

# 冲击压缩下非均质脆性固体的弛豫破坏研究<sup>\*</sup>

陈登平<sup>1)†</sup> 贺红亮<sup>1)†</sup> 黎明发<sup>2)</sup> 经福谦<sup>1)‡</sup>

1) 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 绵阳 621900)

2) 武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

(2006 年 2 月 13 日收到, 2006 年 6 月 6 日收到修改稿)

通过平板冲击实验研究了富含微缺陷的非均质脆性固体的冲击压缩响应特性. 选取“强角闪石化橄榄二辉岩”作为样品材料, 利用激光速度干涉仪测量样品后自由面的速度历史, 在冲击加载应力远低于样品材料 Hugoniot 弹性极限的条件下, 观测到了表征破坏波出现的再加载信号, 并且该破坏波的速度远大于玻璃中破坏波的速度, 以接近于冲击波的速度在样品内向前传播, 其形成机理与玻璃样品中的破坏机理不同, 称之为“就位扩展机理”. 采用同一冲击加载应力( $\sim 3.9\text{GPa}$ )作用于不同厚度的样品, 获得了破坏波穿过样品的运动过程, 确定出样品中破坏波的轨迹线近似为一条不过原点的直线, 相应的产生此破坏波的弛豫时间约为  $0.5\ \mu\text{s}$ .

关键词: 冲击波, 破坏波, 微观缺陷, 脆性固体

PACC: 6250, 6220, 6110F

## 1. 引言

玻璃、陶瓷等典型脆性材料由于具有压缩强度高、硬度高、熔点高、密度低等许多优良的物理力学特性, 被广泛应用于各种苛刻的条件如高温、高压、腐蚀和辐射环境下的众多器件和工程中, 然而对于脆性固体材料压缩破坏(包括冲击波加载下的压缩行为)的认识还远远不够. 固体材料在载荷作用下的损伤、破坏涉及从微观到宏观各种层次和各种尺度的相互耦合<sup>[1]</sup>, 固体破坏问题不仅是力学中的一大难题, 而且也是对物理学的一场新的挑战. de Gennes(1992 年诺贝尔物理奖获得者)认为, 无序与断裂问题的研究可能成为物理与力学的新结合点. 脆性固体一般来说都是非常硬和脆的, 对变形具有高度敏感性, 经常在应变不到 1% 时就发生破坏, 在冲击载荷作用下表现出许多不同于延性固体的响应特性和破坏行为, 因而对脆性固体的动态压缩特性研究不仅是一个工程问题, 也是一个非常有意义的科学问题.

在冲击加载条件下进行材料动态特性研究的实验技术通常是平板冲击实验, 例如文献 [2, 3] 利用平板冲击实验研究了一些材料的屈服强度、剪切模量等. 材料的动态响应特性可以通过多种方法来获得,

例如, 利用激光速度干涉仪 VISAR (velocity interferometer system for any reflector) 测量样品自由面速度历史或在样品内埋置应力计测量样品内不同位置和不同方向的应力历史等. “破坏波 (failure wave)”现象是脆性固体在冲击加载条件下表现出的非常独特的动态破坏特性之一. Razorenov<sup>[4]</sup> 等通过 VISAR 测量平面爆轰冲击的 K19 玻璃样品的自由面速度历史时发现, 当冲击压缩应力超过某一阈值但低于材料的 Hugoniot 弹性极限  $\sigma_{\text{HEL}}$  时(传统的观点认为压缩破坏不可能在  $\sigma_{\text{HEL}}$  以下应力区发生, 而必须是加载应力越过  $\sigma_{\text{HEL}}$  以后, 介质才产生损伤破坏), 自由面速度曲线出现一个反常的、弱的二次压缩信号, 认为它是由于自由面反射的卸载稀疏波在受压缩样品内遇到具有较低声阻抗的破坏区的界面反射造成的. 即在受冲击压缩的样品内存在一个滞后于冲击波阵面的破坏区. 以后的许多实验对此破坏波现象作了进一步地证实并对破坏区内的纵向应力、横向应力、材料强度以及冲击加载应力与破坏波速度之间的关系等问题作了大量的研究<sup>[5-12]</sup>, 明确了破坏波的许多性质, 例如破坏波后的材料冲击阻抗显著下降, 层裂强度几乎下降为零, 冲击加载应力强度在 3—9 GPa 范围内, 破坏波的速度是比较慢的, 其值

<sup>\*</sup> 中国工程物理研究院科学技术基金(批准号 20040107)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: honglianghe@263.net

大约为 1—2.5 km/s 等。

值得指出的是,已有的研究工作主要集中在玻璃等均质脆性固体上,但是对于非均质脆性固体,尤其是像陶瓷、复合材料、岩石类自身含有微观缺陷的脆性固体,是否也存在“破坏波”现象,还存在许多争论,目前尚没有明确一致的报道,甚至报道结果相互矛盾。Grady 和 Moody<sup>[13]</sup>通过 VISAR 测量了在冲击压缩作用下  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiB}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{AlN}$  等陶瓷样品的后自由面速度历史,没有观察到表征“破坏波”出现的异常的二次压缩信号。而近期陆续观察到  $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[14,15]</sup>、 $\text{TiB}_2$ <sup>[16]</sup>、 $\text{SiC}$ <sup>[17]</sup>等多晶陶瓷以及砂浆<sup>[18]</sup>、3D-C/SiC 复合材料<sup>[19]</sup>等非均质脆性固体中也可能存在压缩损伤破坏区。应该强调的是 Kanel 等<sup>[20]</sup>最近采用多层玻璃样品的冲击加载实验,观察到每层样品的前表面都有破坏波产生,该实验中不同玻璃样品的层间界面等效于陶瓷、岩石等非均质脆性介质的晶界或颗粒界面,因此推测在陶瓷和岩石等非均质脆性材料中也可以产生类似玻璃中的破坏波。

本文选用岩石为非均质脆性固体的样品材料,利用 VISAR 测量自由面速度历史这种更灵敏的探测方法研究了它在  $\sigma_{\text{HEL}}$  以下应力区的冲击压缩特性,明确地测量到一种新的不同于玻璃介质中的弛豫破坏现象,文章对这种弛豫破坏的性质进行了详细分析,并定量测量了  $3.9 \pm 0.2$  GPa 冲击应力下的弛豫时间。文章对产生这种弛豫破坏的物理机理提出了初步解释。选用岩石作为非均质脆性固体的代表性材料是因为岩石的剪切强度较低,对压剪破坏更为敏感,因此有可能明显地反映剪切破坏的效应和特征。

## 2. 实验方法

选用“强角闪石化橄榄二辉岩”(AOW 岩石)作为研究材料,该岩石取自四川省宝兴县,是一种典型

的上地幔岩石,主要成分为角闪石(体积比 73%)、辉石(9%)、橄榄石(4%)、云母(3%)、蛇纹岩(3%)、磁铁矿(3%)。所有的实验样品均取自同一大块岩石,加工成直径为 80 mm,厚度分别为 6, 8, 10 mm 的三种样品。为了确保平面冲击加载,对样品前、后两平行表面进行研磨、抛光处理至粗糙度优于  $\nabla \alpha 2.5$  ( $\mu\text{m rms}$ ),平面度优于 0.02,肉眼看不到孔洞、裂纹。为了消除岩石中残留水分对岩石动态行为的影响,所有样品均在 100℃ 温度下烘干 24 h 左右。样品的后表面蒸镀了一层约为 800 nm 厚的铝膜,用做 VISAR 测量系统入射激光的反射面。经测定,样品的孔隙比约为 0.28%,平均密度为  $2.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,平均纵波声速为 6.75 km/s(由于样品的个体差异,细观组织不均匀,纵波声速大约有 3%—5% 的差异),根据文献[21]的测量(如图 1)可知 AOW 岩石的  $\sigma_{\text{HEL}}$  约为 7.8 GPa。

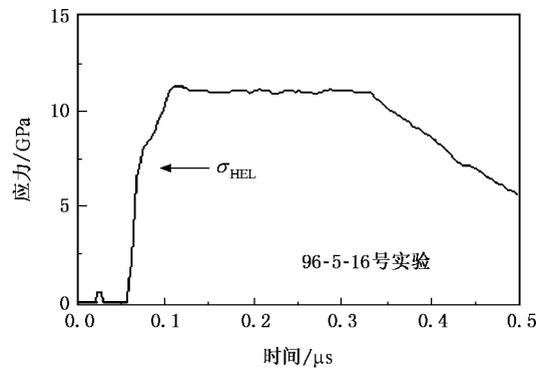


图 1 锰铜应力计测量的 AOW 岩石的典型冲击压缩实验信号(引自文献[21])

冲击加载实验装置如图 2 所示。实验中使用的飞片材料为无氧铜(oxygen-free high-conductivity copper, OFHC),密度为  $8.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,纵波声速为 4.60 km/s,厚度为 10 mm,直径为 95 mm。为了专门研究样品的压缩破坏现象,选用足够厚的飞片,以保证

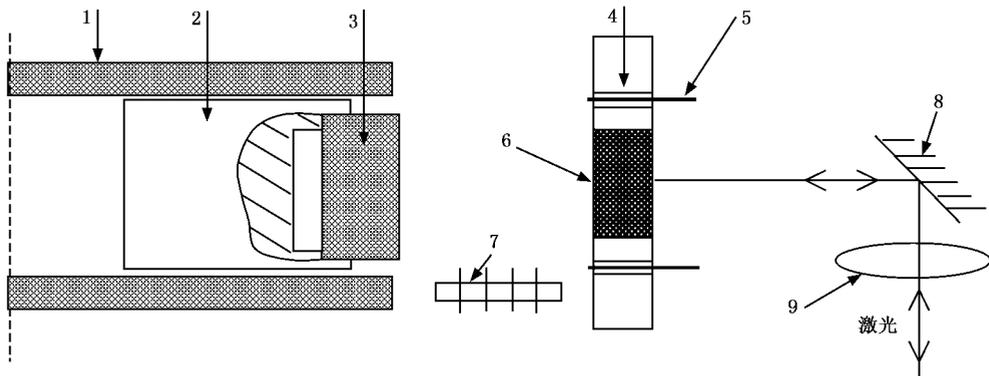


图 2 平板冲击实验的装置简图(1 为气炮,2 为弹丸,3 为飞片,4 为靶环,5 为触发探针,6 为样品(岩石),7 为测速探针,8 为反射镜,9 为透镜)

由飞片后自由面发出的追赶稀疏波在有效的测量时间内不会影响样品的压缩状态。

### 3. 实验结果和讨论

飞片碰撞速度在 300 m/s 左右的所有 AOW 岩石自由面速度历史如图 3 所示。从图 3 可以看出,所有的自由面速度历史都显示了相同的特性,即开始有一个快速上升,然后速度基本保持不变,随后速度

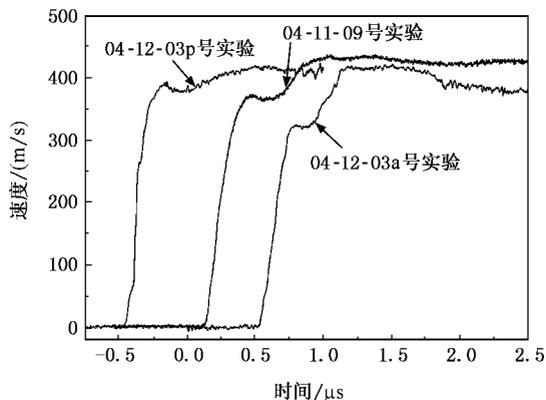


图 3 不同厚度样品的自由面速度历史(箭头所指为再加载信号)

表 1 AOW 岩石样品的冲击加载实验条件及结果

实验编号	样品厚度/mm	飞片材料	飞片厚度/mm	碰撞速度/(m/s)	加载应力*/GPa	破坏区厚度/mm	破坏波速度/(km/s)
04-12-03p	6.08	OFHC	10.06	304.6	3.92	4.08	5.86
04-11-09	8.12	OFHC	10.08	308.0	3.96	6.26	6.39
04-12-03a	10.02	OFHC	10.04	296.2	3.82	8.46	6.94

\* 三次实验加载应力的平均值为 3.9 GPa.

根据图 5 计算破坏区的厚度和样品内破坏波的平均传播速度。如图 5 的拉格朗日坐标,假定从飞片撞击样品的时刻开始,样品经过短暂的弛豫时间  $t_0$  之后样品开始破坏,破坏区边界以一定的速度向前传播,  $t_f$  时刻稀疏波  $R$  与破坏区边界相遇,此时破坏区的厚度为  $h_f$ ,则有

$$h_f \approx h_s - t_f c_{10} / 2, \quad (1)$$

$$t_f \approx (2h_s - h_f) / c_{10}, \quad (2)$$

$$V_f \approx h_f / (t_f - t_0), \quad (3)$$

式中  $h_s$  为样品厚度,  $c_{10}$  为样品在常压下的弹性纵波声速。在本文的实验中,由于加载应力较低,计算中近似取  $c_1 \approx c_2 \approx c_{10}$ , 并且忽略加载状态与常压状态样品密度  $\rho$  与  $\rho_0$  的差异,根据关系式  $V_f$  (欧拉坐

标)  $= (\rho_0 / \rho) V_f$  (拉格朗日坐标),可认为两种坐标下得到的破坏波速度值近似相等。根据实验测得的  $t_f$  值,计算出破坏波的平均速度,结果列于表 1。

又出现一个幅度较小的上升(如图 3 中箭头所示)。实验加载条件及简要的实验结果如表 1 所示。根据测量的碰撞速度由阻抗匹配法可以计算出冲击加载应力,计算结果如表 1。从表 1 可以看出,所有实验的加载应力幅值都约为 3.9 GPa,而根据图 1 可知 AOW 岩石材料的  $\sigma_{HEL}$  值约为 7.8 GPa,即所有实验的冲击加载应力都在样品材料的  $\sigma_{HEL}$  以下。以样品厚度为 6.08 mm 的 04-12-03p 为例,如果样品内部没有破坏波出现,根据计算可得稀疏波从飞片/样品界面反射回来所需要的时间应大约为  $1.8 \mu s$ ,而实验结果表明岩石样品的自由面在大约运动了  $0.57 \mu s$  以后,出现了一个小的速度增加,即速度增加信号(如图 3 箭头所示)出现的时刻早于飞片/样品界面分离信号出现的时刻。同时,只考虑样品材料弹性响应的数值模拟结果也表明实验中的速度增加信号并非源于样品的弹性变形(如图 4 所示),代替数值模拟中自由面速度下降的是一个小的速度增加,并且速度增加信号出现的时刻早于数值模拟信号出现速度降低的时刻。由此可以判定在样品内部出现了一个阻抗较低的区域,速度增加信号是从飞片/样品界面之前的某个低阻抗区界面反射回来的,即在样品内部出现了压缩破坏区。

标)  $= (\rho_0 / \rho) V_f$  (拉格朗日坐标),可认为两种坐标下得到的破坏波速度值近似相等。根据实验测得的  $t_f$  值,计算出破坏波的平均速度,结果列于表 1。

通过不同厚度的岩石样品在同一冲击压力作用下的实验,可以分别得到它们的破坏区厚度以及再压缩信号出现的时刻,进而可以得到样品内破坏波在不同时刻的位置,这样得到样品内的破坏区边界(如图 6)。从图 6 可以看出,在此时破坏区边界的位置  $x$  与演化时间  $t$  近似为一条直线  $t = 0.5 + 0.15x$ ,并不通过坐标原点且与冲击波阵面几乎平行,这表明样品破坏在飞片撞击后有一个明显的弛豫时间,约为  $0.5 \mu s$ 。经此弛豫时间后,样品几乎以与材料的纵波速度相同的破坏速度引起材料的破

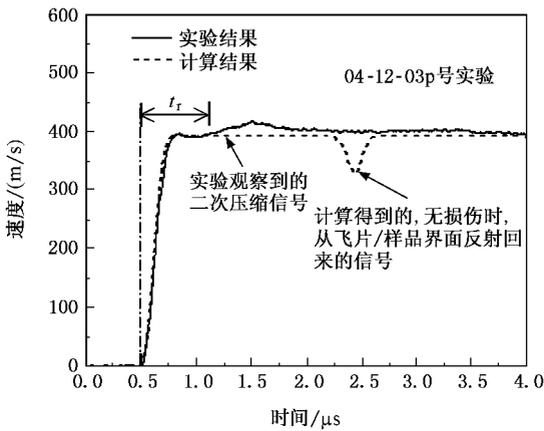


图4 实验结果与模拟结果的比较

将产生破坏并逐渐向样品内传播形成破坏波,即表面微裂纹扩展机理<sup>[4-6,9-10,22]</sup>。由于玻璃中的破坏波是样品表面微裂纹开裂的结果,所以破坏波的速度不会超过裂纹扩展的速度,约为0.5—0.7倍的体声速<sup>[22]</sup>。据此观点,如果岩石材料中的破坏波也是表面微裂纹扩展机理形成的,那么其破坏波速度的范围大约为2.47—3.45 km/s(AOW岩石样品的体声速为4.93 km/s)。很显然,这样预估的破坏波速度值远低于本文岩石中实际观察到的破坏波速度值。因而我们可看出在脆性均质材料(例如玻璃)和脆性非均质材料(例如岩石)中,虽然都有破坏波产生,然而它们的产生机制可能不同,即非均质脆性材料中的破坏波形成机制应不同于均质脆性材料中的表面微裂纹扩展机理。

岩石是一种典型的非均质脆性材料,其内含有大量的微裂纹、微孔洞等微缺陷。在冲击波压缩作用下,这些微裂纹将可能由于局部的剪应力作用而激活、扩展。与Grady<sup>[23]</sup>提出的在冲击加载应力超过材料 $\sigma_{\text{HEL}}$ 的剪切破坏模型类似,我们提出这种剪切破坏方式也可能出现在冲击应力低于材料 $\sigma_{\text{HEL}}$ 时的受压样品中。文献<sup>[24,25]</sup>对在准静态压缩作用下岩石中的微裂纹演化进行的广泛观察和研究,认为在压缩作用下微裂纹有两种典型的扩展方式:一是由局部剪应力导致的拉伸应力集中作用而在原生微裂纹尖端扩展,另一种是由于两个倾斜界面剪切滑移而导致的三晶粒汇交处新裂纹的产生。在冲击载荷作用下,文献<sup>[8,26]</sup>表明受压陶瓷等非均质脆性材料中沿着晶粒边界出现了大量的微裂纹。

在一维应变冲击压缩条件下,样品由于强大的侧向围压作用而产生很大的剪应力。因此,根据我们现在的观察结果,我们认为,飞片与样品相撞后,岩石样品中冲击波通过以后区域内的微裂纹等微缺陷在这种剪切应力的作用下,经过短暂的弛豫时间,微裂纹等微缺陷在原来的位置扩展形成新的裂纹,并彼此形成裂纹网络,导致样品内出现一个以近乎冲击波速度向前传播的低阻抗破坏区域,本文称这种物理机理为“就位扩展机理”。

我们的观察表明,在冲击波压缩下,AOW岩石样品中原生微裂纹的“就位”激活、扩展是岩石材料中破坏波形成的主要机理。由于受压岩石样品内的原生微裂纹是“就位”扩展,并不需要时间从碰撞面向样品内传播,因此该破坏区的传播速度能远远超过玻璃中的破坏波速度。这可以用来很好地解释为

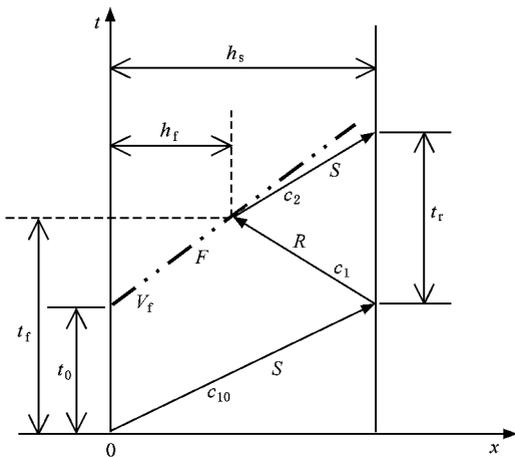


图5 计算破坏波速度的距离-时间关系图

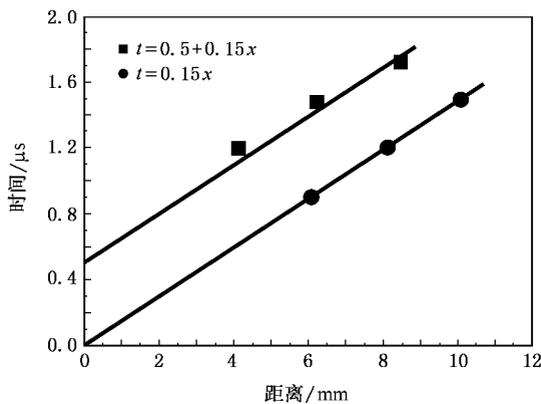


图6 破坏区边界位置与演化时间的关系

破坏。而在玻璃等脆性材料中的破坏波速度约为1—2.5 km/s<sup>[6-12]</sup>,远低于该破坏波速度值。在玻璃样品中,飞片与样品碰撞后,样品表面的微裂纹等微缺陷

什么在我们研究中观察到的岩石中破坏波的速度是非常高的.破坏波阵面和冲击波阵面之间有一个明显的弛豫说明样品在冲击压缩后可能存在一个破坏孕育区.在这个孕育区内,微裂纹等缺陷“就位”激活、扩展并最终导致受压材料形成局部破坏.图 7 是

上述破坏波形成与传播图像的一个示意图.图 7(a)表示冲击波驱动样品内的原生微裂纹等缺陷在原来位置(或三晶粒交界处)就位”扩展,形成裂纹网并向前传播;图 7(b)表示破坏区滞后于冲击波阵面一定距离,以接近冲击波的速度向前传播.

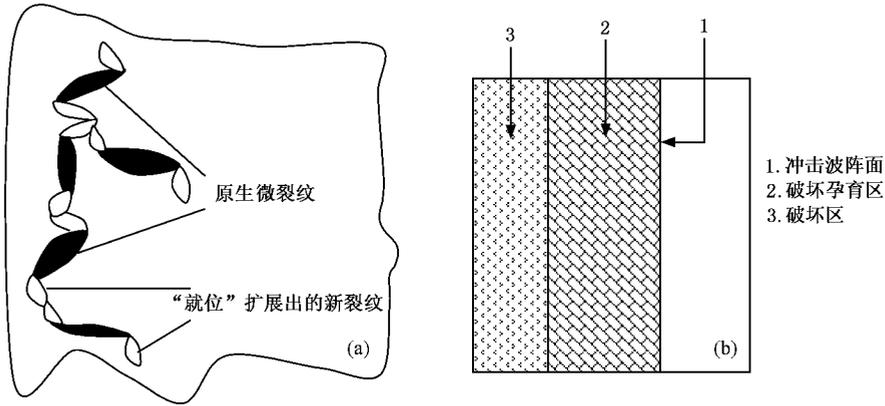


图 7 破坏波的形成与传播示意图

## 4. 结 论

以 AOW 岩石为样品研究了脆性非均质材料在平面冲击加载条件下的冲击压缩响应特性.通过 VISAR 测量在同一冲击压力下不同厚度样品的自由面速度获得了冲击波和破坏波穿过样品的位置-时间关系.得到了如下的一些特性:

在冲击加载应力约为 3.9 GPa(远低于  $\sigma_{HEL}$  7.8 GPa)的条件下,明确地观察到岩石内有类似玻璃中的破坏现象产生,破坏波以近似于材料的纵波声速向前传播,远大于玻璃样品中的破坏波速度,其产生机理与玻璃介质不同,可能是原生微裂纹的“就位”扩展机理.确定了在 3.9 GPa 左右冲击应力作用下,破坏区的边界运动轨迹近似为一条不过原点的直线,破坏的弛豫时间约为 0.5  $\mu$ s.

[1] Xia M F, Ke F J, Bai Y L 1997 *Physics* **26** 140 (in Chinese) [夏蒙禁、柯孚久、白以龙 1997 物理 **26** 140]

[2] Peng J X, Jing F Q, Wang L L, Li D H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2194 (in Chinese) [彭建祥、经福谦、王礼立、李大红 2005 物理学报 **54** 2194]

[3] Hu J B, Yu Y Y, Dai C D, Tan H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5750 (in Chinese) [胡建波、俞宇颖、戴诚达、谭华 2005 物理学报 **54** 5750]

[4] Razorenov S V, Kanel G I, Fortov V E, Abashev M M 1991 *High Press. Res.* **6** 225

[5] Kanel G I, Razorenov S V, Fortov V E 1991 *Shock compression of Condensed Matter* (edited by Schmidt S C, Dick R D et al Elsevier Science, New York, 1991) 451

[6] Bless S J, Brar N S, Kanel G I, Rosenberg Z 1992 *J. Am. Ceram. Soc.* **75** 1002

[7] Clifton R J 1993 *Appl. Mech. Rev.* **46** 540

[8] Raiser G F, Wise J L, Clifton R J, Grady D E, Cox D E 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 3862

[9] He H L, Jing F Q, Jin X G 2001 *Int. J. Impact Engng.* **25** 599

[10] He H L, Jing F Q, Jin X G, Kanel G I 1998 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **12** 241 (in Chinese) [贺红亮、经福谦、金孝刚、Kanel G I 1998 高压物理学报 **12** 241]

[11] Brar N S, Bless S J, Rosenberg Z 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 3396

[12] Bourne N K, Rosenberg Z, Field J E 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 3736

[13] Grady D E, Moody R L 1996 *SANDIA REPORT SAND96-0551*, UC-704

[14] Bourne N K, Millett J, Rosenberg Z, Murray N 1998 *J. Mech. Phys. Solids* **46** 1887

[15] Yao G W 2003 *Ph. D. Thesis* (Chongqing: Chongqing university) (in Chinese) [姚国文 2003 博士学位论文(重庆:重庆大学)]

[16] Bourne N K, Gray G T 2002 III, *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **458** 1273

[17] Millett J, Bourne N K, Dandekar D P 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 113513-1

- [ 18 ] Grote D L , Park S W , Zhou M 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 2115
- [ 19 ] Zhang Q M , Huang F L , Han L M 2000 *Chinese Science Bulletin* **45** 408
- [ 20 ] Kanel G I , Bogatch A A , Razorenov S V , Chen Z 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5045
- [ 21 ] He H L 1997 *Ph. D. Thesis* ( Mianyang : China Academy of Engineering Physics )( in Chinese )[ 贺红亮 1997 博士学位论文 ( 绵阳 : 中国工程物理研究院 ) ]
- [ 22 ] Zhang G R 1998 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **12** 81 ( in Chinese )[ 章冠人 1998 高压物理学报 **12** 81 ]
- [ 23 ] Grady D E 1994 *Sandia Technical Report* TMDG 0794
- [ 24 ] Asbhy M F , Sammis C G 1990 *PAGEOPH* **133** 489
- [ 25 ] Brace W F , Paulding J B W , Scholz C 1966 *Journal of Geophysical Research* **71** 3939
- [ 26 ] Louro L H L , Meyers M A 1989 *J. Mat. Sci.* **24** 2516

## A delayed failure of inhomogenous brittle material under shock wave compression<sup>\*</sup>

Chen Deng-Ping<sup>1)†</sup> He Hong-Liang<sup>1)†</sup> Li Ming-Fa<sup>2)</sup> Jing Fu-Qian<sup>1)‡</sup>

1) ( Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research , Institute of Fluid Physics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )

2) ( College of Science , Wuhan University of Technology , Wuhan 430070 , China )

( Received 13 February 2006 ; revised manuscript received 6 June 2006 )

### Abstract

The failure property of inhomogenous brittle materials under plate impact experiment has been studied by using AOW ( amphibolized olivine websterite ) rock as a representative sample. A small recompression signal was observed in the VISAR record of the rear free surface velocity at shock stress much below  $\sigma_{\text{HEL}}$  , indicating the generation of the failure wave. By using samples with different thickness but impacted at approximately the same shock stress of 3.9 GPa , the trajectory of the propagation of the failure wave through the stressed sample has been determined. The failure wave is generated with a delay time of about 0.5  $\mu\text{s}$  behind the shock wave front , and propagates into the stressed material with a velocity comparable to that of the shock wave front. A physical mechanism involving the “ *in situ* activation and growth ” of the originally existing micro-cracks due to the local shear stress under shock wave compression is suggested for these observations.

**Keywords** : shock wave , inhomogenous brittle materials , failure wave , microscopic defect

**PACC** : 6250 , 6220 , 6110F

<sup>\*</sup> Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics ( Grant No. 20040107 ).

<sup>†</sup> E-mail : honglianghe@263.net