文章编号:1000-5773(2007)04-0337-05

陶瓷材料在压剪联合冲击加载下动态响应的实验研究*

段卓平,郁 锐,张连生,黄风雷

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:应用 57 mm 压剪炮和双磁场 IMPS 粒子测试系统对 95% 的 Al_2O_3 陶瓷材料在压剪联合加载条件下的力学行为进行了实验研究,测量得到了材料内部压缩波(P 波)、剪切波(S 波)的加载、卸载和传播规律。对剪切波的衰减随载荷的变化进行了研究,初步得到 95% Al_2O_3 陶瓷材料在压剪联合载荷冲击下发生损伤的纵向应力阈值是 4.86 GPa。

关键词:固体力学;电磁粒子速度计;陶瓷;压缩波;剪切波;衰减

中图分类号:O347.1 **文献标识码**:A

1 引 言

材料在强冲击载荷下的力学行为是引人关注的研究领域,现在有的力学模型和材料参数,基本是来自一维应变下的实时测量,因缺少横向应力和剪切行为的参数,无法确定完全应力状态和建立完整的本构方程,所以对材料的横向行为进行直接测量,成为研究强载荷下的力学行为的方向之一。

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 弹性极限的压力下,仍不能忽略剪切强度和压缩强度。

压剪炮是目前研究强载荷下材料力学行为的主要设备,能在样品中产生 P 波和 S 波的复合加载。国内外学者利用压剪炮对多种材料进行了大量的实验研究[1-5],但由于材料动态性能的复杂性和观测技术的限制,定量陶瓷材料的动态力学性能还存在差距。本研究通过 95% Al_2O_3 陶瓷板倾斜碰撞实验,测量材料内部质点纵向、横向粒子速度历程,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 氧化铝陶瓷的压剪复合冲击实验

2.1 实验装置及测试原理

本研究应用倾斜碰撞实验,通过测量材料内部质点纵向、横向粒子速度历程,研究多晶陶瓷材料在压剪复合冲击下非弹性变形响应和剪切波传播规律。实验在北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室的 57 mm 压剪炮和双磁场 IMPS 粒子测试系统上进行。双磁场 IMPS 粒子测试系统测试原理如图 1 所示。

飞片和靶板进行倾斜碰撞,飞片粘在尼龙弹托上,弹托上有一个金属键与∅57 mm 压剪炮相配合。

* **收稿日期**:2006-12-30;**修回日期**:2007-03-26

基金项目:国家自然科学基金(10472014)

作者简介:段卓平(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail:duanzp@bit.edu.cn

保证弹托在炮管中运动时不发生旋转。碰撞时在样品中产生垂直于撞击平面的纵向冲击波 P 波(波速较高)和平行于撞击面的横向冲击波 S 波(波速较低)。通过在试件内部埋植多个 π 形电磁粒子速度计(如图 2),测量速度计在磁场中运动产生的感应电动势,得到试件内部多个质点的粒子速度历程,进而分析材料内部质点的纵向、横向粒子速度,最终得到压缩波和剪切波参数。

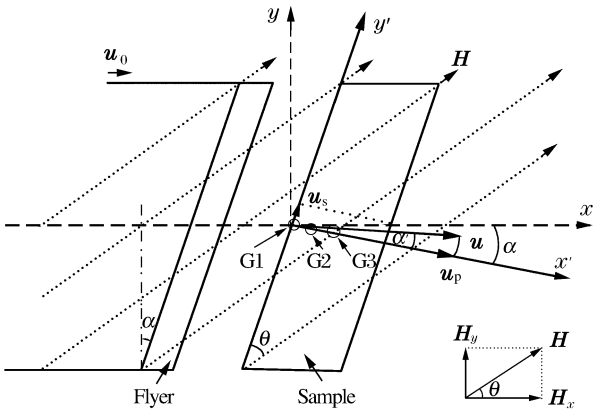


图 1 板倾斜碰撞实验装置原理图

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

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

$$E=\boldsymbol{l}\cdot(\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{H}) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{u}$ 为质点速度,需分解为纵向分量 u_P、横向分量 u_S,$\boldsymbol{H}$ 为磁感应强度,$\boldsymbol{l}$ 为切割磁力线的金属箔有效长度。

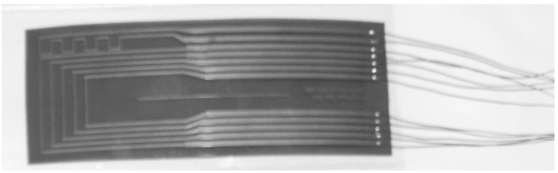


图 2 电磁粒子速度计

Fig. 2 Electromagnetic velocity gauges

当试样处于水平和垂直磁场 H_x 和 H_y 中(如图 1),合磁场 H 为

$$H=\sqrt{H_x^2+H_y^2} \tag{2}$$

$$\tan\theta=H_y/H_x \tag{3}$$

在图 1 中,G1、G2、G3 为埋在试件中的电磁速度计,方向为垂直于 xy 平面,由 Faraday 电磁感应定律,所产生的电动势为

$$E_P=\boldsymbol{l}\cdot(\boldsymbol{u}_P\times\boldsymbol{H})=+Hu_Pl\sin\alpha(\theta-\alpha') \tag{4}$$

$$E_S=\boldsymbol{l}\cdot(\boldsymbol{u}_S\times\boldsymbol{H})=+Hu_Sl\cos\alpha(\theta-\alpha') \tag{5}$$

式中:α'为样品表面质点速度 u 与撞击面垂直方向 x'轴的夹角。当飞片和样品材料相同(即所谓的对称碰撞),且不打滑时,有 $\alpha'=\alpha$[2]。

根据上面的公式,在合磁场的角度和撞击角度确定的时候就可以预测出实验曲线的大概形状。E_P 和 E_S 也正分别是 P 波和 S 波的直观反映。实验中选择水平磁场,这样能得到一个比较清晰的 P 波和 S 波图像,以方便进行后续的研究。

2.2 实验技术与方法

实验采用北京大华陶瓷厂生产的 95% Al_2O_3 陶瓷,参数[6]为:密度 3.80 g/cm^3,硬度(HV5) 142.86 MPa,抗折强度 350 MPa,弹性模量 355 GPa,泊松比 0.23。在中国科学院声学研究所用超声波法测量,得到 95%Al_2O_3 陶瓷的纵波声速 c_e 和横波声速 c_s 分别为 10.11 km/s 和 5.93 km/s。

本研究采用陶瓷碰陶瓷的对称碰撞法,为了把陶瓷材料中的加载波和卸载波充分的拉开,采用较大的飞片厚度,陶瓷飞片厚度为 9.3 mm,靶板为长 60 mm、宽 30 mm、厚度 30 mm 的两块陶瓷,用 914 环氧树脂粘合而成。

飞片和样品材料相同对称斜碰撞不打滑的临界条件为[2]

$$\tan\alpha_{max}=(\tan\varphi)/D_{sp}$$

式中:$\tan\varphi=\tau_{max}/p$,$D_{sp}=c_s/c_e$,这里 τ_{max}为最大剪应力,p 为压应力。本研究 95%Al_2O_3 陶瓷的压剪系数参考 AD995 陶瓷的压剪系数[7]取 $m=0.273$,即 $\tan\varphi=\tau_{max}/p=0.273$,则 $\alpha_{max}=25°$。实验弹速 200~400 m/s,碰撞倾斜角 α 分别为 15°、20°,$\alpha\leqslant\alpha_{max}$,满足不打滑的条件。试件采用纵剖靶,试件内部埋植多

个 π 形电磁速度计(EMV)。测试过程中,采用探针法测量弹速,用炮管前的触发探针来触发示波器。

2.3　实验结果

陶瓷飞片对陶瓷靶板倾斜对称碰撞典型实验波形如图 3 所示,实验结果见表 1。

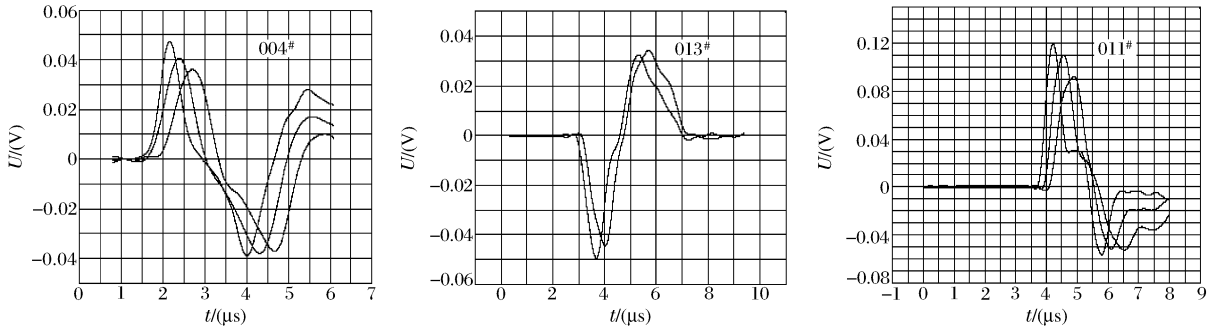


图 3　典型实验记录

Fig. 3　Typical record of EMV

表 1　实验数据总结

Table 1　Summary of impact experimental data

No.	Impact velocity /(m/s)	θ/(°)	Horizontal magnetic field/(T)	Vertical magnetic field/(T)	Compress wave velocity/(m/s)	Shear wave velocity/(m/s)
004	234	15	1 230	0	9 346	5 595
010	342	20	1 260	0	10 000	5 824
011	364	20	1 235	0	10 810	6 369
012	252	15	1 120	0	9 620	5 350
013	300	15	1 200	0	10 125	6 210

3　对剪切波衰减问题的讨论

根据应力波理论,飞片以倾斜角 α、速度 u_0 与靶发生斜碰撞,将在试样中依次传播四道主要波阵面:加载压缩纵波(P^+)、加载剪切横波(S^+)、卸载纵波(P^-)和卸载剪切波(S^-),形成四波五区。每道波的传播特性与前方区域的材料当时当地状态相关。每道波产生的影响留给了后面,因此,波特性实时地反映了材料的动特性,并能在一定程度上体现材料的细观统计特性。其中的剪切波特别重要。加载剪切波在前方纵波压缩应力状态上增添剪切分量,它的传播特性如波速、幅值、弥散等,反映材料经压缩加载后的损伤程度和剩余强度。因此,由于不同强度的压缩纵波传过陶瓷材料,使材料产生了沿晶、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绕开裂纹孔洞传播的过程中,并最终引起材料剪切刚度的降低和剪切波的衰减。所以,剪切波幅值的衰减情况便可以直观地反映出材料受到压剪复合加载冲击后材料内部的损伤和和破坏程度。

由于本研究采用的是水平磁场,根据前面的公式(4)和公式(5)可以得到,在材料没有损伤或碰撞不打滑的条件下,实验测量得到的信号中压缩加载波 P^+ 的值和剪切加载波 S^+ 的值正好相等,符号相反。如果材料发生损伤,则 S^+ 波的值加载不到最大,也就是说剪切加载波发生了衰减。

则剪切波衰减相对幅度:$\eta=(|E_{P^+}|-|E_{S^+}|)/|E_{P^+}|$

利用应力波公式和记录波形,可以计算得到纵向应力、剪切应力和剪切波衰减幅度,结果如表 2 和图 4 所示。

对图 4 中剪切波衰减幅度大于零的实验点数据进行线性拟合,得到的直线与衰减幅度等于零的直

线的交点即剪切波衰减临界点，当压缩应力大于该点的值时，剪切波幅值开始衰减，材料在这个时候开始发生损伤和破坏，这时的纵向应力为 4.86 GPa 左右。因此，可以近似地认为 95%的氧化铝陶瓷材料在受到压剪联合冲击加载内部开始出现损伤和破坏时的纵向力阀值为 4.86 GPa。

表 2 计算结果总结

Table 2 Summary of result

No.	θ/(°)	Longitudinal stress/(GPa)	Shear stress/(GPa)	Shear wave attenuation/(%)
004	15	4.1	0.66	0
010	20	6.8	1.20	15
011	20	7.1	1.30	25
012	15	4.3	0.72	0
013	15	5.6	0.85	8

为了从另一个方面验证我们的结论，分别对 004#、013# 和 011# 号实验波形进行分析，从波形中计算分离出横向粒子速度曲线，如图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)所示。

由图 5 可以看到，在图 5(a)中，纵向应力在 4.1 GPa 时，不同深度埋入的传感器测出的横向粒子速度基本上没有衰减，说明此时陶瓷内部没有发生损伤和破坏。在图 5(b)中，剪应力达到了 5.6 GPa，横向粒子速度幅值随剪切波传播距离的增加而开始出现衰减，说明此时材料开始产生了微小裂纹和孔洞，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。而在图 5(c)中，横向粒子速度传播距离的增加，衰减明显加剧，这说明此时材料内部的裂纹和孔洞开始增多，材料的损伤和破坏开始加剧。

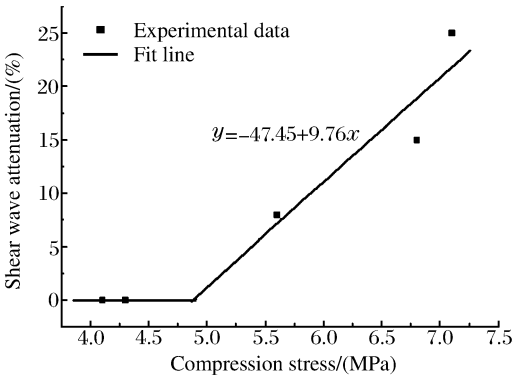


图 4 剪切波幅值衰减曲线

Fig. 4 Attenuation of share waves

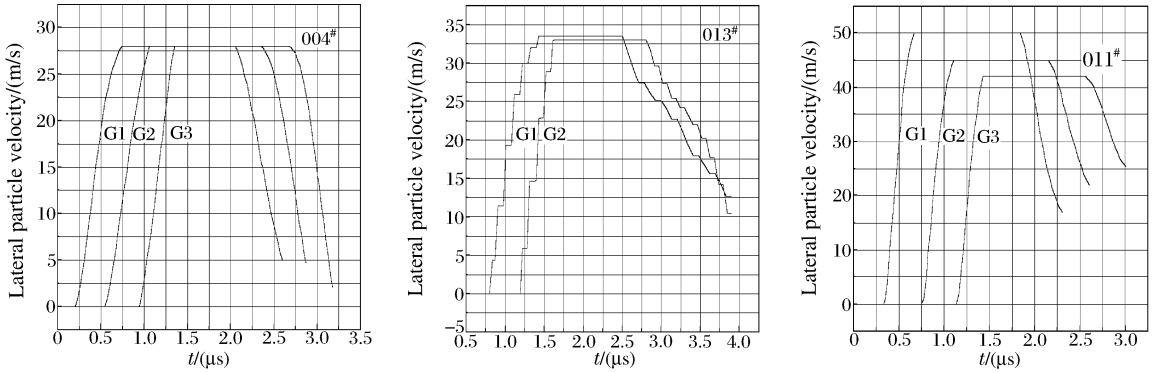


图 5 横向粒子速度历程

Fig. 5 Lateral particle velocity histories

4 小 结

(1) 建立了压剪联合加载实验平台和双向电磁场粒子速度测试系统，对 95% Al_2O_3 陶瓷材料中的

压缩波和剪切波进行了测量,得到了 P 波和 S 波图像和相应的数据。

(2) 实验揭示了 95% Al_2O_3 陶瓷在压剪冲击载荷下剪切波衰减规律,得到了材料内部开始出现损伤和破坏时的纵向应力阀值是 4.86 GPa。

(3) 实验证明,压剪波联合测量、分析是脆性材料动态损伤研究的有效手段。

References:

[1] Tang Z P, Liu W Y. Experimental Investigation on Cement Composites under Combined Compression and Shear Impact Loading [J]. Chinese Journal of Cent South Univ Technot, 2001, 32(Special): 23-26. (in Chinese)
唐志平,刘文彦. 水泥基复合材料的压剪联合冲击实验研究 [J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2001,32(专辑):23-26.

[2] Tang Z P, Hu X J, Liao X L, et al. An Experimental Facility for Measuring Longitudinal and Shear Wares with Dual Magnetic Field [J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1): 15-21. (in Chinese)
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.

[3] Gupta Y M. Measurement of Compression and Shear Waves in an Impact Experiment: Role of Gauge Leads in Compression-Shear Experiment [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 5352-5355.

[4] Yao G W, Liu Z F, Huang P Y. Experimental Study on Shear Response of Alumina Ceramic by Impact of Compression and Shear Load [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 120-124. (in Chinese)
姚国文,刘占芳,黄培彦. 压剪复合冲击下氧化铝陶瓷的剪切响应实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2005,25(2):120-124.

[5] Raiser G, Clifton R J, Ortiz M. A Soft-Recovery Plate Impact Experiment for Studying in Microcracking in Ceramics [J]. Mech Mater, 1990, 10: 43-58.

[6] Duan Z P, Guan Z Y, Huang F L. Mechanic Performances of Anti-Shoot Alumina Ceramic under Shock-Loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(1): 29-34. (in Chinese)
段卓平,关智勇,黄风雷. 冲击载荷下 Al_2O_3 抗弹陶瓷的力学性能实验研究 [J]. 高压物理学报,2003,17(1):29-34.

[7] Sikhanda S, Stepphan B. Calculation of Penetration Resistance of Brittle Materials Using Spherical Cavity Expansion Analysis [J]. Mech Mater, 1996, 23: 323-330.

Experimental Study on Shear Response of Alumina Ceramic under Combined Compression and Shear Loading

DUAN Zhuo-Ping, YU Rui, ZHANG Lian-Sheng, HUANG Feng-Lei

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The pressure-shear plate impact experiments have been performed on 95% Al_2O_3 ceramic using 57 mm diameter compressed gas gun. The high-pressure gases drove the ceramic flyer to impact the oblique target to produce pressure-shear loading, and the particle velocity is traced by embedded electromagnetic velocity gauge. The inelastic behavior and shear wave propagation of ceramics under combined compression and shear loading have been probed in ceramic. The lateral particle velocities show an attenuation of shear waves with increasing of impact load. From the experiments, we found that when the compression stress reached about 4.86 GPa, 95% Al_2O_3 ceramic started to produce little amount of cracks and holes. The shear waves also began to attenuate.

Key words: solid dynamics; electromagnetic velocity gauge; ceramic; compress wave; shear wave; attenuation