

文章编号: 1005-0523(2026)01-0001-11



加锚层状岩石三轴压缩力学性能研究

万徐梓涵, 刘永胜, 吴勋杰, 张志星, 何忠懿, 杨政, 李青强

(华东交通大学土木与建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要:层状岩石是地下工程中一种常见的沉积岩类型,普遍采用锚杆支护技术来对层状围岩进行加固。为了研究其在复杂工程应力环境下的力学响应,选用云南省红砂岩、云石胶、螺杆及环氧树脂为原材料并通过切割粘接制作试验试样,进行了三轴压缩试验,探究不同界面层倾角的角度和不同围压对加锚与无锚层状岩石的力学性能影响。研究表明:试样的破坏经历了孔隙压密、线弹性、裂纹稳定扩展、裂纹非稳定扩展及峰后破坏等阶段,其强度、变形参数及裂纹扩展形态均受到围压显著影响;围压增大可延长弹性变形阶段,提高残余强度和延性。不同倾角试件在围压作用下的破坏形态呈现出劈裂破坏、拉剪破坏及纯剪切破坏3种破坏模式;围压对加锚层状岩石及层状岩石的力学性能具有全面的提升作用,不仅增强了岩石的抗压强度和抗剪切能力,还改善了岩石的峰后延性。研究结果为深入理解岩石力学特性及工程应用提供了有力支撑。

关键词:加锚层状岩石;三轴压缩;界面层倾角;围岩压力;峰值强度

中图分类号:TU452

文献标志码:A

本文引用格式:万徐梓涵,刘永胜,吴勋杰,等.加锚层状岩石三轴压缩力学性能研究[J].华东交通大学学报,2026,43(1):1-11.

Study on Triaxial Compression Mechanical Properties of Anchored Layered Rock

Wan Xuzihan, Liu Yongsheng, Wu Xunjie, Zhang Zhixing, He Zhongyi, Yang Zheng, Li Qingqiang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Bedded rock is a common sedimentary rock type in underground engineering environment, and anchor support technology is generally used to strengthen bedded rock. In order to study its mechanical response under complex engineering stress environment, Yunnan red sandstone, marble glue, screw and epoxy resin were selected as raw materials and the test samples were made by cutting and bonding. Triaxial compression test was used to investigate the effects of different interface dip angles and confining pressures on the mechanical properties of anchored and unanchored stratified rocks. The results showed that the failure of the sample experienced pore compaction, linear elasticity, stable crack growth, unstable crack growth and post-peak failure, and its strength, deformation parameters and crack growth pattern were significantly affected by confining pressure. The increase of confining pressure can prolong the elastic deformation stage and improve the residual strength and ductility. The failure modes of specimens with different angles under confining pressure are split failure, tensile shear failure and pure shear failure. Confining pressure has a comprehensive enhancement effect on the mechanical properties of anchored and stratified rocks, which not only enhances the compressive strength and shear resis-

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51664014)

tance of rocks, but also improves the post-peak ductility of rocks. This study provides strong support for further understanding of rock mechanical properties and engineering applications.

Key words: anchored layered rock; triaxial compression; interface layer dip angle; surrounding rock pressure; peak strength

Citation format: WAN X Z H, LIU Y S, WU X J, et al. Study on triaxial compression mechanical properties of anchored layered rock[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 1-11.

在深部地下工程中,层状复合岩石普遍存在。层状岩石是在数百万年的复杂地质作用下形成的,其力学性质为各项异性;同时在深部地下环境中还受高温地热、高地应力、强腐蚀等复杂条件影响^[1-2]。岩土工程的失稳破坏通常是由内部裂隙扩展贯通引发的。为防止岩体变形失稳,在岩体加固中使用锚杆及锚索^[3-5]。

国内外学者针对层状岩石的力学性能已开展了大量的试验研究。梁正召等^[6]使用单轴压缩实验和数值模拟相结合的方法,研究了两种不同性质的岩石制成的层理倾角岩石试件,并获得了不同岩层倾角下横观各向同性岩体的不同破裂模式和破坏准则。黄春等^[7]通过对层理倾角灰岩进行单轴压缩试验,发现随着层理倾角的增加,岩石的弹性模量、峰值强度及残余强度均呈现先降后升的趋势。王洪建等^[8]对层状页岩岩石力学特性及其脆性评价进行了研究。刘永胜等^[9]采集岩石制作层状复合层理岩石,进行三轴压缩实验,通过改变实验围压条件来研究试件在不同围压、多种界面层倾角和界面层间距条件下的层状复合岩石的力学性能演化规律。黄殷婷等^[10]结合高精度三维激光扫描技术,对不同倾角层理灰岩岩样进行巴西劈裂试验,来探讨层理倾角对岩体抗拉力学特性与宏-细观破裂特征的影响。Liyanage等^[11]通过设计不同倾角方向的垫层砂岩进行单轴压缩试验加上声发射手段研究其力学行为和能量释放特性。邓华锋等^[12]对不同倾角的普通砂岩进行单轴试验,发现弹性模量、变形模量和抗压强度随着层理倾角的变化而有规律地变化。Jaeger^[13]使用完整岩块及层状倾角岩石,扩展了单弱面理论的发展。杨春和等^[14]经过一系列的岩石试验研究,并根据 Cosserat 介质理论,建立了新的本构模型,为盐岩体分析提供了一种新思路。以上研究共同展示了层理倾角对岩石力学特性的

重要影响,并通过多样的实验方法和理论分析,深化了对层理岩石力学行为的理解,为相关领域的科学研究和实际应用提供了有力支持。

曾泽民^[15]通过制作无锚与加锚类岩体试样,通过单轴和声发射试验,从宏观受力和细观裂纹扩展方面分析单轴压缩条件下锚杆材质、锚杆直径对岩体力学特性的影响。霍宏斌等^[16]通过锚杆抗拉拔试验研究了锚杆在岩体结构面的抗拔性能及变形的影响。王斌等^[17]根据实际工程中锚杆支护下脆性围岩的浅表局部破坏特点,通过室内相似模型试验研究单轴压缩条件下锚杆直径对完整脆性岩体的破坏规律。武东阳等^[18]通过模型试验发现锚杆对裂隙岩体具有锚固效应,能提高岩体强度,限制裂纹扩展且锚固角 45° 时效果最明显,该研究为岩体工程稳定性分析提供了参考。腾俊洋等^[19]针对含孔洞加锚岩石的力学特性研究发现,支护结构能显著提升岩石强度,其中锚杆效果显著,且对 90° 层理试件提升效果更佳。以上研究表明锚杆在岩体工程中具有显著锚固效应,能提升岩体强度和稳定性,通过不同试验方法分析其影响因素,为岩体工程稳定性分析提供重要参考。

当前层状岩石的研究主要集中在各向异性力学性质、破坏模式以及强度变化规律,这些研究有助于深入理解层状岩石的破坏机制。但在目前的研究中,存在选取的岩样种类较少、界面层介质的复杂性未充分考虑、对应力应变分析不够全面等问题。

本文采用“ZTR-2000 微机控制岩石三轴测试系统”开展了常规三轴压缩试验,分析了不同围压下加锚层状岩石试件的力学行为和破坏规律,发现锚固后的层状岩石其破坏形态发生变化,且锚杆的锚固效果随层理面倾角的不同而有所差异。研究加锚层状岩石在不同层倾角和围压下的三轴压缩

力学性能及其破坏形态变化情况,可为类似工程提供指导。

1 试件制作及试验方案

1.1 试件材料

本文采用的原材料为云南省红砂岩,岩石整体性好,颗粒细密且成分稳定,岩石表面未见宏观裂纹。层理面所用材料为云石胶,其固化速度相对较快,可以在较短的时间内达到使用强度。选择直径为3 mm、长度为50 mm、强度为423 MPa的螺杆作为锚杆的模拟材料,同时用螺帽对锚杆进行加固。对于锚杆打入时所需的注浆胶结材料,本文选用强度优良且粘结性好的环氧树脂粘接剂以加强锚杆周端强度,确保试件粘接牢固。原材料见图1。

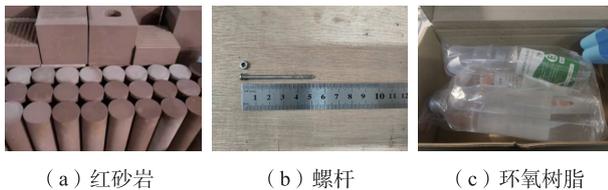


图1 试验原材料
Fig. 1 Test raw materials

1.2 试件制备

层理岩石制作参考文献[20]的方法,对整块红砂岩材料进行取芯,此时所取得为单一无损岩石试件,将其对称切割,然后粘接,具体过程如下。

1) 编号标记。根据要切割的角度对岩样进行编号,并在岩样上标记出后续需要切割的 0° 、 30° 、 60° 的层理线。

2) 试件切割。利用切割机对准上一步时标记好的 0° 、 30° 、 60° 层理线切割出对称岩石,然后利用磨石机将试件端面打磨至高100 mm、直径50 mm,使其成为高径比为2:1的标准岩石试件。

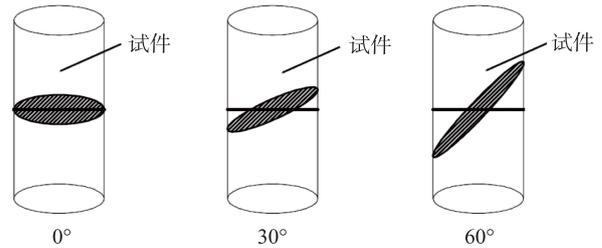
3) 组合粘贴。首先清洁需要粘贴的岩样端面,然后均匀涂抹按比例混合的云石胶。将试件放置在角钢上,用力压紧,直至云石胶固化并达到所需强度。

4) 岩样养护。粘接好的岩样放于阴凉干燥处养护一周左右,确保粘接效果。

5) 试件分组。将养护好的试件分为两组:加锚组与无锚组。取出加锚组试件,将其需要钻孔的位置标记好,用打孔机依次钻出3 mm的成孔,对于三

轴试验中的加锚试件,需在3 mm成孔处再钻一个直径为5 mm,深度为2 mm的沉孔。

6) 试件编号。完成所有需要制备的试件(图2),将其进行编号,编号为:Y/W-5- 0° ,其中Y表示锚固试件,W为无锚固试件,5表示施加的围压为5 MPa, 0° 表示锚杆与层理面呈 0° 的夹角,类似符号以此类推。



(a) 加锚试件设计示意图



(b) 成型试样实物图

图2 试样示意图及实物图

Fig. 2 Schematic diagram and physical diagram of the sample

1.3 试验方案

三轴试验是研究岩石力学性能的重要手段,本文采用ZTR-2000三轴伺服模拟系统,最大竖向加载为2 000 kN,最大围压为40 MPa,如图3所示。ZTR-2000伺服仪器可通过控制加载速率、加载方式和加载顺序,模拟不同的地质条件。其中加锚试件采用3 mm螺栓作为锚杆进行锚固,并施加0.5 kN的预紧力进行锚固。设计3种不同围压5、10、15 MPa。常规三轴试验以不同围压、不同锚固条件以及不同层理倾角为变量,进行岩石的力学性能研究。试验方案如表1所示。

1.4 试验步骤

试验采用ZTR-2000微机控制岩石三轴测试系统进行,加载控制方式为变形控制以便观测到峰后



图3 ZTR-2000 微机控制岩石三轴测试系统
Fig. 3 ZTR-2000 microcomputer control rock triaxial test system

表1 三轴试验方案
Tab.1 Triaxial test scheme

| 试件编号 | 围压/MPa | 倾角/(°) | 数量/个 |
|----------|--------|--------|------|
| W-5-0° | 5 | 0 | 3 |
| W-5-30° | 5 | 30 | 3 |
| W-5-60° | 5 | 60 | 3 |
| W-10-0° | 10 | 0 | 3 |
| W-10-30° | 10 | 30 | 3 |
| W-10-60° | 10 | 60 | 3 |
| W-15-0° | 15 | 0 | 3 |
| W-15-30° | 15 | 30 | 3 |
| W-15-60° | 15 | 60 | 3 |
| Y-5-0° | 5 | 0 | 3 |
| Y-5-30° | 5 | 30 | 3 |
| Y-5-60° | 5 | 60 | 3 |
| Y-10-0° | 10 | 0 | 3 |
| Y-10-30° | 10 | 30 | 3 |
| Y-10-60° | 10 | 60 | 3 |
| Y-15-0° | 15 | 0 | 3 |
| Y-15-30° | 15 | 30 | 3 |
| Y-15-60° | 15 | 60 | 3 |

曲线,加载速率为0.06 mm/min。与单轴相比,需对仪器注入液压油加围压,所以岩样需完全包裹密封。加载时先将围压施加到定值,待围压稳定后开始施加轴压,试验具体步骤如下:

1) 取出试件并涂抹凡士林削减套箍作用,固定于试验台中心,套热缩管并用热风机吹紧,两端缠绕绝缘胶布密封。

2) 给试件装上轴向和环向应变仪,并固定在试验台上。将试件放入加载仓,连接数据传输线至电脑,调整应变仪量程。

3) 关闭仪器仓门。调整阀门至注油状态,注入

液压油至满后将阀门调至加载状态。围压加载完成后,施加轴压,采用移动转换方式进行预压。

4) 预压结束后,以0.06 mm/min的速度进行变形控制加载,目标为3 mm。

5) 加载结束后,保存数据,先卸载轴压,再卸载围压,确保压力卸完。调阀门至排油状态,排油后降仓门,取试件。

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线

各试件的应力-应变曲线如图4和图5所示,其中图4为无锚试件应力-应变曲线图,图5为加锚试件的应力-应变曲线图。从图4和图5可以看出,常规三轴试验中岩石试件的破坏大致可以分为5个阶段。

1) 孔隙压密阶段:由于岩石中存在天然形成的孔隙和裂隙,试件加载时,会先挤压孔隙与裂隙。在此阶段,试件体应变增加,体积缩小,岩石内部裂隙被压密至闭合,应力-应变曲线为上凹形。

2) 线弹性阶段:此阶段体应变继续增加,试件应力-应变曲线近似为线弹性,且随着围压的增大,该阶段会相应的延长。

3) 裂纹稳定扩展阶段:此阶段试件达到其屈服应力值,屈服应力值约为峰值应力的65%~75%。在屈服应力以前试件的体应变都在增大,试件体积不断缩小,过了屈服点之后试件的横向变形迅速增加,应变开始减小,试件体积增大,到峰值应力时体应变趋于零,试件又恢复原来的体积。这个阶段岩石内部开始产生微裂隙,裂隙随荷载增加继续扩展,最终新老裂缝贯通直至岩石破坏。

4) 裂纹非稳定扩展阶段:在裂隙稳定扩展阶段之后,岩石内部的微裂隙开始加速扩展并相互贯通,形成宏观破裂面。这个过程中岩石的承载能力逐渐降低,直至达到峰值强度。

5) 峰后破坏阶段:岩石试件达到峰值强度后继续加载,虽然承载能力有所降低,但仍具有一定的残余强度。此时,岩石内部形成了贯穿的宏观断裂面,断裂面之间依靠摩擦力来承担外部荷载。

2.2 强度特征分析

试验所得试件峰值强度、峰值轴向应变、弹性模量结果见表2和表3。

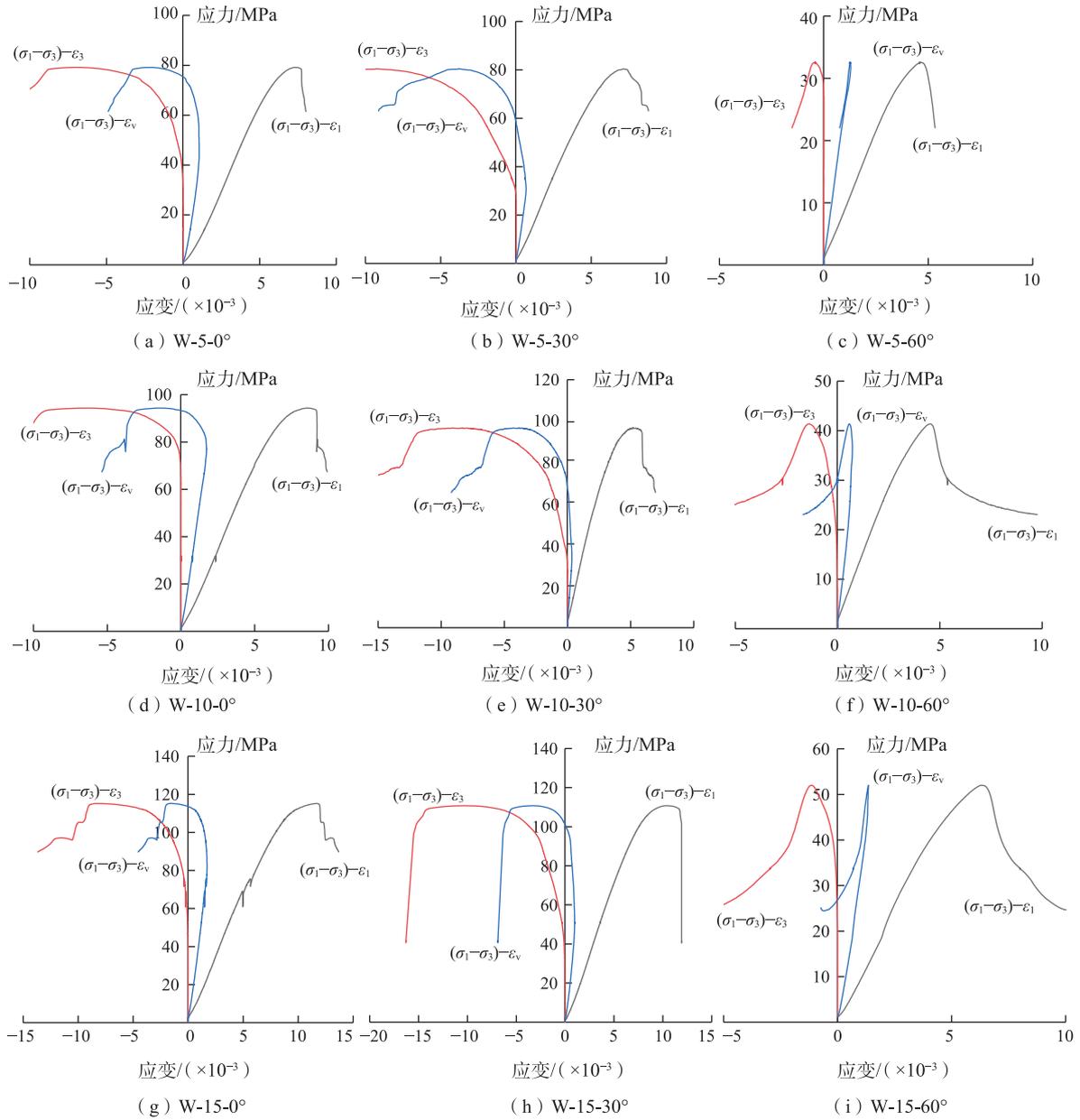


图4 无锚层状岩石全应力-应变曲线

Fig. 4 Full stress-strain curve of unanchored layered rock

从表2可以看出,试件W-15-0°的峰值强度为115.0 MPa,为所有试件强度最高,其次是W-15-30°,其强度为110.7 MPa。而试件W-5-60°的峰值强度为32.6 MPa,为所有试件中最低,其次是W-10-60°,其强度为41.4 MPa。

在相同围压下,试件的峰值强度随倾角的增加先增加后减小。如围压为5 MPa时,0°、30°、60°倾角试件峰值强度分别为89.2、90.7、32.6 MPa,其中60°倾角试件峰值强度最小,且相比于0°、30°下降幅度分别为63.4%、64.1%。围压为10 MPa时,其峰

值强度分别为104.3、105.3、41.4 MPa,其中60°试件相比于0°、30°试件,下降幅度分别为60.3%、60.7%。当围压为15 MPa时,其峰值强度分别为115.0、110.7、44.8 MPa,其中60°试件相较于0°、30°试件,下降幅度分别为61.0%、59.5%。由此可以看出,当围压分别为5 MPa和10 MPa时,下降幅度均随着角度的增大而增大;当围压为15 MPa时,下降幅度随着角度的增大而减小。

从表2和表3可以看出,无锚试件以及加锚试件的峰值强度随围压的增大而增大,随倾角的增大而减

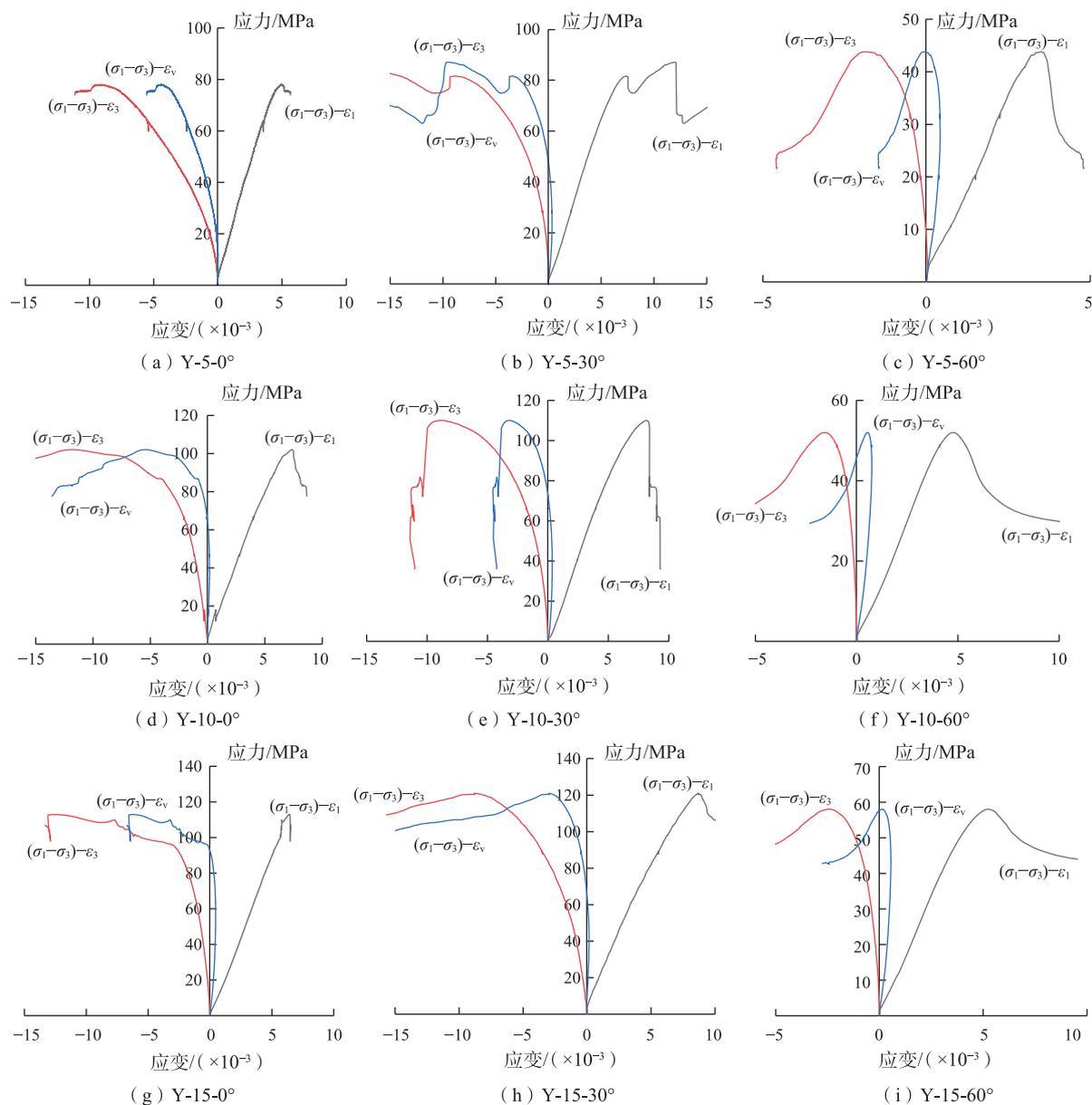


图5 加锚层状岩石全应力-应变曲线

Fig. 5 Full stress-strain curve of anchored layered rock

小。其中试样 Y-15-30° 峰值强度为 121.0 MPa, 为所有试件中最高。试样 W-5-60° 峰值强度为 32.6 MPa, 为所有试件中最低。同时加锚试件较于未加锚试件峰值强度均有很大的提升, 对于 30°、60° 试件提升幅度明显, 而对于 0° 试件提升效果较差。说明锚杆的作用针对与其相交的倾角层理面效果更好, 此时锚杆能够有效地抑制试件沿层理面发生滑动剪切, 从而提高试件的抗剪性能。

试件峰值强度与倾角关系曲线见图 6。由图可以看出随着围压的提高, 0°、30° 和 60° 试件的峰值

强度均呈现出逐渐增加的趋势。0°、30° 和 60° 的加锚试件的峰值强度随围压提高到 15 MPa 时, 分别增加了 94.49%、129.60% 和 101.39%。

数据表明, 围压的约束作用对试件峰值强度提高有明显的影 响, 且对于 30° 和 60° 的岩体效果尤其显著。30°、60° 加锚层状岩石试件相比层状岩石试件, 峰值强度整体上有所提升, 而 0° 加锚试件却提升不明显, 说明加锚试件强度的提升很大程度上是因为锚杆约束了试件沿层理面的剪切滑动。在相同围压下, 0° 试件强度最大, 60° 试件峰值强度最

表2 无锚层状红砂岩试件力学参数表

Tab.2 Mechanical parameters of layered red sandstone without anchor specimens

| 试件编号 | 峰值强度/MPa | 轴向峰值应变/ ($\times 10^{-3}$) | 弹性模量/GPa |
|----------|----------|---------------------------------|----------|
| W-0-0° | 62.1 | 10.6 | 7.4 |
| W-5-0° | 89.2 | 8.0 | 14.0 |
| W-10-0° | 104.3 | 9.9 | 14.7 |
| W-15-0° | 115.0 | 13.7 | 13.5 |
| W-0-30° | 36.3 | 10.0 | 3.5 |
| W-5-30° | 90.7 | 8.8 | 14.9 |
| W-10-30° | 105.3 | 7.0 | 24.9 |
| W-15-30° | 110.7 | 12.5 | 14.6 |
| W-0-60° | 18.1 | 7.3 | 3.0 |
| W-5-60° | 32.6 | 5.3 | 5.11 |
| W-10-60° | 41.4 | 9.8 | 9.2 |
| W-15-60° | 44.8 | 11.1 | 10.9 |

表3 加锚层状红砂岩试件力学参数表

Tab.3 Mechanical parameters of anchored bedded red sandstone specimens

| 试件编号 | 峰值强度/MPa | 轴向峰值应变/ ($\times 10^{-3}$) | 弹性模量/GPa |
|----------|----------|---------------------------------|----------|
| Y-0-0° | 58.1 | 9.9 | 7.5 |
| Y-5-0° | 78.0 | 3.8 | 11.4 |
| Y-10-0° | 102.0 | 4.6 | 15.6 |
| Y-15-0° | 113.0 | 6.4 | 15.5 |
| Y-0-30° | 52.7 | 8.9 | 7.0 |
| Y-5-30° | 87.1 | 11.9 | 11.0 |
| Y-10-30° | 110.0 | 8.0 | 16.3 |
| Y-15-30° | 121.0 | 4.6 | 14.6 |
| Y-0-60° | 28.8 | 8.1 | 4.3 |
| Y-5-60° | 42.0 | 4.0 | 8.1 |
| Y-10-60° | 52.0 | 2.4 | 19.6 |
| Y-15-60° | 58.0 | 4.0 | 13.4 |

小。试件峰值强度随倾角增大而减小,峰值应变随倾角的增大而减小;锚杆能够有效的约束试件的变形,从而提升试件的抗压强度。

另一方面,试件峰值强度随着围压的增加而提升,锚杆的约束作用进一步增强了这一效果,因为锚杆能够抵抗层状岩石的剪切滑移。其中30°试件强度提升最为显著,是因为30°试件锚杆与层理面夹角更小、角度更缓使得锚杆的锚固效果更佳。对于0°倾角的试件,由于其倾角为0°限制了锚杆的锚固效果,所以锚杆的影响并不明显,另外0°试件

锚杆的打入甚至可能对试件有一定的削弱。

2.3 变形参数分析

岩石的变形参数包含弹性模量、变形模量、峰值应变、泊松比等。其中变形模量一般取岩石峰值强度与峰值应变的50%,即为割线模量 E_{50} 。

表4和表5分别为无锚和加锚试验样品的试件参数表。由表4和表5可知,相同围压下,无锚试件与加锚试件岩样的弹性模量 E 与变形模量 E_{50} 均在0~30°时呈增加的趋势、30°~60°时呈减小的趋势。相同围压下,加锚试件与无锚试件岩样的峰值形变随倾角的增加整体上有增大的趋势,因为锚固的加固作用改善了岩石的变形性能,增加了岩石的延性;同一倾角下,随着围压的增加部分岩样的弹性模量也呈增加的趋势,但部分岩样没有规律,呈现明显的各项异性。试件W-10-30°弹性模量与变形模量分别为24.94 GPa与18.54 GPa,为所有试件中最大;试件W-5-60°的弹性模量为5.11 GPa,为所有试件中最小;试件Y-5-30°的变形模量为6.10 GPa,为所有试件中最小。可以看出岩样虽呈现出明显的各项异性,但围压与锚杆的作用对其变形性能有一定的改善。峰值轴向应变与环向应变最小的数值分别为0.004 8、0.000 4,对应的试样为Y-10-60°、W-5-60°,可以发现倾角为60°时试件的延性最差。峰值轴向应变与环向应变最大的数值分别为0.014 5、0.024 5,两者试样均为Y-5-30°,可见倾角为30°时,对试件进行锚固,此时试件延性最好,试件对围压表现为各向异性,对倾角和锚固作用表现较好。

2.4 裂纹扩展及破坏形态

无锚试件的破坏情况与裂纹开展情况如图7所示。在无锚试件中,同一围压下,裂纹的发展情况受倾角控制,0°倾角试件,裂纹由上至下发展直至贯通,呈现劈裂破坏的模式;30°倾角试件,裂纹由上表面向下延伸呈现劈裂破坏模式,但裂纹发展至30°层理面处,裂缝延伸趋势改为沿层理面发展,以层理面为界,上下岩块发生剪切滑移,其整体破坏模式为劈裂加剪切的拉剪破坏;当倾角增加到60°时,可以发现,试件沿着60°层理面发生纯剪切破坏,上下两个岩块发生明显的错层滑移,这主要是因为倾角较大的情况下,外力在层理面上产生的剪切应力会相对集中。随着倾角的增加,剪切应力会逐渐增大,当达到层理面的抗剪强度时,就会发生剪切破坏。

对于同一倾角不同围压下的试件,以0°试件为

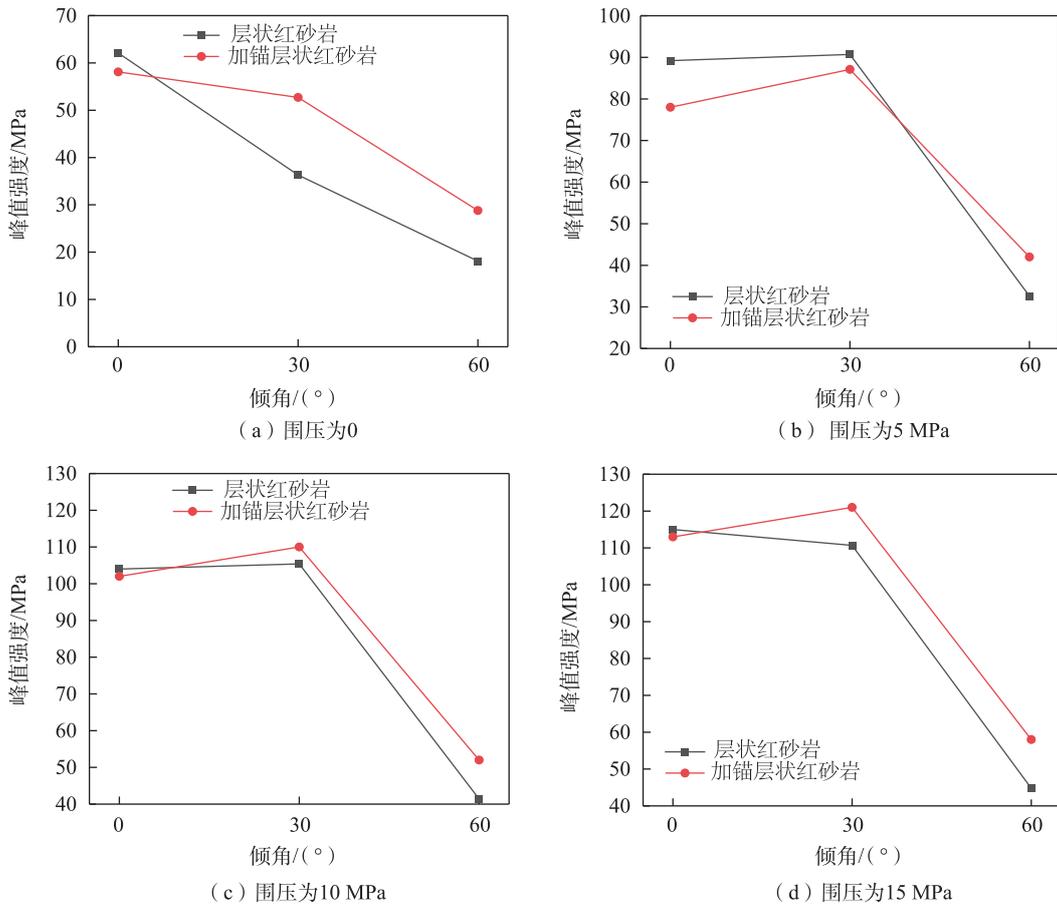


图6 试件峰值强度与倾角关系曲线

Fig. 6 Relation curve between peak strength and dip angle of specimen

表4 无锚层状岩石试验变形参数统计表

Tab.4 Statistical table of deformation parameters for anchorless layered rock test

| 试件编号 | 弹性模量/GPa | 变形模量 E_{50} /GPa | 轴向应变峰值/ $(\times 10^{-3})$ | 环向应变峰值/ $(\times 10^{-3})$ | 泊松比 |
|----------|----------|--------------------|----------------------------|----------------------------|------|
| W-5-0° | 14.00 | 10.88 | 0.007 4 | 0.006 6 | 0.33 |
| W-5-30° | 14.92 | 11.25 | 0.006 1 | 0.007 8 | 0.52 |
| W-5-60° | 5.11 | 8.69 | 0.004 6 | 0.000 4 | 0.07 |
| W-10-0° | 14.73 | 10.79 | 0.008 6 | 0.006 3 | 0.28 |
| W-10-30° | 24.94 | 18.54 | 0.005 4 | 0.009 1 | 0.44 |
| W-10-60° | 9.17 | 11.02 | 0.004 5 | 0.001 4 | 0.11 |
| W-15-0° | 13.54 | 9.81 | 0.011 8 | 0.008 4 | 0.41 |
| W-15-30° | 14.62 | 10.79 | 0.010 3 | 0.009 8 | 0.59 |
| W-15-60° | 10.87 | 8.27 | 0.006 3 | 0.001 1 | 0.12 |

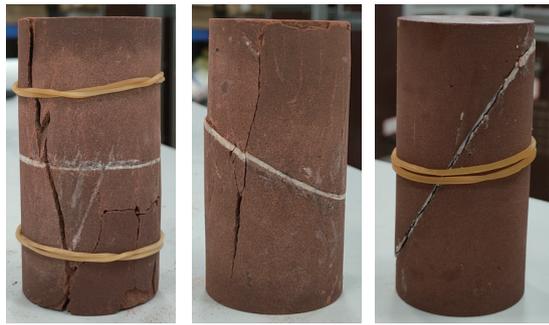
例,围压在5、10、15 MPa情况下破坏模式相同均为劈裂破坏,但随着围压对试件的约束作用增强,使得试件的破坏程度明显降低,因为围压增强了岩石的整体性,抑制了裂纹的扩展,可能改变了破坏机制,并提高了岩石的强度和稳定性。对于30°试件,围压

表5 加锚层状岩石试验变形参数统计表

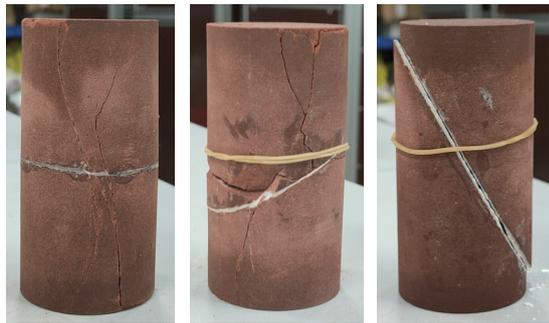
Tab.5 Statistical table of deformation parameters of anchorage bedded rock in conventional triaxial test

| 试件编号 | 弹性模量/GPa | 变形模量 E_{50} /GPa | 轴向应变峰值/ $(\times 10^{-3})$ | 环向应变峰值/ $(\times 10^{-3})$ | 泊松比 |
|----------|----------|--------------------|----------------------------|----------------------------|------|
| Y-5-0° | 11.36 | 15.75 | 0.004 9 | 0.009 1 | 0.16 |
| Y-5-30° | 10.99 | 6.10 | 0.014 5 | 0.024 5 | 0.41 |
| Y-5-60° | 8.14 | 6.89 | 0.004 8 | 0.000 4 | 0.32 |
| Y-10-0° | 15.61 | 13.9 | 0.008 7 | 0.011 7 | 0.33 |
| Y-10-30° | 16.26 | 13.55 | 0.009 3 | 0.008 8 | 0.61 |
| Y-10-60° | 19.57 | 14.97 | 0.010 4 | 0.003 5 | 0.03 |
| Y-15-0° | 15.50 | 14.66 | 0.007 7 | 0.015 2 | 0.43 |
| Y-15-30° | 14.56 | 13.87 | 0.008 7 | 0.008 8 | 0.51 |
| Y-15-60° | 13.43 | 11.07 | 0.005 2 | 0.002 3 | 0.07 |

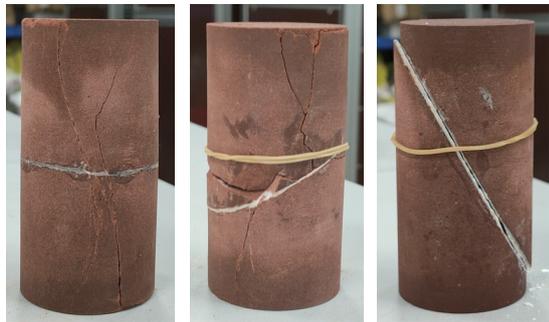
的提高明显减轻了试件剪切破坏的倾向,使试件有从拉剪破坏转向劈裂破坏的趋势,可见围压的作用可以减缓试验中试件的滑移剪切。对于60°试件,围压虽未改变其剪切破坏模式,但显著提高了其峰值强度,减少了其破坏程度。



W-5-0° W-5-30° W-5-60°
 (a) 围压为5 MPa 时不同倾角破坏示意图



W-10-0° W-10-30° W-10-60°
 (b) 围压为 10 MPa 时不同倾角破坏示意图



W-15-0° W-15-30° W-15-60°
 (c) 围压为 15 MPa 时不同倾角破坏示意图

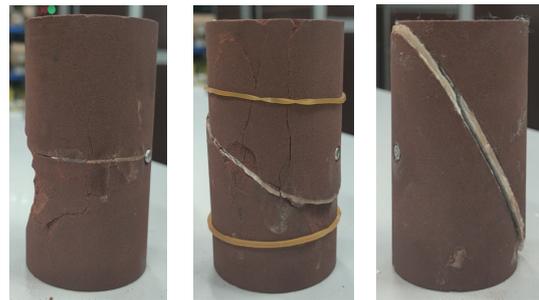
图7 无锚试件加载破坏示意图

Fig. 7 Loading failure diagram of anchor free specimen

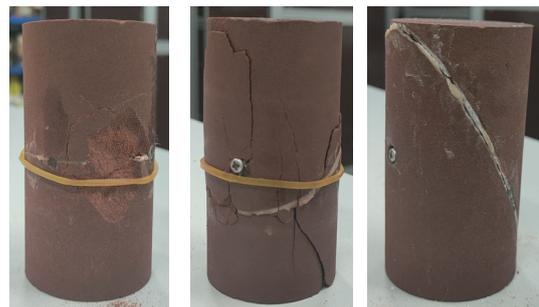
在加锚试件中,锚杆的加入对裂缝发展形态的影响如图8所示。从图8中可以看出,锚杆加入后,裂缝均经过锚杆影响区域,这表明锚杆显著改变了试件内部的传力路径。在0°试件中,试件为劈裂破坏,5 MPa时,0°试件裂缝由试件顶部向下发展延伸,裂缝经过锚杆处贯通整个试件。当围压提高至10、15 MPa时,试件的开裂主要集中在试件的腰部及锚固区域处,这是因为岩石是各项异性材料,锚杆的加入和0°层理面处均使得这一区域为试件的薄弱处,裂缝会优先出现在这一区域。围压



Y-5-0° Y-5-30° Y-5-60°
 (a) 围压为5 MPa 时不同倾角破坏示意图



Y-10-0° Y-10-30° Y-10-60°
 (b) 围压为 10 MPa 时不同倾角破坏示意图



Y-15-0° Y-15-30° Y-15-60°
 (c) 围压为 15 MPa 时不同倾角破坏示意图

图8 加锚试件加载破坏示意图

Fig. 8 Loading failure diagram of anchor specimen

作用下,30°层状岩石试件的部分剪切裂缝会转为竖向的劈裂裂缝,且围压越高这种现象越明显。由图8可以看出30°试件在10、15 MPa的竖向裂缝比5 MPa多。围压的提高不仅使得试件承载力提高,还会改变试件内部的传力路径,同时相较于单轴压缩试验,三轴试验中裂纹更集中于锚杆处,说明锚杆在有围压条件下其锚固效果要优于无侧限条件。对于60°层状岩石试件时,承载力得到很大提升,但破坏模式仍为沿60°滑动剪切破坏,破坏时层理面上下岩石较为完整,层理面完全分开且锚杆被剪断,这是因为在60°倾角下,外力在层理面上产生的剪切应力相对集中,这种集中的剪切应力会导

致层理面成为试件破坏的主要路径。

3 结论

本文通过对无锚层状红砂岩以及加锚层状红砂岩试件进行三轴试验,并对试验结果从强度特征、变形特征以及破坏特征进行分析,主要结论如下。

1) 围压能够显著提升加锚层状岩石以及无锚层状岩石抗压强度、抗剪切能力、峰后延性等力学性能。相同围压下倾角越大,试件的峰值强度、峰值应变越低,且 60° 试件在应变很小的情况下便会破坏,说明在高围压下, 60° 试件容易发生小变形失稳破坏。

2) 对于 30° 和 60° 倾角的试件,锚杆的引入显著增强了剪切破坏的应力集中效应,进而使试件的峰值强度和延性特性得到提升,且由于围压的存在,这种集中性会显著增强。然而,对于 0° 倾角的试件,锚杆的增强效果则相对较低,其对试件力学性能的增强效果相对减弱。

3) 层状岩石试件倾角的增加使得试件的破坏模式发生根本改变, 0° 、 30° 、 60° 分别对应3种破坏模式:劈裂破坏、拉剪破坏、纯剪切破坏。抗压强度也随着破坏模式的改变发生着显著变化。围压能够约束剪切破坏,从而提高试件的抗剪能力;锚杆同样能够提升试件抗剪能力。

4) 本文在三轴试验中,仅针对不同倾角与不同初始围压进行研究,控制参数较少。今后研究可通过改变加载围压的速率从而更深层次的探讨加锚岩石的力学性能。

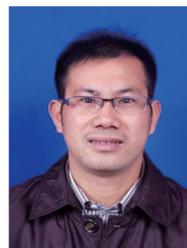
参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究与探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
XIE H P, GAO F, JU Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 阮承志,石海斌,于万友,等.盾构上穿既有隧道影响及加固分析[J].华东交通大学学报,2022,39(3):54-60.
RUAN C Z, SHI H B, YU W Y, et al. Analysis of the influence and reinforcement of shield passing through existing tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 54-60.
- [3] 何满潮,李晨,宫伟力,等.NPR锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1513-1529.
HE M C, LI C, GONG W L, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1513-1529.
- [4] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [5] 李术才,陈卫忠,朱维申,等.加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1661-1666.
LI S C, CHEN W Z, ZHU W S, et al. Catastrophe model of crack propagating in bolt-supported jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1661-1666.
- [6] 梁正召,唐春安,李厚祥,等.单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J].岩土力学,2005,26(1):57-62.
LIANG Z Z, TANG C A, LI H X, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 57-62.
- [7] 黄春,左双英,王嵩,等.层状各向异性岩体的室内单轴压缩试验分析[J].长江科学院院报,2016,33(5):58-62.
HUANG C, ZUO S Y, WANG S, et al. Analysis of indoor uniaxial compression test on layered anisotropic rock masses[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 58-62.
- [8] 王洪建,刘大安,黄志全,等.层状页岩岩石力学特性及其脆性评价[J].工程地质学报,2017,25(6):1414-1423.
WANG H J, LIU D A, HUANG Z Q, et al. Mechanical properties and brittleness evaluation of layered shale rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1414-1423.
- [9] 刘永胜,詹学才,邱传传.层状复合岩石三轴压缩力学性能研究[J].华东交通大学学报,2021,38(3):1-6.
LIU Y S, ZHAN X C, QIU C C. Study on mechanical properties of layered composite rock under triaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 1-6.
- [10] 黄殷婷,左双英,钟帅,等.层理灰岩抗拉力学参数各向异性及破裂特征分析[J].人民长江,2022,53(7):174-180.
HUANG Y T, ZUO S Y, ZHONG S, et al. Analysis on anisotropic tensile parameters and fracture characteristics of limestone with different dip angles[J]. Yangtze River,

- 2022, 53(7): 174-180.
- [11] LIYANAGE P W P, GAMAGE R P. Deformation characteristics of bedded sandstone in uniaxial compression[C]// FENG X T, HUDSON J A, TAN F. Proceedings of the 3rd ISRM SINOROCK Symposium, Rock Characterisation, Modelling and Engineering Design Methods. Leiden: CRC Press, 2013: 131-135.
- [12] 邓华锋, 王伟, 李建林, 等. 层状砂岩各向异性力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 112-120. DENG H F, WANG W, LI J L, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of bedded sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 112-120.
- [13] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1): 65.
- [14] 杨春和, 李银平. 互层盐岩体的 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4226-4232. YANG C H, LI Y P. Expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4226-4232.
- [15] 曾泽民. 加锚脆性类岩体单轴压缩力学特性与破裂特征试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017. ZENG Z M. Mechanical properties and failure mechanism of the rock-like anchored brittle samples under the uniaxial compression load experiment[J]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [16] 霍宏斌, 刘虎, 许添. 岩体结构面参数对岩石锚杆抗拔与变形影响的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(2): 36-43. HUO H B, LIU H, XU T. Experimental study on the influence of rock structural planes parameters on the anchor pullout capacity and deformation performance[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2019, 32(2): 36-43.
- [17] 王斌, 宁勇, 冯涛, 等. 单轴压缩条件下锚杆影响脆性岩体破裂的细观机制[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1593-1600. WANG B, NING Y, FENG T, et al. Meso-mechanism of rock failure influenced by bolt anchorage under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1593-1600.
- [18] 武东阳, 蔚立元, 苏海健, 等. 单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC3D 模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1681-1692. WU D Y, YU L Y, SU H J, et al. Experimental study and PFC3D simulation on crack propagation of fractured rock-like specimens with bolts under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1681-1692.
- [19] 腾俊洋, 唐建新, 李欣怡. 含孔洞加锚岩石力学特性及裂纹扩展规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 87-103. TENG J Y, TANG J X, LI X Y. Mechanical property and fracture propagation of anchored rock with a hole under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 87-103.
- [20] 詹学才. 层状复合岩石三轴压缩性能研究及数值模拟[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021. ZHAN X C. Research and numerical simulation of triaxial compression performance of layered composite rock[J]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.



第一作者: 万徐梓涵(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为防灾减灾工程。E-mail: 1481458091@qq.com。



通信作者: 刘永胜(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为岩石动力学、结构防灾减灾工程等。E-mail: ysh-liu07@126.com。

(责任编辑: 吴海燕)