

复合型建筑节能涂层的制备及性能研究

邓安仲^a, 杨光^b

(中国人民解放军后勤工程学院 a.军事工程管理学系, b.化学与材料工程系, 重庆 401331)

摘要: **目的** 提高建筑节能涂层的隔热性能, 为多种隔热机理于一体的建筑节能涂层提供借鉴意义。**方法** 自制复合乳液作为复合涂层的粘合剂, 将含空心微珠填料的涂层做底面涂层, 含镍钛黄颜料的涂层做表面涂层, 制备了底-表面复合型建筑节能涂层, 并探究了镍钛黄掺量对涂层性能的影响。采用 X 射线衍射仪、紫外/可见光/近红外分光光度计、长波发射率仪、精密色差仪和扫描电子显微镜对镍钛黄和涂层性能进行表征, 采用红外灯模拟太阳热源测量涂层的隔热性能。**结果** 镍钛黄晶体结构为金红石型, 且具有优异的可见光和近红外反射特性, 其在可见光和近红外波段的平均反射率达 72.61%。镍钛黄掺量对复合涂层在可见光和近红外波段平均反射率具有一定的影响, 当镍钛黄掺量为 20% 时, 复合涂层在近红外波段的平均反射率最高为 66.75%, 此时涂层在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的长波发射率分别为 0.95 和 0.94, 试板背面平衡温度比仅含相同掺量镍钛黄的表面涂层试板背面平衡温度降低 2.4%, 隔热性能得到提升。**结论** 采用阻隔-反射型/底-表面复合结构可以提升建筑节能涂层的隔热性能, 实际应用时颜料掺量以 20% 为宜。

关键词: 建筑节能; 复合涂层; 反射率; 发射率; CIE 色度值; 镍钛黄

中图分类号: TG174.446 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0121-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.021

Preparation and Properties of Composite Type Building Energy-saving Coatings

DENG An-zhong^a, YANG Guang^b

(a. Department of Military Engineering Management,

b. Department of Chemistry and Materials Engineering, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: The work aims to improve insulation performance of building energy-saving coatings and providing certain reference significance for building energy saving coatings featuring in multiple thermal insulation mechanisms. Undersurface/surface composite building energy-saving coatings were prepared with hollow glass micro-bead as undersurface coatings, coatings containing nickel titanium yellow as surface coatings and self-made composite emulsion as adhesive. What's more, effects of content of nickel titanium yellow on properties of coatings were investigated. Properties of nickel titanium yellow and coatings were characterized using XRD, ultraviolet/visible/near-infrared spectrophotometer, infrared emissivity measurement device, precise colorimeter and scanning electron microscope. Infrared lamp was used to simulate sunlight heat source and analyze insulation performance of the coatings. Rutile nickel titanium yellow was a rutile-type structure exhibiting excellent reflective characteristic in visible light and near-infrared light, its average reflectance in visible light and near-infrared band was 72.61%. The average reflectance of coatings in visible light and near-infrared band was influenced by content of nickel titanium yellow to a certain extent. Provided that nickel titanium yellow was 20%, near infrared average reflectance of the composite

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-01-06

Received: 2016-12-01; Revised: 2017-01-06

作者简介: 邓安仲 (1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事功能材料研究。

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

coatings could be up to 66.75%. Meanwhile, long wave emissivity of coatings in wave band of 3~5 μm and 8~14 μm was 0.95 and 0.94, respectively. Equilibrium temperature on reverse side of the composite coatings was 2.4% lower than that of surface coatings with the same content of nickel titanium yellow. Thus, insulation performance of building energy-saving coatings can be improved by using barrier-reflection type/subface-surface composite structure, optimum content of the pigment shall be 20% in practical application.

KEY WORDS: building energy-saving; composite coating; reflectance; emissivity; CIE colorimetric value; nickel titanium yellow

太阳有着巨大的能量,每秒有 $1.765 \times 10^{17} \text{ J}$ 的能量到达地球^[1],巨大的能量为人类的生产生活提供了必备条件,但强烈的热辐射也给人类带来诸多不便^[2],建筑物室内环境和能耗很大程度上也受太阳热辐射的影响^[3-4]。在经济高速发展的今天,建筑节能已是提高社会能源利用效率的关键^[5]。为此,科学工作者对建筑节能材料展开了研究^[6-8]。然而,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^[9],降低了其隔热节能效果。建筑节能涂料是一种薄层功能涂料,由于具有较高近红外反射率和红外发射率成为人们关注的焦点^[10-11]。

目前关于建筑节能涂料的研究多集中在成膜基料的选择^[12]、颜填料复配^[13]、新型颜料的开发^[14]等方面。建筑节能涂料按照节能机理分为三种类型,即阻隔型、反射型和辐射型^[15],然而报道的建筑节能涂料多以单一类型的涂料居多,关于两种及以上类型的复合型建筑节能涂层方面的报道较少。

镍钛黄属于复合无机颜料(Complex Inorganic Color Pigment),因其具有较高的近红外反射率,也被称为“冷颜料”^[16-17]。用空心微珠掺量为 5% 的阻隔型涂层为底面涂层,不同掺量镍钛黄涂层为表面涂层,制备了复合型建筑节能涂层(简称复合涂层,下同),探究了镍钛黄掺量对复合涂层性能的影响,旨在为制备兼具多种隔热机理的复合型彩色建筑节能涂层提供一定的借鉴意义。

1 实验

1.1 原料与仪器

基料自制,其性能参数如表 1 所示。KH560, 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股份有限公司;空心微珠,VS-5500,上海向岚化工有限公司;镍钛黄,湖南巨发科技有限公司;增稠剂,SN-612,日本诺普科化学有限公司;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;消泡剂,L-1311,美国亚什兰有限公司;去离子水实验室自制;铝板,重庆鸿发不锈钢有限公司;石棉水泥板,重庆科盾实

验器材有限公司。实验基础配方如表 2 所示。

表 1 硅溶胶-苯丙复合乳液性能参数
Tab.1 Property parameters of nano silica sol styrene acrylic composite emulsion

固含量/%	$T_g / ^\circ\text{C}$	MFT(最低成膜温度)/ $^\circ\text{C}$	平均粒径/ μm	类型	pH
45 \pm 2	63 \pm 1	20	0.2~0.3	阴离子	8

表 2 节能涂料基础配方
Tab.2 Basic formulation of energy saving coating

原料	底面涂料/g	表面涂料/g
复合乳液	500	500
镍钛黄	0	25~100
成膜助剂	8	5
空心微珠	25	0
分散剂	1~2	4~6
润湿剂	1~2	2~4
消泡剂	1~2	4~8
增稠剂	1~2	2~4

所用仪器有:X 射线衍射仪,XRD-6100,日本岛津;紫外/可见光/近红外分光光度计,U-4100,日本日立;扫描电子显微镜,S-3700,日本日立;涂层测厚仪,QNIX-4500,德国尼克斯;精密色差仪,HP-200,上海汉谱;长波发射率测量仪,HWF-2,北方驰宏。

1.2 涂层的制备

1) 基料的制备。将计量的纳米硅溶胶注入三口烧瓶后,将三口烧瓶置于 60 $^\circ\text{C}$ 水浴锅中,插入电动搅拌器、温度计、冷凝管,缓慢滴入计量的 KH560,恒温搅拌 4 h,注入计量的苯丙乳液并搅拌 2 h,加入多功能助剂调节体系 pH 至 8 左右,出料备用。

2) 基材预处理。将铝板通过砂纸十字型打磨、水洗、无水乙醇除油、烘干等步骤处理备用,将石棉水泥板通过砂纸轻微打磨除去表面尘土及杂质备用。

3) 底面涂层的制备。将底面涂料均匀刷涂在铝板和石棉水泥板表面,铝板基材测量反射率、长波发

射率、CIE 色度值, 石棉水泥板基材测量隔热性能, 均置于室温条件下 7 d 至完全干燥, 固化后底面涂层干膜厚度为 250 μm 左右。

4) 复合涂层的制备。控制适当的喷涂压力和喷速, 保持喷枪与铝板垂直且相距 30 cm, 分别在铝板基材和石棉水泥板基材的底面涂层上均匀喷涂涂料, 均置于室温条件下 7 d 至完全干燥, 固化后复合涂层干膜厚度为 300 μm 左右。

1.3 测试与表征

采用 XRD 衍射仪分析镍钛黄的物相晶型结构, 扫描范围为 10°~80°, 扫描速度为 4 (°)/min, 步长 0.02 (°)/s。采用紫外/可见光/近红外分光光度计测量镍钛黄及涂层的紫外/可见光/近红外反射率, 测试前使用 BaSO₄ 校准基线。采用长波发射率测量仪测量涂层在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的长波发射率。采用精密色差仪分析涂层的色度值。采用涂层测厚仪测量涂层的干膜厚度。参照 JG/T 235—2014《建筑反射隔热涂料》^[18], 自制隔热性能测试装置, 如图 1 所示。采用 275 W 红外灯模拟太阳光进行照射实验, 测试时热电偶每隔 0.5 min 记录一次样板的背面温度, 直到样板背面温度达到平衡, 待样板冷却至室温, 交换两块试板的位置再测试一次, 保证两次误差不超过 0.5 ℃。以时间为横轴、温度为纵轴作时间-温度变化曲线, 分析样板的隔热性能。样板的平衡温度越低, 则涂层的隔热节能效果越好, 反之则越低。

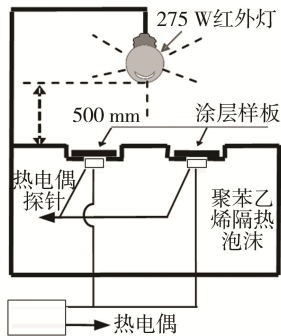


图 1 隔热性能测试装置
Fig.1 Device of insulation performance testing

2 结果与讨论

2.1 镍钛黄性能分析

2.1.1 XRD 分析

镍钛黄的 XRD 衍射谱图如图 2 所示。由图 2 可知, 镍钛黄分别在 27.40°、36.21°、38.00°、41.34°、54.44°、56.76°、69.12°处出现尖锐的特征衍射峰且基本无杂峰, 对比粉末衍射卡片 JCPDS:73-1765, 可知其为 Ni、Ti、Sb、O 四相掺杂氧化物, 主晶相为 NiTiSbO₆, 晶型为金红石型, 且形成的晶型较稳定。

晶型的形成是因为镍钛黄颜料通过高温煅烧所致。颜料经过高温煅烧后发生了高温固相反应, 因此形成的离子掺杂中杂质较少, 颜料晶型稳定。

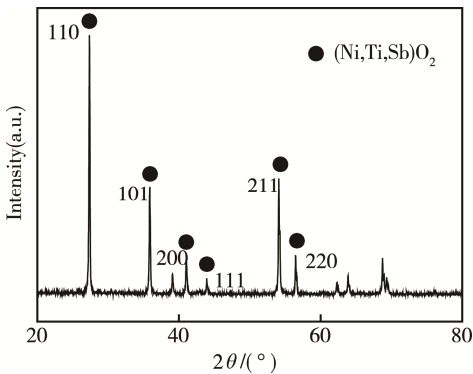


图 2 镍钛黄的 XRD 衍射谱图
Fig.2 XRD patterns of nickel titanium yellow

2.1.2 反射率分析

图 3 为镍钛黄粉末在紫外/可见光/近红外波段 (200~2500 nm) 的反射率曲线。由图 3 可知, 对于紫外波段 (200~380 nm), 由于紫外光的高透射及高能量, 镍钛黄在此波段基本无反射, 表现为较强的吸收。对于可见光波段 (380~780 nm), 镍钛黄在 580 nm 处存在较强的反射峰, 在 708 nm 处存在吸收峰。产生吸收峰的原因是镍钛黄呈现明亮的淡黄色, 吸收了较多的黄色光所致。对于近红外波段 (780~2500 nm), 镍钛黄具有优异的近红外反射特性, 其近红外反射率随波长的增加而呈现增加趋势, 在波长 906 nm 和 1936 nm 处产生明显的反射峰。通过对镍钛黄反射率曲线的分析处理, 得出镍钛黄紫外/可见光/近红外波段平均反射率, 如表 3 所示, 镍钛黄的近红外平均反射率为 77.21%。

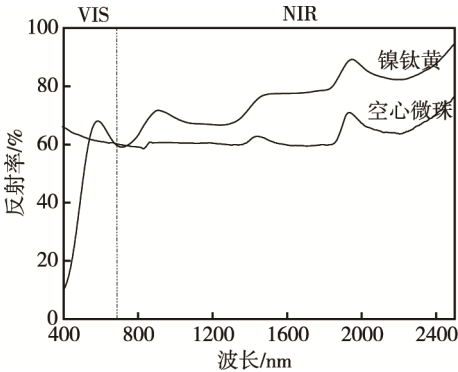


图 3 镍钛黄的可见光/近红外反射曲线
Fig.3 VIS/NIR reflectance curves of nickel titanium yellow

表 3 镍钛黄的可见光/近红外平均反射率
Tab.3 VIS/NIR average reflectance of nickel titanium yellow

颜料	平均反射率/%		
	TSR	VIS	NIR
镍钛黄	72.61	49.66	76.44

2.2 涂层性能分析

2.2.1 反射率分析

测试了底面涂层、表面涂层以及复合涂层的紫外/可见光/近红外波段(200~2500 nm)反射率,结果如图4所示。对比图3和图4可知,表面涂层和复合涂层在可见光波段(380~780 nm)的反射率曲线变化趋势与镍钛黄在可见光波段趋于一致,均在580 nm左右存在较强的反射峰,在708 nm左右存在较强的吸收峰。在近红外波段(780~2500 nm),表面涂层反射率曲线变化趋势与底面涂层变化趋势趋于一致,在780~1650 nm波段的反射率较高,但在1650~2500 nm波段的反射率下降,从而导致整个近红外波段反射率降低。在紫外波段,底面涂层和表面涂层以及复合涂层的反射率均较低。

通过计算得出底面涂层和表面涂层以及复合涂层的紫外/可见光/近红外的平均反射率,结果如表4所示。由表4可知,在可见光波段,相同镍钛黄掺量的复合涂层的可见光平均反射率高于表面涂层,原因是底面涂层与表面涂层的可见光平均反射率相互叠加,导致复合涂层的可见光平均反射率增加;在近红外波段,镍钛黄掺量为20%时,复合涂层近红外平

均反射率最高,为66.75%,比表面涂层低4.01%,原因是底面涂层近红外平均反射率较低,为46.14%,略微降低了复合涂层的近红外平均反射率;在紫外波段,复合涂层的紫外平均反射率与表面涂层相差不大。

表4 表面涂层和复合涂层的可见光/近红外平均反射率
Tab.4 Average VIS/NIR reflectance of surface/composite coatings

涂层类型	镍钛黄掺量	平均反射率		
		TSR	VIS	NIR
底面涂层		46.31	54.23	46.14
表面涂层	5	52.83	51.19	58.00
	10	56.59	45.73	64.35
	15	60.47	55.01	67.40
	20	62.94	59.83	69.56
复合涂层	5	52.11	56.12	55.92
	10	58.09	57.85	63.58
	15	59.24	59.83	64.61
	20	60.94	60.25	66.75

2.2.2 长波发射率分析

测试了底面涂层、表面涂层和复合涂层在3~5 μm 和8~14 μm 波段的长波发射率,结果如表5所示。由表5可知,不同镍钛黄掺量对两种涂层在3~5 μm 和8~14 μm 波段的长波发射率基本无影响,两种涂层在两个波段范围内的长波发射率始终保持在较高水平,不低于0.92,因为表面涂层中的镍钛黄和基料以及底面涂层在两个波段范围内的长波发射率均较高。对于表面涂层,相同镍钛黄掺量下的涂层在3~5 μm 波段的长波发射率略高于8~14 μm 波段的长波发射率,而对于复合涂层则相反。3~5 μm 和8~14 μm 波段属于中红外波段的“大气窗口”^[19],高红外发射率有助于将涂层吸收的太阳热能以热辐射的方式散掉,产生一定的降温节能效果^[20]。

表5 底面涂层、表面涂层和复合涂层的长波发射率
Tab.5 Long wave emissivity of undersurface and surface/composite coatings

涂层类型	波段/ μm	长波发射率			
		镍钛黄 5%	镍钛黄 10%	镍钛黄 15%	镍钛黄 20%
表面涂层	3~5	0.94	0.94	0.94	0.95
	8~14	0.93	0.93	0.93	0.93
复合涂层	3~5	0.92	0.95	0.95	0.95
	8~14	0.94	0.94	0.94	0.94

2.2.3 CIE 色度值分析

利用精密色差仪测试了表面涂层和复合涂层的CIE 1976 (L^* 、 a^* 、 b^* 、 c^*)色度值,结果列于表6。从表6可知,随着镍钛黄掺量的增加,两种涂层的

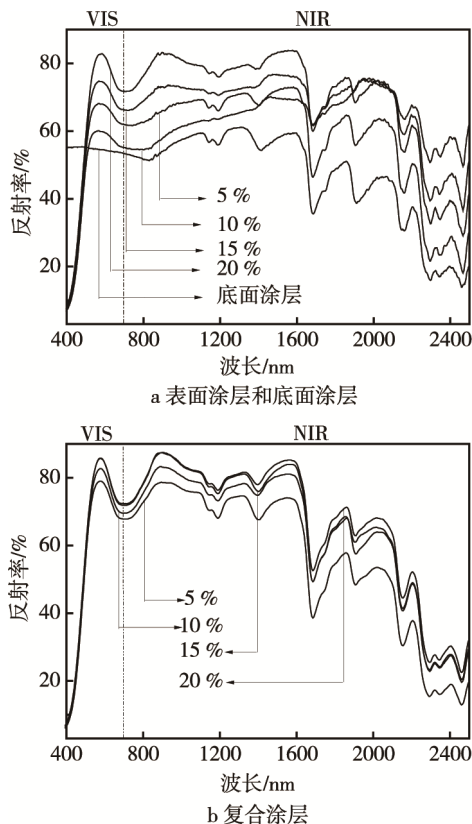


图4 底面涂层和表面涂层/复合涂层的可见光/近红外反射率曲线

Fig.4 VIS/NIR reflectance curves of undersurface and surface/composite coatings: a) surface/undersurface coating, b) composite coating

L^* 、 b^* 和 c^* 均逐渐增大, a^* 逐渐减小, 表明镍钛黄掺量的增加可以增大涂层明度, 并使涂层外观的黄色相加深, 绿色相略微加深, 涂层的色彩饱和度渐佳。相同镍钛黄掺量的复合涂层的明度高于表面涂层, 原因是底面涂层中的空心微珠增强了复合涂层的明度。

表 6 表面涂层和复合涂层的 CIE 色度值
Tab.6 CIE colorimetric data of surface/composite coatings

涂层类型	镍钛黄掺量/%	色度值			
		L^*	a^*	b^*	c^*
表面涂层	5	78.74	-5.71	36.29	36.74
	10	79.30	-5.76	36.96	37.41
	15	86.36	-6.33	44.26	44.71
	20	88.05	-6.09	44.67	45.08
复合涂层	5	85.49	-6.51	48.76	49.19
	10	87.98	-6.70	50.13	50.58
	15	89.38	-6.51	51.07	51.48
	20	89.57	-6.48	50.85	51.26

2.2.4 SEM 图分析

图 5 是底面涂层和镍钛黄掺量为 20%的复合涂层断面的扫描电子显微镜图片。由图 5 可知, 对于底面涂层 (图 5a), 可见球形的空心微珠被复合乳液紧密包裹, 由于空心微珠密度较小, 在浮力作用下分布在涂层上方, 形成了致密的隔热层, 因此可以起到较好的隔热效果, 但由于放大倍率较小, 图中未见纳米级二氧化硅粒子。对于表面涂层 (图 5b), 均匀分布

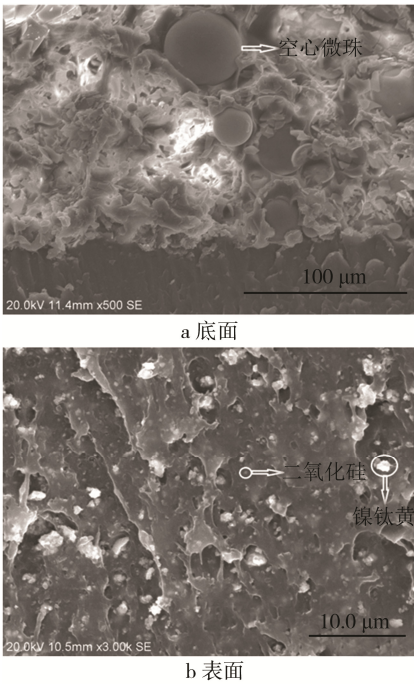


图 5 底面涂层和表面涂层的 SEM 图
Fig.5 SEM pictures of undersurface(a) and surface(b) coatings

着纳米二氧化硅粒子和镍钛黄粒子, 两种粒子均被复合乳液紧紧包围, 即使在外力 (液氮脆断) 作用下, 仍未脱离复合涂层, 符合涂层材料的要求, 因此作为建筑节能涂层, 具有较好的反射效果, 并且涂层致密减小了吸收及透射几率, 也增大了反射几率。复合涂层反射隔热原理如图 6 所示。

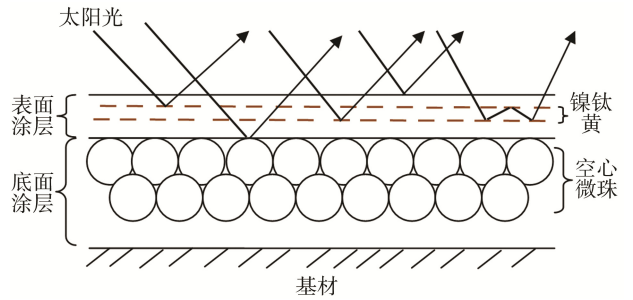


图 6 复合涂层反射隔热模型
Fig.6 Reflective insulation model of composite coating

2.2.5 隔热性能分析

测试了底面涂层 (a)、镍钛黄掺量为 20%的表面涂层 (b)、镍钛黄掺量为 20%的复合涂层 (c) 及空白石棉水泥板 (d) 的隔热性能, 结果如图 7 所示。由图 7 可知, 四块样板均在约 15 min 后达到温度平衡, 此时的温度称为平衡温度。其中 d 的平衡温度最高, 约为 72.9 °C; a 与 b 的平衡温度接近, 分别为 63.1 °C 和 62.3 °C, 比 d 低 9.8 °C 和 9.7 °C, 具有较好的隔热性能; c 的平衡温度最低, 约为 60.8 °C, 比 d 低 12.1 °C, 具有优异的隔热性能。

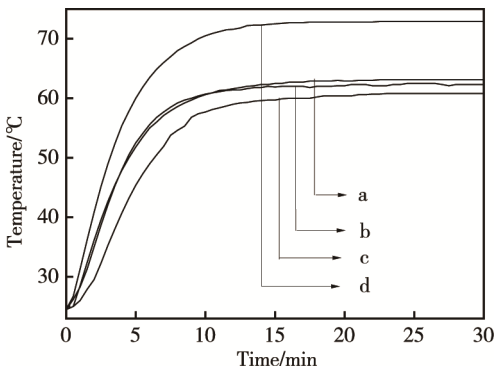


图 7 样品涂层温度变化曲线
Fig.7 Change curves of temperature of sample coatings

3 结论

金红石型的镍钛黄具有优异的近红外反射特性, 其近红外平均反射率为 77.21%。在近红外波段 (780~2500 nm), 表面涂层的反射率曲线变化趋势与底面涂层的变化趋势趋于一致。当复合涂层中的镍钛黄掺量为 20%时, 其近红外平均反射率最大可达 66.75%, 此时复合涂层试板的背面平衡温度比空白石

棉水泥板的低 12.1 ℃, 隔热性能最好。不同镍钛黄掺量下的复合涂层, 在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的长波发射率始终保持在 0.92 以上, 且基本不受镍钛黄掺量的影响。

参考文献:

- [1] 闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(S1): 47—56.
YAN Yun-fei, ZHANG Zhi-en, ZHANG Li, et al. Application and Utilization Technology of Solar Energy[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(S1): 47—56.
- [2] MICHELE F, VERIDIANA A S, VINICIUS C C L, et al. Building Energy Efficiency: An Overview of the Brazilian Residential Labeling Scheme[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 1216—1231.
- [3] ISHIHARA Y, HIRAI T, SAKURAI C, et al. Applications of the Particle Ordering Technique for Conductive Anti-reflection Films[J]. Thin Solid Films, 2002, 411: 50—55.
- [4] 万畅. 节能建筑围护结构设计与仿真应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
WAN Chang. Research on Building Envelop Design and Simulation Application of Energy-efficient Building[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [5] 黄德中, 沈吉宝. 建筑节能技术综述[J]. 太阳能学报, 2007, 28(6): 682—688.
HUANG De-zhong, SHEN Ji-bao. The Energy Saving of Building[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2007, 28(6): 682—688.
- [6] 杨辉, 杨闯, 郭兴忠, 等. 建筑节能门窗及技术研究现状[J]. 新型建筑材料, 2012(9): 84—89.
YANG Hui, YANG Chuang, GUO Xing-zhong, et al. Energy-saving Doors and Windows and Current Technology Research Status[J]. New Building Materials, 2012(9): 84—89.
- [7] 王雅丽, 田静, 李会宁, 等. 纳米 ATO 水性透明隔热涂料的制备与性能研究[J]. 涂料工业, 2014, 44(12): 12—18.
WANG Ya-li, TIAN Jing, LI Hui-ning, et al. Preparation and Properties of Nano-ATO Transparent Heat-insulation Baking Varnish[J]. Paint & Coatings Technology, 2014, 44(12): 12—18.
- [8] 沈凡, 徐慢, 王树林, 等. 磷石膏基保温砂浆的制备与性能研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 277—279.
SHEN Fan, XU Man, WANG Shu-lin, et al. On the Preparation and Performance of the Phosphogypsum Based on the Study of the Thermal Insulation Mortar[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 277—279.
- [9] 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.
- [10] 徐斌, 龙林爽, 孟宪春, 等. 不同典型气候区内建筑屋面及外墙使用隔热涂层后节能作用的分析与评价[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 670—676.
XU Bin, LONG Lin-shuang, MENG Xian-chun, et al. Analyzing and Evaluating the Effect of Thermal Insulation Coating Used in Building Roof and Exterior Walls on Building Energy-saving in Various Typical Climates[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(4): 670—676.
- [11] 沈航. 反射隔热多彩涂料的制备及性能探讨[J]. 涂料工业, 2016, 46(2): 6—12.
SHEN Hang. Preparation and Property of Waterborn Multicolor Decorative Thermal Reflective Coatings[J]. Paint & Coatings Technology, 2016, 46(2): 6—12.
- [12] 赵苏, 吕剑, 孙艳丽, 等. 外墙隔热涂料用复合苯丙乳液的研制[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 132—140.
ZHAO Su, LYU Jian, SUN Yan-li, et al. Development of Composite Acrylic Emulsion Paint for External Wall Insulation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(1): 132—140.
- [13] 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[D]. 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.
- [14] LIANG S T, ZHANG H L, LUO M T, et al. Preparation of Cr₂O₃-based Pigments with High NIR Reflectance via Thermal Decomposition of CrOOH[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2015, 8: 2646—2652.
- [15] 黄亮, 王立, 俞豪杰, 等. 节能建筑涂料研究进展[J]. 涂料工业, 2013, 43(10): 69—74.
HUANG Liang, WANG Li, YU Hao-jie, et al. Recent Research Progress in Energy-saving Architectural Coatings[J]. Paint & Coatings Technology, 2013, 43(10): 69—74.
- [16] 杜丽娜. 金红石型钛镍黄颜料制备与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
DU Li-na. Preparation and Properties of Rutile Titanium-Nickel Yellow Pigments[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [17] 张波, 崔学民. 高温自蔓延合成钛镍黄颜料机理的研究[J]. 稀有金属材料科学与工程, 2007, 36(1): 17—19.
ZHANG Bo, CUI Xue-min. Study on the Synthesis Mechanism of Titanium-Nickel Yellow Pigment by the Process of Self-propagating High-temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(1): 17—19.
- [18] JG/T 235—2014, 建筑反射隔热涂料[S].
JG/T 235—2014, Architectural Reflective Thermal Insulation Coating[S].
- [19] ISHIHARA Y, HIRAI T, SAKURAI C, et al. Applications of the Particle Ordering Technique for Conductive Anti-reflection Films[J]. Thin Solid Films, 2002, 411: 50—55.
- [20] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
ZHANG Jian-qi, FANG Xiao-ping. Infrared Physics[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Technology University Press, 2004.