

红外隐身技术的应用及发展趋势

李波

(海军驻长春地区航空军事代表室,吉林 长春 130033)

摘要:从斯忒藩—波尔兹曼定律出发,阐述了红外隐身的基本原理,分析得出实现红外隐身的几种方法。介绍了红外隐身材料的作用机理,指出了目前这些材料存在的主要问题,然后描述了红外隐身技术在军事上的具体应用和研究进展,总结了红外隐身技术的未来发展趋势。最后,指出今后的研究将主要在以下两方面展开:一是寻求全波段多隐身技术的兼容;二是对现有方法进行改进并探索新的红外隐身方法。

关键词:红外隐身;红外辐射特性;隐身材料;多波段

中图分类号:TN219; TN976 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130606.0818

Application and development trend of infrared stealth technology

LI Bo

(Navigation Resident Office of the Navy at Changchun, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: li86@sina.com

Abstract: The principle of infrared stealth is introduced based on the Stefan-Boltzmann law firstly in this paper. Several methods for infrared stealth are given. The working mechanism of the infrared stealth materials are introduced, and some unsolved problems are put forward. Then, military applications and research progress are briefly described. Finally, the development trend of infrared stealth is summarized. It suggests that the future research will mainly include two aspects: one is to solve the combination of various waveband stealth technologies; the other is to improve existing methods and to explore new methods of infrared stealth.

Key words: infrared stealth; infrared radiation characteristic; stealthy material; multiband

1 引言

随着红外探测技术和红外精确制导武器的发展,飞机、坦克等军事目标要想在日益复杂而恶劣的战场环境中具有足够的生存力,必须采用包括红外隐身在内的各种隐身技术来降低自身被探测的概率。为此,以降低目标红外辐射强度和削弱敌方探测效能为宗旨的红外隐身技术受到了各军事强国的重视^[1]。本文就红外隐身原理、红外隐身材料、红外隐身技术的军事应用及发展趋势进行了研究和探讨。

2 红外隐身技术概述

红外隐身技术主要是通过减小或改变目标的红外辐射特性来降低红外探测系统对目标的探测概率。具体措施包括改进热结构设计,对主要发热部件进行强制冷却,表面涂覆红外隐身材料,使用红外伪装和遮蔽等^[2]。

2.1 红外隐身的基本原理

根据斯忒藩-波耳兹曼定律,物体在所有可能方向和波长范围内的辐射功率为:

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \frac{\pi^4 c_1 T^4}{15c_2^4} = \varepsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

式中, E_b 为黑体的全波长辐射功率($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); ε 为物体的发射率; c_1 为第一辐射常数($c_1 = 2\pi hc_0^2$); c_2 为第二辐射常数($c_2 = hc_0/k_B$), k_B 为波耳兹曼常数; σ 为斯忒藩-波耳兹曼常数; T 为物体的绝对温度(K)。

红外探测系统的最大作用距离计算如下:

$$R = \sqrt{\frac{D^* A_t A_0 \tau_a \tau_0 (L_t - L_b)}{N_t (A_d \Delta f)^{1/2} (V_s/V_N)}}, \quad (2)$$

式中: R 为作用距离; D^* 为红外探测器探测率; A_t 为目标辐射面积; A_0 为红外探测系统入瞳面积; τ_0 为红外系统光学透过率; τ_a 为作用距离 R 下的大气透过率; N_t 为由弥散引起的目标所占像元数; A_d 为探测器单元的面积; Δf 为放大电路等效噪声带宽; V_s/V_N 为信号处理器可接受的信噪比; L_b 为背景辐射亮度; L_t 为目标辐射亮度;其中:

$$L_t = \varepsilon \sigma T^4 / \pi. \quad (3)$$

红外隐身的目的就是降低或改变目标的红外辐射特性,减小红外探测系统对目标的作用距离,从而降低目标被探测的概率。由式(1)~(3)可知,要减小红外探测系统对目标的作用距离,可通过以下方式来实现:(1)降低物体表面的发射率;(2)控制物体表面的温度,减小目标与背景的温度差;(3)减小目标高温区辐射面积;(4)采用光谱转换技术使目标红外辐射偏移到探测系统的响应波段之外。

在实际的红外探测过程中,物体发出的红外辐射通过大气传输才能到达红外探测器。大气传输过程中红外辐射会因波长不同而有不同程度的衰减,通常把大气衰减较少的波长区域称为大气窗口。大气的红外窗口有以下3个波段:短波 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、中波 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 、长波 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,红外辐射在这3个波段以外基本上是不透明的,目前使用的红外探测器大都工作在这3个波段内。根据这一特点,可以采用合适的材料作为表面涂层,调节己方军事目标的红外辐射波段至大气窗口之外,使得对方红外探测器无法探测到己方目标的红外辐射能量。

2.2 红外隐身的主要技术措施

综合以上红外隐身原理分析可知,常见的红外隐身方法主要包括:(1)改变目标红外辐射传输路径;(2)改变目标红外辐射特性;(3)降低目标红外辐射强度;(4)进行光谱转换。

2.2.1 改变目标红外辐射传输路径

改变红外辐射传输路径主要是改变目标周围大气的频谱透过率,以达到屏蔽和对红外探测器干扰的作用。烟幕以其较好的经济性和较高的实用性在海上军事舰艇红外隐身方面得到了广泛的应用。烟幕的主要功能是通过在空中施放气溶胶微粒,改变电磁波介质传输特性,实施对光电探测、观瞄和制导武器系统的干扰。在红外方面其隐身作用机理主要是:(1)使得目标周围大气路径上充满烟幕微粒,对物体红外辐射产生强烈的吸收和散射作用,削弱红外侦察和制导系统中红外探测器接收信号的强度,使之无法成像;(2)烟幕本身可以发出更强的红外辐射,覆盖目标及背景的红外辐射,使红外探测设备只能探测到一片模糊影像^[3]。但是由于烟幕必须悬浮在目标的

周围,所以多用于保护静止和慢速运动的目标。

烟幕干扰基本原理如图1所示。红外探测系统对距离R处的目标进行探测,在没有干扰的情况下,目标与背景辐射之差为:

$$\Delta L_0 = (L_t \cdot \tau_a + L_{\text{path}}) - (L_b \cdot \tau_a + L_{\text{path}}) = \tau_a \cdot (L_t - L_b), \quad (4)$$

式中, τ_a 、 L_{path} 分别红外系统和目标之间的大气透过率和路径辐射, L_t 、 L_b 分别为目标和背景辐射亮度。

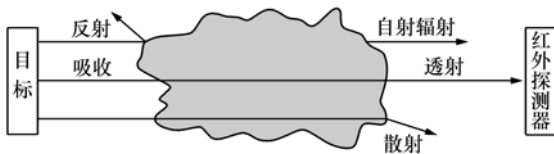


图1 烟幕对红外辐射衰减的原理图

Fig.1 Principle diagram of decay of smoke screen on infrared radiation

在实施烟幕干扰的情况下,目标与背景辐射之差为:

$$\Delta L_1 = (L_t \cdot \tau_a \cdot \tau_{\text{smoke}} + L_{\text{smoke}} + L_{\text{path}}) - (L_b \cdot \tau_a \cdot \tau_{\text{smoke}} + L_{\text{smoke}} + L_{\text{path}}) = \tau_a \cdot \tau_{\text{smoke}} \cdot (L_t - L_b), \quad (5)$$

式中, τ_{smoke} 、 L_{smoke} 分别为烟幕的透过率和有效辐射亮度。

目标背景辐射之差受烟幕消光的衰减系数为:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_0} = \frac{\tau_a \cdot \tau_{\text{smoke}} \cdot (L_t - L_b)}{\tau_a \cdot (L_t - L_b)} = \tau_{\text{smoke}}. \quad (6)$$

烟幕对红外系统的遮蔽率为:

$$\eta = (1 - \sigma_{\text{eff}}) \times 100\%. \quad (7)$$

式(4)~(8)是从目标背景辐射差的角度来分析烟幕消光影响的。为直观起见,可以从红外系统的目标背景输出值之差的角度进行分析。没有烟幕干扰时的目标背景输出值之差为:

$$\Delta DN_0 = DN_t - DN_b, \quad (8)$$

式中, DN_t 、 DN_b 分别为红外系统的目标和背景测量输出值。有烟幕干扰时的目标背景输出值之差为:

$$\Delta DN_1 = DN'_t - DN'_b, \quad (9)$$

式中, DN'_t 、 DN'_b 分别为有烟幕干扰时红外系统的

目标和背景输出值,则烟幕对红外系统的遮蔽率为:

$$\eta = \left(1 - \frac{DN'_t - DN'_b}{DN_t - DN_b}\right) \times 100\%. \quad (10)$$

2.2.2 改变目标红外辐射特性

改变目标红外辐射特性的主要措施是改变目标的主要红外辐射波段以及模拟背景辐射特性,使得敌方红外探测器无法探测或识别己方目标的红外辐射。

改变目标主要红外辐射波段,其一是使得目标主要红外辐射在对方探测器的工作波段以外,另外是使己方目标的主要红外辐射集中在大气强损耗波段。具体应用如:通过向燃料中加入特殊添加剂,使排气尾焰的红外辐射带偏移红外探测系统的响应波段之外;采用红外变频材料制作有关的结构部件等。实例之一为目前国外采用的一种特殊燃料,使飞机排气尾焰辐射偏移到5~8 μm的大气强损耗波段。

模拟背景辐射特性即红外图形迷彩,是指通过使用不同发射率的材料来改变目标物体各部分红外辐射分布状态,使得目标与背景的红外辐射分布状态相协调,从而目标的红外图像成为整个背景红外图像的一部分,使得敌方探测器难以识别。例如目前采用的红外光区四色变形迷彩涂料等。瑞典采用的角形结构碎片迷彩以及前西德陆军采用的歪曲车辆阴影图案,都收到了较好的效果。

2.2.3 降低目标红外辐射强度

根据斯特潘-波尔兹曼定律,降低目标的红外辐射强度主要是通过降低物体表面的发射率和物体表面的温度来实现的。具体技术手段有:表面涂发射率较低的材料;减少散热源;采用热屏蔽手段使得目标内部热量难以外传;对喷管等重要部位进行降温;降低发动机排气管温度;废气废水冷却;注入红外吸收剂降低尾焰温度等。

2.2.4 采用光谱转换技术

实现光谱转换的主要手段是采用特定的涂料,使得目标表面在3~5 μm和8~14 μm波段大气窗口有较低的发射率,而在这两个大气窗口外的中远红外波段上有较高的发射率。这样,辐射能量的频段主要在大气窗口以外,完全被大气

吸收和散射掉,从而使得目标难以被发现。

3 红外隐身材料

红外隐身材料是红外隐身技术的重要途径,隐身材料既可用于目标蒙皮,又可用于目标发热部件,来减小或改变目标红外辐射特性达到隐身效果,还能使目标红外辐射特性模拟背景辐射特性以达到红外伪装效果^[4]。红外隐身材料使用方便,工艺简单,品种较多,在红外隐身技术中占有重要的地位。用于红外隐身的材料应具有符合要求的红外辐射发射率或者较强的控温能力,合理的表面结构,较低的太阳辐射吸收率,并能与其他波段的隐身涂料兼容^[5]。

涂层材料是红外隐身材料研究的重点,根据其作用原理,可以将涂层材料分为红外低辐射涂料和红外伪装涂料。

红外低辐射隐身涂料是通过控制目标表面的红外发射率和隔热来降低其红外辐射功率,从而实现红外隐身目的。目前在低发射率红外隐身涂料的研发方面,美国、法国、德国、瑞典等国的水平处于世界领先地位,其中有些涂料已经发展成为通用的红外隐身材料。美国《简氏防务》2009年报道,Intermat公司研制开发的红外隐身涂层喷涂50 μm厚就可以限制目标对热辐射的吸收和发射^[6]。法国研制出一种具有很好的磁导率和红外辐射率的宽频纳米隐身涂料,这种涂料在较宽的频带内有很好的隐身效果。德国研制出一种飞行器用的涂料,其组成中含有碳化硼、石墨导电性炭黑、碳化硅和聚乙炔等,该涂料在波长小于14 μm时可实现红外隐身,而且本身具有较强的防腐能力。瑞典的Dlab Barracuda AB公司伪装产品的开发也已经达到国际先进水平^[7]。

红外伪装涂料主要针对短波红外隐身,在近红外波段,探测器主要是利用目标反射的红外辐射能量来探测和识别目标。类似于可见光隐身中的迷彩技术,将目标的表面分区后涂上不同红外发射率的材料,使其余背景的红外辐射相协调,达到伪装的目的。这一技术在坦克、越野汽车等陆上目标红外隐身中得到了应用,需要根据目标不同位置的温度和所处的环境来选择涂料。

从红外隐身材料的研究现状看,主要存在两方面的问题:其一是成本高,寿命短,耐腐蚀性差^[9];其二是隐身材料的可见、激光、红外、雷达多频段兼容问题并没有得到解决。

4 红外隐身的军事应用

红外隐身技术广泛应用于飞机、地面武器装备和舰艇等军事目标。

4.1 飞机的红外隐身技术

飞机的热辐射主要产生于发动机、发动机喷口、排气气流、机体蒙皮等。实现飞机红外隐身的主要技术措施包括:采用红外辐射较弱的涡扇发动机,并通过对发动机进行隔热,防止其热量传给机身;在喷管内部涂低发射率材料;在燃料中加入添加剂抑制和改变尾焰的红外辐射频段;飞机表面涂红外隐身涂料;释放伪装气溶胶烟幕;改进外形设计减小机体摩擦以降低蒙皮温度等^[8]。例如,美国的F-22战斗机通过矢量可调管壁来降低其二元矢量喷管所产生的红外辐射,垂尾、平尾、尾撑向后延伸以遮蔽发动机喷口的红外辐射,在炽热喷流飞出尾喷口前就得到了降温,因而红外特征显著降低。美国F-117A战机为了红外隐身,采用了新型燃料,这种燃料能高速燃烧,又可急速冷却,在采用二元喷管后,红外辐射能量降低约90%。欧洲2000战斗机以及美国和英国的联合攻击战斗机(JSF),都使用了推力矢量技术,其二元推力矢量喷口被向后伸展的平尾和立尾所遮挡,达到很好的红外隐身效果。就目前的发展水平来看,飞机的红外隐身技术已经比较成熟,达到实用阶段并且已经开始应用于军用飞机的制造中。

4.2 坦克等地面武器的红外隐身技术

坦克的红外辐射主要来源包括:发动机、烟囱、烟羽、表面辐射和对外界短波辐射的反射等。主要通过采用效率高、热损耗小的发动机减少发热量,改变排气通道位置和形状并进行冷却,发热部位隔热,表面涂低发射率材料和迷彩伪装等措施来实现红外隐身。

4.3 舰艇等海上武器装备的红外隐身技术

舰艇的红外辐射源主要是烟囱管壁、排气烟

羽和舰体表面。对舰艇进行红外辐射抑制的技术手段主要分3种:降温、红外屏蔽和隐身涂料,其中降温是最常用和最有效的策略。

具体实施方法包括:改变烟囱的位置和形状、对机舱水冷降温、高温表面涂绝热层、舰船表面喷淋海水和涂隐身材料等。20世纪70年代初,美国和加拿大就开始了控制舰艇排气系统红外辐射的研究,至今已经历了海水喷射、简单喷射混合、全气膜冷却三代技术。瑞典的“维斯比”级轻型护卫舰采用碳纤维塑料增强型夹层板和特殊的烟囱设计方式,烟囱出口设在舰艇的尾部,将废气从舰尾排出至海上冷却,达到了很好的红外隐身效果。法国海军“拉斐特”级护卫舰在隔热处理方面设计独特,烟囱采用玻璃钢制造再涂以一种低辐射的特殊涂料,加强隔热效果的同时还对发动机排气口和玻璃钢排气管做了精细的隔热处理。美国的“斯普鲁恩斯”级驱逐舰采用了排气引射系统以降低排气温度,同时烟囱内布置有喷雾系统,在受到攻击时可以喷出水雾以冷却烟气。英国研制的“海魂”号护卫舰也安装了喷雾系统,需要时该系统会在几秒钟内喷出细密的水雾使得舰体笼罩在薄雾中,与海天背景融为一体,实现很好的隐身效果。

5 红外隐身技术的发展趋势

随着红外探测器技术的迅速发展,红外探测手段趋于高精度、智能化和多样化,这就对红外隐身技术提出了新的更高的要求。根据红外隐身技术的发展现状,其发展趋势可以总结为两方面:一是寻求各波段各种隐身技术的兼容,即全波段隐身技术;二是对现有方法进行改进并探索新的红外隐身方法。

参考文献:

- [1] 刘默伟,李航. 红外隐身技术的发展分析[J]. 舰船电子工程,2009,29(5):25-27.
LIU M W, LI H. Development analysis of the infrared stealth technology[J]. *Ship Electronic Eng.*, 2009, 29(5):25-27. (in Chinese)
- [2] 陈慧华. 基于介孔氧化镧红外吸波材料的研究[D]. 南京:东南大学,2008.
CHEN H H. Study on infrared absorption material based on mesoporous lanthanum oxide[D]. Nanjing:Southeast University, 2008. (in Chinese)

5.1 各波段隐身技术的兼容

随着现代探测手段的日益多样化,针对单一波段或者单一类型探测器的隐身技术已经不能适应战争的需要。因此人们未来将会更加重视全波段隐身技术,即兼顾声波、雷达毫米波、红外、可见光、紫外等频段的隐身技术,而实现全波段隐身技术主要是依靠高性能的隐身材料^[10-12]。法国海军的“拉斐特”级护卫舰是已经投入实用的具有较出色隐身效果的多波段隐身战舰。美、德、瑞典等国在多波段隐身技术方面的研究水平已经达到可见光、近红外、中远红外和雷达毫米波四频段兼容。

5.2 现有方法的改进和新的红外隐身方法

对现有方法的改进主要包括目标表面结构的改进、主要热源隔热方法的优化、现有隐身材料的合理使用等,目的是使得现有的隐身措施效果更好,以应对探测和识别精度更高的红外制导武器。

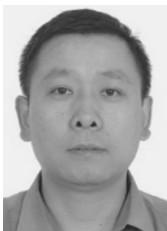
新的红外隐身方法主要包括新型隐身材料和新的隐身技术。新型隐身材料包括手性材料、纳米隐身材料、导电高聚物材料、多晶铁纤维吸收剂、智能隐身材料等^[13]。未来的隐身涂料应具备以下性能:具有较低的红外发射率和可见光吸收率;具有对热辐射进行漫反射的合理表面结构;能与其它波段的隐身要求兼容;具有良好的机械性能和耐腐蚀性^[14]。新的隐身手段主要指目标外形设计、热源冷却方法和新的隐身机理。

6 结束语

随着红外隐身技术的发展,红外隐身技术广泛应用于空中、地面和海上的军事目标。各种新的隐身方法、隐身材料不断开发出来,红外隐身技术正朝着全频段、智能化发展,在未来的现代化战争中将发挥更加重要的作用。

- [3] 邱继进,赵晓哲.舰载烟幕弹对抗红外成像型反舰导弹的方针研究[J].红外与激光工程,2005,34(6):651-654.
QIU J J,ZHAO X ZH. Simulation research on the smoke bomb carried on the warship confronting the infrared imaging anti-ship missile[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2005,34(6):651-654. (in Chinese)
- [4] 崔锦峰,马永强,杨保平,等.红外隐身材料的研究现状及发展趋势[J].表面技术,2010,39(6):71-74.
CUI J F,MA Y Q,YANG B P,*et al.*. Research situation and development trend of infrared stealth materials[J]. *Surface Technology*,2010,39(6):71-74. (in Chinese)
- [5] 侯文学,张晓光.可见光、激光、毫米波与红外的复合隐身技术[J].航天电子对抗,2003,(3):34-37.
HOU W X,ZHANG X G. Visible, composite stealth technology of laser, millimeter wave and infrared[J]. *Aerospace Electronic Warfare*,2003,(3):34-37. (in Chinese)
- [6] 徐鹏.红外隐身技术的发展动向与分析[J].舰船电子工程,2009,29(7):40-44.
XU P. Development trends and analysis of the infrared stealth technology[J]. *Ship Electronic Eng.*,2009,29(7):40-44. (in Chinese)
- [7] 杜永,邢宏龙,陈水林.热红外隐身涂料的研究进展[J].矿业科学技术,2007,35(1):51-55.
DU Y,XING H L,CHEN SH L. Development of IR camouflage coating research[J]. *J. China University Mining & Technology*,2007,35(1):51-55. (in Chinese)
- [8] 宋新波,吕雪艳,章建军.飞机红外隐身技术的研究[J].激光与红外,2012,42(1):3-7.
SONG X B,LV X Y,ZHANG J J. Study on the infrared stealth technology of plane[J]. *Laser & Infrared*,2012,42(1):3-7. (in Chinese)
- [9] 朱永安,姚兰芳,汪国庆,等.红外隐身涂料的研究进展[J].材料导报,2006,20(S2):319-322.
ZHU Y A,YAO L F,WANG G Q,*et al.*. Development of study on infrared stealthy materials[J]. *Materials Review*,2006,20(S2):319-322. (in Chinese)
- [10] 高颂,乐洪宇.国外红外隐身技术的发展[J].舰船电子工程,2010,30(10):17-22.
GAO S,LE H Y. Development of the infrared stealth technology abroad[J]. *Ship Electronic Eng.*,2010,30(10):17-22. (in Chinese)
- [11] 张文毓.多频段兼容雷达隐身材料的研究及应用进展[J].船舶设计与建造,2009,21(2):710.
ZHANG W Y. Research and application progress on compatible radar stealth material with multi-frequency[J]. *Design and Construction Ship*,2009,21(2):7-10. (in Chinese)
- [12] 李风雷,徐国跃,余慧娟,等.红外隐身涂层的制备及其与雷达吸波涂料的兼容性研究[J].红外技术,2009,31(7):415-419.
LI F L,XU G Y,YU H J,*et al.*. Preparation of infrared camouflage coatings and its compatibility radar absorbing coatings [J]. *Infrared Technology*,2009,31(7):415-419. (in Chinese)
- [13] 范有余,羊毅,姜雄伟,等.一种新型中红外材料及其隐身功能研究[J].红外与激光工程,2010,39(1):12-16.
FAN Y Y,YANG Y,JIANG X W,*et al.*. New mid-infrared material and its radar stealth function[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2010,39(1):12-16. (in Chinese)
- [14] 余慧娟.低红外发射率涂层的制备及其耐腐蚀性能的研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
YU H J. Study on preparation and corrosion resistance of low emissivity infrared coatings[D]. Nanjing:Nanjing University Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)

作者简介:



李波(1972—),男,湖北随州人,硕士,工程师,主要从事光电设备的监造与验收方面的研究。E-mail:li86@sina.com