

文章编号: 1000-3851(2002) 05-0079-05

从微孔洞起始的热冲击裂纹的数值研究

—— : 能量释放率分析

贺鹏飞¹, 李京剑², Yuan C³, Stern R³, Clegg W J³

(1. 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 同济大学 固体力学教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 深圳市宝发实业有限公司, 深圳 ; 3. Department of Materials Science and Metallurgy,
University of Cambridge Pembroke Street, Cambridge CB2 3QZ, UK)

摘 要: 利用商业的有限元软件 ABAQUS, 分析了具有微孔洞结构氧化铝陶瓷材料在受到热冲击作用下, 从处于材料表面上的开口微孔洞以及临近材料表面的闭口微孔洞的底部起始的裂纹扩展。结果表明: 对于从开口微孔洞和闭口微孔洞底部起始的裂纹, 其能量释放率随冷却时间的变化规律类似, 即随冷却时间 t 由零开始增加, 能量释放率也由零开始快速增大, 在冷却时间大约为 $t=0.1\text{ s}$ 时, 达到其最大值, 随后开始降低。另外对于从开口微孔洞底部起始的裂纹, 结果发现裂纹的能量释放率随裂纹长度的增加、微孔洞半径的增加而增加, 而对于从闭口微孔洞底部起始的裂纹, 其能量释放率随裂纹长度的增加、微孔洞半径的增加、以及微孔洞与材料受热冲击面距离的增加而增加。以开口微孔洞底部起始的裂纹为例, 研究了裂纹与临近微孔洞之间的作用, 发现临近微孔洞的存在可以明显减小裂纹的能量释放率。这些结果对于从材料的微结构角度设计材料的抗热冲击性能有参考价值。

关键词: 裂纹; 热冲击; 能量释放率; 微孔洞

中图分类号: TB301 文献标识码: A

INITIATION OF CRACK FROM THE PORES IN POROUS CERAMICS UNDER THERMAL SHOCK —— : ENERGY RELEASE RATE

HE Peng-fei¹, LI Jing-jian², Yuan C³, Stern R³, Clegg W J³

(1. Key Laboratory of MMC of China, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

Key Laboratory of Solid Mechanics of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge CB2 3QZ, UK)

Abstract: Thermal shock cracks can be initiated at the surface of ceramics materials when the surface was loaded by suddenly cooling. In the present paper, with the commercial finite element method (FEM) package ABAQUS, the initiation of crack for porous ceramics under suddenly cooling was investigated. Two cases, cracks initiating from the pores on the surface and the pores in the neighborhood of the surface of the porous ceramics were studied. For the case of crack initiating from the pores on the surface, it is found that the energy release rate will increase with increasing of the depth of the crack and the radius of the pores. For the case of crack initiating from the pores near the surface, the energy release rate will increase when the crack depth, the pore radius and the distance between the pore and the surface increase.

Key words: cracks; thermal shock; energy release rate; micro-pores

具有较高温度的陶瓷材料突然处于较低温度的环境中时, 材料的表面和内部分别要承受拉伸和压缩的热应力^[1]。因此, 这种热冲击引起的材料的损伤

模式是, 裂纹首先在材料的表面产生, 然后从表面向内扩展。庆幸的是由于材料内部承受的是压应力, 单个裂纹一般不会很快贯穿整个材料。另外, 材料表面

收稿日期: 2001-03-02; 收修改稿日期: 2001-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (19972048) 和教育部回国人员基金资助项目

作者介绍: 贺鹏飞 (1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复合材料力学等方面的研究。

一般会有多个裂纹同时形成,裂纹之间的相互作用亦有益于减小裂纹的驱动力^[2]。裂纹的起始和扩展、裂纹之间的相互作用都与材料的微结构,特别是材料表面的微结构有直接的关系,所以考虑材料的微结构,利用断裂力学的原理和方法优化设计材料的抗热冲击性能是目前高温陶瓷研究领域的重要问题之一^[4]。另外,我们对具有不同体积含量的微孔洞陶瓷的热冲击实验表明:微孔洞的引入将可能完全改变热冲击裂纹的发展模式,从而改变材料的抗热冲击性能^[3]。然而,隐含在这一结论背后的机制并不很清楚。

本文工作是工作[5]的继续。根据文献[5],我们可以预测裂纹的起始位置。在此基础上,用数值的方法,即利用 ABAQUS 软件,着重研究从热冲击面上和临近热冲击面上的微孔洞起始的热冲击裂纹。

在文献[5]中,对温度场和应力场的分析模型有详细的介绍,在此将不再重复。在分析中,裂纹尖端区域使用了四分之一的奇异单元。本文作者的分析限于裂纹的长度和微孔洞的半径处于同一量级。另外,受论文篇幅限制,略去单元网格图。

1 裂纹的能量释放率

根据文献[5]所得到的热应力的分布结果,我们将就两种不同的起始裂纹模型,即从开口微孔洞起始的裂纹(图 1(a))和从闭口微孔洞起始的裂纹(图 1(b)),进行分析。另外,为了研究微孔洞之间的相互作用,我们还将对图 1(c)所示的模型进行分析。在下面的分析中,裂纹的长度为 a ,微孔洞的半径为 r 。另外。若没有特别的说明,以我们实验中采用的具有微孔洞结构的氧化铝陶瓷为研究对象^[5],采用如下的材料参数。

表 1 数值分析中所用参数及其数值

Table 1 The values of the parameters used in the following analysis

热传导系数 k	$8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
比热 c	$500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
密度 d	$5800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
水的温度 T_0	$20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
试样温度 T_S	$300 \text{ }^{\circ}\text{C}$
泊松比系数 ν	0.2
杨氏模量 E	243 GPa
热转换系数 h	$30000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
热膨胀系数 T	$8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

值得要说明的是,从理论上讲,在裂纹的扩展过程中,新形成的裂纹面也会受到热冲击荷载的作用,但是我们目前分析的问题关于裂纹扩展方向对称,即热流的方向与裂纹面的法向垂直,因此可以近似假设裂纹面为绝热面。另外,微孔洞的表面处理为受热冲击面。

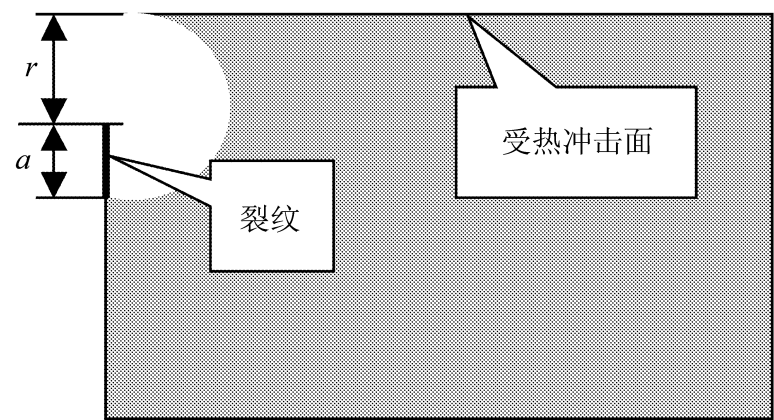


图 1(a) 裂纹从开口微孔洞底部起始问题示意图
Fig. 1(a) Crack initiated at the bottom of open pore

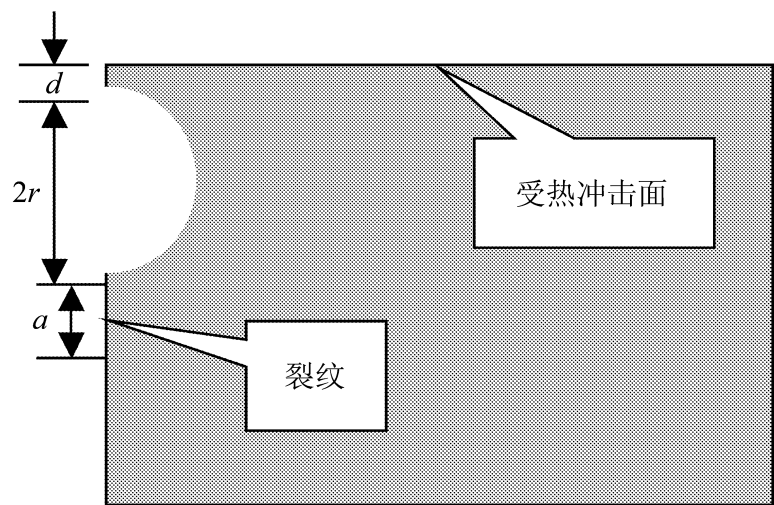


图 1(b) 裂纹从闭口微孔洞底部起始问题示意图
Fig. 1(b) Crack initiated at the bottom of closed pore

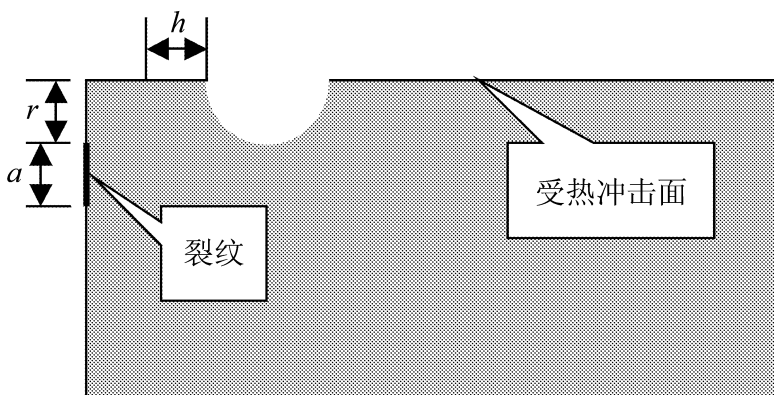


图 1(c) 裂纹从开口微孔洞底部起始,且受到附近开口微孔洞的影响
Fig. 1(c) Crack initiated at the bottom of open pore with neighborhood pores

1.1 从开口微孔洞底部起始裂纹的能量释放率

对于图 1(a)所示的问题,图 2、图 3 和图 4 分别给出了裂纹的能量释放率随冷却时间 t 、裂纹长度

和微孔洞半径 r 的变化。固定微孔洞的大小 $r=0.1\text{ mm}$, 裂纹的长度 $a=0.05\text{ mm}$ 情况下, 裂纹的能量释放率作为冷却时间 t 的函数表示在图 2。从图中可以看出, 随冷却时间 t 由零开始增加, 裂纹的能量释放率 G 从零开始快速增加, 在 t 大约为 0.1 s 时, G 达到其最大值, 然后开始降低, 这一变化规律和有关文献的结果[4, 6]是一致的。

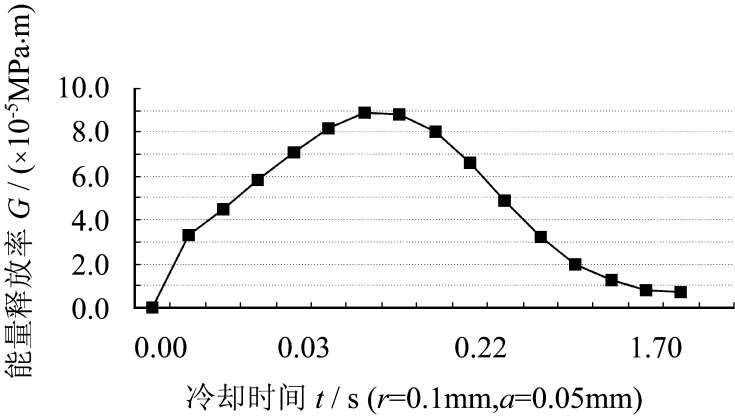


图 2 能量释放率 G 随冷却时间 t 的变化
($r=0.1\text{ mm}$, $a=0.05\text{ mm}$)
Fig. 2 Dependence of energy release rate on the cooling time t

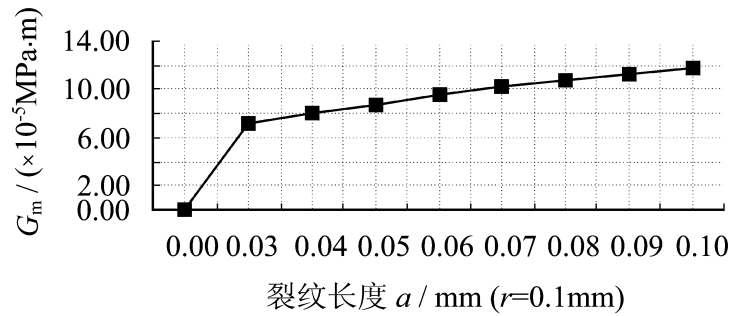


图 3 能量释放率最大值 G_m 随裂纹长度 a 的变化($r=0.1\text{ mm}$)
Fig. 3 Dependence of maximum of the energy release rate on the length of the crack a

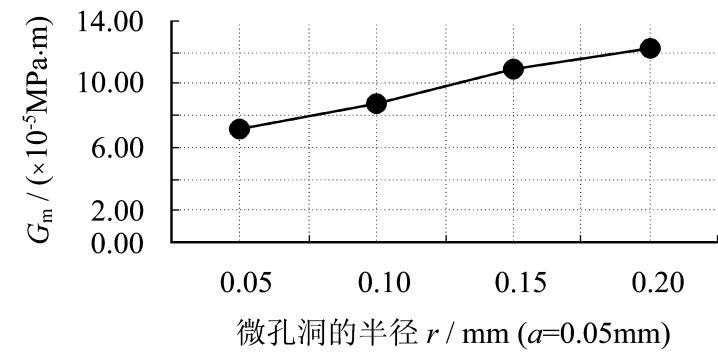


图 4 能量释放率最大值 G_m 随微孔洞半径 r 的变化($a=0.05\text{ mm}$)
Fig. 4 Dependence of the maximum of the energy release rate on the radius of the pore

固定微孔洞的大小($r=0.1\text{ mm}$), 裂纹能量释放率的最大值随裂纹长度 a 的变化曲线如图 3 所

示。随裂纹长度的增加, 能量释放率的最大值相应增加。图中结果对应的裂纹长度的最大值仅为 0.1 mm , 故还未到能量释放率最大值随裂纹长度增加而下降的阶段。

固定裂纹的长度($a=0.05\text{ mm}$), 能量释放率最大值随微孔洞的半径 r 的变化规律表示在图 2(c)。类似与图 2(b), 随微孔洞半径 r 的增加, 能量释放率的最大值随之而增加。

1.2 从闭口微孔洞底部起始裂纹的能量释放率

图 5、图 6、图 7 和图 8 分别给出了图 1(b) 所示模型中, 裂纹的能量释放率随冷却时间 t , 裂纹长度 a , 微孔洞与受热冲击面的距离 d 和微孔洞半径 r 的变化。

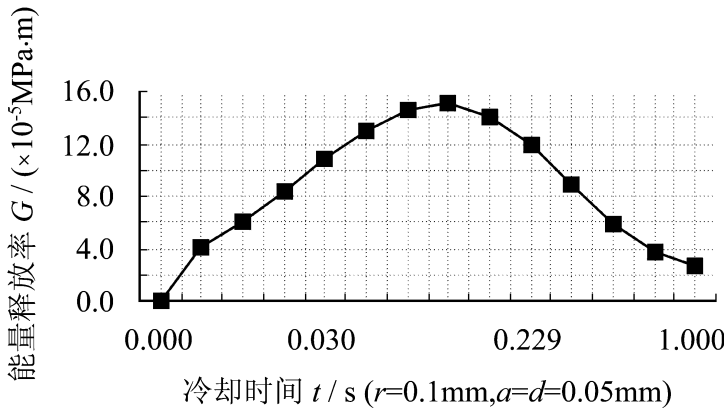


图 5 能量释放率 G 随冷却时间 t 的变化
($r=0.1\text{ mm}$, $d=a=0.05\text{ mm}$)

Fig. 5 Dependence of energy release rate on the cooling time t

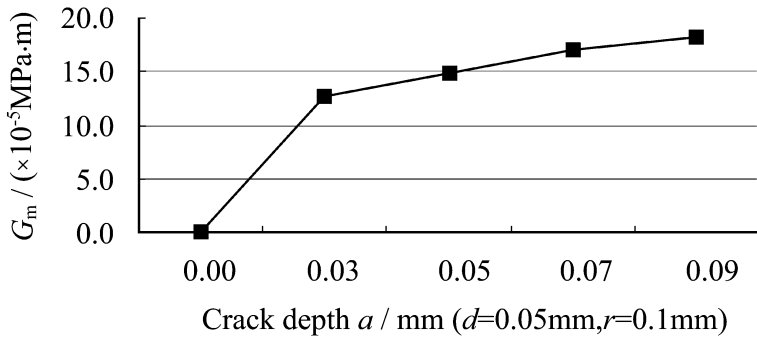


图 6 能量释放率最大值 G_m 随裂纹长度 a 的变化
($r=0.1\text{ mm}$, $d=0.05\text{ mm}$)

Fig. 6 Dependence of maximum of the energy release rate on the length of the crack a

图 5 所给出的是, 固定裂纹长度 a , 微孔洞与受热冲击面的距离 d 和微孔洞半径 r , $a=0.05\text{ mm}$, $d=0.05\text{ mm}$, $r=0.1\text{ mm}$ 情况下, 裂纹的能量释放率 G 随冷却时间 t 的变化规律。可以看出, 它和图 2 所示的结果类似, 即随冷却时间 t 由零开始增加, 裂纹的能量释放率 G 从零开始快速增加, 在 t 大约为 0.1 s 时, G 达到其最大值, 然后开始降低。

图 6 表示的是能量释放率 G 的最大值(关于冷

却时间 t 的最大值) 随裂纹长度 a 的变化规律, 另外两个参数固定为 $r=0.1\text{ mm}$, $d=0.05\text{ mm}$ 。图中给出的裂纹长度的最大值为 0.09 mm , 在此范围内, 随裂纹长度的增加, 能量释放率亦相应增加。

固定裂纹长度和微孔洞与受热冲击表面的距离, 即 $d=a=0.05\text{ mm}$, 则能量释放率的最大值(关于冷却时间 t 的最大值) 随微孔洞半径 r 的变化规律如图 7 所示。随微孔洞半径 r 的增加, 能量释放率的最大值也随之而增加, 且变化规律近似为直线。

能量释放率的最大值随微孔洞与受热冲击表面距离 d 的变化曲线表示在图 8, 另外两个参数分别固定为 $r=0.1\text{ mm}$, $a=0.05\text{ mm}$ 。随微孔洞与受热冲击表面距离 d 的增加, 能量释放率的最大值亦随之而增加。在文献[5]中, 我们知道, 对于闭口微孔洞, 其引起的热应力集中系数随 d 的增加而减小。所以, d 的增加, 虽然不利于裂纹的形成, 但却有利于裂纹的扩展。这表明从强度角度和断裂力学角度对 d 有不同的要求。

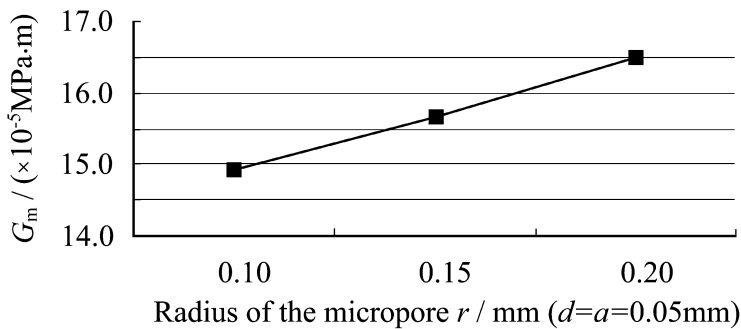


图 7 能量释放率最大值 G_m 随微孔洞半径 r 的变化 ($d=a=0.05\text{ mm}$)

Fig. 7 Dependence of maximum of the energy release rate on the radius of the pore r

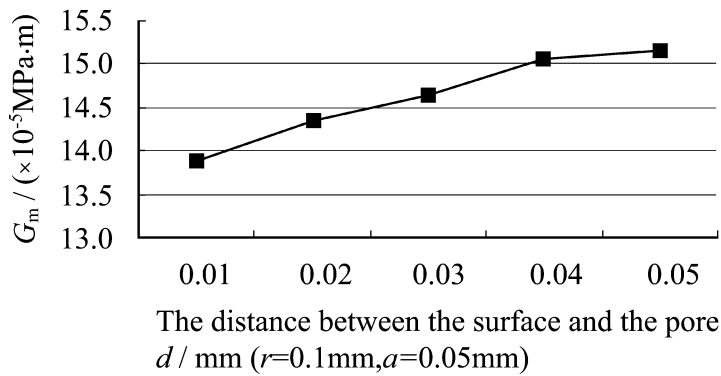


图 8 能量释放率最大值 G_m 随距离 d 的变化 ($r=0.1\text{ mm}$, $a=0.05\text{ mm}$)

Fig. 8 Dependence of maximum of the energy release rate on the distance d

1.3 临近微孔洞的影响

当微孔洞之间的距离比较小时, 有必要考虑微孔洞之间的相互作用。不失一般性, 并使问题不过于

复杂, 我们假设一开口的微孔洞底部有一小裂纹, 同时在该微孔洞的两边等距离地分布着两个微孔洞。图 9 给出的是由开口微孔洞底部起始的裂纹受临近开口微孔洞的影响。从图中不难看出, 由于临近微孔洞的存在而使裂纹的能量释放率的最大值有所减小。

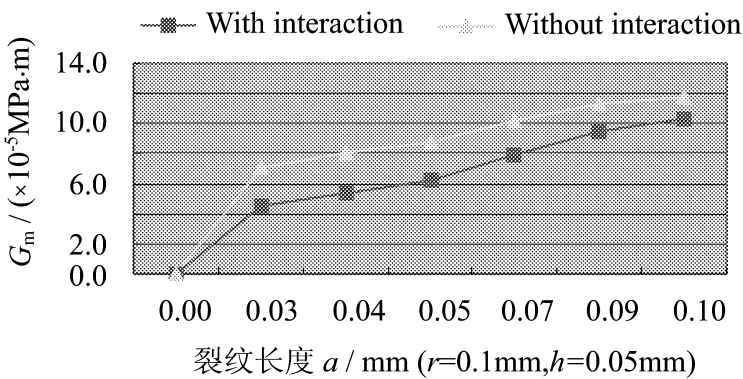


图 9 开口微孔洞底部起始的裂纹受临近开口微孔洞的影响 ($r=0.1\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$)

Fig. 9 Influence of neighbor pore on the energy release rate of the crack initiated at the bottom of the open pore

2 结论和讨论

从上面的分析, 我们可以得到如下结论:

- (1) 从开口微孔洞和从闭口微孔洞起始的裂纹, 其能量释放率皆随冷却时间的增加, 首先快速增加, 达到最大值后, 相对缓慢地下降。
- (2) 对于上述两种情况, 裂纹的能量释放率都随裂纹的长度和微孔洞的增大而增加, 但是, 这一结论仅对小的裂纹是正确的。
- (3) 从闭口微孔洞起始的裂纹, 裂纹的能量释放率随微孔洞与受热表面之间距离的增加而增加, 这一结果和热应力集中系数对应的情况相反。
- (4) 临近裂纹的微孔洞的存在能降低裂纹的能量释放率。

仅从热冲击裂纹的起始和扩展(限定在小裂纹范围)讲, 处于裂纹表面附近的闭口微孔洞比处于材料表面上的开口微孔洞更易于裂纹的起始和扩展。大的微孔洞不利于阻止裂纹的扩展。对于闭口微孔洞的情况, 它与受热冲击面的距离 d 的增加有利于减小热应力集中系数, 但却不利于阻止裂纹的扩展, 或者讲较大的 d 有利于阻止裂纹的起始, 但却不利于阻止已起始裂纹的扩展。总之, 选择小的微孔洞和适当的微孔洞的密度将有利于提高材料抗热冲击性能。

参考文献:

[1] Kuna M. Liesk H. Fracture analysis of a single edge cracked strip under thermal shock [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1987, 8: 33- 39.

[2] He Pengfei. Cleggy B. Modeling of thermal shock spalling crack in a ceramic slab [J]. Key Engineering Materials, 2000, 183-185: 1213- 1218.

[3] 贺鹏飞, Chen Y, Cleggy B. 具有微孔洞结构陶瓷材料的热冲击研究 [J]. 已投《材料工程》.

[4] Arnold M, Boccaccini A R, Ondracek G. Theoretical and experimental considerations on the thermal shock resistance of sintered glass and ceramics using modeled microstructure-property correlation [J]. J of Materials Science, 1996, 31: 463- 469.

[5] 贺鹏飞, 李京剑, Chen Y, Cleggy B. 从微孔洞起始的热冲击裂纹的数值研究—— : 热应力分析 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(5): 75- 78.

[6] Hahr H H, Weiss H J. Multiple crack propagation in a strip caused by thermal shock [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1988, 10: 219- 226.