DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0741 **CSTR:**32223.14.j.rsm.2024.0741

层理铁矿石剪切力学性能试验研究

汪 昕[1,2]，幸安康[1,2]，曾子强[1,2]，姜 祎[1,2]，徐建宇[1,2]，王晓南[3]，刘造保[1,2]

（1．东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819；2．东北大学 深部工程与智能技术研究院，辽宁 沈阳 110819；3．本溪龙新矿业有限公司，辽宁 本溪 117013 ）

摘 要：陡倾薄层状矿体在开挖扰动下，易呈现高切向应力导致边墙弯折破断或弯曲内鼓破坏，破坏模式与层理岩体的力学性质紧密相关。为研究思山岭铁矿层状矿体在剪切破坏过程中的变形和强度性质及破坏特征，开展不同层理倾角和围压下层状岩石三轴剪切试验。试验结果表明：思山岭层理铁矿石试样的峰值强度、轴向和环向变形、破坏模式受围压和层状节理角度影响显著。层理角度的增加使得试样抗剪强度呈现先增加后减小的趋势，轴向变形和环向变形呈现波浪形变化；围压的增加使得试样峰值剪切强度有显著的提高，轴向剪切位移也有增加的趋势，环向变形呈减小的趋势。层理铁矿石试样的破坏模式受层理倾角和围压控制，在层理倾角为 0°和 30°时，试样发生以应力控制型为主的破坏；层理倾角为 45°时，试样发生应力-结构控制型的破坏；层理倾角为 60°和 90°时，试样发生以结构控制型为主的破坏。最后基于试验结果，给出了同时考虑中主应力和矿石层理倾角的破坏判据，研究结果可为思山岭铁矿的采场和支护设计提供重要支撑。

关 键 词：层理倾角；围压；强度；变形；破坏模式

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2025) 04－1039－10

Experiment of shear mechanical properties of layered iron ore

WANG Xin[1,2], XING An-kang[1,2], ZENG Zi-qiang[1,2], JIANG Yi[1,2], XU Jian-yu[1,2], WANG Xiao-nan[3], LIU Zao-bao[1,2]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 2. Institute of Deep Engineering and Intelligent Technology, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China; 3. Benxi Longxin Mining Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117013, China)

Abstract: Steeply dipping thin-layered ore bodies are prone to exhibit failure modes such as bending and breaking of the sidewall or bending and internal bulging caused by high tangential stress, which are closely related to the mechanical properties of the bedded rock mass. In order to investigate the deformation, strength properties, and failure characteristics of Sishanling layered iron ore during the shear failure process, conventional triaxial shear tests were conducted on layered rocks under various bedding dip angles and confining pressures. The test results show that the peak strength, axial displacement, circumferential deformation and failure mode of stratified iron ore samples are affected by confining pressure and layered joint angle. With an increase in the bedding angle, the shear strength of the specimen initially increases and then decreases, while the axial and circumferential deformations exhibit a ‘wave-like’ trend. Moreover, as the confining pressure increases, the peak shear strength of the specimen significantly improves, the axial shear displacement increases, and the circumferential deformation decreases. In addition, failure mode of bedding iron ore specimen is controlled by both the bedding dip angle and confining pressure. The study reveals that the failure mode is stress-controlled when the bedding dip angles are 0° and 30°. At a bedding dip angle of 45°, the specimens exhibit a stress-structure controlled failure mode, while for angles at 60° and 90°, the failure mode is predominantly controlled by the structure. Based on the test results, a failure criterion is proposed considering both the intermedium principle stress and the ore bedding angle. The test results could offer important technique support for the stope and blasting and also the ground support design.

Keywords: bedding dip angle; confining pressure; strength; deformation; failure mode

收稿日期：2024-06-14 录用日期：2024-09-12
基金项目：国家重点研发计划（No. 2023YFC2907201）；辽宁省科学技术计划（No. 2023JH1/10400004）；国家自然科学基金（No. 52374083）。
This work was supported by the National Key R&D Program of China (2023YFC2907201), the Science and Technology Program of Liaoning Province (2023JH1/10400004) and the National Natural Science Foundation of China (52374083).
第一作者简介：汪昕，男，1986 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事深部矿山岩体力学方面的教学和科研工作。E-mail: wangx@mail.neu.edu.cn
通讯作者：幸安康，男，1999 年生，硕士研究生，主要从事金属矿山地下开采方面的研究。E-mail: xingankang1999@163.com

1 引 言

地下矿山井巷工程往往受层理、节理、结构面的影响，层状岩体在深部高应力加卸荷条件下易发生弯曲、屈曲和倾倒剥落等现象灾害，当岩体内部剪切应力超过其抗剪强度，会导致岩体沿着某个剪切面发生滑动或破裂，尤其矿山采场顶板和边墙层理岩体易发生沿层理面的剪切滑移破坏，剪切破坏对岩体灾害的影响是非常显著的。此外，在深部高地应力叠加薄层状围岩体下，高边墙在高切向应力下易出现弯折破断（薄层）或弯曲内鼓（厚层）破坏模式，此类破坏模式与层理的剪切力学性质紧密相关。因此，研究含节理岩石剪切力学性能，探讨层理对剪切破坏的影响机制，对工程岩体稳定性具有重要意义。

近年来，国内外学者对节理岩石的压缩拉伸力学性能做了大量研究。陈国栋等[1]对砂岩进行单轴与常规三轴压缩试验，研究了围压及层理角度对砂岩力学特性的影响规律。李育宗等[2]研究了不同结构面倾角及不同岩性影响下含结构面岩体的岩爆特征及破坏机制。王春萍等[3]研究了围压和裂隙倾角对花岗岩围岩力学行为的影响，开展了单轴压缩和三轴压缩试验。腾俊洋等[4]沿与层理呈 0°、30°、60°和 90°夹角加载进行巴西劈裂圆盘试验，同步进行声发射测试，并采用离散元软件 3DEC 对试验结果进行数值模拟验证。

同时，节理岩石的剪切力学试验也得到了大量研究。夏磊等[5]基于人工制样方法，开展不同层理倾角、层理间距及层理黏结强度下层状岩体直剪试验。王培涛等[6]基于 3D 打印技术，建立了不同节理粗糙系数的节理模型、几何形态节理模型和复杂裂隙网络物理模型，通过开展室内直接剪切试验分析了各组试件的剪切强度及破坏模式。王刚等[7]采取一体化浇筑方式制备不同节理面间距和不同粗糙度的双节理试样，结合声发射技术探究不同法向应力条件下粗糙双节理岩体剪切力学特性和破坏演化特征。韦婕等[8]通过开展超临界 CO_2 不同浸泡时间后的煤体结构面直剪力学试验建立一种新的结构面剪切本构模型。Barton 等[9]发现剪切强度和剪切刚度随着块体尺寸的增加而降低，提出了一种从实验室到现场块体尺寸的剪切强度和剪切位移缩放方法。Fan 等[10]对恒法向荷载条件下岩石立方体破碎得到的裂隙进行了一系列直剪试验，采用激光扫描技术测试了岩石节理的表面形貌，并通过数值模拟研究了节理在直剪过程中的损伤演化和损伤区域。Nguyen 等[11]提出了一种将岩石大剪切箱试验与相应的数值模拟相结合并明确考虑节理粗糙度的新方法。Zhang 等[12]通过对一系列北山花岗岩断裂试样在不同法向应力作用下的直剪试验，研究了剪切过程中粗度退化的特征，并定量分析了其对裂缝中溶质迟滞的影响。Liu 等[13]研究了混凝土−泥岩界面的抗剪强度，对界面变形和抗剪强度进行了定量分析，发现界面具有黏聚性，抗剪强度可近似为法向应力的非线性函数。Tian 等[14]对 10 组注浆节理试件进行了三维扫描和直剪试验，推导了弱充填节理抗剪模型。Wang 等[15]在按 Barton 标准粗糙度剖面制备的岩体结构面人工试样上进行了加载−卸载剪切预应力路径剪切蠕变试验和不同初始应力和变形状态剪切蠕变试验。Kleepmek 等[16]进行了三轴剪切试验，以评估位移速度和围压对花岗岩、砂岩和泥灰岩试样中拉伸裂缝和光滑锯切面剪切强度和扩展的影响。Dang 等[17]通过不同垂直和水平冲击频率、垂直冲击荷载幅值、水平剪切位移幅值和法向荷载水平的试验研究了平面节理在法向载荷循环变化下的循环摩擦响应。孙杰豪等[18-19]分析了砂岩节理直剪破坏的声发射特征对类岩石节理剪切控制方式和卸荷应力路径的影响。这些节理岩石的压拉剪试验结果对分析节理岩石试样的变形、破坏和各向异性提供了关键基础。

总体上看，对层状页岩、煤岩体、混凝土等材料进行了大量含节理面的压缩、拉伸试验，层理剪切试验多为单一结构面或为人造节理，对多组平行节理岩石的剪切试验进行较少，尤其是硬岩的平行层理铁矿石。本研究以思山岭铁矿为工程背景，采用三轴剪切试验设备对不同层理角度、围压的铁矿石试样进行常规三轴剪切试验，研究围压及层理角度对试样变形、强度、破坏模式等的影响，探讨了平行层理对铁矿石试样剪切力学特性中的影响规律，提出一种针对思山岭铁矿考虑层理影响的破坏判据。室内试验结果可对思山岭铁矿的大参数采场设计和底部出矿结构与运输大巷的支护设计提供数据和技术支撑，也可为开采条件类似的矿山提供一定的参考意义。

2 试验准备

2.1 岩样准备

从思山岭铁矿现场运回岩块，利用自动取芯机采用钻芯取样方法钻取 5 种层理倾角的层理铁矿石试样。定义层理倾角 θ 为层理与试样端面的夹角。制备层理倾角为 0°、30°、45°、60°、90°的圆柱试

样，岩样尺寸为直径 50 mm、高 50 mm 标准圆柱试样。取样示意和制备的部分试样如图 1、2 所示。

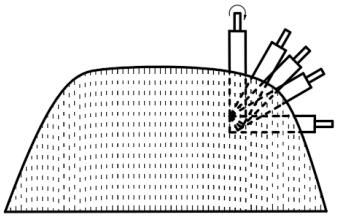


图 1　层理试样取样示意图

Fig.1　Schematic diagram of bedding sample sampling

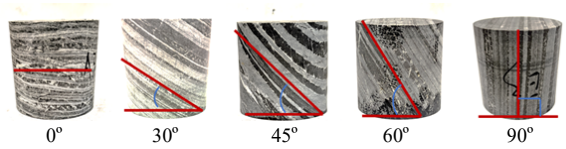


图 2　室内制备的具有不同层理角度部分试样

Fig.2　Selected specimens with different bedding angles prepared in the laboratory

需要说明的是，思山岭铁矿石属于薄层状矿体，具有一组明显的弱势层理结构面，在取样加工以及后续试验中，都是基于该弱势结构面开展相关工作。加工好的试样在室内自然晾干，测量试样直径和高度，同时测量铁矿石试样波速，多次测量求取平均值，挑选无波速异常、完整、表观无裂隙和缺陷的思山岭铁矿试样开展岩石力学试验研究。

图 3 为随层理角度增加层理试样轴向纵波波速变化特征。对应不同倾角，分别选取 3 块试样开展波速测试，后期分别用于 10、20、30 MPa 围压下的剪切试验，故图 3 中共 15 个点进行拟合。试样的纵波波速 w 随层理倾角 θ 的增加呈现线性增长趋势，可用线性函数进行简单拟合。可见矿石试样的平均波速由 θ= 0°的 3 875 m/s 增加至 θ= 90°的 4 750 m/s，当层理倾角达到 90°时，矿石试样的波速达到最大值，连续岩石基质有利于波的传播，层理面影响了纵波的传播，该规律符合预期，与其他学者研究成果[20]具有一致性。

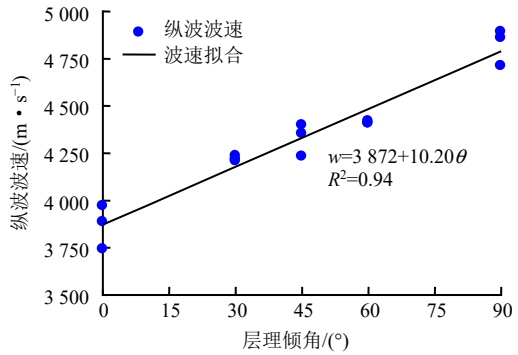


图 3　层理试样纵波波速变化

Fig.3　P-wave velocity varies with different bedding angles

2.2　试验设备

试验采用东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室自主研发的高温高压耦合三轴剪切试验系统，该装置由一对剪切模块和高温高压三轴耦合试验系统组成，所用试验设备如图 4 所示。在进行试验前，剪切模块和试样由聚氯乙烯（polyvinyl chlorid，PVC）热缩管封装，以避免液压油接触试样表面。由于 L 型剪切模块和空心硅胶囊剪切模量相差较大，在施加轴向荷载 F 后，可对试样实现剪切。刚性压头上可安装两个直线位移传感器（linear variable displacement transducer，LVDT）测量剪切位移，并计算两个 LVDT 所测变形的平均值，作为的岩石的剪切变形。环向变形通过固定在试样中部的链条连接的 LVDT 量测量，具体为测量岩石圆柱试样的周长变化 ΔD，膨胀率记为 $\Delta D/D$，其中，D 为圆柱试样的直径。剪切刚度记为剪切应力 τ 的增量与轴向剪切位移 u 的增量的比值，围压记为 P_c。

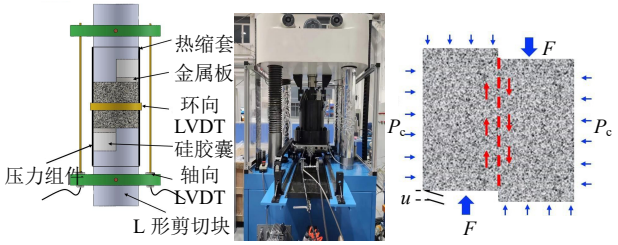


图 4　岩石三轴直剪试验装置与岩石直剪示意图[21]

Fig.4　Schematic diagram of rock triaxial direct shear test device and rock direct shear [21]

2.3　试验方案

针对思山岭铁矿所处的应力状态和矿岩体层理倾角，探究不同围压和层理倾角条件下思山岭铁矿石三轴直接剪切力学性能，设计了在 10、20、30 MPa 围压条件和 0°、30°、45°、60°、90°层理倾角下的三轴直剪试验，共计 15 种工况。为避免加载速度过快试样发生剪断，同时过慢的加载速率影响试验的准确性和试验耗时，基于前期大量的类似室内剪切试验经验，选取剪切速率为 0.01 mm/min。加载过程中，首先通过液压油以 0.5 MPa/s 的速率增加围压达到目标围压值。然后进行轴向力加载，先按照 0.01 mm/min 的轴向应变速率控制加载，为了节省试验时间，待轴向应力达到峰后阶段，加载速率由 0.01 mm/min 逐渐增加为 0.1 mm/min 继续加载，直至矿石试样破坏。

3 试验结果

3.1 剪应力-剪位移曲线

图 5 给出了在 30 MPa 围压和 60°层理倾角条件下岩石的剪切应力随剪切位移的变化曲线。

根据剪切应力、剪切刚度及膨胀率的变化，将岩石的剪切破裂过程分为 3 个阶段：

I孔隙裂隙压密阶段。在这个阶段，岩石中的孔隙和裂隙逐渐被压实，导致试样的剪切刚度随着剪切位移的增加处于一个相对恒定的区间。剪切应力-剪切位移的曲线呈现出上凹的趋势，剪切应力增加的速率逐渐减小。

II裂纹扩展阶段。试样中的裂纹开始扩展，剪切刚度迅速降低。剪切应力增加速率逐渐减小，当剪切应力达到峰值后，开始迅速减小。试样产生宏观裂纹，膨胀率迅速增加，伴有脆响声。

III裂纹剪切摩擦阶段。在这个阶段，裂纹扩展已经相对稳定，剪切应力逐渐减小并趋于稳定。剪切应力最终达到残余剪切强度，试样的膨胀率增加速度降低并保持恒定。

从图 5 可看出，在 I 阶段，试样的孔隙被压密，试样的剪切刚度随剪切位移的增加逐渐增加，剪切应力曲线呈上凹型，剪切刚度值逐渐增大，试样在剪切过程中并非严格存在线性阶段，剪切刚度并不一定是恒定值，即剪切力-剪切位移曲线中并不一定存在绝对的弹性阶段，岩石在此阶段不断被压密，同时岩石的膨胀率在此阶段变化较小，基本为 0，这也表明此阶段矿石内部基本没有裂纹的扩展；在II阶段，剪切刚度值开始降低，矿石内部裂纹开始扩展，这与 Shang 等[22]获得岩石剪切过程中的声发射信号具有较好的一致性。在此阶段,矿石的膨胀率开始增加且膨胀率在峰值剪切应力之后开始迅速增加，在达到峰值剪切应力时，剪切刚度基本为 0；在III阶段，岩石的膨胀率速率突变，矿石的破裂面完全贯通，随后矿石膨胀率速率随剪切位移的增加均匀增加，进入破裂面的摩擦阶段，剪切应力逐渐趋于稳定值，即矿石的残余剪切强度。

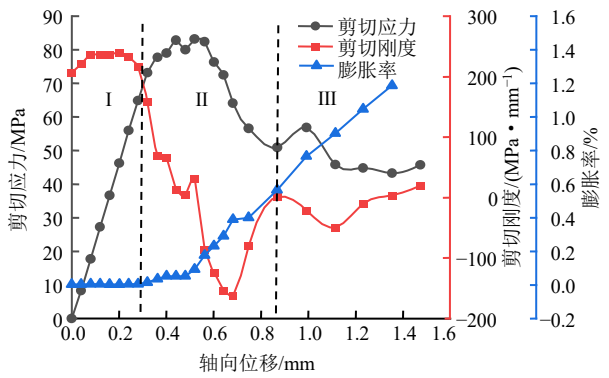


图 5 60°、30 MPa 试样的剪切应力、剪切刚度、膨胀率与轴向位移曲线

Fig.5 Shear stress, shear stiffness, expansion rate and axial displacement curves of specimen with 60 ° dipping angle and 30 MPa confinement

需要指出的是在其他不同围压、层理倾角条件下岩石的剪切破坏过程也存在类似的分阶段过程，即分为孔隙裂隙压密阶段、裂纹扩展阶段和裂纹剪切摩擦阶段。为缩短篇幅，其他工况的试验结果不在此赘述。

3.2 围压对试样剪切强度及变形破坏的影响

图 6 给出了围压对试样剪切强度的影响。可以看出围压对试样的剪切强度有显著影响，矿石试样的峰值剪切强度随围压的增加而显著增加。此外，不同角度下抗剪强度增长率是不同的，其中当倾角在 30°～60°时，抗剪强度增长率相对较大。

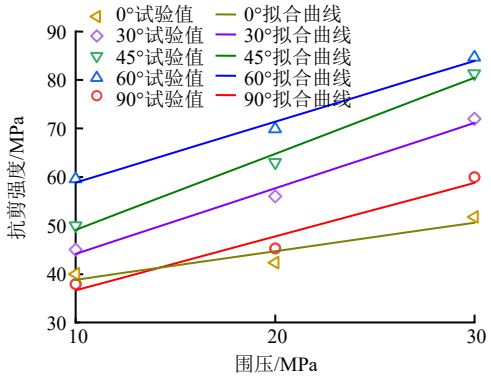


图 6 试样强度与围压的关系

Fig.6 Relation between specimen shear strength and confining pressure

通过拟合得到不同层理倾角试样在不同围压作用下的摩尔-库仑强度包络线，强度线性拟合公式如表 1 所示。

表 1 不同层理角度下试样剪切强度拟合公式

Table 1 Fitting equations of strength under various dipping angles

层理倾角/(°)	峰值强度拟合
0	$\tau = 0.59P_c + 32.89$
30	$\tau = 1.35P_c + 30.67$
45	$\tau = 1.56P_c + 33.44$
60	$\tau = 1.26P_c + 46.30$
90	$\tau = 1.11P_c + 25.64$

注：思山岭矿石试样脆性大，在试验中易发生脆断，无明显的峰后阶段。

通过 3 组围压下的直剪试验获得矿石试样的峰

值抗剪强度，采用摩尔-库仑准则计算出不同层理倾角条件下的等效黏聚力和内摩擦角。图 7 给出了在不同层理角度条件下试样的等效黏聚力和内摩擦角的变化规律。等效黏聚力和内摩擦角随层理倾角的变化而变化，表现出一定的各向异性。黏聚力随试样倾角变化较大，试样内摩擦角随层理倾角的增加呈现先增加后减小趋势。当层理倾角为 60°时，试样内的摩擦角最大，在此倾角下有效正应力最大，层理面上的剪切应力最小，以及层理面间的摩擦阻力增加，这些因素共同作用使得试样内部的摩擦阻力达到最大值。

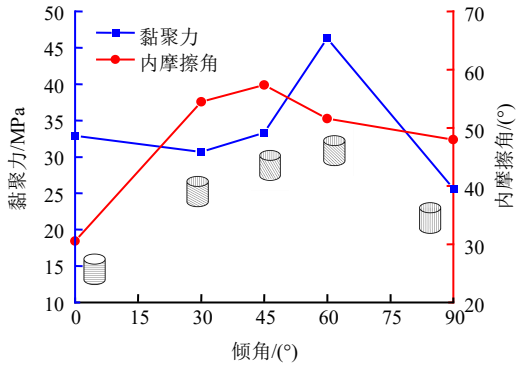


图 7　等效黏聚力和内摩擦角随倾角变化

Fig.7　Equivalent cohesive and internal friction angle varies with dip angles

从试验结果可发现，思山岭层理铁矿石试样的峰值强度、轴向位移、环向变形均受到围压和层状角度影响。随着围压的增加,试样的峰值剪切强度有显著的提高，如图 8 所示。围压的增加会导致试样内的有效应力增加，使试样内部的岩石颗粒更加紧密，减小岩石中的裂隙和孔隙空间，从而增加了矿石内的有效应力，使矿石颗粒之间的摩擦力增加，试样内部的矿石颗粒受到更大的约束力，摩擦效应得到增强，使得矿石内的微裂纹闭合，减少了矿石的内部裂隙和缺陷。

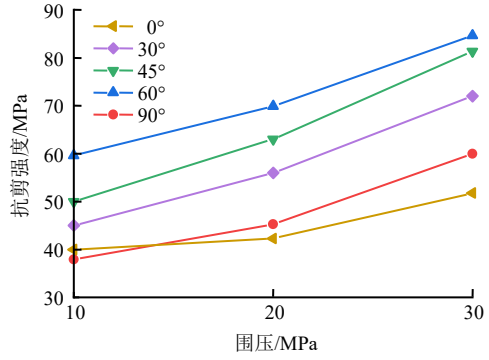


图 8　峰值剪应力随围压的变化

Fig.8　Variation of peak shear stress with confining pressure

随围压的增加，峰值抗剪强度对应的轴向剪切位移也有增加的趋势，如图 9 所示。围压越大峰值剪应力对应的轴向位移越大，随着围压的增加，试样内部受到的约束增加，有效应力增加。增加的有效应力会导致试样在剪切过程中需要承受更大的剪切应力，试样内部的孔隙和裂隙可能会逐渐被压缩或闭合，导致试样的体积减小，使试样在剪切过程中需要更多的轴向剪切位移来适应体积的减小和形状的变化，从而达到相同的峰值抗剪强度，故需要更大的轴向剪切位移才能达到相同的峰值抗剪强度。

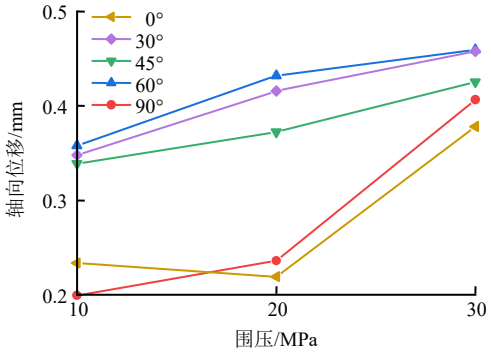


图 9　峰值轴向位移随围压的变化

Fig.9　Variation of peak axial displacement with confining pressure

值得指出的是，由图 10 可知，随围压的增加，试样内的微观裂隙和孔隙会逐渐被压缩或闭合，矿石颗粒环向挤压程度加深，围压的增加限制了试样的环向变形，环向变形呈减小的趋势。

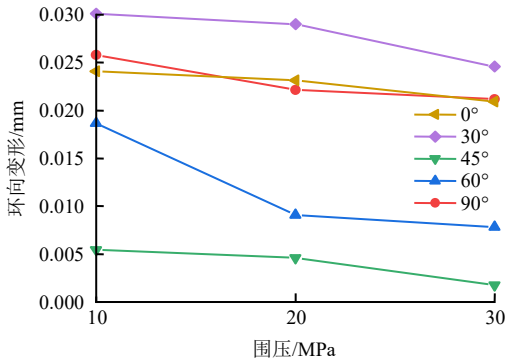


图 10　环向变形随围压的变化

Fig.10　Variation of circumferential deformation with confining pressure

3.3　层理角度对剪切强度及变形破坏的影响

在不同层理倾角条件下，试样的剪切特性也表现出一定的各向异性。对于层理倾角为 90°的试样，其剪切过程中剪切面与层理面平行，因此试样受到的抗剪强度几乎接近于层理面的抗剪强度,试样受到的剪应力方向与层理面扩展方向平行，表现为沿

层理面的滑移。相反，对于层理倾角为 0°的试样，即层理面与剪力垂直的情况，试样在剪切时受到层理面扩展的影响最小，层理与试样之间的相互作用减弱，试样的抗剪强度更加接近于岩石基质的强度。

由图 11～13 可以看出，层理角度对峰值剪应力、轴向变形、环向变形存在影响。层理对层状岩体变形破坏的弱化影响不仅在于层理自身相对较弱的力学性质，同时也与层理倾角密切相关。层理对试样内部应力分布、传递具有重要影响。层理倾角较大，层理面处应力集中；层理倾角较小，有利于应力在层理面间的传递。

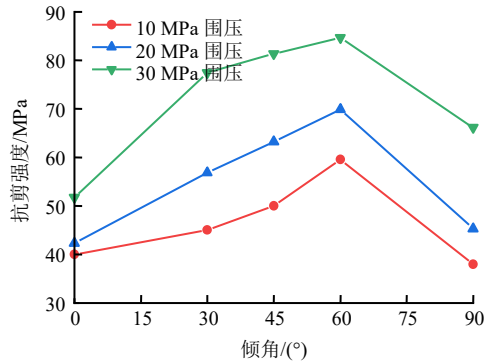


图 11 抗剪强度随层理倾角的变化

Fig.11 Variation of shear strength with bedding dip angles

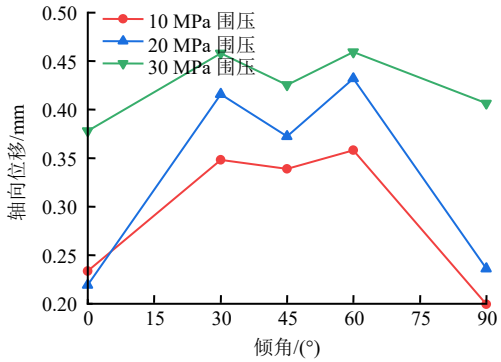


图 12 轴向位移随层理倾角的变化

Fig.12 Variation of axial displacement with bedding dip angles

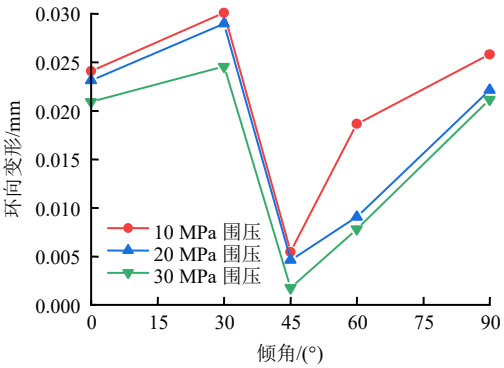


图 13 环向变形随层理倾角的变化

Fig.13 Variation of circumferential deformation with bedding dip angles

层理角度对峰值剪应力的影响如图 11 所示，试样的抗剪强度随层理的增加呈现先增加后减小的趋势，呈“∧”形。随着层理倾角增加到一定程度（如 30 MPa 围压时倾角 60°），裂隙的闭合程度最大化，使得试样的内部结构更加紧密，且适当的层理倾角有利于增加试样内部的摩擦效应，从而提高了试样的抗剪强度。

层理角度对轴向位移的影响如图 12 所示，随着层理倾角的增加，轴向位移总体呈现先增加后减小的趋势，在层理倾角为 30°～60°时，轴向位移呈现 30°～45°时小幅度降低，45°～60°时小幅度提高趋势，呈波浪形。层理角度对轴向位移的影响可能是由裂隙闭合效应、摩擦特性和试样内部应力分布等因素共同作用所致。层理试样在 45°倾角时，破坏模式多为应力结构控制型，试样既受应力影响又受层理面影响，轴向位移相较于 30°、60°有所下降可能是试样破裂面未完全贯穿，减小了试样的轴向位移。

随层理倾角的增加，试样环向变形呈现先增加后减小再增加的趋势，如图 13 所示。当层理角度为 30°时，加载方向与层理面之间形成一定角度，使应力更容易集中在层理面上，促进裂隙的扩展和开裂，应力集中效应导致环向变形最大；在 45°层理角度时，既有沿加载方向的破坏，也有沿层理面的破坏，这种混合破坏模式使得应力在试样内不断重分布，减少了局部变形的发生，从而使环向变形最小。

3.4 围压及层理角度对破坏模式影响

根据破坏机制不同可以将岩石破坏模式分为应力控制型，应力-结构控制型和结构控制型[23]。应力控制型是指岩石破坏过程主要受岩石材料本身性质控制，层理结构对岩石破坏不造成任何影响。结构控制型是指岩石的破坏过程主要受层理结构影响。而应力-结构控制则是岩体的破坏强度和破坏模式受到材料本身性质和层理结构分布情况的共同作用。

通过观察矿石试样破坏后的断面形状（见表 2）发现：

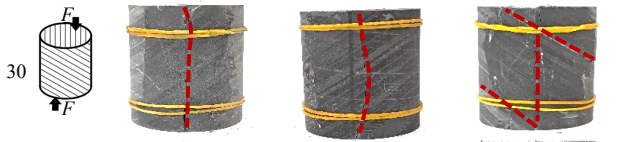
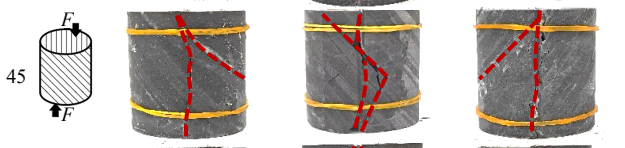
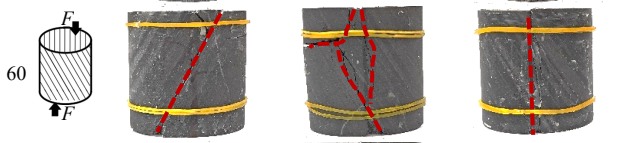
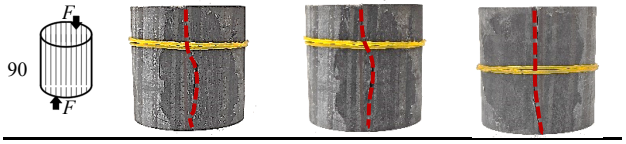
当层理角度为 90°时，层理对试样破坏模式影响较大，层理铁矿石试样破坏模式以沿层理剪切破坏为主，破坏为结构控制型。层理面与剪切加载方向更为接近，矿石更容易沿着层理面发生剪切破坏。较大的层理角度通常会导致裂纹在层理面附近产生，并且矿石的破坏模式更倾向于沿着层理面扩展。

当层理角度为 60°时，随着围压的增加，试样破坏模式由沿层理发生剪切破坏到沿加载方向和层理

面方向混合破坏再到沿加载方向破坏转变，即从结构控制、应力-结构控制到应力控制的转变。

表 2　不同围压及层理角度下试样破坏模式

Table 2　Failure modes of specimens under different confining pressures and bedding angles

倾角/(°)	破坏模式		
	10 MPa	20 MPa	30 MPa
0			
30			
45			
60			
90			

当层理角度为 45°时，层理对矿石试样破坏模式影响较大，层理铁矿石试样破坏模式以沿加载方向和层理面方向混合破坏为主，即试样的剪切破坏主要为沿基岩剪断破坏和沿层理滑移破坏的复合破坏，为应力-结构控制型。

在层理倾角为 30°时，试样在高围压（30 MPa）下发生沿基岩剪断破坏和沿层理滑移破坏的复合破坏，试样在 10、20 MPa 下沿加载方向破坏。

当层理角度为 0°时，层理对试样破坏模式影响较小，层理铁矿石试样破坏模式主要为沿着基质的剪断破坏。

层理倾角较小时，层理面与加载方向垂直，层理面无法提供明显的剪切路径，主导作用的是加载方向的应力，而不是层理面的特性。因此，试样更容易沿着加载方向发生剪切破坏，而层理面的影响相对较小。同时，试样内部相对均匀地受到加载方向的应力，不会出现层理面导致的应力集中现象。这样可以减少试样内部的局部破坏，使得试样更容易沿着加载方向发生剪切破坏。

相比之下，当层理角度较大时，层理面与加载方向平行，层理面应力集中，能够提供更容易滑动的剪切路径，层理面对试样破坏起主导作用，使得试样更容易沿着层理面发生剪切破坏。

特别是在中等层理倾角时，存在一个沿层理面剪切破坏的临界角，围压使得剪切面上的法向应力增加，层理面提供滑移路径，在围压和层理共同作用下，发生沿加载方向和层理滑移破坏的复合破坏。

3.5　层理倾角对峰前弹性段的剪切刚度的影响

峰前弹性段是指在岩石达到峰值强度之前的线弹性阶段，此阶段试样的变形主要是弹性变形，剪切刚度可以通过剪切模量来表示。常规三轴剪切下试样变形受层理角度影响。由图 14 所示，随着层理角度的增加，试样的剪切模量呈现先增加后减小再增加的趋势。当层理倾角 45°时，剪切刚度会存在下降。当层理与剪切加载方向夹角增加时，矿石的剪切破坏模式通常会发生变化。在夹角较小的情况下，矿石可能更容易沿着层理面产生剪切破坏，而在夹角较大的情况下，矿石可能更容易发生整体破坏或层内剪切破坏。这种剪切破坏模式的变化会导致剪切刚度的提高。当层理与剪切加载方向夹角增加时，层理面上的摩擦力会增加，从而抵抗剪切加载的效果。

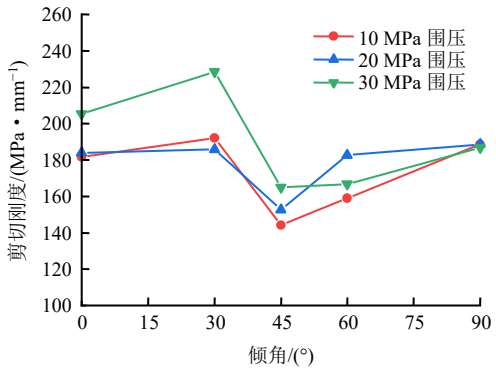


图 14　剪切刚度随层理倾角的变化

Fig.14　Variation of shear stiffness with bedding dip angles

3.6　考虑层理倾角的破坏判据

对矿石试样所得的黏聚力和内摩擦角进行拟合，通过不同拟合方式比较，发现黏聚力、内摩擦角选用三阶多项式拟合，拟合结果相对较好，$C_0(\theta)$ 和 $\varphi_0(\theta)$ 的拟合确定系数分别为 0.60 和 0.97，拟合函数为

$$C_0(\theta)=33.13-1.09\theta+0.041\theta^2-3.342\times10^{-4}\theta^3 \quad (1)$$

$$\varphi_0(\theta)=30.44+1.58\theta-0.03\theta^2+1.615\times10^{-4}\theta^3 \quad (2)$$

需要说明的是式（1）和式（2）是单纯的试验数据拟合，适用于思山岭铁矿的矿石试样，无任何

实际物理意义，当然其他类型的岩石试验，可以参考本研究对数据的处理方式，选用类似的三阶或其他拟合方式开展研究。

进一步，在硬岩三维破坏准则方面，Feng 等[24]建立的硬岩三维破坏准则（3D hard rock failure criterion，3DHRFC）能够很好地反映完整脆性岩石破坏强度与真三向应力状态的关系，尤其是考虑了中间主应力 σ_2 的影响。在此基础上，本文考虑将常规三轴剪切的破坏规律扩展至考虑 σ_2 和层理的破坏判据。将式（1）、（2）代入式（3）～（5）[24]，得到式（6），即破坏强度与应力状态和层理倾角关系的函数式 $f(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3,\theta)=0$。

$$\sin\varphi_b=\frac{\sin\varphi_0}{\sqrt{1-b+sb^2}+t\left(1-\sqrt{1-b+b^2}\right)\sin\varphi_0} \tag{3}$$

$$b=\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3} \tag{4}$$

$$\sin\varphi_b=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3+2C_0\cot\varphi_0} \tag{5}$$

$$\left\{\sqrt{1-\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3}+s\left(\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3}\right)^2}+t\left[1-\sqrt{1-\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3}+\left(\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3}\right)^2}\right]\sin\left(30.44+1.58\theta-0.03\theta^2+1.165\times10^{-4}\theta^3\right)\right\}\cdot$$
$$(\sigma_1-\sigma_3)=(\sigma_1+\sigma_3)\sin\left(30.44+1.58\theta-0.03\theta^2+1.615\times10^{-4}\theta^3\right)+2\left(33.13-1.09\theta+0.041\theta^2-\right.$$
$$\left.3.342\times10^{-4}\theta^3\right]\cos\left(30.44+1.58\theta-0.03\theta^2+1.615\times10^{-4}\theta^3\right) \tag{6}$$

式中：s、t 为材料参数。岩石的参数 s 一般小于 1，经验取值 0.8～1；岩石的参数 t 取值大于 0[24]。

需要指出的是，式（6）只适用于思山岭平行层理的铁矿石，其他研究可参照本文的处理方式。其中，σ_2 和 σ_3 是根据试样所处的应力状态取得，分别为中间主应力和最小主应力；θ 为平行层理与 σ_2、σ_3 应力平面的夹角；σ_1 为试样的极限强度。

当 σ_3=10 MPa，如图 15 所示，由式（6）求解出不同层理倾角和应力状态下矿石的峰值强度，可见随着 σ_2 的增加，峰值强度表现为先增加后减小特征，且与倾角息息相关。式（6）可用来估算思山岭薄层状层理铁矿石在真三向应力状态下的极限破坏强度。

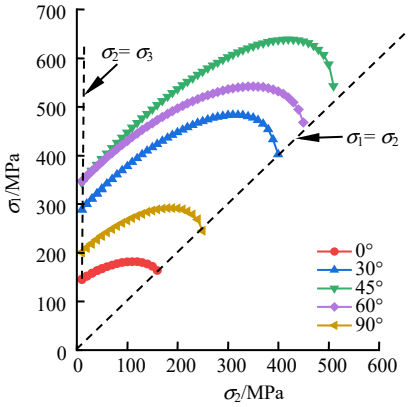


图 15 层理铁矿石的峰值强度随层理倾角和应力水平的变化特征

Fig.15 Variation characteristics of peak strength of layered iron ore with bedding dip angle and stress level

4 结 论

采用常规三轴剪切试验机对思山岭层理铁矿石试样进行了系列不同层理角度的三轴剪切试验，基于试验数据，分析了围压和层理角度对层理试样的抗剪强度、变形以及破坏模式的影响规律，主要结论如下：

（1）围压对思山岭铁薄层状矿石试样的抗剪强度和变形破坏具有显著影响。围压增加导致试样峰值剪切强度提高，轴向剪切位移增加，环向变形减小。

（2）层理角度对矿石试样的抗剪强度和变形破坏特征也具有影响。层理角度的增加导致试样抗剪强度呈现先增加后减小的趋势；轴向位移总体呈现先增加后减小的趋势，当倾角为 45°时，轴向位移略微降低；此外，环向变形呈现先增加后减小再增加的趋势；试样的剪切模量呈现先增加后减小再增加的趋势，在 45°层理倾角时，剪切模量为最小值。

（3）层理铁矿石试样破坏模式分应力控制型、应力−结构控制型和结构控制型。发现当层理角度为 60°和 90°时，层理对矿石试样的破坏模式影响相对最大，破坏模式以沿层理剪切破坏为主，属于结构控制型破坏；当层理倾角为 0°和 30°时，试样以矿石基质的破坏为主要特征，属于应力控制型主导的破坏；当层理角度为 45°时，层理铁矿石试样破坏模式是以沿加载方向和层理面方向混合破坏，属于应力−结构控制型破坏。

（4）基于室内试验发现的力学参数变化规律，

结合考虑中主应力的真三向硬岩破坏准则（3DHRFC），提出了针对思山岭层理铁矿石的破坏判据，给出了反映矿石破坏强度与所处应力状态和层理倾角关系的函数式，可对思山岭铁矿的大参数采场设计和支护设计提供重要支撑。

参 考 文 献

[1] 陈国栋, 赵骏, 侯朋远, 等. 围压及层理角度对砂岩变形、强度、破坏模式及脆性影响[J]. 金属矿山, 2023(2): 15-21.
CHEN Guo-dong, ZHAO Jun, HOU Peng-yuan, et al. Effects of confining pressure and bedding angle on deformation, strength, failure modes and brittleness of sandstone[J]. **Metal Mine**, 2023(2): 15-21.

[2] 李育宗, 袁亮, 张庆贺, 等. 含结构面岩体岩爆特征真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 120-132.
LI Yu-zong，YUAN Liang，ZHANG Qing-he, et al. True-triaxial experimental study on the rockburst characteristics of rock mass with a structural plane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(1): 120-132.

[3] 王春萍, 刘建锋, 刘健, 等. 围压和裂隙倾角对花岗岩力学行为的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 578-586.
WANG Chun-ping, LIU Jian-feng, LIU Jian, et al. Influences of confining pressure and fracture inclination on mechanical behavior of granite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(3): 578-586.

[4] 腾俊洋, 唐建新, 张闯. 层状含水页岩的抗拉强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1317-1326.
TENG Jun-yang, TANG Jian-xin, ZHANG Chuang. Experimental study on tensile strength of layered water-bearing shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1317-1326.

[5] 夏磊, 姚劲松, 蒋磊. 层理特性对层状岩体剪切力学特性的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 37-43, 69.
XIA Lei, YAO Jin-song, JIANG Lei. Influence of bedding plane characteristics on the shear mechanical properties of layered rock masses[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2020, 18(1): 37-43, 69.

[6] 王培涛, 黄正均, 任奋华, 等. 基于 3D 打印的含复杂节理岩石直剪特性及破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 46-56.
WANG Pei-tao, HUANG Zheng-jun, REN Fen-hua, et al. Research on direct shear behaviour and fracture patterns of 3D-printed complex jointed rock models[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(1): 46-56.

[7] 王刚, 刘廷方, 王长盛, 等. 贯通型标准 JRC 双节理剪切力学及声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(3): 500-509.
WANG Gang, LIU Ting-fang, WANG Chang-sheng, et al. Shear mechanics and acoustic emission characteristics of penetrating standard JRC double joints[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(3): 500-509.

[8] 韦婕, 陈跃都, 梁卫国. 超临界 CO_2 作用下煤体结构面剪切硬化特征与本构模型[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4487-4498.
WEI Jie, CHEN Yue-du, LIANG Wei-guo. Shear hardening characteristics and constitutive model of coal structural plane after supercritical CO_2 soaking[J]. **Journal of China Coal Society**, 2023, 48(12): 4487-4498.

[9] BARTON N R, BANDIS S. Effects of block size on the shear behavior of jointed rock[C]//ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. [S. l.]: ARMA, 1982.

[10] FAN W C, CAO P, TANG G D. Experimental and Numerical Study on the damage evolution of random rock Joint surface during direct shear under CNL condition[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2019, 37(8): 975-983.

[11] NGUYEN V M, KONIETZKY H, FRÜHWIRT T. New methodology to characterize shear behavior of joints by combination of direct shear box testing and numerical simulations[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2014, 32: 829-846.

[12] ZHANG J W, CHEN Y L, CHEN J H, et al. Investigation of mechanical behavior, AE and EMR characteristics of rocks under compression-shear loading via variable-angle shear tests[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2023, 217: 105197.

[13] LIU Z, SHAO J, ZHA W, et al. Shear strength of interface

between high-performance concrete and claystone in the context of a French radioactive waste repository project[J]. **Géotechnique**, 2021, 71(6): 534-547.

[14] TIAN Y C, LIU Q S, MA H, et al. New peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. **Engineering Geology**, 2018, 233: 269-280.

[15] WANG Z, GU L, ZHANG Q, et al. Influence of initial stress and deformation states on the shear creep behavior of rock discontinuities with different joint roughness coefficients[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(11): 5923-5936.

[16] KLEEPMEK M, KHAMRAT S, THONGPRAPHA T, et al. Displacement velocity effects on rock fracture shear strengths[J]. **Journal of Structural Geology**, 2016, 90: 48-60.

[17] DANG W, KONIETZKY H, FRÜHWIRT T, et al. Cyclic frictional responses of planar joints under cyclic normal load conditions: laboratory tests and numerical simulations[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 337-364.

[18] 孙杰豪, 郭保华, 田世轩, 等. 基于声发射特征参数的砂岩节理直剪破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 167-177.
SUN Jie-hao, GUO Bao-hua, TIAN Shi-xuan, et al. Experimental study of direct shear failure characteristics of sandstone joints based on characteristic parameters of acoustic emission[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 167-177.

[19] 孙杰豪, 郭保华, 程胜锦, 等. 不同控制方式和卸荷应力路径下类岩石节理剪切强度特征研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2061-2071, 2116.
SUN Jie-hao, GUO Bao-hua, CHENG Sheng-jin, et al. Shear strength characteristics of rock-like joints in different control modes and unloading stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 2061-2071, 2116.

[20] 晏先震, 白海波, 翟明磊. 不同层理倾角页岩的超声波传播特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 2): 552-559.
YAN Xian-zhen, BAI Hai-bo, ZHAI Ming-lei. Experimental study on ultrasonic characteristics of shale rock with different bedding angle under uniaxial loading[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2021, 17(Suppl. 2): 552-559.

[21] OH H, WANG X, WU M, et al. A simplified log creep model for describing triaxial creep of mélange rocks[J]. **Heliyon**, 2023, 9(6): e17529.

[22] SHANG D L, CHEN Y D, ZHAO Z H, et al. Mechanical behavior and acoustic emission characteristics of intact granite undergoing direct shear[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2021, 245: 107581.

[23] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609-616.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 609-616.

[24] FENG X T, KONG R, YANG C, et al. A three-dimensional failure criterion for hard rocks under true triaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 103-111.