

大气及地面红外辐射对高空飞机长波 低发射率红外隐身效果的影响

黄 伟, 吉洪湖, 卢浩浩
(南京航空航天大学 能源与动力学院
江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 计算分析了蒙皮反射的大气及地面红外辐射对高空飞机采用低发射率材料的红外隐身效果的影响. 蒙皮温度采用恢复温度, 红外辐射采用反向蒙特卡罗法计算. 考虑了夏季和冬季两种典型大气和地面条件, 亚声速巡航和超声速巡航两种飞行状态. 结果表明: 蒙皮对背景红外辐射的反射使得低发射率材料对飞机红外辐射强度的抑制效率降低 1.5%~6%; 考虑反射的背景红外辐射时, 探测距离增加 20%~70%; 背景红外辐射对低速飞机的红外辐射影响较大, 且夏季比冬季更明显; 当飞行速度较低时, 降低飞机上表面发射率, 当飞行速度较高时, 降低飞机全部表面的发射率, 可获得更好的红外隐身效果.

关 键 词: 背景红外辐射; 低发射率; 探测距离; 红外辐射; 红外隐身

中图分类号: V218; TN215 **文献标志码:** A

Impact of atmospheric and ground infrared radiation on infrared stealth effect of long-wave band low emissivity of high-flying aircraft

HUANG Wei, JI Hong-hu, LU Hao-hao
(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The impact of atmospheric and ground infrared radiation reflected by skin on the infrared stealth effect of low emissivity material of high-flying aircraft was computed and analyzed. The recovery temperature was applied to calculate the skin temperature, and the infrared radiation was computed by the reverse Monte Carlo method. Both summer and winter, the two typical climate conditions were considered in the computation. And both subsonic and supersonic cruise, the two typical flight conditions were also considered in the computation. Results show that, the reduction efficiency of low emissivity material on the aircraft infrared radiation is reduced 1.5%—6%; the detection distance of the detector is increased by 20%—70% considering the reflected infrared radiation of background infrared radiation; the infrared radiation of low-speed aircraft is more susceptible to the background infrared radiation, and the effect of summer is more obvious than winter; if reducing the emissivity of the upper surface of a low-speed aircraft, the total surface of a high-speed aircraft can get a better infrared stealth effect.

Key words: background infrared radiation; low emissivity; detect distance; infrared radiation; infrared stealth

随着红外制导武器以及红外探测系统的迅猛发展,军用飞机甚至大型商用飞机的安全都受到了严重的威胁^[1-2]. 研究表明^[3],机体表面是飞行器上最重要的红外辐射源之一,且主要集中在8~14 μm 波段. 当对飞机进行前向探测时,机体对排气系统热部件和热喷流的红外辐射形成了遮挡,机体的红外辐射更为突出. 出于隐身考虑,当前的飞行器在设计初始阶段就需要对其红外特征进行仿真分析,以降其低红外辐射^[4]. 降低机体红外辐射的方法主要有机体冷却和表面发射率(文中简称发射率)分布设计两种,但由于飞机面积大,采用冷却措施往往需要付出极大的代价,因此对机体采用低发射率材料^[5-6]是一种更为可行的抑制措施.

飞机总的红外辐射可分为自身红外辐射和对背景红外辐射的反射红外辐射两部分. 以往的很多计算中通常认为背景红外辐射很低,并且在忽略背景红外辐射的情况下对飞机机体采用低发射率材料的红外隐身效果进行了分析. 如韦第升等^[7]、吕建伟和王强^[8]、林杰和江勇等^[9]、徐顶国和桑建华等^[10]、斯仁和吉洪湖等^[11]、刘健和宫禹等^[12]的研究均表明在一定的发射率范围内,蒙皮表面的红外辐射强与发射率呈线性关系,发射率每降低 0.1,红外辐射强度减小约 10%. 也有一些研究表明,背景红外辐射会对低发射率材料的红外抑制效果产生重要影响. Mahulikar 等^[13]认为低空飞机后机身反射地面 8~12 μm 波段的红外辐射明显,后机身的发射率并不是越低越好;刘钢、额日其太等^[14]研究表明大气红外辐射削弱了材料发射率对亚声速巡航导弹蒙皮的红外抑制效果;徐顶国、桑建华等^[15]计算表明背景红外辐射可使非隐身的无人机在 8~14 μm 波段的红外辐射增加 4.4%~10%.

对于非透明涂层,发射率越低,意味着对背景红外辐射的反射也越强,因此在评估低发射率涂层的红外抑制效果时应充分考虑飞机的飞行条件以及所处的环境背景情况. 高空环境有一个明显的特点就是飞机下方的大气红外辐射远大于飞机上方,同时飞机下方还会受到地面背景红外辐射的影响. 目前,关于大气和地面背景对高空飞机低发射率红外隐身效果的影响研究尚不多见,高空飞机发射率如何分布更合理尚待研究.

本文以一个典型的单发动机飞机为研究对象,计算分析了蒙皮反射的大气和地面背景红外辐射对高空飞机采用低发射率材料的红外隐身效果的影响. 计算中,考虑了夏季和冬季两种典型大气模型,亚声速巡航和超声速巡航两种典型飞行状态. 本文的计算结果可为飞机表面低红外发射率材料的合理应用提供参考.

1 物理模型

本文以一个假定的单发动机飞机模型为研究对象,飞机的侧视和前视图分别如图 1 所示. 飞机模型由进气系统、机身、机翼、尾翼和发动机排气系统等部分组成.

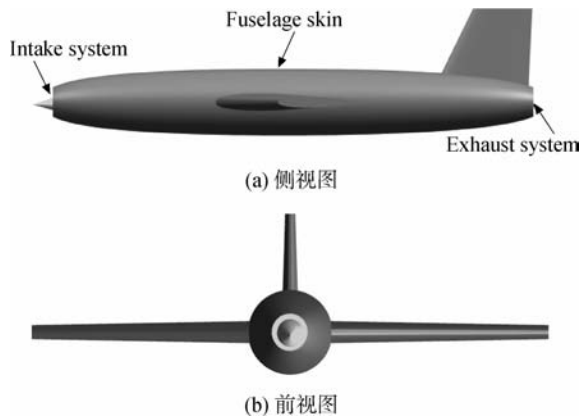


图 1 飞机物理模型

Fig. 1 Physical model of aircraft

2 计算方法

2.1 飞机蒙皮温度计算

飞机高速飞行时,蒙皮的温度主要取决于环境温度 T_{air} 和飞行过程中的气动加热. 由于边界层各层之间有温度梯度,下层的高温气体会向上层的低温气体传热,通常采用恢复温度 T_r 来表示蒙皮温度^[16].

$$T_r = T_{\text{air}} \left(1 + \gamma \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \tag{1}$$

式中 T_{air} 和 T_r 的单位为 K, γ 为恢复系数, $\gamma \cong \sqrt[3]{Pr} = 0.9$, $k = 1.4$, Ma 为飞行马赫数.

本文计算中,假设飞行高度为 11 km,夏季时,当地大气温度 T_{air} 为 228 K,冬季时,当地大气温度 T_{air} 为 219 K. 考虑了从亚声速到超声速共 4

种巡航飞行速度,飞行马赫数分别为 0.6,0.9,1.2 和 1.5. 根据季节和飞行速度不同,一共可以确定 8 种蒙皮温度.

2.2 飞机总的红外辐射

考虑蒙皮对大气和地面红外辐射的反射时,飞机总的光谱红外辐射强度 $I_{\text{total},\lambda}$ 如式(2)所示. 计算中,假设蒙皮对环境(大气和地面)的红外辐射的反射形式为漫反射.

$$I_{\text{total},\lambda}(s) = I_{\text{ac},\lambda}(s) + I_{\text{atmosphere},\lambda}^{\text{reflect}}(s) + I_{\text{ground},\lambda}^{\text{reflect}}(s) + \frac{1 - \epsilon_\lambda}{\pi} (E_{\text{atmosphere},\lambda} + E_{\text{ground},\lambda}) A_{\text{ac}} \quad (2)$$

式中 $I_{\text{ac},\lambda}$ 为飞机自身光谱红外辐射强度, $I_{\text{atmosphere},\lambda}^{\text{reflect}}$ 为反射的大气光谱红外辐射强度, $I_{\text{ground},\lambda}^{\text{reflect}}$ 为反射的地面光谱红外辐射强度,单位均为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$; ϵ_λ 为壁面光谱发射率; π 为立体角, sr ; A_{ac} 为目标在探测视线方向上的投影面积, m^2 ; s 为辐射方向或观测方向矢量; $E_{\text{atmosphere},\lambda}$ 为大气红外辐射对目标的光谱红外辐射照度, $E_{\text{ground},\lambda}$ 为地面红外辐射对目标的光谱红外辐射照度,单位均为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$.

长波 8~14 μm 波段的光谱红外辐射强度的积分值为

$$I_{\text{total}}(s) = \int_8^{14} I_{\text{total},\lambda}(s) d\lambda \quad (3)$$

2.2.1 自身光谱红外辐射强度计算

计算红外辐射时需将飞机表面离散为 M 个三角网格,然后采用三维数组存储网格的 3 个角点的坐标、网格法向矢量以及温度 T_i (恢复温度) 和发射率 ϵ_i . 由于喷流在 8~14 μm 波段的红外辐射与固体壁面相比较小,因此在计算中只考虑了固体壁面的红外辐射. 计算时,为了便于进行规律性对比,假设飞机发射率的变化范围为 0.1~1.0,且不随光谱变化.

飞机的自身光谱红外辐射强度 $I_{\text{ac},\lambda}$ 采用反向蒙特卡罗法计算,主要过程是:①在探测器视场范围内随机地发射一条射线,并判断射线与飞机壁面网格是否相交,如不相交则重新发射一条射线;②当射线与壁面网格有交点时,生成[0,1]分布的随机数 N_{ran} ,如果 $N_{\text{ran}} \leq \epsilon_i$,则认为该条射线的携带了蒙皮自身的红外辐射,反之,认为该条射线携带了背景的红外辐射. 射线的发射方向和反射方向的计算方法可见相关参考文献[17]. 目标自身的光谱红外辐射计算表达式如下:

$$I_{\text{ac},\lambda} = \frac{\Omega_{\text{fov}} R^2}{\pi N} \sum_{i=1}^N F_{\text{b},\lambda}(T_i) \quad (4)$$

式中 Ω_{fov} 为探测器视场立体角, sr ; R 为飞机与探测器之间的距离(下文简称探测距离), m ; N 为射线数, $F_{\text{b},\lambda}$ 为黑体光谱辐射力, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$.

$$F_{\text{b},\lambda}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} \quad (5)$$

式中 c_1 为第 1 辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第 2 辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

2.2.2 大气光谱红外辐射照度计算

为了便于进行计算研究,可以确定一些典型的大气模型. 模型中,假设大气由许多层水平的气体层组成,每一层中,吸收、发射以及穿透的红外辐射能量取决于各层的组分、温度、压力以及空间位置. 本文的计算考虑了中纬度夏天(北纬 45°,7 月)、中纬度冬天(北纬 45°,1 月)两种典型的大气模型. 压力(p)、温度(T)和水蒸气质量浓度($M_{\text{water vapor}}$)随高度(H)的变化[18]如图 2 所示,由图可见,高度越高,大气压力、水蒸气的质量浓度和温度越低. 模型中,冬季的水蒸气质量浓度和温度明显低于夏季,但压力差别不大.

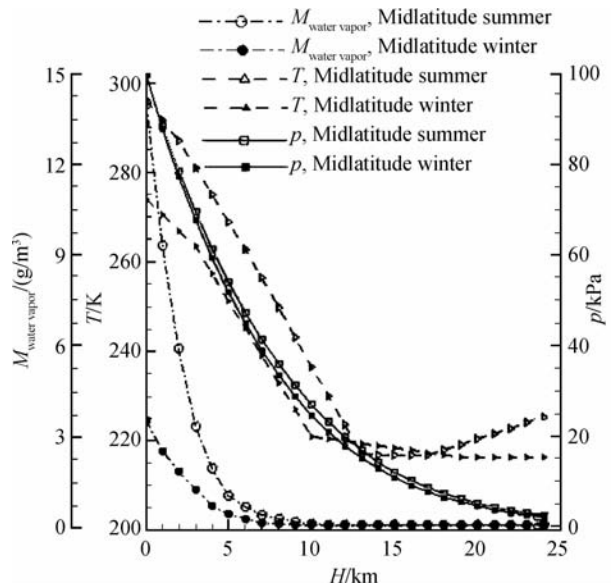


图 2 压力、温度和水蒸气质量浓度随高度的变化
Fig. 2 Variation of pressure, temperature and water vapor mass concentration with height

采用 Modtran 程序计算得到的不同季节时,11 km 高度处的大气红外辐射亮度 L 随照射方向 s_θ 的分布如图 3 所示,角度计算间隔为 10°. 由图可见,在 $\theta = 0^\circ \sim 100^\circ$ 范围内,大气红外辐射亮度随角度逐渐增加,在 $\theta = 100^\circ \sim 180^\circ$ 范围内,大气

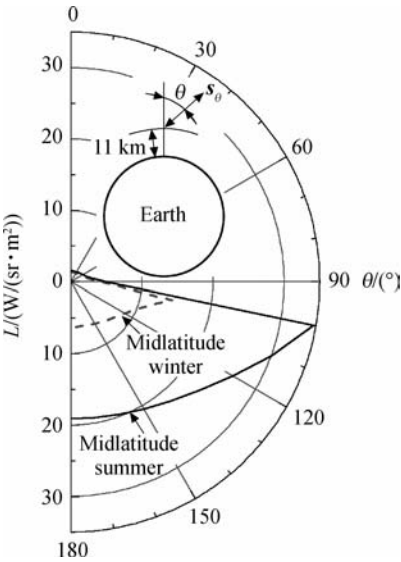


图 3 不同季节时,11 km 高度处的大气红外辐射亮度随照射方向的变化

Fig. 3 Variation of atmospheric infrared radiance at the height of 11 km with irradiance direction at different seasons

红外辐射亮度随角度逐渐减小, $\theta > 90^\circ$ 范围内(飞机下方)的大气红外辐射亮度远远大于 $\theta < 90^\circ$ 的情况(飞机上方). 由图还可看出, $\theta > 90^\circ$ 范围内的大气红外辐射亮度与季节关系不大, 而 $\theta < 90^\circ$ 范围内的大气红外辐射亮度则是夏季明显大于冬季.

大气红外辐射对目标的光谱红外辐射照度可表示为

$$E_{\text{atmosphere},\lambda} = \int_{n_w \cdot s_\theta < 0} L_{\text{atmosphere},\lambda}(\theta) |n_w \cdot s_\theta| d\omega_\theta \quad (6)$$

式中 $L_{\text{atmosphere},\lambda}$ 指大气光谱红外辐射亮度, $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$; n_w 为飞机壁面法向矢量; $d\omega_\theta$ 为大气红外辐射照射方向 s_w 的立体角, sr .

2.2.3 地面光谱红外辐射照度计算

假设地面为一个发射率为 0.95 的灰体, 向上方红外发射辐射的方向为 s_g , 照射到飞机表面上的光谱红外辐射照度为

$$E_{\text{ground},\lambda} = \int_{n_w \cdot s_g < 0} \epsilon_{\text{ground}} \cdot \frac{F_{b,\lambda}(T_{\text{ground}})}{\pi} \cdot \tau_{\text{path},\lambda} |n_w \cdot s_g| d\omega_g \quad (7)$$

式中 $\tau_{\text{path},\lambda}$ 为地面到飞机之间的大气光谱透过率; T_{ground} 为地面温度, 夏季时假设为 300 K, 冬季时假设为 273 K; $d\omega_g$ 为大气红外辐射照射方向 s_g 的立体角, sr .

0 km 和 11 km 高度处的地面光谱红外辐射

亮度分布如图 4 所示. 由图可见, 在地表 0 km 处, 夏季的地面红外辐射亮度明显大于冬季, 但经过 11 km 的大气吸收后, 两者的差距明显缩小, 这主要是因为夏季的大气吸收比冬季强. 夏季和冬季的地面光谱红外辐射在 11 km 处的积分值分别为 $24 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 和 $22 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$, 与飞机下方夏季的大气红外辐射亮度大小相当.

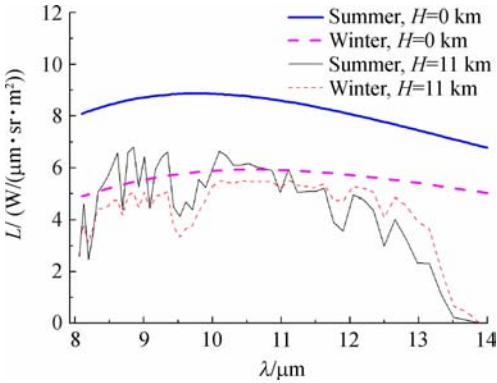


图 4 0 km 和 11 km 高度处的地面光谱红外辐射亮度分布

Fig. 4 Distribution of ground spectral infrared radiance at the height of 0 km and 11 km

2.2.4 红外辐射方位的定义

采用圆锥坐标系^[19]描述飞机的红外辐射方位, 飞机的重心为坐标系的原点, 如图 5 所示. 每个方位可用俯仰角 α 和方位角 β 来表示, α 表示红外辐射方向与水平面的夹角, 水平面上的 $\alpha = 0^\circ$, 上半球为正, 下半球为负; β 表示探测器和飞机的连线在水平面上的投影线与飞机轴线前向之间的夹角, 0° 表示机头方向, 正值表示飞机左侧, 负值表示飞机右侧.

本文计算的飞机红外辐射方位如图 6 所示. 由于前向是飞机在 8~14 μm 波段的主要威胁方

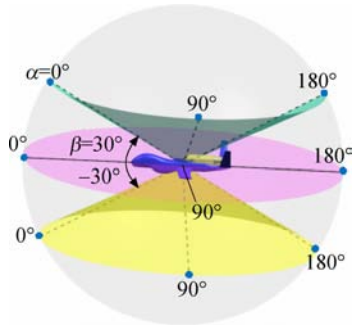


图 5 坐标系示意图^[19]

Fig. 5 Sketch map of coordinate system^[19]

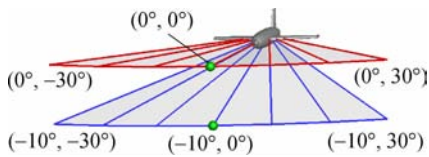


图 6 飞机红外辐射方位示意图

Fig. 6 Sketch map of aircraft infrared radiation direction

向,因此本文重点计算了俯仰角 $\alpha = -10^\circ \sim 0^\circ$,方位角 $\beta = -30^\circ \sim 30^\circ$ 范围内的红外辐射特征,角度间隔均为 10° .

2.3 红外辐射计算方法验证

为了保证计算过程的正确性,首先对一块圆形平板的自身红外辐射强度方向分布进行了计算(如图 7 所示),并与理论值进行了对比,平板的温度和发射均给定常数. 计算值与理论值的误差如图 8 所示. 由图可见,程序计算得到的红外辐射强度方向分布与理论值相比,最大误差小于 0.6% ,说明程序求解过程正确,并有足够高的精度.

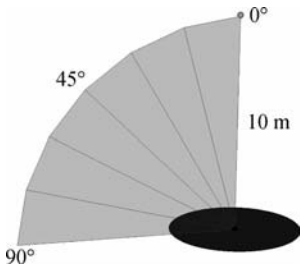


图 7 平板红外辐射计算方位示意图

Fig. 7 Sketch map of infrared radiation computation direction of flat plane

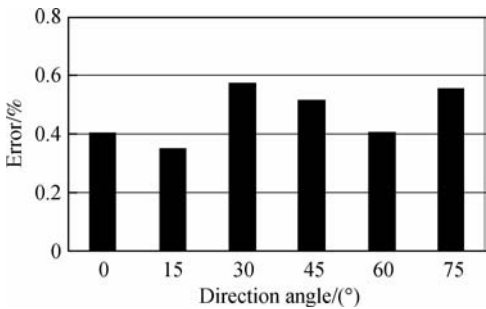


图 8 计算值与理论值的误差

Fig. 8 Error of computation and theory results

然后以 Hermansson 等^[20]的测试数据对考虑背景红外辐射后的计算精度进行了验证. Hermansson 分别测试了刷暗绿色漆的金属板(发射率为 0.8)和低发射率金属片(发射率为 0.4)两块

平板的红外辐射亮度,测试波段为 $7.5 \sim 12.0 \mu\text{m}$.

计算结果与测试结果的对比如图 9 所示,图中 IR 表示红外辐射. 由图可见,不考虑环境红外辐射时,计算值明显偏离测试值;考虑环境红外辐射时,计算值落在了测试的误差范围内,计算值与测试值较为吻合. 计算结果与实验结果均说明了表面反射背景红外辐射导致总红外辐射增加,以及低发射率表面反射的背景红外辐射比高发射率表面强的现象. 计算精度满足工程需求,可用于下文的规律性研究.

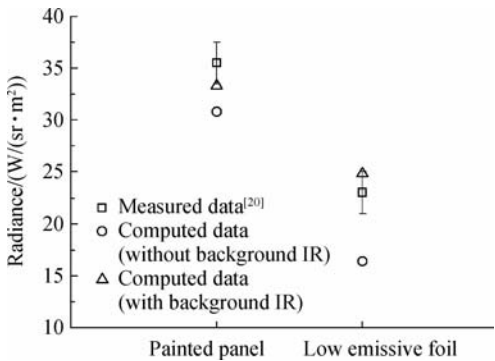


图 9 计算结果与实验结果的对比

Fig. 9 Comparison of measured and computed data

2.4 红外辐射强度抑制效率和探测距离计算

本文采用红外辐射强度抑制效率 η_e (单位: %)和探测距离 R (单位: m)两个指标来评价低发射率材料的红外隐身效果. η_e 的定义为红外辐射强度减缩量与原红外辐射强度的百分比,计算式为

$$\eta_e = (I_{1.0} - I_e) / I_{1.0} \times 100\% \quad (8)$$

式中下标表示发射率值.

计算 R 时,飞机距离探测器通常很远,可将飞机处理为点源目标,则探测距离^[11-12]的计算式如下:

$$R = \left[\frac{\eta_{ac} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_{\text{total},\lambda} - L_{\text{bg},\lambda} \cdot A_{ac}) \cdot \tau_{\lambda} d\lambda}{I_{ne} \cdot R_{sn}} \right]^{0.5} \quad (9)$$

式中 η_{ac} 为目标红外辐射有效系数; $L_{\text{bg},\lambda}$ 为背景的光谱红外辐射亮度, $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$; τ_{λ} 为目标与探测系统之间的大气光谱透射率; NEI 为探测系统的等效噪声照度(量符号记为 I_{ne}), W/m^2 ; SNR 为红外探测器的信噪比(量符号记为 R_{sn}).

本文计算中,假设探测器的工作波段为 $8 \sim 10.3 \mu\text{m}$, $\eta_{ac} = 0.8$, $I_{ne} = 1.32 \times 10^{-9} \text{ W}/\text{m}^2$, $R_{sn} = 6$.

3 结果与分析

3.1 对红外辐射强度抑制效率的影响

图 10 给出了 $\alpha=0^\circ$ 平面内,考虑背景红外辐射时,发射率从 1.0 降至 0.2 的红外辐射强度抑制效率随方位角 β 的变化,飞行马赫数为 1.5. 由图可见,在 $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内,无量纲红外辐射强度 ($I/I_{\max}$) 随 β 的变化明显, β 越大,红外辐射强度也越大,但抑制效率随着角度的变化并不明显,最大值与最小值之间的差别约为 4%. 为表述方便起见,下文的计算中,将以 $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的算术平均值来表示.

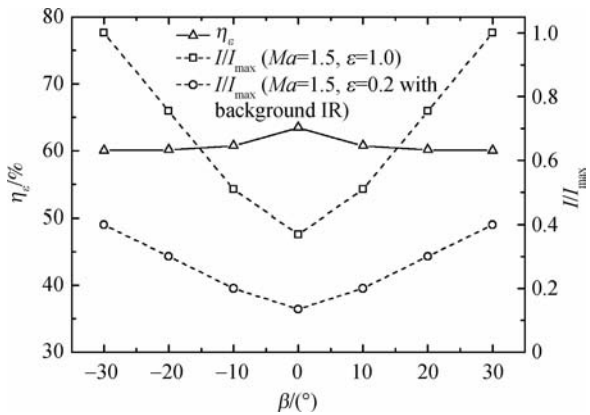


图 10 考虑背景红外辐射时,发射率从 1.0 降至 0.2 的抑制效率随 β 的变化
Fig. 10 Variation of reduction efficiency of emissivity changing from 1.0 to 0.2 with β , when considering the background infrared radiation

图 11 给出了 $\alpha=0^\circ$ 时, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的抑制效率均值 ($\eta_{e,avg}$) 随马赫数和发射率的变化. 从理想抑制效率(没有背景红外辐射的抑制效率)曲线可以看出,发射率越低,效率越高,飞机整个表面的发射率每降 0.1,红外辐射强度可降低 10%. 由图还可以看出,考虑蒙皮对大气和地面背景红外辐射的反射后,除了发射率为 1 的情况外,实际的抑制效率均低于理想抑制效率,且飞行马赫数越低,偏差越大. 例如 $Ma=1.5$ 时,发射率每降低 0.1,可降低 7.8% 的红外辐射强度; $Ma=0.9$ 时,发射率每降低 0.1,只能降低 4.2% 的红外辐射强度. 这两种典型速度下, $\eta_{e,1}$ 分别比理想抑制效率低了 20% 和 52%. 产生这种现象的主要原因是飞行速度低时自身红外辐射也低,反射的背景红外辐射占主导地位,而飞行速度高时自身红外辐射也高,自身红外辐射占主导地位.

图 11(b) 与图 11(a) 相比,理想抑制效率不变,但相同的飞行速度和发射率条件下,冬季的实际抑制效率要高于夏季. 这是因为冬季的飞机自身红外辐射与夏季相差不大(约为 6%),但冬季大气背景红外辐射明显小于夏季(相差 1 倍以上).

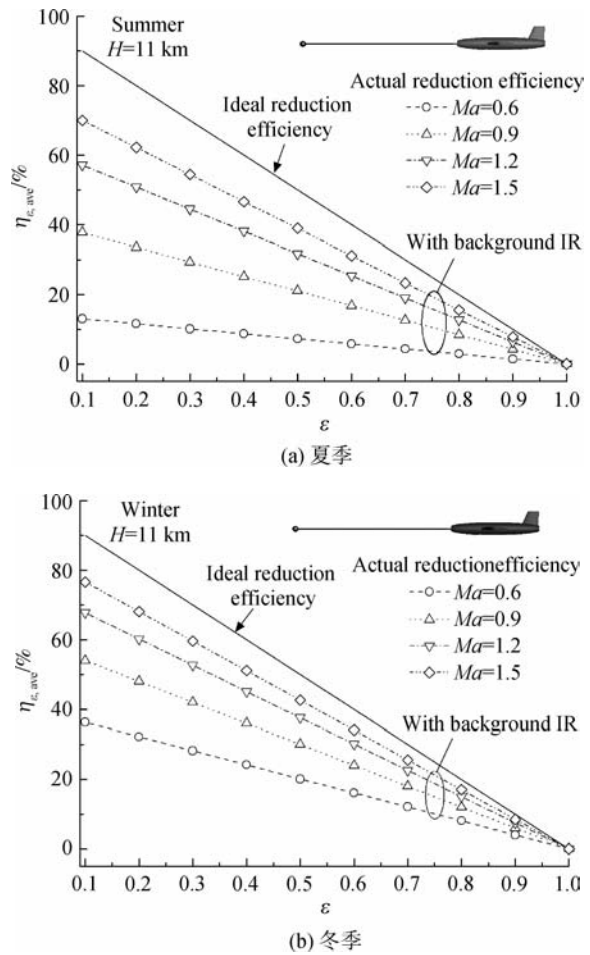


图 11 $\alpha=0^\circ$ 时, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的抑制效率均值随飞行马赫数和发射率的变化
Fig. 11 Variation of averaged reduction efficiency within $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ with flight Mach number and emissivity, when $\alpha=0^\circ$

图 12 给出了 $\alpha=-10^\circ$ 时, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的抑制效率均值随飞行马赫数和发射率的关系. 从图 12(a) 可以看出,当飞行马赫数小于 0.9 时,实际的抑制效率 η_e 小于零,且发射率越低 η_e 也约低. 这主要是因为飞机下方的大气和地面背景红外辐射亮度之和高于飞机自身的红外辐射亮度,当发射率降低后,反射的背景红外辐射增加量大于飞机自身红外辐射的减缩量,导致飞机总的红外辐射随发射率的降低而逐渐增加. 当飞行马赫数大于 0.9 后,自身红外辐射显著增强,降低

发射率仍能起到一定的红外抑制作用,但与图 11(a)相比,抑制效率降低.例如 $Ma=1.5$ 时, $\eta_{0.1}=52.1\%$, $Ma=1.2$ 时, $\eta_{0.1}$ 只有 27.8% , 分别比理想抑制效率低了 37.9% 和 62.2% .

由图 12(b)可以看出,当飞行马赫数小于 0.6 左右时,实际的抑制效率 η_e 小于零,当飞行马赫数大于 0.6 后,抑制效率随飞行马赫数的增加而逐渐增大. 相同的飞行速度和相同发射率条件下,冬季的实际抑制效率要高于夏季. 以 $Ma=1.5$ 为例,冬季的实际抑制效率 $\eta_{0.1}=65.6\%$, 比夏季高 13.5% , 但比理想值低 23.4% .

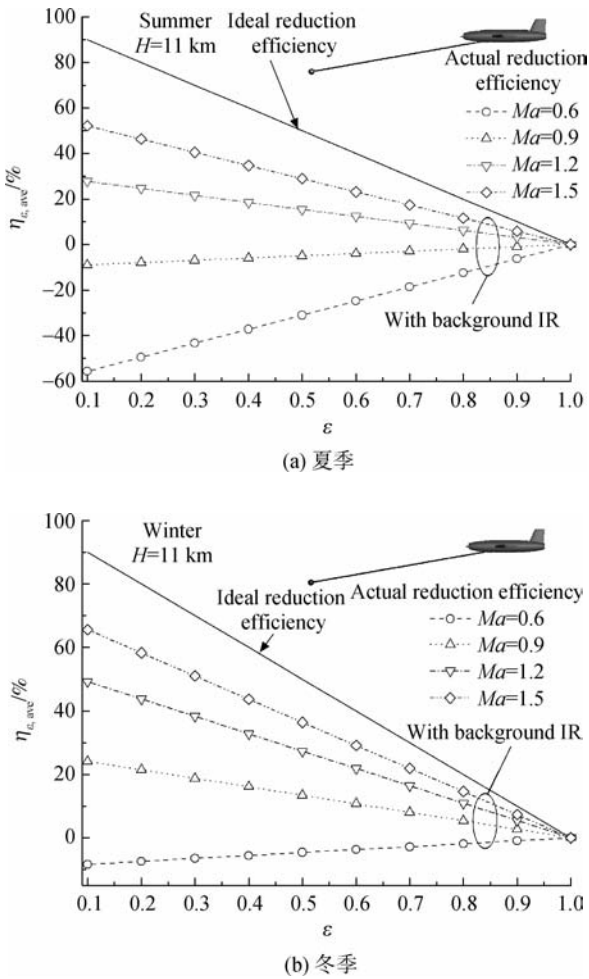


图 12 $\alpha=-10^\circ$ 时, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的抑制效率均值随飞行马赫数和发射率的关系

Fig. 12 Variation of averaged reduction efficiency within $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ varies with flight Mach number and emissivity, when $\alpha=-10^\circ$

3.2 对探测距离的影响

图 13 给出了发射率由 0.9 降至 0.2 对 $\alpha=0^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的无量纲探测距离 ($R/R_{\max}$) 均值的影响. 由图可见,当飞机表面的发

射率较高 ($\epsilon=0.9$) 时,考虑蒙皮反射背景红外辐射的探测距离略大于未考虑背景的探测距离,可见背景红外辐射对高发射率飞机探测距离的影响并不明显;当飞机发射率由 0.9 降至 0.2 时,如不考虑背景红外辐射,探测器对飞机的探测距离可缩短约 50%,但考虑了大气和地面红外辐射的影响后,探测距离的实际缩减量明显小于理想缩减量.

由图 13 还可以看出,相同的飞行马赫数,夏季的探测距离略大于冬季;飞行马赫数越大,实际探测距离与理想探测距离约接近,即红外探测器对高超声速飞机的探测距离受背景红外辐射的影响较小,而对亚声速飞机的探测距离受背景红外辐射的影响较大. 当 $Ma=0.9$ 时,背景红外辐射使得采用低发射率材料(发射率为 0.2)后的飞机

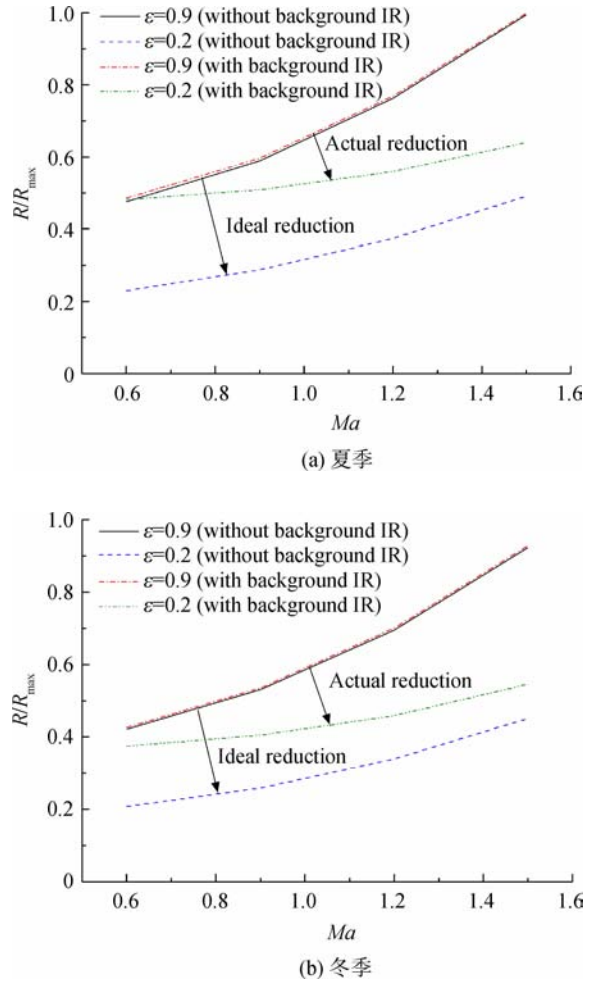


图 13 发射率由 0.9 降至 0.2 对 $\alpha=0^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的探测距离均值的影响

Fig. 13 Impact of emissivity changing from 0.9 to 0.2 on averaged detection distance at the region of $\alpha=0^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$

在夏季和冬季的探测距离分别增加了 76% 和 56%;当 $Ma=1.5$ 时,背景红外辐射使得采用低发射率材料后的飞机在夏季和冬季的探测距离分别增加了 30%和 21%.

图 14 给出了发射率由 0.9 降至 0.2 对 $\alpha=-10^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的无量纲探测距离均值的影响. 由图可见,由于地面的遮挡,存在一个截止距离,当高度为 11 km 时,截止距离为 63.4 km,对应的无量纲探测距离均值为 0.254. 当机体发射率为 0.9,不论是否考虑背景红外辐射,各个飞行速度下的探测距离均受限于截止距离;当机体发射率为 0.2,不考虑背景红外辐射的夏季探测距离略小于截止距离,冬季探测距离除了 $Ma=0.6$,其他飞行速度下的探测距离也受限于截止距离;当机体发射率为 0.2,考虑背景红外辐射的探测距离均受限于截止距离.

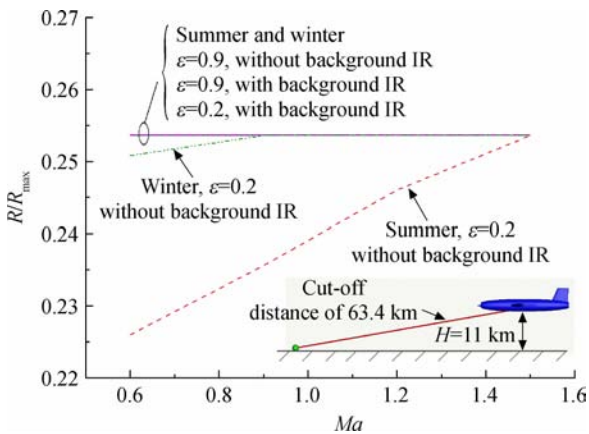


图 14 发射率由 0.9 降至 0.2 对 $\alpha=-10^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的探测距离均值的影响
Fig. 14 Impact of emissivity changing from 0.9 to 0.2 on averaged detection distance at the region of $\alpha=-10^\circ, \beta=-30^\circ\sim30^\circ$

3.3 考虑背景辐射的飞机低发射率分布方案优选

由前文的结果可以看出,低发射率材料的红外抑制效果受到环境背景的影响而降低,有时甚至不能起到红外抑制作用,在特定的条件下,合理地分布发射率才能起到更好的红外抑制效果. 为此,本文对比了 4 种发射率方案对飞机前向 $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$ 区域内的红外辐射强度均值的影响,分别为:方案①机身上表面和下表面的发射率均为 0.9;方案②机身上表面和下表面的发射率均为 0.2;方案③机身上表面的发射率 ϵ_{upper} 均为 0.2,下表面 ϵ_{lower} 的发射率为 0.9;方案④机身上表面的发射率均为 0.9,下表面的发射率为 0.2.

图 15 给出了夏季背景下,不同发射率分布对飞机前向无量纲红外辐射强度的影响. 由图可见,在 $\alpha=0^\circ$ 平面内,当 $Ma<0.95$ 时,方案③的红外辐射强度最低,但与方案②的差距并不大;当 $Ma>0.95$,方案②的红外辐射最低. 在 $\alpha=-10^\circ$ 平面内,当 $Ma<1.4$ 时,方案③的红外辐射强度最低;当 $Ma>1.4$,方案②的红外辐射强度最低. 综合图 15(a)和图 15(b)可以看出,在夏季环境下,当 $Ma<1.4$ 时,飞机上表面适宜采用低红外辐射率材料,下表面适宜采用高发射率材料;当 $Ma>1.4$ 时,飞机上下表面均适宜采用低发射率材料.

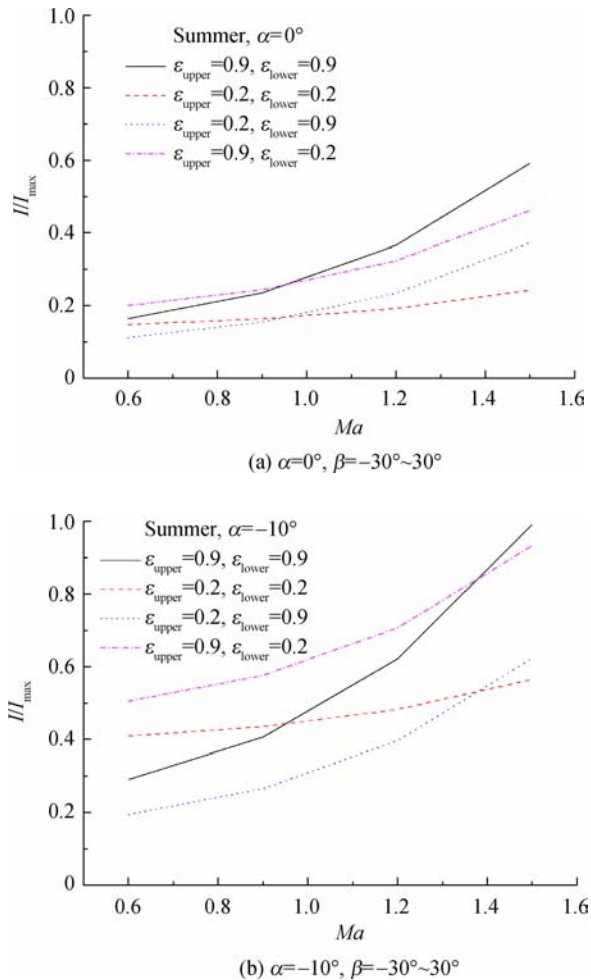
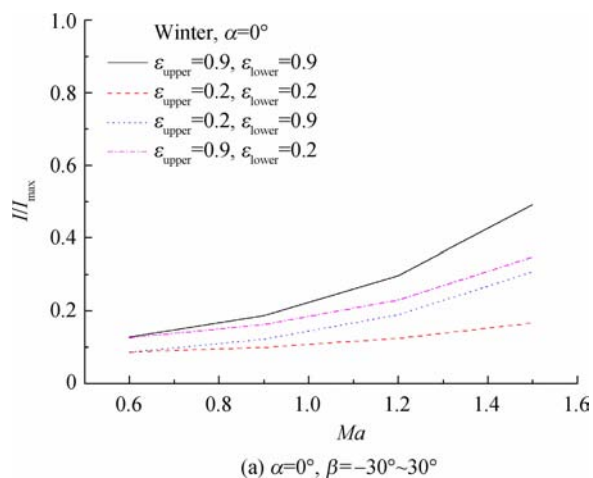


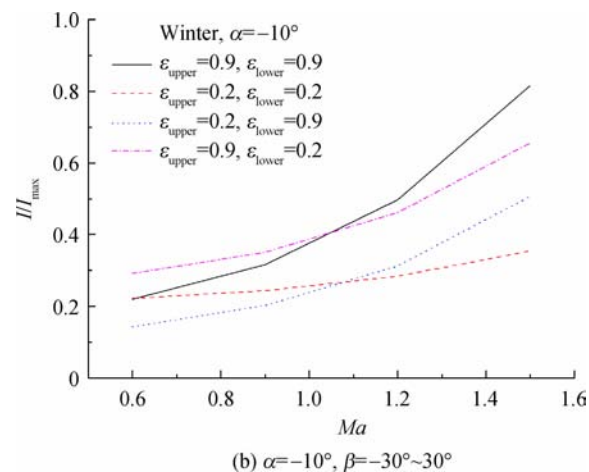
图 15 夏季背景下,不同发射率分布对飞机前向红外辐射强度的影响
Fig. 15 Impact of different emissivity distribution on the infrared radiation intensity of the front region of aircraft, under the summer background

图 16 给出了冬季背景下,不同发射率分布对飞机前向无量纲红外辐射强度的影响. 由图可见,在 $\alpha=0^\circ$ 平面内,方案②的红外辐射最低,且 Ma

越大,方案②的红外抑制效果约好;在 $\alpha=-10^\circ$ 平面内,当 $Ma<1.1$ 时,方案③的红外辐射最低,当 $Ma>1.1$ 时,方案②的红外辐射最低.综合图15(a)和图15(b)可以看出,在冬季环境下,当 $Ma<1.1$ 时,飞机上表面适宜采用低辐射率材料,下表面适宜采用高发射率材料;当 $Ma>1.1$ 时,飞机上下表面均适宜采用低发射率材料.



(a) $\alpha=0^\circ$, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$



(b) $\alpha=-10^\circ$, $\beta=-30^\circ\sim30^\circ$

图16 冬季背景下,不同发射率分布对飞机前后红外辐射强度均值的影响

Fig. 16 Impact of different emissivity distribution on the infrared radiation intensity of the front region of aircraft, under the winter background

4 结 论

1) 考虑蒙皮对大气和地面背景红外辐射的反射时,降低蒙皮发射率对飞机红外辐射的实际抑制效率明显下降,有些情况下甚至会增大飞机的红外辐射强度.对于飞行马赫数为0.9和1.5的飞机表面,发射率每降低0.1,水平辐射面内的红外辐射强度理想抑制效率为10%,但夏季环境

下,实际抑制效率分别为4.2%和7.8%,冬季环境下,分别为6%和8.5%.对于飞机下方 -10° 辐射面,当夏季飞行马赫数小于0.9,冬季飞行马赫数小于0.6时,降低发射率会增加飞机的红外辐射.

2) 降低飞机发射率时,蒙皮反射的大气和地面红外辐射增加了探测距离,且夏季增加幅度大于冬季,低飞行马赫数时的增加幅度大于高飞行马赫数.当 $Ma=0.9$ 时,背景红外辐射使得采用低发射率材料后(发射率由0.9降至0.2)的飞机在夏季和冬季的探测距离分别增加了76%和56%;当 $Ma=1.5$ 时,夏季和冬季的探测距离分别增加了30%和21%.

3) 采用低发射率材料抑制飞机蒙皮的红外辐射时,需充分考虑飞行环境以及飞行状态,对低发射率材料进行合理的分布才能获得更好的红外抑制效果.总的来说,亚声速飞行时,降低飞机上表面的发射率的红外隐身效果较好;超声速飞行时,降低飞机全部表面的发射率的红外隐身效果较好.

参考文献:

- [1] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7/8): 218-245.
- [2] Yildirim Z. Self defence of large aircraft[D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2008.
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [4] Coiro E. Global illumination technique for aircraft infrared signature calculations[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(1): 103-113.
- [5] Zhang W, Xu G, Ding R, et al. Nacre biomimetic design: a possible approach to prepare low infrared emissivity composite coatings[J]. Materials Science and Engineering: C, 2013, 33(1): 99-102.
- [6] 余慧娟, 徐国跃, 沈轩, 等. 8~14 μm 波段低发射率涂料的制备与优化研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(6): 49-52.
- [7] YU Huijuan, XU Guoyue, SHEN Xuan, et al. Study on preparation and optimization of low infrared emission coating in 8-14 μm [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(6): 49-52. (in Chinese)
- [8] 韦第升, 王小群, 杜善义. 飞行器红外隐身效能工程评价方法[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1592-1597.
- [9] WEI Disheng, WANG Xiaoqun, DU Shanyi. Engineering evaluation method for infrared camouflage efficiency of aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1592-1597. (in Chinese)

[8] 吕建伟,王强. 飞行器蒙皮红外辐射特征的反向蒙特卡罗计算与分析方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 232-237.
LÜ Jianwei, WANG Qiang. Numerical calculation and analysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 232-237. (in Chinese)

[9] 林杰,江勇,方浩百,等. 飞机整机蒙皮自身红外辐射特性建模与分析[J]. 红外技术, 2012, 34(5): 286-291.
LIN Jie, JIANG Yong, FANG Haobai, et al. , Modeling and analysis on self-infrared radiation characteristics of whole aircraft skin[J]. Infrared Technology, 2012, 34(5): 286-291. (in Chinese)

[10] 徐顶国,桑建华,罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 880-884
XU Dingguo, SANG Jianhua, LUO Mingdong. Study on the infrared radiation characteristics of UAVS' skin[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 880-884. (in Chinese)

[11] 斯仁,吉洪湖,黄伟. 低发射率对二元引射喷管无人机红外特征及探测距离的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 665-670.
SI Ren, JI Honghu, HUANG Wei. Effect of low emissivity on infrared signature and detection range of UAV with 2-D ejector nozzle[J]. Journal of Nanning University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(5): 665-670. (in Chinese)

[12] 刘健,宫禹,吉洪湖. 战斗机 8~14 mm 波段红外特征及低发射率材料隐身效果[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 259-267.
LIU Jian, GONG Yu, JI Honghu. Fighter's infrared characteristics between 8 and 14 μm and infrared stealth effect of low emissivity materials. [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 259-267. (in Chinese)

[13] Mahulikar S P, Rao G A, Kolhe P S. Infrared signatures of low-flying aircraft and their rear fuselage skin's emissivity optimization[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(1): 226-232.

[14] 刘钢,额日其太,朱希娟. 巡航导弹蒙皮红外辐射特性的反向蒙特卡罗法模拟[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5): 1012-1017.
LIU Gang, Erqitai, ZHU Xijuan. Simulation of infrared radiation characteristics of cruise missile skin by backward Monte Carlo method[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(5): 1012-1017. (in Chinese)

[15] 徐顶国,桑建华,罗明东. 背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 649-653.
XU Dingguo, SANG Jianhua, LUO Mingdong. Simulation study on the infrared radiation characteristics of UAV under the background radiation[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(6): 649-653. (in Chinese)

[16] 吕建伟. 飞行器表面红外辐射特征计算及红外隐身方案研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2009.
LÜ Jianwei. Numerical reserch on aircraft skin infrared characteristics and its infrared suppression program[D]. Beijing, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)

[17] 谈和平,夏新林,刘林华,等. 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.

[18] Ontar Corporation. PcModWin manual: version 4. 0 [M]. North Andover, MA: Ontar Corporation, 2001.

[19] 冯晓星,吉洪湖,斯仁,等. 战斗机 3~5 μm 波段红外特征空间分布及低发射率材料隐身效果分析[J]. 红外技术, 2011, 33(7): 389-405.
FENG Xiaoxing, JI Honghu, SI Ren, et al. Numerical study on spatial distribution of 3~5 μm infrared signature and stealth effect of low emissivity material for fighter aircraft[J]. Infrared Technology, 2011, 33(7): 389-405. (in Chinese)

[20] Hermansson P, Hjelm A, Lindell R. Benchmarking and validation of IR signature programs; SensorVision, CAME-O-SIM and RadThermIR[R]. FOI-R-0952-SE, 2003.

(编辑:王碧琚)