含水状态对裂隙砂岩力学特性与能量演化的影响*

郭世祥[1],杨达明[1,2],于秋鸽[3],孟晗[1]

(1.河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸市 056038;
2.河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作市 454003;
3.中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为揭示含水条件下裂隙砂岩的力学特性及能量演化规律,以鄂尔多斯某矿砂岩为研究对象,采用微机控制煤岩刚性冲击试验系统开展单轴压缩试验。试验考虑了自然与饱水两种状态,以及不同裂隙倾角(0°、30°、60°、90°),分析了裂隙砂岩的全应力-应变曲线、物理力学参数、能量演化规律及裂纹扩展特征。结果表明:与完整砂岩相比,含裂隙倾角砂岩的峰值强度和弹性模量较完整试验均有明显下降;自然状态下试样吸收的总能量(196~317 kJ/m^3)约为饱水状态(102~176 kJ/m^3)的1.85倍,且总能量随裂隙倾角增大而增加。在能量演化方面,损伤平稳阶段弹性应变能占比达92%以上,加速损伤阶段则降至61.5%以下,耗散能占比则相反。试验的破坏模式具有显著各向异性,水的劣化作用使起裂应力降低13.43%~18.18%,并使岩块剥落现象增多。裂隙倾角和含水状态是控制砂岩力学特性、能量演化和破坏模式的关键因素,研究结果可为富水裂隙岩体工程的稳定性控制提供理论依据。

关键词:饱水状态;裂隙砂岩;单轴压缩;能量演化;破坏模式

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0149-13

Influence of Water-Bearing State on Mechanical Properties and Energy Evolution of Fractured Sandstone

GUO Shixiang[1], *YANG Daming*[1,2], *YU Qiuge*[3], *MENG Han*[1]

(1.School of Mining and Surveying Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2.School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3.CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties and energy evolution laws of fractured sandstone under water-bearing conditions, uniaxial compression tests were conducted using a microcomputer-controlled coal-rock rigid impact testing system on sandstone specimens collected from a mine in Ordos. The tests considered both natural and saturated states, as well as different fracture inclination angles (0°, 30°, 60°, 90°). The full stress-strain curves, physical and mechanical parameters, energy evolution laws, and crack propagation behavior of fractured sandstone were analyzed. The results show that compared with intact sandstone, the peak strength and elastic modulus of sandstone with pre-existing fractures are significantly reduced. The total energy absorbed by the specimens under natural states (196-317 kJ/m^3) is approximately 1.85 times that under saturated states (102-176 kJ/m^3), and the total energy increases as the fracture inclination angle increases. Regarding energy evolution, the proportion of elastic strain energy exceeds 92% during the stable damage stage, while it drops to below 61.5% during the accelerated damage stage, with the proportion of dissipated energy which shows the opposite trend. The failure mode of the specimens exhibits significant anisotropy, and the deterioration effect of water reduces the initiation stress by 13.43% to 18.18%, while also increasing the occurrence of rock spalling. Fracture inclination angle and water-bearing state are key factors controlling the mechanical properties, energy evolution, and failure mode of sandstone. The research findings can provide a theoretical basis for the stability control of water-rich fractured rock mass engineering.

Key words: Saturated state, Fractured sandstone, Uniaxial compression, Energy evolution, Failure mode

---

* **收稿日期**:2025-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104081);河北省自然科学基金资助项目(E2022402031);河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023080)

作者简介:郭世祥(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事矿山压力及岩层控制方面的研究。E-mail:1823431845@qq.com

通信作者:杨达明(1992—),男,河南新乡人,博士,副教授,主要从事开采损害与环境保护、矿山压力及岩层控制方面的研究。E-mail:438328609@qq.com

0 引言

随着矿产资源开采不断向深部推进,复杂地质环境引发的采矿工程问题愈发凸显。断层分布、软岩遇水易变形以及高水压作用等问题,对巷道稳定与采场安全构成了严峻挑战。鄂尔多斯矿区作为我国重要的煤炭生产基地,其砂岩地层常存在裂隙发育、富水性强的特征,导致巷道围岩易发生软化、剥落甚至突水等灾害,严重阻碍了矿井的高效安全开采。与此同时,岩石变形破坏过程中的能量释放在工程中可能引发灾害,进而增大工程建设的风险[1-3]。因此,深入探究含水条件下裂隙岩体的力学特性及能量演化规律,具有重要的理论意义与工程应用价值。

已有研究表明,水对岩石的软化作用主要通过物理化学作用[4]与力学机制[5]实现,而裂隙的存在会加剧水的渗透与损伤累积。目前,学者们借助多种试验方法在岩石变形破坏与力学特性方面开展了诸多研究。彭岩岩等[6]通过真三轴加卸载试验,系统分析了不同结构面倾角对组合煤岩的力学性能变化特征,并揭示了不同结构面倾角对组合煤岩的影响机制。李回贵等[7]对大柳塔煤矿岩层的砂岩进行XRD、SEM、NMR分析和单轴压缩试验,以此分析弱胶结砂岩的成分、微观结构和孔隙率特征以及含水率对其力学特性的影响规律。郝瑞卿等[8]开展了干燥及饱水条件下含尖端交叉裂隙砂岩的单轴压缩试验,着重分析了裂隙夹角与地下水作用对砂岩力学性质及变形破坏方式的影响机理。杨昊等[9]采用相似材料构建单裂隙岩体模型,通过冻结三轴试验,综合分析了裂隙迹长、宽度、倾角、温度及围压等多因素对裂隙岩体力学行为的耦合影响。平琦等[10]采用SHPB试验系统,对不同倾角预制裂隙的饱水岩石实施冲击压缩试验,重点探讨了饱水环境下岩石的动态力学特征及裂纹扩展规律。姚强岭等[11]选取不同岩性的煤岩样本,在不同含水饱和度条件下开展单轴压缩试验与变角剪切试验,研究了含煤岩系力学特性随含水饱和度的变化规律,并建立了不同岩性煤岩的含水率、含水饱和度与浸水时间的关联模型。周辉等[12]针对泥质砂岩,在不同围压与浸水时长条件下进行三轴压缩试验,深入探讨了水作用对不同应力状态下泥质砂岩力学行为及相关参数的影响机制。

此外,水的存在将改变岩体的物理力学特性,对岩体变形破坏过程中的能量释放也具有重要影响。赵奎等[13]通过单轴压缩试验及声发射系统,研究了红砂岩在不同含水状态下的物理力学参数及特征应力演化规律。张晓悟等[14]通过对水化学侵蚀后的砂岩进行单轴压缩试验,系统分析了水化学侵蚀作用对砂岩力学特性及能量演化特征的影响规律。曾波等[15]通过室内力学试验模拟裂隙形成的应力环境,制备了反映真实应力条件的含裂隙砂岩样本,进而开展应力-渗流耦合试验,阐明了含裂隙砂岩的变形、强度及渗透特性的关联机制。滕腾等[16]围绕砂质泥岩拉伸与压缩这两种典型破坏形式,开展了巴西劈裂试验和单轴压缩试验,对比研究了干燥及饱水条件下该岩石破坏过程中的能量演化规律。郭红军等[17]对红砂岩进行单轴循环加卸载试验,探究了不同应力水平条件下红砂岩的力学性质及能量演化特征。蒋景东等[18]通过对烘干、天然及饱水状态下的泥岩开展三轴压缩试验,深入探讨不同含水状态下其物理力学特性与能量演化规律。郭佳奇等[19]通过单轴压缩试验和常规三轴压缩试验,分析了自然与饱水状态下岩溶灰岩的力学参数变化规律及能量演化机制。

现有研究虽在含水条件下裂隙岩体力学特性及能量演化规律方面取得了一定成果,但研究对象多局限于完整岩体或单一裂隙倾角岩体,针对多角度裂隙砂岩在水-岩作用下的力学响应及能量演化规律缺乏系统性研究。此外,研究多侧重于宏观力学参数的变化,对裂隙岩体在加载过程中的能量积聚、耗散与释放规律探讨不足,难以全面阐明其破坏机理。

据此,本研究选取鄂尔多斯市某矿均质较好的砂岩作为研究对象,通过单轴压缩试验,系统探究自然及饱水条件下不同裂隙倾角砂岩的力学特性;并基于能量耗散理论,分析自然与饱水状态下裂隙砂岩的能量积聚、耗散及释放规律;最终结合岩石试样的裂纹演化特征,分析不同裂隙倾角下试样的起裂形式与破坏模式差异。

1 试验方案设计

1.1 试样制备

本试验选用自鄂尔多斯某矿均质较好的砂岩作为研究对象,该岩样无可见缺陷,自然状态下呈灰白色,次棱角状,主要成分为石英和长石。取样后对试

样进行封存并运送回实验室,参考其他学者对试样模型和裂隙尺寸的取值经验[6-9],将岩石样品加工成尺寸为 Φ50 mm×100 mm(直径×高度)的标准圆柱型试样。随后,采用高速水刀切割技术对岩样进行预处理,以岩样几何中心点为圆心,在直径为 15 mm 的圆内预制裂隙,裂隙长度为 15 mm,宽度约为 2 mm。定义裂隙与试样中心线的夹角为裂隙倾角 θ,分别设置为 0°、30°、60°和 90°,如图 1 所示。

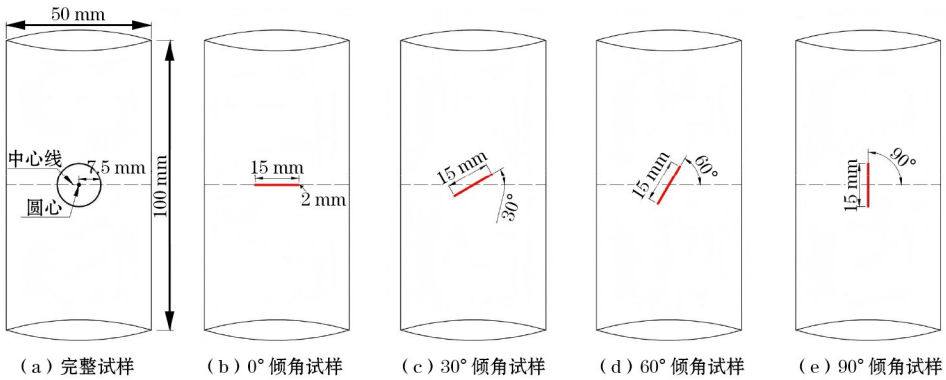


图 1 裂隙砂岩试样示意

Fig.1 Schematic of fractured sandstone specimens

为保证试样的均匀性和成果的可对比性,所有试样均取自同一块岩块。裂隙试样制备完成后,放置于室内自然干燥 7 d,将每种裂隙倾角的试样分为自然状态和饱水状态两组,为减少离散性对试验结果的影响,每种工况重复 3 次。依据《水利水电工程岩石试验规程》[20]建议的饱水试验流程,采用自由吸水法制备饱水试样,具体步骤如下:首先,对试样进行称重,将称量后的试样放入水槽,注水至试样高度的 1/4 处,每隔 2 h 分别注水至其 1/2 和 3/4 处;6 h 后完全浸没试样,让其自由吸水 48 h,之后取出用纱布擦净表面水分并立即称重,直至岩样重量不变,即达到饱和状态。试样命名方法为:状态名称首字母-裂隙倾角-试样号,例如,编号 Z-0-1 代表自然状态下、裂隙倾角为 0°的 1 号试样;编号 B-60-3 代表饱水状态下、裂隙倾角为 60°的 3 号试样。

1.2 试验设备与方法

试验在 TDW-600 微机控制煤岩刚性冲击试验系统上进行,采用位移控制加载方式,加载速率为 0.001 mm/s。试验前,在试样上下两端均匀涂抹一层凡士林润滑剂,以减小端部摩擦应力,利用设备自带的数据采集系统采集加载过程中应力、应变等数据,加载过程中,利用高速摄像机对试样的裂隙发展过程进行实时图像采集。

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线分析

根据试验所得数据(同种工况下力学参数的平均值)绘制自然与饱水状态下不同裂隙角度的应力-应变曲线(见图 2),分析试样在单轴压缩下的变形特征。由图 2 可知,砂岩试样在自然和饱水状态下均经历压密阶段、弹性阶段、塑性阶段及破坏阶段,且应力-应变曲线存在明显差异。

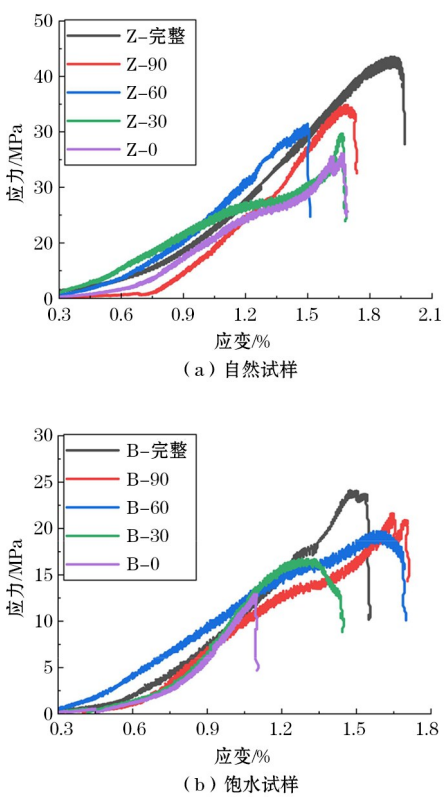


图 2 自然与饱水状态下砂岩试样应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of sandstone specimens under natural and saturated states

(1) 压密阶段:在外力加载作用下,岩石内部裂纹逐渐被压密,原生微裂隙快速闭合,应力随应变增加缓慢上升。在饱水状态下,孔隙水压力抑制了微裂隙的闭合,导致曲线斜率低于自然状态。

(2) 弹性阶段:饱水试样更早进入弹性阶段,该阶段应力与应变呈近似线性关系,但应力-应变曲线斜率较自然状态明显减小。水进入微裂隙后诱发裂纹萌生,导致弹性阶段长度缩短,试验更快达到屈服极限。在自然状态下,砂岩试样内部矿物颗粒发生弹性变形,微裂隙逐渐闭合,结构处于弹性受力状态,应力与应变呈近似线性关系,曲线斜率基本保持恒定。

(3) 塑性阶段:在自然状态下,砂岩试样应力增长缓慢,应变快速增加,曲线呈"下凹"形,斜率明显下降,直至达到峰值应力。此阶段微裂隙大量萌生、扩展并相互贯通,岩石进入塑性变形阶段,产生不可逆损伤。在饱水状态下,砂岩试样受水软化作用影响,试验的应力-应变曲线更加平缓,峰值应力明显低于自然状态,而峰值应变增大,岩石表现出更强的塑性特征。

(4) 破坏阶段:当应力超过峰值后迅速下降,自然状态和饱水状态下的应力-应变曲线均呈下降趋势,应变持续增加,直至最终丧失承载能力。

2.2 力学参数变化特征分析

为直观呈现不同状态及裂隙倾角下砂岩试样的力学参数变化特征,对试样的力学参数进行汇总分析(见表 1)。由表 1 可知,自然状态下完整砂岩的峰值强度均值为 43.3 MPa,弹性模量均值为 2.87 GPa,且两者变异系数(标准差与平均值的比值)均较小,仅为 5.16×10^{-3} 和 1.24×10^{-2},表明试验选用砂岩材料均质较好,可用于含预制裂隙砂岩力学性质的试验研究。预制裂隙砂岩经饱水后,试样质量和体积均略有增大,这体现了砂岩的吸水特性:水分借助试样内部微裂隙渗入,充分填充岩石的孔隙空间,引起试样质量增加;同时,试样内部部分矿物质遇水发生膨胀,且水分占据原有孔隙空间,导致试样整体体积增大。此外,无论是自然状态还是饱水状态,含裂隙砂岩试样的峰值强度均值和弹性模量均值均低于完整砂岩。

表 1 试样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of specimens

裂隙倾角/(°)	试样编号	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	质量/g	体积/cm^3
完整	Z-1/Z-2/Z-3	43.7/43.2/43.0	2.92/2.85/2.84	434.5/433.6/434.1	194.24/194.28/194.37
	B-1/B-2/B-3	22.8/25.6/22.7	1.48/1.72/1.45	487.1/488.5/487.3	194.68/194.71/194.67
0	Z-0-1/Z-0-2/Z-0-3	27.3/25.9/25.4	1.93/1.85/1.83	430.9/432.1/429.8	194.21/194.39/194.35
	B-0-1/B-0-2/B-0-3	14.7/14.3/15.7	0.93/0.88/1.13	484.2/484.8/486.1	194.70/194.73/194.66
30	Z-30-1/Z-30-2/Z-30-3	30.2/31.5/26.8	2.22/2.34/2.01	431.5/428.6/429.8	194.33/194.42/194.38
	B-30-1/B-30-2/B-30-3	15.2/17.4/17.5	0.86/1.09/1.11	485.3/481.2/485.9	194.73/194.81/194.78
60	Z-60-1/Z-60-2/Z-60-3	33.4/29.7/31.1	2.48/2.19/2.35	431.1/428.6/430.0	194.39/194.20/194.28
	B-60-1/B-60-2/B-60-3	16.9/17.7/21.8	1.04/1.15/1.35	485.2/486.1/483.9	194.63/194.68/194.77
90	Z-90-1/Z-90-2/Z-90-3	33.3/35.1/35.4	2.33/2.56/2.61	430.5/431.4/429.7	194.24/194.35/194.27
	B-90-1/B-90-2/B-90-3	23.2/22.5/18.8	1.47/1.39/1.10	484.7/483.3/484.9	194.66/194.84/194.69

单轴压缩下试样峰值应力和弹性模量(同种工况下力学参数的平均值)变化特征如图 3、图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,与完整试样相比,含裂隙砂岩试样的峰值应力和弹性模量均发生不同程度的降低,降低程度与裂隙角度密切相关。不同预制裂隙角度下的峰值应力和弹性模量随裂隙角度的增大近似呈线性递增[21]。

试验结果表明,预制裂隙显著劣化了砂岩的峰值强度。在自然状态下,裂隙角度为 90°、60°、30°和 0°试样的峰值应力较完整试样(43.3 MPa)分别下降 20.09%、27.48%、31.87%、39.49%;在饱水状态下,裂隙角度为 90°、60°、30°和 0°试样的峰值应力较完整试样(23.7 MPa)分别下降 9.28%、20.68%、29.54%、37.13%。同时,随着裂隙角度的减小,自然和饱水状态下对应的弹性模量下降幅度分别为 12.89%、18.47%、23.69%、34.84% 和 14.84%、23.87%、34.19%、36.77%。此外,在相同裂隙倾角下,饱水状态砂岩试样的应力与弹性模量较自然状态均有所弱化:在 0°~90°范围内,应力弱化幅度为 43.1%、43.4%、40.1%、37.9%,弹性模量弱化幅度为 47.6%、53.4%、49.6%、57.2%。综上可知:水的软化作用与裂隙倾角均会改变试样的内部结构。在饱水状态下,孔隙水压力、矿物软化及水力劈裂等机制会显著降低砂岩的峰值应力与弹性模量。随着裂隙倾角从

90°逐渐变为 0°，试样的峰值应力与弹性模量依次递减，且递减幅度大致稳定。

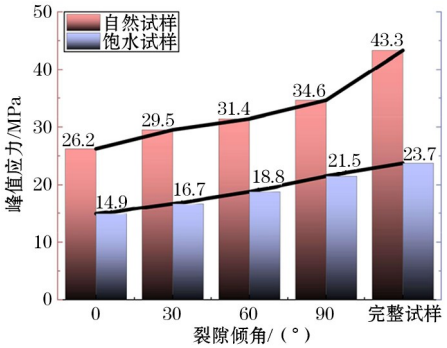


图 3　自然与饱水状态下试样峰值应力变化特征

Fig.3　Variation characteristics of peak stress of specimens under natural and saturated states

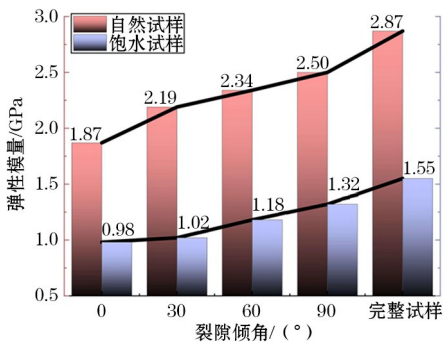


图 4　自然与饱水状态下试样弹性模量变化特征

Fig.4　Variation characteristics of elastic modulus of specimens under natural and saturated states

通过对砂岩试样峰值应力随裂隙倾角的变化进行曲线拟合，得出峰值应力与裂隙倾角的经验公式为：

$$\begin{cases}\sigma_{自然}=0.090\ 33\theta+26.36(0^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ)\\ (R^2=0.995)\\ \sigma_{饱水}=0.073\ 55\theta+14.69(0^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ)\\ (R^2=0.992)\end{cases}\tag{1}$$

弹性模量与裂隙倾角的经验公式为：

$$\begin{cases}\sigma_{自然}=0.006\ 8\theta+1.919(0^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ)\\ (R^2=0.993)\\ \sigma_{饱水}=0.003\ 9\theta+0.948(0^\circ\leqslant\theta\leqslant90^\circ)\\ (R^2=0.952)\end{cases}\tag{2}$$

式中：σ 为峰值应力；E 为弹性模量；θ 为裂隙角度；R^2 为相关性系数，其中相关性系数都接近 1，拟合效果较好。

图 5、图 6 分别为裂隙砂岩在自然及饱水状态下的抗压强度、弹性模量及其软化系数对比图(同种工况下力学参数的平均值)。由图 5 可知，不同裂隙倾角砂岩试样在饱水后，其力学性能均呈现明显软化。其中，裂隙倾角为 0°和 30°时，抗压强度软化系数均为 0.57；随着裂隙倾角从 60°增至 90°，软化系数呈上升趋势，分别为 0.6 和 0.62。由图 6 可知，弹性模量软化系数随裂隙倾角增大呈先减小后增大的趋势，依次为 0.52，0.47，0.5，0.53。这表明，饱水岩体的表面裂隙会加剧其强度弱化等效应。而邓华锋等[22]、熊德国等[23]通过试验发现，完整红砂岩的抗压强度软化系数为 0.79～0.82，高于本文结果。这是由于本文所研究的对象为裂隙砂岩试样，水对裂隙岩体的物理化学作用更为显著；水分渗入后，裂隙尖端的应力集中效应增强，微裂纹更易扩展、贯通，损伤加剧，导致其饱水后的强度下降更为明显。通过对比软化系数，也从侧面说明了研究裂隙岩体的重要性。

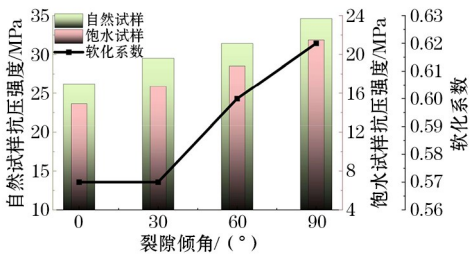


图 5　自然与饱水状态下抗压强度及软化系数对比

Fig.5　Comparison of compressive strength and softening coefficient under natural and saturated states

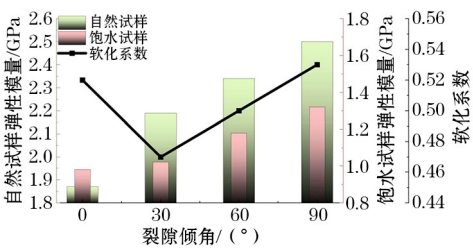


图 6　自然与饱水状态下弹性模量及软化系数对比

Fig.6　Comparison of elastic modulus and softening coefficient under natural and saturated states

3　自然及饱水状态下能量演化分析

3.1　能量演化特征计算原理

从能量损伤与破裂机制来看，岩石的变形、损伤及破坏实质上是能量积聚、耗散及释放共同作用的结果。岩石在受力变形过程中所涉及的能量主要包括从外部吸收的总能量 U、弹性应变能 U^e 和耗散能 U^d，各能量指标之间的关系如图 7 所示。

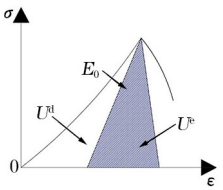


图 7 岩石单元各能量指标关系

Fig.7 Relationship among various energy indices of rock element

依据热力学第一定律[24],其表达式分析如下:

$$U=U^{e}+U^{d} \tag{3}$$

单轴压缩下岩样吸收的总能量 U 可表示为:

$$U=\int_{0}^{\varepsilon_1}\sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon=\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{2}(\varepsilon_1^{i+1}-\varepsilon_1^{i})(\sigma_1^{i+1}+\sigma_1^{i})\right\} \tag{4}$$

式中:σ_1、ε_1 分别为主应力、主应变值;σ_1^i、ε_1^i 分别为应力-应变曲线上每个点的主应力、主应变值;i 为数据点编号;n 为总的数据点数。

由广义胡克定律可知:

$$U^{e}=\frac{1}{2}\sigma_1\varepsilon_1^{e}\approx\frac{\sigma_1^2}{2E_0} \tag{5}$$

式中,E_0 为初始弹性模量。

将公式(5)代入公式(3),可得耗散能表达式为:

$$U^{d}=U-U^{e}=\int_{0}^{\varepsilon_1}\sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon-\frac{\sigma_1^2}{2E_0}=$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{2}(\varepsilon_1^{i+1}-\varepsilon_1^{i})(\sigma_1^{i+1}+\sigma_1^{i})-\frac{\sigma_1^2}{2E_0}\right\} \tag{6}$$

3.2 能量演化特征分析

岩石在变形至破裂的全过程中,始终伴随能量的动态迁移与转化。其在外荷载作用下的变形破坏本质上是能量驱动引发的失稳行为。因此,运用能量理论揭示岩石损伤变形过程中的能量演化规律,具有重要的理论价值与工程实践意义。基于上述能量计算原理及相应公式,选取各小组 1 号试样绘制自然及饱水状态下试样应力-应变曲线与能量演化关系图(见图 8)。并根据耗散能的演化规律,将试样损伤破坏阶段划分为初始损伤阶段(OA)、损伤平稳阶段(AB)、加速损伤阶段(BC)及损伤破坏阶段(CD)。通过分析各阶段的能量演化特征,揭示砂岩试样在单轴压缩条件下的损伤破裂机制。

(1) 初始损伤阶段(OA):加载初期,随应变的增大,总能量密度、弹性应变能密度和耗散能密度均增长平缓,曲线斜率较小。这是由于岩石内部存在原生微裂隙,外部载荷所做的功主要用于岩样内部孔隙闭合。以图 8(b)、图 8(d)、图 8(f)、图 8(g)中的 A 点为例,砂岩试样的 U^e、U^d 占 U 的比例分别为:U^e 占比约 68.12%、68.53%、68.31%、68.65%;U^d 占比约 31.88%、31.47%、31.69%、31.35%。这表明,在该阶段,总能量一部分转化为弹性应变能,另一部分则耗散于微裂隙的闭合过程,且自然与饱水状态下这两者数值相近。

(2) 损伤平稳阶段(AB):该阶段岩石试样的总能量密度与弹性应变能密度均呈快速上升的趋势,而耗散能密度仍维持缓慢增长,且弹性应变能始终低于所吸收的总能量。以图 8(a)、图 8(c)、图 8(i)、图 8(j)中的 B 点数据为例:砂岩试样弹性应变能(U^e)占总能量(U)的比例分别为 92.35%、92.46%、92.74%、92.08%,耗散能(U^d)占总能量(U)的比例则分别为 7.65%、7.54%、7.26%、7.92%。这一结果表明,受预制裂隙影响,砂岩试样从外部吸收的能量,绝大部分以弹性应变能的形式储存于试样内部,同时其内部已开始萌生新裂纹,进而引发能量耗散。在该阶段,无论是自然状态还是饱水状态,含裂隙岩样的弹性应变能普遍低于完整岩样,且弹性应变能的变化规律与裂隙倾角存在显著关联。当裂隙倾角从 90°降至 0°时,自然状态下弹性应变能占总能量的比例依次为 96.47%、87.32%、74.65%、56.33%,饱水状态下该比例则依次为 89.04%、73.97%、60.27%、42.47%。由此可得出:在稳定损伤阶段,自然状态岩样中的裂隙会进一步被压实,促使弹性应变能占比持续提升。其中裂隙倾角为 90°时,弹性应变能占比达到最大值,而倾角为 0°时占比最小。对于饱水状态岩样,由于水的软化作用会削弱岩样颗粒间的胶结强度,可能导致新生裂纹产生,使所需能量降低。

(3) 加速损伤阶段(BC):随着变形的增加,岩石应力-应变曲线呈现非线性增长,表面开始产生一定数量的裂纹,内部损伤程度逐渐加剧。以图 8(a)、图 8(b)、图 8(f)、图 8(i)中的 C 点处为例,砂岩试样的 U^e 占 U 的比例约为 61.55%、53.81%、57.26%、45.78%,U^d 占 U 的比例约为 38.45%、46.19%、42.74%、54.22%,两者比值较 B 点有所降低。这表明,该阶段岩石内部裂隙扩展吸收的能量主要转化为耗散能,导致耗散能占比上升、弹性应变能占比下降,且弹性应变能在 C 点达到最大值。此外,自然与饱水状态下,含裂隙砂岩的耗散能占比均高于完整砂岩,说明此阶段除新裂纹萌生外,还伴随预制裂隙的进一步扩展与贯通,含裂隙砂岩将从外界吸收的能量更多转化为耗散能,以满足裂隙扩展的能量需求。

(4) 损伤破坏阶段(CD):当岩样达到峰值强度

后,应力呈下降趋势,内部裂纹进一步扩展并贯通,承载能力的降低导致总能量 U 增长缓慢。此时,弹性应变能 U^e 快速释放,耗散能 U^d 则大幅增加,当弹性应变能与耗散能出现交叉点后,耗散能开始超过弹性应变能。对比两种状态下的总能量可知,自然状态下试样压缩破坏时所需的总能量均大于饱水状态下试样,且总能量随裂隙角度的增大而增加,这与试验测得的应力-应变曲线规律一致。

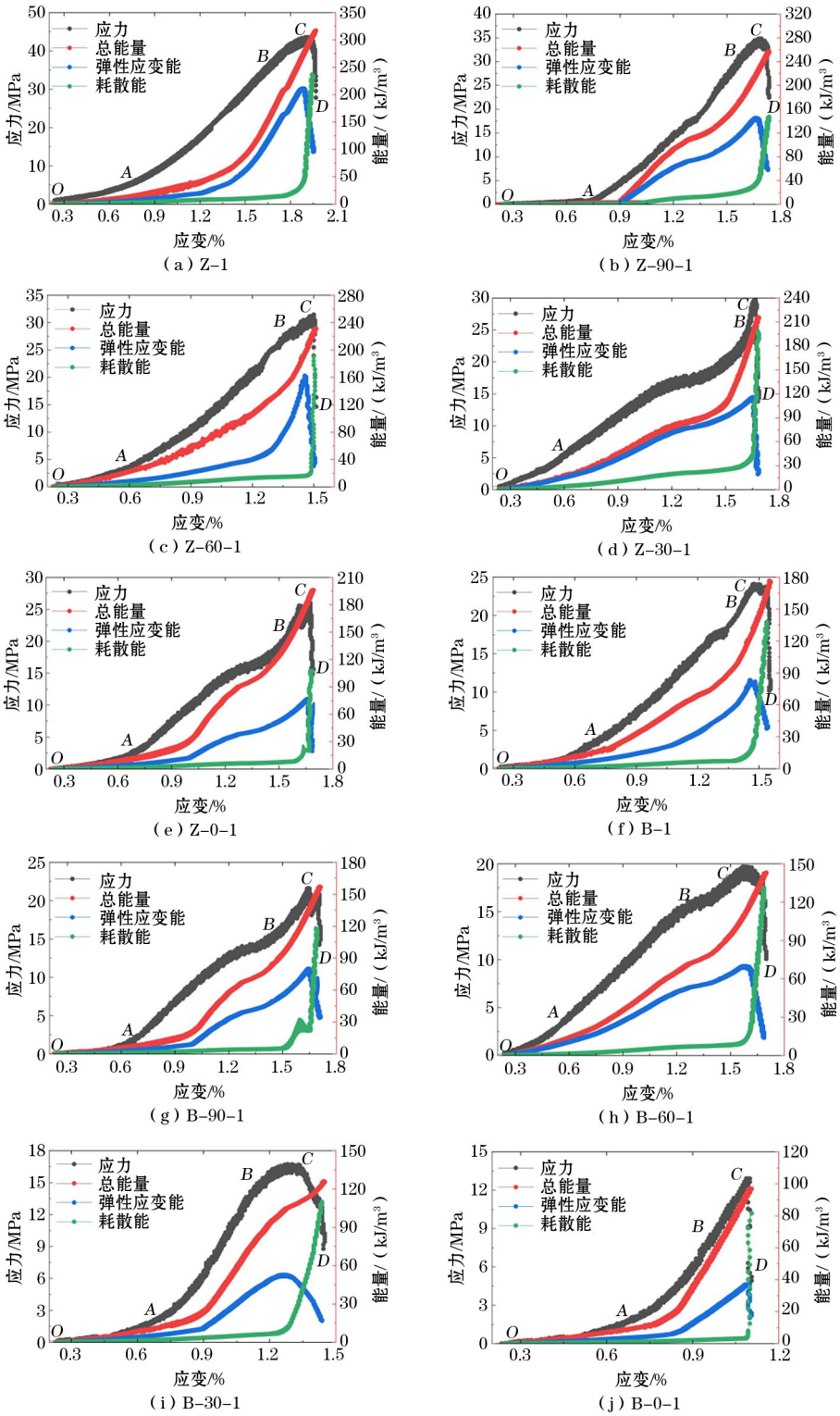
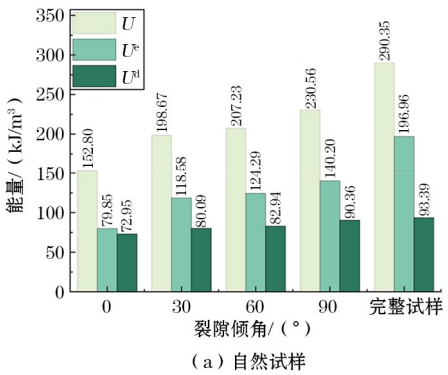


图 8 自然及饱水状态下试样应力-应变曲线与能量演化关系

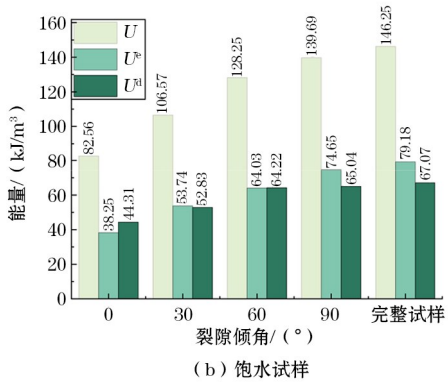
Fig.8 Relationship between stress-strain curves and energy evolution of specimens under natural and saturated states

3.3 峰值能量特征分析

对比自然与饱水状态下砂岩试样的峰值能量指标图(此处数值均取自各小组 1 号试样),如图 9 所示。由图 9 可知,自然状态试样吸收的总能量及释放的耗散能均高于饱水试样,其中完整砂岩的总能量与弹性应变能积聚能力最优。



(a) 自然试样



(b) 饱水试样

图 9 自然与饱水状态下峰值能量指标

Fig.9 Peak energy indices under natural and saturated states

在峰值点处,自然状态和饱水状态两者的能量积聚率(U^e/U)分别达 67.84%和 54.14%,表明外力做功多以弹性应变能的形式存储于砂岩内部。当轴向应力达到单轴抗压强度时,弹性应变能释放产生的耗散能达到最大。饱水后砂岩的能量储存能力显著下降,但其能量积聚率变化相对较小。

含预制裂隙的试样因裂隙削弱了承载能力,并存在初始损伤,其能量储存能力普遍低于完整试样。总能量与弹性应变能的积聚能力和裂隙角度密切相关。其中,裂隙角度为 90°的砂岩积聚能力最强,在自然状态和饱水状态下的能量积聚率分别为60.81%和 53.44%,在所有含裂隙试样中最高,说明该裂隙角度试样塑性变形能力较强,外力做功多以塑性破坏形式耗散。随裂隙角度减小,总能量和弹性应变能逐渐降低,60°、30°、0°砂岩的能量积聚率分别为 59.98%、59.69%、52.26%和 49.93%、49.42%、46.33%。由此可知,裂隙角度为 0°的砂岩试样,其弹性应变能和耗散能均为最低,在所有试样中最先发生破坏。

通过对能量演化和峰值能量特征的分析表明,砂岩弹性应变能曲线与其应力-应变曲线具有相似的变化规律,分析其原因,这与试验采用位移控制加载方式,且弹性应变能计算与应力直接相关。此外,自然状态下试验吸收的总能量约为饱水状态的 1.85 倍,这一结果与峰值应力的对比规律相吻合。

4 试样裂纹演化与破坏模式分析

4.1 起裂形式

岩石属于非均质性材料,加载过程中会出现局部应力集中现象,当应力超过该区域材料强度时,便会发生开裂破坏[25]。在加载作用下,试样的起裂形式与起裂应力能够有效反映岩石材料自身的非均质属性及内部缺陷的结构性特征,是揭示岩石损伤破坏的重要指标。图 10 展示了自然与饱水状态下不同裂隙倾角砂岩试样在单轴压缩时的宏观起裂形式(取自各小组 1 号试样,下同)。

由图 10 可知,当裂隙倾角为 0°时,自然状态下含预制裂隙砂岩试样的裂纹产生于预制裂隙的尖端,且仅出现在一端,裂纹方向基本平行于加载方向并向下方扩展;而饱水状态下砂岩试样裂纹产生于预制裂隙的中间部位,方向同样平行于加载方向并向下方扩展。当裂隙倾角增至 30°时,自然状态下砂岩试样裂纹在预制裂隙两端沿应力加载方向逐渐扩展至边界;饱水状态下砂岩试样裂纹则在预制裂隙两端沿应力加载方向仅向下方扩展。当裂隙倾角增至 60°时,自然状态下砂岩试样裂纹在预制裂隙尖端处产生,其方向朝上下两端且平行于加载方向扩展;饱水状态下砂岩试样裂纹同样在预制裂隙尖端处产生,上尖端处裂纹朝倾斜方向向上扩展,下尖端处裂纹沿加载方向下扩展。当裂隙倾角增至 90°时,自然状态下、饱水状态下砂岩试样的裂纹均与 60°倾角时类似。综上分析可知,水平裂隙的存在会促使向下扩展的裂纹形成;随着裂隙倾角的增大,尖端应力集中现象更为显著,导致裂纹起裂于尖端位置。水的存在会降低裂隙处的应力集中程度,进而改变裂纹的起裂形式。相关研究显示,仅含一条水平裂隙时,裂纹通常起裂于裂隙中部或尖端处;仅含一条倾斜裂隙时,裂纹则多起裂于裂隙尖端,且方向垂直于原裂隙或平行于加载方向[8]。

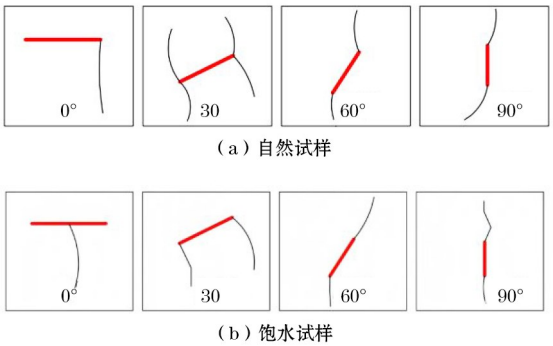


图 10 宏观起裂形式

Fig.10 Macroscopic crack initiation modes

4.2 起裂应力

由于试验条件与研究目标的差异,学者们对加载过程中岩石起裂应力的判定标准尚未统一。参考文献[26]将加载过程中初始宏观裂纹起裂时对应的轴向应力定义为起裂应力,同时将起裂应力与峰值应力的比值定义为起裂应力水平[27]。图 11 为不同裂隙倾角下砂岩试样在自然与饱水状态下的起裂应力及起裂应力水平。

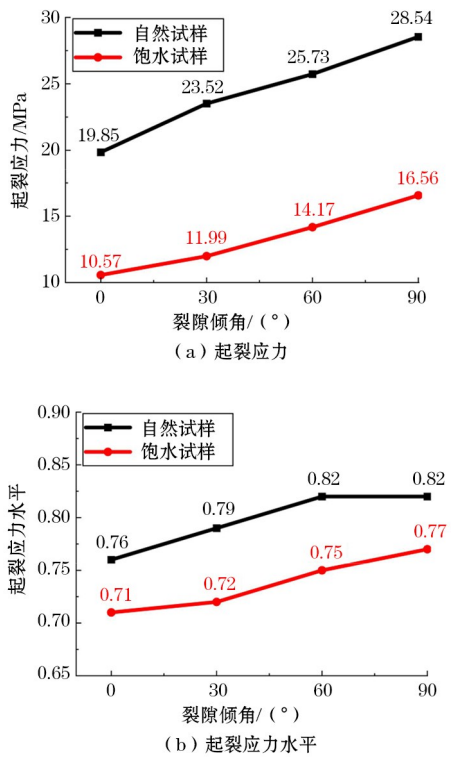


图 11 自然与饱水状态下试样起裂应力和起裂应力水平

Fig.11 Crack initiation stress and crack initiation stress level of specimens under natural and saturated states

由图 11 可知,针对自然状态下的砂岩试样,起裂应力与起裂应力水平均随裂隙倾角的增加呈逐渐增大趋势,在裂隙倾角为 0°～90°范围内,相较于前一裂隙倾角试样,后一裂隙倾角试样的起裂应力增幅依次为 18.49%、9.40%、10.92%,起裂应力水平增幅依次为 3.95%、3.80%、0%。由此可见,自然状态下裂隙倾角为 0°的砂岩试样更容易起裂。对于饱水状态下砂岩试样,起裂应力与起裂应力水平同样随裂隙倾角增加而逐渐增大,起裂应力增幅依次为 13.43%、18.18%、16.87%,起裂应力水平增幅依次为 1.41%、4.17%、2.67%。

综上分析可知,不同裂隙倾角下的砂岩试样,其起裂应力在自然与饱水状态下的变化规律均与峰值应力和弹性模量的变化规律相似,裂纹的起裂形式与起裂应力均与裂隙倾角密切相关。对于相同裂隙倾角的砂岩试样,饱水状态下的起裂应力水平均低于所对应的自然状态下起裂应力水平[28],这是因为在相同外部荷载作用下,岩石孔隙被水充满后,孔隙水压力会抵消部分外部载荷,导致岩石骨架承受的有效应力降低,其水的"软化"作用会削弱岩石自身的抗裂强度,从而使砂岩试样在较低应力下提前产生裂隙。

4.3 裂纹演化与破坏模式分析

裂纹形态对岩体力学性能具有显著调控作用,在单轴加载试验中,岩样会发育多种类型的裂纹。试验过程中,最先出现的通常是初生翼裂纹,该类裂纹属于拉伸型裂纹:由于预制裂隙端部会形成切向拉应力,初生翼裂纹多从预制裂隙尖端起始,并向试件边缘扩展,且其扩展方向大致与加载方向保持一致。次生裂纹则为剪切型裂纹,其出现时间相对滞后,主要由压应力增大诱发。多数情况下,次生裂纹的萌生存在两种模式:一是起始于主裂纹与预制裂隙共面或准共面位置,受预制裂隙尖端最大剪切应力驱动形成;二是与预制裂隙呈一定夹角,形态类似翼裂纹,但扩展方向与翼裂纹相反[29]。

自然状态下砂岩试样表面破坏裂纹分布特征如图 12 所示。由图 12 可知:完整试样中部出现一条纵向劈裂裂隙,其裂隙倾角约为 87°,右上角伴随一定程度的剥落现象。当裂隙倾角为 0°时,预制裂隙尖端部位率先起裂形成一条拉伸裂隙①,起裂方向与加载方向平行并向下方扩展;在该裂隙扩展过程中,预制裂隙两端同步产生向反方向倾斜延伸的翼裂纹②,最终延伸至岩样端部。根据裂隙倾角为 0°的岩样的最终破坏模式可知,其为拉伸-剪切复合破坏。当裂隙倾角为 30°时,预制裂隙尖端产生的

翼裂纹①沿平行于加载方向扩展;加载持续进行后,岩样中部无新裂隙发育,左侧翼裂纹延伸至试样端部,右侧翼裂纹上端则生成一条与原有裂隙连通的剪切裂隙②,同时试样右下角出现局部剥落。从该倾角岩样的最终破坏形态来看,其破坏形状近似呈H形,属于拉伸-剪切复合破坏。当裂隙倾角增至60°时,翼裂纹①首先在预制裂隙两端起裂并持续扩展,最终延伸至试样端部并与预制裂隙贯通;加载继续进行后,预制裂隙下尖端下方13 mm处出现次生裂纹②,并最终扩展至岩样端部。该倾角岩样的最终破坏模式同样为拉伸-剪切复合破坏。当裂隙倾角达到90°时,预制裂隙两端的翼裂纹①开始扩展,试样右上角发生剥落现象并与上尖端翼裂纹贯通,下尖端翼裂纹沿倾斜方向向下延伸至岩样端部。根据裂隙倾角90°岩样的最终破坏模式可知,其为拉伸-剪切复合破坏。

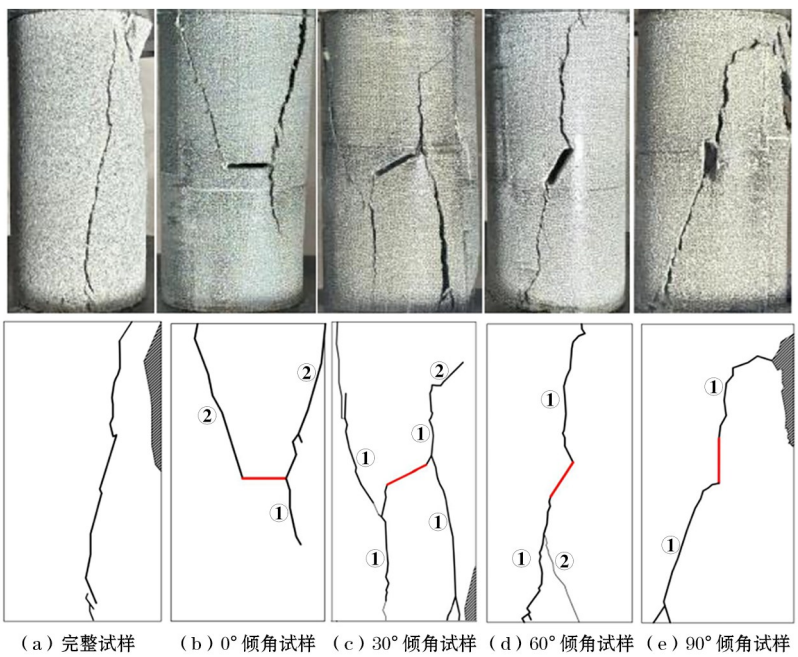


图12 自然状态下试样破坏模式

Fig.12 Failure modes of specimens under natural states

饱水状态下砂岩试样表面破坏裂纹分布特征如图13所示。由图13可知:完整试样左侧出现一条纵向劈裂裂隙,右侧则伴随较大范围的剥落现象,这体现了水对砂岩存在一定的"软化"作用。当裂隙倾角为0°时,预制裂隙中心形成一条拉伸裂隙①并向下方延伸,同时其两端产生向反方向扩展的翼裂纹②,起裂方向与加载方向平行,并最终延伸至试样端部。加载过程中,受压应力影响,沿主裂隙产生微小次生裂隙。从该倾角岩样的最终破坏形态来看,其破坏形状近似呈Y形,为拉伸破坏。当裂隙倾角为30°时,预制裂隙两端先产生向下扩展的翼裂纹①;随着加载持续进行,右侧翼裂纹①下方27 mm处部分岩块从试样表面剥落,左侧翼裂纹①下方12 mm处生成沿加载方向平行并向上方延伸的翼裂纹②,同时预制裂隙右尖端产生向上延伸的翼裂纹③,试样左上角伴有少量剥落。从该倾角岩样的最终破坏形态来看,其破坏形状近似呈H形,为拉伸破坏。当裂隙倾角增至60°时,预制裂隙尖端产生两条分别向上、向下扩展的翼裂纹①;随着加载的继续进行,预制裂隙上尖端生成与加载方向平行的翼裂纹②,且翼裂纹②、翼裂纹①与预制裂隙的交叉处出现局部岩块剥落现象。此外,预制裂隙下尖端翼裂纹①下方25 mm和28 mm处产生次生裂纹③,延伸长度约17 mm。根据裂隙倾角60°岩样的最终破坏模式可知,其为拉伸-剪切复合破坏。当裂隙倾角达到90°时,预制裂隙尖端产生两条与加载方向平行的翼裂纹①;随着加载的继续进行,预制裂隙上尖端翼裂纹①上方6 mm处生成一条向下延伸的翼裂纹②,同时翼裂纹①持续扩展延长(方向与加载平行),最终翼裂纹①和翼裂纹②共同延伸至试样端部,试样右下角伴有局部剥落。根据裂隙倾角90°岩样的最终破坏模式可知,其为拉伸型破坏。

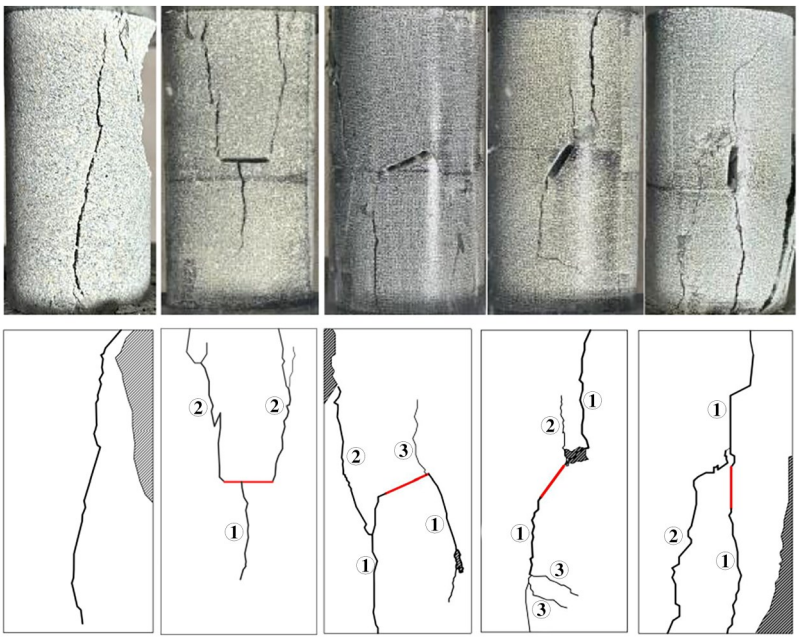


图 13 饱水状态下试样破坏模式

Fig.13 Failure modes of specimens under saturated states

综合上述分析可知,与完整试样的裂纹扩展模式相比,含裂隙倾角的砂岩试样对裂纹的起裂位置、起裂方向及最终的破坏模式均存在一定影响。在自然状态下,0°裂隙倾角试样的起裂位置始于预制裂隙右侧尖端,随着裂隙倾角的增大,起裂位置逐渐变为预制裂隙两端。而在饱水状态下,0°裂隙倾角试样起裂于预制裂隙中间部位,并随倾角的增大起裂位置逐步向预制裂隙尖端转移。这一现象说明,预制裂隙尖端存在应力集中,使得破坏过程具有更强的定向性,次生裂隙多以预制裂隙为中心定向发展。对比自然与饱水状态下的裂隙砂岩试样,两者最终的变形破坏形状大致相似。但受水的劣化作用影响,饱水试样中预制裂隙周围岩体的强度被弱化,导致裂隙萌生时间更早(对应更低的起裂应力),且优先从预制裂隙尖端及附近区域萌生。同时,水的作用还会降低试样内部的黏聚力,致使试样破坏时呈现出明显的岩块剥落现象。

5 结论

(1) 水-岩作用与裂隙倾角的耦合效应对砂岩试样力学参数具有显著影响。与完整砂岩相比,含裂隙倾角砂岩试样的峰值强度和弹性模量均发生明显劣化。随裂隙倾角从 0°增至 90°,自然与饱水状态下砂岩试样的峰值强度和弹性模量均呈近似线性递增趋势,且递增幅度基本保持不变。

(2) 自然及饱水状态下,不同裂隙倾角的砂岩试样抗压强度软化系数为 0.57～0.62,弹性模量软化系数为 0.47～0.53,均远小于完整砂岩试样。当裂隙倾角从 30°增至 60°时,抗压强度与弹性模量软化系数均呈逐渐增大趋势,表明饱水状态下裂隙岩体的强度弱化效应更为显著。

(3) 能量演化特征由含水状态与裂隙倾角共同调控。自然状态下砂岩试样吸收的总能量(196～317 kJ/m^3)约为饱水状态(102～176 kJ/m^3)的 1.85 倍,且总能量随裂隙倾角的增大而递增。弹性应变能占比在损伤平稳阶段达 92%以上,进入加速损伤阶段后降至 61.5%以下。耗散能占比则呈相反趋势,表明裂隙扩展过程中能量耗散不断加剧。此外,完整砂岩试样的能量积聚率(67.84%)高于含裂隙砂岩试样(46.3%～60.8%),饱水状态下岩石的能量存储能力明显减弱。

(4) 裂纹起裂与破坏模式呈现明显的各向异性。在自然状态下,0°裂隙倾角砂岩试样从尖端起裂,90°裂隙倾角砂岩试样从两端起裂,均表现为拉伸-剪切复合破坏。在饱水状态下,0°裂隙倾角砂岩试样从裂隙中心起裂,随倾角增大转向尖端起裂,破坏模式以拉伸型破坏为主(0°、30°、90°)。水的劣化作用使起裂应力降低 13.43%～18.18%,起裂应力水平均低于对应的自然状态,同时加剧了岩块剥落与次生裂纹的发育。研究结果可为水环境下裂隙

岩体工程的稳定性评价提供理论支撑,同时为相关工程的支护设计与灾害预警提供参考依据。

参考文献(References):

[1] 赵光明,秦志宏,孟祥瑞.动载循环作用下砂岩的动态力学响应及破坏特征[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(1):22-37.
ZHAO Guangming, QIN Zhihong, MENG Xiangrui. Dynamic mechanical response and failure characteristics of sandstone under dynamic load cycle[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2025,7(1):22-37.

[2] 邓华锋,齐豫,李建林,等.水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J].岩土工程学报,2021,43(4):634-643.
DENG Huafeng, QI Yu, LI Jianlin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(4):634-643.

[3] 吴宝杨,王伟男,郭东明.浸水次数影响下裂隙砂岩强度损伤及声发射特征[J].采矿与安全工程学报,2020,37(5):1054-1060.
WU Baoyang, WANG Weinan, GUO Dongming. Strength damage and AE characteristics of fractured sandstone under the influence of water intrusion times [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(5):1054-1060.

[4] 刘建,乔丽苹,李鹏.砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应:试验研究与本构模型[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):20-29.
LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng. Experimental studies and constitutive model of elastoplastic mechanical behaviors of sandstone with hydro-physicochemical influencing effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(1):20-29.

[5] 张村,王潇杰,师旭涛,等.含水饱和度影响下砂岩劈裂特性与水岩作用机制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊2):3722-3737.
ZHANG Cun, WANG Xiaojie, SHI Xutao, et al. Splitting characteristics of sandstone under the influence of water saturation and its mechanism of water rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024, 43(Suppl.2):3722-3737.

[6] 彭岩岩,郦亦凡,余虎,等.基于真三轴卸载试验不同倾角组合煤岩力学特性研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(2):5-14.
PENG Yanyan, LI Yifan, YU Hu, et al. Mechanical properties of coal and rock with different dip angles based on true triaxial unloading test[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2024,6(2):5-14.

[7] 李回贵,李化敏,许国胜.含水率对弱胶结砂岩力学特征的影响规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):60-66.
LI Huigui, LI Huamin, XU Guosheng. Influence of water content on mechanical characteristics of weakly cemented sandstone [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2021,3(4):60-66.

[8] 郝瑞卿,曹平,王华,等.干燥与饱水状态下含尖端相交裂隙砂岩的力学特性及破裂演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(7):1696-1706.
HAO Ruiqing, CAO Ping, WANG Hua, et al. Mechanical properties and fracture behaviors of sandstone in dry and saturated states with tip intersecting cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(7):1696-1706.

[9] 杨昊,张晋勋,单仁亮,等.冻结饱水单裂隙岩体力学特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(4):1245-1255.
YANG Hao, ZHANG Jinxun, SHAN Renliang, et al. Experimental study on mechanical properties of frozen saturated single fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(4):1245-1255.

[10] 平琦,孙施佳,高祺,等.饱水裂隙砂岩动态力学特性与裂纹扩展规律研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(增刊1):3131-3139.
PING Qi, SUN Shijia, GAO Qi, et al. Study on dynamic mechanical properties and crack extension law of water-saturated fractured sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(Suppl.1):3131-3139.

[11] 姚强岭,王伟男,李学华,等.水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):558-569.
YAO Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, et al. Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021,50(3):558-569.

[12] 周辉,宋明,张传庆,等.三轴应力下水对泥质砂岩力学特性影响的试验研究[J].岩土力学,2022,43(9):2391-2398.
ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental study of influences of water on mechanical behaviors of argillaceous sandstone under tri-axial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2391-2398.

[13] 赵奎,冉珊瑚,曾鹏,等.含水率对红砂岩特征应力及声发射特性的影响[J].岩土力学,2021,42(4):899-908.
ZHAO Kui, RAN Shanhu, ZENG Peng, et al. Effect of moisture content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(4):899-908.

[14] 张晓悟,徐金海,黄宁,等.水化学侵蚀条件下砂岩力学特性及能量损伤特征演化规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(6):79-89.
ZHANG Xiaowu, XU Jinhai, HUANG Ning, et al. Mechanical properties and energy damage characteristics of sandstone subjected to hydro chemical erosion[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2022,4(6):79-89.

[15] 曾波,冯江荣,秦垦,等.应力-渗流耦合下含裂隙砂岩力学特性研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(3):82-92.
ZENG Bo, FENG Jiangrong, QIN Ken, et al. Study on mechanical properties of fractured sandstone under stress-seepage coupling conditions[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2025,7(3):82-92.

[16] 滕腾,王玉明,李召龙,等.干燥和饱水状态下砂质泥岩拉压变形破坏过程能量演化对比研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1):174-183.
TENG Teng, WANG Yuming, LI Zhaolong, et al. Contrastive analysis of energy evolution in the tension and compression deformation processes of dry and water-saturated sandy mudstone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2023,40(1):174-183.

[17] 郭红军,季明,孙中光,等.循环荷载作用下红砂岩能量演化特征研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):15-23.
GUO Hongjun, JI Ming, SUN Zhongguang, et al. Energy evolution characteristics of red sandstone under cyclic load [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021,3(4):15-23.

[18] 蒋景东,陈生水,徐婕,等.不同含水状态下泥岩的力学性质及能量特征[J].煤炭学报,2018,43(8):2217-2224.
JIANG Jingdong, CHEN Shengshui, XU Jie, et al. Mechanical properties and energy characteristics of mudstone under different containing moisture states [J]. Journal of China Coal Society,2018,43(8):2217-2224.

[19] 郭佳奇,刘希亮,乔春生.自然与饱水状态下岩溶灰岩力学性质及能量机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):296-308.
GUO Jiaqi, LIU Xiliang, QIAO Chunsheng. Experimental study of mechanical properties and energy mechanism of karst limestone under natural and saturated states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014, 33(2):296-308.

[20] 汤大明.《水电水利工程岩石试验规程》DL/T 5368—2007 编制说明及应用调查[J].四川水力发电,2011,30(6):115-118.
TANG Daming. Compilation explanation and application survey of DL/T 5368—2007 *Code for Rock Tests of Hydroelectric and Water Conservancy Engineering* [J]. Sichuan Water Power,2011,30(6):115-118.

[21] 胡千庭,余长君,李全贵,等.单轴压缩下裂隙砂岩宏细观损伤破坏特性的试验研究[J].实验力学,2025,40(1):49-60.
HU Qianting, YU Changjun, LI Quangui, et al. Experimental study on macro-mesoscopic damage and failure characteristics of fractured sandstone under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics,2025, 40(1):49-60.

[22] 邓华锋,朱敏,李建林,等.砂岩Ⅰ型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究[J].岩土力学,2012,33(12):3585-3591.
DENG Huafeng, ZHU Min, LI Jianlin, et al. Study of mode-Ⅰ fracture toughness and its correlation with strength parameters of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics,2012, 33(12):3585-3591.

[23] 熊德国,赵忠明,苏承东,等.饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):998-1006.
XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rocks in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011, 30(5):998-1006.

[24] 谢和平,鞠杨,黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报,2005(17):3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(17):3003-3010.

[25] 尹乾,靖洪文,苏海健,等.单轴压缩下充填正交裂隙花岗岩强度及裂纹扩展演化[J].中国矿业大学学报,2016,45(2):225-232.
YIN Qian, JING Hongwen, SU Haijian, et al. Strength characteristics and crack coalescence evolution of granite specimens containing orthogonal filling fissures under uniaxial compression [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(2):225-232.

[26] 熊飞,靖洪文,苏海健,等.尖端相交裂隙砂岩强度与破裂演化特征试验研究[J].煤炭学报,2017,42(4):886-895.
XIONG Fei, JING Hongwen, SU Haijian, et al. Strength and fracture behaviors of sandstone samples containing intersect fissures under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(4):886-895.

[27] 王宇,李晓,武艳芳,等.脆性岩石起裂应力水平与脆性指标关系探讨[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):264-275.
WANG Yu, LI Xiao, WU Yanfang, et al. Research on relationship between crack initiation stress level and brittleness indices for brittle rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(2):264-275.

[28] 张科,蔡晨曦,张凯,等.饱水裂隙砂岩力学及前兆异常特征量化分析[J].煤炭学报,2021,46(增刊1):200-210.
ZHANG Ke, CAI Chenxi, ZHANG Kai, et al. Quantitative analysis on mechanical and precursory anomaly properties of water-saturated sandstone with a flaw[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(Suppl.1):200-210.

[29] 谢雨霖,李小双,耿加波,等.不同形态下红砂岩力学特性和裂纹断裂特征研究[J].矿业研究与开发,2022,42(6):119-125.
XIE Yulin, LI Xiaoshuang, GENG Jiabo, et al. Study on mechanical properties and crack fracture characteristics of red sandstone under different morphologies [J]. Mining Research and Development,2022,42(6):119-125.