

文章编号: 1001-1455(2005)02-0119-06

压剪复合冲击下氧化铝陶瓷的 剪切响应实验研究*

姚国文¹, 刘占芳², 黄培彦¹

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640;

2. 重庆大学工程力学系, 重庆 400044)

摘要: 通过对 92.93% 氧化铝陶瓷进行倾斜板碰撞实验, 研究了多晶陶瓷材料在压剪复合冲击下的非弹性变形响应和剪切波传播规律。压剪复合冲击实验由 $\varnothing 57$ mm 开槽气体炮驱动铜飞片对陶瓷靶板加载, 通过试件内埋植的电磁速度计来测量内部质点速度历程。将纵向粒子速度从感应电动势曲线中分离后得到横向粒子速度历程, 发现在压剪复合冲击下由于材料剪切刚度的降低而引起的剪切波衰减。冲击软回收试件的扫描电子显微镜 (SEM) 观察表明, 冲击载荷低于屈服强度时, 多晶氧化铝陶瓷中存在沿晶界、气孔的微裂纹成核与扩展, 在高于屈服强度的冲击加载下进一步产生了穿晶微裂纹, 微裂纹系统导致了材料在卸载后的显著的体积膨胀。

关键词: 固体力学; 剪切响应; 倾斜板碰撞实验; 氧化铝陶瓷; 电磁速度计; 剪切波; SEM

中图分类号: O347.3; O521.3

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

陶瓷材料具有比金属高得多的动力学弹性极限和声速, 作为有效的装甲防护, 陶瓷及其复合材料已经广泛应用于受强冲击作用的各种结构中, 因此, 开展陶瓷材料冲击动力学研究对穿甲力学、武器物理效应、高速撞击防护等方面的基础设计具有重要的指导意义。在高温高压下, 各种物质都表现出压缩性和相变等效应, 延性材料的剪切强度常可忽略不计, 即流体动力学近似处理。而脆性陶瓷材料压缩强度高, 耐高温, 在几倍于 Hugoniot 弹性极限 (σ_{HEL}) 的压力下时仍不能忽略剪切强度和压缩强度。因此, 需要对冲击加载与 σ_{HEL} 相当时的陶瓷材料冲击动力学响应进行深入研究。

另外, 单纯的一维应变冲击下力学量的测量, 无法根据基本方程推断出材料的横向行为, 因此不能确定一般的应力状态和构筑完整的本构方程。不同材料在强动载荷下的力学行为与静态相比差异很大, 屈服后的剪切行为还与断裂、破坏、相变等过程密切相关, 解决这些问题的根本在于对材料中剪切波的传播、演化规律进行直接测量, 这是目前强动载荷下连续介质力学测量的两个主攻方向之一 (另一个是温度)。本文中通过设计、实施氧化铝陶瓷倾斜板碰撞实验, 测量材料内部质点纵向、横向粒子速度历程, 来研究多晶陶瓷材料在压剪复合冲击下的非弹性变形响应和剪切波传播规律。

2 氧化铝陶瓷压剪复合冲击实验

2.1 实验装置与测试原理

氧化铝陶瓷倾斜板碰撞实验主要分析不同强度压缩冲击和剪切冲击下氧化铝陶瓷的非弹性变形和破坏响应, 实验在中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理实验室进行, 装置如图 1 所示。通过 $\varnothing 57$ mm 压剪炮加速铜飞片倾斜碰撞陶瓷靶板, 弹速 $v = 250 \sim 500$ m/s, 碰撞倾斜角度分别为 5° 、 10° 、

* 收稿日期: 2004-06-15; 修回日期: 2004-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10376046); 总装备部国防科技重点实验室基金项目 (99JS75.2.2. JW2001)

作者简介: 姚国文 (1974—), 男, 博士, 助理研究员。

15°。粒子速度的测量采用双磁场电磁速度计方法^[1~3],在试件内部埋植多个 π 形电磁速度计(EMV),来跟踪试件内部多个质点的粒子速度历程。通过测量速度计在磁场中运动产生的感应电动势来跟踪压缩波和剪切波,进而分析材料内部质点的纵向、横向粒子速度。采用刷子探针触发示波器记录系统,触发平台宽度为 6 mm,测量过程中,Tektronix TDS684C 示波器采样率设定为 $5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。铜飞片直径为 52.7 mm,氧化铝陶瓷试件直径为 55 mm。氧化铝陶瓷材料组分在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室由 EDAX9100 能谱仪进行分析,其中氧化铝的质量分数为 92.93%,按照传统的分类方法,该氧化铝陶瓷属于 95 瓷,其密度为 $3.896 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 293.15 GPa,泊松比为 0.218, $\sigma_{\text{HEL}} = 5.844 \text{ GPa}$,对应的剪应力 $\tau_{\text{HEL}} = 2.107 \text{ GPa}$ ^[4]。铜飞片密度为 $8.931 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,纵波速度为 4.60 km/s。

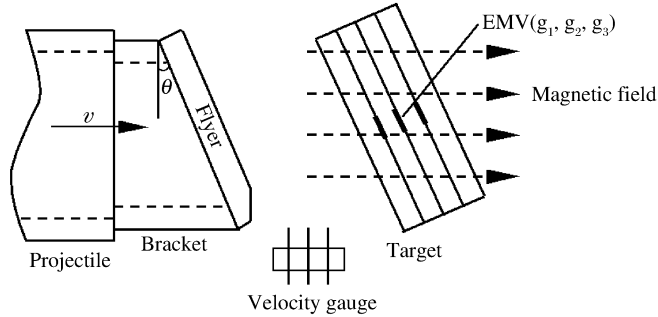


图 1 板倾斜碰撞实验装置原理图

Fig. 1 Combined pressure-shear experiment with oblique plate impact and EMV

由铜箔制作的 π 形电磁速度计的两臂作为引线与外部测量电路相连,两臂走向与粒子运动方向一致,测量时外加一均匀磁场,磁力线方向垂直于 π 形传感器的横梁。当应力波到达 π 形计部位时,由于铜箔很薄(约 $20 \mu\text{m}$),因而可以近似认为能立即与应力波阵面后的物质粒子一起运动。运动的 π 形计将切割磁力线,根据 Faraday 电磁感应定律,电磁粒子速度计的感应电动势为

$$E = l \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

式中: \mathbf{v} 为质点速度,需分解为纵向、横向分量, \mathbf{B} 为磁感应强度, l 为切割磁力线的金属箔有效长度。用这种方法可同时对多个质点的速度进行测量,但是不适用于导电性良好的材料,包括受冲击后由非导体转变为导体的材料,因而限制了它的应用范围。另外,在试件内部埋植传感器会给样品带来新的内界面,而增加新界面必然造成波系的复杂性。

为了验证实验方案的合理性,选取 PMMA 进行了 3 发倾斜板对称碰撞实验,测得 EMV 的感应电动势曲线,并与弹性波的 D'Alembert 解进行了比较(见图 2),PMMA 密度为 $1.18 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,纵波速度为 3.15 km/s,横波速度为 1.63 km/s^[1]。实验 515 的飞片速度为 260.59 m/s,倾斜角度为 5°。由图 2 可以看出,在弹性压缩波的加载阶段,实验测得的应力幅值和脉冲持续时间与理论值相近,说明实验方案是合理的。另外,在工作环境下用百分表调节时,只能保证静态下飞片与靶板的平行;为了分析高速运动下两者的平行误差,部分试验在试件碰撞面上粘贴了 2 组靶面探针,通过测量探针的触发时间间隔得到了碰撞倾斜角度的最大相对误差为 0.016%,因此倾斜板碰撞实验中能够保证飞片与靶板足够精度的平行碰撞。

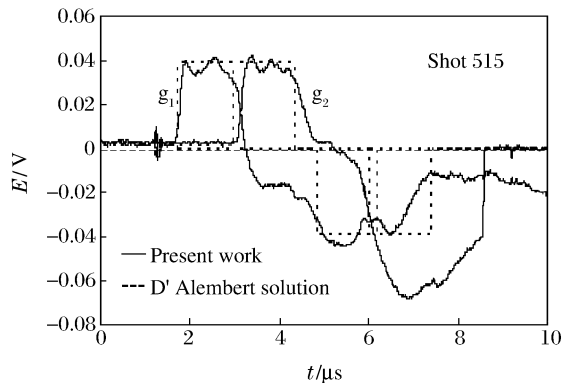


图 2 PMMA 板倾斜碰撞中的感应电动势曲线
Fig. 2 Electromotive force profiles
in oblique plate symmetric-impacted PMMA samples

2.2 倾斜板碰撞实验结果

铜飞片对氧化铝陶瓷的倾斜板碰撞实验共进行了 13 发。图 3 是实验 523 中埋植在不同深度的 EMV 的感应电动势曲线，碰撞倾斜角度为 10° ，飞片速度为 341.36 m/s。显然，高速运动的铜飞片对磁场有影响，需要将迭加在 EMV 感应电动势曲线上的初始电位消去。为此，特别测量了飞片与靶板碰撞之前一段时间内高速运动的铜飞片对 EMV 感应电动势的影响（见图 3）。通过对不同铜飞片厚度、板倾斜角度、飞片速度、飞片与 EMV 间距等因素的比较分析，发现铜飞片速度和飞片与 EMV 的间距决定了铜飞片对磁场的影响程度。为此，对实验 510、523 和 529（板倾斜角度分别为 15° 、 10° 、 5° ）的 3 个 EMV 采集到的数据进行拟合，发现附加感应电动势与碰撞速度近似成线性关系，与铜飞片和 EMV 的间距成二次关系，数据拟合得到铜飞片对 EMV 的附加感应电动势 E_{Cu} 与飞片速度 v_0 、飞片和 EMV 的间距 h 之间的关系为

$$E_{Cu} = (5.184h^2 - 0.1443h + 0.01450)v_0 \tag{2}$$

式中： v_0 、 h 的单位分别为 m/s、m。根据上式消除迭加在 EMV 感应电动势曲线上的初始电位，并对曲线进行光滑处理，得到消除附加电位后的 EMV 感应电动势曲线，如图 4 所示。

需要说明的是，倾斜板碰撞实验主要研究压缩波和剪切波对氧化铝陶瓷的复合作用，有限厚度的铜飞片能够保持较长时间的压缩加载脉冲；如果进行氧化铝陶瓷的对称碰撞实验，则不存在金属飞片撞击试件时影响磁场和感应电动势的问题，从而获得更加准确的实验数据，但是压缩脉冲时间较短。

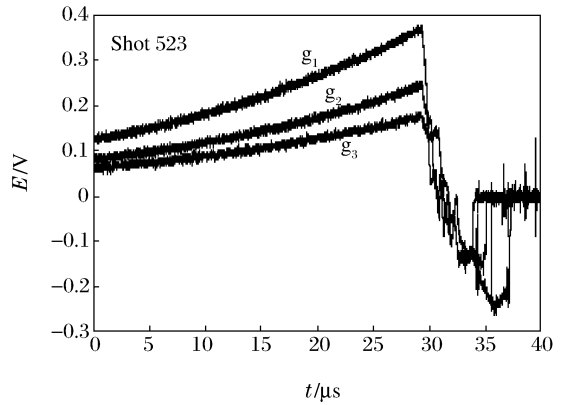


图 3 氧化铝陶瓷板倾斜碰撞中附加的感应电动势曲线
Fig. 3 Electromotive force profiles in oblique plate impacted aluminas by copper flyer

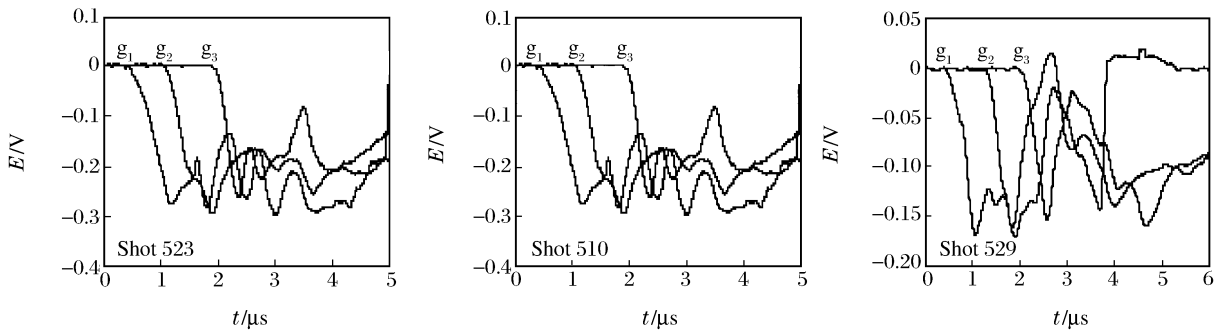


图 4 消除附加电位后的 EMV 感应电动势曲线
Fig. 4 Electromotive force profiles induced by EMV after eliminating the redundant

3 氧化铝陶瓷中剪切波的传播

氧化铝陶瓷压剪复合冲击实验中测量的电磁感应电动势耦合了内部质点的纵向、横向速度，将其解耦后得到剪切波的演化规律，进而对材料的横向力学行为进行描述。对实验 529，板倾斜角度为 5° ，根据弹性冲击波相互作用的质量、动量守恒条件，可得碰撞接触面的纵向、横向粒子速度分别为 $v_v = 158.1$ m/s、 $v_h = 13.35$ m/s，纵向压缩应力和横向剪切应力分别为 5.650、0.4943 GPa。图 5(a)是在实验 529 中，将纵向粒子速度分离后得到的氧化铝陶瓷试件内部的横向粒子速度历程，其波形和幅值在剪切波传播过程中基本保持不变，说明材料基本上遵循弹性变形过程；对实验 528，板倾斜角度为 10° ，碰

撞接触面的纵向、横向粒子速度分别为 $v_v=252.3 \text{ m/s}$ 、 $v_h=44.49 \text{ m/s}$ ，纵向压缩应力和横向剪切应力分别为 9.101 、 1.604 GPa 。图 5(b)是在实验 528 中，将纵向粒子速度分离后得到的氧化铝陶瓷试件内部的横向粒子速度历程，与图 5(a)相比，可以发现实验 528 的横向粒子速度幅值随剪切波传播距离的增加而衰减，而且破坏波传播速度逐渐降低，说明此时材料产生了沿晶、穿晶微裂纹，气孔发生塌陷，导致部分剪切变形能耗散在剪切波阵面上，并最终引起材料剪切刚度的降低和剪切波的衰减。

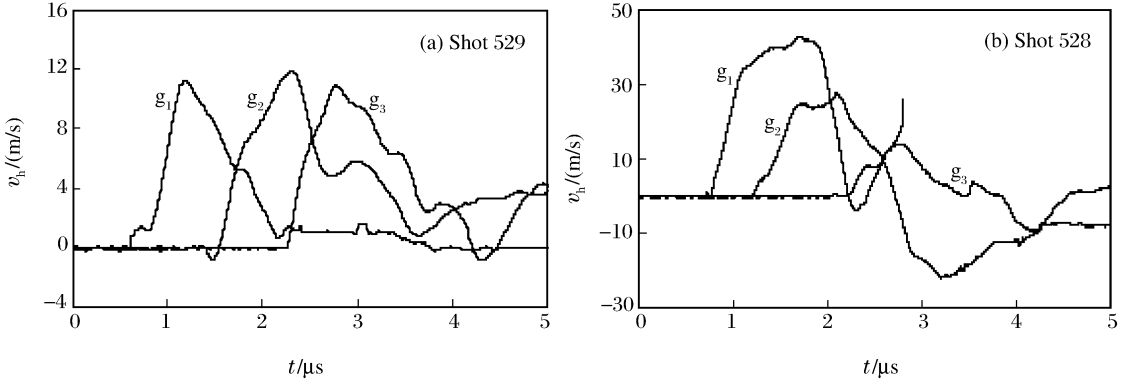


图 5 压剪复合冲击下氧化铝陶瓷试件内部的横向粒子速度历程

Fig. 5 Lateral particle velocity histories in aluminas under combined pressure-shear loading

4 氧化铝陶瓷冲击软回收试件的 SEM 分析

陶瓷材料具有弹性模量大、强度高以及熔点高、硬度高、化学稳定性好等优良性能，这主要是由它的物质组成和显微结构决定的。氧化铝陶瓷属于多晶体，主要由晶相、玻璃相和气相组成，其存在的数量与分布上的差异，决定了陶瓷不同的性能。氧化铝陶瓷的晶体结构主要是以刚玉为主的强固的离子键，具有较高的强度；但由于陶瓷材料中的裂纹或缺陷比金属材料多而大，因此实际断裂强度低于理论强度。另外，多晶氧化铝陶瓷的晶体结构复杂，晶粒取向混乱，离子键具有明显的方向性，致使滑移系非常少，位错不易向周围晶粒传播，而容易在晶界处塞积产生应力集中，引起裂纹的形核、扩展和脆性断裂。因此，陶瓷材料塑性很差。要深刻揭示陶瓷材料的脆性本质及其在强动载荷下的力学行为，必须考虑陶瓷材料存在缺陷及显微结构因素对陶瓷材料强度的影响。为了从细观尺度上进一步解释陶瓷材料在强动载荷下的动态破坏行为，需要对氧化铝陶瓷的显微结构特征进行描述。为此，在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室，用 S-530 扫描电子显微镜 (SEM) 对氧化铝陶瓷试件进行了扫描，如图 6 所示。发现 92.93% 氧化铝陶瓷的不规则晶粒粒径为 $1\sim 15 \mu\text{m}$ ，气孔较多，孔径为 $1\sim 10 \mu\text{m}$ ，随机分布；靠气孔的晶粒沿晶面明显，无气孔的区域晶粒接触紧密，晶界明显，无明显的缝隙。气孔和玻璃相构成了氧化铝陶瓷细观层次上的薄弱面。

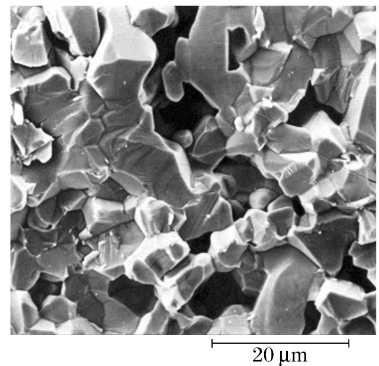


图 6 氧化铝陶瓷的扫描电镜观察

Fig. 6 SEM micrograph of original alumina

陶瓷作为典型的脆性材料，对变形高度敏感，其破坏特征通常呈崩溃式的形式，拟静态条件下的破坏响应与高应变率显著不同。在高速冲击下所造成的局部应力集中，可能会受到邻近低应力区域的屏蔽而不能充分发展，从而呈现独特的脆性变形和破

坏特征。陶瓷材料所呈现的一种响应特性是当冲击载荷低于 σ_{HEL} (4~9 GPa)时,材料产生非弹性响应。G. Raiser 等^[5]、J. U. Cazamias 等^[6]通过扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)对多晶氧化铝陶瓷的微观观察,揭示了微裂纹沿晶界、孔洞、夹杂物等的产生、扩展、聚结。在氧化铝陶瓷的倾斜板碰撞实验中,对部分试件进行了回收,通过 SEM 对氧化铝陶瓷在压剪复合冲击加载下细观结构的破坏模式进行了分析。图 7(a)是压剪冲击实验 514 回收试件的 SEM 图像,板倾斜角度 10° ,压缩冲击应力为 5.40 GPa,剪切冲击应力为 0.482 GPa($0.952\tau_{\text{HEL}}$);可见在低于屈服强度的压剪冲击作用下,陶瓷晶体中产生的裂纹多数沿晶界、气孔扩展,极少数从晶体中间裂开。图 7(b)是压剪冲击实验 529 回收试件的 SEM 图像,板倾斜角度 15° ,压缩冲击应力为 5.55 GPa,剪切冲击应力为 0.804 GPa($1.02\tau_{\text{HEL}}$),此时陶瓷晶体中产生沿晶、穿晶微裂纹。图 7(c)是压剪冲击实验 427 回收试件的 SEM 图像,板倾斜角度 10° ,压缩冲击应力为 8.05 GPa,剪切冲击应力为 0.768 GPa($1.43\tau_{\text{HEL}}$)。可见较高强度的压剪冲击作用下,氧化铝陶瓷粉碎成大小不等的粉末,多数在 $1\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间,在电镜下可见单个晶粒和小于 $1\ \mu\text{m}$ 的微粉,由于破碎晶粒的塞积,大部分气孔发生塌陷。另外,压剪复合冲击加载下的氧化铝陶瓷比在一维应变冲击压缩条件下更易形成微裂纹和达到破坏状态,即剪应力的增加有利于剪切微裂纹的成核与扩展。同时,对冲击回收的试件进行金相分析,得到图 7(a)中含微裂纹氧化铝陶瓷的孔隙率为 14%,而图 7(b)则高达 20%,说明氧化铝陶瓷在压剪复合冲击加载下产生的微裂纹系统造成了材料在卸载后显著的体积膨胀。

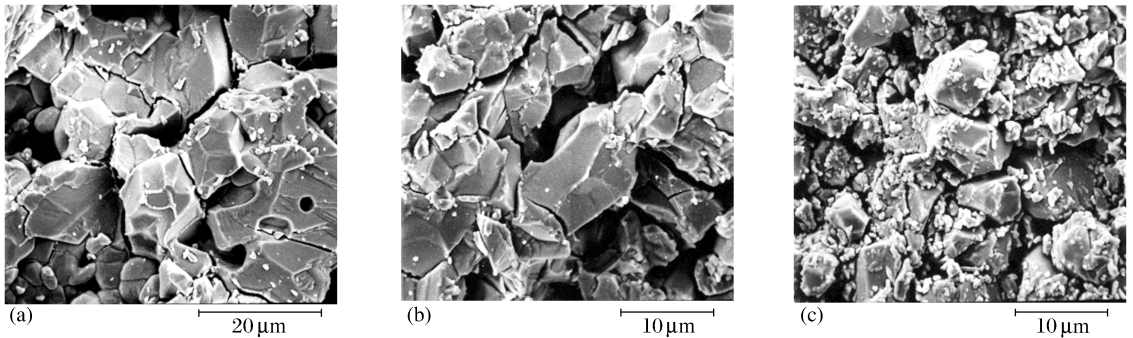


图 7 氧化铝陶瓷压剪复合冲击软回收试件的 SEM 图像

Fig. 7 SEM micrographs of recovered post-failure alumina specimens under pressure-shear shock loading

5 结 语

通过氧化铝陶瓷倾斜板碰撞实验,结合冲击软回收试件的 SEM 观察,初步研究了陶瓷材料在压剪复合冲击加载下的力学响应和剪切波传播规律,倾斜板碰撞试验的加载和测试方法可以推广应用于其它脆性材料的动力学性能试验。实验过程中发现高速运动的铜飞片对磁场有干扰,仅从数值方法上消除附加电动势是不完善的,因此需要进一步对飞片的材料、尺寸等进行设计,以满足压剪复合加载脉冲的要求。另外,激光干涉测试技术在板碰撞试验中已经得到广泛应用,合理组合设计速度干涉仪、位移干涉仪可以对倾斜板碰撞试验中的横向、法向粒子速度进行跟踪测量^[7]。

氧化铝陶瓷作为一种典型的脆性材料,在强动载荷下呈现独特的非弹性变形和破坏响应。陶瓷的非弹性变形和破坏表现为对变形的高度敏感性和小变形到脆性破坏的特征,明显区别于延性材料的塑性流动性质。氧化铝陶瓷在冲击压缩下的宏观力学性质主要取决于它的细观结构,因此,需要从细观层次的非均匀结构分析出发,研究氧化铝陶瓷在压剪复合冲击加载下的非弹性变形响应和压缩波、剪切波的传播过程。本文中通过对氧化铝陶瓷的 SEM 显微观察,揭示了沿晶、穿晶微裂纹的产生和扩展及其引起的材料体积膨胀,为从细观层次研究强动载荷下脆性材料的损伤、断裂过程提供了可行的思路。

参考文献:

- [1] Gupta Y M. Determination of the impact response of PMMA using combined compression and shear loading[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(10):5352-5361.
- [2] Aidun J B, Gupta Y M. Shear and compression waves in shocked calcium carbonate[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B2):1955-1980.
- [3] 唐志平, 胡晓军, 廖香丽, 等. 双磁场 IMPS 粒子速度测试系统[J]. *实验力学*, 2000, 15(1):15-21.
TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, LIAO Xiang-li, et al. An experimental facility for measuring longitudinal and shear waves with dual magnetic fields[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(1):15-21.
- [4] 姚国文. 冲击压缩下氧化铝陶瓷中的破坏波研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [5] Raiser G, Clifton R J, Ortiz M. A soft-recovery plate impact experiment for studying microcracking in ceramics [J]. *Mechanics of Materials*, 1990, 10:43-58.
- [6] Cazamias J U, Bless S J, Simha C, et al. Dynamic fracture of a transparent polycrystalline ceramic[A]. Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. *Shock Compression of Condensed Matter-1999*[C]. Utah, USA: American Institute of Physics, 2000:611-614.
- [7] Clifton R J. Response of materials under dynamic loading[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2000, 37:105-113.

Experimental study on shear response of alumina under combined compression and shear loading

YAO Guo-wen^{1*}, LIU Zhan-fang², HUANG Pei-yan¹

(1. *College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: The pressure-shear plate impact experiments and impact recovery experiments have been performed on 92.93% aluminas using 57 mm-diameter compressed-gas gun. And the inelastic behavior and shear wave propagation have been probed in polycrystalline ceramics under combined compression and shear loading. The compressed-gas gun drove the copper flyer to impact the oblique target parallelly, and the particle velocity is traced by embedded electromagnetic velocity gauge. The lateral particle velocities show an attenuation of shear waves with decreasing of material shear rigidity, which were decoupled from the histories of electromotive force induced by electromagnetic velocity gauges moving in magnetic field. Then SEM analysis of recovered samples shows the transit of intergranular microcracks to transgranular microcracks with increasing shock loading. Microcracks nucleate and expand along crystal boundaries and pores under loading of pressure-shear impact below the material yield threshold, and go further to transgranular microcracks with the loading above the yield threshold. The microcracks result in a remarkable dilation of alumina samples when unloaded.

Key words: fluid mechanics; shear loading; oblique plate impact experiment; alumina; method of electromagnetic velocity gauge; shear waves; SEM

* Corresponding author: YAO Guo-wen
E-mail address: 4v-ygw@163.com
Telephone: 020-87111030-3633