

文章编号: 1672-8785(2017)08-0001-07

飞机红外隐身及探测技术简介

黄 臻¹ 姜 伟² 张 杨²

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109;

2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 根据理论方法和调研情况, 介绍了主要的隐形飞机, 并阐述了红外探测技术的发展及其主要的应用领域。在分析隐形飞机的红外辐射之后, 主要对隐形飞机的尾喷管辐射、尾焰辐射以及蒙皮辐射进行了研究, 并针对每一种辐射都给出了具体的红外隐身方法。最后给出了结论, 并期望针对红外隐身技术发展出更先进的可满足现代军事需求的红外探测手段。

关键词: 隐形飞机; 红外隐身; 红外辐射; 尾喷管; 尾焰; 蒙皮辐射

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.08.001

Brief Introduction to Infrared Stealth and Detection Technology of Aircraft

HUANG Zhen¹, JIANG Wei², ZHANG Yang²

(1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: According to the theoretical methods and the situation investigated, the development and main application fields of infrared detection technology are presented. After analyzing the infrared radiation of stealth aircrafts, the tail nozzle radiation, tail flame radiation and skin heat radiation of stealth aircrafts are studied. Then, a specific infrared stealth method is given for each kind of radiation. Finally, a conclusion is given and more advanced infrared detection means against infrared stealth technologies are expected to satisfy the demands of modern military.

Key words: stealth aircraft; infrared stealth; infrared radiation; tail nozzle; tail flame; skin radiation

0 引言

随着现代军事高科技的迅猛发展, 隐身技术已经成为了立体化现代战争中最重要、最有效的突防战术技术手段。作为现代战争的关键技术之一, 隐身技术受到了世界各国的高度重视。而在陆、海、空、天、电磁五位一体的立体化现代战争中, 最受人关注的则是空中飞行器

隐身技术。美国在这方面居于世界前列^[1]。

面对隐形飞机强大的隐身能力, 传统的雷达探测技术已经较难胜任快速发现目标的任务。然而, 通过对飞机本身的热辐射进行红外探测, 则可以很好地发现隐形飞机。

1 隐形飞机简介

1.1 主要的隐形飞机

收稿日期: 2017-07-18

作者简介: 黄臻(1976-), 男, 江苏常州人, 工程师, 主要从事导弹和武器系统雷达方面的研究。

E-mail: jsrdzy@mail.sitp.ac.cn

制空权是现代战争的重要组成部分,它会对战争的进程和结局产生重大影响。谁掌握了制空权,就可以决定战争的胜负。在海湾战争中,美国研制的世界上第一架隐形战斗机——F-117开始用于实战。36架F-117A战斗机出击1270架次,均没有被雷达发现和被地面火力击中,并且都能准确地进行超低空投弹,总共轰炸了80个设防严密的伊军战略目标。在F-117战斗机的基础上,美国研制出了人类目前最先进的隐形战斗机——F-22及其缩小版——F-35战斗机,并计划将它们大规模地装备于盟国军队。与此同时,我国也研制出了两款性能接近F-22的战斗机——歼-20和歼-31。不过外界普遍认为,歼-20战斗机的鸭翼和腹鳍会对隐身性能造成不利影响,其正面的雷达散射截面积大于F-22。

1.2 针对雷达探测的隐形技术

仅仅通过雷达就想分辨出隐形飞机是很困难的。隐形的含义是低可探测性。在人类目前的科技水平下,雷达波是最常用且最可靠的远距离探测手段。因此,到目前为止,隐形科技指的都是降低对雷达的可探测性。只要能将对雷达波的反射水平降至与周围环境同一等级,就可以认为该装备实现了对雷达的隐形。

对于飞机来说,由于处在空旷的天空中,除非把自身的反射水平降至同云彩一个等级,否则还是能够被雷达捕捉到。因此,隐形飞机的研制难度极高。正如上文所罗列的,目前世界上真正能称为隐形飞机的屈指可数。隐形飞机的隐形手段主要采用以下两种方式:

(1) 采用可吸收雷达波的材料。其实符合这个特点的材料早就大量被用于制造飞机。很多经典的机型都采用该材料制作。这种材料就是木头。可是随着对飞机速度的要求越来越高,木头也逐渐被飞机制造行业所淘汰。现代飞机主要采用金属蒙皮,而金属又很容易被雷达探测到。于是人们从潜艇的消声瓦中得到了启发,即在金属机身上刷一层可吸收雷达波的特制材料,以有效地使雷达收到的回波变小,从而提高战斗机的隐身能力。但是涂料不仅会增加飞机

重量和降低飞行性能,而且还会遭受磨损,所以需要经常重新涂抹,使得隐形飞机的维护比普通飞机难上许多。正因如此,寻找雷达波吸收能力强且对飞机作战性能影响小的材料是隐身飞机研究的核心内容。

(2) 通过机身形状的设计,使其在大部分的方向上降低反射率。流线型机身虽然空气阻力小,但是就像凸面镜一样,无论从哪个方向照过来的雷达波都能很好地反射回去。通过将机体尽量做成平面拼接,可以把大部分雷达波反射到其他方向上,进而间接减小自身的反射率。典型的例子就是F-117战斗机,其整体机型中找不到一个曲面。同时,采用倾斜垂尾也符合隐形设计,B-2轰炸机更是直接取消了垂尾。

所以要探测到隐形飞机,在雷达探测的基础上,还须对座舱和飞机排出的热气以及高速飞行时的热效应进行红外探测。

2 红外探测简介

2.1 红外技术的发展

1800年,英国天文学家Herschel F W发现了红外线。20世纪70年代,热成像系统和电荷耦合器件为人们所用。20世纪末,以焦平面阵列为代表的红外器件得到了成功应用。

红外技术的核心是红外探测器。其中,单元红外探测器包括InSb(锑化铟)、HgCdTe(碲镉汞)、非本征硅以及热电探测器等;线列红外探测器包括60元、120元、180元和256元等,它们可被拼接到1024元甚至更大;在4N系列扫描型焦平面阵列方面,有昆明物理研究所研制的4×288元阵列等;在凝视型焦平面阵列方面,致冷型有256×256元、320×240元、640×512元、1024×1024元和1280×720元等,非致冷型160×120元、320×240元和384×288元阵列已经广泛应用于各个行业,且640×480元阵列也已投入使用。

2.2 红外技术的主要应用领域

红外技术在早期只局限于军事应用,而伴随着冷战的结束,该技术则在民用领域得到了广泛应用。战后世界主要国家的经济逐渐恢复,同时III-V族半导体红外探测器材料研究也变得更

加深入,使得红外技术愈发成熟,且产品成本有所下降。因此,民用领域目前已经成为了红外技术的主要盈利点。

2.2.1 军用领域

各种各样的军事目标都可以被红外系统探测到。在目标侦查与预警方面,红外技术作为雷达探测的有效补充手段,在现代战争的电子对抗中发挥着重要作用;同时,红外技术还可以有效地对隐身目标进行监视和跟踪。此外,红外制导也是导弹精准打击的手段之一;驾驶和导航武器平台也可依靠红外技术实现^[2]。

在美、英、法、德、日、以等发达国家的军队中,红外热像仪已配置于陆、海、空各个军种。例如,在海湾战争中,平均每名美国士兵配有1.7具红外热像仪。与发达国家相比,我国军队目前红外热像仪的配备量相对较少,其市场需求相当巨大。

2.2.2 民用领域

目前,红外成像和红外测温已经在民用领域得到了广泛应用。在工业上,可用作一种设备故障诊断手段;在交通上,可用于自动控制;在电力方面,可用于在线监测和非接触测量;在石化方面,可用于资源勘查;在遥感领域,是遥感测量的重要方法;在医学上,可用于人体医学影像检查;在农业上,可用于环境污染监测与分析。随着系统级产品种类和量产规模的不断扩大,红外器件的成本逐渐降低。这个发展趋势不仅会促进这项技术在民用领域不断地探寻更多的用途,而且还会推动这项技术本身所牵引的基础行业的发展。民用领域的红外热像仪市场极有可能呈现出爆发性增长,未来全球潜在市场高达上千亿美元^[3]。

2.3 红外技术的原理

热辐射是每个物体的固有属性。作为一种能量交换形式,热辐射普遍存在于自然界中。可见光的波长范围为 $0.39 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 。 $0.76 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的热辐射实质上就是红外辐射。其中,近红外波段为 $0.76 \sim 3 \mu\text{m}$,中红外波段为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$,中远红外波段为 $6 \sim 20 \mu\text{m}$,远红外波段

为 $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 。而 $100 \mu\text{m}$ 以上就到了微波的范畴,这也是雷达的主要探测波段。近红外波段包含 $2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 的大气窗口,中红外波段包含 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的大气窗口,中远红外波段包含 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的大气窗口。这三个大气窗口是指相对大气透明的波段。只有在对应于大气窗口的波段,红外辐射才能透过大气。而在大气窗口之外的波段,很大一部分则难以透过大气^[4]。

任何温度高于绝对零度(-274.16°C)的物体时刻都在向外发出红外辐射。温度越高,发出的红外辐射越强^[5]。因此,各类军事目标的固有特征是红外辐射。在空中目标方面,由于飞机和火箭等飞行器速度快,其发动机及尾焰等具有很高的温度,所以是很明显的红外辐射源。这也为隐身飞机的红外探测提供了理论基础。

飞机的热红外辐射主要包括被加热的金属尾喷管的热辐射、发动机排出的高温尾喷焰的热辐射以及飞行时气动加热所形成的蒙皮热辐射^[6]。下面分别介绍如何抑制这三种热红外辐射以实现红外隐身的功能。

3 飞机的尾喷管辐射

3.1 尾喷管的红外辐射

尾喷管是航空发动机的一个重要组成部分。燃气经加速达到高速后从尾喷管向后喷出,产生反作用力,进而推动飞机运动。为了提高飞机的机动性,现代飞机要求喷管具有推力换向和反向的能力。同时,喷管喉道中的气流可控,使得涡轮和喷管中的气流膨胀比发生变化,从而控制发动机整体的工作状态。由于高速运动飞机的发动机温度很高,尾喷管是飞机红外辐射的主要来源之一^[7]。

尾喷管的红外辐射可以分为两种:一是空腔黑体辐射,其主要来源是燃气所形成的辐射和喷管内壁部件的辐射;二是固体辐射,其主要来源是喷管外部部件,如涡轮叶片和外罩等^[8]。尾喷管辐射主要覆盖 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段,其中心波长在 $4.2 \mu\text{m}$ 附近。

在建立尾喷管辐射仿真模型时,可以将尾喷管简化成一个被排出气体加热后的圆柱体。由于排气温度与管壁温度相差很大且管壁辐射

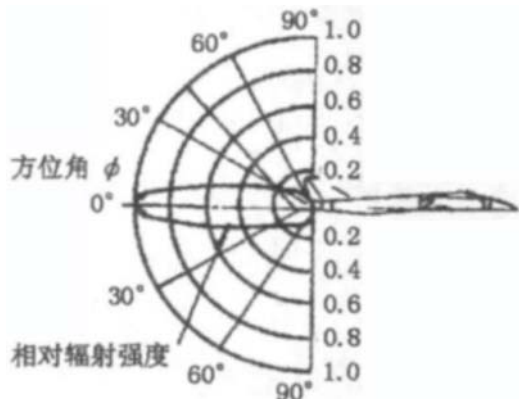


图 1 发动机尾喷管的热辐射空间分布

较小, 考虑到种种因素, 可以把尾喷管和热部件看作发射率为 0.9 的灰体。计算结果表明, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段, 发动机的热辐射强度约为 $1000 \sim 1500 \text{ W/sr}$, 集中在一个很小的角度范围内 (沿 ϕ 方向), 如图 1 所示。 ϕ 为观测视线方向与发动机喷管轴线正后方之间的夹角。可以看出, 尾喷管的红外辐射呈余弦规律逐渐减弱。

不同于机身的其他辐射, 尾喷管的辐射只能在后向探测时被看到。所以从后方侦测飞机主要利用的是尾喷管的红外辐射。飞机的飞行状态和发动机型号等会极大地影响尾喷管的温度。一般说来, 当飞机以额定速度飞行时, 尾喷口的温度比飞机在加力状态下飞行时的低很多。而且, 近年来的尾喷管研究表明, 通过采用涡扇发动机, 可以有效降低采用传统的涡喷发动机时的尾喷口温度^[9]。

3.2 尾喷管的红外隐身技术

对于发动机尾喷管的辐射, 目前红外隐身技术采取的措施包括发动机隔热、异形喷管、发动机及喷管结构的布局优化、排气出口调整与遮蔽以及喷射冷却剂等^[10-11], 以达到减小、变向、遮蔽尾喷管红外辐射的目的。隐身飞机的目标红外特征如下: 在飞机尾部, 红外辐射在方向和强度上出现变化; 在全机身上, 辐射强度发生变化。所以进行尾喷管探测时, 首先要考虑到飞机尾部辐射的方向性。

以美国某型号隐身战斗机为例^[12], 尾喷管决定了其尾部辐射的方向, 而发动机的工作状态和所用燃料决定了尾部辐射的强度。与传统

的尾喷管设计不同, 该型发动机采用二元矢量收敛-扩张喷管, 可在一定角度内进行偏转 (角度可达到俯仰 $\pm 20^\circ$)。利用这种尾喷管使排出的尾焰与大气掺混, 这有利于大气迅速耗散前者排出的高温燃气。研究表明, 喷管出口平面到后半球的最大辐射强度位于它的偏转方向上; 偏转角度在高低角方向上越大, 辐射强度越低。这种特性使得采用矢量喷管的飞机的尾部辐射在各个方向上的辐射强度不同, 且具有一定的方向性, 进而也有一定的机动性。若从飞机前方进行探测, 飞机机身则容易遮挡住尾喷管的辐射, 所以只有后向探测才能较好地探测到尾喷管辐射。由于二元矢量尾喷管具有前文所述的可偏转机动性, 后向探测时尾部产生的辐射具有极大的随机性。这不利于红外系统视场的探测, 从而减小被探测到的概率^[13]。

4 飞机的尾焰辐射

4.1 尾焰辐射的特征

尾焰和尾喷管的辐射主要会引起飞机的侧向和前向辐射。当然, 在非加力状态下, 与尾喷管辐射相比, 尾焰辐射还是较小的。而在加力状态下, 尾焰辐射大大增强, 并取代尾喷管辐射成为飞机的主要辐射源。尾焰辐射具有独特的光谱分布, 其红外特征全面且明显, 所以在飞机的红外隐身设计中, 尾焰辐射是优先注意的红外辐射源。图 2 为用军用红外相机近距离拍摄某隐形飞机所得到的图像。可以看出, 尾焰辐射在加力状态下是最为明显的辐射。

飞机尾焰由尾喷管中的燃料完全燃烧, 产生二氧化碳和水蒸气, 再经由尾喷管喷出。所以尾焰辐射的主要成分是水蒸气和二氧化碳辐射。这两种辐射的光谱是带状光谱, 同时具有选择性辐射特征。研究发现, 尾焰辐射的主要发射带在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 周围的谱带上, 这可被有效地从背景杂波中探测到。尾焰的强度和传输主要取决于气体温度。温度越低, 尾焰辐射强度和传输距离就越小。因此, 抑制飞机发动机红外辐射的关键就是降低尾焰温度^[14-15]。

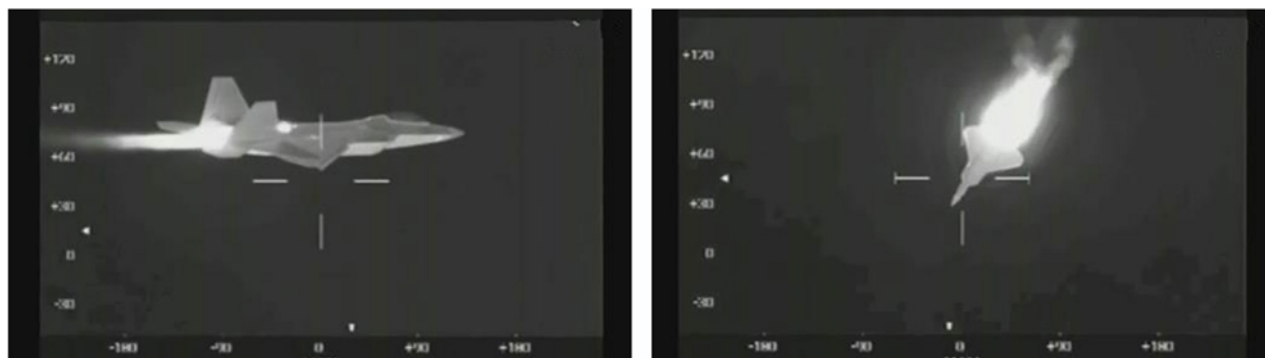


图 2 近距离拍摄某隐形飞机所得到的红外图像

4.2 尾焰辐射的抑制措施

经过大量的实验研究之后,得到了以下几种常用的尾焰辐射抑制方法。

4.2.1 用宽高比较大的二元非轴对称喷管取代轴对称喷管

与轴对称喷管相比,二元喷管对尾焰红外辐射的抑制效果大大增强。其主要原因如下:(1)二元喷管有圆转方的过渡阵。当燃气流过这个过渡阵时,会形成一对二次涡,将周围的冷气混杂进高温燃气,使尾焰的温度降低,从而减少红外辐射。(2)在喷管出口大小相同的情况下,轴对称喷管的出口边界比二元喷管的短,所以后者与外界对流的接触面积更大,有利于尾焰降温。(3)落压比越大,二元喷管越容易削弱近场激波强度,减少马赫盘数目,从而降低红外辐射^[14]。

4.2.2 燃气改进技术

该方法的核心思想是对燃气进行改造,即在燃气中添加含有红外屏蔽材料的物质,比如金属化合物微粒等。这样,燃气从尾喷管出来时就会形成红外屏蔽层,从而降低尾焰的红外辐射^[14]。

4.2.3 排气掺杂技术

由于外界大气中的空气温度远远低于尾喷管中的燃气温度,通过利用引射技术将冷空气引入管道内并将其与高温燃气掺杂,可以大大降低尾焰温度。研究表明,如果引射比足够高,那么尾焰的红外辐射最多可下降 90%^[14]。

4.2.4 “激化”技术

该技术采用“喷流激励”的方法,加强高温燃气射流边界的扰动,增强与外界大气的掺混,

从而降低尾焰温度^[16]。

4.3 国内外研究状况和最新进展

国外较早就开展了关于飞机尾焰热红外辐射特性的研究,主要的军事强国都通过专门的测试设备进行了实验测量,并获得了大量数据。其中,红外特性数值计算模型主要包括 NIRATAM 模型和 IRSAM 模型。前者基于辐射传递的基本理念建立,后者则加入了一定的实践经验。

对于隐形飞机来说,大气对其红外辐射的作用特别大。大气的传输特性和透过率对飞机尾焰的红外辐射有很大的影响。大气传输过程非常复杂,它不仅依赖于大气中吸收辐射分子的种类和浓度,而且还依赖于大气中悬浮微粒的大小以及沿传输路径上各点的温度、压强和气候条件。目前,大气传输计算模型研究有了很大进展。美国已经开发出了相当成熟的红外特征信号估算软件,并将其用于实际武器系统的红外特征信号估计。而 Rothman 等人重新对近年来的光谱参数研究成果进行了汇集,形成了完整的数据汇编,为尾焰辐射和大气辐射传输的计算提供了可靠的基础。

近年来,国内也逐渐重视飞机红外隐身及其相关方面的研究工作。研究人员已经提出了多种工程算法,主要包括吸收系数法、谱带模型法和经验法三种。北京航空航天大学提出的羽流辐射计算方法和西安电子科技大学提出的二元喷管尾焰红外辐射理论计算方法等都可以用于计算飞机处在地面和飞行时额定及加力状态下的尾焰。

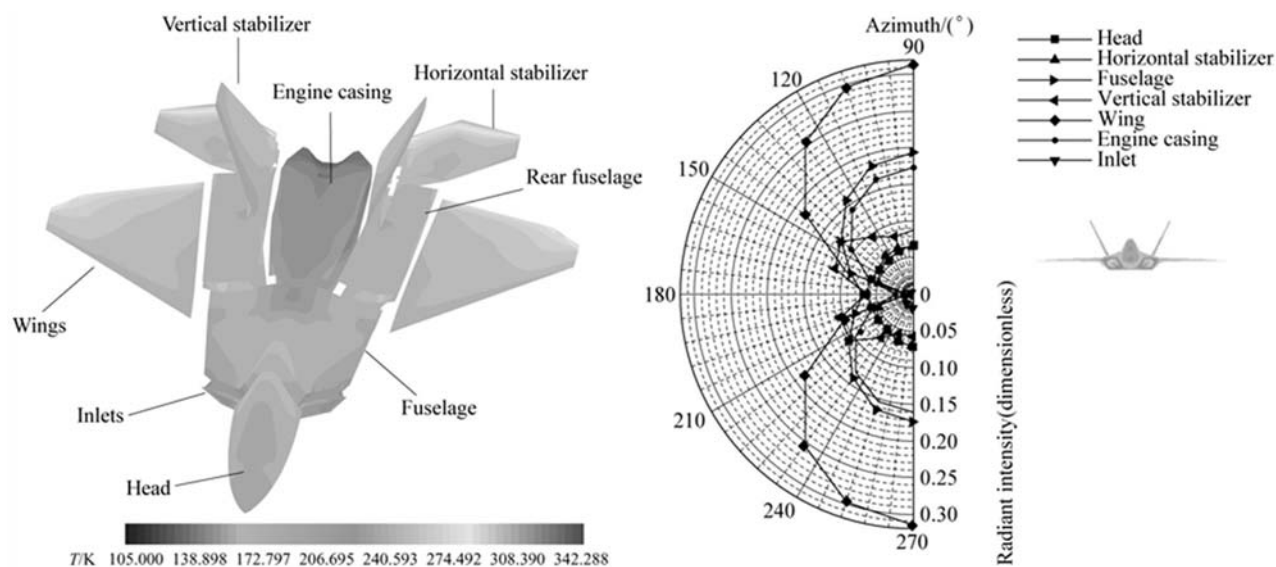


图 3 飞行器蒙皮的温度场及红外辐射^[17]

5 飞机的蒙皮辐射

5.1 蒙皮辐射的介绍

如上所述,尾喷管的红外辐射以及发动机高温尾焰的红外辐射都有一定的方向性。由于尾焰和尾喷管都处于飞机后端,在从飞机的前半段探测时,尾焰和尾喷管的红外辐射会被飞机机身遮挡一部分。所以尾焰和尾喷管的红外辐射是飞机后向探测的主要辐射源。若从飞机整体出发,蒙皮辐射则是飞机的主要辐射源。与尾部辐射不同,蒙皮辐射属于整体辐射,其红外图像可以明显地反映出飞机的几何形体,从而有利于对飞机进行识别和跟踪。飞机的蒙皮辐射主要由飞机本身的大小、机身表面材料的性质、飞行速度、飞行高度以及周围的大气环境等因素决定。因此,要研究飞机的蒙皮辐射,需要考虑空气摩擦的辐射,空气动力加热,飞机内部热源的辐射,地面、天空和太阳的背景辐射等等^[9]。图 3 所示为飞机蒙皮的温度场及红外辐射。

5.2 蒙皮辐射的特征

波段不一样,红外辐射发挥的作用也不一样。根据不同红外辐射的特征,可以计算出不同波段在飞机蒙皮辐射中所占的比值。以采用喷气发动机的某型旋翼直升机为例,3~5 μm 红外

辐射占整体蒙皮辐射的 13%,而 8~14 μm 红外辐射所占的比值达到 87%^[18]。后者如此之高的原因如下:(1) 在平均温度为 300 K 的环境下,蒙皮辐射的峰值波长为 10 μm,处在 8~14 μm 之间。(2) 波段宽度越大,黑体的辐射强度越大。8~14 μm 的波段宽度远远大于 3~5 μm 的波段宽度。因此,黑体在 8~14 μm 波段的辐射能量是 3~5 μm 波段的 30 倍左右。(3) 蒙皮辐射是机身整体的辐射特征。蒙皮的面积比尾喷管大很多倍。所以综合说来,8~14 μm 波段的辐射在飞机整体红外辐射中所占的比重最大。

基于上述原因,目前红外制导导弹主要利用 8~14 μm 波段的红外图像。当飞行速度较慢时,飞机的整体温度较低,蒙皮辐射集中在 8~14 μm 之间。随着飞行速度的加快,气动加热使飞机温度不断增加。当温度达到 400 K 左右时,3~5 μm 红外辐射所占的比例越来越大。所以高速飞行的飞机在 3~5 μm 波段的红外辐射是目前的研究趋势^[9]。

5.3 蒙皮辐射抑制方法

由于蒙皮辐射与机体本身的材料息息相关,采用低发射率的红外隐身材料制作机身蒙皮是抑制蒙皮红外辐射的主要措施。红外隐身材料可以减小飞行器与环境之间的红外辐射差别,使飞行器融入到背景的红外辐射中。因此,

隐身材料的核心技术就是如何使其与背景的红外对比度变小。目前有多种红外隐身材料正处在研究之中,比如纳米材料、高聚合材料和多晶材料等。

材料的选取很重要,同时红外涂层在飞行器表面上的结构处理技术也是不可忽视的一方面。在不同的蒙皮区域所涂敷的涂层需要逐个根据性能挑选,涂层面积及方式也要加以考虑。图4所示为美国F-22战斗机的表面涂层。基于TopCOAT材料,他们采用一种独特的涂层方法有效降低了机身蒙皮的红外辐射。



图4 美国F-22战斗机的表面涂层

另一种抑制蒙皮红外辐射的有效手段是利用冷却措施人为地降低蒙皮的表面温度。F-117战斗机就采用机翼前缘冷却技术将蒙皮温度较高区域的热量导入机身内部的其余部位。比如,通过将机翼前缘气动产生的热量导入机身油箱,不仅可以降低蒙皮温度,而且还可以对油箱进行预加热^[17]。

6 结束语

本文主要对隐形飞机红外探测方法进行了阐述。首先介绍了主要的隐形飞机以及红外探测技术的发展与应用。然后针对隐形飞机的特性,从飞机的尾喷管辐射、尾焰辐射和蒙皮辐射三方面出发,详细介绍了这三种辐射的特征及抑制方法。

对于尾喷管辐射,主要用二元矢量收敛-扩张喷管取代传统的轴对称喷管,使得飞机的尾部辐射在各个方向上的辐射强度不同,让飞机

更难被探测到。同时通过采用涡扇发动机,可以有效降低采用传统的涡喷发动机时的尾喷口温度。对于尾焰辐射,主要采用燃气改进技术,使燃气本身排放出含有红外屏蔽材料的物质,形成屏蔽层以降低尾焰的红外辐射。同时让外界的冷空气与高温燃气进行充分的热交换,从而降低尾焰温度。对于蒙皮辐射,主要选取红外隐身材料作为机身的蒙皮材料,使机身辐射融合到背景辐射之中。同时,蒙皮材料的位置及结构处理也要根据需求进行设计。

综上所述,要降低飞机整体的红外辐射,须注意最重要的两个方向:(1)降低飞机无论在加力状态下还是在非加力状态下的整体温度。其难点还是在于发动机以及尾喷管附近的高温燃气的温度。(2)采用可融合在背景中的红外隐身材料作为飞机的机身材料,进而从根本上降低红外辐射的识别度。以上两个方向也是今后隐形飞机红外隐身技术的重要研究方向。

参考文献

- [1] 钟华. 隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [2] 林继刚. 红外探测器技术指标的建模与仿真 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [3] 冯日盛. 新型谐振式红外探测器探测理论与制作工艺研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.
- [4] 王超哲. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 996-1001.
- [5] 白长城. 红外物理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1989.
- [6] 金捷, 赵景芸. 飞机红外隐身技术综述 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, 8(3): 40-45.
- [7] 吴博. 二元喷管出口宽高比和扩张段冷却对红外辐射特性的影响 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [8] 宋新波, 吕雪艳, 章建军. 机红外隐身技术研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 3-7.
- [9] 张可. 飞行器蒙皮红外辐射图像生成技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [10] 蒋耀庭, 潘丽娜. 红外物理与红外隐身技术 [J]. 激光与红外, 2000, 30(4): 232-233.
- [11] 王中, 王宏, 孙美. 固体火箭发动机红外辐射及抑制技术 [J]. 激光与红外, 2003, 33(5): 323-324.

(下转第43页)