

节理岩体内砂浆锚杆锚固力演化特征试验研究

靖洪文 朱谭谭 苏海健 尹 乾 赵洪辉 韩观胜

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了研究节理岩体内砂浆锚杆锚固力的演化特征,在锚固体内预制了不同尺寸和位置的节理,通过室内拉拔试验,考察了节理开度和节理-表面距离对锚固系统锚固力的影响。研究表明:节理-表面距离对锚固系统破坏形态基本没有影响,而随着节理开度的增大,锚固系统破坏形式由锚杆屈服拉断破坏逐渐演化为锚杆、砂浆和锚固体接触面剪切破坏,其中有 66.67% 表现为锚杆-砂浆接触面破坏,仅有 33.33% 表现为砂浆-锚固体接触面破坏;节理开度对锚杆锚固段应力分布和系统承载能力影响显著,随节理开度的增大,锚固系统承载力逐渐减小,而节理-表面距离越大,锚固系统承载能力越强;完整锚固体锚杆锚固段轴向应力随深度的增大逐渐减小,在节理附近,含节理锚固体锚杆轴向应力基本保持不变,深度大于节理-表面距离时,锚杆轴向应力大于同位置完整锚固体锚杆轴向应力。

关键词: 节理岩体; 砂浆锚杆; 锚固力; 荷载传递

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)01-0016-06

Experimental study on anchoring force evolution characteristics of mortar anchor in joint rock mass

Jing Hongwen Zhu Tantan Su Haijian Yin Qian Zhao Honghui Han Guansheng

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to investigate the evolution of anchoring force of mortar anchor in joint rock mass, indoor pull-out test of anchorage volume with pre-joints of different sizes and locations was conducted, and the influence of joint aperture and the joint-surface distance on the anchoring force of the whole system was also studied. The results show that the joint-surface distance has little effect on the ultimate failure mode of the anchoring system, while with the increasing joint aperture, the ultimate failure mode of the anchoring system changes gradually from the yield and tensile failure of the anchor to shear failure at the contact faces between the anchor, mortar and the anchorage volume, and in which 66.67% of the shear failure presents the interface failure between the anchor and the mortar, only 33.33% of the shear failure shows the interface failure between the mortar and the anchorage volume. Joint aperture has significant influence on the stress distribution of the anchorage section and the bearing capacity of the whole system. The bearing capacity of the anchorage system decreases gradually with the increasing joint aperture, while increases gradually with the rise of the joint-surface distance. Axial stress of the anchorage section in intact anchorage volume decreases gradually with the increasing depth, while the axial stress of the anchor near the joints in flawed anchorage volume maintains basically stable, and the axial stress of anchor is greater than that of the intact anchorage volume in the same position when the depth is greater than the joint-surface distance.

Key words: joint rock mass; mortar anchor; anchoring force; loading transfer

0 引 言

锚杆支护技术在 20 世纪初就已经在煤矿巷道

顶板支护中应用,目前,锚杆支护作为一种有效的加固技术已经在基坑支护、采矿工程等各种岩土工程中得到广泛的推广^[1-4]。锚固系统承载力是锚杆支

收稿日期: 2016-09-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.01.003

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB036003); 国家自然科学基金资助项目(51374198); 中国矿业大学大学生创新创业基金资助项目(201509)

作者简介: 靖洪文(1963—),男,山东冠县人,教授,博士生导师,博士。Tel: 1380520918, E-mail: hwjing@cumt.edu.cn

引用格式: 靖洪文,朱谭谭,苏海健,等.节理岩体内砂浆锚杆锚固力演化特征试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1): 16-21.

Jing Hongwen Zhu Tantan Su Haijian et al. Experimental study on anchoring force evolution characteristics of mortar anchor in joint rock mass [J]. Coal Science and Technology 2017 45(1): 16-21.

护设计的重要参数,锚固系统应力传递机理的研究对锚杆支护的发展和岩土工程设计安全具有重大意义。

长期以来,基于锚杆锚固段剪应力做均匀分布的假设^[5],认为锚固系统所能承受的最大荷载与锚固长度成正比; Fuller^[6]和 EvangeLista^[7]等通过试验证明,除特殊介质下,锚杆锚固段摩擦阻力沿锚杆并不是均匀分布;之后很多学者对锚杆锚固段剪应力的分布进行了大量的研究,并取得了许多研究成果。Phillips^[8]提出锚固段剪应力沿锚固深度成幂函数分布;张季如等^[9]通过建立锚杆荷载传递的双曲函数模型,获得了锚杆摩阻力和剪切位移沿锚固长度的分布规律,并分析了其影响因素;尤春安等^[10-11]根据 Kelvin 和 MindLin 问题的位移解,得到了预紧力锚杆和全长黏结式锚杆锚固段的剪应力和轴向应力分布规律;谷拴成等^[12]通过建立含锚固缺陷锚杆力学模型,得到了含锚固缺陷锚杆荷载传递规律,分析了锚固缺陷长度和位置对应力传递机理的影响;孙玉宁等^[13]对端锚可回收树脂锚杆和普通树脂金属锚杆结构进行了分析,提出 2 种分析锚杆锚固段的力学模型,并通过有限元数值分析软件对 2 种锚杆模型进行非线性计算,获得锚杆锚固段上剪应力和正应力的分布规律。Fujita^[14]总结了 30 例现场试验的成果,提出了临界锚固这一概念,并认为锚固超过一定长度后,锚固力基本不再增加;Kilic 等^[15]通过室内试验,研究了不同形状的锚杆对锚固系统承载力的影响;张波等^[16-17]在类岩石材料中预留了交叉裂隙制作成岩体无锚及加锚试件,探讨了含交叉裂隙节理岩体的锚固效应及破坏模式。

综上所述,当前对完整锚固体的应力传递机理和承载力进行了大量的研究工作,并取得了大量的成果。然而,在复杂地质作用和人为扰动作用下,锚固体内常存在节理等缺陷,锚杆锚固段黏结材料往往是不连续的。基于此,笔者通过在锚固体内预制节理的方法,采用室内拉拔试验,主要考察了锚固体内节理对锚固系统应力传递机理和承载能力的影响。

1 试 验

由于采集大尺寸规则形状岩石以及在大尺寸岩石内部预制节理存在困难,本次试验采用混凝土代替天然岩石。混凝土试块尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,锚固体和节理如图 1a 所示。混凝土试块

采用普通硅酸盐 32.5 标号水泥浇筑,混凝土浇筑过程中,采用 PVC 管在试块中心预留一个直径为 20 mm 的锚孔,采用透明 ACRYLIC 板在试块中心预制一个节理缺陷。经过搅拌、振捣等工序,将浇筑完成的试样养护 24 h 拆模,取出 PVC 管和 ACRYLIC 板。在养护室养护到第 28 天,采用普通硅酸盐 42.5 标号水泥作为黏结材料,建筑石膏作为节理填充物,制作形成含节理缺陷锚固体,试样如图 1b 所示,具体物理参数见表 1。

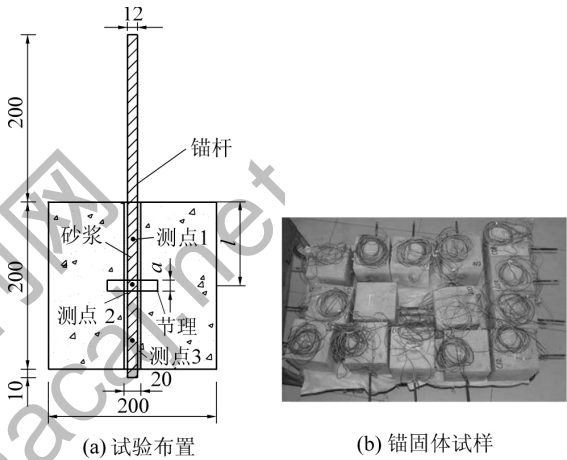


图 1 锚固体试样及其示意

Fig. 1 Anchorage body and sketch maps

表 1 锚固体试样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of anchorage body

锚固体编号	节理开度 a/mm	节理-表面距离 l/mm	承载力 $/\text{kN}$
c01	6	100	41.05
c02	12	100	31.10
c03	12	100	30.40
c04	18	100	28.10
c05	24	100	20.47
c06	30	100	18.62
c11	12	40	29.93
c12	12	70	30.63
c13	12	130	31.71
c14	12	160	33.26
c15	完 整		41.52

在完整混凝土试样内,通过钻心、切割、打磨等工序,共得到 5 个直径为 50 mm,高度为 100 mm 的标准试样,通过室内单轴压缩试验,测得试样平均单轴抗压强度为 30.56 MPa。杨振茂等^[18]指出,锚杆直径与锚孔直径之差为 6~12 mm,最好为 7~8 mm,

所以本次试验锚杆材料选用公称直径为 12 mm 的螺纹钢,锚杆与锚孔直径相差 8 mm。为考察锚杆应力随深度的变化规律,在距锚孔孔口分别为 5、10、15 cm 的 3 个监测点粘贴电阻式应变片,如图 1b 所示。研究主要考察不同节理开度 a 和距孔口不同 l 条件下砂浆锚杆的锚固特性。

本次拉拔试验在中国矿业大学材料检测实验室进行。试验过程中,荷载和位移由试验机数据采集系统自动采集,3 个监测点锚杆应变由 TST3827E 静态应变测试系统同步采集,采用匀速加载方式,加载速率为 10 N/s,试验系统如图 2 所示。



图2 拉拔试验系统

Fig. 2 Pull-out test system

2 试验结果分析

2.1 破坏形式

锚固系统的破坏形式随锚固体内节理尺寸和位置的变化不尽相同,主要可以分为 3 种:①锚杆屈服破坏(I型),如图 3a 所示;②锚杆与砂浆界面破坏(II型),锚杆被拉出,如图 3b 所示;③砂浆与围岩界面破坏(III型),砂浆材料与锚杆被整体拉出,如图 3c 所示。不同节理形态下锚固体破坏形式统计见表 2。



(a) I 型

(b) II 型

(c) III 型

图3 锚固体破坏形式

Fig. 3 Failure modes of anchorage

表2 锚固体破坏形式统计

Table 2 Statistics on failure modes of anchorage

破坏形式	锚固体试样
I	c01, c15
II	c03, c04, c05, c06, c11, c14
III	c02, c12, c13

由图 3 和表 2 可知,当节理开度较小(c01 和 c15)时,锚杆、砂浆和围岩有效黏结长度较长,黏结力大于锚杆抗拉强度,锚固体表现为锚杆屈服拉断破坏。在锚杆自由段与锚固段分界面,锚杆轴向应力与锚杆自由段轴向应力理论上相等,且大于锚固段轴向应力。但是,锚杆安装时几乎不可能与围岩表面垂直,如图 4 所示,锚杆与围岩表面垂线方向成一个很小的角度 θ 。试验机给锚杆一个垂直于锚固体表面的拉力 F , F 可分解为沿锚杆轴向的力 F_1 和垂直于锚杆轴向的力 F_2 。锚杆锚固段和自由段分界面轴向应力由 2 部分组成,一部分为 F_1 提供的轴向拉应力,另一部分为 F_2 提供的弯曲应力。其中,弯曲应力在锚杆一侧表现为拉应力,另一侧表现为压应力,导致分界面锚杆杆体一侧拉应力大于自由段,称之为张拉侧,而另一侧小于自由段,称之为挤压侧。弯曲应力在分界面最大,导致锚杆往往在分界面张拉侧产生撕裂破坏,本次试验结果同样显示,锚杆屈服拉断破坏均在锚固体表面(图 3a)。锚杆弯曲应力随着夹角 θ 的增大而增大,这就要求在实际工程锚杆安装过程中,应该对施工质量进行严格控制,使锚杆尽量与围岩表面垂直。

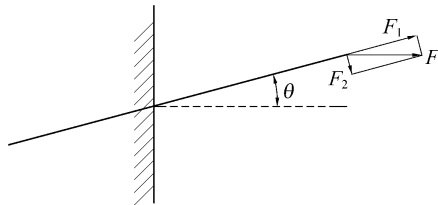


图4 锚杆受力分析

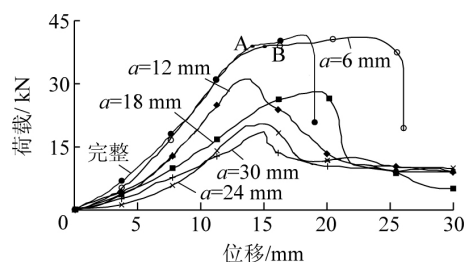
Fig. 4 Mechanical analysis of anchor

随着节理开度 a 的增大,锚杆、砂浆和围岩有效黏结长度减小,锚杆抗拉强度大于黏结力,所以锚固系统表现为 II、III 型破坏,且伴随有锚孔孔口锥形破坏。由表 2 可知,除 I 型破坏外,有 66.67% 表现为 II 型破坏,而仅有 33.33% 表现为 III 型破坏。冀晓东等^[19]和张伟丽等^[20]研究表明,当 2 种材料强度相差较大时 2 介质的黏结更容易破坏,这与试验结果一致。

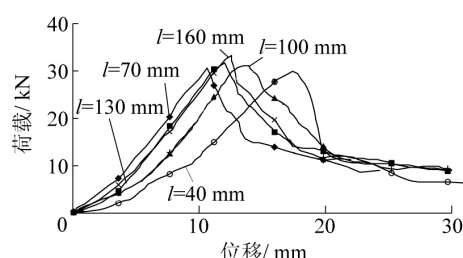
2.2 荷载位移曲线

不同锚固体节理分布下拉拔试验荷载位移曲线如图 5 所示。需要说明的是,试验中由于锚杆存在约 10 cm 的自由段,所以试验机采集到的位移包括锚杆锚固段滑移量和锚杆自由段伸长量。由图 5 可

可以看出, 拉拔试验的荷载-位移曲线主要可以分为 5 个阶段。



(a) $l=100$ mm、不同节理开度 a 条件下



(b) $a=12$ mm、不同距离 l 条件下

图 5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

1) 挤压接触阶段: 在该阶段, 荷载位移曲线成上凸状, 与岩石的应力应变曲线压密段相似, 且形成机理相同, 这主要是由加载初期试验系统各部分之间间隙压密、相互接触导致。

2) 线弹性阶段: 挤压接触阶段后, 荷载位移曲线进入线弹性阶段, 在该阶段试验系统各部分已经充分接触, 轴向荷载随轴向位移得增大呈线性增加。

3) 非弹性阶段: 在此阶段, 砂浆、锚杆和围岩接触面开始产生微观剪切破坏, 荷载-位移曲线表现为上凸状。

4) 破坏阶段: 峰值荷载过后, 锚杆轴向荷载逐渐减小, 砂浆、锚杆和围岩接触面产生宏观破坏, 有效黏结面积逐渐减小, 黏结力减弱, 锚杆轴向荷载逐渐降低。

5) 恒阻力阶段: 当接触面全部破坏后, 荷载位移曲线进入恒阻力阶段, 在该阶段, 轴向位移不断增大, 轴向荷载基本保持不变。拉拔荷载主要由砂浆、锚杆和围岩之间的摩擦阻力提供。

与其他荷载-位移曲线不同, 完整锚固体和 $a=6$ mm 的锚固体锚杆轴向荷载达到峰值后很快减小为零。这主要是由其破坏形式引起的: c01 和 c15 锚固体最终破坏为锚杆屈服断裂破坏, 图 5 中 A 点和 B 点分别为 2 个试样锚杆的屈服点, 在 A 点和 B 点之后, 荷载位移曲线实际为锚杆的屈服

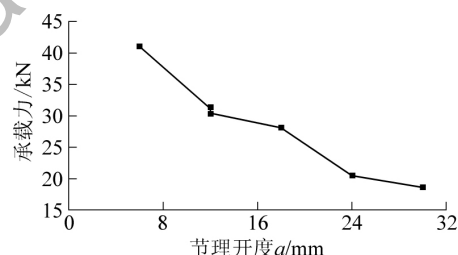
阶段和强化阶段, 当达到锚杆的极限抗拉强度时, 锚杆径缩断裂。

2.3 宏观力学参数

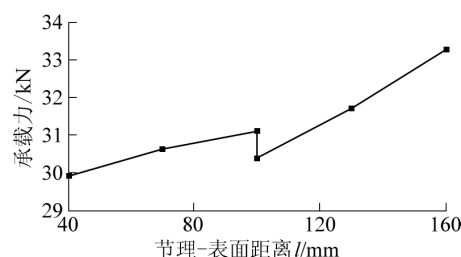
不同节理缺陷下, 锚固系统承载力变化规律如图 6 所示, 具体数值见表 1, 其中锚固力即锚固系统极限承载力。由图 6 和表 1 可以看出。

1) 随着节理开度 a 的增大, 锚固系统承载力逐渐降低, 节理开度 a 由 6 mm 增大到 30 mm, 系统承载力由 41.05 kN 减小到 18.62 kN, 减小了 54.64%。这主要是因为节理开度的增大, 锚杆有效黏结长度减小, 锚杆、砂浆和围岩黏结力降低。

2) 随着节理-表面距离 l 的增大, 锚固系统的承载力逐渐增强, l 由 40 mm 增大到 160 mm, 系统承载力由 29.93 kN 增大到 33.26 kN, 增大了 11.13%。谷拴成等^[12]指出, 节理距锚杆孔口越远, 对锚杆受力的影响越小, 同时, 其研究成果显示, 锚固段缺陷会使锚杆轴向应力和剪应力增大。所以, 随着 l 的增大, 锚固体内节理对系统承载力的影响逐渐减弱, 锚固系统承载能力增强。



(a) 不同节理开度 a



(b) 不同节理-表面距离 l

图 6 锚固系统承载力

Fig. 6 Bearing capacity of anchor system

2.4 锚杆应力分布

以试样 c13 和 c15 为例, 说明锚固体内节理对锚杆锚固段应力变化规律的影响, 其锚杆应力-位移曲线如图 7 所示。试验过程中, 虽然应变片采用 704 硅橡胶进行密封保护, 但锚杆与砂浆相互挤压错动, 出现多处应变片脱落、导线拉断等情况, 当轴向荷载较大时, 应变片测量值不可避免地产生异常,

如图7所示。轴向应力-位移曲线已将异常数据点剔除,只保留了正常数据段。

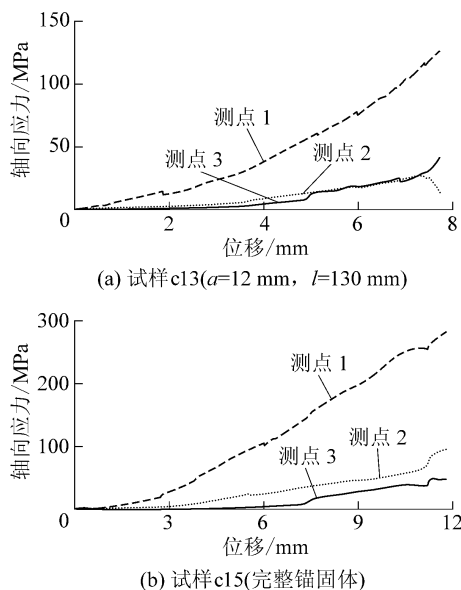


图7 锚杆轴向应力-位移曲线

Fig. 7 Axial stress-displacement curves of anchors bolt

由图7可以看出,在加载初期,3个监测点锚杆轴向应力均为零。随着轴向位移的增大,锚杆轴向荷载逐渐向锚固段深处传递,3个监测点锚杆轴向应力先后开始增大。如图7a所示,当轴向位移达到2 mm左右时,锚杆轴向应力传递到监测点3处,锚杆轴向应力由零开始增大。与完整锚固体不同,当轴向位移达到5 mm时,监测点3处的锚杆轴向应力迅速增大,随后基本与监测点2处的锚杆轴向应力基本相等。分析原因: $l=130$ mm时,节理位于监测点2、3之间,锚杆、砂浆和围岩之间的黏结在节理缺陷处断开,节理附近黏结质量降低,黏结强度减小。随着轴向应力的增大,监测点2、3之间的接触面逐渐破坏而失去黏结力,两监测点轴向应力基本相等。

试样c13和c15锚杆锚固段轴向应力随深度的变化规律如图8所示。由图8可以看出,随着深度的增大,锚杆轴向应力逐渐减小,在节理附近锚杆轴向应力基本保持不变,这与谷栓成等^[12]通过弹性理论得到的含锚固缺陷锚杆轴向应力分布规律相同。轴向荷载为5、10、15和20 kN时,在监测点3处,试样c13锚杆轴向应力分别为1.84、5.92、15.63和22.13 MPa,而完整锚固体锚杆轴向应力分别为0、0.28、1.47和5.68 MPa。由此可以看出,深度大于 l 时,含节理锚固体锚杆轴向应力大于同位置完整锚

固体锚杆轴向应力。

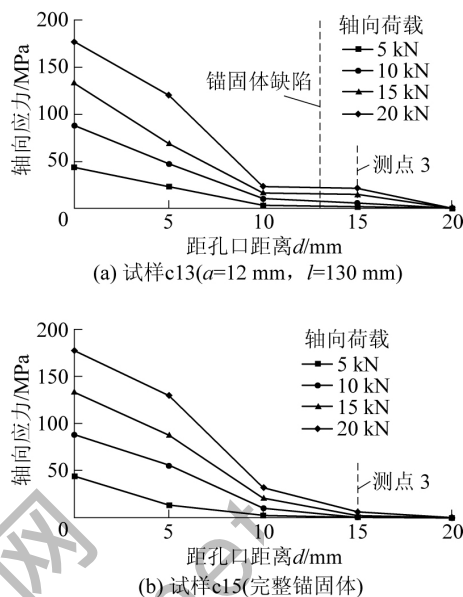


图8 锚杆轴向应力分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of stress along bolt axis

3 结 论

1) 节理-表面距离对锚固系统破坏形态基本没有影响,而随着节理开度 a 的增大,锚固系统破坏形式由锚杆屈服拉断破坏逐渐演化为锚杆、砂浆和锚固体接触面剪切破坏,其中66.67%表现为锚杆-砂浆接触面破坏,仅有33.33%表现为砂浆-锚固体接触面破坏。

2) 节理开度对锚杆锚固段应力分布和系统承载能力影响显著,随节理开度 a 的增大,锚固系统承载力逐渐减小,而节理-表面距离 l 越大,锚固系统承载能力越强。

3) 完整锚固体的锚杆锚固段轴向应力随深度的增大逐渐减小,在节理附近,含节理锚固体锚杆轴向应力基本保持不变,深度大于节理-表面距离 l 时,锚杆轴向应力大于同位置完整锚固体锚杆轴向应力。

参考文献 (References):

- [1] Bo Meng, Hongwen Jing, Kunfu Chen *et al.* Failure mechanism and stability control of a large section of very soft roadway surrounding rock shear slip [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 127-134.
- [2] 薛道成, 张凯. 煤矿锚杆锚固结构系统横向振动特性研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 695-700.
Xue Daocheng, Zhang Kai. Theoretical research on transverse vibrations of the bolt anchorage structure in coal mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 695-700.

- [3] 康红普, 吴拥政, 李建波. 锚杆支护组合构件的力学性能与支护效果分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1057-1065.
Kang Hongpu, Wu Yongzheng, Li Jianbo. Analysis on mechanical performances and supporting function of combination components for rock bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1057-1065.
- [4] 高福全, 薛吉胜, 尹希文. 强烈动压影响下锚网支护巷道矿压显现规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 28-32.
Gao Fuquan, Xue Jisheng, Yin Xiwen. Research on strata behaviors law of bolting with wire mesh roadway affected by strong dynamic pressure[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 28-32.
- [5] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627-631.
Wang Lewen, Wang Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627-631.
- [6] Fuller P G, Cox R H T. Mechanics load transfer from steel tendons of cement based grouted [C]//Fifth Australasian Conference on the Mechanics of structures and Materials. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1995.
- [7] EvangeLista A, Sapio G. Behaviour of ground anchors in stiff clays [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 39-47.
- [8] Phillips S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock [R]. London: London Cementation Research Ltd, 1970.
- [9] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188-192.
Zhang Jiru, Tang Baofu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188-192.
- [10] 尤春安, 王玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925-928.
You Chunan, Wang Yubao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 925-928.
- [11] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341.
You Chunan. Mechanical analysis on wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339-341.
- [12] 谷拴成, 张 京, 张 森, 等. 锚固缺陷对锚杆拉拔试验荷载影响分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(9): 217-220, 224.
Gu Shuancheng, Zhang Jing, Zhang Sen, et al. Influence analysis of anchoring defects on bolt pull-out load[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 217-220, 224.
- [13] 孙玉宁, 周鸿超, 宋维宾. 端锚可回收锚杆锚固段力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3014-3021.
Sun Yuning, Zhou Hongchao, Song Weibin. Research on mechanical character of bonding segment of end-anchored retrievable resin bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3014-3021.
- [14] Fujita K. A method to predict the load-displacement relationship of ground anchors [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1997: 58-62.
- [15] Kilic A, Yas ar E, Celik A G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2002, 17: 355-362.
- [16] 张 波, 李术才, 杨学英, 等. 含交叉裂隙岩体相似材料试件力学性能单轴压缩试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3674-3679.
Zhang Bo, Li Shucai, Yang Xueying, et al. Uniaxial compression tests on mechanical properties of rock mass similar material with cross-cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3674-3679.
- [17] 张 波, 李术才, 张敦福, 等. 含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩力学性能试验及断裂损伤研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 149-154.
Zhang Bo, Li Shucai, Zhang Dunfu, et al. The uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material jointed rock mass with filled crack[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 149-154.
- [18] 杨振茂, 马念杰, 官山月, 等. 锚杆钻孔、杆体、树脂卷直径的合理匹配[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 659-663.
Yang Zhenmao, Ma Nianjie, Guan Shanyue, et al. Reasonable matching of diameters among borehole, bolt and resin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 659-663.
- [19] 冀晓东, 赵 宁, 宋玉普. 冻融循环作用后变形钢筋与混凝土黏结性能退化研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 87-91.
Ji Xiaodong, Zhao Ning, Song Yupu. Experimental study on bond behaviors deterioration between deformed steel bar and concrete after freezing and thawing[J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 87-91.
- [20] 张伟丽, 项 伟, 贾海梁. 冻融循环对砂浆岩石锚杆锚固力影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 558-566.
Zhang Weili, Xiang Wei, Jia Hailiang. Experimental study of mechanical properties of grouted rock under freeze thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 558-566.