

DOI: 10.11779/CJGE202111016

高湿环境平行双裂隙砂岩单轴压缩破坏及裂纹扩展特性

陈伟¹, 万文¹, 赵延林¹, 王卫军¹, 吴秋红¹, 吴小凡², 谢森林³

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学数学与计算科学学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 中国矿业大学能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 深部裂隙矿柱长期受高湿环境中水分子所侵蚀, 其化学动力过程与矿房稳定性及控制地表沉降密切相关。对预制平行双裂隙标准砂岩试样进行了单轴压缩试验, 研究高湿对裂隙砂岩强度变形特性、裂纹演化以及破坏模式的影响, 结合电镜扫描和 XRD 衍射, 分析了试件在高湿环境水化作用前后的微细观结构变化和质量损失特征。结果表明: ①试样结构疏松程度与湿度成正相关, 湿度升高, 试样表现致密结构变得松散并伴有次生孔隙发育, 形成模糊的层间界面, 且微裂隙数目增加, 质量损失率加剧。②裂隙砂岩在单轴压缩下主要有拉伸破坏, 剪切破坏和二者混合型破坏。裂纹萌生的类型主要有翼形裂纹、反抗拉裂纹以及共面/非共面次级裂纹。其裂纹扩展及破坏模式受控于湿度, 随着湿度升高, 裂纹起裂应力和贯通应力降低, 宏观裂纹发育的整体数量呈下降趋势, 且其破坏模式由剪切破坏过渡到拉伸破坏。③高湿环境对裂隙砂岩产生水岩化学作用, 减弱了裂隙结构面以及矿物颗粒间的摩擦作用, 降低了其峰值强度, 峰值应变和弹性模量, 提高了泊松比, 加速了裂隙砂岩的破坏。

关键词: 高湿环境; 平行双裂隙; 水化侵蚀; 力学损伤; 裂纹扩展

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)11-2094-11

作者简介: 陈伟(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事矿山岩石力学与岩层控制的研究。E-mail: chenweiwade@mail.hnust.edu.cn。

Uniaxial compression damage and crack propagation features of parallel double-fissure sandstones under high-humidity environments

CHEN Wei¹, WAN Wen¹, ZHAO Yan-lin¹, WANG Wei-Jun¹, WU Qiu-hong¹, WU Xiao-fan², XIE Sen-lin³

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Mathematics and Computational Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. School of

Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Fractured pillars are eroded by gaseous water under high-humidity environments, and their hydro-chemical processes are closely related to the stability of the mineroom and ground subsidence. The uniaxial compression tests are carried out on standard sandstones with prefabricated parallel double-fissure to analyze the effects of high humidity on the strength-deformation properties, crack evolution and damage modes. By using the electron microscopy scanning and XRD diffraction, the microstructural changes and mass loss characteristics are analyzed before and after hydration. The results show that: (1) The higher humidity causes the structure to loosen more, the interlayer demarcation gets blurred, the number of microcracks grows and the rate of mass loss improves. (2) The damage modes contain tensile, shear and mixed tensile/shear damages. The crack growth includes in 4 types: wing cracks, tensile resistance cracks, and coplanar/non-coplanar secondary cracks. The crack propagation and damage modes are controlled by humidity. As the humidity increases, the crack initiation and penetration stresses drop, the number of cracks sprouting macroscopically reduces and the failure mode changes from shear to tensile failure. (3) The High-humidity condition produces water-rock chemical effects on fractured sandstones, weakening the structural surface of the cracks and the friction between the mineral particles, reducing the peak strength, peak strain and elastic modulus, increasing the Poisson's ratio and accelerating the destruction.

Key words: high-humidity environment; parallel double-fissure; hydro-chemical erosion; mechanical damage; crack propagation

0 引言

含预制裂隙岩石材料的力学特性一直是岩石力学

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774132, 51774131); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5188)

收稿日期: 2021-03-08

*通信作者(E-mail: wanwen68@163.com)

研究的热点问题。例如, 杨圣奇等^[1]以大理岩作为研究对象, 从预制裂隙的几何形态入手, 包括裂隙的倾角、间距、长度、数目等参数, 研究了其强度和变形特性, 总结了裂纹扩展规律。袁媛等^[2]基于数字图像相关方法, 对含填充裂隙的大理岩单轴压缩过程中的全局应变场及位移场进行观测, 分析了不同裂隙倾角和不同充填物试样的变形破坏和裂纹扩展规律。Bobet 等^[3]根据双裂隙石膏岩的单轴压缩试验结果, 重点分析了试件的强度和变形破坏模式受裂隙贯通和萌生次生裂纹类型的影响规律。Zhou 等^[4]利用 3D 打印技术制作了裂隙类岩石试样, 并发现裂隙的几何形状对试件的裂纹扩展规律和力学性能产生影响。赵延林等^[5]重点研究了类岩石材料强度和裂纹扩展模式受控于裂隙开度。以上的诸多研究并未提及岩体所处环境的变化, 随着浅层矿产资源的逐渐枯竭, 资源的开采正稳步向地球深部进军。目前为止, 对于煤炭、地热、有色金属、油气等资源的开采, 其深度已经分别超过了 1400, 3000, 4350, 7500 m^[6]。与浅部相比, 深部的采矿环境变得更加复杂, 地下水的涌水量加大伴随地温升高, 促进蒸发使得深部矿房的相对湿度会达到 80% 以上^[6-7]。此外, 地层经过漫长的地质构造运动, 岩体中出现了不同程度的缺陷, 如裂隙、节理和断层^[8], 这些缺陷使得岩体的力学特性更容易受到高湿环境的影响。

如图 1 中的石膏岩矿柱存在平行双裂隙, 在高湿环境的水岩作用下, 被气态水分子所侵蚀^[9]。相较于气态蒸馏水而言, 含有多种化学成分的气态地下水不仅会对岩体矿物颗粒产生溶解和运移, 而且对岩体微观结构产生化学腐蚀, 导致裂隙矿柱的宏观力学性能劣化, 从而加速其裂纹扩展、促进岩桥贯通, 造成矿柱失稳, 顶板凹陷, 地表沉降, 以及房屋开裂^[10]。



图 1 深部高湿环境裂隙矿柱水化侵蚀所带来的危害^[9]

Fig. 1 Damages caused by hydration and erosion of fractured pillars under deep and high-humidity conditions^[9]

针对水岩作用下裂隙岩体强度特征和变形规律, 学者们也取得了丰硕的成果。研究表明, 安山岩、角闪岩、玄武岩、辉绿岩、辉长岩、花岗岩等^[11], 包括主要的造岩矿物, 如石英和方解石^[9], 在水或水化学溶液中裂纹扩展的速度比空气中快得多, 且由于其水岩作用导致膨胀和外层剥蚀, 发生质量损失和结构劣化, 导致整体力学性能发生改变^[12-13]。总结其根本原因, 在水化学环境中, 岩石材料的裂纹扩展加速主要是由于应力腐蚀^[14]。

目前裂隙岩体的研究主要从 4 个方面展开: ①载荷类型方式; ②试验材料; ③裂隙形态的几何分布; ④所处环境特征。前人已经围绕前 3 种因素做出研究并得出了相对丰硕的成果。而目前关于水岩作用裂隙岩体的研究大多是针对浸泡相关溶液后再对岩石试件进行荷载作用下展开的, 鲜有关于高湿作用相关的报道, 虽然二者均是流体, 但其对裂隙岩体的水岩作用程度以及运移方式不尽相同。根据上述工程实际, 对贵州瓮福磷矿穿岩洞矿区开展水文地质调查后发现, 该矿区内存在弱酸性地下水, 矿房内的矿柱长期受气态水的侵蚀。本文模拟深部高湿环境, 以含预制平行裂隙的矿柱砂岩作为研究对象, 借助 MTS-815 型伺服试验系统进行了单轴压缩试验。分析高湿环境对裂隙砂岩力学特性的劣化规律和机理, 并利用高速摄影仪记录试样在试验过程中裂纹扩展的力学响应及破坏模式, 最后探讨了高湿对裂隙的起裂、贯通及相关参数影响的异同。

1 试验设计

1.1 试样制备

根据对贵州瓮福磷矿穿岩洞矿区房柱法开采段 3 号线-750 m 中段的环境监测, 发现该区域地下水发育, 且常年矿房相对湿度处于 90% 左右 (图 2)。在现场以较小的取样范围内沿沉积构造方向钻孔采取了部分矿柱岩芯 (图 3 (a)), 将其制备成 50 mm×100 mm 的标准圆柱体试件^[15], 并在试件上切割长 20 mm, 宽 2 mm 的平行 2 条预制穿透裂隙, 预制裂隙倾角 α 均为 45°, 两条预制裂隙的中点连线垂直于试样端面, 上、下两排裂隙间的垂直距离 (裂隙间距) $L=23.5$ mm, 岩桥距离以及两条裂隙中点距离上下端面的垂直距离, 均为 $B=33.3$ mm (图 3 (b) 和图 4 (c))。裂隙砂岩试件加工完毕后, 仔细检查其外观, 剔除了外表面具有肉眼可见宏观特征差异的试样, 以确保本次试验结果的可靠性及可比性。因此, 最大限度的保证了此批试样在试验前具有较小的离散性。

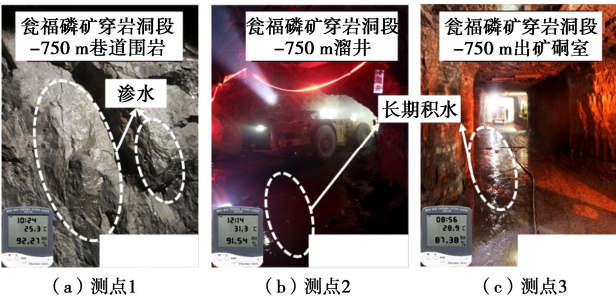


图 2 现场环境测试

Fig. 2 Tests on field environment

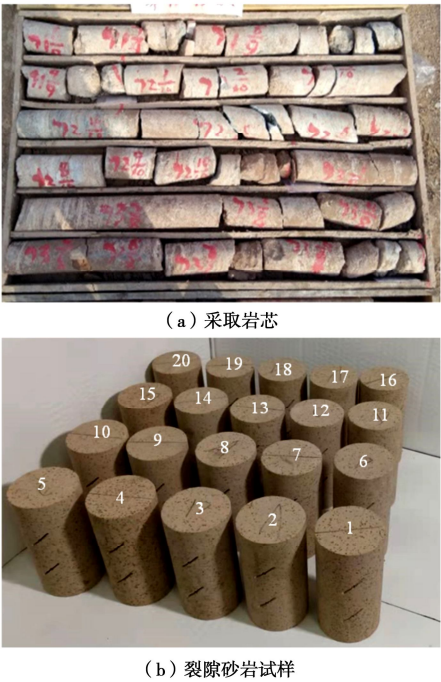


图 3 岩芯采取与试样制备

Fig. 3 Collection of core and preparation of specimens

试件制备完成后以塑料薄膜进行密封包裹，以防止试件风化。根据该砂岩的 XRD 衍射分析结果可知（图 5），其主要矿物成分由石英，方解石和云母构成，次要矿物有钠长石，蒙脱石、伊利石等，色相为淡黄色，细晶结构，粒径相对均匀，呈致密块状构造。采用煮沸法测定饱和吸水率，经计算平均值在 3.6%左右，采用 AiniMR-60 核磁共振分析仪对试件进行孔隙率测试，获得试件的平均孔隙率为 6.27%。

1.2 高湿环境的实现

模拟深部高湿环境是指地下水以气态水分子的形式侵入试件的微孔隙内。根据自行申报的专利“岩石力学实验温、湿度环境控制模拟装置^[16]”，进行了加工并投产使用（图 4）。该环境控制模拟装置为温湿度控制器（图 4（a））和封闭式的箱体（如图 4（b））组合而成，通过超声波将水化学溶液振动并汽化，通过输送管道传输到箱体内，并采用湿度传感器以及控制单元，使箱体内能够一直保持预设的湿度环境，由于本文所选矿区的温度在 25℃~30℃，以一个较小范围浮动（图 2），且本文主要研究湿度对试件的力学损伤，故设置其恒定温度为 25℃。

表 1 列出了本次试验中预制平行双裂隙砂岩基本参数。为了掌握现场酸性地下水溶液对岩石的损伤效应，基于现场地下水两种最大含量的阳离子 Na^+ 和阴离子 Cl^- ，并依照将反应物的浓度进行适量的提升而缩短反应时间，以达到加快试验进程的目的^[17]，配置了 pH 值为 5 的 NaCl 溶液来模拟现场弱酸性地下水（pH=6.28）对砂岩矿柱的长期侵蚀作用（如图 4（d））。

1.3 加湿与加载程序

加工好的预制平行双裂隙砂岩试样采用湿度控制

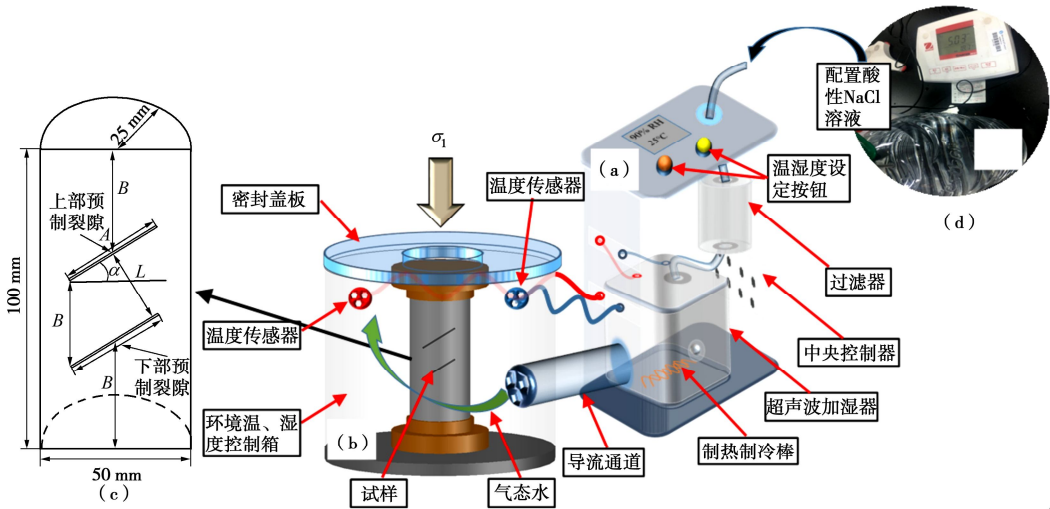


图 4 高湿环境的实现：岩石力学试验温、湿度环境控制模拟装置^[16]

Fig. 4 Realisation of high-humidity environment: temperature and humidity environment control modelling device for rock mechanics experiments^[16]

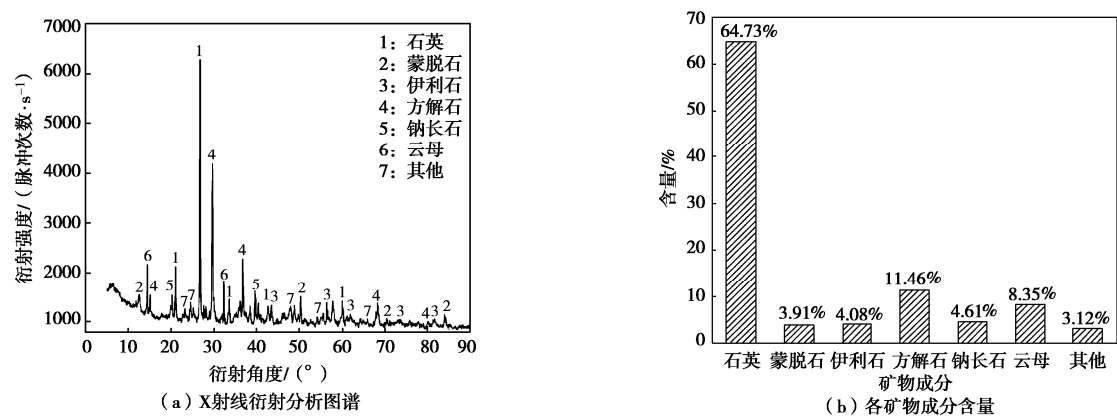


图 5 砂岩 X 射线衍射矿物成分分析

Fig. 5 Analysis of X-ray diffraction mineral composition of sandstones

箱进行加湿。加湿程序如下：首先将配置的酸性 NaCl 溶液以 1℃/min 升温至 25℃，然后打开加湿系统将箱体内部的环境湿度加到目标湿度（80%RH，90%RH 和 100%RH）；然后在目标温、湿度状态下运行 60 d^[18]；最后，取出试样，对表面进行擦拭，为了保证各岩样含水率相同以达到控制变量的要求，基于《岩石物理力学性质试验规程》^[19]，采用真空干燥箱（DZF-2060 型）对岩样进行干燥，干燥温度设置为 120℃，烘干 24 h。

表 1 预制平行双裂隙砂岩试样基本参数

Table 1 Basic parameters of sandstone specimens with prefabricated parallel double-fissure

编号	平均高度/mm	平均直径/mm	平均质量/g	平均密度/(g·cm ⁻³)	控制湿度/%
UCS- (1~5)	99.97	49.55	420.63	2.14	干燥
UCS- (6~10)	100.04	49.43	417.77	2.12	80
UCS- (11~15)	99.92	49.63	422.57	2.15	90
UCS- (16~20)	100.03	49.76	418.07	2.13	100

采用湖南科技大学南方煤矿重点实验室的 MTS-815 岩石力学伺服控制试验机进行干燥后裂隙砂岩试件的单轴压缩试验。试件的加载通过 MTS-815 来以荷载方式施加轴向压力，加压速率为 0.2 kN/s，这样的加载速率处于一个比较低的水平，使得试件的裂纹起裂、扩展、贯通、破坏的详尽过程被全部记录。与此同时，为了分析各湿度对试件变形特性的影响，通过轴向、环向 LVDT 位移计来记录轴向和环向的位移。

2 各湿度环境下裂隙砂岩化学损伤分析

2.1 试件宏、微观损伤分析

裂隙砂岩各湿度环境下 60 d 的宏观特征变化如图

6 所示。砂岩试件在湿度装置处理前，进行了取芯、切割、抛光，因此干燥密封状态下试件的整体结构紧密，颗粒排列规则，充分包裹于胶结物中，无肉眼可见的孔洞和微裂隙存在（图 6（a））。经过 3 种高湿环境处理后，出现不同程度的侵蚀痕迹。80%RH 处理下，经过 60 d 的水化作用，岩样外表面晶体和胶结物发生明显溶蚀，导致试样颜色发生改变（图 6（b））。在 90%RH 和 100%RH 的湿度环境中处理 60 d 后，岩样外表层均出现不同数量的微裂隙，岩样外表面变得凹凸不平（图 6（c），（d））。对比来看，100%RH 下的试件表面的微裂隙数量更多，部分位置的矿物颗粒不再包裹于胶结物中而是显现出来，次生孔隙随着粉状物的逐渐脱落，而逐步增大，裂隙借此发育并联通，结构因此变得较为松散（图 6（d））。

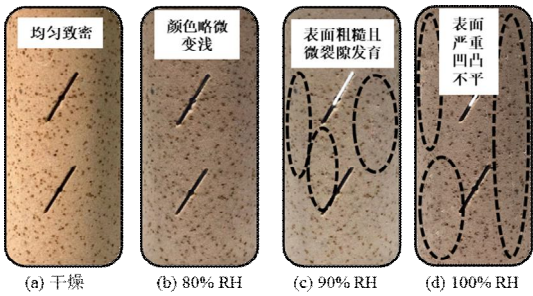


图 6 裂隙砂岩在 4 种湿度环境下 60 d 的表现对比图

Fig. 6 Apparent comparison of fractured sandstones under 4 kinds of humidity environments for 60 d

微观上，根据电子显微图 7 可知，干燥试样显示出的大多都是片状和层状结晶，其晶体结构比较清晰，均质性极好，而且内部没有较大的层间距离，晶粒间排列紧密，基本无微裂隙和微孔隙分布（图 7（a）），体现出经高湿处理前，其物理力学性能良好。而试件在经过高湿作用之后，其结构变得疏松而且呈现出团絮状或海绵状的形态，层次之间不再有明显的分界，

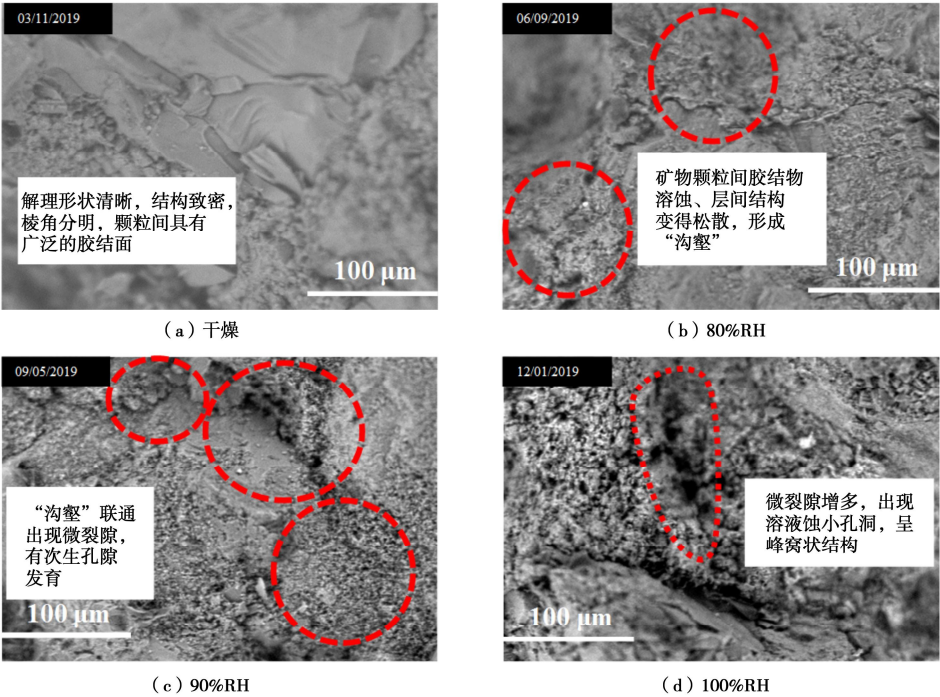


图 7 不同湿度环境下 60 d 裂隙砂岩表面电镜扫描图

Fig. 7 Scanning electron microscopy of surfaces of fractured sandstone under different humidity environments for 60 d

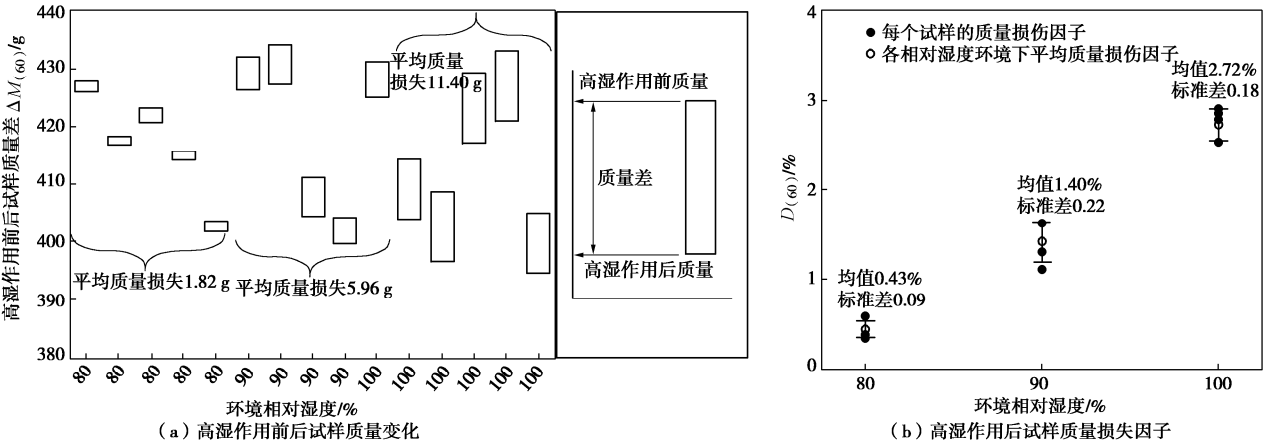


图 8 3 种湿度环境下放置 60 d 的裂隙砂岩试样的质量变化对比

Fig. 8 Comparison of mass changes of fractured sandstone specimens for 60 d under 3 kinds of humidity environments

形成大小尺寸不一的“沟壑”，且随着湿度增高，微裂隙和微孔隙的数量增多，原先分散的较大尺寸的“沟壑”互相连通形成微裂隙并伴有蜂窝状孔隙发育，岩样微观结构损伤愈发严重（图 7（b），（c）和（d））。

可以看出，在其余外部环境一致情况下，不同湿度环境对砂岩的侵蚀程度不一样，表明砂岩对不同湿度的敏感性不同。

2.2 试件质量损失分析

将处理完的岩样表面用蒸馏水冲洗、擦干并烘干后，用精密天平称其质量。这里，定义质量损失因子 D 用以表征裂隙砂岩经不同湿度环境处理前后的质量

损失程度，令

$$D_{(t)} = \frac{\Delta M_{(t)}}{M_0} \times 100\% = \frac{M_0 - M_{(t)}}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中， M_0 为岩样初始质量， $M_{(t)}$ 为岩样经不同湿度环境处理 t d 后的质量， $\Delta M_{(t)}$ 为试样经不同湿度环境处理 t d 前后的质量差值。

图 8 给出了每种湿度下的 5 个试件质量和质量损失因子变化随湿度的变化。图 8（a）表明，经过 3 种湿度环境处理过后，裂隙砂岩质量均呈下降趋势，但下降的幅度有所不同，其与湿度值呈负相关，即环境湿度越高，质量的损失量增加。如 100%RH 的湿度环境下，试样质量平均损伤 11.40 g，分别为 80%RH，

表 2 高湿处理 60 d 后平行双裂隙砂岩单轴压缩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of sandstone with parallel double-fissure under high-humidity environments for 60 d under uniaxial compression

试样 编号	控制湿度 /%	峰值强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	试样 编号	控制湿度 /%	峰值强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
UCS-1	干燥	25.07	4.81	0.15332	UCS-11	90	16.52	3.02	0.16168
UCS-2		25.09	4.53	0.15541	UCS-12		16.95	2.81	0.16498
UCS-3		23.23	4.93	0.15326	UCS-13		17.26	2.93	0.16126
UCS-4		26.23	4.85	0.15763	UCS-14		18.48	3.09	0.16265
UCS-5		26.09	5.08	0.16348	UCS-15		17.52	3.02	0.16108
UCS-6	80	18.5	3.35	0.15642	UCS-16	100	15.23	3.15	0.17446
UCS-7		20.4	3.21	0.15952	UCS-17		17.52	3.09	0.17387
UCS-8		19.52	3.53	0.15945	UCS-18		17.25	3.13	0.16954
UCS-9		19.23	3.33	0.15983	UCS-19		15.52	3.06	0.16576
UCS-10		19.13	3.18	0.15883	UCS-20		16.44	3.17	0.17442

90%RH 湿度下的 6.26 倍和 1.91 倍。同时观察图 8(b)发现, 100%RH 下试样的质量损失因子明显大于其它两种湿度下的质量损失因子, 其平均值为 2.72%, 分别是 80%RH 和 90%RH 环境下质量损失因子的 6.33 倍和 2.61 倍。这说明随着空气中酸性水分子数量的增加, 水岩反应更激烈、更迅速, 导致矿物晶粒间存在的化学键发生断裂, 以及由于试样内部膨胀出现表面粉末碎屑掉落的现象, 从侧面反映了湿度越高对裂隙岩样的物理结构破坏越严重。

3 高湿环境下预制平行双裂隙砂岩力学特性劣化规律

3.1 预制平行双裂隙砂岩抗压强度劣化规律分析

根据 20 组试样的试验结果,表 2 总结了平行双裂隙砂岩经高湿处理 60 d 后在单轴压缩下的峰值强度、弹性模量和泊松比。

每种环境下选取抗压强度峰值为中位数的裂隙砂岩作为代表,图 9(a)展示了其应力-应变曲线。可以看出裂隙砂岩在整个受载直至破坏过程中,一共出现了初始裂隙压密阶段 I、弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段 II、非稳定破裂发展阶段 III 和峰后阶段 IV 4 个阶段。它们由于试样所处环境湿度的不同,其特征也有所差异:①初始裂隙压密阶段,曲线凹度随着湿度的增加而减小,此阶段也就是刚受载时新裂隙的产生数量减少;②弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段,随着湿度的增加,曲线斜率逐渐减小,说明弹性模量也逐渐减小;③非稳定破裂发展阶段,对比干燥试样,高湿处理后岩样的峰值应力显著下降,从 25.09 MPa(干燥)下降至 16.44 MPa(100%RH),下降了 34.81%,有应力平台出现在干燥试样的峰值周围,但持续时间较短。这是由于预制裂隙周边正在慢慢产生变形及扩

展所导致的^[20];④破裂后阶段,干燥试样在峰后应力迅速垂直跌落,呈现出较为明显的强脆性以及低塑性,说明干燥试样具有致密性,反观高湿处理后的试样由于水岩作用使得内部结构松散,颗粒间胶结物缺失导致塑性明显增强。

所有岩样的峰值单轴抗压强度统计图如图 9(b)所示。从图 9(b)看出,随着湿度的增大,裂隙砂岩的峰值应力呈递减变化,对应的抗压强度与湿度关系曲线逐渐下移,这与以往类似试验结果^[11]是一致的。

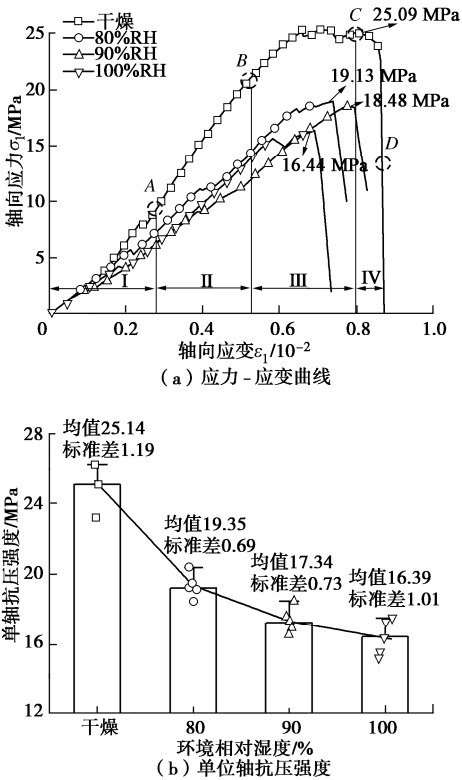


图 9 不同湿度环境下 60 d 双裂隙砂岩试样单轴压缩规律
Fig. 9 Uniaxial compression law of double-fissure sandstones under different humidity environments for 60 d

3.2 预制平行双裂隙砂岩力学参数劣化规律分析

一般用来表征试样力学变形特性的参数是弹性模量 E 、泊松比 ν ，计算结果如图 10 所示。

图 9 (a) 中应力 - 应变曲线在直线段的变形量随环境湿度增加基本呈减小趋势，即高湿削弱了砂岩的弹性模量。砂岩在 90%RH 的环境中 60 d 后，与干燥状态相比，弹性模量下降幅度最大，高达 38.84%，在湿度达 100%RH 时，试样的弹性模量均值又有小幅回升，这是由于试样本身的非均质性所造成的 (图 10)。

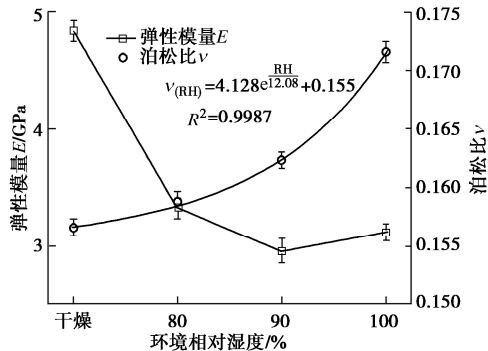


图 10 不同湿度下 60 d 对裂隙砂岩弹性模量、泊松比的影响

Fig. 10 Effects of different humidity environments for 60 d on modulus of elasticity and Poisson's ratio of fractured sandstones

由图 10 也可知，裂隙砂岩的泊松比对湿度环境也

比较敏感，其随湿度的增加呈指数型增长。在 100%RH 环境中放置 60 d 后，裂隙砂岩的泊松比较干燥状态增大了 12.44%。

4 预制平行双裂隙砂岩裂纹演化及破坏特征

4.1 高湿作用过程裂纹扩展过程分析

裂纹的萌生与扩展会导致应力 - 应变曲线出现波动异常^[21]。下面以部分典型岩样为例，对其应力 - 应变曲线与裂纹扩展二者之间的关系进行探究。

图 11 给出了单轴压缩下试样的裂纹扩展过程。从图 11 (a) 可见干燥砂岩试样的应力 - 应变曲线较光滑。与经过高湿处理的岩样不同，该岩样曲线的应力降主要出现在峰值附近。试样经历①裂隙压密阶段 ($\sigma_1=1.85$ MPa) 后进入②弹性变形阶段 ($\sigma_1=16.56$ MPa)。在②中，其内部缺陷和上部预制裂隙被压密，下部预制贯通裂隙并未产生压密效果。当应力值达到③ ($\sigma_1=24.85$ MPa) 时，向下的拉伸裂纹出现在上部预制裂隙两侧尖端，从而导致应力略微下降。同时，切线模量 E_a 因岩石的支撑结构损伤，其数值从②点的 4.84 GPa 减少到③点的 3.79 GPa。之后，应力小幅

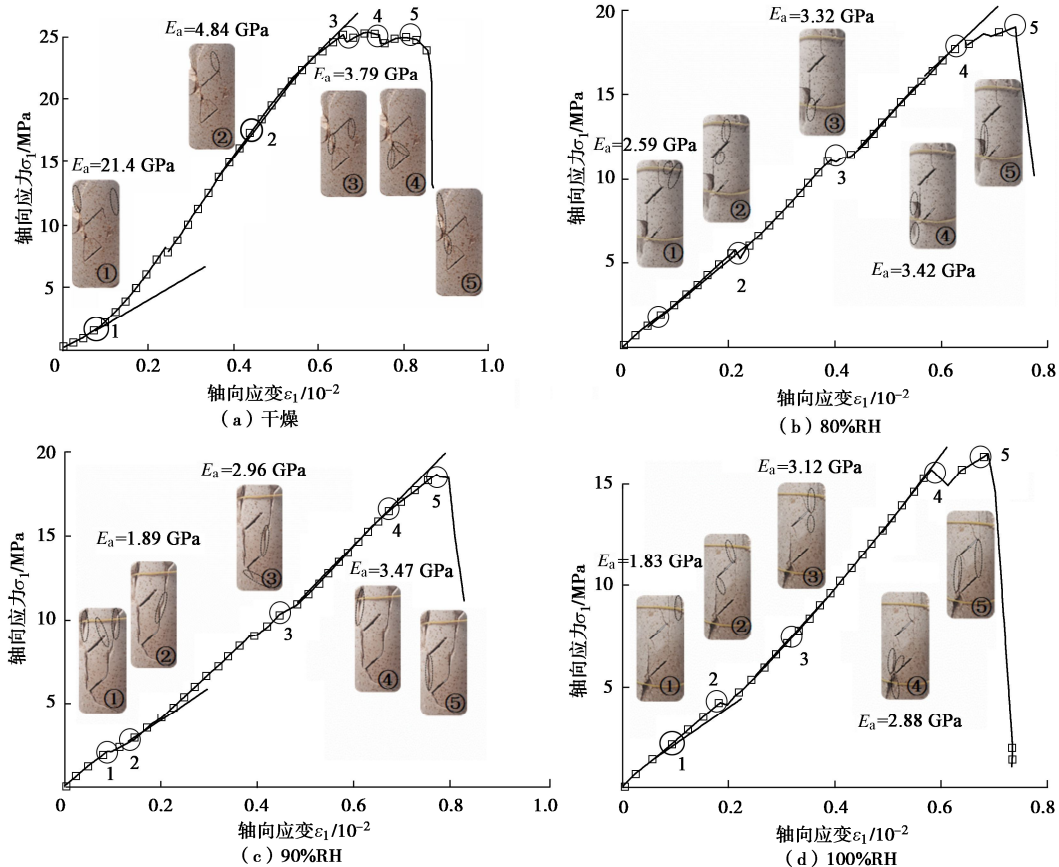


图 11 典型试样裂纹扩展与应力 - 应变曲线对应关系

Fig. 11 Relationship between crack growth and stress-strain curve of typical specimens

上升至④点 ($\sigma_1=24.93$ MPa), 此时呈现出的应力降幅度较大, 下部预制裂隙被压密且两侧尖端发生快速的裂纹扩展, 伴随着向上延伸的趋势, 且此时的应力并未达到峰值, 试样强度还没有失效。当应力又一次升至⑤点 ($\sigma_1=25.09$ MPa) 时, 岩样沿上部预制裂隙左尖端产生使岩桥贯通的剪切裂纹, 发出爆裂声, 试样产生结构性破坏与失稳, 峰后的应力骤降到 12.53 MPa, 呈明显脆性破坏特征。

图 11 (b) 展示了 80%RH 环境下的砂岩试样的应力 - 应变曲线和裂纹扩展情况。整个载荷过程中应力 - 应变曲线呈锯齿状波动, 出现 3 次应力降, 分别发生在②点 ($\sigma_1=5.70$ MPa)、③点 ($\sigma_1=11.07$ MPa) 和峰值⑤点 ($\sigma_1=19.03$ MPa)。由图可知, 应力 - 应变曲线在④点 ($\sigma_1=17.74$ MPa) 附近已经表现出非线性变化, 割线模量 E_a 达到峰值 3.42 GPa 后开始下跌, 下部预制裂隙出现斜剪切裂纹, 当应力达到峰值 19.13 MPa (⑤点) 时, 岩样积聚的弹性能在一瞬间突然释放, 两条预制裂隙左侧尖端分别扩展出上、下方向的次级拉伸裂纹使得岩桥贯通, 应力值缓缓下降, 呈塑性破坏特征。

图 11 (c) 展示了 90%RH 下砂岩试样的应力 - 应变曲线及裂纹扩展情况。该岩样曲线的第一次应力降较上述试样大幅提前, 在①点出现 ($\sigma_1=2.14$ MPa), 具有较多的远场裂纹形成, 且上部裂隙尖端发生裂纹扩展。应力达到②点 ($\sigma_1=2.56$ MPa) 之前, 下部裂隙右侧尖端有明显斜剪切裂纹出现, 后续曲线的切线模量 E_a 明显增加, 由②点的 1.89 GPa 升至③点的 2.96 GPa。当曲线到达③点 ($\sigma_1=9.73$ MPa), 下部预制裂隙左侧尖端发育出较宽的次级剪切裂纹, 其扩展方向与预制裂隙近似垂直。当应力升至④点 ($\sigma_1=16.65$ MPa), 波动幅度增加, 阶段①出现的远场裂纹的宽度不断增加。此时的割线模量达到最大 (3.47 GPa)。继续加载, 在经历较小应变后, 岩样应力达到峰值⑤点 ($\sigma_1=18.48$ MPa), 岩桥贯通, 岩样表面出现大面积剥落, 岩样完全破坏。

砂岩试样经 100%RH 的高湿处理 60 d 后, 其裂纹扩展和应力 - 应变曲线情况参见图 11 (d)。整个过程与 90%RH 下的岩样规律类似, 只是在峰前出现的两次应力降稍有推后, 且每次应力降都是由于预制裂隙的压密、起裂和扩展所引起。当应力至①点 ($\sigma_1=2.03$ MPa) 时, 岩样右端部远场裂纹形成, 此时的割线模量达到最小 (1.83 GPa)。上部预制裂隙在应力增至 4.22 MPa (②点) 时, 其周围出现向上与向下的拉伸裂纹。而当应力增至 6.51 MPa (③点), 曲线进入弹性阶段, 割线模量达到最大 (3.12 GPa)。曲线进入④点时 ($\sigma_1=15.69$ MPa), 出现大幅应力降, 下

部裂隙尖端快速扩展出上、下的拉伸裂纹。随后, 应力再次达到 16.44 MPa (峰值⑤点) 时, 岩样的上、下表面被预制裂隙的双侧拉伸裂纹贯通, 致使其产生拉伸破坏。

根据以上分析, 对图 11 包括未展出的试样进行对比可明显看出, 湿度在一定程度上决定着单轴压缩过程中裂隙砂岩初始裂纹的起裂位置。干燥状态时, 初始远场裂纹主要在上端部左侧萌生, 随着湿度的增加, 起裂位置转移至右侧。3 种高湿环境处理过的试样, 其初始裂纹萌生位置与预制裂隙相连的概率增大。与此同时, 随着湿度的增大, 初始裂纹的起裂应力整体呈下降趋势。这意味着, 裂隙岩样的裂纹起裂或裂纹快速扩展阶段逐渐远离峰值, 对此在讨论部分再进行详细分析。此外, 随着湿度增加, 试样应力 - 应变曲线波动增加, 产生的裂纹宽度增加, 且大多数沿应力加载方向扩展, 其中对比失稳破坏时, 其余 3 种状态下的试样仅有单侧岩桥贯通, 100%RH 下的岩样两侧岩桥均贯通。

4.2 裂隙砂岩裂纹演化与破坏模式分析

图 12 为 4 种湿度影响下典型岩样宏观裂纹的发育情况。斜剪切裂纹、主要裂纹以及次要裂纹分别用不同颜色的线进行标记, 依次是红色、黑色以及蓝色。根据试验结果可知, 试样的破坏通常由多种裂纹类型组合而成, 且湿度对岩样的裂纹萌生类型产生明显影响。以干燥岩样为例, 其裂纹演化类型多样, 分别有反抗拉裂纹、远场裂纹, 次级裂纹与翼形裂纹 (图 12 (a))。本次试验裂纹演化的总体特征有: 裂隙岩样在 4 种不同的湿度环境中 60 d 后, 最先出现的是远场裂纹, 该裂纹主要出现于上端部。随后出现的是拉伸裂纹, 其宏观表现为翼形裂纹, 但岩样破坏的最主要原因并不是因拉伸裂纹而导致的。例如, 对于干燥岩样来说, 反抗拉与翼形裂纹会因应力的上升而在其发育过程中逐渐向共面或者非共面次级裂纹演变, 这才是岩样剪切破坏的最终原因 (图 12 (a))。以 80%RH 高湿处理后的岩样为例, 反抗拉裂纹在拉伸裂纹中是一种较为特殊的存在, 通常情况下与翼形裂纹一同出现 (图 12 (b))。存在剪切破坏的试样中, 主要是以共面次级裂纹的形式体现, 且多出现于 90%RH 以下的湿度环境中。此外, 在湿度达到 90%RH 之前, 会有横向裂纹萌生, 其初始起裂位置在预致裂隙的尖端, 并向着与应力加载垂直的方向延伸, 一直发展至岩样边界, 最后交汇于其他裂纹或演变成其他裂纹 (图 12 (a), (b), (c))。在相同的载荷速率下, 预制裂隙的尖端发生扩展的首先是翼形裂纹, 应力加载过程中翼形裂纹会逐渐演变为次级裂纹, 共面次级裂纹会因为湿度的增加而成为主要宏观裂纹, 这也是导致岩样最

终拉伸破坏的关键因素。100%RH 下，拉伸裂纹主要以共面次级裂纹与翼形裂纹混合形式出现，且不会转变成剪切裂纹（图 12（d））。干燥岩样中的反抗拉裂纹和非共面次级裂纹是导致剪切破坏的直接因素（图 12（a））。除此之外，将全部破坏岩样形态（含未展示的）结合来看，试样在受载过程中新生成的裂纹会随着环境湿度的上升而逐渐减少，高湿度下只会显示出导致试样失稳破坏的主要裂纹。根据前文有关水岩作用总结可知，干燥试样受载时，其本身质地紧密，因此，新裂纹发育充分。而经过高湿处理后的试样内部结构已经发生改变，受载前已经萌生部分微裂隙，同样的载荷速率使得颗粒重排列时间相对较短，造成因高湿产生的内部新增缺陷不能充分发育，因此试样破坏时表面新生的宏观裂纹数量相对较少。

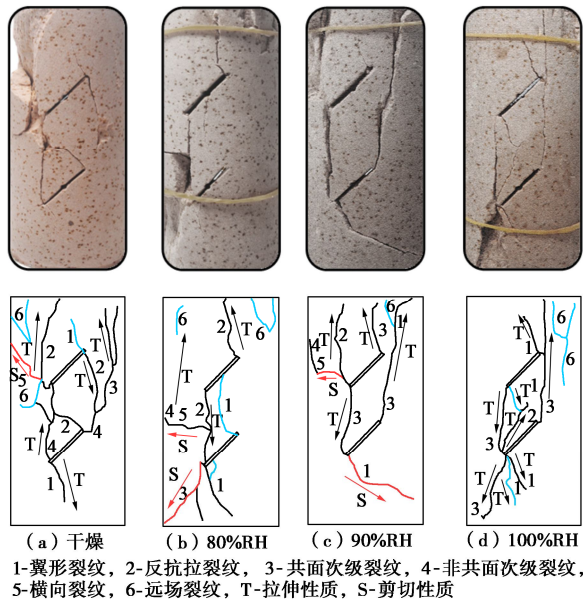


图 12 单轴压缩下裂隙试样的裂纹发育图

Fig. 12 Crack propagation law of fractured sandstone specimen under uniaxial compression

除裂纹扩展类型外，对裂隙砂岩的极限破坏模式进行分析。由试验结果看出，不同湿度下岩样的极限破坏模式有剪切破坏、拉伸破坏和剪切/拉伸混合破坏 3 种（图 13）。

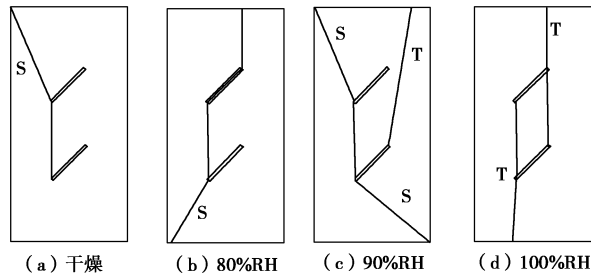


图 13 裂隙岩样破坏模式图

Fig. 13 Failure modes of fracture sandstones

由图 13 可知，剪切破坏模式作为为干燥岩样的主

要选择，环境湿度的升高会导致横向裂纹不再出现，破坏模式由剪切向拉伸破坏转变，如湿度为 80%RH 和 90%RH 时，试样主要呈拉伸与剪切的混合型破坏，最高湿度水平（100%RH）下，岩样的极限破坏模式为 T 型的纯拉伸破坏。

5 高湿影响裂纹演化机制讨论

5.1 高湿对裂纹起裂应力的影响

图 14 为湿度对平行双裂隙砂岩起裂应力 σ_{ci} 的影响曲线，为利于比较，图中还给出因湿度变化的岩样峰值强度曲线。其中 σ_{ci} 为初始裂纹萌生时所对应的应力值。据图 14 可知，湿度和起裂应力两者的关系相似于峰值强度的变化趋势，即因湿度上升而总体下降。当湿度由干燥增加到 90% RH 时，预制平行双裂隙砂岩的平均起裂应力近似线性由 12.12 MPa 降至 2.14 MPa，但有一点不同，即 100%RH 下试样的平均起裂应力 4.11 MPa 大于 90%RH 下试样的平均起裂应力 2.14 MPa。

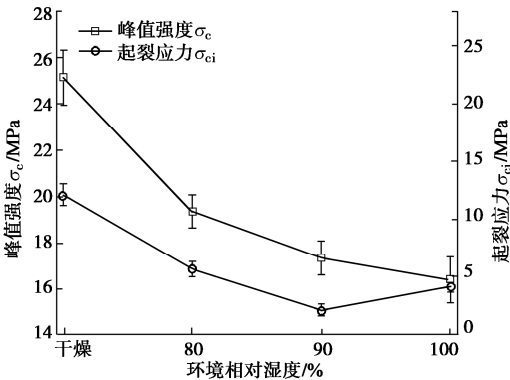


图 14 湿度对平行双裂隙砂岩起裂应力的影响

Fig. 14 Effects of humidity on initiation stress of fractures in parallel double-fissure sandstones

5.2 高湿对裂纹贯通应力的影响

图 15 为湿度对平行双裂隙砂岩贯通应力的影响关系曲线，图中同样给出峰值强度曲线。贯通应力则定义为在预制的两条裂隙间岩桥贯通所对应的应力，若试样存在两处贯通，则选取第一次贯通时的应力。可见，贯通应力与湿度之间的关系与峰值强度变化趋势也类似，随着湿度的增大总体呈减小的变化规律，但不同的是，90%RH 下的平均贯通应力出现上升的趋势。当湿度由干燥增加到 80%RH 时，预制平行双裂隙砂岩的平均贯通应力由 19.90 MPa 降到 10.91 MPa；而当湿度由 80%RH 增大到 90%RH 时，平均贯通应力由 10.91 MPa 又升到 12.83 MPa，且 100%湿度下的平均贯通应力比 80%RH 下的平均贯通应力稍有下降，且降幅不大。

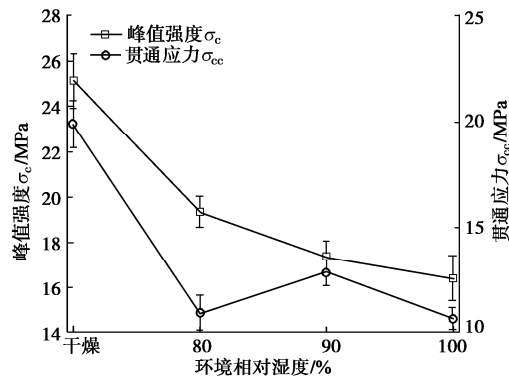


图 15 湿度对平行双裂隙砂岩贯通应力的影响

Fig. 15 Effects of humidity on penetration stress in parallel double-fissure sandstones

5.3 高湿作用下预制平行双裂隙砂岩力学参数劣化机制

砂岩作为一种典型的沉积岩, 内部含有一些初始缺陷, 导致气态水分子很容易进入。当湿度升高时, 试样表面以及两条贯通裂隙接触到的水分子数量增加, 部分矿物通过水岩作用进行离子交换和水解, 形成二氧化硅以及次生矿物高岭石, 加上本身携带的少量伊利石和蒙脱石, 这 3 种亲水性矿物吸水膨胀性强, 形成内外应力差, 表层的矿物颗粒因此掉落, 裂隙与孔隙趁机渐渐发展, 生成更多水岩接触面。同时, 长石矿物与钙质胶结物的水岩作用会因水分吸收、水分子渗透而迅速发展。在烘干过程中, 水溶性矿物随水分子蒸发而迁移, 导致渗透渠道与孔隙的生成。在上述作用下, 砂岩结构趋于松散, 这体现在两方面: ①矿物颗粒框架慢慢软化; ②内部微细观的孔、裂隙发育。因此试样在高湿作用下发生劣化效应, 反映在预制平行双裂隙岩样的弹性模量、峰值强度和应变都呈减小趋势。这也是岩样裂纹演化和破坏模式变化的原因所在。

6 结 论

(1) 随着环境湿度的增加, 裂隙砂岩原致密片状结晶形态呈现出团絮状形态, 结构疏松程度加大, 层间分界变得模糊, 微裂隙和微孔隙的数量增多, 高湿软化接触面的矿物颗粒结合内外应力差使其脱落, 其紧实的微观结构趋于松散, 质量减少, 削弱其宏观力学性能。

(2) 环境湿度对试样裂纹扩展及破坏模式具有明显影响, 随着湿度的增加, 裂纹萌生类型因湿度的加大从翼形裂纹演化为反抗拉裂纹, 导致破坏模式从剪切破坏过渡到拉伸破坏。

(3) 预制平行双裂隙砂岩贯通、起裂应力和湿度

三者的关系类似于峰值强度的变化趋势, 即因湿度的上升而总体下降, 但 100%湿度下的起裂应力和 90%湿度下的贯通应力出现反常偏高。

(4) 探讨了湿度对预制平行双裂隙砂岩力学参数的影响机制。高湿作用对试样的力学参数起劣化作用, 当相对湿度较高时, 试件弹性模量、峰值强度和峰值应变均有所降低, 泊松比则增大。裂隙尖端在高湿环境下产生水压作用发生劈裂, 削弱颗粒之间摩擦力, 从而在单轴压缩过程中促进裂纹的扩展, 也就是加速裂隙砂岩的破坏。

参考文献:

- [1] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(12): 2391 - 2404. (in Chinese))
- [2] 袁 媛, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 基于数字图像相关法的含填充裂隙大理岩单轴压缩破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(2): 339 - 351. (YUAN Yuan, PAN Peng-zhi, ZHAO Shan-kun, et al. The failure process of marble with filled crack under uniaxial compression based on digital image correlation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(2): 339 - 351. (in Chinese))
- [3] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, **35**(7): 863 - 888.
- [4] ZHOU T, ZHU J B, JU Y, et al. Volumetric fracturing behavior of 3D printed artificial rocks containing single and double 3D internal flaws under static uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, **205**: 190 - 204.
- [5] 赵延林, 万 文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破坏试验与翼形断裂数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Fracture experiments on ordered multi-crack body in rock-like materials under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (in Chinese))
- [6] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(8): 1409 - 1417. (HE Man-chao. Progress and

- challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(8): 1409 - 1417. (in Chinese))
- [7] 方晓阳. 21 世纪环境岩土工程展望[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 1 - 11. (FANG Xiao-yang. Environmental geotechnology-perspective in the 21st century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [8] PANP Z, MIAO S T, JIANG Q, et al. The influence of infilling conditions on flaw surface relative displacement induced cracking behavior in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(10): 4449 - 4470.
- [9] DUNNING J, DOUGLAS B, MILLER M, et al. The role of the chemical environment in frictional deformation: Stress corrosion cracking and comminution[J]. Pure and Applied Geophysics, 1994, **143**(1/2/3): 151 - 178.
- [10] ESTERHUIZEN G S, DOLINAR D R, ELLENBERGER J L. Pillar strength in underground stone mines in the United States[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**(1): 42 - 50.
- [11] NARA Y, TANAKA M, HARUI T. Evaluating long-term strength of rock under changing environments from air to water[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, **178**: 201 - 211.
- [12] 陈建生, 李平, 王涛, 等. 青藏高原东缘水库绕坝基渗流化学溶蚀研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 610 - 616. (CHEN Jian-sheng, LI Ping, WANG Tao, et al. Chemical dissolution of seepage around dam foundation of a reservoir in eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 610 - 616. (in Chinese))
- [13] 李二强, 冯吉利, 张龙飞, 等. 水-岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 329 - 337. (LI Er-qiang, FENG Ji-li, ZHANG Long-fei, et al. Brazilian tests on layered carbonaceous slate under water-rock interaction and weathering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 329 - 337. (in Chinese))
- [14] ZHAO Y L, ZHANG L Y, LIAO J, et al. Experimental study of fracture toughness and subcritical crack growth of three rocks under different environments[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(8): 0402128.
- [15] 工程岩体试验方法标准: GB/T50266—2013[S]. 2013. (Standard for Test Methods of Engineering Rock Mass: GB/T 50266—2013[S]. 2013. (in Chinese))
- [16] 陈伟, 万文, 谢森林. 岩石力学实验温湿度及酸性环境控制模拟装置及模拟方法: CN210243364U[P]. 2019-08-30. (CHEN Wei, WAN Wen, XIE Sen-lin. Rock mechanics experiment temperature, humidity and acid environment control simulation device: CN210243364U[P]. 2019-08-30. (in Chinese))
- [17] 刘杰, 李建林, 张玉灯, 等. 宜昌砂岩不同 pH 值酸性溶液浸泡下时间比尺及强度模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(11): 2319 - 2327. (LIU Jie, LI Jian-lin, ZHANG Yu-deng, et al. Study of time scale and strength model of Yichang sandstone under different pH values of acidic solution immersion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(11): 2319 - 2327. (in Chinese))
- [18] 苗胜军, 蔡美峰, 冀东, 等. 酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(5): 1137 - 1144. (MIAO Sheng-jun, CAI Mei-feng, JI Dong, et al. Aging features and mechanism of Granite's damage under the action of acidic chemical solutions[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(5): 1137 - 1144. (in Chinese))
- [19] 岩石物理力学性质试验规程: DZ/T0276.25—2015[S]. 2015. (Test Procedure for Physical and Mechanical Properties of Rocks: DZ/T0276.25—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [20] 杨慧, 曹平, 江学良. 水-岩化学作用等效裂纹扩展细观力学模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(7): 2104 - 2110. (YANG Hui, CAO Ping, JIANG Xue-liang. Micromechanical model for equivalent crack propagation under chemical corrosion of water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2104 - 2110. (in Chinese))
- [21] MIAO S T, PAN P Z, WU Z H, et al. Fracture analysis of sandstone with a single filled flaw under uniaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, **204**: 319 - 343.