文章编号：1000-5773(2013)05-0662-9

高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷压剪冲击动力学特性*

徐松林[1]，刘永贵[1]，王道荣[2]，谭子翰[1]，郑　航[1]

(1.中国科学技术大学，中国科学院材料力学行为和设计重点实验室，安徽合肥　230027；
2.试验物理与计算数学国家级重点实验室，北京　100076)

摘要：基于一级压剪轻气炮，对高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷(孔隙率 47%～50%)进行冲击速度为 68～201 m/s、倾斜角为 0～15°的平板撞击实验，研究了相关的动态压缩及剪切特性。结果表明，由于材料的气孔为直径小于 5 μm 的微孔，其压缩过程是一个渐进的均匀发展的过程，并没有孔洞崩塌现象发生；其剪切行为表现出脆性材料的一般特性。基于 Hoek-Brown 准则和帽盖模型，建立了孔隙介质动态破坏模型和动态双重屈服面模型。结合压剪实验数据，对模型进行了初步分析，分析结果表明了此模型的适用性。

关键词：冲击动力学；压剪复合加载；动态剪切；孔隙介质；双重动态屈服模型
中图分类号：O357.1；TJ441.2　　**文献标识码**：A

1　引　言

陶瓷材料是工程结构中倍受关注的材料。关于其动态响应特征的研究较多，主要集中在利用分离式 Hopkinson 压杆(Split-Hopkinson Pressure Bar，SHPB)和飞片平板撞击技术测试陶瓷材料在高应变率和高冲击压力下的脆性破坏特性方面。脆性材料的动态损伤破坏与材料的剪切性能密切相关，跟踪测量剪切波在材料内部的传播特性，对于揭示材料的动态损伤破坏机理有着十分重要的意义。

相对于 SHPB 实验技术所能研究的简单应力状态，应用轻气炮装置可以研究复杂的应力状态，如材料在动态压应力和剪应力联合加载下的动态响应。应用轻气炮平板撞击装置进行剪切波的测试，最早由 Gupta[1] 和 Abou-Saged 等人[2] 提出，现已有效地应用于测试脆性材料动态损伤。Munson 等人[3] 在多晶 Al_2O_3 陶瓷冲击实验中发现，当冲击压力高于 Hugoniot 弹性限时，粒子速度的波形结构包括一个迅速上升的弹性前驱波和一个缓慢上升的弥散波。由于陶瓷材料存在初始的杂质和微裂纹、微孔洞等微缺陷，冲击载荷作用可能导致局部微缺陷成核和发展，从而形成复杂的波阵面结构。为消除测试计对波形结构的影响，李平等人[4] 采用锰铜计和 VISAR 同时对 90% 的 Al_2O_3 陶瓷进行了对比测试，表明压缩波的波形结构由低压力区的弹性波(上升时间约为 30 ns)和高压力区塑性弥散波构成。Espinosa 等人[5] 应用 Window Interferometer 研究了压剪联合加载下 AlN/AlN/Al 复合陶瓷材料的剪切性能，由于剪切横波(包括加载部分和卸载部分)反映的是材料在冲击压力作用下及作用后的力学状态，因此波形结构表现出强烈的非线性特征；他们在剪切横波上还观察到一些较明显的峰谷值起伏，反映出冲击压缩作用过程中因局部破裂而引起的应力状态调整。综上所述，以上研究主要集中于孔隙率比较低的陶瓷材料，对动态压缩性能的研究较多，而对复杂应力状态下的行为研究较少。

鉴于脆性孔隙材料在航天航空和防护工程等特殊领域越来越广泛的应用，对其动态性能进行研究

* **收稿日期**：2012-06-10；**修回日期**：2012-08-29
基金项目：国家自然科学基金(11272304，10672157)；中央高校基本科研业务费专项资金(2010)；高等学校博士学科点专项科研基金(20113402110008)
作者简介：徐松林(1971—)，男，博士，副教授，主要从事材料的冲击响应的理论与实验工作. Email：slxu99@ustc.edu.cn

的需求显得非常迫切,但该方面的研究,尤其是对动态压剪性能方面的研究却非常少见。本研究对一种高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷进行压剪联合冲击平板撞击实验,探讨相关的动态压缩及剪切特性。

2　压剪联合冲击实验

2.1　高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷试样

微孔陶瓷是一种体内分布大量彼此相通或闭合的气孔的陶瓷材料。与一般陶瓷一样,微孔陶瓷具有耐高温、耐腐蚀和高脆性等特性;同时,较高的孔隙率使其具有较大的比表面积,因而具有高渗透率、高能量吸收率等一般陶瓷不具备的性质。本研究所用微孔陶瓷的粒径为 10～15 μm ,气孔较均匀,孔径为1～5 μm。微孔陶瓷的显微结构如图 1 所示,表 1 给出了材料的基本参数。

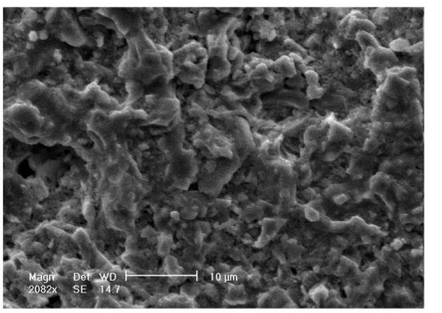


图 1　高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷显微照片

Fig. 1　SEM photos of alumina microvoid ceramics with high porosity

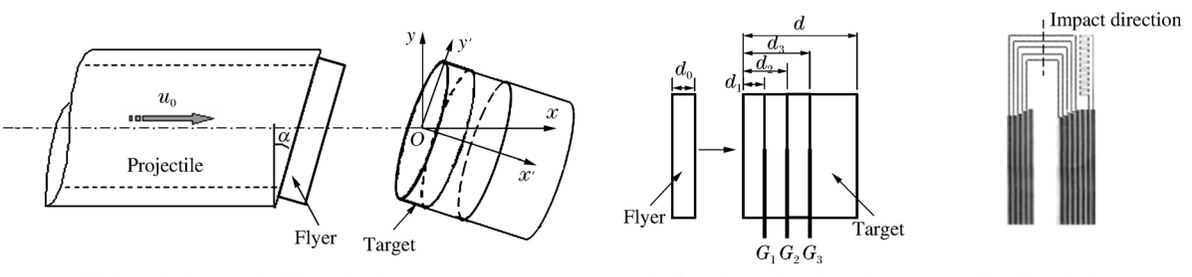
2.2　实验方法和实验内容

实验主要基于 Tang Z P 等人[6]提出的剪切波跟踪技术(Shear Wave Tracking,SWT)进行。轻气炮平板斜撞击实验示意图见图 2(a);飞片、靶和粒子速度计的构型见图 2(b),其中,u_0 为弹丸冲击速度;α 为倾斜角,d_0 为飞片厚度,d 为靶厚度,d_1、d_2 和 d_3 分别为测点 G_1、G_2 和 G_3 的深度。飞片采用两种材料:(1) Al_2O_3 微孔陶瓷,厚度为 5～6 mm;(2) PMMA 材料,厚度为 6～7 mm。靶材为 Al_2O_3 微孔陶瓷,采用横剖形式,每片厚度为 4～5 mm。在每两片之间埋设粒子速度计,然后用环氧树脂胶将样品粘合压牢。整个靶中速度计埋设数为 2～3 个。实验相关参数见表 2,其中 l_1、l_2 和 l_3 为 3 个测点处粒子速度计的长度。

表 1　高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷材料参数

Table 1　Parameters of alumina microvoid ceramics

Mass fraction of Al_2O_3/(%)	Mass fraction of SiO_2/(%)		Density/(g/cm^3)
≥80	16～18		1.8～2.3
Pore diameter/(μm)	Porosity/(%)	Hardness(H_{RA})	Water absorption/(%)
1～2	47～50	≥30	18～22



(a) Schematic diagram of oblique plate impact experiment　(b) Experimental configuration　(c) Particle velocity gauge

图 2　平板斜撞击实验示意图

Fig. 2　Schematic diagram of an inclined impact

实验在中国科学技术大学轻气炮实验室的 57 mm 口径一级轻气炮上进行。靶内部粒子速度的测量采用自行研制的双磁场 IMPS 粒子速度测量系统[7],粒子速度计采用自行研制的电磁粒子速度计(如图 2(c)所示)。整个粒子速度计长为 60 mm,宽为 21 mm,厚度为 50 μm(包括两层绝缘胶)。粒子速度测量计由 5 个子计组成,长度分别为 16.39、14.38、12.37、10.36 和 8.35 mm,子计间距为 2 mm,子计的

整体宽度为 100 μm。横剖靶中每处(图 2(b)中的 G_1、G_2 和 G_3 处)只使用一个速度计上 5 个子计中的任意一个。输出信号采用美国 Tektronix 公司生产的四通道示波器 TDS640A 和 TDS654C 等仪器记录。实验误差约为 5%。

表 2 试件与粒子速度计参数

Table 2 Parameters of specimen and particle velocity meter

Specimen	Flyer material	d_0/(mm)	d/(mm)	l_1/(mm)	d_1/(mm)	l_2/(mm)	d_2/(mm)	l_3/(mm)	d_3/(mm)
0714-0618	Alumina microvoid ceramic	5.62	22.00	15	6.00	11	12.00		
0715-0620	Alumina microvoid ceramic	5.02	19.28	11	4.38	15	9.28		
0716-0621	Alumina microvoid ceramic	5.48	19.38	9	4.56	13	9.38		
0717-0625	Alumina microvoid ceramic	6.40	19.73	11	4.44	17	9.73		
0721-0926	PMMA	6.66	23.92	11	4.70	15	9.38	13	13.88
0722-0928	PMMA	6.62	24.04	11	4.82	13	9.58	11	14.04
0724-1009	PMMA	6.68	23.96	13	4.46	17	9.02	11	13.96
0725-1012	Alumina microvoid ceramic	4.70	23.54	15	4.70	17	9.18	11	13.44

3 高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷压剪冲击动特性

3.1 测试波形分析

粒子速度计记录的典型感生电动势波形如图 3 所示:其中图 3(a)为正撞击典型波形,图 3(b)为斜撞击典型波形。图 3(b)中 p^+、p^-、s^+ 和 s^- 分别表示加载纵波、卸载纵波、加载横波和卸载横波。根据 SWT 技术,当冲击速度低于 98.8 m/s 时,碰撞后的材料基本处于完整状态。当冲击速度高于 98.8 m/s 时,碰撞后的材料处于损伤状态。最明显的标志是:加载横波和卸载横波的幅值都发生了变化。比较遗憾的是,在目前的最高冲击速度(201.6 m/s)下,未观察到卸载横波完全消失的现象。

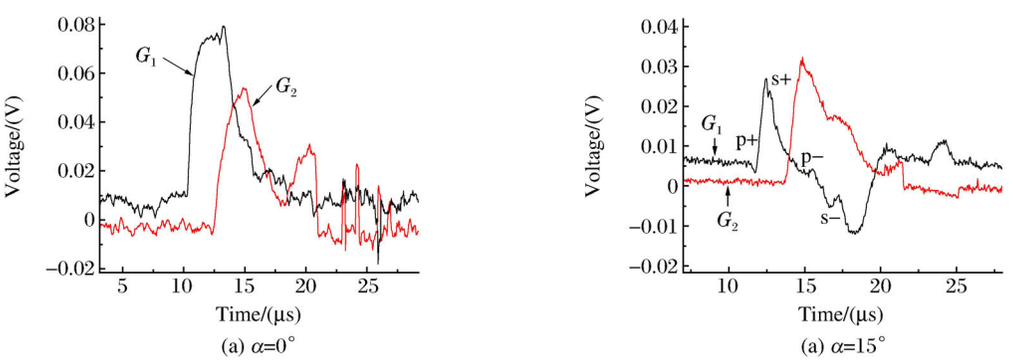


图 3 轻气炮平板撞击实验原始波形

Fig. 3 Recorded wave profiles of plate impact experiments

表 3 和表 4 给出了根据粒子速度计记录得到的正撞击和斜撞击的实验统计结果,其中:v 为比容,v_0 为初始比容,v/v_0 为相对比容;σ 为纵向正应力;ε 为纵向线应变;τ^+ 和 τ^- 分别为加载横波和卸载横波的剪应力;γ 为切应变;c_{p+} 和 c_{p-} 分别为加载纵波和卸载纵波的 Lagrangian 波速;c_{s+} 和 c_{s-} 分别为加载横波和卸载横波的 Lagrangian 波速。

3.2 波速与粒子速度的关系

图 4 给出了高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷的Hugoniot冲击绝热关系,其中:u_p 和 u_s 分别为纵向和横向的粒子速度,c_p 和 c_s 分别为纵向和横向的Lagrangian波速。图 4(a)中冲击压缩过程基本可分为 3 段(图中的固体压缩阶段在本次实验中并未实现,列出来主要用于参考):冲击速度低于 30 m/s 时,波速保持不变,约为 3 100 m/s;冲击速度高于 30 m/s 时,材料进入损伤状态,压缩纵波的波速有逐渐减小的趋势。图 4(b)为相应的剪切波速与冲击速度的关系:冲击速度较低时,剪切波速稳定在2 200 m/s;进入损

伤状态后,剪切波速随冲击速度的增加而逐渐降低。相比而言,图 4(b)的规律性比图 4(a)好,表明u_s-c_s曲线包含的信息比 u_p-c_p 曲线更丰富,因此可以借助 SWT 方法对材料的性能进行进一步的研究。

表 3　正撞击实验结果

Table 3　Results of normal impact experiments

Specimen	u_0/(mm)	Peak state			c_{p+}/(km/s)	c_{p-}/(km/s)
		σ/(MPa)	v/v_0	ε		
0714-0618	131.59	282.90	0.973 22	0.026 78	2.848 7	3.180 2
0715-0620	140.28	345.80	0.971 61	0.028 39	2.733 3	3.011 3
0716-0621	145.20	418.85	0.974 05	0.025 95	3.326 5	3.433 5

表 4　倾斜角为 15°的撞击实验结果统计

Table 4　Results of compression and shear impact experiments with an angle of 15 degrees

Specimen	u_0/(m/s)	Peak state of compression			Peak state of Shear			c_{p+}/(km/s)	c_{p-}/(km/s)	c_{s+}/(km/s)	c_{s-}/(km/s)
		σ/(MPa)	v/v_0	ε	τ^+/(MPa)	γ	τ^-/(MPa)				
0717-0625	131.8	334.3	0.974 27	0.025 73	83.0	0.009 2	21.4	2.864 3	3.173 6	2.218 7	1.718 2
0721-0926	68.8	231.3	0.983 51	0.016 49	54.1	0.005 2	54.1	3.078 9	2.610 6	2.196 1	2.284 6
0722-0928	98.8	330.9	0.976 23	0.023 77	67.4	0.007 6	67.4	3.173 3	3.207 0	2.212 9	2.167 7
0724-1009	201.6	801.6	0.960 60	0.039 40	194.2	0.011 8	19.4	3.235 9	3.543 3	2.226 0	2.222 2
0725-1012	186.4	564.2	0.970 87	0.029 13	76.9	0.014 0	67.2	2.709 7	1.806 5	1.633 3	1.561 9

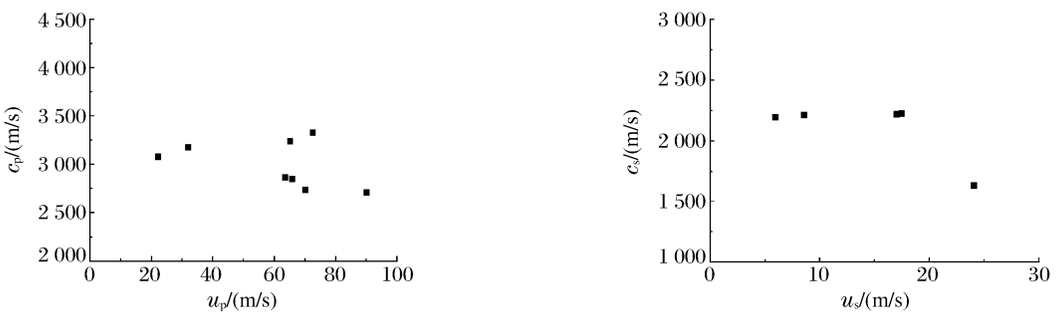


图 4　高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷中波速与粒子速度关系

Fig. 4　Relationship between wave velocity to particle velocity in alumina microvoid ceramics with high porosity

3.3　压力和相对比容的关系

图 5 给出了准静态实验、SHPB 实验和平板撞击实验中应力和相对比容的关系。准静态实验在中国科学院武汉岩土力学研究所的 RMT 岩石力学试验机上进行,在压缩过程中同时测量试件的轴向应变和横向应变;SHPB 实验参见文献[8],在冲击过程中同时测量试件上的轴向应变和横向应变。由此可以对准静态实验和 SHPB 实验中应力和体积的关系进行统计。由图 5 可见,这些数据比较集中,可以进行统一分析。但应注意的是,在平板撞击实验中,当冲击速度低于98.8 m/s时,材料的动态响应反映出材料处于完整状态,而准静态和 SHPB 实验中材料却处于损伤状态。水泥基复合材料(聚丙烯纤维增强水泥砂浆 FCEM)为孔隙率约 10%的脆性介质,孔隙平均直径0.3～0.5 mm,其冲击绝热线有

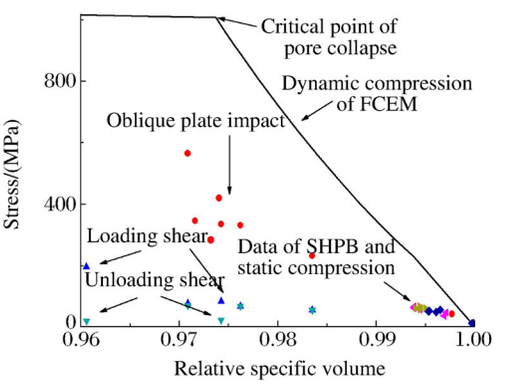


图 5　高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷压剪性能综合分析

Fig. 5　Analyses of dynamic compression and shear behaviors of alumina microvoid ceramics with high porosity

4 个明显的临界点[9-11]：(1) 材料的 Hugoniot 弹性限(σ_{HEL})；(2) 材料 s^- 波消失临界点，即材料的动态剪切强度限，是材料由损伤状态向破坏状态转化的过渡点；(3) 材料的孔洞崩塌点；(4) 密实材料的进一步压缩点。本研究中高孔隙率(孔隙率高达 47%～50%)氧化铝微孔陶瓷并未表现出孔洞崩塌的特征，由于其孔隙直径小于 5 μm，因此其压缩过程，包括孔洞崩塌，是一个渐进的均匀发展的过程，只不过此过程中的变形相对而言比较大。

3.4 动态剪切特性的讨论

对原始波形中分离出来的剪切波进行 Lagrange 分析，可以得到分别对应加载和卸载横波的 2 个剪切强度。s^+ 波和 s^- 波的应力幅值与相对比容之间存在着一定关系，如图 5 所示。由于材料中存在静水压力，加载阶段得到的剪应力因受到材料内部摩擦作用的影响而出现波动，甚至在材料明显破坏之后，仍有一定的残余剪应力存在。但 s^- 波的应力幅值相对而言波动较小，逐渐降为零，在此过程中，s^- 波的剪应力幅值从 $u_0=68.8$ m/s 时的 54.1 MPa 上升到 $u_0=98.8$ m/s 时的67.4 MPa，而后又降至 $u_0=201.6$ m/s 时的 19.4 MPa，当 $u_0>210$ m/s 时，s^- 波的剪应力幅值降为零。因为 s^- 波的应力幅值代表了试件在 p^+ 波和 p^- 波作用后的剩余剪切强度，s^- 波的剪切应力幅值降为零意味着材料已经完全破坏，因此可据此判断材料的失效点。这说明采用卸载剪切波分析脆性材料内部动态损伤有效并具有独特的作用。

4 高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷压剪冲击动态屈服模型

从图 5 中材料的准静态、SHPB 和轻气炮冲击实验可知，本研究采用的微孔陶瓷为一种具有较高孔隙率(47%～50%)的“软”材料，因此主要基于高孔隙率材料的塑性屈服模型对其动态模型进行的探讨。

4.1 动态剪切特性的讨论

脆性材料的塑性行为与金属材料有较大的差异[12]。最早描述岩石类脆性材料屈服和破坏行为的准则是 Mohr-Coulomb 准则(广义的 Tresca 模型)。考虑到围压对脆性材料屈服行为的影响，Drucker 等人[13]建立了 Drucker-Prager 模型(广义的 Mises 准则)。为考虑静水压力对屈服形式的影响，Dimaggio 等人[14]引入了帽盖模型(Cap-model)[15]。还有一类屈服面由大量的实验资料总结得到，其中最常用的为 Hoek-Brown 准则[12]。因为大部分脆性材料的屈服面不能由单一的屈服面描述，本研究基于 Hoek-Brown 准则和帽盖模型，建立含孔隙脆性介质的双重屈服面模型，如图 6 所示，其中：I_1 为应力张量 σ_{ij} 的第一不变量，表征静水压力的影响；J_2 为偏应力张量 S_{ij} 的第二不变量，表征剪切应力的影响。

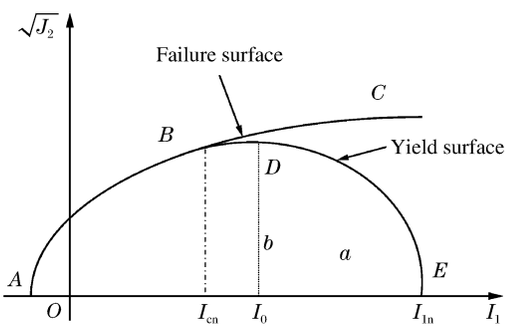


图 6 基于 Hoek-Brown 准则的帽盖模型

Fig. 6 Cap-model with Hoek-Brown criteria

材料的破坏面和屈服面一般不重合，但脆性材料在较低的应力状态下，这两个面基本一致(图 6 中的 *AB* 段)；超过此应力范围，二者有较大的差异(*BC* 段和 *BDE* 段)。模型中破坏面由 Hoek-Brown 准则描述，而其屈服性能则由双重屈服面来表征：当应力较低时(*AB* 段)，屈服面与破坏面重合，采用 Hoek-Brown 准则描述；当应力较高时(*BDE* 段)，屈服面采用帽盖模型中的椭圆方程描述。在此双重屈服面模型中，Hoek-Brown 准则主要描述脆性材料由剪切导致的屈服，而帽盖模型则主要描述由静水压产生的屈服(这在孔隙介质中尤其重要)。在此过程中，须解决两方面的问题，即：(1) *AB* 段与 *BDE* 段的光滑过渡问题，其对应的物理机制为从由剪切导致的屈服向由静水压导致的屈服转变；(2) 如何引入孔隙率的影响。在图 6 的模型中有 5 个参数：I_0、a、b、I_{cn} 和 I_{1n}。通过确定这些参数来解决这两个问题。

对于各向同性脆性材料的三轴抗压强度，Hoek-Brown 准则表达形式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + S\sigma_c^2} \tag{1}$$

式中：σ_c 为完整脆性材料的单轴抗压强度；σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力，以压应力为正；m 和 S 为

表征脆性材料完整性的无量纲参数。在 I_1-$\sqrt{J_2}$平面内,(1)式可以改写为

$$\left(\sqrt{J_2}+Y_0\right)^2=2\sqrt{3}Y_0I_1+\left(1+\frac{36S}{m^2}\right)Y_0^2 \tag{2}$$

式中:$Y_0=m\sigma_c/(6\sqrt{3})$。令(1)式中 $\sigma_3=0$,可以得到该材料的单轴抗压强度 R_c

$$R_c=\sqrt{S}\sigma_c \tag{3}$$

S 定量反映材料破碎程度对材料抗压强度的影响。令(1)式中 $\sigma_1=0$,可以得到材料的单轴拉伸强度

$$R_t=\frac{\sigma_c}{2}\left(\sqrt{m^2+4S}-m\right) \tag{4}$$

由(4)式可知,当 $S=0$ 时,$R_t=0$,说明完全破碎的材料无抗拉强度。根据岩石中孔隙率对岩石强度的影响[15],认为含孔隙岩石的抗拉强度满足

$$\sigma_{tn}=\sigma_t\left[1-\sin^{x_1}\left(\frac{\pi}{2}\frac{n}{n_c}\right)\right] \tag{5}$$

式中:n 为岩石的孔隙度,n_c 为岩石的初始孔隙度,σ_{tn}为孔隙度为 n 的岩体的单轴抗拉强度,σ_t 为完整岩体的单轴抗拉强度,x_1 为材料常数。由(1)式和(3)式～(4)式可以确定

$$\begin{cases}\sqrt{S}=\dfrac{1}{2}\left[1-\sin^{x_1}\left(\dfrac{\pi}{2}\dfrac{n}{n_c}\right)+\cos^{x_2}\left(\dfrac{\pi}{2}\dfrac{n}{n_c}\right)\right]\\ m=-\dfrac{\sigma_{cn}}{\sigma_c}+S\dfrac{\sigma_c}{\sigma_{cn}}\end{cases} \tag{6}$$

式中:x_2 为材料常数;σ_{cn}为孔隙度为 n 的脆性材料的单轴抗压强度。由(3)式～(7)式可以确定破坏面。

屈服面的前段(AB 段)采用 Hoek-Brown 准则描述,即当 $I_1<I_{cn}$时,屈服面的方程由(2)式给出。屈服面的后半段(BDE 段)为椭圆形式,在 I_1-$\sqrt{J_2}$平面内可表示为

$$\frac{(I_1-I_0)^2}{a^2}+\frac{\left(\sqrt{J_2}\right)^2}{b^2}=1\qquad(I_1>I_{cn}) \tag{7}$$

确定 I_0、a 和 b 需要 3 个条件:曲线在 E 点与 I_1 轴相交,$\sqrt{J_2}$及 $\sqrt{J_2}$的一阶导数在 B 点连续,即

$$\begin{cases}\sqrt{J_2}=0 & (I_1=I_{1n})\\ \sqrt{J_2}\big|_{\text{eq.}(2)}=\sqrt{J_2}\big|_{\text{eq.}(7)} & (I_1=I_{cn})\\ \dfrac{\partial\sqrt{J_2}}{\partial I_1}\bigg|_{\text{eq.}(2)}=\dfrac{\partial\sqrt{J_2}}{\partial I_1}\bigg|_{\text{eq.}(7)} & (I_1=I_{cn})\end{cases} \tag{8}$$

由(8)式可以得到 I_0、a 和 b 的具体形式

$$\begin{cases}I_0=\dfrac{FI_{cn}+I_{1n}}{F+1}\\ a=\dfrac{F(I_{1n}-I_{cn})}{F+1}\\ b=\dfrac{F}{\sqrt{F^2-1}}f_1(I_{cn})\end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases}f_1(I_{cn})=\sqrt{\dfrac{1}{3}m\sigma_cI_{cn}+\dfrac{1}{3}S\sigma_c^2+\left(\dfrac{1}{6\sqrt{3}}m\sigma_c\right)^2}-\dfrac{1}{6\sqrt{3}}m\sigma_c\\ f_2(I_{cn})=m\sigma_c\left[\left(\dfrac{1}{\sqrt{3}}m\sigma_c\right)^2+12(m\sigma_cI_{cn}+S\sigma_c^2)\right]^{-1/2}\\ F=(I_{1n}-I_{cn})^{-1}\dfrac{f_1(I_{cn})}{f_2(I_{cn})}-1\end{cases} \tag{10}$$

根据文献[15],I_{1n}和 I_{cn}的表达式可以采用两种方式

$$\begin{cases}I_{1n}=I'_{1n}\left[1-\sin^{x_1}(\pi n/2n_c)+\cos^{x_2}(\pi n/2n_c)\right]/2\\ I_{cn}=I'_{cn}\left[1-\sin^{x_1}(\pi n/2n_c)+\cos^{x_2}(\pi n/2n_c)\right]/2\end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} I_{1n} = I'_{1n}\sinh[(n_c/n-1)^{P_1}] \\ I_{cn} = I'_{cn}\sinh[(n_c/n-1)^{P_2}] \end{cases} \tag{12}$$

式中：P_1、P_2、I'_{1n}、I'_{cn}为材料参数，须经拟合得到。根据(9)式和(10)式确定的 3 个椭圆参数可以实现(2)式和(7)式之间的光滑过渡。

4.2 高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷动态屈服面

本研究针对的是一维应变压剪联合加载状态，撞击面上的正应力为 σ，剪应力为 τ。假设撞击方向沿 z 轴，则应力张量的各分量满足

$$\begin{cases} \sigma_{33} = \sigma \\ \sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma\nu/(1-\nu) = \sigma\nu/(1-\nu) = \sigma\lambda/(\lambda+2\mu) \\ \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_{23} = \sigma_{32} = 0 \\ \sigma_{13} = \sigma_{31} = \tau \end{cases} \tag{13}$$

式中：ν 为泊松比；λ 和 μ 为拉梅系数。为与静水压力对应，令 $I_1=\sigma_{kk}/3$（其中 $k=1,2,3$），J_2 的表达式为

$$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ji} = \frac{1}{3}\left(\frac{1-2\nu}{1-\nu}\right)\sigma^2+\tau^2 \tag{14}$$

式中：$i,j=1,2,3$，分别代表 x、y、z 3 个方向；偏应力 $S_{ij}=\sigma_{ij}-\sigma_{kk}\delta_{ij}/3$；当 $i=j$ 时，$\delta_{ij}=1$，当 $i\neq j$ 时，$\delta_{ij}=1$。

结合表 4 中压剪联合冲击实验数据，根据 99 陶瓷（Al_2O_3 含量为 99%）的准静态实验数据近似确定无孔隙陶瓷材料的参数，按照上述方法对不同孔隙率的陶瓷进行计算分析，具体参数见表 5。计算结果如图 7 所示，其中数据点为本研究中微孔陶瓷的压剪冲击数据。可以看出，微孔陶瓷准静态单轴压缩实验的数据点落在计算得到的孔隙率为 48%微孔陶瓷的准静态屈服面上，初步说明本方法是有效的。由于须确定的参数较多，尚须进一步的验证工作。冲击实验的数据在孔隙率为 48%微孔陶瓷的准静态屈服面以外，说明微孔陶瓷的屈服面表现出一定的应变率效应。

以 99 陶瓷的轻气炮平板撞击实验数据作为参考，按照上述方法进行计算分析，具体参数见表 5，计算结果如图 8 所示。由99 陶瓷的冲击实验结果可计算得到孔隙率为 50%微孔陶瓷的一个动态屈服面，99 陶瓷冲击实验的应变率一般高达10^6 s^{-1}，因此该屈服面对应的应变率也为10^6 s^{-1}。由图 8可以看出，本研究中微孔陶瓷冲击实验的数据点均在计算得到的 50%微孔陶瓷的动态屈服面以内，并未沿着某一种固定应变率对应的动态屈服面发展。这是由于在平板撞击过程中，材料的加载速率无法控制，99 陶瓷的应变率可以高达 10^6 s^{-1}，而本研究中微孔陶瓷的应变率只有10^3 s^{-1}，随着冲击速度的增加，每一发实验的应变率略有增加。冲击压力越高，其应变率越高，相应的数据点越接近推测得到的 50%微孔陶瓷的动态屈服面。

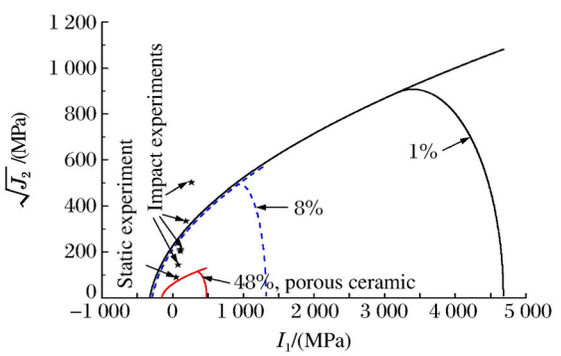


图 7 以 99 陶瓷准静态实验为参考的计算结果

Fig. 7 Calculated yield surfaces based on static experiment

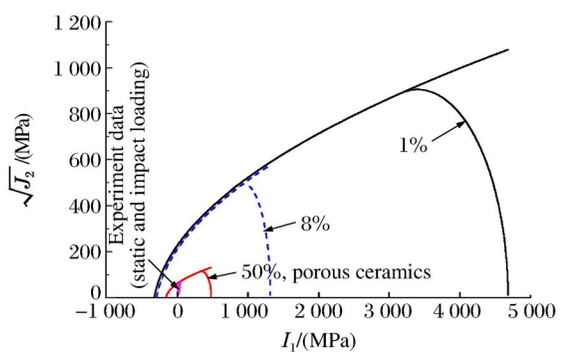


图 8 以 99 陶瓷冲击实验为参考的计算结果

Fig. 8 Calculated yield surfaces based on impact experiment

表 5　屈服面计算参数

Table 5　Parameters for the yield surface caculation

Reference	99 ceramic		Microvoid ceramic						
	R_c/(MPa)	R_t/(MPa)	x_1	x_2	n_c	P_1	P_2	I'_{1n}/(MPa)	I'_{cn}/(MPa)
Static exp.	542	265	π/3	2π	1.0	0.25	0.25	450	300
Impact exp.	5120	2470	π/3	2π	1.0	0.25	0.25	4000	2700

综上所述,实验数据落在"动态"和"静态"屈服面之间,初步说明本方法是有效的。尚须进一步的验证工作。脆性孔隙介质表现出明显的应变率效应。可以在现有模型的基础上,按照 Johnson-Cook 模型的方式来模拟应变率效应的影响。限于轻气炮实验条件,目前有关参数尚无法确定,须补充部分 SHPB 实验数据,这将是下一步的工作。

5　结　论

基于 SWT 技术对高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷进行了冲击速度为 68～201 m/s、倾斜角为 0～15°的撞击实验。在此冲击速度下,本研究中高孔隙率(孔隙率高达 47%～50%)氧化铝微孔陶瓷并未表现出孔洞崩塌的特征。由于孔隙为微孔,陶瓷的压缩过程,包括孔洞崩塌,是一个渐进的均匀发展的过程,因此应力-相对比容曲线上表现出均匀压缩的过程,只是变形较大。

比较而言,u_p-c_p 关系比 u_s-c_s 关系复杂。u_s-c_s 关系能够清楚地给出材料损伤发展的阶段。同时,对加载和卸载横波分别进行分析得到 2 个剪切强度。由于材料中静水压力及材料内部的摩擦作用,其中由横波加载阶段得到的剪切应力出现了波动,甚至到材料明显破坏之后,仍存在一定的残余剪应力。而横波卸载阶段,材料内部压应力已经卸载完成,只有剪应力存在,因此卸载横波是在前面的诸种波作用之后残留的介质中传播,其传播特性能更明显地揭示前面的诸种波的作用效果。

采用基于 Hoek-Brown 准则和帽盖模型的双重屈服面模型,结合关于孔隙率对材料强度影响的设想[15],建立了脆性孔隙介质破坏面和屈服面的分析模型。将其分别应用于准静态和动态分析,结合本研究中高孔隙率氧化铝微孔陶瓷的实验结果,初步说明了本分析模型的有效性。但由于参数较多,尚须进一步的验证工作。

References:

[1] Gupta Y M. Measurement of compression and shear waves in an impact experiment: Role of gauge leads in particle-velocity measurement [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1835-1838.

[2] Abou-Sayed A S, Clifton R J. Pressure-shear waves in fused silica [J]. J Appl Phys, 1976, 47(5): 1762-1770.

[3] Munson D E, Lawrence R J. Dynamic deformation of polycrystalline alumina [J]. J Appl phys, 1979, 50(10): 6272-6282.

[4] Li P, Li D H, Ning J G, et al. Dynamic response of polycrystalline alumina under shock loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(1): 22-28. (in Chinese)
李　平,李大红,宁建国,等. 冲击载荷下 Al_2O_3 陶瓷的动态响应 [J]. 高压物理学报, 2002, 16(1): 22-28.

[5] Espinosa H D, Raiser G, Clifton R J, et al. Experimental observations and numerical modeling of inelasticity in dynamically loaded ceramics [J]. J Hard Mater, 1992, 3(3-4): 285-313.

[6] Tang Z P, Xu S L, Dai X Y, et al. S-wave tracing technique to investigate the damage and failure behavior of brittle materials subjected to shock loading [J]. Int J Impact Engineering, 2005, 31(9): 1172-1191.

[7] Tang Z P, Hu X J, Liao X L, et al. An experimental facility for measuring longitudinal and shear waves with dual magnetic fields [J]. J Exp Mech, 2000, 15(1): 16-21. (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): 16-21.

[8] Xu S L, Zhang K, Zheng W, et al. Experimental study of impact performance of Al_2O_3 microvoid ceramics with high

porosity [J]. J Exp Mech,2008,23(6):525-532. (in Chinese)
徐松林,张 侃,郑 文,等. 高孔隙率 Al2O3 微孔陶瓷冲击性能实验研究 [J]. 实验力学,2008,23(6):525-532.

[9] Xu S L. Investigation on the S-wave tracing technique and the behavior of cementitious composites under combining compression and shear impact loading [R]. Hefei: University of Science and Technology of China,2003. (in Chinese)
徐松林. S 波跟踪技术与水泥基复合材料压剪动特性研究 [R]. 合肥:中国科学技术大学,2003.

[10] Xu S L, Tang Z P, Zhang X H. Dynamic shear properties of steel fiber reinforced cement under combined pressure and shear impact loading [J]. Engin Mech,2006,23(5):139-146. (in Chinese)
徐松林,唐志平,张兴华. 钢纤维增强水泥砂浆压剪联合冲击下动态剪切性能 [J]. 工程力学,2006,23(5):139-146.

[11] Xu S L, Tang Z P, Hu X J, et al. Experimental investigation on dynamic properties of the polypropylene micro-fiber reinforced cement(FCEM) under impact loading [J]. Explosion and Shock Waves,2004,24(3):251-260. (in Chinese)
徐松林,唐志平,胡晓军,等. 聚丙烯短微纤维增强水泥砂浆冲击特性研究 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(3):251-260.

[12] Xi D Y, Xu S L. Fundamental of Rock Physics [M]. Hefei: Publishing House of University of Science and Technology of China, 2012 (in Chinese)
席道瑛,徐松林. 岩石物理学基础 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2012.

[13] Drucker D C, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design [J]. Q Appl Math,1952,10(2):157-165.

[14] Dimaggio F L, Sandler I S. Material models for granular soils [J]. J Eng Mech Div,1971,97:935-950.

[15] Abduljauwad S N, Al-Buraim I M, Al-Ghamedy H N. Mixed hardening, three-invariants dependent cap model [J]. J Eng Mech,1992,118(3):620-637.

[16] Aubertin M, Li L. A porosity-dependent inelastic criterion for engineering materials [J]. Int J Plast,2004,20(12):2179-2208.

Dynamic Responses of Alumina Microvoid Ceramics with High Porosity under Combined Pressure and Shear Impact Loading

XU Song-Lin[1], LIU Yong-Gui[1], WANG Dao-Rong[2], TAN Zi-Han[1], Zheng Hang[1]

(1. *CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
2. *National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics and Numerical Mathematical, Beijing* 100076, *China*)

Abstract: Based on one-stage light gas gun, series of experiments including oblique planar impact with inclination angles of 0～15° and impact velocity ranging from 68 to 201 m/s were carried out to investigate the responses of alumina microvoid ceramics with high porosity subjected to impact loading. Experimental results show that since the diameter of microvoid in sample is smaller than 5 μm, the process of sample compression is gradually and evenly developed, and there is no porous collapse observed. The dynamic shear behaviors are similar to those of brittle materials. Based on the Hoek-Brown criteria and Cap-model, the dynamic model for the failure surface and the double yield surfaces of porous brittle materials was built. Based on the experimental data of compression and shear combined impact loading, the preliminary analyses were carried out and the results show the applicability of the model.

Key words: impact mechanics; combined pressure and shear impact loading; dynamic shear; porous material; dynamic double-yield-surface model