建筑节能涂层光学性能影响因素研究

杨光，邓安仲

（中国人民解放军后勤工程学院，重庆 401311）

摘 要：目的 通过研究建筑节能涂层光学性能的影响因素，从而提高建筑节能涂层的光学性能。**方法** 改变涂层的固化温度和涂层的厚度，改变增稠剂用量来调节涂料体系的黏度，采用刷涂、刮涂和喷涂来改变涂层的表面光泽度，采用差示扫描量热仪、紫外/可见光/近红外分光光度计、红外发射率测量仪、涂层光泽度测量仪和涂层测厚仪，来研究涂料体系的固化温度、黏度、涂层表面光泽度和涂层厚度对建筑节能涂层光学性能的影响。**结果** 固化温度、黏度、表面粗糙度和厚度对涂层 8~14 μm 波段的红外发射率的影响均较小，但对涂层的全波段和近红外波段的反射率有一定影响。实际应用时，固化温度、增稠剂用量、制备方式和涂层厚度分别以 65 ℃、1%、喷涂和 200 μm 为宜。**结论** 通过改变几种影响因素可较明显地影响建筑节能涂层的反射性能，但对建筑节能涂层的红外发射率影响不大，实际应用时应综合考虑几种影响因素来获得较满意的涂层光学性能。

关键词：建筑节能；黏度；固化温度；反射率；红外发射率；涂层厚度

中图分类号：TQ630.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)07-0144-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.024

Optical Property Influence Factors of Building Energy Saving Coatings

YANG Guang, DENG An-zhong

(Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: The work aims to improve optical property of building energy saving coatings by studying optical property influence factors of the coatings. Viscosity of paint system was adjusted by changing curing temperature, coating thickness and thickener dosage. Coating surface glossiness was changed by means of brushing painting, blade painting and spraying. Effects of curing temperature, viscosity, coating surface glossiness and coating thickness of the paint paint system on optical properties of building energy saving coatings were studied using differential scanning calormimetry (DSC), ultraviolet/visible/near infrared spectrophotometer, infrared emissivity measurement device, coating glossiness gauge and coating thickness tester. Curing temperature, viscosity, coating surface glossiness and coating thickness had slight effects on infrared emissivity in 8~14 μm band. Whereas, the factors had certain effects on total solar reflectance and near infrared reflectance. Optimum curing temperature, thickener dosage, preparation method and coating thickness should be 65 ℃, 1%, spraying and 200 μm, respectively during practical application. Changing several influence factors has significant effects on reflectance properties of the building energy saving coatings, but minor effects on infrared emissivity of building energy saving coatings. All the influence factors shall be considered comprehensively to present satisfactory optical properties during practical application.

KEY WORDS: building energy saving; viscosity; curing temperature; reflectance; infrared emissivity; coating thickness

收稿日期：2017-03-17；修订日期：2017-06-05

Received：2017-03-17；**Revised**：2017-06-05

作者简介：杨光（1990—），男，硕士研究生，主要从事建筑节能材料方面的研究。

Biography：YANG Guang (1990—), Male, Master graduate student, Research focus: building erergy 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, Professor, Ph. D., Research focus: functional materials.

炎热的夏季，人们通过空调和风扇等方式降低室内温度，进一步增加了建筑能耗，并加剧了热岛效应[1]，为此，建筑节能材料的研究和应用应运而生[2—3]。目前已大规模应用的建筑节能材料（如保温砂浆和墙体保温板）存在较多缺陷[4—5]，削弱了其节能降耗的作用，进而限制了其进一步应用。建筑节能涂层是一种功能型建筑外墙涂层，由于拥有较高的近红外反射率和红外发射率，可以起到一定的隔热、降温和节能的作用[6—7]，日渐成为关注的焦点。

国内外科研工作者致力于建筑节能涂层方面的研究，并取得了一定的成果。文献[8—9]研究了建筑节能涂层应用于夏热冬冷地区的节能实效，阐述了建筑用反射隔热涂层的隔热节能机理，并为反射隔热涂层的采暖空调能耗模拟和节能效果评估提供了一定的理论支持。文献[10]制备了黄、灰和棕色系的建筑节能涂层，并和同色系的市售普通隔热涂层进行性能对比，结果表明所制备的灰色系建筑节能涂层表面温度比同色系市售普通隔热涂层低 6~7 ℃，隔热性能显著。文献[11—12]制备了两种具有较高近红外反射率的黑色新型颜料，对所制备的颜料进行了系类表征，并探讨了最佳制备工艺，为人造颜料添加了“新成员”。

建筑节能涂料的主要光学性能，如全波段（400~2500 nm，占太阳光谱的 95%）反射率、近红外波段（700~2500 nm，占太阳光谱的 45%）反射率和 8~14 μm 波段红外发射率，受涂层材料本身性能和制备工艺的影响较大，然而关于建筑节能涂层的制备工艺对涂层光学性能的影响却少有报道。以自制的深棕色建筑节能涂层为研究对象，着重研究了其光学性能的主要影响因素，如固化温度、黏度、表面光泽度和厚度，旨在为建筑节能涂层的实际应用提供一定的借鉴意义。

1　实验

1.1　主要实验原料

苯丙乳液，601，德国巴斯夫有限公司，其性能参数如表 1 所示；铁锌铬棕，B3301，湖南巨发科技有限公司；成膜助剂醇酯十二，美国伊斯曼有限公司；分散剂 BYK-163，德国毕克化学有限公司；润湿剂 PE-100，广州润宏化工有限公司；消泡剂 L-1311，美国亚什兰有限公司；增稠剂 SN-612，日本诺普科集团有限公司。以上均为工业品。去离子水，实验室自制。建筑节能涂料基础配方如表 2 所示。

表 1　苯丙乳液的性能参数

Tab.1 Property parameters of styrene-acrylic emulsion

固含量/%	T_g /℃	最低成膜温度/℃	平均粒径/μm	类型	pH
45±2	63±1	20	0.2~0.3	阴离子	8

表 2　建筑节能涂料基础配方

Tab.2 Basic formulation of building energy saving coatings

材料	苯丙乳液	铁锌铬棕	成膜助剂	分散剂	润湿剂	消泡剂	增稠剂	去离子水
质量/g	500	100	9~12	3 ~ 9	3 ~ 9	适量	适量	100

1.2　建筑节能涂层的制备

向装有一定量苯丙乳液的烧杯中，加入定量的颜料色浆（铁锌铬棕和去离子水质量比为 1:1）、适量的分散剂和润湿剂，控制砂磨机转速为 800 r/min，研磨混合均匀后，加入适量消泡剂，调节多功能分散机转速至 400 r/min，低速搅拌 0.5 h，加入不同量增稠剂至预定的黏度后过滤出料。为获得不同光泽度的涂层，在铝板（100 mm×80 mm×1 mm）表面按照 GB/T 1727—1992《漆膜一般制备法》分别进行刮涂、刷涂和喷涂。其中喷涂的操作方法为：称取一定量的上述涂料注入喷涂装置中，控制适当的喷涂压力（0.3 MPa），保持喷枪与铝板垂直相距 300 mm，均匀喷涂涂料，将涂层在设定的温度下固化。挑选合适厚度的涂层进行性能测试。

1.3　仪器与表征

采用德国 NETZSCH 公司的 STA-449C 型差示扫描量热仪测量涂料的固化时间。采用日本日立公司的 U-4100 型紫外/可见光/近红外分光光度计测量涂层的全波段和近红外波段反射率，分别记为 TSR 和 NIR，参比白板为 $BaSO_4$。采用北方驰宏光电有限公司的 HWF-2 型红外发射率测量仪测量涂层的 8~14 μm 波段红外发射率。采用上海魅宇仪器设备有限公司的 QND-4 型黏度计测量涂料体系的黏度。采用天津光学仪器厂的 XGP 型镜向光泽度仪测量涂层的 60°光泽度。采用德国尼克斯的 QNIX-4500 型涂层测厚仪测量涂层的干膜厚度。

2　结果与讨论

2.1　固化温度

2.1.1　固化温度对涂层固化时间的影响

本文研究的建筑节能涂料属于水性涂料体系，而水性涂料体系一般选用低温固化[13]。为此，本文选择 5 种固化温度，分别为 25、45、65、85、105 ℃。对于固化反应来说，要达到某一固化度有两种途径，即延长低温固化时间和提高固化温度。图 1 是建筑节能涂料体系的等温 DSC 曲线，由图 1 可知，5 种固化温度条件下，涂层的固化时间分别约为 180、90、40、25、10 min，由此可见，提高涂料体系的固化温度可明显加快涂层的固化速度。

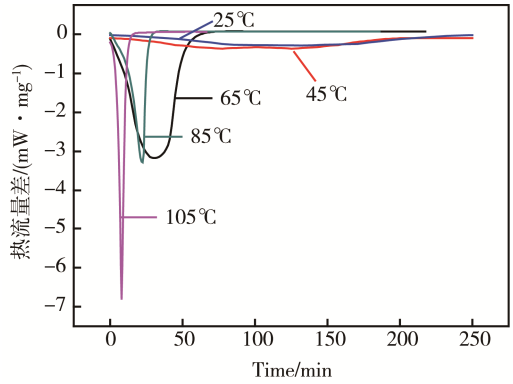


图 1　涂料体系的等温 DSC 曲线

Fig.1 DSC curves of coating systems at different temperatures

2.1.2　固化温度对涂层反射率的影响

对不同固化温度条件下固化的涂层进行全波段/近红外反射率测试，结果如图 2 所示。由图 2 可知，固化温度对涂层的全波段反射率和近红外反射率均有一定的影响，具体表现为：随着固化温度的增大，涂层的全波段反射率和近红外反射率均呈现出先增加后减少再增加的趋势。这是因为，随着固化温度的升高，涂料中的填料与成膜基料结合更紧密，使涂层孔隙率降低，减少了孔隙产生的散射，因此反射率增加。但固化温度过高使涂层因固化过快而重新产生较多的孔隙，增大了散射，降低了反射率。为使涂层获得最佳的反射性能，涂层的固化温度以 65 ℃为宜，此时涂层的全波段反射率和近红外反射率分别为 46.24%和 52.28%。

2.1.3　固化温度对涂层红外发射率的影响

表 3 为不同固化温度下涂层的 8~14 μm 波段红外发射率，由表 3 可知，固化温度对涂层的红外发射率基本没有影响。涂料在低温固化过程中，氧化反应对填料的性能变化影响较小，即随着固化温度的改变，填料对涂层的红外发射率几乎没有影响，主要影响的是成膜基料，即本文中的苯丙清漆[13]。为此，对不同固化温度条件下的苯丙清漆进行红外光谱测试，结果如图 3 所示。由图 3 可知，对于不同固化温度条件下的苯丙清漆，其红外光谱曲线基本趋于一致，说明固化温度对苯丙清漆的红外吸收影响很小，继而进一步证实固化温度对涂层红外发射率的影响较小。因此，实际应用中，涂层的固化温度仍以 65 ℃为宜。

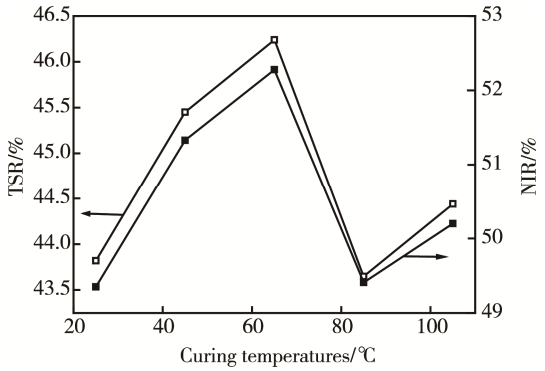


图 2　不同固化温度涂层的反射率

Fig.2 Reflectance of coatings at different curing temperatures

表 3　不同固化温度涂层的红外发射率

Tab.3 Infrared emissivity of coatings at different curing temperatures

固化温度/℃	固化时间/min	红外发射率
25	180	0.90
45	90	0.90
65	40	0.91
85	25	0.90
105	10	0.91

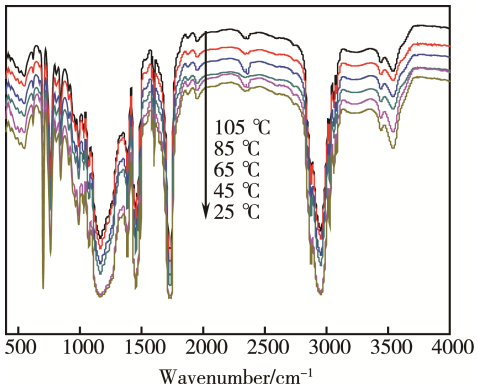


图 3　不同固化温度苯丙乳液的红外光谱图

Fig.3 FT-IR spectra of styrene-acrylic emulsion at different curing temperatures

2.2　黏度

2.2.1　黏度对涂层反射率的影响

对不同黏度的涂料体系固化后的涂层进行了全波段/近红外反射率测试，结果如图 4 所示。由图 4

可知，黏度也可影响涂层的全波段反射率和近红外反射率，随着涂料体系黏度的增加，涂层的全波段反射率和近红外反射率均有一定程度的增加。当涂料体系的黏度大于 34 mm^2/s 后，涂层的全波段反射率和近红外反射率基本不再增加。当涂料体系的黏度为 34 mm^2/s时，涂层的全波段反射率和近红外反射率最大，分别为 45.68%和 51.80%，此时增稠剂用量约为涂料体系总质量的 1%。

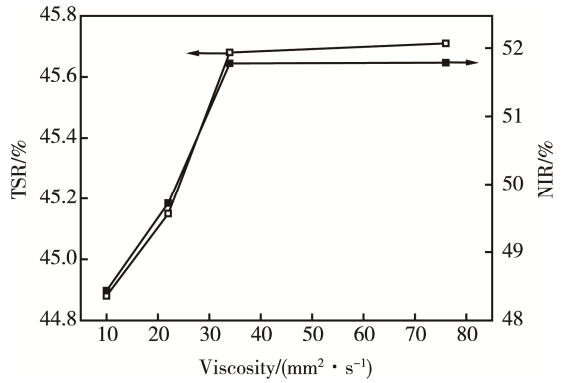


图 4　不同黏度涂层的反射率

Fig.4 Reflectance spectra of coatings with different viscosity

结合涂料的固化过程，分析涂料体系的黏度影响涂层近红外反射率的原因。涂层在固化过程中颜料会发生不同程度的沉降，而颜料的沉降速率会直接影响其在涂层中的分布状态，而在不同涂料黏度体系中，颜料的沉降速率相差较大，其沉降速率和涂料黏度可由 Stokes 定律[14]得出：

$$U_0 = \frac{2R_c^2 g(\rho_c - \rho_s)}{9\eta_s} \tag{1}$$

式中：U_0 为颜料的沉降速率；R_c 为颜料的平均粒径；ρ_c 和 ρ_s 分别为颜料和基料的密度；η_s 为涂料黏度。由此可知，若忽略增稠剂质量对基料密度的影响，随着涂料黏度的增大，颜料的沉降速率降低。相对于低黏度涂料，高黏度涂料固化后，颜料可以较均匀地分布在涂层表面，不至于沉积在涂层底部，减少了基料对近红外光的吸收，也可增大颜料对其反射。

2.2.2　黏度对涂层红外发射率的影响

测试了不同黏度涂料体系固化后的涂层的 8~14 μm 波段红外发射率，结果如表 4 所示。由表 4 可知，随着增稠剂添加量的增加，涂料黏度逐渐增大，当添加量超过 1%时，增大梯度迅速变大，当增稠剂添加量为 1.5%时，涂料黏度最大为 76 mm^2/s。涂料体系的黏度基本不会对涂层 8~14 μm 波段的红外发射率产生影响，不同黏度涂料体系涂层的 8~14 μm 波段红外发射率均保持在较高水平，不低于 0.90，主要原因是涂层中的颜料和苯丙乳液的 8~14 μm 波段红外发射率均较高，进而使涂层的红外发射率较高。

表 4　不同黏度涂层的红外发射率

Tab.4 Infrared emissivity of coatings with different viscosity

增稠剂用量/%	涂料体系黏度/($mm^2 \cdot s^{-1}$)	涂层红外发射率
0	10	0.90
0.5	22	0.90
1.0	34	0.91
1.5	76	0.91

2.3　表面光泽度

2.3.1　表面光泽度对涂层反射率的影响

测试了不同光泽度涂层的全波段/近红外反射率，结果如图 5 所示。由图 5 可知，涂层的光泽度也对涂层的全波段反射率和近红外反射率产生一定的影响，随着涂层光泽度的增大，涂层的近红外反射率呈现出类似线性的增加，当涂层光泽度为 36 时，涂层的全波段和近红外反射率分别为 46.34%和 51.82%。

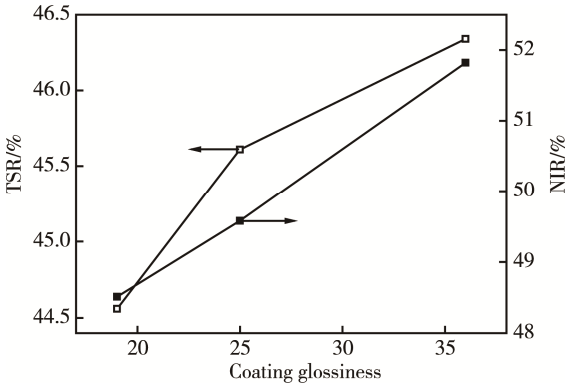


图 5　不同光泽度涂层的反射率

Fig.5 Reflectance of coatings with different coating glossiness

物体表面光泽度与红外反射率存在以下关系[15]：

$$\rho_r = \rho_p \exp[-(\frac{4\pi R_a}{\lambda})^2] \tag{2}$$

式中：ρ_r 为相对粗糙表面的反射率；ρ_p 为相对光滑表面的反射率；R_a 为表面光泽度；λ 为对应波段的波长。由此可知，当表面光泽度降低时，涂层表面的反射率就会下降，原理如图 6 所示。

2.3.2　表面光泽度对涂层红外发射率的影响

测量了不同光泽度涂层 8~14 μm 波段的红外发射率，结果如表 5 所示。由表 5 可知，涂层红外发射率随着表面光泽度的增大而略微减小，但并非影响涂层红外发射率的主要因素，与文献[16]结论一致。这是因为光线照射在凹凸不平的表面，发生多次反射，涂层会多次吸收红外线，增加了涂层对红外线的吸收。根据基尔霍夫定律和能量守恒定律，对于热平衡条件下，吸收率高的物体必然有高发射率，即物体的

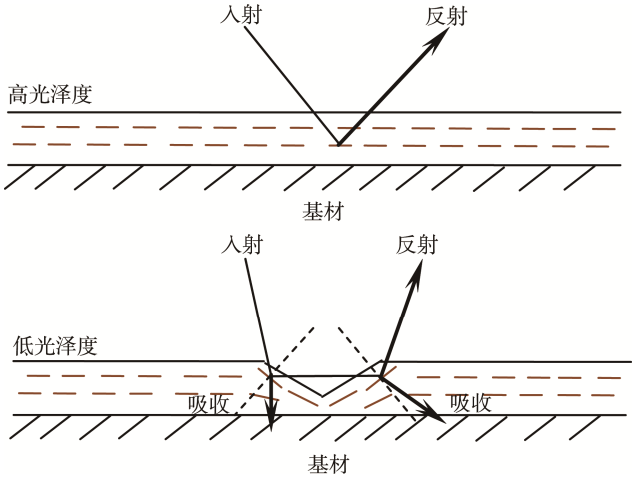


图 6　涂层光泽度对红外反射率影响

Fig.6 Influence of surface glossiness on infrared reflectance

表 5　不同光泽度涂层的红外发射率

Tab.5 Infrared emissivity of coatings with different coating surface glossiness

表面光泽度	制备方法	红外发射率
19	刷涂	0.91
25	刮涂	0.90
36	喷涂	0.90

发射率会随着光泽度的降低而升高。

2.4　厚度

2.4.1 厚度对涂层反射率的影响

测试了不同厚度涂层的全波段/近红外反射率，结果如图 7 所示。由图 7 可知，涂层厚度对涂层全波段反射率和近红外反射率均有一定影响，具体表现为：随着涂层厚度的增加，涂层全波段和近红外反射率呈现先增加后基本不变的趋势。当涂层厚度小于 200 μm 时，随着涂层厚度的增大，涂层全波段反射率和近红外反射率随之增加；当涂层厚度超过 200 μm 后，涂层的全波段反射率和近红外反射率基本不会有较大的变化。实际应用时，涂层厚度以 200 μm 为宜。

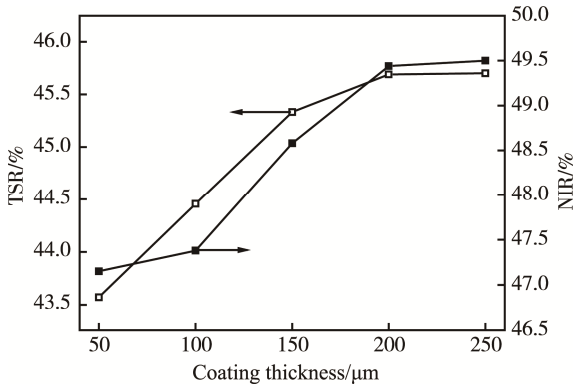


图 7　不同厚度涂层的反射率

Fig.7 Reflectance of coatings with different coating thickness

2.4.2　厚度对涂层红外发射率的影响

测试了不同厚度涂层 8~14 μm 波段的红外发射率，结果如表 6 所示。由表 6 可知，涂层厚度对涂层 8~14 μm 波段的红外发射率影响较小，只是在厚度超过 150 μm 后，发射率略微增加。原因可以由式（3）解释[17]：

$$\varepsilon(\lambda)=\frac{(1-\rho_{\mathrm{e}})(1-\rho_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{-2Ad})}{1-\rho_{\mathrm{e}}\rho_{\mathrm{s}}\mathrm{e}^{-2Ad}} \tag{3}$$

式中：ρ_{c} 为涂层的反射率；ρ_{s} 为基材的反射率；d 为涂层厚度；A 为吸收系数。由此可知，涂层厚度逐渐增大时，发射率会略微增加，而当涂层厚度趋于无穷大时，涂层的发射率与基材无关。实际应用时，涂层厚度以 200 μm 为宜。

表 6　不同厚度涂层的红外发射率

Tab.6 Infrared emissivity of coatings with different coating thickness

涂层厚度/μm	红外发射率
50	0.90
100	0.90
150	0.91
200	0.91
250	0.91

3　结论

固化温度对涂层红外发射率基本无影响，但可明显提高涂层的固化速度，缩短固化时间。实际应用时，固化温度以 65 ℃为宜。

适宜增加增稠剂用量可增加涂层的反射率，但对涂层的红外发射率影响不大，实际应用时，增稠剂用量以涂料体系总质量的 1%为宜。

随着涂层光泽度的增大，涂层的反射性能增强，红外发射率略微降低，但并非影响红外发射率的主要因素。实际应用时，涂层制备以喷涂的方式为宜。

适宜增大涂层的厚度可增加涂层的反射率和红外发射率，实际应用时，涂层厚度以 200 μm 为宜。

参考文献：

[1] ZHONG K, FU H, KANG Y, et al. Indoor Thermal Conditions and the Potential of Energy Conservation of Naturally Ventilated Rooms in Summer[J]. Energy and Buildings, 2012, 55(12):183—188.

[2] 谭瑾. 浅谈居住建筑室内装饰中节能材料的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(S): 105—107.

TAN Jin. Energy-saving Materials in Indoor Decoration of Residential Building [J]. Journal of Liaoning Technical

University(Natural Science), 2011, 30(S):105—107.

[3] 杨闯. 节能门窗的材料性能、热工计算及模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YANG Chuang. Material Properties, Thermal Calculation and Simulation Studies of Energy-saving Windows[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[4] 何燕, 张雄, 管建. 金属氧化物颜料对隔热涂料发射率和反射率的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 784—789.
HE Yan, ZHANG Xiong, GUAN Jian. Influence of Metallic Oxide Pigment on Emissivity and Solar Reflectance of Insulation Coating[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 784—789.

[5] 张永娟, 沈中林, 张雄. 金属颜料对保温涂料发射性和反射性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1855—1860.
ZHANG Yong-juan, SHEN Zhong-lin, ZHANG Xiong. Influence of Metal Paint on Emissivity and Solar Reflectance of Insulation Coating[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(12): 1855—1860.

[6] SHI Zhi-yang, ZHANG Xiong. Analyzing the Effect of the Longwave Emissivity and Solar Reflectance of Building Envelopes on Energy Saving in Building in Various Climate[J]. Solar Energy, 2011, 85(1):28—32.

[7] SANTAMOURIS M, SYNNEFA A, KARLESSI T. Using Advanced Cool Materials in the Urban Built Environment to Mitigate Heat Islands and Improve Thermal Comfort Conditions[J]. Solar Energy, 2011, 85: 3085—3102.

[8] 冯梦萍. 建筑用反射隔热涂料节能效果研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
FENG Meng-ping. Energy Saving Effect of Solar Heat Reflecting Insulation Coatings for Buildings[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2015.

[9] 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.

[10] 曹延鑫, 王晓燕, 冯喆, 等. 热反射颜料对彩色反射隔热涂料的影响[J]. 涂料工业, 2014, 44(4): 11—16.
CAO Yan-xin, WANG Xiao-yan, FENG Zhe, et al. Influence of Solar Reflective Pigments on Property of Colorful Thermal Insulation Coating[J]. Paint & Coatings Technology, 2014, 44(4):11—16.

[11] MA Peng-jun, GENG Qing-fen, GAO Xiang-hu, et al. $Cu_{1.5}Mn_{1.5}O_4$-based Ceramic Spectrally Selective Coatings for Efficient Solar Absorber Applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 675: 423—432.

[12] 张潇予, 张玉军, 龚红宇, 等. 纳米高近红外反射颜料制备工艺研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(3): 482—486.
ZHANG Xiao-yu, ZHANG Yu-jun, GONG Hong-yu, et al. Preparation of High Near-infrared Reflective Nano Pigments[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(3): 482—486.

[13] 黄大庆, 王智永, 刘俊能. 偶联剂对吸波涂层力学性能的影响及其作用机理的研究[J]. 材料工程, 1999, 28(9): 28—31.
HUANG Da-qing, WANG Zhi-yong, LIU Jun-neng. Effects of Coupling Agents on Mechanical Properties of Radar Absorbing Coatings and Its Mechanism[J]. Journal of Materials Engineering, 1999, 28(9): 28—31.

[14] 刘登良. 涂料工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
LIU Deng-liang. Paint Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

[15] 张建奇. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.
ZHANG Jian-qi. Infrared Physics[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2013.

[16] POULSEN P, AULT S K. New Method of High-precision Thermometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(9): 94901—94906.

[17] 徐文兰, 罗宁胜, 张珉, 等. 非均匀涂层的热辐射[J]. 红外与毫米波学报, 1990, 9(5): 384—388.
XU Wen-lan, LUO Ning-sheng, ZHANG Min, et al. Thermal Radiation of Inhomogeneous Coating[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(5): 384—388.