

红外窗口气动热辐射效应评估方法

王亚辉^{1,2,3}, 王 强¹, 张伯川^{2,3}, 郑文娟^{2,3}, 刘 彦^{2,3}, 徐 力^{2,3}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854; 3. 宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 气动热辐射效应导致红外探测制导系统的性能降低甚至失效, 而红外窗口是气动热辐射效应评估的关键因素。通过分析红外辐射在红外窗口中的传输特性, 提出一种红外窗口气动热辐射效应评估方法, 基于等温状态试验, 评估了某超音速飞行器红外探测系统蓝宝石红外窗口在中波 3.7~4.8 μm 波段的气动热辐射效应。研究结果显示, 红外窗口暴露于大气环境后, 蓝宝石窗口导致的气动热辐射效应迅速上升, 表现为红外窗口透过率下降约 10%, 仍然在 0.9 以上, 而自辐射迅速增强约 458 倍, 相当于约 125 $^{\circ}\text{C}$ 黑体, 在探测器获取总辐射中的比例大于 78%。在对地探测应用中, 对于厚度小于 20 mm 的蓝宝石红外窗口, 窗口温度在 100~350 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 随着厚度增加, 透过率下降, 自辐射增强, 总辐射也增强, 自辐射在总辐射中的比例增加, 易造成探测器饱和, 对探测系统影响较大。

关键词: 气动热辐射效应; 红外窗口; 自辐射; 透过率

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0204001

Evaluation method for aero-thermo-radiation effect of IR window

Wang Yahui^{1,2,3}, Wang Qiang¹, Zhang Bochuan^{2,3}, Zheng Wenjuan^{2,3}, Liu Yan^{2,3}, Xu Li^{2,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China)

Abstract: The windows of IR detection systems becomes the main factor of the aero-thermo-radiation effect, which reduces the performance of these IR systems, or even makes these systems fail. By analyzing thermal radiation propagating in IR windows, a participating medium, an evaluation method for aero-thermo-radiation effect of the non-isothermal IR windows was proposed, based on the experimental results of the isothermal state, include self-radiation and transmittance. Aim to an MWIR detection system of a hypersonic vehicle, aero-thermo-radiation effect of a sapphire IR window was evaluated in 3.7–4.8 μm . The results indicate that, as the sapphire IR window is exposed in high-temperature and high-speed airflow, the aero-thermo-radiation effect of the window intensifies as temperature rises rapidly, the transmittance drops about 10%, still bigger than 0.9, otherwise the self-radiation enhances 458 times approximately, equal to that of blackbody about 125 $^{\circ}\text{C}$. For sapphire windows in 100–350 $^{\circ}\text{C}$, which thickness are smaller than 20 mm, as thickness increases, the transmittance decreases, self-radiation increases, and total radiation behind sapphire windows is increased, of which the ratio of self-radiation

收稿日期: 2015-06-12; 修订日期: 2015-07-19

基金项目: “十二五”预研项目(51301030101)

作者简介: 王亚辉(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事气动光学效应方面的研究。Email: wangyahuis@yeah.net

increases. So, self-radiation would drive detector into saturation easily, of which the influence on the MWIR detection system is bigger than that of transmittance.

Key words: aero-thermo-radiation effect; IR window; self-radiation; transmittance

0 引言

飞行器在大气层内超音速飞行时,高温激波强烈的气动加热使红外窗口的温度快速上升,高温红外窗口和激波气体引起强烈的气动热辐射效应,使目标探测信噪比降低、探测能力下降,甚至使探测系统红外探测器饱和而失效^[1]。随着红外探测系统工作时间增加,红外窗口迅速成为气动热辐射的主要因素^[2]。

目前评估气动热辐射效应的地面验证试验主要有热窗试验、全尺寸风洞试验、电弧风洞试验和火箭撬试验等。热窗试验不能给出激波气体辐射的影响,窗口温度分布也很难模拟实际飞行情况^[3]。全尺寸风洞试验能很好地模拟激波流场的流动结构,但是温度、密度等参数与实际飞行状态差异大,气动加热强度小于实际飞行状态。电弧风洞试验能模拟飞行条件的总焓和表面压力等气动加热环境,红外窗口驻点等局部区域的温度梯度与飞行状态一致,但是气流的温度、压力、组分、速度等参数与实际飞行状态差异大,风洞内壁和高温气流形成强烈的热辐射干扰^[4]。火箭撬试验是最接近真实飞行状态的大型地面动态试验,但是运行速度较低、有效状态持续时间短、底层大气环境等因素都与实际飞行条件存在差异,激波气体和红外窗口的热辐射与实际情况的匹配度较差^[5]。现有试验都存在一定的弊端,不能准确解决气动热辐射效应评估问题。一些试验研究显示红外窗口温度越高,自辐射越强,对目标衰减越强^[6]。

在理论研究方面,参与性介质内辐射传输计算方法较为完善^[7],同时高温气体热辐射特性研究比较充分,计算方法多种多样^[8],并具有完善的基础数据库支撑^[9]。但是,红外窗口的热辐射特性与温度、制备工艺有关,国内对红外窗口材料的报道多集中在物理化学性能、透过率、衰减系数等热辐射特性数据较为缺乏^[10]。在红外窗口介质热辐射特性研究方面,数值仿真等理论研究较多:刘立等建立红外窗口热辐射及其影响分析模型,分析窗口在探测器上的响应特征^[11];范志刚等分析温度场非均匀分布的红外

外窗口自身辐射在探测器接收面的辐照度分布^[12]。

随着制备工艺的发展,新技术、更高性能的红外窗口陆续应用于超音速飞行器的红外探测系统,红外窗口成为气动热辐射效应评估中的关键。

在文中工作之前,已经设计了一种红外窗口热辐射特性试验平台,试验测量了蓝宝石红外窗口的透过率和自身辐射等热辐射特性^[13]。在此基础上,提出一种超音速飞行时存在温度梯度分布的红外窗口气动热辐射效应的评估方法,评估某飞行器蓝宝石红外窗口的热辐射效应,讨论厚度对蓝宝石红外窗口气动热辐射效应的影响,支持高速飞行器红外探测系统论证、设计和仿真。

1 红外窗口的热辐射传输特性

辐射传输方程描述了目标热辐射透过红外窗口的传递过程,是沿辐射传输方向的能量守恒方程^[14]。积分形式辐射传输方程表示为:

$$L_{\lambda}(s)=L_{\lambda}(0)\exp(-k_{e\lambda}s)+\int_0^s S_{\lambda}(s^*,\omega_{\lambda})\exp[-(s-s^*)]ds^* \quad (1)$$

式中: s 为传播距离; λ 为波长; $k_{e\lambda}$ 为衰减系数; ω_{λ} 为反照率; S_{λ} 为源函数。透过红外窗口观测目标时,红外探测器获得的透过窗口的总辐射 L_{tot} 是红外窗口内表面的辐射亮度 $L_{\lambda}(s)$, $L_{\lambda}(0)$ 是到达红外窗口外表面的目标红外辐射 L_{obj} 。假设红外窗口的透过率为 τ_{win} ,即 $\tau_{\text{win}}=\exp(-k_{e\lambda}s)$ 。忽略红外窗口的散射因素, $\omega_{\lambda}=0$, S_{λ} 是辐射源函数,右边第二项为窗口自辐射 L_{win} 。公式(1)简化为:

$$L_{\text{tot}}=L_{\text{obj}}\cdot\tau_{\text{win}}+L_{\text{win}} \quad (2)$$

2 红外窗口的气动热辐射效应评估方法

飞行器在大气层内高速飞行时,受气动加热影响,红外窗口温度急剧升高,在窗口厚度方向形成温度梯度。假设单位厚度 Δ 的红外窗口材料在温度 T 状态的透过率 $\tau_{T,\text{win}}^{\Delta}$ 和自辐射 $L_{T,\text{win}}^{\Delta}$ 。沿目标红外辐射传递方向,将飞行器红外窗口按照厚度 Δ 等分,假设窗口温度依次为 T_1 、 T_2 、……、 T_n ,那么每一层红外窗

口材料都遵循公式(2)的规律。

透过第 1 层的辐射为:

$$L_{tot}^1 = L_{obj} \cdot \tau_{T_1,win}^\Delta + L_{T_1,win}^\Delta \quad (3)$$

透过第 2 层的辐射为:

$$L_{tot}^2 = L_{tot}^1 \cdot \tau_{T_2,win}^\Delta + L_{T_2,win}^\Delta = L_{obj} \cdot \tau_{T_1,win}^\Delta \cdot \tau_{T_2,win}^\Delta + L_{T_1,win}^\Delta \cdot \tau_{T_2,win}^\Delta + L_{T_2,win}^\Delta \quad (4)$$

透过第 n 层的辐射为:

$$L_{tot}^n = L_{tot}^{n-1} \cdot \tau_{T_n,win}^\Delta + L_{T_n,win}^\Delta = L_{obj} \cdot \prod_{i=1}^n \tau_{T_i,win}^\Delta + \sum_{i=1}^n [\prod_{k=i+1}^n L_{T_k,win}^\Delta \tau_{T_k,win}^\Delta] + L_{T_n,win}^\Delta \quad (5)$$

由于 $L_{tot} = L_{tot}^n$, 红外窗口的透过率和自辐射分别为:

$$\tau_{win} = \prod_{i=1}^n \tau_{T_i,win}^\Delta \quad (6)$$

$$L_{win} = \sum_{i=1}^{n-1} [\prod_{k=i+1}^n L_{T_k,win}^\Delta \tau_{T_k,win}^\Delta] + L_{T_n,win}^\Delta \quad (7)$$

如果窗口等温分布,那么

$$\tau_{T,win}^\Delta = \sqrt[n]{\tau_{T,win}^\Delta} \quad (8)$$

$$L_{T,win}^\Delta = \frac{L_{T,win}^\Delta}{\sum_{i=1}^n (\tau_{T,win}^\Delta)^{i-1}} \quad (9)$$

红外窗口厚度增加 Δ , 如果透过红外窗口的总辐射增量满足

$$\Delta L_{tot}^n = L_{tot}^{n+1} - L_{tot}^n = L_{tot}^n \cdot (\tau_{T_{n+1},win}^\Delta - 1) + L_{T_{n+1},win}^\Delta \leq 0 \quad (10)$$

即

$$L_{tot}^n \geq L_{T_{n+1},win}^\Delta / (1 - \tau_{T_{n+1},win}^\Delta) \quad (11)$$

那么透过红外窗口的总辐射将不再增加, 这将在当前红外窗口温度分布状态下可探测到的最大红外辐射能量值。

3 蓝宝石红外窗口气动热辐射效应评估

蓝宝石窗口材料具有优异的物理化学性能, 在紫外到中波红外的宽波段内透过率高于 85%, 是目前制作中波红外窗口的最佳材料。针对采用蓝宝石窗口的高速飞行器中波红外对地探测系统, 评估蓝宝石窗口材料在中波 3.7~4.8 μm 波段的热辐射特性, 并讨论厚度对蓝宝石红外窗口气动热辐射效应

的影响。

3.1 蓝宝石窗口材料的热辐射特性测量

文中在前期建立了红外窗口材料热辐射特性试验平台, 图 1 为结构图。该平台主要由试验支撑平台、红外探测器、红外窗口保温装置、模拟黑体、数据记录仪和试验平台状态控制器等组成, 其中试验支撑平台提供其他试验设备组件的安装, 配套设备还有高温加热炉。红外探测器采用 FLIR 公司 SC7300M 型中波热像仪, 320×256 像元, NETD 小于 20 mK, 响应光谱为 3.7~4.8 μm 。模拟黑体用于模拟目标的红外辐射, 采用以色列 CI 公司的 SR-800 型高精度扩展面源黑体, 发射率为 0.97±0.02, 温度范围 0~175 $^\circ\text{C}$, 温度均匀性为 ±0.015 $^\circ\text{C}$ 。

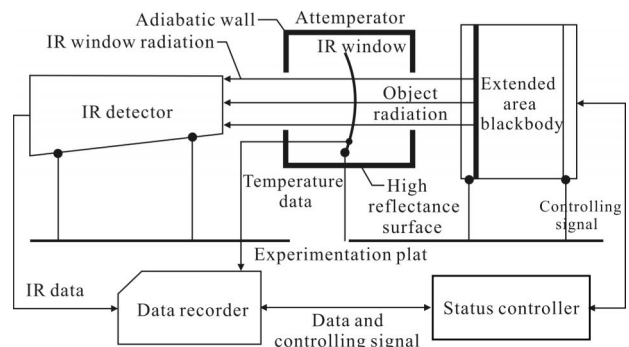


图 1 红外窗口材料热辐射特性试验平台

Fig.1 Scheme for experiment platform measuring thermo-radiation characteristics of IR window

基于红外窗口材料热辐射特性试验平台, 测量了某中波红外探测系统使用的 5 mm 厚蓝宝石红外窗口试验件在高温状态的透过率和自辐射等热辐射特性, 如表 1 所示。

表 1 等温蓝宝石红外窗口的热辐射特性

Tab.1 Thermo-radiation characteristics of sapphire window with uniform temperature

$T_{win}/^\circ\text{C}$	$\tau_{T,win}$	$L_{T,win}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
100	0.999 2	0.198 7
150	0.996 2	0.840 2
200	0.987 1	2.168 6
250	0.972 5	5.435 1
300	0.943 6	11.089
350	0.901 5	20.799

将蓝宝石红外窗口等分成 50 份, 单层厚度 $\Delta=0.1 \text{ mm}$, 基于公式(8)和(9), 计算蓝宝石窗口材料的透过率 $\tau_{T,\text{win}}^\Delta$ 和自辐射 $L_{T,\text{win}}^\Delta$ 等热辐射特性, 如图 2 所示。

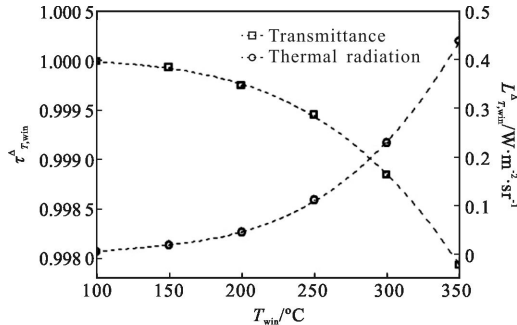


图 2 蓝宝石在中波红外波段的热辐射特性

Fig.2 Thermo-radiation characteristics of sapphire in MWIR

蓝宝石窗口材料在中波红外波段的透过率和自身辐射与温度之间均近似呈现 3 次方关系, 即

$$L_{T,\text{win}}^\Delta = \sum_{i=1}^3 [p_{L_{\text{win}}}^i \cdot (T_{\text{win}})^i] \quad (12)$$

$$\tau_{T,\text{win}}^\Delta = \sum_{i=1}^3 [p_{\tau_{\text{win}}}^i \cdot (T_{\text{win}})^i] \quad (13)$$

式中: $p_{\tau_{\text{win}}}^i$ 、 $p_{L_{\text{win}}}^i$ 为关系系数, 如表 2 所示。

表 2 蓝宝石红外窗口热辐射特性的数据拟合

Tab.2 Fit of thermo-radiation characteristics of sapphire IR window

	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
$p_{\tau_{\text{win}}}^i$	1.00	-1.28E-4	1.11E-6	-4.55E-09
$p_{L_{\text{win}}}^i$	-2.99	6.46E-2	-4.62E-4	1.35E-06

3.2 蓝宝石窗口的气动热辐射效应评估

某飞行器在大气层内 11 km 高空以近似水平状态高速飞行, 飞行速度 $Ma=4\sim 5$, 其中波红外探测系统红外窗口厚度为 8.3 mm, 蓝宝石材料。该蓝宝石材料与 3.1 节的蓝宝石试验件具有相同额的制备工艺及参数。

基于流体力学相关知识计算分析红外窗口的温度分布, 红外窗口曝露于大气环境后, 在强烈的气动加热情况下, 窗口温度迅速上升, 内外壁面的温差逐渐缩小, 图 3 给出了 $t_1\sim t_5$ 不同时刻红外窗口驻点区域平均温度在厚度方向的分布。由图 3 可知, 窗口整

体温度迅速上升, t_5 时刻外壁面温度可达 316°C 。

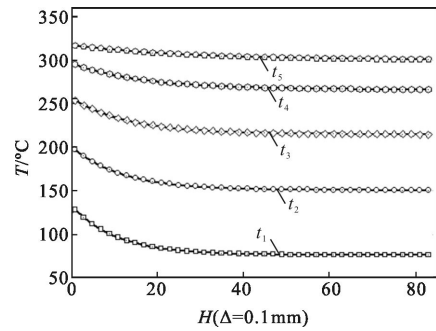


图 3 蓝宝石红外窗口的温度分布($\Delta=0.1 \text{ mm}$)

Fig.3 Temperature distribution of sapphire IR window($\Delta=0.1 \text{ mm}$)

根据蓝宝石窗口材料热辐射特性的对应厚度 $\Delta=0.1 \text{ mm}$, 将蓝宝石红外窗口等分成 50 份。针对图 3 中 5 个时刻的温度分布, 根据公式(12)和(13)计算每一层的透过率 和自辐射。然后基于公式(6)和(7) 计算蓝宝石红外窗口在中波红外波段透过率 τ_{win} 和自辐射 L_{win} , 结果见表 3。表 3 还给出了自辐射对应的亮度温度 T_{win}^b 。

表 3 非等温蓝宝石红外窗口的透过率和自辐射

Tab.3 Thermo-radiation characteristics of sapphire IR window with uneven temperature

t	τ_{win}	$L_{\text{win}}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$T_{\text{win}}^b / ^\circ\text{C}$
t_1	0.999 7	0.041 9	-44.579 2
t_2	0.991 4	1.679 7	34.946 3
t_3	0.970 4	5.744 8	74.796 9
t_4	0.936 1	12.296 3	104.905 0
t_5	0.902 5	19.207 3	125.031 6

由表 3 可知, t_1 时刻, 窗口外表面局部处于高温状态, 靠近内表面的区域温度较低, 红外窗口的透过率高, 自辐射较小, 相当于常温约 -44°C 黑体, 气动热辐射效应小, 对红外探测性能影响小。由 $t_1\sim t_5$, 红外窗口整体温度上升, 衰减和自辐射迅速增强。 t_5 时刻, 透过率下降约 10%, 仍然在 0.9 以上, 但是窗口自辐射增强约 458 倍, 相当于约 125°C 黑体。在对地探测应用中, 考虑发射率、大气衰减和红外窗口衰减等因素, 除太阳、云层、屋顶、运载器尾流等少数强散射或强辐射目标, 自然环境中大多数地物类型到达红外窗口外表面的中波红外热辐射 L_{obj}^k 通常小于 74°C

黑体辐射,即 t_3 时刻的自身辐射。在 t_4 和 t_5 时刻,蓝宝石窗口自辐射在总辐射中的比重分别为 69% 和 78%,存在探测器饱和的风险。 t_5 时刻,窗口透过率仍然在 0.90 以上,对信噪比影响较小。所以,蓝宝石红外窗口自辐射对中波红外探测系统造成的影响比透过率引起的信噪比下降要大一些。

3.3 厚度对蓝宝石窗口热辐射特性的影响

以 Δ 为厚度单位, n 越大,红外窗口越厚。公式(6)指出红外窗口透过率随着窗口厚度增加而下降。而公式(7)指出窗口自辐射随着厚度变化较为复杂,取决于新增加层的透过率和自辐射的关系,与红外窗口的材料、温度有关。

根据图 2,公式(11)给出蓝宝石红外窗口后面可探测到的最大红外辐射能量值 L_{tot}^{max} ,新增加层的窗口温度 T_{win} 在 200 °C 附近时出现最小值, $L_{tot}^m \approx 168 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,如表 4 所示。

表 4 蓝宝石红外窗口后的总辐射最大值

Tab.4 Max of total thermo-radiation behind sapphire IR window

$T_{win}/^{\circ}\text{C}$	$L_{tot}^{max}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
100	248.375
150	221.105
200	168.108
250	197.640
300	196.613
350	211.157

由公式(10)可知,蓝宝石材料厚度增加 Δ ,透过红外窗口的总辐射增量 ΔL_{tot}^n 与 L_{tot}^n 呈线性关系,线性参数与新增加层的窗口温度有关,如图 4 所示。图 4 中各直线与 x 轴的交点与表 4 给出的红外窗口后可探测的最大能量值一致。由图 4 可知新增窗口温度相同条件是:总辐射 L_{tot}^n 越小,增量 ΔL_{tot}^n 越大; $L_{tot}^n \leq 168$ 时,相同 L_{tot}^n 条件下,新增窗口温度越高,增量 ΔL_{tot}^n 越大。

实际应用中,红外窗口厚度通常不大于 20 mm。当目标红外辐射 $L_{obj}=0$ 时,透过红外窗口的总辐射体现为窗口的自辐射,即 $L_{tot}=L_{win}$ 。新增蓝宝石窗口的温度为 350 °C 时透过率最差,自辐射增量最大。对于 20 mm 厚蓝宝石红外窗口,整体温度为 350 °C 时,

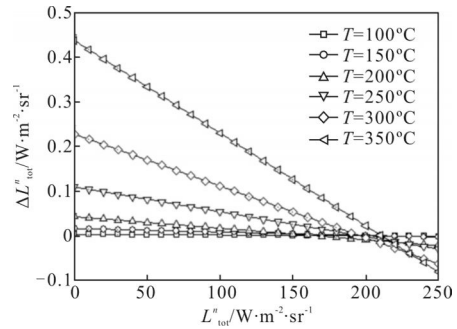


图 4 蓝宝石窗口的红外辐射增量

Fig.4 Increment of total thermo-radiation of sapphire IR window

透过率约为 0.66,自辐射约为 $71.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,小于 L_{tot}^m ,对应 $L_{tot}^m=L_{tot}^m$ 的目标红外辐射 $L_{obj}^m \approx 145.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,大于多数地物类型到达窗口外表面的红外辐射 L_{obj}^k 。所以,在 100~350 °C 范围内,厚度不大于 20 mm 时,蓝宝石红外窗口的中波红外自辐射随着窗口厚度增加而增加,均小于 $71.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$;在对地探测应用中,相同目标红外辐射,蓝宝石红外窗口越厚,温度越高,透过窗口到达探测器的总辐射越强。由于透过率随着厚度增加而持续下降,总辐射增加量体现为窗口的自辐射,自辐射在总辐射中的比例增加,存在探测器饱和的风险。

4 结论

通过分析红外窗口中的辐射传输特性,提出了一种基于试验测量的红外窗口的气动热辐射特性评估方法,并评估了某高速飞行器中波红外探测系统的 8.3 mm 蓝宝石红外窗口在 3.7~4.8 μm 波段的热辐射特性。研究结果显示,随着时间增加,蓝宝石红外窗口透过率下降约 10%,均在 0.9 以上,对信噪比影响较小,而窗口自辐射增强高达 458 倍,相当于约 125 °C 黑体,在总辐射中的比重最高可达 78%,存在探测器饱和的风险,自辐射对中波红外探测系统造成的影响比透过率引起的信噪比下降要大一些。在 100~350 °C 范围内,对于厚度不大于 20 mm 的蓝宝石红外窗口,厚度增加,透过率下降,自辐射增加,透过窗口的总辐射也增加,增加量体现为窗口的自辐射。

研究成果可为高速飞行器红外探测系统论证、研制、参数优化和仿真验证等提供基础数据。

参考文献:

- [1] Yin Xingliang. Principle of Aero-Optics [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003. (in Chinese)
殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] Wang Yahui, Wang Qiang, Gao Lei, et al. Aero-thermo-radiation of a hypersonic vehicle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1399-1403. (in Chinese)
王亚辉, 王强, 高磊, 等. 高超声速飞行器气动热辐射特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1399-1403.
- [3] Chen Lianzhong, Zhang Jiexiang, Fei Jindong. Experiment research on the aerodynamic heating effect on the infrared imaging[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(1): 36-38. (in Chinese)
陈连忠, 张嘉祥, 费锦东. 气动加热对红外成像的影响试验研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 36-38.
- [4] Cheng Meisha, Chen Lianzhong. Aero-optics testing schemes for infrared radome [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010(3): 73-75. (in Chinese)
程梅莎, 陈连忠. 红外头罩气动光学试验 [J]. 宇航材料工艺, 2010(3): 73-75.
- [5] Yang Xingbang. XB high accuracy rocket sled test track[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(10): 99-104. (in Chinese)
杨兴邦. XB 高精度火箭橇试验滑轨 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 99-104.
- [6] Ma Yifei, Zhao Wenping. Effects of window radiation on infrared imaging detection [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(32): 427-430. (in Chinese).
马毅飞, 赵文平. 窗口辐射对红外成像探测影响的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(32): 427-430.
- [7] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua. Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer-Calculating Thermal Radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
谈和平, 夏新林, 刘林华. 红外辐射特性与传输的数值计算-计算热辐射学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [8] Yin Xuemei, Liu Linhua. A survey of models for the calculation of radiation characteristics of high-temperature gases [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2007, 22(5): 473-479. (in Chinese)
尹雪梅, 刘林华. 高温气体辐射特性计算模型 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 473-479.
- [9] Rothman L S, Camy P C, Flaud J M, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database 2000 [EB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.hitran.com>.
- [10] Zhang Xingde, Liu Lin, Li Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601-606. (in Chinese)
张兴德, 刘琳, 李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 601-606.
- [11] Liu Li, Meng Weihua, Pan Guoqing. Modeling and analysis of infrared radiation from the dome flying at supersonic speed [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1193-1198. (in Chinese)
刘立, 孟卫华, 潘国庆. 超音速飞行环境中光学头罩热辐射建模与分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1193-1198.
- [12] Fan Zhigang, Yu Cuiping, Xiao Haosu, et al. Numerical simulation of thermal radiation effect about optical dome in aerodynamic thermal environment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 649-653. (in Chinese)
范志刚, 于翠萍, 肖昊苏, 等. 气动光学头罩热辐射效应数值仿真研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 649-653.
- [13] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Bochuan, et al. Experiment of the thermo-radiation characteristic of infrared window [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 44(6): 609-613. (in Chinese)
王亚辉, 王强, 张伯川, 等. 高超声速飞行器红外头罩辐射传输特性试验[J]. 红外与激光工程, 2013, 44(6): 609-613.
- [14] Yu Qizheng. Principle of Radiation Heat Transfer[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999. (in Chinese)
余其钰. 辐射换热 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.