

文章编号: 1000-8055(2008)09-1623-05

孔隙率对多孔陶瓷材料失效强度的影响

袁义云, 宋迎东, 孙志刚

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 应用格模型和统计学方法分析了多孔陶瓷材料的失效问题. 首先建立了多孔材料宏观力学性能分析的有限元模型, 然后使用自适应加载技术对多孔材料单向拉伸失效过程进行模拟, 最后根据统计学方法对计算模拟结果进行统计分析. 通过三维格模型方便地考虑到了气孔大小、位置分布、气孔率等影响因素, 研究表明: 脆性多孔陶瓷材料的失效过程表现出一定塑性, 气孔位置随机分布引起失效强度的分散性, 气孔率越高, 材料失效强度越低.

关 键 词: 格模型; 统计学方法; 多孔材料; 气孔; 失效

中图分类号: TB332

文献标识码: A

Effect of porosity on the failure strength of porous ceramic materials

YUAN Yi-yun, SONG Ying-dong, SUN Zhi-gang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The failure problems of porous ceramic materials were analyzed using the lattice model and statistical methods. Finite element model of porous ceramic materials was established firstly. Then, the failure process of porous ceramic materials was simulated by using self-adapt load technique. Finally, the simulation results were analyzed statistically. The effects of the pores' size, volume and porosity, etc, were considered easily through 3-D lattice model. The study shows that the failure process of the brittle porous materials exhibit certain plastic property; the stochastic distribution of the pores causes some differences in the terms of failure strength; the higher porosity means lower failure strength.

Key words: lattice model; statistical methods; porous materials; pore; failure

材料由于生产制备过程或应用环境等原因, 常常含有一定量的孔隙率. 例如, 陶瓷基复合材料在制备过程中不可避免含有一定量的气孔, 尤其对于编织复合材料, 气孔率有时占复合材料体积的 20%~30% 左右^[1]. 另外, 随着科技发展的需要, 人们对材料的开发运用越来越丰富, 多孔材料在许多方面体现出某些优越的材料性能, 如泡沫材料, 蜂窝材料, 多孔金属, 多孔陶瓷等. 材料中孔

隙的存在对于其力学性能和失效往往有着重要的影响, 对于许多脆性材料, 气孔是其失效的最主要影响因素之一.

多孔材料失效问题的研究, 国内外目前报道不是很多, 大多针对于具体问题, 集中于实验或有限元模拟的研究方法. 廖明顺^[2]、张俊彦^[3]针对高孔隙率泡沫失效开展了简单研究, 这不同于较低孔隙率陶瓷情况. 林鹏^[4]、段进超^[5]、朱万成^[6]等

收稿日期: 2007-09-06; 修订日期: 2007-11-26

基金项目: 973 计划; 航空科学基金(05CS2013)

作者简介: 袁义云(1982-), 男, 湖北咸宁人, 硕士, 主要从事航空发动机结构、强度与振动的研究.

利用东北大学自主开发的分析系统在分析混凝土材料时考虑过气孔的影响. Wang Jianlin^[7]提出了一种基于求解复杂的超奇异边界积分方程法,在解决复杂多孔多裂纹问题方面进行了探索. Vekinis G^[8]通过四点弯曲实验测量,研究了石膏的弹性模量、强度、断裂韧性等与孔隙率的函数关系. Haubensak E G^[9]通过三角网络弹簧模型,来模拟了多孔材料的二维裂纹抗扩展机制. Aldo R^[10]利用 OOF 计算码生成二维有限元模型,对多孔失效问题进行了模拟分析. 本文采用的格模型是一种基于均匀化思想的有限元和统计思想结合方法. 1992 年 Schlangen E^[11]和 Mier J 采用简单格形模型模拟了混凝土等脆性材料的典型破坏机理. 2000 年 Yao Zhenhan^[12]建立了非均匀材料的三维格形和统计模型,对三维简单试件在拉压作用下的破坏过程进行了数值模拟. 本文利用格模型和统计学方法研究了随机气孔分布对多孔陶瓷材料失效的影响.

1 格形有限元模型

格模型法(Lattice model)是将有限元和统计学思想相结合的一种方法. 格模型法首先对代表体元进行离散,把几何模型离散为大小相同的单元格. 然后,根据气孔率大小,确定气孔单元数目,通过 Monte Carlo 随机方法确定单元中的气孔位置. 对给定的气孔单元指定一个极小模量代表孔隙. 在边界约束条件和载荷加载下,进行多个样本计算,最后对计算结果采用统计学思想进行分析,得到随机气孔分布多孔材料的有关特性. 该模型可以通过尺度比变化、气孔随机分布、气孔率变化来研究气孔大小、气孔位置分布和气孔率大小对材料力学性能影响.

本文采用三维立方体代表单元体(RVE)建立问题的力学模型(如图 1). 单元体在 3 个侧面简支,在端面沿 z 方向加载拉伸位移载荷,即

$$\begin{cases} u(x=0)=0; \\ v(y=0)=0; \\ w(z=0)=0; \\ w(z=a)=\Delta w \end{cases} \quad (1)$$

然后,根据格模型和统计学方法建立格型有限元模型(如图 2,深色代表气孔).

对脆性材料,采用最大应力破坏准则,当单元主应力超过失效强度时,单元即被破坏,不再具有任何抵抗变形的能力. 通过这种简单的本构关系和失效准则来模拟多孔材料的单向拉伸失效过

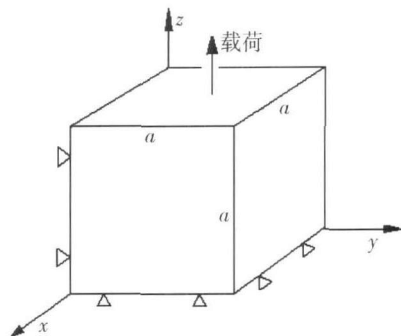


图 1 代表单元体力学模型 ($a \times a \times a$)

Fig. 1 RVE mechanical model ($a \times a \times a$)

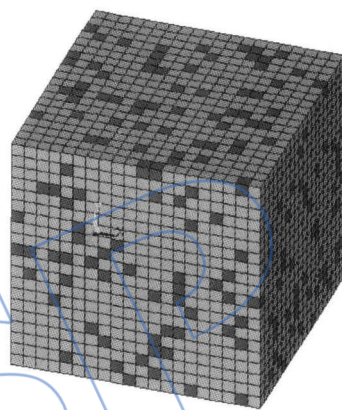


图 2 三维格模型

Fig. 2 Three dimension lattice model

程. 为了真实模拟材料失效过程,采用自适应增量加载技术,该方法不同于以往固定载荷增量加载,自适应加载是根据材料单元失效自动调整载荷增量,使每次加载最多只有一个单元破坏. 对失效单元刚度退化处理,然后通过非平衡迭代重新加载,直到整个材料失去承载能力为止,来达到真实模拟材料失效的过程.

计算流程图如图 3.

2 算例分析

某 SiC 陶瓷材料,其致密体材料常数为 α : 弹性模量 $E = 430 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.2$,断裂强度 $\sigma_0 = 160 \text{ GPa}$. 取代表单元体尺寸为: $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,网格划分按照 $10 \times 10 \times 10$, $20 \times 20 \times 20$, $30 \times 30 \times 30$ 进行划分. 由于气孔用划分的单元代替,即气孔孔边长相当于为 $100, 50, 33 \mu\text{m}$. 定义宏观单元体尺寸与气孔单元尺寸尺度比为 d ,则以上 3 种情况代表尺度比分别为 $10, 20, 30$.

2.1 多孔材料失效过程模拟

利用格模型法计算得到气孔率分别为 $0, 10\%, 20\%, 30\%$ 的 SiC 多孔陶瓷单向拉伸失效应力应变曲线(如图 4). 结果表明:气孔率越高,能

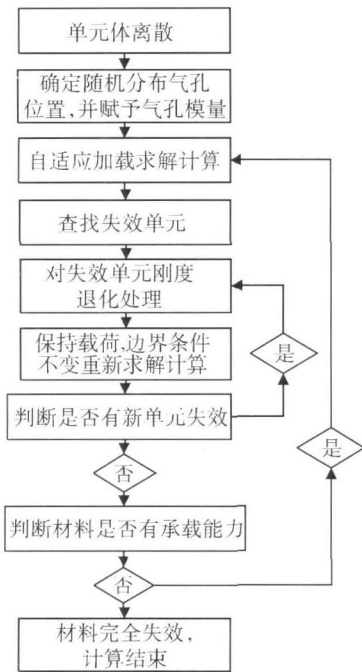


图 3 格模型计算流程图

Fig. 3 Flow chart of lattice model

够承受的最大应力越低,且弹性阶段斜率越低(即拉伸模量也越低).在气孔率为零时,材料应力达到极限强度时,立即出现脆性失效;而在含孔的多孔材料中,当应力增加到一定程度时,由于局部应力集中而发生单元失效,单元失效后在原来恒定载荷作用下,失效过程迅速扩展(如图 $A_0 \rightarrow A_1$, $B_0 \rightarrow B_1$, $C_0 \rightarrow C_1$, $D_0 \rightarrow D_1$),也就是非平衡迭代过程出现失效的扩展,这样单元体承载能力急剧下降,但并没有出现断裂那种完全失效,材料仍有一定承载能力,接着随着位移增加,承载能力继续下降直到最后断裂失效.整个失效过程表现出一定塑性失效过程,气孔率越高塑性失效越明显,断裂界面垂直于载荷方向(如图 5).

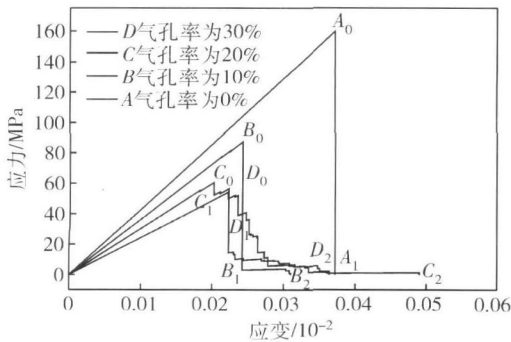


图 4 失效过程应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of failure process

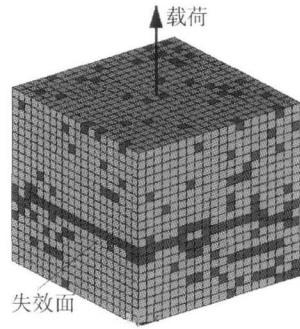


图 5 气孔率为 10 %时失效示意图

Fig. 5 Failure sketch map for porosity 10 %

2.2 多孔材料失效强度的分散性

由于气孔位置的随机分布,多孔材料失效强度表现出一定的离散性.采用 Weibull 分布来描述陶瓷材料的失效强度. Weibull 分布累积概率函数可以写成如下形式:

$$P_f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\eta_b} \right)^m \right] \quad (\sigma > 0, \eta_b > 0) \quad (2)$$

式中 η_b 称为尺度参数, m 称为形状参数. 其概率密度形式为

$$f(\sigma) = \frac{m}{\eta_b} \left(\frac{\sigma}{\eta_b} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\eta_b} \right)^m \right] \quad (\sigma > 0, \eta_b > 0) \quad (3)$$

对代表性单元体,用尺度比 $d = 20$ 的网格进行划分,气孔率为 15 %,随机生成 100 个样本,进行计算分析,计算了每个样本的最大承载力,并进行了统计分析(如图 6).很明显最大承载力与气孔位置相关,呈现一定的分布规律.根据统计样本计算数据结果,采用统计学方法参数估计方法^[13],确定该 Weibull 失效概率密度函数,并得到曲线如图 7.图 8 和图 9 曲线为尺度 $d = 20$ 时不同气孔率,失效强度概率关系描述曲线,可以看出孔隙率增加,Weibull 函数尺度参数 η_b 减小.同

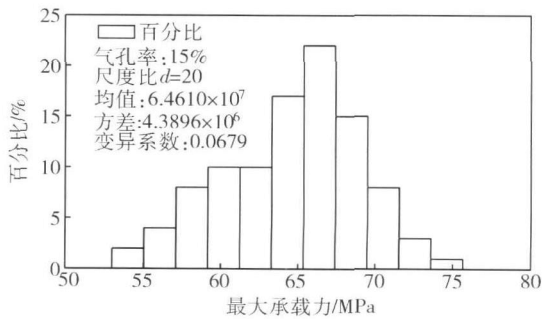


图 6 最大承载力的统计分布图

Fig. 6 Statistics distribution of maximum load

时,由图 10 可以看出,在各个计算中变异系数数量级在 10^{-2} ,且随着尺度比 d 增大,变异系数(在此定义变异系数为均方差与平均值的比值)呈现减小趋势.说明尽管多孔材料的极限强度具有一定分散性,但相对来说变化还是不太大.

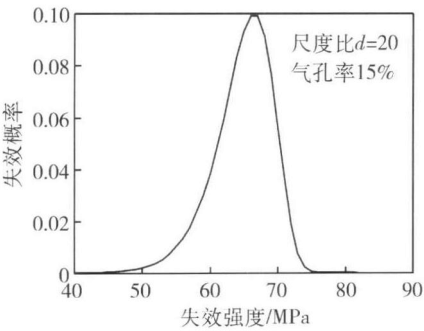


图 7 Weibull 失效概率密度曲线
(气孔率为 15%, $d=20$)
Fig. 7 Weibull failure probability density curve
(Porosity = 15%, $d=20$)

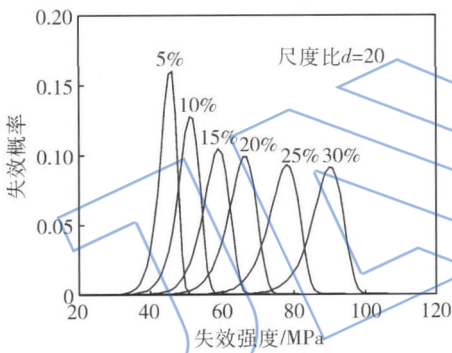


图 8 不同气孔率的 Weibull 失效概率密度曲线
Fig. 8 Weibull failure probability density curve
for different porosity

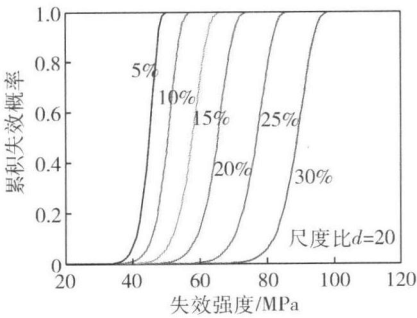


图 9 不同气孔率的 Weibull 累积失效概率曲线
Fig. 9 Weibull failure cumulate probability curve
for different porosity

2.3 气孔率对失效强度影响

为研究不同气孔率大小与最大承载力关系,

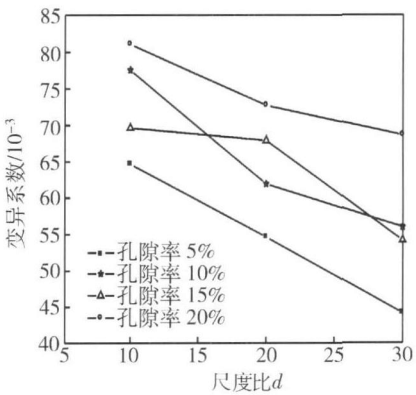


图 10 变异系数与尺度比变化关系
Fig. 10 Relation between variation coefficient with
the dimension rate

同样进行了 100 个不同气孔位置随机分布的样本进行计算分析.上文研究发现材料极限强度变化不很大,对所有样本计算值进行平均得到气孔率对应的失效强度(即最大承载力).计算得到对应不同孔隙率与最大承载力的变化曲线,可以看出,在相同尺度比下,随着孔隙率的增加,最大承载力逐渐降低(如图 11)同时有随着尺度比增大,最大承载力减小,但减小趋势逐渐减小(如图 12).

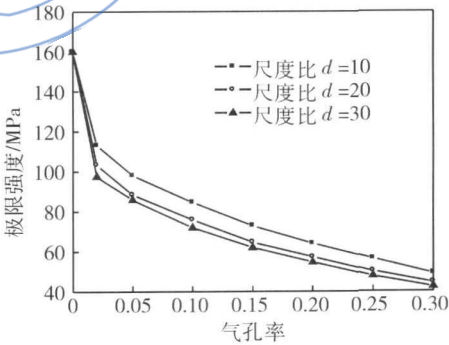


图 11 气孔率为与最大承载能力关系
Fig. 11 Effect of porosity with the
maximum strength

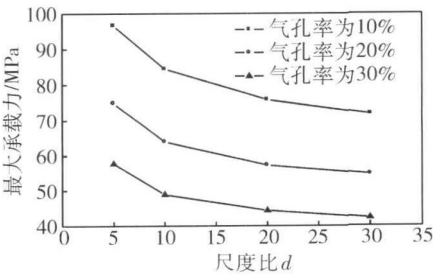


图 12 最大承载能力与尺度比关系
Fig. 12 Effect of dimension rate with the
maximum strength

3 结 论

本文通过格模型与统计学方法相结合对多孔陶瓷材料失效问题进行了模拟.该方法能构有效模拟气孔随机分布的三维多孔材料失效问题.通过对某脆性多孔陶瓷材料失效研究,得到以下结论:

1) 气孔存在明显降低了陶瓷材料失效强度,但多孔材料失效过程却表现出一定的塑性.材料失效界面垂直于载荷方向.

2) 气孔位置随机分布造成多孔材料失效强度表现出一定分散性,但分散性在一定范围之内,同时模拟得到了多孔材料 Weibull 失效概率函数.

3) 气孔大小对材料失效也有影响,气孔减小失效强度也减小,但减小趋势逐渐减小.

4) 气孔率增大材料失效强度明显降低,是影响材料失效强度的最主要因素之一.通过本文方法可以得到不同气孔率对应的材料失效强度.

参考文献:

- [1] Fujita H. Development and assessment of two-phase porous matrices for use in all-oxide ceramic composites[D]. California: University of California, 2004.
- [2] 廖明顺. 多孔材料力学性能数值模拟[D]. 昆明:昆明理工大学, 2006.
- LIAO Mingshun. Simulation of porous material mechanical performance[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] 张俊彦. 多孔材料的力学性能及破坏机理[D]. 湘潭:湘潭大学, 2003.
- ZHANG Junyan. Mechanical properties and breakage mechanism of cellular materials[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2003. (in Chinese)
- [4] 林鹏,唐春安,黄凯株,等. 脆性介质中裂纹与孔洞缺陷的分类与尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2296-2300.
- LIN Peng, TANG Chun'an, HUANG Kaizhu, et al. Classification and size effect of flaw and pore in brittle medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 2296-2300. (in Chinese)
- [5] 段进超,唐春安,常旭. 脆性基多孔材料孔洞的尺寸效应及其破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 631-634.
- DUAN Jinchao, TANG Chun'an, CHANG Xu. A study on hole size effects and failure model of brittle materials containing multiple holes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 631-634. (in Chinese)
- [6] 朱万成,黄明利,唐春安. 混凝土试件裂纹扩展及破坏过程的计算机模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(3): 271-274.
- ZHU Wangcheng, HUANG Mingli, TANG Chun'an. Computer simulation on crack propagation and failure process of concrete specimen[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000, 19(3): 271-274. (in Chinese)
- [7] Wang Jianlin. Numerical modeling of elastic materials with inclusions, holes, and cracks[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2004.
- [8] Vekinis G, Fashby M, Beaumont W R. Plaster of paris as a model material for brittle porous solids[J]. J. Mat. Sci., 1993, 28: 3221-3227.
- [9] Haubensak E G, Bulatov V V, Argon A S. Simulation of crack propagation resistance in brittle media of high porosity[J]. Journal of Computer-Aided Materials Design, 1995, (2): 205-230.
- [10] Boccaccini A R. Computational simulations for the assessment of the mechanical properties of glass with controlled porosity[J]. Journal of Porous Materials, 2003, 10: 189-200.
- [11] Schlangen E, Van Mier J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete[J]. Materials and Structures Materials and Structures, 1992, 25: 534-542.
- [12] Yao Zhenhan, Chen Yongqiang, Zheng Xiaoping. Numerical simulation of failure process in 3-D heterogeneous brittle material[R]. Chicago, US: ICTAM 2000, 2000.
- [13] 龚江宏. 陶瓷材料断裂力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 125-127.
- GONG Jianghong. Fracture mechanics of ceramics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 125-127. (in Chinese)