

文章编号: 1001-1455(2009)02-0167-05

陶瓷材料动态抗弯性能测试*

宋顺成^{1,3}, 王明超², 刘筱玲¹, 王庭辉¹, 孙志杰², 张佐光²

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031;

2. 北京航空航天大学, 北京 100083;

3. 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: 用改装的 Hopkinson 压杆试验装置测试了陶瓷材料 3 点弯曲动态力学性能; 定义了量纲一挠度和挠度变化率, 给出了几种陶瓷材料在不同挠度变化率下的挠度-最大拉应力曲线, 从而给出其抗弯强度。测试结果说明, 陶瓷材料的动态抗弯强度具有挠度变化率效应。分析了 3 点弯曲动态测试的有效性和动态损伤, 分析表明, 动态损伤因子临界值具有挠度变化率效应。

关键词: 固体力学; 动态抗弯强度; 动态 3 点弯曲试验; 陶瓷材料; Hopkinson 压杆试验装置

中图分类号: O346.5

国标学科代码: 130 · 1540

文献标志码: A

1 引 言

由于陶瓷材料具有低密度、高硬度和高压压缩强度特征, 因此 30 多年来其应用一直受到密切关注。关于陶瓷应用的报告可追溯到 20 世纪 60 年代初, 当时陶瓷用在了直升机和人体防护中。随着陶瓷材料的发展, 制定了实用标准, 即 MIL-A-46103、MIL-T-46098、MIL-C-12369。

长期以来人们根据不同的应用, 用不同的陶瓷参数表征陶瓷的使用性能。例如, Z. Rosenberg 等^[1]用陶瓷材料静态压缩强度和动态压缩强度的平均值表征弹道阻力; R. L. Woodward^[2]使用了 Vickers 硬度表征陶瓷材料在撞击中的使用性能; 不过 J. Sternberg^[3]指出陶瓷硬度可能控制高速撞击初始阶段的弹道阻力, 此后由于大量裂纹的产生, 弹道阻力可能会随陶瓷硬度增加而下降; 因此, J. Sternberg 建议通过增加陶瓷材料的韧性来提高陶瓷材料的使用性能。

3 点弯曲试验能较好地描述陶瓷材料的综合性能, 这是因为对于拉、压性质不同的材料 3 点弯曲试验的抗弯强度既决定于材料的单向拉伸强度又决定于材料的单向压缩强度。但是过去 3 点弯曲试验大多是静态试验, V. Crupi 等^[4]在万能试验机上进行了 3 点弯曲动态试验, 测试了铝泡沫夹层材料的动态载荷-挠度曲线, 由于机械直接加载的速度较低 (1.2 m/s), 未给出加载率效应。

本文中用改装的 Hopkinson 压杆试验装置测试陶瓷材料 3 点弯曲动态力学性能。

2 3 点弯曲动态抗弯强度测试装置和测试原理

陶瓷材料 3 点弯曲动态抗弯强度的测试利用了 Hopkinson 压杆试验原理, 测试装置如图 1 所示。子弹被高压气体发射后, 以一定速度撞击应力波输入杆并在应力波输入杆内产生入射波 ϵ_i , ϵ_i 通过应变片 1 被记录下来。当 ϵ_i 到达陶瓷试件后, 一部分成为试件上的作用力, 另一部分由于试件变形或位移被反射回输入杆, 成为反射波 ϵ_r 。 ϵ_r 到达应变片 1 后被记录下来。作用在试件上的力施加在从圆筒分离出的 2 个小支柱上, 成为透射波 ϵ_t 。 ϵ_t 通过应变片 2 被记录下来。最后大部分透射波被应力波吸收杆所吸收。为了防

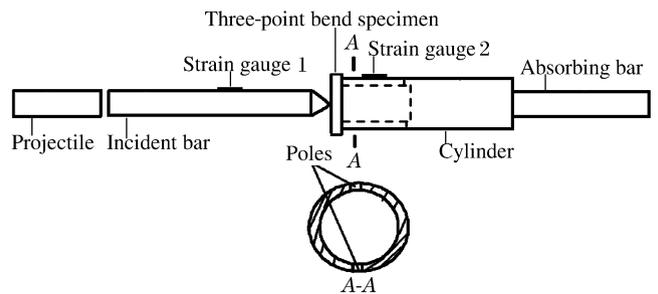


图 1 动态抗弯强度测试装置示意图

Fig. 1 Schematic of the apparatus for measuring the dynamic bending strength

* 收稿日期: 2007-09-21; 修回日期: 2007-12-04

作者简介: 宋顺成(1946—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

止透射波在圆筒端部的反射对前面所要记录的透射波的干扰,圆筒取足够长度,应变片 2 距圆筒右端 1.5 倍子弹长。同理,为了使记录入射波和反射波分离,入射杆要足够长并且应变片 1 距尖头端部大于 1 倍子弹长。图 2 是陶瓷材料 3 点弯曲测试应力波。

该装置的特点是直接测得了透射应力波,从而直接得到试件变形过程中作用在试件上的支反力。文献[5-7]中进行了 3 点弯曲动态试验,但均未测透射应力波,不得已用入射波和反射波间接计算加载力,这是不准确的。

陶瓷材料动态抗弯强度测试所使用的试件为 3 点弯曲试件,跨距长度为 $2l$,宽度为 b ,高度为 h ,试件截面惯性矩 $S = bh^2/6$ 。

定义相对挠度 $\theta = \omega_0/l$,其中 ω_0 为陶瓷试件中心处的挠度。在冲击试验中试件中心处与应力波输入杆的尖头接触。与此一致,定义

相对挠度变化率(简称挠度变化率) $\dot{\theta} = d\theta/dt$ 。于是平均挠度变化率定义为 $\bar{\dot{\theta}} = \int_0^t d\theta/dt$ 。试件变形过程中与输入杆的尖头接触的试件中心处的挠度 ω_0 的计算由入射波、反射波、透射波给出,从而给出瞬时量纲一挠度

$$\theta = \frac{c_0}{l} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \tag{1}$$

式中: c_0 是输入杆材料的声速。输入杆的入射载荷和支撑试件的每个小支柱上的透射载荷分别为

$$F_i = E_i A_i (\epsilon_i + \epsilon_r) \tag{2}$$

$$F_t = EA\epsilon_t \tag{3}$$

式中: E_i 、 A_i 分别为入射杆材料的弹性模量和横截面积; E 是支柱材料的弹性模量, A 是小支柱的横截面积。在一维 Hopkinson 杆试验中取二者的平均值作为试件上的载荷。对于 3 点弯曲试验显然没有一维性,本文中取式(3)为支撑载荷计算弯矩。因此,如果试件断裂在试件的中心处,则最大瞬时弯矩可由小支柱上的透射波给出

$$M_{max} = EA\epsilon_t l \tag{4}$$

此时,试件中心处有瞬时最大拉应力

$$\sigma_{t,max} = M_{max}/S \tag{5}$$

对于试件变形过程,由式(1)和式(5)可获得 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线。从而获得试件材料的动态抗弯强度 $\sigma_{d,b}$ 。定义在 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线上与最大的 $\sigma_{t,max}$ 相对应的 θ 称为断裂量纲一挠度 θ_f 。如果试件断裂不在试件的中心处,则在式(4)中用 l_x 代替 l ,其中 l_x 是断裂处到小支柱的距离。

试验说明,陶瓷材料的动态抗弯强度或者说 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线不但与材料的静态性能有关,而且强烈地依赖于变形率。

3 几种陶瓷动态抗弯强度测试结果

利用上述装置和测试原理给出了几种静态抗弯强度 $\sigma_{s,b}$ 不同的陶瓷材料的动态抗弯强度。图 3 对每种陶瓷给出 2 条 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线,表明最大拉应力随挠度的变化过程。其中一条曲线的平均挠度变化率较高,另一条曲线的平均挠度变化率较低。由 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线可以确定抗弯强度。表 1 给出了上述几种陶瓷材料的动态抗弯强度 $\sigma_{d,b}$ 和断裂量纲一挠度 θ_f 。该测试结果表明,陶瓷材料的 $\sigma_{t,max}-\theta$ 曲线及抗弯强度不但与材料的静态性能有关,而且强烈地依赖于挠度变化率;断裂量纲一挠度 θ_f 也依赖于挠度变化率。一般说来,随着平均挠度变化率的增加断裂量纲一挠度 θ_f 增大。

表 1 几种不同静态抗弯强度的陶瓷材料的动态抗弯强度

Table 1 Dynamic bending strengths of some ceramics materials with different static bending strengths

陶瓷编号	$\sigma_{s,b}/\text{MPa}$	$\sigma_{d,b}/\text{MPa}$	$\bar{\dot{\theta}}/s^{-1}$	θ_f	陶瓷编号	$\sigma_{s,b}/\text{MPa}$	$\sigma_{d,b}/\text{MPa}$	$\bar{\dot{\theta}}/s^{-1}$	θ_f
1	372	658	8.7×10^2	0.028	5	346	738	8.5×10^2	0.033
		837	1.1×10^3	0.037			867	1.2×10^3	0.042
2	255	551	8.8×10^2	0.025	6	437	738	9.4×10^2	0.029
		684	1.2×10^3	0.038			867	1.4×10^3	0.042
3	381	598	9.4×10^2	0.031	7	334	625	9.7×10^2	0.027
		715	1.3×10^3	0.034			774	1.3×10^3	0.043
4	363	680	1.0×10^3	0.033	8	441	853	1.0×10^3	0.032
		715	1.2×10^3	0.042			1 013	1.2×10^3	0.040

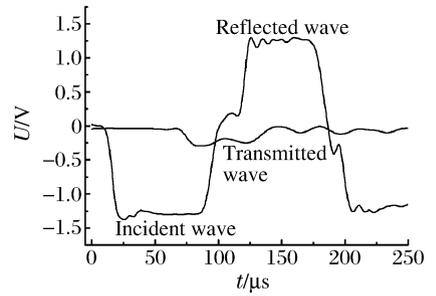


图 2 陶瓷材料 3 点弯曲测试应力波
Fig. 2 Stress waves of ceramic by the three-point bending test

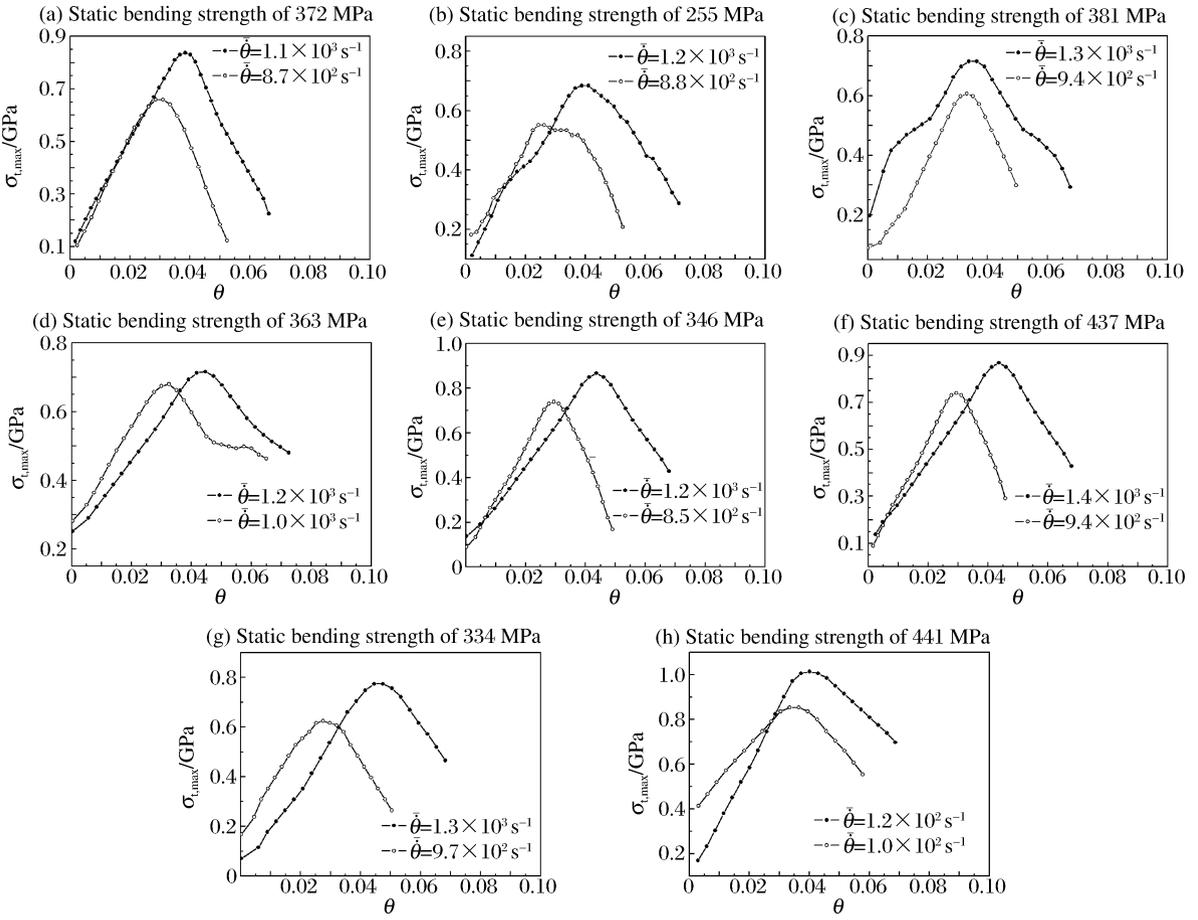


图 3 几种不同静态抗弯强度的陶瓷材料的最大拉应力随挠度的变化

Fig. 3 Deflection-maximum tensile stress curves of ceramic materials with different static bending strengths

4 试验分析

4.1 有效性

如前所述,在本文的测试装置中,支撑试件的是小支柱。在冲击载荷作用下,小支柱受压缩载荷作用。冲击速度越高,压缩载荷越大。因此需要对小支柱的稳定性进行效核。设小支柱长度为 l_p ,横截面面积为 A_p ,横截面惯性矩为 I_p ,按照压杆稳定理论,小支柱上的透射波最大应变不应超过如下计算值

$$\epsilon_{t,max} = \phi(\lambda)\pi^2/\lambda^2 \tag{6}$$

式中: ϕ 是 λ 的函数,可称为动力稳定系数。 ϕ 也与材料强度有关,材料强度越高, ϕ 值越大。目前对动力稳定系数的研究结果较少,可直接利用静力学结果。因为在动态压缩中,材料强度一般都具有应变率强化效应,因此,取静力学结果具有可靠性。在式(6)中, λ 表示为

$$\lambda = \mu l_p / \sqrt{I_p/A_p} \tag{7}$$

式中: μ 是由约束条件决定的因数,本文小支柱一端固支,一端自由,取 $\mu=2.0$ 。其他参数 $l_p=28 \text{ mm}$, $A_p=6 \text{ mm}^2$, $I_p=2.0 \text{ mm}^4$,由式(7)得, $\lambda=97$ 。根据 λ 值查表取较小的 ϕ 值, $\phi=0.6$ 。

于是由式(6)计算得, $\epsilon_{t,max} = 1.41 \times 10^{-3}$,即透射波应变最大允许值为 1.41×10^{-3} 。本文中透射波应变最大测试值为 0.6×10^{-3} ,因此从稳定角度看,上述测试值是有效的。

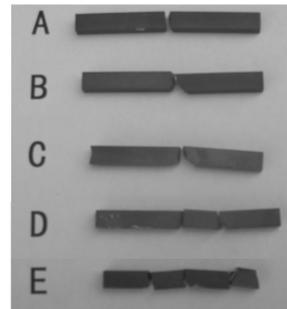


图 4 试件断裂情况分类

Fig. 4 Classification by the rupture of specimens

陶瓷试件被胶布封在圆筒内侧并和胶布粘在一起。很多情况下,试件断裂后仍然未与胶布分离。因此,试件被冲断后很容易回收和观察。如图4所示,在陶瓷材料3点弯曲动态测试中,试件的断裂可分为3种情况,即中间断裂(A、B)、略偏一侧断裂(C)、3段以上断裂(D、E)等。本文中给出的16个测试试件中,只有2个不在试件中心断裂,偏差为10%。对此,运用式(4)计算最大弯矩时以 l_x 代替 l 。其他试件的断裂均在试件中间。对于断裂偏差较大或3段以上的断裂均认为是无效的,未列入本文测试结果中。

4.2 动态损伤临界值

以上测试结果表明,陶瓷材料的动态抗弯性能与静态抗弯性能明显不同,以下从陶瓷材料的静态弯曲性能出发,给出陶瓷材料动态损伤临界值分析。

由静力学理论可以给出陶瓷材料3点弯曲刚度计算方程

$$F/\delta_0 = E_s b h^3 / (2l^3) \quad (8)$$

式中: δ_0 为静力条件下3点弯曲试件中心处的挠度, E_s 为陶瓷材料的静态弹性模量, F 为3点弯曲试件受到的载荷。

对于动态3点弯曲试验,将式(8)修改为

$$F/\omega_0 = E_d b h^3 / (2l^3) \quad (9)$$

式中:冲击条件下3点弯曲试件中心处的挠度 ω_0 由入射波、反射波、透射波给出,而3点弯曲试件受到的载荷可由透射波直接得到。陶瓷材料的3点弯曲冲击过程是陶瓷材料从冲击背面到冲击正面的损伤断裂过程。其中 E_d 可看作陶瓷材料的带动态损伤的弹性模量

$$E_d = E_s (1 - D_d) \quad (10)$$

式中: D_d 为动态损伤因子,于是由式(5)、(9)和(10)得

$$D_d = 1 - \frac{2l}{3E_s h} \frac{\sigma_{\max}}{\theta}$$

定义试件断裂前损伤因子的数值为损伤因子临界值并以 $D_{d,c}$ 表示^[8],则由动态测试 $\sigma_{t,\max}-\theta$ 曲线上的数值给出

$$D_{d,c} = 1 - 2l\sigma_{t,\max} / (3E_s h\theta_i)$$

本文中陶瓷试件为同种陶瓷材料,成分和工艺略有差别,并且具有相同的静态弹性模量和尺寸: $E_s = 400 \text{ GPa}$, $l = 15 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$ 。假设其动态损伤因子临界值有相近的加载率效应,则可通过上述试验数据拟合给出动态损伤因子临界值 $D_{d,c}$ 与加载率 $\dot{\theta}$ 的关系,如图5所示。其中在横坐标中 $\theta^* = \dot{\theta} / \dot{\theta}_0$ 为量纲一挠度变化率,而 $\dot{\theta}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ 。由图5可以看出动态损伤因子临界值 $D_{d,c}$ 与加载率 $\dot{\theta}$ 的对数呈线性关系。

5 结束语

(1)利用本文中改造的Hopkinson动态试验装置可进行动态3点弯曲试验,该3点弯曲试验直接测试入射波、反射波、透射波。利用直接测试的入射波、反射波和透射波,可直接给出试件的动态变形,利用透射波直接给出动态弯矩和弯曲应力。

(2)定义了量纲一挠度和量纲一挠度变化率,试件任意一点的弯矩不但是量纲一挠度的函数,也是量纲一挠度变化率的函数。本文中测试给出了几种陶瓷材料不同挠度变化率下的挠度-最大弯曲应力关系曲线。

(3)分别从压杆稳定原理和试验的对称性考虑,对动态3点弯曲试验做了稳定性和破坏的有效分析,并根据测试数据给出了动态损伤因子临界值与加载率的关系。

参考文献:

- [1] Rosenberg Z, Yeshurun Y. The relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1988,7(3):357-362.
- [2] Woodward R L. A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite armor defeat[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,9(4):455-474.
- [3] Sternberg J. Material properties determining the resistance of ceramics to high velocity penetration[J]. Journal of Applied Physics, 1989,65:3417-3424.

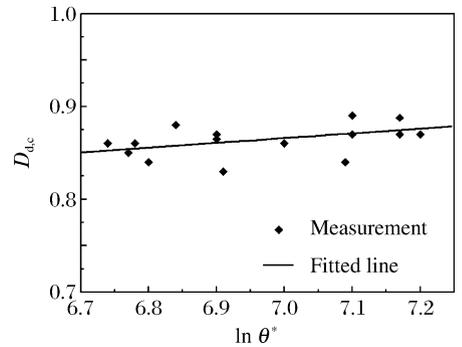


图5 动态损伤因子临界值与加载率的关系
Fig. 5 Relation of critical dynamic damage factor and loading rate

- [4] Crupi V, Montanini R. Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3):509-521.
- [5] 李玉龙, 郭伟国, 徐绯, 等. Hopkinson 压杆技术的推广应用[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(5):386-394.
LI Yu-long, GUO Wei-guo, XU Fei, et al. The extended application of Hopkinson bar technique[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(5):386-394.
- [6] 刘瑞堂, 张晓欣, 姜凤春, 等. 用 Hopkinson 压杆技术测试材料动态断裂韧性的方法研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2000, 21(6):18-25.
LIU Rui-tang, ZHANG Xiao-xin, JIANG Feng-chun, et al. Study of the method for measuring dynamic fracture toughness by Hopkinson pressure bar technique[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2000, 21(6):18-25.
- [7] 曹茂盛, 张铁夫, 刘瑞堂, 等. 层板复合材料动态断裂韧性测试的 SHPB 技术研究[J]. *材料科学与工艺*, 2002, 10(4):428-430.
CAO Mao-sheng, ZHANG Tie-fu, LIU Rui-tang, et al. A study of the method for dynamic fracture toughness testing of laminated composites by SHPB technique[J]. *Materials Science and Technology*, 2002, 10(4):428-430.
- [8] 施明泽, 黄克强, 吕荣坤. 单向拉伸损伤因子 D_{1c} 与纯剪切损伤因子 D_{2c} 之间关系的探讨[J]. *浙江大学学报*, 1988, 22(6):20-23.
SHI Ming-ze, HUANG Ke-qiang, LÜ Rong-kun. Study of the relation between the simple tension damage factor D_{1c} and pure shear damage factor D_{2c} [J]. *Journal of Zhejiang University*, 1988, 22(6):20-23.

Measurements of dynamic anti-bending properties of ceramics

SONG Shun-cheng^{1,3*}, WANG Ming-chao², LIU Xiao-ling¹,

WANG Ting-hui¹, SUN Zhi-jie², ZHANG Zuo-guang²

(1. *Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China*;

2. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China*;

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

Abstract: The three-point bending test was performed to explore the dynamic anti-bending properties of ceramic materials by the improved Hopkinson pressure bar system. The tested ceramic specimens have different static bending strengths. The dimensionless deflection and deflection rate were defined and the deflection-maximum tensile stress curves for these ceramic materials were obtained under different deflection rates. The dynamic bending strengths of these ceramic materials were determined from the obtained deflection-maximum tensile stress curves. The measured results show that the deflection rate has intense effect on dynamic bending strength of the ceramics. Analyses on the validity of the dynamic three-point bending test and the dynamic damage indicate that the critical dynamic damage factor is related to the deflection rate.

Key words: solid mechanics; dynamic bending strength; dynamic three-point bending test; ceramic; Hopkinson pressure bar

* Corresponding author: SONG Shun-cheng

E-mail address: song_sc@163.com

Telephone: 86-28-87603125