

动载下含孔洞岩石试样动态破坏过程模拟

沙润东, 梁正召, 钱希坤

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用 RFPA3D 数值模拟软件对动载下含圆形孔洞岩石试样的动态破坏过程进行了模拟, 探讨了孔洞半径、应力波加载速率及峰值对含孔洞岩体动载下破坏过程的影响。研究表明, 含孔洞岩体动态破坏过程及破坏强度与孔洞直径、应力波峰值和加载速率密切相关。相同动载下, 随着孔洞半径的减小, 非均匀性将对含孔洞岩石的裂纹扩展模式起主导作用; 应力波峰值由小增大时, 孔洞周边初始裂纹形态由类“一”型, 逐渐变为类“Y”型、类“X”型; 应力波加载速率对层裂裂纹的萌生和分布有很大影响。当应力波加载速率较大时, 层裂较集中地分布在模型右侧; 当应力波加载速率小时, 层裂裂纹出现的初始位置逐渐向模型左侧偏移; 当加载速率小于一定值时, 层裂裂纹将不会出现。数值模拟与岩石霍布金森压杆 (SHPB) 试验结果吻合, 表明该数值模拟方法上可行, 结论上可靠。研究成果反映了含圆形孔洞岩石试样裂纹扩展与延伸规律, 可为岩体工程在动荷载作用下的防灾减灾提供参考和指导。

关键词: 动载; 孔洞试样; 数值试验; 裂纹扩展

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0065—06

Numerical Simulation of Rock Specimens Failure Mode with a Single Hole Under Dynamic Loading

SHA Rundong, LIANG Zhengzhao, QIAN Xikun

(State Key Laboratory Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to simulate the dynamic failure process of rock specimens with a single circular hole under dynamic loading, the dynamic version RFPA3D numerical simulation software is adopted. The influence factors such as hole radius, stress wave peak and loading rate on the dynamic failure process of rock mass are discussed. The simulation results show that the dynamic failure process and fracture strength of the rock mass with a single hole are strongly related to diameter, stress wave peak and loading rate. The heterogeneity will play a dominant role in the crack propagation mode of the rock with the decrease of diameter of the hole under the same dynamic load. With the increment of the stress wave peak value, the initial crack shape around the hole gradually transform from the “一” type to the “Y” type and “X” type. The loading rate of the stress wave has huge influences on the initiation and distribution of slabbing crack. When the loading rate of the stress wave is large, the slabbing is concentrated on the right side of the model; when it is small, the initial position of the slabbing crack gradually shifts to the left side of the model. In addition, when the loading rate is less than a certain value, the slabbing crack does not appear. The numerical simulation is in good agreement with the rock Hopkinson bar (SHPB) test results, which indicated that the numerical simulation method is feasible and the conclusion is reliable. The research results could reflect the crack propagation and extension law of rock specimens with circular holes, which can provide reference and guidance for disaster prevention and mitigation under the dynamic load of rock mass engineering.

Keywords: dynamic load; single hole specimen; numerical experiment; crack propagation

岩石作为一种天然的非均质各向异性材料,含有许多微裂隙和孔洞等缺陷。裂纹往往在这些缺陷处孕育、萌生、扩展,最终相互贯通导致岩体失稳,因此对于含有裂隙和孔洞的岩石试样的裂纹扩展规律这一问题,众多学者进行了许多的理论探讨、物理试验和数值模拟研究。例如张通等^[1]、李地元等^[2]和张闯等^[3]利用单轴压缩实验研究了不同加载速率、孔洞形状、孔洞数量对岩石破坏特性的影响。在含缺陷岩石试样的动力学研究方面取得了很大的进展。以裂纹扩展规律为例,郭东明等^[4]探究了动静组合应力场作用下邻近巷道背爆侧裂纹缺陷的扩展规律。赵洪宝等^[5]对含孔洞煤体试件在局部荷载作用下的裂纹扩展规律进行了系统的试验研究。李地元等^[6]对大理岩圆环试样进行动态劈裂试验,研究了裂纹扩展模式的变化规律。高桂云等^[7]和岳中文等^[8-9]均使用了动态焦散线实验系统,分别研究了岩石的损伤对裂纹动态扩展的影响及爆炸荷载作用下空孔对爆生主裂纹扩展行为的影响。对含缺陷岩石试样的动力学研究还多用于岩石的动态断裂问题,周磊等^[10]开展了含预制裂纹的巷道模型在冲击荷载下动态断裂响应实验,并计算了相关断裂参数。王蒙等^[11]基于提出的单裂纹半孔板构型研究了裂纹在冲击荷载作用下的动态断裂行为。

上述研究均是采用理论与物理试验结合的方式。然而在岩石三维裂纹研究中,不仅岩石试样制作成本高昂,而且应力强度因子、裂纹扩展路径等难以测量。因此,需要考虑多种研究手段来系统研究岩石裂纹扩展规律。数值计算是对试验分析和理论研究的有益补充,特别是在二维、三维预制裂纹扩展研究方面,能够很好模拟复杂的内置预制裂隙,因此从某种意义上讲数值模拟比室内试验更具优势。廖志毅等^[12-13]利用 RFPA 软件分析了岩体在爆炸应力波作用下的破碎特征及板状岩体在撞击荷载下的破坏特征均取得较好的结果。

岩体工程在动载作用下响应的本质是应力波在节理中的传播问题,岩体的节理、缺陷不仅阻碍应力的传播,还会发生应力波的透反射及应力波叠加等复杂的现象。与研究岩体中节理对应应力波传播的阻碍作用相比,更为重要的是研究应力波对含缺陷岩体破坏模式的影响。针对冲击荷载下孔洞周边岩石裂纹开裂、扩展和贯通这一问题,何满潮等^[14]通过真三轴加载扰动试验得到了含有孔洞缺陷的岩体的破坏模式。李地元等^[15]通过使用霍普金森压杆开展了冲击荷载作用下含孔洞大理岩破坏特性的物理

实验研究,发现孔洞的存在降低了试样的动态抗压强度。在三维条件高应变率下,孔洞半径、应力波对岩体裂纹扩展规律具有何种影响仍有待探究,因此本文采用 RFPA3D 动力学软件对单孔岩石试样的破坏模式进行研究,对不同孔洞半径、应力波加载速率及峰值下的岩体破坏过程进行了深入分析,为岩石三维动态裂纹扩展机理的研究提供参考。

1 数值模拟模型

本文采用 RFPA3D 动力分析系统,模拟动荷载作用下岩石等非均匀脆性材料的破裂过程。根据模型试验^[15]几何和力学参数,所采用的计算模型如图 1 所示,模型尺寸为 80 mm × 80 mm × 20 mm,单元个数为 160 × 160 × 40 = 1024000 个,模型四周为自由边界,采用摩尔-库仑强度准则。在试样的左表面施加三角形波的冲击荷载。岩体中的宏观节理采用空洞材料。数值模拟参数见表 1。图 2 和图 3 给出施加在单元节点上的荷载示意图。荷载 I—荷载 IV 为应力波峰值 3.9 N,到达峰值时间分别为 10 μs、15 μs、30 μs、40 μs,即荷载 I 加载速率最快,荷载 IV 加载速率最慢;荷载 V—荷载 VIII 为应力波均在第 30 μs 达到峰值,峰值分别为 3.0 N、3.5 N、4.0 N、4.5 N。

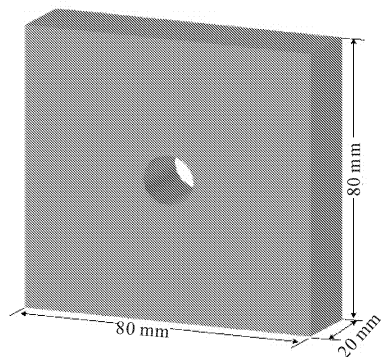


图 1 计算模型

本文主要研究以下 3 种工况:(1)孔洞半径 R 尺寸不同,分别取为 3 mm、5 mm、6 mm、10 mm,应力波均采用荷载 III;(2)孔洞半径尺寸固定为 5 mm 不变,应力波峰值不同,分别采用荷载 V—荷载 VIII;(3)孔洞半径尺寸固定为 5 mm 不变,应力波加载速率不同,分别采用荷载 I—荷载 IV。

表 1 材料参数

均质度	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	泊松比	内摩擦角 /($^{\circ}$)
5	37.5	260	0.3	30

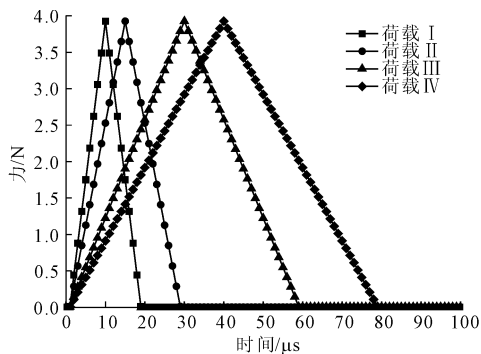


图2 荷载 I—荷载 IV 示意图

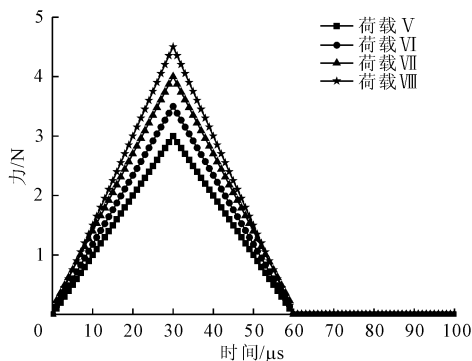
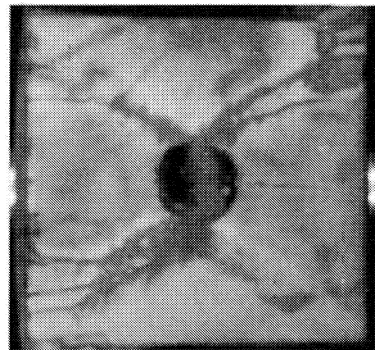
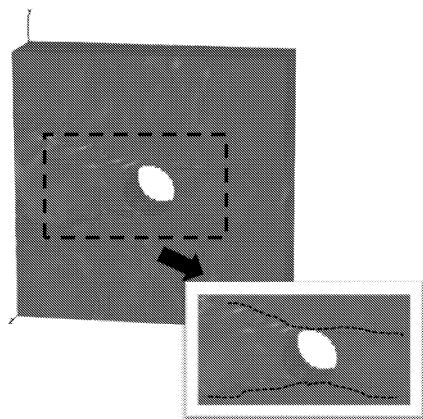


图3 荷载 V—荷载 VIII 示意图



(a) 试验结果



(b) 数值模拟结果

图4 试验结果^[15]与数值模拟结果对比

2 计算结果分析

2.1 模型验证

为确保模拟结果的准确性和可对比性,首先通过与文献[15]中的物理试验对比验证数值模拟结果的准确性。试验采用的直径为75 mm的霍普金森压杆(SHPB)水平冲击试验平台,试验材料为大理岩岩石试样,大理岩的宏观弹性模量、单轴抗压强度和泊松比分别为25.5 MPa,8.5 GPa和0.3。孔洞半径为5 mm。图4所示为针对文献中SHPB冲击试验的数值模拟结果,可以看出数值模拟完整再现了SHPB试验中含孔洞大理石试样在应力波作用下呈现的类“X”型裂纹扩展形态,以及在孔洞水平方向上出现的沿加载方向扩展的横向裂纹。与文献中的试验结果具有较好的一致性。

2.2 孔洞周边应力分析

根据波动力学及弹性动力学,对模型施加动力学载荷后,应力波将会在孔洞界面迎波侧发生应力波的透反射。应力波在传播过程中,随着传播距离的增加,将会出现应力波峰值的衰减,衰减规律如下:

$$\sigma_r = P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^\alpha \sigma_\theta = \lambda_d \sigma_r \quad (1)$$

式中: P_0 为圆形孔洞所施加的初始压力,MPa; σ_r 为介质中任意一点径向应力,MPa; σ_θ 为介质中任意一点的环向应力,MPa; r_0 为炮孔半径,m; r 为介质中任意一点到爆破孔的距离,m; α 为应力波衰减系数, $\alpha = 2 - (v/1 - v_d)$; v_d 为介质的动态泊松比, $v_d = 0.8v$; λ_d 为动态侧应力系数, $\lambda_d = v/(1 - v_d)$ 。

应力波在含圆形孔洞介质中传播过程中,由于应力波的透反射,将会沿孔洞四周出现应力集中。图5是圆形空孔动载作用下受力分析图^[16]。根据弹性动力学相关理论分析,孔洞四周的峰值应力状态为:

$$\sigma_{rm} = \frac{1}{2}(1 - \kappa^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 - 4\kappa^2 + 3\kappa^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta m} = \frac{1}{2}(1 + \kappa^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 + 3\kappa^2)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (3)$$

$$\tau_{rm} = \frac{1}{2}(1 + 2\kappa^2 - 3\kappa^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{r_2}{R} \quad (5)$$

式中: σ_{rm} 为应力波在孔洞反射后的径向应力,MPa; $\sigma_{\theta m}$ 为应力波在孔洞反射后的环向应力,MPa; r_2 为介质的圆形孔洞半径,m; R 为介质中任意一点到孔

洞中心的距离, m ; θ 为计算点到炮孔中心连线与炮孔和孔洞圆心连线的夹角, ($^\circ$)。对上式求 $\frac{d\sigma_{\theta\theta}}{d\theta}$, 令 $\frac{d\sigma_{\theta\theta}}{d\theta} = 0$, 得 $\theta = 0, \pm\pi$, 可知径向应力、环向应力及剪切应力的最大值均出现在炮孔与圆形孔洞连线方向上, 此时:

$$\sigma_{rm} = \frac{1}{2}(1 - \kappa^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 - 4\kappa^2 + 3\kappa^4)(\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta m} = \frac{1}{2}(1 + \kappa^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{1}{2}(1 + 3\kappa^2)(\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (7)$$

$$\tau_{rm} = \frac{1}{2}(1 + 2\kappa^2 - 3\kappa^4)(\sigma_\theta + \sigma_r) \quad (8)$$

在圆孔孔壁上时, $r_2 = R$, 即 $\kappa = 1$, 得: $\sigma_{rm} = 0$, $\tau_{rm} = 0$,

$$\sigma_{\theta m} = 3\sigma_\theta + \sigma_r = (3\lambda_d + 1)P_0\left(\frac{r_0}{a - r_2}\right)^\alpha \quad (9)$$

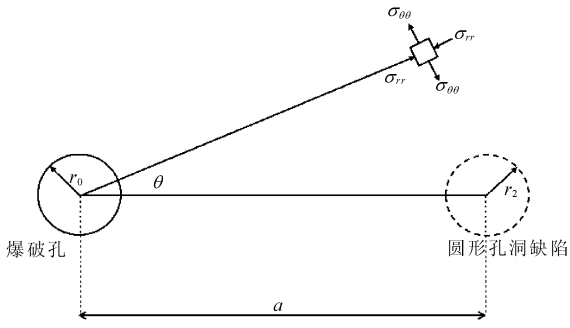


图 5 圆形空孔动载作用下受力分析图

此外, 为进一步方便计算, 建立如图 6 所示的极坐标系(以孔洞中心为原点、冲击载荷方向为 X 轴, 垂直于加载方向为 Y 轴)。点 P 为孔洞周边岩石中的任意一点, a 为径向线上距原点的距离。点 P 极坐标为 (θ, a) 。由弹性力学基尔希公式知点 P 应力分量为:

$$\sigma_{rp} = \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\frac{q_1(t) + q_2(t)}{2} + \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \left(1 - 3\frac{a^2}{r^2}\right)\frac{q_1(t) - q_2(t)}{2}\cos 2\theta \quad (10)$$

$$\sigma_{\theta p} = \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)\frac{q_1(t) + q_2(t)}{2} - \left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right) \cdot \frac{q_1(t) - q_2(t)}{2}\cos 2\theta \quad (11)$$

$$\tau_{rp} = \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right)\frac{q_1(t) - q_2(t)}{2}\sin 2\theta \quad (12)$$

式中: σ_{rp} 为计算点 P 处的径向应力; $\sigma_{\theta p}$ 为计算点 P

处的切向应力; τ_{rp} 为计算点 P 处的剪应力; $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 分别为试件所受到的水平应力分量和竖直应力分量。在本文数值模拟方案中, $q_2(t) = 0$ 。在平行于加载方向的孔洞周边有 $a = r, \theta = 0^\circ$ 或 180° , 此时 $\sigma_{rp} = \tau_{rp} = 0, \sigma_{\theta p} = -q_1(t)$, 产生拉应力。产生的拉应力使得介质在水平方向形成拉伸裂纹。在垂直于加载方向的孔洞径向周边有 $a = r, \theta = 90^\circ$ 或 270° , 此时 $\sigma_{rp} = \tau_{rp} = 0, \sigma_{\theta p} = 3q_1(t)$, 产生压应力集中。即在压应力集中区域, 易发生压剪破坏, 最终形成剪切裂纹。

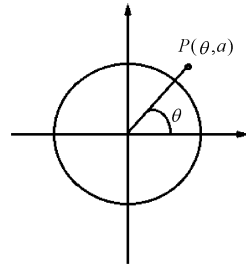


图 6 极坐标系示意图

2.3 预制孔洞半径对岩石试样破坏的影响

以孔洞半径 6 mm 试样为例加以详细说明。图 7 是孔洞半径 6 mm 试样破坏过程的 X 方向位移图。冲击荷载作用下, 由于孔洞的反射效应、应力集中效应以及卸荷效应, 孔洞周边产生类“X”型剪切斑点区域和以孔洞为中心的拉伸斑点区域。随着应力波的持续施加, 第 40 μs , 在孔洞上下两端出现近似平行于加载方向的裂纹, 呈类“X”形状向两侧扩展。第 60 μs , 孔洞上下两端裂纹扩展到试样左右两端, 在孔洞靠近自由面一侧出现细小的水平向裂纹。第 65 μs 细小的水平向裂纹与之前孔洞上端的裂纹相贯通并继续扩展, 试样上下两端开始出现层裂裂纹。随着计算进行, 层裂裂纹逐渐与之前孔洞处裂纹贯通, 裂纹发育趋于稳定, 给出第 100 μs 稳定后的 X 方向位移图(见图 7)。

图 8 是孔洞半径为 3 mm、5 mm、6 mm、10 mm 试样破坏趋于稳定后的 X 方向位移对比图。对比含不同半径孔洞的岩石试样破坏的 X 方向位移图可以看出, 相同动载下, 4 种半径的圆形孔洞试样一般均在圆形孔洞周边形成近似平行于加载方向的裂纹, 随后在孔洞靠近自由面一侧产生细小的水平向裂纹与之前的裂纹贯通扩展至试样左右两端, 孔洞周边裂纹整体呈类“X”型。之后, 在试样上下两端产生层裂裂纹, 与初始裂纹相互贯通, 试样破坏。但可以看出, 随着孔洞直径的减小, 孔洞萌生的两条剪切裂纹夹角逐渐增大, 当孔洞半径减小至 3 mm 时,

岩石材料的非均匀性将对含孔洞岩石的破坏模式起主导作用。

此外,随着荷载峰值的增加,试样破坏越来越严重。

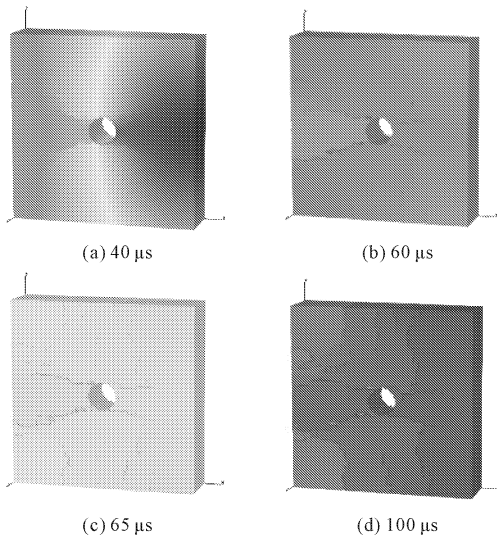


图7 孔洞半径6 mm 试样破坏过程 X 方向位移图

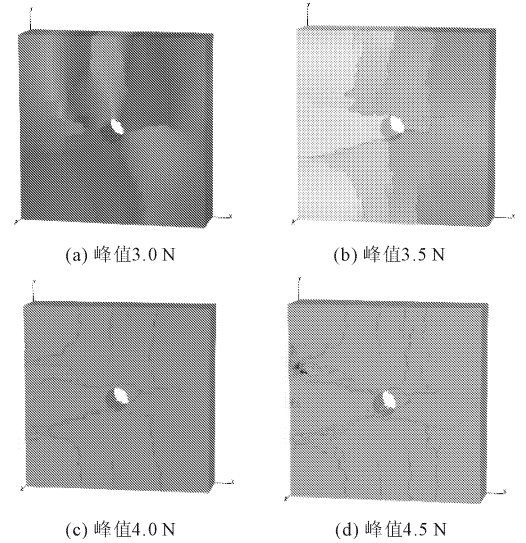


图9 不同加载峰值试样破坏过程 X 方向位移图

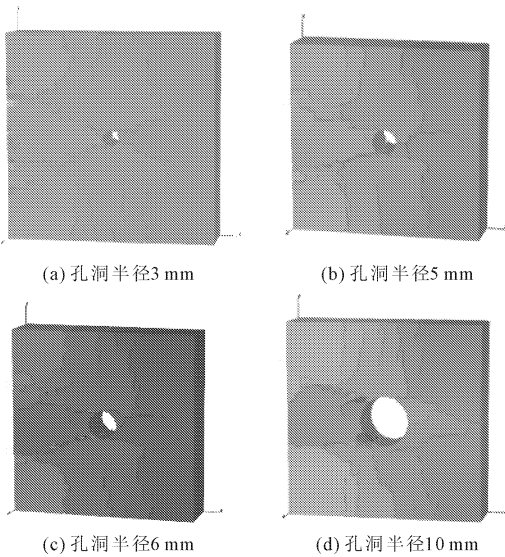


图8 不同孔洞半径试样破坏过程 X 方向位移图

2.4 冲击载荷峰值对岩石试样破坏的影响

为了说明冲击载荷峰值强度对岩石试样破坏过程的影响,固定圆形孔洞半径及冲击荷载加载速率不变,改变冲击荷载加载的峰值进行数值模拟计算。图9是冲击荷载峰值分别为3.0 N、3.5 N、4.0 N、4.5 N时,岩石试样破坏过程的 X 方向位移图。从图9可以发现,与2.3节相比孔洞岩石试样的破坏模式近乎相同。但当冲击荷载峰值是3 N时,孔洞左右侧均只有一条近似水平向裂纹,初始裂纹整体形态呈“一”字型。当冲击荷载峰值是3.5 N时,孔洞右侧只有1条初始裂纹,初始裂纹整体形态呈“Y”型。而当冲击荷载峰值变大,孔洞右侧初始裂纹条数增加到3条,初始裂纹整体形态呈类“X”型。

结合2.3与2.4节,我们发现孔洞岩石在受冲击荷载情况下初始裂纹有三种模式,类“一”型、类“X”型、类“Y”型(见图10)。当冲击荷载足够大时,由2.3节可知垂直于孔洞加载方向的径向左、右周边存在压应力集中导致形成剪切区域,发生压剪破坏,最终形成剪切裂纹。平行于孔洞加载方向的径向周边产生拉应力,形成拉伸裂纹。最终初始裂纹形态整体呈类“X”型。当冲击荷载略小时,由于孔洞的存在,垂直于孔洞加载方向的径向右侧压应力不足以使试样产生破坏。而岩石抗压不抗拉的特性使得孔洞右侧依然会出现张拉破坏,形成拉伸裂纹。最终初始裂纹形态整体呈现类“Y”型。当冲击荷载很小时,垂直于孔洞加载方向的径向左、右侧压应力均不足以使试样产生破坏,但仍然会出现张拉破坏,形成裂纹,最终初始裂纹形态呈类“一”型。



图10 初始裂纹的三种形成模式

2.5 冲击载荷速率对岩石试样破坏的影响

为了说明冲击荷载施加的速率对岩石试样破坏过程的影响,固定圆形孔洞半径及冲击荷载峰值不变,改变冲击荷载加载的速率进行数值模拟计算。图11是冲击荷载分别在第10 μs、15 μs、30 μs、40 μs到达峰值情况下的岩石试样破坏过程 X 方向位移图。从图11中可以看出随着加载速率的减慢,孔洞右侧初始裂纹分叉开裂位置逐渐远离孔壁,层裂纹的分布也发生了改变。

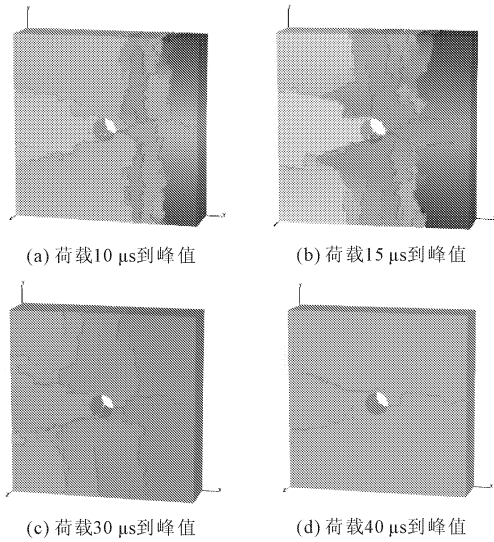


图 11 不同加载速率动载下试样破坏过程
X 方向位移图

图 12 为不同加载速率情况下层裂裂纹的对比图。比较各破坏图案顶部,发现均有不同程度的层裂现象发生,由文献[16]知半正弦入射波加载时产生初始层裂厚度的范围 $\frac{\lambda}{4} \leq \delta < \frac{\lambda}{2}$, 其中 λ 为波长, δ 为距自由面的距离。因此,快加载速率对应的波长短,初始层裂的厚度就更薄。这一规律也得到了很好的验证(如图 12 所示),加载速率快时,层裂裂纹多集中在试样的右侧,靠近右侧自由面处。随着速率减慢,层裂裂纹位置向左偏移且较分散。可见应力波加载速率会影响层裂裂纹位置。此外,基于传统解析通常只能得到初始层裂(第一条层裂)的厚度,而对于应力波多次反射叠加,很难得到解析解。基于本文方法,从模拟中可清晰地得到多级层裂裂纹的复杂图案。

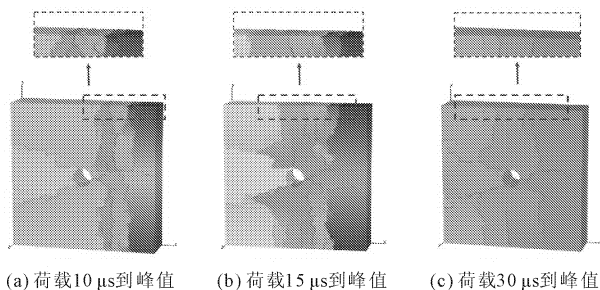


图 12 不同情况下层裂裂纹对比

3 结 论

(1) 含圆形孔洞岩石试样在冲击荷载作用下,裂纹从孔洞两端应力集中区开始萌生与扩展,孔洞

周边出现初始剪切裂纹和拉伸裂纹。这些初始裂纹与后续出现的层裂裂纹相互贯通,造成岩石试样的破坏。孔洞直径对孔洞岩石试样破坏模式具有一定的影响,随着孔洞直径的减小,孔洞萌生的两条剪切裂纹夹角逐渐增大,当孔洞直径减小到一定值后,岩石的非均匀性将作为主导因素影响孔洞岩石的裂纹扩展模式。

(2) 冲击荷载峰值对岩体破坏影响显著。冲击荷载峰值越大,岩体的破坏程度越大。冲击荷载峰值较小时,孔洞周边初始裂纹表现为由孔洞左右侧拉剪裂纹组成的类“一”型。随着冲击荷载峰值的增大,孔洞周边初始裂纹形态逐渐变为由孔洞左侧上下端剪切裂纹及孔洞右侧拉伸裂纹组成的类“Y”型,当冲击荷载峰值增大到一定值后,初始裂纹形态变为由孔洞左右端剪切裂纹及孔洞右侧拉伸裂纹组成的类“X”型。

(3) 冲击荷载的加载速率,对层裂裂纹的萌生和分布有较大的影响。冲击荷载加载速率越大,层裂裂纹出现的时间越早,且集中分布在模型右侧。随着冲击荷载加载速率减小,层裂裂纹出现时间推后,数量减少且逐渐向模型左侧边界偏移。当加载速率小于一定值时,模型试样仅有孔洞周围的裂纹出现。

参考文献:

- [1] 张 通,祝梓航,郑雪梅,等. 不同应变速率下双裂隙红砂岩力学特征试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016,14(4):64-67,72.
- [2] 李地元,朱泉企,李夕兵. 孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1):58-66.
- [3] 张 闯,唐建新,腾俊洋,等. 孔洞数量及孔径对大理岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017,38(S2):41-50.
- [4] 郭东明,刘 康,杨仁树,等. 动静荷载对邻近巷道裂纹缺陷扰动的模拟实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3):297-304.
- [5] 赵洪宝,胡桂林,王飞虎,等. 局部荷载下含中心孔洞煤体裂纹扩展特征量化分析[J]. 煤炭学报, 2017,42(4):860-870.
- [6] Li D Y, Wang T, Chen T J, et al. Static and dynamic tensile failure characteristics of rock based on splitting test of circular ring[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016,26(7):1912-1918.

(下转第 92 页)

- [3] 寇梦婕,张晔. 风化破碎类花岗岩应用于路面层性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(3):160-162,166.
- [4] 王 龙,解晓光. 水泥稳定碎石振动与静压成型物理力学指标关系[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(10):70-74.
- [5] 袁 斌,吕云青. 采用振动击实法开展水泥稳定石基层标准试验的相关影响因素研究[J]. 公路工程,2013,38(3):104-107.
- [6] 李明杰,蒋应军,张俊杰,等. 半刚性基层材料振动试验方法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(1):6-12.
- [7] 吕贵春,王 捷,陈 飞. 水泥稳定碎石无侧限抗强度与抗压回弹模量的关系[J]. 公路,2007(1):171-174.
- [8] 吕松涛,郑健龙,仲文亮. 养生期水泥稳定碎强度、模量及疲劳损伤特性[J]. 中国公路学报,2015,28(9):9-15,45.
- [9] 焦双健,李 淑,陈玉娇. 玄武岩纤维水泥稳定石配合比试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2014(3):49-53.
- [10] 杨洪生,梁 爽,张海涛. 振动与传统搅拌的水稳定碎石路用性能对比研究[J]. 施工技术,2018,47(8):66-68,113.
- [11] 延西利,梁春雨,许金华,等. 水泥稳定碎石基层的弹塑性特性[J]. 中国公路学报,2019,32(1):29-36.
- [12] 薛翠真,申爱琴,万晨光,等. 建筑垃圾复合粉体材料对水稳碎石基层力学与收缩性能的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(1):92-96.
- [13] 陈 峰,童生豪. 水泥稳定再生骨料路面基层抗拉性能试验研究[EB/OL]. [2019-05-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190326.1735.004.html>
- [14] 於德美,吴志鸿,郭 晓,等. 水泥稳定凝灰岩机制砂级配碎石路用性能[J]. 森林工程,2019,35(2):99-106.
- [15] 张向东,任 昆. 水泥稳定煤渣碎石基层的强度与损伤特性[J]. 交通运输工程学报,2018,18(6):91-96.
- [16] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [17] 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程:JTG E30—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.

(上接第 70 页)

- [7] 高桂云,周 洁,励 争. 脆性材料裂纹与损伤相互作用的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(11):2650-2661.
- [8] 岳中文,郭 洋,王 煦,等. 空孔形状对岩石定向断裂爆破影响规律的研究[J]. 岩土力学,2016,37(2):376-382.
- [9] 岳中文,郭 洋,许 鹏,等. 定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析[J]. 爆炸与冲击,2015,35(3):304-311.
- [10] 周 磊,朱哲明,董玉清,等. 冲击加载下巷道内裂纹的扩展特性及破坏行为[J]. 爆炸与冲击,2018,38(4):785-794.
- [11] 王 蒙,朱哲明,王 雄. 冲击荷载作用下的 I/II 复合型裂纹扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(7):1323-1332.
- [12] 廖志毅,唐春安,高军程,等. 撞击荷载作用下板状岩体破坏特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):120-124.
- [13] 廖志毅,唐春安. 爆炸应力波作用下岩体破碎特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):98-102,107.
- [14] 何满潮,刘冬桥,宫伟力,等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(9):1729-1739.
- [15] 李地元,成腾蛟,周 韬,等. 冲击荷载作用下含孔洞大理岩动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(2):249-260.
- [16] 李夕兵,陶 明,宫凤强,等. 冲击荷载作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1081-1088.