

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.017

单轴压缩下含层理加锚岩石力学特性研究

腾俊洋^{1,2}, 张宇宁^{1,2}, 唐建新^{1,2}, 张 闯^{1,2}, 李臣林^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 为分析锚固方式和层理对加锚岩石力学特性影响规律, 采用相似材料预制含层理岩石, 室内钻取 0°和 90°层理标准试件, 以 45 号钢加工而成的螺杆模拟锚杆, 分别对试件进行端部锚固和全长锚固, 从而得到不加锚杆、端部锚固、全长锚固 3 种试件, 然后在 MTS815 岩石力学试验系统上对试件进行单轴压缩试验分析其变形、强度特征。结果表明: 锚杆可提高岩石的强度, 且层理方向和锚固方式影响其对强度的提高幅度。层理相同的加锚试件, 全长锚固下岩石的抗压强度提高幅度大于端部锚固岩石; 同一锚固方式下, 90°层理加锚试件的单轴抗压强度提高幅度大于 0°层理加锚试件。锚固方式不同, 加锚试件的破坏形式亦有所差别。根据锚固方式不同, 可将破坏形式分为剪切拉伸和剪切错断 2 种。锚固方式对加锚试件锚杆失效模式无影响, 二者均表现为岩体与灌浆界面滑脱, 但全长锚固与端部锚固所不同的是, 全长锚固锚杆与岩石粘结长度更大, 粘结强度更高, 失效时可带出更多、更厚的岩石碎屑。

关 键 词: 层理; 加锚岩石; 力学特性; 锚固机制; 破坏形式

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 07-1974-10

Mechanical behaviors of anchored bedding rock under uniaxial compression

TENG Jun-yang^{1,2}, ZHANG Yu-ning^{1,2}, TANG Jian-xin^{1,2}, ZHANG Chuang^{1,2}, LI Chen-lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of anchoring mode and bedding on mechanical properties of anchored rock. Similar materials were used to precast bedding rocks and standard specimens with 0° and 90° bedding were made in the laboratory. Anchor bolts made of #45 steel were applied to perform end anchoring and full-length anchoring, and thus, three kinds of specimens were obtained by end-anchoring, full-length anchoring and non-anchoring, respectively. The uniaxial compressive strength (UCS) and deformation of specimens were obtained by using MTS815 rock mechanical experiment system. The results show that the UCS of rock was enhanced by the anchor. Specifically, the UCS increment was influenced by the bedding direction and anchoring mode. For anchored specimens with the same bedding, the UCS increment of full-length anchored rock was greater than that of the end-anchored rock. For the specimens with the same anchoring method, the increase amplitude of UCS of anchored specimen with 90° bedding was higher than that of the anchored specimen with 0° bedding. It is found that failure modes of anchored specimens are affected by anchoring types and they are further divided into shearing extension and shearing offset. Failure modes of anchor in anchored specimens are not affected by anchoring methods, and both of anchoring methods slipped between rock mass and grouting interface. However, the differences between the end anchorage and the full-length anchorage are that the latter has longer bond length between the anchor and rock, the higher bond strength was, and the more and thicker rock debris were after failure.

Keywords: Bedding; anchored rock; mechanical properties; anchoring mechanism; failure mode

1 引 言

锚杆应用起源较早, 加固支护效果良好, 发展迅速, 广泛应用于隧道、矿山、水利等岩土工程中。

但锚杆种类繁多、锚固方式不一、作用机制复杂, 工程地质赋存环境多变。以隧道工程为例, 广泛应用的就有系统锚杆、超前锚杆和锁脚锚杆等。根据锚固长度的不同, 锚杆锚固方式又可分为端部锚固、

收稿日期: 2016-08-21

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题重点项目(No. 2011DA105287-ZD201504)。

This work was supported by the Scientific Research Foundation of State Key Lab. of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (2011DA105287-ZD201504).

第一作者简介: 腾俊洋, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程围岩稳定性研究工作。E-mail: jteng89@hotmail.com

通讯作者: 唐建新, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山压力及地下工程围岩稳定性的教学与研究工作。E-mail: jtxtang@cqu.edu.cn

加长锚固和全长锚固3种。锚杆作用机制是一个复杂应力传递过程，涉及3种介质2个界面^[1]。锚杆锚固效果与地质条件密切相关，即使是同一锚固系统应用于不同地质工程中锚固效果也会截然不同。而出于对工业发展和工程应用的需要，岩土工程逐渐向深部、复杂地质空间发展，对于破碎岩体、复杂应力场、岩爆、多物理场耦合等条件下的支护，现有锚固理论面临严峻挑战，使得现有锚固理论落后于工程实践，因此，锚杆锚固机制亟待发展和深化。

国内外众多学者针对岩土锚固机制问题，从锚杆荷载传递机制和锚杆锚固效果两个角度^[2-13]，采用理论分析、实验室模拟试验、现场原位支护试验等方法，进行了大量的研究工作，积累了相当丰富的经验，在一定程度上丰富并加深了锚固机制对岩土结构加固机制的认识。

Freeman^[7]通过对全长粘结锚杆在试验隧道中的应用分析，首先提出中性点的概念，被广泛认可和应用，但中性点的位置较难确定。Li等^[11]研究了锚杆在拉拔试验、原位各向同性变形岩体和单一节理岩体中的力学特性，提出了3种解析模型。Cai等^[2]得到了预测锚杆轴力的解析模型。Carranza-Torres^[4]提出了锚杆加固隧道的闭合形式解，并通过数值分析证实了锚杆对增加隧道围压和控制围岩变形具有重要作用。陈璐等^[14-15]进行了加锚岩石力学试验研究，分析了加锚岩石的力学性质和破坏特征。赵同彬等^[1, 16]进行了加锚岩石拉拔试验和流变试验，分析了锚杆界面剪应力传递规律和加锚岩石流变特性。Zhang等^[5]分析了含预制交叉裂隙加锚岩石的力学性质，指出交叉裂隙岩石单轴抗压强度高于单裂隙岩石。刘泉声等^[17]对深部裂隙岩体锚固机制研究现状进行了系统全面的总结。张宁等^[18]研究了锚杆对三维表面裂隙岩体的加固止裂效果。

上述研究成果虽然丰富了对锚固机制的认识，但对加锚岩石力学的性质研究还较少，相关研究内容不够丰富，角度也比较单一。本文采用物理模拟试验模拟加锚试件，进行加锚试件单轴压缩试验，采用定量的试验结果来定性分析层理和加锚方式对加锚试件力学特性的影响规律。

2 试件制备及试验方案

2.1 试件制备

试验采用如图1所示构筑取芯法制取含0°和90°层理标准试件，试件高为100 mm，直径为50 mm，层间距为15 mm，层理构造选用均匀铺设一层厚约

为0.2 mm的100目细度云母片。试件材料采用较为常见的C15水泥配合河沙、生石灰，配合质量比为C15水泥：河沙：生石灰=1:3:1.5，促凝剂选用熟石灰，与水泥等量使用，常温下养护28 d后取芯。

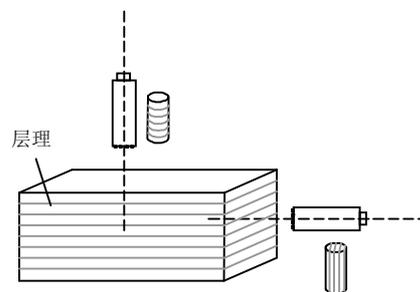


图1 含层理试件制取示意图
Fig.1 Preparation of bedding specimens

2.2 加锚材料及参数

锚杆选取45号钢加工成的强度等级为8.8的螺杆，螺杆屈服强度为640 MPa，抗拉强度为800 MPa，直径为5 mm。锚杆锚固剂选用矿用化学浆液配合酒精适当弱化，将其力学性质与普通锚杆进行对比，如表1所示。

表1 普通锚杆与选用螺杆力学参数
Table 1 Mechanical parameters of common and selected anchors

材料	直径尺寸 /mm	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa	锚固力 /kN
普通锚杆	16~25	200~900	260~600	≥50
选用螺杆	5	800	400	30~40

实际工程进行锚杆支护设计时需确定锚杆直径、锚杆长度、锚杆间排距、锚固方式及锚固角度等参数。室内加锚试验可根据工程实际采用一定的几何相似比进行设计。考虑工程常用锚杆直径为16~25 mm，间排距为0.5~1.0 m，本文选取实际工程中直径为20 mm，间排距为0.8 m的锚杆进行物理模拟，本试验模拟锚杆直径和间距分别为5、60 mm。根据其尺寸确定本试验锚杆几何相似比，即工程用锚杆与模拟锚杆的几何相似比为4:1，工程锚杆间排距与本试验锚杆间排距几何相似比为13.3:1。加锚试件尺寸如图2所示。

2.3 试验方案

试验采用加锚试件单轴压缩试验，测定加锚对层理试件力学性质的影响，试件选用3种加锚方式：不加锚杆、端部锚固以及全长锚固，每种加锚方式分别对应0°层理试件及90°层理试件，为降低试验

离散度，每种试验对应 3 组试件。安装锚杆时，首先采用图 2 所示在试件相应位置上钻取直径为 6 mm 的钻孔，注入锚固剂后安装锚杆及螺母，为了模拟与现场一致的支护条件，加锚试件均采用扭矩扳手施加 10 kN 预紧力。加锚试件编号见表 2。为表达简便，本文将端部锚固和全长锚固分别简称为端锚和全锚。

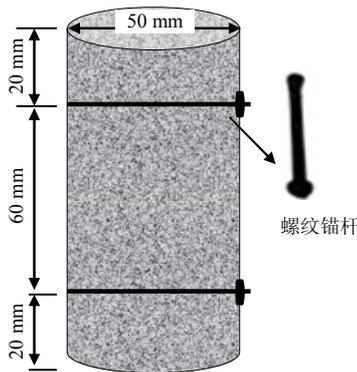


图 2 试件加锚布置示意图
Fig.2 Layout of anchors in specimens

表 2 试件分类列表
Table 2 Classification of experimental tests

试验名称	加锚类型	试件类型	试件编号
单轴压缩	无锚	0°层理	1-W ₁ -1~1-W ₁ -3
		90°层理	1-W ₂ -1~1-W ₂ -3
	端锚	0°层理	1-D ₁ -1~1-D ₁ -3
		90°层理	1-D ₂ -1~1-D ₂ -3
	全锚	0°层理	1-Q ₁ -1~1-Q ₁ -3
		90°层理	1-Q ₂ -1~1-Q ₂ -3

加锚试件单轴压缩试验采用 MTS815 岩石力学测试系统。试件加载类型选择位移控制加载，加载速度控制在 0.1 mm/min，直至试件完全丧失承载能力，试验过程中采用环向应变引伸计测量试件的横向应变。对比试验结果并进行分析，加锚试件及试件放置过程见图 3。



(a) 加锚试件 (b) 放置图

图 3 加锚试件及试件放置图
Fig.3 Anchored specimen and placement

3 试验结果及分析

3.1 应力-应变曲线

试验所得结果见表 3，应力-应变曲线见图 4。由应力-应变曲线可知，加锚岩石与不加锚岩石的应力-应变曲线类似，但加锚岩石总应变大于不加锚岩石。相对于不加锚岩石，加锚岩石达到峰值强度后应力-应变曲线较为平缓，部分试件强度值有一个小幅上升的过程，之后迅速下降，直至失稳。

为分析锚固方式对岩石强度的影响，根据锚固方式的不同，将所得试验结果绘制成散点图，见图 5。由图可以看出，相对于不加锚杆岩石，端部锚固和全长锚固岩石的平均单轴抗压强度和弹性模量均有所提高，但不同锚固方式和层理的岩石其提高幅度亦有所不同。0°层理岩石的单轴抗压强度，端锚相比无锚提高了 12.73%，全锚相比端锚提高了 62.71%；90°层理岩石的单轴抗压强度，端锚相比无锚提高了 34.30%，全锚相比端锚提高了 86.88%。说明全长锚固下岩石的抗压强度提高幅度大于端部锚固，同一锚固方式下，90°层理加锚试件的单轴抗压强度提高幅度大于 0°层理加锚试件，这与本试验所采用的锚固角度有关，90°层理时锚杆锚固方向是垂直于层理方向的，而 0°层理岩石的锚杆锚固方向平行于层理方向。弹性模量有着类似的规律，即 0°

表 3 试验结果
Table 3 Testing results

试件编号	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa
1-W ₁ -1	635.820	0.270	4.710
1-W ₁ -2	740.540	0.310	3.830
1-W ₁ -3	627.390	0.250	4.560
平均值	667.917	0.276	4.366
1-W ₂ -1	489.370	0.220	2.510
1-W ₂ -2	537.760	0.260	3.420
1-W ₂ -3	504.130	0.240	3.080
平均值	510.420	0.240	3.003
1-D ₁ -1	605.370	0.310	4.120
1-D ₁ -2	876.130	0.270	5.870
1-D ₁ -3	648.760	0.250	4.780
平均值	710.087	0.277	4.923
1-D ₂ -1	513.240	0.240	3.350
1-D ₂ -2	510.760	0.340	3.240
1-D ₂ -3	621.130	0.260	5.510
平均值	548.377	0.280	4.033
1-Q ₁ -1	1 210.410	0.300	8.610
1-Q ₁ -2	1 131.560	0.270	7.590
1-Q ₁ -3	1 039.300	0.310	7.830
平均值	1 127.090	0.293	8.010
1-Q ₂ -1	968.510	0.290	8.430
1-Q ₂ -2	879.760	0.270	7.620
1-Q ₂ -3	934.130	0.260	6.560
平均值	927.467	0.273	7.537

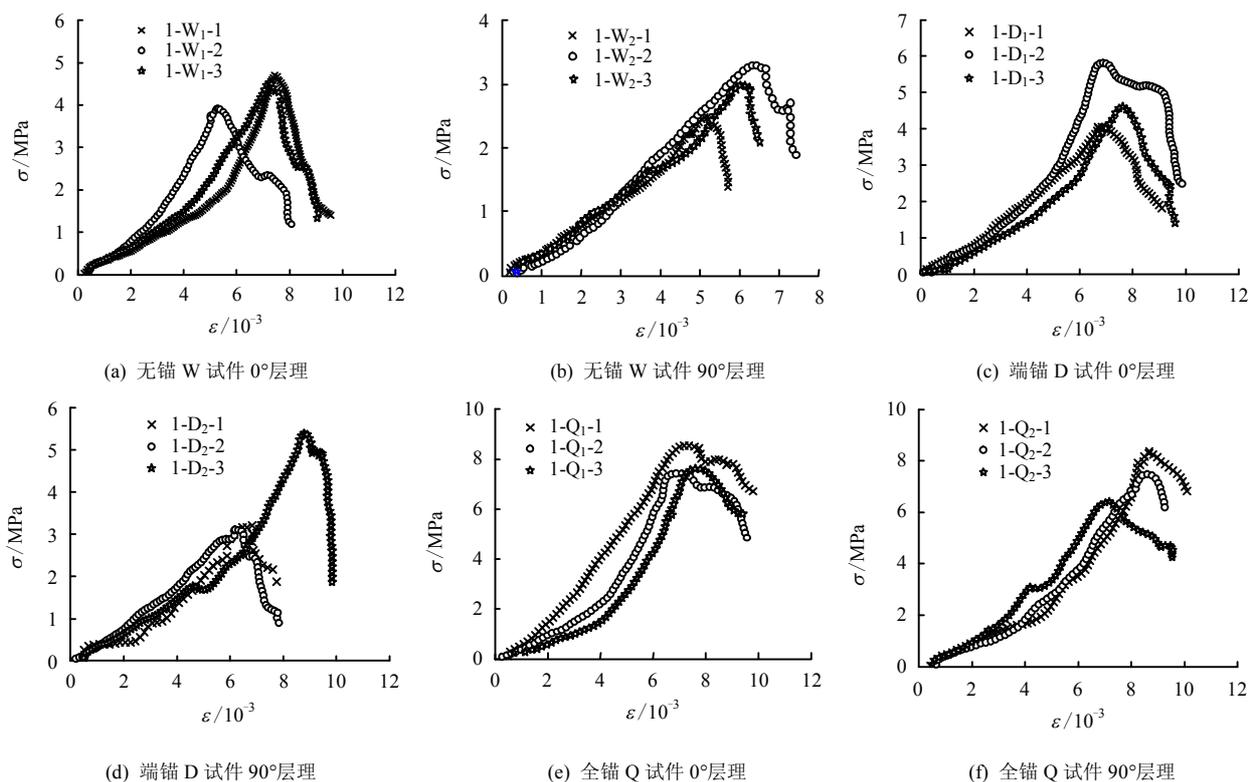


图 4 应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves

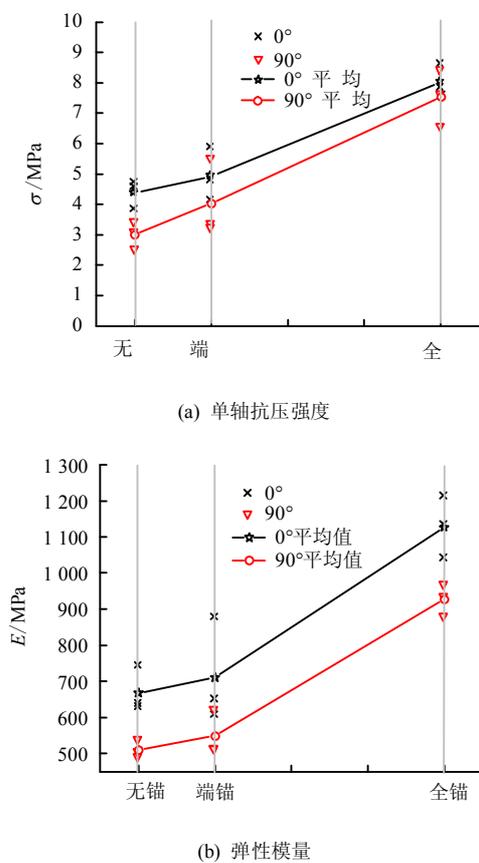


图 5 不同锚固方式下岩石强度参数
Fig.5 Strength parameters of rock with different anchoring modes

层理岩石的弹性模量端锚相比无锚提高了 6.31%，全锚相比端锚提高了 58.73%；90°层理岩石的弹性模量端锚时相比无锚提高了 7.44%，全锚时相比端锚提高了 69.13%。

综上分析可知，施加锚杆有利于提高岩石的强度，并且全长锚固提升效果要好于端部锚固。

3.2 破坏类型

试验所得不同锚固方式下试件破坏形式见图 6。无锚岩石的破坏主要以沿层理的剪切错断（0°层理）和张拉劈裂破坏（90°层理）为主。端部锚固下，0°和 90°层理岩石的破坏形式均表现为剪切拉伸破坏，但二者的破坏机制却有着本质区别。0°层理岩石，锚杆端部粘结力限制了其沿层理的剪切错断作用，使得沿层理的破坏面难以贯通，从而沿轴向发展，表现为沿轴向的剪切拉伸破坏。而对于 90°层理岩石，锚杆的销钉作用起主导地位，限制了岩石的横向张拉作用，最终发生剪切拉伸破坏。全长锚固下岩石沿试件中部或端部发生剪切错断破坏。本质上是沿剪切面剪断凸台，究其原因因为锚固剂对周围岩体的粘结和锚杆销钉作用的综合作用下岩石两端锚固区强度增加，试件中间段则相对较软，锚固区与非锚固区交界处形成软硬交界面，在荷载作用下常沿软硬交界面发生剪切错断破坏。

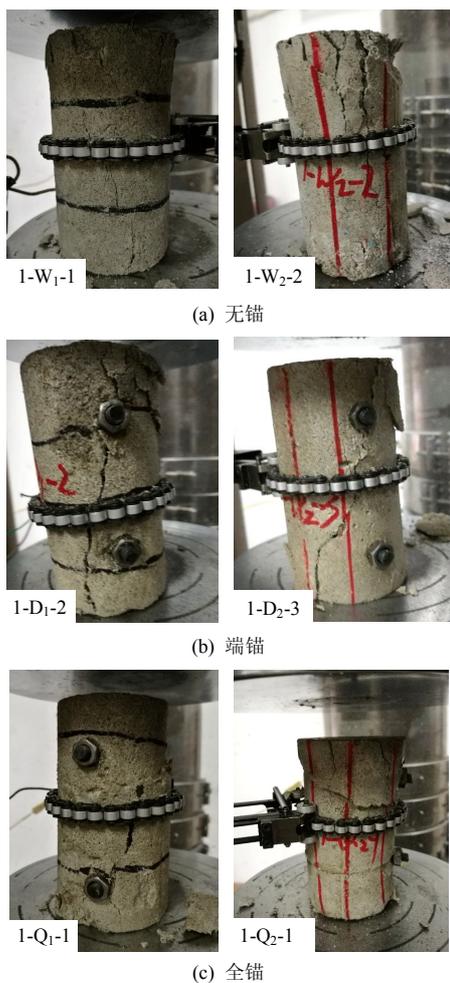


图 6 破坏形式
Fig.6 Failure modes of specimens

4 锚固机制分析

锚杆对锚固体的锚固作用主要是锚杆轴向和切向应力的作用。轴向应力对锚固体施加围压，使其受力状态由单向、双向转化为双向、三向。切向应力改善弱面力学性质，起到加固围岩的作用^[19]，有学者^[20-21]将锚杆对锚固体的这种加固作用看作为对锚固体力学参数的改善，并给出了强度参数的等效公式。锚杆对节理岩体的锚固作用则主要表现为提高节理变形能力和抗剪强度，约束岩体沿节理面的层间错动^[17, 22]。锚杆与围岩体之间的荷载传递机制有助于定量描述锚杆的锚固机制，一直是研究的热点和难点。朱训国^[23]、尤春安等^[24]、张伟等^[25]基于室内试验和现场观测做了较多的研究工作。得到了锚杆轴向力和剪应力分布规律^[23]：

$$\left. \begin{aligned} F(x) &= 2\pi r K u_0 r_0 \left[\ln\left(\frac{x}{r_0}\right) - \frac{1}{\rho}(x - r_0) \right] \\ \tau(x) &= K u_0 r_0 \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{\rho} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： K 为锚杆与注浆体界面上的剪切刚度； u_0 为隧洞壁位移变形； r_0 为隧洞半径； ρ 为中性点位置； x 为任意点距锚杆端头距离； r 为锚杆半径。

基于上述学者对锚杆锚固机制的认识，对所得试验结果进行分析。

4.1 锚固力分布规律

0°层理加锚岩石，锚杆锚固方向与层理面相平行，本文假设锚杆对0°层理岩石锚固时未穿过层理面，即锚杆平行于层理面相隔一定间距布置。这样，在分析0°层理岩石的锚杆受力分布规律时可忽略层理对其影响，端锚锚杆轴力和剪力主要分布于锚固段，自由段与围岩有一定间隙，受力较小且比较均匀，如图7(a)、8(a)中所示，而全锚锚杆轴力和剪力分布可忽略层理影响，如图7(b)、8(b)中所示。

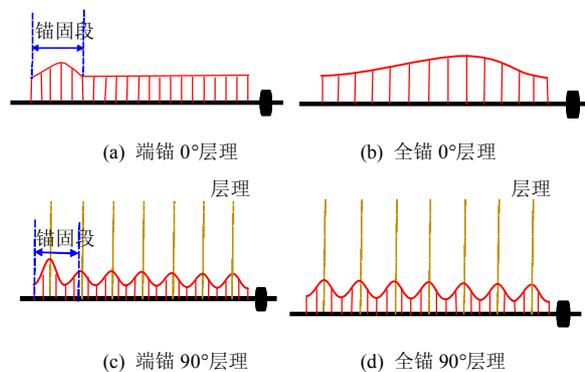


图 7 锚杆轴向力分布示意图
Fig.7 Schematic of axial force distribution of bolts

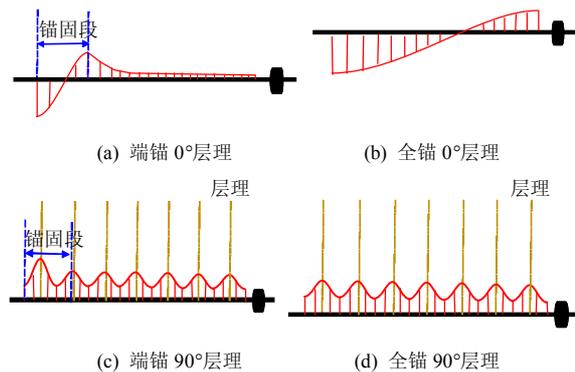


图 8 锚杆剪应力分布示意图
Fig.8 Schematic of shear stress distribution of bolts

90°层理加锚岩石，锚杆与层理面相垂直。在轴向荷载作用下，若无锚杆的作用，试件主要沿90°层理发生横向张拉破坏。若安装端锚锚杆，锚固段与围岩岩体粘结在一起，锚杆与围岩变形耦合较好，当试件发生变形时该段锚杆将及时提供支护阻力，而自由段锚杆与岩石间存在一定的间隙，锚杆无法及时阻止岩石的横向张拉，锚杆的轴向变形与岩石

试样沿层理面的横向变形无法同步, 也即层理面对端锚锚杆的轴向力分布规律影响较小, 其分布规律示意图 7(c)。若安装全锚锚杆, 由于粘结剂的粘结作用, 锚杆的轴向变形与岩石试样沿层理面横向的变形保持同步, 主要集中于层理面附近, 见图 7(d)。90°层理岩层在轴向荷载作用下, 除沿横向发生张拉变形外还将在层理面附近沿轴向发生剪切错动, 对锚杆产生剪切作用。无论对于端锚锚杆还是全锚锚杆, 最大剪应力均分布于层理面附近, 剪应力分布示意图 8(c)、(d)。

考虑到围岩变形的时间效应, 分析锚杆的锚固效果不仅要考虑锚杆轴力和剪力分布规律, 而锚杆的作用特性如增阻速度、抗剪能力等同样重要。端锚锚杆与全锚锚杆的增阻特点和对节理的抗剪特点见图 9。从增阻特点可以看出, 全锚锚杆的增阻速度更快, 阻力更高, 这意味着在进行围岩支护时全锚锚杆可以更快地提供支护阻力, 支护强度也高于端锚锚杆。需要说明的是, 实际应用中, 全锚锚杆的施工较端锚锚杆费时、费力, 这往往贻误了最佳支护时机, 使其支护优点大打折扣。工程中若受条件限制而无法及时进行锚杆注浆时, 可以采用端锚锚杆进行一次支护, 之后再选择适当时机进行灌浆, 形成永久支护。从图 8 中可以看出, 锚杆对含层理岩石进行锚固时, 对于 90°层理, 端锚锚杆和全锚锚杆的剪应力分布类似。但二者对节理的抗剪过程与作用机制却有着较大的差异, 如图 9(b)所示。全长锚固时, 钻孔中粘结剂将锚杆与围岩粘结在一起, 层理发生剪切错动时立即对锚杆产生剪切作用, 当层理达到极限抗剪强度时, 锚杆也可以同步达到其极限抗剪能力 τ_{\max} , 当剪切位移达到 δ_3 时, 锚杆被拉断或剪断, 加锚层理抗剪能力将至残余强度 τ_c 。端部锚固时, 锚杆与岩石之间存在间隙, 层理发生剪切错动时锚杆无法及时作用, 层理错动 δ_1 达到极限抗剪强度时锚杆仍未发挥作用, 错动量达到 δ_2 时锚杆方发挥作用, 而此时层理抗剪能力已接近残余强度。当剪切位移达到 δ_3 时, 锚杆被拉断或剪断, 加锚层理抗剪能力降至残余强度 τ_c 。

由上述分析可知, 端锚锚杆与节理的力学特性匹配较差, 容易导致二者被各个击破, 对层理的锚固效果差。而全长锚杆与层理匹配良好, 可显著提高层理的抗剪能力^[19]。

4.2 锚固体应力-应变曲线

鲜学福^[26]对层状岩体的受力特征与破坏机制做了较为详尽的分析。文中通过对包含砂岩、泥岩、灰岩的复合层状岩体试件单轴压缩试验, 分析了层

状岩体试件的强度与破坏特征, 指出层状岩体的破坏是一个渐进过程, 即破坏首先发生在强度较低的岩层, 最后发生于强度最高的岩层, 如此, 层状岩体应有两个强度值: 初始强度值, 使岩体开始发生破坏; 最终强度值, 使层状岩体完全破坏。

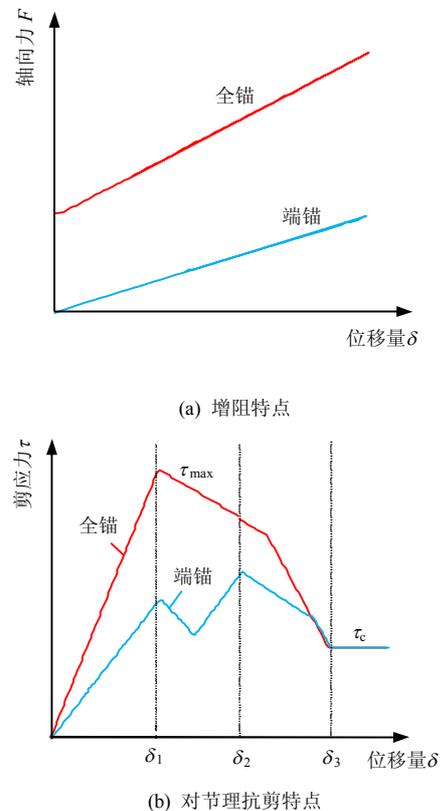


图9 锚杆锚固特点

Fig.9 Anchorage characteristics of anchor bolts

对于水平层状加锚岩体, 不仅要考虑各岩层强度参数的差异性, 还要考虑锚杆对岩层的锚固作用。层状加锚岩石模型见图 10(a), 为便于分析作如下假设: (1) A、B、C 岩石的弹性模量和泊松比为 $E_a > E_b > E_c$, $\mu_a < \mu_b < \mu_c$; (2) 各岩层间具有粘结力, 忽略层面间胶结物厚度; (3) 锚杆布置在 B 岩石中。取 A、B 岩石分析二者界面处应力状态, 见图 10(b)。B 岩石在加锚作用下强度参数提高, 假设其等效弹性模量大于 A 岩石, 即 $E_b > E_a$, $\mu_b < \mu_a$ 。在轴向荷载作用下 A 岩石的横向变形大于 B 岩石, 在交界面处对 B 岩石产生横向拉应力, 使 B 岩石由单向受压应力状态转变为三向压-拉应力状态。A 岩石则由单向受压应力状态转化为三向受压应力状态。当应变值达到 ε_1 时, A 岩石首先达到其极限抗压强度发生破坏, 应力-应变曲线出现首个峰值 A 点, 见图 11(a)。A 岩石破坏时横向变形急剧增加, 在 A、B 交界面处对 B 岩石产生较大拉应力, 随着荷载的持

续增加，应变达到 ε_2 时 B 岩石发生破坏，产生第 2 个应力峰值 B 点。对于全锚锚杆，锚杆与 B 岩石变形协同作用较好，二者同时达到极限强度，B 岩石破坏时并未完全脱粘，随着荷载的持续增加，加锚岩石会产生许多次裂纹，因此，应力-应变曲线残余强度段会有许多微小波动。而端锚锚杆与 B 岩石变形不同步，B 岩石破坏时锚杆尚未达到其极限强度，应变达到 ε_3 时端锚锚杆与 B 岩石脱粘，出现第 3 个应力峰值 C 点。

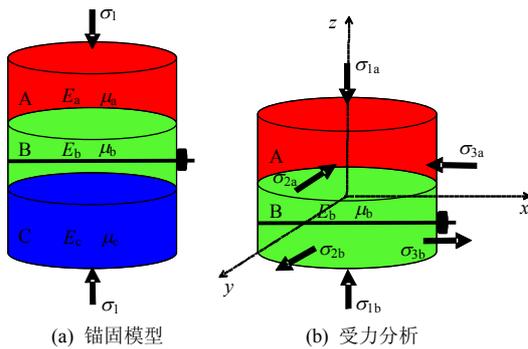
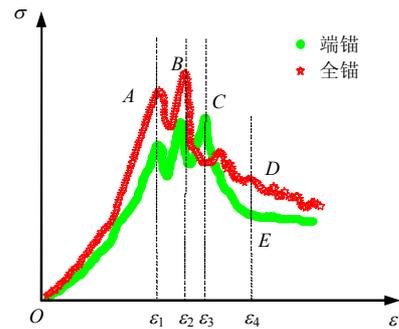


图 10 层状岩石锚固模型及受力分析
Fig.10 Anchorage model and stress analysis of layered rock

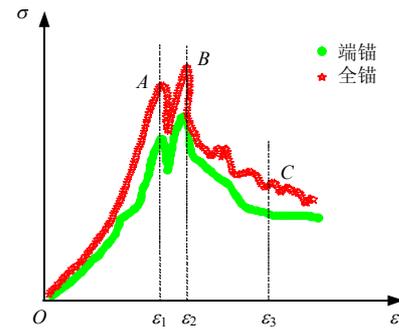
90°层理加锚岩体的破坏主要是沿 90°层理面的张拉破坏和沿锚固区与非锚固区交界处的剪切破坏，锚杆对岩体的加固机制主要为提高岩体力学参数和抗剪能力。端锚锚杆和全锚锚杆的剪应力分布情况类似，最大剪应力值均在层理面附近，其变形特性曲线也类似，见图 11(b)。加锚岩体在轴向荷载作用下沿 90°层理面发生横向变形，应变值达到 ε_1 时，试件发生张拉劈裂破坏，由于锚杆的抗剪作用，限制了其沿层理的进一步破坏，应变达到 ε_2 时，试件最终沿锚固区与非锚固区交界处发生剪切破坏。

4.3 破坏形式分析

由图 6 所示层状加锚岩体破坏形式，根据锚固方式的不同将破坏形式简化为剪切拉伸和剪切错断两种，试件在破坏的过程中伴随着众多的小裂纹。将加锚试件的破坏面定义为主裂纹，周边微小裂纹定义为次裂纹。端锚和全锚锚固方式下典型的破坏形式示意图见图 12。端部锚固下，主裂纹沿与锚杆轴向平行方向发展，贯穿整个加锚试件，试件两端分布少量的次裂纹。全长锚固时，锚固作用使试件两端形成加固区，导致加锚试件两端硬中间软，在轴向荷载作用下，加锚试件沿试件中部剪断。加载过程中，沿试件层理方向伴生许多次裂纹。不同锚固方式下的典型破坏面见图 13。



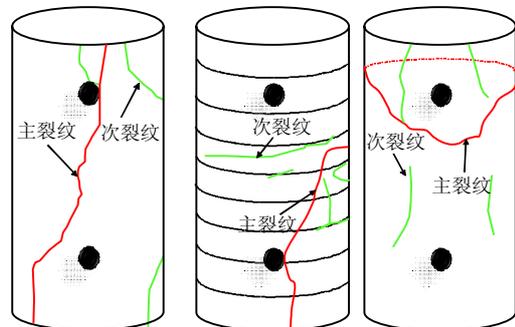
(a) 0°层理



(b) 90°层理

图 11 加锚岩石理论应力-应变曲线

Fig.11 Theoretical stress-strain curves of anchored rock



(a) 端锚

(b) 全锚

图 12 破坏形式示意图

Fig.12 Sketch of failure mode of anchored rock



(a) 端锚

(b) 全锚

图 13 不同锚固方式下破坏面

Fig.13 Surfaces characteristics of failure specimens with different anchoring modes

锚固体失效形式主要有以下4种^[24]: (1) 锚杆体断裂; (2) 锚杆体与灌浆体滑脱; (3) 岩土体与灌浆体界面滑脱; (4) 岩土体破坏。试验所得层状加锚试件锚杆失效模式主要表现为岩土体与灌浆界面滑脱, 如图14所示。岩石与灌浆界面的滑脱取决于该界面的粘结强度, 岩石强度小于粘结剂强度时粘结剂即沿岩石侧被拔出, 带出一层岩石碎屑, 在失效锚杆体附近形成一定厚度薄层。全锚与端锚所不同的是, 全长锚固下锚杆与岩石粘结长度更大, 粘结强度更高, 失效时带出更多、更厚的碎屑, 这意味着该失效模式下全长锚固岩石相比于端部锚固岩石可承受更大的荷载。

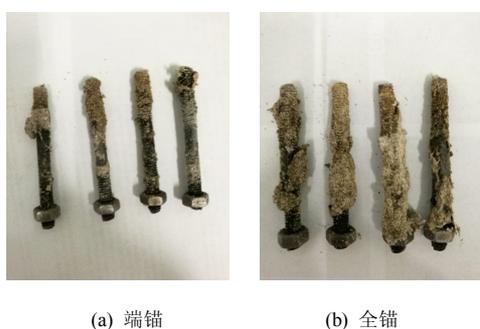


图14 锚固体破坏形式

Fig.14 Failure modes of different anchorage methods

5 讨论

(1) 岩石尤其是沉积岩在成岩过程中常形成较多的层理、裂隙等结构面, 这些结构面往往决定着岩石的变形强度特征, 一定倾角的层理甚至是岩石的破坏控制面, 因此, 在探讨层理对岩石力学性质的影响时层理本身的特性如层厚、胶结充填情况、倾角等是不容忽视的。本文通过铺设云母片的方式来模拟层理, 以分析锚杆对不同倾角层理试件的锚固效果。试验对层理进行了简化处理, 忽略层理的厚度并认为各层层理性质相同。

(2) 本试验在对试件进行锚杆安装时需要试件进行钻孔, 钻孔过程中锚杆对试件产生扰动, 使钻孔周围岩石产生损伤, 试验过程中虽对试件钻孔附近岩石形态进行了检查, 未见宏观损伤裂缝, 但钻孔过程中对试件产生的损伤程度及其对试验的影响有待商榷。工程上在进行现场锚杆施工时亦会对钻孔附近一定范围内围岩产生损伤, 如何对室内试验及现场施工过程中产生的这种损伤进行量化评估并对比分析二者的关系值得进一步地研究探讨。

(3) 本试验采用直径和高度为 50 mm×100 mm 的标准试件, 不考虑尺寸效应问题。有学者^[27]采用长、

宽、高为 75 mm×150 mm×150 mm 尺寸混凝土研究锚杆对节理岩体的锚固特性, 张伟等^[25]在其基础上采用长、宽、高为 150 mm×150 mm×150 mm 混凝土对该问题做了进一步地研究。也有学者采用更大(长、宽、高为 100 cm×60 cm×60 cm)^[28]或更小尺寸(直径和高度为 50 mm×100 mm、25 mm×50 mm)^[14]的试件对加锚岩石的力学性质进行研究。岩石力学性质的尺寸效应一直是岩石力学研究的热点问题, 而对加锚试件尺寸效应的研究尚未见报道。

6 结论

(1) 相同层理的加锚试件, 全长锚固下岩石的抗压强度提高幅度大于端部锚固; 同一锚固方式下, 90°层理加锚试件的单轴抗压强度提高幅度大于 0°层理加锚试件。

(2) 全锚锚杆的增阻速度更快, 阻力更高, 这意味着在进行围岩支护时全锚锚杆可以更快地提供支护阻力, 支护强度也高于端锚锚杆。端锚锚杆与层理岩体的力学特性匹配较差, 容易导致二者被各个击破, 对层理的锚固效果差。而全长锚杆与层理匹配良好, 可显著提高层理的抗剪能力。

(3) 对试验所得层状加锚岩体破坏形式进行分析, 根据锚固方式的不同可将破坏形式简化为剪切拉伸和剪切错断两种。

(4) 层状加锚试件锚杆失效模式主要表现为岩土体与灌浆界面滑脱, 全长锚固与端部锚固所不同的是, 全长锚固锚杆与岩石粘结长度更大, 粘结强度更高, 失效时带出更多、更厚的碎屑。

参考文献

- [1] 赵同彬, 尹延春, 谭云亮, 等. 锚杆界面力学试验及剪应力传递规律细观模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 220—224.
ZHAO Tong-bin, YIN Yan-chun, TAN Yun-liang, et al. Mechanical test of bolt interface and microscopic simulation of transfer law for shear stress[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2011, 28(2): 220—224.
- [2] CAI Y, ESAKI T, JIANG Y. An analytical model to predict axial load in grouted rock bolt for soft rock tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19 (6): 607—618.
- [3] WINDSOR C R. Rock reinforcement systems[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(6): 919—951.
- [4] CARRANZA-TORRES C. Analytical and numerical

- study of the mechanics of rockbolt reinforcement around tunnels in rock masses[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2009, 42(2): 175—228.
- [5] ZHANG B, LI S, XIA K, et al. Reinforcement of rock mass with cross-flaws using rock bolt[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 51: 346—353.
- [6] MA S, NEMCIK J, AZIZ N. An analytical model of fully grouted rock bolts subjected to tensile load[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 49: 519—526.
- [7] FREEMAN T J. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder experimental tunnel[J]. **Tunnels Tunnelling**, 1978, 10 (5): 37—40.
- [8] HAAS C J. Shear resistance of rock bolts[M]. Rolla: Univ. of Missouri, 1976.
- [9] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1975, 12(11): 347—351.
- [10] CAI Y, JIANG Y, DJAMALUDDIN I, et al. An analytical model considering interaction behavior of grouted rock bolts for convergence-confinement method in tunneling design[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 76 112—126.
- [11] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(8): 1013—1029.
- [12] 王平, 冯涛, 朱永建, 等. 加锚预制裂隙类岩体锚固机制试验研究及其数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37 (3): 793—801.
WANG Ping, FENG Tao, ZHU Yong-jian, et al. Experimental study and numerical simulation of anchoring mechanism of anchored rocklike material with prefabricated fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 793—801.
- [13] 汪小刚, 周纪军, 贾志欣, 等. 加锚节理面的抗剪试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 250—256.
WANG Xiao-gang, ZHOU Ji-jun, JIA Zhi-xin, et al. Shear tests on bolted joint planes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.2): 250—256.
- [14] 陈璐, 谭云亮, 臧传伟, 等. 加锚岩石力学性质及破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 413—422.
CHEN Lu, TAN Yun-liang, ZHANG Chuan-wei, et al. Test study of mechanical properties and failure characteristics of anchored rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 413—422.
- [15] 陈璐, 臧传伟, 于凤海, 等. 加锚岩石抗弯特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3451—3459.
CHEN Lu, ZHANG Chuan-wei, YU Feng-hai, et al. Experimental study of flexural behavior of anchored rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3451—3459.
- [16] 赵同彬, 谭云亮, 刘姗姗, 等. 加锚岩体流变特性及锚固控制机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1730—1734.
ZHAO Tong-bin, TAN Yun-liang, LIU Shan-shan, et al. Analysis of rheological properties and control mechanism of anchored rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1730—1734.
- [17] 刘泉声, 雷广峰, 彭星新. 深部裂隙岩体锚固机制研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 312—332.
LIU Quan-sheng, LEI Guang-feng, PENG Xing-xin. Advance and review on the anchoring mechanism in deep fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(2): 312—332.
- [18] 张宁, 李术才, 吕爱钟, 等. 拉伸条件下锚杆对含表面裂隙类岩石试样加固效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 769—776.
ZHANG Ning, LI Shu-cai, LÜ Ai-zhong, et al. Experimental study on reinforced effect of bolts on 3D surface fractured rock under uniaxial tension[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 769—776.
- [19] 陆士良, 汤雷, 杨新安. 锚杆锚固力与锚固技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
LU Shi-liang, TANG Lei, YANG Xin-an. Anchor and anchor technology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [20] 朱浮声, 郑雨天. 全长粘结式锚杆的加固作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 333—337.
ZHU Fu-sheng, ZHENG Yu-tian. Support action analysis of tensioned and grouted bolts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 15(4): 333—337.
- [21] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342—345.
HOU Chao-jiong, GOU Pan-feng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 342—345.