

太阳热反射隔热彩色涂料的制备及隔热性能

杨光¹, 邓安仲¹, 陈静波²

(1.中国人民解放军陆军勤务学院, 重庆 401311; 2.中国人民解放军 62026 部队, 西安 710032)

摘要: **目的** 从色彩三原色理论出发, 制备隔热性能优异的太阳热反射隔热彩色涂料。**方法** 将复合钛红、钴蓝、钛铬黄、镍钛黄和铬绿颜料复配为颜料, 硅溶胶偶联苯丙复合乳液为成膜基料, 制备了紫色、蓝色、橙色和绿色太阳热反射隔热彩色涂料。用扫描电子显微镜和电子探针对颜料微观结构和元素进行定量检测, 用紫外/可见/近红外分光光度计探究颜料的反射特性、涂膜反射特性和污染处理后涂膜太阳光反射比降低率。分别从涂膜试板背面隔热温差和涂膜试板对箱体中心的辐射热流降低率两个方面, 衡量太阳热反射隔热彩色涂料的隔热效果。**结果** 紫色、蓝色、橙色和绿色 4 种太阳热反射隔热彩色涂膜的太阳光反射比均在 0.5000 以上, 分别为 0.6287、0.5433、0.7594 和 0.6991, 涂膜污染后的太阳光反射比降低率均满足相关标准 $\leq 15\%$ 的要求。涂膜试板背面隔热温差均在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 涂膜试板对箱体中心的辐射热流降低率均在 10% 以上, 隔热降温性能显著。**结论** 采用色彩三原色理论选择合适的红外反射颜料, 可制备出隔热性能优异的太阳热反射隔热彩色涂料。

关键词: 反射隔热; 硅溶胶; 硅烷偶联剂; 颜料; 复合乳液; 辐射热流; 红外反射

中图分类号: TQ630.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0269-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.037

Preparation and Insulation Properties of Colorful Solar Reflective Insulation Coating

YANG Guang¹, DENG An-zhong¹, CHEN Jing-bo²

(1.Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China; 2.Unit 62026 of PLA, Xi'an 710032, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare colorful solar reflective insulation coating of excellent insulation properties based on trichromatic theory. Colorful solar reflective insulation coatings in purple, blue, orange and green were prepared with silica sol coupling styrene-acrylic composite emulsion as paint binder, and composite titanium red, cobalt blue, titanium chrome yellow, nickel titanium yellow and chrome green as compound pigment. Microstructure and element of the pigments were determined quantitatively with scanning electron microscope and electron microprobe. Reflectance characteristics of the film, solar reflectance reduction rate after polluted treatment of the film as well as reflectance performance of pigments were characterized with ultraviolet-visible-near infrared spectrophotometer. Insulation effect of the colorful solar reflective insulation coating was measured from two aspects, i.e., temperature difference on reverse side of film panels and film panels radiation heat flux towards box center. Solar reflectance of the colorful solar reflective insulation films in purple, blue, orange and green was 0.6287, 0.5433, 0.7594 and 0.6991, respectively, all above 0.5000. Solar reflectance reduction rate after polluted treatment of the film met re-

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-07-19

Received: 2017-06-01; Revised: 2017-07-19

作者简介: 杨光 (1990—), 男, 硕士生, 研究方向为建筑节能材料。

Biography: YANG Guang (1990—), Male, Master, Research focus: building energy saving materials.

通讯作者: 邓安仲 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事功能材料方面的研究。

Corresponding author: DENG An-zhong (1974—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: functional materials.

quirements of relevant standard, which demanded solar reflectance reduction rate after polluted treatment of $\leq 15\%$. Insulation temperature difference on reverse side of film test panel was above $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, and film panels radiation heat flux towards box center was above 10% , indicating excellent insulation performance of the colorful solar reflective insulation coatings. Thus, the coating prepared is of great application. Colorful solar reflective insulation coating of excellent insulation properties can be prepared by selecting suitable infrared reflectance pigment based on trichromatic theory.

KEY WORDS: reflective insulation; silica sol; silane coupling agent; pigment; composite emulsion; radiation heat flux; infrared reflectance

太阳拥有巨大的能量,每分钟约有 $1.06 \times 10^{19} \text{ J}$ 的能量传递给地球^[1],其中 95% 的能量集中在可见光 ($400 \sim 780 \text{ nm}$) 和近红外 ($780 \sim 2500 \text{ nm}$) 波段^[2],强烈的热辐射给建筑、油罐等设施设备带来外表温度过高等弊端,影响了其正常使用功能的发挥,为此,开发和具有隔热效果的材料成为科研工作者关注的焦点。太阳热反射隔热涂层是一种可反射部分可见光和近红外线的功能涂层^[3-6],可起一定隔热降温作用,也可应用于军事红外隐身领域^[7],具有广阔的发展前景。

林美^[8]制备了有机-无机复合乳液反射隔热涂料,系统探究了普通二氧化钛和改性二氧化钛添加量对涂层反射隔热性能的影响,从实验结果来看,改性二氧化钛由于团聚较少,添加量达 25% 之后仍具有较高的红外反射特性。刘文涛等^[9]通过实验得出结论,认为添加反射型和辐射型填料的涂料的最佳干膜厚度为 $300\text{ }\mu\text{m}$,而添加阻隔型和相变型填料的涂料的隔热降温效果随干膜厚度的增加而增加。Guo 等^[10]系统对比了使用/不使用反射隔热涂料的两个房屋,在夏季和冬季的室内温度变化及空调能耗变化,结果表明,使用反射隔热涂料的房屋最大可降低室内温度达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,每月空调能耗可降低 $5.8\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,隔热节能效果十分显著。

虽然关于反射隔热涂料方面的报道较多,但仍存

在几点研究不足。第一,二氧化钛白色隔热涂料虽然红外反射率较高,但不符合当今的建筑装饰性要求,且白色涂料存在易产生光污染以及耐沾污性不佳等缺陷,应用场合十分有限;第二,彩色反射隔热涂料的研究报道虽然较多且较全面,但市面上大规模生产的复合无机颜料色彩固定且相对单一,色彩可调节性差,不能完全满足反射隔热涂料的多种应用场合及装饰性或伪装性。基于以上两点不足,本文结合色彩三原色理论,使用硅溶胶偶联苯丙复合乳液,制备太阳光反射隔热彩色涂料,对开发新色系、新种类的反射隔热涂料提供一定的借鉴意义。

1 实验

1.1 原料

纯丙乳液 RS-6733,固含量为 $(48 \pm 2)\%$,平均粒径为 $0.8 \sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$,常熟巴德富科技有限公司。碱性纳米硅溶胶 JN-30,固体质量分数为 30%,平均粒径为 $5 \sim 10\text{ nm}$,山东银丰纳米新材料有限公司。红外反射颜料有钛铬黄、镍钛黄、复合钛红、钴蓝(湖南巨发科技有限公司)和铬绿(上海一品化学品有限公司),红外反射颜料的扫描电子显微镜照片如图 1 所示。成膜助剂醇酯

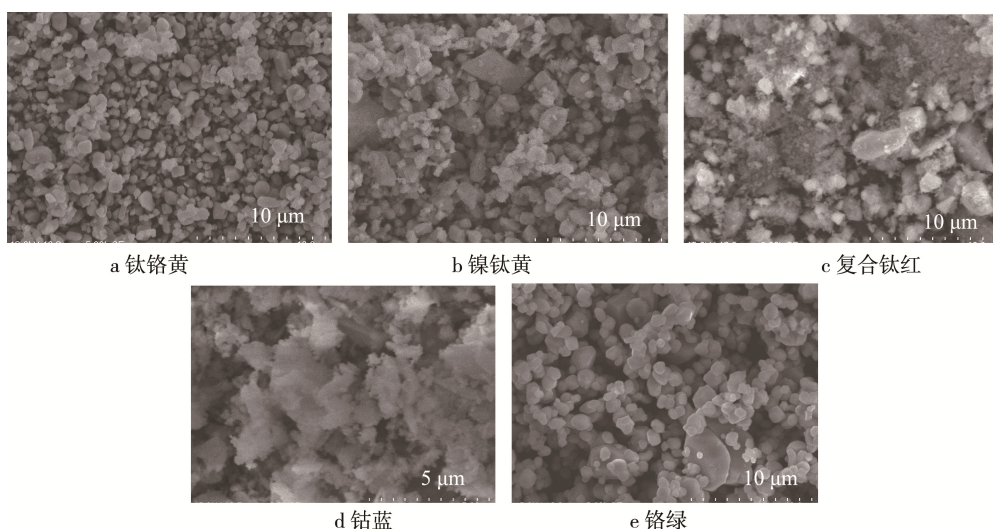


图 1 颜料的 SEM 图片

Fig.1 SEM images of pigments: (a) titanium-chrome yellow; (b) nickel titanium yellow; (c) composite titanium red; (d).cobalt blue; (e). chrome green

十二, 广州恒宇化工有限公司; 消泡剂 BYK-163, 德国毕克化学品有限公司; 增稠剂 SN-162, 日本诺普科化学品有限公司; 以上均为工业品。有机硅烷偶联剂 KH560 为 γ -(2,3-环氧丙氧)丙基三甲氧基硅烷, 分析纯, 湖北武大有机硅新材料有限公司。无水乙醇, 分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司。去离子水, 实验室自制。铝合金板和石棉水泥板, 市售。

1.2 方法

1.2.1 复合乳液成膜基料的制备

将 100 g 硅溶胶加入三口烧瓶中, 注入助溶剂(无

水乙醇)和超纯水的均匀混合液(体积比为 1:1), 置于超声波清洗器中超声分散 0.5 h。将三口烧瓶置于 60 ℃ 的水浴箱中, 插入电动搅拌器、温度计和冷凝管, 在水浴加热/机械搅拌状态下, 缓慢滴入 2 g 偶联剂 KH560, 恒温搅拌 24 h, 将产物注入离心管中, 置于离心机中高速离心分离, 抽滤得到改性后的硅溶胶。将 50 g 改性后的硅溶胶加入到 100 g 苯丙乳液中, 机械搅拌 2 h, 加入适量消泡剂得到复合乳液成膜基料。对复合乳液成膜基料进行测试, 所得性能参数如表 1 所示。

表 1 复合乳液性能参数
Tab.1 Property parameters of composite emulsion

外观	固含量/%	黏度/(mPa·s)	平均粒径/nm	pH	玻璃化转变温度/℃	最低成膜温度/℃	离心稳定性	类型
乳白色	43.2	290.4	188.3	8	63	20	无沉淀	阴离子

1.2.2 太阳热反射隔热涂料的制备

称取 100 g 复合乳液, 分别加入 5 g 成膜助剂、20 g 低速球磨 10 min 后的红外反射复配颜料(复合钛红与钴蓝的质量比为 2:1, 钴蓝与镍钛黄的质量比为 3.3:1, 复合钛红与钛铬黄的质量比为 1:5, 钛铬黄与铬绿的质量比为 1:3)、5 g 增稠剂和 5 g 消泡剂, 在 400 r/min 的转速下机械分散 30 min 后出料备用。

1.3 测试与表征

将红外反射颜料进行真空喷金处理, 用日本日立公司的 SN-3700N 型扫描电子显微镜(SEM)观测颜料的微观结构, 结合美国 AMETEK 公司的 SX-FiveFE 电子探针(EPMA)对颜料进行元素定量检测。

按 JG/T 235—2014《建筑反射隔热涂料》, 选择铝合金板作为基材。首先对铝合金板进行表面预处理, 经打磨、清洗、除油和烘干后备用。将制备好的涂料喷涂在铝合金板和石棉水泥板表面, 自然干燥后选择干膜厚度分别约为 150 μm 和 500 μm 的试板测试涂膜性能。采用澳大利亚安捷伦公司的 Cary-5000 型紫外/可见/近红外分光光度计测量样品的太阳光(400~2500 nm)反射比曲线, (平均)反射比计算公式如下^[11]:

$$\text{TSR} = \frac{\sum_{\lambda=400\text{nm}}^{2500\text{nm}} \rho_0(\lambda)\rho(\lambda)S_{\lambda}\Delta\lambda}{\sum_{\lambda=400\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_{\lambda}\Delta\lambda}$$

(1)

式中: TSR 为样品的反射比; $\rho_0(\lambda)$ 为标准白板的光谱反射比; $\rho(\lambda)$ 为试板的光谱反射比; S_{λ} 为太阳辐射相对光谱分布; $\Delta\lambda$ 为波长间隔。参照 JG/T 235—2008《建筑反射隔热涂料》对涂膜试板进行隔热性能测试, 测试时每隔 1 min 采集一次试板背面温

度和箱体中心温度。涂膜沾污按 GB/T 9780—2013《建筑涂料涂层耐沾污性试验方法》中的 A 法进行 5 次污染处理。

2 结果与讨论

2.1 红外反射颜料反射特性和元素组成分析

太阳热反射隔热涂层的反射隔热性能和其中的红外反射颜料的反射特性密切相关。测试了颜料的太阳光反射特性, 如图 2 所示。不同颜料在可见光波段的反射比曲线的变化差异较大, 这是因为颜料呈现不同颜色且吸收不同波长的可见光所致。不同颜料在近红外波段的反射比曲线的变化差异较大, 这主要是因为不同颜料中含有的金属元素不同, 红外光照射时, 其内部电子发生不同程度的跃迁。钴蓝在 1200~1600 nm 附近存在很强的吸收谷, 这是钴蓝颜料中 Co^{2+} 的特征吸收带导致^[12]。通过计算得到颜料的太阳光反射比如表 2 所示。钛铬黄具有十分优异的太阳光反射特性, 其太阳

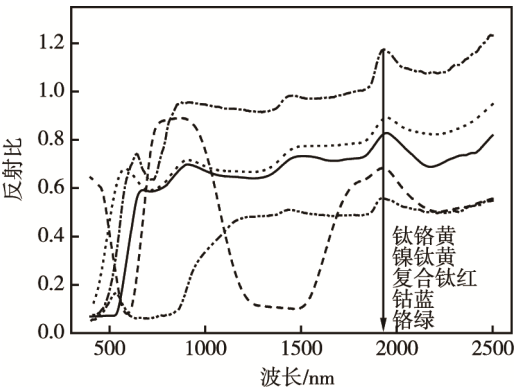


图 2 颜料的反射比曲线
Fig.2 Reflectance curves of pigments

光反射比高达 0.9135, 镍钛黄、复合钛红、钴蓝、铬绿颜料的太阳光反射比分别为 0.7261、0.6401、0.4800 和 0.3870。对颜料进行了电子探针定量成分检测, 结

果如表 3 所示。五种颜料均为金属氧化物, 其中含有 Ti 元素的颜料的太阳光反射比相对较高, 原因可能是 Ti^{4+} 对光线具有较强的反射作用^[13]。

表 2 颜料的太阳光反射比
Tab.2 Solar reflectance of pigments

颜料	钛铬黄	镍钛黄	复合钛红	钴蓝	铬绿
太阳光反射比	0.9135	0.7261	0.6401	0.4800	0.3870

表 3 颜料的电子探针定量成分检测
Tab.3 EPMA quantification of pigments

颜料	元素	质量分数/%	颜料	元素	质量分数/%
钛铬黄	Sb	11.78	复合钛红	Sb	12.66
	Ti	55.26		Ti	45.57
	Cr	4.35		O	24.2
	O	25.3	钴蓝	Al	38.1
镍钛黄	Ni	3.4		Co	39.54
	Sb	15.47		O	22.4
	Ti	52.9	铬绿	Cr	85.29
	O	27.27		O	14.71

2.2 太阳热反射隔热涂膜反射特性分析

太阳热反射隔热涂层的太阳光反射特性对其隔热效果等性能具有重要的影响: 可见光使涂层具有一定的装饰性, 近红外光具有致热作用, 涂膜在此波段的反射比越高, 则反射特性越好, 相对来说隔热效果也较好。此外, 太阳热反射隔热涂层作为一种建筑外

墙功能涂层, 其耐沾污性对涂层的实际应用具有重要影响。涂层的耐沾污性不好, 则使用一段时间后表面附着一定量的尘埃等污染物, 既降低了涂层的美观性, 也会降低涂层的反射特性, 进而影响涂层的隔热效果。将太阳热反射隔热涂料在铝合金板表面固化成膜, 并进行污染处理, 测试了涂膜污染处理前后的太阳光反射比曲线, 结果如图 3 所示。紫色涂膜和蓝色

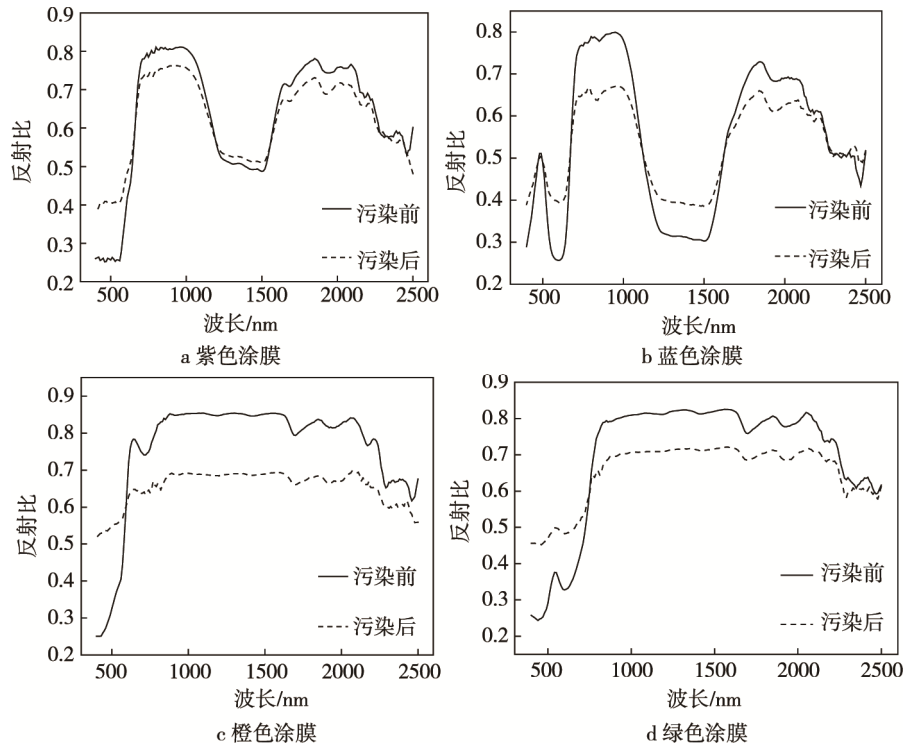


图 3 涂膜的反射比曲线

Fig.3 Reflectance curves of film: (a) purple film, (b) blue film, (c) orange film, (d) green film

涂膜含有钴蓝颜料，其中 Co^{2+} 在 1200~1600 nm 附近的特征吸收带导致涂膜在此波段存在很强的吸收谷；橙色涂膜和绿色涂膜均含有铬黄颜料，使得涂膜在近红外波段的反射比曲线较高。涂膜污染处理后，其太阳光反射比曲线发生不同程度的变化，其中，紫色涂膜和蓝色涂膜表面由于沾染一定的标准用灰，使得涂膜表面的 Co^{2+} 在 1200~1600 nm 附近的特征吸收减弱，橙色涂膜和绿色涂膜在近红外波段的太阳光反射比曲线均存在一定程度的降低。

通过计算，将涂膜污染前后太阳光反射比及反射比降低率列于表 4。由表 4 可知，颜色相对较浅、明度相对较高的橙色涂膜，其污染后太阳光反射比降低率最大，为 13.80%，但仍符合 JG/T 235—2014《建筑反射隔热涂料》中关于涂层污染后太阳光反射比降低率不大于 15% 的要求。由此可知，制备的 4 种彩色太阳热反射隔热涂层均具有较好的耐沾污性。

参照 JG/T 235—2014《建筑反射隔热涂料》中的太阳能量辐射的光谱分布强度表，将制备的 4 种太阳

表 4 涂膜的反射比及污染处理后反射比降低率
Tab.4 Reflectance and reflectance reduction rate after polluted treatment of film

颜色	反射比		降低率/%
	污染前	污染后	
紫色	0.6287	0.6120	2.66
蓝色	0.5433	0.5348	1.56
橙色	0.7594	0.6545	13.80
绿色	0.6991	0.6538	6.48

热反射隔热涂膜的反射太阳光能量辐射曲线列于图 4。由图 4 可知，随着波长的增大，涂膜反射太阳光能量辐射的强度逐渐降低，原因是红外线致热作用增强，导致反射特性下降。污染处理后，涂膜反射太阳光能量辐射的强度降低，这是由于污染处理后，涂膜反射比降低所致。通过计算，将涂膜污染前后反射太阳光能量辐射平均值列于表 5。由表 5 可知，涂膜污染后，反射太阳光能量辐射的平均值均降低，橙色涂膜降低率最大，为 18.75%，这是因为橙色涂膜的反射比降低率最大。

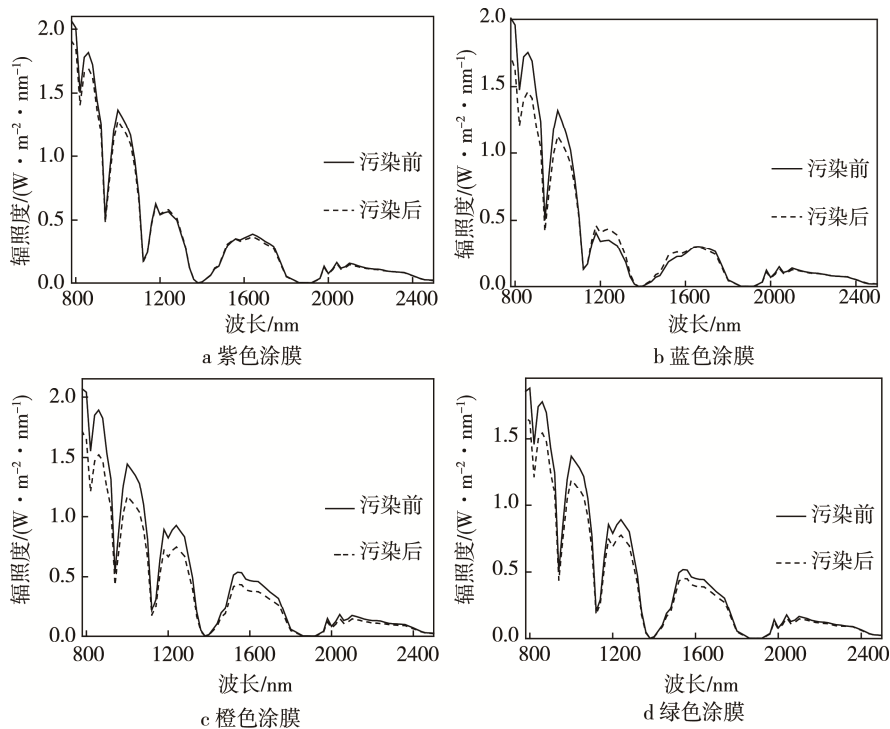


图 4 涂膜反射太阳光能量辐射曲线

Fig.4 Solar energy radiation reflectance curves of film: (a) purple film, (b) blue film, (c) orange film, (d) green film

表 5 涂膜污染前后反射近红外能量辐射平均值
Tab.5 Average near-infrared energy radiation reflectance of film

项目	平均值/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)			
	紫色	蓝色	橙色	绿色
污染前	0.41	0.36	0.48	0.45
污染后	0.39	0.33	0.39	0.40
降低率/%	4.88	8.33	18.75	11.11

2.3 太阳热反射隔热涂层隔热性能分析

为直观地考察制备的 4 种太阳热反射隔热涂层的隔热效果，参照 JG/T 235—2008《建筑反射隔热涂料》，自制了隔热性能测试装置对涂膜试板进行隔热性能测试，试板背面温度和箱体中心温度随时间变化的曲线如图 5 所示。涂膜试板均在约 30 min 后达到温度平衡，箱体中心温度在约 40 min 后达到温度平

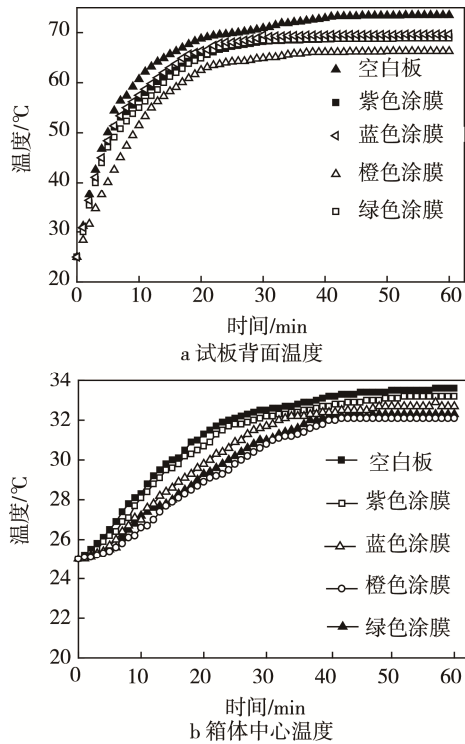


图 5 涂层的隔热性能

Fig.5 Insulation properties of film: (a) temperature on reverse side of test panel, (b) temperature of box center

衡, 滞后于涂膜试板。这是因为箱体中心的温升主要由涂膜试板向箱体中心进行热辐射导致, 当涂膜试板达到温度平衡后, 其仍不断地、缓慢地向箱体中心进行热辐射, 因此箱体中心达到温度平衡所需的时间较为滞后。

假定红外灯照射使涂层试板升温获得的热量全部通过背面的辐射传递给箱体中心而没有损耗, 则有^[14-15]:

$$q = \frac{\sigma [T_1^4 - T_2^4]}{(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1} \quad (2)$$

式中: q 为涂层试板背面对箱体中心的辐射热流; σ 为 Stephan-Soltzmann 常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_1 和 ε_2 分别为试板及聚苯乙烯隔热泡沫的红外发射率, 都取 0.90; T_1 为涂层试板背面的热力学温度; T_2 为箱体中心的热力学温度。图 6 为照射不同试板时, 试板对箱体中心的辐射热流随时间的变化曲线, 可知试板对箱体中心的辐射热流在约 30 min 达到平衡。将涂膜试板的隔热性能列于表 6, 可知采用红外灯模拟太阳光热源对涂膜试板照射 1 h 后, 使用太阳热反射隔热涂层的涂膜试板的隔热效果显著, 试板背面的隔热温差均在 3.8°C 以上, 箱体中心隔热温差均在 0.4°C 以上, 辐射热流降低率均在 10% 以上。红外灯虽然不能完全模拟太阳光热源, 但采用红外灯进行太阳热反射隔热涂层的隔热性能测试, 仍可间接证实所制备的 4 种彩色太阳热反射隔热涂层具有较优异的反射隔热

性能。结合 2.2 节可知, 所制备的 4 种彩色太阳热反射隔热涂层还具有较优异的耐沾污性, 使用标准沾污用灰污染 5 次后, 涂膜的反射比降低率满足相关建工行业标准, 具有较大的应用价值和发展空间。

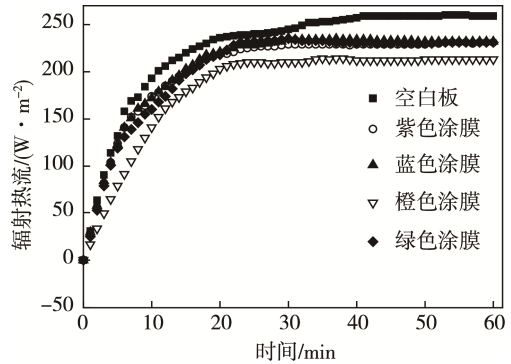


图 6 试板对箱体中心的辐射热流曲线

Fig.6 Radiation heat flux curves of test panels towards box center

表 6 涂膜试板隔热性能

Tab.6 Insulation properties of film test panels

项目 (照射 1 h)	空白板	紫色涂膜	蓝色涂膜	橙色涂膜	绿色涂膜
试板背面温度/ $^\circ\text{C}$	73.5	69.2	69.7	66.3	68.9
试板隔热温差/ $^\circ\text{C}$		4.3	3.8	7.2	4.6
箱体中心温度/ $^\circ\text{C}$	33.6	32.7	33.2	32.1	32.3
箱体中心隔热温差/ $^\circ\text{C}$		0.9	0.4	1.5	1.3
辐射热流/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	259	231	232	213	231
辐射热流降低率/%		10.81	10.42	17.76	10.81

3 结论

1) 复合钛红、钴蓝、钛铬黄、镍钛黄和铬绿颜料均为金属氧化物颜料, 含有 Ti^{4+} 的复合钛红、钛铬黄和镍钛黄颜料具有更优异的反射特性。

2) 橙色涂膜试板的太阳光反射比最高, 为 0.7594; 蓝色涂膜试板的太阳光反射比最低, 为 0.5433。4 种涂膜均具有较优异的耐沾污性, 污染处理后的太阳光反射比变化率均满足相关建工标准。

3) 4 种涂膜具有较优异的试板背面隔热性能和箱体中心隔热性能, 最大分别达 7.2°C 和 1.5°C , 涂膜试板对箱体中心的辐射热流降低率均在 10% 以上。

参考文献:

- [1] BRETZ S E, AKBARI H, ROSENFELD A. Practical Issues for Using Solar-reflective Materials to Mitigate Urban Heat Islands[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32: 95-101.
- [2] LEVINSON R, BERDAHL P, AKBARI H. Solar Spectral Optical Properties of Pigments—Part I: Model for Deriving Scattering and Absorption Coefficients from Transmittance and Reflectance Measurements [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 89(4): 319-349.
- [3] 丁文皓, 朱洪立, 连军涛, 等. 彩色太阳热反射隔热涂料的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(2): 24-25.
DING Wen-hao, ZHU Hong-li, LIAN Jun-tao. Research on Progress of the Colour Solar Reflective Coatings[J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(2): 24-25.
- [4] 杨光, 邓安仲, 陈科, 等. 黑色建筑节能涂料的制备及性能研究[J]. *涂料工业*, 2017, 47(1): 22-26.
YANG Guang, DENG An-zhong, CHEN Ke, et al. Synthesis and Properties of Black Energy-saving Architectural Coatings[J]. *Paint & Coating Industry*, 2017, 47(1): 22-26.
- [5] 沈航. 反射隔热多彩涂层的制备及性能探讨[J]. *涂料工业*, 2016, 46(2): 6-12.
SHEN Hang. Preparation and Property of Waterborne Multicolor Decorative Thermal Reflective Coatings[J]. *Paint & Coating Industry*, 2016, 46(2): 6-12.
- [6] 曾国勋, 杨建坤, 李风, 等. 镍钛黄包覆空心玻璃微珠复合颜料的制备及其热反射性能[J]. *电镀与涂饰*, 2016, 35(18): 968-972.
ZENG G X, YANG J K, LI F, et al. Preparation and Heat Reflective Property of Nickel-titanium Yellow Clad Hollow Glass Microsphere Composite Pigment[J]. *Electroplating & Finishing*, 2016, 35(18): 968-972.
- [7] 叶圣天, 成声月, 刘朝辉, 等. 冷颜料在红外隐身涂料中的应用[J]. *表面技术*, 2016, 45(2): 139-143.
YE Sheng-tian, CHENG Sheng-yue, LIU Zhao-hui, et al. Application of Cold Pigments in Infrared Stealth Coatings[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(2): 139-143.
- [8] 林美. 硅溶胶-纯丙复合乳液反射隔热涂料的制备及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(3): 168-173.
LIN Mei. Preparation and Properties of Silica Sol-Pure Acrylic Emulsion Reflective Insulation Coating[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2017, 33(3): 168-173.
- [9] 刘文涛, 元强, 谢宏, 等. 功能填料对反射隔热涂料隔热性能影响的研究[J]. *涂料工业*, 2016, 46(12): 22-28.
LIU Wen-tao, YUAN Qiang, XIE Hong, et al. Effects of Functional Fillers on Thermal Isolation Property of Reflective Thermal Isolation Coatings[J]. *Paint & Coating Industry*, 2016, 46(12): 22-28.
- [10] GUO W, QIAO X, HUANG Y, et al. Study on Energy Saving Effect of Heat-reflective Insulation Coating on Envelopes in the Hot Summer and Cold Winter Zone [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 50: 196-203.
- [11] JG/T 235—2014, 筑反射隔热涂料[S].
JG/T 235—2014, Architectural Reflective Thermal Insulation Coating[S].
- [12] 陈亮. 掺杂 Cr_2O_3 颜料的制备及光谱性能研究[J]. 成都: 电子科技大学, 2015.
CHEN Liang. The Prepared of Doped Chromium Oxide Pigments and the Research on Its Spectral Properties[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [13] SOMIYA S, HIRANO S, KAMIYA S. Phase Relations of the $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ System[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 1978, 25: 273-284.
- [14] KAI L U, NEIDE M S, VANDERLEY M J. Estimating Thermal Performance of Cool Colored Paints[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42: 17-22.
- [15] RONNEN L, HASHEM A, JOSEPH C R. Cooler Tile-roofed Buildings with Near-infrared-reflective Non-white Coatings[J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 2591-2605.