

# 单轴压缩条件下预制裂隙类岩石材料实验研究

郑文翔<sup>1,2</sup>, 赵延林<sup>3,4</sup>, 王敏<sup>3,4</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 内蒙古科技大学 煤炭学院, 内蒙古 包头 014010;  
3. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 4. 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:**为研究裂隙类岩石材料在单轴压缩条件下的力学性质及裂纹扩展规律,通过在试样中预埋铁片的方法,制备出含不同裂纹条数和裂纹倾角的裂隙类岩石材料;采用 RYL-600 剪切流变仪对试样进行以负荷控制方式进行单轴加载,并使用数码相机记录试样加载过程中裂纹的起裂、扩展和贯通过程。着重对  $60^\circ \times 18$  条裂隙类岩石材料的实验结果进行详细分析,观察其轴向应力-轴向位移曲线,曲线呈现出 3 次明显的应力跌落阶段,结合试样在试验过程中的录像,将裂纹的扩展分为 3 个阶段。并且,通过 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对  $60^\circ \times 18$  条的试样进行数值模拟研究,获得了数值模拟实验加载过程中的轴向应力-轴向位移曲线和模型破坏切片图,分析其破坏方式和破坏模式,并与物理实验对比,两者吻合较好。

**关键词:**类岩石材料;裂纹扩展;实验研究;断裂力学;单轴压缩;数值模拟

**中图分类号:**TU458 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9102(2013)04-0001-06

20 多年来,断裂力学已引入到岩体力学中,对岩体的强度分析主要是建立在对岩石的强度和裂纹的基础上,岩体不再看作为连续的均质体,而是由裂隙构造组合而成的介质体。运用断裂力学分析岩石的断裂强度及性质是比较符合实际的<sup>[1]</sup>。考虑现场原位试验的经济性和难度,针对裂隙岩体的破坏过程研究主要借助于类岩石材料的室内实验研究<sup>[2]</sup>。

1924 年,Griffith<sup>[3]</sup>通过压缩试验,在不考虑摩擦对压缩闭合裂纹的影响和假定椭圆裂纹将从最大应力拉应力集中点开始扩张的情况下,获得了双轴压缩下裂纹的扩展准则,即 Griffith 强度准则<sup>[1]</sup>。Brace 和 Bombolskis(1963)通过单轴压缩试验,得到了倾斜裂纹的断裂角度约为  $70^\circ$ ,这与计算理论值  $70^\circ 32'$  基本相符<sup>[4]</sup>。Kranz<sup>[5]</sup>用 SEM 方法研究 Barre 花岗岩在 87% 断裂强度荷载下裂纹的蠕变扩展,发现:在加速蠕变阶段,裂纹之间的连接、贯通比单一裂纹更加明显。A. Bobet<sup>[6-7]</sup>在对预制裂隙石膏试件进行单轴压缩和双向加载时,在预制裂隙尖端发现

了次生裂纹的存在。同时,R. H. C. Wong<sup>[8]</sup>在对含有两条预制裂隙的砂岩试件进行单轴加载时,观察到 2 种不同形态的次生裂纹。M. Sasong<sup>[9]</sup>和 C. H. park<sup>[10]</sup>在对石膏试件进行单轴加载测试时,也发现了尖端裂纹的存在。李世愚<sup>[11]</sup>对大理石板用碳化硅砂轮片画痕,然后采用三点弯曲的加载方式生成裂纹,发现在大理石板上预制的裂纹端部有丰富的微破裂丛集。赵延林<sup>[12]</sup>进行了双轴压缩条件下类岩石裂纹材料的压剪流变断裂实验,在实验尺度上证实了类岩石裂纹流变断裂现象的存在。国内其他学者在室内裂隙类岩石材料的实验研究方面也取得了一定的成果<sup>[13-18]</sup>。

本文以裂隙类岩石材料的单轴压缩试验为基础,记录实验过程中轴向位移-轴向应力曲线,用高清数码相机对裂隙类岩石材料的破坏过程摄像。对  $60^\circ \times 18$  条的裂隙类岩石材料的实验结果进行了详尽地分析,并对其采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件进行数值模拟实验。

收稿日期:2013-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274097);湖南省教育厅科学研究重点项目(13A020)

通信作者:郑文翔(1979-),男,山西山阴人,博士研究生,主要从事煤矿开采技术、井巷支护、矿山压力等方面的研究。E-mail: 1393493559@qq.com

# 1 物理实验

## 1.1 裂隙类岩石材料的制备

裂隙类岩石材料的骨料主要为沙(直径小于 0.85 mm),胶结材料为水泥(P32.5).制备的主要过程:首先,将水泥、沙子、水按比例混合而成(质量比为水泥:沙子:水 = 26: 25: 10),将水泥、沙、水三者搅拌均匀后倒入方形磨具中(磨具的内尺寸为 28 cm × 18.5 cm × 4 cm),同时,将铁片预埋,然后将其振捣至不再出现大量气泡,抹平表面.24 h 后,取出铁片,预制出长度为 2 cm 厚度为 0.1 cm 的贯通裂隙.待材料凝固好,拆模,制备出来的类岩石材料在室内养护 28 d.将试件的表面及端部打磨平整.图 1 给出了部分试件实物图.



图 1 部分试件实物

Fig. 1 The part of real specimens

## 1.2 裂隙的空间布置

预制裂纹条数有:6 条、9 条、12 条、15 条、18 条,裂纹倾角有 15°,30°,45°,60°,预制的裂纹长度为 2 cm,将不同的裂纹条数和裂纹倾角组合,共制备出 20 个不同裂纹条数和裂纹倾角的试件.以 60° × 18 条为例,说明裂隙空间布置,如图 2.

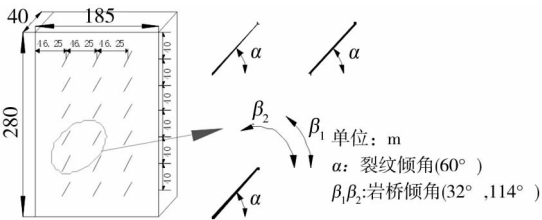


图 2 裂隙布置图

Fig. 2 The layout drawing of crack

## 1.3 裂隙类岩石材料的加载

加载仪器为长春市朝阳仪器有限公司生产的 RYL-600 剪切流变仪,该仪器主要用于岩石或混凝土的剪切流变实验,具有刚度大、测量精确、控制精度高、稳定性好.仪器的测量误差为: ≤ ±0.5%,控制精度:位移误差 ±0.1%,试验力 ±0.2%.

该实验主要采用仪器的轴向加载系统,其实际加载方式如图 3.加载方式采用负荷加载,加载速率为 100 N/s(防止加载速率过快,造成试样崩裂).实

验过程中,用高清数码相机对裂隙类岩石材料的加载破坏过程摄像.

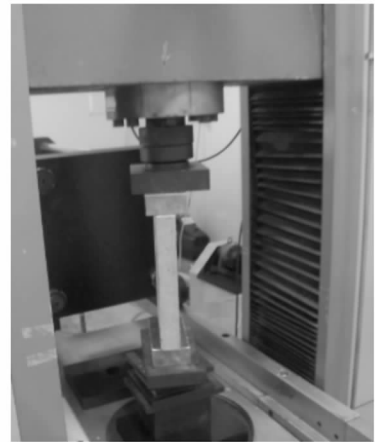


图 3 试件加载图

Fig. 3 The schematic diagram of loading

## 1.4 物理实验结果分析

由于篇幅限制,本文着重以 60° × 18 条为例分析有序裂隙体在单轴压缩过程中呈现出的力学性质和裂纹扩展的一些规律.

通过实验可得轴向应力 - 轴向位移曲线(如图 4),应力出现了 3 次非常明显应力跌落阶段: AB 段、CD 段、EF 段.结合试样破坏过程录像可知,每一次应力跌落都伴随着新裂纹的产生、扩展和贯通.根据应力的 3 个跌落阶段和类岩石材料破坏过程录像,将裂纹扩展分为 3 个阶段:破坏前期(图 4 中 AB 段)、破坏中期(图 4 中 CD 段)、破坏后期(图 4 中 EF 段).为便于分析,列出了与图 3 中 B 点、D 点、F 点对应的试样破坏情况,分别如图 5、图 6,图 7.

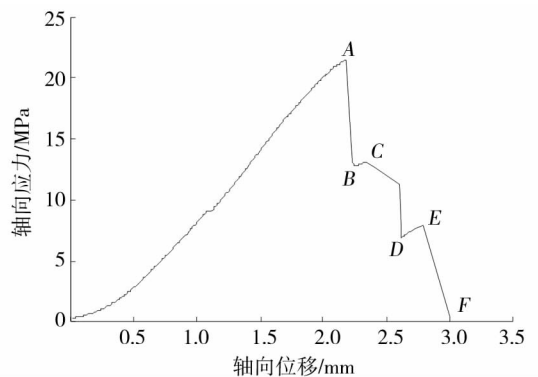


图 4 轴向位移 - 轴向应力曲线

Fig. 4 The curve of axial displacement - axial pressure

破坏前期(图 4 中 AB 段),轴向应力由 A 点的 21.5 MPa 下滑至 B 点的 12.8 MPa,试样的左上角首先发育翼型裂纹,由于拉伸作用翼型裂纹贯通左边一排预制裂纹,中间一排预制裂纹也通过拉伸作用

形成翼形拉裂纹,实现部分预制裂纹之间的搭接. 右边大部分岩桥尚未破坏,试样具有较大承载能力. 随轴向应力增加,排间次生剪切裂纹搭接左边和中间两条主裂纹. 前期的破坏模式为翼型拉裂纹和排间次生剪切裂纹的破坏模式. 图5(对应图4中B点)给出了破坏前期的破坏情况. 但右边一排预制裂隙的岩桥则保存较好,试件仍具较大残余强度.

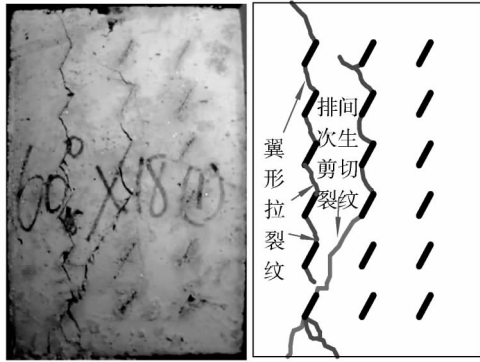


图5 裂隙类岩石材料破坏前期

Fig. 5 The phphase failure of rock like material with crack

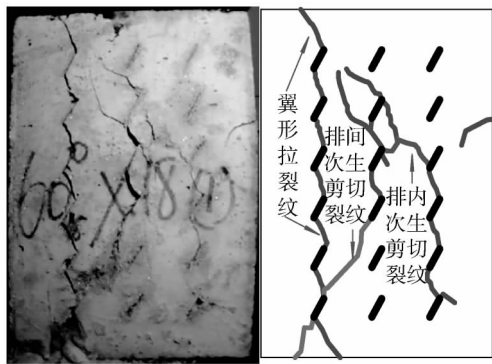


图6 裂隙类岩石材料破坏中期

Fig. 6 The middle failure of rock like material with crack

破坏中期(图4中CD段),这是应力跌落第二阶段,应力值由C点的13.05 MPa下降到6.88 MPa,岩桥大面积破坏,试件残余强度迅速下降,由于轴向应力不断增加,中间一排预制裂隙通过剪切作用向右边一排预制裂纹扩展,形成排内次生剪切裂纹. 翼型拉裂纹沿右边一排预制裂纹向下劈裂. 图6(对应图4中D点)显示了破坏中期的破坏情况. 此时,裂纹未能完全贯通试件右下角.

破坏后期(图4中EF段),轴向应力由E点的7.86 MPa下降至0.46 MPa,试样完全破坏. 在这一阶段,由右下角预制裂纹尖端发育次生倾斜裂纹,翼型拉裂纹沿着右边一排预制裂纹贯通了左下角. 同时,通过排间次生剪切裂纹贯通的左下角,发现其破坏横断面压痕严重,并出现明显的摩擦碎屑(图8),表明排间次生剪切裂纹的出现时主要通过剪切力的作

用. 图7(对应于图4中的F点)为试样最终破坏情况,试样的最终破坏模式为翼形拉裂纹、排间次生剪切裂纹和排内次生剪切裂纹相结合的贯通模式. 并且,整个破坏过程以拉破坏为主,剪切破坏为辅的裂纹扩展模式.

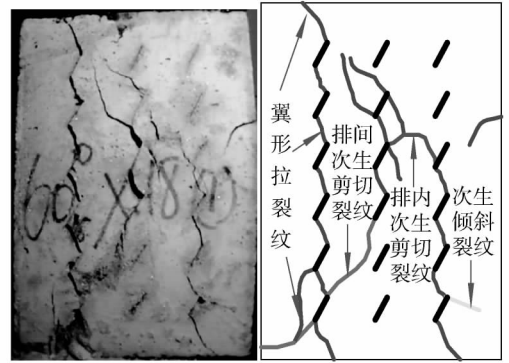


图7 裂隙类岩石材料破坏后期

Fig. 7 The late failure of rock like material with crack



图8 左下角破坏断面图

Fig. 8 The failure sectional drawing of lower left corner

## 2 数值模拟实验

### 2.1 模型建立及实现过程

为进一步验证  $60^\circ \times 18$  条裂隙类岩石材料在单轴压缩条件下,裂隙的起裂、扩展、贯通过程,进行了相应数值模拟实验. 数值模拟实验采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件,由室内实验在加载过程中所获得的轴向应力-轴向位移曲线(图4)可知:材料在变形过程出现了由弹性到塑性的变化过程,针对试样此种特性,选取 FLAC<sup>3D</sup> 中硬化模型<sup>[19]</sup>,模型的各项参数如表1.

表1 数值模拟实验模型参数

Tab. 1 The parameters of numerical simulation model

密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	内聚力 /MPa	抗拉强 度/MPa	剪切角 /(°)	内摩擦 角/(°)
2 500	200	100	3	1.5	15	45

通过在 ANSYS 中建立模型并划分网格,然后导入 FLAC<sup>3D</sup>,得模型如图9. 模型的尺寸为 28 cm ×

18.5 cm × 4 cm, 共产生了 261 887 个单元体和 49 076 个节点.

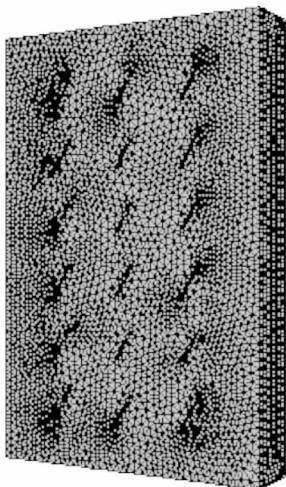


图 9 数值模拟实验模型

Fig. 9 The model of numerical simulation

数值模拟的加载方式与室内实验相同. 在加载过程中, 记录轴向应力 - 轴向位移曲线.

为显示裂纹的宏观扩展, 编制 FISH 语言删除模型在加载过程中出现的正拉破坏单元和正剪切破坏单元, 其中  $z\_state(zp, 0) = 1$  表示单元体处于正切破坏,  $z\_state(zp, 0) = 2$  表示单元体处于正拉破坏. 选取删除正拉破坏单元为例, 介绍删除破坏单元流程, 如图 10.

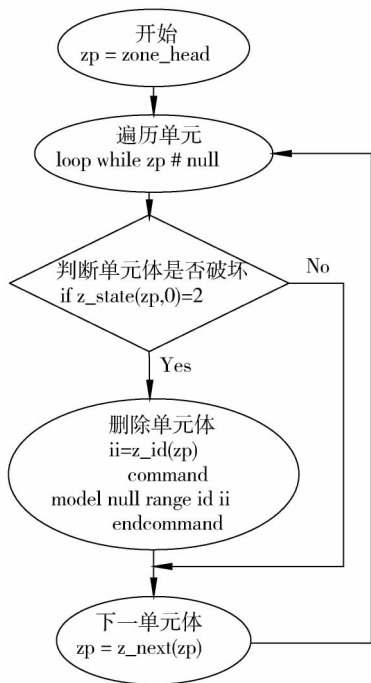


图 10 删除正拉破坏单元体的 FISH 语言流程图

Fig. 10 The flow chart of deleting tension failure unit body with FISH language

## 2.2 数值模拟实验结果分析

通过数值模拟计算可得轴向应力 - 轴向位移曲线(图 11), 选取数值模拟实验中 0 ~ 3 000 时步为研究对象.

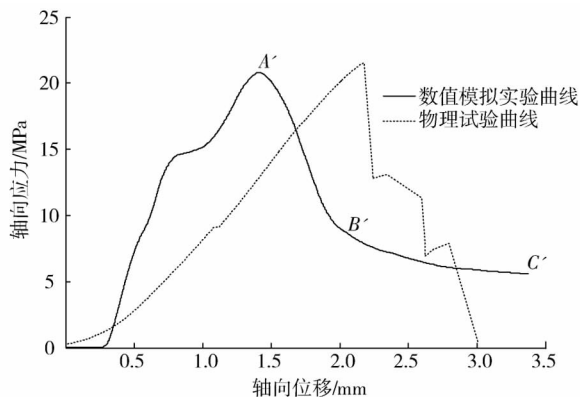


图 11 数值模拟实验的轴向位移 - 轴向应力曲线

Fig. 11 The axial displacement - axial stress curve of numerical simulation experiment

图 11 中数值模拟实验曲线和物理试验曲线存在一定差别, 其原因为: 物理试验中试样剪切破坏的岩桥仍可承受轴向应力, 因此出现了应力的回升现象, 而数值模拟实验则是将计算过程中出现的正拉破坏单元和正剪切破坏单元删除, 从而试样承载能力降低. 但两曲线都是经过峰值应力后, 应力整体呈现出下降趋势, 且最大应力峰值相差较小.

对图 11 中数值模拟实验曲线的 A' 点(应力峰值, 运行 1 252 步)、B' 点(运行 2 000 步)、C' (运行 3 000 步) 相应模型破坏情况进行分析. 将模拟结果分别导入 TECPLOT10.0 进行切片处理, 得到不同运行步数情况下试样破坏情况, 如图 12、图 13、图 14.

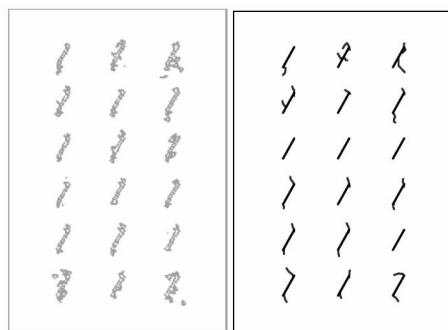


图 12 运行到 1 252 步时模型的破坏情况

Fig. 12 The failure situation when tiemstep is 1 252

在试样的轴向应力达到最大值时(图 11 中 A' 点), 试样预制裂隙尖端由于拉应力集中造成预制裂隙尖端出现细微拉伸破坏, 但岩桥尚未出现严重破坏, 试样具有较大的承载能力.

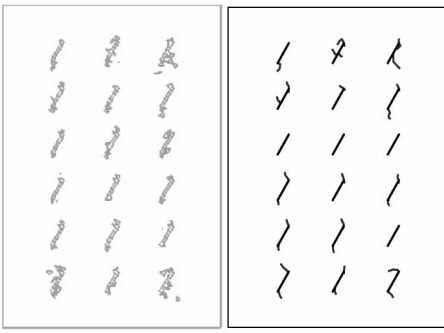


图 13 运行到 2 000 时步模型的破坏情况

Fig. 13 The failure situation when timestep is 2 000

模型运行到 2 000 步时(图 11 中 B' 点),通过拉伸作用,预制裂隙间产生竖向翼型拉裂纹,其主要的裂纹扩展模式表现为翼形拉裂纹扩展. 竖直方向预制裂隙间岩桥沿着竖向预制裂隙方向破坏,由于岩桥破坏,致使试样强度不断下降.

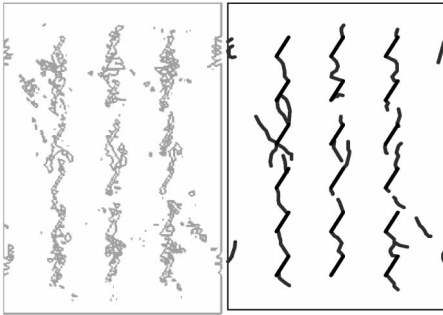


图 14 运行到 3 000 时步模型的破坏情况

Fig. 14 The failure situation when timestep is 3 000

计算运行到 3 000 步时(图 11 中 C' 点),竖直预制裂隙间岩桥大面积破坏,试样的残余强度维持在较低水平,但是轴向应力的存在,裂隙向试样边界扩展,即翼形拉裂纹扩展和次生倾斜裂纹扩展,最终试样的贯通模式为翼形拉裂纹和次生倾斜裂纹相结合的贯通模式.

数值模拟实验中,试样破坏的扩展模式表现为翼形拉裂纹和次生倾斜裂纹扩展,并且以翼形拉裂纹扩展模式为主,次生倾斜裂纹扩展模式为辅,这与物理试验吻合较好.

### 3 结论

1) 根据实验录像及相对应轴向应力-轴向位移曲线的 3 次应力跌落,将  $60^\circ \times 18$  条裂隙类岩石材料的裂纹扩展过程分为 3 个主要阶段:破坏前期、破坏中期、破坏后期.

2) 分析  $60^\circ \times 18$  条裂隙类岩石材料裂纹扩展 3 个阶段发现,裂纹的扩展大体趋势是从上往下,从左往右. 裂纹的起裂是拉应力集中于材料的左上端,从而形成翼形拉裂纹,翼形裂纹竖向扩展搭接预制裂

隙,左边一排预制裂隙间岩桥破坏. 中间一排的预制裂隙的扩展也是通过拉破坏实现预制裂隙的搭接,由于剪切的作用产生的排间次生剪切裂纹贯通试样. 排内次生剪切裂纹实现右边预制裂纹和中间预制裂纹搭接. 预制裂隙间岩桥的损坏及裂隙的贯通导致试样失效破坏. 并且,试样贯通模式主要表现为翼型拉裂纹.

3) 数值模拟试验研究表明:裂纹扩展过程中,形成以拉破坏为主、剪切破坏为辅的破坏方式,这与物理实验是相符的. 且试样最终贯通形式可知,试样大致呈现出左上角与右下角的贯通的破坏形式,通过图 6 与图 13 对比可知,室内实验和数值模拟实验在试样的破坏形式上具有一定的相似性. 数值模拟实验与物理试验在破坏方式和破坏形式吻合较好.

### 参考文献:

- [1] 蔡美峰,何满朝,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.  
Cai M F, He M C, Liu D Y. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press,2002.
- [2] 张宁,张平,陈蕴生. 裂隙岩体实验研究进展与思考[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 西安:中国科学技术出版社,2002.  
Zhang N, Zhang P, Chen Y S. Study development and thinking for experiment of crack body[C]// The seventh academic congress symposium of Chinese society for rock mechanics and engineering in China. Xi'an: Science and Technology of China Press, 2002.
- [3] Griffith A A. The theory of rupture [C]// First international congress for applied mechanics. Delft: Delft University Press, 1924.
- [4] Brace W F, Bombalakis E G. A note on brittle crack growth in compression [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(12): 3709-3713.
- [5] Kranz R L. Crack growth and development during creep of barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1979, 16(1): 23-35.
- [6] 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.
- [7] Bobet A. The initiation of secondary cracks in compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 66(2): 187-219.
- [8] Wong R H C, Chau K T. Crack coalescence in rock-like material containing two cracks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147-164.
- [9] Sagong M, Bobet A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 229-241.

- [10] 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): 818 – 829.
- [11] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010.  
Li S Y, He T M, Yin X C. Introduction of rock fracture mechanics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [12] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展实验及破坏机制 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1050 – 1059.  
Zhao Y L, Wan W, Wang W J, et al. Compressive – shear rheological fracture of rock – like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1050 – 1059.
- [13] 车法星, 黎立云, 刘大安. 类岩石材料多裂纹体断裂破坏试验及有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 808 – 816.  
Che F X, Li L Y, Liu D A. Fracture experiments and finite element analysis for multi cracks body of rock like material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 808 – 816.
- [14] 黎立云, 刘大安, 史孝群, 等. 多裂纹类岩石体的双压实验与正交各向异性本构关系 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 165 – 170.  
Li L Y, Liu D A, Shi X Q, et al. Biaxial compression experiments and orthotropic constitutive relationship for regular cracks in replicated rock mass [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 165 – 170.
- [15] 黎立云, 车法星, 卢晋福, 等. 单压下类岩石材料有序多裂纹体的宏观力学性能 [J]. 北京科技大学学报, 2001, 23 (3): 199 – 203.  
Li L Y, Che F X, Lu J F, et al. Macro – mechanical properties of regular cracks body in rock – like material under uniaxial compression [J]. Journal of University of Science and Technology in Beijing, 2001, 23 (3): 199 – 203.
- [16] 王庚荪, 袁建新, 吴玉山. 多裂纹材料的单轴压缩破坏机制与强度 [J]. 岩土力学, 1992, 13(4): 1 – 13.  
Wang G S, Yuan J X, Wu Y S. The mechanism and strength of multi cracks material under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13 (4): 1 – 13.
- [17] 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.  
Pu C Z, Cao P, Zhao Y L, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock – like material with multi – fissures under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661 – 3666.
- [18] 黄明利, 冯夏庭, 王水林. 多裂纹在不同岩石介质中的扩展贯通机制分析 [J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 142 – 146.  
Huang M L, Feng X T, Wang S L. Numerical simulation of propagation and coalescence processes of multi – crack in different rock media [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 142 – 146.
- [19] 彭文斌. FLAC<sup>3D</sup> 实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
Pen W B. Practical teaching approaches of FLAC<sup>3D</sup> [M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 2011.

## Experimental study on rock like material with crack under uniaxial compression

ZHENG Wen – xiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan – lin<sup>3,4</sup>, WANG Min<sup>3,4</sup>

(1. College of Mining Technology of TaiYuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Inner Mongolia University of Science and Technology School of Coal Science and Engineering, Baotou 014010, China;

3. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. Hunan Province Key Laboratory of Safety Mining Techniques, Technology of Coal Mine, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the mechanisms and crack's extension law of rock like material with multi – crack under uniaxial compression, by the means of pre – burying iron sheet, the rock like material specimen with different crack stripes and angle were obtained; By using the RYL – 600 shear rheometer, the specimen were loaded by the way of load control, and the process of crack initiation, extension and transfixion were recorded. The experimental results of specimen with 60° × 18 stripes were analyzed in detail, the curve of axial stress – axial displacement shows that it presents three obvious stress drop stages, combined with the video of experiment process, which are divided into three stages. Moreover, the numerical simulation for specimen with 60° × 18 stripes was conducted by using FLAC<sup>3D</sup>, the curve of axial stress – axial displacement and the section of failure model were obtained, the failure mode of numerical simulation experiment was analyzed, compared with the results of physic experiment, it suggested that two results agree well with each other.

**Key words:** rock like material; crack extension; experimental study; fracture mechanics; uniaxial compression; numerical simulation