

三轴荷载下深部裂隙砂岩力学行为及损伤特性分析

胡华瑞¹, 刘仕威², 汪文德³, 王浩明⁴, 张洋凯^{5,6}

1. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060;
2. 湖南辰州矿业有限责任公司, 湖南 怀化 419600;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004;
4. 江西铜业股份有限公司, 江西 南昌 330000;
5. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458;
6. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 隧道掘进机及智能运维全国重点实验室, 河南 郑州 450001

中图分类号: TD313 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)02-0014-08

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2025.02.002

摘要 深部岩石损伤破坏特征与浅部具有显著差异, 探究深部复杂应力环境下裂隙砂岩力学规律有助于深部工程安全实施。以含不同角度裂隙砂岩试样为研究对象, 开展了三轴压缩力学实验, 分析了裂隙砂岩基础力学性质演化规律, 借助能量耗散理论阐明了裂隙对试样力学性质的影响规律。研究表明: 含不同裂隙角度砂岩轴向应力应变演化规律均呈倒“V”形先增大后减小规律变化; 径向应力应变曲线呈先增大后缓慢减小规律变化, 峰后阶表现出类似屈服平台特征; 试样破坏时轴向变形程度较径向变形大, 且总体上两者随着裂隙角度增大而增大。随着裂隙角度的增大, 试样峰值强度和弹性模量均线性增大, 但增加幅度先减小后增大, 随着角度从 0° 到 30°、45°、60° 和 90° 依次增大, 相邻试样强度后者较前者依次增加 8.58%、3.16%、1.34% 和 15.12%, 弹性模量依次增加 5.46%、0.07%、3.13% 和 3.74%。不同试样吸收总能量、弹性能和耗散能变化规律基本一致, 总能量和弹性能较耗散能增长快, 试样破坏前耗散能快速增大; 定义了储能系数和耗能系数, 随着试样角度从 0° 到 30°、45°、60° 和 90° 依次增大, 储能系数从 0.615 依次增至 0.618、0.642、0.662、0.712, 耗能系数从 0.159 依次减小至 0.153、0.142、0.139、0.127, 证明试样强度越大, 储能系数越大, 耗能系数越小, 试样抵抗变形的能力越强。

关键词 三轴压缩实验; 深部裂隙砂岩; 能量耗散; 裂隙角度; 力学性质

引言

深部资源开发、隧道掘进和能源存储等地下岩石工程中, 围岩处于高应力状态下, 受地下工程开挖扰动影响, 其力学性质容易劣化, 威胁地下工程安全^[1-3]。此外, 深部岩石由于受力环境复杂, 与浅部岩石损伤破坏规律存在显著差异, 依赖于室内实验构建的传统浅部岩石力学理论难以准确揭示深部岩石力学破坏现象^[6-8]。准确认识岩石在深部应力环境下的损伤破坏行为是确保地下工程安全的核心之一。

学者们对深部岩石力学行为演化规律进行了广泛研究, 并取得了系列研究成果。谢和平院士^[9-11]通过系列实验和理论分析, 研究了不同深度、不同种类等条件下岩石的力学性质, 发现岩石在不同深度表现出脆性和延性相互转化、应变硬化和应变软化等特征, 与浅部岩石力学特性表现出明显差异。郑可跃^[12]通

过理论研究, 分析了深部高应力隧道开挖过程中围岩损伤破坏规律, 发现深部岩石弹塑性变化的本质是能量耗散驱动所致。云丽^[13]通过三轴压缩实验, 结合能量耗散理论, 探究了花岗岩损伤破坏规律, 发现破坏过程中弹性能与耗散能存在明显转化。陶明^[14]分析了深部应力环境下, 应力梯度对岩石力学性质的影响, 研究发现应力路径对岩石力学特征具有显著影响。众多研究表明岩石在深部展现的力学性质有别于浅部, 利用浅部岩石力学特性获得的研究结论, 无法解释深部岩石力学行为^[15-17]。岩石作为一种天然含裂隙材料, 裂隙对其力学性质的影响不可忽视, 王苏生^[18]借助相场法, 模拟分析了含 30° 和 60° 裂隙黄砂岩试样单轴压缩时损伤破坏特性, 探明了试样张拉、剪切和混合裂纹萌生、扩展演化规律。YU^[19]借助室内实验和数值模拟分析了应力方向对裂隙岩体破裂行为的影响机制, 明确了裂纹演化对岩石力学性质的影响。GUO^[20]

收稿日期: 2025-02-15

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划项目(GZB20230451); 中国博士后科学基金资助项目(2024T170578); 中铁隧道集团科技创新计划项目(隧研合 2024-06); 中国中铁科研开发计划项目(2025-重大-16)

作者简介: 胡华瑞(1991—), 男, 湖北天门人, 博士, 助理研究员, 主要从事深部岩石扰动力学方面研究工作, E-mail: hhrui1004@163.com。

结合实验研究, 分析了单裂隙砂岩和双裂隙砂岩在静载和动载下的损伤特性, 发现裂缝参数对岩石损伤阈值存在影响。HU^[21-22] 通过室内实验研究了裂缝角度对砂岩力学性质的影响, 发现裂缝角度对试样力学性质影响显著。综上可知, 不同埋深条件下岩石表现出不同的力学特性, 特别是围压作用限制岩石侧向变形, 试样破坏形态与单轴压缩状态下存在明显区别^[23-26], 而岩石作为一种含裂隙的天然材料, 现有研究通常以完整岩石研究深部岩石力学性质, 忽略了裂隙角度对其力学性质的影响规律, 无法真实揭示岩石破裂行为演化特征。

基于此, 为模拟岩石深部受力环境, 以含预制裂缝试样为对象, 设计了三轴压缩实验。根据岩石力学理论和能量耗散原理, 探讨了含不同角度砂岩试样基础力学性质变化规律和能量演化规律, 并简要分析了岩石力学特性变化与裂缝角度之间的关系, 进一步揭示深部岩石变形破坏本质。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

本实验在高温高压岩石三轴测试系统(GCTS RTX-3000)上进行, 如图 1 所示。该实验系统主要由数据采集系统、压力控制系统和测试系统组成。实验开始前, 预先在数据采集系统设定好实验加载路径和参数, 实验时由压力控制系统向试样施加或者卸载轴向和径向压力, 试样变形和力等数据通过轴向和环向传感器测得, 实验系统的主要参数如表 1 所示。

1.2 实验方法

试样均取自同一块质地均匀的岩块, 经切割打磨后制备成规格为 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱, 圆柱

表 1 设备参数
Table 1 Equipment parameters

名称	参数	名称	参数
轴压	$\leq 3\,000\text{ kN}$	围压	$\leq 210\text{ MPa}$
轴向/侧向变形	$\pm 6\text{ mm}$	测试精度	0.5%

试样端面平整度保持在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 内以符合国际岩石力学学会实验标准。通过线切割方法在试样中心预制长为 15 mm 、宽为 0.5 mm 的贯穿裂缝, 裂缝角度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° , 如图 2a 所示。

根据现有研究获得的地应力参数, 本实验研究设置围压为 15 MPa 以模拟深部应力环境^[8]。加载步骤如下: 首先, 以 1 MPa/min 的速率将轴压和围压同时加载至 15 MPa ; 然后, 保持围压恒定, 引伸计读数清零; 以 0.1 mm/min 的速率采用位移控制方法增大轴向应力, 直至试样破坏。应力加载路径如图 2b 所示。

1.3 能量计算方法

实验过程中, 试样受到外部应力作用, 就能量耗散角度而言, 表现为对试样做功, 此时试样从外部吸入能量, 试样破裂时需要消耗能量, 此外有部分能量以弹性能的形式保存在试样内部。

根据热力学定律, 实验过程中能量守恒, 岩石吸入总能量、耗散能和弹性能之间存在如下关系^[22]:

$$U = U_e + U_d \tag{1}$$

式中: U 、 U_e 和 U_d 分别为吸入总能量、弹性能和耗散能, MJ/m^3 , e 、 d 分别为弹性能和耗散能缩写。

试样的能量在数值上等于应力应变曲线与坐标轴围成的面积, 如图 3 所示, $OABO$ 围成的面积值为吸收总能量, S_1 面积值为耗散能, S_2 面积值为弹性能。

以轴向应力应变曲线为例^[21],

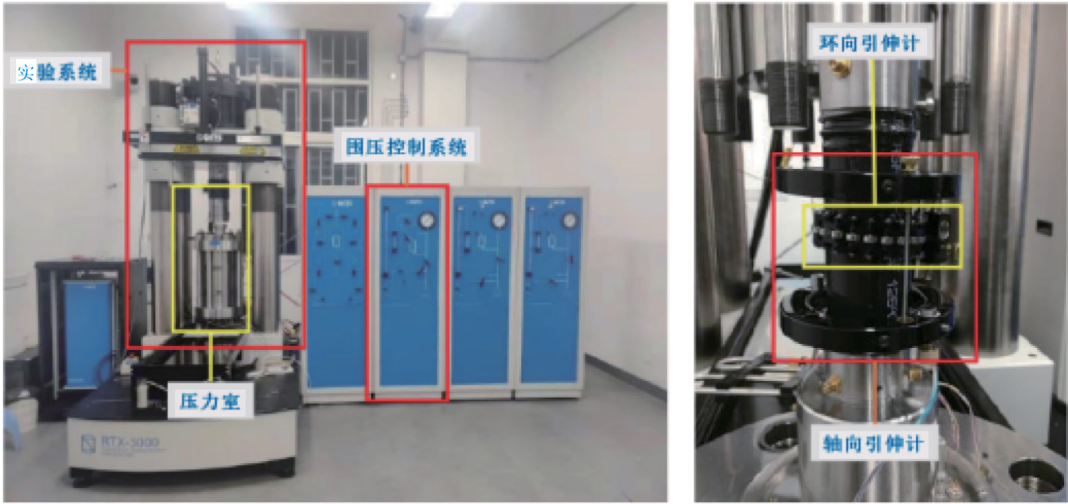


图 1 实验系统
Fig. 1 Diagram of the test system

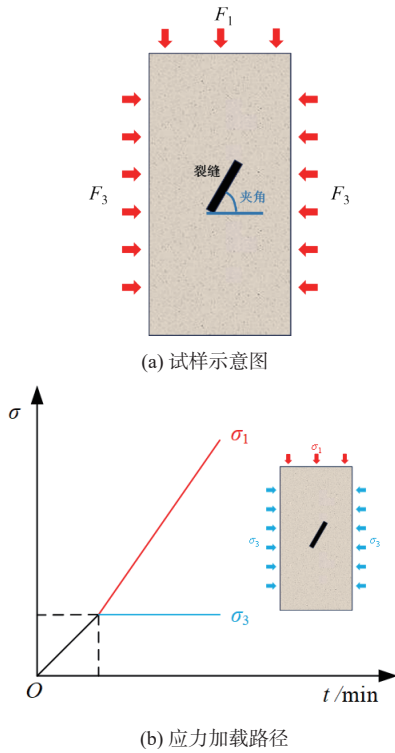


图2 试样和加载路径
Fig. 2 Sample and loading path

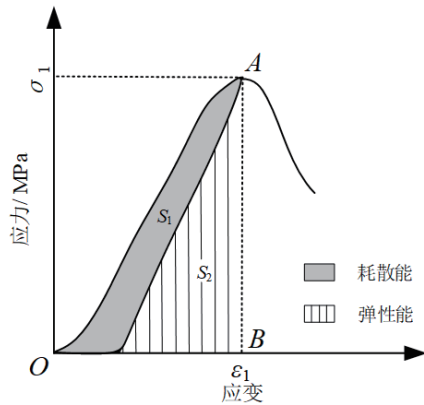


图3 试样能量计算
Fig. 3 Energy calculation diagram of the sample

$$U_1 = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (2)$$

式中: ε_1 是 t 时的应变。

同理, 可计算得出环向吸收能量:

$$U_3 = \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (3)$$

式中: ε_3 是 t 时的应变。

则实验过程中试样吸收总能量为:

$$U = U_1 + 2U_3 + U_0 \quad (4)$$

式中: U_0 是静水压力阶段试样吸收的能量, MJ/m^3 。

$$U_0 = 3(1-2\mu)\sigma_3^2/2E \quad (5)$$

本实验中, 试样弹性能可通过下式计算:

$$U_e = \sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)/2E \quad (6)$$

则耗散能为:

$$U_d = U - U_e \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 应力应变曲线

实验初期为还原深部应力环境将轴向和围压应力增加至 15 MPa, 本文重点分析轴向应力大于围压后阶段试样的力学性质, 含不同角度裂隙试样的应力应变曲线如图 4 所示, 其中图 4a 和图 4b 分别展现了径向和环向应变变化规律, 横坐标为试样变形程度, 纵坐标为偏应力。

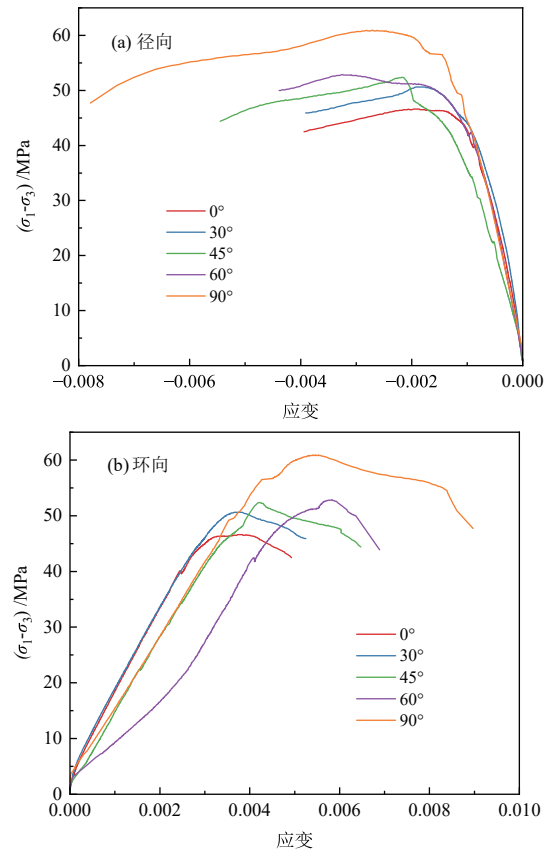


图4 应力应变曲线变化规律
Fig. 4 Change law of stress-strain curve

如图 4 所示, 含不同角度裂隙试样的轴向应力应变曲线变化规律基本一致, 均呈倒“V”型, 呈现先增大后减小规律变化; 而径向应力应变曲线呈现先增大后缓慢减小的趋势变化, 在峰后阶段表现出近似屈服平台特征。由于实验开始时将轴压和围压增加至 15 MPa 期间, 试样逐渐被压缩, 故在应力应变曲线中试样内部裂缝闭合阶段不明显, 该阶段曲线上凹, 因此展现出加载初期应力应变曲线发生不明显上凹的现象; 随后应力应变曲线进入弹性变形阶段, 但裂缝角度为

60°试样进入本阶段时间较晚;然后试样进入微破裂稳定发展阶段,试样内部出现裂纹,应力应变曲线出现跌落后又上升的波动特征,紧接着试样内部裂纹快速增多,直至应力达到峰值试样破坏;峰后应力应变曲线逐渐跌落并有一定残余强度,本文主要关注峰前阶段试样力学变化规律,峰后阶段岩石的力学性质本文不再详细阐述。

从图中可知,试样破坏前,在同等轴向应力作用下,预制裂缝角度越大,试样轴向应变越大。裂缝角度为45°、60°和90°试样轴向变形程度明显大于裂缝角度为0°和30°试样,其中裂缝角度为60°试样变形最明显,这是由于该试样内部裂缝更多,经历裂缝压密时间更长,在试样进入弹性变形阶段时产生了较大得变形。当试样轴向被压缩时,会向外侧膨胀,但是围压限制了侧向膨胀,试样侧向变形整体较小,且不同角度试样变化规律基本一致,其中裂缝角度为45°试样径向变形较其他试样更大。当试样达到峰值应力时,随着裂缝角度的增加,试样对应的轴向和径向变形量越大,如表2所示,虽然裂缝角度为90°变形量较角度为60°试样在峰值应力处变形小,但试样临破坏时含90°裂缝试样比含60°裂缝试样变形量明显更大,前者轴向最大变形为0.00864 mm,后者为0.00633 mm。

表2 不同试样破坏时变形量

Table 2 Deformation of different samples during failure

裂缝角度/ $^{\circ}$	轴向应变 ε_1 /%	径向应变 ε_3 /%	轴向最大变形/mm
0	0.373	-0.186	0.00373
30	0.384	-0.191	0.00384
45	0.422	-0.217	0.00422
60	0.583	-0.320	0.00633
90	0.546	-0.281	0.00864

2.2 弹性模量变化

岩石的强度是力学性质最重要的性质之一。含0°、30°、45°、60°和90°裂隙试样的强度分别为46.6 MPa、50.6 MPa、52.2 MPa、52.9 MPa和60.9 MPa,如图5所示。随着裂缝角度的增加,对应试样强度较前者高8.58%、3.16%、1.34%和15.12%。由此可见,裂缝角度从0°增加至30°和60°增加至90°时,试样强度变化更明显,而裂缝角度从30°增加至60°,试样强度变化很小。通过拟合数据发现,试样强度与裂缝角度呈线性相关性。

弹性模量是表征材料力学性能的关键参数。通过应力应变曲线弹性变形阶段的斜率,可计算出试样的弹性模量。含0°、30°、45°、60°和90°裂隙试样的弹性模量分别为13.01 GPa、13.72 GPa、13.73 GPa、14.16 GPa和14.69 GPa,如图6所示。随着裂缝角度的增加,对

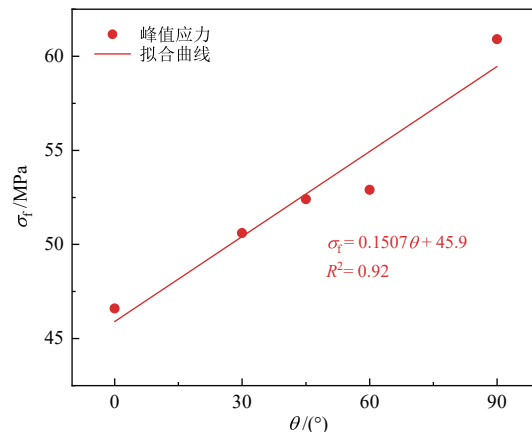


图5 试样强度变化规律

Fig. 5 Variation rule of sample strength

应试样弹性模量较前者高5.46%、0.07%、3.13%和3.74%。由此可见,裂缝角度对试样弹性模量影响不大,因此不同角度试样应力应变曲线弹性阶段几乎平行。此外,数据拟合分析结果表明:试样弹性模量与裂缝角度呈线性相关。

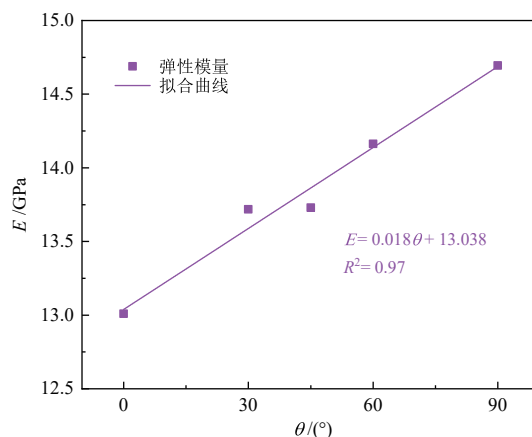


图6 试样弹性模量变化规律

Fig. 6 Variation law of elastic modulus of samples

通过上述分析可知,试样的峰值强度和弹性模量与试样裂缝角度存在较强的正线性关系。此外,岩石材料弹性模量的数值反映了其抵抗变形的能力,从数值变化上可以看出,裂缝角度越大,岩石强度越高,这也揭示了预制裂缝角度越大,相应试样抗压强度越高的原因。

2.3 能量演化特征

试样的能量演化本质上反映了试样的损伤破坏过程。计算各试样的吸收总能量、弹性能和耗散能,三种能量的演化规律基本一致。试样的能量演化典型特征如图7所示,展示了裂缝角度为0°试样的能量演化规律。从图中可知,随着加载的进行,试样吸收总能量、弹性能和耗散能均逐渐增大,但实验前期试样吸收总能量和弹性能增长速度明显较耗散能快,耗

散能几乎呈水平缓慢增长,这是因为静水压力阶段,轴压和围压增加至预定压力过程中,试样内部部分裂缝被压缩,所以用于试样裂缝扩展演化的耗散能变化不明显。由于试样内部存在裂纹,裂纹被压缩消耗能量,因此初期耗散能大于弹性能,待试样被压密后,进入弹性应变阶段,此时弹性能大于耗散能;当试样进入微破裂稳定发展阶段,弹性能增长变缓,耗散能增长速率明显增大,表明试样损伤程度越来越高。整体而言,耗散能的演化规律反映了岩石损伤破坏程度,整体上呈现先缓慢增加后急速增长变化,这与应力应变曲线呈现的岩石损伤破坏规律一致。

为进一步探究不同类型能量之间的演化规律,分

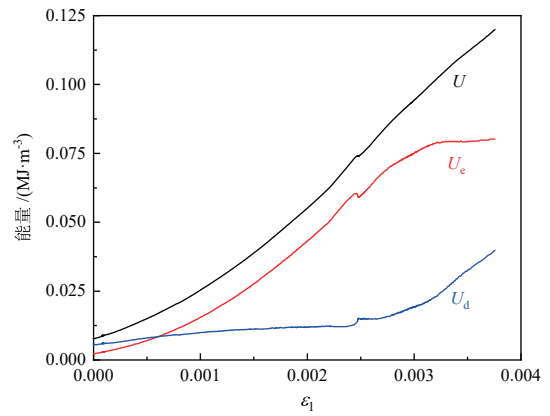


图7 不同种类能量演化

Fig. 7 Evolution of different kinds of energy

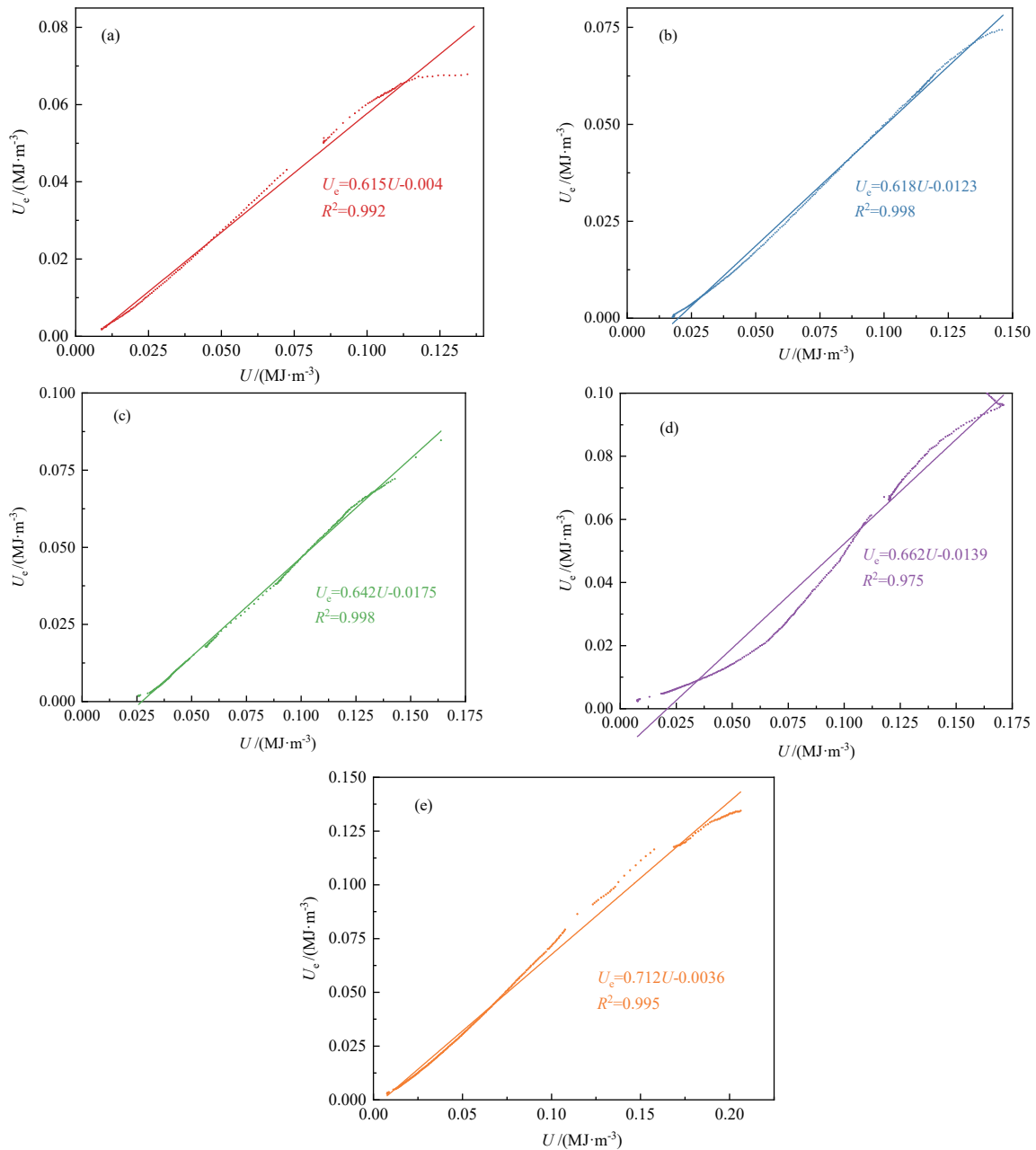


图8 含不同角度裂缝试样弹性能与总能量关系

Fig. 8 Relation between elastic energy and total energy of specimens with cracks at different angles

析了弹性能和吸收总能量之间的关系,如图8所示。拟合发现弹性能和总能量之间存在较强的线性相关性,表明弹性能随着总能量的增加线性增加。

弹性能与总能量拟合关系式可用式(8)表示:

$$U_e = k_e a_e + b_e \quad (8)$$

同理可得耗散能与总能量拟合关系式:

$$U_d = k_d a_d + b_d \quad (9)$$

由于 b_e 和 b_d 远小于 k_e 和 k_d ,可忽略 b_e 和 b_d 对式(8)(9)的影响,则式(8)、(9)可改写为 $U = ka$ 的形式。据此,定义 k_e 和 k_d 分别为储能系数和耗能系数,分析表明含 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 裂隙试样储能系数分别为0.615、0.618、0.642、0.662和0.712,耗能系数分别为0.159、0.153、0.142、0.139和0.127。结合不同试样峰值强度变化规律可知,试样的储能系数越高、耗能系数越低,试样的强度也越高,表明试样抵抗外力变形的能力也越强,这也解释了裂缝角度越大试样强度越高。

为进一步探究不同类型能量与试样裂缝角度的关系(图9),拟合分析了试样达到峰值应力时弹性能、耗散能和吸收总能量与裂缝角度的关系(见图9),如图9所示,发现各类型能量与裂缝角度呈线性相关性。进一步说明随着试样裂缝角度的增大试样强度增大。

3 结论

(1)试样裂缝角度大小对其应力应变演化规律影响不显著,不同试样轴向应力应变曲线变化规律基本一致,均呈倒“V”形先增大后减小变化;而径向应力应变曲线呈先增大后缓慢减小趋势变化,表现出屈服特征。受侧向围压左右,试样径向变形较轴向变形小,但两者均随着裂缝角度的增大而增大,轴向应变由0.37%增大至0.86%、径向应变由0.19%增大至0.32%。

(2)随着裂缝角度从 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 依次增大,试样峰值强度逐渐增大,弹性模量也逐渐增大,两者均与裂缝角度呈线性相关,但从 0° 增加至 30° 和 60° 增加至 90° 时,试样强度和弹性模量较从 30° 增加至 60° 时更显著,即从 0° 到 30° 、 45° 、 60° 和 90° 裂隙试样强度依次增加8.58%、3.16%、1.34%和15.12%,弹性模量依次增加5.46%、0.07%、3.13%和3.74%。

(3)不同试样吸收总能量、弹性能和耗散能变化规律基本一致,前两者较后者增长速率快,但试样破坏前耗散能迅速增加。根据弹性能和耗散能与总能量关系定义了储能系数和耗能系数,含 0° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 裂隙试样储能系数分别为0.615、0.618、0.642、0.662和0.712,耗能系数分别为0.159、0.153、0.142、0.139和0.127,表明试样强度越大时储能系数越高,耗能系数越小,从能量耗散角度揭示了试样强

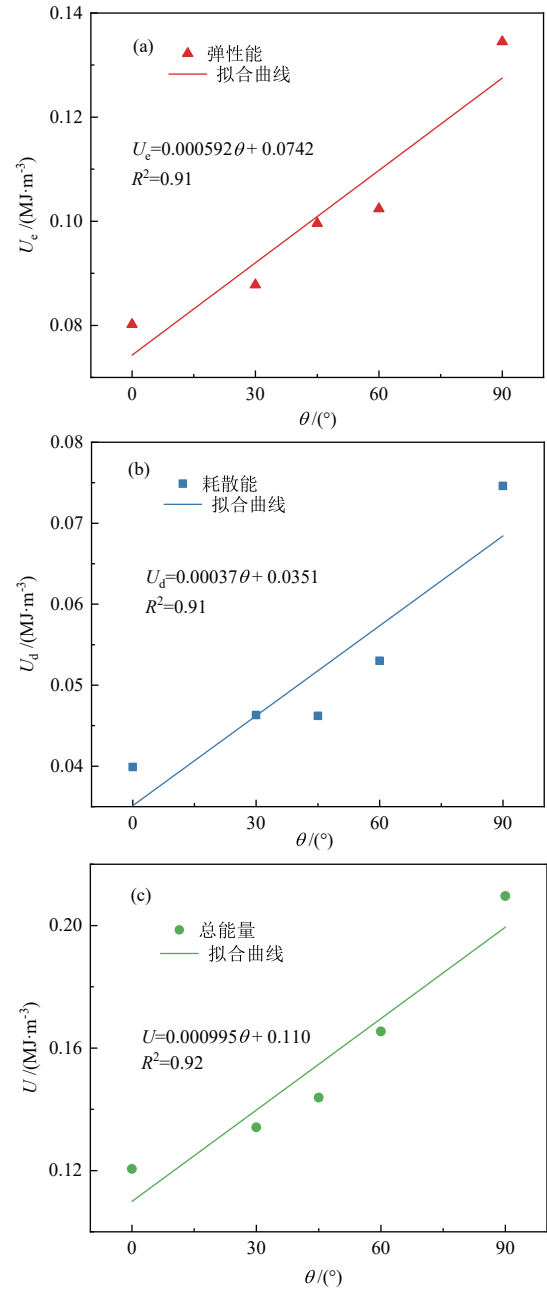


图9 不同类型能量与裂缝角度关系

Fig. 9 Relationship between different types of energy and crack angle

度变化规律。

参考文献:

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE H P. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 夏开文, 姚伟, 付岩, 等. 深部岩石动力学 SHPB 实验研究进展[J]. 工程爆破, 2024, 30(5): 29-44.
XIA K W, YAO W, FU Y, et al. Advances on dynamic behaviors of deep rocks using SHPB[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5): 29-44.
- [3] 何满潮, 武毅艺, 高玉兵, 等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报,

- 2024, 49(1): 75–99.
- HE M C, WU Y Y, GAO Y B, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75–99.
- [4] 李占金, 刘紫琼, 李群, 等. 高应力条件下深部巷道受循环扰动诱发岩爆特征试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(1): 1–8.
- LI Z J, LIU Z Q, LI Q, et al. Experimental study on rock burst characteristics induced by cyclic disturbance in deep tunnels under high-stress conditions[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(1): 1–8.
- [5] 卢宏建, 梁鹏, 顾乃满, 等. 多次开挖扰动下采空区围岩应力演化数值模拟[J]. 矿产保护与利用, 2016(6): 17–20.
- LU H J, LIANG P, GU N M, et al. Stress evolution numerical simulation of goaf surrounding rock under repetitious excavation disturbance[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016(6): 17–20.
- [6] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[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.
- [7] 张良, 王来贵, REN T, 等. 强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 47–59.
- ZHANG L, WANG L G, REN T, et al. Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 47–59.
- [8] 刘造保, 王川, 周宏源, 等. 岩石高温高压两刚一柔型真三轴时效力学试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2477–2486.
- LIU Z B, WANG C, ZHOU H Y, et al. A true triaxial time-dependent test system with two rigid and one flexible loading frame for rock under real-time high temperature and high pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2477–2486.
- [9] 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 701–715.
- XIE H P, GAO M Z, FU C H, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 701–715.
- [10] 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959–3978.
- XIE H P, ZHANG R, ZHANG Z T, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959–3978.
- [11] 张茹, 张安林, 谢和平, 等. 不同赋存深度岩石力学行为差异及本构模型研究[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 1008–1015.
- ZHANG R, ZHANG A L, XIE H P, et al. Mechanical behavior differences and constitutive model of rock at different depths[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 1008–1015.
- [12] 郑可跃, 施成华, 姜义黎, 等. 深部高地应力隧道开挖卸荷围岩能量计算方法及演化机制[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 165–177.
- ZHENG K Y, SHI C H, LOU Y L, et al. Calculation method and evolution mechanism of surrounding rock energy during excavation unloading of deep tunnels in high in-situ stress field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 165–177.
- [13] 云丽, 张志龙, 刘洋, 等. 深部高应力下花岗岩力学损伤的孔隙水压影响[J]. 实验室研究与探索, 2025, 44(1): 158–163.
- YUN L, ZHANG Z L, LIU Y, et al. Effect of pore water pressure on mechanical damage of granite under deep high stress[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2025, 44(1): 158–163.
- [14] 陶明, 吴星宇, 赵瑞, 等. 岩体应力梯度力学特性研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(12): 4473–4492.
- TAO M, WU X Y, ZHAO R, et al. Advancements and future prospects of mechanical characteristics of rock stress gradients[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(12): 4473–4492.
- [15] 罗勇, 宫凤强. 深部硬岩巷道围岩板裂破坏试验研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 46–60.
- LUO Y, GONG F Q. Research progress and prospect of laboratory test of rock spalling in deep hard rock roadway[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 46–60.
- [16] 张广超, 周泽森, 周广磊, 等. 基于亚临界裂纹扩展的岩石蠕变-冲击变形破裂特征研究[J/OL]. 煤炭学报, 1-16[2025-01-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1357>.
- ZHANG G C, ZHOU Z S, ZHOU G L, et al. Deformation and fracture characteristics of rock under creep-impact loading based on subcritical crack growth [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-16[2025-01-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1357>.
- [17] 邵陆航, 康志强, 辛东夫, 等. 深部片麻岩破坏全过程声发射时频域信号特征及前兆预警研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 15–21.
- SHAO L H, KANG Z Q, XIN D F, et al. Study on the time frequency domain signal characteristics and precursor early warning of acoustic emission in deep gneiss failure[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(2): 15–21.
- [18] 王苏生, 杨圣奇, 田文岭, 等. 预制裂隙岩石裂纹扩展相场模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(2): 365–377.
- WANG S S, YANG S Q, TIAN W L, et al. Research on phase-field simulation method of crack propagation of rock with pre-existing fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(2): 365–377.
- [19] YU X J, YANG Y P, LI X F, et al. Cracking formation and evolution in surrounding rock of a deep fractured rock mass roadway: A study of the 790 m level segment engineering at the Jinchuan Mine, China[J]. Engineering Geology, 2024, 331: 107431.
- [20] GUO Y J, XIONG Z M, LI Z H, et al. Damage behavior study of specimens with double-prefabricated cracks under dynamic-static coupling loads[J]. Buildings, 2023, 13(11): 2793.
- [21] HU H R, XIA B W, LUO Y F, et al. Effect of crack angle and length on mechanical and ultrasonic properties for the single cracked sandstone under triaxial stress loading-unloading[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 900238.
- [22] HU H R, LU Y Y, XIA B W, et al. Damage characteristics of sandstone with different crack angles subjected to true triaxial cyclic loading and unloading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 121: 103444.
- [23] 李艳, 杨宇冰, 梁文彪, 等. 围压对花岗岩强度特性与脆性的影响及其表征[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(5): 1528–1540.
- LI Y, YANG Y B, LIANG W B, et al. Influence of confining pressure on strength characteristics and brittleness of granite and its characterization[J]. Chinese Journal of Underground Space and

- Engineering, 2024, 20(5): 1528–1540.
- [24] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16): 2803–2813.
- HE M C, XIE H P, PENG S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16): 2803–2813.
- [25] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846–866.
- LI X B, GONG F Q. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static–dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846–866.
- [26] 韩震宇, 李地元, 朱泉企, 等. 含端部裂隙大理岩单轴压缩破坏及能量耗散特性[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1588–1596.
- HAN Z Y, LI D Y, ZHU Q Q, et al. Uniaxial compression failure and energy dissipation of marble specimens with flaws at the end surface[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1588–1596.

Analysis of Mechanical Behavior and Damage Characteristics of Fractured Sandstone under Triaxial Stress Load

HU Huarui¹, LIU Shiwei², WANG Wende³, WANG Haoming⁴, ZHANG Yangkai^{5,6}

1. Institute of Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

2. Hunan Chenzhou Mining Co., LTD., Huaihua 419600, Hunan, China;

3. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, Hunan, China;

4. Jiangxi Copper Co., LTD., Nanchang 330000, Jiangxi, China;

5. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, Guangdong, China;

6. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operations, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract: The damage and failure characteristics of deep rock are significantly different from those of shallow rock. Investigating the mechanical behavior of fractured sandstone under complex stress environments is crucial for ensuring the safe implementation of deep underground engineering projects. Taking sandstone samples with cracks of different angles as research objects, triaxial compressive mechanical experiments were carried out. The evolution law of the mechanical properties of the fractured sandstone foundation was analyzed, and the influence law of the crack on the mechanical properties of the sample was explored by means of the energy dissipation theory. The results show that the crack angle has little effect on the deformation and failure law of the sample, and the axial stress–strain evolution law of sandstone with different crack angles shows an inverted "V" shape, first increasing and then decreasing. The radial stress–strain curve increases at first and then decreases slowly. The post–peak stage shows a similar yield platform, with the maximum axial and radial strain being 0.86% and 0.32%, and the minimum strain being 0.37% and 0.19%, respectively. The axial deformation degree of the specimen is larger than that of the radial deformation, and the axial deformation degree increases with the increase of the crack angle. Both peak strength and elastic modulus exhibited linear growth with the increase of crack angle, the peak strength and elastic modulus of the sample increase linearly, but the increase amplitude decreases first and then increases. As the angle increases from 0° to 30°, 45°, 60° and 90°, the strength of adjacent samples increased successively in the latter compared with the former by 8.58%, 3.16%, 1.34% and 15.12%, and the elastic modulus increases by 5.46%, 0.07%, 3.13% and 3.74%. The changes of total energy, elastic energy and dissipative energy of different samples are basically the same. Energy analysis revealed consistent trends across specimens: total energy and elastic energy accumulated faster than dissipative energy, with rapid dissipation energy growth preceding failure. Defined energy parameters showed that the energy storage coefficient progressively increased (0.615, 0.618, 0.642, 0.662, 0.712) while the energy dissipation coefficient decreased (0.159, 0.153, 0.142, 0.139, 0.127) with the angle increases from 0°, 30°, 45°, 60°, and 90°. This inverse relationship demonstrates that specimens with higher strength possess greater energy storage capacity, reduced energy dissipation, and enhanced deformation resistance.

Keywords: triaxial compression test; deep fractured sandstone; energy dissipation; crack angle; mechanical properties

引用格式: 胡华瑞, 刘仕威, 汪文德, 王浩明, 张洋凯. 三轴荷载下深部裂隙砂岩力学行为及损伤特性分析[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(2): 14–21.

HU Huarui, LIU Shiwei, WANG Wende, WANG Haoming, ZHANG Yangkai. Analysis of mechanical behavior and damage characteristics of fractured sandstone under triaxial stress load[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2): 14–21.