

织物热红外伪装性能测试评价技术现状

郝立才^{1,2}, 肖红³, 刘卫³

(1.中国科学院化学研究所, 北京 100190; 2.威海拓展纤维有限公司, 山东 威海 264202;

3.总后勤部军需装备研究所, 北京 100010)

摘要: 热红外伪装织物在人体的防红外热像侦察中发挥着重要作用, 织物的红外辐射特性常用红外发射率进行衡量, 而伪装性能常采用热成像方法进行评价。从以上两方面, 介绍了红外伪装织物的现有测试评价方法, 对比阐述了量热法、反射率法测试织物红外发射率的原理及特点, 以及基于热成像探测能力的阈值条件和人工判读评价织物伪装性能的特点和缺陷, 指明了现有热红外伪装织物测试评价方法应改进和完善的方向。

关键词: 红外伪装织物; 红外发射率; 量热法; 反射率法; 伪装性能评价

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)08-0512-06

Review on Evaluating Methods of Thermal Infrared Camouflage Performance of Textiles

HAO Li-cai^{1,2}, XIAO Hong³, LIU Wei³

(1. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Weihai Tuozhan Fiber Co. Ltd, Weihai 264202, China; 3. The Quartermaster Research Institute of the General Logistics Department of the PLA, Beijing 100010, China)

Abstract: Thermal infrared camouflage fabrics play an important role in the countermeasure of thermal infrared detection. The infrared emissivity and the thermal infrared image are commonly used to characterize the infrared radiation features and the camouflage performance of fabrics respectively. In the paper, the commonly used testing and evaluating methods for thermal infrared camouflage fabrics are reviewed. The principles and problems of the calorimetry method and the reflectivity method for measuring infrared emissivity of fabrics are illustrated. The characteristics and limitations of the threshold conditions method based on the detectability of infrared thermography and the manual interpretation method for evaluating camouflage performance are also revealed. Finally, the development direction of testing and evaluating methods for thermal infrared camouflage fabrics are pointed out.

Key words: infrared camouflage fabric, infrared emissivity, the calorimetry method, the reflectivity method, camouflage performance evaluation

0 引言

热红外伪装织物是通过隔热、吸热或散热等控温措施以及低发射率材料的应用和热红外迷彩图案的设计等来消除、减少或改变人体和背景在 8~14 μm 波段的红外辐射特性的差别, 实现人体和背景红外热像融合的防护类织物, 其可对人体实现防热红外探测器如红外热像仪的侦察。红外热像仪通过探测背景和目标的红外辐射能量, 根据能量差异形成图像, 其温

度分辨率已由原来的 0.1℃提高到目前的 0.01℃, 空间分辨率达到 0.03 mrad^[1-2], 高光谱遥感技术在热红外波段的光谱分辨率也已达微米级别^[3]。

由斯蒂芬-玻耳兹曼定律可知, 物体的红外辐射能量由其红外发射率和温度决定。和可见光伪装一样, 热红外伪装常采用形体分割和与背景融合的原则。从人体形体分割的角度而言, 通常在织物上形成红外发射率梯度配置的不规则迷彩斑块, 实现热像图中斑块的红外辐射亮度差异; 从与背景融合的角度而言, 由

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-13.

作者简介: 郝立才(1983-), 男, 山东临清人, 博士, 主要从事防热红外侦视纺织品的研究开发。E-mail: haolicaiwq@163.com。

通信作者: 肖红(1976-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为功能性纺织品, E-mail: 76echo@vip.sina.com。

基金项目: 山东省博士后创新项目专项资金资助, 编号: 201203012。

于人体温度一般高于背景温度,常采用降低红外发射率或温度的方法来减小人体的红外辐射能量,并实现与背景的红外热像细部特征融合^[4]。可见,无论采用什么技术手段,织物的红外发射率和红外热像是评价织物热红外伪装性能的重要指标。

本文分别对织物热红外发射率的测试方法和基于红外热像的织物红外伪装效果的评价方法进行了回顾,对比分析了各测试和评价方法的优缺点,并提出了改进措施和发展方向。

1 织物红外发射率及其测试方法

红外发射率是材料表面单位面积的辐射能力和同一温度相同条件下黑体的辐射能力之比。根据原理,其测量方法可分为量热法、反射率法、辐射能量法和多波长测量法等^[5-6],目前用于织物红外发射率的测试方法主要为量热法和反射率法。

1.1 量热法

量热法的基本原理是将待测样品置于热交换系统中,如图1所示,将样品加热并达到热平衡后,测量样品的温度,根据测温原理和换热状态等,建立包含材料红外发射率的热平衡方程,求解后获得材料的红外发射率^[7]。

对于织物红外发射率的量热法测试,多采用恒温热源加热样品,通过红外热像仪或测温仪及温度传感器对织物表面的真实温度和辐射温度进行测试,从而计算织物的红外发射率。图1所示系统中,红外热像仪所测得的红外辐射能量,由被测织物表面发射的红外辐射能量、织物反射的环境红外辐射能量以及织物与热像仪之间空气本身的热辐射能量组成。在实验室近距离对灰体特征的织物进行测量时,织物与热像仪之间空气辐射和透射的影响都可忽略,故而红外热像仪在热红外波段所能接收到的红外辐射能量可简化表示为:

$$E_r = \sigma T_r^4 = \varepsilon \sigma T_0^4 + \rho \sigma T_a^4 \quad (1)$$

式中: E_r 为红外热像仪接收到的织物表面的红外辐射能量, W/m^2 ; σ 为黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_r 为热像仪指示的织物表面的红外辐射温度 ($\varepsilon=1$ 时), K ; T_0 为织物表面的实际温度, K ; T_a 为周围环境的温度, K ; ε 为织物的红外发射率; ρ 为织物的反射率。由于织物可近似看作不透明灰体,透射率为0,吸收率 α 和反射率 ρ 之和等于1,且吸收率 α 和发射率 ε 相等,故 $\rho=1-\alpha=1-\varepsilon$ 。

对式(1)进行变换,就得到织物表面红外发射率的计算公式:

$$\varepsilon = \frac{T_r^4 - T_a^4}{T_0^4 - T_a^4} \quad (2)$$

实际测试中,量热法又可采用下面2种方式进行。一是联合热像仪和热板仪的测温计算法。测试时,为尽量消除环境辐射的影响,热板仪温度明显高于环境温度,将织物紧密贴附在热板表面,待达到传热平衡后,利用红外热像仪测试织物的红外辐射温度(此时,设置热像仪的材料发射率为1);利用温度传感器测试织物的实际温度和实际的环境温度,通过(2)式进行计算获得织物的红外发射率。采用该原理,测试的棉、毛和涤纶等常规织物的红外发射率在0.55~0.75之间^[8]。二是红外发射率调节测试法。在前述紧贴热板的织物表面,用温度传感器测试其真实温度;调节红外测温仪中的材料红外发射率,当测温仪的显示温度与织物表面真实温度相等时,此时的设定发射率就等于织物试样的红外发射率^[9-10]。采用该原理,利用恒温水箱、红外测温仪和微珠型半导体温度传感器对普通棉和涤纶织物、红外保温织物、防强红外辐射和阻燃织物等的红外发射率进行了对比测试,发现大部分织物的红外发射率都集中在0.70~0.90之间^[9],这 and 前述文献^[8]的结果差异较为显著,说明这类方法测量

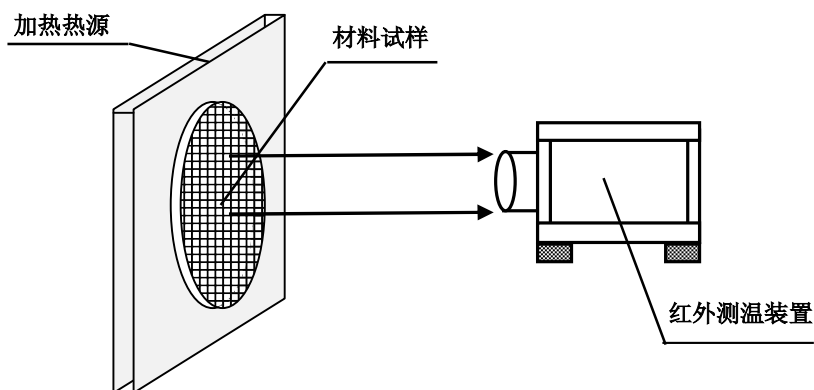


图1 量热法测试原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the calorimetry method

误差较大。

这两种测试方法均操作简单,可实现织物表面不同位置的测试,但有几个测试难点:①织物的真实温度测量困难,即使采用灵敏度高的温度传感器,探头和织物的接触紧密程度等都会影响真实温度;②环境的辐射影响通常很显著,除非热板仪温度远远高于环境温度,或者将周边的发热体都用低发射率的铝箔等材料包裹;③热像仪和红外测温仪长时间工作后,测量的辐射温度也会产生较大误差。

1.2 反射率法

反射率法是基于能量守恒定律及基尔霍夫定律,用恒温的黑体红外辐射源以一定的辐射强度对织物样品表面进行照射,通过测量织物表面所反射的红外能量,求得织物的红外反射率,进而计算其红外发射率。通常采用的反射计有热腔反射计、积分球反射计、镜面反射计及测角反射计等。常用的仪器有远红外热发射率测试仪^[11]和双波段发射率测试仪^[12]。

反射计探测的经被测材料反射的红外辐射能量为:

$$E = (1 - \varepsilon)F_0E_0 + \varepsilon F_1 f(T) \quad (3)$$

式中: E 和 E_0 分别为探测到的经被测材料反射的红外辐射能量和恒温黑体辐射热源的红外辐射能量; ε 和 T 分别为被测材料的红外发射率和测试时的绝对温度; F_0 和 F_1 分别为反射计对黑体辐射热源和被测材料的立体角的几何因子; $f(T)$ 为被测材料在测试时的黑体辐射能量。

实际测试时,分别以高镜面反射率材料和接近黑体的材料作为校准用的基准材料,红外发射率分别记作 ε_1 和 ε_2 ,测试时的绝对温度分别为 T_1 和 T_2 ;同(3)式可得经2种标准材料反射的红外辐射能量。联合求解,可得织物的红外发射率如式(4)所示。

$$\varepsilon = \frac{E(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_1 E_2 - \varepsilon_2 E_1)}{E_2 - E_1} \quad (4)$$

该方法测试简单,避免了对样品表面真实温度的测量,同时减小了环境热辐射的影响;且测试仪器自动化程度高,把样品根据要求置于仪器后,可由仪器直接给出数据。但是要求待测的织物表面平整且结构紧密,同时要注意实际测试表面和黑体辐射源的真实距离。有研究者采用这类仪器获得了织物的红外发射率。比如采用远红外热发射率测试仪对由经纬纱分别为涤纶和竹炭纤维纱的经编织物的红外发射率进行了测试^[13];采用双波段发射率测试仪对水性黏合

剂、金属填料和聚异戊二烯/丙烯腈基涂层织物在8~14 μm 红外发射率进行了测试对比,涤纶织物涂层中片状铝粉质量分数为30%时,织物的红外发射率为0.6^[14]。也有利用自制的黑体辐射热源和傅里叶红外辐射计对普通机织物、化学镀织物和涂层织物等30余种纺织材料在8~14 μm 波段的红外发射率进行的测试^[15]。

此外,利用傅立叶红外光谱仪进行光谱发射率测试的研究也很多,但大都用于自然地物光谱发射率、以及高温和更长波段的材料的光谱发射率测试^[16-18],尚无在织物或纺织品方面应用的报道。

2 织物热红外伪装性能评价方法和指标

主要是基于热成像系统探测能力的阈值条件评价和基于红外热像采集的人工判读识别评价。前者的评价指标包括基于热像仪探测能力和人眼分辨能力的温差阈值和迷彩斑块间红外发射率差的阈值;后者的评价指标为被识别和发现概率以及伪装效率等。

2.1 基于热成像系统探测能力的阈值条件评价

该方法从分析热成像系统的温度和空间分辨力角度出发,考虑目标和背景辐射特性的影响、大气传输衰减特性及人眼分辨能力,找出目标实现热红外伪装的红外辐射温差阈值条件,即伪装目标和背景间所要求的最小辐射温差;或迷彩斑块实现热像分割的斑块间红外发射率差的阈值条件,即迷彩斑块间所要求的最小红外发射率差值。如果目标和背景的温差或目标的迷彩斑块间红外发射率的差值满足该阈值条件,认为目标已实现了热红外伪装,反之,未能实现热红外伪装^[19]。

由红外热成像系统探测能力的2个参数可知,要使目标不被探测到的2个基本条件是:①目标等效空间宽度对热成像系统的张角应小于热成像系统的空间分辨力;②目标与背景的黑体等效温差应小于热成像系统的温度分辨力。尽管实验室条件下,热成像系统的温度分辨力和空间分辨力很高,分别高达0.01℃和0.03 mrad。但实际应用中,由于受大气传输、背景温度起伏等探测条件的限制,其温度和空间分辨能力要小得多。普遍认为,目标与背景的辐射温差控制在±4℃以内时即可实现良好的热红外伪装效果^[20-21]。

在人体的热红外形体分割方面,研究者通过对不同发射率配置和典型背景红外辐射特性的研究,找到了实现形体分割的斑块间发射率差的阈值,认为迷彩

斑块间红外发射率差异达 0.11 时,即可对目标表面实现良好的形体分割效果^[22-23]。

阈值条件评价法虽不能精确获得目标热红外伪装程度的数据,但在热红外伪装工程上得到广泛应用。

现有的研究集中于各类阈值的科学方法及指标的确定。在对典型南方林地型背景温度进行野外测量试验和分析的基础上,提出计算热红外伪装温差阈值的方法^[24]。以人眼通过热成像系统不能识别目标为条件,提出实现红外热像隐身时目标与背景温差阈值的确定方法^[25],或者以红外辐射对比度阈值评估目标在林地背景中的热红外伪装效果^[26]。但是目标与背景的平均温差检测指标存在局限性,需要进一步引入能反映热图纹理的辐射温度标准差对比指标^[27]。除了温差阈值,迷彩斑块的发射率阈值也得到研究。在强日照条件下,林地型伪装网中间色斑块的发射率必须小于 0.63;而在夜间条件下中间色斑块的发射率不小于 0.83^[28],但是单纯依靠调节发射率实现热红外伪装比较困难。迷彩织物的红外伪装效果还受太阳能吸收率、热容、隔热性能、对流传热系数等参数的影响,需要采用日间无风强日照条件(太阳辐照度大于 800 W/m²,风速小于 2 m/s)下和夜间少云条件下迷彩斑块间辐射温差来评价迷彩织物的热红外伪装性能^[29]。

2.2 基于红外热像采集的人工判读识别评价

通过红外热像仪在野外或特定试验场地大量采集包含背景和目标的图像,直接或经数字图像处理进行人工判读识别,以衡量目标的热红外伪装效果。主要有试验场判读评价、实验室内判读评价和试验场图像分析评价等^[19],人工判读识别的依据主要是人眼可识别的红外辐射出射度的差异。该方法广泛用于伪装工程。

1) 试验场判读评价法

组织成批的经过一定训练的人员,对由地面或空中红外热像仪在野外或试验场地在不同距离条件下采集的包含背景和目标的图像进行判读识别,确定伪装目标的被发现和识别概率等。

参照国军标 GJB 5010.4-2003《伪装遮障设计定型试验规程第 4 部分中远红外伪装性能试验》^[30],采用发现概率作为伪装效果的评价指标。

在大气气象能见度大于 10 km 的晴天天气条件下,不少于 10 名的人体目标穿着热红外伪装织物后进入试验场地的特定背景环境中并做好伪装,利用

8~14 μm 的红外热像仪,在 24 h 内每隔 1~2 h 对目标设置区进行红外热像采集拍摄,并用计算机转换为数字图像;挑选不少于 20 名、裸眼视力不低于 5.2、无色盲、了解目标伪装前后红外热像特征且对场地和目标设置无任何了解的观察员,对红外热像进行观察并记录发现目标的情况。

发现概率采用下式进行计算:

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P 为伪装目标的发现概率; n 为被判读识别和发现的伪装目标个数; N 为伪装目标的总个数。

该评价方法与实际情况接近;但所需成本高、灵活性差、评价过程费时费力,且评价指标精度有限(只有发现和未发现两级),评价判定结果易受人为主观因素的影响。

2) 实验室内判读评价方法

对在野外或试验场地采集得到的大量包含背景和目标的图像,在实验室内组织人员对图像进行判读识别,从而做出伪装效果的评价。该评价方法的判读识别在实验室内进行,减少了试验场评价的复杂性,但评价判定结果也会受到人为主观因素的影响。

3) 试验场图像分析评价方法

试验场图像分析评价方法是利用计算机数字图像处理技术,对由红外热像仪采集的有关包含红外伪装目标和背景的图像进行特征提取,找出合适的图像特征统计参数以有效区分目标和背景,从而做出对伪装效果的评价。目标与背景的数字图像统计特征参数相差越大,目标的热红外伪装效果越差。该评价方法的关键是提取包含背景隐身目标的图像数字统计特征,建立起与实际伪装效果如发现概率等的对应关系。

数字图像分析法由于可消除人为主观因素的影响,且可有效降低热红外伪装效果评价的时间和成本,目前已成为热红外伪装效果评价研究的发展趋势,但数字图像分析的统计和评价是以大量的试验为基础的。

从以上 3 种方法可以看出,前 2 种测试方法为主观评价方法,虽然实用性较强,但存在着评价指标单一、缺乏科学客观性的问题;第 3 种测试方法虽具有较好的科学客观性,但国内外尚无统一的标准,且存在着图像处理和统计分析算法不够成熟、通用性和精度差等不足。

诸多的研究集中于更合理更客观的伪装效果评价方法和指标的建立。在人眼判读方面,基于热成像系统静态性能分析和视距理论估算,测试计算了各典型背景下不同梯度发射率涂层目标的伪装概率^[31],并用红外隐身效率定量评价材料和装备的红外隐身效果^[32-33]。在通过计算机图像处理评价红外伪装效果的研究方面,有多种方法。基于图像灰度相关算法,采用图像处理提取的相关峰的峰显著系数、峰-相关能量比和峰-背景比3个特征参量定义红外隐身概率,作为衡量红外隐身效果的客观评价指标^[34]。基于人眼生理学和视觉系统的纹理分割模型,建立 Gabor 函数小波的纹理分析模型用以模拟人眼的判读过程,提出纹理相似度概念^[35]。基于人眼视觉注意机制,根据图像的亮度和朝向特征并融合色差分布图得到的特征显著图,用于目标伪装效果的评价^[36]。基于小波纹理特征的纹理相似度指标来评价迷彩伪装效果的方法^[37]。基于伪装目标和背景红外图像的灰度值与直觉模糊集隶属度、非隶属度的关系,用 Gamma 函数作为隶属度函数,并用直觉模糊集方法重新描述红外图像,对车辆和单兵伪装效果进行评价^[38]。

可见,目前的伪装效果评价方法和评价指标大多是基于红外热像探测能力和人眼分辨能力的阈值和热像图亮度或灰度对比,基于图像处理技术的目标和背景图像特征参数的评价^[39]为伪装效果精确客观评价方法的建立指明了方向,但尚未形成能够客观评价图像质量的函数来定量表征目标与背景红外图像的融合程度。

3 结语

热红外伪装织物性能的测试评价,主要是以织物表面红外发射率、伪装目标与背景的红外辐射温差阈值、迷彩斑块间红外发射率差值阈值、特定背景条件下的发现概率、以及红外热像辐射亮度对比度作为评价指标;但均难以精确表征对人体的伪装程度,评价指标单一且缺乏科学客观性。虽有不少研究者针对人眼分辨能力在图像特征提取和伪装性能指标建立方面进行了探索,但尚未形成科学客观的评价方法。

因此,应针对热红外伪装织物的具体应用背景,建立新型测试评价技术和指标以对织物的热红外伪装性能实现客观、精确、有效而且全面的预测和评价。特别是对典型地物植被背景条件下织物红外辐射特性和对人体的伪装程度及与背景融合程度的精确关

系的确立、以及伪装性能评价准则的建立,需要更深入地研究和探讨。这需要着重从以下几方面进行:①加强对典型地物植被背景和人体的红外热像图灰度、纹理与形状等特征的提取和统计分析;②结合人眼视觉特征和视觉注意机制,建立精确表征和量化人体与背景红外热像特征差别的客观尺度化指标;③结合傅立叶红外光谱仪,建立织物表面红外发射率和红外发射率光谱的精确测试方法。相信随着不断深入研究,织物热红外伪装性能测试与评价方法和指标将趋于完善和精确。

参考文献:

- [1] 李国华, 吴立新, 吴淼, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.
- [2] 张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 热红外伪装涂料研究进展及发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2007(12): 88-91.
- [3] 张朝阳, 程海峰, 陈朝辉, 等. 高光谱遥感的发展及其对军事装备的威胁[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 10-12.
- [4] 赵均英, 王彦, 孙方兵. 热红外伪装隐身技术探讨[J]. 红外技术, 2008, 30(7): 373-375.
- [5] 吴燕燕, 罗铁苟, 黄杰, 等. 基于红外热像仪测温原理的物体表面发射率计算[J]. 直升机技术, 2011(4): 25-29.
- [6] Ibos L, Marchetti M, Boudenne A, et al. Infrared emissivity measurement device: principle and applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(11): 2950-2956.
- [7] 王宗伟. 高温热防护材料发射率测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 徐军, 陈益松, 甄慧英, 等. 基于红外热像技术的织物红外发射率测量方法[J]. 纺织学报, 2009, 30(9): 41-44.
- [9] 董侠, 柴岩凌. 防辐射阻燃织物发射系数的实验测定[J]. 中国劳动防护用品, 2000(4): 37-39.
- [10] 徐卫林. 红外技术与纺织材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [11] Ube Industries, Ltd.. Emissivity measuring device: Euro., 1643225 A1[P]. 2006-04-05.
- [12] 上海技术物理所. 上海技术物理所研制成功 IR-2 型双波段发射率测量仪[J]. 红外, 2004(10): 50.
- [13] Lin JiaHong, Lin ChingWen, Lin ChinMei, et al. Pilot study of PET/bamboo charcoal warp-knitted fabric[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 184-185: 1090-1093.
- [14] 邢宏龙, 马妍, 何亮, 等. 聚异戊二烯/丙烯腈基织物涂层在 8~14 μm 波段的红外低发射率[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12):

- 2349-2353.
- [15] Zhang H, Hu T L, Zhang J Ch. Surface emissivity of fabric in the 8~14 μm waveband[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2009, **100**(1): 90-94.
- [16] 王珏, 盘毅, 李华, 等. 基于快速傅立叶红外光谱仪的自然地物光谱发射率测量[J]. *红外技术*, 2009, **31**(4): 210-214.
- [17] 王新北, 萧鹏, 戴景民. 基于傅里叶红外光谱仪的光谱发射率测量装置的研制[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 149-152.
- [18] 王海燕, 吴坚业, 朱国荣. 红外发射材料光谱发射率的测量法[J]. *红外技术*, 2003, **25**(6): 61-63.
- [19] 王自荣, 孙晓泉. 光电隐身性能的表征概述[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(1): 11-14.
- [20] 王自荣, 孙晓泉. 涂层热红外迷彩隐身的条件分析[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(4): 305-307.
- [21] 王自荣, 孙晓泉. 热红外伪装对材料伪装性能的要求[C]//中国化学会第二届隐身功能材料学术研讨会论文集, 中国化学会. 2004: 126-130.
- [22] 冉仕勇, 杨曦. 纳米涂料用于雷达装备红外伪装与隐身[C]//第九届全国雷达学术年会论文集, 2004: 982-985.
- [23] 周学梅, 周光华, 张平, 等. 可见光迷彩与红外斑块分离的多梯度红外隐身涂料研究[J]. *表面技术*, 2007, **36**(3): 14-16.
- [24] 王友军, 胡江华, 吕绪良, 等. 林地型背景热红外伪装的温差阈值试验研究[J]. *红外技术*, 2008, **30**(6): 361-364.
- [25] 胡江华, 周建勋, 张保民. 红外热像隐身的评价原则[J]. *红外技术*, 1995, **17**(6): 25-27.
- [26] 谢民勇, 沈卫东, 宋斯洪, 等. 基于目标与背景红外辐射对比度的红外隐身效能研究[J]. *红外技术*, 2011, **33**(2): 113-115.
- [27] 田少辉, 陈宏书, 胡志毅, 等. 热红外伪装效果检测指标分析[J]. *红外技术*, 2010, **32**(1): 57-60.
- [28] 曹义, 才鸿年, 程海峰, 等. 林地型伪装网热红外发射率取值分析[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(7): 671-675.
- [29] 曹义, 才鸿年, 程海峰, 等. 变形迷彩伪装的技术指标分析[J]. *红外技术*, 2008, **30**(2): 118-122.
- [30] 中远红外伪装性能试验[S]. GJB 5010.4-2003. 伪装遮障设计定型试验规程(第4部分).
- [31] 冉洪武, 周学梅, 曹红锦, 等. 不同发射率红外隐身涂层在典型背景中的伪装效率研究[J]. *表面技术*, 2009, **38**(5): 63-66.
- [32] 薛晶晶, 白廷柱, 李国琛. 红外隐身材料隐身效果评价方法研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**(3): 449-451.
- [33] 马娜, 黄峰, 李耀伟. 基于隐身效率的红外隐身性能评估方法[J]. *红外技术*, 2009, **31**(8): 491-494.
- [34] 黄峰, 汪岳峰, 董伟, 等. 基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 928-931.
- [35] 林伟, 陈玉华, 高洪生, 等. 基于 Gabor 小波纹理分析模型的伪装效果评价方法[J]. *兵工学报*, 2007, **28**(10): 1191-1194.
- [36] 朱欢欢, 都思丹. 基于小波纹理特征的迷彩伪装评价[J]. *计算机工程*, 2008, **34**(16): 227-229.
- [37] 贾其, 吕绪良, 吴超, 等. 人眼视觉注意机制用于伪装效果评价[J]. *应用科学学报*, 2011, **29**(3): 294-298.
- [38] 王贺, 白廷柱. 基于直觉模糊集的红外图像伪装评价研究[J]. *红外技术*, 2012, **34**(3): 181-184.
- [39] 王勇智. 基于图像处理的变形迷彩目标发现研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.