

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.11

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

张科^{1,2}, 刘享华¹, 杨红宣¹, 范文臣³

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 对不同裂隙倾角的含孔洞裂隙模型试件进行单轴压缩试验, 并使用 RFPA^{2D} 软件进行数值模拟, 对比孔洞不充填和完全灌浆充填 2 种工况, 研究灌浆体对试件应力环境、破裂模式及力学特性参数的影响。试验与数值模拟研究结果均表明: 灌浆体减轻了应力集中, 表现为最大压应力和最大拉应力下降, 降幅分别为 7.6% ~ 9.8%、0.4% ~ 9.8%。试件破裂模式、力学特性参数及其孔洞灌浆充填后的变化幅度与预制裂隙倾角紧密相关, 水平和竖直裂隙这 2 种结构型式的试件均呈现为穿切岩桥的破坏模式; 而倾斜裂隙试件的破坏受预制裂隙控制, 使得峰值强度和残余强度最小, 但这 2 种参数孔洞灌浆充填后的增幅最大。与孔洞不充填试件相比, 孔洞完全灌浆充填的物理模型和数值模型试件峰值强度的增幅分别为 5.45% ~ 23.33%、4.18% ~ 14.29%, 残余强度增幅分别达到 31.68% ~ 161.71%、22.54% ~ 73.85%。

关键词: 孔洞; 裂隙; 数值模拟; 应力环境; 破裂模式; 强度

中图分类号: TU 458⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0079-07

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

ZHANG Ke^{1,2}, LIU Xianghua¹, YANG Hongxuan¹, FAN Wenchen³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Uniaxial compression experiments and numerical simulation by RFPA^{2D} on model specimens containing a hole and a flaw with different flaw inclinations were conducted to investigate the influence of grouting body on the stress environment, failure mode and mechanical parameters of specimens. The specimens without and with grouting body were compared. The results of experimental and numerical simulations show that the grouting body reduces the stress concentration, the maximum compressive stress and tensile stress of specimens decrease, and their amplitude reductions are in the range of 7.6% to 9.8% and 0.4% to 9.8%, respectively. The failure modes, mechanical parameters and their variation amplitudes after filled are closely related to the inclination of the pre-existing flaw. A horizontal/vertical inclined flaw leads the specimens without and with grouting body to fail in a mode of cutting through the rock bridge. The peak and residual strength are the smallest and their amplifications are the highest in the case of an inclined flaw where the failure mode is controlled by the presence of such a flaw. Compared with the specimens without grouting body, the peak strength and residual stress of the physical and numerical model specimens with grouting body

收稿日期: 2018-05-31; 修订日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41762021); 中国博士后科学基金项目资助(2016M592717; 2017T100715); 云南省应用基础研究计划项目资助(2018FB0093); 云南省人培基金项目资助(KKSY201504049)

第一作者: 张科(1986-), 男, 副教授, 从事岩石力学与工程研究工作。E-mail: zhangke_csu@163.com

increase, and the peak strength amplifications are in the range of 5.45% to 23.33% and 4.18% to 14.29%, respectively, and the residual stress amplifications are in the range of 31.68% to 161.71% and 22.54% to 73.85%, respectively.

Keywords: hole; flaw; numerical simulation; stress environment; failure mode; strength

由于漫长的地质构造作用,岩体内部除了存在裂隙缺陷,也孕育了孔洞缺陷^[1]。这些地质缺陷是影响岩体强度和变形破坏特性的主要因素,也是影响工程安全的重要地质条件。因此,开展含地质缺陷的岩体力学特性试验研究,对于确保岩体工程的稳定具有重要的理论意义。

近几十年来,国内外学者们对含裂隙缺陷的岩体力学特性进行了大量的试验、理论以及数值模拟研究,取得了丰硕的成果^[2-5]。而对含孔洞缺陷的岩体力学特性方面的研究相对较少,Lajtai^[6]最早采用石膏模型材料试验研究压缩作用下含孔洞试件的破坏过程。胡盛斌等^[7]采用水泥砂浆材料试验研究了单轴循环荷载作用下含孔洞试件的破坏特征。宋义敏等^[8]采用石膏模型材料试验研究了含孔洞试件拉断裂和远场断裂破坏、V型坑破坏和分区破裂化3种破坏形式的形成机制。李地元等^[9]研究了单轴压缩条件下含双侧预制孔洞的花岗岩岩板力学特性和变形破裂演化规律。Chen等^[10]对大比尺含圆形孔洞模型进行了双向加载试验。朱谭谭等^[11]对含双圆形孔洞的砂岩试样进行了单轴压缩试验。孔洞和裂隙在几何形态上存在着差异性,所以在受力条件下将表现出不同的力学特性。研究表明,压缩应力作用下含裂隙岩石类脆性材料的破裂演化过程中产生翼型裂纹和次生裂纹^[2-5],翼型裂纹属于拉裂纹,在裂隙尖端或靠近尖端的位置萌生;次生裂纹属于剪切裂纹,出现在裂纹尖端。而含孔洞岩石类脆性材料在压缩加载过程中观察到3种裂纹模式^[8]:初始拉裂纹,形成于孔顶和孔底拉应力集中区;剪切裂纹,形成于孔壁左右两侧压应力集中区;远场裂纹,形成于孔洞周边的远处。岩体工程中常采用灌浆充填技术处理地质缺陷,加固岩体^[12-16]。孔洞缺陷和裂隙缺陷往往同时出现在岩体中,朱谭谭等^[17]对孔洞-裂隙组合型缺陷岩体的力学特性进行了试验研究,但灌浆体对含孔洞裂隙岩体力学特性的影响研究却鲜有报道。

本文采用类岩石模型材料制备含孔洞裂隙模型试件,单轴压缩试验对比孔洞不充填和完全灌浆充填2种工况,使用RFPA^{2D}软件进行数值模拟,研究不同裂隙倾角条件下灌浆体对含孔洞裂隙岩体应力环境、破裂模式、力学特性参数的影响,为理解孔洞灌浆体的加

固作用机制提供了一种途径。

1 试件制备与试验方案

1.1 试件制备

若直接采用天然岩石进行试验,试件加工困难且无法保证一致性,因此本试验制备类岩石模型材料,这类材料具有与岩石相似的结构特征和破坏特征,同时还具有力学特性稳定、制作方便以及成本低廉等优点。类岩石模型材料配比参考Zhang等的研究^[18],配比为白色硅酸盐水泥:细砂:水=2:2:1(体积比)。试件尺寸为150 mm(长)×150 mm(宽)×30 mm(厚)。在岩溶地区隧道工程的修建过程中难免遇到岩溶问题,如果未能及时处理,容易造成塌方事故,给施工和运行造成重大安全隐患。通过地质勘察发现圆形、类圆形是天然溶洞主要的形状之一^[19]。因此,在模型材料中心位置添加圆形预制孔洞,以模拟天然溶洞,孔洞半径为25 mm(图1a)。在模型材料初凝前插入云母片模拟闭合型裂隙,裂隙长度为10 mm,裂隙延长线与孔洞圆心重合。设计3种不同的裂隙倾角 β ,定义为裂隙与水平方向的夹角,分别设置为0°、30°和90°,分别表征水平、倾斜和竖直裂隙(图1a)。试件在标准钢模具中浇注成型,浇筑完24 h后拆模,然后将其放入混凝土养护箱按标准养护方式养护28 d。模型材料和裂隙的基本物理力学参数与文献^[18]相同。

试验对比孔洞不充填和完全灌浆充填2种工况。而孔边裂隙为闭合型,无法对其进行灌浆处理,所以试验未考虑裂隙灌浆充填这种工况。对于孔洞完全灌浆充填工况,相应的试件制备是在养护完成的含孔洞裂隙物理模型试件基础上,按白色硅酸盐水泥:细砂=1:2(体积比)以及适量水配制低强度水泥砂浆,用于模拟灌浆体,将其完全充填孔洞(图1b),然后再养护72 h。养护完成后,将试件上下表面磨平,以便于在试验中观察裂纹扩展过程,物理模型试件如图2所示。

1.2 试验装置和方法

单轴压缩实验在RYL-600型微机控制岩石剪切流变仪上完成(图3)。试验加载过程中采用位移控制,加载速率设置为0.6 mm/min,试验加载持续到试件完全破坏。采用配套的控制记录软件记录轴向位移

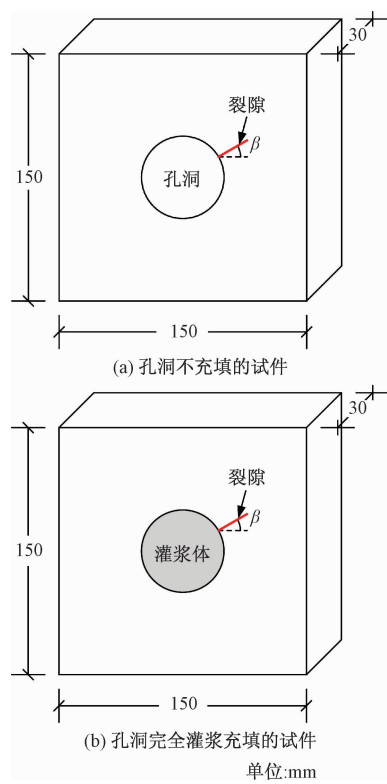


图 1 物理模型试件示意图

Fig. 1 Sketches of the physical model specimens

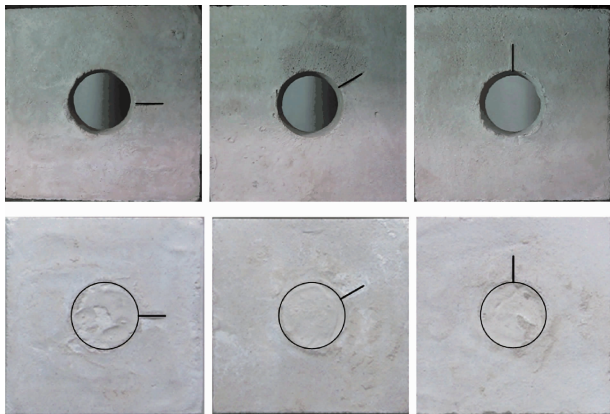


图 2 待试验的试件

Fig. 2 Specimens ready to be tested

和荷载数据,采用高清摄像机记录裂纹起裂、扩展、贯通和失效等破坏过程。

2 数值模型

RFPA^{2D}是基于有限元和统计损伤理论的数值模拟软件,可以真实地模拟岩石类脆性材料的破坏过程。相应的数值模型试件尺寸为长×宽=150 mm×150 mm,模型网格划分为300×300=90 000个细观基元(图4)。破坏判据采用修正的 Morh-Coulomb 准则

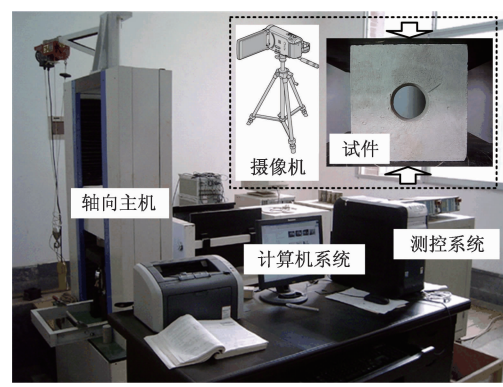


图 3 试验装置

Fig. 3 Experimental setup

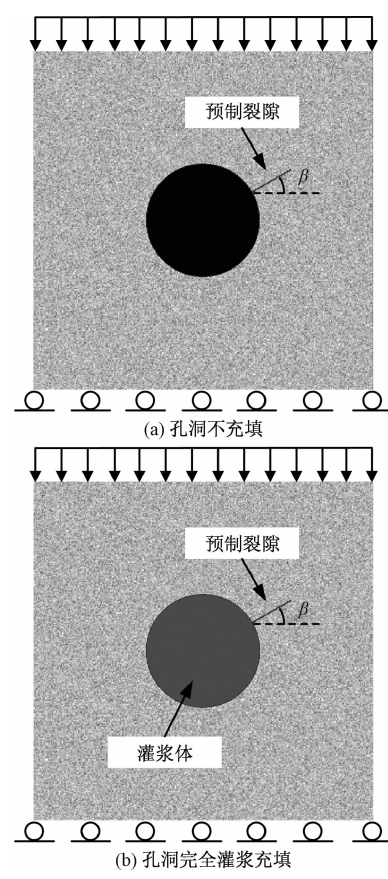


图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical model

和拉破坏准则。模型试件上部施加法向位移控制条件,下部设置为法向位移约束。

3 试验及模拟结果分析

3.1 孔洞灌浆体对应力环境的影响

采用 RFPA^{2D} 软件计算数值模型试件的应力分布,以轴向加载位移量为 0.17 mm 为例,不同裂隙倾角的试件最大和最小主应力云图如图 5 所示,各试件最大

压应力和最大拉应力的计算结果见表 1。可以看出,孔洞不充填和孔洞完全灌浆充填试件的主应力集中区域大体一致:“X”型最大压应力带交于孔洞左右两侧,且孔洞和裂隙周边应力更大,最大拉应力则集中于孔

顶和孔底。相比于孔洞不充填试件,完全灌浆充填试件的灌浆体减轻了应力集中,表现为最大压应力和最大拉应力下降,降幅分别为 7.6% ~ 9.8%、0.4% ~ 9.8%。

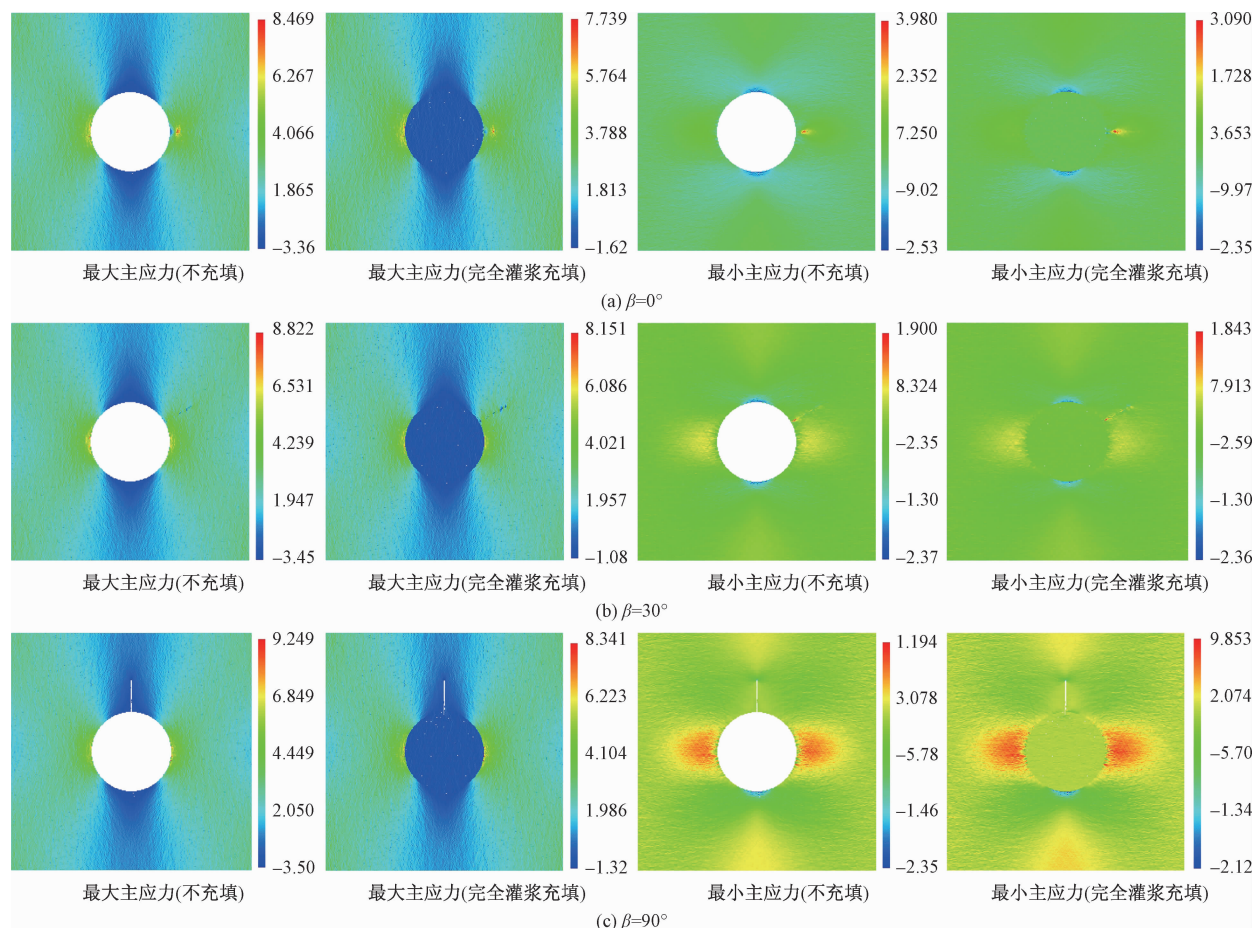


图 5 不同裂隙倾角 β 下的主应力云图 (MPa)

Fig. 5 Contours of the principal stresses of different flaw angles β (MPa)

3.2 破裂模式

3.2.1 裂隙倾角对破裂模式的影响

单轴压缩作用下不同裂隙倾角的含孔洞裂隙物理模型和数值模型试件(孔洞不充填和完全灌浆充填)宏观破裂模式如图 6 所示。

(1) 水平裂隙($\beta = 0^\circ$): RFPA^{2D} 数值模拟表明,在加载初期,孔顶和孔底产生拉应力集中现象(图 5)。这些裂纹立即扩展到一定长度,由于拉应力得以释放,继续加载后一直保持稳定,并未导致试件贯通破坏。随后,数值模拟发现孔壁左右两侧压应力集中(图 5),导致发生碎屑崩落的现象,类似于地下工程开挖过程中发生的岩爆现象。孔洞左上侧稍远处形成远场裂纹;预制裂隙右端形成剪切裂纹沿试件左下端发展。随着施加荷载的进一步增加,宏观裂纹搭接贯通,最终

导致试件的失稳破坏(图 6),此时数值模拟结果显示应力集中现象不明显。

表 1 应力计算结果

Table 1 Calculation results of stresses			
裂隙倾角 $\beta / (^\circ)$	充填情况	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa
0	无	8.47	2.53
	完全灌浆充填	7.74	2.35
30	无	8.22	2.37
	完全灌浆充填	8.15	2.36
90	无	9.25	2.35
	完全灌浆充填	8.34	2.12

(2) 倾斜裂隙($\beta = 30^\circ$): 在加载初期,除了在孔顶和孔底产生初始拉裂纹,孔边预制裂隙尖端也观察到拉裂纹。随着施加荷载的增加,孔壁左右两侧碎屑崩落,孔洞左下侧稍远处形成远场裂纹;而预制裂隙尖端产生剪切裂纹,向右上端延伸和扩展。继续加载,远场裂纹、

预制裂隙和剪切裂纹搭接贯通,使得试件产生最终破坏

(图6),此后数值模拟结果表明应力趋于平均分布。

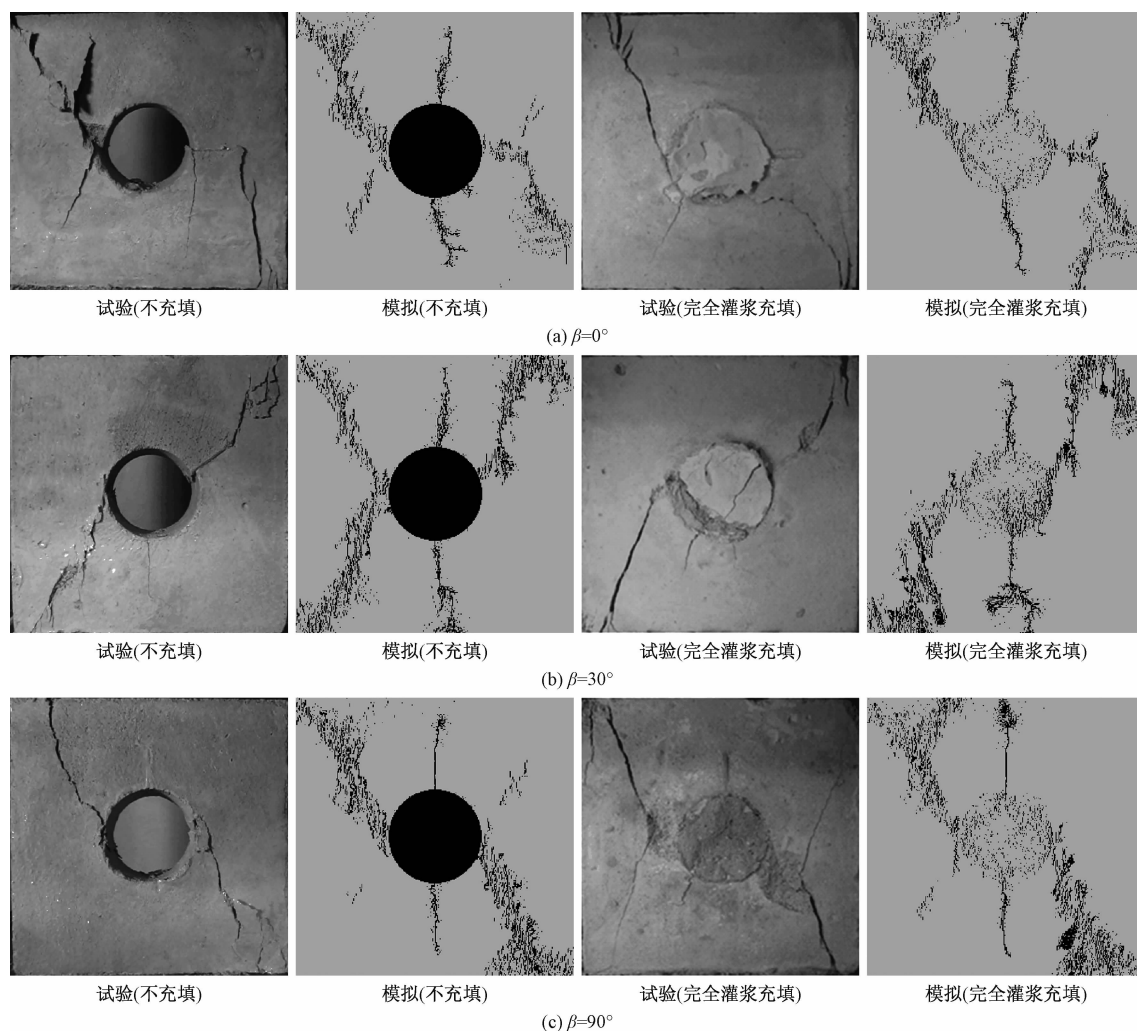


图6 不同裂隙倾角 β 下的试件单轴压缩破裂模式

Fig. 6 Uniaxial compression failure modes of specimens under different flaw angles β

(3) 竖直裂隙 ($\beta = 90^\circ$): 孔洞左上侧和右下侧形成的远场裂纹导致试件的失稳破坏(图6)。

RFPA^{2D}数值模拟所再现的破坏过程与试验结果大体吻合。本次试验中水平和倾斜裂隙试件的破裂模式与朱谭谭等^[16]的含孔洞张开型裂隙砂岩试验结果基本一致。由于裂隙开合状态以及试件材料的不同,导致竖直裂隙试件的破裂模式有所不同,探究这两因素的影响效应是今后研究的方向。

3.2.2 孔洞灌浆体对破裂模式的影响

孔洞完全灌浆充填试件的裂纹扩展特征与孔洞不充填试件类似,这是由于灌浆体强度远低于围岩强度,虽然使得应力环境有所改善,但仍不足以改变最终破裂模式。水平和竖直裂隙试件($\beta = 0^\circ$ 和 90°)最终的破裂呈现为远场裂纹剪断岩桥,均未沿预制裂隙发生破坏;而沿远场裂纹、预制裂隙和次生剪切裂纹的剪切

滑移导致倾斜裂隙试件的最终破坏。

3.3 力学特性参数

3.3.1 裂隙倾角对力学特性参数的影响

单轴压缩作用下不同裂隙倾角的含孔洞裂隙试件(孔洞不充填和完全灌浆充填)力学特性参数见图7。对于含孔洞裂隙试件,预制裂隙倾角显著影响试件的破裂模式,而宏观强度参数与岩体中裂纹起裂、扩展和贯通过程紧密相关。倾斜裂隙试件破坏主要受预制裂隙控制,破坏模式为沿裂隙面滑移破坏,导致试件峰值强度最低,试验和模拟结果分别为7.20和7.56 MPa。远场裂纹是水平和竖直裂隙这两种结构型式试件破坏的重要表现形式,均呈现为穿切岩桥剪切破坏,造成其峰值强度高于倾斜裂隙试件。

3.3.2 孔洞灌浆体对力学特性参数的影响

(1) 对于峰值强度变化特征,苏海健等^[13]、尹乾

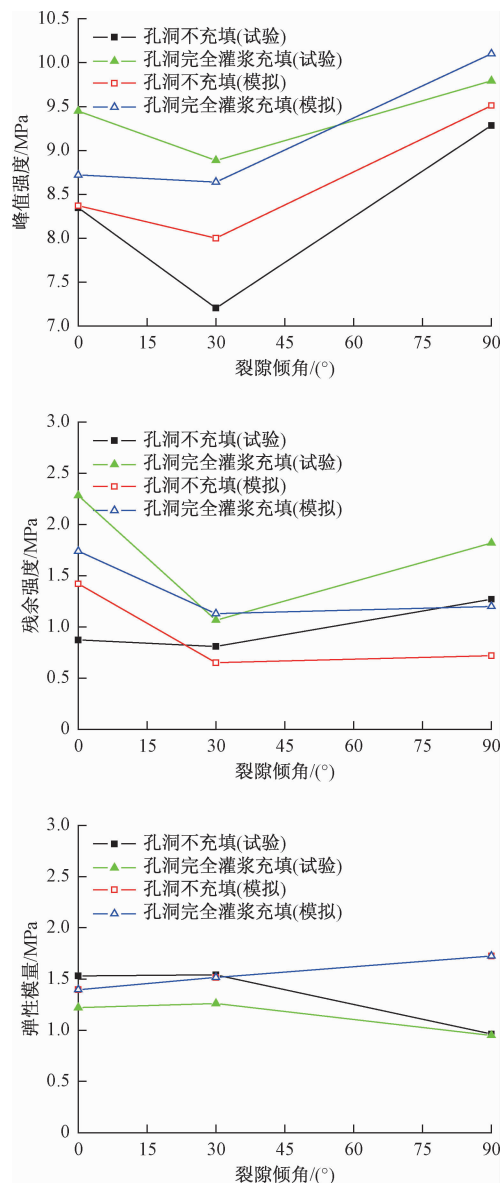


图7 灌浆体对力学特征参数的影响

Fig.7 Influence of grouting body on mechanical characteristic parameters

等^[15]研究发现低强度充填物对裂隙岩体峰值强度的增强效应并不明显,与不充填相比仅增大 1.49% ~ 3.96%;而本次试验采用的孔洞灌浆体也属于低强度材料,但相比于孔洞不充填试件,孔洞完全灌浆充填的物理模型和数值模型试件的峰值强度增幅分别为 5.45% ~ 23.33%、4.18% ~ 14.29%,加固效果明显。另外,还发现倾斜裂隙试件的峰值强度增幅最大。

(2)对于残余强度变化特征,孔洞完全灌浆充填试件破坏后并没有完全失去承载力,除了岩石原生和次生裂隙内部之间摩擦力,灌浆体在受力条件下表现出弹塑性特征,所以还能承受荷载,导致残余强度高于

孔洞不充填试件。孔洞完全灌浆充填的物理模型和数值模型试件残余强度的增幅分别达到 31.68% ~ 161.71%、22.54% ~ 73.85%。在这一点上,孔洞灌浆体加固效果优于裂隙充填工况,苏海健等^[13]、尹乾等^[15]研究发现残余强度有所增大。这是因为充填物占比不大,所以影响轻微。

(3)对于变形变化特征,孔洞完全灌浆充填情况下物理模型试件的弹性模量比孔洞不充填试件减小了 1.47% ~ 20.26%,而数值模型试件的弹性模量基本保持不变。

3.4 孔洞灌浆体的加固作用机制

综合上述试验和模拟结果,孔洞灌浆体的加固作用可能存在以下 3 种机制:

(1)当孔洞灌浆处理后,灌浆体与含孔洞裂隙岩体形成了一种复合结构体,尽管灌浆体强度不高,但岩体受荷变形压缩灌浆体,灌浆体又对围岩产生反作用力,灌浆体与含孔洞裂隙岩体之间形成了力学上相互作用,改善了孔洞周边的应力环境,增强了围岩的自支撑能力。

(2)另一方面,灌浆体和围岩交界面会产生局部支护力,尤其在孔边裂隙附近,而已有研究证明小的表面荷载对摩擦型介质中屈服区范围可能会产生重大影响^[20]。

(3)另外,围岩破坏并不意味着承载能力的消失,灌浆体在受力条件下表现出弹塑性特征,改善了含孔洞裂隙岩体的峰后特征,破坏后的试件还有较高的残余强度。

4 结论

(1)孔洞灌浆体能够改善孔洞周围的应力环境,应力分析表明灌浆体与含孔洞裂隙岩体之间形成了力学上的相互作用,灌浆充填后的试件最大压应力和最大拉应力均小于孔洞不充填试件,降幅分别为 7.6% ~ 9.8% 和 0.4% ~ 9.8%,使得孔洞上下两端初始拉裂纹以及孔壁碎屑崩落引起的破坏程度降低。

(2)孔洞完全灌浆充填的物理模型和数值模型试件最终破裂模式与孔洞不充填试件类似,倾斜裂隙试件破坏主要受预制裂隙控制,而水平和竖直裂隙试件的破裂模式为岩桥剪断。

(3)孔洞完全灌浆充填的物理模型和数值模型试件峰值强度和残余强度均显著高于孔洞不充填试件,峰值强度增幅分别为 5.45% ~ 23.33%、4.18% ~ 14.29%,残余强度增幅分别为 31.68% ~ 161.71%、22.54% ~ 73.85%。灌浆充填后的力学参数变化幅度

与裂隙倾角有关,倾斜裂隙试件的加固效果最好。

(4)本次研究初步探究了单轴压缩作用下充填试件的力学特性,下一步将开展双轴和三轴压缩作用下不同孔洞形状的相关试验和数值模拟研究工作。

参考文献:

- [1] 林鹏,唐春安,黄凯珠,等.脆性介质中裂纹与孔洞缺陷的分类与尺度效应[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2296-2300. [LIN P, TANG C A, WONG R H C, *et al.* Classification and size effect of flaw and pore in brittle medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (Sup 2):2296-2300. (in Chinese)]
- [2] 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.
- [3] Wong R H C, Chau K T, Tang C A, *et al.* Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws - part I: experimental approach [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7):909-924.
- [4] Park C H, Bobet A. Crack coalescence in specimens with open and closed flaws: a comparison [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(5):819-829.
- [5] Yang S Q, Jing H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression [J]. International Journal of Fracture, 2011, 168(2):227-250.
- [6] Lajtai E Z, Lajtai V N. The collapse of cavities [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1975, 12(4):81-86.
- [7] 胡盛斌,邓建,马春德,等.循环荷载作用下含缺陷岩石破坏特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2490-2495. [HU S B, DENG J, MA C D, *et al.* Experimental study of failure characteristics of rock containing flaw under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (12):2490-2495. (in Chinese)]
- [8] 宋义敏,潘一山,章梦涛,等.洞室围岩三种破坏形式的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2741-2745. [SONG Y M, PAN Y S, ZHANG M T, *et al.* Experimental investigation on fracture of three types of underground caverns [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1):2741-2745. (in Chinese)]
- [9] 李地元,李夕兵,李春林,等.单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1198-1206. [LI D Y, LI X B, LI C L, *et al.* Experimental and numerical studies of mechanical response of plate-shape granite samples containing prefabricated holes under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (6):1198-1206. (in Chinese)]
- [10] Chen L, Bai S, Yin X. Physical simulation on failure around a circular cavern in hard and brittle rock under high and increasing natural stress conditions [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(2):332-344.
- [11] 朱谭谭,靖洪文,苏海健,等.含双圆形孔洞砂岩单轴压缩力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1047-1056. [ZHU T T, JING H W, SU H J, *et al.* Mechanical behavior of sandstone containing double circular cavities under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1047-1056. (in Chinese)]
- [12] 张波,李术才,杨学英,等.裂隙充填对岩体单轴压缩力学性能及锚固效应的影响[J].煤炭学报,2012,37(10):1671-1676. [ZHANG B, LI S C, YANG X Y, *et al.* The influence of crack fillings to rock uniaxial compression mechanical property and anchoring effect [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10):1671-1676. (in Chinese)]
- [13] 苏海健,靖洪文,赵洪辉,等.纵向裂隙对砂岩力学特性影响试验研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4):644-649. [SU H J, JING H W, ZHAO H H, *et al.* Experimental study on the influence of longitudinal fissure on mechanics characteristic of sandstone [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31 (4):644-649. (in Chinese)]
- [14] 董茜茜,马国伟,夏明杰,等.含充填物的大理岩裂隙扩展过程及破坏特性[J].北京工业大学学报,2015,41(9):1375-1382. [DONG Q Q, MA G W, XIA M J, *et al.* Crack extension process and failure behavior of marbles containing fillers [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (9):1375-1382. (in Chinese)]

- installing pile group in saturated soft [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(11): 1290 - 1294. (in Chinese)]
- [10] 张忠苗, 谢志专, 刘俊伟, 等. 粉土与淤质互层土中管桩压入过程孔隙水压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 534 - 536. [ZHANG Z M, XIE Z Z, LIU J W, *et al.* Experimental study on pore pressure during pile driving in silty soil with mucky soil interbed [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup 2): 534 - 536. (in Chinese)]
- [11] 钱峰, 刘干斌, 齐昌广, 等. 饱和黏土中静压沉桩模型试验及数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 56 - 61. [QIAN F, LIU G B, QI C G, *et al.* Static pressure pile-sinking model tests and numerical simulation on saturated clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 56 - 61. (in Chinese)]
- [12] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. [Collaboration Group. Rock grouting theory and engineering examples [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)]

编辑: 张明霞

(上接第 85 页)

- [15] 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 Q, JING H W, SU H J, *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 and Technology, 2016 45(2): 225 - 232. (in Chinese)]
- [16] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 等. 注浆加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊1): 3140 - 3147. [LIU Q S, LEI G F, LU C B, *et al.* Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical properties of rock fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 1): 3140 - 3147. (in Chinese)]
- [17] 朱谭谭, 靖洪文, 苏海健, 等. 孔洞 - 裂隙组合型缺陷砂岩力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1518 - 1525. [ZHU T T, JING H W, SU H J, *et al.* Experimental investigation on mechanical behavior of sandstone with coupling effects under uniaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1518 - 1525. (in Chinese)]
- [18] Zhang K, Cao P, Ma G W, *et al.* Strength, fragmentation and fractal properties of mixed flaws [J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(4): 901 - 912.
- [19] 石书缘, 胡素云, 刘伟, 等. 塔里木盆地西克尔地区奥陶系溶洞系统特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 167 - 177. [SHI S Y, HU S Y, LIU W, *et al.* Ordovician paleokarst cave system and its controlling factor in Xekar, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 167 - 177. (in Chinese)]
- [20] Brady B, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. London: Chapman and Hall, 2003.

编辑: 张明霞