

文章编号:1673-0062(2018)02-0037-06

动静荷载下类节理岩体裂纹扩展特性研究

孙冰¹, 罗瑜¹, 谢杰辉¹, 曾晟²

(1.南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:为了研究节理岩体在动静荷载下的裂纹扩展特性,采用室内试验和颗粒离散元程序 PFC^{2D} 5.0 对类节理岩体在动静荷载下的破坏形态进行研究.对比分析不同荷载下节理倾角对破坏形态的影响.结果表明,节理倾角等于 45°时为翼裂纹与次生裂纹转变的临界角度值;当倾角小于 45°时,新生裂纹主要为翼裂纹,裂纹起裂与岩体破坏主要受张拉应力控制;当倾角大于 45°时,新生裂纹主要为次生裂纹.裂纹起裂与岩体破坏主要受剪切应力控制.在冲击荷载下,单节理岩体与双节理岩体的破坏形态类似,都为张拉破坏,主要裂纹形式为翼裂纹.

关键词:岩石力学;组合节理;裂纹扩展;数值模拟

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A

Crack Propagation Characteristics of Jointed Rock Mass Under Static and Dynamic Loads

SUN Bing¹, LUO Yu¹, XIE Jie-hui¹, ZENG Sheng²

(1.School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.School of Nuclear Resources Engineering, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to study the crack propagation characteristics of jointed rock mass under static and dynamic loads, the failure modes of jointed rock mass under dynamic and static loads were studied by laboratory tests and particle discrete element program PFC^{2D} 5.0. The influence of joint inclination angle on failure mode under different loads was analyzed. The results show that the critical angle of the transition between the wing crack and the secondary crack is equal to 45. When the dip angle is less than 45, the new crack is mainly wing crack, crack initiation and rock mass damage are mainly controlled by tensile stress; When

收稿日期:2018-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51204098);湖南省自然科学基金项目(2018JJ2331);湖南省科技厅重点研发计划项目(2015SK20584);湖南省研究生科研创新项目(CX2017B532)

作者简介:孙冰(1979-),女,教授,博士,主要从事岩石力学与工程检测等方面的研究.E-mail:sunbingnh@126.com

the dip angle is greater than 45, the primary crack is secondary crack. Crack initiation and rock mass failure are mainly controlled by shear stress. Under impact load, the failure modes of single jointed rock mass and double jointed rock mass are similar, they are tensile failure, and the main crack forms are wing cracks.

key words: rock mechanics; combined joint; crack propagation; numerical simulation

0 引言

自然界中的岩体存在着节理、裂隙、孔隙等复杂不连续面,在外荷载作用下这些不连续面的边界或尖端将首先产生裂纹并扩展贯通,最终引起岩体的失稳破坏。随着我国各类隧道工程、地下空间工程、水利水电工程的大量建设,各类与岩体失稳破坏相关的工程事故频频发生,严重威胁着工程人员的生命财产安全。因此,研究含裂隙岩体在受载情况下的裂纹扩展规律对预防和减少工程灾害事故有重要意义。

目前对于含裂隙岩体裂纹扩展规律及破坏形态研究的主要手段有室内试验、数值模拟和现场检测三种。其中室内试验是主要研究手段,但室内试验无法从细观角度研究节理岩体的力学特性和破坏机制。而数值模拟通过建立模型,改变受力状态从而较为全面的研究节理的力学特性,能够克服室内试验节理几何特征多样性、不可重复性和成本高等难点。室内试验方面,赵程等^[1-2]采用数字图像技术对含单裂隙的类岩石材料变形破坏特性进行试验与数值模拟研究,发现 45° 节理倾角为张拉裂纹与剪切裂纹相互转变的临界值。L.N.Y Wong 等^[3-5]对含缺陷的岩石及相似材料进行试验,研究了裂纹的类型与扩展模式。肖桃李等^[6-7]研究了三轴应力下单节理与双节理岩体的破坏形态并分析了影响破坏形态的主要因素。刘刚^[8]研究了多节理岩体裂纹特征、贯通模式、破坏模式、应力应变特征等与节理倾角之间的关系,并将多节理岩体的破坏模式归纳平面破坏、块体转动式破坏和台阶式破坏三种类型。数值模拟方面,有学者^[9-10]采用室内试验与数值模拟研究结合的方法,分析了含缺陷岩体的裂纹扩展规律。Xia 等^[11]采用颗粒流数值模拟方法研究了不同加载方式对岩石变形破坏的影响。杨圣奇、黄彦华等^[12-13]对双裂隙岩石进行了数值模拟研究,分析了裂隙长度、岩桥长度、岩桥倾角与岩样抗拉强度、裂纹扩展特性之间的关系。李传明、刘万荣等^[14-15]采用颗粒离散元程序分析了巷道围岩节理连通率对破坏形态的影响和不同岩性岩体的声发射特征。夏才初、宋

英龙、王德勇等^[16-18]采用颗粒离散元程序分析了节理岩体的剪切作用强度和力学行为。

目前在单节理岩体强度特征和裂纹扩展规律方面已经取得了很多有意义的成果,但对于含有不同倾角节理组合的岩体在动静不同荷载下的裂纹扩展规律研究较少。为此,本文采用颗粒离散元程序 PFC^{2D}5.0 (particle flow code, PFC) 对含单条和两条不同倾角节理组合的类岩体模型在静载和冲击荷载下的破坏形态进行了模拟,并对比分析两种不同荷载下类节理岩体的强度特征和节理倾角对破坏形态的影响,从而给岩土工程的安全稳定性评估提供一定的参考。

1 不同节理倾角岩体试验

采用强度为 M25 的水泥砂浆制作边长为 150 mm 的立方体类岩石试件,用厚度为 1 mm 的钢片预制贯通节理。单节理试件节理长度为 50 mm,节理倾角 α 为 45° 和 60°;双节理试件竖向节理长度为 50 mm,斜节理长度为 30 mm,节理倾角 β 为 75°。每种类型的试件制作 3 个,试件几何参数及加载方式如图 1 所示。标准养护条件下养护 28 d 后进行静载与冲击加载试验,静载使用 WAW-1000C 电液伺服加载系统,加载速率为 5 kN/min,冲击加载使用 XJL-98 落锤式冲击试验系统,落锤重 5 kg,下落高度为 2 000 mm。静载下测得试件物理力学参数见表 1。

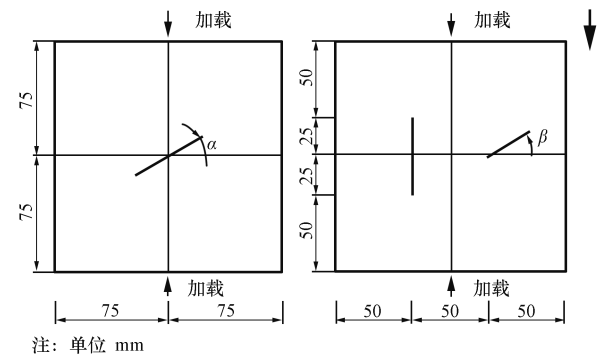


图 1 模型几何参数

Fig.1 Geometry parameters of model

表 1 类岩石材料物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of rock-like material

节理类型	节理倾角 /°	峰值应力 /MPa	峰值应变	初始弹性模量/GPa
单节理	45°	27.5	1.85×10^{-2}	1.25
	60°	27.0	2.00×10^{-2}	2.00
双节理	75°	24.0	2.00×10^{-2}	1.00

对试件进行静载和冲击加载破坏试验,所得破坏形态图片经二值化处理后如图 2 所示.静载下节理尖端及附近新生裂纹的类型主要有三类,翼裂纹、次生共面裂纹和次生倾斜裂纹.翼裂纹为张拉裂纹,通常起裂于节理尖端或附近且迅速向最大主应力方向扩展;次生共面裂纹是剪切裂纹,起裂于节理尖端并沿与节理共面的方向扩展;次生倾斜裂纹为剪切裂纹,起裂后沿与节理垂直方向扩展^[19].由图 2 可知静载下节理倾角大于 45°的试件主要破坏模式为剪切破坏,但裂纹扩展模式不同.图 2(a)中,45°节理试件包含两条裂纹扩展路径,既有翼裂纹又有次生裂纹.试件图 2(c)与图 2(e)中节理尖端主要为次生共面裂纹,起裂后沿剪应力方向扩展,少数此生共面裂纹起裂后沿最大主应力方向扩展.动载下节理岩体的破坏模式类似,均为沿最大主应力方向扩展贯通的翼裂纹,试件破坏主要受张拉应力控制.

2 数值模拟研究

PFC 为颗粒流程序的一种,它以圆形(二维)或球形(三维)颗粒的集合来模拟试样,通过颗粒的运动及相互作用模拟材料的力学特性,颗粒半径可以按均匀分布或高斯分布,颗粒间接触的本构模型由刚度模型、滑动模型和黏结模型 3 部分组成.PFC 通过定义“墙”(wall)来确定模型边界,采用牛顿第二定律定义颗粒间的运动.可用于颗粒材料力学性能分析,如变形及本构关系、大变形问题和断裂问题等.本文建立二维数值模型,尺寸

为 150 mm×150 mm,分别在模型中建立单节理(节理长度为 50 mm,α 分别为 0°、45°、60°、90°)、双节理(竖向节理长度为 50 mm,斜节理长度为 30 mm,β 分别为 75°、90°),模型几何参数如图 1.

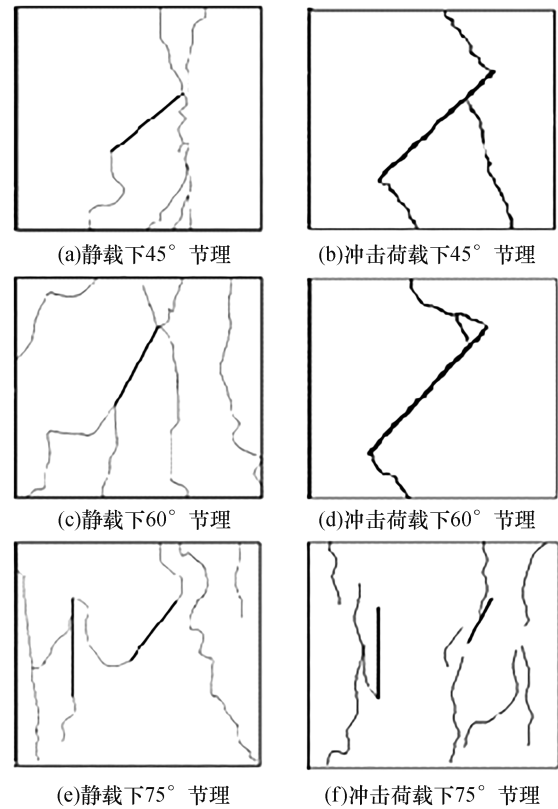


图 2 静载与冲击荷载下试件破坏形态
Fig.2 Failure formation of jointed specimens with static load and impact load

通过移动顶部“墙”单元(wall)来给模型施加荷载,静载速率为 0.01 mm/s.动载采用单个刚性圆盘单元模拟落锤,落锤质量为 5 kg,下落高度 2 000 mm.在模型内为了能较好地反映类岩石材料的力学特征,颗粒间的接触本构采用平行黏结模型.颗粒半径服从高斯分布.模型细观参数见表 2.

表 2 PFC^{2D}模拟细观参数
Table 2 Mesoscopic parameters simulated in PFC^{2D}

岩体参数	颗粒比重 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒半径 /mm	孔隙比	摩擦系数	切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行粘结法向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行粘结切向刚度 /($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
参数值	2 600	0.03~0.05	0.08	0.25	5×10^7	1×10^8	1×10^8	5×10^7

2.1 强度与破坏特征分析

1) 强度特征分析

对数值模型施加单轴静荷载,获得数值模型的应力峰值及应力峰值时刻的应变值见表3.表3中45°、60°、75°三个模型与其对应的室内试验参数基本吻合,说明该数值模型参数设置合理,能较好的反映出试件的物理力学性能.

表3 模型峰值应力及峰值应变

Table 3 Stress and strains peaks of model

节理类型	节理倾角 / (°)	峰值应力 / MPa	峰值应变
单节理	0	26.8	1.6×10^{-2}
	45	27.6	2.0×10^{-2}
	60	26.8	2.7×10^{-2}
	90	28.0	2.5×10^{-2}
双节理	75	24.8	1.7×10^{-2}
	90	30.0	1.9×10^{-2}

由表3可知,随着节理倾角的增大,单节理模型的峰值应力变化不大,变化幅度不超过5%.而峰值应变却随着节理倾角的增大而增大,如节理倾角45°比节理倾角0°试件峰值应变增大25%,节理倾角60°比节理倾角0°的试件峰值应变增大68.8%,节理倾角90°比节理倾角0°试件峰值应变增大56.3%.说明随着节理倾角的增大,岩体的塑性变形也逐渐增大.

2) 破坏形态分析

(1) 静荷载作用下破坏特征

本次模拟中,节理尖端也出现了上述三种裂纹,如图3所示.图中数字1表示翼裂纹、2表示次生共面裂纹、3表示次生倾斜裂纹.图3(a)中,翼裂纹为主要的裂纹形式.水平节理两侧相对运动趋势弱,节理尖端剪切裂纹发育程度低,次生倾斜裂纹3起裂后沿模型剪应力集中区扩展,裂纹萌生发育剧烈,但其作用范围有限.模型破坏主要受张拉应力控制.图3(b)中,翼裂纹与次生裂纹发育程度相近,但次生共面裂纹的扩展贯通导致了模型的最终破坏,说明模型受剪应力较大,模型既有剪切破坏又有张拉破坏,但剪切破坏为主.图3(c)中,翼裂纹与次生共面裂纹均有萌生扩展,翼裂纹发育程度不高、扩展距离短.次生共面裂纹2沿节理共面方向扩展直模型端部,直接导致了模型的最终破坏.这表明模型破坏主要受剪应力控制.

图3(d)中,竖直节理两侧产生大量竖向的细

小裂纹且有扩展贯通整个模型的趋势,节理上端翼型裂纹1扩展至模型上端,说明模型受张拉应力较大.竖直节理两侧产生大量细小裂纹有与节理下端次生裂纹连通的趋势,模型以拉伸破坏为主.通过以上分析可知,当节理倾角小于45°时,新生裂纹主要为翼裂纹,当倾角大于45°时,新生裂纹主要为次生裂纹,45°倾角为两种裂纹的转变角度.

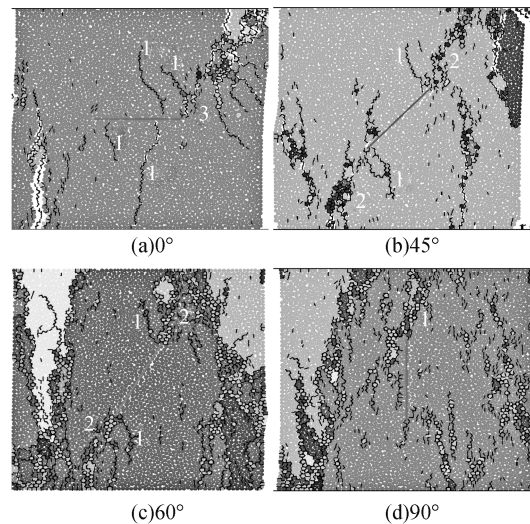


图3 静载下单节理模型破坏形态

Fig.3 Failure formation of single jointed model with static load

对于双节理模型,破坏模式则更加复杂.图4(a)中,翼形裂纹发育程度低,在节理两侧均产生了竖直贯通裂纹,说明模型两侧张拉应力较大,模型以拉伸破坏为主.图4(b)中,模型在外荷载下萌生了大量微裂纹但没有扩展连通,长节理左下角与短节理右上角为模型的剪应力集中区,损伤较大.模型以剪切破坏为主.以上分析表明:双节理模型的破坏形态复杂,破坏主要发生在节理外侧.

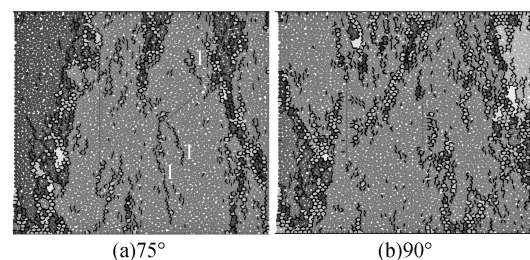


图4 静载下双节理模型破坏形态

Fig.4 Failure formation of double jointed model with static load

(2) 冲击荷载作用下破坏特征

冲击荷载下不同倾角节理模型破坏模式大体相同,裂纹集中在节理尖端且主要为翼裂纹.这是因为冲击过程中首先节理两侧产生相对滑动趋势,节理尖端产生应力集中,萌生裂纹.由于冲击荷载作用时间短、能量大,颗粒吸收能量后来不及传递到模型四周产生侧向膨胀就已经发生了破坏,产生沿最大主应力方向扩展的翼裂纹.

图 5(a)中,由冲击加载点开始形成两条翼形贯通裂纹,绕过节理尖端延伸直至模型底部,说明水平节理两侧相对滑动趋势弱,对冲击能量的传递有阻碍作用.图 5(b)、(c)和(d)中,模型只在节理尖端产生了翼裂纹,其他部位均无损伤.模型以拉伸破坏为主.以上分析表明:冲击荷载下单节理模型主要为拉伸破坏且翼裂纹为主要裂纹形式.

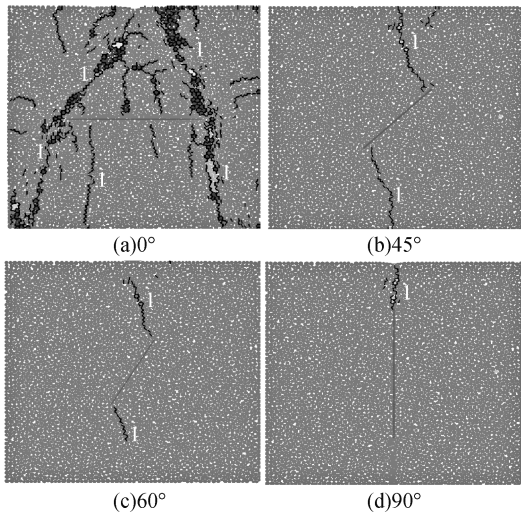


图 5 冲击荷载下单节理模型破坏形态
Fig.5 Failure formation of single jointed model with impact load

双节理模型在冲击荷载作用下的破坏特征与单节理相似程度高,模型的破坏模式主要为翼裂纹扩展贯通导致的张拉破坏.图 6(a)中短节理上下两端翼裂纹扩展贯通最终导致模型破坏.短节理上端次生共面裂纹 2 扩展至模型端部,说明模型的破坏也受到剪应力影响,但影响不大.图 6(b)中,节理两端产生两条翼裂纹 1,扩展至模型端部,模型以受拉破坏为主.以上分析说明:同单节理模型一样,两条节理模型在冲击荷载下的主要破坏模式为拉伸破坏.

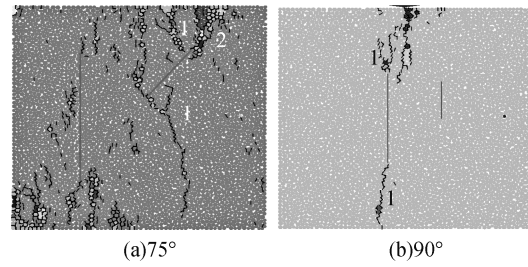


图 6 冲击荷载下双节理模型破坏形态
Fig.6 Failure formation of double jointed model with impact load

2.2 动静荷载对比分析

静荷载与冲击荷载下节理岩体的破坏形态各有差异,静荷载下加载速度较慢,模型能充分吸收能量传递至模型四周,模型内部应力重分布较均匀,各种裂纹形式均能较好发展,所以不同倾角节理模型会呈现出不同的破坏模式.而冲击荷载作用时间短、能量较集中,模型受冲击荷载后竖向急剧压缩,但横向变形来不及完成便已发生破坏,模型中部受到较大张拉应力.所以破坏均发生在模型中部,在节理两端产生翼型张拉裂纹.

2.3 试验与数值模拟对比分析

对比室内试验与数值模拟结果可知,在强度特征方面,数值模拟与室内试验结果较为吻合,说明数值模型参数设置合理,精度较高,能较好的反映出节理岩体的破坏情况.破坏形态方面,在静载下,当节理倾角小于 45° 时,节理岩体裂纹形式主要为翼裂纹,试件呈张拉破坏.当节理倾角等于 45° 时,试件既有翼裂纹又有次生裂纹,试件破坏即受张拉应力控制,又受剪切应力控制.当节理倾角大于 45° 时,主要裂纹形式为次生裂纹,试件呈剪切破坏.在冲击荷载下,节理岩体破坏情况类似,均为沿最大主应力方向扩展贯通的翼裂纹,试件呈张拉破坏.

3 结 论

1) 随着节理倾角的增大,单节理岩体的应力峰值变化不明显,变化幅度不超过 5%.但应力峰值时刻的应变逐渐增大,说明岩体的塑性变形随着节理倾角的增大而增大.

2) 静荷载下,对于单节理岩体,当节理倾角 $\alpha = 45^\circ$ 时,翼裂纹与次生裂纹均有萌生扩展且为 2 种裂纹类型转变的临界角度值;倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时,新生裂纹主要为翼裂纹,裂纹起裂和岩体破坏主要受张拉应力控制;当节理倾角 $\alpha > 45^\circ$ 时,新生裂纹

主要为次生裂纹,裂纹起裂和岩体破坏主要受剪切应力控制.对于双节理岩体,破坏形态则较为复杂,既有剪切破坏又有拉伸破坏.且破坏主要发生在两条节理的外侧.

3) 冲击荷载下,单节理岩体与双节理岩体的破坏形态类似.由于冲击荷载作用时间很短、能量集中,岩体来不及完成横向变形就已经破坏,模型中部受张拉应力较大,所以在节理尖端产生翼裂纹导致模型拉伸破坏,而在模型其他部位无明显损伤.

参考文献:

- [1] 赵程,田加深,松田浩,等.单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):763-769.
- [2] 赵程,刘丰铭,田加深,等.基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3626-3632.
- [3] 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 and mining sciences, 2009, 46(2): 239-249.
- [4] HAERI H, SHAHRIAR K, MARJI M F, et al. Cracks coalescence mechanism and cracks propagation paths in rock-like specimens containing pre-existing random cracks under compression[J]. Journal of central south university, 2014, 21(6): 2404-2414.
- [5] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression[J]. International journal of solids and structures, 2011, 48(6): 979-999.
- [6] 肖桃李,李新平,郭运华.三轴压缩条件下单裂隙岩石的破坏特性研究[J].岩土力学,2012,33(11):3251-3256.
- [7] 肖桃李,李新平,贾善坡.含2条断续贯通预制裂隙岩样破坏特性的三轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2455-2462.
- [8] 刘刚,姜清辉,熊峰,等.多节理岩体裂纹扩展及变形破坏试验研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):151-158.
- [9] 程龙,杨圣奇,刘相如.含缺陷砂岩裂纹扩展特征试验与模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(5):719-724.
- [10] 蒋明镜,张宁,申志福,等.含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J].岩土力学,2015,36(11):3293-3300;3314.
- [11] XIA M, ZHAO C B. Simulation of rock deformation and mechanical characteristics using clump parallel-bond models[J]. Journal of central south university, 2014, 21(7): 2885-2893.
- [12] 杨圣奇,黄彦华,刘相如.断续双裂隙岩石抗拉强度与裂纹扩展颗粒流分析[J].中国矿业大学学报,2014,43(2):220-226.
- [13] 黄彦华,杨圣奇.非共面双裂隙红砂岩宏观力学行为颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1644-1653.
- [14] 李传明,刘万荣.节理岩体巷道围岩稳定性的颗粒离散元分析[J].中国安全科学学报,2017,27(4):133-138.
- [15] 刘万荣,殷志强,袁安营,等.基于颗粒离散元法不同岩性巷道围岩声发射特性和能量演化规律研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):363-370.
- [16] 夏才初,宋英龙,唐志成,等.粗糙节理剪切性质的颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1545-1552.
- [17] 宋英龙,夏才初,唐志成,等.不同接触状态下粗糙节理剪切强度性质的颗粒流数值模拟和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2028-2035.
- [18] 王德咏,王永平,莫海鸿.含内置裂隙的节理岩体的剪切行为数值模拟[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊2):488-492;509.
- [19] BOBET A. The initiation of secondary cracks in compression[J]. Engineering fracture mechanics, 2000, 66(2): 187-219.

(责任编辑:扶文静)