

中图分类号: TB332  
文献标识码: A

文献编号: 1005-1198 (2021) 01-0265-08  
DOI: 10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2021.04.005



# 边界条件对石英纤维增强陶瓷基复合材料局部结构温度场的影响分析

徐莹, 蒋凌澜, 孔维萱, 郝金波  
北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076

**摘 要:** 随着航天技术的发展, 局部复杂结构的温度场预测显得尤为重要。本文针对非烧蚀条件下局部结构温度场预测, 分别采用将热流密度通过一维有限元差分计算方法转换成表面温度的定温度边界和直接采用定热流边界的计算方法得出的计算结果进行了对比和分析。得出了对于局部结构中石英纤维增强陶瓷基复合材料, 采用定热流边界和定温度边界的计算方法同样合适; 对于局部结构中热导率较大的表面材料, 采用定热流边界的计算结果更趋合理。

**关键词:** 边界条件; 复杂局部; 温度场预测; 石英纤维增强陶瓷基复合材料; 影响分析

## Influence of the Boundary Conditions on Temperature Field of Local Structure of Quartz Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites

XU Ying, JIANG Ling-Lan, KONG Wei-Xuan, HAO Jin-Bo  
*Beijing Aerospace Long March aircraft Research Institute, Beijing 100076, China*

**Abstract:** With the development of space technology, it is very important to predict the temperature field of local complex structures. In this paper, according to the prediction of local structure temperature field under non-ablative conditions, respectively, will calculate the heat flux through the one-dimensional finite difference method into constant temperature boundary surface temperature and direct calculation method with constant heat flux boundary results were compared and analyzed. It is concluded that the calculation method of constant heat flux boundary and constant temperature boundary is also suitable for quartz fiber reinforced ceramic matrix composites with local structure. For the surface material with large thermal conductivity in local structure, the calculation results with fixed heat flux boundary are more reasonable.

**Key words:** boundary conditions; local complex structures; prediction of local structure temperature; quartz fiber reinforced ceramic matrix composites; impact analysis

收稿日期: 2021-03-13

修改稿日期: 2021-06-11

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

随着武器技术的发展,飞行器不断向高超声速,高精度、强突防等方向发展,对飞行器耐热设计提出了轻质高效防隔热的设计要求,同时在进行温度场预测时,对复杂结构,内部仪器设备等局部温度场的精确预测显得尤为重要。目前,飞行器普遍采用高硅氧-酚醛、玻璃/酚醛、熔融石英等硅基类作为耐热材料,或者石墨、碳-碳、碳-酚醛等碳基类材料<sup>[1]</sup>,同时对于某些局部结构,也直接采用石英纤维增强陶瓷基复合材料作为耐热承力结构。为了确定飞行器的工作温度并优化热结构设计,耐热层内温度场的计算和分析是必不可少的,理论计算采用数值解法,目前常用有差分法和有限单元法。

飞行器在飞行过程中将经受复杂的气动加热过程,通常为非稳态导热过程。计算耐热层的内部温度场通常采用数值解法,通过求解代数方程组来获得温度场的近似数值解,并且常常需要对实际问题作适当简化,建立物理模型,进行数学求解。求解不稳定导热问题,常常涉及下列三个方面的简化,一是关于边界条件的简化,二是对导热物体内部热阻的简化,三是对导热物体形状的简化<sup>[1]</sup>。

对飞行器不同飞行环境条件下的局部温度场计算时,发现由于其局部结构复杂性,受到结构模型边界条件以及材料物性条件的制约,难以采用一维计算模型准确给出温度分布,一般采用商业软件进行计算,而商业软件又难以直接通过冷壁热流进行加载。为了得出复杂局部结构的温度分布,一种方法是采用一维有限元差分方法计算得出表面温度,再采用商业软件进行定温度边界加载;另一种方法是对商业软件进行二次开发,增加时变热流边界模块,通过耦合计算,以实现热壁热流边界条件的加载。本文针对时变热流边界以及一维有限差分方法计算后的温度边界两种加载方式对结构模型及不同材料物性参数的温度计算,对比分析,得出在某些特定的物理及材料模型条件下,采用某些边界条件的计算更趋合理的结论,可以为今后飞行器局部温度场的预测和设计带来一定的指导意义<sup>[3]</sup>。

## 1 数值仿真计算

温度边界计算采用一维热传导模型<sup>[1]</sup>,  
一维热传导微分方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

其中  $c_p$ —材料比热,  $\lambda_x$ —材料热导率。

导热问题的常见边界条件可归纳为以下三类<sup>[4]</sup>:

(1)规定了边界上的温度值,称为第一类边界条件。对于非稳态导热,这类边界条件要求给出以下关系式:

$$\tau > 0 \text{ 时}, t_w = f_1(\tau) \quad (2)$$

(2)规定了边界上的热流密度值,称为第二类边界条件。对于非稳态导热,这类边界条件要求给出以下关系式:

$$\tau > 0 \text{ 时}, -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau) \quad (3)$$

式中,  $n$  为表面的外法线方向。

(3)规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数  $h$  及周围流体的温度  $t_f$ ,称为第三类边界条件。第三类边界条件可表示为

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \quad (4)$$

在非稳态导热时,式中  $h$  和  $t_f$  均为时间的函数。

热壁热流与冷壁热流的关系式为

$$q_w = q_c \left( 1 - \frac{h_w}{h_r} \right) \quad (5)$$

式中,  $q_w$  为热壁热流;  $q_c$  为表面处在热力学温度零度时传入耐热层表面的热流密度,即冷壁热流;  $h_w$ 、

$h_r$  分别为在表面壁温下和气体恢复温度下的气体焓值。

## 2 不同边界条件下复杂局部结构的温度场计算

针对典型结构模型, 分别对热流和表面温度边界的加载进行计算, 并对不同条件下的温度结果进行对比分析。

### 2.1 石英纤维增强陶瓷基复合结构模型不同边界条件下的计算

首先, 针对某实心体球锥结构进行温度场计算, 其材料为石英纤维增强陶瓷基复合材料。计算模型如图1所示。

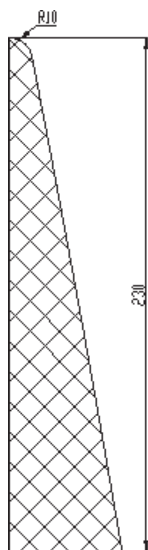


图1 结构计算模型

Fig. 1 Structure calculation model

计算加载球头部位以及8个典型截面位置处的冷壁热流密度环境条件及表面温度边界条件, 表面温度采用一维有限元差分方法进行计算, 忽略模型三维效应对表面温度计算的影响。计算取10℃初温, 计算加载的冷壁热流及表面温度随变化曲线如图2和图3所示。以上两种加载边界条件下的计算结束时刻温度场云图对比如图4所示, 驻点及锥身的温度随时间变化趋势对比如图5所示。

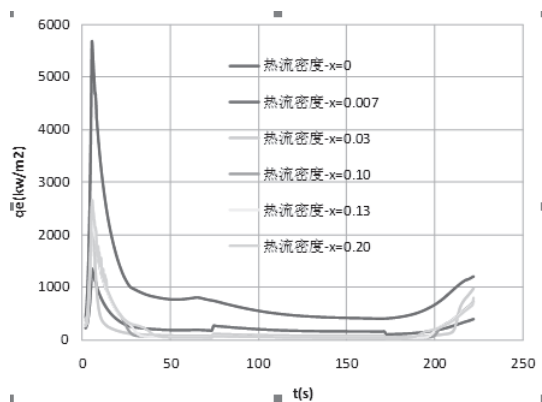


图2 不同截面位置加载的冷壁热流密度随时间变化曲线

Fig. 2 The curve of the heat flux density of the cold wall with time at different section locations

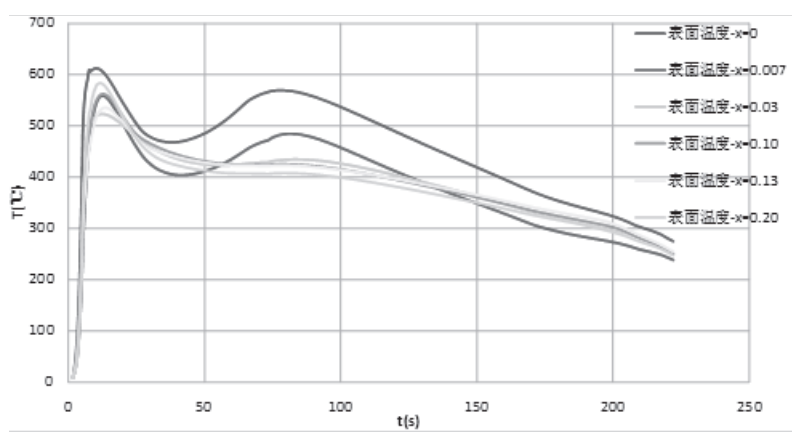
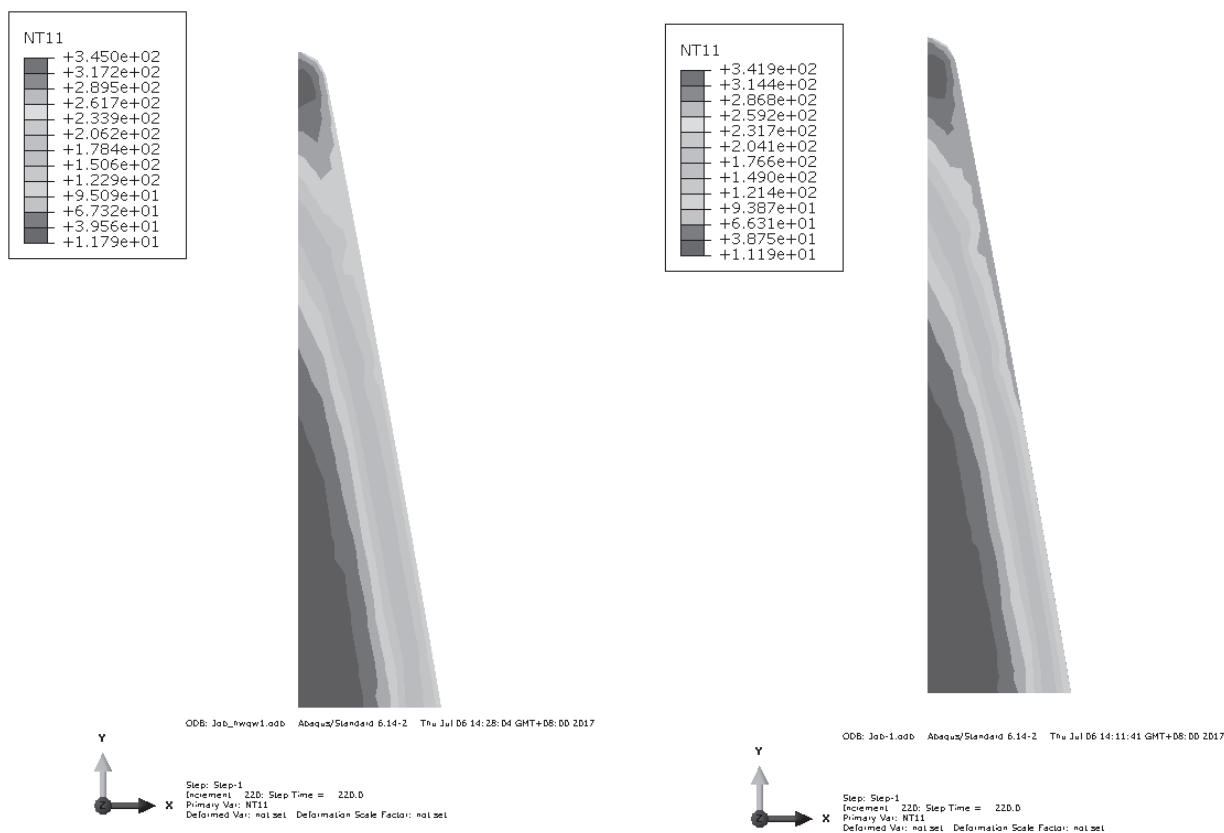


图 3 不同截面位置表面温度随时间变化曲线

Fig. 3 The curve of surface temperature with time at different cross section positions



计算结果云图(加载热流边界的计算)

计算结果云图(加载温度边界的计算)

图 4 两种加载边界条件下的计算结果云图对比

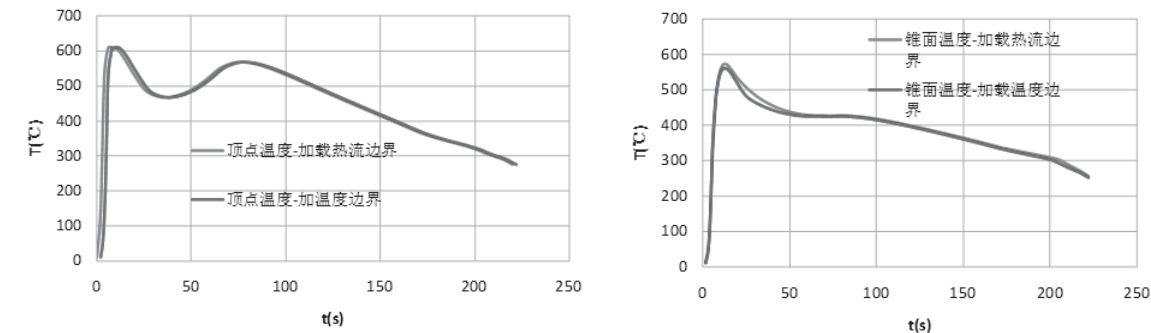
Fig. 4 Comparison of cloud images under two loading boundary conditions

从两种边界条件对顶点和锥身随时间变化的温度曲线,可以看出,对于顶点位置及锥身区域,加载热流边界计算温度结果与加载表面温度边界的温度结果接近。温度计算结果对比汇总如表 1 所示。典型截面的计算结果如图 5 所示。

表 1 两种加载边界条件下的温度计算结果对比

Tab. 1 Comparision of temperature calculation results under two loading boundary conditions

加载边界条件	最高温度-顶点(℃)	最高温度 -x=0.007(℃)	最高温度 -x=0.03(℃)	最高温度 -x=0.10(℃)	最高温度 -x=0.13(℃)	最高温度 -x=0.20(℃)
热流边界	605	622	571	626	572	597
温度边界	611	620	570	630	562	584



两种加载边界条件下的顶点温度对比

两种加载边界条件下的锥身温度对比

图 5 两种加载边界条件下的顶点和锥身温度场计算结果对比

Fig. 5 Comparison of calculated results of temperature field of vertex and cone under two loading boundary conditions

通过对石英纤维增强陶瓷基复合材料结构在不同边界条件下的计算,从温度场云图可以看出,对于计算结束时刻,两种边界条件计算下的温度梯度相差不大,温度分布的一致性较好。从顶点和锥身的计算结果曲线可以看出,两种边界条件下对不同位置处温度变化的一致性很好,计算的温度偏差较小,偏差在 5% 以内。因此,对于此类表面为石英纤维增强陶瓷基复合非金属材料,采用热流加载和温度加载的边界条件计算局部温度场结果同样适用。

2.2 热导率大材料的结构模型不同边界条件下的计算

对于某些局部结构,常用的热导率较大的如钢材的金属材料,其物性参数与石英纤维增强陶瓷基复合材料对比如表 2 所示。

表 2 不同材料的物性参数

Tab. 2 Physical properties of different materials

材料	石英纤维增强陶瓷基复合材料	金属
密度 kg/m <sup>3</sup>	1760	7800
热导率 W/(m·K)	0.6	48.15
比热 J/(kg·K)	1100	469.8

将结构模型中材料改为热导率大的如金属材料,进行两种边界条件下的温度场计算。其中不同截面位置加载的表面温度随时间变化曲线如图 6 所示。计算结果如图 7 所示,顶点和锥身处温度结果对比如图 8 所示,不同截面下的计算结果对比如表 3 所示。

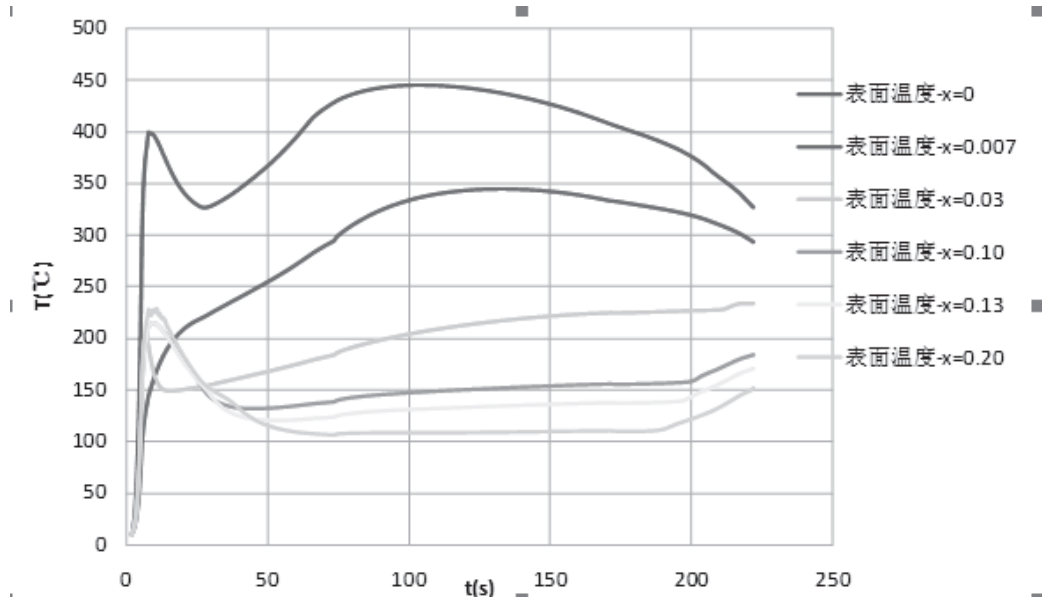
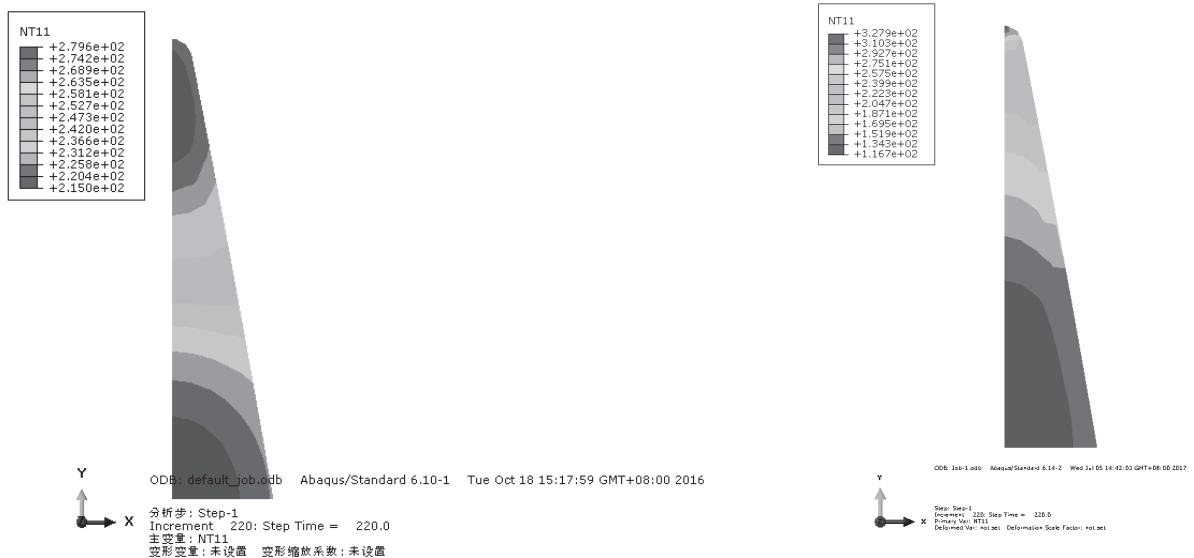


图 6 不同截面位置的表面温度随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of surface temperature with time at differert cross section positions



计算结果云图(加载热流边界的计算)

计算结果云图(加载温度边界的计算)

图 7 两种加载边界条件下的计算结果云图对比

Fig. 7 Comparison of cloud images under two loading boundary conditions

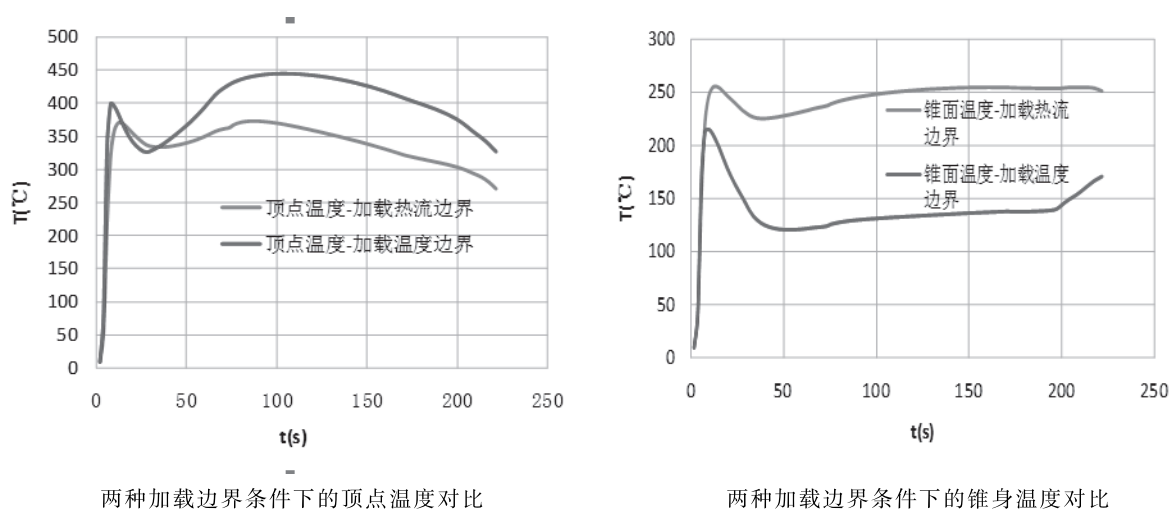
从两种边界条件对顶点和锥身随时间变化的温度曲线,可以看出,对于顶点位置,加载热流边界计算的温度结果低于加载表面温度边界的温度结果,对于锥身区域,加载热流边界计算的温度结果高于加载表面温度边界的温度结果。温度计算结果对比汇总如表 3 所示。

表 3 两种加载边界条件下的温度计算结果对比

Tab. 3 Comparison of temperature calculation results under two loading boundary conditions

加载边界条件	最高温度- 顶点(°C)	最高温度 -x=0.007(°C)	最高温度 -x=0.032(°C)	最高温度 -x=0.10(°C)	最高温度 -x=0.13(°C)	最高温度 -x=0.20(°C)
热流边界	373	373	299	248	254	271
温度边界	445	344	233	214	214	228

从计算结果云图可以看出,在计算结束时刻,加载热流边界的温度场分布更趋于均匀,温度梯度较小;加载表面温度边界的温度场呈现出集中在顶点部位温度较高,而锥身温度较低的趋势,温度梯度较大。典型截面的计算结果如图 8 所示。



两种加载边界条件下的顶点温度对比

两种加载边界条件下的锥身温度对比

图 8 两种加载边界条件下的顶点和锥身温度场计算结果对比

Fig. 8 Comparison of calculated results of temperature field of vertex and cone under two loading boundary conditions

通过对金属局部结构在不同边界条件下的计算,能够得出:对于不规则金属结构模型,进行表面温度边界加载,受到模型不规则尺寸的限制及模型三维效应的影响,在运用有限元差分方法进行一维温度场计算时,其表面温度难以通过模型尺寸的简化而准确给出。因此对于表面温度加载下的温度场计算,受表面温度加载边界的影响,将对温度场分布产生一定的偏差。因此,对于此类表面为热导率系数大的材料,采用热流加载的边界条件计算局部温度场的结果更趋合理。

### 3 结论

本文通过对某结构非烧蚀长时间加热环境条件下,局部模型在热流及温度边界加载下的温度场计算对比分析,得出以下结论:

(1)在非烧蚀环境条件下,表面为石英纤维增强陶瓷基复合非金属材料结构,采用定热流边界与采用一维有限元差分方法计算后的定温度边界加载计算的温度场结果一致性较好,两种边界条件加载计算对非金属结构模型同样适用。

(2)在非烧蚀环境条件下,表面为热导率大的金属材料结构,受到结构三维效应的影响,采用定热流边界加载计算的温度场结果比采用一维有限元差分方法计算后的定温度边界加载计算的温度结果更趋合理。

#### 参考文献

- [1] 王国雄. 弹头设计. 北京宇航出版社[M], 1993: 416-417
- [2] 王智勇, 巨亚堂, 黄世勇. 结构热试验中冷壁热流边界模拟方法研究[J]. 航天器环境工程, 2008 [25] 33-35.
- [3] 夏吝时, 齐斌. 球锥形罩体热力耦合试验方法研究[J]. 强度与环境, 2013(40): 43-45
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009