

郭东明,闫鹏洋,薛磊,等. 动静载荷下巷道围岩裂纹扩展规律的试验研究[J]. 矿业科学学报,2016,1(2):146-154.

Guo Dongming, Yan Pengyang, Xue Lei, et al. The experimental research on the propagation laws of cracks in roadway surrounding rock subjected to static-dynamic load[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 146-154.

动静载荷下巷道围岩裂纹扩展规律的试验研究

郭东明^{1,2}, 闫鹏洋¹, 薛磊^{1,2}, 罗浪¹, 杨俊¹

1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083

摘要:为了研究动静载荷耦合作用下巷道围岩裂纹的扩展规律,将PMMA材料加工成含有单裂纹的试件,利用爆炸加载动态焦散线测试系统进行了巷道围岩裂纹扩展规律的试验。研究表明,预制裂纹的扩展位移、试件损伤度以及试验围压之间存在密切联系:扩展位移与试件损伤度呈负相关的关系;损伤度随围压的增大呈现先增大后减小的变化规律;不同围压条件下,预制裂纹在等量爆炸载荷作用下均出现扩展和止裂交替变化的现象,但预制裂纹扩展位移随着围压的增大呈先减小后增大的变化规律,在0 MPa围压下扩展位移有最大值30.84 mm,在0.4 MPa时扩展位移有最小值10.98 mm。裂纹端部扩展速度与能量释放率关系较为密切:能量释放率增大时,扩展速度会相应增大;预制裂纹扩展速度减小后,受应力波影响,裂纹端部积累能量,能量释放率又会相应增大。

关键词:动静载荷;巷道围岩;预制裂纹;焦散线测试系统;裂纹扩展规律;损伤度

中图分类号:TD 235

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2016)10-146-09

The experimental research on the propagation laws of cracks in roadway surrounding rock subjected to static-dynamic load

Guo Dongming^{1,2}, Yan Pengyang¹, Xue Lei¹, Luo Lang¹, Yang Jun¹

1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China

Abstract: In order to study the propagation law of the crack in surrounding rock subjected to static-dynamic load, the poly methyl methacrylate (PMMA) are used to make specimens containing a single prefabricated crack and dynamic caustics experimental system with explosion load is used to conduct experimental research on the propagation laws of crack in roadway surrounding rock. Study has showed that there exists close relation among the extension displacement of the prefabricated crack, the damage degree of the specimen and confined pressure around the specimen. There is a negative correlation relationship between the extension displacement and the damage degree, which is closely associated with the confined pressure, presenting a rule of increasing firstly and decreasing later as the increasing of confined pressure. Changing the confined pressure around the specimen and keeping the explosion condition unchanged in the study, the prefabricated cracks all appear the phenomenon of alternative varia-

收稿日期:2016-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51274204,51134025);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0965)

作者简介:郭东明(1974—),男,江西新余人,教授,博士,主要从事矿井建设方面的教学和研究工作。Tel:010-62339225, E-mail: dmguo@cumt.edu.cn

通信作者:闫鹏洋(1988—),男,河南洛阳人,博士研究生,主要从事矿井建设方面的科研工作。Tel:15510006375, E-mail: 1140953279@qq.com

tion between extension and arresting, but the value of extension displacement reaches a maximum of 30.84 mm and a minimum of 10.98 mm when the value of confined pressure is 0 MPa and 0.4 MPa respectively, presenting a trend of decreasing firstly and increasing later as the increasing of confined pressure. There exists a close relation between energy release rate around the crack tip and propagation speed of the crack. When energy release rate increases, the propagation speed will increase then, but when the propagation speed decreases, energy accumulation occurs around the tip induced by the explosion stress wave, resulting in energy release rate increasing.

Key words: the static-dynamic load; roadway surrounding rock; prefabricated crack; caustics test system; crack propagation law; damage degree

在采矿工程破岩施工中,目前仍广泛采用钻爆法。不同深度的围岩在地应力作用下处于不同的应力状态,尤其是深部岩体,由于受到“三高一扰动”(高地应力、高地温、高岩溶水压及开挖扰动)的影响,对爆破振动的动态响应具有突变性和多样性,导致岩体内部宏观裂纹扩展、彼此贯通,甚至诱发岩爆、冲击地压等灾害^[1-3]。因此,为了深刻认识岩石的破坏机理,岩石缺陷的破坏规律成为研究热点。由于数学解析方法难以对岩石破坏机理进行详细的求解,许多学者通过试验或数值模拟的方式对静态和动态加载下岩石的破坏机理进行了研究,取得了丰硕的成果^[4-7],对岩石力学的理论与实践具有很大的推动作用。

爆破开挖巷道时,围岩受到的载荷不仅有爆破动载荷,还有地应力等静载荷,而以上研究条件仅限于岩石承受静载荷或承受动载荷(冲击载荷或爆炸动载荷)。这种单一研究静载荷或动载荷下岩石的破坏机理,与现实情况有所出入,有待深入研究。一些学者在以上研究的基础上,对岩石在地应力与爆炸动载荷耦合作用下的动态断裂行为进行了深入研究^[8-11]。

岩石在动载荷作用下,内部的裂纹缺陷快速扩展,以上研究无法用肉眼观察和记录裂纹扩展破坏过程。为了能够记录岩石的动态破坏过程,便于对其破坏机理进行研究,需要高速数据采集系统记录其扩展过程。焦散线法可以满足上述要求,只需采集记录试件表面的斑点图像进行分析,通过数字图像处理技术获得所需要的变形信息,不需作复杂的处理工作,操作简单易行。该方法已经在岩石动态断裂研究中进行了应用,主要被用来进行冲击、爆炸等超动态力学行为的研究^[12]。杨仁树、宋俊生等^[13-16]利用爆炸加载动态焦散线测试系统,研究了双炮眼切槽方式下、同时起爆、两炮眼间贯穿裂纹和炮眼外侧裂纹扩展的动态行为。郭东明等^[17-20]采用爆炸加载透射式动态焦散线系统,研

究了开挖扰动对巷道缺陷的影响规律。宋义敏等^[21]采用数字散斑相关方法作为试验的观测手段,通过搭建高速数据采集系统,对岩石 I 型裂纹在冲击载荷作用下的动态断裂进行试验研究。但是,以上使用焦散线法研究时仅考虑动载荷对断裂过程的影响,并未考虑静载荷,且针对动静载荷耦合作用下裂纹扩展的动焦散研究也相对较少。

本文拟采用有机玻璃(PMMA)材料制作试验试件,采用数字激光动态焦散线实验系统,在不同的动、静载荷耦合条件下,对爆破近区围岩缺陷的扩展规律进行试验研究。本研究有助于加深对不同埋深岩体破坏机理的认识,对研究裂隙岩体的动态损伤和动态强度、减少巷道围岩的扰动、保证围岩的稳定性及工程安全具有重要意义,同时也能为裂隙岩体的爆破设计提供理论指导。

1 试件的制备与动焦散系统

1.1 试验试件的制备

数字激光动态焦散线实验系统使用的试验材质是具有各向同性的有机玻璃(PMMA),其较高透光性,有利于焦散曲线的形成,便于焦散线图像的分析,焦散光学常数为 C ,有机玻璃相关动态力学参数为:纵波波速 $C_p = 2\ 320\ \text{m/s}$,横波波速 $C_s = 1\ 260\ \text{m/s}$,动态弹性模量 $E_d = 6.1 \times 10^9\ \text{N/m}^2$,动态泊松比 $\nu_d = 0.38$,动态应力光学常数 $|C_1| = 0.8 \times 10^{-10}\ \text{m}^2/\text{N}$ 。

试验中试件规格(长×宽×高)为 $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$,利用机械设备在试件中央部位加工深 $5\ \text{mm}$ 的直墙拱形巷道模型,拱形为半径 $20\ \text{mm}$ 的半圆,直墙高 $20\ \text{mm}$,预制巷道宽 $40\ \text{mm}$,在中心位置用激光切割直径为 $6\ \text{mm}$ 的炮眼。施工现场的围岩中,裂纹缺陷的长度、方位角情况较为复杂,试件中预制裂纹与实际情况相比难免出现偏差,为了便于分析,试验中仅考虑了一条裂纹,后续研究中将考虑其他情况。前期试验中,将不同长度

预制裂纹的扩展现象进行对比,同时考虑到预制裂纹长度与预制巷道尺寸相比不宜太长,最终选用长5 mm的预制裂纹,厚度为10 mm。为使裂纹的扩展现象明显,预制裂纹与应力波传播方向平行,设置在模型的水平中线位置上,选定裂纹左端距离模型边界2 mm,与水平方向的夹角为 0° ,试件如图1所示。

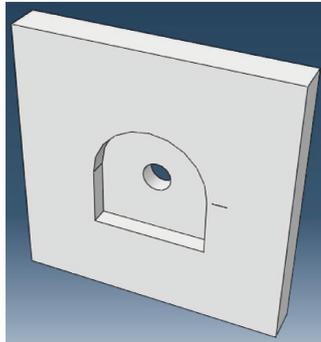


图1 试件示意图

Fig. 1 The diagram of the specimen

试验过程中发现,当作用于试件周边的围压超过0.7 MPa时,试件发生较大变形,数据误差较大。在0~0.6 MPa之间,均匀选取0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa作为试验围压。在试验围压下,使用叠氮化铅炸药,经过多次试验发现,当炸药用量过多时,试件爆源附近区域完全破碎,巷道模型破损严重,与现场工况不符,影响数据精度;当炸药用量过少时,裂纹扩展现象杂乱,随机性大;当试验用药在190 mg时,试件破碎较少,巷道模型完整性较好,符合现场工况,试验现象较为理想,规律性较好,因此最终确定炸药用量为190 mg。

1.2 焦散线原理

单色光束垂直照射含裂纹缺陷的透明试件表面时,受载试件裂纹端部所受的应力状态发生显著变化,极易出现应力集中现象,其光学性质也随之发生变化,即裂纹端部受拉时,端部材料厚度减小,成为光疏材料,折射率减小,光线照射不到,从而形成阴影区;裂纹端部受压时,端部材料的厚度增加,成为光密材料,折射率增大,光线在某些地方集中,形成亮度增加的光密区。将参考屏垂直光线放置于光场中,调整与试件的距离,观察到参考屏上会截出黑暗的区域,即焦散斑以及三维的包络焦散曲面,其原理如图2所示。

1.3 动焦散系统介绍

数字激光动态焦散线试验系统包含激光发射器、扩束镜、场镜以及高速摄影仪等设备组成的高

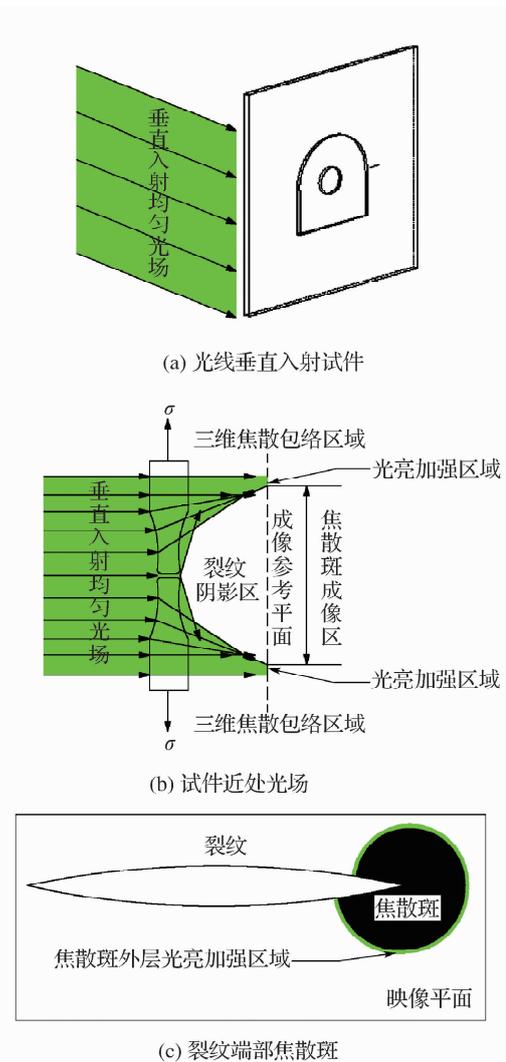


图2 焦散线成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of caustics formation

速摄影光路系统,还包括爆炸加载与同步控制系统,起爆器为MD-2000多通道脉冲点火器,在2100 V左右的高压下瞬时引爆炸药叠氮化铅。本试验系统较适用于爆炸试验,能够将爆炸试验中整个动态变化过程记录下来,便于进行动态断裂试验的光测力学分析,同时数据记录具有较高的精度,操作系统简单方便,提高了试验的精度和成功率。图3所示为透射式焦散线试验系统光路。

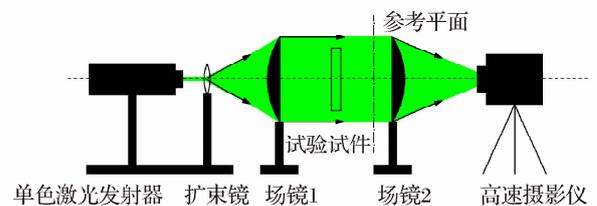


图3 透射式焦散线试验系统光路

Fig. 3 Schematic diagram of transmission caustics experimental system

1.4 应力强度因子

从光路系统高速摄影仪记录的图片中可以清晰看到裂纹端部的焦散斑,裂纹尖端的应力场奇异性越强,积聚的能量越多,焦散斑的直径越大,应力强度因子值就越大。通过测量焦散斑的直径 D_{\max} 和 D_{\min} [22],可以将动态载荷下复合型扩展裂纹尖端的动态应力强度因子 K_{I}^d 和 K_{II}^d 分别表示为

$$\begin{cases} K_{\text{I}}^d = \frac{2\sqrt{2\pi}F(v)}{3g^{5/2}z_0Cd_{\text{eff}}}D_{\max}^{5/2} \\ K_{\text{II}}^d = \mu K_{\text{I}}^d \end{cases} \quad (1)$$

式中, K_{I}^d 、 K_{II}^d 分别为复合型扩展裂纹端部的 I、II 型动态应力强度因子值; $F(v)$ 为裂纹扩展速度 v 引起的修正因子,在具有实际意义的扩展速度下,其值约等于 1; D_{\max} 为沿裂纹尖端焦散斑的最大直径值; μ 为动态应力强度因子 K_{I}^d 与 K_{II}^d 的比值,由测得值 $(D_{\max} - D_{\min})/D_{\max}$ 确定; g 为应力强度数值因子,由计算得到的 μ 值确定; z_0 为试件到参考平面的距离; C 为试件的应力光学常数; d_{eff} 为试件的有效厚度。

1.5 能量释放率

能量释放率 G 从能量角度表述了裂纹尖端扩展过程中端部应力以及应变场的变化情况,表征的是扩展单位长度及单位厚度时裂纹尖端吸收的总能量。能量释放率与动态应力强度因子相互关联, Freund [23] 分析了两者之间的关系,在平面应力情况下将其表示为

$$G = \frac{1}{E}[A_{\text{I}}(v)K_{\text{I}}^2 + A_{\text{II}}(v)K_{\text{II}}^2] \quad (2)$$

式中, E 为材料弹性模量; v 为裂纹扩展速度; $A_{\text{I}}(v)$ 、 $A_{\text{II}}(v)$ 分别为裂纹的扩展速度函数。

当 $v=0$ 时

$$A_{\text{I}}(v) = A_{\text{II}}(v) = 1$$

当 $v \neq 0$ 时

$$A_{\text{I}}(v) = v^2 \alpha_d / [(1-v)c_s^2 D]$$

$$A_{\text{II}}(v) = v^2 \alpha_s / [(1-v)c_s^2 D]$$

其中

$$\alpha_d = \sqrt{1 - v^2/c_d^2}$$

$$\alpha_s = \sqrt{1 - v^2/c_s^2}$$

$$D = 4\alpha_d \alpha_s - (1 + \alpha_s^2)^2$$

式中, c_d 为膨胀波波速; c_s 为剪切波波速。

根据式(2)可以求得裂纹端部瞬时的动态能量释放率。

1.6 试件的损伤度

岩石受到冲击载荷作用后会出现一定损伤,为

了测定其损伤度,经常是通过测定应力波在岩石中传播速度的变化程度来反映岩石的损伤程度。目前,研究岩体爆破损伤特性应用较为广泛的手段是超声波测试 [24],测得的声波波速 v' 与岩石损伤度 D 之间的关系为

$$D = 1 - \left(\frac{v'}{v_0}\right)^2 \quad (0 \leq D \leq 1) \quad (3)$$

式中, D 为岩石损伤度; v_0 、 v' 分别为爆炸冲击荷载作用前、后岩体中的声波速度。

试验中,试件受到爆炸荷载作用后出现大量裂纹,通过模型及预制裂纹后应力波波速会减小,可通过以上方法对试件的损伤度进行测定。已知纵向波在试验材质中的传播速度 v_0 为 2 320 m/s,计算某一时刻预制裂纹端部应力波在试验试件中的传播速度,并代入式(3)得到相应时刻试件的损伤度。

2 试验结果

2.1 试验现象

图4中(a)(b)(c)(d)所示分别为 0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa 围压下的试验现象。可以明显看到,在爆破动载荷与围压耦合作用下预制裂纹近端与炮眼贯通形成贯通裂纹,裂纹远端沿远离炮眼的方向扩展,扩展轨迹稍微翘曲,大体上呈直线状。这是由于在爆炸荷载作用瞬间,应力波沿裂纹方向对裂纹进行冲击,裂纹端部受到较静载荷大的压应力,出现明显的应力集中现象,裂纹会张开,沿着爆炸加载的方向(较大主应力方向)扩展。

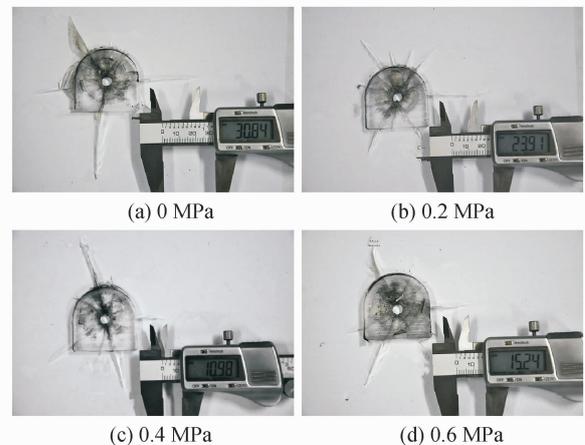


图4 不同围压下的试验现象

Fig. 4 The experiment phenomenon of specimen under different confining pressure

2.2 预制裂纹扩展位移

图5为4种围压下预制裂纹扩展位移与时间的变化曲线。可以看出,4种围压下的位移曲线变

化趋势相似,预制裂纹均出现多次扩展和止裂交替变化的现象,止裂期基本处于75~150 μs 和175~350 μs 的时间段内。试验围压为0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa时,相应预制裂纹的扩展位移分别为30.84 mm、23.91 mm、10.98 mm、15.24 mm。在围压作用下,预制裂纹的扩展受到抑制,围压不同裂纹受到的抑制作用也不同。

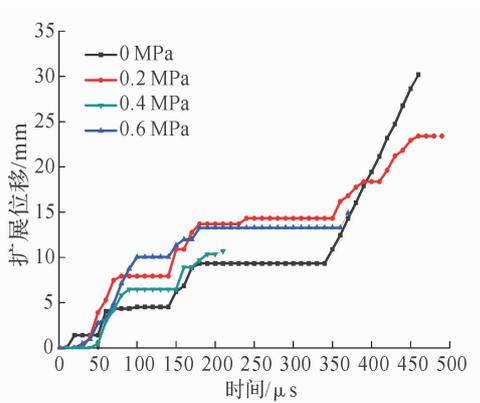


图5 预制裂纹扩展位移与时间的变化曲线
Fig. 5 The displacement curves of the prefabricated cracks vs. time

在0~0.4 MPa内,随着围压的增大,预制裂纹受到的抑制作用越来越大,扩展位移不断减小,在0.4 MPa围压下,仅为10.98 mm;但在0.6 MPa围压下,预制裂纹扩展位移为15.24 mm。可以看出,随着围压的增大,预制裂纹受到的抑制作用并不是持续增大,而是先增大后减小,呈波动变化。

在0~60 μs 内,静载荷比爆炸冲击载荷小得多,围压对裂纹的扩展影响较小,不同围压下预制裂纹此时的扩展位移相差无几。在60~100 μs 内,爆炸载荷衰减,围压对裂纹的扩展影响增大,此时不同试验围压下裂纹的扩展位移大小顺序为: $L(0.6 \text{ MPa}) > L(0.2 \text{ MPa}) > L(0.4 \text{ MPa}) > L(0 \text{ MPa})$ 。试验围压为0.6 MPa时,裂纹受到较大围压的抑制作用,裂纹端部也随之受到较大应力集中作用。应力波作用后,端部积累的能量更易达到裂纹的断裂韧度,使得裂纹起裂扩展,此时裂纹的位移最大;相反在0 MPa围压时,裂纹端部受到的应力集中作用较弱,应力波作用下裂纹较难达到裂纹扩展的临界断裂韧度,此时裂纹的扩展位移最小;相对于0.6 MPa,在0.2 MPa和0.4 MPa围压下裂纹受到的应力集中作用相对较小,裂纹不易扩展。

约350 μs 时刻,0 MPa、0.2 MPa、0.6 MPa试验围压下裂纹的扩展位移分别为9.33 mm、14.32 mm、13.28 mm。此时0.6 MPa试验围压下,裂纹扩展位

移较大,应力波传播至裂纹端部时能量衰减较大,围压的抑制作用使得裂纹很难继续开裂扩展;0.2 MPa试验围压下,尽管裂纹的扩展位移达到14.32 mm,与0.6 MPa时的扩展位移相差不大,但随着围压的减小,裂纹受到的抑制作用较小,裂纹较易扩展至较大距离;0 MPa试验围压下,裂纹扩展位移最小,距离炮眼较近,应力波携带的能量在裂纹端部的损失较小,同时也没有受到围压的抑制,裂纹端部在短时间内较易积聚大量的能量,易开裂扩展,最后的扩展阶段相应的扩展位移最大。

2.3 应力强度因子

图6为裂纹端部动态焦散斑的部分图像,从图中可以看到,炸药在10 μs 时刻起爆,20 μs 时刻应力波穿过预制裂纹端部,30 μs 时刻裂纹端部形成明显的焦散斑,此后焦散斑随应力波的不间断作用出现减小和增大交替变化的现象,同时随裂纹的扩展而移动。通过量取图像上预制裂纹端部焦散斑特征长度并代入公式(1)进行计算,得到相应时刻4种围压下裂纹端部应力强度因子及其随时间的变化曲线,如图7所示。4种围压下相应的应力强度因子曲线均呈现增大和减小交替变化的趋势。

从图7中可以看到,在25~60 μs 时间段内,不同试验围压下预制裂纹端部的应力强度因子在 $0.8 \text{ MN}/\text{m}^{\frac{3}{2}}$ 附近振荡变化,由于爆炸对端部冲击力相对于外部围压而言非常大,裂纹端部的应力场主要受爆炸冲击波的影响,端部受到较大冲击作用时,端部近区产生较大的变形,冲击力衰减后,变形又迅速恢复,使得应力强度因子变化幅度大。

在75~150 μs 时间段内,不同围压下的裂纹停止扩展,处于停滞期。试件围压分别为0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa时,裂纹端部应力强度因子值在 $0.3 \text{ MN}/\text{m}^{\frac{3}{2}}$ 附近振荡变化,振荡幅度较小。试件围压0.6 MPa时应力强度因子值在 $0.5 \text{ MN}/\text{m}^{\frac{3}{2}}$ 附近振荡变化,振荡幅度较大,这是由于围压增大后,裂纹端部应力集中程度明显增大,在应力波作用下应力集中区域变形会急剧增大;应力波远离裂纹端部后,端部区域受力减小,应力集中区域变形会急剧减小。此时间段内裂纹端部不断受到应力波的冲击作用,裂纹端部经历了多次压缩、回弹的循环过程,出现塑性变形和损伤,使得端部区域断裂韧度降低,所以在150~175 μs 内,不同围压的裂纹均再次起裂扩展,这是端部受应力波循环加卸载作用后形成疲劳损伤的结果,损伤区域扩展后,裂纹又再次止裂。

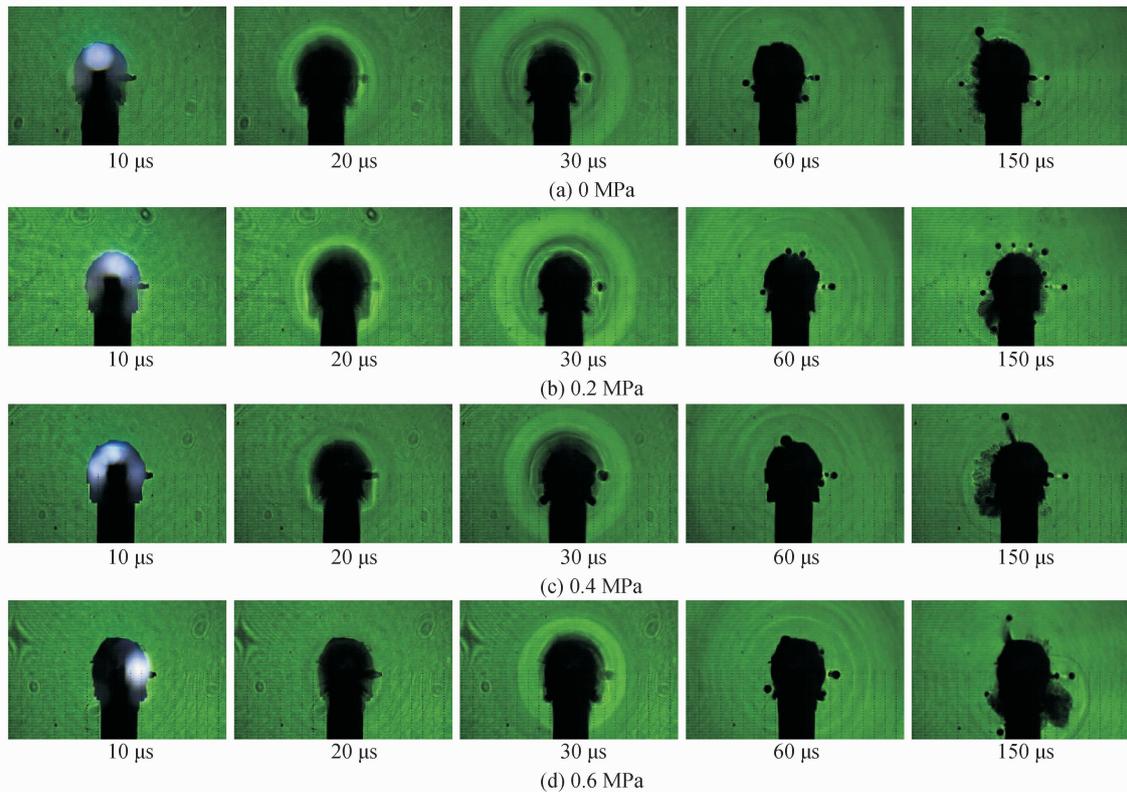


图 6 动态焦散斑部分图像

Fig. 6 Part of the images for dynamical caustics speckle

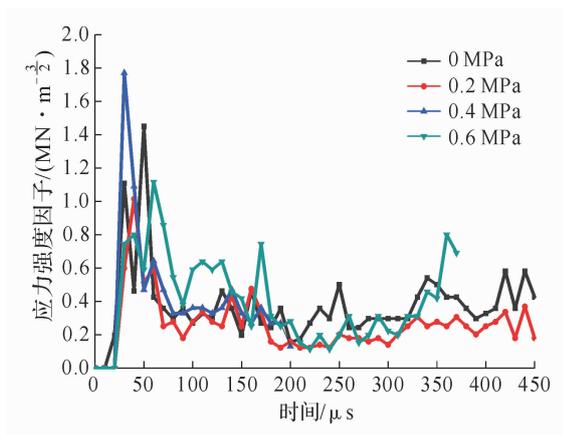


图 7 应力强度因子与时间变化曲线

Fig. 7 The curves of the stress intensity factor vs. time

在 175 ~ 350 μs 时间段内, 试验围压为 0.4 MPa 的预制裂纹已经止裂, 其他试验围压下的预制裂纹处于停滞期。此时 0 MPa 围压下预制裂纹应力强度因子在 $0.3 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 附近振荡变化, 幅度较大, 这是由于裂纹端部与爆源距离较近, 易受应力波的影响, 应力波的加卸载作用较为明显, 端部变形变化较大; 0.6 MPa 围压下预制裂纹应力强度因子在 $0.2 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 附近振荡变化, 振荡幅度也较大, 这是由于裂纹端部在围压作用下, 易产生应力集中, 应力波对裂纹加载时, 端部变形会急剧增

大, 应力波卸载后, 应力集中区域变形急剧减小; 试验围压为 0.2 MPa 时, 应力强度因子变化幅度较小, 这是由于此时预制裂纹扩展位移较大, 应力波运动至裂纹端部时已发生较大程度的衰减, 对裂纹端部的作用力相对较小, 端部变形较小。

在 350 μs 以后, 试验围压为 0 MPa、0.2 MPa、0.6 MPa 时, 相应预制裂纹的应力强度因子分别在 $0.4 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $0.2 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 、 $0.6 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 附近振荡变化, 此时 3 种试验围压下预制裂纹的应力强度因子值与 175 ~ 350 μs 时间段内各自曲线值近似, 但裂纹仍然起裂扩展, 这仍然是应力波循环加卸载作用的结果, 损伤区域扩展后, 裂纹会再次止裂。

2.4 能量释放率与扩展速度

图 8 为动态能量释放率和裂纹扩展速度与时间的变化曲线, 两者变化趋势基本相似, 均先达到峰值, 之后产生多次减小和增大交替变化的现象。两者间的关系大体为: 裂纹端部能量释放率较大后, 扩展开裂的裂纹扩展速度也会相对增大; 裂纹扩展速度减小后, 能量释放率会相应增大。

以 0 MPa 试验围压下相应动态能量释放率与裂纹扩展速度变化曲线为例, 对两者关系进行具体分析说明。在炸药爆炸初期, 约在 60 μs 时刻, 冲击载荷作用下能量释放率迅速增大至峰值

1 074 N/m,已达到裂纹的断裂韧度,裂纹开裂后扩展速度迅速增大至峰值 264.5 m/s;在 70 μs 时刻,能量释放率振荡变化后急剧减小至 112 N/m,此时裂纹速度随之骤降至 0 m/s,裂纹止裂;在 90 μs时刻,端部能量释放率小幅增大至 170 N/m,

裂纹又再次起裂,扩展速度增大至 15.5 m/s,能量释放率随之减小至 32 N/m;在 130 μs 时刻,能量释放率增大至 116 N/m,端部疲劳损伤区域开裂,扩展速度迅速增大至 171 m/s,之后速度骤降至 62 m/s,能量释放率则增大至 94 N/m。

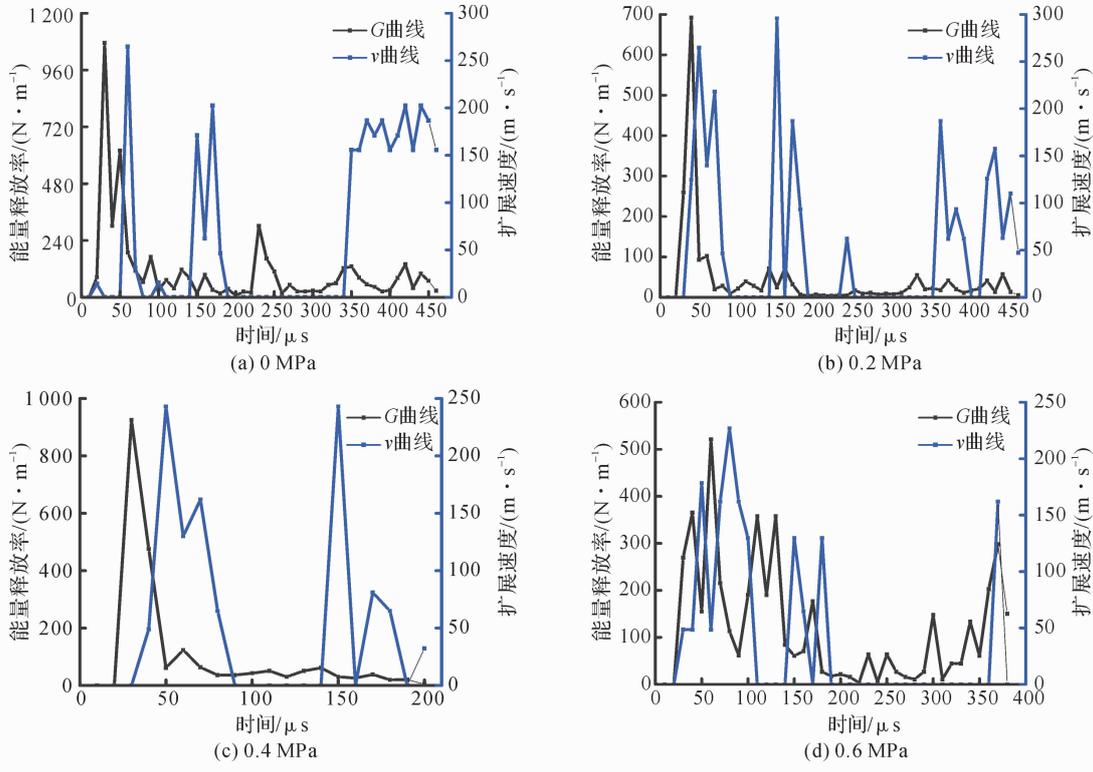


图 8 动态能量释放率、裂纹扩展速度与时间的变化曲线

Fig. 8 The curves of the dynamic energy release rate and the velocity of crack extension vs. time

2.5 试件损伤度的分析

炸药爆炸后,出现爆炸冲击波,受冲击波的压缩作用,PMMA 材料在应力峰值处受压,厚度减小,成为光疏材料,光线照射不到成为阴影区,从而形成一条条圆形条纹,条纹位置的变化过程与爆炸冲击波的运动过程同步,本文试验中将其作为应力波运动的参照物,用以进行应力波速度的计算。

根据试验记录的爆炸过程图像,测量并记录预

制裂纹端部应力波水平位置以及 10 μs 后相应应力波的水平位置,计算出相应时刻端部应力波在试件中的传播速度,将相应数据代入式(3)得到相应时刻试件的损伤度。10 μs 时刻,裂纹端部并未出现应力波,从 20 μs 时刻开始测量记录相关数据,90 μs 时刻以后,应力波形比较杂乱、模糊,不易识别,所以仅测量 20 ~ 90 μs 时间段内试件的损伤度(表 1)。

表 1 试件损伤度 D

Tab. 1 The damage degree of the specimens

围压/MPa	20 μs	30 μs	40 μs	50 μs	60 μs	70 μs	80 μs	90 μs
0.0	0.106	0.168	0.308	0.522	0.644	0.675	0.690	0.712
0.2	0.149	0.258	0.370	0.558	0.698	0.713	0.720	0.767
0.4	0.587	0.680	0.761	0.806	0.813	0.813	0.819	0.830
0.6	0.560	0.656	0.656	0.672	0.754	0.788	0.800	0.806

由表 1 看出,在爆炸冲击载荷持续作用下,新的裂纹逐渐形成并扩展,试件损伤度不断增大。试件

四周无围压时,任意时刻(20 ~ 90 μs)试件的损伤度均较围压情况小,这是因为在围压作用下,预制裂纹

处应力集中程度较大,在应力波作用下裂纹端部处应力陡增,易使裂纹开裂、扩展。20~90 μs 内,不同围压条件下试件损伤度的大小顺序为: $D(0.4\text{ MPa}) > D(0.6\text{ MPa}) > D(0.2\text{ MPa}) > D(0\text{ MPa})$ 。

与裂纹扩展位移关系对比分析得知,试件的损伤度与裂纹扩展位移存在内在联系:试件的损伤度越大,应力波在试件中运动时的速度降低,强度衰减,能量耗散就越大,预制裂纹的扩展位移就越小;试件的损伤度越小,应力波能量损失较小,预制裂纹端部的扩展位移就越大。

3 结 论

(1) 预制裂纹远端的扩展位移与围压应力、试件的损伤度密切相关。扩展位移与试件损伤度呈负相关的关系。扩展位移随着围压的增大,呈现先减小后增大的变化规律,在0 MPa 围压下扩展位移有最大值30.84 mm,在0.4 MPa 时扩展位移有最小值10.98 mm。

(2) 不同试验围压作用下的预制裂纹,在爆炸载荷作用下,扩展一段距离后便停止扩展,后又再次开裂扩展,出现扩展和止裂交替变化的现象。这是由于裂纹端部止裂后,端部受应力波循环加、卸载作用,出现疲劳损伤、断裂韧度减小,损伤区域易再次开裂。

(3) 不同试验围压下爆炸初期预制裂纹端部应力强度因子均保持在较高水平,爆炸后期应力强度因子均保持在较低水平。这与爆炸应力波的衰减程度、裂纹端部位置变化、试验围压等因素密切相关。

(4) 预制裂纹端部能量释放率较大时,裂纹扩展的速度也会相应增大;裂纹扩展速度减小后,能量释放率又会相应增大。

(5) 试件的损伤度与围压密切相关,随围压的增大呈现出先增大后减小的变化规律。

参考文献

- [1] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报,2014,39(2): 205-213.
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(2): 205-213.
- [2] 贾义鹏,吕庆,尚岳全,等. 基于证据理论的岩爆预测[J]. 岩土工程学报,2014,36(6): 1079-1085.
Jia Yipeng, Lü Qing, Shang Yuequan, et al. Rockburst prediction based on evidence theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1079-1085.
- [3] 唐治,潘一山,王凯兴. 冲击地压巷道围岩支护作用动力学分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(8): 1532-1538.
Tang Zhi, Pan Yishan, Wang Kaixing. Dynamic analysis of support for surrounding rock of rockburst roadway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(8): 1532-1538.
- [4] 付金伟,朱维申,曹冠华,等. 岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J]. 煤炭学报,2013,38(3): 411-417.
Fu Jinwei, Zhu Weishen, Cao Guanhua, et al. Experimental study and numerical simulation of propagation and coalescence process of a single three-dimensional flaw in rocks[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 411-417.
- [5] 胡荣,朱哲明,胡哲源,等. 爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7): 1476-1481.
Hu Rong, Zhu Zheming, Hu Zheyuan, et al. Experimental study of regularity of crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1476-1481.
- [6] 周小平,杨海清,董捷. 压应力状态下多裂纹扩展过程数值模拟[J]. 岩土工程学报,2010,32(2): 192-197.
Zhou Xiaoping, Yang Haiqing, Dong Jie. Numerical simulation of multiple-crack growth under compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(2): 192-197.
- [7] 曲志明,周心权,巩伟平,等. 大爆破爆炸冲击波在破碎岩体间传播的数值模拟研究[J]. 振动与冲击,2007,26(12): 60-62,100.
Qu Zhiming, Zhou Xinquan, Gong Weiping, et al. Numerical simulation on shock wave propagation in crushed rocks during intense blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007,26(12): 60-62,100.
- [8] 左宇军,李夕兵,唐春安,等. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(9): 1809-1820.
Zuo Yujun, Li Xibing, Tang Chun'an, et al. Experimental investigation on failure of rock subjected to 2D dynamic-static coupling loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(9): 1809-1820.
- [9] 赵伏军,谢世勇,潘建忠,等. 动静组合载荷作用下岩

- 石破碎数值模拟及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1290 - 1295.
- Zhao Fujun, Xie Shiyong, Pan Jianzhong, et al. Numerical simulation and experimental investigation on rock fragmentation under combined dynamic and static loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1290 - 1295.
- [10] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 主动围压下岩石的冲击力学性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 120 - 126.
- Liu Junzhong, Xu Jinyu, Lü Xiaocong, et al. Experimental study on rock's mechanical capabilities under impact loading with confining pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 120 - 126.
- [11] 平琦, 马芹永, 卢小雨, 等. 被动围压条件下岩石材料冲击压缩试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 55 - 59.
- Ping Qi, Ma Qinyong, Lu Xiaoyu, et al. Impact compress test of rock material under passive confining pressure conditions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 55 - 59.
- [12] 杨立云. 岩石类材料的动态断裂与围压下爆生裂纹的实验研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2011.
- [13] 杨仁树, 王雁冰, 岳中文, 等. 定向断裂双孔爆破裂纹扩展的动态行为[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 631 - 637.
- Yang Renshu, Wang Yanbing, Yue Zhongwen, et al. Dynamic behavior of crack propagation in direction fracture blasting with two holes[J]. Explosion and Shake Waves, 2013, 33(6): 631 - 637.
- [14] Yang Renshu, Wang Yanbing, Guo Dongming, et al. Experimental research of crack propagation in under polymethyl methacrylate material containing flaws explosive stress waves[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2016, 44(1): 248 - 257.
- [15] 杨仁树, 许鹏, 杨立云, 等. 缺陷介质切槽爆破断裂行为的动焦散线实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 145 - 152.
- Yang Renshu, Xu Peng, Yang Liyun, et al. Dynamic caustic experiment on fracture behaviors of flawed material induced by pre-notched blasting[J]. Explosion and Shake Waves, 2016, 36(2): 145 - 152.
- [16] 宋俊生, 王雁冰, 高祥涛, 等. 定向断裂控制爆破机理及应用[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(1): 016 - 028.
- Song Junsheng, Wang Yanbing, Gao Xiangtao, et al. The mechanism of directional fracture controlled blasting and its application[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(1): 016 - 028.
- [17] 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型实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 297 - 304.
- Guo Dongming, Liu Kang, Yang Renshu, et al. Simulated experiment of disturbance effect on crack defects of adjacent tunnel under dynamic and static load[J]. Explosion and Shake Waves, 2016, 36(3): 297 - 304.
- [18] 郭东明, 刘康, 杨仁树, 等. 爆炸冲击荷载下相邻巷道裂隙扩展机理模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 178 - 183.
- Guo Dongming, Liu Kang, Yang Renshu, et al. Simulation experiments on the mechanism of adjacent tunnel crack extension induced by explosion load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 178 - 183.
- [19] 郭东明, 刘康, 杨仁树, 等. 爆炸荷载对邻近巷道背爆侧裂纹的影响规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2355 - 2361.
- Guo Dongming, Liu Kang, Yang Renshu, et al. Effects of blast load on crack in back-blast side of adjacent tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2355 - 2361.
- [20] 郭东明, 闫鹏洋, 杨仁树, 等. 爆破开挖中巷道围岩缺陷扩展的动焦散模型试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 728 - 734.
- Guo Dongming, Yan Pengyang, Yang Renshu, et al. Dynamic caustics model experimental study on the defects extension of roadway surrounding rock when blasting excavation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 728 - 734.
- [21] 宋义敏, 杨小彬, 金璐, 等. 冲击荷载作用下岩石I型裂纹动态断裂试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 49 - 53.
- Song Yimin, Yang Xiaobin, Jin Lu, et al. Dynamic fracture test for I-type crack under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 49 - 53.
- [22] 杨仁树, 桂来宝. 焦散线方法及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997.
- [23] Ferund L B. Dynamic fracture mechanics[M]. Edinburgh: Cambridge University press, 1990: 1 - 18.
- [24] 王宇, 李晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287 - 300.
- Wang Yu, Li Xiao, Hu Ruilin, et al. Review of research process and application of ultrasonic testing for rock and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 287 - 300.

(责任编辑: 王晓玲)