第17卷 第1期 高 压 物 理 学 报 Vol. 17, No. 1
2003年3月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Mar., 2003

文章编号：1000-5773(2003)01-0029-06

冲击载荷下 Al_2O_3 抗弹陶瓷的力学性能实验研究*

段卓平，关智勇，黄风雷

（北京理工大学爆炸与安全科学国家重点实验室，北京 100081）

摘要：通过静力学实验得到了 Al_2O_3 抗弹陶瓷的弹性模量和泊松比。通过一维平面撞击实验，在 Al_2O_3 抗弹陶瓷材料中进行了冲击波速度、飞片速度的测量和纵向应力、横向应力测量，得到了 Al_2O_3 抗弹陶瓷的冲击波 D-u_p 关系，以及抗弹陶瓷在3～11 GPa压力范围内相应的横向应力和纵向应力关系曲线，并根据这一曲线得到了抗弹陶瓷的纵向应力与剪切强度的关系。

关键词：横向应力；纵向应力；抗弹陶瓷；动态剪切强度

中图分类号：O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

随着现代高科技战争的不断变化，使得战争的攻击方式有了根本性的转变。以往攻战敌方占区所采用的步兵进攻方式，由于损伤相当严重，以及战区设施的高科技防护设置，已不能适应现代作战的需要。因此，空投轻型装甲步兵战车已成为现代战争普遍实施的作战方案。目前，国际上轻型装甲战斗车辆采用的装甲防护，基本上是陶瓷复合装甲。由于陶瓷的比重比钢的比重少2/3之多，从而大大减轻了车辆的重量。直升攻击机底仓甲板、主战坦克的首面装甲及炮塔装甲也都已开始采用陶瓷复合材料，其中 Al_2O_3 基陶瓷就是比较好的装甲材料之一。由文献[1]可以看出，近些年来陶瓷装甲材料的本构关系和抗穿甲破坏机理已引起国内外学者的普遍重视。但由于实验手段和测试方法的限制，对材料基本性能，特别是动态性能的实验研究相对较少，限制了陶瓷材料本构关系研究的发展及对陶瓷抗穿甲破坏机理的认识。我们采用先进的横、纵向应力测试技术和冲击波测量技术，在轻气炮上通过一维平面撞击实验，研究了 Al_2O_3 基陶瓷材料的冲击波关系、不同冲击载荷条件下的横向应力和纵向应力关系及动态剪切强度，为研究 Al_2O_3 基陶瓷材料的动态本构关系和抗穿甲破坏机理提供基本的实验规律和参数。

2 静力学实验

实验中采用的陶瓷材料的主要成份为 Al_2O_3，工厂提供的参数有：密度为 3.80 g/cm^3；硬度(HV5)为 13.72 GPa；抗折强度为 350 MPa。

精确测得抗弹陶瓷的弹性模量和泊松比，特别是泊松比，对横向应力的测算十分重要，我们采用材料实验机进行测定。试件采用直径为 10 mm，长 L=100 mm 的精加工圆柱。其测量的基本原理为：先把 120 Ω 康铜应变计贴在试件上，给试件预加载，然后对每一额定载荷，利用康铜应变计测出试件的纵

* **收稿日期**：2002-04-27；**修回日期**：2002-07-09

作者简介：段卓平(1965—)，男，博士，教授.

向应变和横向应变，即可计算出试件的弹性模量和泊松比。

从提高测试的精度考虑，最好采用拉伸加载的测试方法，这样可以避免应力偏心带来的误差。但对于抗弹陶瓷材料，不易加工成拉伸加载的形状，只适合进行压缩加载。在这种情况下，为提高测试精度，采用四个纵向应变计对称贴装，以克服轴向加载的偏心；两个横向应变计对称贴装，以克服由轴向加载所带来的横向应变的偏心。应变计的安装如图 1 所示。

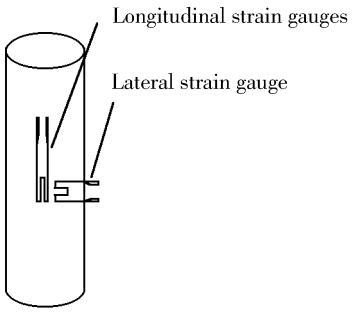


图 1 应变计安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strain gauges mounted on the specimen

在测试过程中，先预加载荷 10 kN，以减小误差，然后每次增加 10 kN 载荷，最大加载到 90 kN。实验数据如表 1 所示。实验数据的处理采用差值法，先把四个纵向应变计、两个横向应变计的输出值分别平均，再对每相邻两组数据求差，作为每 10 kN 载荷下的应变值，求得每一组参数后最后再总平均。处理得到的结果为：抗弹陶瓷的弹性模量 $E=355$ GPa，泊松比 $\nu=0.23$。

表 1 抗弹陶瓷静态参数测试

Table 1 Characteristic parameters of anti-shoot ceramic for captive tests

P /(kN)	Longitudinal strain $e/(10^{-6})$						E /(GPa)	Lateral strain $e/(10^{-6})$				Poisson ratio
	e_1	e_2	e_3	e_4	$e=\sum_{i=1}^{n}\frac{e_i}{n}$	Δe		e_1	e_2	$e=\sum_{i=1}^{n}\frac{e_i}{n}$	Δe	
10	327	319	409	384	359.7			85	82	83.5		
20	695	700	776	747	729.5	369.8	344.6	170	164	167	83.5	0.226
30	1058	1066	1143	1107	1093.5	364.0	350.0	257	246	251.5	84.5	0.232
40	1418	1424	1505	1459	1451.5	358.0	355.8	339	326	332.5	81.0	0.226
50	1768	1774	1866	1812	1805.0	353.5	360.3	420	408	414	81.5	0.231
60	2136	2139	2236	2179	2172.5	367.5	346.6	505	490	497.5	83.5	0.227
70	2478	2482	2588	2523	2517.8	345.3	369.0	585	571	578	80.5	0.233
80	2843	2839	2957	2878	2879.3	361.5	352.4	667	651	659	81.0	0.224
90	3189	3181	3319	3232	3230.3	351.0	362.9	750	736	743	84.0	0.239
Average							355.2					0.230

3 动态力学性能实验研究

3.1 抗弹陶瓷的 D-u_p 关系

在 ϕ37 mm 一级轻气炮上进行同质抗弹陶瓷材料飞片与靶板的撞击实验，实验中用刷子探针测量飞片的撞击速度。由于陶瓷材料为非导体，常规刷子探针不能使用，为此专门设计了自导通刷子探针，用以测量陶瓷材料飞片撞击靶板时的运动速度 u，由于是同质材料相撞，所以撞击时靶板中的粒子速度 $u_p=u/2$。

对于材料中冲击波速度的测量，一般采用同轴探针或光杆探针，由于加工误差和安装误差，很难保证平面正碰撞，在测量冲击波速度时，必须进行平面度修正，方法是采用 6～8 个探针组成的空间组合探针组同时测量[4,5]，这样试件的设计、安装复杂，且精度要求高，难度较大。这里采用同一轴线上的三个

锰铜计来测量抗弹陶瓷材料的冲击波速度，以确定 D-u_p 关系，不必进行平面度修正，这时由于飞片倾斜带来的相对误差为$(1-\cos\theta)$，θ 为飞片偏转角，本文实验可控制 $\theta\leqslant 2°$，所以由于飞片倾斜带来的相对误差小于 0.1%，说明用锰铜压阻计测量材料中的冲击波速度是可行的，当然，还应考虑封装胶厚度的影响。实验装置见图 2，典型的实验记录如图 3 所示。运用阻抗匹配技术，该实验还可对锰铜压阻应力计进行标定。

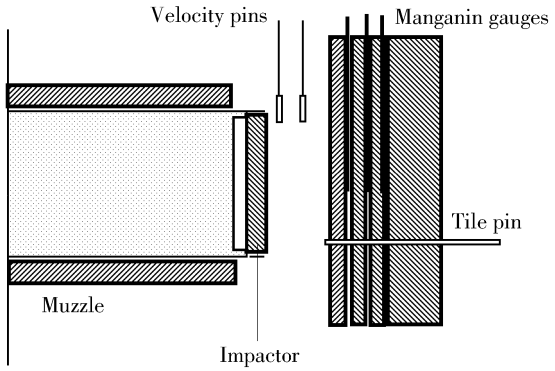


图 2　实验装置

Fig. 2　Schematic diagram of experimental arrangement

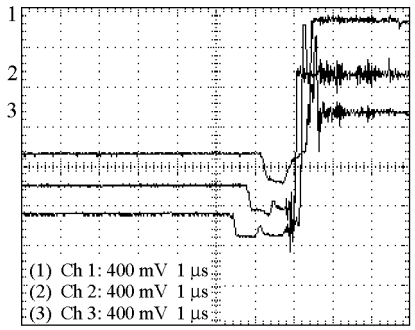


图 3　抗弹陶瓷冲击波实验记录

Fig. 3　Shock wave experiment records of anti-shoot ceramic

根据抗弹陶瓷的 D、u_p 实验数据作线性拟合，可以得到 D-u_p 平面上的抗弹陶瓷 D-u_p 关系：$D=(7040.79\pm12.369)+(1.99\pm0.057)u_p$，单位：m/s，其相关系数 $r=0.998$。如图 4 所示。

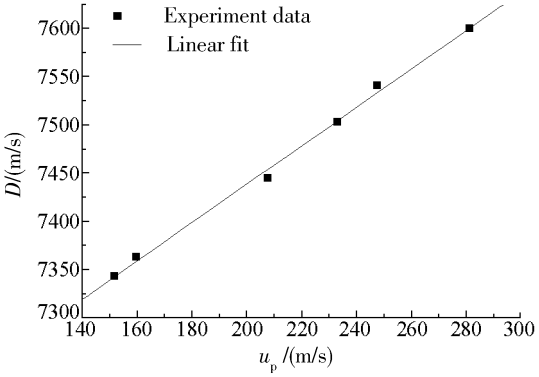


图 4　抗弹陶瓷 D-u_p 关系曲线

Fig. 4　D-u_p relationship for anti-shoot ceramic

3.2　冲击载荷下纵向、横向应力

为研究抗弹陶瓷材料的动态力学性能，在 ϕ37 mm一级轻气炮上进行了抗弹陶瓷材料的平面一维撞击实验，同时测量陶瓷材料在冲击载荷作用下的纵向和横向应力，实验装置如图 5 所示，飞片和靶板材料均为抗弹陶瓷。靶板中放置了锰铜纵向计和锰铜横向计，采用环氧树脂进行封装。为进一步分析锰铜横向计的应力应变状况，在有的实验中同时放置了康铜横向计。实验时飞片速度的变化范围为 200～600 m/s。

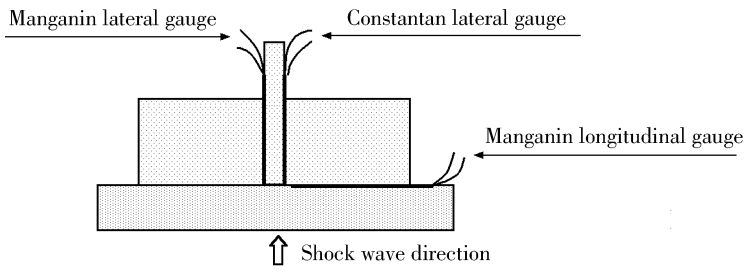


图 5　实验装置图

Fig. 5　Schematic diagram of experimental arrangement

从实验记录的数据可以看到,锰铜横向计的输出比锰铜纵向计的输出要小。同质抗弹陶瓷材料飞片与靶板撞击实验一个典型的实验记录如图 6 所示。同时放置了康铜横向计的典型实验记录如图 7 所示。可以看到,康铜横向计的输出相对锰铜横向计的输出比较小,这是因为锰铜计的输出由压阻效应和应变效应组成,而康铜计的输出只由应变效应组成,在本文中应变效应很小,经计算可知,其相对电阻的变化值大约为锰铜横向计相对电阻变化值的 6.0%,在横向应力测试计算中应该考虑进去,即康铜横向计补偿技术,这部分内容在“冲击波中横向、纵向应力计响应初步研究”一文中有较详细的论述,见文献[6]。

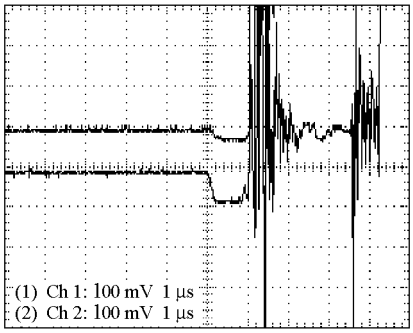


图 6 抗弹陶瓷应力实验曲线

Fig. 6 Stress test records of anti-shoot ceramic

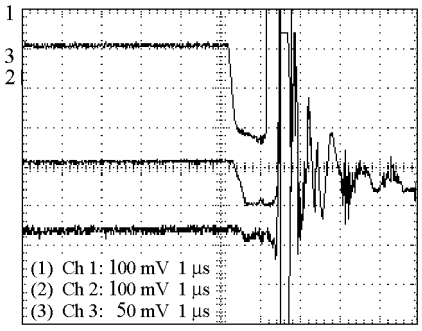


图 7 加康铜计的抗弹陶瓷应力实验曲线

Fig. 7 Stress test records of anti-shoot ceramic measured using constantan and manganin gauge

根据锰铜纵向计的标定曲线及横向计测试方法计算,可同时得到抗弹陶瓷在不同冲击载荷下的纵向应力和横向应力。表 2 是实验结果。把所有的实验数据都标在一张图上,如图 8 下面的曲线所示,横坐标为锰铜纵向计测得的纵向应力,纵坐标为锰铜横向计测得的横向应力。可以看出,曲线在纵向应力 6.52 GPa、8.14 GPa、10.9 GPa 处有三个拐点。根据抗弹陶瓷这样一种脆性材料的动态特性,我们可知,第一个拐点应为抗弹陶瓷的屈服点。

表 2 纵向、横向和剪切应力测试结果

Table 2 Results of longitudinal, lateral and shear stress measurements

No.	Longitudinal results		Lateral results		$2\tau=\sigma_x-\sigma_y$ /(GPa)
	$\Delta R/R$	σ_x/(GPa)	$\Delta R/R$	σ_y/(GPa)	
1	0.07764	3.106	0.02697	0.925	2.181
2	0.11250	4.500	0.03611	1.347	3.153
3	0.16298	6.519	0.04908	1.945	4.574
4	0.17737	7.095	0.05899	2.401	4.694
5	0.18532	7.413	0.06482	2.670	4.743
6	0.19091	7.636	0.06832	2.832	4.804
7	0.20359	8.144	0.07671	3.218	4.926
8	0.23353	9.341	0.07778	3.268	6.073
9	0.27359	10.943	0.08011	3.375	7.568
10	0.27607	11.043	0.10735	4.631	6.412
11	0.27778	11.111	0.10989	4.748	6.363

3.3　动态剪切强度

根据不同冲击载荷下抗弹陶瓷材料中的纵向应力 σ_x 和横向应力 σ_y 的实验数据，我们可得到抗弹陶瓷的纵向应力与剪切强度（$2\tau=\sigma_x-\sigma_y$）的关系，如图 8 上面的曲线所示。

从图 8 中可以看到，抗弹陶瓷的剪切强度在屈服限之后增长十分缓慢，在 $\sigma_{HEL}<\sigma_x<8$ GPa 时，其剪切强度维持在 2.4 GPa 左右，在 $\sigma_x>8$ GPa 时，抗弹陶瓷的剪切强度开始上升。这与 Rosenberg[2] 对 AlN 陶瓷进行动态特性研究时得到的剪切强度的实验曲线十分一致。如图 9 所示，AlN 陶瓷的剪切强度在 $\sigma_{HEL}<\sigma_x<16$ GPa 时，在 3.5 GPa 左右。

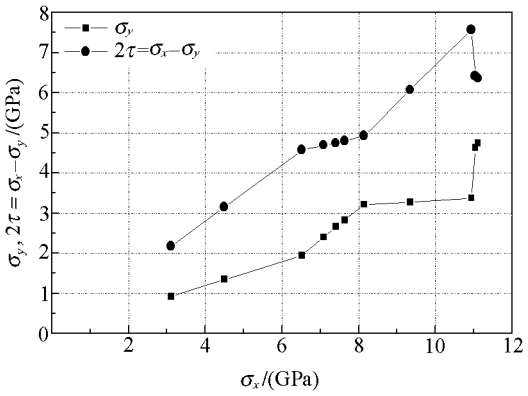


图 8　抗弹陶瓷横向应力、切应力和纵向应力关系曲线

Fig. 8　Relationship between lateral, shear and longitudinal stresses of anti-shoot ceramic

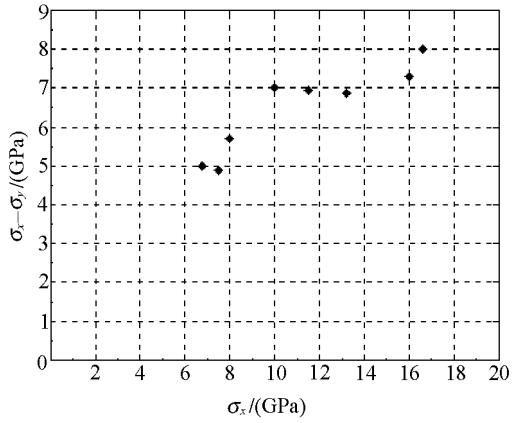


图 9　AlN 陶瓷的剪切强度

Fig. 9　Shear strength of shock-loaded AlN ceramic

由实验结果可以看出，本研究测得的 Al_2O_3 抗弹陶瓷的雨贡纽弹性限 $\sigma_{HEL}=6.52$ GPa，剪切强度（$2\tau=\sigma_x-\sigma_y$）大约为 4.8 GPa，测试得到的 Al_2O_3 抗弹陶瓷的泊松比 $\nu=0.23$。这与文献[3]提供的氧化铝陶瓷的数据（雨贡纽弹性限 $\sigma_{HEL}=6.0$ GPa、剪切强度（$2\tau=\sigma_x-\sigma_y$）大约为 5.5 GPa，泊松比 $\nu=0.22$）十分接近。

4　小　结

通过静力学实验得到的 Al_2O_3 抗弹陶瓷的泊松比 $\nu=0.23$，其结果与国外 Al_2O_3 陶瓷的泊松比基本一致。

在平面一维撞击实验中，采用锰铜压阻应力计测量冲击波速度，比用组合探针平面度修正的探针测试方法简单、可靠，并且同样能保证测试精度。得到了 Al_2O_3 抗弹陶瓷的冲击波 D-u_p 关系：$D=(7040.79\pm12.369)+(1.99\pm0.057)u_p$，单位为 m/s。

在平面一维撞击实验中，同时测量材料中的动态纵向应力和横向应力，得到了 Al_2O_3 抗弹陶瓷材料在不同冲击载荷下的动态纵向应力和横向应力，以及动态剪切应力，得到的雨贡纽弹性限 σ_{HEL} 和剪切强度（$2\tau=\sigma_x-\sigma_y$）值与国外同类材料的数据接近。

本文的实验结果及抗弹陶瓷材料在冲击载荷下的响应规律，可为研究该材料的动态本构关系、抗弹性能及破坏机理提供依据。

References:

[1] Fan J L, Zhang W R, Zhai W, et al. Anti-Perforation Experimental Stady of Silicon-Nitride Ceramics [J]. Journal of Ballistics, 2000, 12(4): 77－81. (in Chinese)
范景林, 张伟儒, 翟 文, 等. 氮化硅基陶瓷材料抗穿甲破坏实验研究 [J]. 弹道学报, 2000, 12(4): 77－81.

[2] Rosenberg Z, Brar N S, Bless S J. Dynamic High-Pressure of AlN Ceramic as Determined by Flyer Plate Impact [J]. J Appl Phys, 1991, 70(1): 167－171.

[3] Rosenberg Z, Yaziv D. Shear Strength of Shock-Loaded Alumina as Determined with Longitudinal and Transverse Manganin Gauges [J]. J Appl Phys, 1987, 62(3): 1120－1122 .

[4] Gong Z Z, Anderson W W, Bi Y, et al. Shock Wave Equation of State and Shock-Induced Melting of Melanterite [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(1): 62－69. (in Chinese)
龚自正, Anderson W W, 毕 延, 等. 水绿矾的状态方程和高压熔化 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(1): 62－69.

[5] Li X J, Zhou X M, Wang F H, et al. Shock Compression of a Kind of Porous Iron [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 224－228. (in Chinese)
李西军, 周显明, 王藩侯, 等. 一种多孔铁的冲击压缩性 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 224－228.

[6] Duan Z P, Guan Z Y. Preliminary Studies on Response of Longitudinal and Lateral Gauges for Shock Wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(4): 265－270. (in Chinese)
段卓平, 关智勇. 冲击波中横向、纵向应力计响应初步研究 [J]. 高压物理学报, 2002, 16(4): 265－270.

Mechanic Performances of Anti-Shoot Alumina Ceramic under Shock-Loading

DUAN Zhuo-Ping, GUAN Zhi-Yong, HUANG Feng-Lei

(*State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: In this paper, the Young's modulus and Poisson ratio of an alumina ceramic were determined by quasi-static experiments. The relationship between shock wave and particle velocity was obtained by measuring the shock wave and flying plate velocities with refer to 1-D plate impact tests. The longitudinal and lateral manganin gauges were used to determine the principal stresses in the shocked specimens, the lateral stress and longitudinal stress were measured in the 3～11 GPa range of shock stresses. Moreover, the shear strengths of the ceramic were determined from the difference between the longitudinal and lateral stresses.

Key words: lateral stress; longitudinal stress; bullet-proof ceramic; dynamic shear strength