

文章编号: 1001-1455(2004)03-0226-07

Al₂O₃ 陶瓷材料应变率相关的动态本构关系研究*

张晓晴¹, 姚小虎^{1,2}, 宁建国³, 赵隆茂², 杨桂通²

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640;

2. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024;

3. 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 采用改进的 SHPB 实验方法对 Al₂O₃ 陶瓷的动态力学性能进行了研究, 得到了材料在较高应变率范围内的动态应力应变曲线。结果表明, Al₂O₃ 陶瓷为弹脆性材料, 其动态应力应变呈非线性关系, 在较高的应变率范围内, 陶瓷材料的动态应力应变关系是应变率相关的; 材料的初始弹性模量、破坏应力、破坏应变值随应变率的增大而增大。基于损伤力学的基本理论, 给出了 Al₂O₃ 陶瓷的一维损伤型线性弹脆性本构模型。根据 SHPB 实验结果确定模型中的参数, 得到了 Al₂O₃ 陶瓷应变率相关的损伤型动态本构方程。

关键词: 固体力学; 动态本构方程; SHPB 实验; 损伤; 动态力学性能; Al₂O₃ 陶瓷

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 130·15 文献标志码: A

1 引言

Al₂O₃ 陶瓷具有高强度、高硬度、低密度等特性, 在军用防护装甲中得到广泛应用^[1]。由于陶瓷装甲在战斗中承受冲击载荷, 因此研究其动态力学性能就显得特别重要。为了研究陶瓷材料的动态本构关系, 分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 可实测材料在一定应变率范围内的动态应力应变曲线, 是研究材料动态力学性能最基本的实验方法之一。然而, 由于陶瓷材料强度非常高, 其破坏应变极其微小, 给采用 SHPB 装置测量其动态特性造成很大的困难, 因此这方面的研究工作很少。G. Kennedy 等^[2] 等采用 SHPB 装置研究了两种微结构的 TiB₂+Al₂O₃ 两相陶瓷抗压强度, 给出了应力时间曲线。黄良钊等^[3] 进行了这方面的尝试, 采用 SHPB 装置对 95 瓷、97 瓷、99 瓷的动态力学性能进行了研究, 得到了一些初步的结论。结果表明, 材料的动态抗压强度随应变率的增大而增大。

陶瓷是一种脆性材料, 在室温下承载时几乎不发生塑性变形, 往往在弹性范围内就产生断裂破坏。这是因为, 陶瓷材料内部存在有许多称之为损伤的微缺陷。这些损伤的存在明显地影响材料的力学性能。陶瓷材料的破坏是由微裂纹的起裂扩展积累而导致的。因此采用损伤力学的方法, 是研究这类弹脆性及损伤耦合的材料力学性能较为有效的方法。应用损伤力学理论研究脆性材料的本构方程, 已有不少工作。周维垣等^[4]、吴政等^[5] 等研究了岩体弹脆性损伤本构模型及工程应用; 王道荣等^[6] 对混凝土在冲击载荷下的损伤演化规律进行了实验研究, 给出了应变率相关的本构方程。但是, 关于 Al₂O₃ 陶瓷材料, 这方面的工作报道还未见到。

本文中采用改进的 SHPB 实验方法对 Al₂O₃ 陶瓷的动态力学性能进行研究, 实验得到较高应变率范围内的应力应变曲线。

2 Al₂O₃ 陶瓷动态力学性能的实验研究

2.1 实验方法

采用 SHPB 装置测量 Al₂O₃ 陶瓷材料的动态力学特性时, 遇到很大的困难。其中之一就是由于其

* 收稿日期: 2003-07-24; 修回日期: 2003-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10172063, 10272023)

作者简介: 张晓晴 (1974—), 女, 博士后。

强度极高,动态断裂应变极小 (< 0.01), 很难找到合适的材料制造波导杆来完成实验。为此对现有的 SHPB 装置进行了改进。为了提高试件的应变率及其应力, 实验使用较小直径的试件; 为了防止实验中压杆端面的变形, 借鉴文献[7]中提到的实验方法, 在试件端面和压杆之间各加一陶瓷垫块, 其直径和压杆基本相同。由于陶瓷垫块的直径远大于实验试件, 在实验中垫块发生的变形将远小于实验试件, 因此认为在实验中可以忽略垫块发生的变形。

根据 SHPB 实验原理^[8], 试件中的平均应力、平均应变和平均应变率分别为

$$\sigma = E \frac{A}{A_0} \epsilon_T \tag{1}$$

$$\epsilon = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_R d\tau \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon} = -\frac{2c_0}{l_0} \epsilon_R \tag{3}$$

式中: c_0 、 E 、 A 分别为钢杆中的弹性纵波波速、弹性模量和截面积, A_0 、 l_0 分别为试件的初始截面积和初始长度, ϵ_i 、 ϵ_R 、 ϵ_T 是试件两端面上的入射波、反射波、透射波。

但是, 改进后的实验方法记录的信号并非试件两端面上的入射波、反射波、透射波。如图 1, 设输入杆和输出杆上应变片 1 和应变片 2 记录的入射波、反射波、透射波分别为 ϵ_i 、 ϵ_R 、 ϵ_T , 试件两端面上的入射波、反射波、透射波分别为 ϵ_i^* 、 ϵ_R^* 、 ϵ_T^* 。依照一维应力波理论, 当输入杆中的入射波 ϵ_i 到达压杆与垫块界面 S-C 时, 将会产生应力波的反射与透射, 根据弹性波在不同介质界面上的反射和透射理论, 可得反射、透射波分别为

$$\epsilon_R' = \frac{1-n}{1+n} \epsilon_i \tag{4}$$

$$\epsilon_T' = \frac{2}{1+n} \frac{A_s}{A_c} \epsilon_i \tag{5}$$

式中: $n = \frac{\rho_s c_s A_s}{\rho_c c_c A_c}$, ρ_s 、 c_s 、 A_s 和 ρ_c 、 c_c 、 A_c 分别为钢杆和陶瓷垫块的密度、波速和截面积, 下标 s、c 表示钢杆和陶瓷垫块。

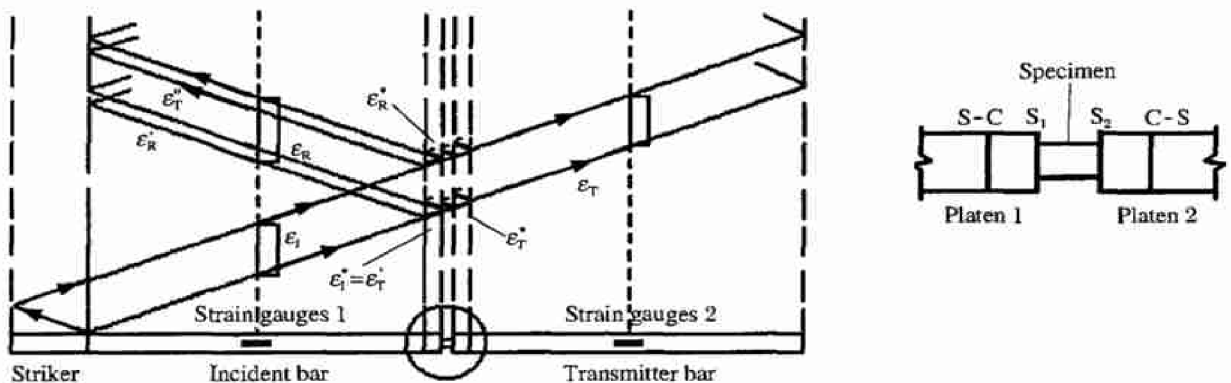


图 1 实验原理

Fig. 1 The principle of modified SHPB technology

透射波 ϵ_T' 在陶瓷垫块中向右传播, 到达垫块与试件界面 S₁, 成为界面 S₁ 上的入射波 ϵ_i^* , 因此有

$$\epsilon_i^* = \epsilon_T' = \frac{2}{1+n} \frac{A_s}{A_c} \epsilon_i \tag{6}$$

入射波 ϵ_i^* 在界面 S₁ 产生反射波 ϵ_R^* , ϵ_R^* 传播至界面 S-C 也将产生反射和透射, 透射到钢杆中的部分为

$$\epsilon_T'' = \frac{2n}{1+n} \frac{A_c}{A_s} \epsilon_R^* \tag{7}$$

而实验记录到的反射波 ϵ_R 为 ϵ'_R 和 ϵ'_T 的叠加,因此数据处理时,首先应在 ϵ_R 中去除 ϵ'_R 。而界面 S_2 上通过试件后的透射波 ϵ_T^* 经过陶瓷垫块后在界面 C-S 上同样产生应力波的反射和透射,传播到钢杆中的透射波即为实验记录到的透射波 ϵ_T ,因此有

$$\epsilon_T = \frac{2n}{1+n} \frac{A_c}{A_s} \epsilon_T^* \quad (8)$$

综上所述,试件两端面上的入射波、反射波、透射波分别为

$$\epsilon_I^* = \frac{2}{1+n} \frac{A_s}{A_c} \epsilon_I, \quad \epsilon_R^* = \frac{n+1}{2n} \frac{A_s}{A_c} \epsilon_R, \quad \epsilon_T^* = \frac{n+1}{2n} \frac{A_s}{A_c} \epsilon_T \quad (9)$$

进行数据处理时,应采用(9)式中 ϵ_I^* 、 ϵ_R^* 、 ϵ_T^* 替换(1)~(3)式中 ϵ_I 、 ϵ_R 、 ϵ_T ,从而求得材料的平均应力、平均应变和平均应变率。

2.2 实验过程

实验所用的 Al_2O_3 陶瓷试件是由四川宜宾金洋电子陶瓷厂制备的 95 瓷,配方组成为 $94.5\%Al_2O_3 + 3.2\%SiO_2 + 2.2\%CaO$ 及少量粘胶,热压烧结而成,平均密度为 $3.625g/cm^3$ 。

实验采用的撞击杆、输入杆和输出杆均为钢杆,直径 37mm,长度分别为 0.6、2、2m。改进 SHPB 方法选取试件尺寸为 $\varnothing 13mm \times 6mm$ 。实验共分 3 组,每组 5 个试件,数据取平均值。每组实验打击速度不同,实验测试了 3 种应变率下 Al_2O_3 陶瓷试件的应力应变曲线。

2.3 实验结果

实验中实测到的入射波、反射波及透射波原始波形的典型曲线如图 2 所示。由图中可以看出,入射波形状近似为矩形,幅值随撞击速度的提高而提高,透射波开始为缓慢上升阶段,后面部分近似为矩形,而反射波较小,这是因为 Al_2O_3 陶瓷材料本身的特性决定的,作为脆性材料,其破坏应变很小。

根据 SHPB 技术实验原理及数据处理过程中的修正方法,进行数据处理,可以得到试件的全程动态应力应变曲线。通过分析可以看出, Al_2O_3 陶瓷在破坏前的变形主要是弹性变形,非弹性变形是由于材料在冲击载荷下产生的微裂隙造成的,并不是塑性变形,因此可认为 Al_2O_3 陶瓷为弹脆性材料;合理反映其本构特征的应力应变曲线应选取非线性弹性变形阶段(如图 3),最高点的应力值为其破坏极限,即材料的动态抗压强度。由不同打击速度(10~20m/s)下的实验发现,随打击速度的提高,陶瓷材料的应变率增大,应变率范围为 $560 \sim 650s^{-1}$ 。由于实验方法的改进,实验得到了比常规方法较高的应变率及应力范围的应力应变曲线。图 3 给出了不同应变率下材料的动态应力应变曲线,可以看出,在较高的应变率范围陶瓷材料的动态应力应变关系是应变率相关的。而且,随着应变率的提高,材料的初始弹性模量、破坏应力、破坏应变值也随着提高。

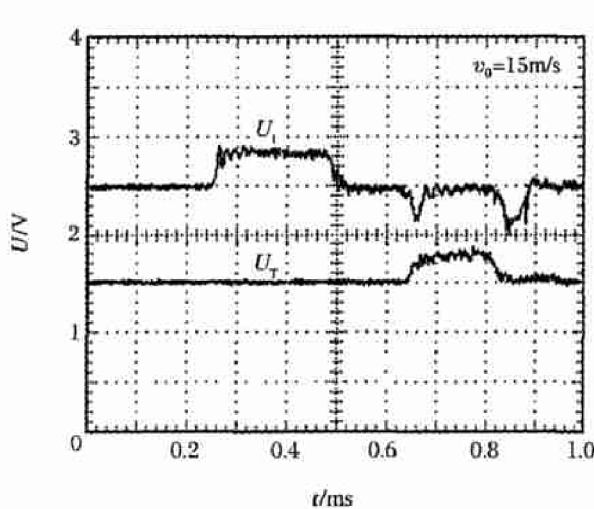


图 2 原始波形

Fig. 2 The typical recorded waves

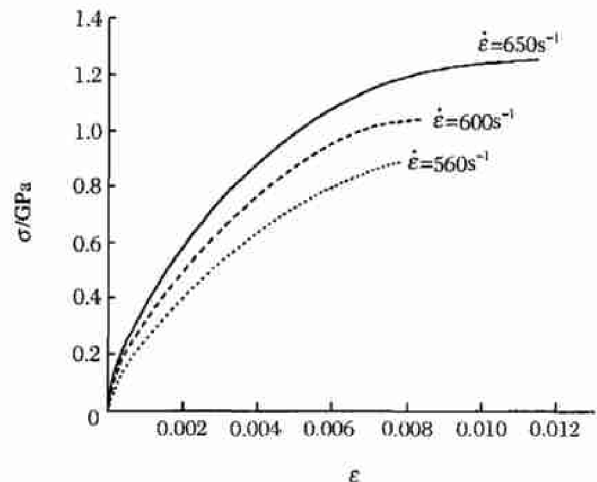


图 3 不同应变率下的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of Al_2O_3 ceramics at different strain rates

3 Al₂O₃陶瓷应变率相关的损伤型动态本构方程

3.1 一维弹脆性损伤本构模型

损伤力学的基本思想是,材料在外界力的作用下,由于内部缺陷的产生和发展而劣化,且此过程是不可逆的。材料的破坏过程就是这种劣化的累积过程,当累积到一定程度后材料就产生宏观裂纹,致使材料破坏。

在加载过程中,材料由微裂纹及空隙的聚集而导致材料渐进破坏的行为用损伤变量 D 来表示。损伤变量 D 可以有多种表达方式,从宏观上考虑最常用的是用应变来表示。脆性材料的损伤变量可定义为^[8]

$$D = m\varepsilon^n \tag{10}$$

式中: n 为参量, m 为与应变率相关的量。

由损伤力学的理论^[9],弹性材料在一维应力条件下的损伤本构方程为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \tag{11}$$

式中: σ 、 ε 为材料的应力、应变, E 为弹性模量, D 为损伤变量。

因此,陶瓷材料的一维弹脆性损伤本构模型为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - m\varepsilon^n) \tag{12}$$

3.2 本构关系式的确定

采用最小二乘法对实验曲线进行拟合,发现使用二次多项式拟合效果最佳(如图 4)。因此(7)式中 n 应取 1, Al₂O₃陶瓷的动态本构方程可表示为

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon(1 - D) \\ D = m\varepsilon \end{cases} \tag{13}$$

表 1 不同应变率下参量的拟合值

Table 1 The fitted parameters in the constitutive equation

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	E/GPa	m	R^2
560	227.4	68.2	0.98856
600	316.2	69.9	0.98117
650	329.2	73.2	0.97884

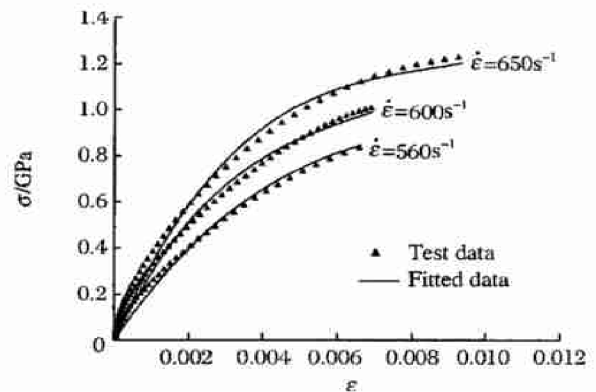


图 4 实验数据与曲线拟合

Fig.4 Test data and fitted data

对各组实验数据进行拟合,可以得到不同应变率下的应力应变关系式。表 1 给出了拟合得到的不同应变率下的参量值及拟合曲线的相关指数 R^2 。各个相关指数 R^2 均趋近于 1,这表明拟合曲线的效果很好。

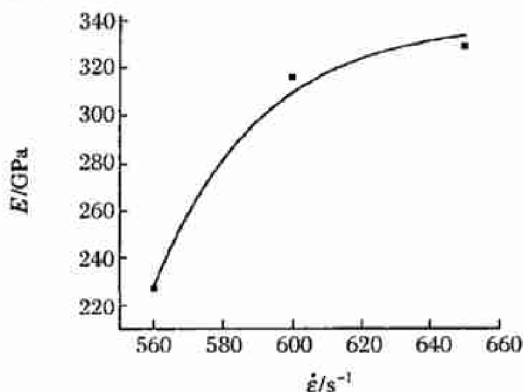


图 5 系数 E 与应变率的关系

Fig.5 The relationship between initial elastic modulus E and strain rate

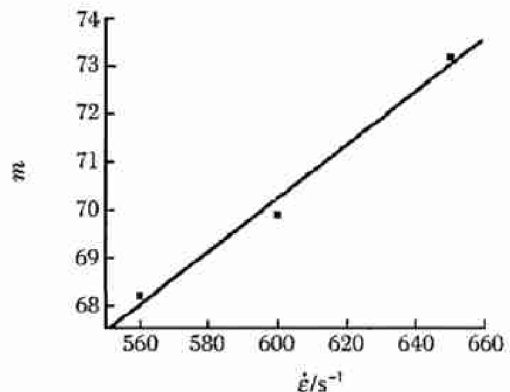


图 6 系数 m 与应变率的关系

Fig.6 The relationship between parameter m and strain rate

由表1中数据进行拟合(如图5~6),可得

$$E(\varepsilon) = 340 - 0.96\varepsilon \times 10^{10} \quad (14)$$

$$m(\varepsilon) = 36 + 0.056\varepsilon \quad (15)$$

拟合曲线的相关指数分别为0.99382和0.99297,表明拟合曲线的效果较好。

图7给出了不同应变率下损伤变量 D 与应变的关系。可以看出,损伤变量 D 随应变增大而增大,二者呈线性关系。而且,应变率越高,增长速率越高。这说明,随着材料变形的发展,材料内部的损伤不断演化、扩展;而且,随着应变率的提高,损伤演化、扩展的速度也会提高。材料的破坏过程就是这种损伤演化、扩展的累积过程,当累积到一定程度后材料就产生宏观裂纹,致使材料破坏。

由实验结果,材料的破坏应力、破坏应变值随着应变率的提高而提高。对数据进行拟合,可得 σ_f 、 ε_f 与 ε 的关系均近似为二次多项式,表达式为

$$\sigma_f(\varepsilon) = -5.6 + 0.018\varepsilon - 0.000012\varepsilon^2 \quad (16)$$

$$\varepsilon_f(\varepsilon) = -0.0076 + 0.000023\varepsilon - 0.000000016\varepsilon^2 \quad (17)$$

拟合曲线相关指数分别为0.99769和0.93479,表明拟合曲线的效果较好。这里需要说明,以上拟合所得的关系式(14)~(17)适用于本文所涉及的高应变率范围。根据低应变率范围的实验结果^[10],在低应变率范围陶瓷材料的动态应力应变关系是应变率无关的。

综合上述分析, Al_2O_3 陶瓷在一维冲击压缩载荷下的损伤型动态本构模型为:

基本假定:(1)陶瓷材料为弹脆性材料;(2)陶瓷的弹性性质表现为非线性;(3)陶瓷材料的本构关系是应变率相关的;(4)考虑陶瓷内部损伤的存在及演化;(5)损伤变量 D 与应变和应变率有关。

本构方程:

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon(1-D) & \varepsilon \leq \varepsilon_f, \sigma \leq \sigma_f \\ D = m\varepsilon \\ E(\varepsilon) = 340 - 0.96\varepsilon \times 10^{10} \\ m(\varepsilon) = 36 + 0.056\varepsilon \\ \sigma_f(\varepsilon) = -5.6 + 0.018\varepsilon - 0.000012\varepsilon^2 \\ \varepsilon_f(\varepsilon) = -0.0076 + 0.000023\varepsilon - 0.000000016\varepsilon^2 \end{cases} \quad (18)$$

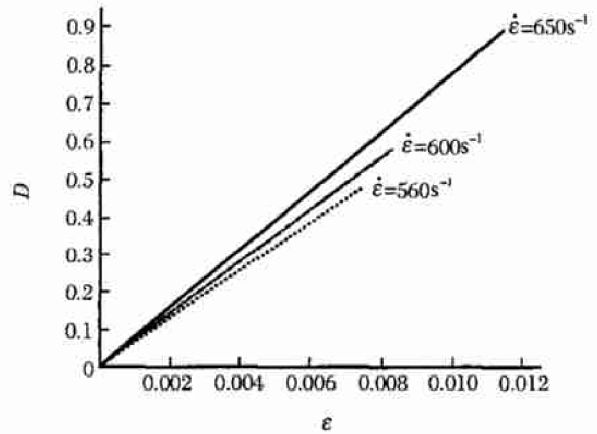


图7 不同应变率下损伤变量 D 与应变的关系

Fig.7 The relationship between D and strain

4 讨 论

陶瓷是脆性材料,其变形机理与金属有所不同。金属材料具有很大的塑性变形能力,其塑性变形主要是由材料内部结构的位错和滑移引起的。而陶瓷材料的内部结构很难产生位错和滑移,因此陶瓷的变形主要不是塑性变形,而是弹性变形阶段的脆性断裂。

金属材料的弹性性质一般表现为线性,而陶瓷材料由于其结构内部存在许多损伤(包括夹杂物、气孔等缺陷),加载过程中损伤的演化使得应力增长速度逐渐变得缓慢。因此陶瓷材料表现为非线性弹性性质。

陶瓷材料内部的夹杂物交截可形成裂纹,气孔处也易构成应力集中点而形成裂纹源,多晶体中不同取向的晶粒的热膨胀性的差别也可形成裂纹。不同取向晶界可形成压应力、张应力和剪应力。在张应力和剪应力的同时作用下使裂纹成核。这些裂纹成核、扩展,最终使材料发生脆性断裂。在加载速率较

高时,由于应力作用的时间很短,使裂纹成核、扩展不能有充分时间完成,所以达不到材料断裂所需的能量。必须在更高的应力下才能使裂纹成核、扩展,而使陶瓷断裂,结果表现出陶瓷材料力学性能的应变率相关性。

基于陶瓷材料的变形机理,可以认为陶瓷材料的非线性弹性性质及其力学性能的应变率相关性是由其内部结构的损伤及其演化引起的。因此构造陶瓷材料的本构模型时考虑损伤因素是合理的。

5 结 论

对于脆性陶瓷材料,动态断裂应变很小,这正是 SHPB 技术弱点所在。本文中对现有的 SHPB 装置进行了改进。采用高精度的六通道超动态应变仪和 TEK-TDS420A 示波器记录及输出数据,尽量排除各种干扰,保证数据的精确性;由于实验中添加的垫块,记录的信号并非试件两端面上的入射波、反射波、透射波,依照一维应力波理论由记录信号得到了试件两端面上的入射波、反射波、透射波,而不是直接采用记录的数据进行处理,保证了结果的可信性。

采用改进的 SHPB 实验方法对 Al_2O_3 陶瓷的动态力学性能进行了研究,得到了材料的动态应力应变曲线。结果表明, Al_2O_3 陶瓷材料的本构特性具有以下特征:(1) Al_2O_3 陶瓷的变形主要为弹性变形,在弹性范围就会发生脆性断裂破坏,认为 Al_2O_3 陶瓷为弹脆性材料;(2) Al_2O_3 陶瓷动态应力应变呈非线性关系;(3) 在较高的应变率范围内,陶瓷材料的动态应力应变关系是应变率相关的;(4) 材料的初始弹性模量、破坏应力、破坏应变值随应变率的增大而增大。

陶瓷是一种脆性材料,其破坏是由微裂纹的起裂扩展积累而导致的。采用损伤力学的方法,是研究这类弹脆性及损伤耦合的材料力学性能较为有效的方法。本文中应用损伤力学理论,给出了 Al_2O_3 陶瓷的一维损伤型线性弹脆性本构模型。根据 SHPB 实验结果确定模型中的参数,得到了 Al_2O_3 陶瓷应变率相关的损伤型动态本构方程。

参考文献:

- [1] 胡玉龙, 蒋凡. 装甲陶瓷的发展现状和趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(5): 37—42.
HU Yu-long, JIANG Fan. Development and current status of armor ceramics[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1996, 19(5): 37—42.
- [2] Kennedy G, Keller A, Russell R, et al. Dynamic mechanical properties of microstructurally-biased two phase $\text{TiB}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ceramics[A]. Staudhammer K P, Murr L E, Meyers M A. Proceedings of International Conference on Fundamental Issues and Applications of Shock-wave and High-strain-rate Phenomena (EXPLOMET 2000)[C]. Amsterdam: Elsevier Science BV, 2001, 63—70.
- [3] 黄良钊, 张安平. Al_2O_3 陶瓷动态力学性能研究[J]. 中国陶瓷, 1999, 35(1): 13—15.
HUANG Liang-zhao, ZHANG An-ping. A study of dynamic mechanical properties on Al_2O_3 ceramics[J]. China Ceramics, 1999, 35(1): 13—15.
- [4] 周维垣, 剡公瑞, 杨若琼. 岩体弹脆性损伤本构模型及工程应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 54—57.
ZHOU Wei-yuan, YAN Gong-rui, YANG Ruo-qiong. Elasto-brittle damage model for rockmass based on field tests in laxiwa arch dams site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 54—57.
- [5] 吴政, 张承娟. 单向载荷作用下岩体损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 55—61.
WU Zheng, ZHANG Cheng-juan. Investigation of rock damage model and its mechanical behaviour[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 55—61.
- [6] 胡时胜, 王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242—246.
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 242—246.
- [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] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[A]. Proc Phys Soc[C]. Lon-

don, 1949: 676—700.

[9] 勒迈特 J. 损伤力学教程[M]. 倪金刚, 陶春虎, 译. 北京: 科学出版社, 1996: 56—74.

[10] 张晓晴, 宁建国, 赵隆茂, 等. 单轴冲击压缩下 Al_2O_3 陶瓷动态力学性能[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(增刊): 85—86.

A study on the strain-rate dependent dynamic constitutive equation of Al_2O_3 ceramics

ZHANG Xiao-qing^{1*}, YAO Xiao-hu^{1,2}, NING Jian-guo³,
ZHAO Long-mao², YANG Gui-tong²

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

2. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*

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

Abstract: The dynamic mechanical properties of Al_2O_3 ceramics have been investigated in this paper using the classical and the improved techniques of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). It is shown that the tested ceramic is nonlinear elastic-brittle material and insensitive to strain-rates in lower ranges but sensitive in higher ranges. The dynamic elasticity modulus and the dynamic compressive strength of the ceramic increase with the strain rate increasing. Based on the theory of damage mechanics, a uniaxial nonlinear elastic-brittle damage-modified constitutive model is proposed here. The parameters of this model for the Al_2O_3 ceramic were obtained by fitting the SHPB test data. It is a strain-rate dependent damage-modified nonlinear elastic constitutive equation of Al_2O_3 ceramics.

Key words: solid mechanics; dynamic mechanical properties; SHPB technology; damage; dynamic constitutive equation; Al_2O_3 ceramics

* Corresponding author: ZHANG Xiao-qing
E-mail address: tcqzhang@scut.edu.cn
Telephone: 0351-6018226