

双轴加压下双裂隙类岩石材料 破坏试验与数值

连帅龙, 万文*, 赵延林

(1.湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:对含有2条预制裂隙的类岩石材料试件进行了双轴压缩试验,研究了岩桥倾角以及侧向压力对双裂隙类岩石材料裂纹的扩展与贯通的影响,并应用离散元法进行数值模拟,对物理试验的结果进行了验证.

关键词:类岩石材料;双轴压缩;扩展与贯通;离散元法

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)04-0045-06

Destruction Test and Numerical Study of Rock-Like Material with Two Flaws Under Biaxial Compression

Lian Shuailong, Wan Wen, Zhao Yanlin

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

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The biaxial compression experiments of rock-like materials with two flaws are carried out under different rock bridge liagment angle, and lateral pressure. It obtains the influence of various factors on crack propagation, penetration of rock like materials. The results of physical experiments are verified by discrete element method.

Keywords: rock-like material; biaxial compression; propagation and penetration; discrete element method

经过长期岩层构造与地质运动的影响,岩体内部会产生微观裂纹和一些细观内部的缺陷,导致岩体在复杂的地质环境中,进一步形成宏观节理裂隙,断层等不同尺度以及不同类型的缺陷.在实际工程中,受自然因素和人为因素的影响,岩体中的节理裂隙不断的扩展,从而会导致岩体产生失稳、塌方、滑坡以及隧道内突水等工程问题,并造成惨重的经济损失和人员伤亡.因此对裂隙岩体节理扩展与贯通模式的研究有重要的意义和深远的影响.为了分析含裂隙的类岩石材料的破断机制,国内外不少学者利用混凝土等类岩石材料,研究裂隙类类岩石材料的起裂扩展及贯通破坏^[1-5].Zhao Y 等^[6,7]基于含2条预制裂隙的类岩石材料的双轴压缩试验,研究了含2条预制裂隙的类岩石材料的开裂及应力应变行为,特别是裂隙尖端的局部应变集中.杨圣奇等^[8],对含断续预制裂隙的大理岩进行了单轴压缩试验,研究裂隙参数对大理岩变形破坏特征的影响.曹平等^[9],在单轴压缩条件下,对含有预制裂隙的混凝土材料进行研究,对试件破坏模式和单轴抗压强度的影响因素进行了分析.Wong 等^[10]在单轴压缩的条件下,对含有多条平行预制裂隙类岩石材料的裂纹的产生、扩展和贯通规律进行了研究.

收稿日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274097;51774132);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067);湖南省教育厅资助科研项目(13A020)

*通信作者,E-mail:wanwen68@163.com

以上研究对类岩石材料的起裂扩展及贯通破坏有一定的意义,但对于侧向压力对岩石试件裂纹扩展情况的研究较少.本文基于学者们的研究,以含2条预制裂隙的类岩石材料为试验对象,研究了岩桥倾角和侧向压力对双轴压缩下含2条预制裂隙的类岩石材料试件裂纹扩展的影响,分析了预制裂隙类岩石材料裂纹的起裂、扩展及贯通的规律,并且运用 PFC2D 离散元颗粒流数值模拟软件进行了数值模拟,对物理试验结果进行了验证.

1 预制双裂隙岩样的双轴压缩试验

1.1 试件制备及空间布置

试验试样是由一定比例的白水泥、砂子、水($m_{\text{水泥}} : m_{\text{砂}} : m_{\text{水}} = 2 : 2 : 1$)制作的类岩石材料,制作试件前,将砂子采用 0.85 mm 的筛子筛选以去除其中的杂质,试验模具采用钢制模具,成型模具内部尺寸:长×宽×高=150 mm×150 mm×30 mm,岩桥长度为 $L = 2a = 20$ mm,预制裂隙倾角为 30° ;预制岩桥倾角为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,具体裂隙空间布置如图 1.

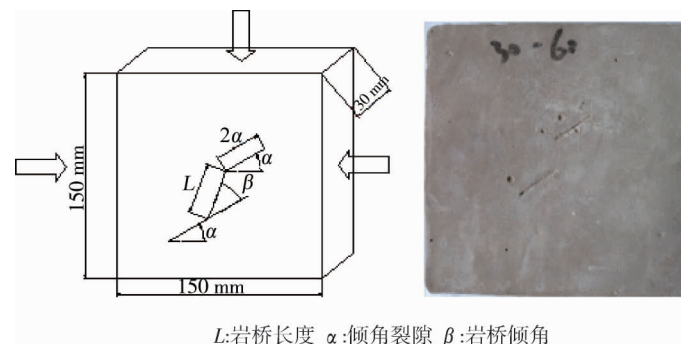


图 1 试件几何布置图以及制备完整的试样

在试样浇筑完毕后,把双面擦拭机油的 0.1 mm 厚的云母片插入预先制定的裂隙位置.在室温环境下养护至 12 h 左右,脱模,并云母片将抽出;试样脱模后,检查试件的平整度以及预制裂隙的贯穿性,用纱布等对出现表面粗糙、形状不规则的试件进行打磨,去除尺寸不符合试验要求的试样,并重新制作,将试件放入水中养护 28 d.

1.2 试件的加载

试验设备采用 RYL600 岩石剪切流变仪,试验前在试件的受压接触端面涂抹润滑油以防止试件端部出现应力集中.首先以 100 N/s 加载速率加载至试验方案设定的侧向压力(0.0, 0.5, 1.0 MPa),然后再以 150 N/s 的加载速率施加轴向荷载,直至试件破坏.采用高清数码相机捕获试件的起裂、扩展、贯通、破坏全过程.试验装置如图 2 所示



图 2 双轴压缩加载

1.3 岩桥倾角对裂纹扩展规律的影响

如表 1 所示.当 $\beta = 0^\circ$ 时,在加载过程中 2 条预制裂隙的内尖端与外尖端附近以张拉的形式开始发生起裂产生翼型裂纹,其中上部裂隙的外尖端附近裂纹向试件上边界扩展,内尖端则朝向试件下边界扩展,随着轴向应力的增大,2 条预制裂隙中间的岩桥部位开始出现剪切破坏,形成 1 条不规则形状的剪切裂纹在岩桥间贯通,并伴随着片状碎块脱落.与此同时,在试件的下部裂隙的外尖端附近出现斜剪切裂纹并向试件的左侧边界扩展.岩桥间是以 1 条与预制双裂隙所共面的共面剪切裂纹贯通,剪切裂隙出现时间较晚,最终当翼型裂纹扩展至试件边界时,试件发生失稳破坏.

当 $\beta = 30^\circ$ 时,试件的破坏过程与岩桥倾角为 0° 相似,岩桥间是以 1 条与预制双裂隙所共面的共面剪






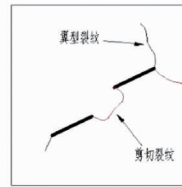
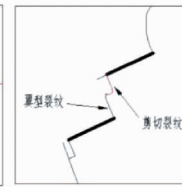
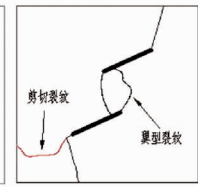
切裂纹贯通。

当 $\beta=60^\circ$ 时,在加载过程中首先在上部预制裂隙的外尖端附近出现张拉破坏,进而产生翼型裂纹,并且以曲线的形式向试件的上部边界扩展,同时试件的下部裂隙的外尖端附近产生1条翼型裂纹向试件的下部边界扩展.同样的,下部裂隙的内尖端产生1条翼型裂纹向上部裂隙的内尖端方向扩展.随着轴向应力的增大,此时上部裂隙的内尖端附近开始出现剪切破坏并产生1条剪切裂纹向下部扩展,与下部裂隙内尖端产生的翼型裂纹在岩桥内形成搭接,进而贯通整个岩桥.此时岩桥间是以翼型+剪切的混合裂纹所贯通,由于剪切裂纹稍稍滞后于翼型裂纹出现,所以搭接位置更加趋近于上部预制裂隙的内尖端附近.最后试件预制裂隙外尖端附近产生的翼型裂隙扩展至试件的边界,试件失稳破坏.

当 $\beta=90^\circ$ 时,在加载过程中上部预制裂隙与下部预制裂隙的外尖端附近分别出现张拉破坏产生翼型裂纹,并分别向试件上下两个边界扩展.同时试件的上部裂隙的内尖端附近产生1条翼型裂纹向下方扩展,试件下部裂隙的内尖端附近产生1条翼型裂纹向上方扩展.随着轴向应力的增加,下部裂隙的外尖端附近产生1条横向剪切裂纹,并向试件的左侧边界沿不规则方向扩展(形状大致呈下凹状).2条内尖端裂纹并未在岩桥范围内搭接,而是相互错开,直至与预制裂隙相交,在岩桥范围内形成贯通,此时岩桥间是以双翼型裂纹贯通,双翼型裂纹与2条裂隙封闭成1个近似四边形的形状,当翼型裂纹逐渐的扩展到试件的边界时,试件失稳破坏.

表1 岩桥倾角对裂纹扩展规律的影响

| 侧向应力/MPa | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|
| 裂隙倾角/ $^\circ$ | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 岩桥倾角/ $^\circ$ | 0 | 30 | 60 | 90 |

| | | | | |
|----------|---|---|--|---|
| 试验 试样 |  |  |  |  |
| 裂纹 扩展 |  |  |  |  |

结合上述分析可知,当预制裂隙倾角与侧向压力一定的条件下,随着岩桥倾角的增大,试件裂纹的扩展规律:剪切型裂纹贯通破坏模式 \rightarrow 剪切+翼型张拉裂纹混合贯通破坏模式 \rightarrow 翼型张拉裂纹的贯通破坏模式.裂纹贯通的条数从单条裂纹贯通逐渐转化为双条裂纹贯通的形式.

1.4 侧向压力对裂纹扩展规律的影响

如表2所示,当试件的加载方式为单轴压缩(侧向压力为0 MPa)时,在2条预制裂隙的内外尖端附近分别以张拉破坏的形式发生起裂产生翼型裂纹.随着轴向压力的增大,翼型裂纹不断扩展并在岩桥内通,随后当外尖端附近产生的翼型裂纹分别扩展至试件上下边界,试件失稳破坏.试件的破坏裂纹主要是以翼型裂纹为主,剪切裂纹稍发育或不发育,破坏方式为张拉型破坏.




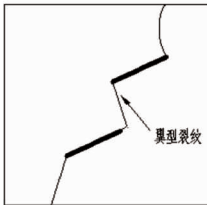
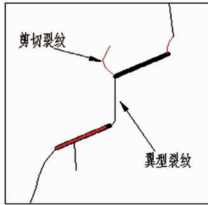
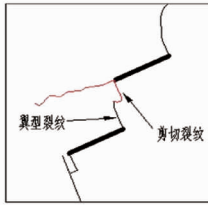
当侧向压力为0.5 MPa时,与侧向压力为0 MPa的情况类相似,试件的破坏裂纹以翼型裂纹为主,剪切裂纹虽已开始逐渐发育,但扩散并不明显,仅仅个别位置出现剪切破坏,试件整体的破坏方式为张拉型破坏.

当侧向压力为1.0 MPa时,首先下部裂隙的内外尖端与上部裂隙的外尖端附近以张拉破坏的形式出现翼型裂纹,随着轴向荷载的增加,上部裂隙的内尖端附近发生剪切破坏,产生斜剪切裂纹并不断地向岩桥方向扩展,以及与上部裂隙大致共面的共面剪切裂纹向试件左侧边界扩展.最后试件预制裂隙的外尖端

附近产生的翼型裂纹逐渐扩展至试件边界,试件发生失稳破坏.试件的部分位置出现剪切破坏,剪切裂隙已大面积发育并扩展,但张拉破坏仍旧占主导地位,试件的整体破坏方式为张拉型+剪切型破坏.

结合以上分析可知,当试件的预制裂隙倾角与岩桥倾角一定的条件下,随着侧向加载应力的增大,翼型张拉裂纹发育减少,而剪切型破坏裂纹明显增加.试件的破坏过程:翼型张拉破坏→翼型+剪切型破坏.

表 2 侧向压力对裂纹扩展规律的影响

| | | | |
|----------|---|--|---|
| 裂隙倾角/(°) | 30 | 30 | 30 |
| 岩桥倾角/(°) | 60 | 60 | 60 |
| 侧向压力/MPa | 0 | 0.5 | 1.0 |
| 试验 试样 |  |  |  |
| 裂纹 扩展 |  |  |  |

2 预制双裂隙岩样双轴压缩数值分析

2.1 计算模型及参数选取

PFC2D 是一种通用的离散单元方法,可以用来模拟岩石的行为,尤其是岩石的断裂特征.在 PFC2D 中建立模型主要由 3 个因素所定义,即颗粒、键(颗粒与颗粒间的黏结)和墙.本文中建立的数值模型由 54 323 个颗粒和 16 339 个平行键组成(图 3).为了模拟轴向载荷,固定模型的下部边界,控制模型的上部边界以恒定速率加载轴向应力.此外,本模型中布置了 5 625 个环状监测区域,以监测应力加载动态过程中的拉伸和剪切应力.本次数值模拟模型的微观及宏观参数,如表 3.

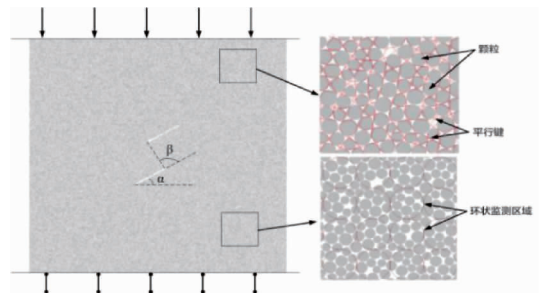


图 3 数值模型

表 3 数值模型的微观和宏观性质

| 微观参数 | 数值 | 宏观参数 | 数值 |
|---------------|------|----------------------------------|------|
| 最小半径/mm | 0.24 | 单轴压缩应力/MPa | 22.3 |
| 颗粒最大半径/最小半径 | 1.66 | 弹性模量/GPa | 2.1 |
| 颗粒接触模量/GPa | 9.5 | | |
| 颗粒法向刚度/剪切刚度 | 2.5 | 泊松比 | 0.24 |
| 颗粒摩擦系数 | 0.5 | | |
| 平行键模量/GPa | 1.95 | | |
| 平行键的法向刚度/剪切刚度 | 2.5 | 裂纹扩展阻力/(Nm/m ²) | 50.2 |
| 平行键强度/MPa | 15.7 | 断裂强度因子/(MPa * m ^{1/2}) | 0.32 |
| 平行键的剪切强度/MPa | 15.7 | | |

2.2 岩桥倾角对试件破坏规律的影响

在侧向压力为 0.5 MPa 的情况下,裂隙倾角 α 为 30° 时不同岩桥倾角的裂纹扩展模拟图如图 4 所示.显然,当岩桥倾角相对较小时,岩桥处未能形成搭接贯通如图 4a 和图 4b.但是当岩桥倾角增加到 60° 时,

岩桥处裂纹贯通.不过,这个推论值得进一步研究.随着岩桥倾角 β 进一步增加到 90° ,图4d显示了一个拉伸裂隙在岩桥内形成贯通.另外,在裂缝尖端附近产生了几条拉伸和剪切裂纹.从图4可以看出,随着 β 值的逐渐增大,岩桥结合面由拉伸剪切模式变为张拉模式.

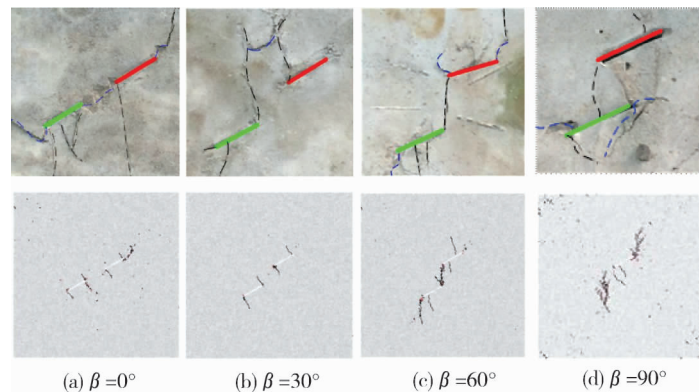


图4 α 为 30° 时不同岩桥倾角裂纹扩展数值模拟

不同岩桥倾角作用下的数值模拟实验结果与物理试验所得出的结论吻合度较好,进一步验证了岩桥倾角对裂纹扩展规律的影响.

2.3 侧向压力对试件破坏规律的影响

图5显示了当裂隙倾角 α 为 30° ,岩桥倾角为 90° 时随着侧向压力不断增加的数值模拟的试验结果.显然,当侧向压力相对较小时,岩桥处形成双裂隙以张拉破坏的形式贯通如图5a.而当侧向压力增加至 0.5 MPa 时,岩桥处仅仅由一条张拉裂纹发生贯通,如图5b.随着侧向压力进一步增加至 1 MPa 时,在试件的岩桥处虽然也形成了张拉裂纹,但其张拉破坏程度不足以使其在岩桥处贯通,如图5c.从数值模拟结果中也很明显可以看到随着侧向压力的不断增加,在两条预制裂隙的岩桥处所产生的张拉破坏程度逐渐减小,但是在预制裂隙外尖端附近产生的剪切裂纹越来越明显.

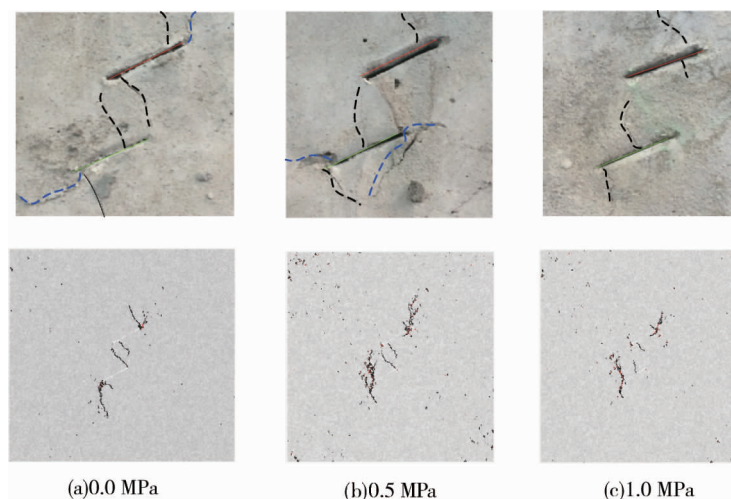


图5 α 为 30° , β 为 90° 时不同侧向压力裂纹扩展数值模拟

不同的侧向压力作用下的数值模拟实验结论与物理试验所得出的结论相吻合,进一步验证了侧向压力对裂纹扩展规律的影响.

3 结论

1) 当裂隙倾角与侧向压力一定的情况下,随着岩桥倾角的增大,试件裂纹的扩展规律:从单条裂纹贯

通逐渐变为双条裂纹贯通的形式,从裂纹类型角度分析,岩桥处由剪切裂纹破坏→剪切+翼型张拉裂纹混合破坏→翼型张拉裂纹破坏.

2)当岩桥倾角与裂隙倾角一定的情况下,随着侧向应力的增大,翼型张拉裂纹发育减少,而剪切型破坏裂纹明显增加.试件的破坏规律为:翼型张拉裂纹破坏→翼型+剪切裂纹破坏→剪切裂纹破坏.

3)当裂隙倾角与侧向压力一定的情况下,随着岩桥倾角的增大,对岩桥区域的拉应力集中有着显著的促进作用;当岩桥倾角与裂隙倾角一定的情况下,随着侧向压力的增加,张拉破坏受到抑制,而剪切破坏得到促进.数值模拟结果与物理试验结论相吻合,进一步验证了结论的准确性与可靠性.

参考文献:

- [1] 李宁,张平,陈蕴生.裂隙岩体试验研究进展与思考[C]//中国岩石力学与工程学会第七次大会论文集.北京:中国科学技术出版社,2002:63-69.
- [2] 张波,李术才,张敦福,等.含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩力学性能试验及断裂损伤研究[J].岩土力学,2012,33(6):149-154.
- [3] Vasarhelyi B, Robert A. Modeling of crack initiation , Propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(2): 119-139.
- [4] 张庆伦,赵延林,刘杰,等.剪切作用下类岩石断续裂纹岩桥破裂试验与数值分析[[J].矿业工程研究,2012,27(2): 31-36.
- [5] 赵延林,万文,王卫军.类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J].岩土工程学报,2013(11): 2097-2109.
- [6] Zhao Y, Zhang L, Wang W, et al. Cracking and Stress - Strain Behavior of Rock-Like Material Containing Tow Flaws Under Uniaxial Compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49 (7) : 2665-2687 .
- [7] Wang M, Ping C, Zhao Y L, et al. Crack growth analysis for rock - like materials with ordered multiple pre - cracks underbiaxialcompression [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(4): 866-874.
- [8] 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(1):31-39.
- [9] 蒲成志,曹平,赵延林,等.单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J].岩土力学,2010,31(11):3661-3666.
- [10] Wong L N Y, Einstein H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(2):239-249.