

# 锚索的选择与应用

刘玉堂 庞有超 白彦光

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

**摘要:** 本文按锚索锚固段的受力特点, 将目前工程中已出现的预应力锚索分为荷载集中型、荷载分散型和拉压复合型三类, 每类中选择一种作为代表, 将目前工程中应用较多的压力分散型锚索、二次灌浆全长粘结锚索和拉压复合型锚索的结构、受力特点、施工要点作了较详细的分析。文中特别强调各种锚索作为永久支护使用时应注意的结构措施。

**关键词:** 岩体加固 预应力锚 索永久性

## 1. 前言

随着我国岩土工程的丰富和发展, 最近几年涌现出很多新型锚索, 这无疑为岩土加固提供了更多手段。工程加固设计选用预应力锚索时, 要对锚索有所了解, 既要了解其共性, 更要了解各种锚索的特性。锚索的共性可概括为主动加固、超前支护、可以控制深层岩体滑动、能随机补强、灵活支护; 凡是锚索都可以控制岩体的变形, 改善岩体的受力状态, 提高岩体的强度, 促进岩体的稳定。但是, 由于锚索的结构不同, 长期工作中受力特性就存在差异, 加固岩体的效果和适应环境的能力也就有差异。不根据加固对象的受力和变形特点恰当地选用锚索, 可能达不到加固目的, 例如, 在大变形岩体加固中选用了全长粘结锚索, 在受采动影响较大或受爆炸脉冲荷载的岩体加固中不是采用允许岩体产生一定位移又保持恒定支护力的屈服锚索等, 都有锚索断裂的危险。把由于锚索的选型不当造成岩体的失稳都归罪于锚索, 将是桩“冤假错案”。为了更好地发挥锚索在岩土工程加固中的作用, 了解各种锚索的受力特性和适用条件是很有必要的。据不完全统计目前工程中已出现的锚索类型达10余种, 按照锚索的服务年限可分为临时性锚索和永久性锚索两大类, 按照锚索体与围岩粘结状态分为全长粘结型锚索和无粘结锚索(又称自由锚索), 还有其它分类方法, 如拉力型锚索和压力型锚索等。本文按照锚固段的受力状态把锚

索分为三类, 一类是荷载集中型锚索, 它的主要受力特点是锚索的拉力集中作用于锚固段上, 其中包括二次灌浆预应力锚索、集中压力型锚索及一次灌浆自由锚索; 第二类是荷载分散型锚索, 其主要受力特点是锚索的拉力分散作用于处于钻孔不同深的注浆体上, 其中包括压力分散型锚索、拉力分散型锚索、拉压复合分散型锚索以及可回收锚索; 第三类是拉压复合型锚索。在分析锚索的受力特点时, 每类锚索仅选一种作为代表, 作了较详细的阐述, 其余锚索的结构、受力特点、适用条件及施工要点详见参考文献<sup>[1]</sup>。

## 2. 全长粘结型预应力锚索

### 2.1 结构

全长粘结型锚索的典型结构如图1所示。这种锚索在我国最早应用于1964年梅山水库坝基加固, 是我国应用最早、最多、至今许多大型边坡加固工程如云南漫湾水电站、黄河上游的李家峡水电站、长江三峡水电站等仍在应用的锚索型式。施工时先对锚固段进行注浆, 张拉后再对张拉段注浆, 因此也称为二次注浆预应力锚索。锚固段处于岩体深部相对完整、稳定的岩体中, 张拉时注浆体受拉, 因此归类于“拉力型锚索”。锚固段有两种组装型式, 图1所示为枣核型, 另一种是直列型(整根钢绞线无弯曲), 实践证明, 同样长度的锚固段, 枣核型受力更合理, 锚固力更大, 目前工程应用较普遍。

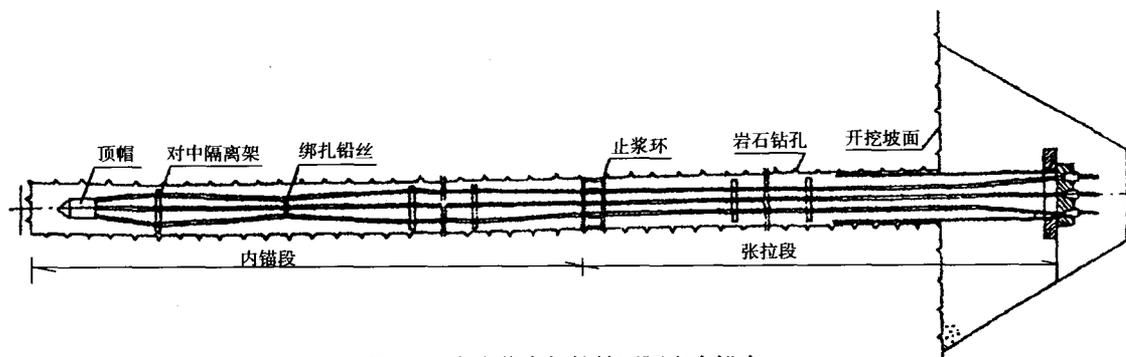


图1 二次注浆全长粘结型预应力锚索

长期以来，有人对全长粘结锚索有种误解，认为它没有作任何“防护”，只能用于服务时间不大于两年的临时工程。这种观点不符合大量的工程实践，从梅山水库坝基加固至今40年来用全长粘结锚索加固了大量的边坡、坝基及工程结构，至少到现在为止，未发现任何一个工程的全长粘结锚索遭到破坏的报道。认为全长粘结锚索没有任何防护，是由于缺乏对钢材防护原理的了解。钢铁的防护措施很多，有隔离防护，即采用化学性质稳定的物质覆盖钢铁表面，把钢铁与外界有害物质隔开，如涂油、镀铬、镀锌、渗铝以及自由锚索采用的在钢绞线上套塑料管等都属于隔离防护。在化工、航海及地下工程中常用阴极防护和阳极防护保护钢铁，阴极防护常用于船舰、地下管道、基础等，阳极防护主要用于化学工厂的设备。其实，最简单、最廉价、最常用的是强碱对钢铁的防护。这些防护方法及原理详见“锚索的锈蚀、防护及永久锚索的合理结构”一文<sup>[2]</sup>。钢铁在 $\text{PH} \geq 11$ 的强碱环境中，表面可形成一层连续的、化学性质非常稳定的钝化膜，分子结构为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，称为尖晶石结构，厚度约100纳米，正是这层钝化膜保护了钢铁，这就是全长粘结钢筋砼和预应力钢筋砼结构以及全长粘结锚索能安全服务几十年后仍能正常使用的道理。用硅酸盐水泥拌制的水泥浆或水泥砂浆 $\text{PH} \geq 11$ ，所以，全长粘结型预应力锚索施工时只要注浆全部选用硅酸盐水泥拌制，使锚索处于强碱环境中，并且确保形成的钝化膜永不破坏，完全可以在岩土加固中作为

永久支护手段。

## 2.2 特点

### 2.2.1 长期使用中不能调节锚索的拉力

锚索张拉锚固后、张拉段注浆前，锚索的张拉段仍处于自由状态，锚索的拉力是可调的，同时也没有任何防护，无特殊要求时锚索张拉锚固后应尽快回填灌浆，2004年版的锚索规范<sup>[7]</sup>建议不超过三天。有时设计要求调整预应力的时间较长，如群锚效应及岩体变形等，不能及时回填灌浆时必须对张拉段作临时防护。一旦回填灌浆结束，锚索体、注浆体与围岩粘结在一起，锚索伸缩受围岩制约，不仅锚索预应力无法调整，锚索应力的自调能力也很差，因此，在大变形岩体加固中选用这种锚索，就有被拉断的危险。

### 2.2.2 控制岩体变形能力大

锚索体与岩石是两种力学性质差异很大的材料，注浆体作为中间介质把两者粘结起来，共同工作，协调变形，依赖锚索体的高强度控制岩体的变形。如果锚索穿过的滑动面产生了滑动，锚索将调动锚索设计时的安全储备，在限制岩体滑动的情况下，局部应力提高，直至储备应力耗尽。在块状岩体中，粗看起来注浆体只能把锚索附近的岩块粘结起来，然而岩块之间有一种互相咬合的镶嵌作用，“冠石理论”就是以此为基础。互相咬合的岩块以与其粘结在一起的锚索体作坚固的支撑，共同形成有一定支护作用的“结构”，维持岩体的稳定。

### 2.2.3 全长粘结锚索有受力的“局部性”

国际预应力协会曾集收了35例锚索破坏的

实例<sup>[3]</sup>,几乎全部是非粘结型锚索。这并不说明全长粘结锚索没有破坏的,只是由于这种锚索受力的局部性破坏了也无从知晓。无论什么原因造成锚索某处断裂,由于钢绞线和岩体被注浆粘结为一体,锚索对岩体的加固作用仅影响断裂面附近的不长距离(影响的距离与岩体强度有关),其余的锚索长度仍正常工作,并不受局部锚索断裂的影响。根据受力局部性的特点,全长粘结预应力锚索的外锚具可以去掉(土和风化岩除外)。实际上,工业与民用建筑中许多预应力钢筋砼结构根本就不需要外锚具,例如预应力砼屋面板的所有预应力钢丝都不安装锚具,很多先张法预应力钢筋砼构件甚至桥梁也不安装锚具。

#### 2.2.4 用其加固的结构极限承载力高

有研究指出,用粘结筋加固的结构的极限承载力比用无粘结筋加固的结构的极限承载力高30%<sup>[4,6]</sup>,这是一个不容忽视的数据。因此,近期国内外都在研究缓凝无粘结锚索,其施工期及前期工作状态是无粘结型,长期工作状态是全长粘结型,兼有两种锚索的优点。研究途径有两个,一个是以日本和天津钢线钢缆集团有限公司几个单位为代表,他们在钢绞线与PE管之间涂的不是防锈脂,而是掺有特殊外加剂的缓硬树脂,硬化时间由设计者自行设定。树脂硬化前钢绞线可在PE管内自由滑动,硬化后能把钢绞线与PE管牢固地粘在一起。为了增加钢绞线与浆体之间的粘结强度,PE管的外形做成波纹状。第二种解决方案是以兰州铁道学院等单位为代表的缓凝缓硬砂浆,这种砂浆在5~40℃的条件下30天内不凝结,30天后逐渐凝结、硬化,最终抗压强度可达30MPa以上。

### 2.3 适用条件

#### 2.3.1 作为永久锚索时的要求

##### (1) 营造锚索表面可形成钝化膜的环境

钢材在PH>11的强碱环境中可在表面形成钝化膜,而工程中大量采用的普通或早强型硅酸盐水泥拌制的水泥浆可满足这个条件,因此

施工中应全部选用硅酸盐水泥。为了改善注浆的性质,施工中常掺加一些外加剂,如早强剂、减水剂、助流剂、膨胀剂、抗冻剂等,这些外加剂以及拌合水都不能降低水泥浆的碱度,也不得含有破坏钝化膜的有害成分,特别是SO<sup>2-</sup>和Cl<sup>-</sup>的含量应严格控制在规范规定的范围内。

##### (2) 长期使用中不得破坏钝化膜

很多有害物质都可破坏已形成的钝化膜,如大气中的CO<sub>2</sub>可使注浆体碳化,降低锚索所处环境的碱度,钝化膜将逐渐消失而失去保护锚索的作用;许多化学物质还会直接破坏钝化膜。然而,锚索是深埋地下的,情况简单得多。一般来说,只要地层及地下水PH>6,工地附近没有化工厂、钢铁厂及污水处理厂,可大胆采用全长粘结预应力锚索作为永久支护。

锚索设计拉力较大,有可能将锚固段的注浆体拉裂时,可采用分次注浆分次锚固的施工工艺,详见参考文献[1]。随着水泥外加剂的迅速发展,添加超早强剂的水泥浆1~2天即可达到设计强度,因分次注浆对施工进度影响已很小。目前已有不少工程采用这种施工工艺,如云南漫湾水电站、河北潘家口水库、河北黄碧庄水库的加固工程等。

#### 2.3.2 不宜用作永久支护的情况

- (1) 岩体变形较大需要随时调整锚索拉力大小时;
- (2) 观测锚索;
- (3) 有海水及腐蚀性废水侵入的地区;
- (4) PH<5的酸性地层;
- (5) 杂散电流密集地区。

在这些条件下要使用锚索,应选择各种隔离防护锚索。

### 3. 压力分散型锚索

#### 3.1 结构

水泥注浆体是脆性材料,受力后的变形与钢材极不匹配,在岩石中的拉力型锚索,在锚固段与张拉段的交界处易产生裂缝甚至碎裂;在软岩和土中,锚固段的水泥浆体将被拉断,

象香肠一样一段一段串在钢绞线上。无论哪种情况,锚索都将在受力的关键部位失去防护而影响使用寿命。压力型锚索的力是从钻孔底部导入,水泥浆柱承受的是压力,不会开裂,从锚索受力的合理性和防护的角度看,压力型锚索是一种较合理的锚索结构。由于压力型锚索的拉力是通过承压板挤压注浆体,注浆体的受力面积(与钻孔面积相等)和强度决定了锚索设计拉力的大小,经济性和可操作性限制了钻孔不可能太大,注浆体的强度也不可能太高。为防止浆体压碎,对于设计拉力较大的锚索,目前工程上普遍采用压力分散型。图2是典型的压力分散型锚索锚固段的结构,它是把压在注浆体上的集中力分散压在3段注浆体上,以减小承压板对注浆体的压力,把压强限制在浆体的允许抗压强度之内。设计分几级由锚索设计拉力的大小、注浆体的抗压强度和岩体性质决定。

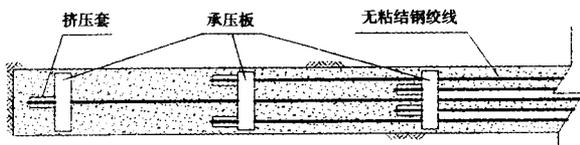


图2 压力分散型锚索的锚固段结构

压力分散型锚索的防护归类于隔离防护,依赖锚索的隔离层与外界有害物质隔离。所有钢绞线均不与注浆体接触,在隔离层内可以自由伸缩,一旦隔离层破裂,钢绞线将在破损处锈蚀而断裂,其后果是整根钢绞线失效。因此,图2的锚索结构只能用于临时支护,用于永久支护时,按照规范规定整个锚索都必须有至少两层隔离防护层。有两种处理方法,第一种方法是维持图2的结构不变,选用有环氧涂层的无粘结钢绞线组成锚索,环氧涂层和钢绞线上的PE管组成双层隔离防护层;第二种方法是把图2的锚索整体装入由高密度聚乙烯(HDPE)制成的密闭波纹管中,如图3所示,波纹管和PE套管组成双层隔离防护。有的论文<sup>[5]</sup>为了把图2的锚索当作永久锚索,错误地把注浆体也算作锚索的隔离防护层。在隔离防护的概念中注浆

体是不能作为隔离层的,它对岩体中的有害气体和液体也起不到隔离作用。在碱性环境对钢材的保护作用中,仅当注浆体的 $\text{PH} \geq 11$ 且直接与钢材接触,钢材表面才可形成钝化膜,保护钢材不再锈蚀;在隔离防护中钢绞线上的PE管把注浆体与钢绞线已隔开,不直接接触,钢材表面形不成钝化膜,因而注浆体对钢绞线既起不到隔离防护作用,也不具有防锈蚀作用。尽管如此,锚索施工规范仍要求无粘结锚索的钻孔注满水泥浆,这时浆体的作用有二,一是作为把钢绞线的拉力传递给钻孔周围岩体的中间介质,二是对隔离层起保护和增强作用。

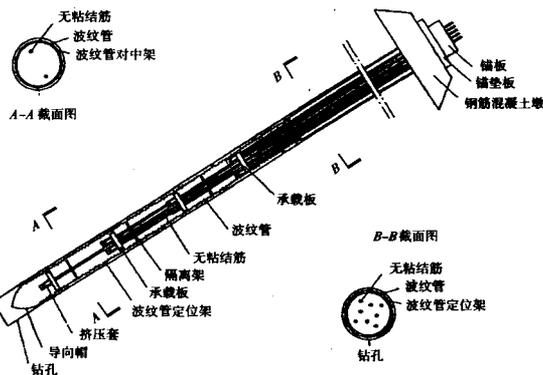


图3 永久性压力分散型锚索结构

## 3.2 压力分散型锚索的优点

### 3.2.1 锚固段注浆体受压,受力更合理

锚索的拉力经由孔底的承压板转换为对注浆体的压力,注浆体的受力状态是压剪,不会出现拉裂缝,有利于锚索的防护;注浆体在压力作用下径向变形被钻孔壁限制,其强度实际上是有侧限的抗压强度,尽管侧限力的大小无法预估,抗压强度的提高值无法利用,毕竟受力更为合理。

### 3.2.2 锚索的承载体分散受力

锚索的拉力被位于钻孔不同深度的几个承载体共同分担,不仅大大减小了注浆体的压力,也大大减小了注浆体与孔壁间的剪应力集中,这种锚索结构特别适用于抗剪强度不高的软弱岩体和某些土层的加固。

## 3.3 压力分散型锚索的缺点

### 3.3.1 长期工作状态钢绞线的拉伸应力很难一致

鉴于压力分散型锚索张拉段钢绞线的长度不一致,锚索张拉时对钢绞线都进行预紧,依据张拉段的长短施加不同的预紧力,以保证整体张拉时组成锚索的所有钢绞线拉应力大致相等。锚具锚固后,如果锚索的拉力始终维持在设计承载力,各根钢绞线的拉应力将大致相同。锚索在长期工作状态下一般都要产生预应力损失(岩体的压缩、钢绞线的松弛等),锚具产生向岩体内的微小位移,锚索的拉力将小于设计承载力,自由段短的钢绞线受力变小(相对平均拉力),自由段长的钢绞线拉力变大;在基坑和边坡工程中,往往是边开挖边施工锚索,由于应力解除效应,开挖下个台阶时,上台阶的岩体将产生向外的位移,上台阶已施工的锚索拉力就会增大,这时自由段短的钢绞线拉力将比自由段长的增大得多。这种锚索由于构造特点,在长期工作中造成锚索各受力筋受力不均匀是很难避免的。同一个受力体各组件非等应力受力是不理想的,如果它加固的岩体变形过大,必然造成自由段短的钢绞线首先断裂,各个击破。这也就是为什么压力分散型锚索不能做整体极限承载力试验的道理。

### 3.3.2 锚索预应力的调整不方便、不合理

压力分散型锚索归类于非粘结锚索,非粘结预应力锚索的优点之一是能够根据需要随时调整预应力的的大小。但是,正常调节预应力的方法都不把锚片从锚板中拔出,或者用螺帽法、或者用垫片法整体调整张拉段的长度,达到调整锚索预应力的目的。压力分散型锚索自由伸缩段的长度不等,这些成熟技术都不能应用,只能按照张拉时的程序,依照自由段的长短分组,用超张拉的方法把锚片从锚板中拔出,更换锚片在钢绞线上的咬合位置,调整张拉段的长度,达到调整锚索拉力的目的。这种方法有两个缺点,第一,增加锚片在钢绞线上的咬痕深度。一般调节的长度不会超过锚片长度,这必将有一部分是重复咬合,锚片对钢绞

线的咬痕本来对钢绞线就是一种损伤,调整预应力必将加重这种损伤;第二,调整操作时不安全,尤其是需要放松的锚索,本来锚索拉力就大于设计值,把锚片从锚板中拔出必须施加更大的力,锚索的超张拉应力是一个叠加,不小心就会把钢绞线拉断。

### 3.3.3 对锚具要求高

与全长粘结锚索不同,非粘结锚索的锚具要长期受力,其有效使用年限与锚索相同,一旦锚具因某种原因失效,就意味着整根锚索失去任何作用,因此在锚索使用期内必须有可靠的保护措施。锚具与钢绞线间是一种机械咬合,我国又是多地震国家,对锚具还有防松、抗震和抗疲劳的要求。

### 3.3.4 施工操作繁琐

同一根锚索钢绞线下料不一样长,同一个工地往往锚索的设计长度不同,给锚索的工业化生产带来难度;锚索组装完,锚索的张拉端每根钢绞线上都必须标有可靠的表示张拉段长短的标记,万一标记脱落,将给锚索的张拉带来麻烦。

## 4. 拉压复合型预应力锚索

### 4.1 结构

这也是近几年出现的一种新型锚索结构,锚固段的典型结构如图4所示。承压板与可伸缩挤压套共同构成压力型锚固部分,承压板以里的裸体钢绞线构成锚索的拉力型锚固部分。拉力锚固段可以组装成直列型,也可以组装成枣核状。当作用力相同时,承压板压缩注浆体的压缩变形要小于钢绞线从注浆体中拔出的拉伸变形,所以,压力锚固部分与压力型锚索不同,挤压套可以移动,张拉锚索时拉力段首先受力,挤压套产生一定位移后承压板才受力,挤压套移动的距离决定压力部分和拉力部分承担锚索拉力的比例。

### 4.2 特点

4.2.1 兼有荷载分散型和荷载集中型两种锚索的优点。对于锚索整体,长期使用中不会产生各

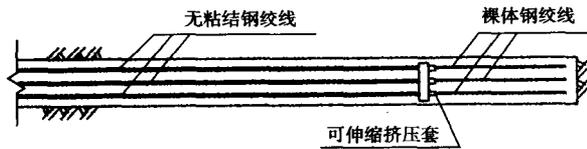


图4 拉压复合型锚索锚固段结构

根钢绞线受力不均的问题；对于锚固段，注浆体与孔壁间的剪应力沿孔深分散。

4.2.2 无论拉力型锚索或压力型锚索注浆体与孔壁间的剪切应力分布都不均匀，而且传递剪切应力的长度也不大，岩石强度越大表现越突出，因此锚索的锚固段有相当长的区段是不受力的，称为无效锚固段。同样的锚索设计承载力、同样的锚固段长度，锚固段注浆体分为拉、压两部分，既提高了锚固段的利用率，又降低了注浆体与孔壁间的剪切应力峰值，如图5所示。

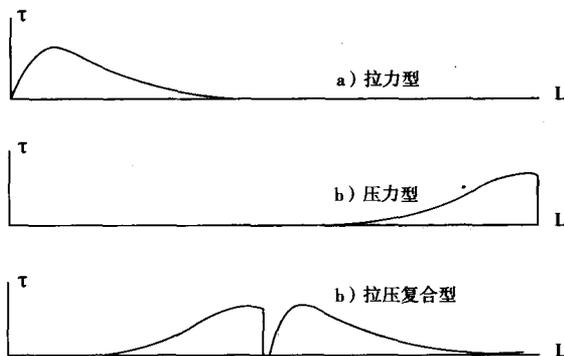


图5 三种锚索锚固段剪应力分布

4.2.3 拉压复合型锚索属于荷载集中型无粘结锚索，调整锚索拉力方便，适应岩体变形能力强，特别适用于观测锚索及大变形岩体加固。

4.2.4 拉压复合型锚索的关键是可移动挤压套移动量的设计，它决定钢绞线的拉力在锚固段拉、压部分的分配比例，如果挤压套不能位移，锚索的拉力绝大部分由承压板对注浆体的压力承担，拉力部分只承受很小的力；相反，如果挤压套移动量过大，承压板受力很小，甚至变成了拉力型锚索。因此，必须在有代表性的岩体内作出锚固段的拉力一位移曲线；由于锚固段的拉伸变形和压缩变形一般情况下是不

相同的，所以还必须作出锚固段的压力一位移曲线。根据这两条曲线设计可移动挤压套的允许位移，达到锚固段拉压部分合理分担锚索拉力的目的。

## 5. 结语

各种锚索都有优点和缺点，我们选用锚索是用它的优点，以适应被加固体的特性和用途，以某种锚索的优点与另一种锚索的缺点相对比进行排斥是片面的。本文在三类锚索中各选出一种有代表性的锚索，较详细地阐述了它们的结构和特点，目的在于使锚索应用者对各种锚索有个较全面的了解，以便根据工程要求、岩体性质、工程环境和希望锚索起到的作用，合理地选用锚索类型，达到工程加固的最佳效果。锚索新技术、新工艺、新结构的推广和应用是锚索发展的需要，锚索规范<sup>[7]</sup>对此比较慎重，特别强调应结合工程实际求实创新，既不墨守成规、生搬硬套，又要经过受力性能试验论证、鉴定并经相关部门批准才能在实际工程中应用，目的在于防止某些商业性宣传，把特定条件下的试验结果作为共性和规律推广到所有工程，某些工程特别是某些国家重点工程的教训足以为戒。

## 参考文献

- [1] 刘玉堂, 翟金明. 常用预应力锚索的结构和特点. 《预应力技术》. 2005, 4, 5期.
- [2] 刘玉堂等. 锚索的锈蚀、防护及永久锚索的合理结构[C]. 岩土锚固技术与工程应用. 北京: 交通出版社. 2004. 10.
- [3] 高大水. 岩土预应力锚索腐蚀与防腐[J]. 岩土锚固工程2003. (1)
- [4] 章建庆, 王起才. 缓粘结预应力筋的研究与应用[J]. 海威姆预应力技术. 2003. (1)
- [5] 燕立群等. 压力分散型锚索与拉力型锚索的比较—再论新型锚索结构系列及工程应用[C]. 岩土锚固技术与西部开发. 北京: 人民交通出版社. 2002. 9
- [6] 刘文华等. 缓粘结预应力钢绞线的试验研究[J]. 海威姆预应力技术. 2003. (1)
- [7] DL/T5083-2004. 水利水电工程预应力锚索施工规范. 北京: 中国电力出版社.