

## 蒙皮反射的背景辐射对亚声速飞机红外特征的影响研究(二):应用

黄 伟,吉洪湖

(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,江苏 南京 210016)

**摘 要:** 采用典型背景下的飞行器红外辐射特征计算模型,研究了蒙皮反射太阳、大气和地面等背景辐射对亚声速飞机总的红外特征的影响。计算分析了背景辐射对降低发射率的红外抑制效果的影响。结果表明:太阳辐射对飞机前向探测区域 3~5  $\mu\text{m}$  波段的红外辐射强度影响最大,大气和地面辐射对飞机前向和侧向探测区域 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外辐射影响更明显;探测方位、季节不同,影响程度也不同;蒙皮反射的背景红外辐射使得降低发射率措施的红外抑制效果降低甚至失效。

**关键词:** 红外辐射; 飞机; 背景辐射; 发射率; 红外隐身

中图分类号: TN219; V218 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)07-2039-05

## Effect of reflected background radiation by skin on infrared characteristics of subsonic aircraft (II): application

Huang Wei, Ji Honghu

(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 effect of background radiation, such as the sunshine, the atmosphere and the ground on the total infrared radiation signature of a subsonic aircraft was studied by using the infrared radiation signature computation model under typical background environment. The influence of the background radiation on the infrared suppression of low emissivity was analyzed. The results show that the sunshine radiation has a great effect on the front detection region of the aircraft in the 3–5  $\mu\text{m}$  waveband; the atmosphere and ground radiation has a more obvious effect on the front and side detection region of the aircraft in the 8–14  $\mu\text{m}$  waveband; the impact is different when the detection orientation and season changes; the infrared radiation suppression effect of low emissivity is reduced or even failed because of the background infrared radiation reflected from the skin.

**Key words:** infrared radiation; aircraft; background radiation; emissivity; infrared stealth

收稿日期: 2014-11-09; 修订日期: 2015-06-26

基金项目: 航空科学基金(20132752039)

作者简介: 黄伟(1983-), 男, 博士后, 主要从事红外隐身方面的研究。Email: hw\_one@163.com

## 0 引言

随着红外制导武器以及红外探测系统的迅猛发展,飞行器受到的红外威胁日益严重<sup>[1]</sup>。近年来,研究人员对飞机的红外辐射特征以及红外抑制技术开展了广泛的研究,以提高其隐身性能。

为了简化计算,许多学者在研究中忽略背景辐射的影响。韦第升等<sup>[2]</sup>研究了飞行器红外隐身效能的工程评价方法;单勇等<sup>[3]</sup>采用逆向蒙特卡罗法对导弹蒙皮的红外辐射强度进行了计算分析;吕建伟<sup>[4]</sup>对飞行器蒙皮的红外辐射特征进行了计算分析;斯仁等<sup>[5]</sup>研究了低发射率红外材料对探测距离和概率的影响。关于背景辐射对空中目标红外辐射特征的影响也有相关研究。但计算模型往往简化较大,忽略了较多的因素,如发动机排气系统热喷流辐射、发射率光谱特性、蒙皮的双向反射特性等等。例如,Rao等<sup>[6]</sup>研究了大气辐射以及大气吸收对飞机红外辐射特征以及地空导弹探测距离的影响;Guo等<sup>[7]</sup>计算分析了复杂目标对背景红外辐射的散射特征;冯云松等<sup>[8]</sup>理论计算了空中目标蒙皮红外辐射特性。

文中以某虚拟的单发固定翼飞机简化模型为研究对象,采用综合考虑飞机自身辐射和反射辐射的飞行器红外辐射特征计算模型,较系统地研究了蒙皮反射太阳、大气和地面等背景辐射对飞机总的红外特征的影响。最后,对考虑背景辐射时降低发射率的红外抑制效果进行了分析。研究结果可为飞行器的红外特征分析以及红外隐身设计提供参考。

## 1 物理模型及工况参数

### 1.1 物理模型

虚拟的单发飞机模型如图 1 所示。飞机模型由进气系统、机身蒙皮、机翼蒙皮、尾翼蒙皮和排气系统等部分组成。机身长约 11.86 m,翼展约 9.82 m。

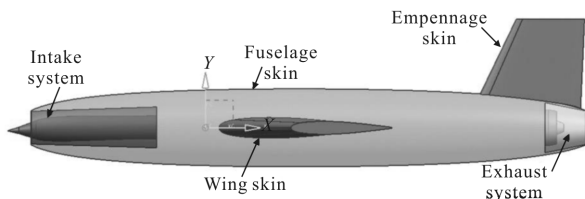


图 1 飞机模型侧视图

Fig.1 Side view of aircraft model

排气系统为涡扇结构,如图 2 所示,由外涵、涡轮出口面、中心锥、混合器和收敛喷管等部件组成。低压涡轮出口和外涵道在 5 截面上的面积分别为  $0.24\text{m}^2$  和  $0.4\text{m}^2$ ,喷管出口(8 截面)的面积为  $0.365\text{m}^2$ 。

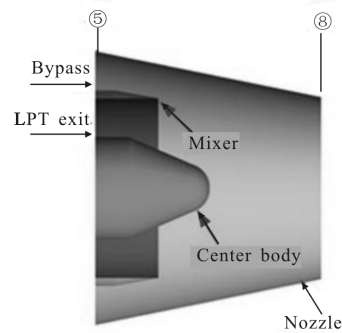


图 2 排气系统模型

Fig.2 Exhaust system model

### 1.2 工况参数

假设飞行高度为海拔 11 km,飞行速度为  $0.8\text{Ma}$ ,攻角为  $0^\circ$ 。计算中考虑了中纬度夏天(北纬  $45^\circ$ ,7月)和中纬度冬天(北纬  $45^\circ$ ,1月)两种典型大气条件。夏季时,11 km 高度处的当地大气压力和温度分别为 24 300 Pa 和 228.2 K;冬季时,分别为 21 990 Pa 和 219.2 K。发动机 5 截面上的工作压力及温度工况根据总体性能参数由 GasTurb 程序计算得到,计算中假设输入的地面空气总流量为  $105\text{kg/s}$ ,设计涵道比为 3.5。发动机 5 截面上的工况参数见表 1。内涵气体假设完全燃烧,组分浓度可由耗油率及空气流量计算得到,耗油率及内涵空气流量分别为  $0.29\text{kg/s}$  和  $13\text{kg/s}$ 。外涵的气体组分浓度根据大气参数给定。

表 1 发动机 5 截面上的工况参数

Tab.1 Working condition parameters of section 5 of engine

Season	$p^*/\text{Pa}$	$T^*/\text{K}$	Mole fractions	
			$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$
Summer	56 770	873	0.045	0.047
	58 310	305	0.000 33	0.0
Winter	60 290	837	0.042	0.046
	61 760	286	0.000 33	0.0

## 2 计算方法

### 2.1 流场、温度场计算

流场、温度场的计算方法可参考第一部分。计算中,固体壁面网格采用四边形网格划分,如图3流体网格采用六边形结构化网格划分,并在排气系统高温喷流区域和蒙皮近壁区进行了加密处理,蒙皮近壁区域网格的 $y^+$ 约为5。

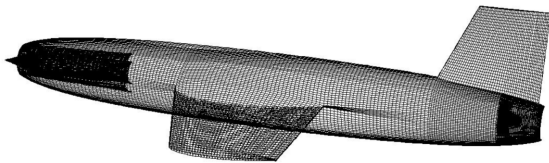


图3 壁面网格  
Fig.3 Wall grid

### 2.2 飞机总的红外辐射计算

飞机总的红外辐射包括自身辐射和反射的背景辐射。自身辐射包括蒙皮的红外辐射、发动机热部件的红外辐射和热喷流的红外辐射,背景辐射包括太阳、大气以及地面辐射。具体计算过程可参考第一部分<sup>[9]</sup>。

### 2.3 飞机红外辐射方位

计算了飞机水平探测面内的红外辐射,以方位角 $\alpha$ 表示任意圆锥辐射面内,任意辐射方位与飞机轴线的夹角, $0^\circ$ 表示飞机前向, $180^\circ$ 表示飞机后向。为了表述方便,将 $\alpha=0^\circ\sim 180^\circ$ 的区域划分为3个子区域,其中 $\alpha=0^\circ\sim 45^\circ$ 为前向区域, $\alpha=45^\circ\sim 135^\circ$ 为侧向区域, $\alpha=135^\circ\sim 180^\circ$ 为后向区域。

### 2.4 反射辐射比

以飞机蒙皮反射背景红外辐射强度与飞机自身红外辐射强度之比来衡量蒙皮反射背景辐射强弱,简称“反射辐射比”,记为“RIR”,见公式(1)。

$$RIR = I_{\text{reflect}} / I_{\text{ac}} \times 100\% \quad (1)$$

该参数说明了反射的背景辐射相对于飞机自身辐射增加的幅度,RIR越小表示反射的背景辐射对飞机的红外辐射特征影响越小,反之则越大。

## 3 结果与分析

### 3.1 温度场及压力场计算结果

蒙皮的静温分布如图4所示。由图可见,夏季飞机蒙皮的平均温度为256.4 K,比环境温度上升了

27.6 K;冬季飞机蒙皮的平均温度为245.8 K,比环境温度上升了26.5 K。

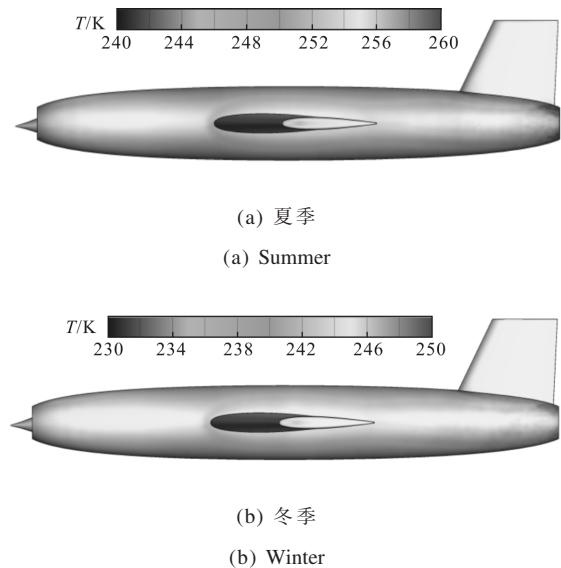


图4 蒙皮静温分布

Fig. 4 Distribution of skin static temperature

发动机热喷流温度分布如图5所示。由图可见,不同季节的喷流分布形式类似,但夏季时喷流核心区温度略高于冬季,约有 $25^\circ\text{C}$ 的温差,这主要是由发动机工作状态变化引起的。

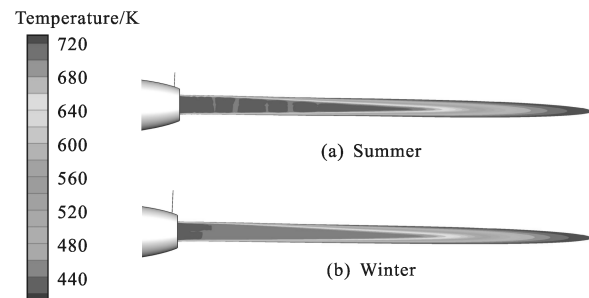


图5 喷流静温分布

Fig.5 Distribution of plume static temperature

喷管内腔及出口下游的静压分布如图6所示。由图可见,喷管内腔的压力明显高于环境压力,出口下游的静压略高于环境压力,处于欠膨胀状态。



图6 喷流静压分布

Fig.6 Distribution of plume static pressure

### 3.2 蒙皮反射的背景红外辐射对比

夏季时, 反射辐射比随方位角  $\alpha$  的分布如图 7 所示。由图 7(a) 可见, 对  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段 RIR 影响最大的是太阳辐射, 其次是大气辐射和地面辐射, 三者随角度的分布规律类似, 但蒙皮反射的太阳辐射比后两者大约一个数量级。RIR 在前向区域最大, 侧向区域次之, 后向区域最小, 主要原因是前向区域以蒙皮反射为主, 侧向及后向区域以喷流和热部件辐射为主。 $\alpha=0^\circ$  方向上的 RIR 可达到 500%,  $\alpha>45^\circ$  后, RIR 开始小于 10%,  $\alpha>140^\circ$  后, RIR 开始小于 5%,  $\alpha=45^\circ\sim 140^\circ$  范围内 RIR 的平均值约为 8.5%。

由图 7(b) 可见, 对  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段 RIR 影响最大的是大气辐射, 其次是地面辐射, 太阳辐射的影响可以忽略。在前向和侧向区域, 总的 RIR 随角度的变化不大, 平均值约为 11%。在后向区域, 总的 RIR 随角度的增加而逐渐降低, 尾向  $180^\circ$  上的 RIR 约为 4%。

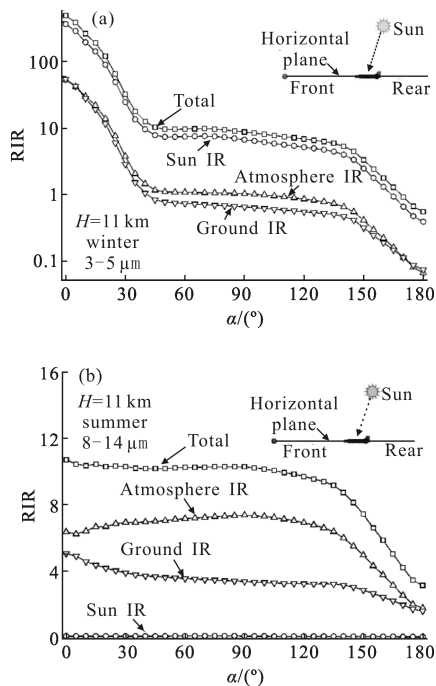


图 7 夏季时, 反射辐射比随方位角  $\alpha$  的分布

Fig.7 Distribution of RIR with the azimuth angle  $\alpha$  during the summer

冬季时, 反射辐射比 RIR 随探测角度的分布与夏季时类似, 但量值有所降低。在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段,  $\alpha=0^\circ$  方向上的 RIR 可达到 450%,  $\alpha>40^\circ$  后, RIR 开始小于 10%,  $\alpha>130^\circ$  后, RIR 开始小于 5%。 $\alpha=40^\circ\sim 130^\circ$  范围内 RIR 的平均值约为 7%。在  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段,  $\alpha=0^\circ$

$\sim 135^\circ$  范围内总的 RIR 平均值约为 8%, 尾向  $180^\circ$  上的 RIR 约为 2.3%。

蒙皮反射太阳辐射的强弱与太阳位置的关系密切, 图 8 给出了飞机与太阳在四种相对位置下的反射辐射比分布。由图可见, 总的趋势都是太阳辐射对飞机前向区域的红外辐射的影响最大, 侧向区域次之, 后向区域最小。当探测方位与太阳在飞机的同侧时(图中的 L), 反射辐射比最大; 当探测方位与太阳在飞机的异侧时(图中的 R), 反射辐射比最小; 当太阳位于飞机前向(图中的 F)或后向时(图中的 B), 反射辐射比介于前两者之间。

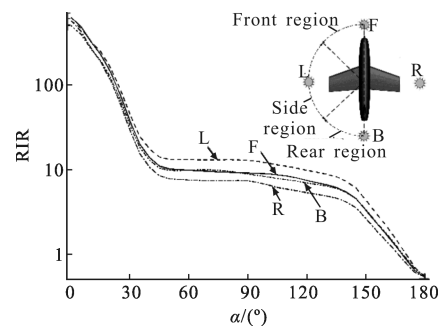


图 8 飞机与太阳在四种相对位置下的反射辐射比分布

Fig.8 Distribution of sun RIR at four different relative positions

### 3.3 背景辐射对降低发射率的红外抑制效果的影响

夏季时, 降低发射率前后的红外辐射强度对比如图 9 所示。在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段, 无背景辐射时, 发射率

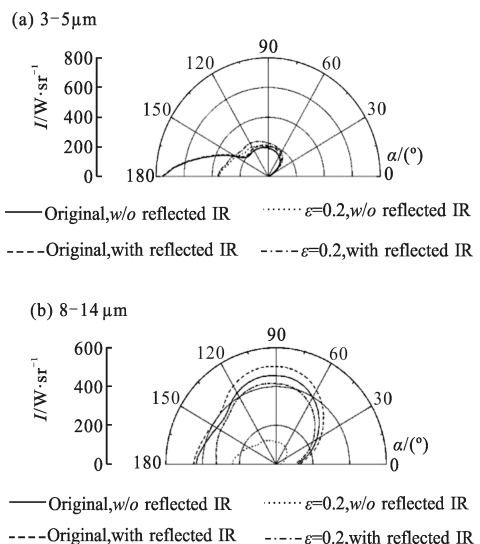


图 9 夏季时, 降低发射率前后的红外辐射强度对比

Fig.9 Comparison of infrared radiation intensity before and after reducing emissivity during summer



降至 0.2 可使飞机机头及机尾方向的红外辐射强度降低 50% 以上;有背景时,发射率降至 0.2 可使机头方向的红外辐射增加 70%~80% 左右,侧向也有 8%~20% 左右的增加,但对尾向的红外抑制率影响不大。在 8~14  $\mu\text{m}$  波段,无背景时,发射率降至 0.2 可使飞机红外辐射降低 45%~75%;有背景时,发射率降至 0.2 只能使飞机红外辐射强度降低 14%~28%。

冬季时,降低发射率前后的红外辐射强度对比如图 10 所示。降低发射率以及背景辐射对飞机红外辐射的影响与夏季时类似,但具体数值有所差别。在 3~5  $\mu\text{m}$  波段,无背景时,发射率降至 0.2 的红外抑制率与夏季时相当;有背景时,降低发射率导致飞机红外辐射增加的幅度相比夏季有所降低。在 8~14  $\mu\text{m}$  波段,无背景时,发射率降至 0.2 的红外抑制率与夏季时相当;有背景时,发射率降至 0.2 只能使飞机的红外辐射强度降低 28%~34% 左右。

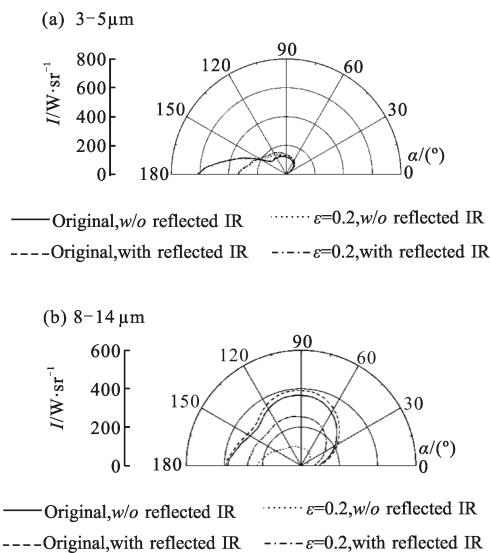


图 10 冬季时,降低发射率前后的红外辐射强度对比

Fig.10 Comparison of infrared radiation intensity before and after reducing emissivity during winter

## 4 结论

(1) 在 3~5  $\mu\text{m}$  波段,蒙皮反射的太阳辐射比大气及地面红外辐射大一个数量级以上,且对以蒙皮辐射为主的飞机前向区域的影响更为明显。当太阳方位与飞机红外辐射观测方位同侧时,反射的太阳辐射最大,异侧时,反射的太阳辐射最小。

(2) 在 8~14  $\mu\text{m}$  波段,蒙皮反射的大气及地面

红外辐射更为明显。夏季和冬季时,分别可使飞行速度为 0.8Ma 的飞机前向及侧向的红外辐射强度增加 11% 和 8% 左右,且夏季时反射的大气辐射比冬季更强。

(3) 蒙皮反射的背景红外辐射使得降低发射率措施的红外抑制效果降低甚至失效。文中计算表明:降低 3~5  $\mu\text{m}$  波段的发射率时,反射的太阳辐射使得飞机前向和侧向的总红外辐射增加,而降低 8~14  $\mu\text{m}$  波段发射率时,红外抑制率比无背景辐射时减少了 40% (冬季) 至 60% (夏季) 左右。

## 参考文献:

- [1] Yildirim Z. Self defence of large aircraft [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [2] Wei Disheng, Wang Xiaoqun, Du Shanyi. Engineering evaluation method for infrared camouflage efficiency of aircraft [J]. *Acta Aeronautica ET Astronaut ICA Sinica*, 2008, 29(6): 1592-1597. (in Chinese)
- [3] Shan Yong, Zhang Jingzhou, Guo Rongwei. Numerical computation and anlysis of the infrared radiation characteristic of missile scarfskin [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2): 251-255. (in Chinese)
- [4] Lv Jianwei, Wang Qiang. Numerical calclation and anlysis of infrared radiation characteristics from aircraft skin by using RMC method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 232-237. (in Chinese)
- [5] Si Ren, Ji Honghu, Feng Xiaoxing, et al. Influence of low emissivity infrared materials on range and probability of detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 442-448. (in Chinese)
- [6] Rao G A, Mahulikal S P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures [J]. *Journal of Aircraft*, 2005, 42(4): 1046-1054.
- [7] Feng Yunsong, Lv Xiangyin, Ling Yongshun, et al. Theoretical calculation on infrared radiation of air target scarfskin [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40 (2): 115-122. (in Chinese)
- [8] Guo X, Wu Z, L Linghu, et al. Scattering characteristics of complex target from solar irradiance and sky-ground background radiance in infrared spectrum [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 571: 367-371.
- [9] Huang Wei, Ji Honghu. Effect of reflected background radiation by skin on infrared characteristics of subsonic aircraft (I): methodology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1699-1703. (in Chinese)