

# 预应力锚索锚固段长度的确定方法

刘玉堂 庞有超 白彦光

(总参工程兵科研三所 洛阳 471023)

**摘要:** 本文详细讨论了确定预应力锚索锚固段长度的4种方法, 并指出各种方法的优缺点及应用时的注意事项, 重点阐述了现场试验法的场地选择、施工要点、试验数据的采集和处理等, 与其他方法相比, 用现场试验法确定的锚固段长度更符合工程实际, 因而也更可靠, 是锚索工程特别是大型锚索工程, 在确定锚固段长度时的首选方法。

**关键词:** 锚索 锚固段 现场试验

锚索是把欲加固的结构或岩体与稳定结构或岩体连结在一起的受拉构件, 锚索深入稳定岩体或结构的深度就是锚固段长度。锚固方法是依赖钻孔中注入的水泥浆把锚索与围岩粘为一体, 锚索的拉力经由注浆体传递给岩体。在其它条件相同时, 锚索的造价仅与锚索长度有关, 锚固段的长度是锚索长度的一部分, 如何合理地确定锚固段的长度, 既关系到锚索的安全, 也关系到锚索的造价。本文较详细地讨论了四种确定锚固段长度的方法以及它们的优缺点, 推荐较符合工程实际的现场试验法。

## 1. 锚索破坏的形态

锚索破坏主要有5种形态, 如图1所示。

图1(a)是锚索体被拉断。造成这种破坏的原因可能是设计时锚索材料的使用应力偏高, 安全储备小, 并忽视了各受力筋受力不均匀的影响; 也可能是锚索选型问题, 把全长粘

结锚索用于加固变形较大的岩体; 也有可能是在施工中超张拉力过大。不管哪种原因, 锚固段是安全的, 不是本文讨论的范畴。

图1(b)的破坏是由于锚固段埋植深度不足, 岩体锥体提供的抗剪力小于锚索拉力。当被加固的岩体有明确的滑移面时, 锚索的锚固段应深入稳定岩体, 当没有确定的滑面时, 锚固段埋植深度的确定方法参见参考文献[1]锚索设计一节。

图1(c)的破坏形式仅发生在压力型锚索, 当注浆体的抗压强度小于锚索拉力在承压板上产生的压应力时, 注浆体被压碎。有三种解决办法: 第一种是采用压力分散型锚索, 把锚索的拉力分散加压于处于钻孔不同深度的注浆体上。由于锚索张拉段的长度不同而带来许多缺点, 详见参考文献[2]; 第二种解决办法是加大钻孔直径, 增加受压面积, 降低注浆体上

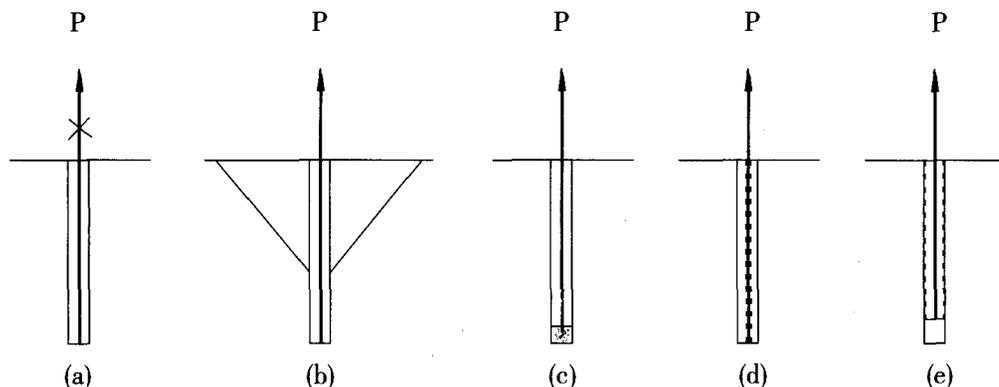


图1 锚索锚固段的破坏模式

的压强。经济性和可操作性限制了钻孔直径不可能太大。第三种办法是提高注浆承载体的强度，总参工程兵科研三所研究的集中压力型锚索的设计拉力已达3000kN。

图1(d)是受力筋与注浆体接触面间产生滑动，是拉力型锚索的主要破坏形式之一，一般产生于岩锚范畴，这种破坏有可能是注浆体强度较低，但多数情况是锚固段长度不足，如何确定锚固段的长度，是本文的主题。

图1(e)是受力筋与注浆体一同沿孔壁滑动，拉力型和压力型锚索都可能出现，这种破坏多发生在软岩和土层中的锚索。因为围岩较软，抗剪强度较低，为了抵御锚索的拉力，只能依赖于增大注浆体与孔壁的接触面积。最简单最常用的方法是钻孔直径不变，加深钻孔。如果孔壁有足够的直立时间，不缩孔，不塌孔，也可采用各种扩孔方法增大注浆体与孔壁的接触面积，常见的有矩形孔(图2a)、菱形孔(图2b)、三角形孔(图2c)。扩孔的方法是依赖钻杆高速旋转产生的离心力，或者利用外加压力或拉力，使钻具上活动刀具弹出以切削土体。如果孔壁直立的时间短(饱和淤泥等)，可利用地基处理中常用袖阀管技术，在锚固段长度上形成一串球状注浆体，如图2d所示。上海和北京还与旋喷技术相结合，在设计锚根位置预先做旋喷桩，在桩上钻孔和安装锚杆。台湾卢锡焕教授发明了一种钻杆当做锚杆的技术，在钻杆端头安装一种特制钻头，当孔深达到设计要求后，提拉钻杆，钻头上的翼板打开，切削土体，扩孔完成后，将钻头和翼板推入孔底，注浆后形成锚杆，如图2e所示。

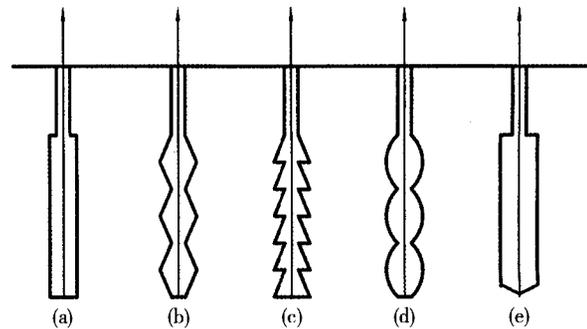


图2 增加土锚锚固力的方法

## 2. 由结合面的剪切应力求锚固段的长度—理论计算法

### 2.1 锚杆体与注浆体间的剪切应力

量测锚索受力筋与注浆体间的剪切应力，通常采用在受力筋上贴电阻丝片的方法，如图3a所示。受力筋的张拉力由结合面上的剪切力来平衡，如图3b所示。为了由测得的应变求结合面上的剪应力，取 $dl$ 长度单元，如图3c所示：

由力的平衡：

$$P_i - P_{i+1} = \tau \cdot \pi D \cdot dl \quad (2.1)$$

其中 $D$ —受力筋直径；

$\tau$ —微段 $dl$ 长度上的平均剪应力；

$dl$ —微段长度，取应变片间距。

对于钢绞线， $\pi D$ 应取与注浆体接触的周长。由弹性力学 $\sigma = E \cdot \varepsilon$ 知：

$$P_i = EF \cdot \varepsilon_i$$

$$P_{i+1} = EF \cdot \varepsilon_{i+1} \quad (2.2)$$

式中 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 为 $dl$ 微段两侧的轴力；

$\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_{i+1}$ 为 $dl$ 微段两侧处的实测应变；

$F$ —受力筋的横断面面积；

$E$ —受力筋的弹模。

将2.2式代入2.1式，整理得 $dl$ 长度上的平均

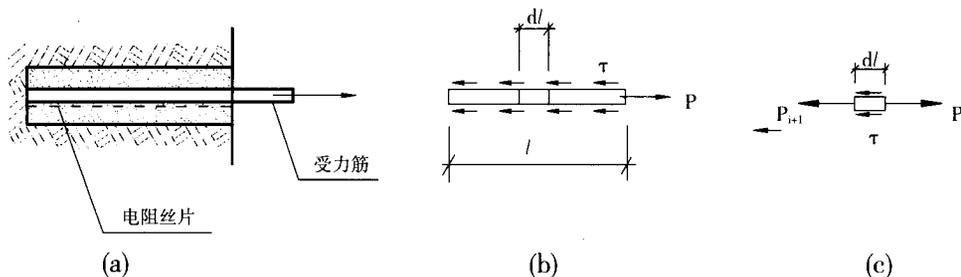


图3 锚索受力筋的受力分析

剪应力:

$$\tau = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}) EF / \pi dl \quad (2.3)$$

2.3式右侧的参数都是已知的,当受力筋的拉力恒定时,即可根据测得的 $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_{i+1}$ 值求出两个应变片之间 $dl$ 长度上的平均剪应力 $\tau$ 。根据式2.3可求得其余每两个应变片之间的平均剪切应力,利用最小二乘法将计算出的一系列剪应力处理后即可得出相对某一拉力时结合面上的剪应力分布 $\tau=f(l)$ 。受力筋的拉力每增加一级都可得到一条曲线,如图4所示。

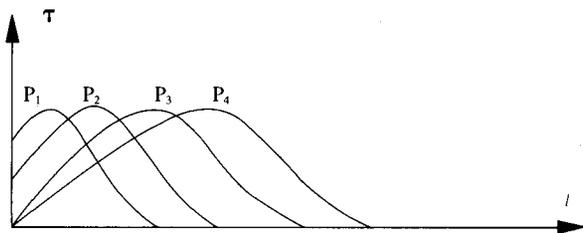


图4 锚索受力筋上的剪应力沿锚固段长度的分布

## 2.2 锚固力的计算

图4中每条曲线与横坐标包围的面积即为相应锚索拉力下的锚固力 $P = \int_0^l f(l) dl$ ,考虑安全系数后即可设计锚固段的长度。

显然,只要锚索结构及其所处环境与量测锚索相近,都可以方便地计算出锚固段长度。这种方法的优点是相对合理、真实,而且可以清楚地了解到任意锚索拉力下锚固段的受力状态。当然,岩体是千差万别的,受力筋的应变测量技术虽不复杂,做起来却有一定难度,因此,采用理论计算的方法确定锚固段长度,有待锚索工作者长期努力和数据的积累。

## 2.3 理论计算中要注意的几个问题

(1) 锚索的破坏形式除图1c之外,无论拉力型锚索,或者压力型锚索,都有注浆体沿孔壁滑动的可能,也存在锚固段长度问题,然而,至今仍没有解决量测注浆体与孔壁间剪切力的手段,这是理论计算锚固段长度的一大缺憾;

(2) 往受力筋上贴片时,要先在受力筋上打底胶,贴片后还要封闭,以保证较好的绝缘度。这些涂层把注浆体和受力筋隔开,贴片处的粘结力不再与非贴片时相同;

(3) 目前锚索的受力筋多采用钢绞线,钢绞线与光面钢筋在注浆体中的锚固力不同,光面钢筋的锚固力全部由两者间的粘结力来提供。钢绞线是由7根钢丝绞捻而成,捻距16~18cm,钢绞线受拉后有一个向反方向的扭转运动,外圈的钢丝挤压注浆体,由此产生的摩擦力,与钢丝和注浆体间的粘结力共同组成锚固力,如图5所示。实践也证明,当钢绞线与注浆体的接触面积及其它条件相同时,光面钢筋的锚固力要小;

(4) 受力筋在拉力作用下按泊松比变细,在注浆体与受力筋的接触面间产生一种撕裂,必然降低二者间的粘结力;

(5) 锚索锚固段的组装形式对锚固力也有影响,对于枣核状锚固段,每根受力筋是弯曲的,张拉时受力筋企图伸直,挤压注浆体,因挤压力产生的摩擦力如图6所示,增大的锚索锚固力,理论计算公式中也无法反映。

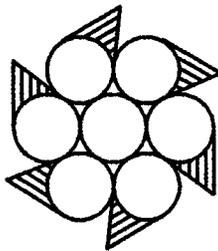


图5 由钢绞线的旋转产生的摩擦力

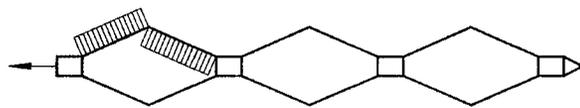


图6 弯曲受力筋增大锚固力

长期以来,特别是上世纪80年代之前,岩土锚固工作者投入了大量的精力,试图通过现场和室内实验找出锚索或锚杆锚固段长度的理论计算方法,由于量测技术和量测手段的局限性,也由于影响锚固力因素的多元性,尽管也取得了不少可喜成果,相距实用的要求仍有很大差距。因此现行锚索或锚杆规范、规程及手册在涉及锚固段长度的确定时,都不推荐理论计算方法。

### 3. 平均应力法确定锚固段长度—规范推荐法

#### 3.1 计算锚固段长度的方法

锚索规范及手册都推荐这种方法，它假定，无论注浆体与孔壁的接触面或者注浆体与受力筋的接触面，结合应力都呈矩形分布，并根据图1d和图1e锚固段的两种破坏模式给出两个锚固段长度计算公式：

$$L_m = P_w K / \pi D \tau_s \quad (3.1)$$

$$L_m = P_w K / n \cdot \pi D \tau_u \quad (3.2)$$

式中  $P_w$ —锚索设计拉力；

$K$ —安全系数；

$D$ —锚索孔直径；

$d$ —单根受力筋外径；

$\tau_s$ —注浆体与孔壁间的平均粘结强度；

$\tau_u$ —注浆体与受力筋间的平均粘结强度；

$n$ —受力筋的根数。

对于拉力型锚索，取两个公式计算结果的最大值；对于压力型锚索，仅取式3.1计算结果，并验算注浆体是否会压碎。 $\tau_s$ 取值参考表1。 $\tau_u$ 取值参考表2，对于土体及破碎岩体详见参考文献[1]、[3]，安全系数 $k$ 的取值见参考文献[4]。显然，按照平均剪切强度方法确定锚固段长度易于操作，也符合规范，反映了我国当前对锚固段受力状态的认识水平。

表1 注浆体与孔壁间的结合强度  $\tau_s$

岩体类型	花岗岩	白云岩	灰岩	砂岩	页岩	板岩
结合强度 (MPa)	1.7~3.1	1.4~2.1	1.1~1.5	0.8~1.7	0.2~0.8	0.8~1.4

表2 注浆体与受力筋间的结合强度  $\tau_u$

受力筋类型	光面钢筋	刻痕钢丝	钢绞线	枣核状钢绞线
最大结合强度 (MPa)	1.0	1.5	2.0	3.0

#### 3.2 平均剪切应力法确定锚固段长度的问题

(1) 该方法的前提与实际不符。图4所示虽为受力筋与注浆体间的剪应力分布，孔壁与注浆体间的剪应力也大致如此<sup>[4]</sup>，一般情况下有4种应力状态：局部破坏段，它处于张拉端的端部，受自由面的影响最先达到剪切强度，是零应力区；未达到剪切强度段，该区段最长，锚

索锚固力主要由该段提供；达到剪切强度段，该区段很短，处于剪应力峰值左右，而且位置随着张拉力的增大逐渐向深部移动；处于锚固段最里端不受力，也称为无效锚固段。这样复杂多样的应力状态仅用一个矩形分布的平均剪应力来代替，与实际情况相差太远；

(2) 平均剪切强度也不是衡定的，同样条件下与锚固段的长度有关，锚固段长度越短，平均剪切强度越高，例如我国丰满水电站曾做过这样试验，锚固段长度为1.0m时，平均剪切强度为4.64MPa，锚固段长度为0.5m时，平均剪切强度增为10.6MPa。美国也做过类似的实验，当锚固段长度 $L_a=7.62$ m时，平均剪切强度 $\tau_i=0.58$ MPa，当 $L_a=3.0$ m时， $\tau_i=1.61$ MPa。由图4也可以看出，锚固段越短，高剪应力分布的长度相对长些，能更充分发挥锚固效果；

(3) 平均剪切强度与钻孔手段和注浆强度有关，当采用旋转钻成孔时，孔壁相对光滑，注浆体与孔壁的结合力主要表现为两者间的粘结强度；当采用冲击钻成孔时，孔壁是粗糙的，注浆体必将渗入孔壁的凹坑中，由注浆体抗剪强度控制的嵌固力与二者间的粘结力共同组成锚固力，其平均剪切强度必将大于前者，边坡手册建议锚索孔造孔手段应优先选用冲击钻就是这个道理；

(4) 平均剪切强度与一个孔内受力筋的根数有关。显然锚索设计承载力越大，受力筋的根数越多，孔径也越来越大。受力筋在孔内的排列主要考虑防护和分布均匀，还没有研究过使注浆体等应力受力的合理受力筋间距，当受力筋较多时（如3000kN是19根钢绞线，6000kN是37根钢绞线以上），孔中部的注浆体受多根受力筋拉力的作用，受力状态远比孔壁附近的复杂，必定首先破坏。

以上4点对剪切强度的取值都有些影响，在采用规范法确定锚固段长度时，对其安全度要心中有数。

### 4. 工程类比法确定锚固段长度

它是根据既有锚索工程中，围岩类型及锚

索结构与在建工程相似的；其成功经验、锚固段长度及其它锚索参数即可搬来直接应用，如表3所示。

表3 已建工程围岩类型及锚固段长度

云南漫湾 水电站	凝灰岩	锚索设计拉力(kN) 锚固段长度(m)	1000 6~8	1600 6~8	3000 8~10	6000 10~12
三峡 水电站	花岗岩	锚索设计拉力(kN) 锚固段长度(m)	1000 5		3000 8	
丰满 水电站	砾岩	锚索设计拉力(kN) 锚固段长度(m)				6000 13.3

工程类比法可以单独应用，也可以与规范推荐的平均应力法互相参照，配合应用，但是，要注意以下几个问题：

(1) 除了围岩名称相同外，还要考虑岩体结构、岩体强度、风化程度及锚索与岩体构造面的组合关系；

(2) 除锚索设计拉力相同外，还要注意受力筋的类型、根数及锚索的组装形式；

(3) 正常情况下利用成功的经验不会出现意外，然而毕竟是人家的经验，照搬总有些盲目，参照的工程偏于安全，将造成浪费，参照的工程临近极限状态，又会偏于危险。

## 5. 现场试验法确定锚固段长度

### 5.1 现场试验的必要性

有人认为受力筋的直径小，与注浆体的接触面比注浆体与孔壁的接触面小，因此图1(d)的破坏模式起控制作用；锚索设计规范<sup>[4]</sup>则认为注浆体与受力筋间的粘结强度比注浆体与孔壁间的大1倍，图1(e)的破坏模式才起控制作用。据笔者进行现场拉拔试验的经验，锚固段的破坏形态与受力筋在锚固段的组装形式有关，如果钢绞线是直列式，锚固段破坏时，钢绞线将从注浆体中抽出；如果组装成枣核状，注浆体呈粉碎体。由此可见，锚索锚固段的受力状态很复杂，除与岩体结构、岩体强度、注浆强度有关外，还与受力筋的种类和组装形式有关，因此锚索设计规范、规程和手册在推荐平均应力法计算锚固段长度时，都有一个前提，粘结应力应由现场试验确定，当无现

场试验资料时再查表。由此可见现场试验的重要性，规范推荐平均应力法也是不得已而为之。

### 5.2 现场试验要注意的几个问题

(1) 试验地点应选择在与工程锚索所处地质环境相似的区域；

(2) 试验锚索所用受力筋类型、根数及锚固段的组装形式应与工程锚索完全一致；

(3) 注浆用水泥品种、配比、设计标号等应与工程锚索一致；

(4) 现场试验孔三个。钻孔直径、成孔方法与工程锚索相同；

(5) 锚固段不得太长。现场拉拔试验易出现的通病是锚固段注浆长度偏大，以致受力筋拉断而锚固段完整无损，这样不仅求不出单位锚固长度的锚固力，甚至对确定锚固段的合理长度无助；

(6) 千斤顶应缓慢出力，加载速度按锚索施工规范[6]执行。

### 5.3 计算锚固段长度的方法

(1) 量测三个试验孔的实际注浆（锚固段）长度 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ；

(2) 记录三个试验锚索锚固段破坏时的拉力 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。只要不是受力筋拉断，按图1d或图1e模式破坏都可应用本计算方法，对破坏现象的描述可以丰富锚索设计和施工经验，提高对锚固段的认识。

(3) 求出三个试验孔单位锚固长度的锚固力 $P'_1 = P_1/L_1$ ， $P'_2 = P_2/L_2$ ， $P'_3 = P_3/L_3$ ，取其中最小值 $P_{min}$ 作为计算依据。不取平均值是尽量选取影响锚固力的各种因素中最不利的组合；

(4) 锚固段长度：

$$L_m = KP_w/P_{min} \quad (5.1)$$

式中 $P_w$ —锚索设计工作拉力(kN)；

$P_{min}$ —单位锚固长度的最小锚固力(kN/m)。

K—安全系数，一般取 $K=3.0$ ，比锚索规范规定值大，主要考虑三个因素，第一、施工因素：试验锚索少，施工工艺比工程锚索掌握严

(下转第22页)

#### 4.7 水牛家水电站左坝肩边坡锚索

左坝肩开挖后,受岩体卸荷和雨季影响,局部产生较大变形,危及坝基施工及左坝肩自身安全。采用了1000kN自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索及锚筋束等进行支护处理。

锚索孔深30~40m,锚索孔径 $\Phi 110$ ,锚孔俯角 $300^\circ$ ,37根。

#### 4.8 其它

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索即将在舟坝、溪洛渡、锦屏等工程中应用。

### 5. 结语

当前,越来越多的水利水电工程、岩土工程的上马,无疑给预应力锚索的大量使用带来了契机。

随着锚索技术研究的进一步深入,人们对预应力锚索锚固段应力集中及锚索腐蚀影响预应力锚索的锚固效果和锚固寿命等问题予以高度重视,而自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索重点地解决了这些问题。

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索采用单孔多锚头防腐型结构,具有改善锚固段应力集中、有效防腐、有效减小孔径、全孔一次注浆、可进行二次张拉等特点,增强了对复杂地层的适应性,对工程的长效锚固保持有效性,已在多个工程中成功应用,取得了良好的经济技术指标。

因此,该锚索具有广阔的应用前景以及显著的技术效益、经济效益和社会效益。

(上接第7页)

格;第二,锚固段长度的影响:试验锚索锚固段短,平均锚固力比工程锚索要大;第三,时间因素:尽管加荷速度慢,与工程锚索所受的恒载相比仍然快得多,锚固强度仍偏高。

#### 5.4 现场试验实例

河南小浪底水利枢纽处于砂页岩互层岩体区,交通洞设计锚索为600kN,采用现场试验法确定锚固段长度,现试验结果列于表4。

表4 600kN级锚索现场拉拔试验成果表

孔号	注浆体强度 (MPa)	钻孔深度 (m)	钻孔直径 (mm)	锚固段长度 (m)	锚索破坏时拉力 (kN)	锚固强度 (kN/m)
1	29	2.05	115	0.75	667	889
2	29	1.20	115	0.66	775	1174
3	29	1.00	115	0.64	716	1118

取最小锚固长度 $P_{min}=889\text{kN/m}$ ,代入式5.1得小浪底水利枢纽工程600kN锚索锚固段长度

$$L_a = 600 \times 3 / 889 = 2.0\text{m}$$

凡是我部在小浪底水利枢纽施工的600kN级锚索,内锚固段长度均采用2.0m。

### 6. 结论

岩体是多种多样的,选用锚索加固的岩体结构一般都非常复杂,影响锚索锚固段锚固力的因素又很多,采用计算公式计算出的锚固段

长度,无论是理论计算或者是平均应力法都很难符合实际情况,何况计算公式中一个重要力学参数是两个粘结强度,任何文献提供的表格中仅仅是岩石名称和粘结强度的对应,对于粘结强度的试验方法、注浆体强度、岩体强度和结构等都不得而知。现场试验法比较符合工程的实际情况,尽管也存在些问题,毕竟是在在建工程的岩体中实际测出的参数,与其它方法相比应当更可靠,更可信。我们认为锚索工程,特别是一些大型锚索工程,采用现场试验来确定锚固段长度更真实,更有把握,也可减少不必要的浪费。实践证明:这比锚索规范建议的先现场求出两个粘结力再利用式3.1和3.2计算锚固段长度更直接、更简洁、更易于操作。

#### 参考文献

- [1] 闫莫明等. 岩土锚固技术手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2004. 5
- [2] 刘玉堂, 翟金明. 常用预应力锚索的结构和特点[J]. 防护工程, 2005. 5
- [3] 梁炯望主编. 锚固与注浆手册[M]. 北京:中国电力出版社, 1999. 9
- [4] SL212-98. 水工预应力锚索设计规范. 北京:中国水利水电出版社, 1998. 8
- [5] 水工现代预应力技术专业委员会. 第二届学术交流会论文集[C]. 北京:1999. 10