

内嵌定向高导热层疏导式结构热防护机理分析*

孙健[†] 刘伟强

(国防科技大学高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

(2011年10月13日收到; 2011年11月8日收到修改稿)

针对飞行器高超声速飞行时严重的气动加热环境, 提出内嵌定向高导热层的疏导式热防护系统. 运用数值方法分析了特定条件下内嵌定向高导热层的疏导式系统的防热效果, 外壁面最高温度下降了 9.1%, 内壁面最高温度下降了 31.5%, 高温区和低温区都被封闭在外层区域, 内层温度更加均匀, 实现了热流由高温区向低温区的转移, 削弱了高温区的热载荷, 强化了整体结构的热防护能力. 研究表明, 随着气动热流密度比与辐射散热面积比的增大, 疏导结构的冷却效果增强. 本文还对疏导防热系统的结构参数和材料参数对冷却效果的影响进行了分析, 为结构的设计和材料的选取提供一定的依据.

关键词: 定向高导热层, 疏导式热防护, 气动热, 热辐射

PACS: 44.05.+e, 44.10.+i, 44.40.+a

1 引言

高超声速飞行器工作时会有严重的气动加热, 机体前端、翼前缘等驻点区域是关键设计位置. 传统的烧蚀热防护机理需要牺牲表面烧蚀材料来实现对严重气动热的防护作用, 但同时会损失良好的气动外形, 特别是对于高超声速飞行器的尖锐头锥, 结构的严重烧蚀会导致无法保证高马赫数飞行; 而主动冷却方式虽然能保持飞行器的气动外形, 但因其结构复杂而可靠性又不高, 导致其使用受到限制. 疏导式热防护^[1]作为半被动热防护, 它采用高导热率材料、高效传热元件的传热、对流换热的物理特性将高热流区热量快速传递到低热流区, 借助大范围的低温散热面, 将严重的气动加热以辐射的方式释放, 以降低高热流区的表面温度, 达到现有耐高温材料能够承受的水平.

疏导式结构的核心装置是定向高导热层, 其一般包括热管和定向高导热材料两种. Wojcik 等^[2]设计制作并实验验证了一种以难熔金属做管壁, 以金属锂做工质的高温热管. David^[3]给出热管冷却

性能的工程预测方法, 还用有限元法预测了飞行器前缘热结构件热管的冷却效果. 文献[4]给出高温热管冷却效率在电弧风洞的实验验证. 陈连忠等^[5]将包裹了热管的碳复合材料柱形体放在电弧风洞中, 验证了热管具有较好的降温效果. 姜贵庆等^[6]分析二维固体材料的传导性能, 提出表面降温系数和背面升温系数用以评价固体材料的疏导性能. 李同起等^[7]对定向高导热碳材料的导热机理和导热特性进行了研究. 保文星等^[8]对碳纳米管的热导性能进行了研究, 给出了以分子动力学为基础的热导率计算方法. 王照亮等^[9]采用四焊盘 -3ω 方法测量了室温下基体表面不同长度单根单壁碳纳米管 (SWNT) 的导热系数, 理论预测与实验结果相符合, 即 SWNT 导热系数随长度变化具有尺度效应. 侯泉文等^[10]利用分子动力学模拟了碳纳米管的热导率, 研究发现其随长度变化的幂指数随着碳纳米管长度的增加而成衰减指数的规律减小, 与理想一维材料不同, 在热力学极限下, 碳纳米管导热会出现完全扩散输运, 其热导率将收敛到有限值. 文献[11]研究尖化前缘内嵌高导热碳材料的防热效果, 并对相关影响因素进行了分析. 总之, 内嵌高导

* 国家自然科学基金 (批准号: 90916018) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200899980006) 资助的课题.

[†] E-mail: sunjian19850620@163.com

热材料疏导式防护结构的研究国内才刚刚起步, 因此在其工程化之前, 由很多关键技术问题需要解决, 首要的是要深刻理解其传热防热机理, 并对结构的防热性能进行安全性评估以及防热效果影响因素进行研究. 本文针对内嵌定向高导热层的疏导式防热结构, 研究其热防护机理, 并分析疏导结构各层宽度及导热系数、高低热流区气动加热比、辐射散热面积比等对热防护性能的影响.

2 物理模型与控制方程

2.1 物理模型

图 1 所示为有高、低热流密度区与定向高导热层疏导通道组成的疏导式防热系统结构. 各层均为等截面材料, 其中耐热层宽度为 d_1 , 各向同性材料导热系数为 K_1 ; 将定向高导热层等效为一种各向异性材料, 其宽度为 d_2 , 各向导热系数分别为 K_{2x}, K_{2y} ; 隔热层宽度为 d_3 , 各项同性材料导热系数为 K_3 . 高、低热流密度区均采用均匀热流, 即模型 AD 边高热流密度区热流为 q_a , 长度为 L_a , 低热流密度区热流为 q_b , 长度为 $L - L_a$. 外界空间温度为 T_∞ .

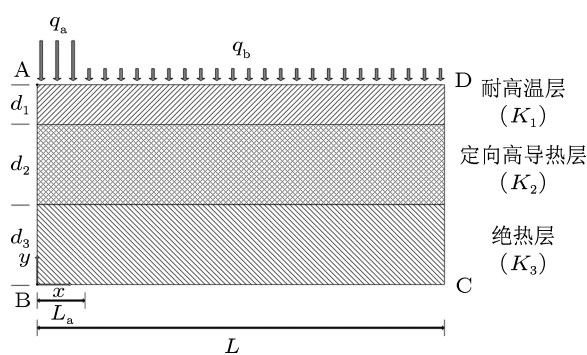


图 1 疏导结构模型图

2.2 控制方程

根据热传导理论, 假设固体材料的各向导热系数与黑度是常数, 即与温度和时间无关, 则模型中的非稳态导热方程^[12]为

$$K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 K_x, K_y 分别为 x, y 方向的导热系数, T 为节点温度, ρ 为材料密度, C 为材料定压比热, t 为时间.

由于表面接触热阻的影响因素由很多 (如表面粗糙度、材料属性等), 而且其值随表面温度、压力的变化而变化, 分析方法多采用实验研究, 因此本文假设疏导结构各层之间接触良好, 不存在接触热阻. 因为疏导式防热结构热量的加载和释放绝大部分都通过外壁面, 所以假设 AB, BC 和 CD 边均绝热, 并且热辐射只存在于 AD 边与外界空间环境, 因此模型的边界条件为

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w = 0, \quad (\text{AB, CD边}), \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = 0, \quad (\text{BC边}). \quad (3)$$

AD 边存在恒定热流和辐射换热两个热载荷, 且热流分布不均匀, 应分区给出其边界条件

$$-K_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = q_a - \varepsilon \sigma [T_w^4 - T_\infty^4], \quad (0-L_a), \quad (4)$$

$$-K_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = q_b - \varepsilon \sigma [T_w^4 - T_\infty^4], \quad (L_a-L), \quad (5)$$

式中 ε 为黑度, σ 为黑体辐射常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

3 计算结果与讨论

在分析冷却效果时, 外壁面 A 点和内壁面 B 点的温度是极为重要的参考, A 点温度决定了耐高温层的材料选取, B 点温度决定了对内部结构的热防护效果, 因此引入两个冷却参数 T_{CA}, T_{CB} , 其分别为内嵌定向高导热层疏导结构时 A, B 点温度.

表 1 为计算模型的结构与载荷参数, 定向高导热层选取定向高导热碳材料^[7]. 初始时刻 $t = 0 \text{ s}$ 时, 结构各点温度 $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. 由图 2 可知, 随着时间的增加, 疏导结构的 T_{CA} 逐渐上升并趋于稳定, 稳态时 A 点的温度最高, 此时疏导结构的温度分布能够很好的反映出其防热效果, 因此在本文以后的讨论中均考虑稳态条件下的温度结果. 图 3 为内嵌高导热层结构冷却前后的稳态温度分布. 由图可见, 内嵌高导热层疏导结构的高温区和低温区都被封闭在外层, 内层温度均匀. 内壁面 B 点温度由原来的 $1349 \text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $923.69 \text{ }^\circ\text{C}$, 降幅为 0.315; 外壁面 A 点温度由原来的 $1819 \text{ }^\circ\text{C}$ 降到 $1653 \text{ }^\circ\text{C}$, 降幅为 0.091. 即内嵌高导热材料的疏导结构实现了热量由高温区向低温区的转移, 削弱了高热流密度区的热载荷, 提升了结构的整体辐射散热能力, 实现了对高温区内外壁面的热防护.

4 疏导结构热防护效果的影响因素

内嵌定向高导热层疏导结构的结构参数和材料参数对热防护效果起着至关重要的影响. 因此, 本文对疏导结构各层宽度及其导热系数、高低热流区辐射散热面积比以及气动加热比等对热防护性能的影响进行了研究, 为内嵌定向高导热层疏导式防热的结构设计和材料选取提供一定的依据.

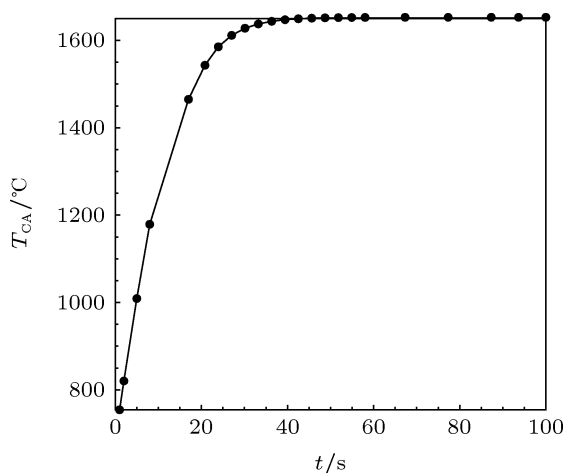


图2 T_{CA} 随时间变化曲线

表1 模型结构与载荷参数

变量	数值
d_1/mm	50
d_2/mm	200
d_3/mm	200
$K_1/(\text{W}/\text{mK})$	60
$K_{2x}/(\text{W}/\text{mK})$	2000
$K_{2y}/(\text{W}/\text{mK})$	6
$K_3/(\text{W}/\text{mK})$	0.017
$\rho_{1-3}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7850
$C/(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$	434
ε_1	0.8
$q_a/(\text{W}/\text{mm})$	10^6
$q_b/(\text{W}/\text{mm})$	5×10^4
L_a/mm	100
L/mm	1500
$T_\infty/^\circ\text{C}$	20

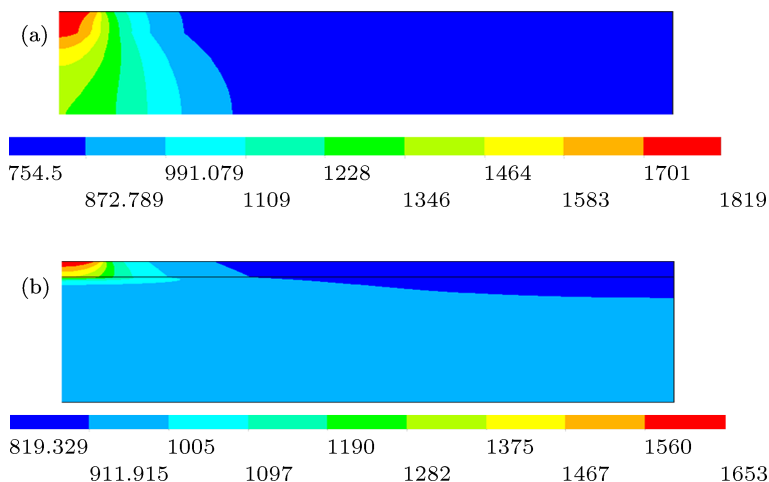


图3 特定工况疏导式防热效果 (a) 无定向高导热层时稳态温度分布 ($^\circ\text{C}$); (b) 存在定向高导热层时稳态温度分布 ($^\circ\text{C}$)

4.1 疏导结构各层宽度的影响

表2为疏导结构各层宽度对应的算例. 图4, 图5分别为各层宽度对壁温 T_{CA} , T_{CB} 的影响. 其中随着耐热层宽度 d_1 的增加, T_{CA} 增加剧烈而 T_{CB} 缓慢下降, 即耐热层的加厚会严重提高外表面最高

温度而降低内表面最高温度, 不利于外表面的热防护, 恶化外表面的热环境. 这是由于耐热层的加厚会增大耐热层对热量的吸收, 降低了传导进内层结构的热量, 降低了高导热结构的热疏导性能. 因此, 耐热层温度会剧烈上升, 而最内层温度下降缓慢.

随着定向高导热层宽度 d_2 的增加, T_{CA} 和

T_{CB} 均逐渐下降且趋于稳定, 即定向高导热层的厚度对热防护效果的增强作用存在一个极值, 超过此值后热防护效果几乎不变. 这是由于定向高导热层的传热极限由导热系数和高导热层的厚度决定, 不改变导热系数只通过改变厚度无法持续增强结构的热疏导效果. 因此, 在疏导结构的设计中定向高导热层的厚度应当尽量等于产生极值的 d_2 , 以达到最优疏导效果的条件减少疏导结构的重量. 随着隔热层宽度 d_3 的增加, T_{CA} 不变且稳定在 $1653\text{ }^\circ\text{C}$, 而 T_{CB} 减小得极其缓慢, 即绝热层的厚度对外壁面最高温度没有影响, 而内壁面的影响很小.

表 2 各层宽度对应的算例

case	d_1/m	d_2/m	d_3/m
1	0.025	0.2	0.2
	0.05	—	—
	0.1	—	—
	0.15	—	—
	0.2	—	—
	0.25	—	—
2	0.05	0.025	0.2
	—	0.05	—
	—	0.1	—
	—	0.15	—
	—	0.2	—
	—	0.25	—
3	0.05	0.2	0.025
	—	—	0.05
	—	—	0.1
	—	—	0.15
	—	—	0.2
	—	—	0.25

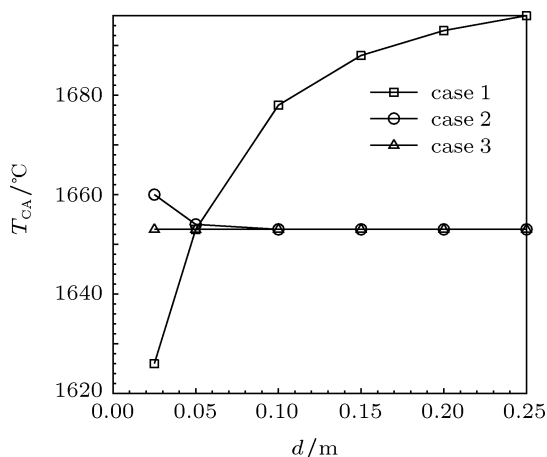


图 4 各层宽度对 T_{CA} 的影响

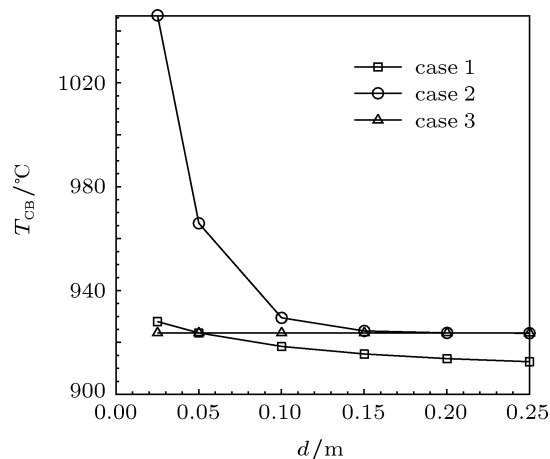


图 5 各层宽度对 T_{CB} 的影响

4.2 耐高温层导热系数的影响

表 3 为耐高温层导热系数 K_1 对疏导结构热防护的影响, 随着 K_1 的增加, T_{CA} 逐渐降低而 T_{CB} 逐渐升高. K_1 的增加强化了耐高温层内部的疏导性能, 加强了热量在耐高温层内部向低温区转移, 这也就使得外壁面最高温度下降, 但它同时也加大了向结构内部传递的热量, 使得内壁面最高温度上升. 若耐高温层也采用异向材料, 在增加 x 方向导热系数的同时降低 y 方向导热系数, 会取得更好的热防护效果.

表 3 K_1 对热防护效果的影响影响

$K_1/(\text{W/mK})$	$T_{CA}/^\circ\text{C}$	$T_{CB}/^\circ\text{C}$
20	1761	897.996
60	1653	923.685
100	1596	934.204
140	1556	939.544
180	1525	943.269
220	1499	946.142

4.3 定向高导热层 x 方向导热系数的影响

图 6, 图 7 分别为定向高导热材料 x 方向导热系数 K_{2x} 对 T_{CA} 和 T_{CB} 的影响. 由图可见, 随着 K_{2x} 的增加, T_{CA} 以抛物线形式逐渐降低, 而 T_{CB} 先下降后上升, 存在一个最小值. 这是由于随着 K_{2x} 的增加, 结构热疏导能力被提高, 强化了向低温区转移高热流密度区的热量的能力, 使得外壁面最高温度持续下降而内壁面温度先下降; 而随

随着 K_{2x} 的持续增加, 疏导结构的整体等效导热系数也增加, 进入定向高导热层的热量持续增加直至其不能完全将其转移到低温区, 剩余热量导进隔热层使得内壁面最高温度上升.

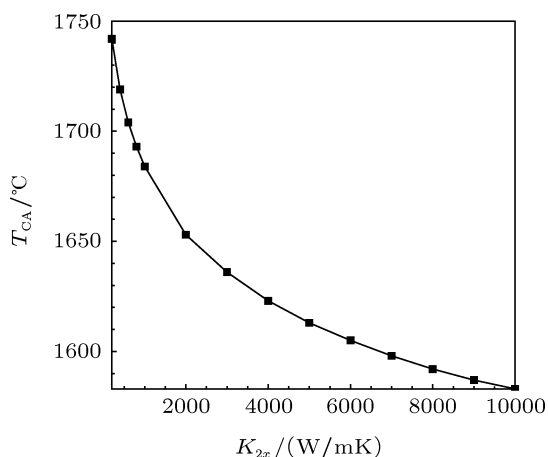


图6 K_{2x} 对 T_{CA} 的影响

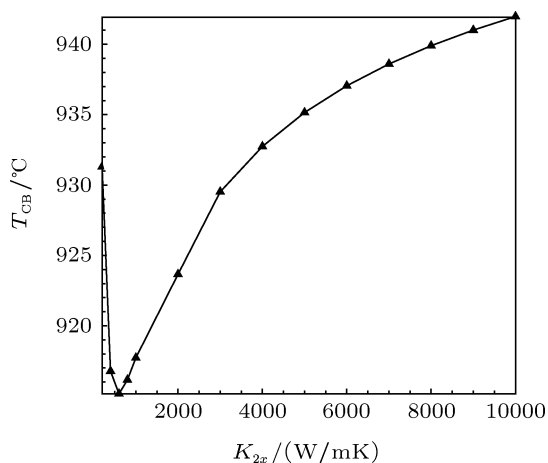


图7 K_{2x} 对 T_{CB} 的影响

4.4 高低热流密度区辐射散热面积比的影响

表4为高低热流密度区辐射散热面积比对热防护效果的影响. 随着 L_a/L 的减小, 壁面温度 T_{CA} , T_{CB} 下降, 并且 T_{CA} 和 T_{CB} 的下降幅度均趋于平缓. 即疏导结构中低热流密度区面积比重越大时, 结构整体辐射散热面积增大, 高热流密度区相对减小, 由高热流密度区传递的热量能通过更广泛的低温区以辐射能形式散发出去, 疏导结构的防热效果越好, 但随其比重的持续增加, 这种增强作用逐渐减小.

表4 辐射散热面积比对热防护效果的影响

L_a/m	L/m	L_a/L	$T_{CA}/^{\circ}C$	$T_{CB}/^{\circ}C$
0.1	0.6	1/6	1683	1125
0.1	1	1/10	1664	999.74
0.1	1.5	1/15	1654	923.69
0.1	2.0	1/20	1653	886.70
0.1	2.5	1/25	1651	863.19

4.5 气动热流比的影响

由于气动加热量的变化, T_{CA} , T_{CB} 的变化已经不能完全反映疏导结构的冷却效果, 因此选取第二组冷却参数

$$\Delta T_A = T_A - T_{CA}, \quad (6)$$

$$\Delta T_B = T_B - T_{CB}, \quad (7)$$

式中, T_A , T_B 分别为没有定向高导热层时 A, B 点温度, ΔT_A , ΔT_B 的物理意义是 A, B 点温度的下降程度, 反映了结构采用疏导方式前后的热防护效果.

由表5可知, 当 q_a , q_b 分别固定时, 随着气动热流密度比 q_a/q_b 的增大, 壁面温度 ΔT_A , ΔT_B 均以抛物线形式上升. 即疏导结构所承担的热防护区域内热流密度差异越大时, 高低温区的温差就越剧烈, 定向高导热层所传递的热量就越多, 就越能降低高温区的热载荷, 结构的热防护效果越好.

表5 动热流比对热防护效果的影响

$q_a/(W/mm)$	$q_b/(W/mm)$	q_a/q_b	$\Delta T_A/^{\circ}C$	$\Delta T_B/^{\circ}C$
10^6	2×10^5	5	105	265
10^6	10^5	10	139	355
10^6	5×10^4	20	166	425.34
10^6	2×10^4	50	189	484.54
10^6	10^4	100	199	508.09
5×10^5	10^4	50	186.5	384.80
2×10^5	10^4	20	165.89	251
10^5	10^4	10	136.44	164.74
5×10^4	10^4	5	95.77	93.35

5 结论

1. 内嵌定向高导热层疏导式系统能够较大程度的降低高温区内外壁面温度, 实现了热流由高温

区向低温区的转移,强化了整体结构的热防护能力.

2. 疏导式防热结构各层宽度的变化对热防护效果有着不同的影响,其中随着耐热层宽度的增加外壁面对高温逐渐上升而内壁面则相反;随着定向高导热层宽度的增加内外壁面最高温度均逐渐下降至一稳定值;而隔热层厚度对外壁最高温度没有影响,对内壁面对高温影响很小.

3. 耐热层导热系数的增加,强化了外壁面的疏导能力,降低外壁面最高温度,但同时也增加了向内部的导热量,使得内壁面最高温度上升.若耐热层也采用各向异性材料,降低向内的导热系数,会

取得较好的热防护效果.

4. 随着定向高导热层 x 方向导热系数的增加,外壁面最高温度逐渐下降,内壁面最高温度先下降后上升,存在一个最小值.

5. 随着辐射散热面积比与气动热流密度比的增大,疏导结构的热防护效果增强,证明了此结构非常适用于热环境差异较大的地方.

本文研究的定向高导热层疏导式结构能够在不改变外形的条件下提供良好而又稳定的防热效果,非常适用长时间工作、热环境差异较大的高超声速飞行器前缘的热防护.

-
- [1] David E 2008 *AIAA*-2008-2068
- [2] Wojcik C C, Clark L T 1991 *AIAA*-1991-1400-520
- [3] David E 1998 *NASA CR*-1998-208962
- [4] David E 1998 *NASA CR*-1998-207642
- [5] Chen L Z, Ou D B, Liu D Y 2009 *Frontier Sci.* **2** 41 (in Chinese) [陈连忠, 欧东斌, 刘德英 2009 前沿科学 **2** 41]
- [6] Jiang G Q, Ai B C, Yu J J, Chen L Z 2008 *11th Countrywide Heat Pipe Conference Weihai* September 7-11 72 (in Chinese) [姜贵庆, 艾邦成, 俞继军, 陈连忠 2008 第十一届全国热管会议, 威海 9月7—11日 72]
- [7] Li T Q, Hu Z J 2007 *Aeros. Mater. Techn.* **1** 16 (in Chinese) [李同起, 胡子君 2007 航空材料工艺 **1** 16]
- [8] Bao W X, Zhu C C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3552 (in Chinese) [保文星, 朱长纯 2006 物理学报 **55** 3552]
- [9] Wang Z L, Liang J G, Tang D W, Zhu Y T 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3391 (in Chinese) [王照亮, 梁金国, 唐大伟, Zhu Y T 2008 物理学报 **57** 3391]
- [10] Hou Q W, Cao B Y, Guo Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7809 (in Chinese) [侯泉文, 曹炳阳, 过增元 2009 物理学报 **58** 7809]
- [11] Sun J, Liu W Q 2011 *Acta Aeron. Astron. Sin.* **32** 1622 (in Chinese) [孙健, 刘伟强 2011 航空学报 **32** 1622]
- [12] Guo Z Y, Cao B Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4273 (in Chinese) [过增元, 曹炳阳 2008 物理学报 **57** 4273]

Analysis of thermal protection mechanism of leading structure embedded high directional thermal conductivity layer*

Sun Jian[†] Liu Wei-Qiang

(*Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 13 October 2011; revised manuscript received 8 November 2011)

Abstract

The structure of embedded high thermal conductivity layer leading thermal protection is considered as thermal protection system to prevent hypersonic vehicle from the serious aerodynamic heating. By numerical method, we analyze the cooling effect of the leading thermal protection system under given conditions. The maximum outer surface temperature and the inner surface temperature are reduced by 9.1% and by 31.5% respectively. Both high temperature region and low temperature region are blocked in the external layer and the inner temperature distributions are more uniform. The transfer of heat from high temperature region to low one is achieved, the thermal load of the high temperature area is weakened, and the ability of leading thermal protection system is strengthened. The research shows that the cooling effect of leading system increasing with the increasing of aerodynamic flux ratio and the area ratio of radiative surfaces. The influences of structure parameters and materials properties on thermal protection are discussed, which provides some references for the design of the structure and the selection of materials.

Keywords: high directional thermal conductivity layer, leading thermal protection, aerodynamic heating, heat radiation

PACS: 44.05.+e, 44.10.+i, 44.40.+a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.90916018), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200899980006).

[†] E-mail: sunjian19850620@163.com