

·测试、试验与仿真·

面源红外诱饵辐射特性测试研究

李 永¹, 尹庆国²

(1.空军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000; 2.中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要:对于红外成像制导导弹, 面源红外诱饵是一种效费比较高的干扰手段, 具有广泛的应用前景。为实现有效干扰, 面源红外诱饵的红外辐射特性必须满足一定的要求。文中分析了面源红外诱饵的干扰有效性, 对光谱特性、辐射强度、时域特性、辐射面积等红外辐射特性的测试方法进行了分析, 并给出了一些实例, 为面源红外诱饵的设计和考核提供技术支持。

关键词:面源红外诱饵; 辐射特性; 测试方法

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0074-05

Research on Radiation Characteristic Testing of Special Material Decoy

LI Yong¹, YIN Qing-guo²

(1. Military Representative Office of Air Force in Jinzhou, Jinzhou 121000, China ;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: For infrared imaging guidance missile, special material decoy is a kind of jamming method with higher efficiency cost ratio, which has promising application prospects. For effective jamming, the infrared radiation characteristics of the decoy must meet the requirements. The jamming effectiveness of the decoy is analyzed. The relative testing methods for spectrum characteristics, radiation strength, time-domain characteristics and radiation area are analyzed. Some examples are presented, which provides technical support for the design and evaluation of the special material decoy.

Key words: special material decoy; radiation characteristic; testing method

红外诱饵弹作为一种用于对抗红外制导导弹的有效方法, 已经在世界各国得到了广泛的应用和发展。随着红外制导技术的发展, 尤其是红外成像技术的应用, 传统点源红外诱饵已不能满足有效对抗第三、四代红外制导导弹的需求。为了对抗先进的红外制导导弹, 国外军事强国极为重视红外面源诱饵的发展^[1-2]。面源红外诱饵目前使用的材料主要有自燃液体材料、低温燃烧烟火材料、自燃箔片等^[3], 其中应用最多是自燃箔片材料。自燃箔片材料是一种表面多孔合金材料(SMD), 采用铁铝合金脱铝法制备, 美国专利^[4-6]详细介绍了这种制备工艺。当暴露在空气中与氧气接触后, 会立即发生氧

化还原反应, 形成大面积红外云团, 辐射过程是自燃的, 属于冷燃烧。由于合金材料反应时能够更好的模拟载机的羽烟温度和辐射光谱, 可以很好的改善点源红外诱饵在辐射光谱、辐射强度、空间形状与载机存在的明显差异, 有效对抗红外成像制导导弹^[7]。

1 面源红外诱饵

1.1 干扰有效性

1.1.1 对识别能力的干扰

红外成像导弹在发射初期, 主要通过提取目标

图像的物理特征进行目标识别,识别能力存在局限性。如果改变导引头所提取图像目标的物理特征,即可实现干扰。对于一定光学分辨率的红外成像导引头,面源红外诱饵连续投放后,在真目标附近形成大面积红外辐射云团,其辐射强度、光谱特征与真目标相似,与真目标融合共同形成目标信息,改变了导引头视场内的目标红外辐射特征,常用的灰度、面积、长宽比、不变矩等识别特征均发生较大变化,导引头难以识别出真目标。采用这种干扰方式后,真目标的特征或运动参数将以不稳定或“非目标”的方式变化(如机动逃逸),而面源红外诱饵的特征保持稳定(持续燃烧或连续投放),此时,红外成像导弹的识别系统将会锁定假目标,从而达到干扰目的。

1.1.2 对跟踪能力的干扰

(1)干扰形心跟踪模式

红外成像导弹对目标进行形心跟踪时,所跟踪的形心与目标图像的面积及光能密度有关,即与目标图像区域内的辐射能量有关,形心位置可视为目标图像的等效辐射中心。如果改变导引头视场内的目标图像形心位置,使其偏转移至跟踪波门之外,即可实现有效干扰。对于一定光学分辨率的红外成像导引头,当面源红外诱饵连续投放后,在目标附近形成大面积的红外辐射云团,与真目标同时出现在导引头跟踪视场内,并可能与目标图像部分融合,导引头跟踪波门内的红外辐射分布发生变化,导致相应的目标形心位置(等效辐射中心)偏离原来的成像跟踪点,从而使导引头难以正确跟踪目标或转入预测跟踪。因为诱饵的红外辐射强度要大于真目标,所以等效辐射中心偏向于诱饵一边,随着面源红外诱饵与目标在空间上的逐渐分离,只要诱饵在视场内停留足够长的时间,真目标就将最终从导引头的跟踪视场内消失,达到有效干扰的目的。即使导弹击中跟踪视场内的形心,只要此时形心与目标之间的距离(导弹的脱靶量)大于导弹的杀伤半径,就可认为面源诱饵的形心干扰取得成功。

(2)干扰相关跟踪模式

红外成像导弹对目标进行相关跟踪的前提,是在实时图像矩阵中找出预先获取的基准图像矩阵最相似的子矩阵。改变导引头视场内目标的图像匹配特征,即可实现有效干扰。对于一定光学分辨率的红外成像导引头,当面源红外诱饵连续投放后,在真目标附近形成具有一定持续时间、一定辐射强度、较

大辐射面积的红外干扰云团,与真目标融合共同形成目标信息,破坏了导引头跟踪视场内目标的红外辐射分布,甚至将真目标的红外辐射湮没或遮蔽,使导引头所观察到的目标大小、方位、辐射强度等发生变化,相关跟踪所用的匹配模板与匹配图像有较大的差异,匹配点会发生偏移,从而有效破坏导引头的相关跟踪能力,最终使真目标逸出跟踪视场,从而达到有效干扰目的。

(3)干扰预测跟踪模式

红外成像导弹对目标的正常跟踪状态受到干扰时,转入预测跟踪模式。由于预测跟踪存在可靠性低、持续时间有限等弱点,干扰持续时间足够长,即可实现有效干扰。预测跟踪利用先前的目标位置信息进行航迹外推,在预测点周围一定范围内通过目标匹配来选择跟踪点,由于目标的真实运动特征在时刻变化而无法得知,为了保证所选择跟踪点的有效性,预测跟踪的时间不可能太长,一般持续1~2s。对于一定光学分辨率的红外成像导引头,面源红外诱饵连续投放后,在真目标附近形成大面积的红外辐射云团,对其正常跟踪模式进行持续干扰,且持续时间大于预测跟踪时间,此时导引头仍然无法识别出目标,跟踪状态被破坏而转入搜索状态,由于此时导引头的视场范围已经很小,很难再次捕获到真目标,最终实现成功干扰。

1.2 红外辐射特性

根据对红外成像制导导弹的攻击引导过程及对抗分析,面源红外诱饵光谱特性、辐射强度、时域特性、辐射面积等红外辐射特性满足一定的要求,才能实施有效干扰^[8],对这些红外辐射特性进行测试与分析是客观评价面源红外诱饵性能的主要手段。

(1)光谱特征。面源红外诱饵的光谱要与被保护目标相似,即面源红外诱饵的辐射波长应与红外寻的器的工作波长相匹配。红外面源诱饵的中短波辐射能量比在1.5以上,辐射光谱分布能有效模拟载机目标,辐射波长与来袭红外制导导弹导引头的工作波段匹配,能够有效抑制先进的红外导引头利用目标的辐射光谱分布进行干扰检测。

(2)辐射强度。面源红外诱饵的辐射强度由目标的辐射强度决定。在大多数情况下,面源红外诱饵必须在红外寻的器工作的全波段有超过目标的辐射强度。面源红外诱饵的辐射强度与载机相当,能

够有效抑制先进的红外导引头利用目标的辐射强度大小进行干扰检测。

(3)时域特性。为了对红外成像制导导弹实现有效干扰,面源红外诱饵必须与被保护目标同时出现在来袭红外制导导弹寻的器的视场内,并保持足够时间,以保证被保护目标能顺利离开红外成像制导导弹的导引头视场。红外面源诱饵信号强度上升相对平稳,形成时间在1s以内;能够在较长时间内保持可信的红外辐射特征,持续时间在3s以上。

(4)辐射面积。红外诱饵具有有效辐射区域,其面积要足够大,而且要与目标图像部分融合。这样,使得红外成像制导系统波门扩大,其质心坐标与目标真实坐标之间造成较大偏离,或者由于目标红外辐射分布被严重破坏,使制导系统无法识别目标^[9]。面源红外诱饵在红外探测器上占据的弥散斑或像元数与载体类似,能够有效抑制先进的红外导引头利用目标面源特征进行干扰检测;通过改变探测视场内的图形特征,能够有效破坏红外成像跟踪系统的正常跟踪。

2 测试方法

2.1 光谱特性和辐射强度测试

面源红外诱饵光谱特性和辐射强度采用SR5000进行测试。首先,对SR5000光谱辐射计的响应灵敏度进行校准,采用标准黑体源进行校准。在不改变SR5000测试参数的条件下,通过设置合适的标准黑体温度,用SR5000系统光谱灵敏度校准程序实施现场校准。光谱辐射计输出的电压信号为

$$S_V = K(\lambda)[W_{\text{chopper-open}} - W_{\text{chopper-closed}}] = K(\lambda)[W_{\text{chopper-open}} - P_L(\lambda, T_{\text{BB}})] \quad (1)$$

式中, $K(\lambda)$ 为SR5000光谱辐射计的光谱响应灵敏度系数,无因次量; $W_{\text{chopper-open}}$ 为斩波器开启时探测器接收的辐射能量值; $W_{\text{chopper-closed}}$ 为斩波器关闭时探测器接收的辐射能量值; $P_L(\lambda, T_{\text{BB}})$ 为仪器内部黑体的普朗克辐射能量值; S_V 为光谱辐射计输出电压值。

首先需要得到光谱辐射计的光谱响应灵敏度系数 $K(\lambda)$,公式如下

$$S_V^c(\lambda) = K_1(\lambda)[P_L(\lambda, T_{\text{BB}}) - P_L(\lambda, T_{\text{IBB}})] \quad (2)$$

已知黑体源目标的辐射量为 $P_L(\lambda, T_{\text{BB}})$,得到

$$S_w(\lambda) = P_L(\lambda, T_{\text{BB}}) \quad (3)$$

读出信号电压值 $S_V^c(\lambda)$ 和 $P_L(\lambda, T_{\text{BB}})$ 代入式(2),得到下式

$$S_V^c(\lambda) = K_1(\lambda)[P_L(\lambda, T_{\text{BB}}) - P_L(\lambda, T_{\text{IBB}})] \quad (4)$$

通过对式(4)换算得到光谱响应灵敏度系数为

$$K_1(\lambda) = \frac{S_V^c(\lambda)}{P_L(\lambda, T_{\text{BB}}) - P_L(\lambda, T_{\text{IBB}})} \quad (5)$$

光谱辐射计光谱响应灵敏度曲线如图1所示。

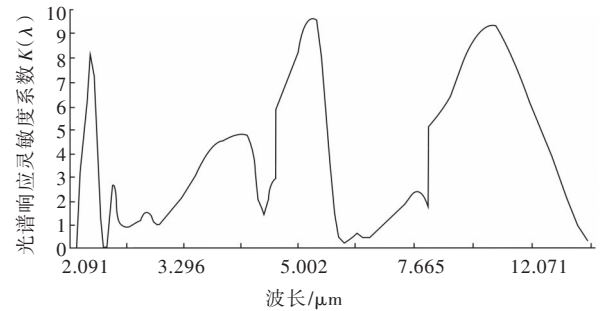


图1 光谱辐射计光谱响应灵敏度曲线

在同一测试条件下,分别对目标、标准黑体进行测试,根据式(1)可计算出目标的辐射量值为

$$W_{\text{chopper-open}} = \frac{S_V}{K(\lambda)} + P_L(\lambda, T_{\text{BB}}) \quad (6)$$

面源诱饵红外辐射强度计算方法如下

(1)将标定的腔黑体温度设置为 T_{BB} ,光阑口径为 D ,标定距离为 L (使得黑体在辐射计视场中的像未充满视场),设置辐射计的视场、增益、斩波频率等参数与实际测试的参数相同;

(2)采集腔黑体的信号 V_{BB} 及背景信号 V_{bb} ,从目标的信号 V_s 提取目标附近的背景信号 V_b ;

(3)根据下式可计算目标的光谱辐射强度

$$I(\lambda) = \frac{(V_s - V_b)R^2}{(V_{\text{BB}} - V_{\text{bb}})L^2} \times M(T_{\text{BB}}) \times \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

式中, $M(T_{\text{BB}})$ 为黑体在 T_{BB} 的光谱辐射出射度,单位为 W/m^2 ; R 为被测目标与红外辐射计的距离,单位为 m 。

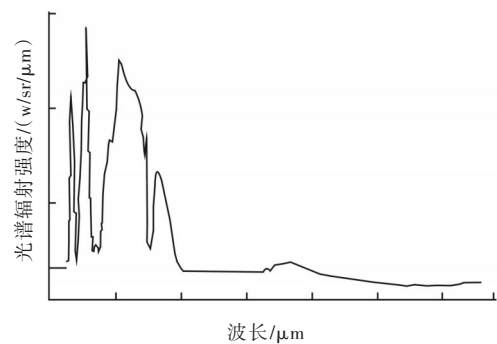


图2 光谱辐射强度曲线

某个波段内的辐射强度可用积分方法求得

$$I(\lambda_1 \sim \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

图2所示即为通过SR5000光谱辐射计测试得到的某面源红外诱饵的光谱强度曲线。图3为3~5 μm积分辐射强度曲线。

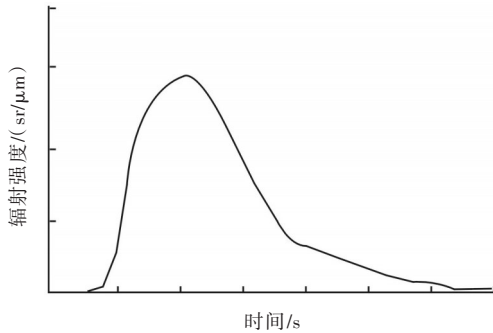


图3 3~5 μm积分辐射强度曲线

2.2 时域特性测试

时域特性包括上升时间和持续时间。在面源红外诱饵离开导引头视场之前,必须达到有效的辐射强度,因此上升时间不能太大。持续时间是保证红外诱饵干扰效果的重要指标之一,持续时间过长,会造成诱饵能量的浪费,持续时间过短,载机未逃逸出导引头视场,面源红外诱饵就燃尽,无法形成有效干扰。

辐射时域特性可结合积分辐射强度曲线进行测量。图4所示是辐射时域特性的示意图。上升时间是指从发火箭片开始反应,到辐射强度上升到额定值90%的时间,即 t_2 。持续时间是指出从辐射强度上升到额定值50%起,到辐射强度下降到额定值50%的时间,即 $t_3 - t_1$ 。

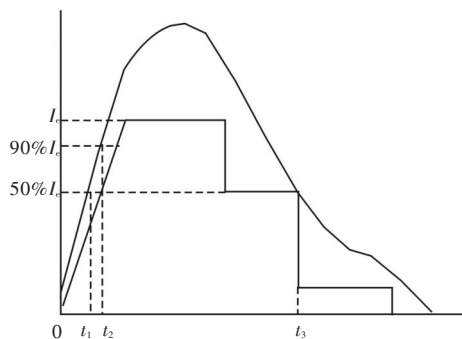


图4 辐射时间特性示意图

2.3 辐射面积测试

用红外热像仪可实现对面源红外诱饵辐射面积的测试,通过红外热像仪分析处理软件,对目标辐射区域进行选取,再根据激光测距仪获取的目标距离参数,结合红外热像仪的视场参数,便可计算分割后的目标在探测器方向的投影面积。当面源红外诱饵和背景经光学成像系统形成一幅二维图像时,这种离散化图像与实际景物相比,除相差一定比例系数外,每个像元在大小、面积、坐标位置和灰度等级上都与实际景物一一对应^[10]。

用红外热像仪测量面源红外诱饵面积,其测量原理主要依据以下公式

$$\frac{A}{a} = \left(\frac{D}{f}\right)^2 \quad (9)$$

式中, A 为单元元素对应的红外诱饵面积; a 为单元像素面积; D 为镜头焦点到目标的垂直距离; f 为光学镜头的焦距。

测量距离一般要根据红外热像仪的测量视场、动态范围和红外诱饵的面积来确定。面源红外诱饵既不能超出设备的测量视场,在测量视场中所占的比例也不应太小。如果面源红外诱饵超出测量视场,设备将不能全部接收其在测量方向上的红外辐射,造成测量值偏小;如果面源红外诱饵所占的测量视场比例太小,设备接收的背景辐射将增多,也将引起测量误差。

根据激光测距仪获取的目标距离参数,结合红外热像仪的视场参数计算被分割后的面源红外诱饵在探测器方向的投影面积。设红外热像仪的瞬时视场角为 $\alpha \times \beta$,图像分辨率为 $W \times H$ 像素,红外热像仪到面源诱饵的距离为 d ,则单元像素对应的辐射面积为

$$S_0 = \frac{d^2 \tan \alpha \tan \beta}{WH} \quad (10)$$

3 结束语

面源红外诱饵采用大量燃烧温度与飞机尾焰温度接近的特殊自燃材料作为干扰载荷,通过产生大量辐射单元形成,在空中呈现为大面积红外辐射云团,其红外辐射强度与载机相当,辐射光谱与载机相似,并通过连续投放具有连续向前运动的特征。面

源红外诱饵经过 20 余年的研究与发展,技术已经成熟。作为红外点源诱饵的补充,面源红外诱饵的装备与应用,将进一步增强飞机对抗先进红外制导导弹和红外搜索与跟踪系统的能力。同时,随着多光谱红外成像制导、多模复合制导、弹载信号处理及图像处理技术的深入发展和广泛应用,未来飞机面临的红外制导导弹威胁将进一步加大,作为最常用的自卫干扰措施,红外面源诱饵的功能和使命将被赋予新的内涵,相关新技术也必将得到进一步发展。

参考文献

- [1] 王继光,王敏帅,臧寿洪.国内外面源红外诱饵弹的发展和试验方法研究[J]. 红外,2011,32(10):17-20.
- [2] 张宏宇,林涛,常晓玲.面源红外干扰弹对红外成像制导系统干扰研究[J]. 光电技术应用,2008,23(3):225-29.
- [3] 淦元柳,蒋冲,刘玉杰,等.国外机载红外诱饵技术的发展[J]. 光电技术应用,2013,28(6):16.
- [4] Exothermically formed aluminide coating [P]. U.S. Patent, 5866840.1999.5102700.1992.
- [5] Aqueous masking solution for metal treatment [P]. U.S. Patent, 5262466.1995.
- [6] Pyrophoric materials and method for making the same[P]. U.S. Patent, 5464699.1995.
- [7] 赵非玉,马春孝.机载红外诱饵技术的发展[J]. 舰船电子工程,2012,32(3):21.
- [8] 陈宁,万纯,黄烽,等.面源红外诱饵干扰有效性分析[J]. 航天电子对抗,28(6):38-41.
- [9] 王馨.面源红外诱饵技术特征及材料组分研究[J]. 光电技术应用,2007,22(3):13.
- [10] 刘静梅,官伏安.用热像仪测试面源红外诱饵面积的方法及误差研究[J]. 红外,2009,30(8):33.

(上接第 57 页)

- [8] Robert T Payntner. Introductory Electronic Devices and Circuits[J]. 6th ed. Prentice Hall Inc. 2003.
- [9] 康华光.电子技术基础(模拟部分)[M].4版.北京:高等教育出版社,1999.
- [10] 冯民昌.模拟集成电路系统[M].北京:中国铁道出版社,1998.

(上接第 69 页)

- [2] Lee S B. Origin of variation in switching voltages in threshold-switching phenomena of thin films[J]. Applied Physics Letters, 2013,102(6):063501.
- [3] 陈涛.利用金属氧化法在不同衬底上制备氧化钒薄膜的研究[D].天津:天津大学,2008:1.
- [4] YNDC, XU N K, ZHANG J Y, et al.Vanadium dioxide films with good electrical switching property[J]. J Phys, 1996,D29(4):1051-1057.
- [5] Dumas-Bouchia F. Rf-microwaves witches based on reversible semi-conductor-metal transition of thin films synthesized by pulsed-laser deposition[J]. Applied Physics Letters, 2007,91(22):223505.
- [6] 魏雄邦.退火对氧化钒薄膜成分及热敏性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2009,38(2):951-953.
- [7] 黄章立.低温相变氧化钒薄膜的制备及性能研究[D].武汉:华中科技大学,2013:19.
- [8] 田雪松.二氧化钒薄膜的退火组分变化及光学特性研究[J].激光技术,2005,29(3):332-336.
- [9] 朱和国,王恒志.材料科学研究与测试方法[M].南京:东南大学出版社,2007:81-82.
- [10] SHI Qi-wu, HUANG Wan-xia. Nanostructured VO_2 film with high transparency and enhanced switching ratio in THz range[J]. Applied Physics Letters, 2014,104:10.1063/1.4863408.
- [11] 杨旭.磁控溅射制备氧化钒薄膜[D].西安:西安工业大学,2010:13.
- [12] 杨鑫鑫.高温氢退火还原 V_2O_5 制备二氧化钒薄膜及其性能的研究[J].物理学报,2013(22):370-374.
- [13] 孙丹丹.二氧化钒薄膜低温制备及其太赫兹调制特性研究[J].物理学报,2013(1):41-46.
- [14] 刘东青.二氧化钒薄膜制备及其热致变色特性研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009:52.
- [15] 刁训刚.低发射率薄膜的红外隐身特性研究[J].宇航材料工艺,2007,37(5):39-42.