

文章编号: 1001-4888(2007)05-0534-05

准一维应变下 Al_2O_3 陶瓷动态压缩 失效的实验研究^{*}

石志勇, 汤文辉, 张若棋, 余金虎, 陈 荣

(国防科学技术大学 理学院技术物理研究所, 湖南长沙 410073)

摘要: 为了考察 Al_2O_3 陶瓷准一维应变下的力学性能, 采用 LY12 铝套筒和 45 钢套筒对陶瓷试样进行了环向约束, 在准静态和动态下分别进行了压缩实验, 得到了材料的应力—应变曲线。实验结果表明, Al_2O_3 陶瓷的轴向压缩强度基本上随围压的增大而增大, 动态压缩加载下的轴向压缩强度随应变率增大而增大。 Al_2O_3 陶瓷在准一维应变下的破坏形式为裂纹破坏, 准静态的脆性失效行为可以用 Mohr-Coulomb 失效准则来描述。

关键词: 陶瓷材料; 准一维应变; 脆性失效

中图分类号: O347

文献标识码: A

0 引言

自 Wilkins^[1]报道陶瓷装甲应用以来, 陶瓷的防护性能一直是研究的热点。陶瓷材料属脆性材料, 具有高强度、高模量、高声速和高硬度的特性, 因此在复合装甲中, 陶瓷材料以其优异的动、静态力学性能发挥出了关键的抗弹效益。由于陶瓷的密度不到钢的一半, 从而大大减轻了装甲的质量, 装甲步兵战车、主战坦克的首面装甲、炮塔装甲等都开始采用陶瓷复合装甲, 其中 Al_2O_3 基陶瓷是比较好的装甲材料之一。近年来, 陶瓷装甲材料的本构关系和抗穿甲破坏机理已引起了国内外学者的普遍重视^[2]。张晓晴^[3]等通过在 SHPB 上添加垫块, 测量了 Al_2O_3 陶瓷在冲击加载下的应力—应变曲线, 给出了 Al_2O_3 陶瓷的一维损伤线性弹脆性本构模型。李平^[4]等在轻气炮上测量了 YB-AD90 陶瓷高速冲击加载下的动态力学性能, 得到了低于 11GPa 应力下的本构方程。这些描述陶瓷材料动态力学性能的实验技术本质上是一维应力条件或者一维应变条件, 围压对陶瓷材料失效行为的影响在国内至今没有被很好地研究。国外对陶瓷材料在围压条件下的力学性能的实验研究也不多见。文献[5]研究了一种压缩强度 345MPa 的玻璃陶瓷的准一维应变性能, 得出在围压 230MPa 条件下, 动态压缩强度增加到准静态的 4 倍。

本文实验中所用的陶瓷材料准静态抗压强度接近 1GPa, 为了防止 INSTRON 机和 SHPB 装置的损坏, 需要在试样两端添加垫块。由于陶瓷的应变很小, 一般不超过 1%, 需要在试样上直接贴应变片来测量试样的真实应变。我们采用铝和钢两种材料不同厚度的套筒, 对 Al_2O_3 陶瓷在环向进行约束, 在 INSTRON 机和 SHPB 上添加垫块, 研究强度远大于玻璃陶瓷的 Al_2O_3 陶瓷在准一维应变下的力学性能, 探讨其失效行为。

1 准静态力学实验

实验是在中南大学分析中心的 INSTRON 材料试验机上进行的。实验中采用的陶瓷材料的成份是: Al_2O_3 95%, Cr_2O_3 1.5%, TiO_2 0.3%, SiO_2 1.8%, Fe_2O_3 0.2%, Na_2O 0.2%, 稀土 1%。该种陶瓷

^{*} 收稿日期: 2007-01-12; 修订日期: 2007-06-12

通讯作者: 石志勇(1978—), 男, 博士, 研究方向为材料的动态力学响应及数值计算。E-mail: shizhiyong.student@sina.com

材料是由湖南精诚特种陶瓷有限公司生产的,它委托中国科学院上海硅酸盐研究所无机材料分析测试中心进行了材料的力学性能实验,提供的参数有:体积密度为 $3.53\text{g}/\text{cm}^3$,抗压强度为 913MPa ,抗弯强度为 290MPa ,断裂韧性为 $4.89\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,洛氏硬度为 HRA88。实验中采用的陶瓷试样尺寸为 $\phi 9\text{mm} \times 18\text{mm}$,试样的端面研磨成平面并相互平行,与轴心垂直度误差不大于 0.015mm 。

为了实现准一维应变条件,我们用套筒对试样圆周方向进行约束,套筒材料选择 45 钢和 LY12 铝,垫块采用硬度更高的碳化钨垫块,碳化钨垫块尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。LY12 铝套筒的厚度为 0.5mm , 0.8mm , 1.0mm , 1.5mm , 45 钢套筒的厚度为 0.5mm , 1.0mm 。试样和圆筒采用过盈配合,试样的直径略大于圆筒的内径。配合之后,试样和套筒接触面上必将产生相互压紧的装配压力 p_z ,形成紧固的静配合。陶瓷试样的轴向应力通过下列公式计算:

$$\sigma_A = \frac{F_T - F_0}{A_s} \quad (1)$$

式中 F_T 是试样和套筒整体受到的轴向压力; F_0 是套筒受到的轴向压力; A_s 是试样的横截面积。 F_T 和 F_0 通过单轴压缩实验得到。对圆筒来说,装配压力相当于内压力,由厚壁圆筒公式,内压力(即试样的围压)可表示为^[6]:

$$p_z = \frac{E\delta}{b(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \mu)} \quad (2)$$

式中 a 是圆筒的内径; b 是外径; E 是圆筒材料的弹性模量; μ 是泊松比; δ 是过盈度。当试样屈服时,围压为:

$$p_z = \sigma_s \frac{b^2 - a^2}{2b^2} \quad (3)$$

式中 σ_s 是金属套筒的屈服强度。

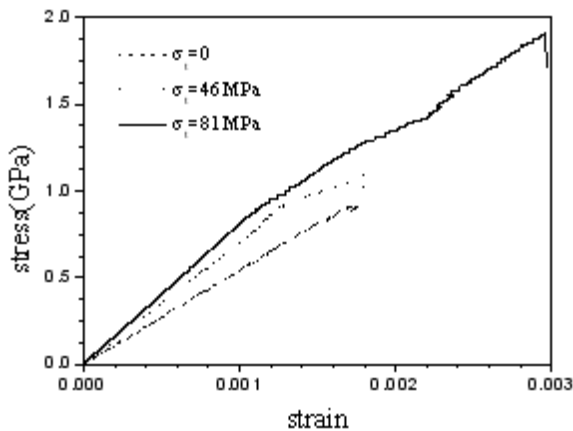


图1 不同围压下陶瓷试样的准静态应力—应变曲线

Fig. 1 Typical quasi-static stress-strain curves with different levels of lateral confinement

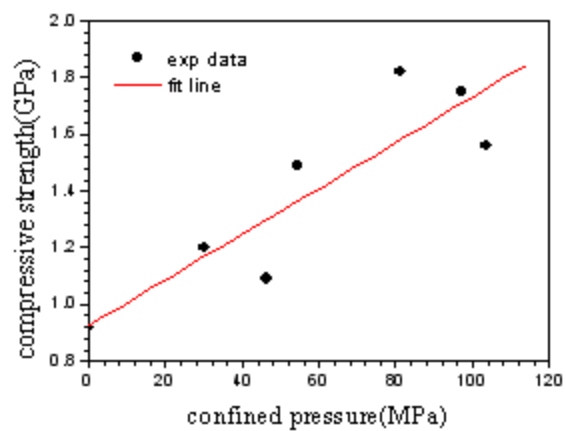


图2 轴向压缩强度与围压的关系

Fig. 2 Variation of quasi-static axial compressive strength with confinement

在应变率 0.0001s^{-1} 下,我们测量了受围压试样的轴向应力和轴向应变,并且测量了套筒在相同条件下的压缩应力—应变曲线。图1是在该应变率下,围压 81MPa 的 45 钢套筒、 46MPa 的 LY12 铝套筒以及没有套筒约束试样的应力—应变曲线。可以看出,随着围压增大,试样的轴向应力相应增大。图2是在该应变率下轴向压缩强度与围压的关系,陶瓷的轴向压缩强度基本随围压的增大而增大。

2 动态力学性能实验

动态压缩实验是在国防科技大学理学院研究所的 SHPB 上进行的,实验采用 $\phi 20\text{mm}$ 的钢杆,密度 $7850\text{kg}/\text{m}^3$,杨氏模量 211GPa ,泊松比 0.28 ,弹性波速 $5186\text{m}/\text{s}$ 。陶瓷试样的尺寸为 $\phi 9\text{mm} \times 9\text{mm}$,端面磨平。陶瓷试样的硬度和强度非常高,因此需要在入射杆和透射杆上添加垫块^[7,8]。陶瓷是脆性材

料,而且其应变很小,一般不超过 1%,需要在试样上直接贴应变片,实验中我们在试样中部对称贴应变片。为了改善入射波的波形,我们使用黄铜和橡皮的混合整形器。为了减少垫块引入对应力波传播的影响,按照一维应力波理论,需要垫块的声阻抗与 Hopkinson 压杆的相同,将垫块和压杆参数代入就可以得到垫块的直径,垫块的尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。

为了实现准一维应变,采用的方法与准静态实验一样,我们用不同厚度 45 钢和 LY12 铝的套筒对试样进行环向约束,只是试样的厚度比准静态实验的试样小一半。试样的轴向应力 σ_A 由下式计算:

$$\sigma_A = (F_{kur} - \pi E_{ring} \epsilon_A (R_o^2 - R_i^2)) / (\pi R_i^2) \quad (4)$$

式中 E_{ring} 是套筒的弹性模量; ϵ_A 是试样上所贴应变片测得的套筒和陶瓷的共同应变; F_{kur} 是应力平衡时的冲击力; R_o 是试样和套筒配合后的外径; R_i 是 Al_2O_3 试样的内径。图 3 是围压为 33.4MPa 时 45 钢套筒约束的陶瓷试样的轴向应力—轴向应变关系。与准静态围压实验相比,应力—应变曲线出现了明显的屈服阶段;与动态无围压实验相比,应力—应变曲线出现了应变软化阶段,这说明围压增大了陶瓷的韧性。图 4 给出了不同注气压力下, SHPB 实验中所得到的围压和轴向强度值。可以看出,围压增大时,轴向压缩强度增大;注气压力增大(即应变率增大)时,轴向强度也增大。

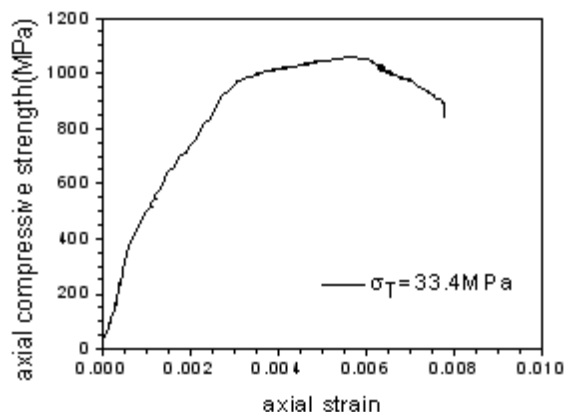


图 3 受围压试样的应力—应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of the specimen under lateral confinement

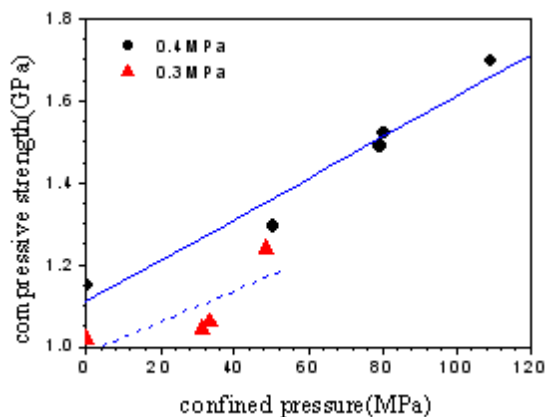


图 4 动态轴向压缩强度与围压的关系

Fig. 4 Variation of dynamic compressive strength with lateral confinement



图 5 准静态压缩实验中回收的试样

Fig. 5 Reclaimed specimen from quasi-static experiments



图 6 SHPB 实验中回收的试样

Fig. 6 Reclaimed specimen from SHPB experiments

3 失效特征和失效准则

在准静态压缩实验中,陶瓷试样大多完全崩碎。而受围压陶瓷的破坏则不同,受约束的陶瓷由于裂纹生长、发展而断裂,试样表面有多条贯穿裂纹。图 5 是回收的 LY12 铝套筒约束的陶瓷试样,可以看到在陶瓷表面有贯穿裂纹。在 SHPB 试验中,陶瓷试样大多完全粉碎,而受围压陶瓷破坏则不同,陶瓷内部破裂,端面有众多裂纹,见图 6。对比两图可以看出,陶瓷动态压缩破坏裂纹数目远多于准静态压缩破坏。

陶瓷是脆性材料,其脆性失效行为可以用 Mohr-Coulomb 失效准则来描述。

$$|\tau| + \alpha p = \tau_0 \quad (5)$$

其中

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} = -\frac{1}{3}(\sigma_A + 2\sigma_T) \quad (6)$$

$$|\tau| = \frac{1}{2} |\sigma_A - \sigma_T| \quad (7)$$

$|\tau|$ 是剪切强度的绝对值; p 是静水压; τ_0 是材料在纯剪状态下的剪切强度; α 是比例系数; σ_T 是横向应力。

在准静态压缩实验和动态冲击压缩实验中,陶瓷和金属套筒由于泊松效应将径向膨胀,导致套筒的围压减少陶瓷试样屈服时,若泊松效应的应变大于围压所导致的应变

$$\frac{\sigma_s}{E_{ring}} \leq (\nu_2 - \nu_1)\epsilon \quad (8)$$

试样不受约束。式中 σ_s 是套筒的屈服应力; E_{ring} 是套筒的弹性模量; ν_2 和 ν_1 套筒和试样的泊松比; ϵ 是轴向应变。

根据式(8),轴向应变为 0.003 时,采用 LY12AL 套筒加载,陶瓷试样围压约减少 4%;采用 45 钢套筒加载,陶瓷试样围压约减少 11%。若忽略套筒加载试样的泊松效应影响,剪切强度与压缩强度的关系见图 7 所示。对实验数据进行拟合,得到 τ_0 和 α 的值分别是 103.8MPa 和 1.12。

在多轴压缩加载条件下,用滑移裂纹模型描述带有初始微裂纹的脆性材料失效准则为^[5]:

$$\sigma_1 = c\sigma_3 - \sigma_0 \quad (9)$$

其中 σ_1 是轴向应力(相当于 σ_A); c 是材料常数; σ_3 是横向应力(相当于 σ_T); σ_0 是无约束抗压强度。而且在裂纹传播的初始阶段, c 和 σ_0 可以表示为:

$$c = \frac{\sqrt{1+\mu^2} + \mu}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \quad (10)$$

$$\sigma_0 = \left[\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2} - \mu} \right] \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} \quad (11)$$

其中 μ 是越过裂纹表面的摩擦系数; K_{IC} 是材料的断裂韧性; a 是初始微裂纹的长度。

假设 $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_T$, 对比 Mohr-Coulomb 失效准则公式有:

$$\alpha = \frac{3(1-c)}{2(2+c)} \quad (12)$$

$$\tau_0 = -\frac{3\sigma_0}{2(2+c)} \quad (13)$$

由于准静态实验中加载应变率(0.0001s^{-1})都是一致的,我们利用准静态实验结果对上述失效准则进行验证。在准静态压缩条件下, τ_0 和 α 的值分别是 103.8MPa 和 1.12,由上述公式计算得到 $\sigma_0 = 0.830\text{GPa}$,这与工厂所提供的无约束抗压强度 0.913GPa 相近,因此也说明了用上述滑移裂纹模型来描述 Al_2O_3 陶瓷的脆性失效是可行的。

4 结束语

采用不同厚度的 45 钢套筒和 LY12 铝套筒对 Al_2O_3 陶瓷试样进行环向约束,在准静态实验和动态

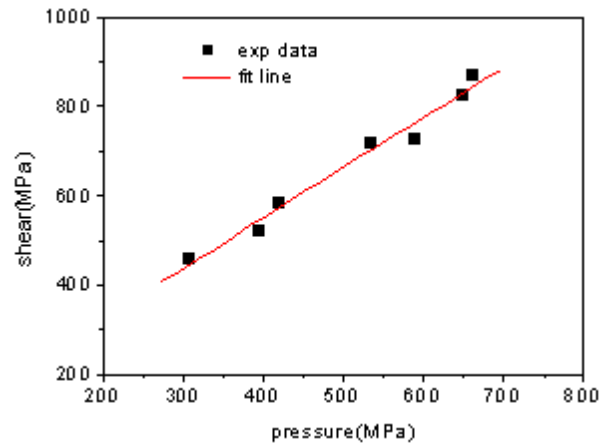


图7 剪切强度与静水压的关系

Fig. 7 Variation of hydrostatic pressure with shear strength

压缩实验中测得了陶瓷试样的轴向应力—应变曲线,还得到了 Al_2O_3 陶瓷在不同围压下的轴向压缩强度。结果表明 Al_2O_3 陶瓷的轴向压缩强度基本随围压的增大而增大,动态应力—应变曲线出现了明显的屈服段和应变软化阶段,动态压缩加载下的轴向压缩强度还与应变率相关。 Al_2O_3 陶瓷在准一维应变下的破坏形式为裂纹破坏,动态加载陶瓷试样表面出现的裂纹数目远多于静态加载。准一维应变下 Al_2O_3 陶瓷在准静态的脆性失效行为可以用 Mohr-Coulomb 失效准则来描述。

参考文献:

- [1] Wilkins M L, Honodel C A, Landingham. Fifth Progress Report of Light Armour Program[A]. UCRL-50980: Lawrence Radiation Laboratory, 1971.
- [2] 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(Fan J L, Zhang W R, Zhai W, et al. Anti-Perforation Experimental Study of Silicon-Nitride Ceramics. Journal of Ballistics, 2000,12(4):77~81 (in Chinese))
- [3] 张晓晴,姚小虎,宁建国,赵隆茂,杨桂通. Al_2O_3 陶瓷材料应变率相关的动态本构关系研究[J]. 爆炸与冲击, 2004,24(3):226~232 (Zhang Xiao-qing, Yao Xiao-hu, Ning Jian-guo, Zhao Long-mao, Yang Gui-tong. A study on strain-rate dependent dynamic constitutive equation of Al_2O_3 ceramic. Explosion and Shock waves, 2004,24(3): 226~232(in Chinese))
- [4] 李平. 陶瓷材料的动态力学响应及其抗长杆弹侵彻机理[D]. 北京理工大学(博士论文),2002 (Liping. Dynamic mechanical response of ceramic and the mechanism of the ceramic withstanding projectiles penetrating. Beijing Institute of Technology, 2002(in Chinese))
- [5] Chen Weinong, Ravichandran G. Dynamic Compressive Failure of a Glass Ceramic under Lateral Confinement[J]. J Mech Phys Solids, 1997, 145(8): 1303~1328.
- [6] 刘鸿文. 材料力学(下册)[M]. 高等教育出版社,1992: 294~295(Liu Hongwen. Material Mechanics. Higher education publish company, 1992:294~295(in Chinese))
- [7] Chen W, Subhash G, Ravichandran G. Evaluation of ceramic specimen geometries used in Split Hopkinson Pressure Bar[J]. Dymat J, 1994,1:193~210.
- [8] Kennedy G, Zhai J, Russell R, et al. Dynamic Mechanical Properties of Microstructurally-biased Two Phase $\text{TiB}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ceramics[C]. Proceedings of International Conference on Fundamental Issues and Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena(EXPLOMET 2000). Amsterdam;Elsevier Science BV, 2001: 63~70.

Experimental Study of Dynamic Compressive Failure of Al_2O_3 Ceramic under Quasi-one-dimension Strain

SHI Zhi-yong, TANG Wen-hui, ZHANG Rou-qi, SHE Jin-hu, CHEN Rong

(Institute of Technical Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the performance of the Al_2O_3 ceramic under quasi-one-dimension strain, the ceramic specimens were confined laterally by the 45 steel and LY12 aluminum rings. The quasi-static and dynamic experiments were performed with the confined specimens, and the stress-strain curves were measured. The experimental results showed that the compressive strengths including quasi-static and dynamic increased with the confined pressures. The axial compressive strength under dynamic loading was improved with the increase of the strain rate. The failure mode was crack damage. The brittle failure of the Al_2O_3 ceramic could be well described by the Mohr-Coulomb failure criterion.

Keywords: Al_2O_3 ceramic; quasi-one-dimension strain; brittle failure