

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.03.006

## 可见光-激光兼容隐身涂层的制备与性能研究

王真\*, 吴玉茵, 卜铁伟

(山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206)

**摘要:** 以激光吸收填料、着色颜料、水性聚氨酯树脂以及常用助剂制备可见光-激光兼容隐身涂料,并将涂料涂覆于织物上制得涂层。研究了激光吸收填料的种类、含量对涂层色度值、1.06  $\mu\text{m}$  波段光谱反射率以及红外发射率等性能的影响。研究表明:采用纳米ATO作为激光吸收填料,可有效降低涂层的光谱反射率;控制涂层在一定厚度下,随着纳米ATO添加量的增加,涂层的反射率逐渐降低,当添加量为51%时,反射率可降至5%以下,满足激光隐身要求,并且涂层的可见光性能符合GJB 1082-1991《伪装网用颜色》中的DG0847深绿色;此外,涂层的阻燃及其他性能均可达实用要求。

**关键词:** 可见光-激光;兼容隐身;反射率;色度值;阻燃

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

## Preparation and Properties of Visible-Laser Compatible Stealth Coatings

WANG Zhen\*, WU Yuyin, BU Tiewei

(Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, China)

**Abstract:** The visible light-laser-compatible stealth coating was prepared by laser absorbing filler, coloring pigment, water-based polyurethane resin and common additives. The influences of the types and contents of laser absorbing fillers on the chromaticity value, spectral reflectance of 1.06  $\mu\text{m}$  band and infrared emissivity of the coating were studied. The results show that using nanometer ATO as laser absorbing filler can effectively reduce the spectral reflectance of the coating. Under a certain thickness, the reflectivity of the coating gradually decreases with the increase of the amount of nano ATO. When the amount of nano ATO is 51%, the reflectivity can be reduced to less than 5%, which meets the requirements of laser stealth. Besides, the visible light performance of the coating conforms to DG0847 dark green in GJB 1082-1991 "color for camouflage net". In addition, the flame retardant and other properties of the coating can meet the practical requirements.

**Keywords:** visible light-laser; compatible stealth; reflectance; chroma value; flame retardant

随着科技的发展,光电探测技术的迅速提升,激光制导武器具有命中率高、捕获目标快,识别目标能力强等特点,在军事中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。在实际作战环境下,发现意味着被摧毁,因此,武器装备需要具备一定的反隐身能力,才能满足现代战

场复杂的生存环境<sup>[3-6]</sup>。目前,外军装备的激光器主要有0.93  $\mu\text{m}$ 的碲化镓激光器、1.06  $\mu\text{m}$ 的钕铝石榴石激光器和10.6  $\mu\text{m}$ 的二氧化碳激光器,特别是1.06  $\mu\text{m}$ 的钕铝石榴石激光器应用广泛,因此,激光隐身材料主要针该波段的研究较多<sup>[7-9]</sup>。对于性能

收稿日期: 2020-05-14

修回日期: 2020-07-25

通信作者: 王真, wang20200513@163.com

优异的激光隐身材料不仅在 1.06  $\mu\text{m}$  处应具有高的吸收率,还要实现与其他波段的兼容隐身,以及优良的理化及环境适应性能。现阶段,激光隐身涂料在实现激光隐身技术中具有重要意义,其原理是利用涂料对激光的强吸收作用,从而使得激光装置无法有效接收反射回来的激光,进而实现激光隐身<sup>[10-12]</sup>。一般而言,织物类装备具有可操作性强、机动性高、应用灵活等特点,在军事装备中扮演着重要的角色,具有广泛的应用价值。现阶段的隐身织物主要针对光学、红外和雷达波段的隐身,对在 1.06  $\mu\text{m}$  波段激光隐身织物的研究较少,特别是针对可见光-激光兼容一体化的隐身织物鲜有报道。

本文采用水性聚氨酯树脂体系,选用纳米 ATO (氧化锡锑)/ITO(氧化铟锡)为激光吸收填料,以激光吸收填料为基础进行调色,添加适当比例的铬绿、黄颜料、碳黑着色颜料,使涂层满足 GJB 1082-1991《伪装网用颜色》中深绿色要求,实现了可见光-激光隐身的兼容;通过添加合适比例的十溴二苯醚和三氧化二锑,使涂层满足阻燃要求;此外,还对涂层的理化及环境性能进行了测试。

## 1 实验部分

### 1.1 材料及仪器

水性聚氨酯树脂(安徽安大华泰新材料),消泡剂(东莞希尔),增稠剂(广东中联邦),铬绿(郑州瑞超化工),黄颜料(杭州映山花颜料),碳黑(上海稳颜化工),三氧化二锑(安化华宇锑业),十溴二苯醚(山东海王化工),纳米氧化锡锑(以下简称 ATO)(北京德科岛金科技有限公司),纳米氧化铟锡(以下简称 ITO)(北京德科岛金科技有限公司),涤纶织物(苏州择优纺织科技)。

### 1.2 隐身涂层的制备

将着色颜料(铬绿、黄颜料、碳黑)、激光吸收填料(纳米 ATO/ITO)、去离子水按一定比例放入锥形磨内研磨制得浆料,研磨时间为 30 min,控制浆料细度在 10~15  $\mu\text{m}$ ;加入水性聚氨酯树脂、增稠剂和消泡剂,搅拌均匀制得隐身涂料;采用刮涂工艺,将上述涂料涂覆于织物上烘干制备均匀的涂层,烘干条件为:110  $^{\circ}\text{C}$  下 5 min,控制涂层厚度在 40~45  $\mu\text{m}$ ,涂层重量为 40~50  $\text{g}/\text{m}^2$ 。

根据 GJB 1082-1991《伪装网用颜色》设计光学

特征符合深绿色(DG0847)涂层,涂料配方见表 1。

表 1 涂料配方设计

Tab.1 Paint formulation design

材料序号	$w$ (纳米 ATO)/%	$w$ (铬绿)/%	$w$ (黄颜料)/%	$w$ (碳黑)/%	$w$ (十溴二苯醚)/%	$w$ (三氧化二锑)/%
1	45.00	11.30	3.53	0.17	30.00	10.00
2	48.00	11.37	3.00	0.19	28.08	9.36
3	51.00	12.86	5.79	0.35	22.50	7.50
4	54.00	13.01	3.76	0.45	21.58	7.20
5	57.00	13.30	2.04	0.46	20.40	6.80
6	60.00	12.32	1.39	0.29	19.50	6.50

其中树脂按照与颜料的质量比为 1:1 添加

### 1.3 测试与表征

采用广州标旗生产的光谱反射率测试仪测量涂层在 400~1150 nm 波段的光谱反射曲线,根据反射率曲线找到 1.06  $\mu\text{m}$  处的反射率值;采用光谱反射率测试仪自带的测色软件测试涂层的色度值;采用中科院物理所研制的 IR-2 双波段发射率测量仪测量涂层 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外发射率。

色差  $\Delta E_{ab}^*$  的计算:按照 GJB1082-1991 中 4.3.2 的规定,CIE1976L\*a\*b\*色差  $\Delta E_{ab}^*$  按照下式计算:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中: $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  为伪装网样品色与其所对应标准色坐标  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  之差。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浆料研磨工艺对涂层的影响

分别选用玻璃珠砂磨和锥形磨研磨两种工艺制备所需浆料。通过对比可知,采用玻璃珠砂磨工艺存在的问题首先是,颜料和玻璃珠分离困难,且过筛后颜料损失严重,特别是过筛过程中极易导致碳黑又团聚在一起,过筛困难。其次,炭黑和激光吸收填料的粒径均为纳米级,难以混合均匀,使得涂层表面颜色不均匀。而采用锥形磨研磨工艺有效解决了上述问题,不仅浆料损失量少,易于混合均匀,且研磨过程简单。因此,下述实验优选锥形磨研磨方式,并控制浆料的粒径在 10~15  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 激光吸收填料质量比对涂层光谱反射率的影响

研究了纳米 ATO 与 ITO 不同质量比下(分别为 1:1、2:1、3:1、4:1)对涂层在 1.06  $\mu\text{m}$  波段光谱反射

率的影响。由图(1)可以看出,在未添加激光吸收填料下,涂层在1.06  $\mu\text{m}$ 处的反射率为48.494%,有文献表明<sup>[13]</sup>,要想实现较好激光隐身性能,该波段的反射率要达到5%以下,因此,不满足激光隐身要求。通过添加一定量的激光吸收填料后,涂层的光谱反射率显著降低,并且当激光吸收填料质量比小于4:1时,随着ATO与ITO质量比的增大,涂层的反射率降低显著;当质量比为3:1时,反射率可达5.041%;继续增大至4:1时,反射率反而出现了升高的趋势。可见,在一定范围内,增大ATO与ITO质量比,有利于降低涂层的反射率。上述实验可以看出,在一定程度下,增大ATO的用量,更有利于降低涂层的反射率,但上述实验中最优值仍未达到5%以下;并且ATO相较于ITO更具有成本优势。因此,综合性能和成本考虑,下文选择ATO作为激光吸收填料进行研究和验证。

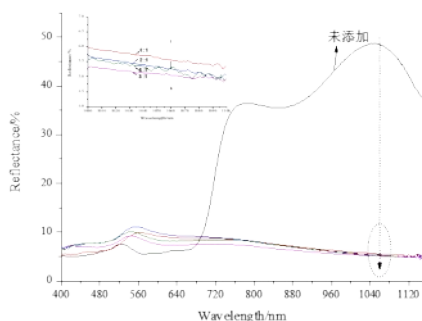


图1 激光吸收填料质量比对涂层反射率的影响

Fig.1 Effect of different laser absorbing fillers on reflectivity of coating

## 2.3 ATO添加量对涂层性能的影响

### 2.3.1 光谱反射率特性分析

因此,本实验制备了添加不同量纳米ATO(质量分数分别为45%、48%、51%、54%、57%、60%)的涂层,并控制涂层厚度在40~45  $\mu\text{m}$ 。由图(2)可以看出,随着纳米ATO添加量的增加,涂层的光谱反射率逐渐降低,这是由于纳米ATO本身是一种较好的激光吸收材料,具有较强的吸收能力,在1.06  $\mu\text{m}$ 波段具有较低的激光反射性能<sup>[14-15]</sup>。因此,随着纳米ATO含量的增加,涂层表现出更低的反射率。

### 2.3.2 色差分析

对添加不同量纳米ATO涂层的CIE1976( $L^*a^*b^*$ )色度值进行了测试,结果见表2。GJB 1082-1991中规定深绿色涂层(DG0847)的CIE1976( $L^*a^*b^*$ )为 $L^*=33.9$ , $a^*=-6.0$ , $b^*=9.98$ ,其

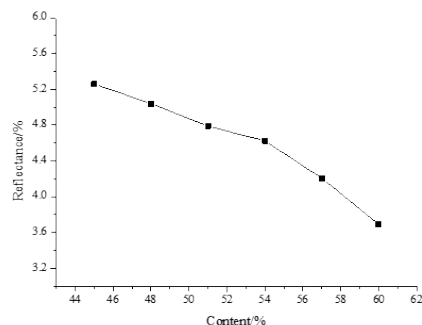


图2 不同纳米ATO添加量对涂层光谱反射率的影响

Fig.2 Effect of different nano ATO addition on spectral reflectance of coating

中,要求色差不大于3  $L^*a^*b^*$ 单位。由表2可以看出,纳米ATO添加量对涂层的色差 $\Delta E$ 值影响较大,这是由于纳米ATO在体系中有两方面的作用:一是担当了颜料的角色;二是起激光隐身作用,当纳米ATO的添加量大于51%时,不能满足与标准色的色差 $\leq 3 L^*a^*b^*$ ,对体系的调色造成一定的困难;可见,当纳米ATO添加量为51%时,涂层的性能最为优异,可实现较好的可见光、激光兼容隐身。

表2 ATO添加量对涂层色度值的影响

Tab.2 Influence of ATO addition on color value of coating

ATO添加量/%	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
45	32.13	-5.68	9.98	1.81
48	32.12	-4.4	8.39	2.77
51	34.58	-3.92	9.74	2.19
54	37.44	-3.67	7.98	4.6
57	31.74	-3.91	5.30	5.4
60	35.25	-3.22	4.23	6.37

### 2.3.3 红外发射率分析

由图(3)中可以看出,随着纳米ATO添加量的增加,涂层8~14  $\mu\text{m}$ 波段的发射率有略微增大的趋势,并且始终保持在一个较高水平不低于0.90。这是由于随着纳米ATO添加量的增大,涂层的反射率逐渐降低,进而发射率略微升高。这主要是因为对于不透明的物体,发射率降低,其反射率会相应升高,这也与上述反射率的测试数据相吻合。

## 2.4 涂层的阻燃设计

实验选用十溴二苯醚和三氧化二锑的混合物

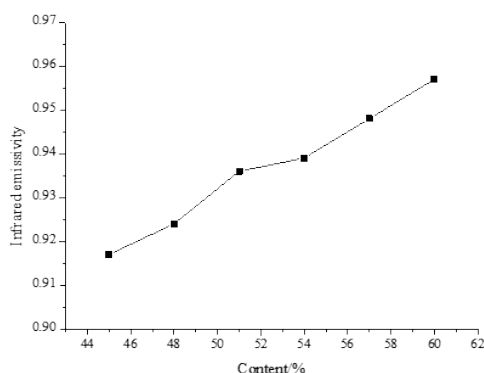


图3 纳米ATO添加量对涂层红外发射率的影响

Fig.3 Effect of nano ATO addition on infrared emissivity of coating

作为阻燃剂,在未添加着色颜料及激光吸收剂的前提下,研究十溴二苯醚与三氧化二锑的最佳用量比(分别为1:1、2:1、3:1和4:1)。由表3可知,当阻燃剂两者用量相等时,阻燃性能较差;当十溴二苯醚用量大于三氧化二锑时,阻燃性能较好,这也与文献中的研究结果相一致<sup>[16]</sup>。其中,当质量比为3:1时,涂层的阻燃性能最好,继续增大十溴二苯醚用

表3 不同配比阻燃剂性能测试

Tab.3 Performance test of flame retardant with different proportion

阻燃剂用量比 (十溴二苯醚:三氧化二锑)	阻燃性能		
	续燃/s	阴燃/s	损毁长度/mm
1:1	经向:2.4 纬向:3.2	经向:1.8 纬向:2.6	110 118
2:1	经向:1.5 纬向:2.3	经向:1.2 纬向:1.7	98 103
3:1	经向:0 纬向:0	经向:0 纬向:0	84 91
4:1	经向:1.0 纬向:1.2	经向:0.5 纬向:1.0	96 99

量,阻燃性能反而出现一定程度的下降,因此,实验中优选十溴二苯醚与三氧化二锑的用量比为3:1。

此外,还对表1不同阻燃剂用量制备的涂层分别测试了其阻燃性能。由表4可以看出,随着体系中纳米ATO添加量的增大,阻燃剂在体系中的占比逐渐减小,当阻燃剂的添加量低于30%时(表中4、5和6涂层),涂层阻燃性能不理想。

表4 涂层阻燃性能测试

Tab.4 flame retardant performance test of coating

样品编号	阻燃剂用量/wt%	阻燃性能
1	40.00%	阻燃
2	37.44%	阻燃
3	30.00%	阻燃
4	28.80%	不阻燃
5	27.20%	不阻燃
6	26.00%	不阻燃

表5 涂层的理化及环境性能测试

Tab.5 Physical, chemical and environmental performance test of coating

序号	检测项目	标准参考值	检测结果	检测方法
1	日晒牢度	≥4级	4级	GB/T 16422.2—2014《塑料实验室光源暴露试验方法:氙弧灯》
2	阻燃性	阴燃时间≤5 s; 损毁长度<100 mm	阴燃时间:经向0 s、纬向0 s 续燃时间:经向0 s、纬向0 s 损毁长度:经向84 mm、纬向91 mm	GB/T 5455—2014《纺织品燃烧性能垂直方向损毁长度阴燃和续燃时间的测定》
3	色牢度	干摩擦≥3级; 湿摩擦≥2级	干摩擦3级;湿摩擦3级	GB/T 3920—2008《纺织品色牢度试验耐摩擦色牢度》
4	耐静水压	≥7 kPa	26.1 kPa	GB/T 4744—2013《纺织品防水性能的检测和评价静水压法》
5	沾水性	≥4级	4~5级	GB/T 4745—2012《纺织品防水性能的检测和评价沾水法》

## 2.5 物理及环境适应性测试

对纳米ATO添加量为51%时制备的涂层进行了物理及环境适应性测试。由表5可以看出,各项指标性能均满足实用要求。



### 3 结论

(1)研制了一种可见光/激光兼容隐身涂层,涂层在1.06  $\mu\text{m}$ 波段反射率可达5%以下,并且光学性能符合GJB 1082-1991中深绿色(DG0847)的要求。

(2)与ITO相比,纳米ATO对降低涂层的光谱反射率有着更好的效果。当其添加量为51%时,涂层在1.06  $\mu\text{m}$ 处反射率可达4.79%,满足激光隐身要求,继续增大纳米ATO的添加量不仅不利于体系的调色,对涂层的阻燃性能也会造成一定影响。

(3)涂层综合性能测试结果表明:涂层日晒牢度、阻燃性、色牢度等各项指标性能优异,符合军用要求。

### 参考文献

- [1] 高颂. 国外激光隐身技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(2): 14-16.  
Gao S. Development of the laser camouflage technology abroad[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(2): 14-16.
- [2] 张晶, 李会利, 张其土. 激光隐身技术的现状和发展趋势[J]. 材料导报, 2007, 21: 316-318+324.  
Zhang J, Li H L, Zhang Q T. Present status and development tendency of laser stealth technology [J]. Material Review, 2007, 21: 316-318+324.
- [3] 催运国, 陆春华, 许仲梓. 激光威胁与对策[J]. 激光与红外, 2005, 35(5): 316-318.  
Cui Y G, Lu C G, Xu Z Z. The threaten and countermeasure of laser [J]. Laser & Infrared, 2005, 35 (5) : 316-318.
- [4] 卢言利, 张拴勤, 吕绪良等. 激光隐身材料的研究新进展[J]. 材料导报, 2008, 3(5): 5-7.  
Lu Y L, Zhang S Q, Lu X L, et al. New reasearch developments of laser stealth materials [J]. Material Review, 2008, 3(5): 5-7.
- [5] 赵锦, 陈宏书, 王结良. 激光隐身材料的研究现状及其发展趋势[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(5): 78-82.  
Zhao J, Chen H S, Wang J L. Laster stealth materials and its developments tendency [J]. Material Development and Application, 2011, 26(5): 78-82.
- [6] 张永进, 赵石林, 许仲梓. 激光隐身涂料的应用研究进展[J]. 涂料工业, 2008, 38(9): 62-64+66.  
Zhang Y J, Zhao S L, Xu Z Z. Research progress of laser stealth coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2008, 38 (9): 62-64+66.
- [7] 陶启宇. 红外-激光兼容隐身涂层的制备研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2013年.
- [8] 王自荣, 余大斌, 孙晓泉等. 激光与红外复合隐身涂料初步研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(5): 301-304.  
Wang Z R, Yu D B, Sun X Q, et al. Compound camouflage paints of laser and infrared [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(5): 301-304.
- [9] 刑宏龙, 郭文美, 陶启宇等. 聚氨酯基红外-激光兼容隐身涂层性能研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 761-765.  
Xing H L, Guo W M, Tao Q Y, et al. Preparathion and properties of infrared-laser compatible stealth coating with waterborne polyurethane [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(7): 761-765.
- [10] 吴伶芝, 谢国华, 吴瑞彬等. 激光、红外兼容涂料的前景分析[J]. 宇航材料工艺, 2001, (2): 1~3+9.  
Wu L Z, Xie G H, Wu R B, et al. Prospect Analysis for Compatible Stealth Coatings in Laser and Infrared [J]. Aerospace Material Technology, 2001, (2): 1~3+9.
- [11] 潘家亮, 张拴勤, 卢言利等. 光谱选择性激光隐身材料研究现状[J]. 光电技术应用, 2011, 26(6): 45-48.  
Pan J L, Zhang S Q, Lu Y L, et al. Study status of spectral selective laser stealth materials [J]. Electro-optic Technology Application, 2011, 26(6): 45-48.
- [12] 李海燕, 张世珍, 孙春龙等. 隐身涂料的研究进展与发展方向[J]. 功能材料, 2013, 增刊 I (44): 36-40.  
Li H Y, Zhang S Z, Sun C L, et al. The present situation and prospect of stealthy coatings [J]. Functional Materials, 2013, Supplement I (44): 36-40.
- [13] 游毓聪, 杜仕国, 施冬梅等. 高分子材料在隐身涂料中的应用[J]. 化工新型材料, 2007, 35(3): 18-20.  
Yong Y C, Du S G, Shi D M, et al. Application of high-molecular material in stealthy coating [J]. New Chemical Materials, 2007, 35(3): 18-20.
- [14] 刘欣伟, 林伟, 苏荣华等. 纳米材料在隐身技术中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(30): 134-139.  
Liu X W, Lin W, Su R H, et al. Progress in application of nanometer materials in stealth technology [J]. Material Review, 2017, 31(30): 134-139.
- [15] Zhang J, Wang L X, Liang M P, et al. Effects of Sb content on structure and laser reflection performance of ATO nanomaterials [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 131-135.
- [16] 于志辉. 军用高强度涤纶面料的阻燃拒水多功能复合整理[D]. 上海:东华大学, 2018.