

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230336

交叉多裂隙岩体单轴压缩颗粒流数值模拟研究

舒 杨¹, 孙少锐², 宋 章¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为研究交叉多裂隙岩体在单轴压缩试验中的破坏模式、裂纹扩展特征、强度特性等力学相应特征, 利用颗粒流程序模拟了交叉多裂隙岩体在单轴压缩试验中的力学特征, 分析了交叉裂隙夹角对多裂隙试样在单轴压缩过程中的强度特性、破坏模式、微裂纹发育及演化规律的影响。结果表明, 交叉多裂隙试样破坏强度随裂隙夹角的增大表现出缓底“U”型的特性; 交叉多裂隙试样破坏模式以拉剪破坏为主, 部分试样中为剪切破坏; 交叉多裂隙试样破坏过程首先是裂隙内尖端之间产生裂纹并交汇贯通, 随后在裂隙外尖端产生裂纹并平行于加载方向向上下两侧传递至岩体两端, 最终致使岩体发生宏观破坏。研究成果有助于理解交叉多裂隙岩体在压缩破坏中的力学机制, 是对交叉多裂隙岩体力学性质研究的补充。

关键词: 岩体; 交叉多裂隙; 单轴压缩; 宏观观特征; 颗粒流

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0156-04

1 引言

岩体由于原生及构造作用的影响, 内部分布着众多的细微节理裂隙, 这些节理裂隙等细微损伤结构对岩体的强度特性及破坏模式影响严重。裂隙岩体在外部荷载及应力释放作用下, 裂纹的起裂、延展及贯通破坏机理一直是研究重点。目前主要采用类岩体材料进行预制裂隙、数值模拟、理论推导的方式研究含 1、2 条的裂隙。在类岩体材料进行预制裂隙方面, 张波等^[1]通过在预制单裂隙类岩石试件中填充树脂薄片, 进行含充填单裂隙试件的单轴压缩试验, 发现充填裂隙试件的总应变释放率降低, 充填试件损伤程度小于无充填试件; 付金伟等^[2-3]采用新材料配置类岩石试样, 并在其中预制三维裂隙, 发现三维裂隙的裂纹扩展以包裹式翼裂纹和花瓣形裂纹为试件主要裂纹形式; WONG R H C 等^[4-5]利用石膏制作含三条裂隙的试样, 试验结果表明单轴条件下试样破坏是其中两条裂隙产生的支裂纹的贯通所引起的。在数值模拟方面, REYES O 等^[6]研究了两条裂隙试样的裂纹发育、贯通情况, 证实了数值试验的可行性与正确性; 蒋明镜等^[7]对单裂隙试样进行单轴压缩模拟试验, 发现裂隙倾角为 30°时, 试样最容易起裂; 裂隙倾角为 75°时, 试样最难起

裂。在理论研究方面, 李术才等^[8]用突变理论建立了压剪应力状态下加锚节理面的分支裂纹扩展的突变模型; 孙宗颀^[9]根据裂纹尖端的最大无因次剪应力和拉应力强度因子来判断断裂类型是 I 型还是 II 型。目前对单、双裂隙研究成果较多, 而在多裂隙方面尤其是交叉多裂隙方面研究涉及较少, 主要是一方面室内试验在交叉多裂隙制样方面难度较大, 其次是由于裂隙较多, 在裂隙间相互作用的理论研究方面问题较多。自然条件下, 由于构造应力及应力释放的影响, 节理裂隙往往出现相互交叉与穿切的情况。因此, 本文利用颗粒流数值软件 PFC(Particle Flow Code, v3.1 版本)对含交叉多裂隙试样进行单轴压缩试验研究, 重点分析加载过程中应力—应变曲线形态、峰值强度的变化规律、裂隙之间的相互作用及裂纹的产生、发展过程及最终的破坏形式, 从宏观、细观角度阐述了多裂隙岩体压缩过程中微裂纹的发育和扩展规律。

2 交叉多裂隙岩体数值模型建立

在交叉多裂隙岩体单轴压缩数值模型试验尺寸为 54 mm×108 mm(宽×高)的二维模型中预制 8 条相互交叉裂隙, 数值模型通过设置相邻交叉裂隙水平中心点距离 $d = \text{试验宽度}/2 = 27$

收稿日期: 2023-03-07, 修回日期: 2023-04-10

作者简介: 舒杨(1990-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为岩体结构, E-mail: 282818073@qq.com

mm, 设置相邻交叉裂隙垂直中心点距离 $b =$ 试验高度 $/2 = 54$ mm, 设置所有裂隙长度为 20 mm, 通过改变两交叉裂隙间夹角 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 来探究不同夹角对交叉多裂隙力学行为的影响, 需要说明的是, 当 $\alpha = 0^\circ, 180^\circ$ 时两交叉裂隙重合为 1 条裂隙, 这使模型试样内仅含 4 条裂隙, 多裂隙岩体单轴压缩试验模型见图 1。图 1 中, $L_1 \sim L_8$ 为 8 条裂隙编号。由于本文仅考虑不同排列方式对试样强度及破坏模式的影响, 因此在模拟过程中设置竖向压力为 1 MPa。颗粒间黏结模型采用平行黏结模型, 颗粒间接触黏结参数见文献[10], 该参数所表征的宏观岩石试样为取自锦屏水电站的深埋大理岩试样。制备得到交叉多裂隙数值试验模型见图 2。

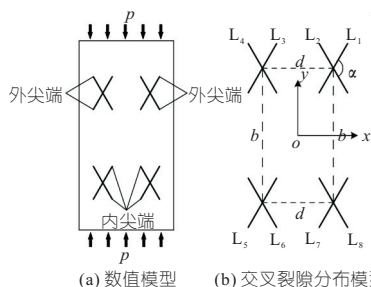


图 1 交叉多裂隙岩体单轴压缩试验模型

Fig. 1 Uniaxial compression test model for intersecting multi fracture rock mass



图 2 交叉多裂隙岩体单轴压缩 PFC 数值模型 ($\alpha = 90^\circ$)
Fig. 2 PFC2D numerical model for uniaxial compression of intersecting multi fractured rock masses ($\alpha = 90^\circ$)

3 交叉多裂隙岩体单轴压缩颗粒流数值模拟

3.1 交叉多裂隙岩体应力—应变曲线特征

图 3、4 为不同裂隙夹角交叉多裂隙岩体应

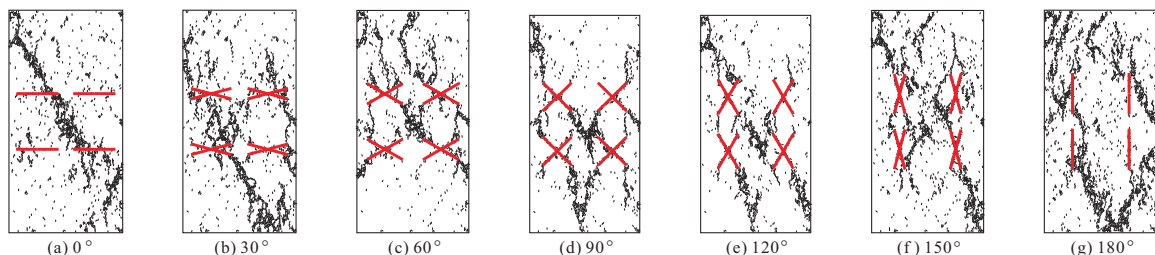


图 5 不同裂隙夹角交叉多裂隙岩体微裂纹分布

Fig. 5 Distribution map of microcracks in multi fractured rock masses with different intersecting angles of cracks

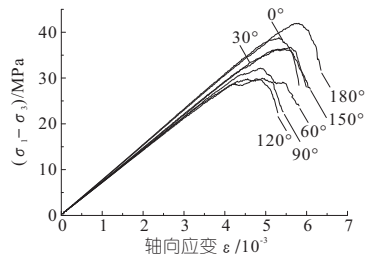


图 3 交叉多裂隙岩体应力—应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of intersecting multi fractured rock mass

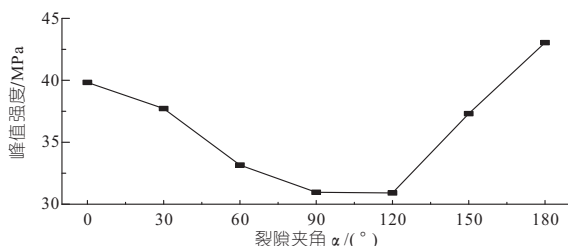


图 4 裂隙夹角 α 对交叉多裂隙岩体峰值强度影响曲线
Fig. 4 Influence curve of crack angle on peak strength of intersecting multi fractured rock mass

力—应变关系曲线及裂隙夹角 α 对多裂隙岩体峰值强度影响曲线。由图 3、4 可知: ①在加载初期较小轴向应变条件下, 各模型试样的应力—应变曲线重合性较好, 表明在该段时间内排列方式对试样无影响, 此后随着加载的继续, 各应力—应变曲线逐渐脱离发展, 且试样峰值强度越大, 应力—应变曲线在峰前直线段越陡峭, 其弹性模量也相应越大; ②随裂隙夹角的变化, 峰值强度具有明显的非线性变化特征, 整体上呈先减小后增大的趋势, 基本呈缓底“U”型变化。裂隙夹角由 0° 向 120° 变化过程中, 峰值强度从 39.83 MPa 降至 30.91 MPa, 且在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 间降幅最为剧烈, 在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 间降幅最小, 仅从 30.93 MPa 降至 30.91 MPa。裂隙夹角由 120° 向 180° 变化过程中, 峰值强度呈陡增的趋势, 即从 30.91 MPa 到 37.31 MPa, 再到 43.04 MPa。

3.2 交叉多裂隙岩体微裂纹分布特征

图 5 为不同排列方式下加载终止时试样内部微裂纹分布。由图 5 可看出, 裂隙夹角对试样内微裂纹分布影响严重, 这也直接导致破坏形式具

有明显的差异性:① 0° 夹角时,4条裂隙水平排列, L_1/L_2 、 L_5/L_6 两组裂隙对试样无影响,无贯通裂纹在其周围产生,试样为沿着 L_3/L_4 裂隙内尖端与 L_7/L_8 裂隙内尖端到中部贯通形成的宏观剪切裂纹,致使试样为宏观剪切破坏;②裂隙夹角为 30° 时,主裂纹迹线为 L_3 、 L_4 裂隙外尖端的剪切裂纹与 L_5 、 L_6 裂隙内尖端向上扩展至 L_3 、 L_4 裂隙交叉点,向下扩展至底端面的剪切裂纹,这3条裂纹形成试样的剪切破坏。此外 L_1 、 L_2 、 L_7 、 L_8 这四条裂隙的外尖端也有连通剪切裂纹产生,致使试样在该处发生局部剪切破坏。③裂隙夹角为 60° 时,试样上半部分较为破坏,微裂纹较多。 L_1 、 L_4 内尖端与 L_2 、 L_3 内尖端均有沿加载方向扩展的拉伸型裂纹, L_1 、 L_8 内尖端, L_2 、 L_7 外尖端和 L_3 、 L_6 外尖端均有裂纹连接, L_4 、 L_8 两裂隙内尖端间有剪切裂纹贯通,且微裂纹还较密集,表明此部分较破碎。这些贯通裂纹的形成,使试样为拉剪破坏;④裂隙夹角 90° 、 120° 时具有大致相同的微裂纹分布,主裂纹为 L_4 、 L_7 内尖端的剪切裂纹与 L_4 、 L_8 内尖端的次生共面裂纹和预制裂隙共同组成的宏观剪切裂纹面,裂隙 L_6 、 L_7 内尖端的两条拉伸裂纹径直扩展交汇至底端面。剪切裂纹与拉伸裂纹二者共同构成试样的拉剪破坏;⑤裂隙夹角为 150° 时,主要以 L_1 内尖端、 L_2 外尖端、 L_8 内外尖端4部分形成的拉伸裂纹、剪切裂纹和 L_4 内外尖端、 L_5 内尖端、 L_6 内尖端4部分的拉伸裂纹、剪切裂纹为主,形成试样的拉剪破坏,该情况下对角内尖端(L_1 和 L_5 、 L_4 和 L_8 内尖端)间无连接裂纹形成;⑥裂隙夹角为 180° 时,4条裂隙垂直排列,试样为各裂隙内、外尖端形成的剪切裂纹的贯通破坏。

3.3 交叉多裂隙岩体微裂纹扩展特征

为了分析交叉多裂隙加载过程中的裂纹扩展、演化及交叉裂隙间裂纹连接规律,以裂隙夹角 $\alpha=90^\circ$ 为例,在裂隙夹角 $\alpha=90^\circ$ 应力、微裂纹数目—应变曲线(图6)上布设 a 、 b 、 c 、 d 、 e 共5个监

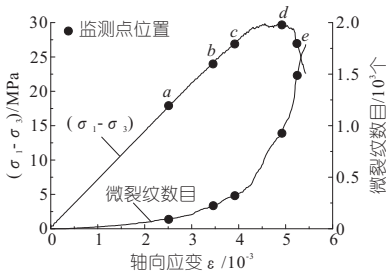


图6 裂隙夹角 $\alpha=90^\circ$ 交叉多裂隙岩体应力、微裂纹数目—应变曲线

Fig. 6 Microcracks and strain curves of $\alpha=90^\circ$

测点,其中 a 、 b 、 c 点为峰前点,对应轴向应力分别为 $0.6\sigma_1$ 、 $0.8\sigma_1$ 、 $0.9\sigma_1$; d 点为峰值强度点、 e 点为峰后点,对应轴向应力均为 $0.9\sigma_1$ 。图7为该试样破坏过程中微裂纹发育特征。

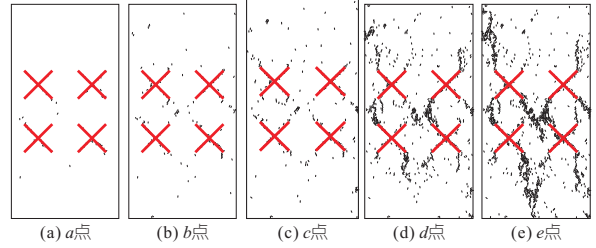


图7 裂隙夹角 $\alpha=90^\circ$ 交叉多裂隙岩体破坏过程中微裂纹发育状态

Fig. 7 Development status of microcracks of $\alpha=90^\circ$

由图6、7可知:①从加载开始至观测点 a 处,试样内部产生微裂纹较少,仅为93个,但大多集中在预制裂隙周围,主要是由于充填材料强度低于岩体强度,初期加载时使裂隙闭合,且裂隙周围(尤其是裂隙两端部)应力明显高于其余部位,造成颗粒破坏;②当轴向应力达到 $0.8\sigma_1$ 时,即观测点 b ,已能观测到大部分预制裂隙内外尖端有微裂纹产生,表明宏观上在裂隙两端部可能已有裂纹起裂;③当轴向应力达 $0.9\sigma_1$ 时,即观测点 c ,与 b 处相比 c 处微裂纹扩展无明显变化,但裂隙周围裂纹明显加密,微裂纹个数也从 b 处的211个增至 c 处的325个;④在峰值强度点,即观测点 d ,微裂纹产生了明显的扩展,且裂纹产生速率较 c 点明显加快,微裂纹数量陡升至935个。此状态下 L_1 、 L_4 、 L_8 外尖端和 L_6 内尖端均产生拉伸型裂纹, L_3 、 L_6 裂隙外尖端和 L_1 、 L_8 裂隙内尖端间已产生贯通裂纹;⑤随着加载继续,试样进入峰后阶段,并达到观测点 e 。此时, L_1 、 L_4 、 L_8 外尖端和 L_6 内尖端产生的拉伸型裂纹扩展迅速,且 L_4 外尖端、 L_6 内尖端均率先分别扩展至顶底端面, L_3 、 L_6 裂隙和 L_1 、 L_8 裂隙间裂纹密集程度进一步增强, L_2 外尖端、 L_4 内尖端均产生次生共面裂纹,造成试样中心部区域较为破碎。

各裂隙内外尖端萌发、扩展的拉伸裂纹和次生共面裂纹形成试样的宏观拉剪破坏。

4 结论

a. 对于含有8条相互交叉的多裂隙试样而言,破坏强度随裂隙夹角的增大呈先减小后增大的变化趋势,整体上呈缓底“U”型。

b. 各排列形式下交叉多裂隙试样破坏模式以拉剪破坏为主,在部分试样中为剪切破坏。

c. 交叉多裂隙岩体的裂纹发育及扩展特征就

是裂隙内尖端之间先产生裂纹并交汇贯通,随后裂隙外尖端产生裂纹并平行于加载方向向两侧传递至上下两侧,致使最终岩体发生宏观破坏。

参考文献:

- [1] 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试验及断裂损伤研究[J].岩土力学,2012,33(6):1647-1652.
- [2] 付金伟,朱维申,曹冠华,等.岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(3):411-417.
- [3] 孙熙震,李杨杨,江宁,等.类岩石材料三维裂纹传播规律试验研究[J].岩土力学,2016,37(4):965-972,980.
- [4] 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 & geomechanics abstracts, 2001,38(7):909-924.
- [5] 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.
- [6] REYES O, EINSTEIN H H. Failure mechanisms of fractured rock-a fracture coalescence model[C]// Paper presented at the 7th ISRM congress. Germany: Aachen,1991.
- [7] 蒋明镜,陈贺,张宁,等.含双裂隙岩石裂纹演化机理的离散元数值分析[J].岩土力学,2014,35(11): 3259-3268,3288.
- [8] 李术才,陈卫忠,朱维申,等.加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1661-1666.
- [9] 孙宗顺.如何判断在各种加载下的断裂模式: I 型还是 II 型[J].三峡大学学报(自然科学版),2004,26(1):27-30.
- [10] 余华中,阮怀宁,褚卫江.岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1482-1490.

Numerical Simulation of Uniaxial Compressive of Crossing Multi-fractured Rock Mass Based on Particle Flow Code

SHU Yang¹, SUN Shao-rui², SONG Zhang¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the mechanical characteristics such as fracture mode, crack propagation characteristics, and strength characteristics of intersecting multi-fractured rock masses in uniaxial compression tests, the particle flow program was used to simulate the mechanical characteristics of intersecting multi-fractured rock masses in uniaxial compression tests. The impact of the angle between intersecting cracks on the strength characteristics, failure mode, microcrack development and evolution law of multi-fractured samples during uniaxial compression was analyzed. The experimental results show that the failure strength of the cross multi-crack specimen exhibits a slow bottom "U" shaped characteristic with the increase of crack angle; The failure mode of intersecting multi-crack specimens is mainly tensile shear failure, with some specimens exhibiting shear failure; The failure process of intersecting multi-crack specimens first involves the generation and intersection of cracks between the tips inside the cracks, followed by the generation of cracks at the outer tips of the cracks and their transmission parallel to the loading direction to both ends of the rock mass, ultimately leading to macroscopic failure of the rock mass. The results of this study contribute to the understanding of the mechanical mechanism of cross fissured rock masses in compression failure, and are a supplement to the research on the mechanical properties of cross fissured rock masses.

Key words: rock mass; crossing multi-fractured; uniaxial compressive; macro and micro characteristics; particle flow code

(上接第 185 页)

Instantaneous Whirling Feature Extraction and Stability Assessment of Hydropower Unit Shaft Vibration

JI Lian-tao¹, WANG Pu², JING Xiu-yan², LI Ze², HE Hong-xiang³, LI Chao-shun³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To effectively judge the vibrational stationary state of hydropower units, the whirling characteristics of the rotor vibration and the evaluation method of stability of shaft vibration were studied. The theoretical expression of instantaneous whirling velocity was derived, and the characteristic parameters of whirling velocity were analyzed. A holographic whirling velocity analysis method for shaft vibration was proposed. The whirling characteristics indicators and vibration stability evaluation index of shaft vibration were established. Finally, the theory of this paper was applied to the shaft vibration data analysis of Zhejiang Xianju pumped storage power station. The key characteristic indicators of vibration were extracted and the shafting stationary was evaluated. The results show that the established characteristic indicators have good performance in evaluating the stationary of shaft vibration, and have broad application prospects for the monitoring and performance evaluation of actual hydropower units.

Key words: hydroelectric units; feature extraction; whirling velocity; holo-whirling; vibration stationary