

锚固类结构界面剪应力相互作用关系 试验研究

曾宪明¹ 范俊奇¹ 李世民^{1, 2}

(1 总参工程兵科研三所 洛阳 471023 2 西安交通大学工程力学系 西安 710055)

摘要:采用高、中、低强三种围岩介质,在室内进行了锚杆第一、第二界面剪应力分布形态测试。在此基础上,分析了锚杆第一、第二界面剪应力相互作用关系。研究指出:第二界面剪应力是第一界面剪应力衰减的结果;第一、第二界面剪应力沿杆体轴线方向和垂直于杆体轴线方向都是衰减的,并且存在极限剪应力、零值剪应力与浆体局部破坏基本同时发生向杆体深部的转移现象;着重指出平均剪应力的理论基础—锚杆界面微观结构理论具有不爭的误导性。

关键词:锚杆 诸界面剪应力 相互作用关系 试验研究

1 概述

锚固类结构是指锚杆、锚索和土钉一类岩土工程加固支护结构。除击入式土钉外,锚固类结构一般都存在三个界面剪应力相互作用关系问题。这里,第一界面是指杆体与注浆体之间的界面,第二界面是指注浆体与孔壁之间的界面;第三界面发生围岩介质内部,是一广义的界面,近似呈圆锥面。

锚固类结构诸界面剪应力分布形态的确定是建立相应设计理论和方法的基础和前提。受D J Pinchin等人于1978年发表、此后又有不少研究者进一步研究和发展的锚杆界面微观结构理论影响^[1-6],世界各国包括我国的相关技术标准采用的设计方法大多是基于平均剪应力的概念和方法。微观结构理论认为:浆体材料在界面处存在一个相对较弱的界面区。此界面区主要由氢氧化钙晶体、C-S-H等组成,对界面力学特性起着非常重要的作用。由于界面层材料的微观构造尺寸即使与很细的钢纤维相比仍然非常小,因而纤维直径的变化不会引起界面层微观结构的变化。鉴于此,提出了基于平均剪应力的界面剪切强度与摩擦剪应力计算方法,并认为可以用表面处理相同的钢条或钢筋替代钢纤维进行试验,以确定锚杆界面的力学特性。大量试验研究结果表明,剪应力并不是均匀分布的^[7-14]。不过这些测试结果具有以下特点:①第一界面剪应力是较理想的(应变片直接粘贴在杆体表面);②第二界面剪应力

不是理想的而是邻近该界面(通过量测加计算求得或采用应变砖测得);③未能考虑诸界面剪应力相互作用关系。

本项研究采用较特殊方法,对第一、第二界面剪应变以及沿垂直于杆体轴线方向的围岩介质中应变同时进行了比较测试和分析。研究指出,锚固类结构诸界面剪应力分布形态不仅沿杆体轴线方向是衰减的,而且沿垂直于杆体轴线方向也是衰减的,并非均匀分布,且彼此间存在着显著的相互影响的关系。

2 试验方法

2.1 试件打筑

为模拟实际施工工艺并测取理想第二界面以及围岩介质内部剪应力分布特性,试件制作采用了如下方法:①制作锚杆,在其表面设计位置粘贴应变片,以测取第一界面剪应变分布形态;②将锚杆置于模拟锚孔的PVC管中,并灌浆形成锚固体;③切除PVC管,在锚固体表面与第一界面测点相对应的位置粘贴应变片,以测取第二界面剪应变分布形态;④将锚固体再次置入孔径更大的PVC管中并打筑水泥浆体以模拟围岩介质;⑤再次切除PVC管,在对应位置粘贴应变片,并将除测点之外的介质表面全部凿毛;⑥重复④和⑤工序,直至完成试件制作。试件养护期以最后一层围岩介质达到28d为准。

打筑完毕后的试件见图1,测点布置见图2。

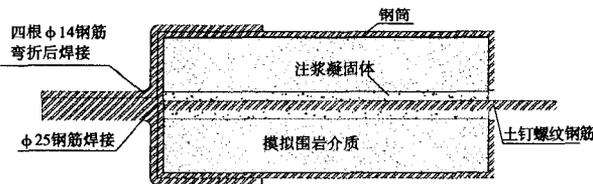


图1 制作完毕后的试件

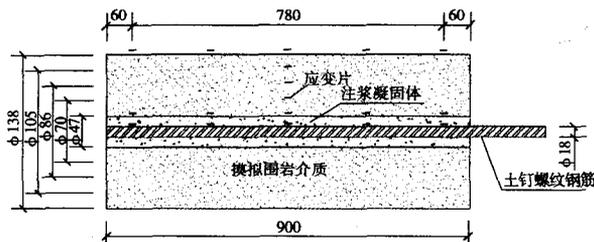


图2 试件应变测点布置

2.2 围岩介质及注浆体强度特性

围岩介质的强度按显著高于、等于、显著低于注浆体强度设计，实测结果见表1。

表1 围岩介质及注浆体试件抗压强度

介质类型	单轴抗压强度/MPa	
	7d	28d
高强介质	31.8	53.14
中强介质	19.2	32.22
低强介质	3.70	7.26
注浆体	19.2	32.22

3 试验结果

不同荷载条件下各类试验锚杆实测轴应变沿杆体长度方向的分布形态如图3所示，图中杆体长度（内锚固段）均为90cm，对于高、中强介质试件，图中曲线对应的外加荷载分别为40kN，50kN，60kN，80kN和100kN，对于低强介质试件，对应的外加荷载分别为20kN，30kN，40kN，50kN和60kN。

由图3知，锚杆杆体轴应变沿杆体轴向是按指数规律衰减的。据此，分别对不同介质试件杆体轴应变进行近似拟合，其结果为：

$$\varepsilon(x/d) = \frac{4P_0}{\pi d^2 E_s} e^{-K_p \left(\frac{x}{d}\right)^{1.18}} \quad (1)$$

式中： $\varepsilon(x/d)$ 为第一界面上轴向应变/ $\mu\varepsilon$ ； ε_0 为注浆体承受外荷载作用点（或与承压板接触点）处的应变值/ $\mu\varepsilon$ ； x 为注浆体上某点至外荷载作用点的距离/m； d 为锚杆钢筋直径/m； D 为注浆体直径/m； K_p 为荷载系数，与外荷载 P_0 相关；

E_s 为锚杆钢筋弹性模量/MPa； P_0 为锚杆外荷载。

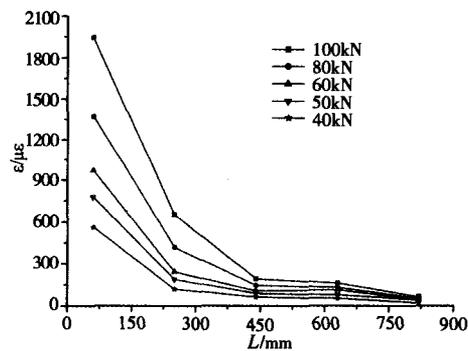
K_p 与外荷载 P_0 之间的关系可用下式表示：

$$\left. \begin{aligned} \text{高强介质: } K_p &= 0.15579 e^{-0.01149P_0} \\ \text{中强介质: } K_p &= 0.11601 e^{-0.01157P_0} \\ \text{低强介质: } K_p &= 0.14734 e^{-0.03801P_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

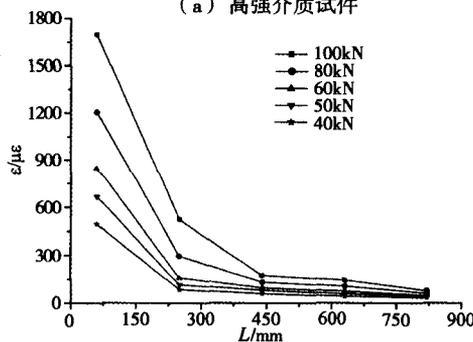
利用杆体轴应力与轴应变的关系，可把轴应变方程改写成轴应力方程：

$$P(x) = P_0 e^{-K_p \left(\frac{x}{d}\right)^{1.18}} \quad (3)$$

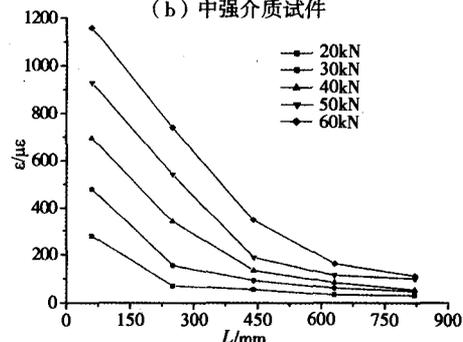
这种转换对于分析第一界面剪应力基本可行，因为应变片是粘贴在钢筋表面的；但对分析第二界面只具有参考意义，因为该界面力学特性是非线性的。



(a) 高强介质试件



(b) 中强介质试件



(c) 低强介质试件

图3 实测锚杆内锚固段杆体轴应变分布曲线

4 第一界面剪应力分布形态

锚杆承载时，锚固段注浆体内的轴力随着离承压板距离的增大而减小，在某一段注浆体上的轴力之差应由注浆体与杆体（第一界面）之间的剪力来平衡，因而可从中取出一微段作力的平衡分析，见图4。

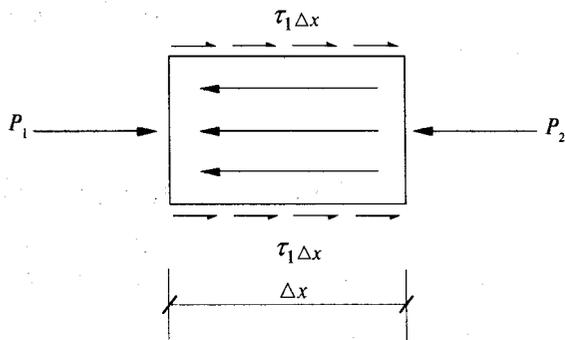


图4 加载时锚杆杆体受力分析图

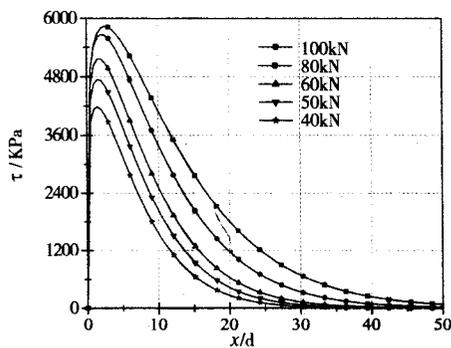
图4中，在长为 Δx 的一段浆体柱上，其轴力分别为 P_1 、 P_2 。这一段上注浆体与杆体界面第一界面的平均粘结应力（即剪应力）为 τ_1 ，其轴力之差应等于这一段注浆体表面的剪切力 $Q\Delta L = \tau_1 \pi d \Delta x$ （ d 为注浆体直径），则可据式（4）算出此微段上的平均剪应力 $\tau_1 \Delta x$ ：

$$\tau_1 \Delta x = \frac{P_2 - P_1}{\pi \cdot d \cdot \Delta x} \quad (4)$$

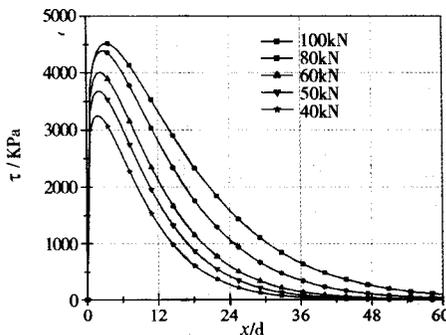
当此微段 Δx 足够短时，则所求的剪应力即可看作峰值剪应力。试验中，沿锚杆轴线方向上两相邻测点之间的长度为190mm，利用式（4）可分别算出各类锚杆两相邻测点间的平均剪应力。此时，第一交界面上任一点的剪应力可表示为：

$$\begin{aligned} \tau_{1\Delta x} &= \frac{P_2 - P_1}{\Delta x} = \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{dP}{dx} = \frac{d \left(P_0 \cdot e^{-K_p \left(\frac{x}{d} \right)^{1.18}} \right)}{dx} \\ &= \frac{-1.18 K_p P_0}{d} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.18} e^{-K_p \left(\frac{x}{d} \right)^{1.18}} \end{aligned} \quad (5)$$

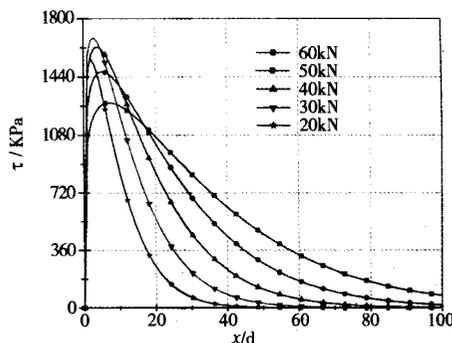
式（5）是一个以试验结果为基础的经验公式，试验做得越精细，公式的可靠性就越好。将相应参数代入式（5）即可求得不同试件第一交界面上任一点剪应力分布形态，计算结果见图5。



(a) 高强介质试件的剪应力分布形态



(b) 中强介质试件的剪应力分布形态



(c) 低强介质试件的剪应力分布形态

图5 锚杆第一界面剪应力分布形态

5 第二界面剪应力分布形态

杆体的拉应力是通过注浆体的剪切变形传递给围岩的，近似假设注浆体为刚体（这一假设对于土介质尤其是软土较为可行），则可从注浆体中取出长度为 dx 的微段进行分析（图6）。

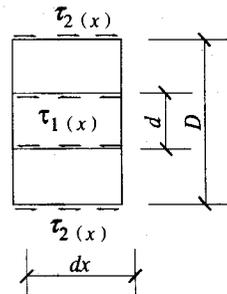


图6 加载条件下锚固体受力分析简图

由 dx 微段的轴向平衡条件有:

$$\sum x=0 \quad \pi d \tau_1(x) dx - \pi D \tau_2(x) dx = 0 \quad \text{得}$$

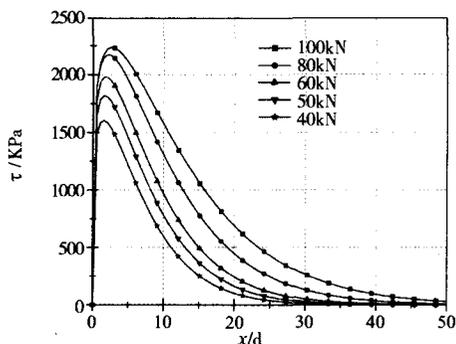
$$\tau_2(x) = \frac{d}{D} \tau_1(x)$$

将式(5)代入上式即可得到第二界面上任一点的剪应力:

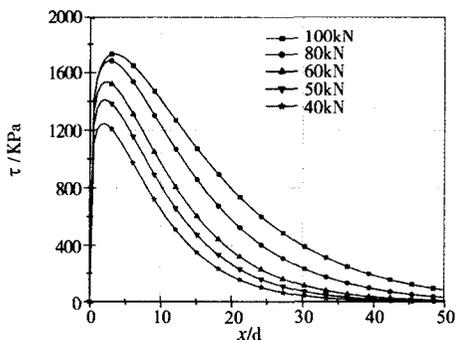
$$\tau_2(x) = \frac{-1.18 K_p P_0}{\pi \cdot d \cdot D} \left(\frac{x}{d}\right)^{0.18} e^{-K_p \left(\frac{x}{d}\right)^{1.18}} \quad (6)$$

由式(6)可得到不同外荷载作用下各类试件第二界面上剪应力分布形态如图7所示。

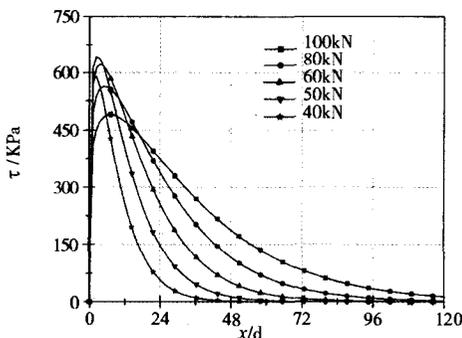
需要指出, 试验中, 第二界面因故损坏两个应变测点, 试验曲线难以画出。但由式(6)比照剩余测点数据, 均有相当程度的吻合, 表明图7所示曲线具有参考意义。



(a) 高强介质试件的剪应力分布形态



(b) 中强介质试件的剪应力分布形态



(c) 低强介质试件的剪应力分布形态

图7 第二界面剪应力分布形态

6 综合分析

①锚杆轴向应变衰减特性。图3表明, 无论高、中、低强介质, 在沿杆体轴线方向上, 第一界面轴向应变都是衰减的。但介质不同, 衰减速率不同, 高强介质衰减快, 低强介质衰减慢。在试验条件下, 上述特性体现在荷载系数的差异上, 即式(2)中。上述特性是锚固类结构杆体临界锚固长度随介质变软而增长的根本原因。

②锚杆外端点效应及浆体局部破坏转移特性。在外端点处, 由于 $\Delta x=0$, $\Delta x/d=0$, 故剪应力为零。但极限剪应力发生在紧靠外端点处。因此, 注浆体若沿第一或第二界面发生破坏, 即首先发生在该点处。宏观观察表明, 此时进一步加载, 此破坏即发生向杆体深部的转移。其破坏与相应的极限剪应力紧密相关。图5和图7表明, 在靠近外端点处, 剪应力并非最大, 这是因为量测读数时, 该点处浆体局部破坏已经发生。

③峰值点及其转移特性。综合分析图5和图7知, 无论是高、中、低强介质, 抑或第一、第二界面, 在每一级荷载条件下, 都存在一个剪应力峰值点。随着外加荷载等级升高, 该峰值点发生向极限值点的转移(y轴之上); 当达到极限值点后, 该点处浆体产生破坏, 极限剪应力发生向杆体深部的转移(x轴之右)。

④零值点及其转移特性。在图5和图7中, 不管是高、中、低强介质, 还是第一、二界面的剪应力曲线, 都是从峰值开始衰减至零的。因此每一级荷载条件下, 都存在一个零值点; 随着荷载的增加, 零值点发生向锚杆杆体深部的转移。

⑤同时转移特性。上述浆体局部破坏转移、剪应力极限值点转移和零值点转移是基本同时发生的。如果不是破坏后的浆体在拉拔过程中还存在不大的摩阻力效应(随破坏长度增加而略有增加), 上述三个转移现象将同时发生。亦即极限剪应力值点与零值点之间的空间

距离基本保持为一个常数，这个常数就是临界锚固长度（另文讨论）。

⑥第二界面剪应力是第一界面剪应力衰减的结果。比较图5和图7，相对于高、中、低强介质，第二界面的剪应力分布特征与第一界面的基本相近，但同一荷载条件下的量值有较大差别。当加载均在100kN、100kN、30kN时，第一界面剪应力分别达到5800KPa（高强介质）、4600KPa（中强介质）、1700KPa（低强介质），第二界面剪应力分别为2245KPa（高强介质）、1720KPa（中强介质）、650KPa（低强介质），后者分别为前者的61.3%、62.6%、62.8%。

⑦试验中对围岩介质进行了系统测试，但因部分测点破坏未给试验结果。从剩余测点的测试数据可以看出：第三界面剪应力是第二界面剪应力进一步衰减的结果，其量值与介质力学强度有关（另文讨论）。三个界面剪应力量值的关系为：第一界面>第二界面>第三界面；只有：1.杆体强度；2.第一界面粘结强度；3.浆体强度；4.第二界面粘结强度均显著高于围岩介质强度时，第三界面破坏才有可能发生。

⑧图8~11给出4位研究者分别对锚索邻近第二界面，锚杆邻近第二界面，锚杆第一界面剪应力分布形态所作实测结果^[8, 9, 12, 13]。将这些结果与图5、图6比较可见，它们的规律是相近的。但它们又不在同一个界面上。这表明：1.平均剪应力的概念和方法经不起科学试验检验，应予摒弃；2.界面剪应力分布形态遵从衰减机理，是一个普遍现象；此衰减包括沿杆体和垂直于杆体两个正交方向上的衰减；3.锚固类结构界面剪应力分布规律问题在一定程度上可以统一起来进行研究。

⑨微观结构理论是平均剪应力概念和设计方法的理论基础。微观结构理论由D.J.Pinchin和D.Tabor（1978）提出，此后又由A.Benter, S.Diamond和S.Mindess（1985）等人进一步研究和发展起来的。由于该理论的应用超出了本身的适用范围，因而具有很大误导性。

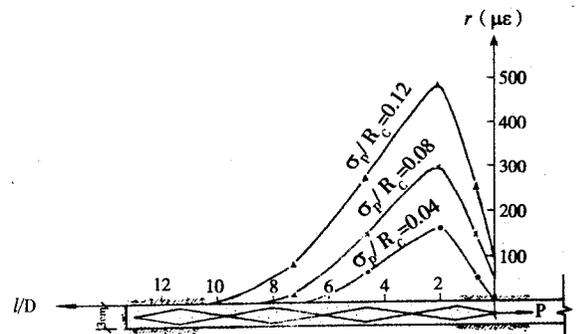


图8 测邻近第二交结面剪应变分布^[8]

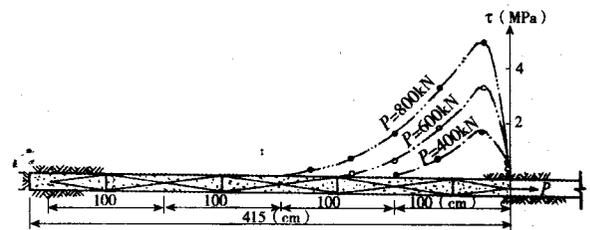


图9 测邻近第二交结面剪应力分布^[9]

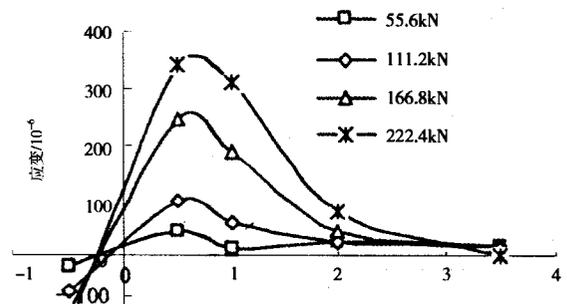


图10 测邻近第二交结面剪应力分布^[12]

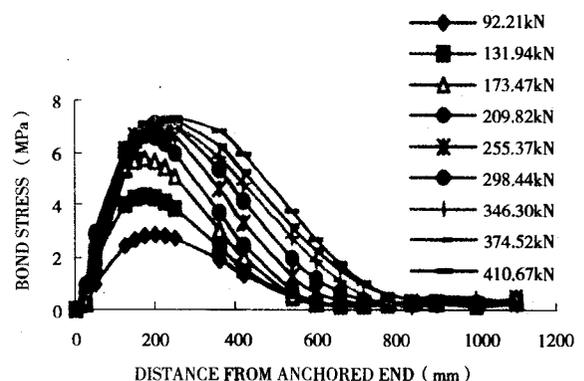


图11 测唯一交结面上剪应力分布^[13]

7 结论

①实测锚杆轴向应变呈衰减分布形态；对于不同介质，衰减速率不同，在低强介质中衰减更快；因而临界锚固长度在低强介质中最短，在低

强介质中较长,在中强介质中居中。

②本文建立的以试验数据为基础的剪应力分布经验公式,对于第一界面是可行的,对于第二界面由于介质的非线性特性而只具有参考意义。

③本文在计算第二界面剪应力分布形态时所采用的注浆体为刚体的假设只适用于软土一类介质。

④锚杆界面剪应力分布在沿杆体和垂直于杆体两个正交方向上都是衰减的,而不是均匀分布的,锚杆界面微观结构理论具有不争的误导性。

⑤锚固类结构诸界面剪应力间存在显著相互作用关系,第三、第二界面剪应力是第二、第一界面剪应力不断衰减的结果。

⑥第一、第二界面剪应力发生沿杆体的衰减过程伴随有砂浆局部破坏转移、剪应力极限值点转移和零值点转移现象发生。上述三个转移大体同时进行。

⑦锚固结构诸界面剪应力问题在一定程度上可以统一起来进行研究。

参考文献

- [1] Pinchin D J, Tabor D. Interfacial phenomena in steel fiber reinforced cement I: structure and strength of interfacial region [J]. Cement and concrete research, 1978, 8:15-24.
- [2] Benter A, Diamond S, Mindess S. The microstructure of the steel fiber-cement interface[J]. Journal of Materials Science, 1985, 20:3620-3626.
- [3] Stang H, Li Z, Shah S P. The pull-out problem—the stress versus fracture mechanical approach[J]. ASCE, J. Engng Mech., 1990, 116(10):2136-2150.
- [4] Patrikis A K, Andrews M C, Yong R J. Analysis of the single-fiber pull-out test by the use of Raman spectroscopy. part I: pull-out of aramid fibers from an epoxy resin[J]. Composites Science and Technology, 1994, 52:387-396.
- [5] Li Zongjin, Barzín M O, Surendra P S. Characterization of interfacial properties in fiber reinforced cementations composites [J]. Journal of American Ceramic Society, 1991, 74:2156-2164.
- [6] Khalaf M N, Page C L. Steel/mortar interface. microstructure features and mode of failure[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 9:197-208.
- [7] 郑颖人, 杨会龙. 锚喷支护参数分析与选用原则[R]. 西安: 空军工程学院, 1982. (Zheng Yingren, Yang Huilong. Parameters analysis and selection principle[R]. Xi'an: Engineering College of Air Force, 1982. (in Chinese))
- [8] 郑全平. 预应力锚索加固作用机理与设计计算方法[R]. 北京: 中国防护工程科技报告, 1998. (Zheng Quanping. Reinforcement and action mechanism and design and calculation method of prestressed anchor rope[R]. Beijing: Chinese Science and Technology Report of Protective Engineering, 1998. (in Chinese))
- [9] 顾金才, 明治清, 沈俊, 等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[A]. 见: 岩土锚固新技术[C]北京: 人民交通出版社, 1998. (Gu Jincai, Ming Zhiqing, Shen Jun, et al. Field test research on stress characteristic of inner anchorage section of prestressed anchor rope[A]. In: New Techniques of Rock and Soil Anchorage[C]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese))
- [10] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3765-3769. (Xu Jingmao, Gu Leiyu. Testing study on the peak shear strength between grout and bore wall in the interior bond section of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22):3765-3769. (in Chinese))
- [11] 王霞, 郑志辉, 孙福英, 等. 锚索内锚固段摩擦力分布及扩散规律研究[J]. 煤炭工程, 2004, (7): 45-48. (Wang Xia, Zheng Zhihui, Sun Fuying, et al. Study on frictional resistance distribution and diffusion law of inner anchorage section of anchor cable[J]. Journal of China Coal Society, 2004, (7): 45-48. (in Chinese))
- [12] 邬爱清, 韩军, 罗超文, 等. 单孔复合型锚杆锚固体应力分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 247-251. (Wu Aiqing, Han Jun, Luo Chaowen, et al. Research distribution along bolts single borehole and multiple anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2):247-251. (in Chinese))
- [13] Wu Shenxing. Dynamic experimental study of bond-slip between bars and the concrete in Xiaowan arch dam[A], In: New Developments in Dam Engineering—Wieland[C]. London: Taylor and Francis Group, 2004. 951-959.
- [14] 曾宪明, 杜云鹤, 范俊奇等. 锚固类结构第二交接面剪应力演化规律、衰减特性与计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报. 2005 (8): (4610-4626). (Zeng xianming, Du Yunhe, Fan Junqi, Discussion on evolutionary law, attenuating characteristic and calculating method for the shearing stress of the second interface of anchorage type structures). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. Vol.24, Supp. 1 (4610-4626).