

## 硅基材料烧蚀产物对高温气体流场辐射影响

高铁锁,董维中,江涛,丁明松,桂业伟

(中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所,四川 绵阳 621000)

**摘要:** 高温气体流场辐射特性在高超声速飞行器目标探测、识别和气动热环境预测等方面具有重要应用。基于带辐射模型,考虑硅基防热材料热化学烧蚀产物的可见光和红外辐射机制,建立了烧蚀产物光谱参数的计算方法,发展了高温气体烧蚀流场辐射特性计算软件。高温气体烧蚀流场的数值模拟结果,利用所发展的辐射计算软件,计算分析了自由飞弹道靶实验模型及高超声速钝头体流场的辐射特性,重点研究了各种烧蚀产物的影响。研究表明:烧蚀产物对流场红外辐射特性具有重要影响。

**关键词:** 高超声速飞行器; 硅基材料; 流场; 高温气体; 烧蚀产物; 辐射特性

**中图分类号:** V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0042-06

## Effects of ablation products of silicon-based materials on radiation of high-temperature gas flow field

Gao Tiesuo, Dong Weizhong, Jiang Tao, Ding Mingsong, Gui Yewei

(Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The radiation characteristics of high-temperature gas flow have important application in detection, discrimination and aerothermal environment prediction for hypersonic vehicles. Based on a band model and considering the visible and infrared radiation of the ablation products of silicon-based materials for heat-shield, the method and code were developed to compute spectral parameter of ablation products and the radiation characteristics of high temperature gas flow field. The flow field parameters resulted from the numerical simulation and used the code, the radiation characteristics of flow over a model in a free-flight ballistic range and hypersonic blunt body were computed, and particularly the ablation effects were studied. The research shows that the ablation products have important effects on infrared radiation of the flow field.

**Key words:** hypersonic vehicles; silicon-based materials; flow field; high-temperature gas; ablation products; radiation characteristics

收稿日期:2014-05-05; 修订日期:2014-06-10

基金项目:国家自然科学基金(91216204)

作者简介:高铁锁(1965-),男,研究员,硕士,主要从事气动物理计算方面的研究。Email:gaots19654@163.com

通讯作者:江涛(1981-),男,硕士,主要从事气动物理计算方面的研究。Email:fengqiaoren999@163.com

## 0 引言

空间目标红外探测能力随红外探测技术的发展不断提高,研究空间目标的红外辐射特性对于反探测识别具有重要价值<sup>[1-2]</sup>。高超声速飞行目标的红外辐射特性取决于受气动加热影响的飞行器的表面及其周围高温气体流场的辐射特性。

硅基材料是一类常用的热防护材料,它是二氧化硅为主要成分复合材料,由 C-H-O-Si 原子系统组成,其热化学烧蚀机制涉及酚醛树脂的热解、SiO<sub>2</sub> 融化液态层的蒸发及碳硅反应等物理化学过程。以硅基材料作为隔热材料的高超声速飞行器在大气中飞行时,与大气发生相互作用,其周围绕流空气发生离解和电离,表面材料发生热化学烧蚀。烧蚀产物被引射到流场中,和高温空气组分发生反应形成含烧蚀产物的高温气体流场。硅基材料烧蚀流场包含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、各种碳氢化合物和高温空气组分等,在高温条件下它们的内部自由度被激发,从高能级向低能级跃迁时,产生大量的原子和分子光谱,从而对高超声速飞行器目标的辐射特性产生影响。

针对高超声速飞行器高温流场和发动机尾喷焰流场的热辐射特性,国外开展了大量研究,形成了相对成熟的辐射模型和计算软件,如国外著名的高温非平衡空气计算软件(NEQAIR)、标准红外辐射计算软件(SIRRM)以及优化的非平衡辐射计算软件(LORAN)等<sup>[3-5]</sup>。这些软件已经广泛地应用于高温气体流场红外辐射特性及辐射加热的计算分析。国内也发展了相应的计算方法和分析软件<sup>[6]</sup>。尽管国内外已经发展了各种辐射模型和计算软件,但由于高温气体动力学问题的复杂性,高温气体辐射精细建模以及在高超声速飞行器绕流辐射与辐射加热计算中的应用还面临诸多挑战,辐射-气体动力学干扰效应、局部热力学非平衡(NLTE)气体辐射建模与验证、自吸收气体非平衡辐射计算效率等问题仍然是高温气体动力学领域的前沿研究课题<sup>[7-9]</sup>。

目前国内外公开发表的文章中,有关高温空气、发动机燃气和含碳基材料烧蚀产物的高温流场辐射特性研究较多<sup>[10]</sup>,但对于含硅基材料烧蚀产物的高温流场气体的辐射特性的研究工作还未见发表。碳基和硅基材料的热化学烧蚀产物及其在流场中的分

布特性具有很大的差异,它们对流场辐射特性的影响必然存在很大不同。文中以硅基材料烧蚀流场为研究对象,发展形成了含硅基材料热化学烧蚀产物的高温气体流场辐射计算方法和软件。

计算分析高温气体烧蚀流场的辐射特性,首先需要已知流场参数。笔者已经发展了模拟隔热材料烧蚀效应的高温气体非平衡流场数值计算软件,进行了硅基材料高温烧蚀流场数值模拟研究,获得了烧蚀产物和空气组分的质量分数与温度等流场参数<sup>[11]</sup>,文中在此工作基础上研究高温烧蚀流场的辐射特性,重点分析硅基材料烧蚀产物对飞行目标全流场(包括绕流及底部尾迹流场)的可见和红外辐射特性的影响。

## 1 计算方法

### 1.1 流场数值模拟

流动控制方程为包含化学非平衡源项的 Navier-Stokes 方程,在计算坐标系下其无量纲化形式如下:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial \zeta} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{H}_v}{\partial \zeta} + \bar{W} \right) \quad (1)$$

式中:  $\bar{Q} = J^{-1}[\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E]^T$ 。数值模拟含硅基材料烧蚀产物的高温气体流场,采用 24 组分化学反应模型,其中包含 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, NO<sup>+</sup>, CO, CO<sub>2</sub>, O, N, C, C<sub>2</sub>, CN, H<sub>2</sub>, H, H<sub>2</sub>O, OH, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H, CH<sub>2</sub>, CH, HCO, Si, SiO, SiO<sub>2</sub>, e 等烧蚀产物和高温空气组分。基于气-固(液)交界面上的壁面能量和组分质量平衡关系建立烧蚀壁面条件,把控制公式(1)和烧蚀壁面条件耦合求解。详细的气体反应模型、热化学烧蚀模型及耦合求解方法见参考文献[11]。

### 1.2 流场辐射计算

高温气体流场热辐射的控制方程为局部热力学平衡(LTE)下的辐射传输方程:

$$\frac{dI_v}{d\ell} = k_v(B_v - I_v) \quad (2)$$

式中:  $\ell$  为辐射传输路径;  $I_v$  为光谱辐射亮度;  $k_v$  为光谱吸收系数;  $B_v$  为黑体辐射强度,其表达式为:

$$B_v(T) = \frac{2hv^3/c^2}{e^{hv/kT} - 1} \quad (3)$$

通过对硅基材料烧蚀流场中 24 个化学组分辐射机制和它们在流场中浓度大小及分布的细致分析,在可见光谱区主要考虑如下 6 种辐射机制:

(1) NO 的  $\beta$  带系 ( $B^2\Pi \rightarrow X^2\Pi$ ); (2) O<sub>2</sub> 的 S-R 带系 ( $B^3\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ ); (3) N<sub>2</sub> 的第一正带系 ( $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$ ); (4) N<sub>2</sub> 的第二正带系 ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ); (5) C<sub>2</sub> 的电子跃迁带系 ( $A^3\Pi_g \rightarrow X^3\Pi_u$ ); (6) CH 的电子跃迁带系 ( $A^3\Delta \rightarrow X^2\Pi$ )。

在红外光谱区主要考虑如下 8 种辐射机制:

(1) NO 基态 ( $5.3 \mu\text{m}$ ) 和第一谐波带系 ( $2.7 \mu\text{m}$ ); (2) CO 基态 ( $4.67 \mu\text{m}$ ) 和第一谐波带系 ( $2.34 \mu\text{m}$ ); (3) OH 的基态 ( $2.8 \mu\text{m}$ ) 和第一谐波带系 ( $1.4 \mu\text{m}$ ); (4) CO<sub>2</sub> 的红外带系 ( $15 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 、 $2.7 \mu\text{m}$ ); (5) H<sub>2</sub>O 的红外带系 ( $6.27 \mu\text{m}$ 、 $2.66 \mu\text{m}$ 、 $1.88 \mu\text{m}$  等); (6) CN 的红外带系 ( $4.67 \mu\text{m}$ ); (7) CH 的振转带系 ( $3.6 \mu\text{m}$ 、 $1.9 \mu\text{m}$ ); (8) C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 的振转带系 ( $13.7 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \mu\text{m}$ )。

另外还考虑了 O 和 N 的连续谱辐射。

考虑到上述高温烧蚀流场气体辐射机制的复杂性,在求解方程(2)时基于光学薄的假设,采用带辐射模型计算光谱吸收/发射系数<sup>[12]</sup>,在求解飞行目标绕流流场沿某一观测方向的辐射强度时(认为目标距探测器无限远),首先采用改进的 Z-buffer 消隐技术<sup>[13]</sup>,消除再入体对高温流场辐射的遮挡效应,其次计算上述辐射机制下未遮挡流体网格体积单元在每个谱带内的光谱辐射强度,再对这些网格体积单元的光谱辐射强度进行体积分得到该观测方向的高温气体流场的光谱辐射强度,最后对高温气体流场光谱辐射强度在特定探测光谱波段内积分获得该光谱波段的辐射强度。

## 2 计算结果

文中计算外形均为轴对称体,0°攻角。视角定义为视线与飞行目标对称轴之间的夹角,0°对应从再入体的正前方观测的方向。

为了验证含硅基材料烧蚀产物的高温气体流场辐射计算模型和方法的可行性,计算了两组自由飞弹道靶实验状态,并和实验测量结果进行了比较。试验模型外形为小钝锥体,红外测量波段是 3~5  $\mu\text{m}$ ,两组试验状态分别对应低速低压和高速高压条件,模型飞行速度分别是 2.497 km/s 和 4.095 km/s,对应靶室压力分别是 2.20 kPa 和 6.50 kPa。图 1 和图 2 给出两组试验状态下模型尾流辐射强度计算与测量值比较,同时给出了模型绕流及尾流温度场的数值模

拟结果。在模型头身部不仅有绕流气体的辐射还包括模型表面的辐射,这里主要验证高温气体流场的辐射模型与计算方法,因此只计算了模型尾流流场的辐射。从图 1 和图 2 可以看出,低速低压条件下的计算和试验结果具有较好的一致性,图 1 和图 2

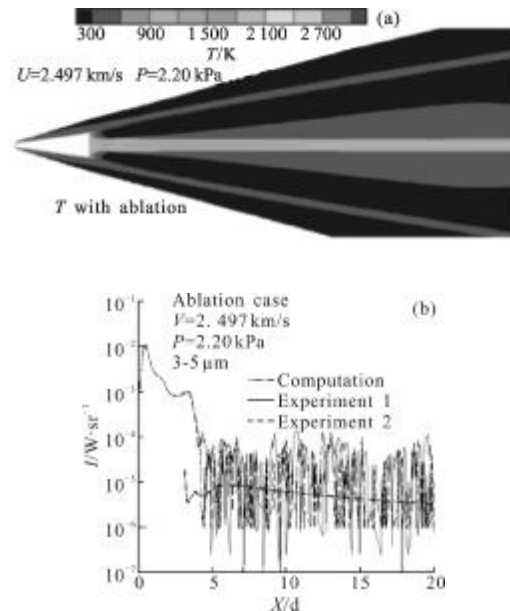


图 1 模型尾流辐射计算与实验比较(状态 1)

Fig.1 Computational and experimental radiation intensity of wake flow(case 1)

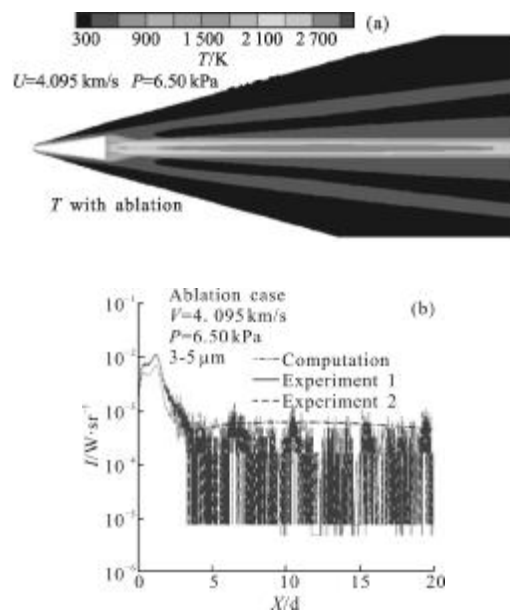


图 2 模型尾流辐射计算与实验比较(状态 2)

Fig.2 Computational and experimental radiation intensity of wake flow(case 2)

的(a)、(b)图分别为流场温度分布和尾流辐射强度,此时模型表面材料热解和烧蚀量较小,而高速高压条件下计算比测量值偏高,计算值接近测量值的上限(见图 2),此时模型材料烧蚀量较大,烧蚀产物对尾流辐射的影响增强,尾流的辐射强度值较前一组状态增加了一个量级左右。计算值偏高的可能原因是没有考虑高温气体对辐射的吸收等影响因素。

为了研究硅基材料烧蚀产物对流场辐射特性的影响,选择钝头双锥体外形<sup>[11]</sup>,飞行高度和速度分别为 30 km 和 5 km/s,来流条件中除考虑大气中的 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 外,还考虑了大气微量组分 CO<sub>2</sub> 和 CO。图 3(a)给出靠近飞行体肩部(与飞行体底部相邻)位置的流场组分质量分数沿 y 轴分布(垂直于飞行体对称轴),图 3(b)给出全流场温度分布云图。从图 3(a)可见硅基材料热化学烧蚀产物主要有 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CO 和 OH 等,这些烧蚀产物经飞行体头身部流入尾迹,从而对尾迹流场的辐射特性产生影响。O<sub>2</sub> 过激波后发生分解接近壁面时又发生少量复合,而 N<sub>2</sub> 只有少量分解。从图 3(b)可见,尾迹流场温度在 3 000 K 以下,尾流高温区主要集中在靠近尾流轴线的粘性内尾流区域。

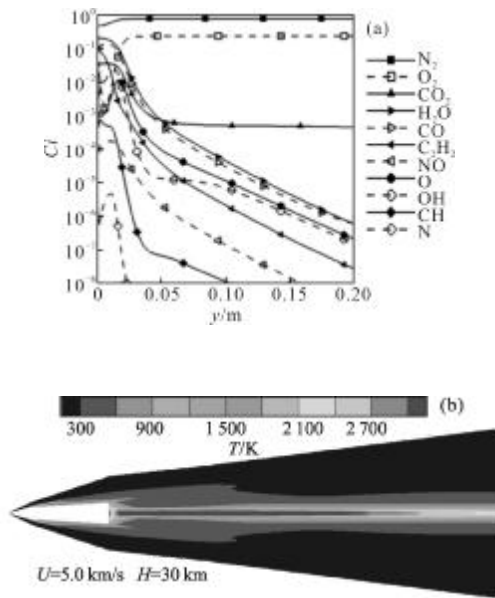


图 3 组分质量分数和温度分布

Fig.3 Distribution of species mass fraction and temperature contours

图 4 为考虑烧蚀和不考虑烧蚀产物影响的两种情况下在不同光学波段的全流场(包括头身部绕流和

尾流)辐射随视角分布的比较图(a)为可见利短波红外,图(b)为中波和长波红外。

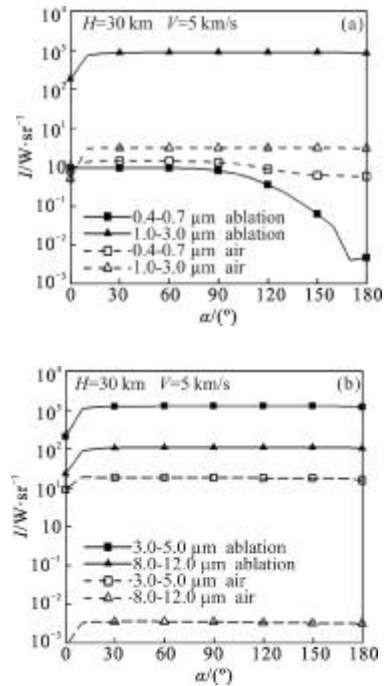


图 4 烧蚀产物对流场辐射强度影响

Fig.4 Effects of ablation products on radiation intensity of flowfield

从图 4 可见,视角大于 10°后,3 个红外波段的辐射强度变化都比较平缓,说明无论是烧蚀情况还是非烧蚀情况,相对于头身部绕流,尾流的红外辐射占主导地位。在红外波段,考虑烧蚀情况下的辐射强度明显高于不考虑烧蚀的辐射强度,而在可见光波段 0.4~0.7 μm 则恰恰相反(除 0°视角附近外)。考虑与不考虑烧蚀情况相比,在 1~3 μm 和 3~5 μm 波段,全流场辐射强度最大增加约两个量级,在 8~12 μm 波段则增加地更多,最大增加约 4 个量级。在 0.4~0.7 μm 波段和大于 0°视角条件下,随着视角增大到 90°,考虑和不考虑烧蚀的全流场辐射强度的变化比较平缓,在视角大于 90°以后,飞行体对头身部绕流的遮挡区域逐渐增大,随着视角增大,二者开始下降,但烧蚀情况下全流场辐射下降很快,这表明烧蚀情况下的可见光辐射主要来自飞行体头部绕流流场,而非烧蚀情况下则主要来自温度较高的尾迹流场。通过比较不难发现,考虑与不考虑烧蚀两种情况,全流场辐射强度从大到小对应的三个红外波段依次是 3~5 μm、1~3 μm 和 8~12 μm,这主要取决于流场中主要烧蚀组分的辐射机制(见图 5)。

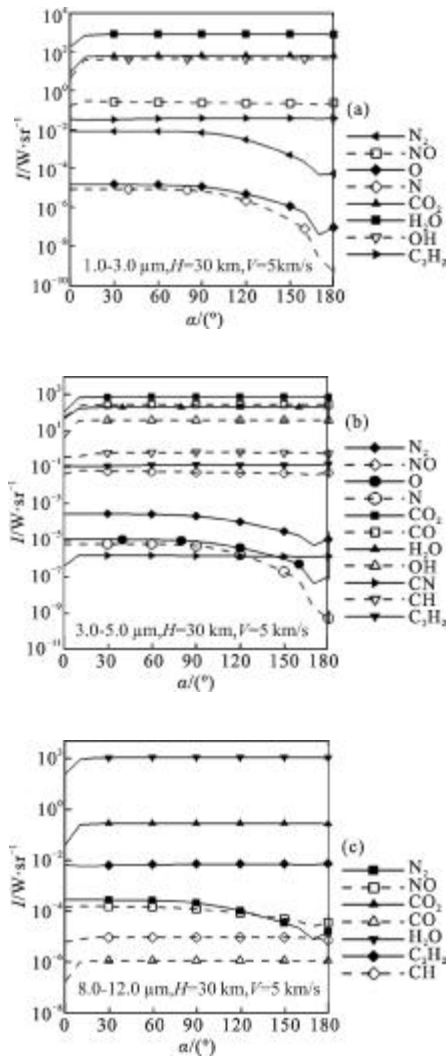


图 5 不同红外波段组分辐射强度分布

Fig.5 Species radiation intensity in different infrared bands

图 5 给出全流场中气体组分在不同红外波段的辐射强度随视角的变化。从图 5 可见,在 1~3  $\mu\text{m}$  波段,  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{OH}$  对飞行目标全流场辐射的贡献是主要的;在 3~5  $\mu\text{m}$  波段,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{OH}$  分子的贡献是主要的;在 8~12  $\mu\text{m}$  波段,  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的贡献是主要的,  $\text{C}_2\text{H}_2$  也有一定贡献。气体组分对全流场辐射的贡献主取决于流场中组分的质量分数、温度分布及其在此温度下的辐射机制。图 5 中主要烧蚀产物的辐射强度与图 4 中全流场辐射强度的变化特征一致,表明烧蚀产物决定了全流场辐射的变化特征。

图 6 给出两个不同高度条件下不同区域流场的辐射强度随视角的变化情况。从图 6 不难看出,在 3~5  $\mu\text{m}$  波段,全流场辐射强度主要取决于尾迹流

场,头身部绕流流场的辐射贡献相对较小,只是在视角  $0^\circ$  附近,由于尾流高温区域被飞行体遮挡,此时观测到的头身部绕流和全流场的辐射强度值比较接近。实际上,在其他两个红外波段,尾流同样在全流场辐射中占主导地位。从该图还可以看出,同一飞行速度下,随着飞行高度降低,全流场的辐射强度迅速降低,从 30~50 km 降低了近一个量级。

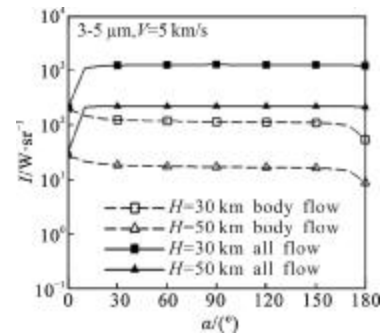


图 6 不同高度不同流场区域辐射强度比较

Fig.6 Radiation intensity of different altitudes and flowfield regions

### 3 结论

文中发展了含硅基材料烧蚀产物的高温气体流场辐射特性计算方法和软件,计算分析了自由飞弹道靶实验模型和飞行速度高达 5 km/s 的高超声速钝头双锥体绕流及底部尾迹流场的辐射特性。通过以上计算分析获得以下初步结论:

(1) 表面材料为硅基耐热材料的弹道靶实验模型尾迹流场的红外辐射分布计算和实验测量结果在定性上是一致的,初步验证了计算模型、算法和软件的可行性。

(2) 硅基材料热化学烧蚀产物中,对流场红外辐射影响较大的烧蚀组分是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{OH}$  和  $\text{C}_2\text{H}_2$  等组分。烧蚀产物对流场辐射影响很大,在不同红外波段使流场辐射强度最大增加约 2~4 个量级。

(3) 飞行目标全流场中,尾流对辐射的影响占主要地位。全流场的可见光辐射相对 3 个红外波段的辐射相对较弱,3 个红外波段中,3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射最强,1~3  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  波段次之。

硅基耐热材料的烧蚀机理非常复杂,表面硅基材料烧蚀情况下的高超声速飞行器流场辐射计算结果依赖于模拟烧蚀效应的 CFD 数值方法、流场辐射模型与计算方法以及化学动力学数据和高温气体光

谱数据等诸多环节,给计算分析带来很大困难。为保证烧蚀流场辐射计算结果的可靠性和精准度,需要进一步完善高温气体流场及其辐射的理论模型、计算方法和软件,加强每个环节的理论计算和实验测量的校核验证。

#### 参考文献:

- [1] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3146-3153. (in Chinese)  
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3146-3153.
- [2] Sun Chengming, Yuan Yan, Huang Fengzhen, et al. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 563-568. (in Chinese)  
孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 563-568.
- [3] Park C. Nonequilibrium air radiation (NEQAIR) program: User's Manual[S]//NASA-TM, 1985: 86707.
- [4] Ludwig C B, Malkmus W, Rcardon J E, et al. The standard infrared radiation model[C]//AIAA, 1981, 81: 1051.
- [5] Hartung L C. Predicting radiative heat transfer in trermochemical nonequilibrium flow field. Theory and user's manual for the LORAN code [C]//NASA Technical Memorandum, 1994: 4564.
- [6] Zhang Zhicheng, Gao Tiesuo, Dong Weizhong, et al. Study on modeling of reentry vehicle signatures [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1): 7-12. (in Chinese)  
张志成, 高铁锁, 董维中, 等. 再入飞行器目标特性建模研究[J]. *实验流体力学*, 2007, 21(1): 7-12.
- [7] Laux C O, Gessman R J, Hilbert B, et al. Experimental study and modeling of Infrared Air plasma radiation [C]//AIAA, 1995, 95: 2124.
- [8] Levin D A, Candler G V, Limbaugh C C, et al. Multi-spectral Shock layer radiance from a hypersonic slender body [C]//AIAA, 1999, 99: 3747.
- [9] Clemente M D, Ferrarella D. Convective and radiative heat flux estimation on a re-entry capsule[C]//AIAA, 2010:5067.
- [10] Laux, C O, Winter M, Merrifield J, et al. Influence of ablation products on the radiation at surface of a blunt hypersonic vehicle at 10km/s[C]//AIAA, 2009: 3925.
- [11] Dong Weizhong, Gao Tiesuo, Ding Mingsong, et al. Numerical analysis for the effect of Silicon based material ablation on the flowfield around reentry blunt body [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2010, 28(6): 708-714. (in Chinese)  
董维中, 高铁锁, 丁明松, 等. 硅基材料烧蚀产物对再入体流场特性影响的数值计算 [J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(6): 708-714.
- [12] Gao Tiesuo, Dong Weizhong, Zhang Zhicheng. Computation and analysis for infrared radiation of thermochemical nonequilibrium flow[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(1): 32-35. (in Chinese)  
高铁锁, 董维中, 张志成. 热化学非平衡流动红外辐射计算分析[J]. *空气动力学学报*, 2008, 26(1): 32-35.
- [13] Jiang Tao, Gao Tiesuo, Ding Mingsong, et al. Numerical study on the radiation characteristics of complex reentry targets [C]//The 15th Hypersonic Aerodynamics & Aeroheating Conference, 2009: 320-323. (in Chinese)  
江涛, 高铁锁, 丁明松, 等. 复杂外形再入目标辐射特性计算研究 [C]//第 15 届高超声速气动力/热学术交流会会议论文集, 2009: 320-323.