

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.003

冲击荷载作用下非贯通节理岩体 细观破坏模式研究*

董平^a, 刘婷婷^{b,c}, 李新平^{b,c}, 丁鹿阳^a, 王刚^a

(武汉理工大学 a. 土木工程与建筑学院; b. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室;
c. 三亚科教创新园, 武汉 430070)

摘要: 地应力作用下节理岩体的动态力学特性及对应力波传播规律的影响对深部地下工程的稳定性有着重要影响,采用颗粒流离散元软件(PFC^{2D})建立了含非贯通节理岩体的冲击作用数值模型,并通过与室内试验的对比验证了模型的有效性。通过对不同节理倾角、节理长度非贯通节理岩体的冲击压缩仿真试验,分析了岩体的变形特征、破坏模式及应力波传播规律。结果表明:随节理倾角从15°增加至75°,岩石强度呈现先减小后增大的近“V”字型变化规律,节理试件始终处于拉伸主导作用下,并在45°倾角时拉伸作用最为明显;随着节理长度的增大,岩体的初始损伤增大,动态抗压强度减小。15~25 mm“短”节理试件的贯通破坏由反翼裂纹主导,而30~35 mm“长”节理试件是在反翼裂纹和共面裂纹共同作用下断裂破坏。

关键词: 颗粒流离散元; 动态响应; 应力波传播; 破坏模式; 非贯通节理

中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0017-09

Study on Wave Propagation and Meso-failure of Rock with Non-persistent Joints

DONG Ping^a, LIU Ting-ting^{b,c}, LI Xin-ping^{b,c}, DING Lu-yang^a, WANG Gang^a

(a. School of Civil Engineering and Architecture;

b. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering;

c. Sanya Science and Education Innovation Park,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The dynamic mechanical characteristics and the influence on the law of stress propagation of jointed rock masses under in situ stress have an important influence on the stability of deep underground engineering. Based on the particle flow discrete element software (PFC^{2D}), a numerical model of rock mass with discontinuous joints was established, and the effectiveness of the model was verified by comparison with laboratory tests. The deformation characteristics, failure modes and stress wave propagation laws of the rock masses were analyzed through the impact compression simulation test of rock masses with different joint inclination angles and lengths of non-continuous joints. The results show that the strength of the rock presents a “V”-shaped evolution law, namely, first decreases and then increases with the joint inclination increases from 15° to 75°. The joint specimen is always under the leading action of stretching, and the stretching effect is most obvious at an inclination angle of 45°; As the joint length increases, the initial damage of the rock mass increases and the dynamic compressive strength decreases. The penetration failure of 15~25 mm “short” joint specimens is dominated by anti-wing cracks, while for the 30~35 mm “long” joint specimens, the fracture failure occurs under the combined action of the anti-wing cracks and the coplanar cracks.

Key words: particle flow discrete element program; dynamic response; wave propagation; failure; non-persistent joints

节理作为一种重要地质结构面,将极大影响岩体强度,并且使岩体表现出明显的不均匀性、各向异性及不连续性等特征。在外部荷载作用下,诸如工程爆破、盾构施工以及地震等动力作用时,将涉及节理岩体内部应力重分布、应力波透射及应变率效应等诸多问题,因此节理岩体特性研究具有重要的理论研究意义及工程应用价值。

近年来国内外学者对节理岩体动力响应问题展开了相应研究,如 Wu 等基于 SHPB 试验,研究了动荷载作用下节理岩体与应力波的相互作用,分析了节理岩体的破坏模式并得到了透射系数的衰减规律^[1,2]。马芹永等探讨了软弱贯通节理砂岩的动态力学特性,发现动态抗压强度随节理倾角的增加呈先减小后增大的趋势,同时,节理试件塑性特征降低,脆性特征增强^[3]。薄英璠等研究了高地应力下节理岩体的破坏模式及动力响应特征,表明相比准静态计算,动力计算模式下岩体破坏范围和程度均显著增大,节理面两侧岩体破坏程度差异显著^[4]。赵怡晴等采用颗粒流软件研究了加卸载条件下非贯通节理岩体的破坏特性,表明三轴压缩模拟中,岩桥的破坏以剪切裂纹为主;非线性加载卸围压模拟中,岩桥中拉伸裂纹与剪切裂纹分布均匀;卸荷过程中,节理面的剪应力最小^[5]。张雨霏等采用改进的 SHPB 研究了粗糙节理岩体的动态损伤特征,发现节理面的损伤削弱了应力波的透射能力,冲击荷载作用下节理岩体的损伤主要表现在节理面损伤^[6]。Huang 等研究了充填厚度对透射系数的影响,发现充填厚度越大,透射系数则越小,同时拉伸应力波不能通过充填节理,反而会将充填节理层撕裂,从而削弱了应力波在充填节理中的多重反射^[7]。Dai 等对含有初始缺陷的巴西圆盘进行 SHPB 试验,得到了加载率与 I 型断裂韧度间的关系^[8,9]。Li 等通过离散元软件 UDEC 研究了波在多节理岩体中传播的规律,认为波传播取决于岩石节理的力学特性和几何分布特征^[10]。王奇智等对平行双节理试件进行霍普金森压杆实验,研究发现随着节理倾角从 0° 至 90° 变化,试件的动态强度呈现出先增大后减小再增大的变化趋势^[11]。Zou 等通过试验总结了岩石试件在动荷载作用下,裂纹起裂及扩展规律,通过比较节理裂隙的扩展情况,发现动态荷载作用下岩石试

件的强度和应变都比在静荷载作用下大^[12,13]。

相关成果对节理岩体力学特性认识及岩体工程发展具有重要意义,但总体而言,节理岩体动力响应研究相对较少,同时,节理岩体破坏实际是能量驱动下微观构造劣化的过程^[14,15],而目前研究中对微观响应的分析较为少见,因此,采用离散元软件 PFC^{2D} 建立非贯通节理岩体的 SHPB 冲击数值仿真模型,从应力波传播特性、能量转化、微观结构劣化特征等多个角度对不同节理角度、贯通率等工况进行数值仿真研究。

1 基于 PFC 颗粒流的非贯通节理岩体的动态细观特性数值模型及验证

1.1 数值模型及参数标定

本次模型的压杆在满足应力波测量的基础上,将入射杆、透射杆长设为 2.0 m,直径设为 0.05 m,试件尺寸设计为 50 mm × 50 mm (宽 × 高),为改善应力波传播能力,降低试样端部的弥散效应,将入射杆、透射杆颗粒设置为规则排列颗粒,数值模型如图 1 所示。

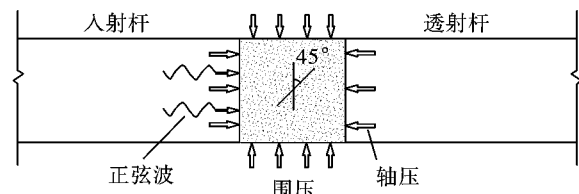


图 1 SHPB 数值模型

Fig. 1 SHPB numerical model

颗粒流模型采用线性平行接触模型 (Linear-bond)^[16],通过离散裂隙网格 (DFN) 图像反应岩石裂纹演化特征,当颗粒 (组) 实体与周边粘结破坏,出现分割裂纹后产生碎块 (Fragment),即表征岩石破坏产生的碎块 (碎屑),从而较好反应了岩石类材料的损伤破坏特征。试件中预制的节理采用光滑节理模型 (Smooth-joint)^[17],类似形成一系列均匀分布在圆柱截面上的弹簧,很好模拟了一定张开度的节理特性。

为达到模拟初始静载围压效果,采用循环语句生成规则排布的 pebble 集合体,形成侧向 clump 加载板,通过 clump 侧向板及冲击压杆端部直接施加指定力的方式施加初始围压 (地应力),进一步通过在入射杆端部施加正弦应力波的方式完成深部节理岩体冲击仿真过程。试验中,分别于入射杆和透射杆布置测量圆,用以监测应力、应变等参数。

采用 RTX-100 岩石三轴仪进行单轴压缩试验并对岩石颗粒流模型进行校验、修正,采用“试凑

收稿日期:2021-06-08

作者简介:董平(1996-),男,硕士研究生,从事岩石动力学方面研究,(E-mail)1532231827@qq.com。

通讯作者:刘婷婷(1988-),女,博士研究生、副研究员,从事应力波传播规律与节理岩体动力特性方面研究,(E-mail)tltiu@whut.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51774222,52079102);三亚崖州湾科技城管理局重大科技项目(SKJC-KJ-2019KY02)

法”不断调整模型细观力学参数^[18],最终获取花岗岩细观参数(如表1、表2)。图2为室内单轴压缩试验及相应颗粒流数值模拟应力-应变曲线,两者较为

契合,同时数值试验中试样的破坏形态图与花岗岩试样破坏形态相似,宏观力学参数接近,从而验证了所创建颗粒流模型的可靠性。

表1 花岗岩模拟试件细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of granite simulated specimens

颗粒	密度/(g·m ⁻³)	最小粒径/mm	粒径乘子	摩擦系数	刚度比	接触模量/GPa
	24.2	2950	0.3	1.66	0.577	1.4
粘结	内聚力/MPa	内摩擦角/°	刚度比	法向粘结强度/MPa	平行接触模量/GPa	
	7.65	40	49	1.4	52	

表2 宏观力学参数

Table 2 Macroscopic mechanical parameters

	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
物理试验	31.13	0.201	122.15
模拟试验	31.74	0.206	123.67

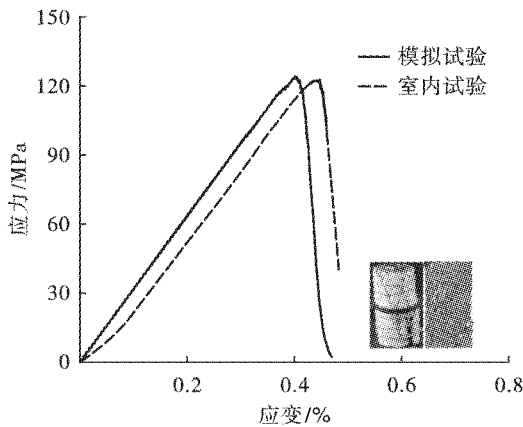


图2 应力-应变曲线对比图

Fig. 2 Stress-strain curve comparison graphic

1.2 节理模型及参数

试验模拟地下100 m应力状态,考虑自重作用,设置初始围压为2.60 MPa,此时假定侧压力系数为1。利用Smooth joint接触模型改变预置节理处颗粒的粘结方式。为全面了解非贯通节理岩体的动态响应特征,结合模型尺寸设计了系列I(节理长度因素):节理倾角为45°,长度分别为15、20、25、30、35 mm五种不同长度节理试件;系列II(节理倾角因素):节理长度为25 mm,15°、30°、45°、60°与75°五种不同倾角节理试件(见表3)。

表3 节理试件模拟方案设计

Table 3 Simulation scheme design of jointed rock mass

类型	变量参数	
	节理倾角/°	节理长度/mm
系列I	45	15、20、25、30、35
系列II	15、30、45、60、75	25

备注:定义水平面为施加冲击荷载方向,节理倾角为节理面与竖直面夹角。

2 非贯通节理岩体的动态变形特性与细观破坏模式分析

2.1 节理角度对变形特性和破坏模式的影响

图3给出了5种不同节理倾角的节理岩体动态应力-应变曲线。从图上看全应力-应变曲线总体可分为弹性阶段、屈服阶段和峰后破坏阶段。在弹性阶段,应力与应变基本成线性关系,服从胡克定律,表现为弹性特征;在屈服阶段,试样内部损伤加剧,岩石试件局部发生屈服破坏,应力-应变曲线偏离直线,表现出塑性发展特征;在破坏阶段,试件内的应力达到其极限承载能力,试件失稳破坏。

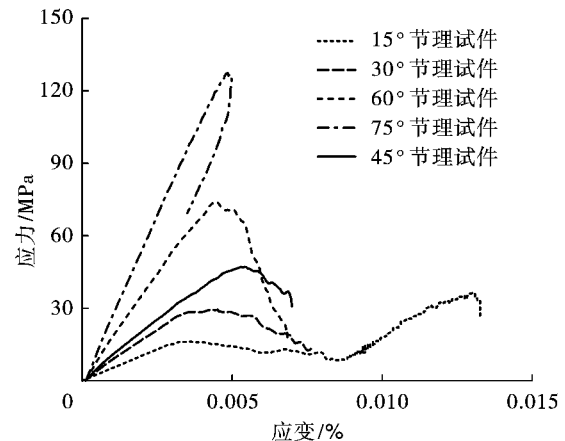


图3 不同节理倾角试件应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of specimens with different joint dip angles

节理试样动弹性模量随着倾角增加呈增大趋势,依次为4.4 GPa、8.1 GPa、9.5 GPa、17.6 GPa、27.4 GPa,且动弹性模量差别明显,最大动弹性模量与最小动弹性模量之间相差可达5倍。其中,对于15°、30°、45°、60°倾角节理试件,当加载临近峰值强度约80%后,试件进入屈服阶段,表现出一定塑性特征;试件进入峰后阶段后,变形随着应力降低而增长,应力-应变曲线呈“开口型”特征。对于75°节理试件,表现出较强的抵抗弹性变形能力,其峰后出现

明显的回弹现象,应力-应变曲线呈“闭口型”,即表明岩石试件仍保持较好的完整性,承载力较大。

不同倾角节理试件动态抗压强度如图4所示,当节理倾角由 15° 增加到 75° ,节理试件的强度分别为36.5、29.3、47.1、74.2、126.9 MPa,呈近似“V”字型先减小后增大的变化特征。通过应力应变曲线可知,动态荷载作用下, 15° 节理试件的抗压强度迅速下降,但由于试件在节理的轴向范围内,最大程度的保留了完整性,因此,随着应变的增加,试件能承受更高的轴向应力,并且该残余强度高于 30° 节理试件,因而出现曲线“异常”。随着节理倾角增加,节理对岩石强度弱化能力逐渐降低,试件压缩强度趋于增大,当节理倾角为 75° 时,其强度可达126.9 MPa,约为完整试件强度的93.2%。

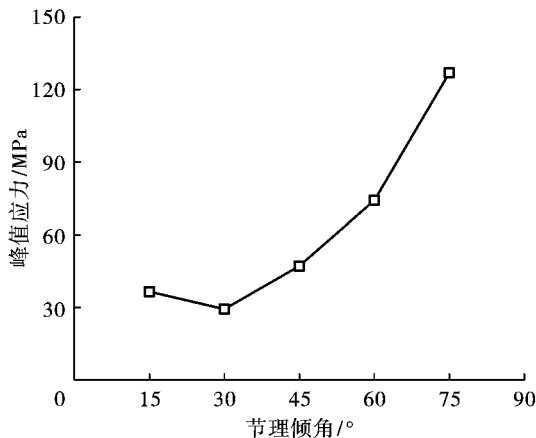


图4 峰值应力与倾角关系

Fig. 4 Peak stress with different joint dip angles

图5为不同倾角预制节理岩体受到冲击荷载作用的破坏过程。当节理倾角小于等于 60° 时,预制裂纹明显影响岩石裂纹分布及破坏形态。在 $360 \mu\text{s}$ 时,节理尖端出现应力集中,并超过临界应力,造成尖端萌生一定数量裂纹,此时裂纹类型主要为翼裂纹,与最大主应力呈一定角度。当 $380 \mu\text{s}$ 时,冲击荷载增大,反翼裂纹与远场共面裂纹几乎同时出现并不断凝聚、扩展,形成局部宏观裂纹,此时裂纹向最大主应力方向偏转延伸。当约 $430 \mu\text{s}$ 时,荷载临近峰值应力,试件内部裂纹迅速凝聚、扩展,并与预制节理相贯通,发生失稳破坏。对于 75° 节理试件,预制节理对裂纹扩展影响相对较小,在加载初期,试样内部不同部位的微缺陷随机被激活并发展,随着应力的进一步增加,裂纹出现自相似扩展,且更多的微裂纹被不断激活,出现宏观的裂纹交叉并产生局部碎块、碎屑。由于荷载并未超过试件承载极限,所以裂纹未得以进一步发展,试件仍保持一定完好性。

试件最终破坏形态如图6所示。

不同节理倾角下裂纹信息汇总如图7所示。随节理倾角增大,裂纹总数分别为1975、2169、2253、1768、499个,呈先增大后减小的趋势,这是裂纹扩展区域与岩体初始损伤综合作用的结果。另外,岩石类材料微破裂可分为张拉裂纹和剪切裂纹,当法向应力超过法向黏结强度时,发生拉伸破坏,对应产生拉裂纹;当切向应力超过切向承载强度时,发生剪切破坏,对应产生剪裂纹,裂纹类型信息极大反应了岩石破坏的本质。这里定义试样破坏时的剪切微裂纹占总微裂纹的比为剪切破坏比 k ,剪切破坏比越高表示断裂过程中剪切破坏作用越明显,反之表示拉伸破坏作用明显,从而反映岩石破裂过程中的拉剪断裂机制。当节理倾角从 15° 增加到 75° ,剪切破坏比 k 分别为0.43、0.40、0.38、0.44、0.49。

2.2 节理长度对变形特性和破坏模式的影响

图8给出了5种节理长度岩体试件动态应力-应变曲线,随着节理长度的增加,试件动弹性模量依次为21.6 GPa、14.1 GPa、9.8 GPa、6.7 GPa、5.4 GPa,呈逐渐减小趋势,最大动弹性模量与最小动弹性模量之间相差可达3倍。其中,对于15 mm节理试件,应力应变曲线在峰后出现回弹现象,即表明岩石试件仍保持较好的完整性,具有一定承载力。当节理长度大于15 mm,试件出现应变软化现象,应力随着应变增加而减小,应力-应变曲线整体呈“开口型”特征。

不同长度节理试件动态抗压强度如图9所示,可知节理对岩体的强度弱化效应明显。定义节理长度与试样沿节理倾角方向总长度的比值为贯通度 δ ,则当 δ 由0.21增大到0.50,试件的强度分别为90.1、62.9、47.1、33、20.7 MPa,呈逐渐减小趋势。节理长度差异表征了不同的岩石初始损伤,预制节理长度越大,试件完整性越差,造成初始损伤越大,如节理长度15 mm试件,其强度为完整试件的67%,较大程度上保留了试件抵抗荷载的能力,而对于节理长度35 mm试件,其强度仅为完整试件的15%,承载能力下降明显。

根据图10展示的不同长度预制节理岩体在受到冲击荷载作用的破坏过程,节理倾角为 45° ,显然,当应力波传播至非贯通节理处时,节理尖端出现了应力集中,造成尖端萌生大量微裂纹,同时试样内部不同部位出现少量随机分布裂纹。当节理贯通度较小时($\delta=0.21 \sim 0.35$),尖端裂纹主要为翼裂纹,与最大主应力呈一定夹角;而当节理贯通度较大时($\delta=0.35 \sim 0.50$),除节理端部的翼型裂纹外,沿节

理方向产生明显的共面裂纹,并不断向试件端部扩展。随着冲击荷载的增大,短节理试件中除翼型裂纹外,出现一定数量的反翼裂纹与远场共面裂纹。当约430 μs时,试件内部裂纹迅速凝聚、扩展,短节

理试件在反翼裂纹主导下贯通破坏,长节理试件在反翼裂纹和共面裂纹共同作用下,出现宏观断裂带,试件最终破坏形态如图11所示。

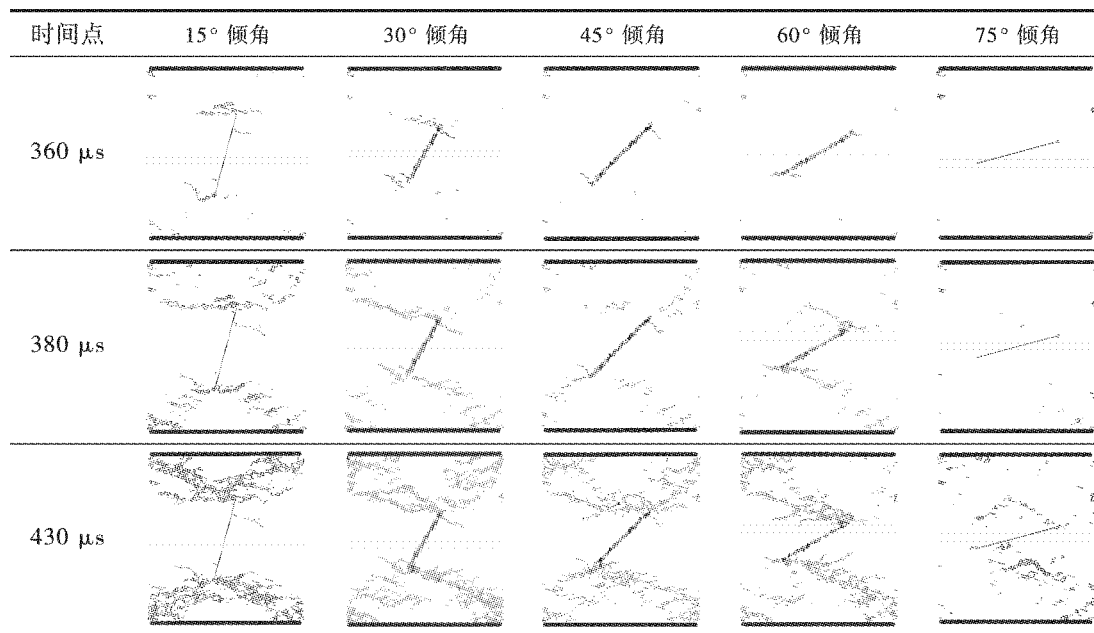


图5 不同节理倾角试件裂纹演化图

Fig. 5 Crack propagation of specimens with different joint dip angles

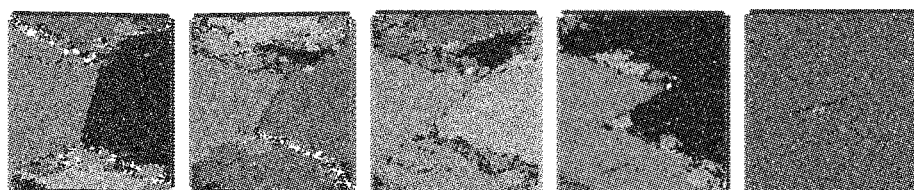


图6 不同节理倾角试件破坏形态图(15°、30°、45°、60°、75°)

Fig. 6 Destruction form of specimens with different joint dip angles(15°、30°、45°、60°、75°)

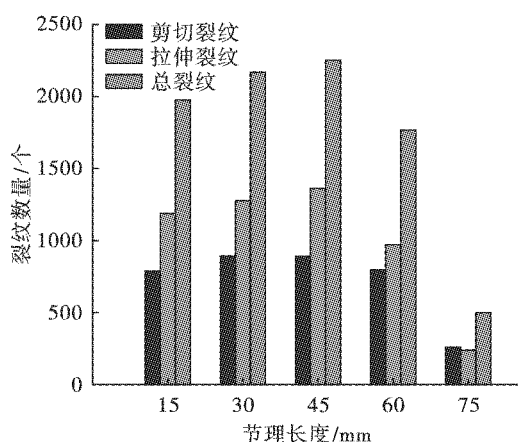


图7 生成裂纹数目与节理倾角关系

Fig. 7 Change law of the number of cracks with different joint dip angles

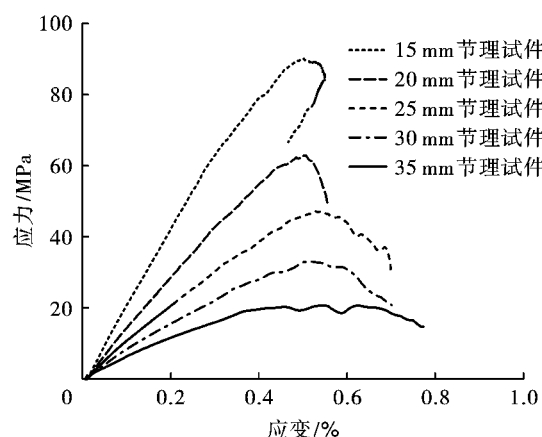


图8 不同节理长度试件应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of specimens with different joint length

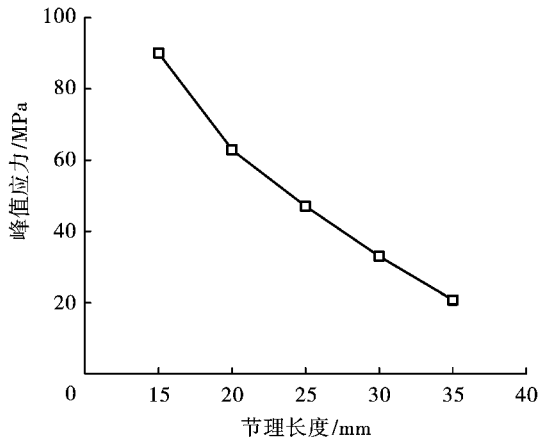


图9 动态峰值强度与节理长度关系
Fig. 9 Peak stress with different joint length

图12为裂纹信息汇总统计,随节理长度增大,裂纹总数分别为1016、1894、2253、2305、1834个,呈先增大后减小的趋势,其中,对于短节理试件(15~25 mm),节理长度的增加,促使反翼裂纹大量增加,形成了更宽的破碎带;当节理长度增加到一定程度,即本文的30~35 mm,共面裂纹产生的优势主裂纹直接影响了试件裂纹扩展与破坏模式,反翼裂纹作用弱化,对于45°倾角节理试件,最终形成更为明显的沿节理方向的对角破坏。当裂纹长度由从15 mm增加到35 mm时,剪切破坏比k分别为0.431、0.430、0.390、0.387、0.371,呈逐渐下降趋势,即随着节理长度增加,拉伸作用趋于明显。

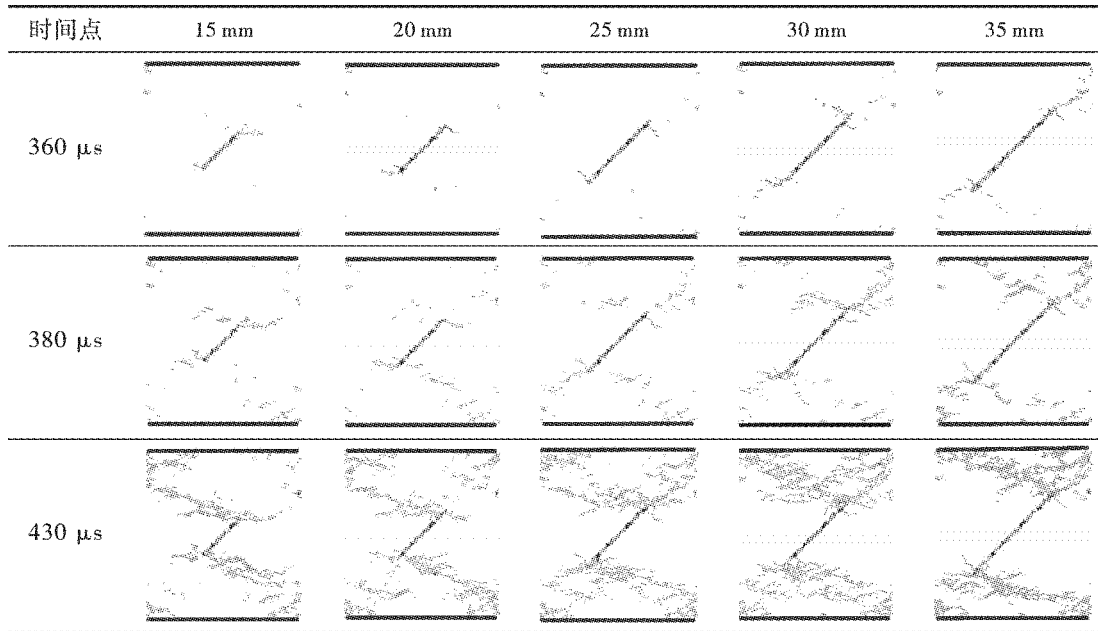


图10 不同节理长度试件裂纹演化图
Fig. 10 Crack propagation of specimens with different joint length



图11 不同节理长度试件破坏模式(15~35 mm)
Fig. 11 Destruction form of specimens with different joint length (15~35 mm)

3 节理贯通度对应力波能量衰减规律的影响

为了研究节理的贯通度对应力波衰减规律的影响,定义参数透射系数 T 为透射波与入射波的波幅

比值。25 mm 节理试件的入射波、透射波、反射波随时间的变化关系见图13。不同贯通度下节理岩体的透射系数如图14所示,随着贯通度的增加,透射系数单调减小,应力波衰减明显,再次说明了节理对岩体强度的弱化作用。

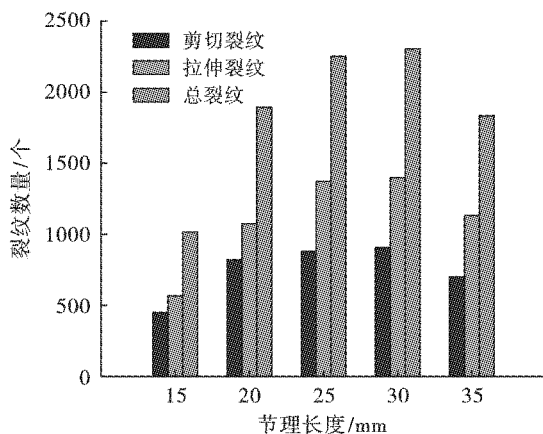


图12 裂纹生成数量与节理长度关系

Fig. 12 Change law of the number of cracks with different joint length

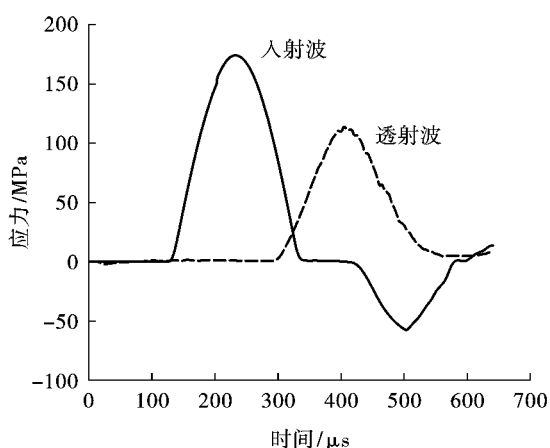


图13 25 mm 节理试件入射波、透射波、反射波应力-时间曲线

Fig. 13 Stress-time curve of incident wave, transmitted wave and reflected wave of 25 mm joint specimen

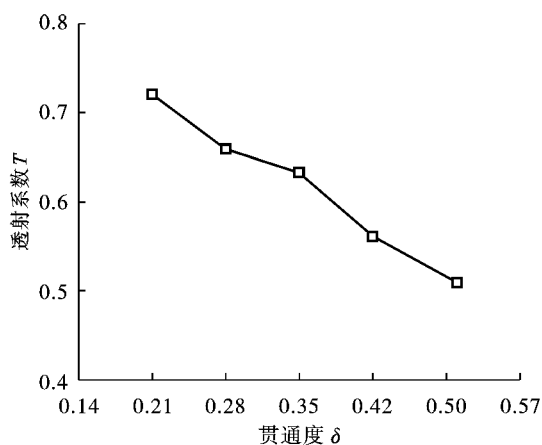


图14 透射系数与贯通度关系图

Fig. 14 Transmission coefficient with different joint continuity degree

岩石试件吸收了应力波能量,从而导致内部裂纹扩展贯通,因此对岩石试件在冲击荷载下的能量

耗散特征展开研究,将有助于揭示岩石破坏特征的本质^[19]。当应力波传播到非贯通节理岩体时,入射波 E_I 能量主要会分散为三部分:继续传播的透射能 E_T ;反射回去并可能产生拉应力的反射能 E_R ;诱发微裂纹产生扩展甚至贯通的耗散能 E_D 。其计算公式如下^[20-22]

$$E_I = A_0 \rho_0 C_0^3 \int_0^t \varepsilon_I^2(t_1) dt_1 \quad (1)$$

$$E_R = A_0 \rho_0 C_0^3 \int_0^t \varepsilon_R^2(t_1) dt_1 \quad (2)$$

$$E_T = A_0 \rho_0 C_0^3 \int_0^t \varepsilon_T^2(t_1) dt_1 \quad (3)$$

式中: A_0 、 ρ_0 和 C_0 分别为入射杆和透射杆的横截面面积,初始密度以及弹性波纵波波速; $\varepsilon_I(t_1)$ 、 $\varepsilon_R(t_1)$ 、 $\varepsilon_T(t_1)$ 分别为入射波,反射波与透射波的时程应变。

定义能量透射系数 Te 、能量反射系数 Re 以及能量耗散系数 De 分别为透射能、反射能及损耗能与入射能的比值。如图15所示,随着节理贯通度的增加,能量透射系数迅速减小,能量反射系数增加,能量耗散系数先增加然后趋于稳定,出现减小的趋势。能量耗散变化规律与图12中节理裂纹数量结果吻合,随着节理贯通度的增加,微裂纹数量并不是一直增加,而是快速增加后,增加速度变缓,最后出现减少。因为节理贯通度增加后,节理更容易产生破坏,即新生微裂纹数量较小也可以导致贯通度较高的节理岩体产生破坏,从而导致应力波能量大量被反射,应力波衰减严重。

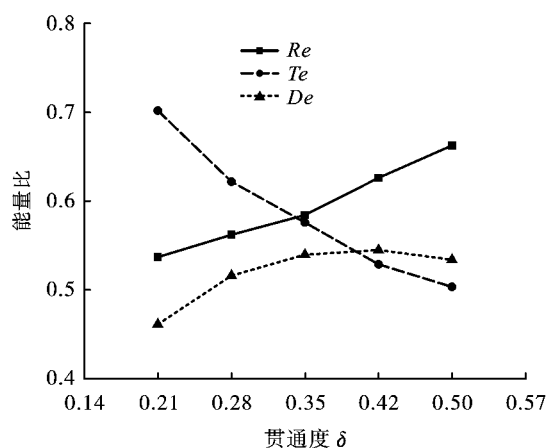


图15 各能量系数与贯通度关系图

Fig. 15 Energy ratio with different joint continuity degree

4 结论

采用颗粒流离散元程序(PFC^{2D})建立了分离式霍普金森压杆(SHPB)数值模型,从细观角度研究

了含非贯通节理岩体的动态破坏特征及应力波传播规律,主要结论如下:

(1) 冲击荷载作用下,试件破坏过程可分为弹性阶段、屈服阶段和峰后破坏阶段,节理长度的增加或倾角的减小,均可促使试件应力-应变曲线特征由“闭合型”向“开口型”转变。

(2) 随节理倾角从 15° 增加至 75° , 岩石动态抗压强度呈现先减小后增大的近“V”字型变化趋势, 裂纹数量呈先增大后减小的变化规律; 非贯通节理试件的破坏由剪切与拉伸共同作用导致, 其中拉伸作用更加突出。

(3) 随着节理贯通度的增加, 岩体初始损伤增大, 试件动态抗压强度逐渐降低。岩石破坏模式由反翼裂纹主导贯通破坏向反翼裂纹和共面裂纹共同破坏转换。

(4) 随着节理贯通度的增加, 能量透射系数减小, 能量反射系数增加, 能量耗散系数呈现出先增加后减小的变化规律。此外, 应力波衰减随着节理贯通度的增加而趋于明显。

参考文献 (References)

- [1] WU N, ZHU Z D, ZHANG C, et al. Dynamic behavior of rock joint under different impact loads[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(2): 541-548.
- [2] WU N, ZHANG C, MAIMATIYUSUPU S, et al. Investigation on properties of rock joint in compression dynamic Test[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(9): 3854-3863.
- [3] 马芹永, 苏晴晴, 马冬冬, 等. 含不同节理倾角深部巷道砂岩 SHPB 动态力学破坏特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1104-1116.
- [3] MA Qin-yong, SU Qing-qing, MA Dong-dong, et al. SHPB experimental study on dynamic characteristics and failure behaviors of sandstone containing weakly filled joints with various angles in deep roadways[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1104-1116. (in Chinese)
- [4] 薄英莹, 王华宁, 蒋明镜. 深部节理岩体开挖卸荷动力破坏机制的离散元研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(S2): 196-201.
- [4] BO Ying-jun, WANG Hua-ning, JIANG Ming-jing. Cracking mechanism of deep jointed rock mass induced by transient excavation via DEM [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S2): 196-201. (in Chinese)
- [5] 赵怡晴, 刘佳伟, 金爱兵, 等. 加卸荷条件下非贯通节理岩体破坏特性研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(7): 1893-1901.
- [5] ZHAO Yi-qing, LIU Jia-wei, JIN Ai-bing, et al. Study on failure characteristics of intermittent jointed rock mass under loading and unloading condition[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(7): 1893-1901. (in Chinese)
- [6] 张雨霏, 李建春, 闫亚涛, 等. 基于 SHPB 试验的粗糙节理面动态损伤特征研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 491-500.
- [6] ZHANG Yu-fei, LI Jian-chun, YAN Ya-tao, et al. Experimental study on dynamic damage characteristics of roughness joint surface based on SHPB[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 491-500. (in Chinese)
- [7] HUANG X L, QI S W, WILLIAMS A, et al. Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 69-70: 23-33.
- [8] DAI F, XIA K, ZHENG H, et al. Determination of dynamic rock mode- I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(15): 2633-2644.
- [9] DAI F, CHEN R, IQBAL M J, et al. Dynamic cracked chevron notched Brazilian disc method for measuring rock fracture parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(4): 606-613.
- [10] LI H B, LIU T T, LIU Y Q, et al. Numerical modeling of wave transmission across rock masses with nonlinear joints [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 1115-1121.
- [11] 王奇智, 夏开文, 吴帮标, 等. 预制平行双节理类岩石材料板动态破坏试验研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(10): 1099-1108.
- [11] WANG Qi-zhi, XIA Kai-wen, WU Bang-biao, et al. Dynamic failure of simulated rock mass plate containing two parallel cracks[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(10): 1099-1108. (in Chinese)
- [12] ZOU C J, WONG L N Y. Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading[J]. *Engineering Geology*, 2014, 173: 19-31.
- [13] ZOU C J, WONG L N Y, LOO J J, et al. Different mechanical and cracking behaviors of single-flawed brittle gypsum specimens under dynamic and quasi-static loadings[J]. *Engineering Geology*, 2016, 201: 71-84.
- [14] XIA L, ZENG Y W. Parametric study of smooth joint parameters on the mechanical behavior of transversely isotropic rocks and research on calibration method [J]. *Computers & Geotechnics*, 2018, 98: 1-7.
- [15] MA L J, LI Z, LIU J G, et al. Mechanical properties of coral concrete subjected to uniaxial dynamic compression [J]. *Construction Building Materials*, 2019, 199: 244-255.
- [16] HART R, CUNDALL P A, LEMOS J. Formulation of a

- three-dimensional distinct element model-Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1988,25(3):117-125.
- [17] DAI F, SHENG H, XIA K W, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering,2010,43(6):657-666.
- [18] WANG G, LUO Y, LI X P, et al. Study on dynamic mechanical properties and meso-deterioration mechanism of sandstone under cyclic impact load[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2020,45(5):3863-3875.
- [19] YANG B D, JIAO Y, LEI S T. A study on the effects of microparameters on macroproperties for specimens created by bonded particles[J]. Engineering Computations, 2006,23(6):607 - 631.
- [20] 刘运思,何楚韶,傅鹤林,等. 冲击荷载下饱水板岩拉伸力学特性及能耗规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020,39(11):2226-2233.
- [20] LIU Yun-si, HE Chu-shao, FU He-lin, et al. Study on tensile mechanical properties and energy consumption law of saturated slate under impact loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11):2226-2233. (in Chinese)
- [21] 潘博,汪旭光,徐振洋,等. 节理角度对岩石材料的动态响应影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021, 40(3):566-575.
- [21] PAN Bo, WANG Xu-Guang, XU Zhen-yang, et al. Research on the effect of joint angle on dynamic responses of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3):566-575. (in Chinese)
- [22] 温森,赵现伟,常玉林,等. 基于 SHPB 的复合岩样动态压缩破坏能量耗散分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(2):483-492.
- [22] WEN Sen, ZHAO Xian-wei, CHANG Yu-lin, et al. Energy dissipation of dynamic failure of mixed rock specimens subject to SHPB compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(2):483-492. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第16页)

- [18] 卢国强,林德润. 混凝土-钢板结构在爆炸作用下变形的计算方法[J]. 同济大学学报,2000(5):510-512.
- [18] LU Guo-qiang, LIN De-run. Calculation method of deformation of concrete-steel plate structures subjected to explosion[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2000(5):510-512. (in Chinese)
- [19] 张永亮. 钢纤维混凝土材料的抗爆抗侵彻性能研究及应力波演化[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.
- [19] ZHANG Yong-liang. Study on anti-explosion and anti-penetration properties of steel fiber reinforced concrete and evolution of stress wave[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2018. (in Chinese)
- [20] 常虹,沈鹏,谷复光,等. 钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土学报,2020(4):67-69.
- [20] CHANG Hong, SHENG Peng, GU Fu-guang, et al. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Concrete, 2020(4):67-69. (in Chinese)
- [21] 谢雨霏,盛梦,吕一帆,等. 钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 四川水泥学报,2020(7):14-15.
- [21] XIE Yu-fei, SHENG Meng, LV Yi-fan, et al. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete[J]. Sichuan Cement, 2020(7):14-15. (in Chinese)
- [22] POLANCO-LORIA M, HOPPERSTAD O S, BØRVIK T, et al. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(5):290-303.
- [23] ISLAM M J, SWADDIWUDHIPONG S, LIU Z S. Penetration of concrete targets using a modified Holmquist-Johnson-Cook material model[J]. International Journal of Computational Methods,2012,9(4):1-19.
- [24] BANTHIA N. Impact resistance of HPRFCC[C]// FISCHER G, LI VC, editors. Proceedings of International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications. Honolulu:RILEM,2005:479e88.
- [25] BACHE HH. Compact reinforced composite: basic principles[R]. CBL Report No. 41. Aalborg, Denmark: Aalborg Portland;1987:87.
- [26] AARUP B. Fiber reinforced high performance concrete for precast applications[C]// AITCIN P-C, DELAGRAVE Y, editors. Proceedings of International Symposium on High-performance and Reactive Powder Concrete. Sherbrooke: Universite de Sherbrooke,1998:113e23.

英文编辑:黄刚