

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 212—2020

替代 SL 212—2012

SL 46—94

水工预应力锚固技术规范

Technical specification for hydraulic
prestressed anchorage

2020 - 06 - 05 发布

2020 - 09 - 05 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水工预应力锚固技术规范》 等5项水利行业标准的公告

2020年第9号

中华人民共和国水利部批准《水工预应力锚固技术规范》
(SL/T 212—2020)等5项为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水工预应力锚固技术规范	SL/T 212—2020	SL 212—2012 SL 46—94	2020.6.5	2020.9.5
2	水利系统通信业务技术导则	SL/T 292—2020	SL 292—2004 SL 305—2004 SL 306—2004	2020.6.5	2020.9.5
3	水利行业反恐防范要求	SL/T 772—2020		2020.6.5	2020.9.5
4	河湖健康评估技术导则	SL/T 793—2020		2020.6.5	2020.9.5
5	小型水电站下游河道减脱水防治技术导则	SL/T 796—2020		2020.6.5	2020.9.5

水利部

2020年6月5日

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，对 SL 212—2012《水工预应力锚固设计规范》、SL 46—94《水工预应力锚固施工规范》进行合并修订。

本标准共 10 章和 6 个附录，主要技术内容有：材料与设备、锚索体设计、锚固设计、锚索防护、锚固施工、安全监测与锚固试验、质量检查与验收。

本次修订的主要内容有：

- 在材料与设备中，增加了锚具和连接器及注浆和防护的内容，明确了预应力锚索（杆）所使用原材料的材质和检测频次要求；
- 在锚索体设计与选择中，针对预应力锚固技术的发展、各种新型锚索型式的应用，规范了其使用和制作的要求；
- 进一步规范了锚索的制作、张拉、锁定、防护的要求；
- 进一步补充、完善了安全监测与锚固试验以及质量评定与验收等内容。

本标准所替代标准的历次版本为：

- SL 46—94
- SL 212—98
- SL 212—2012

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中水东北勘测设计研究有限责任公司

本标准参编单位：水利部寒区工程技术研究中心
水利部建设管理与质量安全中心
柳州欧维姆机械股份有限公司
中国水利水电第七工程局有限公司
四川准达岩土工程有限责任公司
葛洲坝集团第二工程有限公司
北京天成垦特莱科技有限责任公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：苏加林 栾宇东 赵长海 景健伟
郑奕芳 刘 丽 朱奎卫 苏 萍
高 垠 蔡云波 张喜武 陈立秋
张殿双 贾志刚 逢立辉 吕君卓
金 辉 宋立民 尹一光 陈全宝

本标准审查会议技术负责人：马毓淦

本标准体例格式审查人：陈 昊

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条2号，邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

目 次

1	总则	1
2	术语	3
3	基本规定	6
3.1	基本资料	6
3.2	锚固设计的基本要求	7
3.3	锚固施工的基本要求	9
4	材料与设备	10
4.1	锚索（杆）材料	10
4.2	锚具和连接器	11
4.3	锚索组装件	13
4.4	注浆与防护材料	13
4.5	造孔设备	14
4.6	张拉设备	14
4.7	注浆设备	15
5	锚索体设计	16
5.1	锚索体选择	16
5.2	锚索体设计	16
5.3	锚固段结构设计	17
5.4	锚头结构设计	19
5.5	张拉程序设计	19
6	锚固设计	21
6.1	岩质边坡锚固	21
6.2	土质边坡锚固	21
6.3	地下洞室锚固	22
6.4	岩壁吊车梁锚固	23
6.5	混凝土坝锚固	24

6.6	混凝土闸墩锚固	24
6.7	闸室、消力池（塘）及挡墙锚固	25
6.8	水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索	25
7	锚索防护	28
7.1	锚索防护设计	28
7.2	锚索防护施工	29
8	锚固施工	31
8.1	造孔	31
8.2	锚墩	32
8.3	制索与安装	32
8.4	张拉及锁定	38
8.5	注浆	41
9	安全监测与锚固试验	45
9.1	设计	45
9.2	试验	46
9.3	实施	48
10	质量检查与验收	49
10.1	质量检查	49
10.2	质量评定与验收	52
附录 A	预应力钢绞线力学性能检验	55
附录 B	预应力钢绞线-锚具组装件静载试验	57
附录 C	预应力锚具硬度检验	59
附录 D	预应力锚索伸长值的计算及伸长值、回缩量 测量方法	60
附录 E	预应力张拉机具及测力计的配套标定	62
附录 F	预应力锚索质量评定表	63
	标准用词说明	69
	标准历次版本编写者信息	70
	条文说明	71

1 总 则

1.0.1 为规范预应力锚固设计和施工，使预应力锚固工程做到安全可靠、经济合理、技术先进，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水工建筑物预应力锚固的设计与施工。

1.0.3 水工预应力锚固设计与施工应积极采用新技术、新工艺、新设备和新材料。

1.0.4 锚固工程的设计应符合环境保护的要求。施工前，应制定环境保护措施和实施方案，实施方案应符合环境保护要求。

1.0.5 预应力锚固工程施工前应编制安全施工方案，安全施工方案应符合 SL 398《水利水电工程施工通用安全技术规程》、SL 401《水利水电工程施工作业人员安全操作规程》的规定。

1.0.6 本标准主要引用下列标准：

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB/T 5223 预应力混凝土用钢丝

GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线

GB/T 8162 结构用无缝钢管

GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器

GB/T 20065 预应力混凝土用螺纹钢筋

GB 50487 水利水电工程地质勘察规范

GB/T 50662 水工建筑物抗冰冻设计规范

SL 105 水工金属结构防腐蚀规范

SL 176 水利水电工程施工质量检验与评定规程

SL 223 水利水电建设工程验收规程

SL 253 溢洪道设计规范

SL 265 水闸设计规范

SL 279 水工隧洞设计规范

SL 378 水工建筑物地下开挖工程施工规范

SL 379 水工挡土墙设计规范

SL 386 水利水电工程边坡设计规范

SL 398 水利水电工程施工通用安全技术规程

SL 401 水利水电工程施工作业人员安全操作规程

SL 597 锚索测力计校验方法

SL 632 水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——

混凝土工程

SL 633 水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——

地基处理与基础工程

SL 677 水工混凝土施工规范

JG/T 161 无粘结预应力钢绞线

1.0.7 水工预应力锚固设计与施工除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 预应力锚固 prestressed anchorage

对设置在岩（土）体、混凝土结构物中的锚索（杆）施加张拉力并锁定后，使岩（土）体、混凝土结构物达到稳定或限制结构变形及改善内部应力状态的工程措施。

2.0.2 预应力锚索 prestressed anchor

由若干股预应力混凝土用钢丝或预应力混凝土用钢绞线按一定规律编排成束，可以施加张拉力的构件。预应力锚索由锚头、自由段和锚固段组成。

2.0.3 锚固段 anchor fixed length

通过胶结材料或机械装置将预应力锚索（杆）与稳定岩（土）体或混凝土结构连成整体，直接承受锚索拉力的区段，是预应力锚索体的内部持力端。

2.0.4 自由段 anchor free length

对预应力锚索（杆）施加张拉力时，锚索材料可以自由伸长的区段，也称张拉段。

2.0.5 锚头 anchor head

对预应力锚索（杆）施加张拉和锁定的支撑装置，是预应力锚索（杆）的外部持力端。

2.0.6 永久性预应力锚索（杆） permanent prestressed tendon

在水工建筑物中布置的长期使用的预应力锚索（杆）。

2.0.7 临时性预应力锚索（杆） temporary prestressed tendon

在水工建筑物中布置的使用年限不超过 2 年的预应力锚索（杆）。

2.0.8 有粘结预应力锚索 bonded prestressed tendon

自由段钢绞线或钢丝与胶结材料之间不能相对滑动的预应力锚索。

2.0.9 无粘结预应力锚索 unbonded prestressed tendon

自由段钢绞线或钢丝与胶结材料之间可以相对滑动的预应力锚索。

2.0.10 张拉锚杆 atensile anchor

由螺纹钢筋或预应力混凝土用螺纹钢筋组成，施加张拉力后的锚杆。

2.0.11 设计锚固力 design anchorage force

扣除由各种因素造成的预应力损失后，设计要求的锚索（杆）在使用期内维持的锚固力。

2.0.12 设计张拉力 design stressing force

根据对被锚固对象的稳定与应力分析结果，并考虑一定安全裕度和岩（土）体流变性、混凝土徐变及钢材松弛可能引起的预应力损失或由于被锚固介质位移引起预应力增减后，确定的锚索应施加的张拉力。

2.0.13 超张拉力 extra stressing force

为消除由于锚索（杆）与孔壁的摩擦、锚具的压缩和锚索（杆）的回缩而引起的预应力损失，施工时将设计张拉力提高后的张拉力。

2.0.14 补偿张拉 compensatory tensioning

预应力锚索锁定后，由于预应力损失超过了设计允许值，为补偿预应力损失而进行的再次张拉作业。

2.0.15 预张拉 pretension

预应力锚索张拉作业前，为使锚索中各股钢丝或钢绞线受力均匀，所进行的初期张拉作业。

2.0.16 拉力型锚索 tension grouted tendon

锚索受力时，锚固段胶结体处于受拉状态的预应力锚索。

2.0.17 压力型锚索 compression grouted tendon

锚索受力时，锚固段胶结体处于受压状态的预应力锚索。

2.0.18 拉力分散型锚索 multi-unit tension grouted tendon

在同一束拉力型锚索中，钢绞线划分若干组，锚索张拉时，

张拉力分散于锚固段中不同位置的预应力锚索。

2.0.19 压力分散型锚索 multi-unit compression grouted tendon

在同一束压力型锚索中，钢绞线划分为若干组，并分别在其端部设置承载体，锚索张拉时，压应力分散于锚固段中不同位置的预应力锚索。

2.0.20 拉压复合型锚索 tension-compression-combined tendon

在同一束锚索中，锚固段由若干组拉力型和压力型锚索单元组成的预应力锚索。

2.0.21 回缩量 draw-in length

预应力锚索锁定时，自由段钢丝或钢绞线回缩的量值。

3 基本规定

3.1 基本资料

3.1.1 预应力锚固设计时应具备下列基本资料：

- 1 建筑物级别及工程布置图。
- 2 水工建筑物的基本参数、荷载组合和运行特性。
- 3 锚固区域地形地质条件、水文地质条件。
- 4 被锚固水工建筑物的稳定、应力及位移的分析计算结果。
- 5 施工条件。
- 6 锚固材料的物理力学指标。

3.1.2 岩（土）锚固工程锚固设计时应具备下列地质资料：

- 1 锚固工程部位的地质平面图、剖面图。
- 2 锚固区岩（土）体的范围和边界条件。
- 3 岩体质量、主要构造的产状、各种结构面的组合关系、地应力及地下水资料。

4 锚固工程部位涉及的岩（土）体物理力学性质、参数和可能引起岩（土）体失稳的结构面的凝聚力和内摩擦角等资料。

- 5 被锚固区域环境水的化学性质。
- 6 被锚固土体的化学分析结果。
- 7 重要部位的锚固工程经原位试验获取的力学试验资料。

3.1.3 水工建筑物锚固工程锚固设计时应具备下列资料：

- 1 水工建筑物稳定分析资料。
- 2 水工建筑物内部应力分析资料。
- 3 结构布置及几何尺寸。
- 4 强度等级。
- 5 运行要求。
- 6 原位试验获取的力学试验资料。

3.1.4 锚固施工时应具备下列资料：

- 1 锚索（杆）所用各种材料的性能指标、产品合格证及各种设备的使用说明书。
- 2 各种进场材料的检测报告。
- 3 施工前编制的施工组织设计、作业指导书及质量标准文件。
- 4 锚索（杆）受力性能试验方案。

3.2 锚固设计的基本要求

3.2.1 锚固设计应包括下列内容：

- 1 选择锚索（杆）类型。
- 2 确定锚固范围、布置方式和锚固深度。
- 3 选定锚固方式。
- 4 根据设计所需的总锚固力，确定预应力锚索（杆）数量、设计张拉力。
- 5 确定锚索（杆）结构型式及各项参数。
- 6 绘制工程锚固设计布置图和结构图，并编制技术要求。
- 7 提出复杂地质条件下的锚固段处理措施。
- 8 提出锚固工程监测项目、布置及技术要求。
- 9 对环境水及锚固区岩（土）体进行化学分析，确定其对预应力锚索（杆）的腐蚀等级。

3.2.2 锚固范围、深度和锚固力应根据岩体软弱结构面的位置、产状和力学性质，或结构物的受力状况等，按稳定或变形应力分析结果确定。

3.2.3 预应力锚索（杆）的设计锚固力、设计张拉力，应根据下列因素确定：

- 1 保证被锚固结构物安全运行需要的总锚固力。
- 2 岩（土）体流变或混凝土徐变及钢材松弛可能产生的应力损失。
- 3 锚固介质和胶结材料的力学指标。
- 4 预应力锚索（杆）材料的力学指标。

5 锚固后岩（土）体或结构可能产生的变形。

6 锚具的类型、张拉设备出力和施工场地条件。

3.2.4 边坡、地下洞室和基础锚固所采用的预应力锚索，其长度应按潜在破坏面的位置和岩性、岩（土）体构造及在稳定介质中的锚固段长度等条件确定。

3.2.5 水工建筑物加固采用的预应力锚索（杆），其长度应根据结构物尺寸和稳定、应力分析结果确定。

3.2.6 岩（土）体锚固中的预应力锚索（杆）布置应符合下列规定：

1 预应力锚索（杆）布置应提供均匀的锚固力。根据锚索（杆）的数量、施工条件、工艺要求，选用方形、梅花形、矩形或菱形布置。

2 预应力锚索（杆）的轴线方向，宜按最优锚固角并结合锚固区域的地形及施工条件计算确定。

3 当采用群锚时，相邻预应力锚索（杆）的锚固段宜错开布置，必要时可调整锚索角度。

3.2.7 水工建筑物中预应力锚索（杆）布置应符合下列规定：

1 闸墩中的预应力锚索，应根据闸墩的结构型式、锚块型式、闸墩的应力分布和施工条件，经综合比较确定。

2 混凝土预应力衬砌中的环形锚索，应根据应力分析结果、锚索体材料和施工条件确定。

3 混凝土坝体和坝基、闸室、消力池（塘）及挡墙等水工建筑物中的预应力锚索（杆）布置，应根据稳定和应力分析结果并按相关规范要求确定。

3.2.8 应根据工程的重要性、被锚固介质和环境水的化学性质等，对永久性预应力锚索进行防腐、防锈保护设计。

3.2.9 对于重要工程或工程的重要部位，采用预应力锚索（杆）加固时，应进行锚索（杆）试验，确定张拉力及可能产生的预应力损失，还应测定被锚固介质产生的变形等，并复核设计参数的合理性。

3.2.10 对可能发生倾倒破坏的边坡、大型地下洞室、挡墙中布置的锚索（杆），可不实行超张拉，其张拉荷载应由设计确定。

3.3 锚固施工的基本要求

3.3.1 预应力锚固施工前，应做好下列工作：

1 应按照相关标准，对锚固区地质条件进行调查，复核设计提供的地质条件，若有变化，应进行补充勘探。

2 应根据技术标准、设计要求、锚固对象及施工部位地形、地质、作业条件，制定施工工艺，编制施工组织设计和作业指导书。

3 应选择有代表性的地质地段或结构进行预应力锚固性能试验，根据试验成果验证设计参数和施工工艺。试验锚索的数量不宜少于3根，每根试验锚索应安装测力计并进行长期监测。

4 应做好锚索布置区域的防水、排水设计与施工。

5 应制定锚固区域环境保护、锚索安全施工、文明作业专项施工方案。

3.3.2 预应力锚索（杆）施工工序宜按造孔、清孔、锚墩制作、编索、下索、锚固段注浆、张拉锁定、自由段注浆、封锚等工序顺序施工。

3.3.3 布置在高陡边坡及地下洞室高边墙的预应力锚索（杆）应按开挖程序自上而下安装，同级边坡或梯段开挖完成后，宜适时施工该级边坡或梯段的锚索（杆），开挖施工应按 SL 378 的要求实施。当需调整施工程序时，应根据变形监测结果进行专门论证。

3.3.4 同一锚固区，宜采用同一品种、型号、规格和同一生产工艺生产的预应力钢丝、钢绞线和锚具。更换材料品种、规格和型号时应重新进行试验。

3.3.5 当预应力锚索在台架上施工时，应对工作台架进行专门设计。

3.3.6 封孔注浆前，对有粘结预应力锚索应根据观测锚索锁定后测力计数值的变化，确定是否实施补偿张拉。

4 材料与设备

4.1 锚索（杆）材料

4.1.1 预应力锚索可根据工程性质、规模、锚固部位等情况选择预应力混凝土用钢丝、预应力混凝土用钢绞线或无粘结预应力钢绞线。预应力钢绞线的标准强度等级宜为 1860MPa（270 级）和 1960MPa（290 级）；预应力锚杆可采用预应力混凝土用螺纹钢筋，级别不宜低于 PSB 785 级。

4.1.2 采用预应力混凝土用钢丝或预应力混凝土用钢绞线作为锚索材料时，其力学性能应分别符合 GB/T 5223 和 GB/T 5224 的规定；采用预应力混凝土用螺纹钢筋作为锚杆材料时，其力学性能应符合 GB/T 20065 的规定。

4.1.3 无粘结钢绞线外包材料的化学稳定性及防腐介质的质量、涂敷量和聚乙烯护套厚度应符合 JG/T 161 的规定。

4.1.4 预应力锚索（杆）材料选择，应符合下列规定：

1 承担长期观测任务或有补偿张拉要求的预应力锚索，应采用无粘结钢绞线。

2 当要求预应力锚索具有一定刚度，或对于预应力锚索安装有特殊需要时，可采用预应力混凝土用螺纹钢筋。

3 当锚固区域岩体较为破碎，成孔困难时，可选用自钻式预应力锚杆。

4.1.5 自钻式预应力锚杆应符合下列要求：

1 自钻式预应力锚杆可采用厚壁无缝钢管制作。

2 制作自钻式预应力锚杆的材料应符合 GB/T 8162 的规定。

3 杆体螺纹应采用冷挤压工艺加工。

4.1.6 进入施工现场的预应力钢丝、钢绞线、无粘结预应力钢绞线、预应力混凝土用螺纹钢筋和自钻式预应力锚杆材料，每盘

(捆) 均应具有材质证明书和产品合格证；进场的产品应具有厂家提供的试验检测报告单；无粘结钢绞线还应提供高密度聚乙烯树脂和专用防腐介质材料证明书。

4.1.7 进入施工现场的预应力锚索体材料应进行外观检查并记录检查结果。外观检查应符合下列规定：

1 钢绞线外包装应完整，报告单与生产日期一致，表面应无油渍、锈蚀、毛刺、损伤；伸直性能良好，无散头，每股钢丝通长无接头；涂层钢绞线的保护层无损伤。

2 无粘结钢绞线的护套表面应光滑、无褶皱、无裂缝、无漏油点及未塑化颗粒。

3 预应力混凝土用螺纹钢筋、自钻式预应力锚杆与连接套管表面不应存在影响其力学性能的缺陷。

4.1.8 进入施工现场的预应力钢丝、钢绞线、无粘结预应力钢绞线、预应力混凝土用螺纹钢筋和自钻式预应力锚杆材料在使用前应进行力学性能检测。预应力钢丝、钢绞线和无粘结预应力钢绞线检测项目应包括极限抗拉强度、伸长率和弹性模量；预应力混凝土用螺纹钢筋和自钻式预应力锚杆检测项目为极限抗拉强度。检测方法应按附录 A 的规定执行，检测频次应为同品种、同型号、同厂家和同一批次，每 60t 为一个检测批次，不足 60t 应按一个检测批次取样，每批次取样数量应不少于 3 组。

4.2 锚具和连接器

4.2.1 与预应力锚索（杆）配套使用的锚具可分为夹片锚具、墩头锚具、螺母锚具和压接锚具 4 种，锚具可根据锚索结构、产品技术性能、张拉方式按表 4.2.1 选用。

4.2.2 预应力锚索锚具型号及尺寸应与设计张拉力相匹配，并选用厂家制造的定型产品。制造锚具及连接器的材料应符合 GB/T 14370 的规定。

4.2.3 预应力锚索结构布置图中应标明锚具和连接器的规格及性能要求。

表 4.2.1 锚具型式

预应力筋品种	张拉端	固定端	
		安装在结构外部	安装在结构内部
钢绞线	夹片锚具， 压接锚具	夹片锚具， 挤压锚具， 压接锚具	压花锚具， 挤压锚具
单根钢丝	夹片锚具， 墩头锚具	夹片锚具， 墩头锚具	墩头锚具
钢丝束	墩头锚具， 冷（热）铸锚	冷（热）铸锚	墩头锚具
预应力螺纹钢筋	螺母锚具	螺母锚具	螺母锚具

4.2.4 锚具和连接器进场时，应具有下列资料：

- 1 锚具和连接器的质量检测报告单和产品合格证。
- 2 压力型锚索还应提供承载板和 P 型挤压锚产品合格证及其抗拔性能试验资料。

4.2.5 锚具及连接器进场后，应对全部锚具及连接器进行外观检查，不应有裂纹和影响受力性能的质量缺陷。应按每批次 10% 且不少于 10 套的频次进行几何尺寸检查，抽检样品全部符合质量标准为合格，当有一套样品不符合技术条件时，应对进入施工现场的产品逐套检查，合格者方可使用。

4.2.6 1 级、2 级水工建筑物锚固工程，锚具进场后应按附录 B 的规定进行预应力钢绞线-锚具组装件的静载试验，试件数量不应少于 3 套。试验结果应满足下列要求：

- 1 锚具效率系数 η_a 不应小于 0.95。
 - 2 实测极限拉力时的总应变 ϵ_{apu} 不应大于 2.0%。
 - 3 锚具组装件不应出现裂纹或破损。
- 4.2.7 锚具的硬度检查应符合附录 C 的规定，检验频次按总件数的 5% 抽取，且不应少于 5 组。

4.2.8 与锚具相配套的钢垫板、螺旋筋、承压板的材质应符合

GB/T 14370 的有关规定，加工尺寸应符合设计要求。

4.2.9 连接器的力学性能指标应与锚具的力学性能指标相同。

4.3 锚索组装件

4.3.1 预应力锚索锚固段的止浆装置应具有良好的止浆功能，在设计注浆压力下不应漏浆，止浆装置材料应具耐磨性，下索时与孔壁摩擦不破损。

4.3.2 隔离架和对中支架宜由厂家配套制作，外形尺寸应符合设计要求。有粘结钢绞线锚索的隔离架和对中支架材质可采用钢材或合成材料；无粘结钢绞线锚索的隔离架和对中支架材质宜采用合成材料。

4.3.3 预应力锚索的绑扎材料不应含有对锚索产生腐蚀的成分。

4.3.4 压力分散型锚索的各锚固单元的承压板、P型锚、U型槽等承载体应采用厂家制造的定型产品。灌浆管、排气阀及自制的承压板、挤压套、防护罩等材质、加工质量与尺寸应符合设计要求。

4.4 注浆与防护材料

4.4.1 锚索体注浆应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，质量应符合 GB 175 的有关规定，水泥强度等级不应低于 42.5 级。当环境水有腐蚀性时，应采用抗腐蚀性水泥。

4.4.2 进入施工现场的每一批水泥，应有生产厂家出具的出厂合格证和品质试验报告，水泥进厂检验应按同厂家、同品种、同强度等级进行编号和取样。每 200t 水泥为一个取样单位，不足 200t 也作为一个取样单位进行检验，检验合格后方可使用。

4.4.3 注浆材料的拌和用水，水质应符合 SL 677 的规定。

4.4.4 注浆材料中添加细骨料时，其质量应符合下列规定：

- 1 细骨料最大粒径应不大于 2.0mm，且级配良好。
- 2 细骨料中的含泥量应不大于 3%。
- 3 细骨料中云母、硫化物及硫酸盐等有害物质含量应不大

于1%。

4.4.5 注浆材料中使用外加剂时，应通过配合比试验确定。其品质除应符合 SL 677 的有关规定外，水泥浆中的氯化物含量不应大于水泥重量的 0.02%。

4.4.6 闸墩预应力锚索的穿索孔道宜采用钢管或金属波纹管；水工隧洞环形锚索预应力混凝土衬砌的穿索孔道宜采用高密度聚乙烯波纹管或金属波纹管。

4.4.7 预埋孔套管几何尺寸应满足下列规定：

- 1 套管内径应大于锚索体直径 10mm。
- 2 设有隔离架的锚索，套管内径应大于隔离架直径 10mm。
- 3 钢套管壁厚不应小于 3mm。
- 4 金属波纹管壁厚不应小于 0.5mm，其径向变形量不应大于内径的 15%。

5 高密度聚乙烯（HDPE）波纹管管壁厚不应小于 3mm。

4.4.8 套管宜采用缩节管连接，接头管长度不小于 200mm，接头应严密不漏浆。端部宜采用防水乳胶带封裹。

4.4.9 高密度聚乙烯波纹管及缩节管应具有化学稳定性和耐久性。

4.5 造孔设备

4.5.1 预应力锚索（杆）造孔设备应适应锚固区的地质和施工场地条件，造孔设备的动力宜选用电动、液压动力源，造孔能力和造孔质量应满足设计要求。

4.5.2 钻机机架应稳固，钻机扭矩大、提升力强、调整方便，钻机有效行程应满足快速成孔需要。

4.5.3 钻具连接件的强度应满足最大扭矩的要求，连接方便、快捷，且通用性好。

4.5.4 造孔设备应具备集尘和防止粉尘扩散功能。

4.6 张拉设备

4.6.1 预应力锚索（杆）张拉设备选型应符合下列规定：

- 1 张拉设备应与锚索类型相匹配。
 - 2 张拉设备的公称张拉力应大于设计要求的超张拉力。
- 4.6.2** 与张拉设备配套使用的压力表宜选用抗震数显压力表，其精度不应低于 1.5 级。当施加张拉力时，压力表示值宜为最大量程的 20%~75%。
- 4.6.3** 预应力锚索（杆）测力计的选型与使用应符合下列规定：
- 1 测力计型号及尺寸应与锚具、张拉设备相匹配。
 - 2 测力计最大量程不应小于锚索设计张拉力的 150%。
 - 3 测力计性能应稳定，受环境与温度影响小。
 - 4 测力计安装前，应与选用的张拉千斤顶、高压油泵和压力表配套标定。
 - 5 应提供测力计抗偏载试验资料。
- 4.6.4** 张拉设备在使用前应通过有资质部门的计量检定。

4.7 注浆设备

- 4.7.1** 注浆设备选型应满足下列基本要求：
- 1 制浆与注浆能力应满足锚索孔注浆速度的要求。
 - 2 应适应浆液类型和浆液浓度。
 - 3 应运行稳定并保持均匀连续注浆。
- 4.7.2** 注浆过程中应保持缓慢、连续、均匀供浆。注浆压力应稳定，其额定工作压力应大于最大注浆压力的 1.5 倍，压力波动范围宜小于注浆压力的 20%。
- 4.7.3** 与注浆泵配套的压力表精度不应低于 1.5 级，其量程应大于设计注浆压力的 1.5 倍。
- 4.7.4** 注浆泵上安装的压力表应由有资质的部门进行校准，每次检验的有效期为 1 年。
- 4.7.5** 注浆管宜采用耐压橡胶管或耐压 PE 管，管路系统耐压值不低于设计灌浆压力的 1.5 倍且不低于 0.5MPa。

5 锚索体设计

5.1 锚索体选择

5.1.1 锚索体型式应根据锚固工程使用年限、单根预应力锚索的设计锚固力、锚索的布置、施工条件及使用环境，经技术经济比较确定。

5.1.2 预应力锚索的锚固段、自由段、锚头及各种连接部件的结构设计应按等强度的原则确定。

5.1.3 布置在岩（土）体中的预应力锚索长度，应根据伸入稳定岩（土）体的深度和被加固岩（土）体的厚度确定。预应力锚索的总长度应为锚固段、自由段和锚头及外露段长度之和。

5.1.4 布置在混凝土结构中的预应力锚索总长度应根据混凝土结构尺寸、锚索两端锚固锁定方式确定。

5.1.5 拉力型和压力型预应力锚索中各股钢绞线长度应一致；拉力分散型、压力分散型和拉压复合型锚索中各股钢绞线长度应根据分散单元的数量和位置确定。

5.1.6 永久性锚固工程应选用胶结式锚固段。当单根预应力锚索的设计锚固力小于 1000kN，锚固区岩石抗压强度大于 60MPa，需要迅速实现张拉的锚固工程或难以使用胶结式锚固段时，可选择机械式锚固段。

5.1.7 布置在土层、软弱岩体中的预应力锚索应采用压力分散型、拉力分散型或拉压复合型锚索。

5.1.8 当设计张拉力大于 2000kN，计算锚固段长度大于 10m 时，可选用压力分散性、拉力分散型或拉压复合型锚索。

5.2 锚索体设计

5.2.1 锚索体设计应包括：选择锚索体材料，确定设计锚固力、设计张拉力、锚索组装件（隔离架、对中支架、排气管、灌浆

管、止浆环等)布置、锚索孔径及锚索体防护措施等。

5.2.2 岩(土)体锚固中,锚索体采用预应力钢丝或钢绞线时,钢材强度利用系数不宜大于0.6;采用预应力混凝土用螺纹钢筋或自钻式杆材时,钢材强度利用系数不宜大于0.65。

5.2.3 混凝土结构锚固中,锚索体采用预应力钢丝或预应力钢绞线时,钢材强度利用系数不宜大于0.65;采用预应力混凝土用螺纹钢筋时,钢材强度利用系数不宜大于0.70。

5.2.4 根据地质勘察资料分析,岩(土)体加固后还可能产生较大变形时,应降低预应力钢材的强度利用系数,也可降低锚索的锁定荷载,降低幅度可根据变形和地应力水平确定。

5.2.5 沿锚索长度方向应安设隔离架。对于陡倾角方向布置的锚索,隔离架间距不宜大于4.0m;对于缓倾角方向布置的锚索,隔离架间距不宜大于2.0m。

5.2.6 隔离架的外径应小于锚索孔直径20mm。隔离架的穿索孔数应与该根锚索钢绞线股数一致,应保证每股钢绞线顺直。隔离架中还应设有灌浆管和排气管的通道。

5.2.7 隔离架可采用钢材或合成材料制作,厚度不宜小于10mm。

5.2.8 封孔灌浆后,锚索的水泥浆或水泥砂浆保护层厚度应大于20mm。

5.3 锚固段结构设计

5.3.1 胶结式锚固段提供的锚固力,应大于预应力锚索的超张拉力。锚固段长度可按式(5.3.1-1)确定,并按式(5.3.1-2)复核。对于重要工程或岩体条件复杂的锚固工程还应通过现场拉拔试验验证。

$$L_1 = K \frac{P_m}{\pi DC} \quad (5.3.1-1)$$

$$L_1 = K \frac{P_m}{\pi d C_1 n} \quad (5.3.1-2)$$

式中 L_1 ——锚固段长度，mm；

P_m ——单根预应力锚索（杆）超张拉力，超张拉力的数值一般为设计张拉力的 110%，N；

K ——锚固段长度的安全系数，按表 5.3.1-1 选取；

D ——锚索（杆）孔直径，mm；

C ——胶结材料同孔壁的粘结强度按表 5.3.1-2 选取，MPa；

C_1 ——胶结材料与预应力钢丝或钢绞线的握裹力，可取 2.0MPa；

d ——单股预应力钢丝或预应力钢绞线直径，mm；

n ——同根锚索预应力钢丝或预应力钢绞线股数。

表 5.3.1-1 胶结式锚固段抗拔安全系数

锚固工程类别	永久性工程								临时性工程							
	仰孔				俯孔				仰孔				俯孔			
建筑物级别	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5
安全系数 K	2.2	2.0	1.8	1.5	1.6	1.5	1.4	1.2	1.6	1.5	1.4	1.2	1.3	1.2	1.1	1.1

表 5.3.1-2 水泥浆（砂浆）与围岩粘结强度

围岩类别	I	II	III	IV	V
粘结强度/MPa	1.5	1.5~1.2	1.2~0.8	0.8~0.3	≤0.3

5.3.2 锚固段长度不宜大于 10m。当计算的锚固段长度大于 10m 时，宜采取改善锚固段岩体质量、扩大锚固段孔径或采取拉力分散型和压力分散型锚索等措施，并对锚固段结构进行专项设计。

5.3.3 应根据锚固工程的需要和锚固段的岩体强度、锚固段结构等因素，选择水泥浆、水泥砂浆或树脂作为胶结材料。水泥浆

及水泥砂浆胶结材料的抗压强度不宜低于 35MPa，树脂胶结材料的抗压强度不宜低于 50MPa。

5.3.4 拉力分散型和压力分散型锚固段单元分级数量及各单元钢绞线长度，应根据锚索总长度、锚固段地质条件、钻孔直径、注浆体抗压强度等因素确定，每个单元的锚固力应分别计算，各锚固单元锚固力之和应大于单根锚索设计的总锚固力。

5.4 锚头结构设计

5.4.1 锚头应由锚墩、孔口承压板、工作锚及封孔保护等部件组成。观测锚索应设置用于监测锚固力变化的测力装置。

5.4.2 宜采用梯形或矩形钢筋混凝土锚墩，有特殊需要时可采用钢锚墩。

5.4.3 混凝土锚墩顶面应铺设锚垫板，锚垫板与混凝土面应紧密接触，与工作锚接触面应平整、光洁。锚垫板厚度可根据锚索的张拉荷载确定，但不宜小于 20mm。

5.4.4 锚头部位钢绞线长度应由锚墩和承压板厚度、工作锚、工具锚、张拉设备高度另加 300~500mm 裕量之和确定。对于观测锚索还应加上测力传感器的高度。

5.4.5 锚墩型式和结构尺寸应根据预应力锚索的设计张拉力和地质条件确定。锚墩的承压面应与预应力锚索张拉方向相垂直。锚墩混凝土强度等级应根据计算确定且不应低于 C30。其抗冻性应符合 GB/T 50662 的规定。锚墩中还应预留灌浆孔和排气孔。

5.4.6 锚头处于易受碰撞的环境时，锚墩应采取有效的保护措施。

5.4.7 边坡布置混凝土网格梁时，预应力锚索应布置在网格梁的交叉处。预应力锚索设计张拉力超过 2000kN 时，锚墩与网格梁结合部位应增加交叉处的承压面积。

5.5 张拉程序设计

5.5.1 预应力锚索张拉之前，应对每股钢绞线实行预张拉，预

张拉后逐股锁定钢绞线。预张拉施加的张拉力可按设计张拉力的10%~20%控制。

5.5.2 预应力锚索张拉程序设计应符合下列规定：

1 张拉力应分级施加，逐级增加至超张拉荷载，可分四~五级施加。

2 每级张拉荷载下应持荷 5min，同时测定锚索的实际伸长值。

3 达到超张拉力时，持荷 10min 测定伸长值后锁定。

4 锁定后应测定钢绞线回缩值。

5.5.3 拉力分散型、压力分散型和拉压复合型预应力锚索的张拉程序应根据锚固段分级情况专门设计。

5.5.4 下列工程部位的预应力锚索，不仅应确定每根锚索的张拉程序，还应确定锚索的张拉顺序，可通过试验或原位监测结果对预应力锚索的张拉程序和张拉顺序进行专门设计：

1 大型地下洞室群锚区域的预应力锚索。

2 膨胀性地层中的预应力锚索。

3 高地应力地层中的预应力锚索。

4 高边坡群锚工程的预应力锚索。

5 高吨位预应力锚索。

6 压力隧洞环形预应力锚索。

7 闸墩预应力锚索。

8 渡槽与箱涵中布置的锚索。

6 锚固设计

6.1 岩质边坡锚固

6.1.1 采用预应力锚索（杆）加固后岩质边坡的稳定应满足 SL 386 的规定。

6.1.2 预应力锚索（杆）的布置应根据可能失稳的岩（土）体中软弱结构面位置、产状、加固范围和单根锚索的锚固力确定。预应力锚索应均匀布置，间排距宜为 3~6m。

6.1.3 沿某一软弱结构面滑动破坏的边坡，预应力锚索（杆）的锚固角度应按下列原则确定：

1 锚固角度可按式（6.1.3）确定：

$$\beta = \alpha - \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (6.1.3)$$

式中 β ——最优锚固角（同水平面的夹角），（°）；

α ——滑动面倾角，（°）；

φ ——结构面的内摩擦角，（°）。

2 当最优锚固角度为 $-10^\circ < \beta < +10^\circ$ 时，锚固角度宜调整至 $\beta \leq -10^\circ$ 或 $\beta \geq +10^\circ$ 。

3 难以按最优锚固角布置时，应通过技术、经济比较确定锚固角调整幅度。

6.1.4 倾倒、崩塌破坏失稳的边坡，总锚固力应按可能失稳的块体体积确定，锚固方向宜垂直张开面。

6.1.5 当锚头部位岩体条件不满足锚索承载力要求时，可采取加大锚墩尺寸、浇筑混凝土格梁等措施。

6.1.6 岩质边坡锚固区域的截水、排水设计应符合 SL 386 的规定。

6.2 土质边坡锚固

6.2.1 土质边坡采用预应力锚索（杆）加固措施后，边坡稳定

应符合 SL 386 的规定。

6.2.2 滑动面在土体中时，锚固段应布置在稳定的土体中，锚固段提供的锚固力宜满足施加的超张拉力需要；锚固段岩（土）体软弱与孔壁的摩阻力较低，不能提供设计要求的锚固力时，应采取扩大锚固段孔径或采用拉力分散型、压力分散型锚索结构的措施。

6.2.3 滑动面为土层与岩体的结合部位时，锚固段应设置在稳定的岩层中。

6.2.4 土体中预应力锚索自由段的隔离架间距应满足 5.2.5 条的规定。锚索应均匀布置在网格梁交叉处，间距、排距宜为 3.0~4.0m。

6.2.5 土体中锚索（杆）的锚墩应与混凝土格梁、挡墙等支挡结构形成整体。

6.2.6 土质边坡锚固区域的截水、排水设计，应符合 SL 386 的规定。

6.3 地下洞室锚固

6.3.1 经稳定及应力分析，对地下洞室中范围较大的压剪破坏区、塑性区及不稳定块体，可采用预应力锚索加固。

6.3.2 限制围岩变形的预应力锚索（杆），提供的锚固力应按地下洞室的围岩应力水平确定。预应力锚索（杆）提供的单位面积支护抗力可按式（6.3.2）计算。

$$P_1 = \frac{q_1}{A} \quad (6.3.2)$$

式中 P_1 ——由预应力锚索（杆）提供的单位面积上的支护抗力，MPa；

q_1 ——单根锚索（杆）的设计锚固力，N；

A ——单根锚索（杆）所控制区域的面积， mm^2 。

6.3.3 预应力锚索（杆）应穿过压剪破裂区、塑性区或不稳定岩体，锚固段应布置在没有扰动的弹性区内，锚固段长度应满足 5.3.1 条和 5.3.2 条的规定。

6.3.4 预应力锚索（杆）的间距不宜大于预应力锚索自由段长度的1/2，并不宜小于3m。

6.3.5 系统布置的预应力锚索之间宜布置普通砂浆锚杆或张拉锚杆，并采用喷射混凝土封闭岩面。

6.3.6 当拱部存在塌落体时，拱部预应力锚索（杆）应承担全部塌滑体重量；为防止拱部围岩产生有害变形，应以控制围岩变形在允许范围内为原则，确定设计锚固力。

6.3.7 当边墙存在不利结构面时，应根据节理裂隙的组合关系，考虑塌滑体周围岩体的嵌固作用后，按岩质边坡的规定确定预应力锚索（杆）的锚固力。

6.3.8 两相邻地下洞室间的岩墙，应采用对穿式预应力锚索。

6.4 岩壁吊车梁锚固

6.4.1 岩壁吊车梁可采用预应力锚索（杆）进行锚固。

6.4.2 应通过刚体静力平衡法或弹塑性有限元法分析确定预应力锚索（杆）的设计锚固力。采用刚体静力平衡法计算时，单位梁长预应力锚索（杆）的锚固力可按式（6.4.2）确定：

$$KF = 0.8A_s f_{ptk} \quad (6.4.2)$$

式中 K ——安全系数，对1级、2级和3级建筑物，分别取2.2、2.0和1.8；

F ——预应力锚索（杆）设计锚固力，N；

A_s ——预应力锚索（杆）截面积， mm^2 ；

f_{ptk} ——预应力钢绞线抗拉强度标准值，MPa。

6.4.3 岩壁吊车梁中布置的预应力锚索（杆）的锚固深度，应根据预应力锚索（杆）承受的最大拉力，按式（5.3.1-1）和式（5.3.1-2）计算，并应加上围岩松弛区的影响深度1.0m。

6.4.4 预应力锚索（杆）与水平面的夹角宜为 $15^\circ \sim 25^\circ$ ，特殊情况可根据需要布置。

6.4.5 对预应力锚索（杆）的受力情况应进行监测。

6.5 混凝土坝锚固

- 6.5.1 对混凝土坝的基础和坝体采用预应力锚索加固时，应针对不同的工程对象，按相应的规范进行抗滑稳定、抗倾覆稳定和应力分析计算，确定加固范围和施加的设计锚固力。
- 6.5.2 加固坝基的预应力锚索轴线方向，应根据场地和施工条件，经过技术经济比较确定。
- 6.5.3 当坝基存在缓倾角软弱结构面时，应根据其位置和产状、建筑物的布置和施工条件，确定锚索布置和长度。
- 6.5.4 坝基岩体裂隙发育，较为软弱、破碎时，应在锚固之前对锚固段的岩体进行灌浆加固。
- 6.5.5 对坝体裂缝等缺陷采用预应力锚索加固时，应选择适合于原建筑物强度要求的锚固力。锚固段应布置在坝体的不同高程或部位。
- 6.5.6 对坝体裂缝实施预应力锚固后，需要灌浆时，应控制灌浆压力。

6.6 混凝土闸墩锚固

- 6.6.1 预应力混凝土闸墩的锚固设计应包括下列内容：
- 1 主锚索的设计锚固力及其布置。
 - 2 次锚索的设计锚固力及其布置。
- 6.6.2 闸墩中预应力主锚索的合力应通过支铰中心，锚索布置应符合下列规定：
- 1 主锚索在闸墩立面上的布置，沿弧门推力方向呈辐射状扩散，与弧门推力方向的夹角宜为 $-10^{\circ}\sim+10^{\circ}$ 。主锚索宜长、短相间布置。
 - 2 中墩主锚索在平面上对称布置，边墩和缝墩为非对称布置。主锚索在闸墩平面上的投影，平行于闸墩侧立面或与闸墩侧立面成 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的夹角。主锚索宜靠近闸墩外侧面，距离不宜小于500mm。主锚索间距不宜小于400mm。

3 锚索不宜伸出弧形门体之外的上游范围。

6.6.3 闸墩的支撑结构中，应设置次锚索。

6.6.4 应根据锚索的直径和保护层厚度确定锚索的穿索孔直径。采用有粘结钢绞线时，保护层厚度不宜小于 20mm；采用无粘结钢绞线时，保护层厚度不宜小于 10mm。穿索孔道宜采用预埋钢管或金属波纹管等。

6.6.5 锚固区域的混凝土强度等级不应低于闸墩本身混凝土强度等级，且不应低于 C30。混凝土锚块和颈部等部位的混凝土强度等级不宜低于 C40。

6.7 闸室、消力池（塘）及挡墙锚固

6.7.1 当闸室、消力池（塘）和挡墙的稳定不满足要求时，可采用预应力锚索加固。

6.7.2 对闸室、消力池（塘）采取锚固措施时，抗浮稳定应符合 SL 253 和 SL 265 的规定。

6.7.3 对挡墙采取锚固措施时，其稳定应符合 SL 379 的规定，并应符合下列要求：

1 挡墙承受的滑动力，由预应力锚索施加的阻滑力和挡墙的阻滑力共同承担。

2 根据挡墙稳定应力分析结果，确定锚索的数量和单根锚索的锚固力。

3 根据挡墙的用途、结构和可能破坏方式，选择最优的锚固角度。

4 对挡墙预应力锚索实施张拉时，挡墙不得产生位移。

6.8 水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索

6.8.1 对承受较高内水压力的水工隧洞或涵洞，经过技术经济比较可采用沿混凝土衬砌外缘环形布置的预应力锚索，承担全部或部分内水压力。

6.8.2 环形锚索式预应力混凝土衬砌隧洞的结构设计应符合

SL 279的有关规定。

6.8.3 环形锚索式预应力混凝土衬砌，应将锚索施加的环向应力作为荷载之一，按弹性理论进行结构应力分析，必要时可通过有限元计算或模型试验复核。

6.8.4 环形预应力锚索的设计张拉力，应按需要环形锚索提供的径向预压应力，并考虑锚索张拉过程中张拉端偏转器的摩阻损失后确定：

1 张拉应力控制值可按式 (6.8.4-1) 计算：

$$\sigma_{\text{con}} = 0.75 f_{\text{ptk}} \quad (6.8.4-1)$$

式中 σ_{con} ——张拉时钢绞线应力控制值，MPa；

f_{ptk} ——预应力钢绞线抗拉强度标准值，MPa。

2 张拉过程中，考虑偏转器摩阻损失后的剩余张拉应力可按式 (6.8.4-2) 计算：

$$\sigma_1 = (1 - a) \sigma_{\text{con}} \quad (6.8.4-2)$$

式中 σ_1 ——考虑偏转器摩阻损失后的剩余张拉应力，MPa；

a ——偏转器的摩阻损失系数，为 8%。

3 钢绞线沿程的有效张拉应力可按式 (6.8.4-3) 计算：

$$\sigma = \sigma_1 e^{-(kx + \mu\theta)} \quad (6.8.4-3)$$

式中 σ ——钢绞线沿程的有效张拉应力，MPa；

k ——钢绞线的摆动系数，有粘结钢绞线为 0.0015，无粘结钢绞线为 0.004；

x ——从张拉端至计算断面的钢绞线长度，m；

μ ——钢绞线与套管的摩擦系数，有粘结钢绞线 0.2，无粘结钢绞线为 0.09；

θ ——从张拉端至计算截面曲线孔道的切线夹角，rad。

6.8.5 环形锚索宜均匀布置在混凝土衬砌外缘，锚索间距宜为 400~500mm。

6.8.6 环形锚索预应力混凝土衬砌，混凝土的强度等级不宜低于 C40。

6.8.7 锚具槽的布置应以便于施工为原则，左右两侧宜交错

布置。

6.8.8 采用无粘结钢绞线时，钢绞线宜布置在外层钢筋外侧。采用有粘结钢绞线时，环形预应力锚索应根据结构受力要求布置，并在锚索位置预埋环形波纹管。

6.8.9 张拉完成后，应对穿索孔道及锚具槽进行回填灌浆，回填灌浆材料应采用无收缩水泥砂浆或水泥浆，其抗压强度等级不应低于 M30。

7 锚索防护

7.1 锚索防护设计

7.1.1 应根据工程的重要程度、被锚固区域的地下水性质、设计锚固力等因素对预应力锚索进行防化学腐蚀、防应力腐蚀、防静电腐蚀等专项防护设计。

7.1.2 锚固区域环境对预应力锚索的腐蚀程度可划分为无腐蚀或弱腐蚀、中等腐蚀和强腐蚀。腐蚀程度可按照 GB 50487 的有关规定判定。预应力锚索防护设计标准应符合表 7.1.2 的规定。

表 7.1.2 预应力锚索防护设计标准

环境对锚索的 腐蚀程度	临时性预应力锚索 (含永久性预应力锚索的临时性防护)	永久性预应力 锚索
无腐蚀或弱腐蚀	A 级	C 级
中等腐蚀	B 级	C 级
强腐蚀	C 级	D 级

注：A 级：液态防护，如石灰水、防腐油。
B 级：塑态防护，如凝胶、树脂、防锈油脂等。
C 级：刚性防护，如水泥浆，水泥砂浆或无粘结钢绞线并灌注水泥浆。
D 级：双层防护，全孔固结灌浆，无粘结钢绞线加设波纹管并灌注防腐水泥浆。

7.1.3 当锚固区域地下水发育且具有腐蚀性时，锚固前应采取灌浆处理措施。

7.1.4 当锚固区域的地层中含有易产生腐蚀的化学物质时，宜采用无粘结预应力钢绞线作为锚索材料，并应加设波纹管，管内应充填水泥砂浆或水泥浆，管外水泥浆包裹厚度不小于 10mm。水泥砂浆或水泥浆应具有抗化学腐蚀性能。

7.1.5 锚索体防腐、防锈处理时，所使用的材料及其附加剂中，不应含有硝酸盐、亚硫酸盐、硫氰酸盐。

7.1.6 预应力锚索采用水泥浆或水泥砂浆作为封孔灌浆或胶结材料时，水泥的品质应符合 GB 175 的规定。

7.1.7 无粘结预应力锚索的防腐性能应符合 4.1.3 条的规定。

7.1.8 预应力锚固区域内存在杂散电流时，应采取绝缘隔离防护或阴极防护等措施。

7.1.9 预应力锚索安装前应对锚索体做除锈处理。锚索安装后，应及时做好锚头的保护。锚索张拉锁定并完成二次注浆后，应及时封闭锚头。预应力锚索（杆）防锈处理应符合 SL 105 的相关规定。

7.1.10 对于无粘结锚索锚头部位的防护应符合下列规定：

1 当永久性预应力锚索张拉锁定后，应及时对锚头涂以防腐材料，再用混凝土封闭，封闭厚度不应小于 100mm。

2 采用防护罩保护时，其内应填充防腐材料，并充填饱满。

7.2 锚索防护施工

7.2.1 锚索材料进场后，应妥善保管，并应符合下列规定：

1 应切断腐蚀源，避免与有害物质接触。

2 应防止受潮。

3 不应直接在地面或露天储存。

7.2.2 地下水发育且有腐蚀性时，应进行灌浆处理，合格后安装锚索。

7.2.3 锚索张拉完成后，不需补偿张拉时，应割除多余的钢绞线，锚具外保留钢绞线长度不应小于 50mm。

7.2.4 预应力锚头部位施工完成后应及时进行保护。岩（土）体中锚索锚头的保护应符合下列规定：

1 采用金属、塑料防护罩进行保护时，防护罩内应充填专用防腐材料，且密封良好。

2 采用混凝土包封锚头时，应包封严密，混凝土强度等级应符合设计要求。

7.2.5 混凝土结构中锚索的锚头保护应符合下列规定：

- 1 与结构混凝土结合部位应凿毛处理。
- 2 有粘结预应力环形锚索的锚具槽壁面应凿毛处理、清洗干净，并应检查验收，过槽钢筋恢复后应采用同强度等级补偿收缩混凝土回填密实。
- 3 无粘结预应力环形锚索、锚板、锚具、外露钢绞线应清洗干净，锚头防护应涂防护介质，其外层应采用耐老化材料密封包裹。

8 锚固施工

8.1 造孔

8.1.1 根据锚固工程对象的不同，预应力锚索孔可采用钻孔成孔法或埋管法施工。

8.1.2 锚索孔的造孔应满足下列要求：

1 孔位坐标误差不应大于 100mm。

2 开孔直径可根据施工条件确定，锚固段孔径不应小于设计值。

3 锚索孔深度不应小于设计值，有效孔深的超深不宜大于 300mm。

4 钻孔轴线应顺直，孔壁应无错台，孔内应无松动碎石。

5 按设计要求方位角造孔，终孔孔轴线偏差不应大于孔深的 2%。如设计有特殊要求时，应按设计要求执行。

8.1.3 预埋管孔位及间距偏差不宜大于 10mm。

8.1.4 开孔时应校验钻具的倾角及方位角，当开孔钻进 200~300mm 后，应校核其倾角；接长或更换钻杆时应及时测量并纠正孔斜偏差。

8.1.5 造孔施工中，应记录地层变化，当钻进至锚固段部位时，应详细记录地质条件。锚固段岩体软弱、破碎，与设计要求不符时，应研究改善锚固段岩体质量或增加孔深的措施，使锚固段置于相对完整坚硬的岩体内。

8.1.6 当锚索孔通过易塌孔地段时，根据地质条件可采用浆体固壁措施，也可采用套管跟进或固结灌浆的成孔方法施工。

8.1.7 当造孔过程中，突然涌水或涌砂时，应立即停钻，查明原因，并采取有效措施后，方可恢复钻进。

8.1.8 造孔过程中，对特殊地质条件的处理措施和过程应详细记录。

8.1.9 造孔完成后应清孔，清除孔底沉渣，孔底沉渣淤积厚度不宜大于 200mm。清孔后应测量孔深，有效孔深应满足设计要求。钻孔完成后应验收，并及时填写锚索孔工序质量评定表。

8.1.10 隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索、穿索孔道及两端的喇叭管、锚具槽，应在内层钢筋布设完成后安装。

8.1.11 施工前应制定预埋管固定措施。结构混凝土浇筑前，应对已安装好的孔道管进行密封性、通畅性及孔道位置检查并记录；浇筑混凝土时应对端口封堵保护，混凝土入仓及振捣时不应损坏、移动预埋管。

8.1.12 锚索预留孔部位的混凝土浇筑完成后，应及时进行畅通性检查，对堵塞的孔道应进行疏通处理。

8.1.13 在负温环境条件下，应对孔道采取保温防冻措施。

8.2 锚 墩

8.2.1 锚墩混凝土承压面应光洁平整，锚垫板应与混凝土承压面紧密接触，其法线方向应与锚索孔轴线方向一致，允许误差应为 $\pm 1^\circ$ 。孔口埋管应与锚索孔同轴，轴线误差应小于 2mm。

8.2.2 锚墩混凝土浇筑过程中，应保证预埋的孔口管不被碰动。当预应力锚索下索安装后，如果不能及时进行张拉，应按 7.1.2 条的规定对锚索体采取临时防护措施。

8.2.3 在负温环境条件下，应对锚墩采取保温防冻措施。

8.2.4 工程施工过程中对锚墩易发生碰撞时，应对锚墩采取保护措施。

8.2.5 锚墩混凝土和锚固段注浆体达到设计强度后，方可进行锚索张拉。锚索张拉完成后，不得碰撞锚头。

8.2.6 锚墩施工完成后，应及时填写锚墩制作工序质量评定表，作为预应力锚索单元质量评定的依据。

8.3 制索与安装

8.3.1 锚索宜在专门加工场按设计要求制作，锚索数量较少、

布置分散的锚固工程可因地制宜在现场制作。制作场地应满足锚索体防雨、防污染及防止损害索体的要求。

8.3.2 锚索制作前，应备齐材料及配件，并检验合格。钢丝或钢绞线表面应无损伤、刻痕、污染。

8.3.3 钢绞线下料应采用切割机，不应使用电弧或乙炔焰切割。

8.3.4 锚索制作完成后，应进行外观检验，并签发合格证。成品锚索应挂有孔号标识牌，孔号牌与锚索孔位编号应一致，并注明完成日期、锚索孔号、锚索吨位、锚索长度等。无合格证及孔号牌的锚索不应运入安装作业区。

8.3.5 锚索存放场地应干燥、通风，存放锚索的支架支点间距不宜大于 2m。应分层平铺，不应折弯，不应接触氯化物等有害物质；应避免杂散电流，并应进行临时防护。

8.3.6 锚索的运输与吊装应根据施工和场地条件制定专项方案，不应拖曳。

8.3.7 锚索的运输应符合下列规定：

1 水平运输中，各支点间距不应大于 2m，转弯半径宜大于 3m。

2 垂直运输中，除主吊点外，其他吊点应在锚索入孔前快速、安全脱钩。

3 运输、吊装过程中，应防止损伤索体。

8.3.8 锚索入孔前应进行下列检查，合格后方可吊装安放。

1 锚孔内及孔口周围杂物应清除干净。

2 锚索的孔号牌应与锚孔孔号对应，并应核对孔深与锚索长度。

3 锚索应无明显折弯、扭转现象。

4 锚索护套管应无损伤，或损伤已经修复合格。

5 锚索中的进浆、排气管道应畅通，阻塞器应完好。

8.3.9 锚索安装应缓慢匀速推入锚孔，宜一次送索到位。安装过程中，不应扭转锚索体，不宜往复拖曳。

8.3.10 仰孔锚索安装应符合下列规定：

1 锚索孔口应设置提升或承托装置及阻滑设施，下索过程中不应损伤索体。

2 锚索安装应采用机械提升辅以人工入孔。

3 锚索安装到位后应将其固定。

8.3.11 俯孔大吨位锚索安装应符合下列规定：

1 在孔口应安设送索导向架，下索过程中不应损伤索体。

2 孔口安设的牵引装置应能控制索体的自由下滑。

8.3.12 有粘结、无粘结拉力型锚索制作应符合下列规定：

1 钢绞线在全长范围内不应有接头或连接器。预应力钢绞线的下料长度，应满足锚索结构设计及工艺要求，并考虑因地质条件变化可能引起的孔深增加，可采用式（8.3.12）计算。

$$L = S + h_a + h_m + h_c + h_z + h_x \quad (8.3.12)$$

式中 L ——预应力钢绞线下料长度，mm；

S ——实测锚索孔深度，mm；

h_a ——锚墩厚度，mm；

h_m ——工作锚板厚度，mm；

h_c ——测力计高度，mm；

h_z ——锚索张拉部位需要的钢绞线长度，为张拉千斤顶高度、限位板厚度、工具锚厚度、预留安全长度之和，mm；

h_x ——因地质条件变化引起的孔深增加长度，mm。

2 有粘结拉力型锚索制作应符合下列规定：

1) 有粘结钢绞线表面应清洗干净。

2) 在锚固段与自由段结合部位，或锚索体的指定位置应安装止浆装置，并与锚索体密封固定。

3) 锚固段的注浆管出口至锚索底部距离应小于200mm，锚固段排气管应穿过止浆装置进入锚固段内；自由段注浆管应靠近止浆装置。

3 无粘结拉力型锚索制作应符合下列规定：

1) 锚固段和锚头部位的无粘结钢绞线护套剥除长度应与

设计锚固段长度一致，并满足张拉要求，裸线表面应清洗干净；剥除护套后的端部应密封，防止防腐介质外溢。

2) 锚索注浆采用全孔一次注浆工艺时，可根据锚索孔深度，安设 1~2 根注浆管，至少 1 根注浆管应安设在导向帽附近。

4 锚索体制作应符合下列规定：

1) 各根钢绞线应按照锚索结构设计，以锚索体的孔底端部为基准整齐、平顺排列。

2) 锚索进出浆管与排气管应按要求编入锚索体，并保持通畅，管路系统耐压值不应低于设计注浆压力的 1.5 倍。

3) 锚索体钢绞线和注（回）浆管之间应用隔离架分隔集束。隔离架间距在锚固段内可为 0.75~1m，自由段内可为 1~2m，不宜大于 3m。

4) 编索过程中，钢绞线应排列平顺，钢绞线和注（回）浆管、排气管等捆扎成一束，隔离架与索体应绑扎牢固。

5) 导向帽宜采用金属材料制作，其长度不宜小于 300mm，并与锚索体绑扎固定，不应使用焊接方式与索体连接。

8.3.13 拉力分散型、压力分散型、拉压复合型锚索制作与安装应符合下列规定：

1 多组承载体的分散型锚索钢绞线应按设计结构及张拉工艺要求下料，同组承载体的钢绞线应等长。各组承载体的钢绞线下料长度可采用式（8.3.13）计算。

$$L_i = S - l_i + h_a + h_m + h_c + h_z + h_x \quad (8.3.13)$$

式中 L_i ——每组承载体对应钢绞线的下料长度，mm；

l_i ——每组承载体或锚索体端部到孔底的距离，mm。

2 拉力分散型锚索宜采用无粘结钢绞线制索。制索时，锚

固段各组承载体钢绞线的护套剥除长度应符合设计要求。裸线表面应清洗干净，钢绞线应按分组由长至短依次顺直放置于相应位置。

3 压力分散型锚索制作应符合下列规定：

- 1) P型锚的无粘结钢绞线护套剥除长度应满足挤压成形需要。
- 2) 应按由长至短依次安装各组承载体的承压板、P型挤压锚及锚索内端的导向帽，P型锚挤压时的操作油压和挤压后P型锚具直径应符合设计要求。
- 3) 各承压板平面应与各钢绞线垂直，与P型锚具端面紧密贴合。
- 4) 应按照锚索结构要求装配承压板、注（回）浆管等，并进行锚固段承载体系部分的制作。
- 5) 隔离架与承载体上的钢绞线孔、注（回）浆管孔位应相互对应。

4 U型压力分散型锚索制作应符合下列规定：

- 1) 无粘结钢绞线中点部位应置于专用顶压机圆弧顶头，顶压弯曲制作U型钢绞线。
- 2) 应按照锚索结构要求装配U型承载体、钢绞线、辅助支架和注（回）浆管等并进行承载体部分的制作。

5 拉压复合型锚索制作应符合下列规定：

- 1) 与拉力型相关联的无粘结钢绞线的护套剥除长度应满足设计要求。
- 2) 与压力型相关联的无粘结钢绞线的护套剥除长度应满足P型锚挤压成形要求。
- 3) 应按由长至短依次安装各组承载体的承压板、P型挤压锚及导向帽。
- 4) 应按照锚索结构要求装配拉力型钢绞线束、压力型钢绞线束。

6 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索制作除应符合1~5

款的规定外，尚应符合下列要求：

- 1) 每组承载体由承载板与辅助件组成，各根钢绞线的 P 型挤压锚应将封装防护处理而成的防腐型单锚头嵌固于二者之间。
- 2) 各组承载体之间应连接成一个整体。

7 锚索体钢绞线应根据分组情况，孔底和孔口两端对应编号并标识，安装锚具后应与夹片锥孔编号相互对应。

8.3.14 环形锚索制作与安装应符合下列规定：

1 预应力钢绞线的下料长度应满足锚索结构设计及工艺要求，可采用式（8.3.14）计算确定。

$$L = S_1 + h_1 + h_2 \quad (8.3.14)$$

式中 S_1 ——实测环形锚索自由段长度，mm；

h_1 ——孔道外张拉端钢绞线使用长度，为孔口至工作锚板的距离、工作锚板厚度、偏转器和延长筒的孔道长度、千斤顶张拉需要的长度之和，mm；

h_2 ——孔道外被动端钢绞线使用长度，为孔口至工作锚板的距离、工作锚板厚度、锚板外钢绞线留存长度之和，mm。

2 锚索应采用编帘法制作。预应力钢绞线应平铺顺直，一端应对齐并分根编号，每隔 1.5~2m 扎紧成束。

3 环形锚索的安装应符合下列规定：

- 1) 有粘结锚索宜采用埋管法安装。
- 2) 当采用埋管法时，在穿束前应用高压水、高压风将孔道洗净吹干。
- 3) 锚索入孔前应装上导向帽牵引入孔就位。穿索完毕应立即用棉纱封堵仰孔孔口。
- 4) 环向预应力锚索采用无粘结钢绞线时，可直接固定在结构钢筋或定位支架上。
- 5) 无粘结锚索应做好防护，应采取措施避免电焊火花、

熔渣灼伤钢绞线和护套管。

8.3.15 预应力闸墩锚索制作与安装应符合下列规定：

1 预应力闸墩纵向主锚索制作和安装应符合下列规定：

- 1) 穿索孔道管的位置和轴线应符合设计要求，孔道管应安装牢固。锚束安装及安装后，应采取措施避免电焊火花、熔渣灼伤管壁。
- 2) 整束式锚索应采用隔离架集束。安装时，通过导向架将锚索缓慢匀速推入孔内就位。
- 3) 环形钢绞线集束的闸墩锚索安装，各钢绞线宜逐一牵引入孔。

2 预应力闸墩次锚索为对穿锚索，其制作和安装应符合下列规定：

- 1) 钢绞线应排列平顺，采用隔离架集束，隔离架间距可为 1.0~3.0m。
- 2) 当采用埋管法时，锚索入孔前应装上导向帽牵引入孔就位。

8.3.16 布置于潮湿、地下水丰富地段的锚索，安装后应及时张拉、锁定和注浆。不能立即实施张拉作业与注浆的锚索应按 7.1.2 条的规定做好临时防护。

8.3.17 水平孔锚索制作时，应在索体上安装对中支架，对中支架间距 1~2m。

8.3.18 锚索制作与完成后应及时填报锚索制作安装工序质量评定表，并组织验收。

8.4 张拉及锁定

8.4.1 预应力锚索张拉前应做好下列准备工作：

1 清除张拉作业区内与张拉作业无关的材料、设备及其他障碍物。

2 配套标定张拉千斤顶、压力表及测力计，绘制张拉力—压力表（测力计）关系曲线。

3 张拉机具就位后，应进行空载试运转，检查其运行状态及可靠性。

4 安装有测力计的锚索，测力计应与工作锚同步安装，且均应与锚索孔道对中。

5 张拉机具操作应定人、定位、挂牌上岗，非作业人员不应进入张拉作业区，张拉千斤顶出力方向 45°内严禁站人。

6 对于岩（土）体中的锚索，张拉作业前应对锚墩混凝土、锚固段注浆体的强度进行取样检测；对于混凝土结构锚索，应对结构混凝土强度进行检测。达到设计强度后，再进行锚索张拉作业。

7 原材料检测、钢绞线-锚具组装件的静载试验、锚具硬度、张拉机具配套标定施工记录应齐全，钻孔、编索、注浆、锚墩及锚垫板等工序的质量评定表应完整并满足规范要求。

8.4.2 张拉设备的校准应符合下列规定：

1 张拉设备应由计量检定部门标定，或采用经计量检定部门标定的专用计量设备自行标定。

2 张拉设备应每 6 个月或使用超过 200 次标定一次，标定环境应与使用环境相近。

3 张拉设备维护后应重新标定。

4 用于钢绞线-锚具组装件静载试验的张拉设备使用次数小于 20 次时可 10 个月标定一次。

5 锚索张拉过程中如发现张拉设备异常时应重新标定。

6 张拉设备应由专人保管，并建立设备使用、维修、标定台账。

8.4.3 预应力锚索张拉顺序及张拉工艺应根据设计要求和施工条件确定，并应由监理工程师批准。

8.4.4 预应力锚索张拉顺序应符合下列规定：

1 边坡、地下洞室和坝基的预应力锚索，应先张拉布置在中间的锚索，然后依次张拉周围锚索。

2 预应力混凝土衬砌中的环形锚索，应根据浇筑段分区，

按两端相向、跳环顺序张拉。

3 对穿锚索宜采取两端张拉，锁定时，一端先锁定，另一端补偿张拉后再锁定。当实行一端张拉时，应制定详细的张拉操作规程，并通过试验完善工艺后方可实施。

8.4.5 锚索张拉作业之前均应进行预张拉，预张拉作业应符合下列规定：

1 应逐根进行钢绞线预张拉作业，并逐根锁定。

2 预张拉荷载为设计张拉力的 10%~20%，锚索短时取小值，锚索长时取大值。

8.4.6 预应力锚索张拉荷载可分 5 级施加，环形锚索可分 6~8 级，级差应均匀。

8.4.7 预应力锚索超张拉时，超张拉荷载可按设计张拉力的 110% 控制。

8.4.8 张拉荷载应缓慢平稳施加，加载速率不宜超过 $0.1\sigma_{\text{con}}/\text{min}$ (σ_{con} 为设计控制应力)；卸荷速率不宜超过 $0.2\sigma_{\text{con}}/\text{min}$ 。

8.4.9 每级荷载持荷应不少于 5min，最后一级荷载持荷应不少于 10min。每级荷载施加后应量测每级荷载下钢绞线伸长值。锚索锁定后应测量回缩量，实测回缩量不应大于 5mm。当实测回缩量大于 5mm，应采取相应的处理措施。钢绞线理论伸长值、实际伸长值及锁定后回缩量可按附录 D 的推荐方法进行计算和测定。

8.4.10 锚索的实际张拉力应由张拉千斤顶的出力测定值确定，同时还应采用同级荷载下的钢绞线伸长值复核。

8.4.11 岩（土）体锚索实测伸长值大于理论伸长值的 110%，或小于理论伸长值的 95% 时，混凝土结构锚索实测伸长值大于理论伸长值的 106%，或小于理论伸长值的 94% 时，应查明原因并采取措施后再对后续锚索实施张拉作业。

8.4.12 预应力锚索锁定时测力计实测值可作为锚索预应力损失的初始值，锁定后测力计的实测值大于或小于张拉千斤顶出力实测值的 110% 时，应查明原因并采取相应的处理措施。

8.4.13 预应力锚索锁定 48h 内，锚索的预应力损失大于设计张拉力的 10% 时，应进行补偿张拉；锚索的预应力增幅大于设计张拉力的 20% 时，应对照其他监测资料，分析原因，经论证后再采取补救措施。

8.4.14 预应力锚索张拉锁定后，夹片错牙不宜大于 2mm；当夹片错牙大于 2mm 时应卸荷退锚重新张拉。锚索放张退锚时，宜采用退锚器退锚。

8.4.15 压力分散型锚索、拉力分散型锚索以及拉压复合型锚索宜采用差异张拉，其张拉顺序为分组单根预紧、分组差异张拉、整束分级张拉、持荷稳压、锁定。压力分散型锚索张拉也可采用单根预紧、单根对称循环张拉方式作业。

8.4.16 当单根预应力锚索设计张拉力超过 5000kN 时，应根据张拉设备出力情况制定专门的张拉程序。

8.4.17 预应力锚索张拉过程中遇钢绞线断丝、滑丝、夹片出现裂纹、千斤顶漏油、压力表反常、锚墩有裂缝、锚固段滑移等情形时，应停止张拉作业，并进行检查和处理。

8.4.18 张拉作业后应及时进行张拉工序的质量评定。

8.5 注 浆

8.5.1 预应力锚索注浆可分为钻孔围岩固结灌浆、岩（土）体锚索锚固段注浆、自由段注浆以及混凝土结构预应力锚索孔道注浆。

8.5.2 预应力锚索锚固施工前应进行注浆试验，确定注浆工艺、注浆压力和浆液配比。

8.5.3 浆液配比应经试验确定。注浆结石单轴抗压强度应满足设计要求。

8.5.4 浆液制备应符合下列规定：

1 纯水泥浆胶结材料水灰比宜为 0.38~0.45；水泥砂浆胶结材料水灰比宜为 0.40~0.50。

2 纯水泥浆制拌时间不应小于 30s。

3 注浆浆液宜由制浆站拌制，计量设备、灌浆自动记录仪应经检定或校准合格。

4 浆液宜随拌随用，不应使用已初凝的浆液。

8.5.5 注浆浆液的质量标准应符合下列规定：

1 浆液应搅拌均匀并测定浆液密度，测量频次不应少于 3 次/h。

2 浆液 3h 后泌水率不应大于 2%。

3 浆液流动度直径不应小于 150mm。

8.5.6 封孔注浆应在锚索张拉锁定后及时进行，不宜超过 72h，注浆压力应满足设计要求，并保持压力稳定。注浆量应与理论注浆量相近，并按规定频次采用无损检测方法测定注浆密实程度，注浆密实度不低于 90%。

8.5.7 锚索注浆应采用灌浆自动记录仪记录压力、流量、密度、注入量等各项数据。

8.5.8 同一孔段注浆时不宜中断。中断注浆时应查明原因，恢复注浆前应疏通进浆管和排气管。

8.5.9 注浆过程中应每天取样测定 28d 龄期水泥浆或水泥砂浆立方体抗压强度值。当连续施工时，锚固段应每 3 孔取样一组；自由段应每 5 孔取样一组。

8.5.10 钻孔孔道注浆应符合下列规定：

1 有粘结锚索宜先进行锚固段注浆，待锚索张拉锁定后再进行自由段注浆；无粘结锚索的锚固段和自由段可同时注浆。

2 锚固段注浆应符合下列规定：

1) 注浆前应排干孔内积水。注浆管、排气管应畅通。

2) 注浆压力应通过试验确定，根据锚索孔的孔向、孔深、岩体条件，锚固段部的注浆压力可按 0.1~0.5MPa 控制。

3) 当孔口或回浆管排出的浆液与注入浆液的密度相同时进行屏浆，屏浆压力宜为 0.3~0.4MPa，屏浆时间为 20~30min。

4) 注浆温度宜为 5~40℃。冬季日平均气温低于 5℃时, 应对制浆系统、注浆机械和输浆管线保温; 高温季节应采取降温措施。

3 水平孔注浆时, 孔口段应封闭堵塞。有粘结锚索应在锚固段和自由段之间设置止浆装置。注浆压力可提高至 0.5MPa, 并采取间歇反复注浆工艺, 必要时可采用真空工艺注浆。

4 仰孔注浆应符合下列规定:

1) 有粘结锚索锚固段与自由段间止浆装置应密封可靠, 回浆管距孔顶不应小于 50mm, 屏浆后可利用回浆管进行一次压浆。

2) 先进行自由段孔口密封, 待终凝后再进行全孔注浆。

5 对穿锚索注浆前应将两端封闭堵塞, 注浆时可适当提高注浆压力, 必要时可采用真空注浆工艺。真空度宜为 -0.10~-0.08MPa。

6 同级边坡实行边开挖边锚固的锚索, 孔道注浆初凝 1~3d 内, 允许爆破质点振动速度应为 1.0~2.0cm/s; 3~7d 内, 应为 2.0~5.0cm/s; 7~28d 内, 应为 5~10cm/s。

7 注浆完成后, 应复核实际注入孔道中的浆液量。可采用无损检测方法检查注浆饱满度。

8.5.11 预留孔孔道注浆应符合下列规定:

1 锚索预留孔孔道注浆宜一次完成。若中断, 应采取相应处理措施。

2 预留孔孔道注浆应符合下列规定:

1) 注浆前应检查注浆管、回浆管(排气管)畅通情况。应清除孔道内积水, 并保持孔道处于密封、湿润、洁净状态。

2) 当采用真空注浆工艺时, 真空度宜为 -0.10~-0.08MPa。

3) 当出浆密度与进浆密度相同时, 在设计压力下持续压浆 10min 后结束注浆。

3 对预应力混凝土衬砌的环形锚索孔道注浆时，可采用一端或两端同时间歇注浆工艺，当出浆管排浆后封堵进浆管，并用出浆管进行压浆补充注浆至不吸浆为止。

8.5.12 锚索注浆完成后，应及时填写注浆工序质量评定表。

9 安全监测与锚固试验

9.1 设计

9.1.1 安全监测设计应符合下列规定：

- 1 安全监测应以监控工程施工期及运行期的安全为主，并兼顾指导施工和验证设计。
- 2 施工期安全监测项目宜与运行期安全监测项目相结合。
- 3 监测仪器应布置在有代表性的地段或部位。
- 4 选定的各种监测仪器宜在施工初期安装。
- 5 每个监测断面的监测仪器数量不应少于 3 支（组）。
- 6 施工前实施的试验锚索应布置测力装置。

9.1.2 安全监测设计应对仪器的安装、保护、监测等提出相应的技术要求。

9.1.3 安全监测设计应包括监测锚索体工作状态和被锚固对象的锚固效果。监测结果应作为锚固区域工程验收和工程安全评价的依据之一。

9.1.4 特殊的预应力锚固工程，应根据需要进行专项监测设计。

9.1.5 预应力锚索自动化监测系统应包括监测仪器、数据采集、计算机及外部设备、网络通讯设备、电源及防护设备、数据采集软件与安全监测管理软件。

9.1.6 预应力锚固工程监测仪器选型应符合下列规定：

- 1 监测仪器应适应工程环境、耐久、实用，仪器精度满足工程需要。
- 2 仪器类型宜与监测工程类型相匹配。
- 3 监测仪器不仅应具有人工监测功能，还应具有自动监测功能，便于及时接入自动化信息处理平台。

9.1.7 锚索体工作状态监测应包括下列内容：

- 1 张拉过程中，每根锚索体的实际伸长值和锁定时的回

缩值。

2 在有代表性锚索中安装测力传感器，监测锚固力变化值。

3 设计要求的其他监测项目。

9.1.8 锚索体和被锚固介质的监测仪器宜布置在同一监测断面。监测仪器数量可根据建筑物类型、建筑物级别，按表 9.1.8 确定。当锚索数量超过 500 根时，监测锚索比例可适当减小，但不应小于 3%。

表 9.1.8 建筑物安全监测锚索数量

锚固工程类型	边坡锚固			地下建筑物锚固			水工建筑物锚固		
	1	2	3	1	2	3	坝基、坝体	闸墩	闸室、挡墙
建筑物等级									
监测锚索根数的百分比： $\left(\frac{\text{监测锚索根数}}{\text{锚索总根数}}\right) \times 100$	≥ 10	≥ 8	≥ 5	≥ 10	≥ 8	≥ 5	≥ 15	≥ 10	≥ 5

9.1.9 当预应力锚索采用新材料、新技术、新工艺、新产品时，应经过试验验证，并应长期监测。

9.1.10 锚索监测应按设计要求及时布置实施，并应先安排监测锚索施工。

9.1.11 监测仪器接入自动化监测信息平台时，应根据设计要求的允许值建立预警系统。设计无特殊要求时，可按预应力损失超过设计锚固力的 10% 或预应力增幅超过设计锚固力的 20% 设置预警值。

9.1.12 系统报警后，应立即会同设计部门分析原因并研究应采取的措施。

9.2 试 验

9.2.1 水工预应力锚固工程试验项目应包括材料检验、锚索受力性能试验。

9.2.2 材料检验应包括钢绞线或预应力钢筋的力学性能检验、

预应力钢绞线-锚具组装件静载试验和锚具硬度检验。试验频次和试验方法应分别按附录 A、附录 B 和附录 C 的规定执行。

9.2.3 1 级、2 级水工建筑物锚固工程，施工前应在有代表性地段或结构进行锚索受力性能试验。试验位置应由建设、设计、监理和施工单位共同确定。试验数量不应少于 3 根，当锚固对象或地质条件有明显变化时，应增加试验数量。

9.2.4 混凝土衬砌环形预应力锚索性能试验段可选择有代表性的洞段或部位。

9.2.5 受力性能试验所用的锚索材料、张拉机具及施工工艺应满足设计要求。

9.2.6 试验前，测力装置应与张拉千斤顶、压力表配套标定；配套标定可按附录 E 的规定执行。锚索受力性能试验的张拉力值应以张拉千斤顶的压力表示值为准。

9.2.7 锚索受力性能试验，宜选择非破坏性试验方法。非破坏性试验可在有代表性的工作锚索中进行。当采用新型锚索或单束锚索设计张拉力大于 5000kN 时，可根据设计要求研究确定破坏性试验的必要性。

9.2.8 受力性能试验时，锚索张拉应分级执行，当达到最大张拉力时，锚索中钢绞线的平均应力不宜超过预应力钢材强度标准值的 75%。

9.2.9 岩（土）体中预应力锚索的破坏性试验，应在非锚固区选择有代表性的地质地段造孔，孔深可大于锚固段长度 10m 以上。试验锚索数量应按设计要求确定，但不应少于 3 根。

9.2.10 锚索受力性能破坏性试验的张拉程序应另行制定。当加载达到 $100\% \sigma_{con}$ 后继续加荷时，应按 8.4.8 条规定的加荷速率加载至锚固段产生连续位移且无法加荷或有预应力钢绞线被拉断，即认为预应力锚索已达到破坏状态。

9.2.11 各项试验均应提出试验报告。内容应包括：试验位置、试验方法、数量、材料、设备、仪器、加载过程、各级荷载及实测伸长值和锁定后回缩值等，并提出试验结论。

9.3 实 施

- 9.3.1 预应力锚固工程安全监测应按设计要求和施工图规定的部位、项目、数量及方法实施。
- 9.3.2 锚索测力计的标定应按 SL 597 的规定执行。
- 9.3.3 锚索张拉锁定后应立即开始监测，监测频次为：3d 以内为 2 次/d，3~10d 为 1 次/d，10~30d 为 1 次/5d，以后为 1 次/月。当环境条件或边界条件发生变化时，应及时监测并加密监测频次。
- 9.3.4 施工期监测应与预应力锚索施工同步进行，并应及时整理分析监测资料和信息反馈。
- 9.3.5 转入运行期监测的项目，应做好监测设施的保护和移交工作。
- 9.3.6 预应力锚索监测仪器信号超过预警值或监测数据出现异常时，应及时查找原因，并进行相应处理。
- 9.3.7 监测报告的内容应包括监测项目、布置、方法、监测仪器的型号、规格、标定资料及监测资料整理分析等。施工期监测的原始资料应包括预应力损失值及应力—应变曲线图。

10 质量检查与验收

10.1 质量检查

10.1.1 施工单位应建立健全质量管理体系，施工前应制定预应力锚固施工专项技术措施，编制施工作业指导书。

10.1.2 施工前应对操作人员进行技术培训，并记录。

10.1.3 施工过程中应按工序进行质量检查，上一道工序检查合格后再进行下一道工序的施工作业。对每道工序的检查应做详细记录，并作为工序质量评定的依据。

10.1.4 预应力锚索材料、锚具及其配件应检查下列内容：

- 1 出厂合格证和质量报告单。
- 2 进场后施工单位对其力学指标抽检报告单及外观检查记录。
- 3 预应力钢绞线-锚具组装件静载检验和锚具硬度检验报告单。
- 4 水泥、骨料、钢材质量抽检报告单。

10.1.5 锚索钻孔应检查下列内容：

- 1 孔位偏差。
- 2 孔径、孔深偏差。
- 3 孔斜偏差及孔道顺直情况。
- 4 清孔质量。

10.1.6 预留孔道应检查下列内容：

- 1 孔道位置及偏差，架设的牢固性及接头的严密性。
- 2 结构混凝土浇筑前、浇筑过程中及浇筑后预留孔道是否通畅。

10.1.7 锚索制作质量应检查下列内容：

- 1 钢绞线顺直程度及外观质量。
- 2 下料长度及偏差。

- 3 隔离架材质、规格及间距。
- 4 分散型锚索钢绞线编号及标识。
- 5 锚固段钢绞线清洗及端头保护情况。
- 6 止浆装置的位置和固定的牢固程度。
- 7 注浆管、排气孔的位置、固定的牢固程度及通畅性。
- 8 压力分散型锚索承载体间距、P型锚挤压套的紧固性和防护装置的密封性。

9 制索、编索出厂合格证及验收记录。

10.1.8 锚索运输及吊装应检查下列内容：

- 1 吊点设置。
- 2 锚索弯曲半径。
- 3 孔号和锚索编号是否对应。
- 4 仰孔锚索入孔后固定装置的牢固性。

10.1.9 锚固段和自由段注浆应检查下列内容：

- 1 浆液的水灰比、密度和拌和时间。
- 2 进、出浆管的浆液密度、注浆温度、注浆压力、屏浆压力、屏浆时间、实际注浆量。
- 3 注浆记录仪校准与工作状态。
- 4 注浆体设计龄期立方体强度值。

10.1.10 锚墩及孔口装置应检查下列内容：

- 1 孔口岩面的平整度、松动岩块是否清除、岩面清洁程度。
- 2 孔口套管的型号和规格，安装位置及其轴线与钻孔轴线的偏差。
- 3 钢筋制安质量，模板尺寸及其安装后的稳定性。
- 4 锚垫板、螺旋筋的型号、规格、安装精度及牢固程度。
- 5 锚墩混凝土配合比试验报告单。
- 6 混凝土拌和物质量和浇筑质量，混凝土试块的立方体抗压强度值。
- 7 当锚墩为预制构件时，还应检查预埋连接钢筋的位置和预埋质量。

8 当采用钢质锚墩时，应检查水泥砂浆找平层与锚孔轴线垂直度的偏差、预埋螺栓的位置和预埋螺栓的锚固质量。

10.1.11 锚索张拉前应检查下列内容：

- 1 锚固段注浆记录，复核锚固段胶结长度和注浆密实度。
- 2 锚固段注浆体设计龄期的立方体抗压强度实测值。
- 3 张拉设备配套标定结果，当预应力锚索安装有测力传感器时，还应检查测力传感器的标定结果。
- 4 锚具和测力计的安装质量。
- 5 现场作业人员培训情况及培训记录。

10.1.12 锚索张拉作业应检查下列内容：

- 1 各根钢绞线预紧程度。
- 2 张拉力及分级、张拉力施加速率、稳压时间、卸载速率。
- 3 各级荷载下实测伸长值与理论伸长值的差值。
- 4 锁定后钢绞线的回缩值。
- 5 测力传感器的张拉过程曲线。
- 6 夹片顶面的平齐度及各股钢绞线对应夹片的夹紧程度。
- 7 张拉作业记录。
- 8 24h 的预应力损失值。

10.1.13 锚头防护应检查下列内容：

- 1 钢绞线外露长度切割与防护。
- 2 钢筋混凝土锚墩的几何尺寸偏差、设计龄期立方体抗压强度值。
- 3 金属、塑料防护罩内注入防腐介质的品质、饱满程度及密封性。

10.1.14 环形锚具槽回填质量应检查下列内容：

- 1 锚具槽表面凿毛质量及冲洗情况。
- 2 锚具槽内有粘结钢绞线清洗程度，无粘结钢绞线护套剥除后防腐介质的密封性。
- 3 回填混凝土的立方体抗压强度及与衬砌混凝土的结合质量。

10.1.15 预应力锚索监测系统应检查下列内容：

- 1 监测仪器布置与设计位置的偏差。
- 2 监测仪器的率定曲线。
- 3 出线保护措施。
- 4 初始值。

10.1.16 施工中，各工序均应按规定表格填写检查结果，并及时进行各工序质量评定。

10.2 质量评定与验收

10.2.1 预应力锚索验收应符合下列要求：

1 边坡、地下洞室、水工建筑物的每根锚索作为一个单元工程，施工完成后应组织该根锚索的单元工程质量评定；每个锚固区或每个锚固工程分部加固完成后，应组织该锚固区或每个锚固工程的验收；所有预应力锚固工程可划分为一个单位工程，或当与其他施工项目划分为一个单位工程时，预应力锚索和其他施工项目全部完成后应组织单位工程验收。

2 混凝土衬砌环形预应力锚索应按衬砌浇筑单元进行质量评定，当环形锚索施工完成后，应与其他施工项目一并组织分部工程和单位工程的验收。

3 当预应力闸墩的锚索与其他施工项目作为一个分部工程或一个单位工程时，应同其他工程一并组织验收。

预应力锚固工程，每一根锚索为一个单元工程，每根锚索施工完成后应立即进行该单元工程的质量评定及验收。当一个独立区域的全部锚索施工完成且每个单元工程锚索质量评定全部由监理审核完成后，应及时组织该区域锚固工程验收。

10.2.2 预应力锚固工程的质量评定和验收应按 SL 176、SL 223、SL 632、SL 633 执行。

10.2.3 预应力锚固工程验收应具备下列条件：

1 已按批准的设计文件及承包合同的规定完成施工，其质量符合设计要求，具备使用条件。

2 锚索测力计的实测锚固力与时间变化过程线平稳且基本稳定，实际锚固力应满足设计要求。

3 施工过程中发生的质量缺陷，经处理后满足设计要求。

4 按附录 F 的要求完成各单元及各单元所有工序的质量评定。

10.2.4 预应力锚索单元工程质量评定应提供下列资料：

1 各种原材料、中间产品的产品合格证及抽检报告单。

2 锚索制作出场合格证及锚索制作工序质量评定表。

3 造孔工序质量评定表。

4 锚索安装工序质量评定表。

5 锚墩制作工序质量评定表。

6 锚索张拉工序质量评定表。

7 锚索体注浆质量评定表。

8 相关的声像资料。

10.2.5 分部工程含有锚固工程项目时，验收应提供下列资料：

1 试验锚索的试验报告书。

2 每根锚索的单元工程质量评定表及验收签证，并附相应的检测结果。

3 原材料质量检测汇总表。

4 注浆及混凝土等中间产品质量检测结果汇总分析表。

5 单元工程质量评定汇总表。

6 各根锚索张拉力及锁定后钢绞线实测伸长值汇总表。

7 观测锚索实测锚固力变化过程线及预应力损失状况的分析意见。

8 锚固区域安全监测结果及分析结论。

10.2.6 单位工程含有锚固工程项目时，验收应提供下列资料：

1 锚固工程施工总结报告。

2 分部工程验收签证及质量评定结论。

3 原材料检测结果汇总表。

4 各检测项目检测结果汇总表。

5 锚固力监测及被锚固介质监测过程线及分析资料，并提出安全监测专题报告。

6 施工缺陷处理结果报告。

7 有关的声像资料。

10.2.7 预应力锚索加固工程作为一个单位工程时，其竣工验收应符合 SL 223 的规定。

附录 A 预应力钢绞线 力学性能检验

A.0.1 施工单位应对进场钢绞线的极限抗拉强度、伸长率和弹性模量进行检验。

A.0.2 试件制备应符合下列要求：

1 从外观检验合格的钢绞线中抽取试件。检验频次为同品种、同型号和同一生产工艺生产，每 60t 为一个批次，不足 60t 也作为一个批次。每批次随机选取 3 盘，每盘各抽取 1 根试件组成一个试验组。设计另有要求时，应按设计要求执行。

2 试件制取时应从所选钢绞线盘内先截去 500mm，再根据试验条件截取 900~1200mm（测试标距为 610mm）。

3 每根钢绞线试件两端均应用胶布贴裹编号，注明钢绞线生产厂家、强度等级、生产日期、盘号、试件编号等，送检时应避免损坏。

A.0.3 试件检验应符合下列要求：

1 钢绞线力学性能试验，应由具有相应资质的试验检测机构进行。

2 试件送检单位应与相应检测机构签订钢绞线力学性能检验委托书，应明确送检试件名称、规格、数量、检验项目、送检日期、见证取样单位、见证人、送样人、检验成果、提交日期及其他有关事宜。

3 被委托机构应按委托书规定的项目进行钢绞线力学性能检验，按规定的日期向委托单位提交钢绞线力学性能检验报告。报告中应提供委托检验项目的检验结果，并判定送检试件是否合格。

A.0.4 检验判定合格标准应符合下列要求：

1 3 根钢绞线试件中，如有 1 根试件的主要力学指标不合

格，应再随机抽查 6 根试件复检，如再有 1 根不合格，则该批次钢绞线应判为不合格。

2 如试件在夹头内或距钳口两倍钢绞线公称直径内断裂而达不到标准性能要求时，则判为检验无效，应进行复检。

附录 B 预应力钢绞线-锚具 组装件静载试验

B.0.1 预应力钢绞线-锚具组装件静载试验应符合下列规定：

1 1级、2级水工建筑物的锚固工程，应根据设计要求进行预应力钢绞线-锚具组装件静载试验。

2 试验用预应力钢绞线、锚具均应为合格品，其组装件应由锚具的全部零件与预应力钢绞线组成。

3 锚具零件不应带有影响试验效果的物质。

4 预应力钢绞线应等长、平行，受力长度不应小于3.0m。

5 试件数量不应少于3套。

B.0.2 试验用预应力钢绞线、锚具，其组装方式应与工程实际一致。

B.0.3 试验用测力系统误差不应大于1%，测量总应变量具的标距误差不应大于0.2%，指示应变的标距误差不应大于0.1%。

B.0.4 试验加载程序应符合下列规定：

1 试件制作、试验程序及方法应按照GB/T 14370的规定执行。

2 应按预应力钢绞线强度标准值的20%、40%、60%、80%四级加载，加载速率宜为100MPa/min。

3 当达到80%强度标准值时，应持荷1h，随后继续加载直至破坏。

B.0.5 测试应包括下列内容：

1 试件极限拉力 F_{apu} 及其总应变 ϵ_{apu} 。

2 各根预应力钢绞线与锚具之间的相对位移。

3 工作锚板、夹片之间的相对位移。

4 加载至预应力钢绞线抗拉强度标准值的80%并持荷1h后，测定工作锚板、夹片的变形及钢绞线的伸长值。

5 试件的破坏部位与破坏形式。

B. 0. 6 试验成果应包括下列内容：

- 1 试验记录。
- 2 计算锚固效率系数和总应变。

B. 0. 7 锚固效率系数可按式 (B. 0. 7) 计算：

$$\eta_a = \frac{F_{apu}}{F_{pm}} \quad (\text{B. 0. 7})$$

式中 η_a ——预应力钢绞线-锚具组装件静载试验测得的锚固效率系数；

F_{apu} ——预应力钢绞线-锚具组装件的实测极限拉力；

F_{pm} ——按预应力钢绞线试件实测破断荷载平均值计算的预应力钢绞线的实际极限抗拉力。

B. 0. 8 总应变 ϵ_{apu} 可按式 (B. 0. 8) 计算：

$$\epsilon_{apu} = -\frac{\Delta L}{L} \quad (\text{B. 0. 8})$$

式中 ϵ_{apu} ——预应力钢绞线-锚具组装件达到实测极限拉力时的总应变；

ΔL ——预应力钢绞线实测伸长值，mm。

B. 0. 9 预应力钢绞线-锚具组装件静载试验判定标准应符合下列规定：

1 如三套试件同时满足 $\eta_a \geq 0.95$ ， $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$ ，且工作锚板和夹片未出现肉眼可见的裂纹或破损，该批锚具应判为合格品。

2 如有一套试件不满足本条 1 款的条件，应取双倍数量的试件复检。如再有一套试件不满足本条 1 款的条件，该批锚具应判为不合格品。

附录 C 预应力锚具硬度检验

C.0.1 锚具硬度检验的数量，在每批进场的工作锚板和夹片中应抽取总量的 5%，且工作锚板应不少于 5 件，夹片不少于 5 副。

C.0.2 测试前应用硬度标准块校正硬度计，随后将锚具和检测的夹片擦净，锚板中心打点处刨光后再进行测试。

C.0.3 采用洛氏硬度计测试，应在工作锚板中心测打 3 点，在夹片背面中心线上测打 3 点，硬度检验应符合 GB/T 14370 的规定。

C.0.4 被检验的工作锚板和夹片的硬度值如有一件不合格，应取双倍数量复验，如再有一件不合格，应对该批工作锚板、夹片逐件检验，合格者方可使用。

附录 D 预应力锚索伸长值的计算及 伸长值、回缩量测量方法

D.0.1 直线型锚索理论伸长值 ΔL_L 可按式 (D.0.1-1) 计算:

$$\Delta L_L = \frac{PL_f}{AE} \quad (\text{D.0.1-1})$$

其中
$$P = P_j \left[1 - \frac{kx + \mu\theta}{2} \right] \quad (\text{D.0.1-2})$$

式中 P ——预应力钢绞线的平均张拉力, 取张拉端的张拉力与计算截面处扣除锚口及孔道摩擦损失后张拉力的平均值;

L_f ——预应力钢绞线自由段长度, mm;

E ——预应力钢绞线弹性模量, MPa;

A ——预应力钢绞线的截面积, mm^2 ;

P_j ——张拉控制力, 当超张拉时按超张拉取值, N;

k ——预应力孔道局部偏摆系数;

μ ——预应力钢绞线与预埋孔道壁的摩擦系数;

θ ——预应力钢绞线从张拉端至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和, rad;

x ——张拉端至计算截面的孔道长度, mm。

对于混凝土建筑物中预埋孔道成孔的预应力工程, μ 、 k 可参照表 D.0.1 取值。

表 D.0.1 摩擦系数和偏摆系数取值

孔道成型方式	k	μ	
		钢丝线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋金属波纹管	0.0015	0.25	0.50
预埋塑料波纹管	0.0015	0.15	—

表 D.0.1 (续)

孔道成型方式	k	μ	
		钢丝线、钢丝束	预应力螺纹钢筋
预埋钢管	0.0010	0.30	—
抽芯成型	0.0014	0.55	0.60
无粘结预应力筋	0.0040	0.09	—

D.0.2 钢绞线伸长值及回缩量的量测，可参照下列方法进行：

1 锚索在初始应力下，量测千斤顶活塞体外露长度 L_0 ；锚索每张拉一级荷载，量测一次张拉千斤顶活塞体外露长度 L_{\max} ；张拉锁定后，量测千斤顶活塞体外露长度 L_b 。

2 最后一级荷载时，自由段实际伸长值 ΔL_s 可按式 (D.0.2-1)、式 (D.0.2-2) 计算：

$$\Delta L_s = \Delta L_1 + \Delta L_2 - \Delta L_3 \quad (\text{D.0.2-1})$$

$$\Delta L_1 = L_{\max} - L_0 \quad (\text{D.0.2-2})$$

式中 ΔL_1 ——从初应力至最终应力之间的实测伸长值，mm；

ΔL_2 ——初应力下的理论伸长值，mm；

ΔL_3 ——张拉后千斤顶长度范围内的钢绞线理论伸长值，mm；

L_{\max} ——锚索张拉至最后一级时，千斤顶活塞体外露长度，mm；

L_0 ——初始应力下，千斤顶活塞体外露长度，mm。

3 钢绞线的回缩量按式 (D.0.2-3) 计算：

$$b = L_{\max} - L_b - \Delta L_3 \quad (\text{D.0.2-3})$$

式中 b ——钢绞线的回缩量，mm；

L_b ——张拉锁定后，千斤顶活塞体外露长度，mm。

4 如果中间锚固，则第二级初始荷载应为前一级最终荷载，故将多级千斤顶活塞伸长值叠加即为初应力到最终应力间的实测伸长值。两端张拉时，实测自由段的伸长值及钢绞线的回缩量可参照上述方法进行。

附录 E 预应力张拉机具及测力计的 配套标定

- E.0.1** 预应力锚索张拉前，张拉机具应进行配套标定。
- E.0.2** 张拉机具配套标定前，压力表、测力计应单独由计量部门检验合格。
- E.0.3** 张拉机具配套标定前应进行下列准备工作：
- 1 应将待标定的千斤顶、压力表、测力计擦拭干净。
 - 2 千斤顶、压力表、测力计应进行配套编号、标示、登记。
 - 3 张拉机具在送检的装卸、运输过程中应防止碰撞、摔打、损伤。
- E.0.4** 张拉机具配套标定成果应包括下列内容：
- 1 千斤顶的张拉力—压力表读数关系曲线图（含对应关系数值表）。
 - 2 千斤顶主动张拉力—压力表读数关系计算公式。
 - 3 千斤顶被动张拉力—压力表读数关系计算公式。
 - 4 张拉机具配套标定过程中发现的有关问题。
- E.0.5** 标定的设备额定张拉力应大于锚索设计超张拉力 1~2 级（即 500~1000kN）。

附录 F 预应力锚索质量评定表

表 F-1 预应力锚索单元工程质量评定表

锚索编号：

合同编号：

单位工程名称		编码		工程部位	
分部工程名称		编码		锚索类型	
单元工程名称		编码		单根锚索长度/m	
单根锚索设计张拉力/kN				钢绞线根数	
单根锚索设计锚固力/kN					
施工单位				评定日期	年 月 日
项次	工序名称	工序质量等级			
1	锚索孔				
2	锚索制作与安装				
3	锚墩制作				
4	锚索张拉与锁定▲				
5	锚索注浆▲				
施工单位 自评意见	评定意见			单元工程质量等级	
	签字 加盖公章 年 月 日				
监理单位 意见	评定意见			单元工程质量等级	
	签字 加盖公章 年 月 日				
注：▲为主控项目。					

表 F-2 锚索孔工序质量评定表

合同编号：

单位工程名称				单位工程编码				
分部工程名称				分部工程编码				
单元工程名称				单元工程编码				
单根锚索长度/m				设计孔深/m				
锚索孔编号				质量评定日期		年 月 日		
项次	检查类别	项目名称	单位	设计值	允许误差	实测误差	质量等级	
							合格	优良
1	检测项目	孔位	x	m				
			y					
2		孔口高程	m					
3		孔径▲	mm					
4		孔深▲	m					
5		方位角	°					
6		倾角▲	°					
7		孔斜▲	%					
8	孔道清理情况							
钻孔地质情况说明								
施工单位自评意见		主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 工序质量等级为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日						
监理单位意见		经抽检 并查验相关检测报告或记录， 主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 该工序质量核定为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日						
注：▲为主控项目。								

表 F-3 锚索制作安装工序质量评定表

合同编号：

单位工程名称					单位工程编码						
分部工程名称					分部工程编码						
单元工程名称					单元工程编码						
锚孔编号					锚索编号						
锚索类型		设计锚固力/kN			设计长度/m						
钢绞线根数					质量评定日期		年 月 日				
项目		单位	设计值	实测值	质量等级	项目		单位	设计值	实测值	质量等级
钢绞线	材质▲	MPa				锚固段	长度▲	m			
	直径	mm					承压板直径	mm			
	根数						承压板数量	个			
	下料长度	m					承压板间距	m			
	剥皮清洗▲						挤压锚外径	mm			
	外观						导向帽直径	mm			
止浆装置	直径	mm				锚索体	导向帽长度	m			
	长度	m					自由段长度	m			
回浆管	直径	mm				安装	索体绑扎				
	耐压	MPa					外观				
	长度	m					锚索体检查				
对中支架	直径	mm				锚索体运输	锚索人孔姿态				
	锚固段中间距	m					外露长度	m			
	自由段中间距	m					支点间距	m			
波纹管	直径	mm					转弯半径	m			
	长度	m									
施工单位自评意见		主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 工序质量等级为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日									
监理单位意见		经抽检 _____ 并查验相关检测报告或记录， 主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 该工序质量核定为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日									
注：▲为 主控项目。											

表 F-4 锚墩制作工序质量评定表

合同编号：

单位工程名称				单位工程编码			
分部工程名称				分部工程编码			
单元工程名称				单元工程编码			
锚索孔编号				锚索体编号			
锚索类型				设计锚固力/kN			
				设计长度/m			
质量评定日期				年 月 日			
项目			单位	设计值	实测值	质量等级	
基面清理							
孔口管	直径		mm				
	长度		m				
	对中误差▲		mm				
钢筋	钢筋间距		mm				
	保护层厚度		mm				
模板	锚墩尺寸误差		mm				
仓面清理							
混凝土强度等级▲			MPa				
锚垫板	锚板尺寸		mm				
	中心孔直径		mm				
	外平面偏斜误差▲		°				
施工单位自评意见			主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 工序质量等级为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日				
监理单位意见			经抽检 _____ 并查验相关检测报告或记录， 主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 该工序质量核定为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日				
附表：锚墩混凝土立方体抗压强度检测结果报告。							
注：▲为主控项目。							

表 F-5 锚索张拉工序质量评定表

合同编号：

单位工程名称		分部工程名称		单元工程名称							
单位工程编码		分部工程编码		单元工程编码							
锚索类型		锚索孔编号		锚索体编号							
设计锚固力/kN		锚索长度/m		锚固段长/m							
设计张拉力/kN											
预紧千斤顶型号/编号		油泵型号/编号		压力表型号/编号							
张拉千斤顶型号/编号		油泵型号/编号		压力表型号/编号							
测力计型号/编号		质量评定日期		年 月 日							
钢绞线下料长度/mm											
预张拉	预张拉力/kN		理论伸长值/mm								
张拉 ▲	荷载级别	预紧	2	3	4	5	6	7	8	9	锁定
	张拉力/kN										0
	压力表读数/MPa										
	加荷时间/min										
	持荷时间/min										
	理论伸长值/mm										
	实测伸长值/mm										
	理论实测之差/mm										
张拉情况描述											
操作		测量		记录		计算					
张拉日期	年 月 日			补偿张拉日期			年 月 日				
质量评定	施工单位 自评		签字： 年 月 日		监理单位 复核		签字： 年 月 日				
<p>注：▲为主控项目。张拉指预应力锚索进行的整体张拉，预紧时张拉可以指示为“0”，实测伸长值和理论伸长值指预紧张拉力条件下的理论伸长值，以后各级张拉力时的实测伸长值为预紧时的理论伸长值再加上各级张拉力时的实测伸长值。</p>											

表 F-6 锚索注浆工序质量评定表

合同编号：

单位工程名称				单位工程编码			
分部工程名称				分部工程编码			
单元工程名称				单元工程编码			
锚索孔编号				锚索体编号			
锚索类型		设计锚固力 /kN		锚固段长度 /m		自由段长度 /m	
注浆记录仪器型号/编号			质量评定日期			年 月 日	
项目		单位	锚固段注浆			自由段注浆	
			设计值	实测值	质量等级	设计值	实测值
浆液	水灰比						
	灰砂比						
注浆	压力		MPa				
	进浆密度		kN/m ³				
	回浆密度		kN/m ³				
	屏浆密度		kN/m ³				
	屏浆时间▲		min				
	结石 28d 强度▲		MPa				
	理论注浆量		L				
	实际注浆量▲		L				
	注浆日期						
注浆过程记录							
施工单位自评意见		主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 工序质量等级为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日					
监理单位意见		经抽检 并查验相关检测报告或记录， 主控项目 100%合格，一般项目合格率 % 该工序质量核定为： 签字 _____ 加盖公章 _____ 年 月 日					
附表：结石 28d 立方体抗压强度检测结果报告。 注：▲为主控项目。							

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

标准历次版本编写者信息

SL 46—94

本标准主编单位：长江葛洲坝工程局

本标准主要起草人：王冲 任尚卿 杨春堂 沈世焜
刘玉堂 曹俊华 彭敏而 贲建明
周其庆 焦家海

SL 212—98

本标准主编单位：水利部东北勘测设计研究院

本标准主要起草人：赵长海 王永年 田裕甲 上官能
余知生 刘俊柏 邓德炎 孙洪泽
王俊杰 王 槟 车黎明 李 勇
郝长生

SL 212—2012

本标准主编单位：中水东北勘测设计研究有限责任公司

本标准主要起草人：赵长海 苏加林 苏 萍 高 垠
杜国文 陈 雷 陈立秋 景健伟
郑奕芳

中华人民共和国水利行业标准

水工预应力锚固技术规范

SL 212—2020

条 文 说 明

目 次

1	总则	73
2	术语	76
3	基本规定	84
4	材料与设备	92
5	锚索体设计	101
6	锚固设计	114
7	锚索防护	141
8	锚固施工	147
9	安全监测与锚固试验	169
10	质量检查与验收	175

1 总 则

1.0.1 预应力锚固工程是利用高强度、低松弛材料对不稳定的岩（土）体或水工混凝土建筑物加固的技术措施。其可以最大限度地少扰动原有岩（土）体，实施主动加固，有效防止或减少自然灾害，是一种经济、高效的加固技术，也是防灾、减灾最简便的工程措施。

近 20 年来，我国水工预应力锚固技术有了很大的发展，采用预应力锚索加固边坡、地下洞室、坝基、坝体和其他各种水工建筑物的工程非常普遍，应用预应力锚索数量之多，是世界水工建筑中少有的，目前我国预应力锚索最大张拉力已达 10000kN，最长的锚索长度已超过 120m。预应力锚索使用钢材抗拉强度标准值已达到 1960MPa，无粘结钢绞线已大量生产，锚具和张拉设备产品质量大幅度提高。随着预应力锚固技术的发展，压力分散型、拉力分散型、拉压复合型，以及可除式预应力锚索不断被工程所采用，更值得关注的是预应力锚索的防护已得到所有锚固工程的高度重视，预应力锚固工程的安全监测已在许多工程中实施并用于工程的安全评价。

预应力锚索在高应力状态下工作，施工工艺和技术十分复杂，对其施工质量要求很高，此外采用预应力锚索加固的工程，安全十分重要，一旦失效或发生质量事故，将造成设备的损失、甚至人员伤亡，这是绝对不允许发生的。

为了更加有效地推进预应力锚固技术的发展，规范应用条件，合理地利用预应力锚固技术，保证工程安全，特对 SL 212—2012《水工预应力锚固设计规范》进行修订。在修订 SL 212 时，考虑到 SL 46—94《水工预应力锚固施工规范》已经使用 20 多年，已经不适应我国锚固技术的发展需要，而且随着我国锚固技术的发展，不仅应用领域扩大，锚固数量增加，而且锚索设计张拉力

和锚索长度也大幅度提高，在施工过程中发生的质量问题也随之增多，为进一步规范锚索施工的质量行为，提高施工质量，确保锚固工程安全运行，也将水工预应力锚固施工并入该规范一并修订，修订后的规范名称改为《水工预应力锚固技术规范》。

1.0.2 本标准的适用范围：采用预应力锚索（杆）对坝基、岩质边坡、土质边坡、地下工程的围岩，以及水工混凝土结构的加固、补强等工程的设计和施工，对施工过程中的试验、监测、检测以及锚固工程的验收也都做了规定。

1.0.3 预应力锚固技术是一种发展中的技术，工序比较复杂，种类繁多，应用广泛，而且制约因素较多，又多用于隐蔽工程。在工程设计时要求详尽地掌握工程的运用要求和锚固对象的各种基础资料，根据不同的条件，积极采用新技术、新工艺、新材料和新设备，因地制宜地进行设计工作，不断地促进预应力锚固技术的发展，充分发挥预应力锚固的加固作用，以达到投资节省和工程安全的目标。

1.0.4 虽然预应力锚固工程对环境的破坏很小，但由于锚固工程占用一定空间，对周围环境也有一定影响。为将对环境的影响减少到最小程度，施工后尽快恢复原地形、地貌，清除施工垃圾十分重要，要在施工前制定完善的保护措施和保护方案。随着国家的发展，人民对美好生活的向往，绿水青山就是金山银山已深入人心，国家也加强了对环境保护的力度，也制定了一系列的法规和环境保护的规定，锚固工程的设计与施工应更加重视对环境的保护。

1.0.5 岩（土）体锚固施工区域的自然环境比较复杂。开挖后的高陡边坡或洞室围岩稳定性差，工程地质条件和水文地质条件较为复杂的边坡或洞室围岩，存在一些松动块石或边坡孤石；高地应力区的地下洞室可能发生岩爆。由于预应力锚索张拉应力很高，预应力锚固工程施工自始至终都存在一定不安全因素。为确保施工安全工作处于有效管控状态，施工前在编制预应力锚固工程施工组织设计时，要同时制定安全施工技术措施，应依照国

家安全法、水利水电行业的 SL 398《水利水电工程施工通用安全技术规程》、SL 401《水利水电工程施工作业人员安全操作规程》的相关规定，对可能存在安全隐患的施工工序，还要制定详细的安全施工作业指导书。工程开工前，要结合工程的具体情况，制定安全技术措施和施工安全应急预案，对参与工程施工的人员进行安全施工技术培训并进行考核，操作人员要持证上岗。

2 术 语

2.0.1 预应力混凝土用钢丝或预应力混凝土用钢绞线具有极高的抗拉强度，其标准值 270 级可达到 1860MPa，290 级可达 1960MPa，PSB785 级预应力混凝土用螺纹钢筋的极限抗拉强度也能达到 980MPa。由多股高强度预应力钢绞线或高强度预应力混凝土用螺纹钢筋组成的预应力锚索或预应力锚杆对边坡加固可以增加边坡抗滑稳定性，对坝基加固可以增加坝基的稳定程度，对大型地下洞室加固可以限制围岩有害变形的发展，将由地应力和洞室开挖应力重新调整引起的变形控制在允许的范围之内，对坝体、闸墩和压力输水隧洞中布置的锚索施加预应力后可以极大程度地改善混凝土结构中的应力状态，提高承受水荷载的能力。

预应力锚索加固技术也是一种经济、高效，对围岩扰动最小、对环境破坏最小的加固措施，所以广泛地应用于边坡、地下洞室及各种水工建筑物的加固工程中。

2.0.2 在预应力锚固工程中，主要采用两种高强度材料制成的预应力锚索或预应力锚杆，一种为高强度低松弛的预应力钢绞线或高强度低松弛的预应力钢丝，另一种为预应力混凝土用螺纹钢筋或用高强钢材制成的自钻式锚杆。国际上将预应力锚索或预应力锚杆统称为预应力锚杆，而我国习惯上将由预应力钢绞线或预应力钢丝制成的索体称为预应力锚索，将由预应力混凝土用螺纹钢筋制成的索体称为预应力锚杆。在 20 世纪 90 年代编制 SL 212—98《水工预应力锚固设计规范》时，为与国际接轨，将预应力锚索和预应力锚杆统称为预应力锚杆，但该规范应用 20 多年来，大多数工程技术人员认为该称呼应用十分不便，因此修编 SL 212—98（修订后的标准编号为 SL 212—2012）时，又将用预应力钢绞线或预应力钢丝制成的索体称为预应力锚

索，用预应力混凝土用螺纹钢筋制成的索体称为预应力锚杆。为与 SL 212—2012 一致，为表述清晰，在预应力锚索后面加上了“（杆）”。

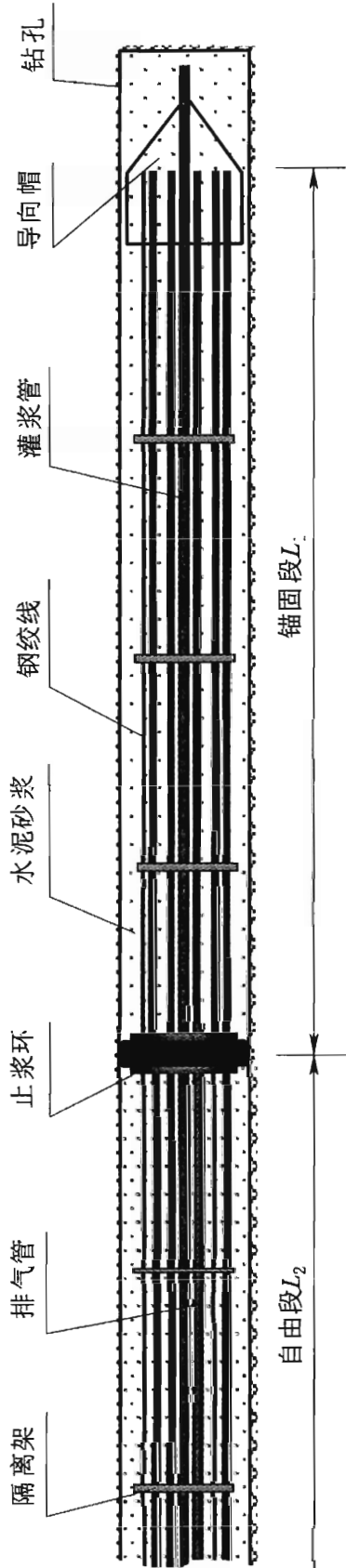
2.0.16 拉力型锚索：这种型式锚索结构示意图见图 1（a）。施工时，先对锚固段注浆，待锚固段注浆体达到设计强度后，对锚索施加张拉力。此时锚固段浆体结石受拉。当锚索张拉锁定 24h 后若预应力损失在 10% 以内，再进行二次注浆。此种锚索锚固段剪应力分布示意图见图 1（b）。

2.0.17 压力型锚索：这种型式锚索结构示意图见图 2（a）。它与拉力型锚索的主要区别在于锚固段端部布置了一个承压板或挤压套，由于它的作用是将锚固段注浆体结石由受拉改变为受压，从而改变了锚固段浆体结石的受力状况。此种锚索锚固段剪应力分布示意图见图 2（b）。

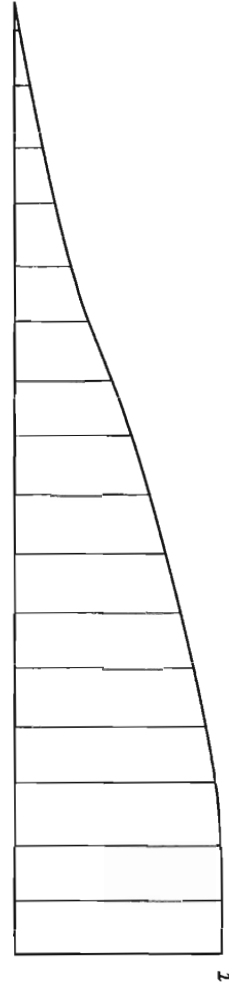
2.0.18 拉力分散型锚索：这种型式锚索结构示意图见图 3（a）。它与拉力型锚索工作原理基本相同，其主要区别在于锚固段拉力分散在若干个区段，从而减小了锚固段注浆体结石承受拉力的峰值，其具体制作方法为将锚固段中的无粘结钢绞线分组，并在不同位置剥去护套，使其在不同位置通过胶结材料与孔壁胶结。拉力分散型锚索其剪应力分布示意图见图 3（b）。

2.0.19 压力分散型锚索：压力分散型锚索结构示意图见图 4（a）。压力分散型与压力型的区别，在于锚固段的不同位置中设置若干个承压板和挤压套，将锚索孔底端一个承压板的压力分散于若干个承压板上，这种型式预应力锚索中的各根钢绞线的长度是不等长的，而且其钢绞线要采用无粘结钢绞线。这种锚索的最大优点是锚固段的剪应力分布更加均匀，可以最大限度地发挥锚固段的承载能力，多用于锚固深度较深，施加的预应力吨位较高的预应力锚索。压力分散型锚索剪应力分布示意图见图 4（b）。

2.0.20 拉压复合型锚索：拉压复合型锚索结构示意图见图 5（a）。拉压复合型预应力锚索锚固段由拉力型钢绞线束与压力型钢绞束编制而成，使拉应力和压应力在锚固段内相互叠加，从而

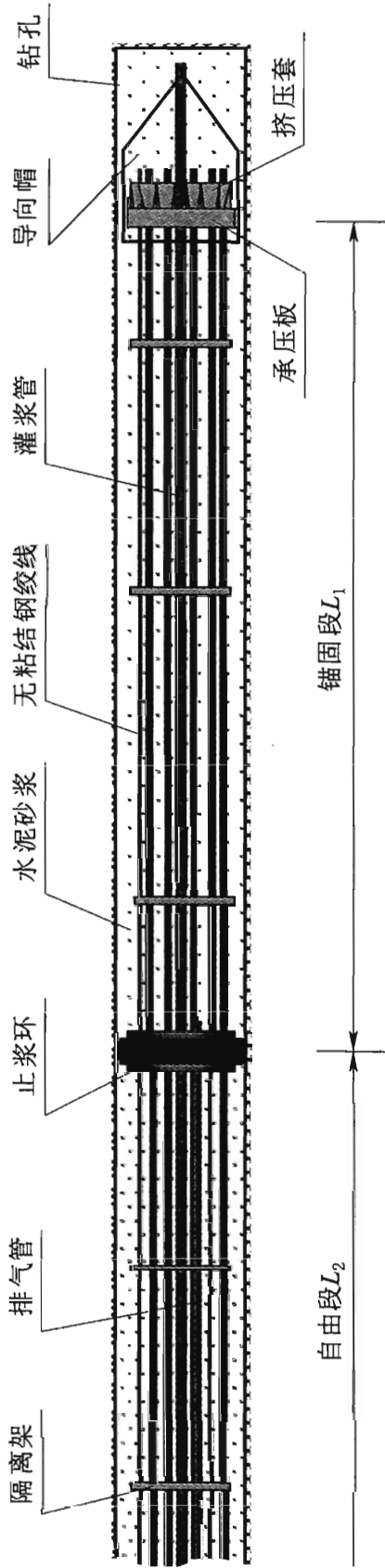


(a) 拉力型锚索结构示意图

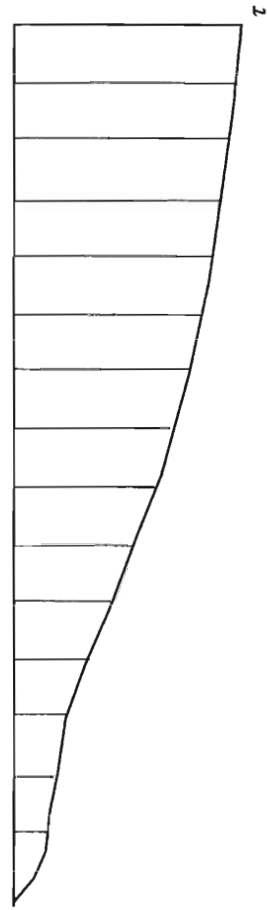


(b) 拉力型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 1 拉力型锚索结构示意图

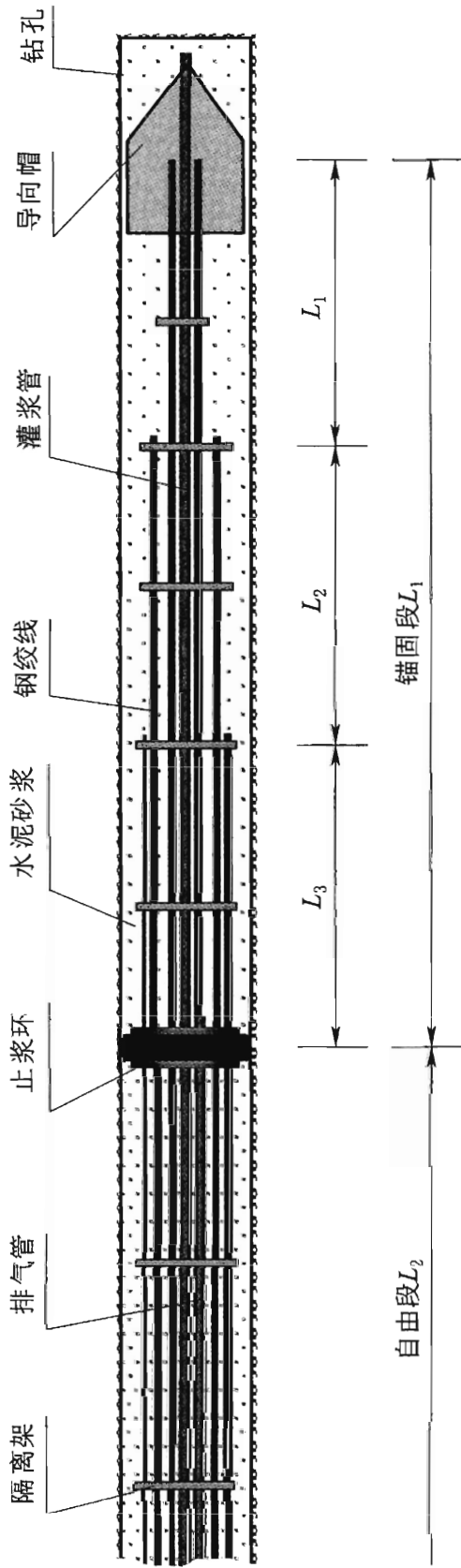


(a) 压力型锚索结构示意图

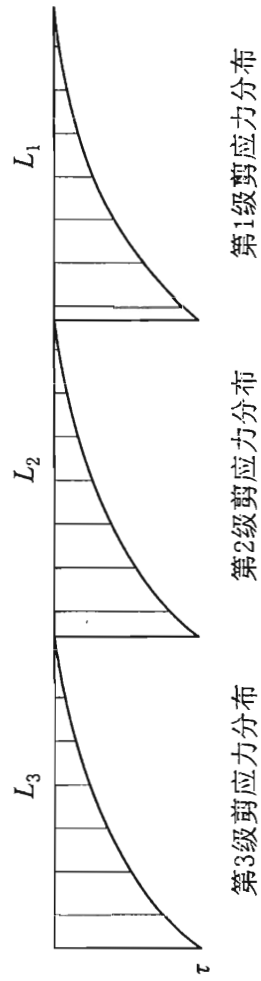


(b) 压力型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 2 压力型锚索结构示意图

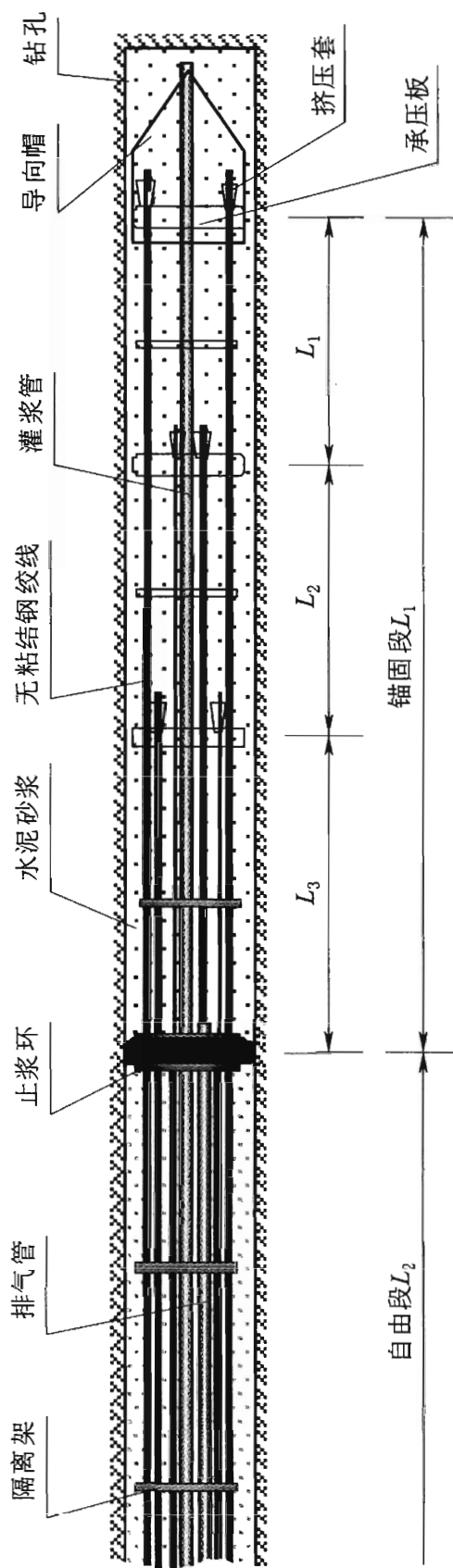


(a) 拉力分散型锚索结构示意图

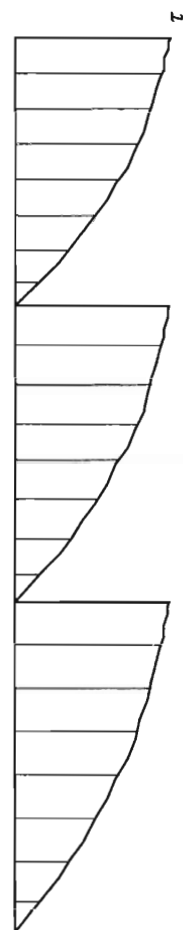


(b) 拉力分散型锚索锚固段剪应力分布示意图

图3 拉力分散型锚索结构示意图

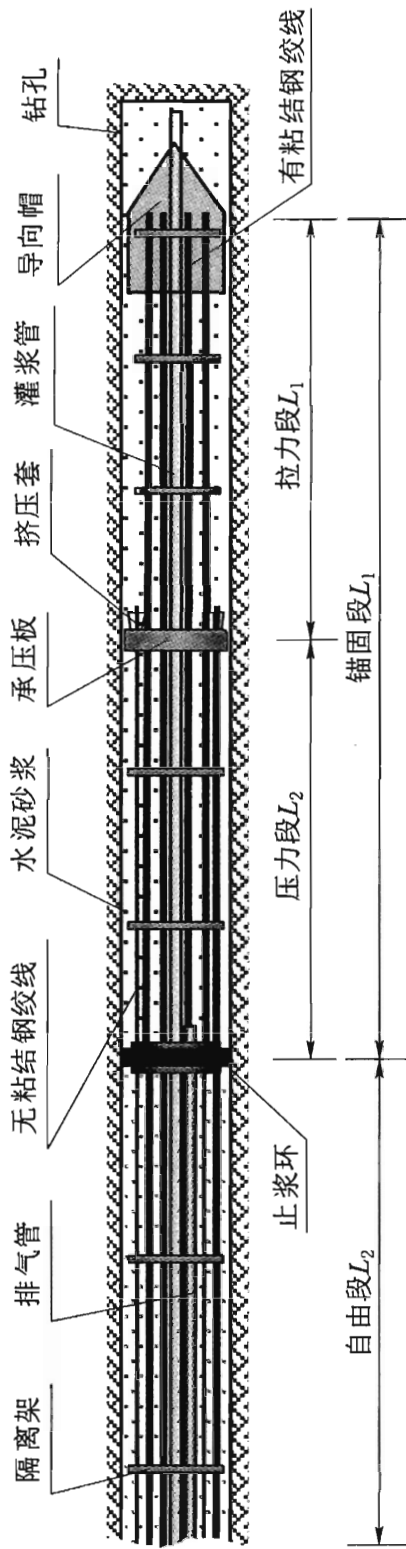


(a) 压力分散型锚索结构示意图

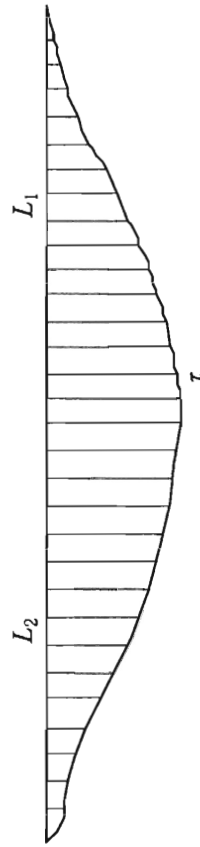


(b) 压力分散型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 4 压力分散型锚索结构示意图



(a) 拉压复合型锚索结构示意图



(b) 拉压复合型锚索锚固段剪应力分布示意图

图 5 拉压复合型锚索结构示意图

使锚固体内应力及周边岩体间的粘结摩阻力均匀分布，可大幅度降低应力峰值。拉压复合型锚索剪应力分布示意图见图 5 (b)。四川瀑布沟水电站和紫坪铺水电站均使用了 3000kN 级拉压复合型锚索。

3 基本规定

3.1 基本资料

3.1.1~3.1.3 预应力锚索（杆）的吨位、长度、方位与被锚固体有直接关系，因此要详尽地掌握锚固部位的相关资料。对边坡加固，主要了解边坡的可能破坏形式、岩（土）力学参数、破坏面位置、结构面的组合关系、对预应力锚索的基本要求；对地下洞室，主要了解围岩的稳定状态和可能发生塑性变形的深度、范围；对局部破坏部位，主要了解和掌握滑动面或破坏面的位置、产状和不利结构面的组合关系；对水工建筑物本身，主要掌握影响稳定和内部应力恶化的各种荷载和运行方式；对锚固介质，主要掌握所处的环境条件及物理和化学特性。从而确定设计参数，优化结构布置和施工方法。

原位监测资料对地下工程的围岩稳定、边坡的稳定评定有非常重要的价值，原位监测的结果可直观地反映结构物及岩体的稳定状况。为此，许多工程特别是一些重要工程，在施工初期就布置了一定数量的锚索测力计、收敛计、多点位移计或测斜仪，监测边坡或地下结构物的稳定状况，而且直接用于工程稳定评价。

3.1.4 预应力锚索（杆）施工前，应备齐所用材料，特别是各种材料的力学性能资料，各种施工设备的产品说明书，以及根据设计文件要求及施工材料、设备情况编制的施工组织设计方案及作业指导书，这是做到有序施工的 necessary 保证，此外施工前还需根据规范要求编制预应力锚索（杆）受力性能试验方案，正确、准时开展试验，以保证指导施工顺利进行。

3.2 锚固设计的基本要求

3.2.1 在锚固设计中，除确定锚固范围和锚索长度、选择锚固方式、计算锚固力、确定预应力锚索数量、确定锚索结构型式和

各项参数，以及绘制工程布置图、结构图，编制技术要求和提出复杂地质条件处理措施外，锚固效果的监测也十分重要，所以监测设计的有关内容应列入设计文件中。

3.2.2 在预应力锚固设计中，需研究岩（土）体或水工建筑物可能失稳的条件和失稳破坏的形式，以便确定预应力锚索的锚固范围和锚固深度。

一般情况下，边坡的破坏形式主要是滑动、倾倒和软弱岩（土）层或风化导致的变形破坏。引起边坡滑动的主要因素是顺坡节理或软弱结构面的存在，查清滑动面的位置，以及其结构面的组合情况与力学性质就可确定滑动范围、滑动力的大小，进而计算施加的阻滑力和锚固位置；引起倾倒的主要原因为卸荷裂隙、外力作用（包括地震、水荷载等），要查清卸荷裂隙的性质、产状、发育长度、与其他结构面的组合关系及地下水活动规律等，计算塌滑体体积和外水压力进而确定锚固位置、锚索长度、设计锚固力和设计张拉力等；由于岩（土）体软弱、风化，其破坏形式为岩（土）体蠕变，采用预应力锚索加固的目的是限制岩（土）体变形的发展导致变形的破坏，一般采用混凝土挡墙、抗滑桩、钢筋混凝土网格梁与预应力锚索（杆）联合的综合加固措施，为此要对岩（土）的变形特性进行分析和计算，确定由预应力锚索提供的锚固力。

地下洞室围岩失稳主要有两种方式。一种是由于洞室开挖引起的应力重新调整，使某些部位应力超限，出现较大范围的塑性区。为抑制有害变形的发展和限制塑性区的扩大，要采用系统加固的方法。根据洞室的开挖程序，通过有限元分析计算，确定塑性区范围、需要施加的锚固力和锚固深度。另一种是由于软弱结构面的不利组合，使局部岩体滑动或塌落，此时可按块体理论分析失稳条件，确定锚固力和锚固深度。

对于水工建筑物，主要是以预应力锚索所施加的预压应力，改善结构物内部应力状态或保持建筑物的整体稳定。因此，需要根据水工建筑物的稳定、应力分析结果，确定施加的预应力大小

和锚固的部位。

3.2.3 不稳定岩（土）的加固形式主要由锚固介质的力学强度、锚索体采用的材料和张拉设备的张拉能力决定。

对岩（土）体加固而言，提供的锚固力大小是由可能失稳的块体大小根据稳定分析结果确定的，对钢筋混凝土结构而言是根据结构应力分析结果确定的。而锚索的设计张拉力大小还要根据加固对象、岩（土）体围岩的力学性质、预应力锚索张拉锁定后可能引起锚索受力的增加幅度等综合因素来确定，所以设计锚固力和设计张拉力不是一个量值，如有些时候，锚索后期应力要增大，锚索张拉时要把后期应力增加部分预留一定数值；如岩体边坡可能发生倾倒失稳时，需要提供预防岩体倾倒的锚固力可能较大，但锚索安装后实施的张拉力不一定要很大；还例如布置在挡墙中的锚索，锚固力需要根据可能失稳的滑动力确定，但在锚索张拉时为防止挡墙向内变形过大，可能使挡墙与基础结合面拉裂破坏而施加的张拉力可能要小些等，所以在确定施加的设计张拉力大小时，一定要考虑加固对象的承受能力。

当被锚固介质力学强度较低、质量不好、岩体破碎、软弱时，只能采用胶结式锚固段型式的锚索。必要时，还需进行固结灌浆或增设其他结构措施，以增大锚固段的锚固力。

锚索体的材料是制约单根锚索锚固力的一个重要因素。确定材料数量时，要考虑一定安全余度，再根据需要确定钻孔直径。一般情况下，当采用 1860 级钢绞线时，锚固力、钢绞线股数和钻孔直径的关系见表 1。

表 1 单根锚索的锚固力、钢绞线股数和钻孔直径关系

单根锚索锚固力/kN	1000	2000	3000	6000
单束锚索钢绞线股数	6	12	19	40
钻孔最小直径/mm	110	140	160	220

单根锚索的锚固力还受到施工设备的限制。例如钻孔机具要满足可造锚固力需要的最小孔径的要求；张拉锚索的千斤顶，最

大出力要大于单根锚索的超张拉力。目前我国生产的张拉千斤顶的最大出力为 6000~8000kN。在锚固设计时，单根锚索锚固力要综合上述条件选取。张拉设备可参照 4.6 节的规定选取。

此外，在设计单根预应力锚索的设计张拉力时，还要考虑可能发生的预应力损失。影响预应力损失的主要因素有：锚索材料的徐变性质、被锚固介质的流变特性、锚索张拉锁定后钢绞线回缩量的大小、锚索与孔壁的摩擦和锚具之间的接触情况等。在上述预应力损失中，锚索的回缩量大小、锚索与孔壁摩擦以及锚具的接触变形可利用超张拉来克服，而锚索材料的徐变和锚固介质的流变是属时间效应，要在设计时予以考虑。其中，钢材的徐变影响仅占预应力值的 1%，对于混凝土建筑物中的预应力锚索，由于混凝土的徐变引起的预应力损失为 5%~6%，此值变幅不大。而对于岩体或土体中的预应力锚索，大部分预应力损失则来源于岩体的流变特性，所以要着重考虑岩体锚固介质的质量。在预应力锚固设计时，关于预应力损失量的考虑，对于一般性工程，可根据经验或工程类比法确定；对于重要工程，需要通过试验确定。

3.2.4、3.2.5 采用预应力锚索（杆）进行加固，锚固段的位置需置于稳定的介质中。对于由软弱结构面引起的塌滑，预应力锚索（杆）需穿过软弱结构面，锚固段需置于不能滑动的完整岩层中；对由塑性变形引起的塑性区或拉力区，锚固段需置于围岩的弹性区内；对水工建筑物，锚固段需置于压应力区内。

3.2.6 为了向被锚固介质提供最佳的锚固效果，力求锚固力分布均匀，在一般情况下，锚索（杆）要均匀、等距离布置。布置型式可以是方形或矩形，也可以是梅花形或菱形。

从锚索的受力条件分析，当锚索受到较大拉力时，在锚固段和锚头附近的一定范围内，被锚固介质将出现拉应力区，所以锚索的布置要力求缩小锚固段和锚头附近拉应力区的范围，拉应力值也要控制在允许的范围之内。

锚索的方位要以提供最大阻滑力和最有效支护抗力为目的进

行布置。一般情况下，最有效的布置为逆滑动方向布置。这样锚索可能很长，有时还受施工条件、滑动体边界条件的限制，只能以一定的角度布置，所以要经过综合比较，选择最优的锚固方向，以达到最有效的加固效果。

由于稳定需要，设计中布置的预应力锚索数量多，锚固段在被锚固的介质中比较集中，在锚固介质的某个高程或某个平面内应力状况比较复杂，或由于施加的张拉力比较大而造成锚固段区域产生局部拉应力过大。为改善锚固段区域锚固介质的应力条件，锚固段最好分布在不同高程或不同平面内，这样可以减小局部拉应力的数值，改善锚固段区域的应力分布。由于锚固技术的发展，为改善锚固段区域的应力状况，对锚固段的结构型式做了改进，将锚固段做成拉力分散型或压力分散型。由此，锚固段区域的拉应力将大幅度降低，并可控制在允许范围之内，因此大大改善了锚固段的应力状态，扩展了预应力锚索的应用范围，并为发展高荷载预应力锚索创造了条件。

3.2.7 由于混凝土预应力闸墩结构的尺寸较小，且又承受了巨大的水推力，应力状态比较复杂。计算结果表明，在巨大的水推力作用下，闸墩内侧表面和闸墩与大梁连结部位都有较大的拉应力，有些工程上述部位的主拉应力达 8.0MPa。为了改变这种状况，预应力锚索在立面上要沿水平推力的合力方向呈扇形扩散布置，使闸墩中应力分布均匀；此外，预应力锚索在平面内的布置，除考虑应力条件外，还要考虑施工简便的要求。

环形锚索式预应力混凝土衬砌中布置的锚索，使用的材料主要有两种，一种为有粘结预应力钢绞线，另一种为无粘结预应力钢绞线。由于使用的材料不同，锚索的布置是有区别的，施工中采用的锚具型式对锚索的布置也有影响，所以在锚索的布置设计时，要针对锚索材料、锚具的型式，采用相应的布置方式。

在坝体、坝基以及其他水工建筑物中布置的锚索，主要根据结构物的稳定及应力分析结果确定其布置。

3.2.8 由于预应力锚索工作的环境千差万别，锚索材料内部应

力较大，再加上各股钢丝或钢绞线受力的不均匀性，决定了对锚索的防腐和防锈蚀处理的重要性。因此，在预应力锚固设计时一定要注意锚索的防腐、防锈处理的设计。锚索的防护设计，要根据锚索的使用年限、工作环境和地下水的性质等条件进行设计。

3.2.9 锚固工程多为隐蔽工程，地质条件和地质参数很难选取得非常准确，再加上一些不可预见因素的影响，给工程的锚固设计带来困难。为了优化设计，保证锚固工程经济、合理、运行安全，要安排一定数量的试验锚索，以确定或验证主要设计参数的合理性和可靠性。

3.2.10 对可能发生失稳的边坡，布置锚索是为了阻止山体滑动，布置在挡墙中的预应力锚索是为了防止倾倒，设计锚固力要提供阻止山体滑动和倾倒破坏的力。在这两个部位布置的锚索张拉时，要以倾倒体和挡墙根部不被破坏为条件，所以一般设计张拉力较小，不进行超张拉。设计张拉力大小要以不发生与倾倒和挡墙滑动相反方向位移为条件。大型地下洞室尤其是水电站地下厂房，跨度、高度均较大，又采用分层、分部开挖，施工中顶拱及边墙持续变形较大，导致已安装的锚索应力增幅较大，极易造成应力超限，因此一般将实际锁定荷载降低到小于设计锚固力以下，或进行二次张拉（松放）；也可同时考虑降低预应力钢材强度的利用系数。

3.3 锚固施工的基本要求

3.3.1 预应力锚固工程的施工准备十分重要，关系到锚固工程施工质量和施工安全，为保证有序施工，应做好下列施工准备：

1 通过预应力锚索施加的锚固力对不稳定岩（土）体实施加固的工程和工程地质条件关系十分密切。对锚固区，在施工前进行地质复核，复核设计提供的地质资料是否有变化，对地下水和地层进行化学分析，确定对锚索有无侵蚀性并按实际地质条件对锚索进行防护，做到锚固工程万无一失。

2 制定施工组织设计、编写预应力锚索作业指导书是对预

应力锚固工程施工提出的最基本也是最重要的要求，是保证预应力锚索施工质量的基础，也是对预应力锚索施工质量的事前控制措施。《建设工程质量管理条例》（国务院令第 279 号）明确要求施工单位要建立质量责任制，建立质量保证体系。预应力锚固工程较为重要，它还涉及工程的安全运行。同时，预应力锚索结构复杂，施工难度大，技术含量高，施工前编制作业指导书，制定工艺流程，按序施工，明确质量控制标准都很重要，只有按作业指导书组织施工，才能保证施工质量，做到安全施工。

3 预应力锚索张拉吨位较大，预应力钢绞线受力后，长期在高应力状态下工作，再加上锚固段地层较深，其力学指标很难准确确定。同时，锚固区域内地质条件较为复杂，变化因素较多，地质条件不确定因素较多，对于锚固工程都应在施工前选择有代表性地段进行预应力锚索的工艺性试验、验证设计参数，确定施工工艺。因为锚固性能试验，一般为工作锚索的一部分，为了提供完整的试验数据，评价试验锚索的试验结果，每根试验锚索都应安装锚索测力计，并进行长期监测。

4 对于地下水发育、地表水丰富的区域，最主要的措施是防水和排水，隔断地下水和地表水对预应力锚固工程的接触，防止对施工的干扰是第一位的措施，一定要做好。

5 利用预应力锚索加固水工建筑物本身就是对围岩扰动小、破坏环境少的一种加固技术，但施工过程中也存在改变和破坏环境的问题。施工时做好环境保护，施工后恢复损坏的环境，使该项加固技术对环境损坏更小，使锚固技术有更大的发展空间。预应力锚索工程复杂，设备重，锚索长，重量大，钢绞线应力大。施工中不安全因素多，又多为高空作业，施工前制定安全措施十分重要，以做到防患于未然，保证安全施工。

3.3.2 锚固工程的工序很多，每道工序都有检测项目和质量指标，要求安排好施工顺序，保证各工序有序衔接。同时上道工序完成后要进行质量检查与验收，填写工序质量评定表，下道工序进行前还要对上道工序进行检查。只有保证每个工序的质量，整

束锚索的质量才能得到有效的保障。

3.3.3 对高陡边坡和地下洞室的高边墙，一般情况下，要求在开挖一级边坡或开挖一个梯段后立即安装预应力锚索并实施张拉。一方面是边坡或边墙稳定的需要，另一方面也为了方便施工，避免不必要的脚手架搭设。要做到这一点，一定要安排好施工程序，做到有序施工。但有些时候，可能这一施工顺序需要调整。调整后的施工顺序一定要确保边坡和边墙的稳定，要经过设计同意、监理批准后再实施。

3.3.4 同一锚固区，采用同品种、规格、型号和同一生产工艺的锚索材料、锚具目的是确保工程加固效果，方便施工，方便管理，统一施工方法、质量标准和质量控制，更有效地保证施工质量。

3.3.5 有些锚固工程造孔、安装、张拉、注浆均在台架上进行。由于钻机、张拉设备、注浆设备较重，台架的稳定十分重要，如果台架不稳定，不仅会出现安全事故，钻孔质量也难以保证。一些锚索还在高陡边坡上进行，属高空作业范畴，为此要求设置安全防护设备，经常对台架的安全检查也是必不可少的工作内容。

3.3.6 锚索测力计是监测预应力锚索锁定后预应力保持程度的仪器，如果在封孔灌浆之前测定预应力损失超过 10% 时，要确定是否需要进行补偿张拉。对有粘结锚束而言，补偿张拉要在自由段注浆前完成。

4 材料与设备

4.1 锚索（杆）材料

4.1.1、4.1.2 预应力锚索使用的钢绞线为有涂层（无粘结）或无涂层（有粘结）高强度低松弛钢绞线。低松弛钢绞线在满足标准条件下试验 1000h，初载为最大负荷的 70% 和 80% 时，其松弛率不大于 2.5% 和 4.5%。钢绞线生产工艺分为标准型和模拉型，其标准强度分别为 1720MPa（250 级）、1860MPa（270 级）和 1960MPa（290 级）。为最大限度地发挥预应力锚索的作用，目前 250 级很少采用，所以本标准推荐的预应力混凝土用钢绞线标准强度值为 1860MPa（270 级）和 1960MPa（290 级）。根据 2014 年修订，2018 年 4 月 1 日实施的 GB/T 5224—2014《预应力混凝土用钢绞线》中 6.3 条表 3 和 7.2 条表 7，将水利工程预应力锚索常用的 1×7 结构钢绞线的几种规格的尺寸及允许偏差、公称截面积、每米理论质量和力学性能，列入表 2，以方便选择使用。

预应力混凝土用螺纹钢筋，也是锚固工程中经常采用的锚杆材料，其力学指标已制定国家标准 GB/T 20065《预应力混凝土用螺纹钢筋》，其性能见表 3。

4.1.3 无粘结钢绞线均由生产厂家专门生产，外包材料的化学稳定性，防腐介质的质量、涂敷量及聚乙烯护套厚度对锚索防腐十分重要。使用单位大多不具备检测条件，但生产厂家提供的材质证明一定要符合 JG/T 161《无粘结预应力钢绞线》的规定。

4.1.4 虽然我国预应力锚索（杆）材料近年来发展较为迅速，种类也比较多，但在水利工程中最广泛应用的还是高强预应力钢绞线。有粘结钢绞线使用方便、造价低，与水泥浆或水泥砂浆有良好的胶结，只要保护层厚度满足要求，防腐性能是可以得到保证的。

表 2 1×7 结构钢绞线规格及力学性能表

公称直径 D_n /mm	直径允许偏差 /mm	钢绞线公称横截面积 S_n /mm ²	每米理论质量 /(g/m)	公称抗拉强度 R_m /MPa	整根钢绞线最大力 F_m /kN \geq	整根钢绞线最大力的最大值 $F_{m,max}$ /kN \leq	0.2%屈服力 $F_{p0.2}$ /kN \geq	最大力总伸长率 ($L_0 \geq 500$ mm) $A_{gt}/\%$ \geq	应力松弛性能	
									初始负荷相当于实际最大力的百分数/%	1000h 应力松弛率 $\tau/\%$ \leq
12.70		98.7	775	1860 1960	184 193	203 213	162 170			
15.20 (15.24)	+0.40 -0.15	140	1101	1860 1960	260 274	288 302	229 241	对所有规格 3.5	对所有规格 70 80	对所有规格 2.5 4.5
15.70		150	1178	1860	279	309	246			
17.80 (17.78)		191 (189.7)	1500	1860	355	391	311			

注：可按括号内规格供货。

表 3 预应力混凝土用钢筋力学性能表

级别	屈服强度 R_{eL} /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 $A/\%$	最大力下总伸长率 $A_{gt}/\%$	应力松弛性能	
					初始应力	1000h 后应力松弛率 $V_r/\%$
PSB785	785	980	8	3.5	0.7 R_m	≤ 4
PSB830	830	1030	7			
PSB930	930	1080	7			
PSB1080	1080	1230	6			
PSB1200	1200	1300	6			

注：无明显屈服时，用规定非比例延伸强度 ($R_{p0.2}$) 代替。

吉林省丰满水电站枢纽工程始建于1937年，枢纽工程主要由混凝土重力坝、坝身泄水孔、左岸泄洪洞、坝后式厂房、三期岸边式厂房等组成，总装机1002.5MW。1986—1996年对大坝进行全面加固时，期间采用预应力锚索对混凝土重力坝坝体与坝基进行了加固处理，2019年丰满水电站全面治理（重建）工程实施期间，拆除丰满水电站老混凝土重力坝（以下简称老坝）时，对老坝坝体内的锚索进行了解剖，对锚索的锈蚀程度进行了检查，对锚索的材料进行了金相分析，对锚索进行了破坏性拉拔检测。此次解剖进行检测的锚索共12根，其中有粘结钢绞线锚索3根，无粘结钢绞线锚索9根，有粘结锚索设计张拉力2040kN，无粘结锚索设计张拉力2330kN、2040kN、870kN和2620kN，2019年拆除老坝时，对上述12根锚索采取了保护性开挖，去掉砂浆，使钢绞线裸露，切掉1m钢绞线进行室内试验，留下1.5m钢绞线进行现场破坏性拉拔试验，有粘结预应力锚索钢绞线强度等级为1470MPa，3根锚索平均破断力与理论强度之比为83%；9根无粘结预应力锚索钢绞线强度等级为三种强度等级，强度等级为1860MPa的2根钢绞线平均破断力与理论强度之比为98.7%、强度等级为1570MPa的1根钢绞线平均破断力与理论强度之比为98.3%、强度等级为1470MPa的6根钢绞线平均破断力与理论强度之比为76.7%。经过近30年运用，1470级有粘结预应力锚索钢绞线的预应力保存效果优于无粘结预应力锚索钢绞线，说明水泥注浆防护效果较好。从室内试验结果看，无论是有粘结预应力锚索钢绞线还是无粘结预应力锚索钢绞线的表面均无锈蚀，钢绞线断面新鲜，说明水泥注浆均有较好的防护效果。

近几年来，无粘结钢绞线使用也较多，特别是对抗腐蚀要求较高、观测性预应力锚索或被锚固介质压缩变形较大需要进行补偿张拉时，使用无粘结钢绞线优点突出。

预应力混凝土用螺纹钢筋刚度大，又可承担一定剪力，多用于岩壁吊车梁的锚固。

对岩体较为破碎，成孔难度较大的部位，使用自钻式预应力锚杆也是一种非常好的选择，这种材料多用于边坡加固工程。

4.1.5 为解决塌孔地段的锚索安装的难题，近几年又开发了自钻式预应力锚杆。自钻式预应力锚杆集造孔、锚杆安装、锚杆注浆、张拉于一体，施工方法简便，易于保证安装质量，其施加的张拉力可达 1500kN。自钻式锚杆材料采用高强度无缝钢管制造，其材料性能已有国家标准为 GB/T 8162 《结构用无缝钢管》，为使用方便，本标准列出自钻式锚杆材料性能见表 4。

表 4 自钻式锚杆原材料基本要求

钢材名称	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	延伸率 /%	备注
45 号钢	335	590	14	国标，退火态
45Mn2	735	885	10	国标，淬火态
40Mn2	735	885	12	国标，淬火态

4.1.6、4.1.7 每批次预应力材料进场后，应组织检查和验收。检查验收要提供：材料的产品合格证、厂家材料材质力学指标和化学成分检验报告单，对无粘结钢绞线还要提供高密度聚乙烯树脂外保护套及防腐介质化验报告单。检查完要附的上述资料后，组织专人进行外观检查，检查后要在外观检查记录上签署材料检查结果和意见，并附于锚索制作工序表之后备查。

4.1.8 钢绞线进场后，对其品质进行检测是非常重要的项工作，和水利水电工程施工中都要对使用的原材料进行检测一样，预应力锚索使用的钢绞线也要对其品质进行抽检，检测频次参照 SL 677 《水工混凝土施工规范》的规定。对钢绞线进场后的抽检频次为 60t 为一个检验批次，不足 60t 也为一个批次。

4.2 锚具和连接器

4.2.1 锚具是组成锚头的主要部件，锚头是预应力锚索外部持力端，预应力锚索提供的锚固力是靠锚具保持的。根据锚索体材

料种类不同，锚具主要有四种类型：夹片式锚具、墩头锚具、螺母式锚具和压接锚具。夹片式锚具主要与钢绞线配套使用，根据每根锚索钢绞线数量可以有单孔或多孔之分，是使用最多的一种；墩头锚具主要适用于高强钢丝锚索体；螺母式锚具主要用于由预应力混凝土螺纹钢筋组成的锚索体，使用螺纹钢筋做锚杆材料时还要配置相应的连接器；压接锚具目前应用较少。

4.2.2 锚具包括工作锚板、工具锚板、承载板和 P 型挤压锚等产品，锚板与夹片均有严格的配合要求，国家已制定 GB/T 14370《预应力筋用锚具、夹具和连接器》生产标准，其力学性能、几何尺寸和钢材质量均要符合该标准的要求。

4.2.3 预应力锚索结构施工图要详尽，不仅要对采用的锚具型式、规格和性能提出要求，还要对制索、安装、张拉、注浆、封锚都要做出具体的规定。

4.2.4 锚具和连接器进场时要进行验收。验收内容包括生产厂家、产品合格证、检测报告单和外观尺寸。按照 GB/T 14370—2015 中 6.1 条规定了静载锚固性能、疲劳荷载性能、周期荷载性能、辅助性能和其他性能等要求，6.3 条规定了连接器的基本性能要求，规定了锚具、夹具、连接器和锚固区的承压件应有完整的设计文件、原材料的质量证明文件、制造批次记录、性能检测记录，还规定了该类文件应具有可追溯性。

4.2.5~4.2.9 该五条的规定为锚具和连接器进场后应进行的检测项目，这些规定是施工过程中容易忽视的问题，一定要切实做好，并提出检测报告备查。锚固工程验收时应检查这些资料是否齐全。

进场的锚具要配齐相关检测资料，并随同进场锚具一并验收。

1~2 级水工建筑物实施预应力锚固为重要的锚固工程，锚索数量较多，吨位较大，加固的部位比较重要，再加上预应力锚索使用寿命长，对锚索的锚固力要求较严格，所以要进行钢绞线-锚具组装件的静载试验。静载试验要满足锚具效率系数 $\eta_a \geq$

0.95，极限拉力时的总应变 $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$ 的要求，且锚具组装件不产生破损。本次修订标准时，对钢绞线-锚具组装件的静载试验、硬度检验及外观检查，均做了检测频次的规定，一方面便于质量控制，另一方面也便于质量检查，做到有章可循。

4.3 锚索组装件

4.3.1~4.3.4 预应力锚索的组装件较多，锚索的结构也比较复杂，尤其是压力分散型、拉力分散型和拉压复合型锚索的组装件更多，主要包括钢垫板、螺旋筋、承压板、止浆装置、隔离架、对中支架、护套、波纹管及绑扎用的金属丝等。其中一些组装件可由锚索生产厂家提供，也有一些组装件是锚索的制作和安装单位自己筹集。这些组装件不仅要满足本标准对保护层厚度、几何尺寸匹配的要求，还要满足允许误差的规定以及抗侵蚀及化学稳定性的要求。每一个细小环节都不能忽视，否则会影响锚索寿命，严重时会出现安全事故。

4.4 注浆与防护材料

4.4.1、4.4.2 预应力锚索承受的拉力大，应力值可达 1000~1200MPa，在高应力状态下易产生应力侵蚀，一旦发生侵蚀破坏，后果不堪设想。所以对预应力锚索的防护越来越受到重视，要做好锚索的防护，首先要从材料入手。目前水工预应力锚索采用 4 级防护，用的最多最普遍也是最有效的是水泥注浆、无粘结预应力锚索和防护套管。

注浆用水泥应采用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥，因矿渣水泥和火山灰水泥含有硫化物和氯化物，当氯离子含量超过水泥重量的 0.02% 时，会对锚索产生侵蚀。在预应力锚固施工前要对锚固区地下水进行复核，当地下水有侵蚀性时，还要采用特种水泥。同其他水工建筑物一样，进场水泥要进行抽检，这对预应力锚固工程更为重要。检测频次与水工混凝土施工规范规定一致。

4.4.3 注浆材料的拌和用水品质也很重要，对其检测频次也要

做出规定，否则容易忽视对水质的检测。

4.4.4 为了增加水泥浆的流动性，保证注浆的密实度，大多数浆液要添加减水剂，有些时候还要添加一定数量的细骨料以节省水泥或提高浆体的强度。对加入的细骨料的品质要有较严格的规定以保证水泥砂浆的强度满足设计要求，此外还应对骨料的化学成分中的硫化物及硫酸盐的含量做出规定，主要目的是防止对锚索产生应力腐蚀。

4.4.5 本标准强调，注浆材料中使用外加剂时，在进行预应力锚索施工之前，要进行注浆浆液的配合比试验。配合比试验，要求水泥浆或水泥砂浆的强度值不低于设计值，浆液 3h 后的泌水率控制在 2% 以内。水泥砂浆的质量还取决于细骨料的品质，也要进行严格控制。

4.4.6~4.4.9 混凝土结构中的预应力锚索大多采用预留孔法施工，有特殊防护要求的岩（土）中锚索也会使用套管。套管的孔径、壁厚、连接接头的质量十分重要，直接关系到锚索安装、注浆效果，所以按这四条要求对其质量进行控制是必要的。

制作套管的材料品质关系到套管的强度、耐老化程度和抗侵蚀能力，如果使用了再生料制作的套管，其耐久性将会受到影响，强度不足易于破损，将给锚固工程带来不良后果，也给施工造成困难。

4.5 造孔设备

4.5.1 造孔机械设备的选型要符合设计要求及施工条件。造孔设备要动力足、扭矩大、起拔力强、拆解方便、搬迁容易、易于组装、施工速度快、效率高。要根据施工环境、地质条件、锚索深度、锚索孔方向、孔径大小等因素来选择适宜的钻孔机械设备和成孔工艺。

4.5.2 推进力大、扭矩大、冲击力大、钻速平稳、钻进效率高，是性能优良钻机所具备的基本要素，也是优化和提高钻具性价比的主要参考依据，是钻具快速成孔的基本需要。

4.5.3 钻具的对接和拼装接口要牢固、简单、快捷，通用性好，安装和拆卸方便，最大程度减轻分体件重量，便于吊装移位，方便操作，节省工作量。

4.5.4 为防止粉尘污染，确保操作人员的健康，造孔设备应设有集尘装置，防止粉尘扩散。

4.6 张拉设备

4.6.1 预应力锚索（杆）的张拉设备包括张拉千斤顶、高压油泵、压力表、测力计等。张拉千斤顶，高压油泵和压力表是配套使用的，一定要相互匹配。在同一个区域内有时每根预应力锚索设计张拉力不同，一个区域和另一个区域的锚索设计张拉力也会有区别，所以要求张拉设备能适应各种设计张拉力的需要。千斤顶的出力十分重要，关系到能否施加到设计需要的超张拉力，所以千斤顶出力要大于施加的超张拉力，这样可以保证张拉千斤顶施加的设计张拉力的准确程度。

4.6.2 压力表读数直接反应张拉力的大小，当施加超张拉荷载时，表盘量程显示值为压力表最大量程的 75%，这些规定都是确保施加的张拉力稳定、准确，有利于锚索张拉的质量控制。

4.6.3 锚索测力计是在锚索张拉锁定后测量锚索工作状态的仪器。目前我国生产的锚索测力计元件多为振弦式或差动电阻式，其受环境与温度影响小，有利于保证测值准确、稳定、可靠。

锚索测力计的测值与张拉千斤顶出力显示的读数值是存在差异的，这种差异是由多种原因造成的，因此测力计的标定和张拉千斤顶与压力表的标定要同时进行，并及时记录和分析标定成果，以准确判定锚索的张拉力和锁定后锚索的工作状态。测力计量程选择也十分重要，有些锚索锁定后，其应力可能会增大，如果测力计量程仅高于超张力 10%~20%，当锚索应力增大超过 20%时，测力计将失效。锚索测力计安装时，可能出现偏载的情况，为此要求供应商提供偏载情况下的检验资料。

4.6.4 张拉设备的标定要由有资质的计量部门实施，无资质单

位标定的结果不能用来判定锚索锚固力的大小。

4.7 注浆设备

4.7.1 注浆设备包括浆液搅拌机、注浆泵及配套的压力表、管阀及输浆管等。由于预应力锚索大多数较长，已施工的锚索最长达 120m，一般的也在 20m 以上，再加上孔径小，锚索孔内组装置件繁多，构造复杂，注浆质量难以保证，所以选择性能优良的搅拌机、注浆泵十分重要。对搅拌机、注浆泵的要求是运行稳定，连续注浆，适应各种浓度的浆液，注浆性能要满足锚索孔注浆速度的要求。

4.7.2 为保证浆液均匀、流动性和可灌性，建议选择高速搅拌机制浆，其转速在 1000r/min 以上。由于锚索孔注浆为隐蔽工程，推荐采用灌浆自动记录仪实施注浆。

4.7.3~4.7.5 注浆过程中注浆压力将产生波动，为减少波动的影响，注浆泵的压力表精度要求为 1.5 级，量程要求为注浆压力的 1.5 倍。

注浆管耐磨性要好，其管径要满足注浆量的需要，主要目的是防止注浆管损坏、注浆过程中注浆管爆裂而影响注浆。

5 锚索体设计

5.1 锚索体选择

5.1.1 预应力锚索基本上是按锚固段的锚固方式进行分类的，可分为胶结式和机械式两类。胶结式预应力锚索应用最为普遍；而机械式由于锚固段较为复杂，安装也不方便，很少采用。在预应力锚索迅猛发展的今天，除特定情况外，机械式已基本上不再采用。

由于预应力锚固技术的迅猛发展，胶结式的锚固方式由过去单一的拉力型，发展为拉力分散型、压力型、压力分散型和拉压复合型等多种锚固方式。按胶结式锚固段使用的胶结材料划分，可分为水泥浆或水泥砂浆锚固段和树脂式锚固段。但经常采用的仍为水泥浆或水泥砂浆，只有特殊情况才考虑使用树脂材料。

近 10 年来，无粘结钢绞线大量用于锚固工程，采用无粘结钢绞线的锚索称为无粘结预应力锚索，无粘结预应力锚索主要用于腐蚀地层的加固，观测性锚索或有补偿张拉要求的锚索。

为了方便选择锚索型式，将目前我国经常采用的锚索型式的构造和特点简单介绍如下，以便根据需要进行选择：

(1) 拉力型。拉力型锚索是我国应用最早、应用最多的一种锚索，1964 年安徽省梅山水库坝基加固首先使用了拉力型预应力锚索。这种锚索在施工时，先对锚固段注浆，待浆体达到设计强度后，对锚索施加张拉力，锚索受力时锚固段注浆体受拉，这种锚索的基本构造及锚固段的剪应力分布见图 1。

(2) 压力型。压力型锚索与拉力型锚索主要区别在于通过锚固段孔底端部的承压板或挤压套的作用，将锚固段注浆体由受拉改变为受压，因此改善了锚固段的受力状况，有利于防止锚固段因拉力过大而开裂，从而加强了预应力锚索的防护。压力型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 2。

(3) 拉力分散型。拉力分散型锚索与拉力型锚索工作原理是一致的，不同的是，锚固段部位的锚索长短不一，不同长度的钢绞线在不同部位与水泥砂浆胶结，使锚固段剪应力峰值降低并分散到整个锚固段，使剪力分布趋于均匀。拉力分散型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 3。

(4) 压力分散型。压力分散型与压力型的区别是，在锚固段的不同位置中设置若干个承压板，将锚索孔底端一个承压板的压力分散于若干个承压板上，这种型式的预应力锚索中的各股钢绞线的长度是不等长的，而且其钢绞线要采用无粘结钢绞线。这种锚索的最大优点是锚固段的剪应力分布更加均匀，可以最大限度地发挥锚固段的承载能力，多用于锚固深度较深、施加的预应力吨位较高的预应力锚索。压力分散型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 4。

(5) 拉压复合型。拉压复合型预应力锚索锚固段由拉力型钢绞线束与压力型钢绞线束编制而成，使拉应力和压应力在锚固段内相互叠加，因而锚固体内应力及周边岩体间的粘结摩阻力均匀分布，可大幅度降低应力峰值。拉压复合型锚索结构及锚固段的剪应力分布见图 5。自由式拉压复合型预应力锚索结构见图 6。四川省瀑布沟水电站和紫坪铺水电站均使用了 3000kN 级拉压复合型锚索。

近年来，随着锚固技术的迅猛发展，其应用领域和应用数量都有较大增加，新型锚索不断问世，选择锚索体型式时一定要充分考虑锚索型式的特点、单根锚索设计张拉力大小、锚索长度、施工条件和锚固介质的条件，经综合比较选定。

5.1.2 预应力锚索的锚头、自由段、锚固段及各种连接部件按等强度原则设计是基本设计原则，也是最经济的，保证了预应力锚索的各个部件都具有相等的强度和寿命。

5.1.3 布置在岩（土）体中的预应力锚索，不稳定岩（土）体的范围决定了自由段的长度。锚索的锚固段是提供锚固力的部位，锚固段的长度决定了锚索提供锚固力的大小，其长度可由计

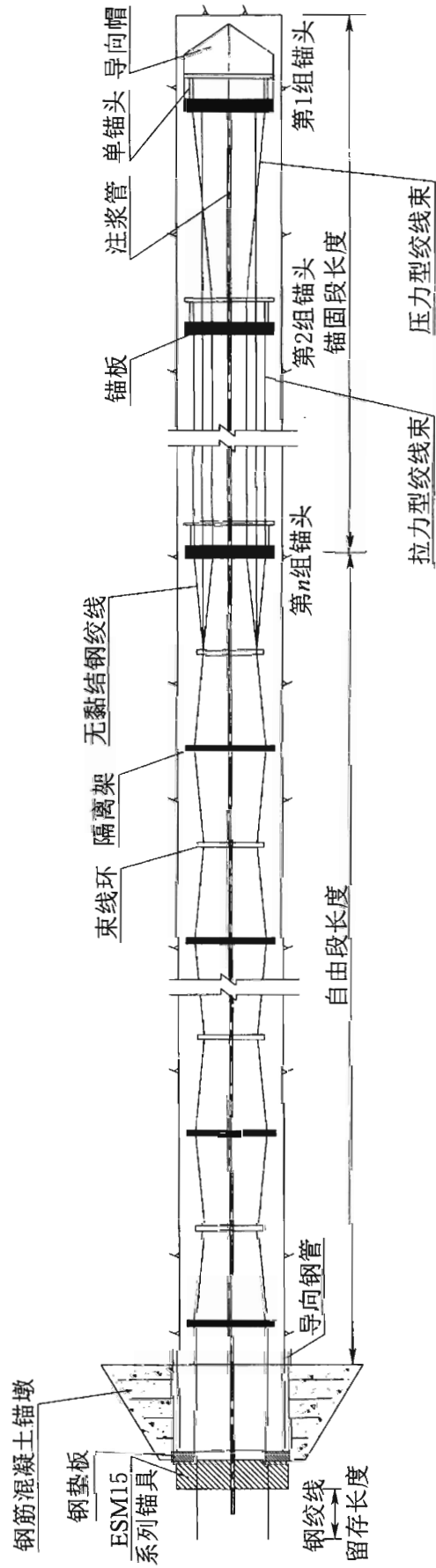


图 6 自由式拉压复合型预应力锚索结构示意图

算确定；自由段是靠锚索材料的弹性伸长形成锚固力的部件，其长度可由不稳定体位置或结构物尺寸决定；锚头是实现张拉和锁定及保持预应力的装置，锚头各部件的高度决定了锚头所需要的材料长度。预应力锚索的总长度是锚固段、自由段、锚头及外露的预留长度之和。

5.1.4 水工混凝土结构中的锚索长度主要由结构物尺寸确定，两端均为锚固段，相对较短，计算锚索长度时要考虑两端的锚固方式。

5.1.5 在预应力锚索中拉力型和压力型的各股钢丝和钢绞线是等长的，而拉力分散型和压力分散型锚索为改善锚固段的应力分布，充分发挥各股钢丝或钢绞线与胶结材料的粘结力，分别在不同部位将钢丝或钢绞线与胶结材料胶结，所以同一根锚索中钢丝或钢绞线长度是不一致的，分散的级数越多，不同长度钢丝或钢绞线分级也越多，所以要进行专门设计，按分散的单元数计算锚索长度。

5.1.6 由于胶结式锚索具有良好的防腐蚀功能，且具有较高的承载能力，再加上近几年来早强型外加剂的出现，实现迅速锚固已不是问题，所以在永久性锚固工程中具有非常明显的优点，得到了广泛采用。

由于机械式锚索可实现迅速张拉的特殊优点，因此还有一定的应用场合，但选择此种锚索时一定要注意被锚固介质的地质条件和设计张拉力不要超过 1000kN。当设计张拉力大于 1000kN 时，应选择胶结式锚固段锚索。

5.1.7 布置在土层或软弱岩体中的预应力锚索，由于锚固段的水泥浆或水泥砂浆与土体或软弱岩体的粘结强度极低，锚固段长度可能要很长，为保证设计锚固力又不能使锚固段过长，采用压力分散型、拉力分散型或拉压复合型锚固段是较好的选择。

5.1.8 锚索的锚固力是靠胶结材料与孔壁的摩阻力来实现的，当锚索设计张拉力较高时，需要的胶结长度较长，但是当采用拉力型或压力型锚索时，锚固段过长，对提高锚索的锚固力并不明

显，国际预应力锚固协会编制的实用规范（FIP）也注意到这一问题，锚固段一般不超过 10m。

当计算的锚固段长度大于 10m 时，要采用改善锚固段结构或采用拉力分散型或压力分散型预应力锚索，这样可以保证锚固段均匀受力，大大地提高锚索的设计张拉力。

预应力锚索设计张拉力大于 2000kN 时，锚索受力较大，如果锚固段围岩质量较差，胶结材料与孔壁的粘接强度较低，锚固段的计算长度较长，此时要选择拉力分散型、压力分散型或拉压复合型锚索。

5.2 锚索体设计

5.2.1 锚索体的结构较为复杂，由于预应力锚固技术的不断发展，锚索的类型也由单一的拉力型发展为拉力分散型、压力型、压力分散型和拉压复合型，各种类型的锚索结构是不同的，也有不同的适用条件。因此，锚索体的结构设计不仅要合理地选择锚索材料、计算需要的锚固力、合理地确定设计张拉力和锚索类型，而且还要根据地质条件、锚索重要程度做好防护设计，还要做好锚索体内部的结构设计，合理的布置隔离架、对中支架、灌浆管、排气管和止浆环等，以确保锚索安装顺利达到最佳的锚固效果。

5.2.2~5.2.4 预应力锚索（杆）钢材强度利用系数问题是预应力锚索设计中最为关键的问题，编制 SL 212—2012 时，统计了 127 个锚固工程的钢材强度利用系数，对锚索钢材强度利用系数情况进行了分析，共有 92 个工程可以查找出钢材强度利用系数指标。这 92 个工程中，34 个边坡锚固工程平均强度利用系数为 0.60；16 个坝基和坝体加固工程平均强度利用系数为 0.61；9 个地下厂房加固工程平均强度利用系数为 0.53；31 个预应力闸墩平均强度利用系数为 0.67；2 个水工隧洞混凝土衬砌环形锚索材料强度利用系数均采用 0.75。统计分析结果见表 5。

表 5 已建工程锚索材料强度利用系数采用情况表

加固项目	统计工程数量	平均强度利用系数	工程采用的最大值	工程采用的最小值	说明
边坡锚固	34	0.60	0.65	0.51	收集 43 个工程资料，可以分析计算有强度利用系数的工程 34 个
坝基、坝体加固	16	0.61	0.69	0.38	—
地下建筑物加固	9	0.53	0.57	0.48	—
预应力闸墩加固	31	0.67	0.705	0.57	—
水工隧洞环形锚索	2	0.75	0.75	0.75	—

在本次标准修订过程中又收集了部分边坡、地下洞室、坝基、隧洞预应力衬砌环形锚索及渡槽采用预应力锚索加固时，采用的钢材强度利用系数的资料。

边坡加固方面主要有四川锦屏水电站，左岸坝头的边坡高 550m，共布置锚索 5000 根，设计吨位 1000kN、2000kN 和 3000kN，总工程量为 $6 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，设计吨位为 1000kN 的锚索钢材强度利用系数为 0.55，2000kN 为 0.64，3000kN 为 0.61，锚索钢材强度利用系数平均为 0.60；湖北平江河水电站进场公路两侧边坡，采用 1500kN 和 2000kN 级锚索加固，其钢材强度利用系数采用 0.64；重庆市金佛山水利枢纽，左岸边坡陡峻，存在倾倒破坏的隐患，采用 1000kN 和 1200kN 锚索加固，钢材强度利用系数分别为 0.48 和 0.58；广西百色水利枢纽，水电站进口布置 44 根锚索，设计张拉力为 1500kN，采用的钢材强度利用系数为 0.58。广西大藤峡水利枢纽的船闸进口边坡，布置 2300kN 级预应力锚索 88 根，1150kN 级 248 根，钢材强度利用系数为 0.59。

地下厂房方面主要有云南省白鹤滩水电站，在地下厂房顶拱布置 499 根对穿锚索，设计锚固力为 2000kN，锁定张拉力为 1800kN，采用的钢材强度利用系数为 0.55，锁定时钢绞线应力

为 918.4MPa，此时钢材强度利用系数为 0.49。

压力输水隧洞环形预应力锚索主要应用于南水北调穿黄工程和吉林省中部城市供水工程，其中穿黄隧洞长 3450m，在 45cm 厚钢筋混凝土衬砌外缘共布置 7560 根、间距 45cm 的环形锚索，设计控制张拉力为 2350kN，采用的钢材强度利用系数为 0.76。

钢筋混凝土渡槽，在南水北调工程中共 16 座，均为预应力结构。关于预应力锚索的应力控制，不同的设计部门采用了不同的数值，但均在 0.70~0.75 范围之内。贵州省黔中水利枢纽一期工程总干渠的草地坡渡槽采用连续钢构渡槽，横向、纵向均采用了预应力锚索，采用的控制应力系数为 0.72。

钢筋混凝土预应力闸墩中使用预应力锚索的工程越来越多，其中最大的工程当属广西大藤峡水利枢纽工程，高孔中共布置 3 层，主锚索设计张拉力 5600kN，永存锚固力为 4600kN，超张拉力 6100kN；次锚索设计张拉力 2800kN，永存锚固力为 2300kN，超张拉力 3100kN，其钢材强度利用系数为 0.60。

根据大量的工程资料，本次修订对岩（土）体中的锚固工程仍保留了“采用预应力钢丝或钢绞线制作锚索时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 60%（即强度利用系数为 0.60）；采用预应力混凝土用螺纹钢筋或高强自钻式杆材时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 65%（即强度利用系数 0.65）”的规定；对水工混凝土结构中的预应力锚索，采用预应力钢绞线时，钢材强度利用系数不宜大于材料抗拉强度标准值的 65%（即强度利用系数为 0.65）；采用预应力混凝土用螺纹钢筋或自钻式锚杆材料时，一般不大于钢材标准值的 70%（即强度利用系数为 0.70）。

钢材强度利用系数不宜过高，但也不宜低于 0.60 的规定主要原因有下列三点：

(1) 锚索由多股钢丝和钢绞线组成，尤其是高吨位锚索，数十根钢绞线张拉时，各股钢丝或钢绞线受力是不均匀的，编制

SL 212—98 时统计了吉林省白山拱坝、丰满水电站全面治理（重建）工程、黑龙江镜泊湖水电站和河南省黄河小浪底水利枢纽等 4 个工程所使用的锚索，各股钢绞线的受力不均匀系数为 0.40~1.67，本次又加入了湖北省三峡水利枢纽工程预应力锚索的观测结果，1000kN 级预应力锚索受力不均匀系数为 0.91~1.09，3000kN 级为 0.84~1.16。

(2) 锚索受力较大，在长期高应力状态下工作的锚索，有应力腐蚀的可能。

(3) 边坡、地下工程加固中，因受地质条件的影响，不可预见的因素较多，锚索受力条件具有不确定性，要留有一定的安全裕量。

在预应力锚索的设计中，选择锚索材料的强度利用系数时要注意下列四个问题：

(1) 当被锚固介质中存在腐蚀性质时，要采用较小的强度利用系数。

(2) 当采用压力分散型、拉力分散型预应力锚索时，由于锚索中钢绞线的长度不一致，短的锚索在同样变形条件下应力较大，长的应力小些，因此要处理好强度利用系数采用值。

(3) 围岩加固后，被加固的岩体或结构物仍然会发生较大变形，这主要和地质条件有关，锚固设计时要认真分析地质资料，预测可能发生位移的量值。如果加固后可能产生的位移值较大，势必增大锚索材料的应力，锚索越短适应变形能力越小，为了确保预应力锚索的安全使用，要预留较大的安全裕度，此时要降低锚索材料的强度利用系数。

(4) 混凝土结构，由于介质均匀、荷载明确、受力条件清楚、锚索相对较短，所以锚固设计相对简单，但锚索张拉时各根钢绞线受力不均匀性的问题仍然存在，所以还要考虑锚索材料强度利用系数问题。影响锚索材料强度利用系数选取的主要因素为结构受力条件、锚索长短和加固后可能产生的变形大小等，经综合分析计算后确定锚索材料强度利用系数。

5.2.5~5.2.7 隔离架的作用是保证锚索安装后顺直，不交叉、不弯曲、不与孔壁接触，以减少摩阻损失，陡倾角布置的锚索隔离架的间距可大些，水平或缓倾角布置的锚索，隔离架间距建议小些。

隔离架一般用钢板制作，也可以用硬质塑料制作，厚度不宜小于 10mm，目的是保证张拉时不损坏隔离架。隔离架设计时，不仅要满足穿索需要，还应预留灌浆管通道，保证注浆顺利。

5.2.8 为了有效地做好预应力锚索的防护，应保证预应力钢绞线有 20mm 以上的保护层厚度。

5.3 锚固段结构设计

5.3.1 锚固段的胶结长度，目前多数工程仍采用式 (5.3.1-1) 和式 (5.3.1-2) 进行计算确定，但此公式是在假定胶结材料沿孔壁的摩阻力和钢材与胶结材料的握裹力均匀分布的条件下进行计算的，而实际上，胶结材料沿孔壁的摩阻力与钢材和胶结材料的握裹力分布是不均匀的，且沿孔壁呈倒三角形分布，即锚固段上端大，并向孔底逐渐衰减，至孔底其数值已很小。该公式的计算结果是控制性的，只要参数选择合理，是可以作为设计使用的。

5.3.2 因为锚固段胶结材料与孔壁的摩阻力分布近似呈倒三角形，且沿孔壁衰减，至孔底其摩阻力已经很小，锚固段越长，摩阻力衰减越大，所以锚固段加长，锚固力提高值并不明显，从经济角度出发，靠增加锚固段长度来提高锚固力，并不经济，国际预应力锚固协会编制的实用规范 (FIP) 规定锚固段长度不宜超过 10m。

为了提高锚固段的锚固效果，锚固段部位孔壁尽可能粗糙，以提高胶结材料与孔壁的粘结强度。经分析比较，当计算的锚固段较长时可采用拉力分散型或压力分散型锚索。

5.3.3 水泥浆或水泥砂浆不仅有良好的胶结性能，而且对锚索有较好的防护性能，为了保证胶结材料发挥最佳的锚固效果，胶

结材料强度要根据围岩条件确定，围岩较完整、强度较高时，可选择高强度等级的水泥浆或水泥砂浆；围岩较破碎、强度较低时，水泥浆或水泥砂浆胶结材料的抗压强度也可适当降低、一般条件下胶结材料的抗压强度不宜低于 35MPa。对锚固段注浆体既要保证其强度与围岩条件相适应，又要保证注浆密实。在水泥砂浆配比中加入适量减水剂、膨胀剂，有助于提高砂浆强度和密实性。

5.3.4 拉力分散型或压力分散型锚索的设计张拉力是分散在每个锚固单元的，划分的锚固单元级数越多，锚固段受力越均匀，但级数越多，锚固段的结构越复杂，所以要认真做好锚固段的结构设计，合理确定每个锚固单元的承载能力，并保证整根锚索的总锚固力达到设计要求。

5.4 锚头结构设计

5.4.1 锚头组成部件较多，主要有锚墩、孔口承压板、工作锚、工具锚等。锚墩和孔口承压板的作用是平整孔口起伏不平的岩体，使锚索同轴受力，保证施加的预应力均匀地传递至岩体；工具锚的作用是实现张拉，由锚板和夹片组成，保证张拉千斤顶进行张拉时各股钢丝或钢绞线均匀伸长和受力；工作锚是预应力锚索形成永久存在的预应力的部件，它负责锚索锁定后的预应力保持；限位板的作用是在锚索张拉时限制夹片松开钢绞线可以自由伸长又不产生过大位移，锚索锁定时还能保证夹紧钢绞线并保证钢绞线回缩量不大于 5mm 的部件。无论是张拉力的施加和张拉力的锁定，其质量均与工具锚和工作锚的锚具质量有关，所以要求两种锚具硬度适中，张拉时不损伤钢丝或钢绞线，锁定时回缩量不大于 5mm。

5.4.2 钢筋混凝土锚墩为梯形结构，主要目的是为增大锚墩与岩（土）体结合部位面积，或减小传递给岩（土）体的应力，从而减小岩（土）体的压缩变形并减小岩（土）体的徐变，进而减少锚索的预应力损失。采用钢制锚墩主要作用是加快施工速度，

实现尽早进行张拉作业。

5.4.3 锚墩承压面上一定要设置钢质承压板，厚度与张拉荷载有关，张拉力大，承压板要厚；张拉力小，可薄些，但不宜小于20mm。承压板表面应平整光洁，保证锚墩均匀传递张拉应力。

5.4.4 组成锚头各部件的尺寸，决定了锚头部位钢绞线的长度，在计算锚头部位钢绞线长度时，为保证顺利实施张拉作业和锚头保护的需要，要预留一定裕量。

5.4.5 孔口锚墩是传递张拉力的混凝土或钢筋混凝土构件，一般做成梯形，顶部尺寸应根据张拉设备尺寸确定；锚墩底部尺寸和接触部位的岩体质量有关，当孔口岩体破碎、承载力低时，锚墩底部尺寸要大些；当孔口岩体质量较好、承载能力大时，锚墩底部尺寸可小些。由于施加的锚固力较大，所以要求锚墩混凝土强度等级不应低于C30，必要时要配筋。当锚固工程在负温条件下工作时，锚墩混凝土还应有抗冻要求。

5.4.6 锚头一般情况下虽凸出于坡面，但不会受到外部荷载的影响，但也有一部分锚索布置在水中，如船闸边坡水下部分的锚索，行船时可能会发生船体与锚头相碰撞的情况，此时锚头就要进行防护，避免船体碰撞锚头，造成锚头损坏导致锚固力降低或失效。

5.4.7 在边坡锚固中，往往开挖边坡岩（土）体软弱、破碎、特别是土质边坡，为保证边坡加固的整体性，将锚墩与边坡的钢筋混凝土格梁相连，锚头布置在格梁的交点处。格梁的布置纵向布置与设计坡比一致，横向要与边坡走向一致。这一方面可以保证锚固效果最佳，另一方面也可保证外观质量。

5.5 张拉程序设计

5.5.1 按10%~20%的设计张拉力实施预张拉是保证预应力锚索正式张拉时各股钢丝或钢绞线在相同长度条件下，同时起步施加张拉力，是保证各股钢丝或钢绞线应力均匀的重要措施。实施预张拉可采用小型张拉千斤顶逐股钢丝或钢绞线进行，并逐股

锁定。

5.5.2 分级施加张拉力和每级张拉力持荷 5min，是为了预应力钢丝或钢绞线的变形较均匀和充分，有时间进行自行调整。每级荷载施加后，测定钢丝或钢绞线的实际伸长值是为了分析预应力锚索的实际受力情况，分析确定实际施加的预应力的的大小，这是每根锚索施加张拉力时要做的，而且要准确记录。

实施超张拉，是考虑了钢绞线回缩，锚具压缩等产生的预应力损失，是保证预应力锚索锁定后能够保存设计所需要的设计张拉力值。一般情况下规范允许的回缩量为 5mm，按设计张拉力的 110%施加超张拉力可以满足锚索锁定后达到设计张拉力的要求锚具。

由于张拉设备本身存在一定的摩阻力，实测出力会存在一定误差，所以确定每根预应力锚索的实际张拉力时，钢绞线的实际伸长值要与张拉设备的出力联合进行综合分析才能准确地确定锚索的实际锚固力。

5.5.3 拉力分散型、压力分散型和拉压复合型锚索锚固段分级较多，长短不一，结构较为复杂，如何保证每根钢绞线受力均匀是十分重要的问题，应专门研究合理确定张拉程序。

5.5.4 对于锚索数量较多的锚固工程，张拉程序建议专门设计，其设计内容包括张拉顺序、每根锚索首次张拉的张拉力、张拉次数，以避免某根锚索张拉时应力集中，对加固对象造成损害。膨胀性岩体和岩爆发生部位，围岩变形有特殊的变化规律。膨胀性岩层由于组成物质不同，膨胀力、膨胀变形均不同；岩爆地区由于岩体初始应力大小不同，释放的规律也不同。这些特殊问题一般是通过原位监测结果进行分析，确定时空变形规律后，再根据这些监测结果因地制宜地确定锚索的张拉程序。

压力隧洞布置的环形锚索是为了提高压力引水隧洞承受内水压力的能力，由于衬砌厚度较薄，施加环向应力时，隧洞衬砌的稳定是要考虑的问题，因此要研究环形锚索的张拉次序和张拉程序。

预应力锚索吨位较高时，水工结构受力较大，甚至产生应力集中，为缓解结构的应力集中也建议研究高吨位锚索的张拉次序和张拉程序。

闸墩布置的锚索种类较多，如闸墩中的主锚索、次锚索，各种锚索长短不一，设计张拉力也不尽相同，为保证混凝土结构中应力均匀，建议专门研究张拉顺序和张拉程序。

6 锚固设计

6.1 岩质边坡锚固

6.1.1 在水利水电工程建设中，几乎所有的工程均会遇到岩质边坡不稳定问题，这些不稳定边坡可能是自然边坡，也可能是人工开挖的边坡。对不稳定边坡的加固方法很多，有的采用支撑结构，有的采用抗滑桩，有的采用锚固洞，也有的采用锚杆或预应力锚索，为了减少不稳定边坡的下滑力，也有的工程采用削坡减压等措施。随着预应力锚固技术的发展，采用以预应力锚索为主的综合加固方法是最为有效的工程措施，不仅施工方便、经济，最主要的是可以充分利用不稳定块体的阻滑作用，提高滑动面的摩阻参数，是一种主动的加固方法，也是一种对围岩扰动小、最有利于环境保护的加固措施，所以对边坡采用预应力锚索加固在工程中得到了广泛和大量的应用。

为了系统地总结采用预应力锚索对不稳定边坡的加固经验，在历次编制和修订 SL 212 时，收集了近 50 座水利水电工程边坡锚固的工程实例，其中应用吨位较大、预应力锚索数量较多、锚索长度较长的工程：如广西壮族自治区龙滩水电站高边坡预应力锚索设计张拉力 3000kN，数量达 3000 根；云南省漫湾水电站边坡预应力锚索最大设计张拉力 3000kN，锚索总根数 2168 根；湖北省三峡水电站船闸高边坡及中隔墩，最大设计张拉力 3000kN，锚索总根数为 2113 根；四川省锦屏一级水电站预应力锚索最大设计张拉力达 3000kN，总根数 5000 根，单根锚索最长达 120m；云南省小湾水电站边坡锚索最大设计张拉力 6000kN，锚索总根数 1662 根，单根锚索长度为 80m。此外，小浪底引水发电系统的进出口边坡、百色水利枢纽进口边坡、大藤峡水利枢纽船闸进口边坡以及贵州夹岩水利枢纽工程、重庆金佛山右岸山坡以及新疆阿尔塔什水利枢纽等工程高陡边坡都采用了预应力锚索加固。

边坡的失稳方式主要有滑动、倾倒和变形等，滑动破坏时要以稳定分析结果由锚索承担的下滑力确定锚固力；倾倒破坏时，要以可能倾倒的不稳定块体体积确定锚固力；变形破坏时，要以限制有害变形发展确定锚固力，上述破坏形式锚索布置要遵照 SL 386—2007《水利水电工程边坡设计规范》第 6.6.7 条原则布置。

关于采用预应力锚索（杆）加固后的边坡稳定安全系数，建议采用 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定，见表 6。

表 6 边坡加固后抗滑稳定安全系数标准

运用条件	边 坡 级 别				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
正常运用条件	1.30~1.25	1.25~1.20	1.20~1.15	1.15~1.10	1.10~1.05
非常运用条件 I	1.25~1.20	1.20~1.15	1.15~1.10	1.10~1.05	
非常运用条件 II	1.15~1.10	1.10~1.05		1.05~1.00	

该标准 3.4.2 条还规定“经论证，破坏后给社会、经济和环境带来重大影响的 1 级边坡，在正常运用条件下的抗滑稳定安全系数可取 1.30~1.50”。

关于抗滑稳定安全系数标准的具体应用还要遵守 SL 386—2007 第 3.4.3 条、第 3.4.4 条和第 3.4.5 条的规定。

6.1.2 边坡加固的预应力锚索（杆）布置与边坡失稳的总下滑力、软弱结构面的位置及单根预应力锚索的设计锚固力有关，要通过计算比较，确定其布置。

一般情况下，预应力锚索（杆）的总长度为计算确定的锚固段长度、自由段长度（即岩面至滑动面的距离）和锚头段长度之和。对单根锚索来讲，由于拉力型、压力型预应力锚索，各股钢丝或钢绞线的长度是一致的，但压力分散型、拉力分散型预应力锚索各股钢丝或钢绞线由于锚固段的锚固位置不同，钢丝或钢绞线是不等长的。对各根锚索而言，由于滑动面的位置不同，各根锚索长度也可能是不一致的，所以各根锚索的长度要根据软弱结

构面的位置、产状等进行计算确定。

关于预应力锚索的间距、排距，本标准建议为 3~6m，是从对被锚固介质或不稳定岩体提供均匀的锚固力提出的，在实际设计时，要根据锚索（杆）数量，设计张拉力大小及总锚固力综合计算确定。

6.1.3 对于沿某一软弱结构面滑动破坏的边坡，锚索（杆）的布置要以提供最大阻力为原则。最有效的布置方向为逆滑动方向布置。但由于受施工条件、滑动体的边界条件限制，只能以一定的角度布置，所以要经过综合比较，选择最优的锚固方向，以达到最有效的加固效果。

图 7 中， θ 为锚索与滑动面的夹角， β 为锚索与水平面的夹角， α 为滑动面的倾角，它们有如下关系：

$$\alpha = \theta \pm \beta \quad (1)$$

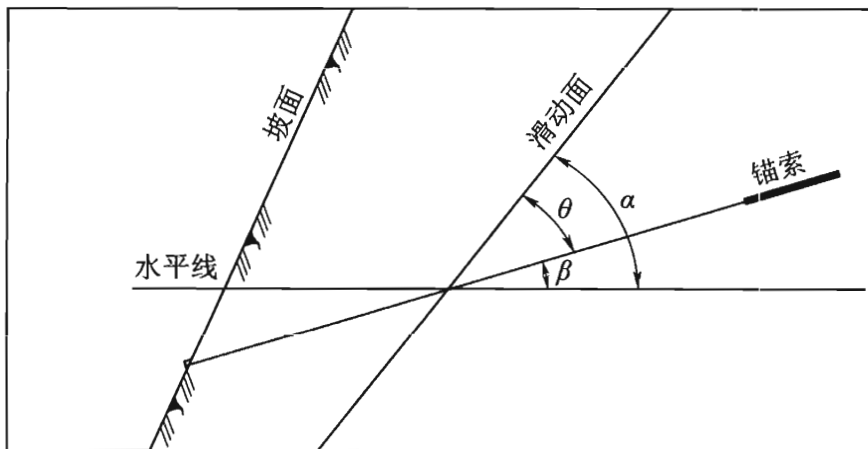


图 7 最优锚固角

由图 7 可知，由锚索（杆）提供的抗力为

$$P_{抗} = P \sin \theta \tan \varphi + P \cos \theta \quad (2)$$

式中 φ ——滑动面上的摩擦角。

当 $\theta_{优} = \varphi$ 时，可得最大抗滑力为 $P_{抗max} = P / \cos \varphi$ ，但此时锚索最长，不经济。综合比较后，当 $\theta_{优} = 45^\circ + \varphi/2$ 时，得到最优的锚固角度，因此最优的锚固角度则为

$$\beta_{优} = \alpha - (45^\circ + \varphi/2) \quad (3)$$

但有些时候，也不可能按最优锚固角进行布置，此时可对锚固角进行适当调整，但必须保证提供较好的锚固效果。

当确定的最优锚固角度为 $-10^{\circ} < \beta < +10^{\circ}$ 时，锚索的注浆不易密实，因而会影响锚固的效果，因此需要调整至 $\leq -10^{\circ}$ 或 $\geq +10^{\circ}$ 。

6.1.4 属于倾倒破坏的边坡，往往伴随存在与边坡平行的卸荷裂隙，由于卸荷裂隙的存在构成了一定体积的倾倒体，倾倒体的失稳是瞬时发生的，它将给附近的水工建筑物或施工人员和设备造成较大的损失，也给工程的安全运行带来灾难性的隐患。

这种破坏形式的边坡采用预应力锚索是最有效的加固措施，锚索提供的锚固力应按倾倒体体积确定，锚索布置方向以垂直卸荷裂隙为佳。例如，重庆市金佛山水利枢纽坝址上游近100m高陡边坡与平行库岸的卸荷裂隙组成的 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 倾倒体，采用1000kN和1200kN级预应力锚索加固，效果较好。

6.1.5 当孔口岩体较为破碎或风化较为严重、锚墩受力较大时，岩体会产生较大的压缩变形，岩体流变性较大也会造成预应力损失加大，因此需要加大锚墩与围岩的接触面积，以减小接触压力。也有不少工程采用钢筋混凝土网格梁加大锚墩受力面积，可使加固结构形成整体，提高边坡的稳定程度。

6.1.6 在岩质边坡锚固设计中，排水是十分重要的问题。许多边坡的失稳，是由于水的浸入削弱了结构面的强度，造成阻滑力减小。所以，无论采取哪种加固方案，都要首先解决排水问题。岩质边坡顶部的水要截住，使之不进入滑动面或被锚固体，同时结构面中或边坡中的水要设法尽快排出。施工用水也要有去污及排放规划，设置固定的排水通道及去污设施。

6.2 土质边坡锚固

6.2.1 土质边坡的稳定问题是工程设计中经常遇到的问题，尤其是在科学技术发展的今天，为保护环境、维护原生态，在工程建设中对不稳定土质边坡往往不采用大开挖和深削坡的工程措

施，而采用挡墙加预应力锚索或抗滑桩加预应力锚索的综合性加固措施。

土质边坡一般为天然边坡，不稳定边坡的滑动是由于土体的抗剪强度较小，其滑动面一般呈圆弧形，进行稳定分析时可采用 SL 386—2007 第 5.2.7 条推荐的简化毕肖普（Simplified Bishop）法和摩根斯顿-普赖斯法（Morgenstern-Price）进行抗滑稳定分析计算；当滑动面呈非圆弧形时，一般采用摩根斯顿-普赖斯法和不平衡推力法进行抗滑稳定计算。对不稳定块体施加预应力后，其边坡稳定安全系数应符合 SL 386—2007 第 3.4.2 条的规定。

6.2.2 当不稳定边坡的滑动面在土体中时，锚固段应设置在稳定的土体中，因土体本身力学指标较低，胶结材料与土体的粘结力不大，锚固段提供的锚固力有限，当需要预应力锚索提供较高锚固力时，应适当扩大锚索孔直径，或采用压力分散型锚索，也可将锚固段的不同部位局部扩大使锚固段呈“糖葫芦状”，以提高锚固段的承载能力。江苏省镇江市跨越长江的 50 万 kV 高压输电铁塔所在的五峰山山体，其土质边坡锚固就采用了这种做法，从而提高了预应力锚索的锚固力。

6.2.3 土体不稳定边坡往往会发生在岩体和土体的结合面，此时锚固段应设置于岩体中，但要考虑结合面处岩体可能风化较严重，其力学参数可能较低，锚固段要适当加深，使锚索锚固于完整、稳定的岩体中。

6.2.4 土体中锚索的隔离架加密布置是防止锚索与土体接触，加强锚索防护的措施。

6.2.5 土体中锚索的锚墩置于土层上，土的压缩系数较大，为了提高锚头的锚固效果，设置混凝土锚墩是十分重要的。各根锚索的锚墩与纵横交叉的混凝土格梁相连，是为了加强锚固结构的整体性。

6.2.6 土质边坡顶部的截水、排水非常重要，是保证被加固土质边坡稳定的措施之一。

6.3 地下洞室锚固

6.3.1 地下水工建筑物包括隧洞、地下厂房及与地下厂房相关的洞室群，采用预应力锚索加固不稳定岩体往往是最经济的方案。特别是大型地下厂房，采用预应力锚索系统加固顶拱及边墙非常普遍，而且布置的预应力锚索非常多。例如四川省与云南省交界的溪洛渡地下厂房开挖跨度 32m，最大开挖高度 75.1m，连同主变室和尾水洞室共布置 1500kN 和 1750kN 级预应力锚索共 5716 根；青海省拉西瓦水电站地下厂房布置 1500kN 和 2000kN 级预应力锚索共 1500 根；云南省大朝山水电站地下厂房布置 1600kN 级预应力锚索 1117 根；河南省黄河小浪底地下厂房顶拱布置 1500kN 级预应力锚索 325 根。

四川省与云南省交界的白鹤滩水电站总装机容量为 16000MW，主厂房开挖尺寸为 438m×34m×88.7m（长×宽×高），在厂房拱部布置 4 排 2000kN 级对穿锚索，间距分别为 3.6m、4.2m 和 4.8m，锚索一端为厂房顶拱高程 624.6m 处，另一端在顶拱高程 652m 处的两个锚固洞中，共 499 根，由于地质条件比预计的好，为此 2000kN 级锚索减少至 256 根，同时增加 111 根 1000kN 级有粘结对穿锚索，为限制厂房拱顶位移，2000kN 级锚索张拉锁定荷载为 1800kN。四川锦屏水电站地下厂房开挖尺寸为 204.5m×25.9m×68.8m（长×宽×高），布置 2000kN、1750kN 和 1000kN 级预应力锚索，仅监测锚索就布置了 9 个监测断面，32 台测力计，锚索锁定荷载为设计张拉力的 85%。地下洞室开挖后，由于应力重新分布形成的一定范围的塑性区、压剪破坏区，可通过有限元法进行分析；由软弱结构面形成的下滑体和坍塌体可通过极限平衡法计算。

对地下工程围岩的稳定分析要遵守 SL 266—2014《水电站厂房设计规范》第 7.2 节的规定。

6.3.2、6.3.3 地下洞室的塑性区和压剪破坏区是由洞室开挖后在岩体初始应力作用下，由于应力重新分布而产生的，在塑性区

和压剪破坏区的岩体中拉应力可能超限，为此需施加一定数值的预压应力，以改善岩体中的应力条件，施加预应力的范围和范围主要由岩体中拉应力大小和塑性区的范围确定。由于塑性区和压剪破坏区的分布面积较大，对这些部位的加固属于系统性加固，通常情况下，是采用以预应力锚索为主，辅以长张拉锚杆（或长砂浆锚杆）、钢筋网喷射混凝土（或钢纤维、树脂纤维喷射混凝土）等综合的加固措施来抵制塑性变形的发生。

许多时候由于洞室尺寸较大，开挖后将产生较大的收缩变形，为限制收缩变形在一定数量级之内，也要采用预应力锚索施加一定数值的预压应力，防止有害变形的发展。

锚索提供的支护抗力与施加的预应力大小和单根锚索的作用面积有关，由预应力锚索提供的支护抗力要大于不稳定岩体所需要的最小支护抗力，并有一定的安全储备。

大型地下洞室的开挖尺寸较大，目前我国在金沙江、雅砻江修建的水电站地下厂房开挖跨度均大于 30m，开挖高度大于 70m，又采用分部开挖，布置的预应力锚索又是开挖完一层施工一层，开挖下层时由于围岩变形的空间效应影响，上层变形加大，此时由于上层锚索已施工完成，并起到了限制上部围岩变形的作用，这就势必使锚索应力增加。如果变形较大，锚索受力也要增加，例如溪洛渡水电站及荒沟抽水蓄能电站的地下厂房边墙锚索，开挖中有的锚索应力加大了 30% 以上，为此采取了降低锁定应力的措施，以适应由变形引起的应力增加。

6.3.4 预应力锚索要穿越塑性区，锚固段要设置在围岩的弹性区内，才能保证加固有效。对于较短的锚索而言，锚索间距可按自由段长度的一半考虑，但对于长锚索而言，按锚索长度的一半布置间距可能过大，根据已建工程的经验锚索最小间距不宜小于 3.0m。

为了改善锚固段的应力状况，防止锚固段在同一断面的应力集中，对系统锚索数量较多且锚固区岩体质量较差部位，采用长短相间的布置方式。

6.3.5 为了提高预应力锚索的加固效果，增加围岩的稳定性和整体性，在预应力锚索之间均布置了砂浆锚杆或张拉锚杆及喷射混凝土覆盖开挖岩面。

6.3.6 在地下工程中采用预应力锚索加固的主要部位为顶拱和高边墙。拱部的预应力锚索主要作用有两个：一为防止拱部存在的不利组合的软弱结构面塌滑，此时要按拱部可能发生塌滑的岩体重量计算锚固力；二为限制拱部开挖后，由于应力重新调整而产生的过大变形，采用预应力锚索使变形控制在允许范围之内。

6.3.7 对高边墙而言，锚索的主要作用是限制边墙开挖后由于初始地应力的重新调整而产生的有害变形发展，使高边墙的变形控制在允许范围之内，保证边墙的稳定，此时预应力锚索设计锚固力将按锚索提供的支护抗力大小来确定。当然也会存在不利组合结构面的情况，此时计算锚固力时就要考虑塌滑体周围岩体的嵌固作用。

6.3.8 地下厂房与主变室的距离一般较近，其隔墙厚度约为20~30m，此处布置的锚索最好采用对穿式锚索加固其岩墙，施工较为方便、快捷，大多数对穿式锚索实行双向张拉，有利于减少锚索的摩阻损失，提高锚固效果。

6.4 岩壁吊车梁锚固

6.4.1 岩壁吊车梁是采用锚杆或锚索将钢筋混凝土吊车梁锚固在地下厂房顶拱两侧预留的岩台上，吊车荷载通过钢筋混凝土吊车梁传到岩壁。采用岩壁吊车梁可缩小地下厂房的开挖跨度，及早形成起重能力，加快施工进度。我国已建和在建的地下厂房中，绝大多数采用了岩壁吊车梁，已建成的岩壁吊车梁大都做过荷载试验，在吊车荷载下实测的锚杆应力和变位都较计算值小。从运行与使用情况看，岩壁吊车梁也比较安全可靠。因此，岩壁吊车梁在水电站地下厂房或其他大跨度地下洞室中越来越被广泛地应用。例如：河南省黄河小浪底水利枢纽地下厂房的岩壁吊车梁长度219m，最大轮压800kN，吊车梁上部布置两排间距

1.0m 预应力锚索，下部布置一排，设计张拉力 500kN；湖北省三峡水电站右岸地下厂房和云南省小湾水电站地下厂房的岩壁吊车梁均布置了 500kN 级预应力锚索，没有布置预应力锚索的岩壁吊车梁也都布置了长锚杆。

用于岩壁吊车梁锚固的预应力锚（索）杆，选用预应力混凝土用螺纹钢筋的主要理由是预应力混凝土用螺纹钢筋强度大，与混凝土握裹力好，安装方便，且有一定的刚度。

6.4.2 岩壁吊车梁是布置在边墙稳定的围岩上，在岩壁吊车梁锚固力的计算中，经常采用的方法是刚体静力平衡法、弹塑性有限元分析法等来确定锚索或锚杆的锚固力。

岩壁吊车梁采用的安全系数十分重要，而已建工程采用的安全系数值有着很大的差异。例如吉林省白山水电站（尾水闸室）采用的安全系数 $K=1.65$ ；云南省鲁布革地下厂房采用的安全系数 $K=2.0$ ；广东省广州抽水蓄能电站一期、二期地下厂房均采用安全系数 $K=2.5$ ；挪威的 Saurdal 水电站采用的安全系数 $K=1.36\sim 1.64$ ；辽宁省蒲石河抽水蓄能电站采用的安全系数 $K=1.8$ 。经综合比较分析，一些专家建议：1 级建筑物可采用安全系数 $K=1.65$ ，2 级建筑物可采用安全系数 $K=1.5$ 。为保证吊车梁的安全运行，对于 1 级、2 级、3 级建筑物的岩壁吊车梁，本标准推荐采用的安全系数分别为 2.2、2.0 和 1.8。

当采用刚体平衡法确定单位梁长中预应力锚索承担的拉力后，可按本条确定预应力锚索的用量。

6.4.3 地下厂房开挖，尤其是岩壁吊车梁部位的开挖，虽然都采用光面控制爆破，但仍然存在一定的松弛区域，其松弛区的影响深度一般小于 1.0m，所以吊车梁锚索（杆）的锚固长度在计算的基础上再加 1.0m 的松弛深度影响区。在松弛区范围的锚筋，要外包沥青或其他材料，以减少该范围的锚索（杆）与岩壁的摩阻力，这样可避免孔口附近出现较高的局部应力。这一方法还能减小施工期因下部岩石开挖，边墙围岩变形加大而引起的锚（索）杆表层局部应力的增大。

6.4.4 为使锚索较好地承受垂直方向的吊车荷载，锚索（杆）与水平线的夹角越大越好，但当夹角过大时，锚索（杆）上方的岩体过薄，不利于吊车梁的稳定，所以锚索（杆）与水平线的夹角可按设计需要布置，一般取 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。

6.4.5 岩壁吊车梁的稳定和所受的荷载大部分是依靠布置在吊车梁中的锚索（杆）承担，由于吊车梁的轮压较大，再加上岩体变形比较复杂，为保证吊车梁的稳定，要布置一定数量的监测仪器进行观测。

6.5 混凝土坝锚固

6.5.1 大坝或其他水工建筑物的基础中，往往存在对坝基稳定有一定影响的软弱结构面，或者由于基础岩体软弱、破碎，使大坝或其他水工建筑物的抗滑稳定安全系数不能满足标准要求。为了增加大坝或其他水工建筑物的稳定，采用预应力锚索是经济、有效的加固措施之一。例如安徽省梅山水库大坝高 88.24m，1958 年投入运行，由于坝基存在的断层、裂隙相互切割，完整性很差，再加上缓倾角节理的存在，造成右岸坝头和坝基不稳定，经复核抗滑安全系数仅为 0.95。为此于 1962 年采用了预应力锚索进行加固，共安装预应力锚索 110 根，施加预压应力 277140kN。加固后坝基抗滑稳定安全系数提高到 1.05，满足了大坝稳定要求，同时减少了渗漏量。在国内采用预应力锚索对坝基加固的工程还有湖南省麻石支墩大头坝基础，共安装预应力锚索 99 根，施加的锚固力 220500kN；湖南省双牌溢流坝下游，共安装预应力锚索 274 根，提供锚固力 893750kN；吉林省丰满大坝（老坝）共安装预应力锚索 361 根，提供的总锚固力为 707250kN，还在 51 号坝段安装了 6000kN 级预应力锚索，其中部分锚索的锚固段在基础之中。云南省小湾水电站在左右两岸坝址贴角及紧邻大坝的抗力体部位布置了 462 根 6000kN 级预应力锚索。陕西省石泉大坝为消除坝踵拉应力，在 7 个非溢流坝段中共布置 29 根锚固吨位为 6000kN 级和 1 根张拉吨位为 8000kN 级

预应力锚索，设计总张拉荷载 176.6MN。北京市永定河下马岭珠窝大坝，始建于 1958 年，1961 年建成发电。运行 30 多年，上游底板拉裂，稳定不足，采用 700kN 锚索进行了加固，共布置拉力型锚索 29 根，拉压复合型锚索 20 根，总锚固力为 33614kN。国外也有不少工程采用了预应力锚索对其基础进行了加固。

为满足防洪、供水或增加发电量的需要，需对已建坝体进行改造、加高。但坝体加高后，如何解决坝体抗滑稳定是一个关键问题。通过预应力锚索，对坝体提供足够的正应力，则是解决坝体稳定的重要途径之一，而且也是十分经济的办法，见图 8 (a)；由于运行或其他的原因，已修建的坝体或其他水工建筑物，出现裂缝和其他局部破坏，影响工程的安全运行，需要采取加固补强措施，应用预应力锚固技术也是非常简便可行的方法，见图 8 (b)。

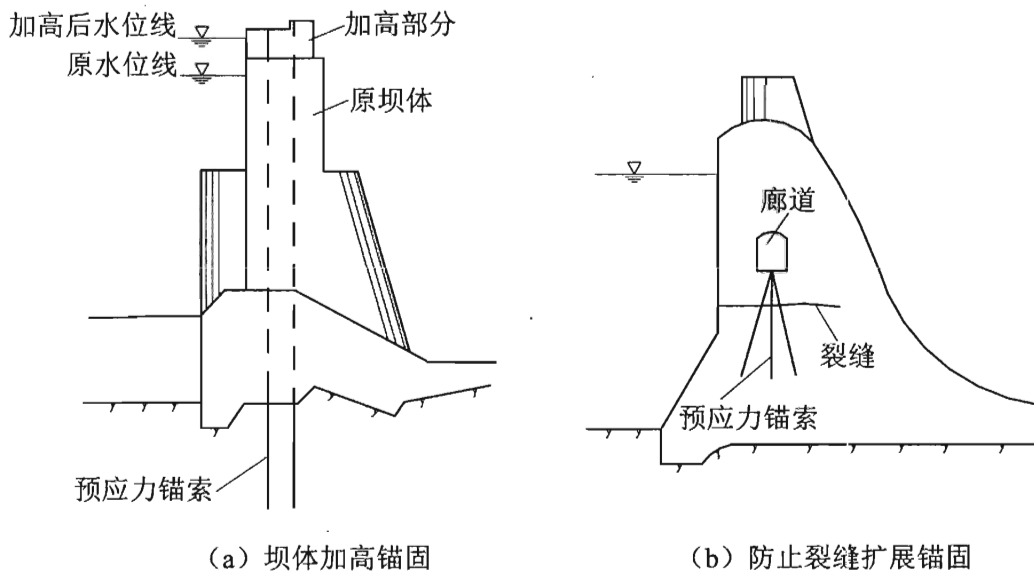


图 8 坝体加高与补强示意图

例如，吉林省丰满水电站始建于 1937 年，1953 年大坝全面建成，迄今为止已运行近 80 年，由于设计与施工先天不足，大坝混凝土存在渗漏、低强、抗冻标号低、整体性差等缺陷，20 世纪 80 年代对大坝进行了加固处理，除采用灌浆补强外，还采

用了预应力锚固技术。预应力锚索施工不仅布置在坝体不同部位，还有部分锚索从坝顶或廊道伸入坝基。单根预应力锚索施加预应力最大达 6000kN，锚索长度达 61.2m，对提高坝体稳定起到了良好的作用。国内对坝体及水工建筑物加固的还有吉林省白山、辽宁省参窝、河北省潘家口等工程。

由于坝型不同，对基础稳定的要求是不同的，稳定性分析的方法和标准也有区别。为了使基础稳定适应相应上部结构的要求，要采用与上部结构类型相适应的标准规定，对不稳定部位的基础进行加固。加固后，由预应力锚索提供的阻滑力计入总稳定荷载，再校核结构物的稳定是否满足相应标准的要求。

对坝基施加锚固荷载，增大了坝基或坝体的正应力。为防止由于正应力的增加而引起的破坏，要求校核由锚固荷载引起的正应力增加幅度。一般情况下，原有荷载和锚固荷载之和而引起的正应力值不得大于坝基的允许应力，而坝基或坝体的拉应力也要在允许范围内，并满足相应标准的要求。

6.5.2 坝基锚固大部在坝基廊道或下游坝坡施工，施工场地狭小，锚索布置和锚固角度受到一定限制，选择的锚固角度和最优锚固角可能发生一定偏差，所以要经技术比较进行调整。

6.5.3 坝基的稳定往往与坝基存在的软弱结构面有关，软弱结构面的产状又决定了预应力锚索的布置，为了寻求最好的锚固效果、最经济的布置方案，要结合施工场地及施工条件选择最优布置。

6.5.4 如果坝基软弱破碎，锚固荷载施加之前应进行固结灌浆处理，以提高锚固效果。防止措施不当引起的附加应力增加，或降低锚固效果。

6.5.5 有些工程，由于长期运行和施工中存在一些薄弱环节，在高温差的反复作用下，出现了裂缝。为限制裂缝扩展，采取预应力锚固是最有效的方法之一。预应力锚索可在廊道中施工，也可在坝顶施工。锚索要穿越裂缝，达到稳定部位。在锚索布置的设计中，为减小坝体的附加应力，力求锚固力分散于坝体内，减

少锚固段部位的应力集中，锚固段要错开布置。

6.5.6 对采用预应力锚索加固，防止裂缝扩展的工程，均要进行封闭裂缝的灌浆。如灌浆压力过大，势必会加大裂缝的宽度。为了使灌浆起到封闭裂缝的作用，一定要选择合适的灌浆压力。

6.6 混凝土闸墩锚固

6.6.1 随着我国国力的提高和经济的发展，兴建的大型水利水电工程越来越多，许多大型水利工程由于泄洪流量大，往往采用大跨度的弧形闸门以减少闸墩数量，增大泄洪孔口净宽以满足泄洪需要。泄洪孔口尺寸加大后，弧形闸门所承受的推力也随之加大。例如湖北省葛洲坝二江泄水闸弧门推力为 42000kN；福建省水口溢流表孔弧门推力为 43200kN；广西壮族自治区岩滩表孔泄洪闸弧门推力为 45394kN；云南省景洪溢流表孔弧门推力为 51200kN；陕西省喜河溢流表孔弧门推力为 53200kN；湖南省五强溪溢流表孔弧门推力为 60200kN；四川省紫兰坝潜孔泄水闸弧门推力为 60960kN；云南省大朝山泄洪排沙底孔弧门推力为 66000kN；重庆市草街冲沙闸弧门推力为 69300kN；云南省小湾放空底孔弧门推力高达 120000kN；广西壮族自治区大藤峡水利枢纽泄水闸低孔弧门推力为 73600 kN、泄水闸高孔弧门推力为 62000 kN；吉林省丰满重建工程泄洪兼导流洞深孔弧门推力为 70000kN、溢流表孔弧门推力为 36000kN。随着弧门推力的加大，闸墩受力也随之增大，但由于溢流宽度的限制，闸墩尺寸不可能设计的过大，这就势必恶化了闸墩的应力状态。计算结果表明，支铰附近的闸墩内，由于水推力的作用，将产生 5~6MPa 的拉应力，再加上运行的要求，闸墩往往处于偏心受拉的工作状态。这一应力状态，采用常规的钢筋混凝土结构难以保证其在长期的持续荷载作用下的正常使用。为改善弧门支撑结构的应力状态，确保建筑物安全运行，便将预应力技术应用于大型弧门的钢筋混凝土闸墩上。

预应力技术应用于闸墩最早可追溯到 20 世纪 50 年代末修建

的突尼斯梅列格溢洪道。比较系统、成熟的应用则要到 60 年代美国哥伦比亚河的瓦纳庞溢洪道工程。在我国，预应力闸墩起步较晚，但发展迅速。70 年代末，我国修建湖北省葛洲坝水利枢纽时，首次应用了预应力闸墩结构，在大江、二江的泄水闸表孔闸墩中布置了 30 根长度为 15.4~24.0m 的主锚索，每根锚索设计张拉力为 3175kN。随后，青海省龙羊峡、云南省鲁布格、广西壮族自治区岩滩、陕西省安康、福建省水口、湖南省五强溪、贵州省天生桥、辽宁省蒲石河、重庆市草街、云南省小湾、吉林省丰满重建等工程的大型弧门闸墩也采用了预应力锚索，都取得了较好的效果。近几年，我国在预应力闸墩的结构理论、设计、锚索体系、施工工艺、材料与设备等方面，均进行了更加深入的研究并取得了很大进展，在工程中也得到了进一步的提高。实践证明，在大型弧门的支撑结构中采用预应力锚索，对改善闸墩的应力状态、限制闸墩的变形、降低工程造价及保证工程安全运行是最为合理的技术措施。

锚块与闸墩和与大梁相连的颈部，以及闸墩的锚固区上游混凝土中的主拉应力，要满足 SL 191《水工混凝土结构设计规范》的有关规定。混凝土支撑结构的强度及变形要满足结构及运行的要求。

弧形门的支撑结构系空间结构，在荷载作用下呈三向应力状态，加上混凝土收缩和温度作用，其应力分布比较复杂。在预应力闸墩的设计初期，往往采用全预应力设计，即钢筋混凝土闸墩中的主拉应力全部由预应力锚索承担，这显然是不经济的，同时也难以保证结构任何部位都不开裂。为了节省投资，方便施工，提出了按部分预应力进行设计的思想，并从结构强度、变形、裂缝控制、运用要求、施工条件及技术经济等方面进行综合分析比较，寻求较为合理和先进的控制标准。混凝土拉应力不要超过混凝土轴心抗拉强度标准值的 0.7 倍，且拉应力分布范围不大；或允许闸墩混凝土出现一定的裂缝，但最大裂缝宽度不超过 0.2mm。青海省龙羊峡水电站底孔、深孔及中孔均采用了预应

力闸墩，共布置预应力锚索 131 根，施加预应力总值为 486626kN。预应力闸墩采用“部分预应力设计理论”，其控制标准为：在闸墩和深梁锚固区，正常情况下，主拉应力 $\sigma_1 \leq 0.35\text{MPa}$ ；特殊情况下，主拉应力 $\sigma_2 \leq 0.70\text{MPa}$ ；在闸墩与底板交界处， $\sigma_1 \leq 0.7\text{MPa}$ ， $\sigma_2 \leq 1.5\text{MPa}$ ；在预应力锚固区端部，一般不控制其应力值，但要采取构造措施和配置局部承压非预应力筋，用来保证强度和控制裂缝开展宽度。

由于预应力闸墩中应力比较复杂，又处于三向应力状态，可采用结构力学法计算，并用三维有限元分析方法对闸墩进行应力复核。重要的工程还可采用结构模型试验确定其结构型式和预应力锚索的布置。例如湖南省五强溪，湖北省葛洲坝，广西壮族自治区岩滩，云南省漫湾，福建省水口、贵州省红水河天生桥，辽宁省蒲石河等水利水电工程的预应力闸墩，不仅进行了大量的计算分析，还专门开展了试验研究工作。

在预应力闸墩的设计中，对闸墩进行应力分析时，要考虑到可能遇到的运行情况，并以最不利的运行工况做为控制工况，闸墩一侧关门另一侧开启往往成为设计的控制工况。此外在水工布置上，由于受地形、施工、运行等方面制约，闸墩呈不对称布置。不对称布置的闸墩，锚索的布置也要有所区别，设计中对这种情况也要进行复核计算。

由于弧形工作门承受的水推力较大，闸墩受力条件较为复杂，不仅要考虑主锚索承受水推力产生的拉应力，还要考虑锚墩中的应力均衡，因此还需要布置一定数量的次锚索。次锚索的张拉力一般低于主锚索。

6.6.2 闸墩预应力主锚索在立面，大都沿弧门水推力合力方向布置，尽可能使预应力合力与水推力合力重合，但也要考虑使闸墩内部应力尽可能均匀分布。为使支铰区附近应力集中得以扩散，多呈扇形状态布置。统计国内闸墩预应力锚索在立面布置的扩散角为 $5^\circ \sim 15^\circ$ 。例如广西壮族自治区岩滩闸墩为 8.3° ，福建省水口闸墩为 10° 。

锚索沿弧门推力方向的平面内布置，主要有平行、交叉、弯曲和倾斜等四种布置方式，详见图 9。

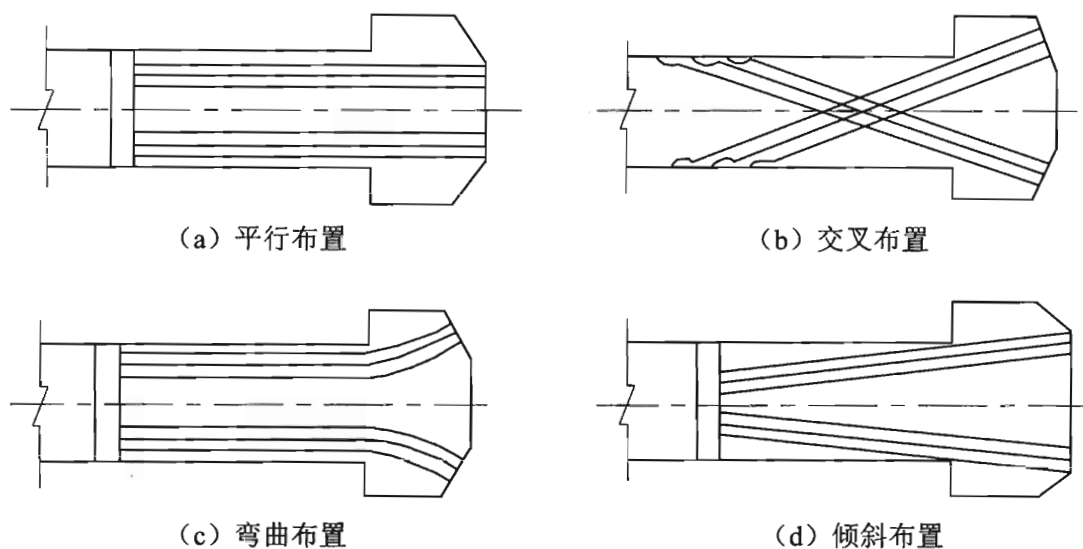


图 9 闸墩内预应力锚索平面布置图

这四种布置在国内均有实例。例如广西壮族自治区岩滩、吉林省丰满重建工程闸墩中的锚索采用平行布置，湖北省葛洲坝二江闸墩中的锚索采用交叉布置，陕西省安康水电站闸墩中的锚索采用弯曲布置。近年发展趋势是以平行布置为主，上游锚头稍向闸墩内移动，以便改善施工预留孔口的拉应力。云南省漫湾水电站闸墩锚索采用倾斜布置，将下游锚头的位置移到弧门推力作用线附近，不仅可以提高颈部的预压应力，而且使锚块上游面水平方向受压，施工预留孔的拉应力明显减小。弧门推力在闸墩内产生的拉应力是外侧面大，内部小。因此，锚索布置建议尽量靠闸墩外侧布置，以得到更有效的预应力效果。

此外，当锚索上游端在闸墩上开孔或留槽锚固时，锚索要长、短相间布置，以避免应力集中，恶化闸墩应力状态。

四川省二滩闸墩主锚索首次采用了 U 型锚固体系，该体系在闸墩内的锚固只需预埋 U 型钢管形成孔道，U 型段周围的应力分布比直线型对穿锚索要均匀。贵州省构皮滩中孔闸墩预应力主锚索共采用 84 套 U-1 型锚固体系。

大型弧门预应力混凝土支撑结构型式主要有深梁式（简支梁、固端梁）和锚块式。深梁式一般用于高水头泄洪孔口，闸墩为缝墩或孔口宽度较小的情况；锚块式一般用于弧门跨度较大的情况。

锚块是闸墩预应力锚索外锚固端，其结构型式对其应力状态有很大影响。在受弧门水推力和主锚索张拉力的作用下，应力状态极为复杂，为使锚块尤其是颈部应力条件得到改善，将锚块设计成不同型式。有些工程还采用了钢锚块，如湖北省五强溪表孔闸墩。采用钢筋混凝土锚块也有简单型和复杂型，陕西省安康表孔弧门支撑体即采用了复杂锚块，见图 10。

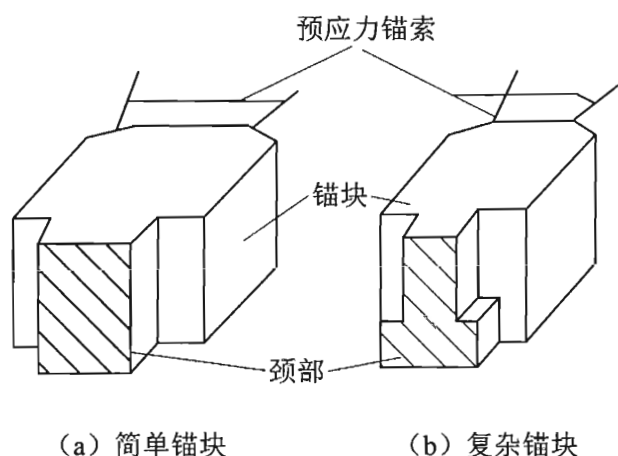


图 10 锚块的结构型式

近几年，为了使锚块内部的应力得以释放并提高颈部的预压应力效果，设计上通常采用在锚块内开设预留槽的结构型式，见图 11。开设预留槽锚块的结构型式较复杂锚块简单，受力性能较简单，可减少主、次锚索数量，降低拉锚系数，经济效益显著。这种型式的锚块在贵州省红水河天生桥、贵州省构皮滩、黑龙江省尼尔基、辽宁省蒲石河、云南省景洪、吉林省丰满重建工程等预应力闸墩上均有应用。

6.6.3 闸墩中主锚索设计吨位较大，使闸墩中产生较大的次生拉应力。为抵消在垂直于主锚索方向上出现较大范围和较大量值的次生拉应力，应在支撑结构中布置适当数量的次锚索，有效地

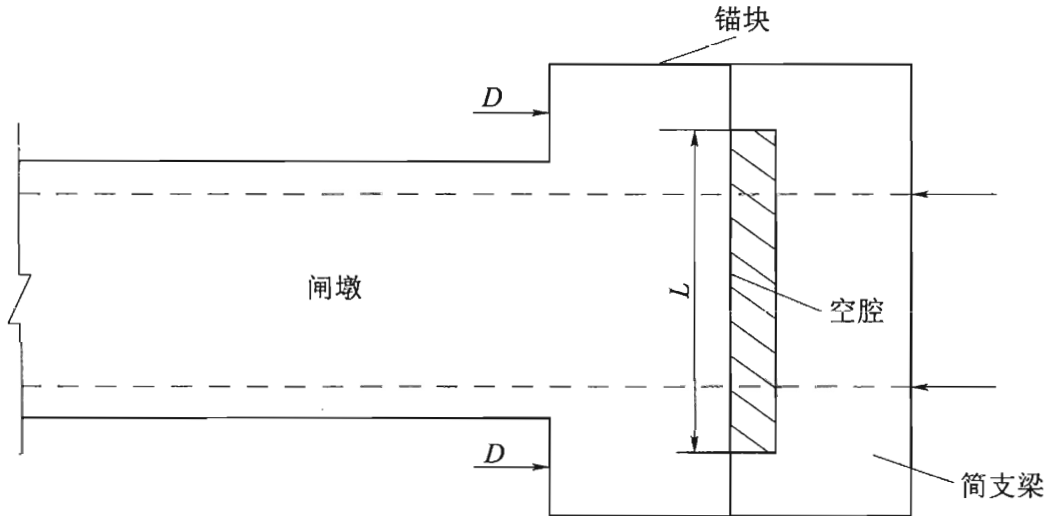


图 11 开设预留槽锚块的结构型式

改善了支撑结构的应力状况。如吉林省丰满重建工程泄洪兼导流洞深孔闸墩主锚索设计张拉力达到 3600kN，超张拉力为 3800kN，闸墩布置的次锚索，设计张拉力为 2500kN，超张拉力为 2700kN；溢流表孔闸墩主锚索设计张拉力达到 3750kN，超张拉力为 4000kN，闸墩布置的次锚索，设计张拉力为 3300kN，超张拉力为 3600kN。大藤峡水利枢纽工程，高孔、低孔弧形闸门闸墩主锚索设计张拉力达到 5600kN，超张拉力为 6100kN，闸墩布置的次锚索，设计张拉力为 2800kN，超张拉力为 3100kN。次锚索布置有两种，一种为水平布置，一种为垂直布置。有些工程水平和垂直次锚索同时布置。次锚索一般不少于 3 排，第一排要靠近弧门铰支承面，其余布置在离支承面 $\frac{2}{3}h$ 的范围内（ h 为支撑结构的高度）。闸墩中主锚索和锚块中次锚索布置见图 12。

6.6.4 由于闸墩尺寸相对较小，在闸墩施工过程中往往采用预留锚索安装通道的施工方法。待闸墩钢筋混凝土浇筑完成后，在预留的通道中安装锚索，实施张拉，最后封孔灌浆。为了安装方便，保证索体水泥浆或水泥砂浆的保护层厚度，预留的锚索通道要有足够的空间。预留空间的大小同锚索张拉荷载和采用的锚索

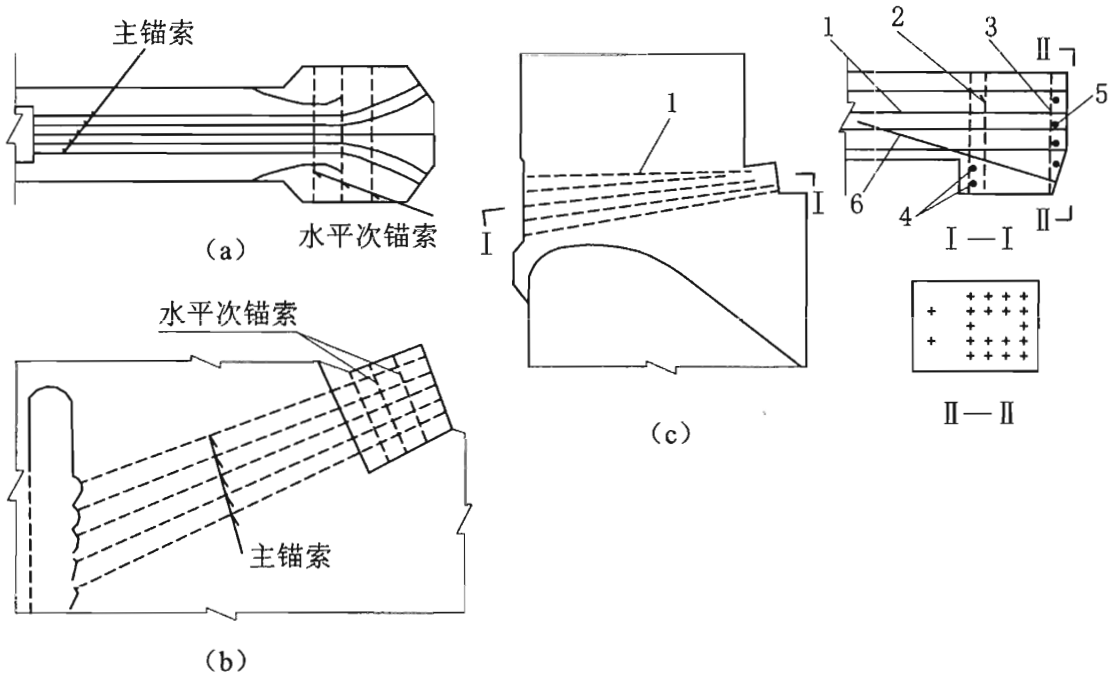


图 12 闸墩中主锚索和锚块中次锚索布置图

1—主锚索；2、3—水平次锚索；4、5—垂直次锚索；6—斜锚索

材料有关。一般情况下，当主锚索张拉力为 3500kN 时，预埋管外径一般采用 107mm，内径不小于 100mm；次锚索单束张拉力为 2000kN 时，预埋管外径一般采用 92mm，内径采用 85mm。

锚索通道采用预埋法施工，预埋管的材料可为波纹管或钢管。采用钢管钢材用量大，造价高，而采用波纹管，可降低造价。

闸墩主锚索的锚固端型式，不仅要考虑对闸墩应力状态的影响，还要考虑施工方便。目前已建工程锚固端的布置主要有两种型式：一种是在闸墩上游预留锚固井、锚孔及浅槽，例如福建省水口、陕西省安康水电站工程；另一种型式是在闸墩上游面预留锚固槽，例如湖北省葛洲坝、贵州省红水河天生桥、辽宁省蒲石河、吉林省丰满重建等工程。

6.6.5 由于闸墩和锚块尺寸较小，而承受的荷载又较大，所以混凝土要有足够的强度，同时还要布置一定数量的钢筋。已建工程经验表明，闸墩混凝土强度等级不应低于 C30，混凝土锚块和颈部等部位的混凝土强度等级不宜低于 C40。

6.7 闸室、消力池（塘）及挡墙锚固

6.7.1 由于预应力锚索施工方便、造价低及易于实施，越来越广泛地应用于水工建筑物的加固、补强和工程改造。例如抵御较大上浮力的重力式闸室，不仅工程量大，施工工期长，也不经济，而采用预应力锚索，可将上浮力传递至基础深部，通过穿越建筑物的锚索，对闸室施加预压应力。这部分预压应力，可以抵消全部或部分的上浮力，使闸室结构处于稳定状态，见图 13 (a)。为抵御水压力、土压力而修建的钢筋混凝土挡墙，也可以布置预应力锚索，施加较大的主动压力，并通过锚索体将这部分主动压力传递至岩体或土体深部，保证挡墙的稳定。这样便可将挡墙修建成轻型结构，以节省投资，见图 13 (b)。

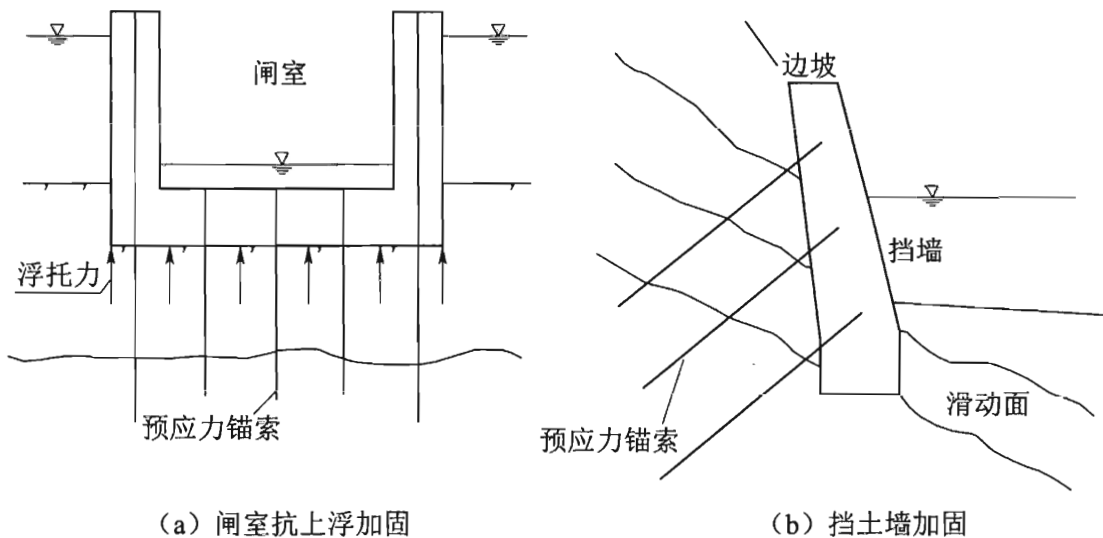


图 13 闸室、挡墙锚固示意图

6.7.2 闸室、消力池（塘）本身自重不能满足抗浮稳定需要时，要布置预应力锚索，其数量与锚固力要满足抗浮稳定的需要，其安全系数应符合 SL 265《水闸设计规范》和 SL 253《溢洪道设计规范》的规定。

闸室、消力池（塘）中布置预应力锚索后，要校核各种计算情况下的闸室基底平均压力，其基底平均压力和基底压力的最大与最小值之比都要满足 SL 265 的规定。

6.7.3 布置在挡墙中的预应力锚索，对挡墙施加与岩体或土体滑动方向相反的主动压力，与挡墙自重共同提供阻滑力。挡墙的预应力锚固设计时，要充分考虑滑动体本身的阻滑作用及挡墙自重所起到的阻滑作用，阻滑力不足部分由预应力锚索承担。按这一要求确定预应力锚索的数量，并决定设计张拉力。预应力锚索的锚固段要布置在稳定的岩层中，并按 6.1.3 条的规定选择最优锚固角度。

由于挡墙底部与基础接触部位尺寸较小，锚索又布置在墙体中上部，施加张拉力过大时，可能造成墙体向外倾斜使墙体与基础部位拉裂，因而为降低墙体与基础的摩阻力，所以对锚索施加的设计张拉力不推荐过大，但预应力锚索的锚固力还要按预应力锚索承担的阻滑力设计。

6.8 水工隧洞混凝土衬砌环形预应力锚索

6.8.1 当压力引水隧洞或涵洞承受的内水压力较大，混凝土衬砌中产生较大的拉应力时，为了克服使衬砌开裂的拉应力，在混凝土衬砌施工中预先施加与内水压力相反的预压应力，用来抵消一部分内水压力产生的拉应力，在混凝土衬砌中布置可以张拉的环形锚索是有效的措施之一。

压力引水隧洞中的环形锚索式混凝土预应力衬砌的主要构件是衬砌周围的环形锚索，通过紧固装置可以施加张拉力，使混凝土衬砌受到一定数值的预压应力，并通过灌浆将这部分预压应力保存在衬砌中，以抵消部分拉应力，这种技术措施已成功用于压力隧洞的设计与施工，目前国内环形锚索式预应力衬砌应用情况见表 7。

使压力引水隧洞获得预应力的方法很多，如在混凝土衬砌外缘布置可以紧固的拉筋或钢箍，也可以对混凝土与围岩之间的缝隙进行高压灌浆等。在采用预应力衬砌时，要根据工程特点、运行要求、地质条件等因素进行技术经济比较，选择技术先进、经济合理的预应力衬砌形式。

表 7 国内外环形锚索预应力衬砌主要工程特性指标

工程名称	国家	结构型式	最大内水压 /MPa	长度或高度 /m	内径	衬砌厚度 /m	锚索主要参数				施工期 (年)
							类型	根数	间距 /mm	直径 d/mm	
San Fiorino	意大利	调压井	1.0	99	8.2	0.8~0.6	有粘结	12	250~1000	15	1971—1973
Brasimone	意大利	调压井	0.6	61	26.0	0.7	有粘结	19 12	150~400	15	1973—1974
Piastra - Andouno	意大利	压力隧洞	0.8	11400	3.3	0.25	有粘结	4	300	15	1973—1974
Taloro	意大利	调压井	0.9	90	14.9	0.8	有粘结	19 12 7	300~600	15	1975
Taloro	意大利	压力隧洞	0.9	495	5.5	0.45	有粘结	6	300	15	1975—1976
Chiotas - Piastra	意大利	压力隧洞	1.4	90	6.1	0.6	有粘结	12	300	12.7	1976—1977
隔河岩水电站	中国	压力隧洞	1.0	602	9.5	0.75	有粘结	12	400	15	1991—1993
天生桥水电站	中国	压力隧洞	1.3	480	9.7	0.7	有粘结	12 14	400+ 330	15	1997 始建
Grimsel tailrace tunnel	瑞士	压力隧洞	1.4	60	6.8	0.6	无粘结	12	240	15	1977—1978
Presenzano	意大利	—	—	—	5.6	—	无粘结	6	300~580	15	1988—1990
小浪底水利枢纽	中国	排沙洞	1.22	3×1100	6.5	0.65	无粘结	8	500	15.7	1997
南水北调穿黄工程	中国	输水洞	—	3450	7.0	0.45	无粘结	21	450	15.2	—

6.8.2、6.8.3 环形预应力锚索混凝土衬砌设计的主要内容是确定环形锚索的间距和每束锚索的设计张拉力，这两项内容均与隧洞衬砌承受的内水压力大小、混凝土衬砌的强度等级及环形锚索承担的内水压力比例有关。关于环形锚索式预应力衬砌的内力计算，应按 SL 279《水工隧洞设计规范》的要求进行。由衬砌应力计算确定要由锚索提供的预应力后，即可计算确定锚索的间距和单根锚索的设计张拉力。对一些重要工程还要通过有限元法或模型试验对施加环向锚索后的衬砌应力状态加以复核。河南省黄河小浪底排沙洞就进行了模型试验，通过模型试验确定采用无粘结钢绞线作为环形锚索的材料。

6.8.4 由于衬砌中的环形锚索是沿衬砌周圈布置，在确定设计张拉力时，一定要考虑锚索沿孔壁的摩阻损失，沿孔壁的摩阻损失可根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》（2015年版）第 10.2.4 条所推荐的公式计算，孔道的摩擦系数 μ 可参考 GB 50010—2010 表 10.2.4 确定。

关于孔道的摩擦系数 μ ，湖北省隔河岩水电站压力引水隧洞环形锚索式预应力衬砌对 1380 束锚索实测伸长值进行了反演分析，其平均值为 0.220~0.153；河南省黄河小浪底排沙洞环形锚索根据模型试验，有粘结钢绞线方案选择为 0.2，无粘结钢绞线方案选择为 0.05，3 条排沙洞环形锚索沿程摩阻损失采用的设计参数见表 8。

表 8 黄河小浪底排沙洞环形锚索沿程摩阻损失采用的设计参数

项 目	有粘结钢绞线方案	无粘结钢绞线方案
每束钢绞线根数	12	8
单根公称面积/mm ²	139	150
摩擦系数 μ	0.2	0.05
摆动系数 k	0.0015	0.0007
设计张拉力/kN	2343.6	1674
预应力沿程分布状况	波动大	较均匀
就位方式	先预埋波纹管，混凝土浇筑后再将钢绞线穿入管内	直接预埋在衬砌体内，就位要求较高

6.8.5 环形锚索布置在混凝土衬砌外缘，是为了有效地对混凝土衬砌提供预压应力，以最大限度地发挥锚索的预应力效果。锚索间距宜为 400~500mm 是根据已建工程经验确定的。

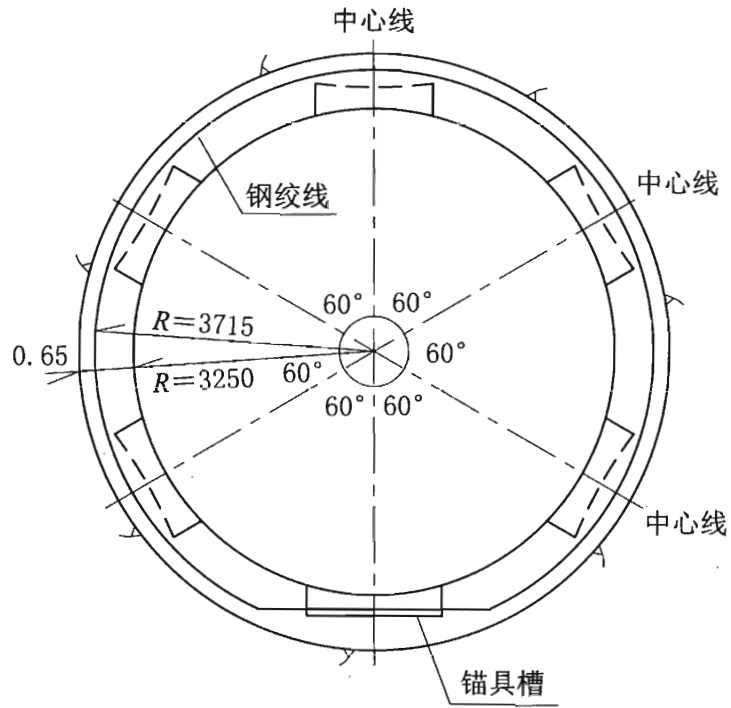
6.8.6 对混凝土衬砌施加环向预应力时，由于施加的张拉力较大，为防止局部应力集中而导致衬砌外缘混凝土损坏，为此要求衬砌混凝土有较高的强度，并且在达到设计强度后方可进行环形锚索的张拉。

6.8.7 锚具槽是实现锚索张拉与锁定的部位，需要专门设置，为了保证混凝土均匀受到锚索的环向压力，锚具槽不要布置在衬砌断面的同一位置，而要错开布置在不同位置上。贵州省红水河天生桥一级后张预应力衬砌试验段张拉槽布置见图 14。河南省黄河小浪底排沙洞环形锚索预应力衬砌，为了减少锚具槽对断面削弱的影响，采用全断面设置一个锚具槽的方案，为了使施加的预应力荷载所产生的应力分布更加均匀，对锚具槽沿洞轴线方向采用环向交错布置方式。对于有粘结钢绞线方案，曾对整个衬砌环采用 4 个锚具槽和 6 个锚具槽两种不同的交错布置情况进行了预应力叠加效果的比较，最终选定了 6 个锚具槽沿圆环均匀分布，纵向间距为 0.25m 的交错布置方案。对于无粘结钢绞线方案所采用的锚具槽布置在衬砌环的下半圆，分别对两个锚具槽中心线的夹角为 90° 和 120° 两种布置情况进行了分析论证，最终选定两个锚具槽中心线的夹角为 90° ，纵向采用 0.5m 间距交错布置为推荐的设计方案。

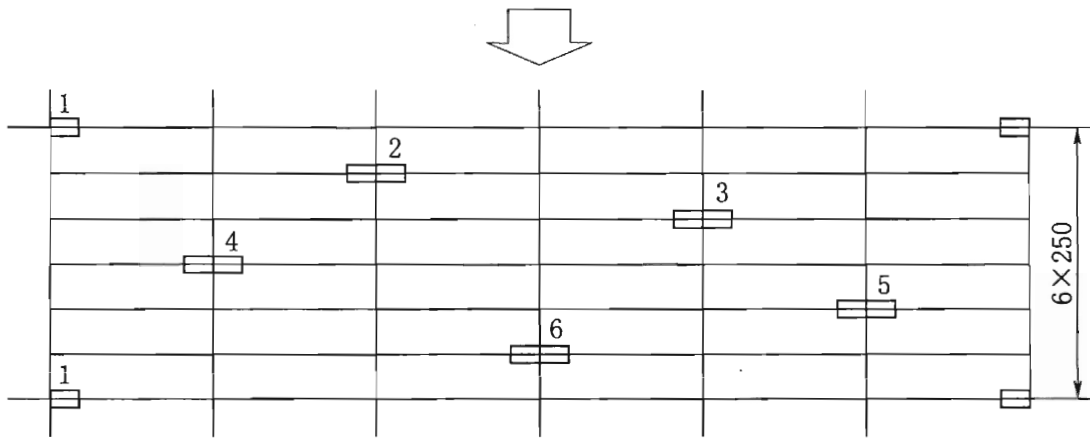
经分析计算，所选定方案的结构应力状况满足全预应力的设计要求。预应力锚索及锚具槽的布置见图 15 和图 16。

6.8.8 混凝土衬砌施工时，为方便环形锚索施工，对有粘结钢绞线锚索，需要在环形锚索位置预埋波纹管；对无粘结钢绞线锚索，可简化施工，但要增加对钢绞线的防护。

6.8.9 穿索孔道应及时进行回填灌浆，因为对于环形预应力锚索式的衬砌混凝土强度，其等级一般不应低于 C30，因此锚索孔道的回填灌浆材料强度也要与其匹配，不应低于 M30。对于锚具槽，由于尺寸较小，为了防止收缩产生裂缝，建议采用无收缩混凝土。

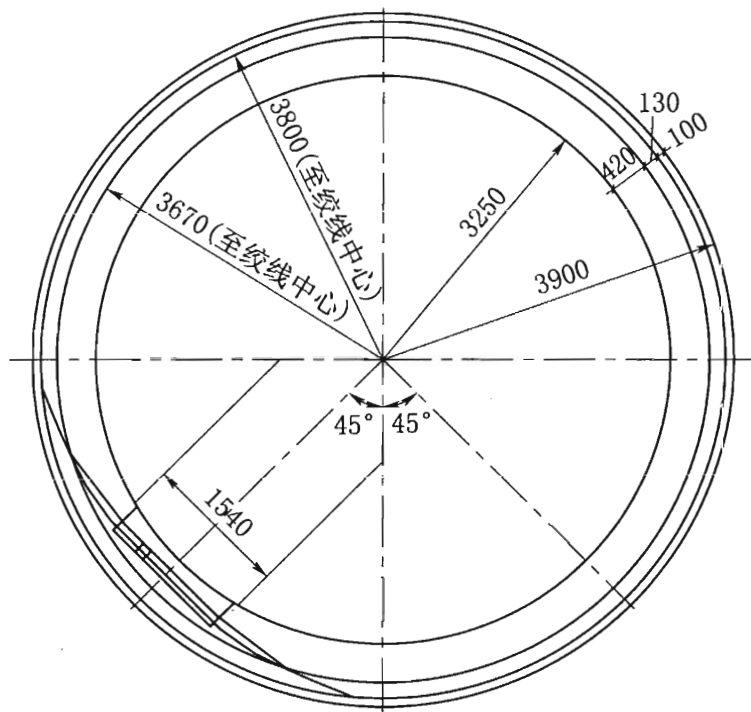


(a) 有粘结预应力钢绞线布置 (单位: mm)

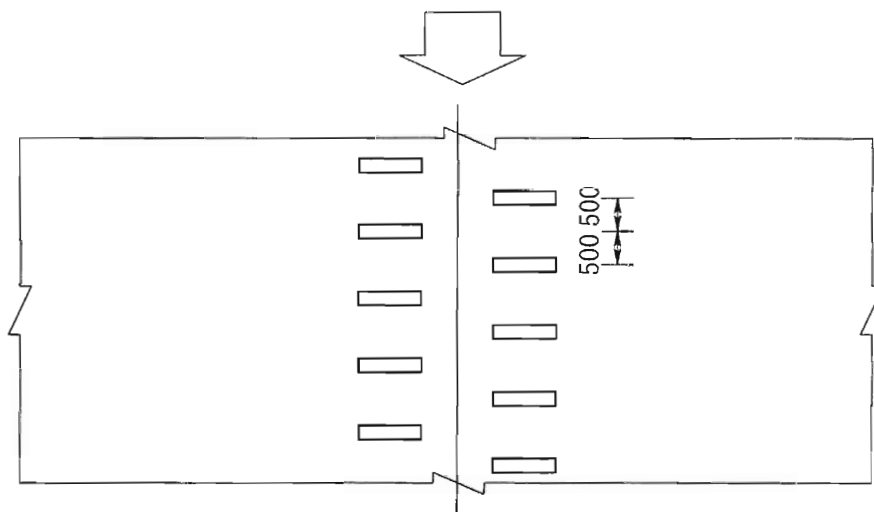


(b) 有粘结锚具槽展开示意图 (单位: mm)

图 15 有粘结钢绞线锚具槽布置



(a) 无粘结预应力筋布置 (单位: mm)



(b) 无粘结方案锚具槽展开示意图 (单位: mm)

图 16 无粘结钢绞线锚具槽布置

7 锚索防护

7.1 锚索防护设计

7.1.1 预应力锚索接触的介质为岩体或土体，在岩体和土体中多含地下水，其成分千差万别，相当一部分地下水含有对钢材具有腐蚀性的物质。此外，预应力锚索施加张拉力后，预应力材料处于高应力状态。在含腐蚀物质环境和高应力状态下，预应力锚索极易腐蚀，从而降低了锚索的使用寿命，所以锚索的防腐十分重要。

预应力锚索的腐蚀类型主要有化学腐蚀、应力腐蚀和静电腐蚀等，这些类型腐蚀的防护，应根据工程的重要程度、锚索使用年限、被锚固区域的地下水性质和锚固力的大小确定防护措施，做好防护设计。

7.1.2 锚固区内环境对预应力锚索的腐蚀，不仅要考虑对胶结材料的腐蚀，还要考虑对预应力钢材的腐蚀。对上述两种材料的腐蚀程度可划分为无腐蚀、弱腐蚀、中等腐蚀和强腐蚀。腐蚀程度的制定可参照下列标准的有关规定判别。

GB 50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》附录 L 中规定了环境水对混凝土的腐蚀性判别标准见表 9，环境水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性判别标准见表 10，环境水对钢结构的腐蚀性判别标准见表 11。

表 9 环境水对混凝土的腐蚀性判别标准

腐蚀性类型	腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标
一般酸性型	pH 值	无腐蚀	$\text{pH} > 6.5$
		弱腐蚀	$6.5 \geq \text{pH} > 6.0$
		中等腐蚀	$6.0 \geq \text{pH} > 5.5$
		强腐蚀	$\text{pH} \leq 5.5$

表 9 (续)

腐蚀性类型	腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标
碳酸型	侵蚀性 CO ₂ 含量 (mg/L)	无腐蚀	CO ₂ < 15
		弱腐蚀	15 ≤ CO ₂ < 30
		中等腐蚀	30 ≤ CO ₂ < 60
		强腐蚀	CO ₂ ≥ 60
重碳酸型	HCO ₃ ⁻ 含量 (mmol/L)	无腐蚀	HCO ₃ ⁻ > 1.07
		弱腐蚀	1.07 ≥ HCO ₃ ⁻ > 0.70
		中等腐蚀	HCO ₃ ⁻ ≤ 0.70
		强腐蚀	—
镁离子型	Mg ²⁺ 含量 (mg/L)	无腐蚀	Mg ²⁺ < 1000
		弱腐蚀	1000 ≤ Mg ²⁺ < 1500
		中等腐蚀	1500 ≤ Mg ²⁺ < 2000
		强腐蚀	Mg ²⁺ ≥ 2000
硫酸盐型	SO ₄ ²⁻ 含量 (mg/L)	无腐蚀	SO ₄ ²⁻ < 250
		弱腐蚀	250 ≤ SO ₄ ²⁻ < 400
		中等腐蚀	400 ≤ SO ₄ ²⁻ < 500
		强腐蚀	SO ₄ ²⁻ ≥ 500
<p>注 1: 本表规定的判别标准所属场地应是不具有干湿交替或冻融交替作用的地区和具有干湿交替或冻融交替作用的半湿润、湿润地区。当所属场地为具有干湿交替或冻融交替作用的干旱、半干旱地区以及高程 3000m 以上的高寒地区时, 应进行专门论证。</p> <p>注 2: 混凝土建筑物不应直接接触污染源。有关污染源对混凝土的直接腐蚀作用应专门研究。</p>			

表 10 环境水对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀性判别标准

腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标
Cl ⁻ 含量/(mg/L)	弱腐蚀	100~500
	中等腐蚀	500~5000
	强腐蚀	> 5000
<p>注 1: 表中是指干湿交替作用的环境条件。</p> <p>注 2: 当环境水中同时存在氯化钠和硫酸盐时, 表中的 Cl⁻ 含量是指氯化物中的 Cl⁻ 与硫酸盐折算后的 Cl⁻ 之和, 即 Cl⁻ 含量 = Cl⁻ + SO₄²⁻ × 0.25, 单位为 mg/L。</p>		

表 11 环境水对钢结构的腐蚀性判别标准

腐蚀性判定依据	腐蚀程度	界限指标
pH 值、 $(Cl^- + SO_4^{2-})$ 含量/(mg/L)	弱腐蚀	pH 值 3~11、 $(Cl^- + SO_4^{2-}) < 500$
	中等腐蚀	pH 值 3~11、 $(Cl^- + SO_4^{2-}) \geq 500$
	强腐蚀	pH 值 < 3 、 $(Cl^- + SO_4^{2-})$ 任何浓度
注 1: 表中是指氧能自由溶入的环境水。 注 2: 本表也适用于钢管道。 注 3: 如环境水的沉淀物中有褐色絮状物沉淀(铁)、悬浮物中有褐色生物膜、绿色丛块、或有硫化氢臭味, 应作铁细菌、硫酸盐还原细菌的检验, 查明有无细菌腐蚀。		

在锚固设计之前, 如果将地下水和岩土中表 9~表 11 所列腐蚀性物质含量测定后, 即可对被锚固介质的腐蚀程度进行认定, 然后再按 7.1.2 条的规定进行预应力锚索的防护设计。经常采用也是最有效的防护措施是全孔灌注水泥浆或水泥砂浆, 并保证灌浆质量。在强腐蚀地层布置的锚索, 要加强防护, 其主要措施是全孔固结灌浆, 隔断腐蚀性介质并采用加设波纹管的无粘结钢绞线, 波纹管内灌满防腐型水泥浆。

7.1.3 根据已建工程经验, 当锚固区地下水发育且具有腐蚀性时, 最有效的办法就是在锚固之前对围岩进行固结灌浆, 减少锚固区域围岩的透水性。例如安徽省梅山水库大坝基础加固、湖南省双牌水电站坝基加固和陕西省石泉水库大坝加固等工程均在锚索施工前进行了固结灌浆处理, 有效地减轻了对预应力锚索的腐蚀。

7.1.4~7.1.7 无粘结预应力钢绞线是专门生产的防腐型预应力材料, 它首先在钢丝或钢绞线表面喷涂一层防腐材料, 外层加设塑料套管, 并在塑料套管与钢丝或钢绞线之间充满防腐油。无粘结预应力锚索基本结构见图 17, 锚索包裹材料厚度见表 12。

表 12 锚索包裹材料厚度表

锚杆材料	标准外径 /mm	涂膜式包裹厚度/mm			标准润滑脂涂敷量 /(g/m)
		a	b	c	
7 股钢丝绞合	20.0	0.1	0.6	1.0	36
注: 表中 a 为环氧树脂涂膜, b、c 均为聚乙烯包裹层(参见图 17)。					

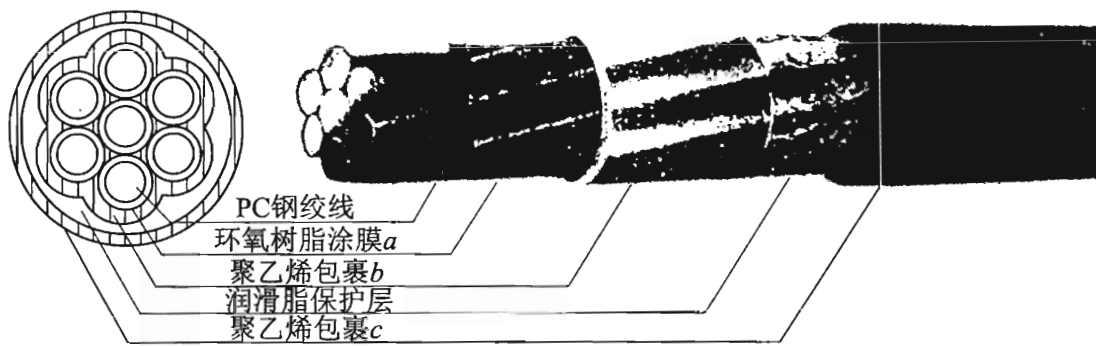


图 17 无粘结预应力锚索基本结构

当环境中存在钠、钙、镁离子及碳酸盐、硝酸盐、亚硫酸盐、硫氯酸盐或氯离子等化学物质时，具有产生电化学腐蚀的条件，再加上预应力锚索的拉应力较大，会加速腐蚀过程，所以规定预应力锚索做防腐、防锈处理时，硝酸盐、亚硫酸盐、硫氯酸盐及水泥中的氯离子含量要控制在 0.02% 以内。无粘结钢绞线所使用的防腐材料要满足 7.1.5 条的规定。

7.1.8 在地下工程或水工建筑物的某些区域总是不同程度地存在一些杂散电流。杂散电流容易引起电化学反应，加速预应力锚索的腐蚀。

为防止杂散电流对锚索的腐蚀，不能使用与锚索体不同成分的金属做部件，在可能有杂散电流的区域设置阴极防护措施，即在钢绞线表面提供足够的电子，不失去电子就不会腐蚀。阴极防护方法有两种：一种是外加电流（直流）法，另一种是在钢绞线上连接活性金属，也可以采取引和排除杂散电流的各种接地电线保护等措施，防止电化学腐蚀的发生。

为防止杂散电流，也可以采用隔离的双层防护，即采用无粘结钢绞线外套金属波纹管或高密度塑料管，管内外均注满水泥浆或水泥砂浆。

7.1.9 预应力锚索张拉完成后及时注浆，并适时封闭锚头的主要目的是为了加强防护、防止钢绞线和锚具的锈蚀。

7.1.10 无粘结锚索锚头的防护往往容易被忽视，有些工程锚固完成后，锚头长期裸露，这是十分有害的，不仅锚头容易腐蚀，

同时也不利于预应力的保持。为此，要及时进行保护，其措施主要有涂防腐剂、混凝土或喷射混凝土包封，其包封厚度不得小于100mm；也可采用保护罩封闭，但盒内要充满防护油脂，且保证封闭严密。

7.2 锚索防护施工

7.2.1 锚索进场后要妥善保管，主要措施有两点：一是隔断侵蚀源；二是改善储存条件。预应力钢绞线要保持清洁，在运输、储存过程中要避免机械损伤、雨淋、湿气和侵蚀性介质的侵蚀，并且不要与硫化物、氯化物、氟化物、亚硫酸盐、硝酸盐等有害物质直接接触或同库储存。

预应力钢绞线入库后要架空储存，不要露天堆放。储存仓库要干燥、防潮、通风良好、无侵蚀气体和介质。如储存时间过长，要使用乳化防腐剂喷涂钢绞线表面。并定期进行外观检查。

7.2.2 锚固区地下水发育，且具有侵蚀性时，对锚索孔围岩固结灌浆后，要对固结灌浆的效果进行检查，固结灌浆后岩体透水率标准要由设计确定，固结灌浆合格才能有效地防止有侵蚀性的地下水对锚索的侵蚀。

7.2.3 锚索张拉完成后，经确定不需进行补偿张拉时，才可以切割多余的钢绞线。为了不损伤预应力钢绞线，要在距夹片50mm之外进行切割，切割时不要采用电弧或乙炔焰切割，防止预应力钢绞线和锚具受高温影响，影响锚固质量。

7.2.4、7.2.5 从以往收集的预应力锚索破坏的实例中，破坏部位在锚头附近的占54%，锦屏预应力锚索破坏性试验结果也表明，钢绞线断裂位置均在锚头部位夹片的刻痕处，当锚索张拉锁定后，不论张拉力大小都会留下刻痕，这种刻痕如不及时封闭保护，会很快腐蚀，使锚索失效，所以锚头的防护要引起足够重视。有粘结锚索可以采用混凝土封闭锚头，封孔灌浆完成后要尽快对锚头进行保护，包封锚头的混凝土中氯离子含量不要超过水泥重量的0.02%。

对于无粘结锚索可以采用金属或塑料防护罩进行保护，防护罩内填塞黄油油脂。垫板安装前要除去垫板上的污物和锈斑，涂刷防腐材料，防护罩与垫板接触面上设密封垫，并可靠连接，防止油脂流失。要定期从防护帽上的补给孔补充防锈油脂。

采用混凝土或钢筋混凝土封锚时，为使新老混凝土结合良好，锚墩混凝土或结构混凝土表面要凿毛、冲洗、湿养。浇筑混凝土前要将锚板、预留的钢绞线洗刷干净，混凝土浇筑完毕要及时进行养护，养护时间一般不少于 28d。

水工隧洞混凝土衬砌采用有粘结预应力环锚时，当锚索张拉完毕后，要及时用混凝土回填锚具槽。填槽前要将混凝土壁面凿毛、冲洗干净，并涂刷混凝土界面处理剂，待恢复过槽钢筋网后，用与衬砌强度等级相同的无收缩细石混凝土回填。回填混凝土要振捣密实，表面收光与隧洞壁面吻合，填槽混凝土湿养护不要少于 28d，以使新老混凝土结合良好。

8 锚固施工

8.1 造 孔

8.1.1 边坡、地下洞室、坝基的预应力锚索采用钻孔成孔法施工，混凝土结构中的预应力锚索大多数采用埋管法施工，当对已建的水工建筑物加固时，也可以采用钻孔成孔法。

8.1.2 为保证钻孔质量，要求在钻进过程中控制其质量，并经常测量和监测，其质量标准和检查方法见表 13。

表 13 单孔预应力锚固孔施工质量标准

项次	检验项目	质量要求	检验方法	检验数量
主控项目	孔径	不小于设计值	钢尺量测	逐孔
	孔深	不小于设计值，有效孔深的超深不大于 300mm	钢尺配合钻杆量测	逐孔
	孔斜率	不大于 2%，有特殊要求的不大于设计值	测斜仪	逐孔
	钻孔围岩灌浆	符合设计和规范要求	压水试验等	逐孔
	孔轴方向	符合设计要求，偏差不大于 $\pm 3^\circ$ 。终孔孔轴线偏差不大于孔深的 2%	罗盘仪、测量仪器检测	逐孔
	扩孔	符合设计及规范要求	查看施工记录	逐孔
一般项目	孔位偏差	$\leq 100\text{mm}$	钢尺量测	逐孔
	钻孔清洗	孔内不残留岩芯、沉渣厚度不大于 200mm	测量孔深	逐孔
	施工记录	齐全、准确、清晰	查阅资料	逐孔

8.1.3 在钢筋混凝土的水工建筑物中设置的预应力锚索，大多数以预埋管方式布置，由于混凝土结构尺寸较小，布置的锚索间距大致为 300~500mm，为保证锚索布置均匀，一般尽量减小预埋管间距偏差，参考 SL 677—2014《水工混凝土施工规范》第

4.5.1 条，钢筋安装位置、间距、误差为 0.5 倍钢筋直径，为此本标准规定预埋管孔位及间距偏差不大于 10mm。

8.1.4 开孔时钻进 200~300mm 后，校核其倾角及方位角，目的是及时纠偏，保证开孔孔向正确。钻孔过程中，也要时刻注意观察钻孔的方向是否与设计值一致，加强和发挥钻具的导向作用，及时检测孔斜误差，合理采用纠偏措施。

8.1.5 为了掌握锚索孔的地质条件，便于异常情况的处理，造孔过程中，要求施工地质人员记录锚固孔围岩地层变化情况。当钻进至锚固段部位时，要详细记录地质条件，以便有效地分析地质条件对锚固力的影响；当孔壁与胶结材料粘结强度低于设计值时，要及时处理。在坡形堆积体或与钻孔方向垂直的地层结构进行造孔时，其孔深要穿过滑裂面或断裂面，锚固段要设在较稳定的岩层或稳定持力的地层中；在隧洞和洞室围岩进行造孔时，其孔深要穿过围岩松动区，锚固段也要设在较稳定的岩层中；在施工中发现锚索孔围岩与设计给定的地质条件存在差异时，要会同设计人员和相关的技术人员商定修正参数或采取相应加强措施。

8.1.6 在钻孔施工过程中，遇有天然空腔孔穴、溶蚀孔洞、小型洞穴等，可导致钻孔孔壁破碎不完整，严重的还会出现塌孔、掉渣、掉块、卡钻而难以继续钻进时，此时可先对孔内一定范围进行固结灌浆或充填，待浆液凝固后，再行钻进。常用的孔内灌浆措施有泥浆固壁、水泥浆固壁、套管跟进、定量灌浆、重复灌浆、间歇灌浆、嵌缝等。

若不具备固结预处理条件，还可以采用具有特殊功能以及各种跟进方式的单套管或多套管组合的钻机钻进。

对于易塌孔或存在较大裂隙地层，也可以采取泥浆、水泥浆、水泥砂浆、混凝土以及其他组分浆液对钻孔壁和裂隙进行孔壁维护等特殊工艺进行造孔。为了改变浆体渗透性能和固结性能，可以在浆液内加入速凝剂、水玻璃、纤维状物质、粉末状物质、结球块状物质或速凝膏状浆液等。

8.1.7 钻孔内或钻孔周围突发集中漏水或涌水、突发涌砂涌泥、

突然漏浆、不明气体集中逸出等情况时，要立即停止钻孔作业，及时分析原因，查明情况后继续进行钻进。可以采用凝结时间可调、自身有一定膨胀性和强度的复合浆液或化学浆液封堵裂隙或孔洞。

在异常塌孔、退钻困难、漏浆严重等特殊地层中造孔时，可以采用集钻孔、注浆、锚固为一体的自钻式预应力锚杆直接施工。此时可以采用后置冲击钻机，实现边钻进边注浆的新型工艺进行造孔作业。

如遇大型孤石群堆积形成的天然空腔孔穴、溶蚀孔洞、小型洞穴，钻孔进入充填型溶洞以及钻孔经过软泥、流砂地层时，其孔壁形成非常困难或不可能形成完整孔壁的极特殊情况，可以采用人工形成孔壁的特殊工艺进行造孔，人工孔壁有卷板状形式、膜袋状形式、纤维状形式、粉末状形式、液体状形式，或是多种形式组合状态。

8.1.8 钻孔过程中应进行地质记录，特别是特殊地质条件钻孔过程中遇到的问题和处理方法，要及时进行记录，其目的是为正确分析锚固效果提供依据，以保证锚固工程质量。

8.1.9 全孔钻进结束后要进行清孔，并测量孔深、孔斜。如孔向不顺直，还要进行扫孔处理。处理合格后填写造孔工序质量评定表。

8.1.10~8.1.13 预应力锚固结构穿过现浇混凝土结构时，锚索孔道要采用预留孔的方式，预留孔可以选用埋管法施工，埋设其他模具法或拔管预留法施工。埋管的管模位置和角度及管径要符合设计要求，要与结构内主受力钢筋连接或架设牢靠，埋管的管模要妥善加以保护。

对于预留锚固孔的混凝土浇筑完成后，要及时对预留锚固孔进行畅通性检查，如发现问题要及时处理。通孔检查后要做好孔口的保护，防止异物、污水进入孔道。

在负温环境条件施工时，应对穿索孔道采取保温措施，是为防止管道积水后冻结而造成无法穿索。

8.2 锚墩

8.2.1 锚墩顶面直接与锚头的钢垫板接触，预应力锚索对锚墩的承压面要求较高。在锚墩施工时，都要设置孔口埋管，埋管的轴线也要与锚索孔轴线一致，目的是保证张拉千斤顶、张拉力与锚索孔轴线一致，减少摩阻损失。

8.2.2 锚墩混凝土浇筑过程中，不能碰动孔口管，保证混凝土浇筑完成后孔口管位置不变是使孔口管与锚索孔始终都处于同轴的位置。由于施工安排或遇有特殊情况，有时锚索安装后不能及时张拉时，钢绞线外露时间可能较长，为防止锚头部位钢绞线锈蚀，要做好临时防护。

8.2.3 当水工混凝土建筑物中预埋管道孔内出现积水时，如出现低温条件施工，会出现冻胀现象，进而对混凝土产生破坏，对此现象要引起重视。国内渡槽施工中，曾出现过类似现象。如放水河渡槽第5跨、第6跨底梁施工中，因混凝土预埋管的冷却水管内余水未及时清理，在低温时出现冻胀现象，导致梁身出现裂缝。

8.2.4 锚固工程完成投入运行后，有些工程可能存在锚固结构易于受到撞击的情况，如边坡加固、船闸水下部分锚索可能受到行船的碰撞，此时锚头要采用隐蔽方式布置，防止外部荷载撞击锚头。

8.2.5 锚墩混凝土达到设计强度才能对锚索实施张拉，一方面是保证锚墩在锚索张拉时不被破坏并均匀传力至岩（土）体，另一方面是保证锚索锚定后，预应力损失可控制在允许范围之内。

8.2.6 锚墩制作是预应力锚索施工的一个重要工序，它关系到预应力保持，制作完成后要对锚墩的几何尺寸、强度等级、制作质量进行多项检查，并填写工序质量评定表，以确保锚索单元工程的施工质量。

8.3 制索与安装

8.3.1 预应力锚索结构复杂，构件多，对防护要求严格，所以

要在工地设置专门的加工场编索。当边坡高陡，锚索运输困难，或施工现场无合适加工场地时，也可以在邻近的工作棚内制作。工作棚要有防雨、防污染等措施，并设置专用工作台或支架。

8.3.2 编制预应力锚索使用的材料较多，不仅要使用的材料备齐，还应检验合格。材料的质量检测是十分重要的工作内容，也是容易被忽视的工作。不仅施工单位要检测，监理工程师也要按着一定比例进行平行检测，检测合格的材料才能用于编索。

8.3.3 如果使用电弧或乙炔焰切割钢绞线，会使其切割部位的钢绞线受高温加热而改变其物理力学性能，所以不要使用。

8.3.4 锚索体制作要注意的问题是：

(1) 单根钢绞线的下料长度要与设计图纸一致，并考虑造孔的实际深度，因为有些时候，锚索孔可能会加深。

(2) 锚索注浆管内径一般为 $\phi 16 \sim 25 \text{mm}$ ，排气管内径则一般不大于注浆管内径。锚索注浆管要耐压，不要使用再生塑料。

(3) 锚索隔离架一般使用模具成型的塑料隔离架，若无合适规格塑料隔离架且需要量不大时，可以使用钢制隔离架。隔离架间距要视部位不同，采用不同的间距。

(4) 使用有色金属材料镀层或涂层的绑扎丝，会对钢绞线产生化学侵蚀，故不要使用。

(5) 导向帽建议用绑扎丝牢固绑扎在锚索体上，不要使用焊接方式。

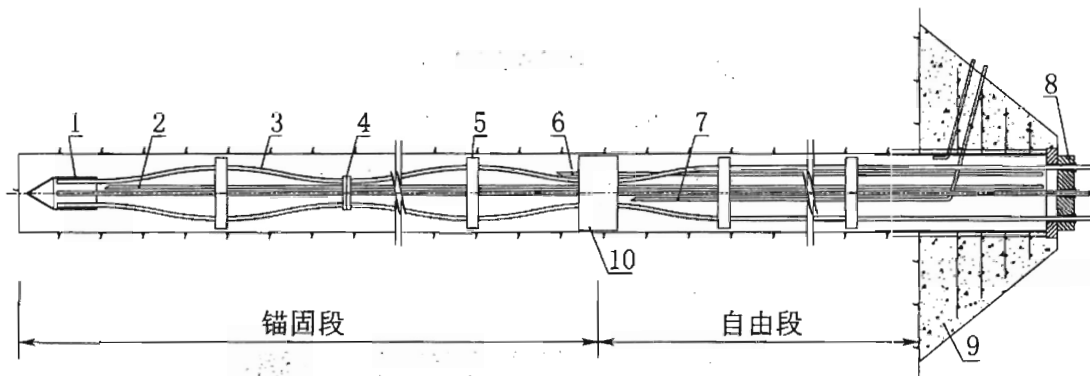
锚索编制完成后，要对照设计图纸进行测量与外观检查。检查内容包括锚索长度、锚固段长度、位置，无粘结钢绞线剥离、清洗及未剥离部位封堵情况、隔离架、排气管、注浆管、绑扎情况及导向帽是否牢固等。检查完成后要编号，并组织验收，签发合格证。无编制合格证的锚索不得运至现场安装。

8.3.5~8.3.11 这七条是对锚索制作、存放、运输、入孔安装的基本规定，强调制作、存放、运输、安装过程中要避免损伤索体、保证锚索顺利安装就位的措施。

8.3.12 组成有粘结或无粘结拉力型及压力型锚索的各根钢绞线

是等长的，各根钢绞线要按设计长度下料且长度要一致。钢绞线下料时，要考虑可能产生的钻孔加深。

采用有粘结钢绞线制作的拉力型锚索要在锚固段与自由段交界处安设止浆装置，并采用二次注浆工艺，第一次注浆形成锚固段，张拉后再进行第二次注浆，将自由段索体保护在水泥结石体中。第一次注浆通过一期注浆管、一期排气管进行。因此，编索时要按要求设置好止浆装置、一期注浆管、一期排气管。有粘结拉力型锚索结构参见图 18。



- 1—导向帽；2—锚固段注浆管；3—钢绞线；4—绑扎丝；5—隔离架；
6—锚固段排气管；7—自由段注浆管；8—锚具；
9—锚墩；10—止浆装置

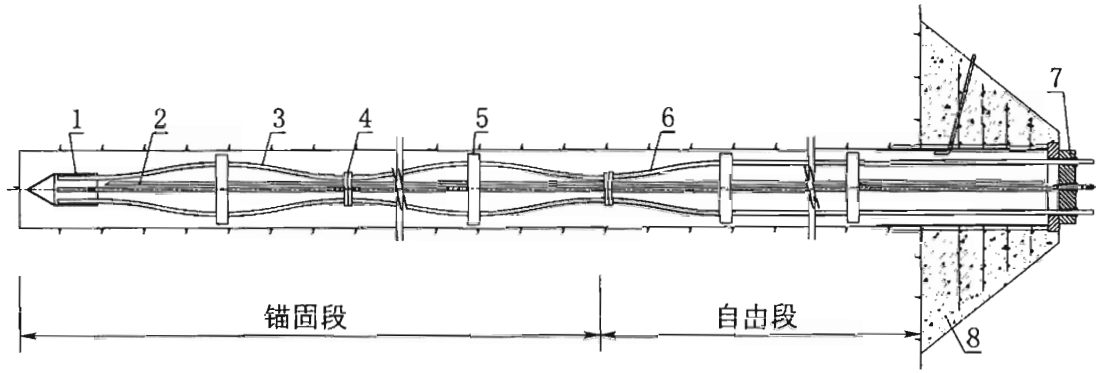
图 18 有粘结拉力型锚索结构示意图

无粘结拉力型锚索制作要注意的问题：

(1) 无粘结拉力型锚索体的锚固段钢绞线与锚孔围岩粘结在一起，从而提供锚固力，因此要将锚固段的无粘结钢绞线护套剥除并清洗干净（参见图 19）。清洗时，建议将各根钢绞线钢丝散丝后，分别清洗干净再合捻复原成单股钢绞线。

(2) 采用无粘结钢绞线的拉力型锚索，钢绞线受力时可以在护套内伸缩而与护套外部的胶结介质无关，因此可以采用全孔一次注浆工艺，安设一根注浆管即可；但锚索孔较深时，建议安设两根注浆管，利于保证注浆效果。

8.3.13 拉力分散型、压力分散型和拉压复合型锚索的各组钢绞线长度是不一致的，需根据设计确定的各组承载体的具体位置计算各

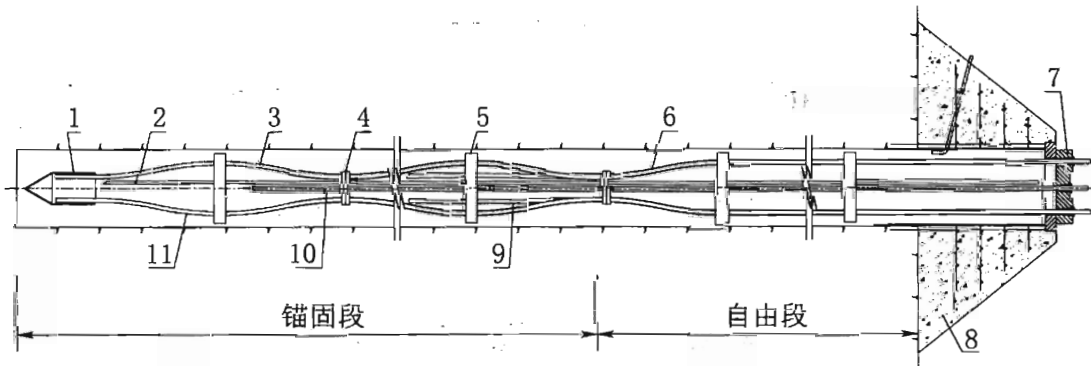


- 1—导向帽；2—注浆管；3—钢绞线；4—绑扎丝；5—隔离架；
6—无粘结钢绞线；7—锚具；8—锚墩

图 19 无粘结拉力型锚索结构示意图

组钢绞线的长度，再根据计算结果下料，并做好编号，便于组装。

拉力分散型锚索建议采用无粘结钢绞线编索，锚固段各组钢绞线护套要剥除并清洗干净。拉力分散型锚索结构参见图 20。

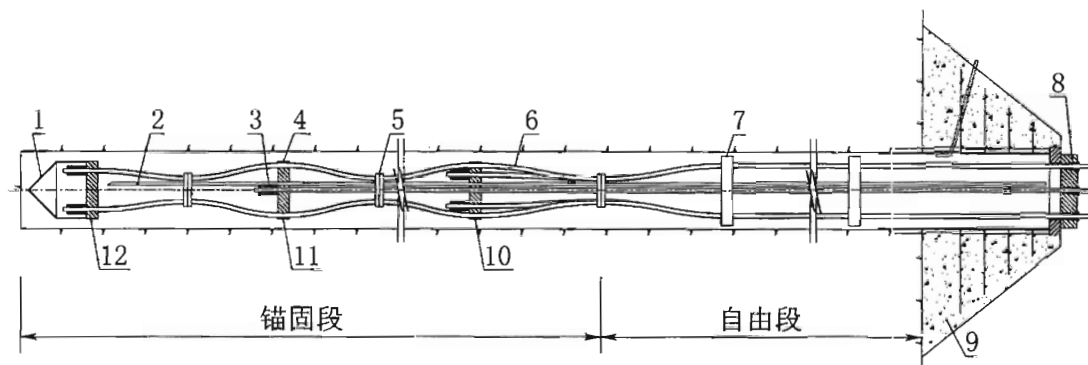


- 1—导向帽；2—注浆管；3—钢绞线；4—绑扎丝；5—隔离架；
6—无粘结钢绞线；7—锚具；8—锚墩；9—第 n 组钢绞线；
10—第 2 组钢绞线；11—第 1 组钢绞线

图 20 拉力分散型锚索结构示意图

压力分散型锚索，钢绞线锚固端多使用 P 型挤压锚，是主要承载、传力构件，要按照操作说明书严格控制挤压过程，确保成形的挤压锚抗拔力不低于钢绞线标准强度。由于钢绞线直径和 P 型锚挤压机型号不同，挤压时的工作压力及挤压后的 P 型锚直径也不同。工程实践表明，P 型锚具用 $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线挤压时

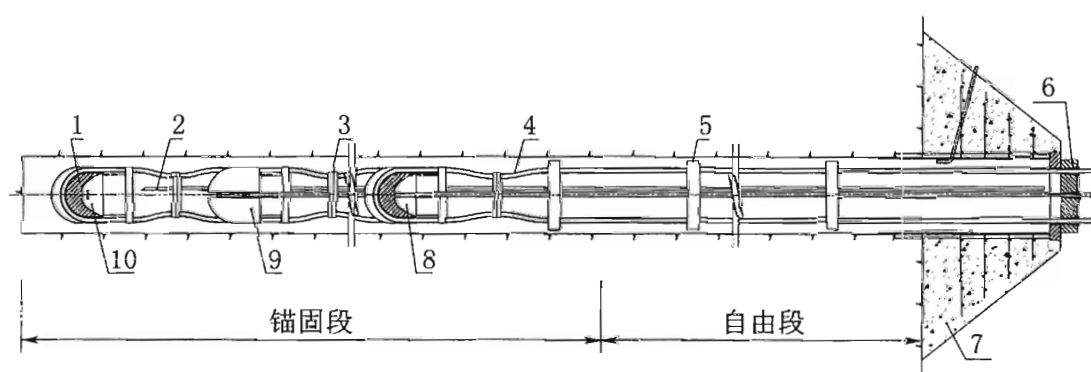
操作油压为 42~45MPa，挤压后 P 型锚直径不大于 30.6mm。P 型锚挤压后，其预应力钢绞线外端露出挤压套不要少于 2.0mm。挤压后 P 型锚具要测量其外径，当发现其外径超过规定值时，要及时更换挤压模具。压力分散型锚索结构参见图 21。



- 1—导向帽；2—注浆管；3—P 型锚；4—承压板；5—绑扎丝；6—无粘结钢绞线；7—隔离架；8—锚具；9—锚墩；10—第 n 组承载体；11—第 2 组承载体；12—第 1 组承载体

图 21 压力分散型锚索结构示意图

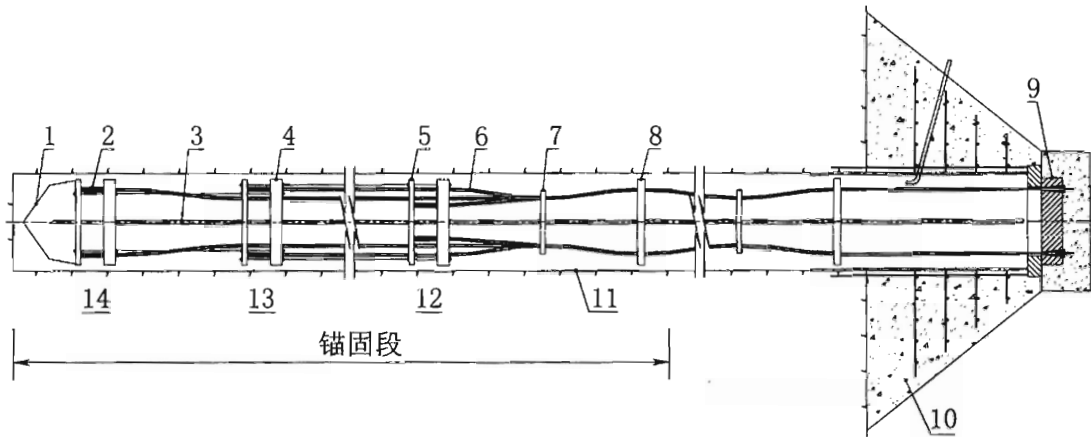
U 型压力分散型锚索是将无粘结钢绞线中点部位顶压弯曲后置于 U 型承载体的弧形槽中，因此单股钢绞线下料长度是按式 (8.3.13) 计算值的 2 倍。U 型压力分散型锚索结构参见图 22。



- 1—U 型承载体；2—注浆管；3—绑扎丝；4—无粘结钢绞线；5—隔离架；6—锚具；7—锚墩；8—第 n 组承载体；9—第 2 组承载体；10—第 1 组承载体

图 22 U 型压力分散型锚索结构示意图

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索的结构参见图 23。



- 1—导向帽；2—单锚头；3—灌浆管；4—承载板；5—辅助板；
 6—无粘结钢绞线；7—绑扎丝；8—隔离架；9—锚具；
 10—锚墩；11—锚孔；12—第 n 组承载体；
 13—第 2 组承载体；14—第 1 组承载体

图 23 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索结构示意图

8.3.14 环形锚索一般在高压水工引水隧洞、压力涵管中为提高承受内水压力的能力而采用。因为锚索使用数量较多，布置密集，又与钢筋绑扎，混凝土浇筑等工序干扰较大。为此，锚索安装十分重要，不仅锚索安装位置要正确，布置要均匀，固定还要牢固；为保证衬砌结构受力均匀，采用编帘法制作、安装平铺顺直、间距均匀，为有序实施张拉作业，要分根编号。环形锚索无论是采用埋管法安装还是采用直接将无粘结钢绞线固定在结构钢筋或定位支架上，一定要保证固定牢固。其他施工作业时不产生位置移动，而且还要注意防止预埋管漏浆造成穿索困难和水泥浆与钢绞线在张拉之前粘结在一起而无法实施张拉作业，只有做好这些才能保证环形锚索的预应力效果。

8.3.15 闸墩中布置的预应力锚索主要作用是改善闸墩的应力状况，主锚索的作用是承担作用在闸墩上的全部或部分水推力。次锚索的作用是改善闸墩的次生应力状况，防止主锚索张拉时应力分布不均匀。由于闸墩尺寸小，锚索密集，锚索间距仅为 0.5~0.6m，张拉力大（主锚索张拉力达 3000kN 以上，次锚索也为

2000~3000kN), 所以预埋管的位置准确十分重要, 是保证闸墩受力均匀、防止产生局部应力集中的关键。为确保锚索位置准确, 隔离架间距要小些, 而且还要布置均匀。

8.3.16 锚固区地下水丰富、环境潮湿, 锚索安装后不及时张拉、注浆, 钢绞线及附属配件易于锈蚀, 使钢绞线与水泥浆握裹力及与岩壁的粘结力降低, 因此安装后应及时张拉, 张拉后要及时注浆, 保证锚固效果。

8.3.17 很多时候预应力锚索采用水平布置, 或倾角较小, 此时锚索极易与孔壁接触, 为减少锚索与孔壁摩擦产生的预应力损失, 建议缩小隔离架或对中支架的间距; 建议对中支架间距为 1~2m。

8.3.18 锚索制作、安装技术复杂, 工序多, 而且锚索标准是否满足设计要求十分重要, 安装前及安装后要严格检查验收。检查验收结果要记录并及时进行锚索制作安装工序的质量评定。

8.4 张拉及锁定

8.4.1 锚索张拉的准备工作包括技术、设备、人员等方面的工作。

1 为使预应力锚索张拉作业安全、无干扰, 锚索张拉前要将作业区范围内所有与张拉操作无关的材料、设备撤离, 与张拉作业有干扰的其他施工项目也要停止施工, 以确保锚索张拉工作顺利进行。

2 锚索张拉是预应力锚固工程施工的关键工序, 张拉作业的质量直接关系到工程 and 人身安全。而锚索张拉质量是由张拉系统——空心千斤顶、高压油泵、压力表或测力计的动作协调、显示准确来保证的。所以在张拉过程中压力表或测力计准确提供预应力锚索的张拉力值至关重要。为此, 在张拉前要对所使用的机具进行配套标定, 并提供千斤顶张拉力—压力表读数关系曲线及其计算公式。锚索张拉时各级张拉力的确定有两种方式: 一是可以运用计算公式, 计算出与锚索各级张拉力相对应的压力表读数, 通过控制油泵压力表读数实现千斤顶对锚索施加各级张拉

力；二是可以在关系曲线上直接查出各级张拉力对应的压力表读数，如三峡水利枢纽工程升船机上闸首预应力锚索张拉用的千斤顶、压力表（测力计）均进行了配套标定。

配套标定采用两种加压方式：一是由张拉千斤顶加压，记录压力机和千斤顶油压表读数，建立二者的关系，并计算回归方程；二是由压力机加压，记录压力机与千斤顶油压读数，建立二者之间的关系，并计算回归方程，最后比较两种加压方式的差别。一般情况下，两种方法差异不大，使用这两条校正曲线时，要优先采用千斤顶加压获得的校正曲线。张拉设备的标定有时候也可采用经过计量部门检定的测力计代替液压机进行。

3 为使锚索张拉作业顺利进行，在张拉机具运抵工地后，要先进行配套试装，并进行空载运行，以便排除液压系统中的空气，检查张拉系统各个环节有无问题。如千斤顶是否漏油，压力表是否回零，高压油泵输油回油是否正常，高压油管系统有无漏油等，发现问题要立即处理。只有在张拉机具运行正常可靠后才能进行正式安装。

4 监测锚索测力计的安装要与孔轴同心，其目的是为了防正产生偏载。

5 预应力锚索张拉施工质量要求高，也存在一定的不安全因素，因此要求操作人员要经专门培训，使其了解并掌握所从事该工种的专业知识和操作技能，保证作业时能准确操作。同时还要熟悉锚索张拉的安全操作规定、预防和排除故障的方法，以便在发生意外情况时，能妥善处理及时排除故障。培训后经过考试合格，取得上岗证才能上岗。为确保施工安全本款强调了非作业人员不要进入张拉作业区，特别是千斤顶出力方向 45° 内不要站人以防不测。

6 预应力锚索具备张拉的重要条件：对于岩（土）体中的预应力锚索，锚固段浆液结石的强度和锚墩混凝土的强度要达到设计值；对于混凝土结构中的预应力锚索则要求混凝土结构强度达到设计值。锚固段浆液结石、锚墩和结构混凝土强度值要通过

检测结果测定。

7 张拉作业前有一项重要工作：检查应检测的钢绞线、锚、夹具、钢绞线-锚具组装件静载试验是否完成，检测资料是否齐全。

8.4.2 对张拉设备、测力计的按时标定是施工过程中经常被忽视的问题，本条规定了张拉设备标定的频次和标定的条件，是为了进一步规范标定工作，也为检查标定的情况提供了检查依据。

8.4.3 一般情况下，设计图纸会对锚固工程中每个锚固区的锚索进行编号，并对张拉顺序和张拉工艺做出原则上的规定。当设计没有编号时，施工单位要根据现场实际情况自行编号，按照设计和规范要求设计张拉顺序和施工工艺，并报监理工程师批准后执行。

8.4.4 各种预应力锚索要根据实际情况采取不同的张拉顺序，其原则如下：

(1) 对布置在边坡、地下洞室和水工建筑物基础的预应力锚索，为降低群锚效应对预应力损失的影响，要先对布置在中间的预应力锚索进行张拉，再依次张拉布置在周边的锚索，或者按照设计要求进行。在边坡岩性复杂、压缩变形大的部位或预应力混凝土结构中，由于锚索张拉力大、索体长、形状复杂，为了减少预应力损失，可以采取间歇张拉的方式，待被锚固的介质或索体应力充分调整，早期预应力损失基本完成后再进行补偿张拉，使锚索应力达到设计应力值后锁定。锚固力损失值可以按式(4)计算：

$$\Delta\sigma = E L_f / \lambda \quad (4)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——预应力损失，MPa；

λ ——锚固时钢绞线回缩值，mm；

L_f ——预应力钢绞线自由段长度，mm。

(2) 压力隧洞混凝土衬砌的环形锚索张拉时，为避免由次生应力的作用而引起洞段端部混凝土产生裂缝，不建议采取由中间向两端推进的张拉方式。如小浪底水利枢纽的排沙洞（其内径为

6.5m), 采取由两端向中间(即先锁口)的张拉方式, 就未发现裂纹(缝)。张拉过程中连续缓慢均匀加荷、多分级、跳束分序张拉也是为了减少群锚效应的作用。

(3) 对穿锚索采取两端张拉的方法有利于索体应力的充分调整, 所建立的有效预应力值相对较高。当然也有一些预应力混凝土结构, 由于构造上的原因, 索体长度超过 24m 而采用一端张拉的工艺。如深圳水库库尾布吉河上的箱形预应力混凝土渡槽(长为 630.45m), 预应力锚索采用一端张拉, 其固定端采用 BM 型锚。张拉过程中为了减少预应力损失, 采取了多项施工技术措施, 如: 分 10 级加载, 分序跳束、间歇张拉, 工程完工后运行正常。

对穿锚索锁定时, 不可同时锁定, 建议一端先锁定, 由于锁定端钢绞线回缩, 使另一端张拉千斤顶的实际张拉力降低, 为此另一端要进行补偿张拉后再进行锁定, 这样的张拉作业可保证锚索达到设计要求的锚固效果。

(4) 弧门闸墩预应力锚索, 根据其受力性能和作用, 一般分为主锚索和次锚索, 其主锚索一般长度较长、张拉吨位较大, 在张拉过程中要注意下列事项: 首先, 正式张拉前要严格控制锚索的预紧力值, 即采用多次循环对称预紧的方式进行预紧作业, 使每根钢绞线在正式张拉前的受力得到充分调整, 钢绞线应力基本均匀、一致; 其次, 在正式张拉过程中要严格按照两端同步、位置对称的张拉顺序进行, “位置对称”主要是指严格按照锚索的实际布置位置依照上下左右、循环对称的方式进行锚索张拉作业, 以降低群锚效应。如锦屏一级水电站大坝的弧门闸墩预应力锚索工程, U 型主锚索布置在闸墩立面方向, 设计张拉吨位为 3800kN, 最长达 93m。直线型次锚索布置在闸墩横向方向, 设计张拉吨位为 3500kN, 长度为 17~19m; 采取了上述技术措施后, 锚索实际锚固力完全满足设计要求, 工程完工后运行正常。

8.4.5 为了使锚索体各根预应力钢绞线在张拉时受力均匀, 采用单孔千斤顶对预应力钢绞线进行逐根预紧, 预紧力一般为设计

张拉力的 10%~20%。预紧过程中要特别注意不可遗漏，所有预应力钢绞线全部预紧完毕后，再进行整束张拉。

8.4.6 锚索张拉过程中分级加载的级数与索体的长度、设计张拉力大小、锚孔的质量、套管材料及张拉方式等有关。一般情况下可分为 4~6 级，特殊情况可以采取多级张拉。

8.4.7 对预应力锚索实施超张拉是为了使锚索锁定后，补偿因钢绞线回缩、锚头压缩、钢绞线与孔壁摩擦而导致预应力锚索产生一定的预应力损失，保证锚索的锚固力仍然可达到设计锚固力的一项重要措施。

锚索张拉是预应力施工中的关键工序，在锚索张拉过程中一般采取的程序：一是直接张拉到设计的控制应力，即 $0 \rightarrow \sigma_{\text{con}}$ ；二是超张拉至 $m_1 \sigma_{\text{con}}$ 或 $m_2 \sigma_{\text{con}}$ (m_i 为张拉系数)，持荷稳压 T_{min} 后，再降至设计张拉应力 σ_{con} 时锁定。实际工程中亦有采取一次性超张拉的方法，即 $0 \rightarrow m_6 \sigma_{\text{con}}$ 进行锁定，此法为一次性使预应力锚索达到张拉控制应力。采取超荷载张拉要比不超荷载张拉所建立的预应力松弛损失小。超张拉的目的是为了抵消锚索锁定后预应力松弛损失，以满足设计要求的锚固力值。

8.4.8 锚索张拉过程中要缓慢加载，其目的是为了索体能充分调整应力，使之受力均匀。同样被张拉的锚索在卸载时也要缓慢进行。如果采取快速卸载可能会导致锚固端受瞬时荷载冲击，使锚固段端部受到不利的影响，甚至会造成水泥结石或混凝土结构出现裂缝，所以要求严格操作工艺，确保预应力锚索施工质量。

8.4.9 稳压时间的控制，同样是为了索体能充分调整应力、使之受力均匀。每级荷载施加后测定钢绞线伸长值是为了更加准确地判定每级荷载的准确性。锁定后测定的回缩量不大于 5mm 是为了保证锚索的应力损失满足设计要求。

对于长度小于 20m 的预应力锚索，由于张拉伸长值比较小，如果还按照一般锚索锚具的 3~5mm 的回缩量进行控制，将造成相对较大的预应力损失，锚索的实际锚固力值得不到有效保证。为有效控制回缩量、降低预应力损失，可以视情况采用回缩

量小于 1mm 的专用锚具或采用单根循环对称张拉的方式进行张拉作业。

8.4.10 施加给预应力锚索的实际张拉力，本标准采用张拉千斤顶实际测定的出力判定并采用相应荷载下的实测伸长值复核，而不采用锚索测力计在锚索锁定时的指示值判定，其理由如下：

(1) 锚索测力计不是每束锚索都安装的，一般是按锚索总数的 5% 布置，所以不推荐利用锚索测力计判定每束锚索的锁定荷载。

(2) 锚索测力计都是被动受力的构件，实际荷载一般小于张拉千斤顶的出力，如图 24 所示。图 24 所示的是三峡船闸的 SM2-3-19 监测锚索的测力计荷载与千斤顶荷载关系曲线。

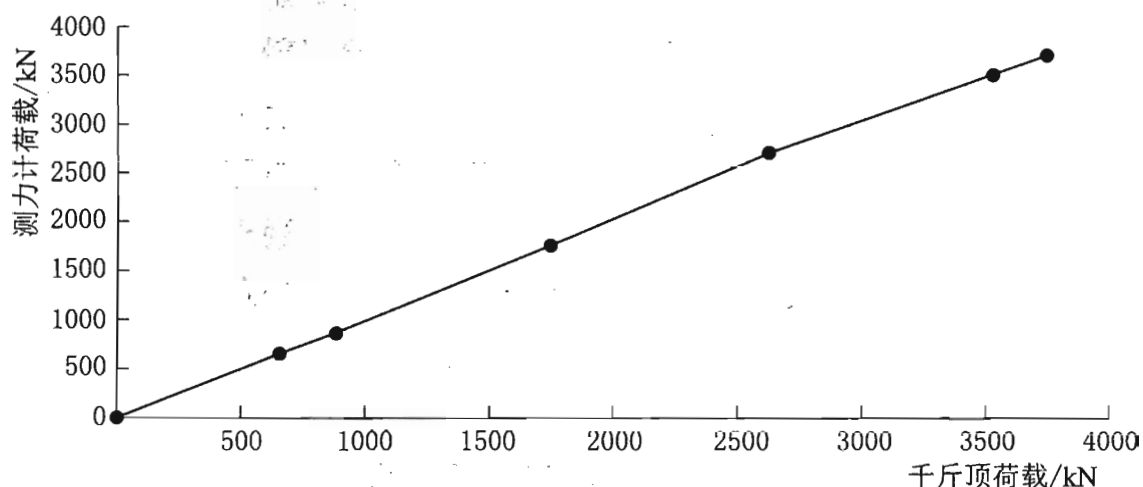


图 24 SM2-3-19 监测锚索的测力计与千斤顶荷载关系曲线

(3) 由于钢绞线的弹性模量较稳定，一般情况下实际测定各级荷载下的理论伸长值和实测伸长值基本是一致的。

为了保证锚索锚固力的精准确定，在每级加载后要同步量测其伸长值；锚索锁定后要量测预应力钢绞线的回缩量。直线型预应力锚索的理论伸长值可以按式 (E.0.2) 计算，实际伸长值与同级荷载下的理论计算伸长值进行比较，再根据 8.4.11 条的规定判断张拉质量是否符合规范和设计要求。

8.4.11 工程实践表明，锚索张拉时发生实测伸长值与理论伸长

值有偏差，这可能是由于张拉机具出现故障或锚固段发生滑移，也有可能是岩锚的自由段长度未能满足设计要求，届时要停机检查处理。直线型锚索理论可以按式（D.0.1-1）计算，实际伸长值可以按式（D.0.2-1）计算。

8.4.12 测力计的主要功能是测定锚索锁定后，预应力锚索工作全过程预应力保持程度的仪器。

尽管测力计在安装前已经与张拉机具配套标定，但由于测力计精度、对工程环境的适应性、现场安装精度和张拉工艺等多种原因的影响，导致千斤顶油压表与测力计数显值的瞬时数据存在一定的差异，有时甚至差异较大。通常测力计读数比千斤顶油压表读数要小，一般情况下两者差值在±10%以内。如果超过±10%，要查找原因。

8.4.13 预应力锚索锁定后48h内，预应力损失过大不满足本标准要求时，要采取补偿张拉措施，以确保张拉力满足设计及本标准要求。在深厚覆盖层、松散堆积体和流变岩体中进行锚固时，往往发生压缩变形，锚索张拉后初期预应力损失较大，经验表明进行补偿张拉是必要的。

8.4.14 由于锚具摩阻不同或锚具安装工艺上的问题，致使夹片在张拉过程中不能平齐跟进，出现错牙。这时夹片对钢绞线的咬合面积及咬合力减小，致使锚索的张拉效果受到一定的影响。所以锚索张拉中夹片错牙不能过大，否则就要放张退锚调换夹片，重新安装后再行张拉。

锚索进行放张退锚作业时，要设计专门的退锚器进行锚索的放张及退锚作业，以确保放张退锚作业的安全。以往在岩（土）体加固和混凝土结构预应力锚索张拉中，由于各类原因而要放张退锚，传统的方法是用千斤顶加插片。这种方法存在着很大的安全隐患。近期长江预应力工程有限责任公司研发了DP型快速退锚器，先后在长江三峡枢纽对外交通工程，雅砻江锦屏一级、二级水电站高边坡岩锚加固工程中成功使用，取得了很好的经济效益和社会效益。

8.4.15 压力分散型锚索张拉较为复杂。目前的张拉方式分为单组张拉、整体张拉和先分组张拉再整体张拉三种方式。但单组张拉不能反映最终设计张拉力；整体张拉各组钢绞线应力不等；先分组张拉后整体张拉，其锚索各根钢绞线的应力较为均匀，且能反映最终设计张拉力，故此方法较为合理。如山西省黄河支流张峰水利枢纽溢洪道闸室基础预应力锚索加固工程，设计总锚固力 220000kN；甘肃省黄河支流临洮海甸峡水电站大坝预应力锚索加固工程，设计总锚固力 115200kN，施工中均采用了差异张拉的方法。张拉工艺为先分组差异荷载张拉，再整体超荷载张拉。其步骤如下：

(1) 计算各组的差异张拉力。

(2) 按计算的各组张拉力进行差异张拉。

(3) 在各级差异张拉稳压后，整索分级张拉至设计超张拉力，稳压 10min 锁定。

8.4.16 目前我国对预应力锚索采用的设计张拉力大部分为 2000～3000kN，超过 5000kN 较少。但有一些工程采用了 5000kN 级预应力锚索。由于 5000kN 级预应力锚索结构复杂，钢绞线根数较多，张拉较繁琐，要专门制定张拉程序。

当单根锚索设计张拉力超过 5000kN 时，施工单位不具备大吨位张拉千斤顶时，为满足设计需要，可以制定专门的张拉办法。

8.4.17 预应力锚索张拉过程中出现断丝、夹片损坏、千斤顶漏油、压力表反常、读数波动、锚墩开裂、锚固段滑移都是不安全因素，也影响锚固效果，要及时排除。

8.4.18 岩（土）体和混凝土结构锚固工程预应力锚索张拉记录，是工程竣工验收及运行期可追溯的技术档案资料；其内容包括：

(1) 张拉机具及其标定资料。

(2) 所采用的张拉程序、工艺及技术措施。

(3) 安全操作技术措施。

- (4) 分级加载、持荷稳压。
- (5) 各级张拉力对应的实测伸长值。
- (6) 稳压锁定，回缩值。
- (7) 张拉过程中的监测记录。
- (8) 张拉过程中异常情况。
- (9) 实测伸长值与理论计算伸长值比较。
- (10) 质量签证记录。

锚索张拉过程不仅应做好记录，还应及时进行张拉工序的质量评定。

8.5 注 浆

8.5.1 由于锚固工程对象、锚固结构型式多种多样，故锚索注浆时也有多种注浆形式。如针对复杂地质条件下造孔的破碎岩体进行固结灌浆；锚索锚固段注浆和自由段注浆，及对钢筋混凝土结构预应力锚索孔道的回填注浆。

8.5.2 锚固工程关系到结构物的稳定与安全，往往与复杂的工程地质条件关系密切，注浆浆液质量十分关键。因此，在注浆前通过试验确定合适的注浆工艺、注浆压力、浆液配比等，对于保障注浆质量和锚固效果尤其重要。

8.5.3 锚索孔体积较小，锚索体的构件多、类型多，锚固段型式多且结构复杂。要使浆液注入饱满，并将锚索体包裹，保护层满足规范要求，其浆液质量十分重要。不仅强度值要达到设计要求，还要求浆液的可灌性、流动性好。为保证这些指标，要在锚索施工前进行浆液配比试验，选择可灌性、流动性好的浆液施灌，以确保锚索孔的注浆效果。

8.5.4 浆液制备要注意下列问题：

(1) 锚索封孔注浆质量的好坏，浆液配比是极为重要的因素之一。采用强度等级为 42.5 或 52.5 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥拌制纯水泥浆灌注时，水灰比建议为 0.38~0.45；采用水泥砂浆灌注时，水灰比建议为 0.40~0.50，其流动度直径不小

于 150mm，3h 泌水率建议为 2%，可以使孔内浆液密实。

(2) 制浆时搅拌时间不少于 30s，目的是使水泥、外加剂和砂得以充分搅拌，获得流动性较好的浆液，以达到最佳的注浆效果。纯水泥浆液如果搅拌时间过长，会降低浆液的流动性。

(3) 施注时建议边制浆、边注浆。如果因故中断，已发生初凝的浆液要做废浆处理。

8.5.5 为保证注浆质量，注浆时要注意下列问题：

1 按施工浆液配比准确投料，使浆液搅拌均匀，要定时监测浆液密度，使拌制的浆液质量符合设计要求。

2 浆液密度要在注浆站测定。当注浆过程中因堵管而冲洗输浆管路，会造成实际注入浆液所测密度减小，影响注浆质量；而在注浆站测定浆液密度，更能真实反映注浆质量。

3 浆液流动度直径不小于 150mm，目的是使浆液的流动好，以达到最佳的注浆效果。

8.5.6 封孔注浆即二次注浆要在锚索锁定后 72h 内进行，目的是确保预应力损失控制在 10% 以内。锚索注浆是否饱满关系到锚索的耐久性，注浆前计算理论注浆量，以便于控制实际注浆量。但因为锚索内部结构复杂，构件多，占用一定的体积，可能存在实际注浆量与理论注浆量不一致的情况。为确保注浆效果，要采用无损检测手段测定注浆饱满程度。

8.5.7 为加强锚固工程的质量监控，对注浆施工的各项质量数据要全面、及时、准确地掌控，采用注浆自动记录仪是必要的。

8.5.8 注浆连续作业是确保注浆质量的关键之一，当遇有特殊情况中断注浆时，建议采用压缩空气对注浆管、排气管进行疏通，确保管路畅通以利复灌。

8.5.9 注浆体结石强度直接反映锚固效果，锚索孔注浆过程中要进行取样，测定 28d 龄期水泥浆或水泥砂浆立方体抗压强度值。锚固段注浆体结石强度满足设计要求后再进行锚索张拉，当注浆体结石强度不满足设计要求时，要延期张拉或采用其他补救措施。

8.5.10 钻孔孔道注浆要注意下列问题：

1 有粘结锚索因钢绞线直接与注浆体接触，锚固段与自由段之间设置止浆环，要分两次注浆，第一次对锚固段注浆，待锚固段注浆体结石达到设计强度后张拉锚索，张拉后进行自由段注浆称为二次注浆。而无粘结钢绞线制成的锚索，锚固段要剥离保护套、清洗防腐油脂，才能使注浆体与钢绞线直接接触、浆液结石后才能承受张拉力，而自由段钢绞线带有保护套钢绞线，不直接与注浆体接触，锚索张拉时钢绞线仍然可以在保护套的保护下自由伸长，不影响施加张拉力，所以可以与锚固段同时注浆。

2 下倾锚索孔道注浆前将孔道冲洗干净，排干积水，目的是使浆液与孔壁围岩粘结成整体。

注浆压力是保证注浆质量的关键。岩（土）体锚索孔道注浆，由于孔壁围岩（土）的性状存在差异，所以孔壁吸浆情况各不相同。一般情况下，一个锚固区注浆前要做适当数量的注浆压力试验，从试验成果中筛选出最佳施注参数。注浆压力选择要考虑锚索长短，是仰孔还是俯孔，一般情况下锚固段部位的注浆压力不大于 0.5MPa。

当浆液温度超过 40℃ 时，浆液因气温过高而降低流动性难以灌注，为使注浆作业顺利进行，夏季注浆时，制浆系统可设遮阳棚，加冰制浆，输浆管线进行隔热保温。冬季日平均气温低于 5℃ 时，浆液流动性明显降低，甚至出现管线冻胀，所以要采取有效的防寒保温措施。

3 为使水平锚索孔道注浆密实，要求适当提高注浆压力，使其顺利进浆；进浆缓慢时，适当稳压间歇后，再稍增压施注，直至孔道不吸浆。对封孔质量要求较高、孔壁围岩较完整、裂隙不发育的锚索孔道可以采用真空注浆。

4 上仰孔有粘结锚索孔道注浆工序较为复杂，难度较大。止浆设施的可靠性特别关键，其制作、安装、检验要认真仔细。排浆管出口距孔顶岩面控制在 50mm 以内，目的是为了孔顶浆液密实，并作为二次注浆的进浆管。

岩（土）体上仰锚索孔道注浆时，为避免孔口冒浆，施注前用环氧砂浆将孔口段先行注浆 2~3m，稍作间歇后再进行全孔注浆，这对孔道浆体密实是有效的。

5 对穿锚索孔道注浆一般为一端进浆，另一端排气（或排浆）。水平对穿锚索，为使孔道充填密实，要适当提高注浆压力，必要时可以采用真空注浆。

6 在边开挖边锚固的同一作业区，为使锚索的锚固段及自由段浆体固化过程中不受爆破影响，要求在作业区内采取控制爆破措施。注浆初凝后 3d 之内，注浆结石强度仍较低，浆体与孔壁的粘结力也较小，此时爆破开挖时要控制爆破质点振动速度。DL/T 5135—2013《水电水利工程爆破施工技术规范》附录 A 中规定预应力锚索注浆体 3d 之内允许爆破质点振动速度为 1.0~2.0cm/s；3~7d 为 2.0~5.0cm/s；7~28d 为 5.0~10.0cm/s。本标准采用这一控制指标，有条件情况下，尽量取下限。为了施工安全，不影响开挖进度，亦可以在浆液中掺入适量对锚索无害的速凝剂，但实施前要进行试验验证。

7 本标准规定锚索的注浆量要与理论计算结果相近。在附录 F 表 F-6 中注浆工序质量评定表中还列出了计算理论注浆量的要求。但由于锚索孔内锚索体结构复杂，组装件较多，很难十分准确算出理论注浆量，只是一个大概的数值，主要目的是了解该锚索孔大致要注多少浆，做到心中有数。但锚索是否已注浆密实、锚索体是否已被浆液全部包裹，还需用无损检测方法进行判定。锚固工程可进行无损检测，测定注浆的密实程度。

8.5.11 预留孔孔道注浆：

1 孔道注浆连续一次性完成更能保证注浆效果。当遇特殊情况中断时，疏通进浆管及排气管以利复灌。

2 预留孔道注浆要注意下列问题：

注浆管、回浆管（排气管）畅通是注浆顺利进行的前提。预留孔孔道施注前将孔道冲洗干净，排干积水，目的是使浆液与孔壁粘结成整体。

实践证明真空度控制在 $-0.08\sim-0.1\text{MPa}$ 能取得良好的注浆效果。

浆液密度是保证结石强度的关键，要及时检测。同一孔道注浆作业一次完成，目的是保证孔道内浆液充填密实，保证注浆质量。

3 环锚及多波形曲线锚索孔道注浆工艺比较复杂，本条规定的目的是为了使其孔内浆体密实。清江隔河岩水电站引水隧洞衬砌环锚孔道注浆及南水北调穿黄隧洞衬砌环锚孔道注浆等多个工程实践证明，利用安装在曲线孔顶部的出浆管（排气管）进行补充注浆，对保证孔道注浆质量是十分有效的。

8.5.12 注浆效果是预应力锚索防护良好的保障，也是保证预应力永久保持的重要环节，对注浆效果的检查、检测要认真实施，同时根据检查、检测记录及时进行该工序的质量评定。

9 安全监测与锚固试验

9.1 设计

9.1.1 预应力锚固对象地质条件较为复杂，勘测设计时不可能查的十分清楚，即使安排了较多的勘测工作，但随着工程的进展，还可能发现新的情况，因此加强预应力锚固工程安全监测是必要的。根据监测结果，对锚固参数进行调整是锚固设计的动态控制措施，目前我国的长江三峡、黄河小浪底、金沙江溪洛渡及向家坝、雅砻江锦屏等大型水电工程均开展了安全监测工作，并安排专门队伍实施。

安全监测结果还是工程验收和工程安全评价的依据，为了做好安全监测，本标准规定了要遵守的基本原则和对监测仪器选型的要求。规定了仪器布置的数量以及试验性锚索要安装监测仪器等。安全监测以施工期和运行期为主，并及时、合理地运用监测资料指导施工、完善设计；监测仪器尽可能在施工初期安装；规定了仪器布置的数量以及试验性锚索要安装监测仪器等。

9.1.2 预应力锚固工程的施工图纸中应对监测仪器的安装保护、监测方法等提出相应的技术要求，这是设计文件中要有的内容。

9.1.3 锚固工程的安全监测分为两个部分：一部分为预应力锚索本身受力状态的监测，主要内容为锚索测力计、各根钢绞线的应力状态等；另一部分为被锚固介质的加固效果，主要内容为锚固力变化、岩（土）体位移、结构物内部应力、应变等。安全监测结果要及时整理分析，是锚固工程验收时的重要依据之一。

9.1.4 对于特殊部位的监测应根据锚固工程的特点和结构设计要求专门进行设计。

9.1.5 对安全监测信息化平台所需要的仪器、设备及信息化处理软件等均做出了明确规定。

9.1.6 监测预应力锚索及被锚固介质受力状态的仪器是锚索测

力计、多点位移计、测缝计等设备。对于锚索测力计而言，由于锚头部位为锚索的外露端，长期暴露于自然环境中，风吹、日晒、阴雨、潮湿，工作环境恶劣，要求仪器适应工作环境，由于测力计还是对被锚固介质稳定监测的主要仪器，要求该仪器长期有效工作，要求测力计耐久实用，适应锚固区域的工作环境，并与锚固工程相协调，同时也便于转入自动化监测。在施工初期未实现自动化监测时还要方便手动监测。

9.1.7 锚索体工作状态主要测定锚索的实际张拉力和张拉力的保持程度。锚索测力计是锚索受力状态观测的主要仪器，主要观测锚索锚固力变化。锚索张拉时，它和张拉千斤顶在各级张拉力下的压力表数值，与锚索伸长值有正相关关系。张拉千斤顶反应的压力表数值、锚索自由段伸长值和测力计数值都是锚索体受力情况分析的基本数据，所以分析锚索体受力情况时要综合这三个监测数据认真分析处理。

其他观测项目主要指每根锚索组成的每根钢绞线或钢丝的受力均匀性，监测方法是在每根钢绞线中粘贴应变片。

预应力锚索安全监测内容主要是锚索体受力状况和被锚固对象的锚固效果两项内容。这两项内容都离不开锚索测力计，锚索测力计是观测锚索受力状态的主要仪器，同时也是对被锚固介质稳定性评价的主要手段。锚索测力计布置的数量是根据建筑物等级、边坡等级，按预应力锚索总量比例确定的。例如东深供水三期扩建工程 4.3km 大型薄壁双向预应力渡槽，24m 跨试验段纵向 1000kN 级预应力锚索共 10 束，其中 2 束安装测力计；横向 U 型 500kN 级无粘结预应力锚索共 10 束，其中 4 束安装测力计，经过一年多监测取得了大量数据。三峡水利枢纽升船机闸首混凝土结构共设置 3000kN 级预应力锚索 657 束，其中 56 束为监测锚索，占锚索总量的 8.5%，四川省雅砻江锦屏水电站左岸高陡边坡共布置 1000kN、2000kN 和 3000kN 级预应力锚索 5000 根，其中安装测力计 242 台，占锚索总数的 4.8%。

9.1.8 表 9.1.8 所列监测锚索比例是参照已建工程经验确定的，

锚固工程设计时要根据建筑物等级、锚索数量综合确定。当锚索数量较多，可能用的测力计较多，此时可降低安装比例，但要以满足设计要求为原则，测力计安装比例不应小于 3%。

9.1.9 在提倡预应力锚索采用新材料、新技术、新工艺、新产品的同时，也要科学慎重地验证其可靠性、耐久性。

9.1.10 监测应按设计要求及时实施，并要求监测锚索最先安装，主要目的是为了测得锚固施工过程中全部资料，避免有关锚固体变形、应力等资料的丢失，同时为了使监测成果最大限度地指导设计及施工。

9.1.11、9.1.12 预应力锚索测力计是监测加固后锚索预应力变化的主要仪器，其监测结果是判定围岩稳定和水工建筑物运行安全与否的重要依据。锚索的预应力变化是一个缓慢的过程，不一定发生在锁定后 48h 内。预应力损失或预应力增幅超过设计允许值时，均不利于锚索的正常工作。建立自动化监测信息平台时，可按预应力损失超过设计锚固力的 10% 或预应力增幅超过设计锚固力的 20% 设置预警值。一旦锚索测力计测值超过预警值时，平台可以迅速报警，以便及时采取工程措施。

9.2 试 验

9.2.1 预应力锚索试验包括两项内容：一为材料试验，二为锚索受力性能试验。这两项试验都是重要的施工内容，按 3.3.1 条的要求均要在预应力锚固工程施工之前完成。

9.2.2 锚索材料检验包括预应力钢绞线、预应力钢丝、预应力混凝土用螺纹钢筋、锚具硬度以及钢绞线-锚具组装件静载检验等内容。附录 A 给出了预应力钢绞线力学性能检验方法和频次；附录 B 给出了预应力钢绞线-锚具组装件静载试验方法和频次；附录 C 给出了预应力锚具硬度检验方法和频次。材料检验应按附录 B 和附录 C 的规定进行。至于其他材料因为相应标准已有规定，其检验方法这里不再赘述，但其检验频次已根据锚固工程特点做了调整，具体调整情况已在相关条文中做了规定。

9.2.3 采用预应力锚索加固的边坡、地下洞室、水工建筑物基础及预应力混凝土工程，一般都是比较重要的水利水电工程。特别是1级、2级水工建筑物和1级、2级边坡工程，一旦边坡失稳、地下洞室的变形超标，或坝基抗滑稳定安全系数不满足规范要求，都会危及结构物的安全。为保证加固对象的安全，要求对锚索的受力性能进行检验和试验。

对于预应力锚索使用数量较大，且地质条件较为复杂，采用5.3.1条确定锚固段的胶结长度有一定困难，或对胶结材料与锚索孔壁粘结强度取值不十分准确时，应安排进行锚索受力特性试验，以合理确定胶结材料与孔壁的粘结强度指标，指导锚固段长度的确定。

锚索受力试验目的是验证锚固段的长度是否合适、张拉程序和工艺以及预应力锚索的预应力保持效果。试验锚索要具备长期观测条件。锚索受力特性试验的锚索数量不应少于3根，对锚固区地质条件复杂，布置锚索数量较多的部位还应增加试验的锚索数量。

锚索受力特性试验，是指导本锚固区域锚索施工的重要手段，试验地点应有代表性。一般情况下，设计文件中可规定试验部位，当设计文件中未规定试验部位时，应由设计、建设单位、监理、施工技术人员共同研究选定。锚固工程工艺复杂、试验成果需要认真分析与评价，试验完成后要组织编写详细的试验专题报告。报告内容要包括工程概况、锚索布置、试验地点、试验方法、试验结果及分析、监测结果、结论及建议等。试验报告要提交监理审核批准。试验报告是锚固工程验收的重要资料之一。

9.2.4 混凝土预应力衬砌的环形锚索，一旦失稳或结构内部应力失控，将影响运行安全，甚至发生安全事故，所以对预应力混凝土衬砌中布置的预应力锚索建议进行原位的锚索受力性能试验。如黄河小浪底排沙洞环形锚索、吉林省中部引水工程压力涵洞的环形预应力锚索在锚固施工前均进行了原位的受力性能试验，试验结果都用于指导环形锚索的施工。

9.2.5 预应力锚索受力性能试验所用的材料、锚索的结构、张拉力、张拉设备及试验中所拟定的工艺都要与工程实际相同。这样的试验成果才具有代表性、科学性，才能对工程具有指导意义。

9.2.6 试验前，测力计、压力表及千斤顶三者要配套标定，根据标定结果在张拉千斤顶与压力表之间建立相关关系。试验锚索的承载能力以压力表的指示值为准，并用张拉荷载对应的实测伸长值复核。测力计是用于试验锚索锚固效果和预应力保持程度的观测仪器，要长期观测。

9.2.7、9.2.8 受力性能试验时张拉力可以按 5 级加载，分级记录测试读数；初始张拉力取 $0.2\sigma_{con}$ ，并以此为起点逐级加荷卸荷，与常规张拉施工工艺一致，但试验锚索施加最大荷载时，钢绞线的平均应力不宜超过预应力钢材强度标准值的 75%。

9.2.9、9.2.10 破坏性试验的目的是确定锚索的承载能力、锚固段的力学参数和锚索的受力状态。破坏性试验不要在锚固部位安排，只能选择与工程条件相似的部位进行。由于主要是确定锚索的承载能力和锚固段长度，为节省试验成本，可以采用短锚索，但锚索自由段长度不要小于 10m。破坏性试验的张拉力分级、加荷速率都要专门制定。判定是否破坏主要有两种方式：一种为从锚索的应力—应变曲线分析，当锚索达到屈服状态可以判定为破坏；另一种为锚固段发生连续位移或部分钢绞线发生断裂可以判定为破坏。

9.2.11 各项试验完成后，要及时提出试验报告，便于及时分析试验结果，指导施工。

9.3 实 施

9.3.1 预应力锚固工程的监测工作要由有资质单位实施，是因为锚固工程监测技术复杂，包括仪器埋设、资料整理分析，对监测数据的合理判定，定期编制监测日报、周报、月报、年报及各项验收阶段的监测资料成果分析等，这些工作技术含量较高，

要有相应技术与监测经验的人员完成。

9.3.2 锚索测力计是由差阻式测量元件组装成的钢环式测力装置，SL 597《锚索测力计校验方法》中较为详细的规定了测力计校验方法，要按此规定执行。

9.3.3 锚固工程的监测分为两类：一类是对锚索本身的锚固效果进行监测，主要监测锚索锚固力的变化情况，确定预应力损失程度，其主要成果是锚固力~时间变化过程线；另一类是对被锚固介质的监测，主要监测被锚固对象的位移、结构物内部应力、应变和结合部位的开合度。这些物理量的变化规律都是锚固初期变化大，后期逐渐平缓收敛，所以锚索锁定初期监测频次要密集，间隔时间要短，后期可以疏稀，间隔时间可以长些。

9.3.4 锚索的监测工作要与预应力锚索施工同步进行，这主要是为了测得被锚固岩（土）体、结构的应力、应变初始值，并按照监测要求进行后续监测。同时，按照本条规定定期将测得的资料进行分析整理，及时向有关方面反馈，以便调整设计参数和张拉程序及工艺。

9.3.5 施工期监测转入运行期监测时，除了要在现场实地交接外，还要对监测资料做全面、详细地移交。在移交过程中，如有仪器发生故障、失效，要及时修复，以便继续监测。

9.3.6 为了确保监测成果的准确性，要妥善保护监测设施，保证监测信息平台的正常工作。当监测信息平台发出预警信号或监测数据变化异常，要会同设计人员查明原因，及时相应处理。

9.3.7 阶段性和定期性的监测报告非常重要，其内容要做到详细、全面，并对锚固工程运行情况做出评价。

10 质量检查与验收

10.1 质量检查

10.1.1~10.1.3 施工单位要严格遵守国家、地方政府制定的关于建筑工程施工质量的法律、法规，认真执行工程承包合同中有关质量方面的条款。在施工中，要建立有效的质量管理机构，切实落实三级检查制度，做好各工序的检查验收，做到发现问题及时处理。预应力锚固工程的质量控制与每一个环节都息息相关，只有做好预应力锚固工程施工过程中各工序的质量监控，才能保证预应力产品合格。

10.1.4~10.1.16 这 13 条是将预应力锚固施工的各个工序、各施工环节要进行的质量检查项目和内容做了明确的规定，并进一步强调了及时填写各工序质量评定表的必要性。因此对各工序的质量检查更具有可操作性。

10.2 质量评定与验收

10.2.1、10.2.2 预应力锚固工程有其特殊性，且专业性较强。施工结束后要及时按项目划分进行单元、分部及单位工程验收。GB 50086—2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》第 4 章有预应力锚杆（本标准为预应力锚索）的内容，该标准中第 14 章也列出了工程质量与验收的内容，在第 12.1.19 条提到了验收试验规定，但并未规定验收试验如何进行。验收试验无非两种形式：一种为在采用预应力锚固加固的工程中预留总锚索数量的 5%，在工程验收时进行张拉作业，这种方式对被锚固工程不利，对工程是不安全的，也不利于施工安排；另一种方式为在已完成施工的锚索中选择 5% 的锚索进行放张，重新张拉作业，如果预应力锚索锚固力无损失或损失在允许范围之内，就没有必要进行再次重复作业，再者说对已完成并放置很长时间的锚索松

开夹片，实行再次张拉也是不安全的，再次锁定后，锚具的性能肯定不如新安装的质量好。所以本标准没有强调进行验收时，要进行验收试验。为保证锚固工程质量，本标准强调锚索的受力性能试验、原材料检测、锚固监测、各工序的验收及质量评定，加强施工过程的质量控制与检查，验收时提供完备齐全的资料及报告并按 SL 223《水利水电建设工程验收规程》、SL 632《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——混凝土工程》和 SL 633《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准——地基处理与基础工程》的规定进行。