

中图分类号:TQ171
文献标识码:A

文献编号: 1005-1198 (2022) 02-103-07
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2022.02.003



多孔氮化硅陶瓷作为罩体材料的应用研究

徐莹, 景昭, 高莹莹, 梁欢, 刘娜
北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076

摘要: 多孔氮化硅陶瓷由于其良好的弯曲强度、介电性能在航天航空领域得到了广泛应用。本文对多孔氮化硅陶瓷作为罩体材料的应用进行研究, 对其作为防热承力材料进行温度场计算及试验研究, 通过仿真及试验研究得出, 多孔氮化硅陶瓷作为罩体材料耐热温度达到 1400°C, 热结构匹配及抗热震性能良好, 能够满足某高速飞行器的使用要求。

关键词: 多孔氮化硅陶瓷; 罩体; 温度场预测; 航天飞行器

Application of Porous Silicon Nitride Ceramics as Cover Material

XU Ying, JING Zhao, GAO Ying-Ying, LIANG Huan, LIU Na
Beijing Aerospace Long March aerocraft Research Institute, Beijing 100076, China

Abstract: Porous silicon nitride ceramics have been widely used in aerospace field because of their good bending strength and dielectric properties. In this paper, the application of porous silicon nitride ceramic as cover material is studied, and its temperature field calculation and experimental research as thermal load-bearing material are carried out. Through simulation and experimental research, it is concluded that as cover material, porous silicon nitride ceramics have good thermal structure matching and thermal shock resistance, and the heat resistance temperature reaches 1400°C, can meet the requirements of hypersonic vehicle.

Key words: Porous silicon nitride ceramics; Cover body; Temperature field prediction; Space vehicle; Experimental study

多孔氮化物陶瓷作为陶瓷材料的一种类别, 可以看作是由气固两相组成的复相陶瓷材料, 作为一种结构陶瓷它不仅具备了陶瓷材料强度高、耐腐蚀、耐热震等优点, 还有着巨大的比表面积和可控的孔隙结构, 使陶瓷材料具有了更小的密度、更轻的质量、更小的导热系数。这不仅拓宽了陶瓷材料的应用领域, 而且使其成为替代传统材料最理想的材料之一, 因其优异的物理化学性能, 在环保、能源、航空、生物医学等传统和新型领域有着广泛的应用^[1]。

收稿日期: 2021-10-21 修改稿日期: 2021-11-12

第一作者: 徐莹 (1987-), 女, 江西景德镇人, 硕士研究生。E-mail: xuxyhit@163.com。

随着航天技术的飞速发展,高精度、强突防和大威力是未来机动弹头的发展方向,为了提高航天飞行器的命中精度,加强突防能力,采用自主寻的机动飞行打击目标将是最有效的方式之一^[3]。航天飞行器采用罩体对光学窗口进行有效热防护,维持气动外形完整,同时在需要情况下能够通过抛切露出工作窗口。

本文对多孔氮化硅陶瓷作为航天飞行器罩体材料进行研究,分别从氮化硅陶瓷的性能分析,温度场计算以及热结构应力试验三部分进行研究,得出氮化硅陶瓷作为罩体材料在高速航天飞行器上应用良好的结论。

1 多孔氮化硅陶瓷性能特点研究

氮化硅(Si_3N_4)陶瓷是无机非金属强共价键化合物,其基本结构单元为 $[\text{SiN}_4]$ 四面体,硅原子位于四面体的中心,四个氮原子分别位于四面体的四个顶点,然后以每三个四面体共用一个硅原子的形式在三维空间形成连续而又坚固的网络结构,氮化硅的许多性能都是因为其具有这种特殊的结构,因此 Si_3N_4 结构中氮原子与硅原子间结合力很强,其作为一种高温结构陶瓷,素有陶瓷材料中的“全能冠军”之称,氮化硅陶瓷具有硬度大、强度高、热膨胀系数小、高温蠕变小、抗氧化性能好,可耐氧化到1400 °C、热腐蚀性能好,能耐大多数酸侵蚀,摩擦系数小,与用油润滑的金属表面相似等优异性能,已在许多工业领域获得广泛应用,并有很多潜在用途。

多孔陶瓷材料是指经高温烧制而成,体内具有相通或闭合气孔的陶瓷材料。因其具有优良的均匀透过性,较低的热传导性,耐高温,抗腐蚀等性能,被广泛的应用于多个科学领域,引起材料界的高度关注。

氮化硅陶瓷的制备技术发展很快,由于 Si_3N_4 是强共价化合物,其扩散系数、致密化所必须的体积扩散及晶界扩散速度、烧结驱动力很小,这决定了纯氮化硅不能靠常规固相烧结达到致密化。目前氮化硅陶瓷烧结工艺方法主要有:常压烧结、反应烧结、热压烧结、气压烧结等^[4]。

表 1 不同氮化硅系列陶瓷性能

Tab. 1 Properties of different silicon nitride series ceramics

| Material Type | Dense silicon nitride | Silicon nitride composites 1 | Silicon nitride composites 2 | Porous silicon nitride Ceramic material |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|
| Density(g/cm ³) | 3.10~3.20 | 1.8~1.95 | 1.8~1.95 | 1.67±0.02 |
| Porosity(%) | 0 | 24~29 | 18~25 | 45~55 |
| Flexural strength(MPa) | 600~800 | 90~120 | 70~7590~120 | |
| Modulus of elasticity(GPa) | ≥320 | 45~60 | 35~45 | 45~60 |
| Tensile strength(MPa) | 177.85 | 1.5~1.8 | 1.4~1.7 | 1.8~2.1 |
| Tensile modulus of elasticity(GPa) | 240.45 | 3.0~4.0 | 3.8~4.8 | 3.5~4.5 |
| Fracture toughness (MPa·m ^{1/2}) | 6.0~8.0 | 2.0~2.3 | 1.0~1.5 | 7.33 |
| Coefficient of linear expansion(×10 ⁻⁶ /°C) | 3.1~3.2 | <3.2 | 1.5~1.9 | 5.86 |
| Thermal conductivity (w/m·k) | 13.5(1000°C) | 11(Room temperature) | 1.15 | 4.62 |
| Specific heat capacity (J/g·K) | 1233(1000°C) | 1000~1010 (500°C~800°C) | 0.75~0.91(Room temperature~200°C) | 943~1009 |

多孔陶瓷材料是指经高温烧制而成,体内具有相通或闭合气孔的陶瓷材料。因其具有优良的均匀透过性、较低的热传导性、耐高温、抗腐蚀等性能被广泛地应用于多个科学领域。对于多孔氮化硅陶瓷是建立在氮化硅陶瓷和多孔陶瓷的基础上逐渐发展起来的一种新型多孔陶瓷材料,因其能够发挥氮化硅陶瓷和多孔陶瓷两者的优异性能而被国内外材料界广泛关注。多孔氮化硅陶瓷作为一种新型的“结构-功能”一体化陶瓷材料具有很多特性,包括耐热性能好、化学稳定性好、几何表面积与体积比高、具有高度开口内连的气孔、具有良好的机械强度和刚度,在气压、液压或其它应力负载下多孔体的孔道形状和尺寸不发生改变等^[5]。

氮化硅陶瓷由于孔隙率不同,密度不同导致材料的性能不同,主要性能参数如表1所示。

多孔氮化硅陶瓷材料热导率及平均线膨胀系数随温度变化曲线如图1和图2所示。从图中可以看出多孔氮化硅陶瓷的热导率随温度升高而下降,平均热膨胀系数随温度升高而升高。

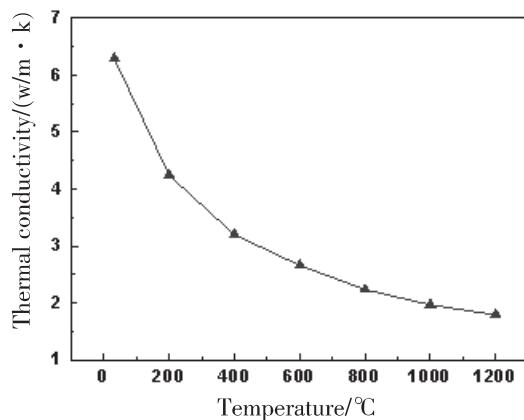


图1 材料热导率随时间变化关系

Figure 1 Relationship between material thermal conductivity and time

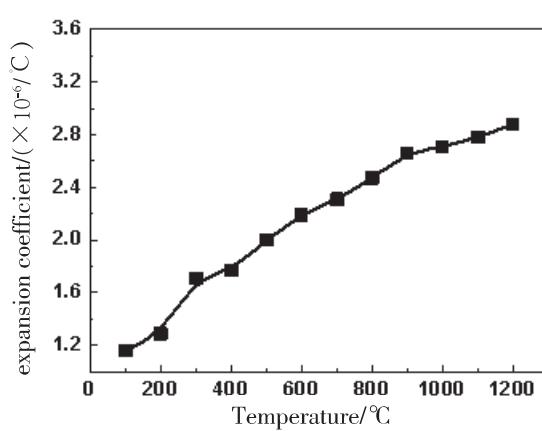


图2 材料平均热膨胀系数随时间变化关系

Figure 2 Variation of mean linear expansion coefficient with time

2 多孔氮化硅陶瓷作为罩体材料的温度场仿真计算

多孔氮化硅陶瓷由于其良好的抗弯强度、抗热震性能以及较好的热导率作为罩体材料在高速飞行器上使用。针对某飞行器使用的氮化硅陶瓷罩体进行应用研究。

多孔氮化硅陶瓷罩体示意图如图3所示,罩体厚度为20mm。罩体所用多孔氮化硅陶瓷物性参数如表2所示。

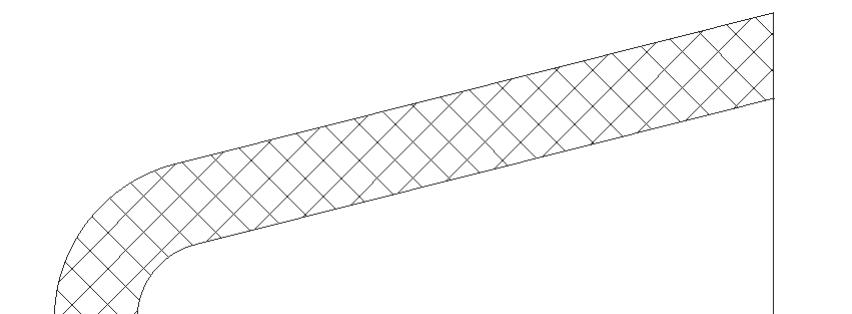


图3 多孔氮化硅陶瓷罩体示意图

Figure 3 Schematic diagram of porous silicon nitride ceramic cover

表 2 多孔氮化硅陶瓷性能参数

Tab. 2 Performance parameters of porous silicon nitride ceramics

| Performance parameter | Density(kg/m^3) | Normal temperature thermal conductivity ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) | Specific heat capacity ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Porous silicon nitride ceramic | 1670 | 7.3 | 1000 |

针对某飞行器热环境条件,热流密度达到 $500\sim 800\text{kW}/\text{m}^2$,飞行总时间达到 800s 以上。多孔氮化硅陶瓷罩体的温度场仿真计算结果如图 4 和图 5 所示。罩体连接环温度场计算结果云图如图 6 所示。

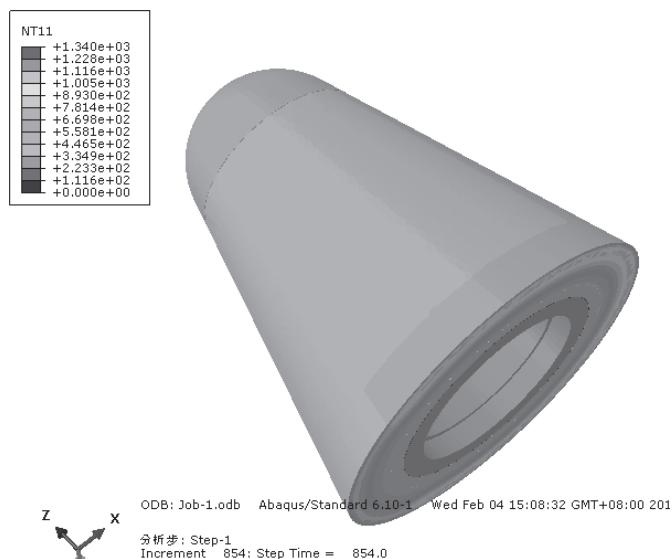


图 4 氮化硅陶瓷罩体温度场计算结果云图-表面温度最高时刻(单位为:℃)

Figure 4 Cloud diagram of temperature field calculation results of silicon nitride ceramic cover-Maximum surface temperature(unit: °C)

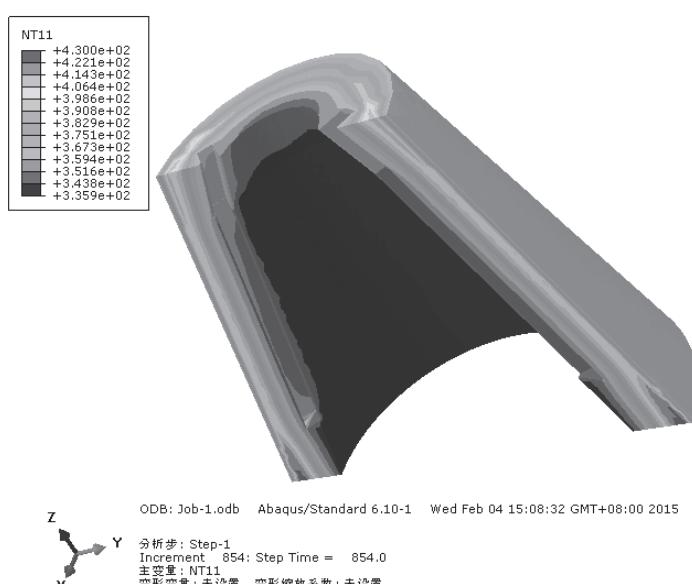


图 5 氮化硅陶瓷罩体温度场计算结果云图-内壁温度最高时刻(单位为:K)

Figure 5 Cloud diagram of temperature field calculation results of silicon nitride ceramic cover-Maximum inner wall temperature(unit: K)

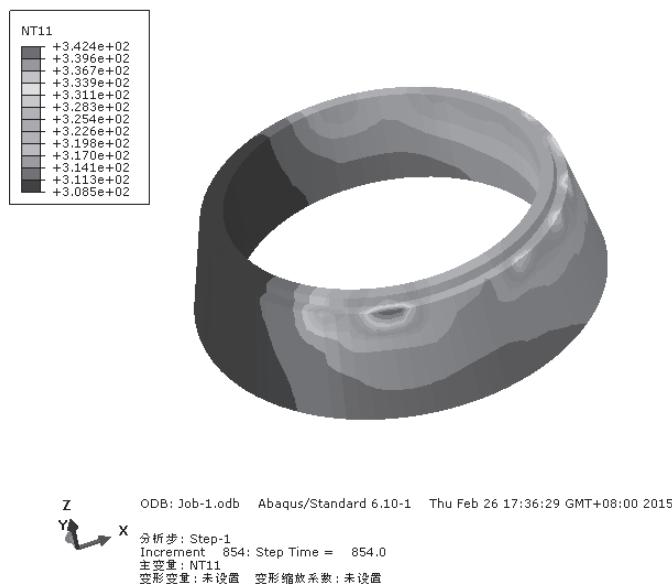


图 6 连接环计算结果云图(单位为:K)

Figure 6 Cloud chart of calculation results of connecting ring(unit: K)

表 3 罩体和连接环温度汇总

Tab. 3 Cover and connecting ring temperature summary

| Position | Cover surface | Inner wall of cover | Connecting ring |
|------------------------------|---------------|---------------------|-----------------|
| Corresponding time(s) | 100 | 850 | 850 |
| Maximum temperature value(℃) | 1340 | 157 | 69 |

从计算结果可以看出,罩体表面最高温度达到了1340℃,罩体内壁最高温度达到了157℃,连接环内壁最高温度达到了69℃。

3 氮化硅陶瓷作为罩体材料的试验研究

在三维温度场仿真计算的基础上,针对该氮化硅陶瓷罩体的热结构应力情况进行地面试验考核验证。试验在电弧风洞加热装置上进行,试验流场状态如表4所示,试验平均热流密度达到了500kW/m²,加热总时间为850s。试验过程中对氮化硅陶瓷试验件表面温度以及Ⅰ象限、Ⅱ象限的内壁温度进行了测量,多孔氮化硅陶瓷罩体试验件表面温度与理论计算温度对比曲线如图7所示,内壁温度试验测量与理论计算温度对比曲线如图8和图9所示,表面最高温度接近1400℃,内壁温度接近170℃。试验测量结果与理论计算结果接近,如表5所示。

表 4 试验流场状态
Tab. 4 Test flow field state

| State parameters | Average heat flux(kW/m ²) | time(s) |
|------------------|---------------------------------------|---------|
| I | 500~600 | 100 |
| II | 700~800 | 750 |

表 5 试验测量与理论计算结果汇总表
Tab. 5 Summary of test measurement and theoretical calculation results

| State parameters | Surface temperature (°C) | Maximum temperature of inner wall of cover-II quadrant(°C) | Maximum temperature of inner wall of cover-I quadrant(°C) |
|-------------------------------|--------------------------|--|---|
| Test | 1339 | 157 | 125 |
| Theoretical Calculation value | 1340 | 166 | 129 |

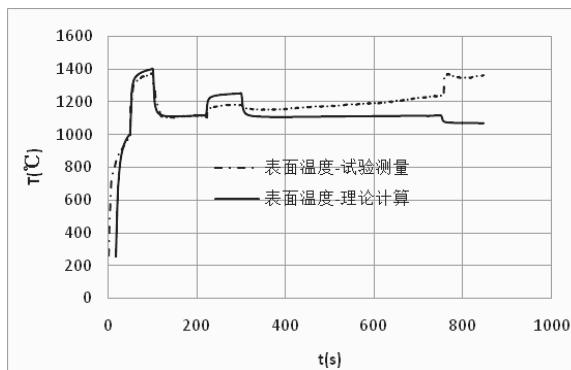


图 7 罩体表面温度计算结果与试验测量对比曲线

Figure 7 Comparison between calculated results and experimental measurement of inner wall temperature of cover (I quadrant)

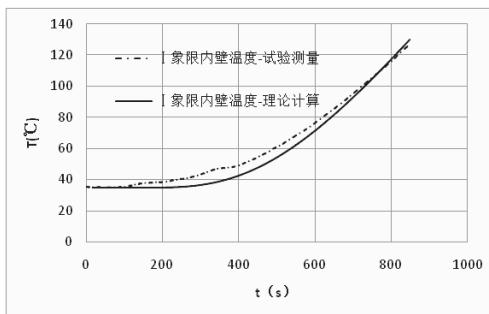


图 8 罩体内壁温度计算结果与试验测量对比
(I 象限)

Figure 8 Comparison between calculated results and experimental measurement of inner wall temperature of cover (I quadrant)

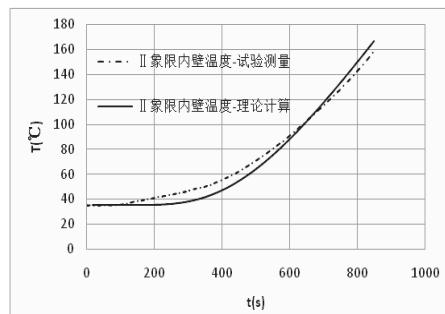


图 9 罩体内壁温度计算结果与试验测量对比
(II 象限)

Figure 9 Comparison between calculated results and experimental measurement of inner wall temperature of cover (II quadrant)

经过电弧风洞低热流、长时间环境条件的试验加热后,氮化硅陶瓷罩体表面状态保持完好,没有因为试验件受热发生内部裂纹等现象,同时罩体与内部连接环材料热结构匹配性良好。

4 结论

本文在对不同氮化硅陶瓷性能特点研究的基础上,对多孔氮化硅陶瓷应用于某飞行器罩体材料进行研究,主要得出以下结论:

- (1) 氮化硅陶瓷由于不同的孔隙率,不同的密度导致了不同的力学性能差异。
- (2) 对于某低热流长时间加热飞行器用罩体采用多孔氮化硅陶瓷材料,通过多孔氮化硅陶瓷罩体

的温度场仿真计算及试验研究得出,罩体材料表面达到了接近1400℃,内壁温度保持在170℃以下,其外观仍保持完好,与连接环连接匹配性能良好,抗热震性能良好,没有出现开裂现象,证明了氮化硅陶瓷应用于罩体材料合理可行。

参考文献

- [1] 葛伟萍,赵昆渝,李智东. 氮化硅多孔陶瓷[J]. 云南冶金, 2004, 01: 47-48+52.
- [2] 陕绍云,王亚明,贾庆明,等. 多孔氮化硅陶瓷的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(1): 138-142.
- [3] 杜运理,夏群力,蔡春涛. 雷达导引头天线罩误差对制导精度影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5):79-82.
- [4] 王会阳,李承宇,刘德志. 氮化硅陶瓷的制备及性能研究进展[J]. 江苏陶瓷,2011, 44(6): 4-6.
- [5] 李美娟,马玲玲,陈斐,等. 氮化硅基多孔陶瓷的制备技术、孔隙结构控制方法及其研究进展[J]. 材料导报:综述篇,2010,24(9):112-115.