

DOI: 10.11779/CJGE201506011

含双圆形孔洞砂岩单轴压缩力学特性试验研究

朱谭谭, 靖洪文*, 苏海健, 尹 乾, 杜明瑞

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 孔洞作为岩石内部微缺陷的基本形式之一, 其破裂演化机制是岩石力学领域研究的重要课题。对预制双圆形孔洞的板状砂岩试样进行室内单轴压缩试验, 研究孔心距 $2b$ 和倾角 α 对砂岩强度、变形特征及破裂演化过程等的影响规律。试验结果表明: 随孔心距 $2b$ 的增大, 试样的峰值强度和弹性模量均表现为先增大后又减小的特征, 孔心距 $2b$ 分别为 22 mm 和 27 mm 时峰值强度和弹性模量达到最大值; 随倾角 α 的增大, 峰值强度和弹性模量整体表现为先减小后增大的趋势, 倾角 α 等于 60° 时峰值强度和弹性模量达到最小值。双圆形孔洞的初始破坏均表现为孔洞内壁塌落破坏, 而孔心距 $2b$ 和倾角 α 对起裂应力水平、孔洞搭接方式及破裂演化过程均具有重要的影响。

关键词: 双圆形孔洞; 强度特征; 破裂演化过程; 起裂应力水平

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-1047-10

作者简介: 朱谭谭(1989-), 男, 硕士, 主要从事岩石力学与工程等方面的研究。E-mail: zhutantan01@126.com。

Mechanical behavior of sandstone containing double circular cavities under uniaxial compression

ZHU Tan-tan, JING Hong-wen, SU Hai-jian, YIN Qian, DU Ming-rui

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Hole is one of the basic forms of micro defects in rock, and its fracture evolution mechanisms have become an important research subject in the field of rock mechanics. The uniaxial compression tests on tabular sandstone samples with pre-existing double circular cavities are conducted in order to investigate the effect of circle center distance $2b$ and angle α on strength, deformation and fracture evolution process of sandstone. The results show that both the peak strength and the elastic modulus of sandstone increase first and then decrease with the increase of the circle center distance $2b$, and the peak strength and the elastic modulus reach their maximum values respectively when the circle center distance is 22 and 27 mm. With the increase of angle α , both the peak strength and the elastic modulus first decrease and then increase, and both of them reach the minimum values when the angle is 60° . The initial damage forms of the double circular cavities samples are all the collapsing destruction from the inner wall of the holes, and both the circle center distance and the angle have great influences on the stress levels of crack initiation, lap ways of holes and fracture evolution process.

Key words: double circular cavity; strength characteristic; fracture evolution process; crack initiation stress level

0 引 言

作为天然的非均质工程地质材料, 岩石内部含有许多宏观和微观的孔洞、裂隙、节理等缺陷。岩石的力学特性与其内部缺陷的大小、几何分布等具有密切的联系^[1-3], 岩石缺陷的破裂演化机制一直以来是岩石力学界关注的焦点之一。

近年来人们对含缺陷岩石的强度、变形特性及其破裂演化规律等进行了大量的数值计算、室内试验和理论分析, 取得了许多成果。钟志彬等^[4]通过含微裂隙流纹岩的三轴加卸围压试验和单轴预加载后常规三轴压缩试验, 对两种应力路径下不同裂隙发育的流纹

岩试样破裂特征和力学参数进行了研究; 李建林等^[5]通过制作不同倾角单一预制节理试件, 开展了节理岩体三轴卸荷试验, 研究了卸荷条件下节理岩体的应力-应变关系、变形特征、强度特征和破坏模式; Yang 等^[6-7]通过预制双裂隙板状试样室内单轴压缩试验和数值模拟, 对不同裂隙产状砂岩试样的力学特性进行了研究

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB036003); 国家自然科学基金项目 (51374198); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ13_0935, SJLX_0637)

收稿日期: 2014-08-16

*通讯作者

发现, 当裂隙倾角 α_2 为 90° 时, 试样的峰值强度、峰值应变和割线模量均取得最大值, 试样的破坏形态主要为在预制裂隙尖端起裂的纵向拉伸裂纹; 赵延林等^[8-9]通过预制有序多裂纹单轴压缩试验和双扭试验, 研究了裂纹产状特性对岩体强度的影响及岩桥的破断规律。而在孔洞方面, 谢林茂等^[10]利用真实破裂过程并行计算软件 RFPA^{3D}-Parallel, 获得了含孔洞岩石试样在单轴、双轴和三轴加载条件下的破裂演化过程; 刘招伟等^[11]、Zhao 等^[12]和 Wang 等^[13]分别采用数字照相量测软件系统 PhotoInfor、声发射技术和 RPFA^{3D} 岩石破裂过程分析系统, 对含单一孔洞岩石的变形破裂演变规律进行了试验研究, 结果表明, 圆孔的破坏主要为圆孔两帮裂纹扩展和圆孔上下孔壁的拉伸破坏; 周航等^[14]基于保角变换的方法将原物理平面上由于椭圆孔扩张所产生的速度边界条件转换到像平面上, 利用复变函数理论得到了一种新的位移控制的椭圆孔扩张弹塑性解; 李地元等^[15]在 Iddefjord 花岗岩板状试样上预制双侧方形孔洞, 分析了单向加载下花岗岩的应力、应变、声发射信号特征和试样破坏过程, 进一步验证了试样单元的破坏以拉伸破坏为主。

经典断裂力学中将岩石内的缺陷均简化为裂纹来进行分析, 而实际岩石工程中孔洞和裂隙的力学特性存在较大的区别。以往文献主要是针对岩石裂隙的破裂演化特征及裂隙与裂隙之间的相互作用进行了大量的研究工作, 而对于孔洞方面, 多是针对单一孔洞的破裂机制, 而孔洞与孔洞的相互作用及其贯通机制方面却鲜有报道。基于此, 本文对含预制双圆形孔洞砂岩试样进行室内单轴压缩试验, 考察了双圆孔的几何分布特征对砂岩强度、变形特征及破裂演化过程的影响规律。

1 试验方法

1.1 试样加工

砂岩材料取自鲁南地区, 自然状态下呈棕褐色,

表 1 试样几何尺寸和力学参数

Table 1 Geometrical sizes and mechanical parameters of sandstone samples									
编号	<i>W</i> /mm	<i>H</i> /mm	<i>T</i> /mm	<i>2b</i> /mm	$\alpha/(^\circ)$	<i>D</i> /mm	σ_0 /MPa	<i>E</i> /GPa	备注
A11	69.22	139.80	31.57	—	—	—	56.16	6.22	完整试样
A13	69.34	140.40	31.78	—	—	—	58.57	6.31	
A01	69.43	139.99	30.07	—	—	12.60	42.35	6.05	
A02	69.43	140.42	31.20	17.00	90	12.60	39.86	5.35	单一圆孔
A03	69.37	140.09	31.29	22.00	90	12.60	45.40	5.58	
A04	69.37	140.38	30.08	27.00	90	12.60	38.30	5.80	
A05	69.18	139.94	30.01	32.00	90	12.60	35.81	5.76	
A06	69.30	140.44	31.61	37.00	90	12.60	30.91	4.72	
A07	69.31	140.06	31.38	22.00	0	12.60	35.38	5.21	
A08	69.42	140.14	30.11	22.00	30	12.60	30.39	5.43	
A09	69.37	140.10	30.08	22.00	45	12.60	27.06	5.18	
A10	69.19	140.29	30.17	22.00	60	12.60	25.84	5.16	

质地均匀, 表面无肉眼可见天然缺陷, 平均重度为 23.02 kN/m^3 。经过切割、精细打磨等工序, 将砂岩块体加工成高 (*H*)、宽 (*W*)、厚 (*T*) 分别为 140, 70, 30 mm 的长方体板状试样。采用高压水射流切割机在加工完的砂岩试样内预制以试样中心为对称点的两个圆孔, 如图 1(a)所示, 其中孔洞直径 *D* 均为 12.60 mm, 通过控制其他参数不变, 改变单个参数的方法, 重点考察两个圆孔的圆心距 *2b* 和倾角 α 对砂岩力学特性的影响, 圆孔具体几何参数如表 1 所示。同时, 为便于比较, 对 3 块无预制孔洞的完整砂岩试样也进行了单轴压缩试验。

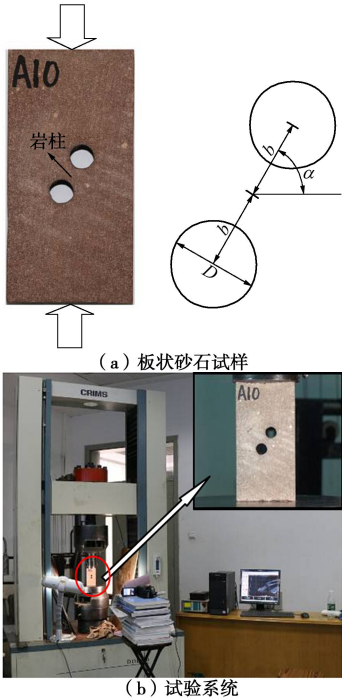


图 1 砂岩试样和试验系统
Fig. 1 Sandstone samples and test system

1.2 加载方式

板状砂岩的单轴压缩试验在中国矿业大学的DDL500 电子伺服试验机(如图 1(b))上进行, 试验机压力范围为 0~500 kN。试验加载过程采用位移

加载方式, 加载应变率为 $3.57 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 。试验前在试样上下端面均匀地涂抹一层凡士林润滑剂, 来减小端部摩擦作用对试验结果的影响。加载过程中计算机自动采集轴向荷载、位移数据, 同时采用一个高清摄像机对压缩作用下试样的变形破裂全过程进行图像实时采集。

2 试验结果分析

2.1 完整砂岩力学特性

完整试样应力应变曲线和破坏形态如图 2 所示, 峰值强度及弹性模量如表 1 所示, 其中, σ_0 为峰值强度, E 为弹性模量。值得说明的是, 3 个完整砂岩试样中编号为 A12 的试样峰值强度仅为 25.39 MPa, 与 A11 和 A13 试样相比离散性明显偏大, 从破坏后的碎块上可以发现其内部存在较多的泥质夹层, 因此将 A12 试样进行剔除。由图 2 和表 1 可以看出, 两个完整试样的应力应变曲线在压密阶段和线弹性变形阶段基本重合, 峰值强度和弹性模量平均值分别为 57.37 MPa 和 6.27 GPa, 两个试样峰值强度和弹性模量分别仅相差 2.41 MPa 和 0.09 GPa, 由此可以说明, 本文所选取的砂岩材料均质性较好, 可以进行不同缺陷布置下试样力学特性的定量研究。

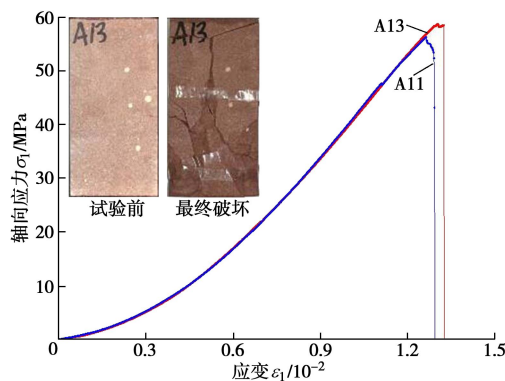


图 2 完整试样应力应变曲线

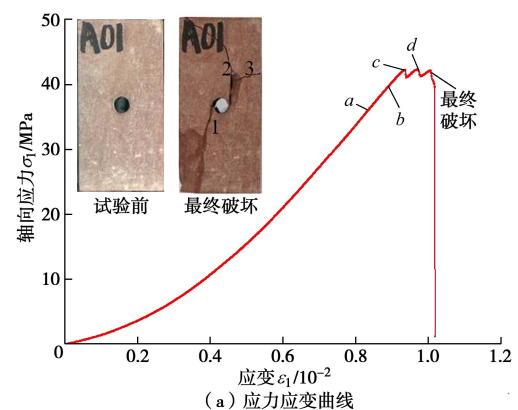
Fig. 2 Stress-strain curves of intact sandstone samples

应力应变曲线压密阶段比较明显, 呈弧形特征, 当轴向应力达到 12.00 MPa 左右时, 应力应变曲线进入线弹性阶段。峰值点之前曲线出现了一定的应力跌落现象, 试样 A11 在轴向应力达到 47.57 MPa 时出现一次应力跌落, 跌落幅度为 0.29 MPa, 而试样 A13 在轴向应力分别为 58.23 MPa 和 58.57 MPa 时出现两次应力跌落, 第二次跌落后试样很快失去承载能力。单轴压缩作用下完整砂岩试样主要以劈裂破坏为主, 形成沿轴向应力方向的拉破坏面, 同时也伴随有一定剪切破坏现象。

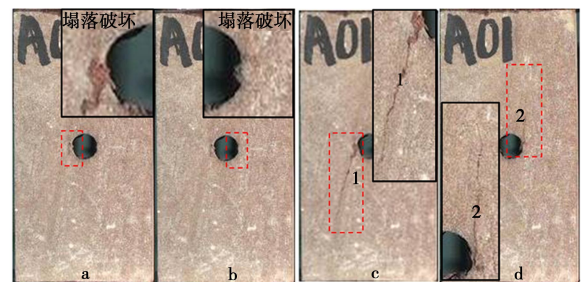
2.2 含单一圆孔砂岩力学特性

含单一圆孔试样应力应变曲线和破坏过程如图 3

所示, 试样的峰值强度和弹性模量分别为 42.35 MPa 和 6.05 GPa, 与完整砂岩相比, 分别劣化了 26.18% 和 3.51%。加载前期试样表面未见有宏观的破裂现象发生, 当轴向应力达到 35.92 MPa 时 (a 点), 圆孔左侧孔壁开始塌落破坏, 在该位置形成薄弱区; 轴向应力达到 39.37 MPa 时 (b 点), 圆孔右侧孔壁开始塌落破坏; 随着轴向应力的继续增大, 圆孔左侧薄弱区发生起裂, 出现裂纹 1 (c 点), 同时轴向应力由 42.22 MPa 跌落到 41.12 MPa, 跌落幅度为 1.10 MPa; 轴向应力达到 42.35 MPa 时 (d 点) 达到峰值点, 圆孔右侧薄弱区发生起裂扩展, 形成裂纹 2, 轴向应力跌落到 41.31 MPa; 当轴向应力再次达到 42.35 MPa 时, 裂纹 1 和裂纹 2 贯通, 并产生横向断裂裂纹 3, 同时轴向应力发生剧烈跌落, 试样完全失去承载能力。



(a) 应力应变曲线



(b) 破坏过程和局部放大图

图 3 含单一圆孔试样变形破裂演化过程

Fig. 3 Fracture evolution process of sandstone samples with a single pre-existing hole

2.3 含双圆孔砂岩强度和变形特征

(1) 不同孔心距 2b

不同孔心距双圆孔试样应力应变曲线、峰值强度及弹性模量变化特征如图 4 所示, 具体参数如表 1。由图 4 和表 1 可以看出:

a) 单轴压缩作用下不同孔心距双圆孔试样应力应变曲线线弹性阶段明显缩短, 峰值点前后出现了多次应力跌落现象。与完整砂岩相比, 双圆孔试样力学性质发生了明显的劣化, 峰值强度和弹性模量分别仅为完整试样的 53.88%~79.14% 和 75.28%~92.50%, 峰

值强度的劣化程度要大于弹性模量。

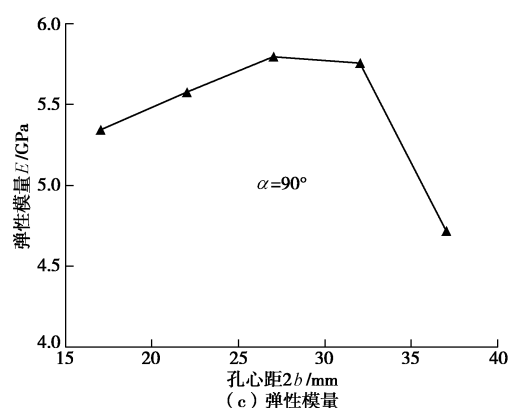
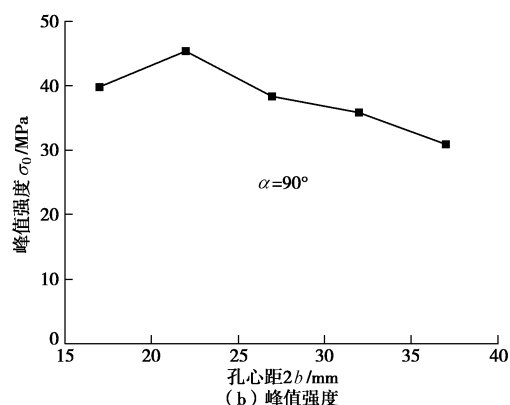
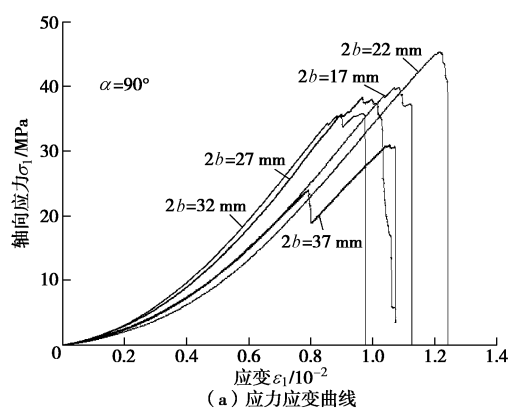


图4 不同孔心距试样应力应变曲线和力学参数

Fig. 4 Stress-strain curves and mechanical parameters of sandstone samples with different hole centre distances

b) 随孔心距 $2b$ 的增大, 试样峰值强度先增大后又减小, 在孔心距为 22 mm 达到最大值。孔心距由 17 mm 增大到 22 mm, 峰值强度由 39.86 MPa 增大到 45.40 MPa, 增大了 13.90%。而孔心距由 22 mm 增大到 37 mm, 试样峰值强度由 45.40 MPa 减小到 30.91 MPa, 减小了 31.92%。分析原因可能是, 当两个圆孔距离较近时, 受力状态接近于一个长轴为加载方向的椭圆, 圆孔孔壁产生的裂纹很容易将两个圆孔连通使岩柱失去承载能力, 随着孔心距的增大, 试样峰值强度逐渐增大。但是随着孔心距的增大, 两个圆孔的独

立性逐渐增强, 受力状态逐渐接近于两个单独的圆孔, 而独立圆孔的压应力集中系数高于椭圆孔的压应力集中系数, 因此随着孔心距的继续增大, 峰值强度表现为逐渐减小的特征。

c) 随着孔心距 $2b$ 的增大, 弹性模量同样表现出先逐渐增大后又减小的特征, 在 $2b=27$ mm 时达到最大值。当孔心距由 17 mm 增大为 27 mm, 弹性模量由 5.35 GPa 增大为 5.80 GPa, 增大了 8.41%; 当孔心距增大到 37 mm 时, 弹性模量为 4.72 GPa, 与 $2b=27$ mm 时相比反而减小了 18.62%。

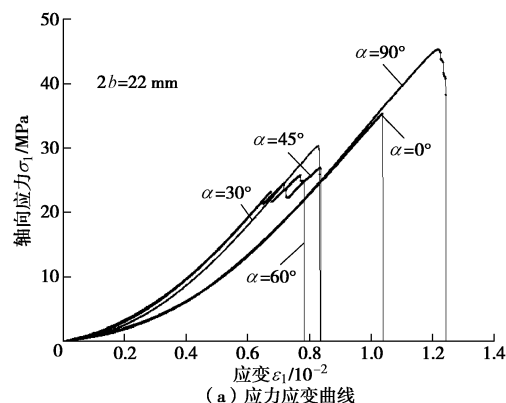
(2) 不同倾角 α

不同倾角双圆孔试样应力应变曲线、峰值强度和弹性模量变化特征如图 5 所示, 具体参数如表 1。由图 5 和表 1 可以看出:

a) 不同倾角时双圆孔试样应力应变曲线在峰值点前后同样表现出较多的应力跌落, 但倾角为 0° 和 90° 时相对不明显。与完整砂岩相比, 不同倾角 α 的双圆孔试样的力学性质同样也有较大的劣化, 峰值强度和弹性模量劣化幅度分别在 20.86%~54.96% 和 11.00%~17.70% 之间。

b) 随倾角 α 的增大, 试样峰值强度先减小后增大, 在 90° 时取得最大值。随倾角 α 的增大, 两圆孔水平距离逐渐减小, 两个圆孔周围产生的裂纹越容易相互贯通, 岩柱失去承载能力, 试样的峰值强度逐渐减小。倾角 α 由 0° 增大到 60° , 峰值强度由 35.38 MPa 减小为 25.84 MPa, 减小了 26.96%。而当倾角增大到 90° 时, 两个圆孔圆心在同一条竖向直线上, 圆孔左右侧孔壁产生的裂纹在扩展过程中不再相互搭接, 岩柱保持相对完整, 试样承载性能明显提高, 与倾角 α 为 60° 相比, 峰值强度增大了 75.70%。

c) 随倾角 α 的增大, 弹性模量先增大后减小后又增大, 由于材料非均质性的影响, 表现出的随机性也较大, 但整体与峰值强度相比, 弹性模量的变化幅度较小。当倾角 α 为 60° 和 90° 时弹性模量分别达到最小值和最大值, 两者仅相差 8.14%。



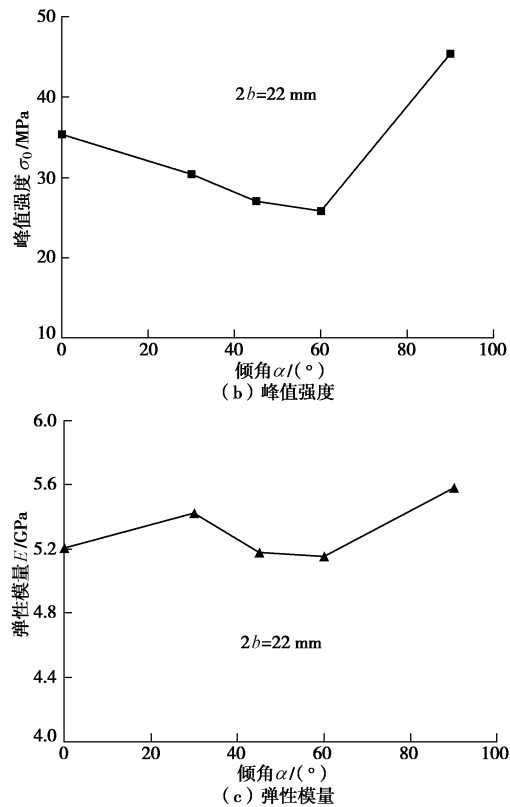


图5 不同倾角试样应力应变曲线和力学参数

Fig. 5 Stress-strain curves and mechanical parameters of sandstone samples with different angles

3 破坏形态分析

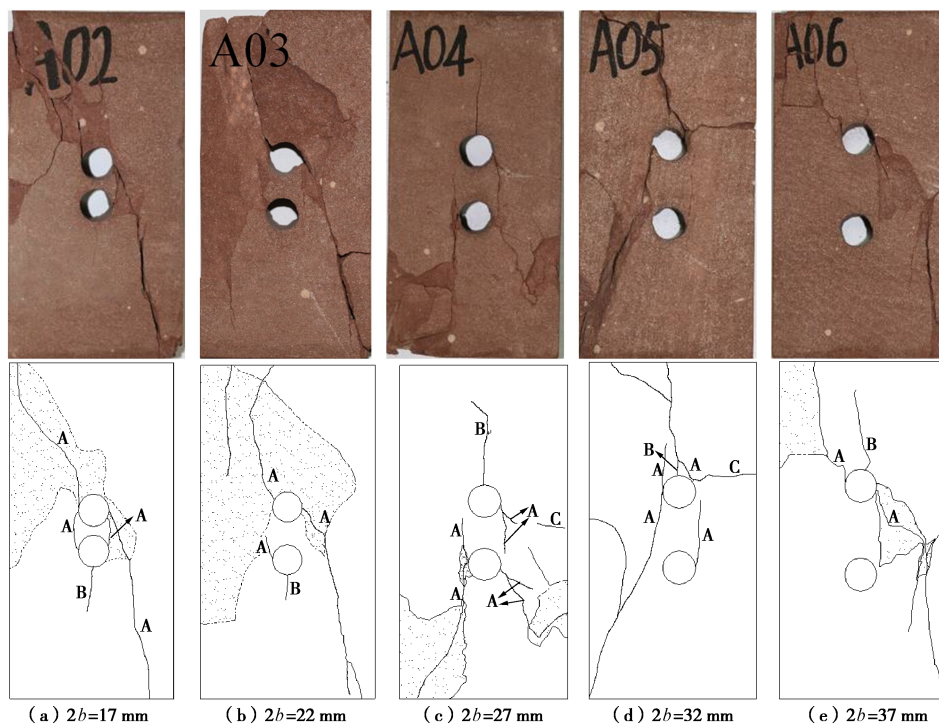
单轴压缩作用下双圆孔试样破坏形态和素描图如图6, 7所示, 试样宏观破坏形式主要表现为孔壁塌落、

裂纹扩展和表面剥落破坏。而次生裂纹根据其形成机制的不同, 主要可以分为 A、B、C 三类: ①A 类裂纹, 起裂于圆孔左右两侧孔壁塌落区, 扩展方向为斜向上(下)方向, 通常发生在孔壁塌落破坏之后; ②B 类裂纹, 由圆孔上下孔壁在拉应力作用下产生, 通常沿轴向加载方向发展, 当然由于材料非均质性和端头承压的作用, B 裂纹扩展后期部分会与轴向应力方向发生一定的偏离; ③C 类裂纹, 主要是由于试样发生整体失稳而产生的结构性横向断裂裂纹, 发生时间通常要晚于 A 类和 B 类裂纹。

文献[16]对孔心距为 40 mm, 倾角为 60° 的双孔洞砂岩试样进行了试验研究发现, 试样的裂纹扩展主要表现为孔洞两侧扩展裂纹、孔洞顶部(底部)拉伸裂纹破坏以及失稳产生的少量断裂裂纹, 这一特征与本文的试验结果是完全一致的。

不同孔心距下双圆孔试样破坏形态主要可以分为两类: ①贯通型破坏, 当两个圆孔孔心距较小时容易发生该类破坏(图6(a)), 此时两个圆孔的相互作用较强, 次生裂纹扩展容易贯通岩柱, 使圆孔连接成一个整体; ②独立型破坏, 当两个圆孔孔心距较大时发生该类破坏(图6(b)~(e))。由于孔心距较大, 两个圆孔独立性较强, 相互作用减弱, 两个圆孔周围产生的裂纹没有贯通整个岩柱, 岩柱保持相对完整。

不同倾角下双圆孔试样破坏形态主要可以分为 3 类: 当倾角较小时($\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$), 岩柱位置的

图6 不同孔心距试样破坏形态和素描图($\alpha = 90^\circ$) (阴影部分为试样表面剥落破坏区域)Fig. 6 Failure modes and sketch maps of samples with different hole centre distances ($\alpha = 90^\circ$)

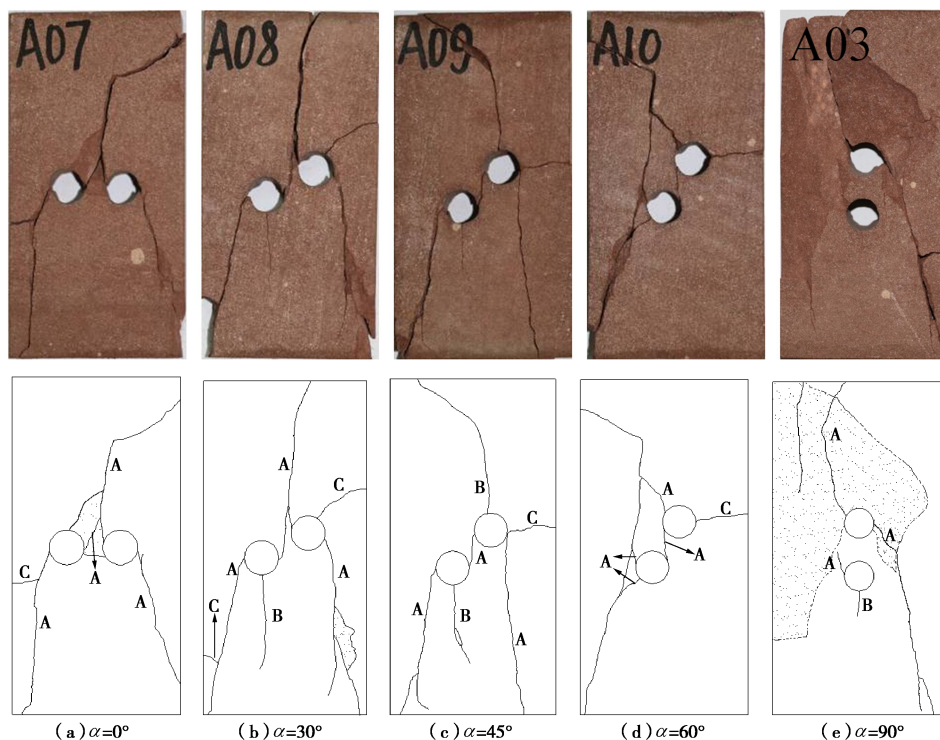


图7 不同倾角试样破坏形态和素描图($2b=22\text{ mm}$) (阴影部分为试样表面剥落破坏区域)

Fig. 7 Failure modes and sketch maps of samples with different angles ($2b=22\text{ mm}$)

A类裂纹产生后独自向上发展,在圆孔上方某个位置交汇;倾角 α 为 45° 和 60° 时,A类裂纹产生后向斜向上方向扩展,直接贯通岩柱,将两个圆孔连通;当倾角为 90° 时,两圆孔发展出的A类裂纹独立扩展,裂纹之间没有发生搭接,两个圆孔之间始终没有发生贯通。

4 双圆孔破裂演化机制

4.1 不同孔心距双圆孔

孔心距 $2b$ 为 17 mm 的试样(A02)破裂演化过程如图8所示,双圆孔试样的变形破裂过程与宏观应力应变过程基本呈现一一对应的关系。值得说明的是,在裂纹的起裂和前期的扩展中,裂隙开度较小,为方便读者阅读交流,对部分细裂纹进行了人为加深。由于两圆孔孔心距较小,圆孔孔壁压应力集中相互叠加,圆孔周围应力集中系数增大,当轴向应力达到 37.20 MPa (A点)时(对应的轴向应变为 1.01×10^{-2}),上部圆孔左右两侧孔壁在高压应力作用下开始塌落破坏,形成结构薄弱区,但此时轴向应力并未发生波动;达到应力应变曲线B点时(轴向应力为 38.53 MPa ,轴向应变为 1.04×10^{-2}),上部圆孔左右侧薄弱区出现裂纹1和裂纹2,并迅速扩展贯通整个岩柱,使上下圆孔发生连通,同时,轴向应力发生第一次跌落,跌落幅度为 0.16 MPa ;随着加载的进行,轴向应力继续增大,到达C点时(轴向应力为 39.83 MPa ,轴向应

变为 1.07×10^{-2}),上部圆孔左侧薄弱区又出现裂纹3,此时,轴向应力发生第二次跌落,跌落幅度为 0.19 MPa ;轴向应力继续增大到 39.86 MPa (D点)时,试样表面出现剥落破坏,裂纹3贯通,此时轴向应力达到峰值点,随后又发生了大幅度的衰减,当衰减至E点($\sigma_1=38.69\text{ MPa}$, $\varepsilon_1=1.10\times 10^{-2}$)时,下部圆孔下方产生拉裂纹4,沿轴向应力方向向下发展。随着加载的进行,轴向应力经历了一个较为漫长的演变过程,当达到F点(轴向应力为 37.27 MPa ,应变为 1.12×10^{-2})时,上部圆孔右侧孔壁产生裂纹5,并扩展至试样右下角边缘,同时表面发生了一定的剥落破坏,此时试样发生最终破坏,轴向应力在瞬间跌落为零,即完全失去承载力。

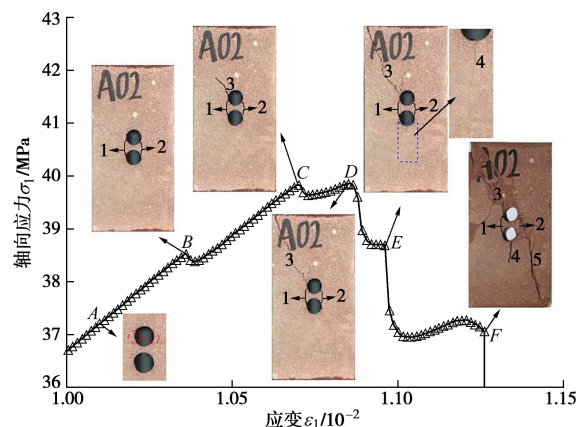


图8 试样A02($2b=17\text{ mm}$, $\alpha=90^\circ$)破裂演化过程

Fig. 8 Fracture evolution process of sample A02 ($2b=17\text{ mm}$, $\alpha=90^\circ$)

当孔心距较大 (22~37 mm) 时, 双圆孔的裂纹产生、扩展过程较为相似, 但与孔心距为 17 mm 时具有很大的不同。由于篇幅原因, 仅以试样 A06 为例来对其破裂演化过程进行分析和探讨, 如图 9 所示。轴向应力达到 23.65 MPa ($\varepsilon_1=0.78 \times 10^{-2}$) 时, 上部圆孔左右两侧孔壁同时出现塌落破坏形成薄弱区, 孔壁塌落后, 轴向应力发生较小的跌落, 跌落为 23.62 MPa (图 9 (a)); 随着加载的进行, 轴向应力继续增大, 至 23.97 MPa 时 (轴向应变为 0.97×10^{-2}), 在上部圆孔两侧的薄弱区同时产生裂纹 1 和裂纹 2, 裂纹 2 迅速扩展至试样左上角, 并产生剥落破坏 (图 9 (b)); 当轴向应力达到 30.76 MPa 时 (轴向应变为 1.04×10^{-2}), 在裂纹 1 的末端出现剥落破坏 (图 9 (c)), 轴向应力发生第二次跌落, 跌落幅度为 0.09 MPa; 当轴向应力达到峰值强度 (30.91 MPa) 时, 上部圆孔上方产生拉裂纹 4, 同时, 裂纹 1 末端发展成两条向下发展的拉裂纹 1^a 和 1^b , 此时试样发生最终破坏, 试样完全失去承载能力 (图 9 (d))。然而与试样 A02 不同的是, 双圆孔周围裂纹的发展与搭接并未将两个圆孔发生贯通, 两者仍保持相对独立。

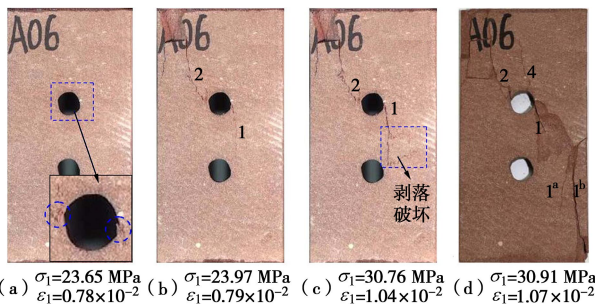


图 9 试样 A06 (2b=37 mm, $\alpha=90^\circ$) 破裂演化过程

Fig. 9 Fracture evolution process of sample A06 (2b=37 mm, $\alpha=90^\circ$)

4.2 不同倾角双圆孔

由破坏形态可以知道, 当孔心距均为 22 mm 时, 不同倾角的双圆孔试样破裂特征以倾角不同主要分为

3 个区段: $0^\circ \sim 30^\circ$, $45^\circ \sim 60^\circ$, 90° , 故选取 A08, A09 和 A03 试样为例对其破裂演化机制进行分析, 分别如图 10~12 所示。

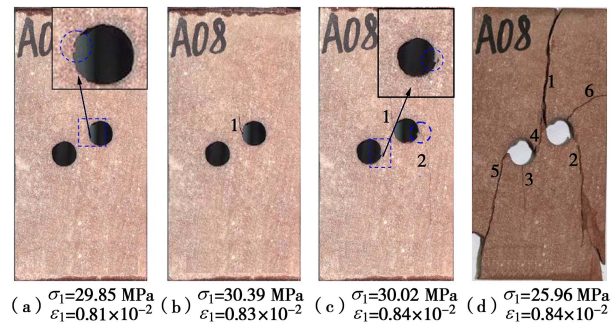


图 10 试样 A08 (2b=22 mm, $\alpha=45^\circ$) 破裂演化过程

Fig. 10 Fracture evolution process of sample A08 (2b=22 mm, $\alpha=45^\circ$)

由图 10 试样 A08 的破裂过程可以看出, 当轴向应力达到 29.85 MPa 时, 轴向应变为 0.81×10^{-2} , 上部圆孔左侧孔壁出现塌落破坏 (图 10 (a)); 轴向应力达到峰值点 (30.39 MPa) 时, 轴向应变为 0.83×10^{-2} , 上部圆孔左侧薄弱区产生裂纹 1 (图 10 (b)); 轴向应力跌落为 30.02 MPa (对应轴向应变为 0.84×10^{-2}) 时, 上部圆孔右侧孔壁塌落破坏, 紧随其后产生裂纹 2, 下部圆孔右侧孔壁塌落破坏 (图 10 (c)); 轴向应力随衰减到 25.96 MPa (对应的轴向应变为 0.84×10^{-2}) 时, 产生裂纹 3, 裂纹 1 和裂纹 2 快速扩展, 试样失去承载能力, 产生裂纹 4、5 和裂纹 6 (图 10 (d))。裂纹 1 和裂纹 4 产生后独立沿加载方向向上发展, 在圆孔上部交汇, 二者没有将两圆孔连通, 岩柱保持相对完整。

试样 A09 破裂过程如图 11 所示, 试样的破坏始于圆孔左右两侧孔壁的塌落破坏, 轴向应力达到 23.30 MPa (轴向应变为 0.75×10^{-2}) 时, 上部圆孔左侧孔壁产生塌落破坏, 并有少量剥落体掉落 (图 11 (a));

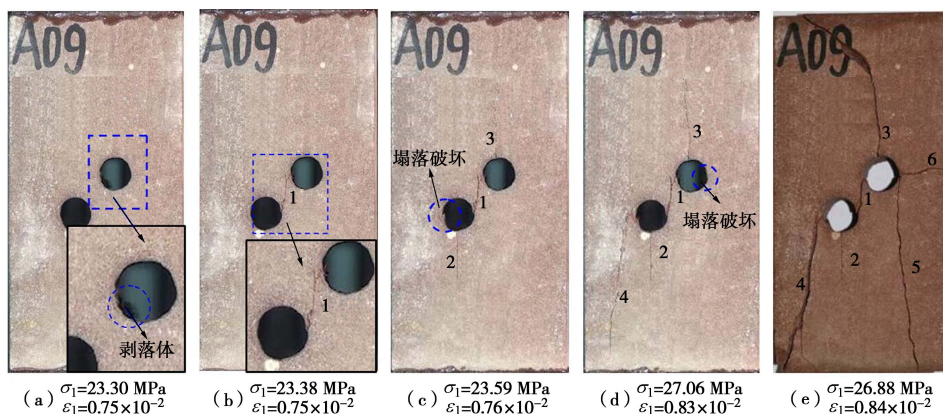
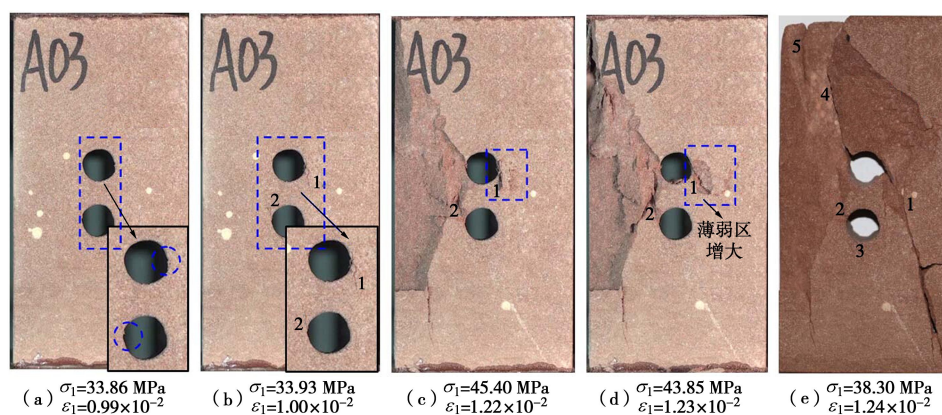


图 11 试样 A09 (2b=22 mm, $\alpha=60^\circ$) 破裂演化过程

Fig. 11 Fracture evolution process of sample A09 (2b=22 mm, $\alpha=60^\circ$)

图 12 试样 A03 ($2b=22$ mm, $\alpha=90^\circ$) 破裂演化过程Fig. 12 Fracture evolution process of sample A03 ($2b=22$ mm, $\alpha=90^\circ$)

随着轴向应力的继续增大, 为 23.38 MPa 时, 上部圆孔左侧塌落位置产生裂纹 1, 裂纹 1 快速扩展贯通整个岩柱, 此时轴向应力发生第一次跌落, 跌落幅度为 1.64 MPa (图 11 (b)); 轴向应力达到 23.59 MPa 时, 轴向应变为 0.76×10^{-2} , 裂纹 2 和裂纹 3 分别在上部圆孔上侧孔壁和下部圆孔下侧孔壁同时产生, 下部圆孔左侧孔壁塌落破坏 (图 11 (c)), 轴向应力发生第二次跌落, 跌落幅度为 1.29 MPa; 轴向应力达到峰值点时, 下部圆孔下侧孔壁产生拉裂纹 4, 上部圆孔右侧孔壁塌落破坏 (图 11 (d)), 轴向应力发生剧烈跌落, 跌落过程中在上部圆孔右侧分别产生拉裂纹 5 和横向断裂裂纹 6, 随后试样在短时间内完全失去承载力。而与试样 A08 不同的是, 裂纹 1 的扩展将两个圆孔连通在一起, 圆孔间岩柱被裂纹 1 贯通。

试样 A03 的破裂过程如图 12 所示, 当轴向应力达到 33.86 MPa, 轴向应变为 0.99×10^{-2} 时, 上部圆孔右侧孔壁和下部圆孔左侧孔壁同时出现塌落破坏 (图 12 (a)), 随后裂纹 1 和裂纹 2 分别在两个薄弱区起裂 (图 12 (b)); 当轴向应力达到峰值点时, 试样左侧出现大面积的剥落, 上部圆孔右侧薄弱区也有扩大的迹象, 但试样整体仍存在一定的承载能力 (图 12 (c)); 峰值点过后轴向应力逐渐跌落, 上部圆孔右侧薄弱区继续增大 (图 12 (d)), 当轴向应力跌落为 38.30 MPa (对应的轴向应变为 1.24×10^{-2}) 时, 分别在下部圆孔下侧和上部圆孔左侧产生拉裂纹 3 和 4, 并在试样左上角产生了一条远场裂纹 5 (图 12 (e)), 此时试样完全失去承载力。

综上所述, 单轴压缩作用下含双圆孔砂岩的初始破坏均始于圆孔孔壁的塌落破坏, 而宏观裂纹的产生始于圆孔塌落脆弱区, 之后在圆孔上下孔壁产生拉伸破坏, 试样逐步发生失稳, 而试样的起裂形态、裂纹搭接过程及其最终破坏形式等则与双圆形孔洞的孔心距和倾角息息相关。

4.3 起裂应力变化特征

起裂应力是反映岩石缺陷结构性特征的重要指

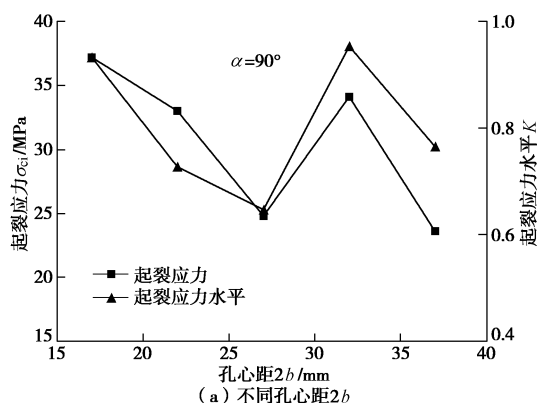
标, 含缺陷岩石的起裂应力水平^[17]可以表述为

$$K = \sigma_{ci} / \sigma_0, \quad (1)$$

式中, K 为起裂应力水平, σ_{ci} 为起裂应力, σ_0 为峰值强度。值得说明的是, 目前, 不同室内试验条件下对起裂应力的判断标准并不统一, Yang^[18]采用第一条宏观裂纹产生时的轴向应力作为试样的起裂应力, 本文单轴压缩作用下双圆孔初始破裂均表现为圆孔内壁塌落, 故借鉴文献[18]的经验定义该状态时的轴向应力值为起裂应力。不同孔心距 $2b$ 和不同倾角 α 下双圆形孔洞砂岩起裂应力水平变化特征如图 13 所示。由图 13 中可以看出:

(1) 不同孔心距试样的起裂应力和起裂应力水平变化规律相似, 均表现为随孔心距的增大先减小后增大后又减小, 表现出较强的随机性; 孔心距 $2b$ 为 17 mm 时, 起裂应力达到最大值 37.20 MPa, 孔心距 $2b$ 为 37 mm 时, 起裂应力达到最小值 23.65 MPa; 孔心距为 27 mm 和 32 mm 时, 起裂应力水平分别达到最小值 (0.65) 和最大值 (0.95)。

(2) 不同倾角 α 的试样, 起裂应力随倾角 α 的增大先减小后增大; 倾角为 60° 时, 起裂应力达到最小值 (21.78 MPa), 倾角为 90° 时, 起裂应力达到最大值 (33.02 MPa); 起裂应力水平随倾角 α 的增大先增大后减小, 倾角 α 为 30° 和 90° 时, 起裂应力水平分别达到最大值 (0.98) 和最小值 (0.73)。

(a) 不同孔心距 $2b$

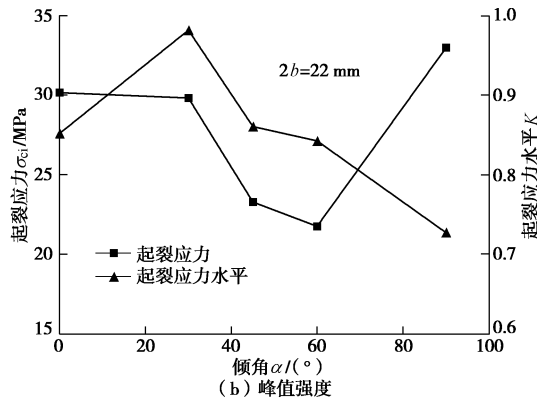


图 13 起裂应力和起裂应力水平

Fig. 13 Stress and stress levels of crack initiation

5 结 论

(1) 含双圆孔试样的峰值强度和弹性模量随孔心距 $2b$ 的增大先增大后又减小, 分别在 22 mm 和 27 mm 时取得最大值, 最大值分别为 35.40 MPa 和 5.80 GPa, 随着孔心距的增大, 双圆孔的相互作用逐渐减弱。

(2) 随倾角 α 的增大, 双圆孔试样峰值强度先减小后又增大, 在 60° 时获得最小值, 而弹性模量的变化特征表现出较大的随机性, 倾角在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间时双圆孔的相互作用最为强烈。

(3) 含双圆孔试样的起始破坏均表现为孔洞孔壁的塌落破坏, 起裂应力水平随着孔心距的增大先减小后增大后又有所减小, 而随着倾角的增大表现为先增大后又逐渐减小的特征。

参考文献:

- [1] YANG S Q, JING H W, XU T. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws[J]. Journal of Central South University, 2014, **21**: 2059 - 2073.
- [2] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 31 - 39. (YANG Sheng-qi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 31 - 39. (in Chinese))
- [3] 杨永明, 鞠 杨, 毛灵涛. 三轴应力下致密砂岩裂纹展布规律及表征方法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 864 - 872. (YANG Yong-ming, JU Yang, MAO Ling-tao. Growth distribution laws and characterization methods of cracks of compact sandstone subjected to triaxial stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 864 - 872. (in Chinese))
- [4] 钟志彬, 邓荣贵, 李 佳, 等. 天然裂隙性流纹岩三轴力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1233 - 1240. (ZONG Zhi-bin, DENG Rong-gui, LI Jia, et al. Experimental study of triaxial mechanical properties of naturally fissured rhyolite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1233 - 1240. (in Chinese))
- [5] 李建林, 王乐华, 孙旭曙. 节理岩体卸荷各向异性力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 892 - 900. (LI Jian-lin, WANG Le-hua, SUN Xu-shu. Experimental study on anisotropic mechanical characteristics of jointed rock masses under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 892 - 900. (in Chinese))
- [6] YANG S Q, HUANG Y H, JING H W, et al. Discrete element modeling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2014, **178**: 28 - 48.
- [7] YANG S Q, LIU X R, JING H W. Experimental investigation on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **63**: 82 - 92.
- [8] 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 experiment of ordered multi-crack body in rock-like material under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013 **35**(11): 2097 - 2109. (in Chinese))
- [9] 赵延林, 曹 平, 万 文, 等. 岩石裂纹亚临界扩展实验与压剪流变断裂模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(1): 276 - 286. (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WAN Wen, et al. Rock cracks subcritical propagation test and compression-shear rheological fracture model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(1): 276 - 286. (in Chinese))
- [10] 谢林茂, 朱万成, 王述红, 等. 含孔洞岩石试样三维破裂过程的并行计算分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(9): 1447 - 1455. (XIE Lin-mao, ZHU WAN-cheng, WANG Shu-hong, et al. Three-dimensional parallel computing on failure process of rock specimen with a pre-existing circular opening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(9): 1447 - 1455. (in Chinese))

- [11] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学, 2010, **27**(8): 133 - 139. (LIU Zhao-wei, LI Yuan-hai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(8): 133 - 139. (in Chinese))
- [12] ZHAO X D, ZHANG H X, ZHU W C. Fracture evolution around pre-existing cylindrical cavities in brittle rocks under uniaxial compression[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, **24**(3): 806 - 815.
- [13] WANG S Y, SLOAN S W, TANG C A. Three-dimensional numerical investigations of the failure mechanism of a rock disc with a central or eccentric hole[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2014, **47**(6): 2117 - 2137.
- [14] 周航, 孔纲强, 刘汉龙. 饱和土体中椭圆孔扩张弹塑性解[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 983 - 988. (ZHOU Hang, KONG Gang-qiang, LIU Han-long. Elasto-plastic solution for elliptical cavity expansion in saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 983 - 988. (in Chinese))
- [15] 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 Di-yuan, LI Xi-bing, LI Chun-lin, 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))
- [16] 杨圣奇, 黄彦华. 双孔洞裂隙砂岩裂纹扩展特征试验与颗粒流模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, **22**(3): 584 - 597. (YANG Sheng-qi, HUANG Yan-hua. Experiment and particle flow simulation on crack coalescence behavior of sandstone specimens containing double holes and a single fissure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, **22**(3): 584 - 597. (in Chinese))
- [17] 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 Yan-fang, 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. (in Chinese))
- [18] YANG S Q. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, **78**(17): 3059 - 3081.

城市地下空间开发利用前沿论坛

(2015, 杭州)

一号通知

随着我国新型城镇化的推进, 城市地下工程快速发展, 呈现出巨大的社会需求, 对地下空间资源的开发利用及城市安全也提出了更高的要求。针对城市地下空间开发利用重大国家需求, 将于 2015 年 10 月 31—11 月 1 日在杭州浙江大学召开“城市地下空间开发利用前沿论坛”研讨会, 会议将围绕城市地下空间特殊环境与科技创新重大任务, 开展城市地下空间开发利用的前沿问题进行研讨, 为提升我国城市地下空间开发利

用的科研水平和人才培养做出努力。

会议主题: 城市地下空间开发规划; 城市地下空间开发基础理论; 城市地下综合体; 城市地下交通; 城市地下综合管线; 城市地下空间防灾减灾。

主办单位: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心; 浙江省城市化发展研究中心。