

水性红外迷彩涂料的制备及其表征

成声月^{1,2}, 刘朝辉¹, 叶圣天¹, 王飞¹, 贾艺凡¹, 班国东¹

- (1. 中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311;
2. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为探讨水性红外迷彩在篷布上的实际应用, 从颜填料和助剂两方面研制了发射率为 0.589、0.761 和 0.953, 颜色分别为土黄、翠绿和墨绿色的红外迷彩涂层材料; 采用紫外-可见光-近红外分光光度计、红外热像仪、SEM、TG-DTG 等手段对该红外迷彩涂料的可见光-近红外隐身性能、红外隐身性能、表面形貌、热稳定性、柔韧性等其他性能进行表征。结果表明: 研制的红外迷彩可见光-近红外反射光谱曲线与背景相似, 红外热图分割效果良好, 涂层表面形貌、稳定性、柔韧性等性能满足篷布使用要求。

关键词: 水性涂料; 红外迷彩; 可见光隐身; 红外隐身

中图分类号: V28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2298-07

Preparation and characterization of water-based infrared camouflage coatings

Cheng Shengyue^{1,2}, Liu Zhaohui¹, Ye Shengtian¹, Wang fei¹, Jia Yifan¹, Ban Guodong¹

- (1. Department of Chemistry & Materials Engineering, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China;
2. The 92493 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to investigate the use of water-based infrared camouflage coatings on tarpaulin, coatings with different infrared emissivities (0.589, 0.761 and 0.953) and different colors (khaki, emerald and dark green) were developed from fillers and auxiliaries; UV-Vis-NIR spectrophotometer, infrared thermal imager, SEM, and TG-DTG were used to characterize the performances of infrared camouflage coatings such as visible light-near infrared stealth, infrared stealth, surface topography, heat stability etc. The research results show that the visible light-near infrared reflectance spectra of infrared camouflage tarpaulin are similar with the background, the partition effectiveness of infrared map is good, and the usage requirements are met by the performances of the surface topography, heat stability and flexibility.

Key words: water-based coating; infrared camouflage; visible light stealth; infrared stealth

收稿日期: 2014-12-06; 修订日期: 2015-01-15

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2012gg-sfgc00002)

作者简介: 成声月(1989-), 男, 硕士生, 主要从事红外隐身材料方面的研究。Email: chengshengyuevip@163.com

导师简介: 刘朝辉(1969-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事红外隐身技术方面的研究。Email: z_h_liu@163.com

0 引言

随着红外技术的发展,战场上的装备和人员受到来自红外探测和红外制导打击的威胁愈加严重,为提升战场战斗力,装备必须采取红外隐身措施^[1]。

热像仪或红外制导武器对目标的识别主要依据的是目标与背景之间的辐射强度差,为此可以通过研制不同辐射率梯度的涂层,分割、扭曲目标红外热图使得目标红外热图变形而实现与背景相融合^[2]。现今,红外隐身涂料研究存在三个弊端:一是研制的涂料多为溶剂型,污染严重且机械性能难以满足织物需求^[3-4];二是斑块之间红外发射率梯度较小,少有 $\Delta\epsilon > 0.15$ 的报道^[5-6];三是研究多集中在原材料筛选和改性,很少探讨如何表征红外迷彩涂料综合性能^[7-8]。为此,文中首先研制了三种不同发射率且发射率梯度 $\Delta\epsilon > 0.15$ 、不同颜色的水性篷布用红外迷彩涂料,并将其应用于篷布上,然后对其综合性能进行表征研究,为水性红外迷彩涂料在装备篷布上的实际应用提供参考。

1 实验

1.1 实验原料

水性丙烯酸树脂(珠海吉力化工企业有限公司);2000目铝银浆(深圳耀德圣科有限公司);色浆(广州市宏特化工科技有限公司);分散剂(南京道宁化工有限公司);消泡剂(广州市易通高分子材料有限公司);羧甲基纤维素醋酸丁酸酯(CMCAB)增稠剂(美国伊斯曼化学公司);篷布(深圳兴达帆布有限公司)。

1.2 涂层制备

将称量好的树脂、金属填料和色浆放入分散罐中,并加入适量的分散剂和消泡剂,使用高速分散研磨机以 500 r/min 的转速分散 15 min,在分散好的涂料中加入适量的增稠剂调节黏度。按照 GB T1727-92《漆膜一般制备法》,在 65 cm×150 cm 篷布上采用刷涂法制备涂层,制好的样板室温固化 3 h,并保持涂层厚度介于 30~40 μm 之间。

1.3 涂层表征

(1) 红外发射率表征

采用昆明物理研究所研制的 HWF-II 型红外辐射率测量仪进行样品的红外发射率测试,测量波段:8~14 μm ,每个样品测量 10 次,取平均值。

(2) 可见光-近红外隐身性能分析表征

采用日本日立公司生产的 UV-4100 型紫外-可见光-近红外分光光度计测试涂层材料反射率,测试波段 480~2 500 nm。

(3) 红外隐身性能表征

评价红外迷彩篷布红外隐身效果的方法有量热法、辐射能量法、反射率法和多波段测量法等多种方法,量热法是其中一种使用较广的方法^[9]。其基本原理是将待测的篷布样品置于热台上,待加热台将样品温度稳定达到热平衡后,通过热像仪拍摄样品红外热图^[10-11]。

如图 1 所示,将磁力搅拌器设为加热平台,将热像仪固定在三脚架上,并使探头位于加热台上方,确保样品的红外热图能位于热像仪的视野中。测试时,首先设定磁力搅拌器加热温度为 50 $^{\circ}\text{C}$,待温度稳定后再将样品置于加热台上,经过 1 min 后拍摄样品红外热图。通过配套的软件分析样品的红外热图。

采用德国英福泰克 Vario THERMTM 型红外热成像测量样品热图,光谱范围为 3.4~5 μm ,测温范围为 -25~1 200 $^{\circ}\text{C}$,温度分辨率为小于 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

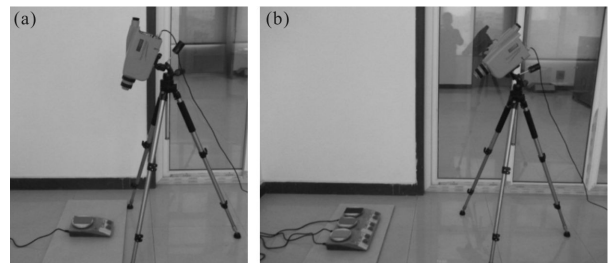


图 1 量热法测试图

Fig.1 Picture of calorimetric method

(4) 表面形貌表征

采用日本日立公司生产的 S-3700N 场发射扫描电子显微镜观察涂层形貌。将样品置于导电胶上,抽真空,观察表面形貌。

(5) 热稳定性表征

采用美国 TA 公司生产的 Q500 热重分析仪检测处理前后篷布的热稳定性。测温范围为室温~700 $^{\circ}\text{C}$,氮气氛围,升温速率为 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

(6) 涂层材料其他性能表征

参照对应的国标测量涂层的其他性能。耐冲击性测试参考《GB/T 1732-93 漆膜耐冲击测定法》;附着力测试参考《GB 1720-79 漆膜附着力测定法》;柔

韧性测试参考《GB/T 1731-93 漆膜柔韧性测定法》；表干时间、实干时间测试参考《GB/T 1728-79(89) 漆膜、腻子膜干燥时间测定法》。

2 实验结果与讨论

2.1 配方

2.1.1 颜填料含量

(1) 低红外发射率涂层

根据参考文献[12],当填料保持在 30%时,能得到最佳涂层。文中在设计涂层配方时,保持树脂的含量为 70%。土黄色设为低发射率涂层,主要模拟裸露的土壤,通过调节金属填料含量来确定配方,如表1所示。

表 1 低红外发射率涂层配方

Tab.1 Formula of low infrared emissivity coating

Resin	Aluminum paste	Yellow iron oxide paste	Toner	Infrared emissivity
70%	8%	22%	Appropriate amount	0.649
70%	9%	21%	Appropriate amount	0.637
70%	10%	20%	Appropriate amount	0.616
70%	11%	19%	Appropriate amount	0.589
70%	12%	18%	Appropriate amount	0.504

注:调色剂为铁红、铁蓝和钛白等色浆。

从表中可以看出,随着金属填料的增加,涂层红外发射率逐渐减小,文中将低发射率涂层设为0.589。

(2) 中红外发射率涂层

翠绿色设为中发射率,主要模拟绿色植物。在设计涂层红外发射率时,同样将树脂的含量保持在 70%,通过调节涂层中金属填料的含量来确定涂层的最佳配方,如表 2 所示。

表 2 中红外发射率涂层配方

Tab.2 Formula of middle infrared emissivity coating

Resin	Aluminum paste	Chorme green paste	Toner	Infrared emissivity
70%	2%	28%	Appropriate amount	0.797
70%	3%	27%	Appropriate amount	0.761
70%	4%	26%	Appropriate amount	0.748
70%	5%	25%	Appropriate amount	0.717
70%	6%	24%	Appropriate amount	0.686

注:调色剂为铁红、铁蓝和钛白等色浆。

在文中,中红外发射率涂层的发射率设为 0.761。

(3) 高红外发射率涂层

墨绿色填料为高发射率填料,能在很大程度上提高涂层的发射率,将墨绿色设为高发射率涂层,同样保持涂层中基体树脂的含量为 70%,调节涂层着色颜料的含量来确定最佳配方,如表 3 所示。

表 3 高红外发射率涂层配方

Tab.3 Formula of high infrared emissivity coating

Resin	Aluminum paste	Carbon black paste	Toner	Infrared emissivity
70%	0%	30%	Appropriate amount	0.953
70%	0%	29%	Appropriate amount	0.953
70%	0%	28%	Appropriate amount	0.951
70%	0%	27%	Appropriate amount	0.948
70%	0%	26%	Appropriate amount	0.946

注:调色剂为铬绿等色浆。

在文中,高红外发射率涂层的发射率设为 0.953,碳黑色浆含量为 29%。

2.1.2 助剂用量的确定

水性涂料基体树脂、填料在乳化过程中均添加了一定的乳化剂,乳化剂能起到降低溶液体系表面张力的作用,这也导致水性涂料在制备过程中会产生大量泡沫,所以在水性涂料制备过程中必须添加一定数量的消泡剂。

消泡剂作为涂料的一种助剂,添加量虽然不多,但在涂料中有极其重要的作用。其作用机理是破坏泡沫体系表面张力和弹性物质,使其表面张力不平衡。良好的消泡剂不仅能消泡还能抑制泡沫的产生。常用的水性涂料消泡剂大多为水性硅油系列,文中选取消泡效果较好的水性二甲基硅油消泡剂作为消泡剂。通过在体系中添加不同用量的消泡剂确定其最佳用量。

从表 4 可以看出消泡剂的最佳用量为 0.02%~0.03%,此时消泡作用明显,涂膜性能良好,当用量小于此范围时会出现大量的气泡,严重影响操作工艺,当大于此范围时会出现破泡现象,涂膜也会出现缩孔现象。

表 4 消泡剂用量实验

Tab.4 Test for the content of defoamer

Mass fraction	Defoaming effect and coating state		
	Low emissivity (0.589)	Middle emissivity (0.761)	High emissivity (0.953)
0.0%	Mass of bubbles, mass of cellulars	Mass of bubbles, mass of cellulars	Mass of bubbles, mass of cellulars
0.01%	More bubbles, less cellulars	More bubbles, less cellulars	More bubbles, less cellulars
0.02%	Less bubbles, none cellulars	Less bubbles, none cellulars	Less bubbles, none cellulars
0.03%	Less bubbles, none cellulars	Less bubbles, none cellulars	Less bubbles, none cellulars
0.04%	Defoaming phenomenon, slight shrinkage	Defoaming phenomenon, slight shrinkage	Defoaming phenomenon, slight shrinkage
0.05%	Defoaming phenomenon, serious shrinkage	Defoaming phenomenon, serious shrinkage	Defoaming phenomenon, serious shrinkage

根据上文对配方的调节,确定低、中和高红外发射率涂层配方如表5所示。

表 5 红外隐身涂料配方

Tab.5 Gormula of infrared stealth coating

Materials	Low emissivity (0.589)	Middle emissivity (0.761)	High emissivity (0.953)
Acylic resin	70%	70%	70%
Aluminwm paste	11%	3%	0%
Color paste	19%	27%	29%
Toner	Appropriate amout	Appropriate amout	Appropriate amout
Defoamer	0.03%	0.03%	0.03%

2.2 红外迷彩涂料表征

2.2.1 可见光-近红外隐身性能分析

为精确检测涂层的可见光-近红外隐身性能,文中采用紫外-可见光-近红外分光光度计测试三种涂层材料反射率,结果如图 2 所示。

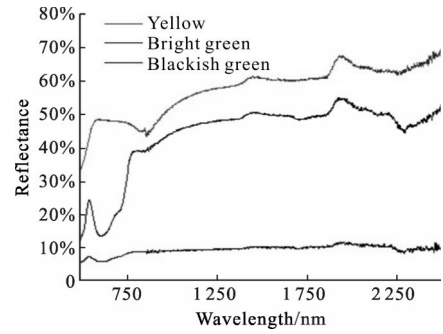


图 2 涂层反射光谱曲线

Fig.2 Reflectance curve of coatings

从土黄色涂层反射曲线可知,在 480~600 nm 之间都处于上升期,600~880 nm 为平台状,之后反射率上升并保持在 60%左右,不超过 70%,这符合参考文献[13]中军用迷彩土黄色光谱图的要求。

从翠绿色涂层反射曲线可以看出,在480~680 nm 之间出现一个明显反射峰,在 680~770 nm 波段涂层的发射率快速上升,在 770~1850 nm 之间反射率变化不大,呈平台状,这与参考文献[14]中测试的多种树叶的反射光谱曲线一致,说明能较好的模拟绿色植物。

从墨绿色涂层反射曲线可以看出,在480~630 nm 之间涂层反射率为 7%以下,630~800 nm 为上升区,之后反射曲线变化不大为平台状,这符合参考文献[13]中军用迷彩墨绿色光谱图的要求。

2.2.2 红外隐身性能分析

(1) 低发射率样品量热法测试

分别将高反射率金属填料含量为 8%、10%和 12% 的样品置于加热台上,加热 1 min 后拍摄样品红外热图如图 3 所示,样品平均辐射温度如表 6 所示。

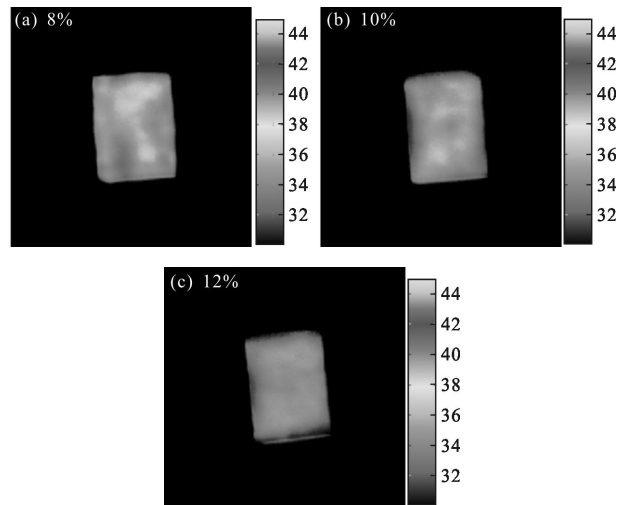


图 3 低红外发射率样品红外热图

Fig.3 Thermal images of low infrared emissivity sample

表 6 低红外发射率样品辐射温度

Tab.6 Radiation temperature of low infrared emissivity sample

Sample	8%	10%	12%
Average radiation temperature/°C	35.26	34.38	33.43

(2) 中发射率样品量热法测试

分别将高反射率金属填料含量为 2%、4%和 6% 的样品置于加热台上,加热 1 min 后拍摄样品红外热图如图 4 所示,样品平均辐射温度如表 7 所示。

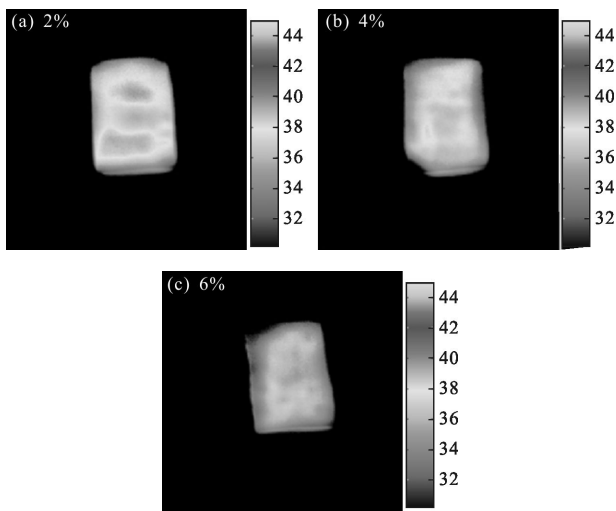


图 4 中红外发射率样品红外热图

Fig.4 Thermal images of middle infrared emissivity sample

表 7 中红外发射率样品辐射温度

Tab.7 Radiation temperature of middle infrared emissivity sample

Sample	2%	4%	6%
Average radiation temperature/°C	38.72	37.11	36.19

(3) 高发射率样品量热法测试

分别将着色颜料含量为 26%、28%和 30% 的样品置于加热台上,加热 1 min 后拍摄样品红外热图如图 5 所示,样品平均辐射温度如表 8 所示。

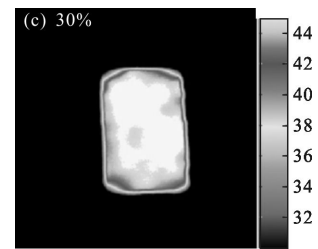
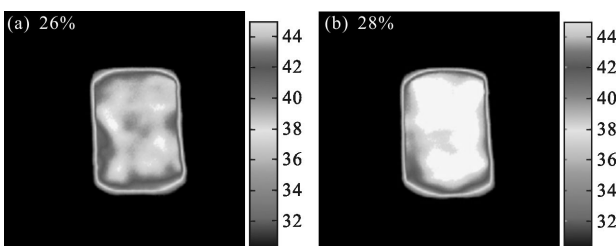


图 5 高红外发射率样品红外热图

Fig.5 Thermal images of high infrared emissivity sample

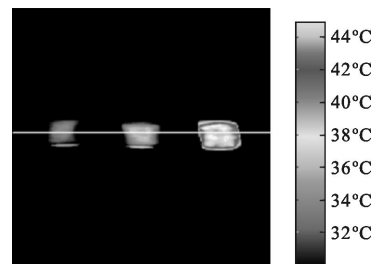
表 8 高红外发射率样品辐射温度

Tab.8 Radiation temperature of high infrared emissivity sample

Sample	26%	28%	30%
Average radiation temperature/°C	45.36	45.57	45.89

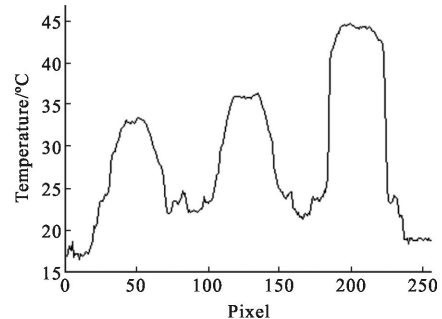
(4) 不同发射率样品量热法测试

将表 5 中低、中和高红外发射率样品置于加热台上,加热 1 min 后拍摄样品红外热图如图 6 所示,样品平均辐射温度如表 9 所示。



(a) 红外热图

(a) Thermal image



(b) 辐射温度曲线图

(b) Radiation temperature graph

图 6 样品红外热图及辐射温度曲线图

Fig.6 Thermal image and radiation temperature graph of sample

表 9 不同发射率样品辐射温度

Tab.9 Radiation temperature of different infrared emissivity

Sample	Low emissivity	Middle emissivity	High emissivity
Average radiation temperature/°C	33.29	35.90	44.63

通过量热法测试可以发现,不同发射率红外迷彩篷布样品红外热图有明显的区别,用配套的软件求出样品的辐射温度也有较大的差别。由图 6 和表 9 可以得出三种配方制备的涂层能实现目标红外热图的有效分割。

2.2.3 表面形貌分析

涂层表面形貌对涂层红外发射率、力学性能等都有重要影响。为观察涂层的形貌,文中采用扫描电镜观察了不同倍数红外迷彩篷布平面和截面 SEM 图,如图 7 所示。

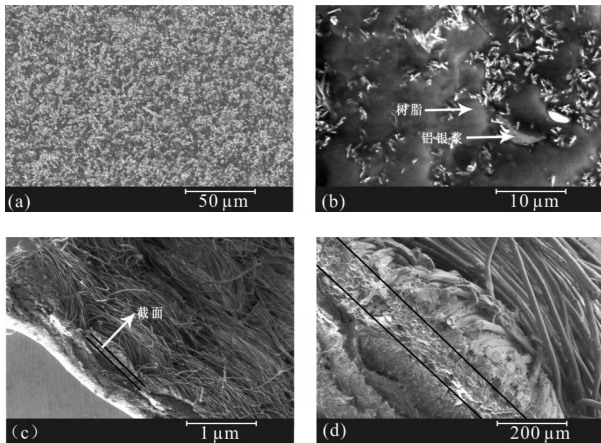


图 7 红外迷彩篷布 SEM 图

Fig.7 SEM images of infrared camouflage

从图 7(a)和 7(b)可以看出,篷布表面涂层材料中,填料分布均匀,能形成致密的反射层,包覆效果良好,色浆与基体树脂融合较好,有利于涂层的稳定性,且表面呈现出凹凸度,有利于表面形成漫反射。

从图 7(c)和 7(d)涂层材料的截面图可以看出,涂层材料在篷布表面形成涂层并深入篷布内层,这增加了涂层的柔韧性和附着力。

2.2.4 热稳定性分析

为检测处理前后篷布的热稳定性,测试未处理篷布和低发射率篷布涂层的 TG 和 DTG 曲线图,如图 8 所示。

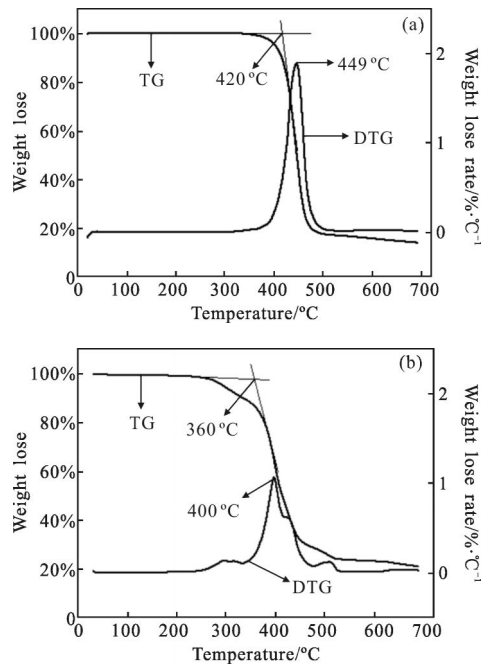


图 8 红外迷彩篷布 DTG 和 TG 曲线

Fig.8 DTG and TG curves of infrared camouflage tarpaulin

从图 8(a)可以看出,未处理篷布在 30~100 °C 之间有较小的失重,这是由于篷布中含有一定的物理吸附水,在加热过程中失重导致,篷布主要失重发生在 350~500 °C 之间,在此温度之间篷布开始分解,其中在 449 °C 时失重速率最大,在 500 °C 以后篷布基本分解完全,只剩下很少残余量。分析 TG 图可知其耐温性能为 420 °C 左右。

从图 8(b)可以看出,低发射率篷布涂层在 30~100 °C 之间也较小的失重,这也是由于篷布和涂层中含有一定的物理吸附水的原因,低发射率篷布涂层主要失重发生在 250~550 °C 之间,在此温度期间,篷布和涂层都开始分解,其中在 400 °C 时失重速率最大,在 600 °C 以后红外迷彩篷布涂层基本分解完,剩下很少残余量,大概为 20% 左右,残余量的主要成分为涂层中添加的颜填料。通过上述分析可知,红外篷布涂层的耐温性能大概为 360 °C,在 330~500 °C 之间有较大的失重率,600 °C 以后分解完全,剩余 20% 的残余量,其成分主要为涂层中添加的颜填料。

2.2.5 涂层材料其他性能分析

涂层材料除了上述特定的性能外,还有耐冲击性、附着力、柔韧性、表干时间和实干时间等性能测试。在文中这些性能测试参考国军标《GJB 1888-1994 防可见光近红外水性伪装涂料规范》。分别以上文中确定的

三种红外迷彩涂料为测试对象测定其性能。

从表 10 可以看出,研制的涂料所测试的性能均符合国军标《GJB 1888-1994 防可见光近红外水性伪装涂料规范》中所要求。

表 10 涂层其他性能测试结果

Tab.10 Results of other performance test of the coating

Mechanical properties	Results			Method
	Yellow	Bright green	Blackish green	
Impact resistance /kg·cm	>50	>50	>50	GB/T 1732-93
Adhesion	1	1	1	GB 1720-79
Flexibility/mm	1	1	1	GB/T 1731-93
Surface dry croom temperature/h	<1	<1	<1	GB/T 1728-79(89)
Hard dry croom temperature/h	<3	<3	<3	GB/T 1728-79(89)

3 结束语

(1) 研制了发射率为 0.589、0.761 和 0.953,颜色分别为土黄、翠绿和墨绿色的红外迷彩涂层材料,同时确定消泡剂使用量为 0.02%~0.03%,得到红外迷彩涂层材料配方。

(2) 将研制的红外迷彩配方应用于篷布上,并进行综合性能测试,结果表明:研制的红外迷彩涂料可见光-近红外反射光谱曲线与背景相似,红外热图分割效果良好,涂层表面形貌、稳定性、柔韧性等性能满足篷布使用要求。

参考文献:

- [1] Sun Min, Yu Mingxun. Stealth Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
孙敏, 于名讯. 隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] Fan Jinxiang, Li Liang, Li Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 789-794. (in Chinese)
- [3] Yu Huijuan, Xu Guoyue, Shao Chunming, et al. Study on Low Infrared Emissivity Coatings with EPDM Adhesive at spectral range of 8-14 μm [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(3): 154-157. (in Chinese)
- [4] Zhang Weigang, Xu Guoyue, Qiao Jialian, et al. Low emissivity at 8 to 14 μm and low near-infrared reflective properties of Al-Sm₂O₃/polyurethane composite coatings [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 2(31): 436-440. (in Chinese)
- [5] Xu Gongrong, Yu Xiao, Zhou Lan, et al. Preparation of low-emissivity coating and its application in thermal infrared camouflage of polyester/cotton blended fabrics [J]. *Journal of Silk*, 2014, 51(2): 1-5. (in Chinese)
- [6] Cao Yi, Cai Hongnian, Cheng Haifeng, et al. Decision of the thermal IR emissivity of woodland camouflage net [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 671-675. (in Chinese)
- [7] Hu C, Xu G, Shen X. Preparation and characteristics of thermal resistance polysiloxane/Al composite coatings with low infrared emissivity [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1): 371-375.
- [8] Yu H, Xu G, Shen X, et al. Corrosion resistance and infrared emissivity properties of EPDM (EPDM-g-MAH) film on low infrared emissivity PU/Cu coating [J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(5): 1843-1847.
- [9] Hao Licai, Xiao Hong, Liu Wei. Review on evaluating methods of thermal infrared camouflage performance of textiles [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 512-517. (in Chinese)
- [10] Liu Yonghua, Zu Chengkui, Zhao Hua, et al. Melting technology of chalcogenide glass for infrared thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1472-1476. (in Chinese)
- [11] Zhang Bao, Cui Enkun, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)
- [12] Ren Yue, Hua Pink, Gong Rongzhou. Materials with low infrared emissivity based on epoxy resin [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(2): 45-48. (in Chinese)
- [13] Yu Yan'e, Cao Peipei, Hu Ping. Printing process of desert-style camouflage fabric with infrared protection [J]. *Printing and Dyeing*, 2011, 37(17): 22-25. (in Chinese)
- [14] Zhang Hui. The research and practice of infrared camouflage fabric [D]. Shanghai: Donghua University, 2006. (in Chinese)
张辉. 红外迷彩伪装织物研究与实践 [D]. 上海: 东华大学, 2006.