

可见光迷彩与红外斑块分离的多梯度红外隐身涂料研究

周学梅,周光华,张平,唐继海

(中国兵器工业第59研究所,重庆400039)

[摘要] 具有高、中、低不同辐射率的三色彩涂料能有效降低目标表面红外辐射强度,缩短热成像系统探测距离。通过对X-烧结颜料、锌钡白、铁蓝、氧化铬绿等颜(填)料的红外透明性分析,研究涂层红外辐射率和可见光的关系,通过添加红外高反射填料,设计涂料的组成配比和颜基比,制备相同迷彩颜色、不同辐射率的多梯度红外隐身涂料,使涂层在具备热图像分割的基础上,实现可见光迷彩与红外斑块的分离,进一步降低武器装备的被识别概率。

[关键词] 红外透明颜料;颜基比;辐射率梯度;图像分离

[中图分类号] TQ637

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)03-0014-03

Study on Infrared Stealth Coating with Different Radiance Grads and with Separation of the Infrared Patterns from the Visible Light Image

ZHOU Xue-mei, ZHOU Guang-hua, ZHANG Ping, TANG Ji-hai

(NO. 59 Institute of the China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

[Abstract] Through using different radiance infrared stealth coating, the infrared radiance intensity of the target was reduced obviously, and the detection range of the thermal imaging system was shortened. Infrared transparency of the pigment or padding for x-sintering pigment, lithopone, iron, chrome oxide was analyzed. The relation of infrared radiance and visible light was studied. Polygradient infrared stealth coating with identical color was prepared through adding high-reflective infrared pigment or padding and designing the coating material constitution and pigment/binder ratio. On the basis of image segmentation, the separation between the visible light image and the infrared pattern was achieved, and identification probability was reduced more.

[Key words] Infrared transparent pigment; Pigment/binder ratio; Radiance gradient; Image segmentation

0 引言

地面武器装备面临的战场侦察手段主要有航天侦察、航空侦察、水面侦察和地面侦察,大多数侦察设备的工作频段主要集中在可见光(0.4~0.7 μm)、中远红外(3~5 μm 、8~14 μm)、厘米波(8~18GHz)和毫米波(27~40GHz、75~100GHz)波段。开展防中远红外隐身材料研究,对提高地面武器装备的生存和作战能力具有重要的意义。

热像仪主要靠捕获目标在中远红外波段的热辐射能量,并将其转换成电信号或可视的图像,因此抑制目标与背景的热辐射能量差就成为红外隐身的主要技术途径。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,对温度 T 的目标(地面装备),单位面积的红外辐射功率 W 由下式表示:

$$W = \alpha \varepsilon T^4 \quad (1)$$

式中, α 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; ε 为红外发射率; T 为绝对温度,K。

对温度,K。

军事目标在某一背景中的可探测性可以由目标与背景的热辐射反差 C 来衡量:

$$C = (W_0 - W_B) / W_B \quad (2)$$

式中, W_0 为目标红外辐射功率; W_B 为背景的红外辐射功率。

一般军事机动目标在多数背景和时段中与背景的反差辐射为正反差,即 $W_0 > W_B$,机动状态下更是如此。减小反差辐射,能缩短目标的探测距离,降低目标被发现和识别的概率;当反差辐射小于红外探测器的最小分辨率时,就能够实现完全的红外隐身。

涂覆低发射率红外隐身涂料,能降低式(1)中的 ε 值,抑制被涂目标的热辐射,从而减小目标与背景的反差辐射 C 值,达到降低热成像系统探测能力的目的。

此外,武器系统所依附的背景环境条件十分复杂,不同物质的热辐射特征各不相同,因此单一发射率的涂层难以提供有效的红外隐身。制备同迷彩色不同辐射率涂料,并进行图案设计,使目标不同部位呈现不同的表观温度,在热像仪上形成图像分割效应,并实现与可见光迷彩图案的分离,对降低目标被识别能力、提高装备作战性能具有重要意义。

[收稿日期] 2007-03-01

[作者简介] 周学梅(1972-),女,重庆人,高级工程师,学士,从事红外涂料和吸波涂料的研究。

1 试验内容

1.1 设计原理

树脂粘结剂、红外颜填料在红外波段的透过和反射特性以及在涂料中的配比是影响涂层辐射率高低的主要因素。本试验研究 X-金属氧化物烧结颜料^[1]、铁蓝、氧化铬绿等颜填料的透射比与红外辐射率参数,通过自制树脂粘结剂,采用 8~26 μm 片状低辐射率混合填料对涂层辐射率进行调整,在同一迷彩颜色中设计出 2 个梯度红外辐射率,实现可见光图案与红外斑块的分离,进一步提高红外隐身涂料在武器装备上的隐身效果。

1.2 着色颜料特性参数分析^[2]

颜料是影响涂层红外隐身性能的基本因素之一,部分金属氧化物颜料的化学结构稳定,在 8~14 μm 红外波段的振荡吸收少,具有较高的红外透射比,不会大幅度增加涂层红外辐射率,红外光谱图见图 1、图 2。

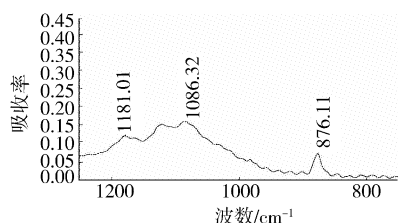


图 1 铁蓝的红外光谱图

Figure 1 The infrared action spectrum picture of the ferricyanide

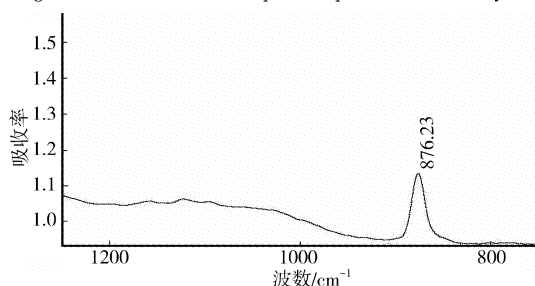


图 2 X-烧结颜料的红外光谱图

Figure 2 The infrared action spectrum picture of the x-agglomeration paint

有机填料由于其复杂的 C—N—O 结构,在中远红外波段有明显尖锐的吸收频谱。因此,本试验以金属氧化物着色颜料为主,测试颜料红外辐射率、着色力和遮盖力^[3],颜料辐射率用 HWF 红外辐射率测试仪测试。测试结果见表 1。

表 1 金属氧化物主要特性参数分析

Table 1 Main signature parameter analysis of metal oxide

材料名称	着色力	遮盖力	红外辐射率 ε
氧化铬绿	好	好	0.87
氧化铁黄	好	好	0.94
氧化铁红	好	好	0.95
X-烧结颜料	好	好	0.86
钛白粉	好	好	0.95
锌钡白	较好	较强	0.87
钒酸铋	较好	好	0.84
铁蓝	较好	较好	0.88

根据对金属氧化物颜料的特性参数测试分析,选择 X-金属

氧化物烧结颜料、氧化铬绿、铁蓝等为低辐射率军绿和黄土着色颜料;酞酐绿、氧化铁红、钛白粉、氧化铁黄、炭黑等为中、高辐射率黄土和军绿色着色颜料。

1.2 高、低不同辐射率翠绿和黄土色浆制备^[4]

1.2.1 红外透明粘结剂的优化选择

化合物内部由于分子偶极变化而会发生伸展振动和弯曲振动,在红外区域表现为具有特征吸收峰,不同分子结构的红外吸收频段和吸收峰强弱具有较大差异。直链的饱和烃化合物由于 C—H 键的伸展振动和弯曲振动都较弱,因而在红外区域的吸收峰不强,表现为红外透明性;大多数高分子有机物的结构式中含有羟基、羧基、双键、三键等多种活性官能团,在红外波段具有多个较强吸收峰,红外透明性较差。

在涂料配方体系中,粘接剂是涂料的主要成膜物,也是影响涂层辐射率的主要因素之一。低发射率红外涂料用粘接剂必须同时具备 2 个条件:既要有较好红外透明性,也要有良好的理化性能和施工性能。本项目以单组分和双组分自干型涂料粘接剂为研究对象,采用优化试验,对环化橡胶、改性醇酸树脂和自制的 1[#]和 2[#]树脂的特性参数进行分析测试,通过对粘接剂自干性、红外辐射率、理化和施工性能的综合分析,确定以双组分丙烯酸聚氨酯为涂料粘接剂,测试结果见表 2。

表 2 几种涂料粘接剂的特性参数

Table 2 Signature parameter of some kinds of coating adhesive

材料名称	附着力/级	柔韧性/mm	硬度/H	耐冲击/cm	辐射率/ ε
环化橡胶	3	2	2	30	0.68
改性醇酸	1	2	2	40	0.74
丙烯酸聚氨酯	0	1	2	50	0.84
1 [#] 树脂	0	1	2	50	0.83
2 [#] 树脂	0	1	2	50	0.83

1.2.2 涂层厚度设计

通过对涂料粘接剂的红外性能分析表明,在树脂涂层厚度为 0~60 μm 的范围内,涂层红外透明性较好,红外辐射率随涂层厚度增加而增大,在超过 60 μm 厚时,涂层辐射率变化趋于平稳。树脂涂层(底材为金属基材)厚度与红外辐射率关系见图 3。

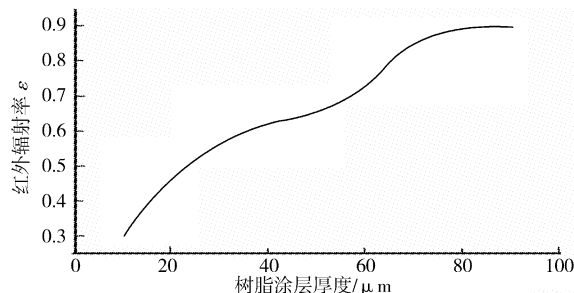


图 3 树脂涂层厚度与红外辐射率关系曲线图

Figure 3 The connection curve of the thickness of colophony coating and infrared radiance

因此,本试验将涂层厚度设计在 35~40 μm ,细度 $\leq 20\mu\text{m}$ 。

1.2.3 涂料制备

根据 Kubelka Munk 理论,涂料中颜(填)料粒子的散射和吸收系数对涂层的法向光谱发射率有较大影响^[5]。因此,选用红外透明性较好的颜填料来制备低辐射率军绿和黄土涂料色浆,降低红外高反射填料的用量;应用钛白色浆等色浆缩小同色不

同辐射率迷彩涂料的色差,可以实现红外隐身涂层可见光图像与红外斑块的分离。设计的高、低不同辐射率军绿和黄土色浆配方见表3。

表3 高、低不同辐射率军绿和黄土色浆配方

Table 3 Formula of bluish and loess mill base with high and low emissivity

材料	用量(质量分数/%)			
	翠绿色浆		黄土色浆	
	低辐射率	高辐射率	中辐射率	低辐射率
1#树脂	15	12	14	15
2#树脂	10	12	8	6
氧化铬绿	27	—	—	—
酞氧绿	—	14	—	—
氧化铁黄	—	—	27	6
氧化铁红	4	4	5	5
铁蓝	15	—	—	3
钛白粉	—	2	3	2
X-烧结颜料	—	—	20	—
高反射填料	7	—	3	12
消光剂	—	2	2	—

采用高速分散机和砂磨机,分别对混有颜填料和粘结剂的翠绿色和黄土色漆浆进行分散研磨,并制作涂层试板测试性能,测试结果见表4。

表4 涂层的综合性能测试

Table 4 Composite performance test of coating

涂料种类		机械性能			隐身性能 ϵ (8~14 μm)
		附着力/级	柔韧性/mm	冲击性/mm	
黄土色涂料	低辐射率	1	1	50	0.59
	中辐射率	1	1	50	0.78
深绿色涂料	低辐射率	1	1	50	0.74
	高辐射率	0	1	50	0.95

1.3 不同辐射率梯度隐身涂层的红外斑块优化设计

本试验研制的红外隐身涂料辐射率梯度由高到低依次为:0.62、0.75、0.80和0.95。受红外热像仪测试精度限制,辐射率为0.74和0.78的涂层,在热像图上的红外斑块灰度值差别不大,因此,要实现明显的热图像分割,相邻两斑块之间的辐射率梯度差应大于0.15。设计不同辐射率梯度隐身涂层的斑块分布如图4所示。

根据国军标2004-2000技术指标要求,三色迷彩图案面积比为: $S_{\text{翠绿}}:S_{\text{黄土}}:S_{\text{深绿}}=4:3:3$,斑块长度为:0.8~1.0m。为保证低辐射率红外斑块所占的涂层面积,低辐射率和高辐射率军绿斑块、低辐射率和中辐射率黄土斑块的面积比应控制在(3:2)~(4:3)之间。

1.4 试板红外成像测试

1.4.1 测试试板的准备

在2块尺寸为200mm×100mm×50mm的钢板上,按涂装工艺流程分别制作迷彩图案与红外斑块相对应和迷彩图案与红外斑块分离的红外隐身涂层,涂层厚度为35~40 μm ,通过红外成像测试进行对比。

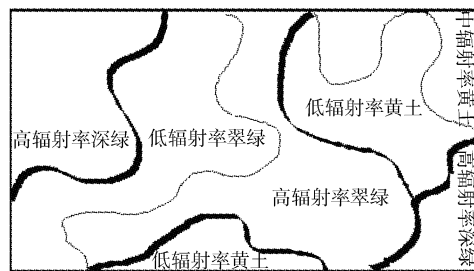


图4 可见光和红外图像分离的不同

辐射率梯度隐身涂层分布示意图

Figure 4 The distributing of the infrared stealth coating with different radiance grads and with separation of the infrared patterns from the visible light image

1.4.2 主要测试仪器和技术参数

IR913A 红外热像仪	1台
工作波段	(8~14) μm
空间分辨率	$\leq 1.1 \text{ mrad}$
温度范围	(0~100) $^{\circ}\text{C}$
温度灵敏度	$\leq 0.1^{\circ}\text{C}$
便携式红外测温仪	1台
可见光照相机	1台
测试距离	25m
测试角度	与被测物垂直

1.4.3 红外热像测试结果

红外热像测试结果见图5、图6。

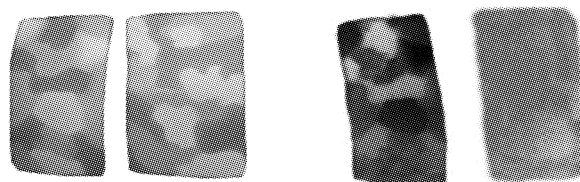


图5 迷彩图案与红外斑块相对应的隐身涂

层可见光与红外热图(右为普通迷彩涂层)

Figure 5 The visible light and infrared image of the infrared stealth coating with corresponding of the polychrome and infrared pattern (the right is the common polychrome coating)

图5中左图为可见光迷彩图,右图为红外热图,其中左边试板上为红外隐身涂层,右边试板上为普通迷彩涂层,由此可见普通迷彩涂层无热红外效果。

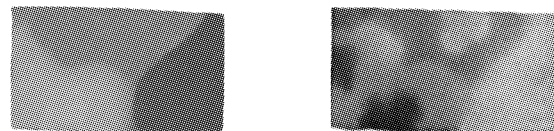
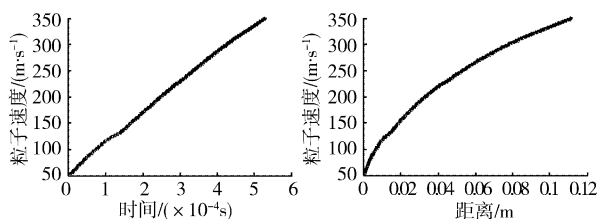


图6 迷彩图案与红外斑块分离的隐身涂层可见光与红外热图

Figure 6 The visible light and infrared image of the infrared stealth coating with separation of the infrared patterns from the visible light image

图6中左图为可见光迷彩图,右图为红外热图,相同漆膜颜色 and 不同辐射率梯度的红外隐身涂层既能够实现红外斑块与可见光图案的分离,并具有更加明显的热图像分割效果,达到降低武器装备的被识别概率。

(下转第27页)



a 粒子速度随时间变化曲线 b 粒子速度随距离变化曲线

图3 粒子直径为40 μm

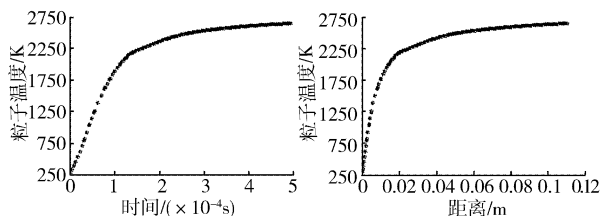
Figure 3 The diameter of particle is 40 micron

2.3 不同粒度粒子温度的动态分析

图4a、图5a、图6a给出了燃气中粒子加热曲线。该图反应了低温粒子在高温燃气状态中的加温过程。粒子温度随时间变化的曲线表明,喷涂粒子在0.1ms以前的温度增速很快,使得低温粒子瞬间达到一定温度。直至出枪,粒子的瞬间温升足以使低熔点粒子软化或者熔化。由前面的假设可知,粒子不会发生相变,因此,整个过程粒子只从高温焰流中获取热量,但不发生形态的变化。

图4b、图5b、图6b给出了粒子的温度随距离变化的曲线。该曲线表明,粒子的温度加速度也是逐渐减小的过程。这是因为,在整个过程中,喷枪枪壁受到的冷却和喷枪焰流传播过程中的温度衰减决定了焰流通过喷嘴以后与粒子之间的温度传导逐渐减弱。

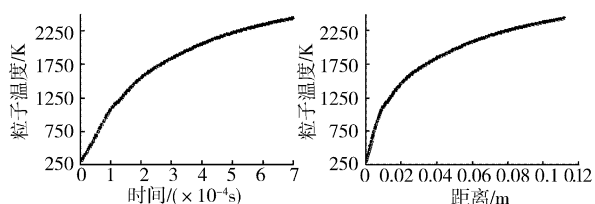
同时,通过对不同粒径粒子温度的变化过程的研究,可以发现小径粒子的温升加速度高于大径粒子。这是由于大径粒子存在内部热量传递的过程。粒子表面吸收热量以后,逐渐向内核传导,使得自身达到新的平衡,这个吸热过程降低了大径粒子的温升加速度。因此,这也是超音速火焰喷涂过程中对粒子要求的一个重要因素。



a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图4 粒子直径为5 μm

Figure 4 The diameter of particle is 5 micron



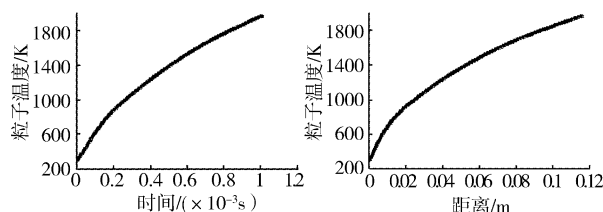
a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图5 粒子直径为10 μm

Figure 5 The diameter of particle is 10 micron

3 结论

在超音速火焰喷涂过程中,喷枪中喷涂粒子的状态对喷涂



a 粒子温度随时间变化曲线 b 粒子温度随距离变化曲线

图6 粒子直径为20 μm

Figure 6 The diameter of particle is 20 micro

的质量有着决定性的影响。对于相同的喷涂状态,喷涂粒子的温度、速度与粒子的直径存在明显的关系,即随着粒子直径的增加,粒子速度和温度的加速度都将减小。粒子在加速出枪以后,还将存在适当距离的加速加温过程。粒子的出口速度和温度与实际测定的比较接近,从而为多功能超音速火焰喷涂的实际粒子存在状态提供了有力的证据,对优化涂层质量有着重要意义。

[参考文献]

- [1] 王志健. 空气超音速火焰喷枪设计研究[D]. 北京:北京装甲兵工程学院,2001.2-4
- [2] 田欣利. 空气超音速火焰喷枪速度场和温度场的数值仿真[J]. 兵工学报,2002,23(4):93-96
- [3] 查柏林. HVO/AF多功能超音速火焰喷涂技术研究[D]. 西安:西安第二炮兵工程学院,2003.69-79
- [4] Pasandeh-Fard M, Mostaghimi J, Chandra S. Modeling sequential impact of two molten droplets on a solid surface[C]. Canada: Proc. of the 16th ITSC, 2000.

(上接第16页)

2 结论

1) 通过2种不同红外隐身涂层的红外热像图对比看出,采用同色迷彩不同梯度辐射率设计方法制备的红外隐身涂料,在具有可见光隐身的同时,红外斑块与迷彩图案完全分离,进一步提高了红外隐身涂料的伪装性能。

2) 本项研究的关键在于如何运用红外高透射比着色颜料,通过控制涂层厚度,降低红外高反射填料用量,缩小与同色不同辐射率涂层的色差。

3) 根据武器装备不同的形体大小来开展红外隐身涂层的图案分布进行优化设计。如被涂目标形体大,则应考虑设计为大迷彩图案和小红外斑块;如被涂目标形体小,则应考虑设计为小迷彩图案和大红外斑块,这2种不同设计形式都能实现可见光和红外热图像的分离,对降低目标的发现概率具有显著的意义。

[参考文献]

- [1] 於定华,叶熙源,余大斌,等. ITO作填料的涂层光谱特性研究[J]. 功能材料,1993,30(6):660-662
- [2] 费逸伟,黄云杰,唐卫红,等. 颜料对低发射率涂料红外辐射特性的影响[J]. 材料科学与工程,2002,20(3):449-452
- [3] 中化化工标准化研究所等. 化学工业标准汇编涂料与颜料(下)[M]. 北京:中国标准出版社,2001.499-589
- [4] 郦江涛,姜卫陵,赵云峰,等. 红外隐身涂料的研究进展[J]. 导弹与航天运载技术,2002,(5):69-73
- [5] 罗志勇. 红外涂层发射率的理论研究[J]. 红外技术,2000,22(5):23-27