

〈材料与器件〉

新型多波段复合植被伪装材料

徐戎, 张晓忠, 吴晓

(湖南文理学院 机械工程学院, 湖南 常德 415000)

摘要: 为满足多波段兼容伪装的需求, 采用多种材料合理匹配与多功能层组合结构的方法, 制备了一种可实现可见光、红外和雷达多波段兼容的新型复合植被伪装材料。用雷达波屏蔽效能和反射率测试实验对伪装材料的吸波性能进行了测试, 用成像法对伪装材料的可见光和热红外伪装性能进行了试验检测。结果表明, 研制的伪装材料有良好的雷达波衰减性能, 大于 5 dB 的吸收频宽高达 3.9 GHz。植被伪装材料面层纹理、颜色、亮度、热图与背景较为接近, 隔热效果明显, 具有良好的可见光和红外伪装效果。

关键词: 可见光; 红外; 雷达波; 多波段兼容伪装; 植被伪装

中图分类号: TJ04, TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)03-0266-06

A New Multiband Composite Vegetation Camouflage Material

XU Rong, ZHANG Xiaozhong, WU Xiao

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: To meet the requirements of multiband compatible camouflage, a new composite vegetation camouflage material that can realize multiband compatibility of visible light, infrared, and radar was fabricated by reasonably matching various materials and a multi-functional layer structure. The absorbing properties of the camouflage material were evaluated by a radar wave shielding effectiveness and reflectivity test. The visible and thermal infrared camouflage properties of the camouflage material were tested by an imaging method. The results show that the camouflage material has good radar wave attenuation performance, and the absorption bandwidth at values of 5dB or more is as high as 3.9GHz. The texture, color, brightness, and thermal map of the surface layer of the vegetation camouflage material are close to the background values, and the thermal insulation effect is evident, enabling good visible and infrared camouflage effects.

Key words: visible light, infrared, radar wave, multiband compatible camouflage material, vegetation camouflage

0 引言

随着探测技术的快速发展, 武器装备在现代战场上可能同时受到来自可见光、红外、雷达及激光等多波段、全方位的探测, 针对某种单一侦察手段的伪装技术很难达到好的伪装效果, 为适应现代化战争的需求, 发展多波段兼容的伪装材料是必然趋势^[1-5]。雷达与红外、可见光兼容伪装材料指的是同时具有雷达

与红外、可见光 3 种伪装性能的伪装材料。一方面, 它的表面材料应具有可调节的可见光反射率, 以使目标的可见光反射系数与背景环境的可见光反射系数尽量接近, 达到可见光伪装效果; 另一方面, 它要具有较低的红外辐射性质, 以控制目标与背景之间的红外辐射能量差(温度差), 使红外探测与成像系统不能够识别目标的性状特征, 从而实现红外伪装目的; 同时, 它要具有良好的吸波性能, 可大幅减少雷达回

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2021-03-10.

作者简介: 徐戎(1980-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事伪装材料制备及性能研究。E-mail: amxurong@163.com.

基金项目: 湖南省高等学校应用特色学科(湘教通〔2018〕469); 湖南省高校科技创新团队支持计划资助(湘教通[2019]379); 湖南文理学院博士科研启动项目(18BSQD08)

波, 以实现雷达伪装目的^[6-7]。

多波段兼容伪装材料目前的报道还不是很多, 关于植被伪装层的研究则更少。顾红军等^[8]以稻草、铁粉、石墨粉、单层铝箔纸等易得廉价材料制作了一种新型多层复合伪装器材, 性能测试表明该伪装器材在红外到雷达波波段内都有良好的伪装隐身效果。吴春等^[9]设计制备了一种新型可见光/热红外兼容伪装复合材料, 该材料以常见的涤纶织物面料为基底, 在其表面涂覆含空心微珠的隔热层, 然后进行表面化学镀镍, 最后通过电解着色, 性能测试结果表明: 材料的有关性能均符合可见光与热红外伪装的要求, 可用做单兵伪装织物面料。杨玉杰等^[10]设计和制备了一种新型的植物叶片仿生伪装材料, 其包含透明聚氯乙烯表层、叶绿素/聚乙烯醇薄膜、含水高阻隔袋和纸张4层结构, 光谱测试结果表明在可见光、近红外和短波红外波段, 该伪装材料的反射光谱特征与植物叶片极为相似, 且耐候性好, 有望可以有效对抗高光谱目标侦察。王超等^[11]采用特征矩阵法和镀膜法设计计算并制备了一种可以实现远红外与10.6 μm激光兼容伪装的光子晶体薄膜, 但增大入射角度会降低整体伪装效果。俞科静等^[12]将金属铝粉和掺锡氧化钨粉末与聚丙烯进行熔融混合制备了一种红外伪装材料, 通过实验研究发现铝粉与掺锡氧化钨粉末的比例为1:2时, 伪装效果最好。易怡等^[13]通过优化设计构建了一维光子晶体复合结构, 实现了近、中、远红外光与波长为1.06 μm和10.6 μm激光兼容伪装, 并发现入射角增大会降低激光伪装效果和缩小红外波段伪装频谱范围。

从现有技术来看, 各个波段单一功能的伪装材料已达到应用阶段, 但是能真正兼容可见光、近红外、热红外、厘米波、毫米波等多个波段的伪装材料还比较少见。有些兼容材料最多也仅能兼容到两三个波段, 但兼容效果并不太理想, 还未进入实用阶段, 对于能兼容3个波段的, 其伪装效果还不能满足使用要求。本研究旨在针对现有技术的不足, 提供一种能满足多波段兼容要求、伪装效果较好、价格相对低廉、制作工艺简单、适合多场景的新型复合植被伪装材料及制备方法。

1 伪装材料结构

为满足多波段兼容伪装的要求, 本研究采用多种材料合理匹配与多功能层组合结构的思路, 研究设计一种复合材料, 既能满足对雷达波及红外等的有效伪装, 还能形成与环境近似的可见光伪装。该伪装材料共分为7层, 从内到外依次为防水层、里层基体、红

外反射层、过渡层、吸波层、外层基体和植被层, 如图1所示。其中, 吸波层完成对雷达波的衰减, 红外反射层完成红外波段的伪装, 植被层完成对雷达波和可见光的近似漫反射, 其余4层为辅助功能层。各层的具体功能和材料选用如下。

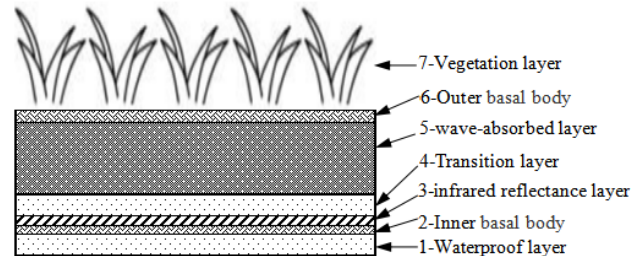


图1 新型多波段复合植被伪装材料结构示意图

Fig.1 Structural diagram of new multiband composite vegetation camouflage material

1.1 可见光伪装功能层

可见光伪装主要是针对人眼目视、仪器照相和摄像等侦察手段, 对比目标与背景环境间的亮度和色度等视觉信号参数的特征值所采取的伪装技术, 通常包括伪装网、迷彩、烟雾、植被伪装和新型智能变色材料等。植物伪装是用种植、采集植物和改变植物颜色对目标实施的伪装, 用于战时伪装较小的固定目标和活动目标及平时伪装较大的永久性固定目标, 能对付光学、热红外和雷达侦察, 植物伪装主要有覆盖、遮障、装饰和变色等4种方法^[14]。本研究中可见光伪装主要通过第7层植被层实现。该层选用无土栽培技术培育的植被层铺装在外层基体上, 并通过绳网固定, 具有适应场景多、伪装效果好、更换速度快的特点。

1.2 红外伪装功能层

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 伪装材料要实现红外伪装, 不仅要尽量使目标与环境的温差小, 而且还要尽量使目标的发射率与背景的发射率相近, 即达到“同温同谱”。本研究中, 红外反射层选用单面铝箔纸, 并将其有铝面朝向遮障目标放置, 利用其较高的红外线反射能力隔绝遮蔽目标向背景环境散发的红外辐射。另外, 植被层和足够厚的吸波层本身就有较好的隔热效果。3个功能层的组合可以较好地调节伪装目标的红外辐射特性, 使其与背景近似达到“同温同谱”的良好伪装效果。

1.3 雷达波伪装功能层

反雷达波伪装主要通过雷达吸波材料来实现。吸波材料一般分为吸收型和干涉型, 后者一般只能对某特定波长的雷达波实现伪装, 而吸收型吸波材料通常需要具备较高的电导率和磁导率^[10]。石墨精粉具有较高的电导率, 铁氧体粉具有较高的磁导率, 因此二者

组成的混合物是理想的吸波材料。本研究中,吸波层主要包含铁氧体粉、石墨精粉、环氧类粘合剂,各组分质量百分比约为:铁氧体粉 35%,石墨精粉 12%,环氧类粘合剂 53%。前两者起吸收雷达波作用,环氧类粘合剂起粘合定型作用。

1.4 辅助功能层

里、外层基体选用彩条布或化纤纺织布,主要起承力和载体作用,并有一定的耐磨和防水作用。防水层主要包括丙烯酸防水涂料、鱼珠胶和伪装颜料,直接涂刷在里层基体上,主要起防水止裂的作用。过渡层主要包含铁氧体粉、石墨精粉、鱼珠胶、伪装颜料,主要在红外反射层和吸波层之间起成分过渡与吸波作用,降低因两层间成分突变对雷达波反射特性的影响,减少雷达回波。

2 伪装性能测试及结果分析

2.1 反雷达波伪装效果

2.1.1 雷达波屏蔽效能测试实验

根据屏蔽作用原理屏蔽体对屏蔽效能的贡献分为 3 部分:一是屏蔽体表面因阻抗失配引起的反射损耗;二是电磁波在屏蔽材料内部传输时,电磁能量被吸收引起传输损耗或吸收损耗;三是电磁波在屏蔽材料内壁面之间多次反射引起的多次反射损耗。屏蔽效能测试通常采用 14 kHz、100 kHz、1 MHz、400 MHz、1 GHz、10 GHz 和 18 GHz 作为测试频率,这些典型测试频率点上的测试结果基本可以代表 9 kHz~18 GHz 整个频段的屏蔽效能^[15]。本研究利用微波暗室法,选取 10 GHz 和 18 GHz 两个测试频率,测试结果基本可以代表植被伪装材料在常用机载雷达主要工作频段 10 GHz~18 GHz 的屏蔽效能。根据阳波等^[16]研究成果,吸波材料中碳含量与铁含量为 1:2 时具有最佳的吸波性能,设计了两种不同的碳含量与铁含量的吸波材料配方,如表 1 所示。其中,1 号和 2 号样品为未安装最外层植被层情况下的测试结果,3 号和 4 号样品是在 2 号样品上安装植被层后的测试结果。3 号样品的植被为正常状态,4 号样品的植被为 12h 未浇灌的缺水状态。由表 1 可知,相对于 1 号样品,2 号样品具有更好的雷达波屏蔽效能,而增加植被层对低频(10 GHz)的屏蔽效能影响很小,对高频(18 GHz)的屏蔽效能有明显提升,且植被处于缺水状态对屏蔽效能有一定影响。

2.1.2 雷达波反射率测试实验

采用弓形法测试了植被伪装材料的雷达波反射率,测试频率扫频范围为 30 MHz~6 GHz,在此频率范围内均匀选取 81 个测试点,根据上节分析,选取 1

号和 2 号样品进行测试,实验结果如表 2 所示。由表 2 可知,1 号样品反射率最大值为 -15.6 dB,对应频率为 5.167 GHz,大于 5 dB 的吸收频宽为 2 GHz,2 号样品反射率最大值为 -12.15 dB,对应频率为 2.556 GHz,大于 5 dB 的吸收频宽为 3.9 GHz。显然,2 号样品反射率在 -5 dB 以下的吸收频宽相对更宽,有良好的雷达波衰减特性。由雷达波屏蔽效能和反射率实验结果可知,3 号样品具有最佳的综合性能,因此将其作为后续可见光和红外性能测试的对象。

表 1 雷达波屏蔽效能测试实验结果

Table 1 Experimental results of radar wave shielding effectiveness test

Specimen number	1	2	3	4
Carbon content/g	15.5	31	31	31
Iron content/g	31	62	62	62
Test frequency (18 GHz)/dB	-21	-27	-37.4	-31.4
Test frequency 10 GHz/dB	-19.2	-44.3	-44	-42.1

表 2 雷达波反射率测试实验结果

Table 2 Experimental results of radar wave reflectivity measurement

Specimen number	1	2
Band range with emissivity less than - 5dB/GHz	3.6-5.6	2.1-6
Corresponding reflectivity Range/dB	-5--15.6	-5.01--12.15
Minimum reflectivity/dB	-15.6	-12.15
Frequency corresponding to the lowest reflectivity value/GHz	5.167	2.556

2.2 可见光与红外伪装效果

采用成像法,利用数码照相机、数码摄像机、蓝绿红 3 种滤光片、红外辐射测温仪和红外热像仪,对伪装材料面层的可见光和热红外伪装效果进行了检测。所有测试均在室外完成,气温 22~30°C。本研究共对植被伪装材料进行了 4 类测试试验:①单块植被伪装材料可见光、蓝滤光、绿滤光、红滤光和热红外成像;②多块植被伪装材料可见光、蓝滤光、绿滤光、红滤光成像;③多块植被伪装材料不同时间点红外成像及表面温度测试;④植被伪装材料隔热性能测试。

图 2 是单块植被伪装材料可见光、蓝滤光、绿滤光、红滤光和热红外成像照片,图 3 是多块植被伪装材料可见光、蓝滤光、绿滤光、红滤光成像照片,图 4 是多块植被伪装材料不同时间点热红外成像照片及表面温度。表 3 为采用新型复合植被伪装材料对汽车

排气管实施遮挡前后的辐射温度测试结果。由图2和图3可以看出,无论是单块还是多块植被伪装材料,它们的面层纹理、颜色与亮度都与背景较为接近,均有良好的可见光伪装效果。由表3可知,伪装前后汽

车排气管温差 18.4°C ,隔热效果非常显著。由图4可知,不同时间点多块植被伪装材料与环境温度差基本均在 2°C 以内,具有优异的红外伪装效果。

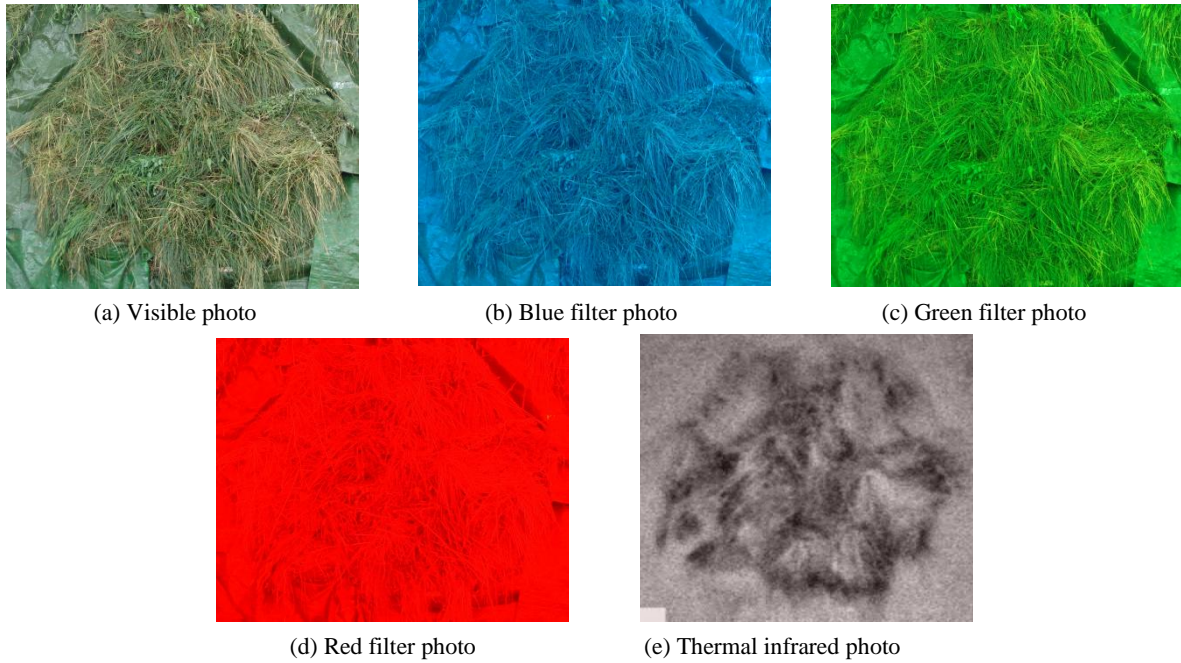


图2 单块植被伪装材料的成像照片

Fig.2 Imaging photos of a single piece of vegetation camouflage material

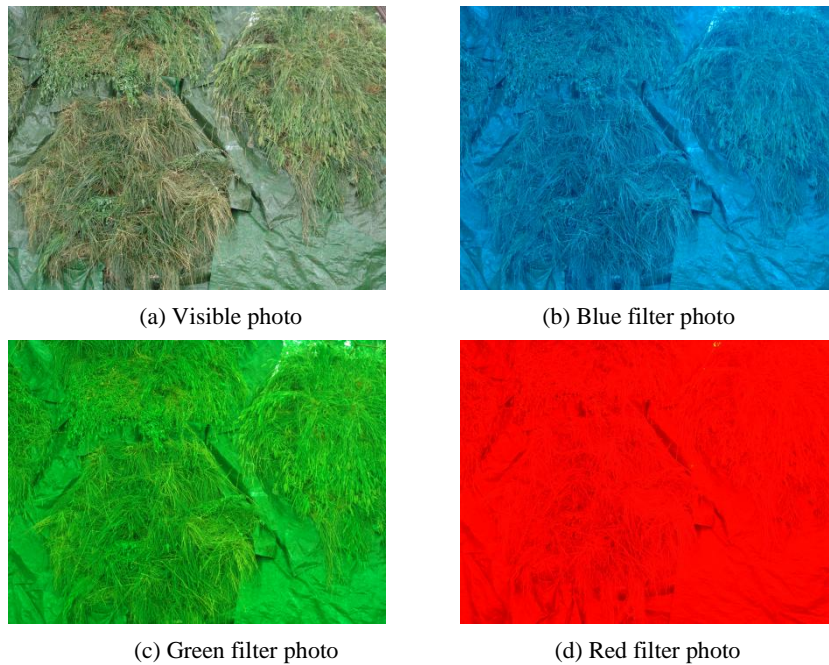


图3 多块植被伪装材料的可见光成像照片

Fig.3 Visible imaging photos of several vegetation camouflage materials

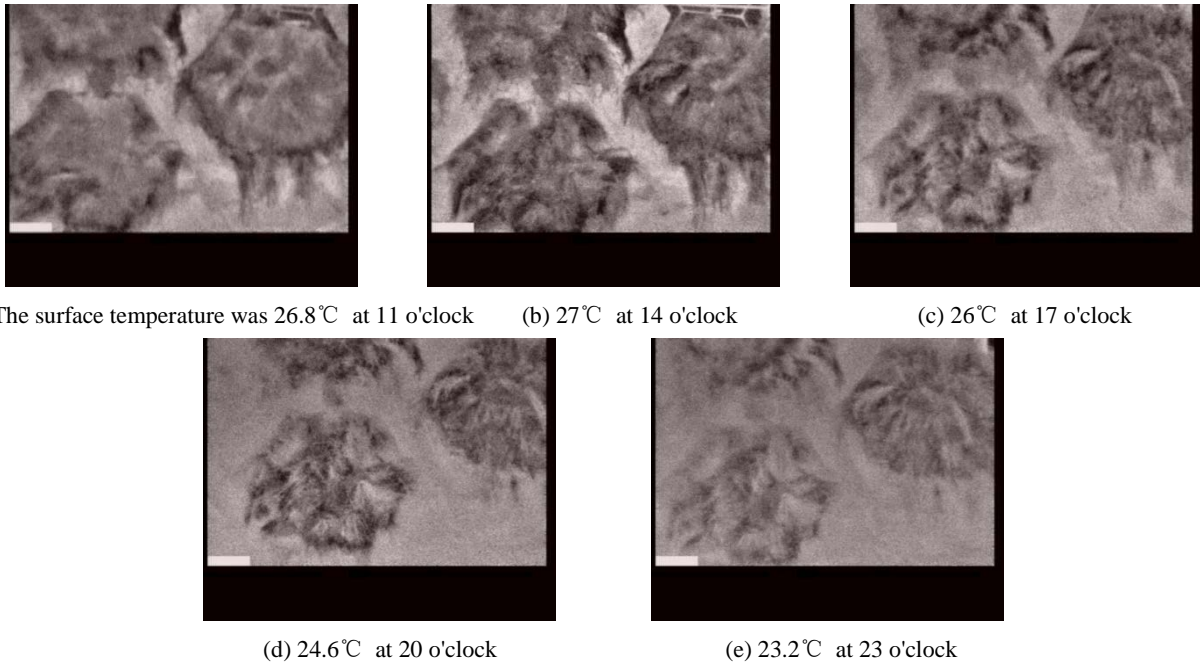


图 4 多块伪装材料不同时间点热红外成像照片及表面温度

Fig.4 Thermal infrared imaging photos and surface temperature of several camouflage materials at different time points

表 3 伪装前后汽车排气管辐射温度测试结果

Table 3 Test results of exhaust pipe radiation temperature before and after camouflage

Test number	Test site	Test temperature/°C
1	Automobile exhaust pipe surface	45.2
	The surface of vegetation	
2	camouflage material covering automobile exhaust pipe	26.8

3 结论

1) 采用移植植被层、铝箔纸、铁氧体粉、石墨精粉、环氧类粘合剂、伪装颜料等常见易得材料, 研制了一种新型复合植被伪装材料;

2) 对两种配方吸波材料层及其构成的植被伪装材料进行了雷达波屏蔽效能和反射率测试试验, 结果表明 3 号样品具有最佳的反雷达波侦测性能;

3) 利用成像法检测了植被伪装材料的可见光和热红外伪装性能, 结果表明植被伪装材料面层纹理、颜色、亮度、热图与背景较为接近, 隔热效果明显, 其可见光和红外伪装效果俱佳;

4) 研制的植被伪装材料可实现可见光、红外和雷达多波段兼容的伪装效果, 其植被层可根据实际需要培育不同外形和颜色的植被, 且植被层为绳索固定, 更换方便快捷, 能有效满足目标连续长时间在多种应用场景中的伪装需求, 此外还具有制作工艺简

单、价格相对低廉、防水和耐老化性能好等优点, 应用前景较为广阔。

参考文献:

[1] 王超, 时家明, 赵大鹏, 等. 多波段兼容伪装方法的分析研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(5): 92-95.
WANG Chao, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng, et al. Analysis and Study of Multiband Compatible Camouflage Methods[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(5): 92-95.

[2] 程红飞, 黄大庆. 多频谱兼容隐身材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(5): 93-99.
CHENG Hongfei, HUANG Daqing. Research Progress in Multi-spectrum Compatible Stealth Materials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(5): 93-99.

[3] 王义, 刘东青, 周峰, 等. 自适应伪装材料与技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(5): 404-410.
WANG Yi, LIU Dongqing, ZHOU Feng, et al. Research Progress of Adaptive Camouflage Materials and Technology[J]. *Materials China*, 2020, 39(5): 404-410.

[4] 陈明辉, 程海峰, 夏成龙, 等. 可见光与红外兼容伪装材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46(4): 36-38.
CHEN Minghui, CHENG Haifeng, XIA Chenglong, et al. Research Progress in Visible Light and Infrared Compatible Camouflage Material[J]. *New Chemical Materials*, 2018, 46(4): 36-38.

[5] 胡杰, 路远, 侯典心, 等. 红外伪装技术研究进展[J]. 激光与红外,

- 2018, **48**(7): 803-808.
- HU Jie, LU Yuan, HOU Dianxin. Research Progress of Infrared Camouflage Technology[J]. *Laser & Infrared*, 2018, **48**(7): 803-808.
- [6] 李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 495-503.
- LI Guangde, LIU Dongqing, WANG Yi, et al. Research Status and Progress of the Thermal Infrared Camouflage Technology[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 495-503.
- [7] 严阳, 华文深, 张炎, 等. 可见-近红外高光谱伪装目标特性分析[J]. *红外技术*, 2019, **41**(2): 171-175.
- YAN Yang, HUA Wenshen, ZHANG Yan, et al. Visible Near-infrared Hyperspectral Camouflage Target Characteristic Analysis[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(2): 171-175.
- [8] 顾红军, 吴义富, 阳波. 新型层合多波段伪装器材研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2006, **29**(3): 54-56.
- GU Hongjun, WU Yifu, YANG Bo. Research on A New Kind of Multilayer Multiplex-wave-bands Camouflage Equipment[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2006, **29**(3): 54-56.
- [9] 吴春, 刘祥萱, 吴友朋. 可见光/热红外伪装复合材料的制备与性能研究[J]. *红外技术*, 2009, **31**(10): 602-606.
- WU Chun, LIU Xiangxuan, WU Youpeng. Study on the Preparation and Properties of Visible Light and Heat Infrared Camouflage Composite Materials[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(10): 602-606.
- [10] 杨玉杰, 胡碧茹, 吴文健. 植物叶片仿生伪装材料的设计与制备[J]. *国防科技大学学报*, 2011, **33**(5): 50-53.
- YANG Yujie, HU Biru, WU Wenjian. Design and Preparation of Bionic Camouflage Materials by Simulating Plant Leaves[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, **33**(5): 50-53.
- [11] 王超, 时家明, 赵大鹏, 等. 入射角度对远红外与激光兼容伪装光子晶体薄膜特性的影响研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, **42**(4): 635-638.
- WANG Chao, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng. Effect of the Incident Angle to the Compatible Camouflage of Photonic Crystals Film of Far Infrared and Laser Band[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, **42**(4): 635-638.
- [12] 俞科静, 李佳妮, 曹海建, 等. 红外伪装材料的制备与性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(5): 94-97.
- YU Kejing, LI Jiani, CAO Haijian, et al. Preparation and Study of Infrared Camouflage Materials[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012(5): 94-97.
- [13] 易怡, 邓联文, 罗衡, 等. 基于光子晶体的红外光与激光兼容伪装材料结构设计[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2017, **48**(11): 2966-2971.
- YI Yi, DENG Lianwen, LUO Heng, et al. Design of Infrared and Laser Band Compatible Camouflage Structure Based on Photonic Crystals[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2017, **48**(11): 2966-2971.
- [14] 高旭芳. 伪装武器装备的几种方法及发展浅谈[J]. *国防技术基础*, 2008(9): 48-50.
- GAO Xufang. Several Methods and Development of Camouflage Weapons and Equipment[J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2008(9): 48-50.
- [15] 肖猛, 闻映红, 吴钊. 电波暗室性能指标的测试方法[J]. *安全与电磁兼容*, 2005(S1): 49-52, 63.
- XIAO Meng, WEN Yinghong, WU Fan. Test Method for Specification of Anechoic Chamber[J]. *Safety & EMC*, 2005(S1): 49-52, 63.
- [16] 阳波, 顾红军, 吴义富. 武器装备伪装毯研究[J]. *装备环境工程*, 2005, **2**(6): 94-97.
- YANG Bo, GU Hongjun, WU Yifu. Research on a new kind of multilayer multiplex-wave-bands camouflage equipment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2005, **2**(6): 94-97.