

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0728-07

爆破开挖中巷道围岩缺陷扩展的 动焦散模型试验研究

郭东明^{1,2}, 闫鹏洋¹, 杨仁树^{1,2}, 左建平¹, 袁保森¹, 赵伟¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 为了分析爆炸动荷载对巷道围岩不同位置处缺陷扰动的影 响, 采用爆炸加载透射式动焦散试验方法进行了相关试验研究。试验结果表明: 在爆炸动荷载作用下, 位于巷道顶端的竖直裂纹最易扩展, 拱部和底角处倾斜裂纹较易发生扩展, 巷帮处水平裂纹不易扩展, 扩展位移分别为 31, 17, 20, 6 mm; 裂纹扩展位移的大小与应力强度因子值密切相关, 巷道顶部裂纹 K_I 值最大, 拱部和底角处倾斜裂纹的 K_I 值次之, 巷帮处水平裂纹的 K_I 值最小。上述研究成果对减少爆破动荷载对围岩的扰动和损伤、节约围岩的支护成本、保证安全施工和快速施工有重要意义。

关键词 爆炸荷载; 裂纹扩展; 动焦散试验方法; 应力强度因子

中图分类号 TD 235 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.005

Dynamic caustics model experimental study on the defects extension of roadway surrounding rock when blasting excavation

GUO Dongming^{1,2}, YAN Pengyang¹, YANG Renshu^{1,2},

ZUO Jianping¹, YUAN Baosen¹, ZHAO Wei¹

(1. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,

China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract In order to analyze the influence of the blasting dynamic load on defects extension of roadway surrounding rock in different locations, the explosion load system using dynamic reflected caustics has been used to conduct the organic glass model experimental study. The experimental results have shown that under the influence of dynamic load the vertical crack at the top of the roadway is easier to extend than others, then are the inclined cracks at the arch and the corner, and the last ones are the horizontal cracks with the data of cracks propagation length of 31, 17, 20 and 6 mm respectively. The value of the displacement of crack propagation has a direct relationship with the value of the stress intensity factor and we can see that the value of the stress intensity factor of the vertical crack at the top of the roadway is greater than that of other three cracks, then is the value of the inclined cracks at the arch and corner and the value of the horizontal crack is at the minimum level. The above research results

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274204); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0965)

作者简介: 郭东明(1974—), 男, 江西省新余市人, 副教授, 硕士生导师, 从事矿井建设方面的研究。

E-mail: dmguocumtb@126.com

Tel: 15652938237

have positive influence on reducing the disturbance and damage of the blasting dynamic load on surrounding rock, and on saving the cost of surrounding rock supporting, ensuring construction safely and rapidly.

Key words the blasting dynamic load; crack propagation; dynamic caustics system; stress intensity factor

目前巷道(隧道)掘进广泛采用钻爆法施工^[1], 爆炸动载荷对围岩的损伤有很大影响, 尤其对含缺陷的围岩影响更大^[2]。钻爆法施工中易出现围岩缺陷的扩展和贯通, 导致围岩的破碎塌落, 严重时发生巷道坍塌, 对施工人员和巷道的安全施工造成威胁, 同时爆炸动载荷使围岩松动圈厚度增大, 增加了围岩支护的成本^[3-4]。针对岩石爆破对围岩产生损伤断裂的不利影响, 国内外许多学者进行了大量研究。李新平等^[5]结合损伤力学和断裂力学, 分析了岩体中裂隙系统的损伤和断裂特性, 建立了以应变、岩体平均应力为基本变量的等效连续损伤断裂模型以及岩体的损伤演化方程。杨小林等^[6]对岩石爆破损伤断裂的细观机理进行了研究, 在岩石爆破损伤断裂过程的应力波初期动态损伤阶段和后期爆生气体作用下准静态损伤阶段的基础上建立了2个阶段的损伤模型和断裂准则, 阐述了岩石的爆破损伤断裂细观理论。杨军等^[7]应用岩石在冲击损伤过程中的声波测试衰减规律, 在TCK损伤模型的基础上, 建立新的爆破损伤模型, 并通过数值模拟反映了岩石在爆炸载荷作用下的损伤演化状况。

巷道围岩在爆炸动载荷作用下发生的复杂断裂行为, 由于数学处理方法的复杂性, 难以用解析的方法对其进行研究和解释, 试验断裂力学则成为主要的研究方法。针对岩石在动荷载下的动态断裂问题, 国内许多学者进行了相关的研究。李清等^[8-9]用PMMA材料模拟了切缝药包控制下爆炸裂纹的起裂、扩展和止裂的行为, 并且分析了裂纹扩展位移、速度、加速度、动态应力强度因子和能量释放率的变化规律。岳中文、杨仁树、李清等^[10-12]使用PMMA材料模拟含有层理和节理的岩石, 对爆炸荷载作用下裂纹动态行为和动态应力强度因子的变化进行焦散线试验的研究。肖同社、杨仁树等^[13-15]建立试验模型, 对节理岩体爆生裂纹的扩展进行了研究。

减少爆破动载荷对围岩的损伤和扰动, 可以节约围岩支护的成本; 然而针对巷道钻爆法施工对不同位置处围岩缺陷扩展机理的研究, 国内外相关的

文献较少。本文拟采用数字激光动态焦散线试验系统, 模拟浅部巷道围岩缺陷的动态变化, 研究裂纹扩展方向、扩展位移、扩展速度和动态应力强度因子 K_I 的变化规律, 从而确定裂纹缺陷容易扩展的不利位置。

1 试验模型与动焦散试验原理

1.1 模型设计

试验的材质选用透明的有机玻璃(PMMA), 已知有机玻璃的相关动力学参数为: $C_S=1200$ m/s, $C_P=2252$ m/s, $E_d=4.5 \times 10^9$ Pa, $c_t=0.88 \times 10^{10}$ m²/N, $\nu_d=0.38$ 。有机玻璃模型的透射式动焦散试验中, 试件的厚度越大, 测量数据的误差会越大, 为了保证测量数据的精度, 有机玻璃试件的规格选为300 mm×300 mm×10 mm。在试件中心挖5 mm深直墙拱形巷道模型, 巷道模型宽40 mm, 直墙高20 mm, 圆弧半径为20 mm, 模型中心的炮孔直径为6 mm。预制8条与巷道模型贯通的裂纹, 预制裂纹长度均为5 mm, 厚度为10 mm, 如图1所示, 分别为A裂纹(90°)、B裂纹(135°)、C裂纹(45°)、D裂纹(180°)、E裂纹(0°)、F裂纹(-135°)、G裂纹(-90°)、H裂纹(-45°), 对称分布在巷道模型两侧, 预制裂纹方向与爆炸应力波垂直, 有利于裂纹的扩展, 使试验现象更明显。试验用药为叠氮化铅单质炸药, 每孔装药量为190 mg。

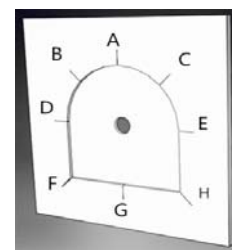


图1 模型示意图

Fig.1 The model diagram

1.2 动焦散原理

光束垂直照射受载带有边缘裂纹的透明薄板试件时, 在两平行面上光线发生反射或折射, 由于裂纹端部复杂的变形状态, 裂纹端部附近的厚度和

材料的折射率均发生变化,使光线在穿过裂纹端部应力集中区域时发生强烈的偏转和汇聚,在试件和场镜间出现简单而清晰的阴影光学图形,形成三维的明亮包围面即焦散面,如图 2。

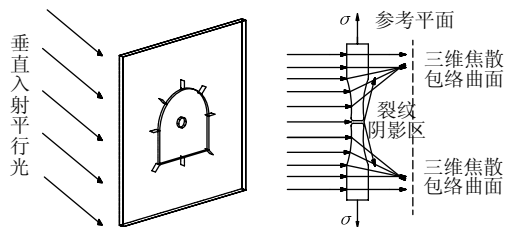


图 2 焦散线成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of caustics formation

数字激光动态焦散线试验系统操作方便,适用于爆破、冲击等动态断裂试验过程的光测力学分析,便于观察试验现象的动态变化,能够提高试验的精确度和成功率,节约试验成本。图 3 为透射式焦散线试验系统光路示意图,图 4 为数字激光动态焦散线试验系统设备。

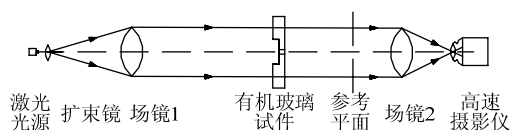


图 3 透射式焦散线试验系统光路示意图

Fig.3 Schematic diagram of transmission caustics experimental system

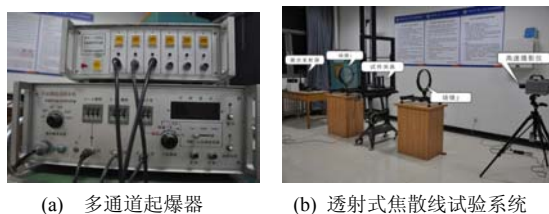


图 4 动态焦散线试验系统设备

Fig.4 The equipment of dynamic caustics experimental system

1.2.1 位移计算方法

根据光学和力学的分析,将焦散线的几何参数与裂纹端部奇异应力场的力学参数联系起来,通过测量焦散线的几何形状,求出相关力学参量。通过高速摄影仪拍摄的照片,可以测得裂纹端部的瞬时位置,将照片与实物进行比例换算,得到裂纹尖端的瞬时位移,即裂纹扩展的位移曲线。

1.2.2 扩展速度计算方法

相邻 2 幅照片裂纹位移的差值,除以 2 幅照片的时间间隔,得到某时刻裂纹扩展的速度,以此画

出裂纹扩展过程中的速度曲线。

1.2.3 应力强度因子计算方法

反映裂纹尖端弹性应力场强弱的物理量称为应力强度因子。应力强度因子与焦散斑的直径有着直接的联系,焦散斑直径越大,裂纹尖端的应力场奇异性越强,积聚的能量越多,应力强度因子就越大。同时,应力强度因子还与构件几何尺寸、裂纹大小以及外应力等条件有关。通过对某时刻照片上裂纹端部焦散斑特征长度的测量和计算,得到相应时刻的动态应力强度因子 K_I 值,以此得到应力强度因子 K_I 值随时间的变化曲线。

爆炸应力场中的应力波主要以膨胀波与剪切波 2 种形式传播,由于两波的共同作用,在试件中的任意一点处产生应力场均为复合型,对于动态焦散线试验方法,参考相关的资料^[16],测量焦散斑的 D_{\max} 值,从而确定复合型扩展裂纹尖端动态应力强度因子 K_I 值为

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3z_0dC\eta^{3/2}} \left(\frac{D_{\max}}{\delta_{\max}} \right)^{5/2}$$

式中: D_{\max} 为裂纹方向的焦散斑最大直径; z_0 为参考平面到物体平面的距离; C 为材料的应力光学常数; d 为试件的有效厚度,对于透明材料,板的有效厚度即为板的实际厚度; η 为应力强度因子比例系数; K_I 为动载荷作用下,复合型扩展裂纹尖端的 I 型动态应力强度因子; $F(v)$ 为由裂纹扩展速度引起的修正因子,在具有实际意义的裂纹扩展速度下,其值约等于 1; δ_{\max} 为沿着动焦散线最大横向直径的校正因子。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象描述

图 5 为巷道模型试验前后的对比图。由图 5b 可看出,在爆破动荷载作用下,裂纹均出现与爆破中心贯通和扩展的现象,且对称位置处裂纹的扩展情况基本一致,并不完全相同;这是由于试验装药和杂质的分布不均、板材加工误差的影响。A 裂纹位于巷道模型顶部,扩展位移为 31 mm,裂纹在 85° 方向上起裂并扩展 2 mm 后,在 100° 方向上扩展 6 mm,最后在 90° 方向上扩展 23 mm 后止裂; B 裂纹扩展位移为 22 mm,裂纹在 136° 方向上起裂,扩展 2 mm 后,偏向 142° 方向并扩展 5 mm,在 45° 方向上扩展 15 mm 后止裂; C 裂纹尖端在 19° 方向上起裂,扩展 5 mm 后,偏向 47° 方向,扩展 12 mm 后

止裂；D 裂纹端部在-150°方向起裂，扩展的整个过程中，扩展方向并未发生改变，扩展位移为 5 mm；E 裂纹位于 D 裂纹的对称位置，与 D 裂纹的试验现象相似，在-150°方向上裂纹起裂，扩展过程中扩展方向没有发生变化，扩展位移为 6 mm；F 裂纹端部在-120°方向上起裂并扩展 4 mm，在-135°方向上扩展 6 mm 后，于-130°方向上扩展 1 mm 后止裂；G 裂纹位于-90°的竖直方向上，裂纹在起裂、扩展、止裂的整个过程中方向并未发生改变，扩展 17 mm 后止裂，受夹具的影响，G 裂纹的扩展过程并未被记录下，但是 G 裂纹的存在有其特殊的意义，使模型更接近巷道围岩的工程环境，使试验更具说服力；H 裂纹端部在-70°方向上起裂，扩展 2 mm 后，在-25°方向上扩展 4 mm，最后在-50°方向上扩展 14 mm 后止裂。

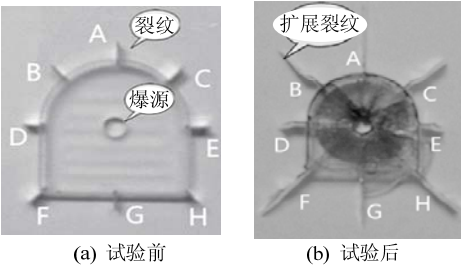


图 5 试验前后对比图

Fig.5 Contrast figure before and after experiment

2.2 裂纹扩展规律的研究分析

尽管裂纹扩展轨迹相对于裂纹方向出现略微的偏移，由图 5b 可以明显看出裂纹扩展轨迹基本呈直线状，将裂纹的最终扩展位移数据进行整理，如表 1 所列。

表 1 裂纹最终扩展位移

Table 1 The finally displacement of crack extension

编号	长度/mm	倾角/(°)	位移/mm
F	5	-135	20
G	5	-90	17
H	5	-45	20
E	5	0	6
C	5	45	17
A	5	90	31
B	5	135	22
D	5	180	5

对比裂纹的试验现象和数据得出，A 裂纹在爆炸荷载作用下较其他预制裂纹易于扩展，其次是预制倾斜裂纹(裂纹 B，C，F，H)，预制水平裂纹 D 和 E 不易扩展，扩展位移分别为 5 mm 和 6 mm，E

裂纹扩展更明显，选用 E 裂纹数据用于分析。裂纹 C 和 H 与处于对称位置处的 B 和 F 相比，前者更符合多次试验后巷道底部预制裂纹更易扩展的试验结果，所以在数据分析时，选取 C 和 H 的试验数据用以数据分析。

2.2.1 裂纹扩展位移的研究分析

图 6 为 A，C，E，H 这 4 条裂纹的扩展位移曲线，可明显看到：A 裂纹的扩展位移始终大于 C 和 H 裂纹，在 30~160 μs 的时间段内，C 裂纹的扩展位移大于 H 裂纹；E 裂纹扩展时间较 A，C，H 裂纹短，最终的扩展位移也最小，但在 E 裂纹的扩展过程中，其扩展位移大于 C 和 H 裂纹；在 165 μs 左右，C 和 H 裂纹的位移曲线存在 1 个交点，此时 2 条裂纹的扩展位移相等，之后在 170 μs 时刻，C 裂纹止裂，H 裂纹继续扩展直至止裂。

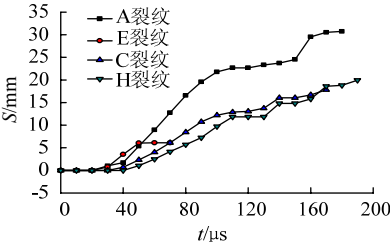


图 6 裂纹扩展位移曲线

Fig.6 The curves of crack displacement

从 A，C，E，H 这 4 条裂纹的扩展位移曲线可以明显看到，4 条裂纹的扩展位移不同，A 裂纹的扩展位移最大，E 裂纹的扩展位移最小。在裂纹止裂前，曲线在某一时间段内基本呈现直线状，说明此时裂纹处于一个稳定扩展的状态；在稳定扩展状态过后，曲线出现比较缓和的过渡期。4 条曲线包含若干个稳定期和过渡期，各个时期的时间并不相同。

2.2.2 裂纹扩展速度的研究分析

图 7 给出了 A，C，E，H 裂纹的扩展速度曲线。由图可看出：20 μs 时刻，裂纹 A 起裂，速度振荡变化达到峰值，在 80 μs 时刻瞬间达到第 1 个峰值 379.9 m/s，之后迅速减小，爆炸后约 120 μs，速度曲线出现振荡变化现象，在 160 μs 时刻达到最大值 499 m/s；C 裂纹起裂后扩展速度逐渐增大，80 μs 时刻达到峰值 231.9 m/s，速度减小出现谷值后出现振荡变化现象，分别在 140 μs 和 170 μs 时刻达到峰值 231.9 m/s 和 112.5 m/s；E 裂纹扩展时间相对较短，炸药爆炸后，40 μs 时，在爆炸冲击力作用下裂纹扩展速度达到最大值 275.8 m/s，随后速度减小

直至裂纹止裂,并未出现振荡变化的现象;H 裂纹起裂后,速度曲线出现振荡变化的现象,出现了 4 个峰值,在 $100\ \mu\text{s}$ 左右出现第 1 个峰值 $246.6\ \text{m/s}$,之后速度衰减,在 $140\ \mu\text{s}$ 时刻速度剧增至最大值 $298\ \text{m/s}$,然后速度陡减,之后速度振荡变化。

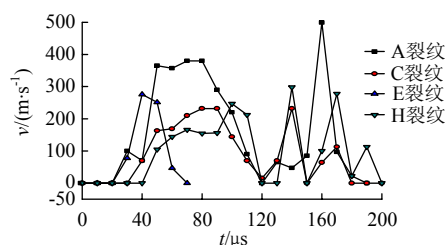


图 7 裂纹扩展速度变化曲线

Fig.7 Variation of the crack propagation velocity

通过比较 4 条裂纹的位移曲线和扩展速度曲线可以看出, E 裂纹在爆炸冲击力作用下,于 $20\ \mu\text{s}$ 时最先开裂,在 $20\sim 50\ \mu\text{s}$ 内,裂纹扩展速度呈线性增加,其扩展速度大于 A, C, H 裂纹的扩展速度,但是 E 裂纹扩展速度很快衰减至零。在 $30\sim 100\ \mu\text{s}$ 内,裂纹的扩展速度处于相对较高的水平,裂纹 A 的扩展速度较裂纹 C 和 H 大, A 裂纹速度曲线在 $80\ \mu\text{s}$ 时刻达到第 1 个峰值,峰值出现时刻较 C 和 H 曲线早,这是由于爆炸产生的应力波的能量更多积聚在 A 裂纹尖端,有较大的能量释放率,使 A

更易扩展。对比 C 和 H 的扩展速度曲线和位移曲线可以得出,两者在 $30\sim 120\ \mu\text{s}$ 内, C 裂纹扩展的平均速度大于 H 裂纹,说明 C 裂纹在应力波作用下相对于 H 裂纹更易扩展。

可以明显看出, A, C, H 裂纹的速度变化曲线整体变化趋势相同,均出现多次振荡变化的现象;尤其在 $40\sim 120\ \mu\text{s}$ 内,扩展速度处于较高的水平,裂纹处于稳定的扩展期,3 条速度曲线均先振荡变化,然后达到峰值,在 $120\ \mu\text{s}$ 时刻达到各自谷值。E 裂纹起裂较快,速度最先达到峰值,但是扩展时间较短,很快止裂。

2.2.3 应力强度因子的分析研究

图 8 为裂纹尖端动态焦散斑系列图像,由图可以直观地看到应力波作用下裂纹尖端焦散斑的变化过程:在 $10\ \mu\text{s}$ 时刻炸药起爆; $20\ \mu\text{s}$ 时刻,应力波穿过预制裂纹,在图 8c 中看到模糊的焦散斑;在 $40\ \mu\text{s}$ 时刻,从图像中可以清晰地看到各裂纹处焦散斑有明显变大和移动的现象,说明裂纹已经扩展;在 $200\ \mu\text{s}$ 时刻,图像中各裂纹尖端处的焦散斑已经变得极其微小,此时裂纹都已止裂。通过某时刻照片上裂纹端部焦散斑特征长度的测量和计算,可得到相应时刻的动态应力强度因子 K_I 及应力强度因子 K_I 随时间变化曲线,如图 9 所示。

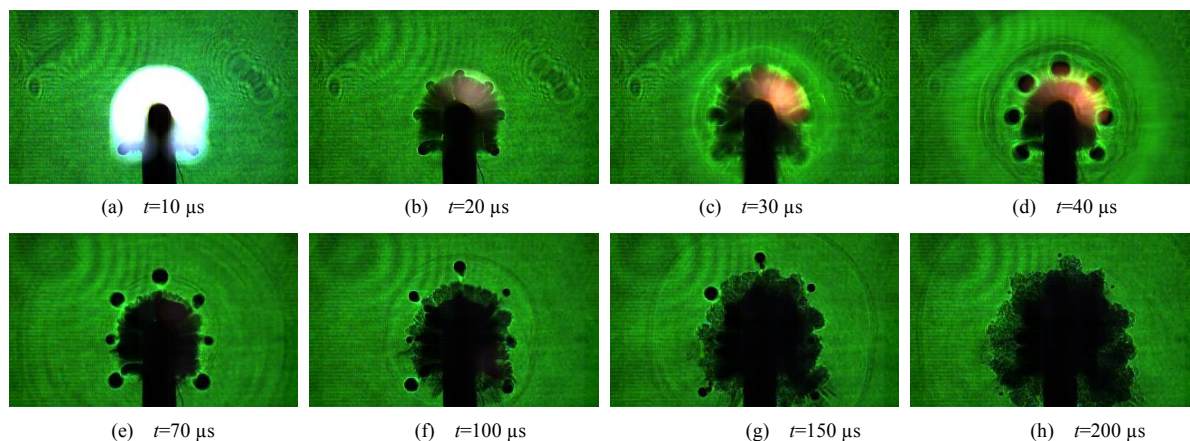


图 8 动态焦散斑系列图像

Fig.8 Serial-gram of dynamical caustics

由图 9 可明显看出在 $20\sim 80\ \mu\text{s}$ 内, 4 条曲线的变化趋势基本相同,均先增大至峰值后减小,出现振荡变化的现象。

在 $20\ \mu\text{s}$ 时刻,裂纹 A 端部出现动态应力强度因子,在 $40\ \mu\text{s}$ 时刻达到第 1 个峰值 $2.85\ \text{MN/m}^{3/2}$;在 $40\sim 90\ \mu\text{s}$ 内,应力强度因子出现先减小后增大交替变化的振荡现象,应力强度因子值减小,裂纹的

扩展速度会相应地增大,即裂纹尖端释放积累的能量,驱动裂纹的扩展。同理,在应力强度因子增大时,裂纹尖端积累的能量增加,释放的能量减少,裂纹扩展速度随之减小。在 $160\ \mu\text{s}$ 时刻裂纹尖端能量的释放使应力强度因子值减小,释放的能量驱动裂纹的扩展,使裂纹的扩展速度达到最大值。

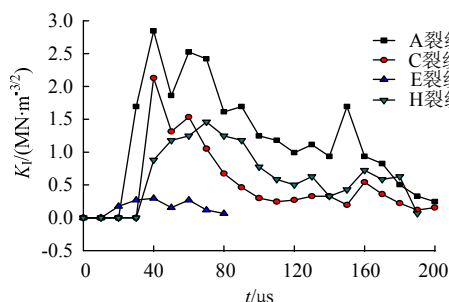


图9 应力强度因子随时间变化曲线

Fig.9 The change curves of the stress intensity factor with time

在 40 μs 时刻, C 裂纹已经起裂, 应力强度因子剧增至最大值 2.1 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$, 随后出现减小和增大交替变化的振荡现象。在 40~50 μs 和 60~90 μs 内, 应力强度因子值减小, 尖端能量释放, 驱动裂纹的扩展, 速度随之增大。在 110~120 μs 内, 裂纹尖端积累能量, 应力强度因子增大, 裂纹扩展速度随之减小。

E 裂纹在爆炸冲击力的作用下裂纹尖端最先变形并积累能量, 在炸药爆炸后, 约 40 μs 时刻应力强度因子达到最大值 0.298 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$, 随后出现振荡变化的现象。

在 0~70 μs 时间段内, H 裂纹尖端的应力强度因子值增大至最大值 1.46 $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$, 之后出现减小和增大交替变化的振荡现象。在 40~70 μs 内, 速度曲线与应力强度因子曲线同步变化、逐渐增大, 说明在爆炸冲击力作用下, 裂纹扩展的同时尖端发生变形并积累能量。在 80~100 μs 内, 尖端释放能量, 驱动裂纹的扩展, 裂纹扩展速度随之增大。相反, 在 140~150 μs 和 170~180 μs 内, 应力强度因子值增大, 由于裂纹尖端的弹塑性变形消耗了能量, 裂纹扩展速度急剧减小。

2.2.4 裂纹扩展现象的差异性分析

从裂纹扩展位移曲线、扩展速度曲线和应力强度因子曲线可以看出, 速度值和应力强度因子值随时间的变化过程中, 多次出现振荡变化的现象。炸药爆炸后, 应力波的能量大量积累在裂纹尖端的奇异区域内, 形成明显的焦散斑, 4 条裂纹的应力强度因子最大值均出现在裂纹起裂后曲线的第 1 个峰值处。积累在裂纹尖端奇异区域内的能量释放, 会使裂纹扩展的速度增大, 在应力强度因子出现的每个峰值后, 扩展速度变化曲线会出现峰值。在裂纹开始扩展的一段时间内, 虽然裂纹尖端积累能量的变化致使裂纹扩展速度出现振荡变化, 但裂纹扩展

速度仍保持相对较高的水平。

A, C, E 裂纹位于炮孔的径向方向上, 在炸药爆炸后一段时间内, 3 条裂纹的应力强度因子变化曲线具有相同的变化趋势。裂纹扩展过程中, A 裂纹的 K_I 值较之 C, E, H 裂纹尖端的 K_I 值大, 说明爆炸应力波在 A 裂纹处积累了更多的能量, C, E, H 裂纹处积累的能量相对较少, 使得 A 裂纹扩展位移较大; 在扩展过程中, C 裂纹的 K_I 值大于 E 裂纹的 K_I 值, 较 A 裂纹的 K_I 值小, 所以 C 裂纹的扩展位移大于 E 裂纹, 而小于 A 裂纹。E 裂纹处在圆弧和直墙的交界处, 界面发生了突变, 应力波极易发生反射和绕射, 不利于能量在端部的积累。从位移曲线和 K_I 变化曲线可以看出, 虽然 E 裂纹扩展较早, 但是能量更多的用于邻近裂纹 C 和 H 的扩展, 使得 E 裂纹的扩展位移较小; H 裂纹与爆源的距离较 A, C, E 裂纹远, 所以 H 裂纹起裂时刻晚于 A, C, E 裂纹, H 裂纹处于巷道底部的直角处, 直角减缓了应力波的冲击作用, 所以 H 裂纹的应力强度因子没有急剧增大, 而是缓慢增大。从 K_I 曲线来看, H 裂纹尖端积累的能量较 A 裂纹少, 较 C 裂纹多, 所以扩展位移较 A 裂纹小, 较 C 裂纹大。较之 C 裂纹, 直角部位容易出现应力集中现象和反射拉伸作用, 对 H 裂纹的扩展更有利。

3 结 论

- 1) 在爆破动荷载作用下, 预制裂纹均出现与爆破中心贯通继而发生扩展的现象。
- 2) 巷道顶部竖直裂纹最易扩展, 拱部和底角处倾斜裂纹较易发生扩展, 巷帮处水平裂纹不易扩展, 扩展位移分别为 31, 17, 20, 6 mm。
- 3) 裂纹扩展位移的大小与应力强度因子值密切相关, 巷道顶部裂纹 K_I 值最大, 拱部和底角处倾斜裂纹的 K_I 值次之, 巷帮处水平裂纹的 K_I 值最小。

参考文献:

- [1] 郭陕云. 隧道掘进钻爆法施工技术的进步和发展[J]. 铁道工程学报, 2007(9): 67-74.
GUO Shanyun. Progress and development of tunnel construction technology with bored blast method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(9): 67-74.
- [2] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610-1619.
ZHANG Guohua, CHEN Libiao, XIA Xiang, et al.

- Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1610-1619.
- [3] 于忠久, 赵同彬. 围岩松动圈理论及其在巷道支护中的应用[J]. 煤炭技术, 2004, 23(8): 53-54.
YU Zhongjiu, ZHAO Tongbin. The theory of loose circle in surrounding rock and its application in roadway support[J]. Coal Technology, 2004, 23(8): 53-54.
- [4] 董芳庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 21-32.
DONG Fangting, SONG Hongwei, GUO Zhihong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 21-32.
- [5] 李新平, 朱瑞赓, 朱维申. 裂隙岩体的损伤断裂理论与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(3): 236-245.
LI Xinping, ZHU Ruigeng, ZHU Weishen. The damage fracture theory and its application in jointed rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(3): 236-245.
- [6] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤断裂的细观机理[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 247-252.
YANG Xiaolin, WANG Shuren. Micro-mechanism of damage and fracture on rock blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 247-252.
- [7] 杨军, 金乾坤. 应力波衰减基础上的岩石爆破损伤模型[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 241-246.
YANG Jun, JIN Qiankun. A new damage model for rock fragmentation by blasting based on stress wave attenuation[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 241-246.
- [8] 李清, 杨仁树, 李均雷, 等. 爆炸荷载作用下动态裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2912-2916.
LI Qing, YANG Renshu, LI Junlei, et al. Experimental study on propagation of dynamic cracks subjected to blasting loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2912-2916.
- [9] 李清, 赵艳萍, 马英丽, 等. 动焦散线在爆炸裂纹扩展试验研究中的应用[J]. 工程爆破, 2005, 11(3): 5-8.
LI Qing, ZHAO Yanping, MA Yingli, et al. Application of dynamic caustics for cracks propagation under blasting load[J]. Engineering Blasting, 2005, 11(3): 5-8.
- [10] 岳中文. 缺陷介质爆生裂纹扩展规律的动态焦散线试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- [11] 杨仁树, 牛学超, 商厚胜, 等. 爆炸应力波作用下下层理介质断裂的动焦散试验分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(1): 36-39.
YANG Renshu, NIU Xuechao, SHANG Housheng, et al. Dynamic caustics analysis of crack in sandwich materials under blasting stress wave[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(1): 36-39.
- [12] 李清, 杨仁树. 节理介质中爆炸裂纹扩展的细观行为研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 271-274.
LI Qing, YANG Renshu. Microbehaviors of crack propagation in jointed materials under blasting load[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(3): 271-274.
- [13] 肖同社, 杨仁树, 庄金钊, 等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 159-164.
XIAO Tongshe, YANG Renshu, ZHUANG Jinzhao, et al. Dynamic caustics model experiment of blasting crack developing on sandwich rock[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2): 159-164.
- [14] 杨仁树, 王雁冰, 杨立云, 等. 双空切槽爆破裂纹扩展的动焦散试验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 868-872.
YANG Renshu, WANG Yanbing, YANG Liyun, et al. Dynamic caustics experimental study of crack propagation in two borehole cut blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 868-872.
- [15] 杨仁树, 杨立云, 岳中文, 等. 爆炸荷载下缺陷介质裂纹扩展的动焦散试验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 187-192.
YANG Renshu, YANG Liyun, YUE Zhongwen, et al. Dynamic caustics experiment of crack propagation in material containing flaws under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 187-192.
- [16] KALTHOFF J F. Handbook on experimental mechanics [M]. New Jersey: Society for Experimental Mechanics, 1987.