

长时间气动加热飞行器的隔热机理

姜贵庆 俞继军

(中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

文 摘 主要论述长时间气动加热飞行器热防护系统隔热机理的新概念, 提出传统的单相固体热传导由于其隔热机制的局限性, 已不能解决新型高超声速式飞行器的隔热问题, 代之以气—固的辐射—传导—对流复合传热机制。多相复合传热机理可解决长时间气动加热飞行器隔热的问题。

关键词 隔热机理, 辐射, 传导, 对流

Insulation Mechanism of Spacecraft With Long Time Aero-Heating

Jiang Guiqing Yu Jijun

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract The new concept of insulation mechanism of the thermal protection system for spacecraft with long time aero-heating is presented. It is pointed out that traditional heat conduction of single phase solid can not solve the insulation problem of spacecraft with long time aero-heating because of limitation of its insulation. Therefore the new insulation mechanism is heat conduction mechanism with multi-phase (gas-solid) and complex (radiation-conduction-convection) instead of single phase solid heat conduction.

Key words Insulation mechanism, Radiation, Conduction, Convection

1 引言

传统的弹道导弹气动加热时间短, 隔热是次要问题, 新型高超声速式飞行器巡航时间长, 可达 3 000 s 左右, 表面热流密度虽低, 但总加量热很大, 无法单纯依靠热化学吸热达到热防护的目的, 隔热就成为热防护的主要问题。

传统的隔热机制采用低热导率的固体材料, 隔热性能受到很大限制, 原因是固体的内部温度不仅取决于材料的热导率, 更取决于材料的导温系数 $= k / C_p$, 导温系数与材料的热导率 k 成正比, 与材料的密度 ρ 和比热容 C_p 成反比, 由于固体材料当热

导率减小时, 密度亦会减小, 因此, 导温系数值下降不大, 即它的隔热性能有一极限值。

基于单相固体热传导已不能满足新型高超声速飞行器的防热要求, 多相复合的传热机理已引起设计人员的关注, 文献 [1~3] 对复合的传热机理进行了理论和实验研究, 并对铝纤维多孔介质隔热材料的隔热性能进行预测, 与实验结果进行了比较, 符合较好。

2 固体热传导的隔热机制的局限性

2.1 常用防热材料的隔热性能

厚度为 20 mm 平板, 表面温度保持在 1 100 K,

收稿日期: 2004 - 10 - 28; 修回日期: 2005 - 02 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90205034)

作者简介: 姜贵庆, 1934 年出生, 研究员, 主要从事气动热力学与热防护的研究工作

预测背面温度的变化历程,预测结果见表 1。

表 1 背面温度的变化历程

Tab 1 Variations of back temperature

材 料	$t_{100} / s^{(1)}$	$T_{1000s} / K^{(2)}$
钛合金	20	1 054
高温合金	30	1 067
高硅氧 酚醛	190	738.8
玻璃布 酚醛	210	731.5
碳 酚醛	200	728.7
石棉 酚醛	150	835.0
低密度 /有机硅	150	763.0

注:1) t_{100} 为背面温度达到 100 的时间;2) T_{1000s} 为时间为 1 000 s 时的背面温度。

表 1 的结果表明:

(1)现有的防热材料在短时间有良好的隔热性能,在 150 s内,五种复合材料的背面温度均不会超过 100 ;

(2)由于固体材料隔热性能的局限性,长时间隔热性能无法满足防热要求,在 1 000 s时,五种复合材料的背面温度都超过 723 K。

2.2 固体材料隔热性能局限性的分析

考虑一维热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中, λ 为导温系数。式 (1)不能直观给出导温系数对背面温度的影响。引进变量

$$\eta = \frac{y}{(\lambda t)^{0.5}}, \quad f = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}$$

式中, T_0 为初始温度, T_w 为表面温度,式 (1)可化为常微分方程:

$$\frac{d^2 f}{d\eta^2} + \frac{df}{d\eta} = 0 \quad (2)$$

分析式 (2)的特性, f 为单调函数,当 η 增加时, f 是下降的,即温度是下降的, η 与 f 成反比, η 大,传热性能好,隔热性能差,反之, η 小,传热性能差,隔热性能好,一般来说,由于材料的热导率与密度成正比,因此,降低材料的热导率的同时,也会降低材料的密度,材料隔热性能的提高受到极大的限制。

3 隔热性能的新机理

目前,国外在探索一种新的隔热机制,即多相复合传热机制^[4-5],其隔热性能明显提高。多相是指固—气二相或固—液—气三相,复合传热是指传导、辐射、对流混合传热,气相隔热是非常有效的隔热机制,在低压下,空气有极好的隔热性能,液态的隔热效果比固态好。在气—固二相体系中,考虑辐射的一维热传导方程^[6]为

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r^*}{\partial x} \quad (3)$$

初始条件

$$T(x, 0) = T_0 \quad (4)$$

边界条件

$$T(0, t) = T_1(l) \quad (5)$$

$$T(L, t) = T_2(l) \quad (6)$$

辐射热流梯度由下式给出

$$\frac{\partial q_r^*}{\partial x} = (1 - w) (G - 4 T^4) \quad (7)$$

式中, w 为衰减系数, w 为散射的反射率, σ 为史蒂芬-玻尔兹曼常数, G 为入射辐射能。由以下二阶微分方程得到

$$-\frac{1}{3^2 (1 - w)} \cdot \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + G = 4 T^4 \quad (8)$$

(3)式中

$$k = f k_s + (1 - f) k_g \quad (9)$$

式中, f 为固态质量分数; k_g 为有效气体热导率; k_s 为有效固体热导率; $k_s = f^2 k_s^*$, k_s^* 为纤维材料的热导率。

$$k_g = \frac{K_g^*}{1 + \frac{2(2 - a)}{a} \cdot \frac{2}{+1} \cdot \frac{m}{P_r L_c}} \quad (10)$$

式中, K_g^* 为大气压下的气体热导率, a 为热适应系数, m 为分子平均自由程, L_c 为特征长度。

图 1、图 2 给出利用上述方法对多层结构的内部温度计算结果。

图 1 为表面辐射平衡温度随时间的变化历程,图 1 的计算结果表明,表面温度保持在 1 200 K 时,加热时间约为 1 000 s。图 2 为背面温度随时间的变化历程,图 2 的计算结果表明,在图 1 的表面温度保持在 1 200 K 的加热时间内,其最高的表面温度仅为 450 K。这比

单纯固体传导隔热具有明显的优越性。

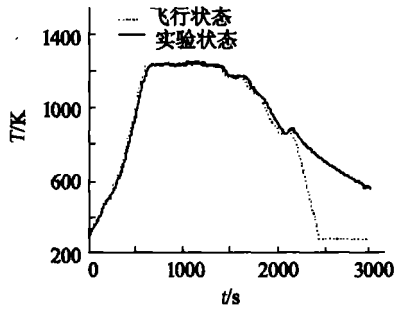


图 1 表面辐射平衡温度

Fig 1 Surface radiant equilibrium temperature

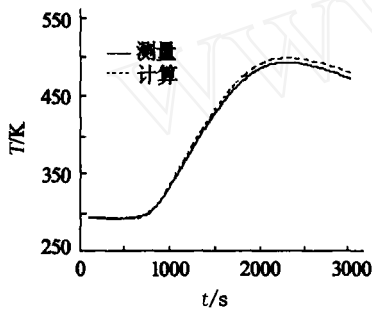


图 2 内部温度随时间的变化历程

Fig 2 Interior temperature variations with time

4 结论

本文的研究表明:传统的固体热传导难以解决长时间气动加热的隔热问题,利用多相(气-固)与复合传递机制(辐射、传导及对流)可以有效解决长时间气动加热的隔热问题。本文的算例表明多相的复合传递机制具有极大的隔热潜力。

参考文献

- 1 Kamran Dergabeigs Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating AIAA 2001: 2 834
- 2 Kamvan Darjabcig Heat transfer in high temperature fibrous insulation AIAA 2002: 3 332
- 3 Marshall J et al Internal radiation transport and effective thermal conductivity of fibrous ceramic insulation AIAA 2001: 2 822
- 4 Petrov V A. Combined radiation and conduction heat transfer in high temperature fiber thermal insulation International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997; 40 (9): 2 241 ~ 2 247
- 5 Inakoma H, Sang K, Okazard U. The effective thermal conductivity of fibrous insulation International Chemical Engineering 1990; 36: 738 ~ 746

(编辑 吴坚)

(上接第 15 页)

16 Kessler M R, White S R. Self-activated healing of delamination in woven composites Composites A, 2001; 32: 683

17 Kessler M R, White S R. Cure kinetics of the ring-opening metathesis polymerization of dicyclopentadiene Journal of Polymer Science A: Polymer Chemistry, 2002; 40: 2 373

18 Brown E N, Sottos N R, White S R. Fracture testing of a self-healing polymer composite Experimental Mechanics, 2002; 42: 372

19 Grove N R, Kohl P A et al Functionalized polynorbornene dielectric polymers: adhesion and mechanical properties Journal of Polymer Science B, 1999; 37: 3 003

20 Skipor A, Scheifer S, Olson B. Self-healing polymer compositions USP application number: 20040007784, 2004

21 Bielawski CW, Benitez D, Grubbs R H. An "endless" route to cyclic polymers Science, 2002; 297: 2 041

22 Chen X, Dam M A et al A thermally remendable cross-linked polymeric material Science, 2002; 295: 1 698

23 Kessler M R, Sottos N R, White S R. Self-healing structural composite materials Composites A, 2003; 34: 743

24 Brown E N, White S R, Sottos N R. Microcapsule induced toughening in a self-healing polymer composite J. of Materials Science, 2004; 39: 1 703

25 Dry C. Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials Composite Structures 1996; 35: 263

26 Dry C, Corsaw M, Bayer E. A comparison of internal self-repair with resin injection in repair of concrete Journal of Adhesion Science and Technology, 2003; 17: 79

27 Brown E N, Kessler M R et al In situ poly(urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene Journal of Microencapsulation, 2003; 20: 719

28 Yamazaki M. Industrialization and application development of cycloolefin polymer Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2004; 213: 81

(编辑 李洪泉)

— 29 —