含单裂隙层状复合岩样力学特性及裂纹扩展规律*

周祥[1]，肖桃李[1]，胡量[1,2]，折海成[1,3]，赵云峰[1]

（1.长江大学 城市建设学院， 湖北 荆州市 434023；
2.武汉建开工程总承包有限责任公司， 湖北 武汉 430012；
3.水力部水库坝安全重点实验室， 江苏 南京 210024）

摘要：矿业开采过程中的工程扰动常会导致岩石产生多种裂隙，进而影响其力学性能。采用室内单轴压缩试验，结合XTDIC和声发射监测系统，探究裂隙位置、裂隙倾角及岩层组合方式对单裂隙层状复合岩样力学行为及破坏模式的影响。研究结果表明：随着裂隙倾角增大，裂隙岩样的峰值应力从13.19～25.34 MPa逐渐增加到33.89～42.99 MPa，弹性模量呈现先增后减的非单调变化趋势，劣化系数则从0.32～0.66逐渐减小到0.06～0.20，且裂隙对砂岩的强度劣化作用较灰岩更为显著；裂隙位置主导破坏模式的演化，当裂隙位于岩样上部时，以张拉破坏为主，裂隙位于岩样中部时，破坏模式受裂隙倾角调控，低裂隙倾角下仍以张拉破坏为主，高裂隙倾角下则转变为张拉-剪切混合破坏；声发射参数（*RA*/*AF* 值）分析显示，低裂隙倾角时，优先出现的裂纹均以张拉裂纹为主，占比可达81.69%～88.41%，随着裂隙倾角增大，剪切裂纹占比上升，破坏模式从张拉破坏逐步过渡为多拉少剪破坏，直至最终形成张拉裂纹占比56.33%～62.73%的拉-剪混合破坏。

关键词：层状复合岩石；力学特性；裂隙倾角；裂隙位置；裂纹扩展

中图分类号：TD313 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0120-09

Mechanical Properties and Crack Propagation Law of Layered Composite Rock Samples with Single Fracture

Zhou Xiang[1], *Xiao Taoli*[1], *Hu Liang*[1,2], *She Haicheng*[1,3], *Zhao Yunfeng*[1]

(1.School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;
2.Wuhan Jiankai Engineering General Contracting Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430012, China;
3.Key Laboratory of Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: The engineering disturbance in the process of mining often leads to a variety of fractures in the rock, which affects its mechanical properties. Using indoor uniaxial compression test, combined with XTDIC and acoustic emission monitoring system, the effects of fracture position, fracture dip angle and rock combination on the mechanical behavior and failure mode of layered composite rock samples with single fracture were investigated. The results show that with the increase of fracture dip angle, the peak stress of fracture rock samples gradually increases from 13.19-25.34 MPa to 33.89-42.99 MPa, the elastic modulus shows a non-monotonic change trend of increasing first and then decreasing, the deterioration coefficient gradually decreases from 0.32-0.66 to 0.06-0.20, and the strength deterioration effect of fracture on sandstone is more significant than that of limestone. The fracture position dominates the evolution of the failure mode. When the fracture is located in the upper part of the rock sample, the tensile failure is dominant. When the fracture is located in the middle of the rock sample, the failure mode is regulated by the fracture dip angle. Under the low fracture dip angle, the tensile failure is still dominant, and under the high fracture dip angle, it is transformed into tensile-shear mixed failure. The analysis of acoustic emission parameters (*RA*/*AF* value) shows that when the fracture dip angle is low, the priority cracks are mainly tensile cracks, accounting for 81.69%-88.41%. With the increase of fracture dip angle, the proportion of shear cracks increases, and the failure mode gradually transitions from tensile failure to multi-tensile and less-shear failure, and finally forms a tensile-shear mixed failure with tensile cracks accounting for 56.33%-62.73%.

Key words: Layered composite rock, Mechanical property, Fracture dip angle, Fracture location, Crack evolution

* **收稿日期**：2025-07-01

基金项目：湖北省自然科学基金项目(2024AFB878，2025AFB919)；水利部水库大坝安全重点实验室开放研究基金项目(YK323003)

作者简介：周祥(2000—)，男，湖北荆州人，硕士研究生，主要从事岩土方向与地下非开挖顶管方向的科研与学习。E-mail:17386313736@163.com

通信作者：肖桃李(1978—)，男，湖北天门人，博士，教授，主要从事岩土工程相关教学和科研工作。E-mail:200536@yangtzeu.edu.cn

0 引言

在地下工程及采矿工程中,层状复合岩体作为一种常见的工程介质,其力学性质及破坏特征均不同于常规岩体,更易引发工程事故。尤其是在施工扰动或其他未知因素影响下,岩体内部易产生裂隙,引发其力学性质和破坏特征发生变化。因此,探究含裂隙层状复合岩体的力学特征和裂纹扩展规律对工程安全具有重要的意义。

许多学者针对层状复合岩样开展了大量研究,并取得了颇为丰硕的研究成果。鲜学福等[1]采用单轴及三轴压缩试验方法,研究了砂岩、泥岩和石灰岩黏结试样的力学行为,发现层间黏结力使各层岩样的力学性质与单一岩体存在差异,且破坏呈现逐层扩展特征。腾俊洋等[2]通过单轴压缩试验发现灰岩层可约束页岩层的横向变形,且组合方式显著影响岩层破坏模式。黄锋等[3]利用单轴及三轴压缩试验,探究了软硬互层岩体的力学特性,发现岩层倾角在一定范围内可降低试样强度。李昂等[4]通过对大理岩-绿片岩互层岩体进行单轴压缩试验,发现软弱岩层数量增加及岩层倾角增大会显著降低岩体破坏荷载。丁恩理等[5]采用三轴压缩试验,研究了试样不同岩层倾角及软硬岩层厚度比对岩样强度的影响,发现岩层倾角增大和软弱岩层厚度增加均会削弱岩体强度。谢志英等[6]通过三轴压缩试验,研究了含预制裂隙的层状复合岩样的力学特性,发现砂岩组分对强度影响显著,而灰岩组分主要影响变形能力。赵娜等[7]结合数字散斑和声发射技术,分析了红砂岩-灰泥岩复合岩体的破坏特征,发现岩层倾角为30°和45°时,破坏主要发生在软弱岩层。刘小亮等[8]通过浇筑不同倾角的类泥岩-砂岩复合试样,研究了单向加载下裂纹扩展规律,结果表明,岩层倾角决定裂纹发展方向,而软硬岩层占比影响张拉与剪切裂纹的比例。贺馨瑶等[9]结合落锤冲击试验和声发射监测,分析了高原寒区含裂隙砂岩的冲击响应,发现微裂纹发育程度随裂隙倾角的增大先增大后减小。Qi等[10]结合数字图像相关(DIC)技术和声发射监测系统,对泥沙复合岩进行单轴压缩试验,得出岩样破坏模式主要为拉伸-剪切-滑动破坏。李修磊等[11]通过单轴压缩试验结合声发射监测技术,分析了含裂隙花岗片麻岩的破坏模式,发现裂隙倾角增大使破坏由剪切向张拉转变。Wang等[12]通过单轴及三轴蠕变试验,研究了含不同倾角裂隙的泥岩、砂岩及石灰岩的长期强度特性,发现裂隙倾角对岩样长期强度具有重要影响。谢其泰等[13]采用单轴压缩试验方法,分析了含单裂隙砂岩的破坏行为,结果表明,裂隙倾角较小时,岩体破坏不稳定,而倾角较大时,裂纹扩展更稳定。王雄等[14]利用三轴压缩试验,研究了张开与闭合裂隙岩样的力学行为,发现峰值应力随微裂纹数量的增加而增大。陈龙等[15]采用DIC技术,研究了含单、多裂隙岩样的裂纹扩展规律,发现单裂隙试样裂纹多沿裂隙尖端扩展,而多裂隙试样裂纹多平行于加载方向。李震等[16]采用全角度剪切试验方法,分析了层状页岩的剪切各向异性,发现逆倾向与顺倾向剪切力学行为存在明显差异。

尽管已有研究对层状复合岩体和含裂隙岩体的力学行为进行了广泛探讨,但多数研究聚焦于岩层倾角或体积比对断裂行为的影响,而对岩层组合方式及裂隙微观发育状况的研究相对较少。本文以含单裂隙的层状复合岩石为研究对象,采用相似材料制备不同位置、不同倾角单裂隙及不同岩层组合方式的试样,结合XTDIC系统和声发射监测技术,开展单轴压缩试验,系统研究试样的力学特性及破坏机制,以期为层状裂隙岩体的工程稳定性评估提供理论依据。

1 试样制备和试验方案设计

1.1 试样制备

为研究单裂隙倾角、位置及岩层组合方式对岩体力学特性及破坏模式的影响,依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)[17],并参照肖桃李等[18]的研究成果,确定了类岩样的配合比,具体见表1。岩样尺寸为70 mm×70 mm×143 mm,固定裂隙长度为20 mm,裂隙倾角分别设置为0°、30°、45°、60°、90°,岩层组合方式包括完整岩石、灰岩夹砂岩和砂岩夹灰岩。为了便于统计,岩样编号采用如WH、WS、HS-S-0、HS-Z-0、SH-S-0、SH-Z-0的格式,其中WH、WS表示完整的灰岩、砂岩,HS表示灰岩夹砂岩,S表示裂隙位于岩样上部,Z表示裂隙位于岩样中部,SH表示砂岩夹灰岩,0表示裂隙倾角为0°。岩石试样的部分宏观力学参数与原岩对比情况见表2。岩样及养护后的试样如图1和图2所示。

表 1 类灰岩与类砂岩试样质量配合比

Table 1 Mass mix ratio of limestone-like and sandstone-like samples

试样	配合比
类灰岩	普通硅酸盐水泥∶微硅粉∶石英砂∶铁粉∶聚羧酸早强减水剂∶消泡剂∶纯净水=1∶0.13∶0.8∶0.25∶0.003∶0.003∶0.3
类砂岩	白色硅酸盐水泥∶石英砂∶消泡剂∶纯净水=1∶0.7∶0.003∶0.35

表 2 原岩与类岩样模型物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of raw rock and rock-like sample models

材料	密度 ρ/(g·cm^{-3})	抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比 μ
灰岩	2.48～2.85	60～110	6～23	35～50	0.20～0.35
类灰岩	2.61	65.02	7.42	43.0	0.27
砂岩	2.10～2.40	20～68	3～15	35～50	0.20～0.25
类砂岩	2.32	47.17	4.68	38.0	0.23

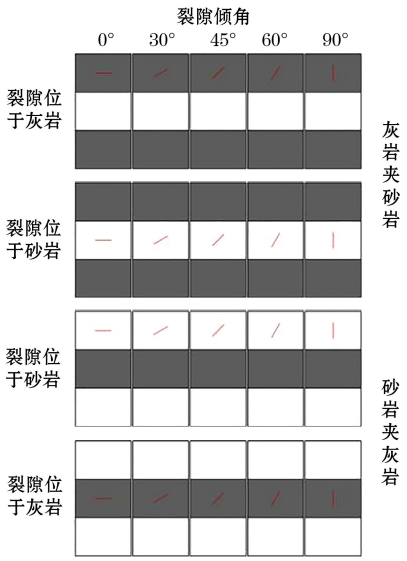


图 1 岩样示意

Fig.1 Schematic diagram of rock samples



图 2 养护后岩样

Fig.2 Rock samples after maintenance

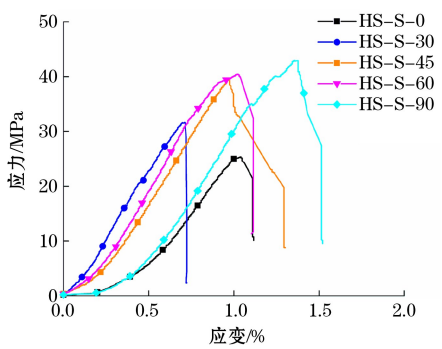
1.2 试验方案

本试验采用 WAW-1000B 型微机伺服控制万能试验机,辅以 XTDIC 及声发射系统,对岩样进行单轴压缩试验,同时记录其裂隙扩展及声发射信号。具体试验步骤如下:首先,从养护室取出试样,在含预制裂隙面喷涂哑光白色喷漆,用黑色油性记号笔打点制作散斑图以便 DIC 系统记录;然后,在万能试验机旁架设 XTDIC 系统,开启照明,调平摄像系统并调节相机参数,架标定板用八步标定法标定,修改参数至计算结果达标;再次,组装声发射系统置于试验机旁,用环氧树脂将 4 个探头粘至试样预定位置,涂上凡士林以便声发射系统收集数据,再设置相关参数,进行探头灵敏度测试;最后,采用位移控制加载,速率设为 0.5 mm/min,照片采集间隔为 1 000 ms,加载同时开启两系统数据采集,密切关注试样破坏情况。

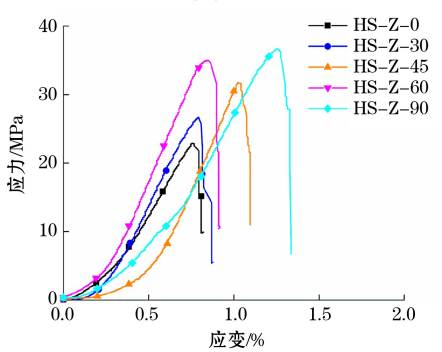
2 岩样力学性质及破坏特征分析

2.1 岩样力学性质分析

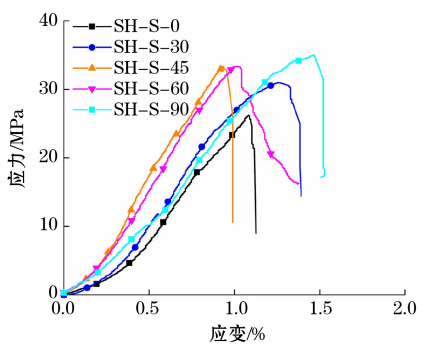
基于单轴压缩试验得到各含单裂隙层状复合岩样及完整岩样的应力-应变曲线,如图 3 所示。



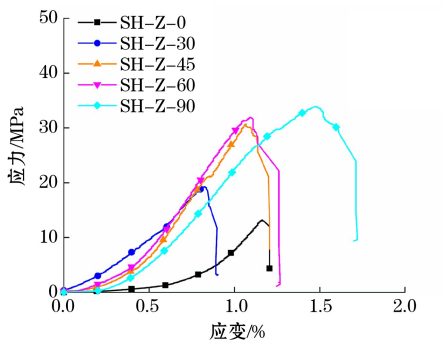
(a) HS-S



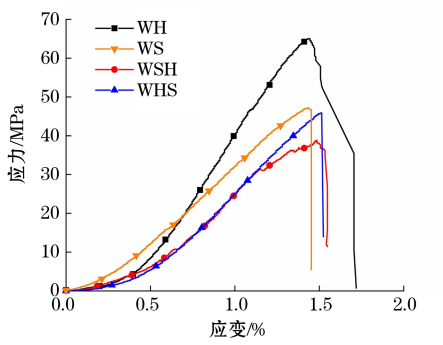
(b) HS-Z



(c) SH-S



(d) SH-Z



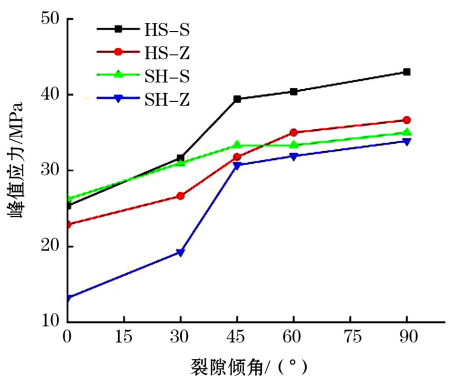
(e) 完整试样

图 3 试样应力-应变曲线

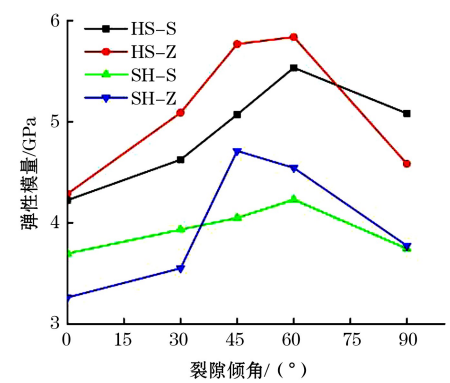
Fig.3 Stress-strain curves of samples

由图 3 可见,裂隙试样和完整试样一样,经历了压密、线弹性、损伤及峰后 4 个阶段,但部分裂隙试样压密阶段持续时间明显长于完整试样,这是由于制作裂隙试样抽掉钢片时,部分空气进入了裂隙周边。裂隙试样进入线弹性阶段后,应力-应变曲线波动明显增多,临近峰值应力时尤为明显。这是因为随着加载深入,试样内部裂纹发育、交汇贯通,产生高应力区,应力集中达到局部承载极限时,材料局部破坏,导致应力重分布。临近峰值应力时,预制裂隙逐渐压密,应力重分布更剧烈,表现为应力波动。裂隙试样达到峰值应力后,应力-应变曲线迅速下降,脆性特征明显。

各峰值应力及弹性模量随裂隙倾角的变化曲线如图 4 所示。由图 4(a)可知,裂隙试样的峰值应力(13.19～42.99 MPa)普遍低于完整岩样,这表明预制裂隙显著削弱了层状复合岩样的强度。灰岩夹砂岩试样的强度高于砂岩夹灰岩试样,说明灰岩含量是主导强度变化的关键因素。当裂隙位于上部时,其强度高于中部,表明裂隙位置对岩层强度有显著影响。例如,HS-Z 试样的裂隙位于砂岩层中部,破坏首先从这一薄弱区域开始,导致两端灰岩层未能充分破坏便已失效。峰值应力随裂隙倾角的增大而增大,这是因为裂隙的水平投影长度减小,承载面积增大,从而降低了削弱作用。在 0°～45°倾角区间,峰值应力的增幅(55.54%～132.79%)显著高于 45°～90°区间(5.06%～15.31%),这是因为前者水平投影长度的减小更为明显。



(a) 峰值应力



(b) 弹性模量

图 4 峰值应力、弹性模量随裂隙倾角的变化曲线

Fig.4 Variation curves of peak stress and elastic modulus with fracture dip angle

参考肖桃李等[18]的研究方法,取应力-应变曲线上应力水平在峰值应力 30%～70%之间的曲线斜率作为试样的弹性模量。由图 4(b)可知,随着裂隙倾角的增加,4 种岩层组合裂隙试样的弹性模量均呈现出先增大后减小的趋势,且在裂隙倾角为

45°及60°时,弹性模量取得较大值。为进一步探究裂隙倾角对层状复合岩强度的影响,引入劣化系数ω,如式(1)所示。对各裂隙试样的劣化系数进行统计,并绘制裂隙试样劣化系数随裂隙倾角的变化曲线,如图5所示。

$$\omega=1-\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{cp}} \tag{1}$$

式中:ω为劣化系数;σ_{ci}为裂隙试样峰值应力;σ_{cp}为完整样峰值应力。

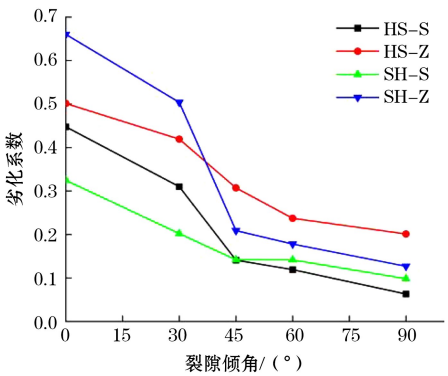


图5 裂隙试样劣化系数随裂隙倾角的变化曲线

Fig.5 Variation curves of deterioration coefficient of fractured samples with fracture dip angle

由图5可知,劣化系数随着裂隙倾角的增大持续下降,但当裂隙倾角达到45°和60°时,劣化系数下降幅度逐渐减缓。裂隙位于中部的试样,其劣化系数普遍高于裂隙位于上部的试样,这表明预制裂隙位于试样中部时,对试样强度的劣化影响更为显著。此外,在裂隙倾角达到45°之前,裂隙位于灰岩岩层的试样的劣化系数大于位于砂岩岩层;当裂隙倾角为45°时,裂隙位于砂岩岩层的试样的劣化系数则更高。这是因为当裂隙倾角小于45°时,裂隙水平方向的投影长度较长,对所在岩层的强度劣化作用更为显著,尤其是当裂隙位于灰岩岩层时,能更有效地削弱灰岩岩层的强度,进而降低试样的整体强度。而当裂隙倾角达到45°时,裂隙水平方向的投影长度缩短,其本身对试样强度的劣化作用减弱,此时裂隙优先加速对砂岩岩层的破坏,从而导致灰岩岩层破坏不充分。

2.2 岩样的破坏模式分析

借助XTDIC系统记录试样的裂纹发育过程以及最终的破坏模式,能够较好地体现裂隙位置和岩层组合方式对试样破坏特征的影响。分别以试样加载过程中应力水平为峰值应力的30%、50%、80%、100%时产生的裂纹为一组,共分为4组,用洋红色线条、绿色线条、蓝色线条、红色线条以及数字①、②、③、④分别标注4组的裂纹(颜色标识见电子版),用黑色粗实线标注主破裂裂纹,并对所有试样的最终破坏图展开统计分析,如图6所示。

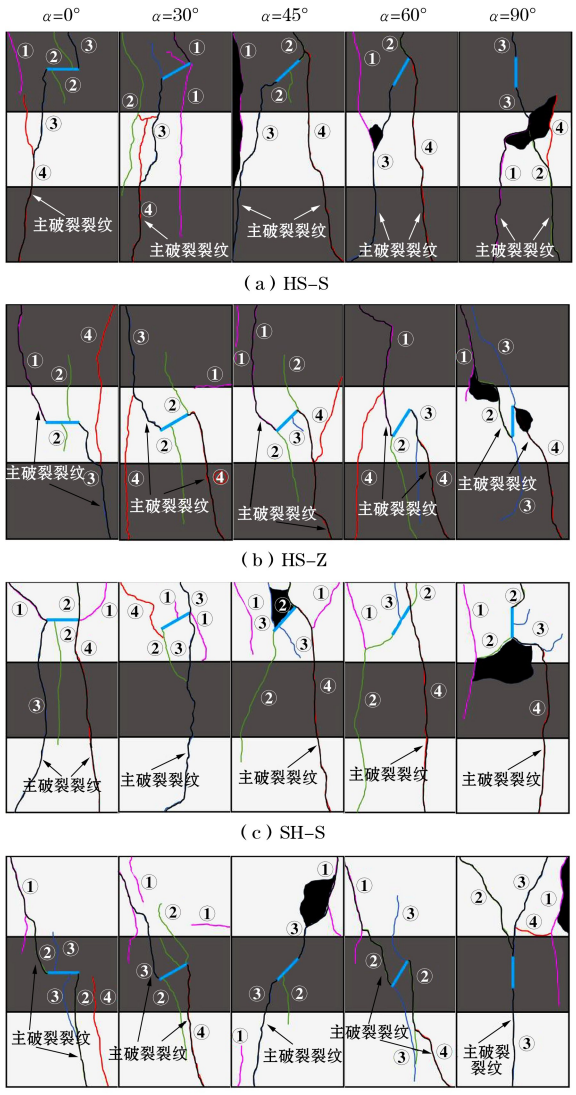


图6 裂隙试样最终破坏图

Fig.6 Final failure diagrams of fractured samples

由图6可知,当裂隙位于岩样上方时,灰岩夹砂岩与砂岩夹灰岩的破坏模式相近,这表明岩样的破坏受裂隙倾角以及岩样组合方式的影响较小,主要受裂隙位置的影响。此时,岩样中张拉裂纹的占比较大,岩样的破坏模式也以张拉破坏为主。而当裂隙位于岩样中部时,其破坏模式受裂隙倾角的影响较大,在低裂隙倾角条件下,以张拉破坏为主,裂隙试样的表面裂纹数量呈现出先增加后减少的趋势,

尤其在裂隙倾角为30°或45°时,表面裂纹数量达到峰值;随着裂隙倾角增大,剪切裂纹的占比逐渐增加,最终形成了以剪切破坏为主的张拉-剪切混合破坏模式。

此外,裂隙位于砂岩时的裂纹数量显著多于位于灰岩的,表明裂隙对砂岩影响更大,主要是砂岩强度低于灰岩,裂隙进一步削弱其强度,导致岩样破坏时砂岩破坏更为严重,且裂隙倾角越大,这一现象越明显,这是因为倾角增大使裂隙在垂直加载方向投影长度减小,对岩层削弱作用减弱,试样破坏特征趋近完整试样。此时层状岩体受单向作用力,相邻岩层横向应变差异使岩层交界面产生黏结力,形成"假三轴"受力状态。砂岩层约束灰岩层,两类岩层应力状态转变,类砂岩层破坏更充分,表面裂纹增多。

3 岩样的声发射特征分析

3.1 各裂隙岩样声发射信号参数规律分析

基于裂隙试样在加载全过程中的声发射能量及声发射累计能量的变化趋势,将各裂隙岩样在压密阶段(*OA*)、线弹性阶段(*AB*)、损伤阶段(*BC*)、峰后阶段(*CD*)的声发射累计能量进行计算、统计,并绘制裂隙试样声发射累计能量随裂隙倾角的变化曲线,如图7所示。

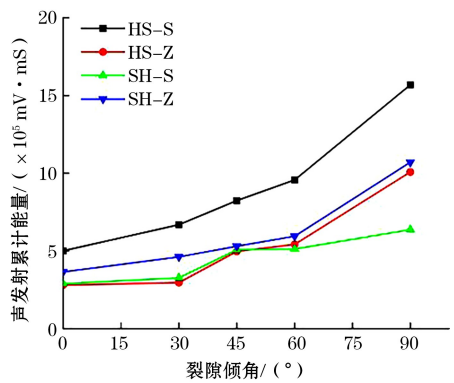


图7 裂隙试样声发射累计能量随裂隙倾角变化曲线

Fig.7 Variation curves of acoustic emission cumulative energy of fractured samples with fracture dip angle

由图7可知,裂隙试样的声发射累计能量与裂隙倾角呈现出显著的正相关关系。其主要原因在于,随着裂隙倾角的增大,裂隙对试样强度的削弱作用逐渐减弱,试样的峰值应力逐步提升,使得试样的破坏过程更为充分,声发射累计能量也随之增大。

在裂隙倾角相同的情况下,裂隙位于砂岩岩层试样的声发射累计能量普遍低于裂隙位于灰岩岩层试样。其主要原因是,当裂隙位于砂岩岩层时,裂纹主要从砂岩岩层向灰岩岩层扩展,导致灰岩岩层的破坏不够充分。尽管这对总体声发射事件数量的影响不大,但多数声发射事件发生在砂岩岩层中,导致最终的声发射累计能量相对较低。当裂隙倾角达到90°时,试样的声发射累计能量增幅显著提升,裂隙对试样的削弱作用明显减弱,相应的峰值应力增大,试样整体破坏更为充分。

3.2 声发射 *RA-AF* 参数特征分析

3.2.1 加载过程中 *RA-AF* 参数特征分析

以SH-Z-30试样为分析对象,同样将加载过程划分为压密阶段(*OA*)、线弹性阶段(*AB*)、损伤阶段(*BC*)和峰后阶段(*CD*),并统计岩样在各阶段内的 *RA* 值及 *AF* 值,结果如图8所示。图中黑色虚线表示两种裂纹的分界线,洋红色、青色、绿色、橙色小球分别代表加载全过程、*OA* 及 *AB* 阶段、*BC* 阶段、*CD* 阶段内的 *RA-AF* 散点(颜色标识见电子版)。参考许文松等[19]的研究,选取 $AF=k\times RA$ 作为分界线方程,其中斜率 k 的取值为加载过程中 *AF* 值与 *RA* 值的最大值的比值。

由图8可知,在加载初期,即 *OA* 及 *AB* 阶段,*RA-AF* 散点主要集中于分界线上方,且散点中心密集区更偏向纵轴,经统计,此阶段张拉裂纹和剪切裂纹的占比分别为79.61%和20.39%,表明该阶段岩样内部裂纹以张拉裂纹为主。

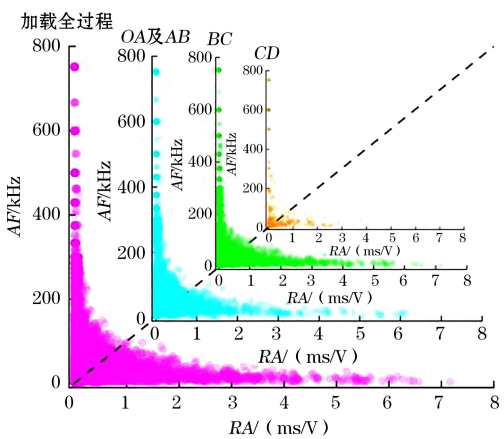


图8 SH-Z-30试样 *RA-AF* 散点分布

Fig.8 Distribution of *RA-AF* scatter of SH-Z-30 sample

当试样加载进入中期,即 *BC* 阶段,*RA-AF* 散点数量增加,仍主要分布在分界线上方,但散点中心密集区开始向下移动,横轴附近的散点数量显著增

多。此阶段张拉裂纹和剪切裂纹的占比分别为66.55%和33.45%,表明剪切裂纹的占比相较于前一阶段显著增加,翼裂纹持续发育,并伴随次生倾斜裂纹的萌生。

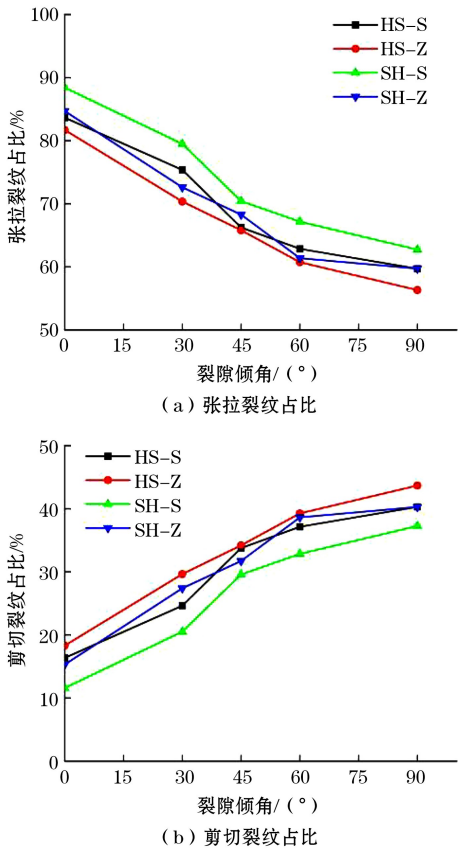
随着试样加载进入后期,即*CD*阶段,岩样已达到峰值应力,破坏即将完成。此时,*AF*值和*RA*值的大小区间与*OA*及*AB*阶段相似,但散点数量急剧减少,主要原因是岩样即将断裂,产生的新裂纹数量较少。*RA-AF*散点在分界线两侧分布较为均匀,张拉裂纹和剪切裂纹的占比分别为58.37%和41.63%,两者数量接近。

在整个单轴压缩加载过程中,*RA-AF*散点较为均匀地分布在分界线两侧,但总体上仍以分界线上方较为密集。张拉裂纹和剪切裂纹的占比分别为72.61%和27.39%,证实了岩样的破坏模式是以张拉为主、剪切为辅的张拉-剪切混合破坏。

3.2.2 各裂隙岩样*RA-AF*参数规律分析

通过统计*RA-AF*散点分布情况,获得了试样在各阶段的张拉裂纹和剪切裂纹占比,如图9所示。

由图9可知,在岩层组合方式及裂隙倾角固定的情况下,裂隙位于上部岩层的岩样在加载全过程中的张拉裂纹占比均高于裂隙位于中部岩层的岩样。此外,在裂隙位置及倾角固定的情况下,类砂岩夹类灰岩岩样在加载全过程中的张拉裂纹占比均高于类灰岩夹类砂岩岩样。岩样的张拉裂纹占比与裂隙倾角呈负相关关系,这表明在单轴压缩条件下,裂隙位于上部、裂隙倾角较小、岩层组合方式为软岩夹硬岩是使含单裂隙层状复合岩体更易产生张拉裂纹的优势条件,进一步验证了前文对破坏模式的分析。



(a)张拉裂纹占比

(b)剪切裂纹占比

图9 裂隙试样裂纹占比变化趋势

Fig.9 Change trend of crack proportion of fractured samples

3.3 基于声发射分析的裂隙岩样破坏模式总结

基于上文对声发射*RA-AF*参数特征的分析,结合各裂隙岩样最终破坏模式,并参考吴迪等[20]的研究,按照岩样不同的裂纹演化过程,即从初始的主破裂裂纹类型到最终破坏模式,对裂隙岩样的破坏规律进行总结,结果见表3。

表3 岩样破坏特征和破坏机理

Table 3 Failure characteristics and failure mechanism of rock samples

试样	0°	30°	45°	60°	90°
HS-S	翼裂纹-张拉破坏	翼裂纹-多拉少剪破坏	反翼裂纹-拉-剪混合破坏	反翼裂纹-拉-剪混合破坏	次生共面裂纹-拉-剪混合破坏
HS-Z	次生倾斜裂纹-张拉破坏	次生倾斜裂纹-多拉少剪破坏	次生倾斜裂纹-拉-剪混合破坏	次生倾斜裂纹-拉-剪混合破坏	次生倾斜裂纹-拉-剪混合破坏
SH-S	翼裂纹-张拉破坏	反翼裂纹-多拉少剪破坏	反翼裂纹-多拉少剪破坏	翼裂纹-多拉少剪破坏	反翼裂纹-拉-剪混合破坏
SH-Z	次生倾斜裂纹-张拉破坏	次生倾斜裂纹-多拉少剪破坏	翼裂纹-多拉少剪破坏	次生倾斜裂纹-拉-剪混合破坏	次生共面裂纹-拉-剪混合破坏

由表3可知,裂隙层状复合岩样的裂隙倾角、位置及岩层的组合方式均对其破坏模式产生显著影响。当裂隙位于上部岩层时,岩样的初始主破裂裂纹多为翼裂纹或反翼裂纹;当裂隙位于中部岩层时,初始主破裂裂纹则多为次生倾斜裂纹或次生共面裂纹。这表明裂隙位于上部时,优先出现的裂纹以张拉裂纹为主,随着裂隙倾角的增大,岩样内部剪切裂纹的占比逐渐上升,裂纹的最终破坏模式也相应地从张拉破坏过渡到多拉少剪破坏,最终转变为拉-剪混合破坏。此外,在裂隙倾角增大的过程中,相较

于砂岩夹灰岩岩样,灰岩夹砂岩岩样最终破坏模式会更早地转变为拉-剪混合破坏。

4 结论

本文主要结合 XTDIC 及声发射技术,对含单裂隙层状复合岩样进行了深入分析,探讨岩样裂隙倾角、裂隙位置以及岩层组合方式对其破坏特征的影响,主要研究成果如下。

(1) 裂隙对岩样强度具有显著的劣化效应。裂隙岩样的峰值应力与裂隙倾角呈正相关关系,随着裂隙倾角增大,峰值应力从 13.19～25.34 MPa 逐渐增加到 33.89～42.99 MPa,弹性模量则随裂隙倾角的增大呈现先增后减的变化趋势。此外,随着裂隙倾角的增大,劣化系数从 0.32～0.66 逐渐减小至 0.06～0.20。相较于灰岩,裂隙对砂岩的劣化影响更为显著。

(2) 裂隙在不同位置、不同倾角下均能对岩样的破坏模式产生影响,且以裂隙位置为主导因素。当裂隙位于岩样上部时,岩样破坏以张拉破坏为主;而当裂隙位于岩样中部时,其破坏模式才开始受裂隙倾角的影响,在低裂隙倾角时,以张拉破坏为主,高裂隙倾角时,转变为以剪切破坏为主的张拉-剪切混合破坏模式。

(3) 由声发射 *RA* 值及 *AF* 值的变化规律可知,低裂隙倾角时,优先出现的裂纹均以张拉裂纹为主,占比可达 81.69%～88.41%。随着裂隙倾角的增大,岩样内部剪切裂纹的占比逐渐上升,裂纹的最终破坏模式也相应地从张拉破坏过渡到多拉少剪破坏,最终转变为张拉裂纹为主(56.33%～62.73%)的拉-剪混合破坏。该结果验证了基于 XTDIC 系统的岩样破坏模式分析。

参考文献(References):

[1] 鲜学福,谭学术.层状岩体破坏机理[M].重庆:重庆大学出版社,1989.
Xian Xuefu, Tan Xueshu. Failure mechanism of layered rock mass[M]. Chongqing:Chongqing University Press,1989.

[2] 腾俊洋,唐建新,王进博,等.层状复合岩体损伤演化规律及分形特征[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增刊 1):3266-3278.
Teng Junyang, Tang Jianxin, Wang Jinbo, et al. The evolution law of the damage of bedded composite rock and its fractal characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(Suppl.1):3266-3278.

[3] 黄锋,周洋,李天勇,等.软硬互层岩体力学特性及破坏形态的室内试验研究[J].煤炭学报,2020,45(增刊 1):230-238.
Huang Feng, Zhou Yang, Li Tianyong, et al. Laboratory experimental study on mechanical properties and failure modes of soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(Suppl.1):230-238.

[4] 李昂,邵国建,苏静波,等.软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):533-538.
Li Ang, Shao Guojian, Su Jingbo, et al. Uniaxial compression test and numerical simulation for alternatively soft and hard interbedded rock mass[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):533-538.

[5] 丁恩理,刘越,吴继敏,等.软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊 1):39-46.
Ding Enli, Liu Yue, Wu Jimin, et al. Triaxial test study on the mechanical properties of soft-hard interbedded rocklike specimens[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(Suppl.1):39-46.

[6] 谢志英,许可,陆逸帆,等.三轴压缩下单裂隙位置对复合岩样力学变形与破坏模式的影响[J].黄金科学技术,2024,32(3):458-469.
Xie Zhiying, Xu Ke, Lu Yifan, et al. Influence of single fissure position on mechanical deformation and failure modes of composite rock specimens under triaxial compression[J]. Gold Science and Technology,2024,32(3):458-469.

[7] 赵娜,孟利新,缪海宾,等.不同倾角软-硬组合岩体破裂演化过程分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):58-67.
Zhao Na, Meng Lixin, Miao Haibin, et al. Experimental analysis of failure process in soft-hard combined rock masses at different inclination angles[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2023,34(4):58-67.

[8] 刘小亮,陈新,宋笑凡.软硬互层岩体变形破坏机制物理模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊 2):3980-3995.
Liu Xiaoliang, Chen Xin, Song Xiaofan. Physical simulation test on deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(Suppl.2):3980-3995.

[9] 贺馨瑶,常远,任富强.落锤冲击下冻结单裂隙砂岩力学及声发射特征试验研究[J].工矿自动化,2024,50(5):135-141+156.
He Xinyao, Chang Yuan, Ren Fuqiang. Experimental study on the mechanical and acoustic emission features of frozen single fractured sandstone under drop hammer impact[J]. Journal of Mine Automation,2024,50(5):135-141+156.

[10] Qi Xianyin, Yang Zhen, Wang Shengwei, et al. Mechanical damage test and model study of layered composite rock based on acoustic emission and DIC characteristics[J]. Shock and Vibration,2022(6):6568588.

[11] 李修磊,谢飞,陈臣,等.基于声发射的张开型单裂隙岩石裂纹扩展行为特性研究[J].水文地质工程地质,2024,51(3):90-101.
Li Xiulei, Xie Fei, Chen Chen, et al. Investigation of crack propagation behavior of opening single fractured rock based on acoustic emission technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2024,51(3):90-101.

[12] Wang Binxu, Li Tingchun, Li Chunting, et al. Study on the creep properties and fracture behavior of three different rock types with a single preexisting fissure [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(7):255.

[13] 谢其泰,郭俊志,王建力,等.单轴压缩下含倾斜单裂纹砂岩试件裂纹扩展量测研究[J].岩土力学,2011,32(10):2917-2921+2928.
Xie Qitai, Guo Junzhi, Wang Jianli, et al. A study of crack propagation measurement on sandstone with a single inclined flaw under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(10):2917-2921+2928.

[14] 王雄,刘小宇,袁超,等.裂隙类型和倾角影响下红砂岩损伤破裂机理研究[J].金属矿山,2025(7):33-42.
Wang Xiong, Liu Xiaoyu, Yuan Chao, et al. Study on the damage and rupture mechanism of red sandstone under the influence of fracture type and dip angle[J]. Metal Mine,2025(7):33-42.

[15] 陈龙,李利,孔德中,等.单向应力下类岩石试件预制浅裂隙发育规律及破坏特征分析[J].矿业研究与开发,2024,44(5):135-141.
Chen Long, Li Li, Kong Dezhong, et al. Development law and failure characteristics of prefabricated shallow fracturesin rock-like specimens under unidirectional stress[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):135-141.

[16] 李震,吴冠洋,司尚金,等.层状岩石逆倾向与顺倾向剪切破坏特征的差异性研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):37-47.
Li Zhen, Wu Guanyang, Si Shangjin, et al. Differences between reverse and normal shear in failure characteristics of layered rocks [J]. Coal Science and Technology,2024,52(7):37-47.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.工程岩体试验方法标准:GB/T 50266—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.

[18] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):3251-3256.
Xiao Taoli, Li Xinping, Guo Yunhua. Experimental study of failure characteristie of single jointed rockmass under triaxial compression tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3251-3256.

[19] 许文松,张金栋,赵光明,等.不同加载刚度砂岩失稳破坏特征及能量演化规律[J].岩石力学与工程学报,2024,43(12):2908-2923.
Xu Wensong, Zhang Jindong, Zhao Guangming, et al. Failure characteristics and energy evolution of sandstone with different loading stiffnesses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(12):2908-2923.

[20] 吴迪,江兴元,赵珍贤,等.含缺陷砂岩单轴压缩裂纹类型及演化规律试验研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(2):200-215.
Wu Di, Jiang Xingyuan, Zhao Zhenxian, et al. Experimental study on the types and evolution of uniaxial compression cracks in defective sandstone[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2025,56(2):200-215.