

# 可加工陶瓷结构件的设计优化研究

张秋明, 赫晓东, 李 垚

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 以云母微晶玻璃陶瓷为研究对象, 通过模拟和分析, 设计了一种金属热防护系统承力结构件, 对可加工陶瓷的结构件进行了优化设计; 对可加工陶瓷结构件在热、力载荷以及热力耦合下的陶瓷承力件的热流、温度以及应力的分布进行了分析。通过优化调整结构件的形状, 最大应力值分别降低了 14.8% 和 30.64%, 最大热流值分别降低了 7.65% 和 6.73%。分析表明, 此种模拟方法, 能够直观的考察结构件内部在各种载荷下的参数分布, 并通过优化, 可获得理想的结果。

**关键词:** 可加工陶瓷; 设计优化; 模拟分析

**中图分类号:** TG 146

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2007)S1-0288-04

## 1 序 言

近二三十年来, 陶瓷材料因诸多的优良性能越来越受到工程材料界的重视, 但其致命的弱点——脆性、不易加工性和塑性变形能力差等限制了更广泛的应用。可加工陶瓷即是在这种条件下应运而生的, 可加工陶瓷是指在室温下, 用传统的机加工方法(如硬质合金或高速钢工具)进行加工并保持一定尺寸公差陶瓷材料<sup>[1]</sup>。可用传统的加工机械或工具(包括切削、加工成型削、刨削、磨削、钻制等工艺过程)加工到精确公差和所要求的表面光洁度。最初的可加工陶瓷由铝硅酸盐玻璃制成, 大纵横比, 相互交错的晶体从玻璃相中析出, 这是形成可加工性的主要因素。这种陶瓷具备了可加工性、强度对表面的不敏感性、抗热震性等不寻常的综合机械性能。从而显示出更广泛的应用潜力。陶瓷的可加工性与其微观结构和材料去除形式密切相关, 可根据陶瓷加工的材料去除原理, 通过设计相应的组分复合和热处理工艺, 控制和调整陶瓷的显微结构及晶界应力, 使陶瓷内部产生弱结合面来实现可加工性。弱界面的存在能以类似裂纹的能量耗散机制阻碍裂纹扩展, 即在载荷作用下, 弱结合界面上会形成微裂纹, 并沿弱界面发生偏转, 耗散裂纹扩展的能量使扩散终止; 当载荷继续上升时, 在下层的弱结合界面处将产生新临界裂纹再扩展; 如此反复, 使裂纹成为跳跃式阶梯状扩展, 断裂渐次发生而非瞬间脆断, 具有了像金属一样的预报失效作用, 增强可加工性<sup>[2]</sup>。Beall G H、Grossman D G 等<sup>[3]</sup>研制出含云母相

的可切削加工玻璃陶瓷, 由小的晶须状或片状云母晶粒均匀分散在玻璃基质中, 使微裂纹主要沿云母玻璃弱界面和层状云母基面扩展, 避免材料在加工过程中的宏观断裂。云母属于层状结构硅酸盐矿物, 容易发生解理, 起到相当于微裂纹的作用, 有很好的可加工性<sup>[4]</sup>。由碱土金属离子代替碱金属离子的含 Ba 云母玻璃陶瓷<sup>[5]</sup>中, 相互交错的云母体和“卷心菜”的组织特征使裂纹扩展变得曲折, 晶体的拔出和搭接效应增大了裂纹的扩展阻力, 可提高机械强度和可加工性能。现在可加工玻璃陶瓷已到了应用阶段, 但由于玻璃陶瓷内含有大量玻璃相, 使其应用温度受到限制, 一般不能超过 800 °C; 而且高的热膨胀系数导致抗热震性能较差, 力学性能也有待提高。

云母玻璃陶瓷是研究较早的一种可加工陶瓷, 它是由小的晶须或者片状云母晶粒均匀分散在玻璃基体中形成的复合物。在 1970 年, G.H.Beall 首次制备出具有优良切削性能的氟云母玻璃陶瓷<sup>[6]</sup>, 此后在此基础上人们又研制出了各种可加工玻璃陶瓷<sup>[7]</sup>。为了获得高强、高硬度玻璃陶瓷, 人们研制出具有针状交织结构的玻璃陶瓷, 如 Canasite 和 Richterite 玻璃陶瓷<sup>[8]</sup>。

由于可加工陶瓷的诸多优点, 成为了金属热防护系统可选材料之一; 经过机械加工后, 尽管在结构形式上能够满足连接的要求, 但是结构件复杂形式导致在复杂载荷下应力分布难以测量和分析, 对整个结构的安全带来重大威胁; 本文对以云母微晶玻璃陶瓷为原料设计的金属热防护系统结构件进行了在热和力载荷作用下的温度分布以及热流和最大应力分布的分

收稿日期: 2007-02-10

作者简介: 张秋明, 男, 1970 年生, 博士, 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080, 电话: 0451-86402345

析，了解应力分布，通过调整结构件的形式，以达到降低最大应力，优化结构，提高安全性的目的。

### 2 结构件形状和材料性能

热防护系统中使用的结构件选用材料为微晶玻璃陶瓷。由于云母微晶玻璃陶瓷密度小，热导率低和弹性模量小的特点，使他适合于热力耦合作用的环境；原设计的结构件如图 1。用于分析结构件的参数如表 1。结构件的基本形状由于连接结构的限制而不可能做由于分析所需数据只需要这几项，其它数据未列出。

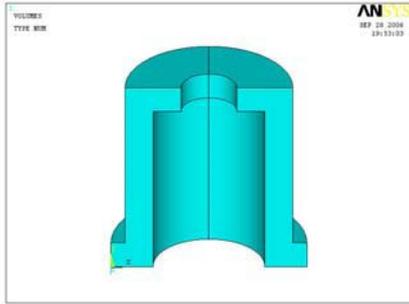


图 1 结构件模型

Fig.1 Mode of structural part

表 1 微晶玻璃陶瓷性能

Table 1 Parameter of microcrystallite glass ceramics

Density/kg·m <sup>3</sup>	2700
Thermal conductivity/ W·(m·K) <sup>-1</sup>	1.68
Heat expansion coefficient/K <sup>-1</sup>	8.6×10 <sup>-6</sup>
Elasticity modulus/Pa	6.5×10 <sup>10</sup>

### 3 优化设计与模拟

近年来，在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析(FEA, Finite Element Analysis)方法为解决复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。有限元分析是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代分析计算方法。随着有限元分析技术的推广，各种有限元分析软件也随之开发出来，然而，经过市场的筛选，ANSYS 最终成为了市场占有率最高的有限元分析软件之一。ANSYS 软件是容结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国州 ANSYS 公司开发，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

本文针对结构件，运用 ANSYS 分析软件，通过在热、力载荷及其耦合下的作用，找到结构的应力集中位置，并且进行一定的调整，降低结构的最大应力，从而提高结构的安全性；分析载荷如下：温度载荷为

上表面 800 ℃，下表面 200 ℃的稳态温度载荷；应力载荷为上表面承受 0.25 MPa 的压力载荷。

图 2~图 4 为原始结构件的分析结果。通过分析表明，结构应力集中在结构件的平面与柱面结合处，最大应力为 9.79×10<sup>7</sup> Pa；最大热流也发生在同一位置，达到 70.572；说明此位置由于热流的集中，导致温降大，因此热膨胀产生的应力陡升，成为最危险区域；因此力求降低此处的应力集中是提高结构件安全性的首要选择。根本改变，只能通过局部的调整来进行优化，以降低应力极值；在此种情况下，所选用圆弧过渡是来减少热流集中，而且由于受力面的增加，减少了应力集中；分别对采用 2 种圆弧过渡对结构应力集中处进行优化调整，直径分别为 1 mm 和 2 mm，来考察优化效果。

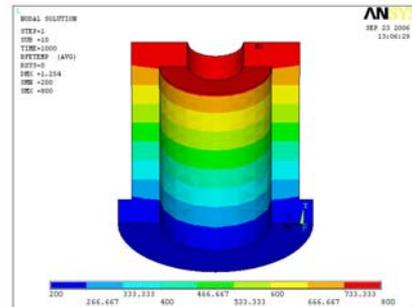


图 2 结构件温度分布

Fig.2 Distribution of body temperature of the part

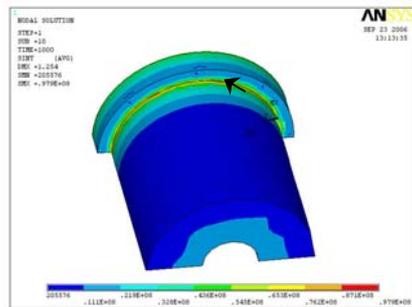


图 3 应力分布

Fig.3 Distribution of Stress intensity of the part

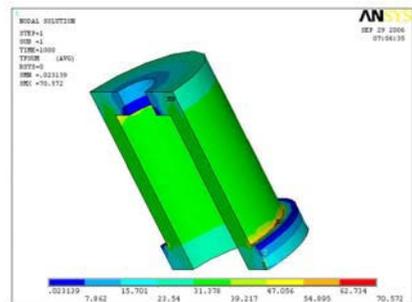


图 4 热流分布

Fig.4 Distribution of thermal flux of the part

调整后的结构件运用 ANSYS 软件进行了模拟分析；分析结果如图 5~图 10。

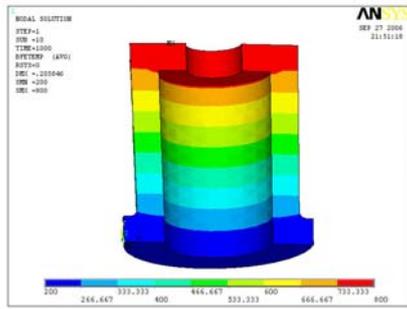


图 5 温度分布

Fig.5 Distribution of Body temperature of the part

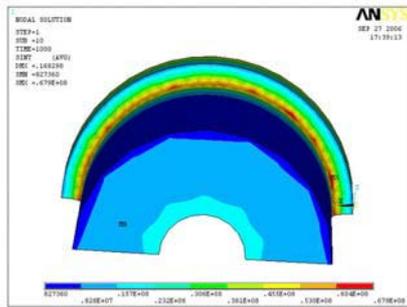


图 6 应力分布

Fig.6 Distribution of Stress intensity of the part

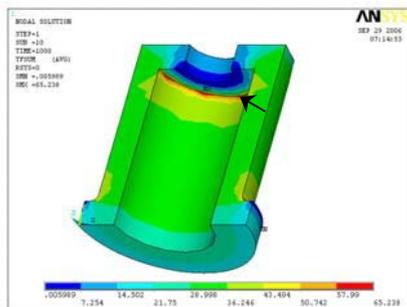


图 7 热流分布

Fig.7 Distribution of thermal flux of the part

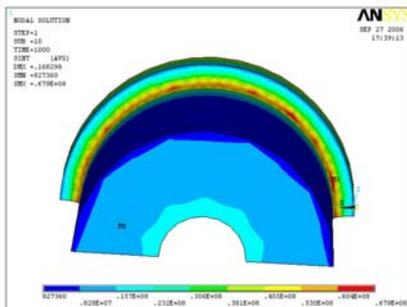


图 8 应力分布

Fig.8 Distribution of stress intensity of the part

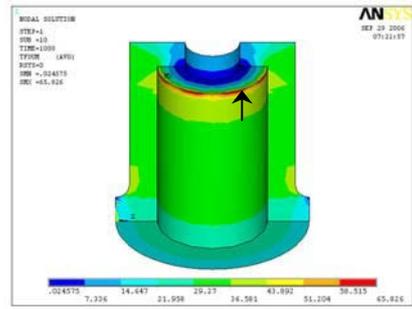


图 9 热流分布

Fig.9 Distribution of thermal flux of the part

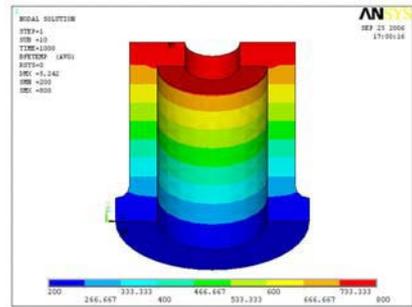


图 10 温度分布

Fig.10 Distribution of body temperature of the part

图 5~图 7 是圆弧直径为 1 mm 的分析结果。图 8~图 10 为圆弧直径为 2 mm 的分析结果。模拟分析表明：调整后结构件的温度分布几乎没有改变，这主要是由于结构件的整体结构没有大的改变，而且温度载荷是相同的，所以温度分布不应有很大的变化；然而，局部进行了圆弧过渡，其结构件的热流分布以及最大应力都发生了很大的改变。最初结构件的最大应力发生于底面与圆弧交界处(图 3 箭头所示区域)，达到了  $9.79 \times 10^7 \text{Pa}$ ；最大热流存在于最大应力处，达到了 70.572；经过了圆弧直径为 2 mm 的过渡后，虽然最大应力的位置没有改变，但是最大值为  $8.34 \times 10^7 \text{Pa}$ ，下降了 14.8%；而且最大热流的位置发生了改变，发生在结构件的圆柱内表面与顶面的交界处（见图 7 箭头所示区），最大值为 65.238，下降了 7.56%；而在经过了圆弧直径为 2 mm 的过渡后，结构件的最大应力位置仍然没有改变，但是最大值为  $6.79 \times 10^7 \text{Pa}$ ，下降了 30.64%；最大热流的位置也发生了改变，与直径为 1 mm 圆弧过渡件的位置相同(图 9 箭头所示区域)，最大值为 65.826，下降了 6.73%；由于此结构件是基本定型的结构，不可能在大的方面进行改动，只能进行局部的调整和优化；而通过简单调整，就获得很好的效果。

### 4 结果与讨论

陶瓷材料在工程中的应用难点之一就是加工的困

难, 而可加工陶瓷恰好克服了之一点; 应用的难点之二是内部应力分布的突变以及危险区域的难以掌握。通过对可加工陶瓷结构件在热力耦合下的热流、温度以及应力的分布分析, 很直观地得到结构的危险应力区; 通过优化调整结构件的形状, 降低了应力值, 降低危险程度, 从而提高了耐热结构件的安全性。通过以上的模拟、分析表明, 采用 ANSYS 进行模拟分析, 进行优化方法, 能够直观地考察结构件内部在各种载荷下的各种参数的分布, 并通过调整可以得到能接受的参数, 获得良好结果。所涉及的可加工陶瓷结构件的形状较为简单, 载荷也并非十分复杂, 如果形状异常复杂, 载荷更加多样 (例如包括振动、声载荷、冲击载荷等), 就更能够体现出此种方法的优势; 而且此种模拟和分析优化的方法, 对其他材料的结构设计也具有指导性。

#### 参考文献 References

- [1] Wang xiangdong(王向东), Qiao guanjun(乔冠军), Jin Zhihao(金志浩). *Materials Review* (材料导报)[J], 2001, 15 (4): 26
- [2] Liu Zhifeng(刘志峰), Qiu Shipeng(邱世鹏), Liu Jiachen(刘家臣). *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺)[J], 2002, 6: 6
- [3] Grossman G D. *J Am Cera Soc*[J], 1972, 55(9): 446
- [4] Zhou Zhenjun(周振军), Liu Jiachen(刘家臣), Yang Zhengfang(杨正方) *et al. Materials Review*[J], 2001, 1: 33
- [5] Qiao Guanjun(乔冠军), Wang Yonglan(王永兰), Jin Zhihao(金志浩) *et al. Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报)[J], 1995, 10(2): 169
- [6] Gao Hong(高宏), Tian Ding(田丁), Wang Xiuhui(王修惠) *et al. Journal of Dalian Railway Institute*(大连铁道学院学报)[J], 1997, 18(4): 74
- [7] Taira M, Yamaki M. *Bri Cera Trans*[J], 1995, 94 (3): 109
- [8] Beall G H. *J Non Cryst-Solids*[J], 1991, 129: 163

## Design Optimization of Structural Part of Machinable Glass Ceramics

Zhang Qiuming, He Xiaodong, Li Yao

(Center for Composite Material, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Through simulation and analysis, design optimization to a strength structural part made of mica microcrystal glass ceramics had been studied. Through the analysis of the thermal flux and the temperature as well as the stress distribution of the machinable ceramic structural part under the thermal and strength load, the shape of structural part had been adjusted. The result showed, by the adjustment, the maximum stress reduced by 14.8% and 30.64% respectively, the most greatly thermal flux reduced by 7.65% and 6.73% respectively. It had been indicated that this optimized method could inspect parameter distribution of structural part under loads, and the ideal result could be obtained;

**Key words:** machinable ceramics; design optimization; simulation analysis

Biography: Zhang Qiuming, Ph. D., Center for Composite Material, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086- 451-86402345, E-mail: zqmingc289@163.com