

应力波在岩石直杆中传播特性及层裂研究

黄志平¹, 陈国平¹, 唐春安², 黎 罡¹

(1. 吉首大学土木工程与建筑学院, 湖南 张家界 427000; 2. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要 目的 揭示冲击应力波在直杆岩体中的传播特性与层裂破坏规律, 以便更好地研究围岩结构动力稳定性. 方法 采用 RFPA^{2D-Dynamic} 软件建立均匀岩石直杆数值模型 I、II, 分别施加直角三角形冲击荷载. 对模型 I 进行杆中及固定端应力波传播形态与理论解析对比分析, 对模型 II 施加 5 种相同峰值而持续时间不同的冲击载荷, 进行直杆中应力波经自由端反射诱发层裂过程数值模拟. 结果 压缩应力波在固定端反射为压缩波, 同时在杆两边界自由面不断产生大量剪切波和拉伸波; 压缩波的峰值随着应力波的传播逐渐降低; 冲击波持续时间越长, 裂纹扩展范围随之扩大, 萌生裂纹数量增加, 裂纹间距也越长. 结论 冲击波传播形态数值模拟与解析理论结果具有较好的一致性; 不同的冲击荷载卸荷速率对岩石直杆动态起裂位置和层裂扩展长度影响较大.

关键词 冲击荷载; 均匀直杆; 数值模拟; 层裂破坏; 波长

中图分类号 TU475

文献标志码 A

Numerical Simulation of Propagation Characteristic and Spallation in Rock Bars under Stress Waves

HUANG Zhiping¹, CHEN Guoping¹, TANG Chun'an², LI Gang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jishou University, Zhangjiajie, China, 427000; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: In order to better research the dynamic stability of surrounding rock structure, the propagation characteristics of stress waves and the rules of spall failure in rock bar were detected. Numerical models I and II of uniform rock bars were established by RFPA^{2D-Dynamic} numerical simulation software, and right triangle impact loads were applied respectively on them. The propagation patterns of stress waves in the bar and at the fixed end of model I were compared with the result of theoretical analysis. Five impact loads with same peak values and different durations

收稿日期: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51604175); 中国博士后科学基金项目(2016M601338); 湖南省教育厅项目(18C0562, 2019SYJG013); 秦岭输水隧洞越岭段微震监测技术服务项目(TYY-2017-WZJC-1)

作者简介: 黄志平(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩石断裂与损伤力学、岩爆机理及微震监测技术等方面研究.

were applied to model II, and the process of spallation induced by stress waves reflected at the free end in the straight bar was numerically simulated. The simulation results showed that the compressive stress wave was reflected as a compressive wave at the fixed end, and a lot of shear waves and tensile waves were continuously generated on the free surfaces of the two boundaries of the bar; the peak value of compression wave gradually decreased with the propagation of stress wave. As the impact wave was continuously generated, the crack propagation range continuously expanded, the number of initiated cracks and the crack spacing increased. The conclusion showed that the numerical simulation of shock wave propagation morphology is in good agreement with the theoretical analysis results; Different impact unloading rates have varied influence on the dynamic crack initiation position and spallation extension length of rock bar.

Key words: stress wave; homogeneous rock bar; numerical simulation; spall failure; wavelength

在当前我国全面推进产业和能源持续发展的情况下,大量岩土工程建设,如地下隧道、硐室、巷道,大型水坝边坡工程以及矿山、油气等资源开采,在工程爆破、围岩防护以及利用地震波进行岩层勘探等,各种岩体工程均会涉及应力波的影响,如岩体在动荷载下的动态断裂规律、能量耗散、强度衰减、传播特性等^[1-2].彭维红等^[3]对扰动应力波作用下巷帮围岩层裂破坏结构的形成过程、顶板的岩性对层裂结构形成的影响进行了初步分析.由于岩石准脆性材料抗压不抗拉,受冲击荷载时通常在岩体自由面发生拉伸破坏,因此研究岩石的动态性能对精细化破岩、围岩防护、和支护参数提供依据,对高效破岩、改善破岩效果、以及保障资源有效开采及施工安全有着重要意义.

近年来,针对岩石类材料的特殊性,国内外学者利用霍普金森压杆装置研究岩体在高应变率情况下的动力性质,取得了许多成果.国外早期一些实验室^[4-5]先后研制了一系列的三轴 SHPB 装置,研究了岩石在围压作用下承受冲击荷载的力学响应特性,但 SHPB 试验系统大部分没有解决好加载应力波整形问题.李夕兵等^[6-7]利用自主研制的 SHPB 改进装置岩石动静组合加载试验系统,研究了岩石试件在一维动静组合加载下临界破坏的破坏模式、变形规律、能量规律和强度特性等.鉴于岩体动力特性的试验研究对设备要

求甚高,实现过程复杂,目前利用先进的计算硬件和方法开展系列岩土工程领域的动力特性课题研究已切实可行.如对完整岩石、节理岩体、填充物节理岩体中波的传播规律研究取得了系列成果^[8-9].还有学者探讨岩石在动载荷作用下弹性模量、强度等参数与加载变形速率之间的关系,总结出了岩石在动载荷作用下的强度准则和本构关系^[10-11],对岩石动力学特性及其力学模型研究奠定了基础.徐颖等^[12]采用波形整形技术实现动态力平衡,并利用激光测量裂缝表面张开位移,确定岩石样品的动态断裂能量各向异性.

学者除了对岩石工程地下结构进行了室内试验和理论研究之外,也有学者对此展开了多方面的数值模拟分析.田振农^[13]通过块体离散元法,对岩柱完整岩体施加撞击载荷,研究一维应力波传播规律.结果表明岩体中各质点振动形式、振动频率与岩柱长度、结构面有关.振动质点在结构面附近有增强现象;组数增加,质点振动衰减便快;距离增加,衰减明显.还有学者对典型的地下圆形隧道岩石结构受到凿岩爆破等冲击荷载动态应力的扰动,开展了应力波在隧洞围岩的传播特性及破坏过程研究,如王学滨^[14]、马冰^[15]采用连续-非连续方法,对圆形巷道围岩开裂、径向应力波传播及围岩径向应力随时间演变规律的影响进行研究.结果表明卸荷率的大小与围岩中裂纹模式、分布及应力变化有密切

关系,给出了巷道围岩中应力波传播过程及其变形-开裂-垮塌过程.因此,采用数值分析方法进行岩石(体)的动应力性质研究,已经取得了十分重要的成果,也是今后开展相关研究的有益手段.

鉴于大量深部岩体工程受动力灾害影响更为严重,分析冲击荷载作用下岩石介质内部应力波传播特性及层裂规律显得十分必要.基于此,笔者以一维岩石杆件为研究对象,分别设置直杆两端部为固定端和冲击端或两端均为自由端等边界条件,从分析弹性应力波力学问题角度考虑,假定岩石介质为均质材料,力学性质各向同性.结合前期相关研究工作^[16-17],根据弹性波传播反射与叠加方法,对岩石直杆中应力波强度衰减、应力波反射诱发层裂模式进行研究,探索岩石类材料动态断裂机理,为深部岩体工程动态失稳理论分析、室内试验验证提供借鉴.

1 RFPA^{2D-Dynamic}简介

岩石破裂过程动态分析软件(RFPA^{2D-Dynamic})是基于面向用户对话框开发,而且考虑岩石材料物理力学性质赋值特殊性,即单元强度、弹模、泊松比等力学性质参数服从威布尔概率分布.同时,由于应变率影响单元强度,程序中引入关于强度与应变率(加载率)关系^[10].关于动态分析计算原理、强度及弹模参数赋值更为详细阐述,可以参考文献^[18-19].进行岩石试件数值分析时,可以在试件冲击端输入一个瞬时冲击荷载,或者赋值一个初始速度作为加载条件.计算时间步长可以在相应合理的范围内取值.每个计算步中,系统包括质量和加速度两个重要参数,建立基元动力学平衡方程,使用弹性动力有限元计算.关于基元损伤准则,主要是符合最大拉应力准则或者 Mohr-coulomb 准则,计算如式(1):

$$-\sigma_3 \geq \frac{f_{c0}}{k}, \sigma_1 - \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \sigma_3 \geq f_{c0}. \quad (1)$$

2 有限直杆模型及实施方案

研究考虑有限长均匀岩石直杆试样作为分析目标,设置不同直杆和限制条件,施加给定冲击载荷,探讨其应力波传播形态与破裂特征.试样几何尺寸以及加载边界条件如图1所示.受载端为简支,远端为固支(模型I)或自由端(模型II),进行岩石试件单轴冲击压缩试验.模型I试样尺寸 300 mm × 50 mm,划分为 300 × 50 个网格基元.模型II尺寸 200 mm × 10 mm,划分为 200 × 10 个网格基元.模型I、II直杆力学性质参数见表1.

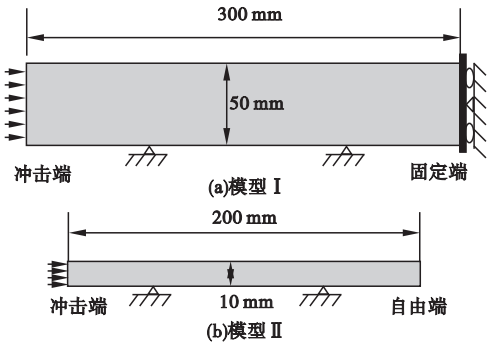


图1 岩石直杆试样

Fig.1 Specimen of rock bars

表1 均匀试样力学性质参数

Table 1 Mechanical properties of homogeneous specimens

模型	弹性模量/ GPa	泊松比	单轴抗压 强度/MPa	密度/ 10^{-6} ($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	拉压比
I	70	0.25	200	2.5	10.5
II	60	0.25	200	2.5	10.5

直杆试件冲击端施加荷载类型如图2所示,共有5种直角三角形冲击荷载.在模型I的冲击端部,施加荷载I,主要进行杆中应力传播特性分析;对模型II,为了研究荷载的不同卸荷率对直杆层裂破坏模式的影响,在直杆冲击端依次施加I~V不同卸荷率的冲击荷载,相应进行数值模拟.在程序计算中,设置时间步长 $\Delta t = 0.1 \mu\text{s}$,计算每个试样终止时间 $t = 120 \mu\text{s}$.对于轴对称直杆模型,可以采用平面应力方法进行研究.根据公式 $v =$

$(E/\rho)^{1/2}$ (E 为弹性模量, ρ 为密度), 可以计算出直杆模型 I、II 中一维纵波速度分别为 $v_1 = 5\,291.50\text{ m/s}$ 、 $v_2 = 4\,899\text{ m/s}$. 而模型 II 冲击荷载卸荷率分别为 $\kappa_I = 8\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $\kappa_{II} = 4\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $\kappa_{III} = 2\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $\kappa_{IV} = 1\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $\kappa_V = 0.5\text{ MPa}/\mu\text{s}$. 分别对均匀试件进行模拟比较, 研究应力波在杆内往复传播过程及破坏形态.

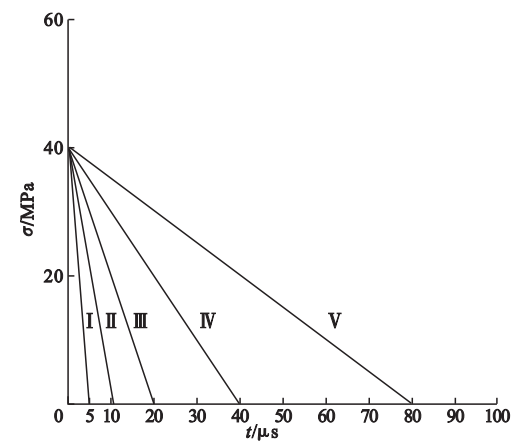


图2 岩石直杆受力端的冲击荷载

Fig. 2 Impact loading on the bearing top of rock straight bar

3 数值模拟结果与分析

3.1 弹性应力波在固定直杆中的传播

理论上, 在任何有界的介质中, 应力波的传播可以用位移表示各向同性介质的运动方程, 再结合给定的相应边界条件, 求解这些方程. 但是若传播介质边界有多个自由面, 应力波在平面界面上发生复杂的反射, 单纯采用数学方程解决问题显得十分困难.

此前, 已有学者采用几何方法来证明直杆中应力波形态传播^[17], 如图 3(a) 所示. 若在某种介质上施加一个冲击荷载, 相应产生一个应力波, 当应力波沿杆向右传播时, 也会沿边界自由面运动, 这样相关膨胀、剪切及其反射等彼此相互作用. 假设在某自由面 GA 上, 应力波通过质点 A 时, A 点被挤压有向外发生自由膨胀的可能性, 将导致 A 点向上运动的同时, 还有向

前运动趋势, 称前者称为旁侧运动, 后者为向前运动. 类似原理, 上下自由面上的任意切点, 遇到波前通过, 都可能发生上述两种运动. 由于两种运动合成效果, 相当自由面 GA 上产生了一个倾斜入射应力波, 经过自由面反射后, 导致子膨胀波和子剪切波的出现, 意味着大量的剪切波和拉伸波将不断地产生. 对于应力波在自由边界产生的膨胀影响区, 亦可以通过几何方法求出. 其内部波形示意图中, 波前 AB 位置所示箭头表示各波前的运动方向, 而 BC 与 AD 分别是尾随而至的压缩膨胀波、剪切波, 是表面应力波膨胀产生的. 相关波前 BC 和 AD 在自由边界反射后, 将类似发生剪切波 DE 和 CF, 直到后续越来越多的波单元产生. 通过图 3 所示几何分析波形示意图和数值模拟结果应力波传播图对比分析, 可以更加形象地了解应力波在均匀试件中传播形成, 与理论几何解析推导的传播波形具有很好的一致性.

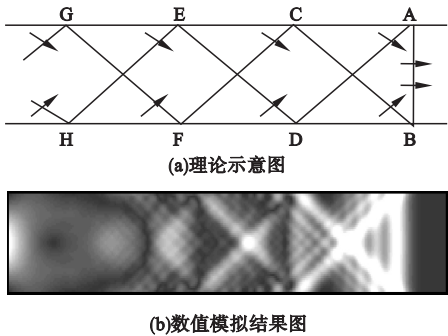


图3 杆中内部波形传播图

Fig. 3 Propagation of stress wave on rock bar

将岩石视为弹性介质时, 施加荷载后杆内不同时刻的应力波状态如图 4 所示. 可以看出, 对杆中应力波传播有重要影响的时间分为两个阶段. 第一阶段, 应力波从有限长杆的左端传递到右端即固定端之间, 杆中应力波传播特性半与无限长杆中的状态符合, 仅存在右行简单的应力波; 第二阶段, 是从杆固定端产生反射应力波向左行开始, 此时从杆左端向右行的应力波仍在继续, 则后续入射波将与反射波发生相互叠加作用, 固定端附近比其他位置波形分布复杂.

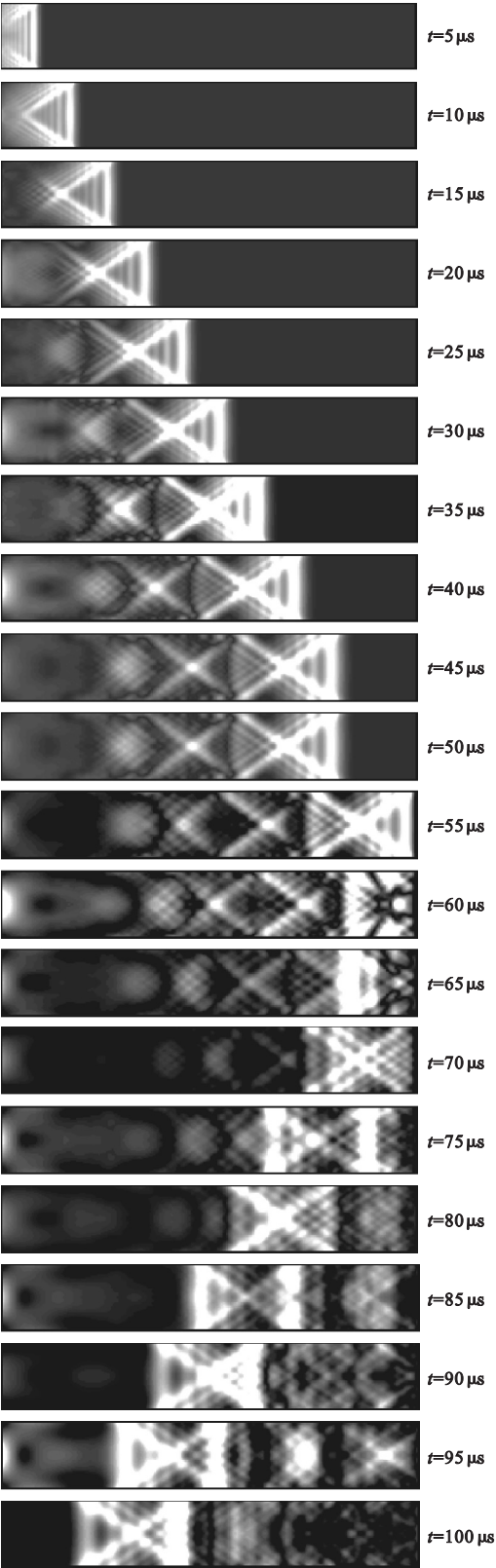


图 4 均匀直杆应力波传播过程模拟图

Fig. 4 Plot of stress wave propagation in a uniform rock bar

根据前述理论计算所得杆中应力波传播速度,针对不同弹性模量的有限长直杆,可以计算出应力波从冲击端传播到固定端或者自由端的时间数值.如模型 I 中,应力波到达固定端时间为 $56.6\text{ }\mu\text{s}$;模型 II 中,应力波到达自由端的时间为 $40\text{ }\mu\text{s}$ (见图 5).对比图 4 和图 5 所示应力波传播过程模拟结果,显示应力波传播时间与理论计算结果基本一致.



图 5 模型 II 应力波在自由端反射之前传播过程
Fig. 5 Propagation process of stress waves before reflection at the free end of model II

图 6 为不同时刻应力波传播应力曲线.在模型 I 上施加一个直角三角冲击荷载,峰值为 40 MPa ,持续时间为 $5\text{ }\mu\text{s}$.在直杆中心轴线上分别取 $120\text{ }\mu\text{s}$ 时间段内每间隔 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的应力波传播状况,当时间为 $10\text{ }\mu\text{s}$ 、 $20\text{ }\mu\text{s}$ 、 $30\text{ }\mu\text{s}$ 、 $40\text{ }\mu\text{s}$ 、 $50\text{ }\mu\text{s}$ 、 $60\text{ }\mu\text{s}$ 、 $70\text{ }\mu\text{s}$ 、 $80\text{ }\mu\text{s}$ 、 $90\text{ }\mu\text{s}$ 、 $100\text{ }\mu\text{s}$ 、 $110\text{ }\mu\text{s}$ 、 $120\text{ }\mu\text{s}$ 时,其应力波峰值分别为 33.44 MPa 、 28.10 MPa 、 25.09 MPa 、 22.74 MPa 、 20.72 MPa 、 31.82 MPa 、 19.94 MPa 、 19.15 MPa 、 19.01 MPa 、 18.81 MPa 、 18.84 MPa .可以看到不同时间波的传播,应力波峰值总体上满足某种衰减规律,逐渐减小,因为杆中自由面作用下不断产生的子膨胀波和子剪切波会不断消耗应力波的能量,导致波前强度不断下降.但是其中 $60\text{ }\mu\text{s}$ 对应的应力波峰值为 31.82 MPa ,大于相邻时间的应力波峰值,分析原因是由于右传应力波经固定端反射后形成的左传压缩波相互叠加后的影响,这也说

明压缩波的波形在固定端反射后仍然是压缩波。

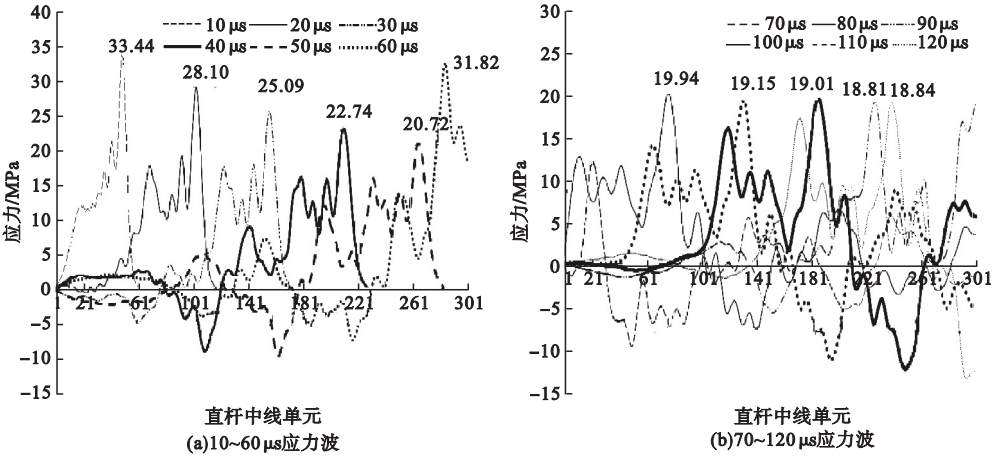


图 6 模型 I 直杆中不同时刻应力波应力曲线

Fig. 6 Stress curves of stress wave in different time on rock bar of model I

3.2 不同卸载率对杆破坏模式影响

因为地震、爆破、或者地应力释放等皆产生冲击荷载作用,并往往以应力波的形式在岩体中传播. 由于动力加载下的应力波效应和惯性效应,直杆在轴向冲击力下的动力破裂与静力失稳具有明显的不同. 对于岩石材料,由于抗压强度远大于抗拉强度,故设置模型 II 的右端边界为自由端,应力波经过自由端发生反射后产生拉伸波,更易导致岩石直杆拉伸破坏.

根据前述可知,对模型 II 施加的 5 种冲击荷载的卸荷率 k 分别为 $8\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $4\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $2\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $1\text{ MPa}/\mu\text{s}$ 、 $0.5\text{ MPa}/\mu\text{s}$,即冲击荷载作用在直杆受力端的持续时间逐渐延长. 压缩波经自由面发生反射会形成拉伸波,新产生的拉伸波将与先前入射的压缩波合成为新的应力波,即力波的叠加现象,导致局部应力集中;当距离自由面某位置上造成拉应力强度满足某种动态的断裂准则时,则有单元必然在该处发生介质拉伸破坏,若破坏单元足够多,宏观表现为足够大的裂纹贯通时,表现为整块裂片脱离直杆母体.

选取模拟计算时间 $t = 90\text{ }\mu\text{s}$ 时直杆破裂结果,分析 5 种不同卸荷率的加载模式差异,结果见图 7. 初始施加峰值荷载相同,均

为 $\sigma = 40\text{ MPa}$,远小于岩石单轴抗压强度 200 MPa ,从而保证冲击端不会发生局部压缩破坏. 对于荷载 I ~ V 的加载模式,即荷载卸荷的持续时间逐渐延长,也就是卸荷率数值逐渐降低,一旦冲击荷载撞击介质界面后,将导致试件内产生应力波的覆盖范围具有明显的区别. 杆中应力波最前端经过右端自由面时发生反射,出现拉伸波. 卸荷率越慢,应力波波长越长,相对其他卸荷率较快的加载模式,前者将有更多后续入射压缩波发生反射产生拉伸波,也就是更强拉应力作用直杆介质上. 如果其拉应力大于试件的动态抗裂强度时,就出现层状剥落. 当第一层剥落破裂出现的同时,也产生一个新的自由面,并立即对原来入射波的剩余部分进行反射,如果这部分拉伸波照样符合介质的动态断裂准则时,第二次层裂就会出现. 以此类推,在满足一定峰值荷载条件下,会随着峰值荷载的卸荷率降低,将能形成更多的层裂数目. 这个过程一直要进行到应力波的后部分不再大于临界正常破裂强度为止. 由此可知,层裂从右至左逐渐发生,且卸荷率越大,层裂次数越少,层裂间距越短;反之,卸荷率越小,层裂次数增加,层裂间距增大趋势.

王礼立等^[21-22]学者对施加三角形应力

波在岩石杆件自由面反射时造成的层裂现象进行了研究,最后得出结论:当 $n\sigma_i \leq \sigma_m \leq (n+1)\sigma_i$ (σ_m 为应力波峰值, σ_i 为岩石抗拉强度)时,岩石杆件将发生 n 次断裂的重要结论。从本次数值模拟结果看,杆件发生拉伸剥落次数不仅与峰值大小有关,亦与荷载作用的持续时间紧密相关,峰值荷载 40 MPa 约为抗拉强度的 2 倍,当荷载持续时间为 $t = 5$ s,与上述结论吻合,但是当 $t > 5$ s 时,就不适合此结论。尤其持续时间越长,断裂次数越多,而且在某些不同时间内,先后断裂长度不同,如图 7(a)、(b)、(c) 和 (e),断裂开始较短,且后断的长度大于先断的长度;图 7(e) 中断裂,总体上长短断裂间隔分布;图 7(d) 中断裂长度基本相等,故断裂长度与时间有关。

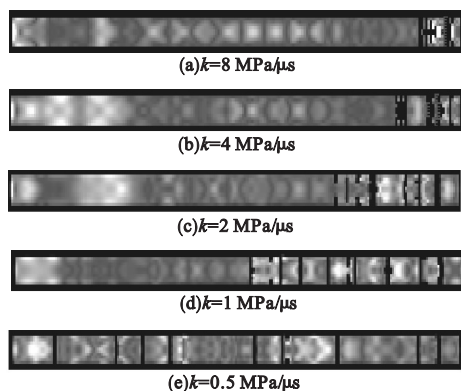


图 7 $t = 90 \mu\text{s}$ 时模型 II 不同卸荷率的拉伸断裂结果

Fig. 7 Tensile fracture result of Model II with different unloading rates for $t = 90 \mu\text{s}$

4 结 论

(1) 岩石抗压强度远大于其抗拉强度,当冲击端或固定端承受压应力低于抗压强度,难以出现局部化破裂现象,而在自由端因反射波拉伸引起拉应力大于抗裂强度,常常出现局部破裂现象。

(2) 应力波传播过程中,因产生大量子膨胀波和子剪切波不断消耗能量,应力波峰值强度而不断降低,最后趋于平稳。

(3) 岩石直杆自由端发生层裂起始位置

及裂纹间距与卸荷率有密切关系。相同峰值荷载情况下,卸荷率越大,起始层裂位置越靠近自由端,层裂间距越小;卸荷率越小,层裂位置及间距越大。总体而言,层裂间距不是均匀分布。

参考文献

- [1] 鲁义强,张盛,高明忠,等. 多次应力波作用下 P-CCNBD 岩样动态断裂的能量耗散特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1106 - 1114.
(LU Yiqiang, ZHANG Sheng, GAO Mingzhong, et al. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2018, 37(5): 1106 - 1114.)
- [2] YANG Junxiong, SHI Chong, YANG Wenkun, et al. Numerical simulation of column charge explosive in rock masses with particle flow code[J]. Granular matter, 2019, 21(4): 1 - 17.
- [3] 彭维红,卢爱红. 应力波作用下巷道围岩层裂失稳的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 213 - 216.
(PEN Weihong, LU Aihong. numerical simulation of layered crack and failure of roadway surrounding rock under the action of stress wave [J]. Journal of mining & safety engineering, 2008, 25(2): 213 - 216.)
- [4] CHRISTENSEN R J, SWANSON S R, BROWN W S. Split-hopkinson bar tests on rock under confining pressure [J]. Experimental mechanics, 1972, 12(11): 508 - 513.
- [5] ROME J, ISAACS J, NEMAT N S. Hopkinson techniques for dynamic triaxial compression tests [C]//Recent advances in experimental mechnics. Netherlands: Kluwer academic publishers, 2002.
- [6] 李夕兵,宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251 - 260.
(LI Xibing, GONG Fengqiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(2): 251 - 260.)
- [7] 李成杰,徐颖,张宇婷,等. 冲击荷载下裂隙类煤岩组合体能量演化与分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2231 - 2241.
(LI Chengjie, XU Ying, ZHANG Yuting, et al. Study on energy evolution and fractal characteristics of cracked coal-rock-like combined body under impact loading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(11): 2231 - 2241.)

- [8] HUANG X, QI S, WILLIAMS A, et al. Numerical simulation of stress wave propagating through filled joints by particle model [J]. International journal of solids & structures, 2015, 69/70: 23 – 33.
- [9] 赵坚, 陈寿根, 蔡军刚, 等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2): 111 – 115.
(ZHAO Jian, CHEN Shougen, CAI Jungang, et al. Simulation of blast wave propagation in joint rock mass using UDEC [J]. Journal of China of mining & technology, 2002, 31(2): 111 – 115.)
- [10] ZHAO J. Application of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamic strength of brittle rock [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2000, 37(7): 1115 – 1121.
- [11] 高文学, 杨军, 黄风雷. 强冲击载荷下岩石本构关系研究 [J]. 北京理工大学学报, 2000, 20(2): 165 – 170.
(GAO Wenxue, YANG Jun, HUANG Fenglei. The constitutive relation of rock under strong impact loading [J]. Journal of Beijing institute of technology, 2000, 20(2): 165 – 170.)
- [12] 徐颖, ZHANG Junchen, 姚伟, 等. 花岗岩动态断裂能各向异性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 1): 3231 – 3238.
(XU Ying, ZHANG Junchen, YAO Wei, et al. Experimental study of dynamic fracture energy anisotropy of granitic rocks [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2018, 37(S1): 3231 – 3238.)
- [13] 田振农, 李世海, 肖南, 等. 应力波在一维节理岩体中传播规律的试验研究与数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008(增刊 1): 2687 – 2693.
(TIAN Zhenong, LI Shihai, XIAO Nan, et al. Experimental studies and numerical simulation of stress wave propagation in one – dimensional rock mass [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008(S1): 2687 – 2693.)
- [14] 王学滨, 马冰, 潘一山, 等. 巷道围岩卸荷应力波传播及垮塌过程模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1259 – 1266.
(WANG Xuebin, MA Bing, PAN Yishan, et al. Numerical simulation of the stress wave propagation and collapsing process of the tunnel surrounding rock [J]. Journal of China university of mining & technology, 2017, 46(6): 1259 – 1266.)
- [15] 马冰, 王学滨, 白雪元. 卸荷时间对圆形巷道围岩开裂及径向应力波传播影响的数值模拟 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 98 – 105, 116.
(MA Bing, WANG Xuebin, BAI Xueyuan. Numerical simulation of the influence of unloading time on the cracking and stress wave propagation in a circular tunnel surrounding rock [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2019, 39(1): 98 – 105, 116)
- [16] 于滨, 刘殿书, 乔河, 等. 爆炸载荷下花岗岩动态本构关系的实验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(6): 552 – 555.
(YU Bin, LIU Dianshu, QIAO He, et al. Experimental study on granite constitutive relation under blasting load [J]. Journal of China university of mining and technology, 1999, 28(6): 552 – 555.)
- [17] 黄志平, 唐春安, 朱万成, 等. 动载荷条件下波长对岩石试件破坏模式影响的数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2007(7): 1048 – 1053.
(HUANG Zhiping, TANG Chun'an, ZHU Wancheng, et al. Numerical simulation on failure modes of rock bars under different wave lengths [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2007(7): 1048 – 1053.)
- [18] ZHU W C, TANG C A. Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2006, 43(2): 236 – 252.
- [19] CHAU K T, ZHU W C, Tang C A, et al. Numerical simulations of failure of brittle solids under dynamic impact using a new computer program _ DIFAR [J]. Key engineering materials, 2004, 265(1): 1517 – 1522.
- [20] 宋守志. 固体介质中的应力波 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
(SONG Shouzhi. Stress waves in solid media [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1990.)
- [21] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
(WANG Lili. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.)
- [22] 单仁亮, 黄宝龙, 程先锋, 等. 应力波随机入射情况下均质岩石杆件断裂规律的理论分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 666 – 672.
(SHAN Renliang, HUANG Baolong, CHENG Xianfeng, et al. Theoretical analyses of fracture regulation of homogeneous rock bar in case of random incidence of stress wave [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(4): 666 – 672.)
- [23] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading [J]. Engineering structures, 2019, 181: 124 – 142.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)