

文章编号: 0253-9993(2005)01-0036-04

爆炸应力波作用下层理介质断裂的动焦散实验分析

杨仁树¹, 牛学超¹, 商厚胜¹, 经来旺^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 安徽理工大学基础系, 安徽淮南 232001)

摘 要: 利用爆炸加载动焦散试验系统, 进行了有机玻璃的透射式动焦散试验. 记录了含层理介质裂纹扩展的全过程, 发现裂纹穿过层理偏移一定距离后继续扩展的现象. 给出了爆炸荷载作用下裂纹尖端应力强度因子随时间的瞬态变化曲线. 对爆炸应力波在层理介质中引起断裂的机理进行了进一步的研究, 讨论了层理对应力波传播的影响. 利用应力波传播理论分析, 得出层理中裂纹与层理后裂纹产生的机理不同, 为层理岩体定向断裂控制爆破研究提供了新方法.

关键词: 爆炸应力波; 层理介质; 动焦散; 应力强度因子

中图分类号: TD235.37

文献标识码: A

Dynamic caustics analysis of crack in sandwich materials under blasting stress wave

YANG Ren-shu¹, NIU Xue-chao¹, SHANG Hou-sheng¹, JING Lai-wang^{1,2}

(1. Institute of Mechanics and Construction Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083; 2. Department of Basic Courses, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Transitive dynamic caustic model experiments were used with a transparent birefringence material in the dynamic caustic measuring system. The propagation of cracks in sandwich materials was recorded. It was observed that the direction of a crack propagation removes some distance from the initial one after it has crossed a sandwich. The time-dependent relations of the dynamic stress intensity factor at crack tip were showed. Analyzed the crack propagation mechanism in sandwich materials under blasting stress wave and the effects of the joint to stress wave. By the blasting stress wave theory, the result was obtained that the crack initiation mechanism is difference between the crack in the sandwich and behind of it. The experiment supplied a new method of studying the blasting mechanisms of directional broken blasting.

Key words: blasting stress wave; sandwich material; dynamic caustics; stress intensity factor

岩体中存在着层理, 岩石爆破时层理影响应力波的传播. 对于研究定向断裂控制爆破来说, 掌握动态裂纹遇到层理时的传播规律非常重要. 爆炸应力波的主要力学效应之一是在岩体中产生裂纹, 动态裂纹遇到层理时裂纹尖端的应力和应变还没有可用的解析解, 而实验方法研究裂纹在动态加载条件下的行为非常有效. 由于爆炸应力波引起裂纹尖端力学和光学的奇异性, 对于动光弹法、全息法、动云纹法、干涉法等典型的光测力学方法来说, 在靠近奇异点附近区域所得到的光学图像中, 条纹已密集到难以准确分辨的程度, 从中无法直接得到关于高应变区有价值的信息. 动焦散方法可以准确而方便地确定裂纹尖端的应力强度因子. 1964年, Manogg^[1]首先提出一个适合解决奇异性问题的实验方法——焦散线方法. 从1976年开

收稿日期: 2004-03-31

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020290010)

作者简介: 杨仁树(1963-), 男, 安徽和县人, 教授, 博士生导师. Tel: 010-62331310, E-mail: yrscumtb@sohu.com

始, Kalthoff^[2]将焦散线方法用于测定动态应力强度因子。此后, 该方法被大量应用于动态断裂行为的研究^[3~5], 并逐步用于爆炸加载即所谓超动态加载条件下裂纹扩展的研究^[6]。然而, 对于层理介质裂纹扩展过程中爆炸应力波所起的作用尚缺少深入研究。

本实验揭示了层理岩体定向断裂控制爆破裂纹发展的规律及应力强度因子的变化特征。笔者从爆炸应力波的角度, 对爆炸裂纹遇层理偏移一定距离后继续发展进行了深入地分析。

1 动聚焦实验原理

爆炸加载存在超动态效应, 描述其产生裂纹的力学参数适宜用动态应力强度因子。爆炸应力波以纵波和横波两种体波形式在介质中传播, 爆炸应力场属于复合型。根据有关资料^[7], 动态裂纹的复合应力强度因子可由下式求得, 即

$$K_{Id} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3 \times 3.17^{5/2} z_0 c d_e} D_{\max}^{5/2}, \quad (1)$$

$$K_{2d} = \mu K_{Id}, \quad (2)$$

式中, $D_{\max}$ ($D_{\min}$) 为复合型裂纹尖端焦散斑最大 (小) 直径; z_0 为参考平面到试件平面的距离; c 为材料的应力光学常数; d_e 为试件的有效厚度; μ 可以依其与 $(D_{\max} - D_{\min}) / D_{\max}$ 之关系曲线求得。

实验中使用切缝药包爆破加载。切缝药包爆破时, 切缝处形成应力集中点, 切缝方向优先形成预裂纹。裂纹在应力波的动作用和爆生气体的静作用下起裂、发展。由于实验采用切缝装药的定向断裂爆破工艺, 形成的初始裂纹与入射波阵面法向单位矢量平行, 避免了炸药爆炸后形成众多的爆生裂纹, 有利于研究爆炸冲击波作用下的裂纹扩展规律。

2 实验结果

实验中使用的试件材料为有机玻璃, 试件尺寸为 290 mm × 210 mm × 6 mm, 炮孔直径为 8 mm。有机玻璃的动态力学参数: 纵波波速 2 250 m/s, 横波波速 1 200 m/s, 弹性模量 45 Pa, 泊松比 0.38, 系统光学系数 8.8 m²/N。层理的制作方法是, 将有机玻璃板按预定位置画出一条痕迹, 然后沿画痕折断, 在层理上涂上 502 胶水将断板黏合, 待胶水凝固后即可。放炮时在平行于层理的板端放置两根钢条, 并用钢夹夹紧, 施加类似于地应力的外部荷载, 以模拟层理地层爆破岩石的现场条件。使用切缝药包和 PdN₆ 炸药爆炸加载。试件共分 2 组, 按切缝中线与层理夹角 ω 的大小分为 60 和 90 两种情况, 每 1 组又按炮孔与层理间距的大小分为 30 或 40 mm, 试件参数: 模型 M_1 , 规格为 295 mm × 235 mm × 6 mm, 单缝, 切缝宽度 0.3 mm, 切缝方向与层理夹角为 60°, 炮眼与层理间距为 30 mm; 模型 M_2 , 规格为 320 mm × 250 mm × 6 mm, 双缝, 切缝宽度 0.3 mm, 切缝方向与层理夹角为 90°, 炮眼到两条层理的距离分别为 30 或 40 mm。

从实验结果发现, 炸药爆炸后沿切缝方向均产生左右 2 条主裂纹, 当主裂纹扩展到层理面时, 并非直接穿过层理沿原方向而是偏移一定距离后继续发展。当扩展裂纹与层理间的夹角 $\omega = 60^\circ$ 时, 裂纹越过层理后产生一条偏移的裂缝, 见图 1 (a); 当扩展裂纹与层理间的夹角 $\omega = 90^\circ$ 时, 左侧主裂纹没有越过层理继续扩展, 右侧主裂纹越过层理后产生两条偏移的次裂缝, 见图 1 (b) 试件 M_2 的爆后效果照片。

图 2 为切缝中线与层理夹角 $\omega = 60^\circ$ 时的系列焦散照片 (对应图 1 (a))。由图可见, 裂纹扩展到层理面时, 焦散斑的尺寸突然减小并沿层理移动, 移动一段距离后, 焦散斑会有一个短时间的停滞, 此时焦散斑的尺寸逐渐加大, 然

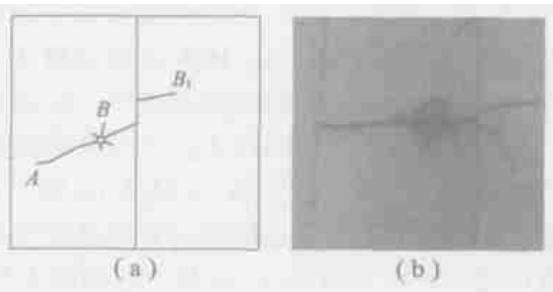


图 1 试件 M_1 爆后裂纹扩展和 M_2 的爆后效果

Fig. 1 The cracks propagation in specimen M_1 and the photograph of specimen M_2 by blasting

(a) 试件 M_1 爆后裂纹扩展; (b) 试件 M_2 的爆后效果

后随裂纹穿过层理继续扩展, 但焦散斑重新初始化的尺寸小于入射时的尺寸。

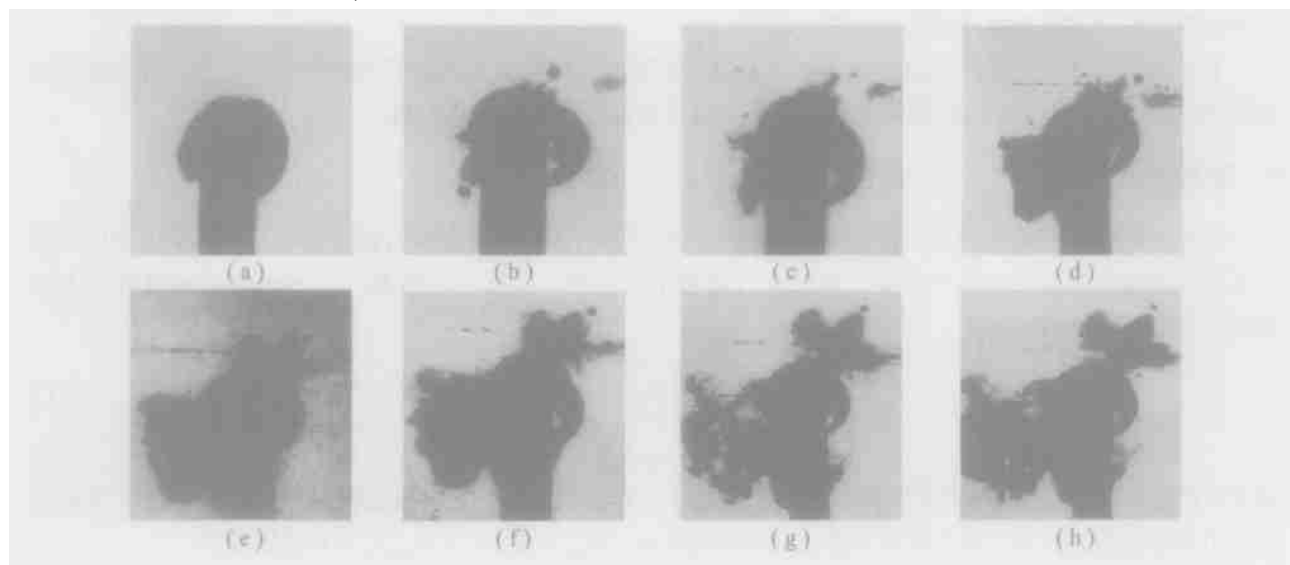


图 2 $\omega = 60^\circ$ 时试件的动焦散系列照片

Fig. 2 Photographs of the cracks propagation induced by blasting in organic glass for $\omega = 60^\circ$

(a) ~ (h) $t = 23.8, 77.0, 93.4, 111.8, 133.4, 175.8, 194.2, 228.8 \mu s$

3 实验分析

通过测定实验得到焦散斑尺寸, 并利用式 (1) 或式 (2) 计算裂纹尖端的复合应力强度因子, 将应力强度因子随时间变化的趋势绘成曲线, 如图 3 所示。

3.1 应力波在均匀介质和含裂纹介质传播时应力强度因子的变化

不受层理影响的爆炸裂纹 $K_{Id} - t$ 变化曲线见图 3 的曲线 A。图 3 (a) 对应图 1 (a) 和 2 左裂纹, 当 $t = 77.0 \mu s$ 时, 其应力强度因子达到最大值, $K_{Id} = 1.24 \text{ kg/mm}^{3/2}$, 随后 K_{Id} 逐渐减小, 直至裂纹停止扩展;

图 3 (b) 中裂纹 A (对应图 1 (b) 左裂纹) 的应力强度因子的变化与图 3 (a) 中裂纹 A 的变化趋势基本一致, 因为虽然试件 M_2 左侧亦有层理, 但距离炮眼较远, 对应力波传播影响较小。可见, 在不受裂纹影响的均匀介质中, 应力波引起的应力强度因子数值是随距离的增加逐渐减小的。

受层理影响的爆炸裂纹 $K_{Id} - t$ 变化曲线见图 3 的曲线 B, B_1 和 B_2 。当裂纹 B (对应图 1 (a) 2 右裂纹) 的尖端扩展到层理, 即 $t = 63.6 \mu s$ 时, 应力强度因子达到最大值, $K_{Id} = 1.67 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 。随着裂纹尖端进入层理面, 而后穿过层理后重新开始发展, 耗时约 $13.4 \mu s$ 。当裂纹 B 的尖端穿过层理后继续发展, K_{Id} 逐渐增大, 在 $t = 133.4 \mu s$ 时, 达到第 2 个峰值 $K_{Id} = 1.16 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 。由于层理的存在, 第 2 个峰值比第 1 个峰值小 $0.51 \text{ kg/mm}^{3/2}$; 在图 3 (b) 中, 裂纹 B_1 , B_2 (对应于图 1 (b) 越过层理的右裂纹, B_1 为上裂纹, B_2 为下裂纹) 是主裂纹 B 穿层后在介质中的进一步扩展的应力强度因子随时间变化的曲线。从图中可以看出, 当裂纹穿过层理后, K_{Id} 仍然保持增大的趋势, 直至达峰值后才开始减小。裂纹 B_1 在 $t = 95.6 \mu s$ 时 K_{Id} 达到峰值 $1.34 \text{ kg/mm}^{3/2}$, 裂纹 B_2 在 $t = 108.2 \mu s$ 时 K_{Id} 达到峰值 $0.71 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 。上述两模型 $K_{Id} - t$ 曲线的变化趋势一致, 即爆炸裂纹 B 遇层理后发生偏移, 其 K_{Id} 突然变小, 穿层后出现第 2 个峰值。

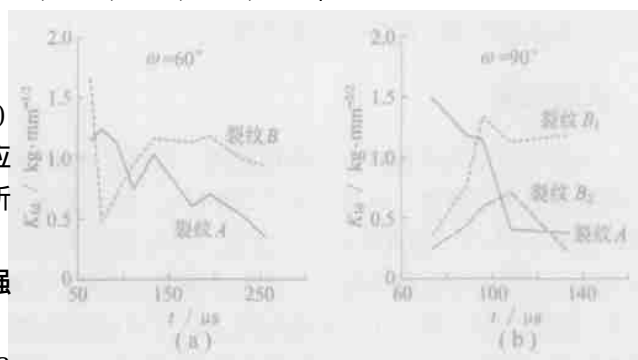


图 3 不同 ω 时动态应力强度因子 $K_{Id} - t$ 曲线

Fig. 3 Change of dynamic stress intensity factor

K_{Id} with t for different values of ω

3.2 裂纹穿过层理偏移的应力波传播机理分析

图1反映了爆炸应力波引起的裂纹遇到层理时偏移的现象, 这是应力波遇层理时反射、透射和折射的结果. 现以 $\omega = 90^\circ$ 时裂纹 AB 的扩展过程来分析, 如图4 (对应图1 (b)) 所示, 切缝药包产生的应力波以扇形向层理传播, 点装药爆炸在介质中同时激起纵波和横波, 但起主要作用的是纵波, 横波一般可以忽略不计^[8]. 当波阵面到达层理时, 会产生反射纵波和反射横波. 由于切缝药包的切缝中心线与 AB 方向一致, 同时 AB 是切缝到达层理最短的距离, 因而, 当爆炸应力波从 A 点传向层理时, 振幅和应力首先在 B 点达到最大值. 当 B 点反射纵波产生的应力强度因子数值大于层理的动态断裂韧度时, 将在 B 点产生裂缝. 裂缝的产生阻断了应力波在 B 点附近继续向右传播的路径. 然而在 B 点产生裂纹并向两侧传播的同时, 裂纹两端点以外仍然可以透射应力波. 该应力波透过层理在径向产生压应力, 而在切向产生拉应力, 当该拉应力的应力强度因子数值大于有机玻璃的动态断裂韧度时, 层理右侧的有机玻璃将断裂, 即产生裂纹 B_1C_1 , B_2C_2 . 由于运动裂纹 B_1B_2 裂尖应力集中, 裂尖又为裂纹 B_1C_1 , B_2C_2 起始创造了自由面, 因而裂纹 B_1C_1 , B_2C_2 在裂尖 B_1 , B_2 处起裂. 一旦裂纹 B_1C_1 , B_2C_2 起裂, 沿层理运动的裂纹 B_1B_2 尖端的能量得以释放, 运动裂纹 B_1B_2 也就停止沿层理向两侧继续扩展. 可见, 表面上看裂纹 B_1B_2 扩展到 B_1 , B_2 两点后继续沿 B_1C_1 , B_2C_2 扩展, 但它们产生的机理是不同的. 至于 $\omega = 60^\circ$ 时仅产生1条偏移裂纹, 是由于应力波的主方向对层理的入射角太大, 层理中裂纹的产生释放了下方介质中拉应力的结果.

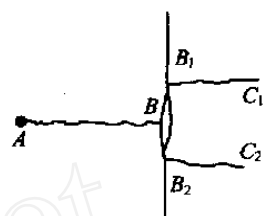


图4 $\omega = 90^\circ$ 时裂纹扩展

Fig. 4 Schematic drawing of crack propagation $\omega = 90^\circ$

4 结 论

爆炸应力波在岩体中引起的裂纹扩展至层理时会发生偏移, 这是由于层理的开裂阻断应力波传播的结果, 偏移的距离与应力波的强弱及介质的性质等因素有关; 层理使扩展裂纹的应力强度因子的数值产生较大波动, 并使应力强度因子的峰值减小; 爆炸应力波会在层理面中引起裂纹扩展, 也会引起层理后介质中裂纹的扩展, 但它们产生的机理完全不同, 层理中裂纹是由于应力波在层理面上反射形成的, 而层理后裂纹是由于爆炸应力波透射过层理后的纵向压缩波产生的切向拉应力形成的; 该实验结果对研究层理岩石定向断裂控制爆破具有参考意义.

参考文献:

- [1] Manogg P. Anwendung der schattenoptik zur untersuchung des zerreissvorgangs von platten [D]. West Germany: West Germany Freiburg University, 1964.
- [2] Beinert J, Kalthoff J F. Experimental determination of dynamic stress intensity factors by shadow patterns [A]. Exp Evaluation of Stress Concentration and Intensity Factors [C]. Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1981. 281 ~ 290.
- [3] Theocaris P S. Dynamic propagation and arrest measurements by the method of caustics on overlapping kewparallel cracks [J]. International Journal of Solid and Structures, 1978 (14): 639 ~ 653.
- [4] Yao X F, Jin G C, Arakawa K, et al. Experimental studies on dynamic fracture behavior of thin plates with parallel single edge cracks [J]. Polymer Testing, 2002 (21): 933 ~ 940.
- [5] 段自力. 裂纹失稳扩展轨迹焦散线和伪焦散线实验研究 [J]. 固体力学学报, 1995, 16 (3): 270 ~ 273.
- [6] 李 清, 杨仁树. 爆炸荷载裂纹扩展的应力强度因子及其断裂行为研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (3): 290 ~ 293.
- [7] Kalthoff J F. Handbook on experimental mechanics [M]. New Jersey: Society for Experimental Mechanics, 1987.
- [8] 王文龙. 钻眼爆破 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.