

飞机红外隐身技术研究

宋新波¹, 吕雪艳², 章建军¹

(1. 北京航空工程技术中心, 北京 100076; 2. 空军航空大学航空机械工程系, 吉林 长春 130022)

摘要:随着红外探测技术和精确制导武器的发展,飞机要想在日益复杂的战场环境中保持和提高生存能力,必须综合采取各种隐身措施。针对飞机的红外辐射特征、辐射机理展开探讨,对飞机的红外隐身措施进行了总结。最后,结合国外的红外隐身技术和隐身材料的发展现状,展望了未来红外隐身技术的发展趋势。

关键词:飞机;红外隐身;隐身技术;辐射机理;辐射特性;气动加热;隐身材料

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.01.001

Study on the infrared stealth technology of plane

SONG Xin-bo¹, LÜ Xue-yan², ZHANG Jian-jun¹

(1. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China;

2. Department of Aviation Machinery, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: With the development of the infrared detection technique and the precision guided weapons, in order to improve the aircrafts survivability under the complex battlefield environment, the aircraft must adopt synthetical infrared stealthy technique. In this paper, based on the infrared radiation characteristic and the radiation principles of the plane, the infrared stealthy techniques are discussed and summarized. Finally, combined the foreign development situation of the infrared stealth technique and stealth materials, the development trend of the infrared stealthy technique is expected.

Key words: plane; infrared stealth; stealth technology; radiation principles; radiation characteristic; pneumatic warming; stealth material

1 引言

随着红外成像探测技术和信号处理技术的发展,红外制导导弹发现、识别和跟踪目标的能力越来越强,制导精度越来越高,并且具有全天候工作的能力,飞机受到来自红外制导武器的威胁也越来越严重。为了提高飞机在复杂战场环境下的生存能力,必须综合采取多种隐身措施。

从20世纪80年代中期以来,红外隐身的重要性日益突出,主要表现在以下两个方面:一是在导弹采用的探测方法中,红外约占30%,因为红外制导具有隐蔽性好、精度高、抗干扰能力强和可昼夜工作等优点,军事实力雄厚的国家都在争相发展性能先进的红外成像制导或双模制导导弹,目前已经有了性

能先进的红外成像制导导弹装备部队;二是在对空作战尤其是近距格斗中,红外制导空空导弹具有大过载和大离轴发射能力,甚至是越肩发射能力,红外导弹正成为空战战场上飞机的主要威胁。在20世纪80年代发生的几次空战中,被红外导弹击落的飞机占被导弹击落飞机总数的70%~80%。因此,减弱飞机的红外辐射特征,降低被红外导引头及红外告警系统探测和跟踪的概率,对提高飞机生存能力具有重大意义。美国在飞机红外隐身技术的研究及应用上优势明显,目前已有多个型号的隐身飞机装

作者简介:宋新波(1975-),男,工程师,主要从事空空导弹总体工作。E-mail:mary_sxb@163.com

收稿日期:2011-05-29;**修订日期:**2011-08-24

备部队。此外,俄、法、德、英等国也在积极研发红外隐身飞机。

2 飞机红外辐射特性分析

飞机的红外辐射主要来源于机身自身的辐射和对环境的反射。机身自身的辐射主要来自四个方面:一是发动机喷管;二是发动机排气尾焰;三是飞机蒙皮的气动加热;四是机身其他发热部件。飞机对环境的辐射主要来自三个方面:一是对直射阳光的反射和散射;二是大气辐射;三是地球辐射。飞机红外隐身技术主要研究如何降低飞机自身的辐射,下面着重探讨飞机自身的辐射特性。

2.1 发动机喷管

发动机喷管热辐射来源有两处:①空腔黑体辐射,包括喷管腔内热部件和燃气形成的热辐射;②固体辐射,包括喷管的部件如调节片、外罩等形成的热辐射。理论分析及试验研究表明,空腔内热辐射主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段内,只是在波长 $4.2 \mu\text{m}$ 的附近,由于大气吸收较强而呈现凹陷,如图1所示。将发动机尾喷管及其热部件看作灰体($\varepsilon = 0.90$)的情况下,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围内,发动机热辐射强度在 $1000 \sim 1500 \text{ W/Sr}$ 之间,并且集中在一个较小的角度范围之内,喷管辐射沿 ϕ 角方向(ϕ 角为观测方向与发动机喷管轴线正后方向的夹角)呈余弦规律减小^[1],如图2所示。

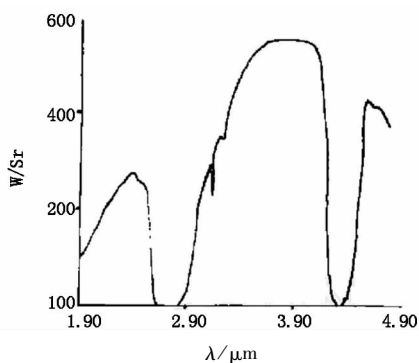


图1 尾喷管空腔黑体辐射光谱图

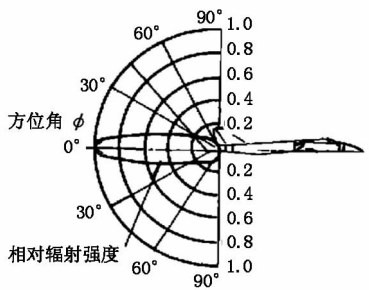


图2 发动机尾喷管热辐射的空间分布

2.2 发动机排气尾焰

排气尾焰辐射其成份主要为 CO_2 和 H_2O 。由

于 CO_2 的辐射比 H_2O 大得多,所以热喷流的辐射可看作是喷流中 CO_2 的辐射。这种辐射集中在以 $4.3 \mu\text{m}$ 为中心的很窄的波段内,处在第2个大气窗口范围。有资料表明,喷管外的喷流红外特征是发动机红外特征的10%左右,但喷管的红外辐射仅限于飞机的后半球,而排气尾焰可以向后喷出几十米甚至上百米,其红外辐射可以从飞机的前半球观测到。对敏感波段在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的红外制导导弹来说,排气尾焰的热喷流辐射是进行导弹迎头攻击的唯一导引信息。

2.3 飞机蒙皮气动加热

飞机在大气中作高速运动时,气流的动能使蒙皮发热。蒙皮温度与飞机的气动外形、速度、高度和大气条件等因素有关。飞行器在飞行时,附面层内阻滞气流的恢复温度 T_r 可按式(1)确定^[2]:

$$T_r = T_1 \left(1 + r \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \quad (1)$$

式中, T_1 为计算点附面层外边界的空气参数; M_a 为飞机飞行的马赫数; k 为比热比,对于空气, $k = 1.4$; r 为恢复系数,层流时, $r = 0.85$,紊流时, $r = 0.88 \sim 0.90$ 。飞机蒙皮温度的计算是一个瞬态热传导和对流换热的过程,在热平衡的情况下,蒙皮温度与恢复温度接近。在11 km高空(同温度)航行的飞机, $M_a = 2$ 时,恢复温度为370 K; $M_a = 4$ 时,恢复温度高达840 K。在机头、机翼、尾翼前缘部分由于紊流作用温度会比以上计算温度略高。

对于典型的超音速战斗机而言,飞机机体蒙皮温度在 $300 \sim 400 \text{ K}$ 之间,峰值波长在 $7.3 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间,位于第3个大气窗口之内。飞机蒙皮的温度虽然比喷管及尾喷流的温度低得多,但由于有效辐射面积大,辐射强度仍然相当可观,一般在 $500 \sim 800 \text{ W/sr}$ 变化,有时甚至超过喷管辐射强度^[3]。

2.4 飞机上其他发热部件

飞机上的其他发热部件主要是由于发动机工作产生的高温通过喷管传给机身附近的蒙皮。由于涡喷和涡扇发动机喷管温度差别较大,另外发动机是否工作在加力状态及尾喷管的形式等因素也会影响尾喷管的温度,因此尾喷管传导到机身上的热量无法准确计算。一般在讨论飞机的红外隐身措施时,通过在发动机上应用隔热材料,将问题归结为发动机红外辐射的抑制问题。

3 红外隐身的理论依据

3.1 物体的红外辐射强度

从红外物理学可知,物体红外辐射能量由斯蒂

芬-玻耳兹曼定律决定^[4]:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

式中, M 为物体总辐射出射度; ε 为物体的辐射率; T 为物体的热力学温度; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数。因此, 凡是温度大于 0 K 的物体都会不断向外辐射红外能量。对于实际物体, 辐射率 $\varepsilon < 1$, 可以看做灰体。不同温度的物体所发射的红外辐射的波长和强度是不同的, 温度越高, 所发射的红外辐射强度越大, 红外辐射光谱中最强部分的波长越短。

3.2 红外的大气传播

在实际红外对抗中, 物体发出的红外辐射都要通过大气传播才能到达红外光学系统。红外波段从可见光的红光边界开始一直扩展到微波区。由于空气中水汽、二氧化碳等气体对红外辐射会产生选择性吸收和散射作用, 红外辐射会因波长不同而有不同程度的衰减。大气对红外辐射是有选择性的, 通常把大气对某些红外波段吸收少、近乎透明的波长区域称为大气窗口。

一般认为大气窗口有三个, 分别是 1 ~ 2.5 μm , 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 14 μm 三个区域, 红外系统所使用的波段限于以上三个大气窗口。红外成像制导空空导弹目前所用探测器多采用碲化铟敏感材料, 工作波段在 3 ~ 5 μm 区域, 其对应的机体温度在 500 ~ 1000 K 之间。这个温度只有目标尾后的发动机尾喷管和尾焰温度或速度为 3 马赫以上时机体蒙皮温度可以达到, 因此即便采用了复杂的成像技术还是难以在同一高度目标正前方 $\pm 15^\circ \sim 30^\circ$ 范围内探测到目标。工作在 8 ~ 14 μm 的红外成像系统的敏感温度 200 ~ 350 K 之间, 可以探测到飞机蒙皮的气动加热, 但由于碲铟汞阵列的工艺技术及均匀性等限制因素, 在空空导弹上应用尚有难度。

3.3 红外隐身的实现途径

飞机红外隐身的任务在于通过降低和控制飞机自身的红外辐射特征信号, 使得飞机难以被红外制导武器发现、跟踪、识别和攻击, 从而有效地提高飞机的突防能力和生存能力。抑制飞机红外辐射的方法主要有以下三个方面: 一是降低目标的红外辐射强度, 通过降低辐射源的温度和辐射率, 达到降低辐射强度的目的; 二是改变目标的红外辐射特征, 使飞机的主要红外辐射能量处于红外制导武器的响应波段之外; 三是调节红外辐射的传输过程, 改变红外辐射的方向, 增强机体对红外辐射的散射、反射和吸收。

4 实现飞机红外隐身的主要技术措施

4.1 发动机的红外抑制技术

4.1.1 发动机的选型

从发动机结构看, 涡扇发动机与涡喷发动机有很大不同, 它可使高压气流流过风扇后一分为二。内涵道的高压空气和涡喷发动机一样, 在燃烧室与燃油混合燃烧, 在提高内能后推动涡轮旋转做功, 然后在尾喷管中将燃气喷出产生推力。外涵道的气流一般不加热, 直接向后喷出, 显然外涵道的气流具有冷却尾喷管和尾焰的作用。在相同的推力下, 涡扇发动机由于采用外涵道气流来降低喷气流温度和尾焰温度, 使排气温度有所降低。特别是大涵道涡扇发动机, 由于多一个风扇级, 排气的温度和速度均有较大降低, 尾焰也明显缩短。一般的, 涡喷发动机喷管的温度为 900 K 左右, 而涡扇发动机的喷管温度可下降到 540 K 左右^[4]。

4.1.2 喷管形状选择

二元喷管其可促进尾焰同自由流动的外部空气快速混合, 使喷口后尾焰芯子长度缩短, 降低辐射强度。采用矢量推力二元喷管、S 形二元喷管等, 加大了尾喷管与冷空气的接触面积, 为喷管的散热和燃气流的混合提供便利, 增加了高温排气与周围冷空气之间的能量和质量交换, 大大降低了喷管和尾焰的温度, 提高了飞机红外隐身能力。试验表明, 采用宽高比为 7 的二元矩形喷管与同样出口面积的圆形喷管相比, 尾焰的红外辐射强度降低了 61%^[5]。具有同样的出口面积, 宽高比越大, 红外抑制效果越好, 一般降幅可达 30% ~ 80%。该技术已在美军的 B-2, F-117, F-22 等隐身飞机上成功采用。

4.1.3 涂层

在喷管外涂覆热障涂层或其他复合涂层, 降低喷管外部部件的温度和发射率, 可以降低飞机红外辐射。用金属-石棉-金属夹层材料作飞机发动机舱的衬里, 对发动机进行隔热, 减少发动机传给机身的热量, 可以降低飞机的红外特征。

4.1.4 冷却技术

利用喷气流高速流动的隐射作用或飞行器高速飞行时的冲压作用, 从大气中引入大量空气来迅速冲淡、冷却高温尾喷流或燃烧室及喷管出口的热壁面, 达到抑制其红外辐射能力的作用。F-22 飞机所用的 F119 涡扇发动机上的喷管调节片采用双层结构, 采用内冷和外冷复合冷却方案, 这也是降低尾喷管红外辐射的关键技术之一。

4.1.5 遮挡技术

采用发动机与机身一体化设计技术,将发动机设置在机翼上面,使喷口隐蔽在机翼背面并安装排气挡板遮挡喷气流,可有效地减小探测视角并减弱辐射。低空的飞机可在发动机的上表面上设计盖板,以防止更高高度的红外传感器探测到这些特征。而在高空中的飞机则可利用设置在发动机下侧的盖板来防止从下方探测。同时,使发动机机轴与机体纵轴平面向下成一定倾角安装,可提高对于后上方探测的遮挡效果。

典型的第三代战斗机普遍采用发动机喷管外露的方式,从飞机尾向、侧向、甚至前向较大范围内,都可以直接观测到发动机喷口或外露热部件,这些都是红外导弹探测跟踪的重点部位。F-22飞机采用向外倾斜的双垂尾设计,使用尾翼遮挡喷管,使喷管的红外辐射更具有方向性,红外导弹只能在尾向较小的角度内探测到喷管的红外辐射,其他方位红外辐射被明显遮挡。

4.2 喷流红外辐射抑制措施

发动机的热喷流是飞机的一个重要红外辐射源,特别是当发动机处于加力飞行状态时,将成为导弹前半段探测的主要辐射源。为降低尾喷流红外辐射,可在燃油中加入特殊的添加剂,将高温燃气辐射的红外光谱移到易于被大气吸收的波段,起到衰减红外辐射的作用。据称在排气口中注入适量的碳微粒、 N_2O 气体或聚苯邻聚二甲酸二乙酯有机高聚物,可以加强大气对尾气红外辐射的吸收,大大降低尾喷流的红外辐射。

另外,对于涡扇发动机而言,当发动机处于加力工作状态时,燃烧室处于缺氧状态,从燃烧室中喷出的燃油未能进行充分燃烧,这些燃油会随喷流喷出,在大气中继续燃烧,形成温度高达1800~2200 K的尾焰,红外辐射十分强烈。为降低喷流的温度和芯子长度,应尽量减少或避免使用加力燃烧室。

4.3 蒙皮红外辐射抑制

飞机蒙皮红外辐射主要是由两个因素造成的,一是飞机高速飞行时由于气动加热引起的红外辐射,二是发动机热传导造成其附近蒙皮发热,从而导致蒙皮红外辐射。针对上述原因,一般在飞机蒙皮表面涂红外隐身涂料,在材料中加入隔热或抗红外成分,以抑制飞机表面温度,降低发射率。飞机蒙皮部位不同,对红外隐身材料的要求也不同。用在飞机腹部的材料应能减少飞机蒙皮与天空的对比度,

而用在背部的材料,需要具有自然环境背景的光谱特性。为减少发动机工作时对蒙皮的热传导,一般通过在发动机内壁四周使用隔热材料抑制热传导,减少发动机传给机身的热量。

4.4 飞机气动外形设计

改进飞机的气动外形以减少机体与空气的摩擦,可降低蒙皮的温度,从而减弱机体的红外辐射。采用外倾斜双垂尾设计,两个水平尾翼在尾喷管的两侧且向尾后伸出比喷管更长的距离,这一措施主要是针对同一水平高度的侧向红外探测器具有较好的遮蔽作用,使垂尾和平尾对喷管及尾喷流根部的遮挡作用有所提升。

5 红外隐身技术的发展分析

红外隐身技术经过近30年的发展,已进入实用阶段,国外现役或在研的隐身飞机与非隐身飞机相比,红外辐射信号下降了10~15 dB^[6],基本实现了红外隐身的目标,红外隐身技术已经逐渐进入工程应用阶段。综合分析现有的红外隐身技术,可以看出红外隐身技术具有如下发展趋势:①全波段隐身技术。当今飞机红外隐身技术主流方向是研究全波段隐身技术,即重点考虑红外隐身和雷达隐身,同时兼顾可见光隐身和激光隐身。飞机作为一种军用装备在战场上可能同时面临雷达、毫米波、红外、可见光、紫外等多种探测系统、多波段侦察设备的威胁,因此,对抗多种仪器、探测多波段的兼容隐身材料是隐身技术发展的重要方向;②新型隐身材料的研究。涂料型红外隐身材料使用方便,可以在不改变现有装备的形状、结构等情况下实现隐身功能。近年来出现的CPs电致变色材料由于具备红外发射率和红外反射率变化大的特点,且具有分子结构可设计、制造成本低、发射红外频谱宽、加工成型工艺方便等优点,已被美、英、法等军事强国高度重视并大力开发。智能温控复合材料是一种基于温控元件、可根据预定指令进行温度控制,使目标随环境温度变化,并保持两者的温度差很小,致使红外探测系统无法探测到目标的新型智能材料;③飞机结构和气动外形设计技术。为了提高目标的生存能力,红外隐身技术也在不断采用更为先进的技术,如进行与目标热红外特征控制有关的自身结构和形状等的红外隐身设计,尽量使目标总的特征与背景相一致。

参考文献:

- [1] Jin Jie,Zhao Jingyun. Summarizing of the infrared stealthy

- technique of aircraft [J]. Turbofan Test & Research, 1998, 36(2): 40-45. (in Chinese)
- 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, 1998, 36(2): 40-45.
- [2] Xu Nanrong. Several question on the infrared stealthy technique of aircraft [J]. Modern Defence Technology, 1989, 29(8): 15-20. (in Chinese)
- 徐南荣. 飞行器红外隐身技术的若干问题[J]. 现代防御技术, 1989, 29(8): 15-20.
- [3] Du Shiming, Yang Jun, Zeng Kai, et al. Discussion on the infrared stealthy technique of aircraft [J]. Electronic Warfare, 2010, 133(4): 41-45. (in Chinese)
- 杜石明, 杨俊, 曾凯, 等. 飞机红外隐身技术的探讨[J]. 电子对抗, 2010, 133(4): 41-45.
- [4] Lü Junwei, Li Haiyan, Zhu Min, et al. The infrared stealth technology of plane [J]. Modern Defence Technology, 2006, 34(4): 92-102. (in Chinese)
- 吕俊伟, 李海燕, 朱敏, 等. 飞机的红外隐身技术[J]. 现代防御技术, 2006, 34(4): 92-102.
- [5] Chen Guang. Development of high-bypass ratio turbofan aeroengine [J]. Aeronautic Manufacturing Technology, 2008, (13): 40-45. (in Chinese)
- 陈光. 高涵道比涡扇发动机发展综述[J]. 航空制造技术, 2008, (13): 40-45.
- [6] Wei Disheng, Wang Xiaoqun, Du Shanyi. Application of composite materials in infrared camouflage [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2462-2468. (in Chinese)
- 韦第升, 王小群, 杜善义. 复合材料在红外隐身技术中的应用[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2462-2468.