涂层结构对建筑节能涂层性能的影响

杨光，邓安仲
（中国人民解放军陆军勤务学院，重庆 401331）

摘 要：目的 通过探究建筑节能涂层的最佳涂层结构，进而提升涂层的隔热和耐久性能。**方法** 将含空心微珠和二氧化钛的涂层作底漆，硅溶胶-苯丙复合涂层作面漆，探究不同种类底漆和面漆对铬绿建筑节能涂层性能的影响。采用正交试验寻求最佳底漆和面漆组合方案，对最佳组合方案涂层进行了综合性能测试，并探讨了相关机理。**结果** 在不改变涂层颜色外观的情况下，底漆可增加涂层的太阳光反射比，面漆可增大涂层的静态接触角，增强涂层的耐水性、耐沾污性和耐老化性，降低涂层污染后和人工气候老化后太阳光反射比变化率及色差。最佳涂层结构组合方案为：底漆中空心微珠和二氧化钛掺量均为5%，面漆中苯丙乳液和硅溶胶质量比为14∶1。此时涂层的太阳光反射比和隔热温差分别为0.6455和6.9 ℃，且综合性能均较好，具有一定的应用价值。**结论** 涂层结构对建筑节能涂层的隔热和耐久性能具有一定的影响，实际应用时可根据需要改变涂层结构来获得满意的性能。

关键词： 颜料；建筑节能；太阳光反射比；涂层结构；复合涂层；静态接触角；反射隔热
中图分类号： TQ630.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2017)09-0048-06
DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.008

Effects of Coating Structure on Properties of Building Energy-saving Coatings

YANG Guang, DENG An-zhong
(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: The work aims to improve thermal insulation and durability of coating by investigating optimal coating structure of building energy-saving coating. With a coating containing hollow glass micro-bead and titanium dioxide as base coat, and silica sol-styrene-acrylic composite emulsion as finishing coat, effects of different base coats and finishing coats on properties of building energy-saving coatings were investigated. Optimal combination scheme of base coat and finishing coat were obtained in method of orthogonal experiment. Comprehensive performance test was performed to the optimal combining scheme coating. What's more, relevant mechanism was disscussed. Provided that color appearance of the coatings remained the same, the base coat could improve solar reflectance of the coating while the finishing coat could increase static contact angle, water resistance, stain resistance and ageing resistance of the coating, and reduced change rate of solar reflectance and chromatic aberration of the coating after pollution and artificial ageing treatment. Optimal combination scheme of coating was, hollow glass micro-bead and titanium dioxide in base coat as 5%, and mass ratio between styrene-acrylic emulsion/silica sol as 14∶1 in finishing coat. The solar reflectance and insulation temperature difference was 0.6455 and 6.9 ℃, respectively. The coating was of good overall performance and certain application value. Coating structure has certain effects on thermal insulation and durability of building

---

收稿日期：2017-03-25；修订日期：2017-05-05
Received: 2017-03-25; **Revised:** 2017-05-05
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 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.

energy-saving coating. Satisfactory performance can be obtained by changing coating structure during practical application.

KEY WORDS: pigment; building energy saving; solar reflectance; coating structure; composite coating; staic contact angle; reflective insulation

建筑节能涂料是一种功能涂料[1]，其能够被动地减少外部热量向建筑内部传导[2]，从而降低建筑表面温度及室内温度，以达到降低能耗的目的。该涂料主要应用在建筑外墙、屋顶等部位，也可应用于油罐外壁和军事装备等领域[3-4]。

为增强建筑节能涂层的反射隔热性能，相关领域的研究人员做了大量研究。沈航[5]通过特殊颜填料的使用及涂层结构组合设计，对多彩仿石涂料体系进行改进，探究了基材处理、底涂、色点、颜料等因素对涂层性能的影响。改进后的涂层具有一定的反射隔热性能，进一步拓宽了水性多彩涂料的功能化和应用范围。曾国勋[6-7]课题组采用水浆混合烧结法分别将钛镍黄颜料和纳米 ATO 粒子包覆在空心玻璃微珠表面，制备了核-壳结构的新型复合无机颜料。使用这两种颜料制备的反射隔热涂层在近红外波段的平均反射比在 50%左右，且具有超过 0.90 的高发射率，隔热性能优异。李瑞[8]采用原位乳液聚合法，以硅溶胶和苯乙烯/丙烯酸乳液为原料，制备了耐沾污性和耐久性较好的硅溶胶-苯乙烯/丙烯酸复合乳液，并系统研究了硅溶胶含量、单体比例、乳化剂配比、乳化剂用量、引发剂用量以及工艺参数对复合乳液涂层性能的影响。

关于建筑节能涂料方面的报道虽然较多，但仍存在一些不足。目前来看，建筑节能涂料的大规模应用受到涂层耐沾污性和耐老化性（耐久性）的制约较大。涂层被污染、老化后，可导致粉化、脱落、色变、反射率下降严重，对反射隔热、装饰性及使用性影响极大。此外，涂层的反射隔热性受材料和涂层结构的影响，但目前关于涂层结构对反射隔热性能的影响研究报道很少。

针对以上两点不足，本文通过改变涂层结构及其内部原料配比等方式，探究涂层结构对涂层反射隔热性能、耐沾污性和耐老化性等综合性能的影响，为建筑节能涂料的进一步应用提供参考。

1　实验

1.1　实验原料

苯丙乳液 503（固含量 48%），广州特润得；铬绿 GN-M（平均粒径 2.0 μm），德国拜耳；金红石型二氧化钛 R902+（平均粒径 300 nm），美国杜邦；空心玻璃微珠 VS-5500，平均粒径 65 μm，美国 3M；成膜助剂 Texanol，美国伊士曼；分散剂 BYK-163，德国毕克；消泡剂 L-1311，美国亚什兰；增稠剂 SN-162，日本诺普科；去离子水，实验室自制；铝合金板，市售。

1.2　涂料及涂层制备

向苯丙乳液中加入去离子水进行稀释，m（苯丙乳液）：m（水）为 5：1，然后加入适量成膜助剂，并搅拌均匀。向其中分别加入 10%（占成膜基料的质量分数，全文同）空心微珠、5%空心微珠+5%二氧化钛、10%二氧化钛，再加入适量分散剂、消泡剂和增稠剂，搅拌均匀后过滤出料，得到底漆涂料。分别记为 D_1、D_2 和 D_3。

配制质量比分别为 1：14、1：12 和 1：10 的硅溶胶-苯丙复合乳液，并向其中加入适量成膜助剂和消泡剂，搅拌均匀得到面漆涂料。分别记为 M_1、M_2 和 M_3。

向 50 g 稀释后的苯丙乳液中加入 5 g 铬绿颜料、1 g 分散剂、2 g 增稠剂和少量消泡剂，混合均匀过滤出料，得到铬绿涂料。

在铝合金板表面刷涂底漆或铬绿涂料，待涂料表干后在其表面刷涂铬绿涂料或面漆涂料，置于标准养护条件下（温度(23±2) ℃，相对湿度(50±5)%）养护 168 h。

1.3　仪器与表征

采用澳大利亚安捷伦的 Cary-5000 型紫外/可见/近红外分光光度计，测量颜填料及涂层的太阳光（400~2500 nm）和近红外（780~2500 nm）波段的反射比，使用聚四氟乙烯进行基线校准。采用上海汉谱光电科技有限公司的 HP-200 精密色差仪测量涂层的明度 L^*、红绿性质 a^*和黄蓝性质 b^*[9]。参照 JG/T 235—2014《建筑反射隔热涂料》测试涂层的太阳光反射比 TSR、近红外反射比 NIR、污染后涂层的太阳光反射比变化率$\triangle TSR_W$、人工气候老化后涂层的太阳光反射比变化率$\triangle TSR_l$ 和色差$\triangle E^*$（ $\Delta E^*=\sqrt{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2}$ ）。涂层沾污按标准 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。涂层人工气候老化按标准 GB/T 1865—2009《色漆和清漆　人工气候老化和人工辐射曝露　滤过的氙弧辐射》进行氙灯照射老化处理。

采用上海中晨数字技术设备有限公司的 JC2000-

C1 型静态接触角测量仪，测量涂层的静态接触角。采用涂层附着力测量仪，按 GB/T 1720—1989《漆膜附着力测定法》测量涂层的附着力。采用中华绘图铅笔，按 GB/T 6739—2006《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》测试涂层的硬度。

2　结果与讨论

2.1　填料、底漆和铬绿涂层的反射比

测试了填料、底漆和铬绿涂层的太阳光反射比曲线，结果如图 1 所示。由图可知，二氧化钛在可见光波段具有较高且平稳的光谱反射曲线，二氧化钛底漆也具有较高的可见光光谱反射曲线，这是由于二氧化钛呈现白色。铬绿涂层的光谱反射曲线在 470 nm 和 580 nm 处存在较强的吸收谷，这是铬绿颜料中的基态光谱项 $^4A_{2g}$ 向 $^4T_{2g}$、$^4T_{1g}$ 跃迁引起的[10]。而且，这两个吸收谷使涂层在 540 nm 处产生了绿色光的反射峰，因此涂层呈现绿色。

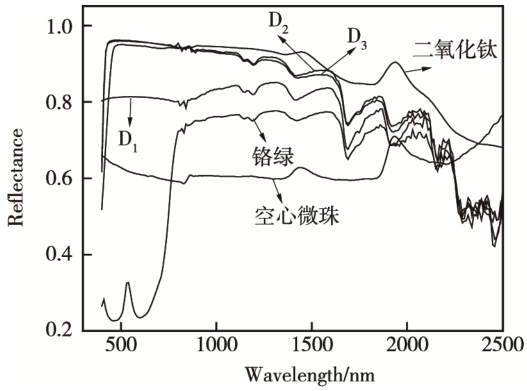


图 1　填料、底漆和铬绿涂层的反射比曲线
Fig.1 Reflectance curves of filler, undercoat and chrome green coating

计算填料、底漆和铬绿涂层的太阳光、近红外反射比，结果列于表 1。由表 1 可知，二氧化钛和空心玻璃微珠分别具有 0.8719 和 0.6273 的优异太阳光反射比，反射特性十分可观。此外，混合填料底漆的太阳光反射比最高，为 0.8253，高于二氧化钛底漆。可能是因为相比于仅含有二氧化钛的底漆，含有混合填料底漆的可见光光谱反射特性更为优异。

表 1　填料、底漆和铬绿涂层的反射比
Tab.1 Reflectance of filler, undercoat and chrome green coating

性能	微珠	二氧化钛	铬绿涂层	D_1	D_2	D_3
TSR	0.6273	0.8719	0.6280	0.7501	0.8253	0.8180
NIR	0.6281	0.8625	0.7003	0.7393	0.7994	0.7905

2.2　底漆对建筑节能涂层性能的影响

测试了不同底漆涂层的太阳光反射比曲线，结果如图 2 所示。由图可知，使用不同底漆后，涂层在 540 nm 处仍存在较强的绿色光反射峰，涂层仍旧呈现绿色。由此可知，不同底漆的使用并未改变涂层的外观颜色。不同底漆对涂层反射比的影响，主要集中在能量较低的近红外短波波段（780~1200 nm）。而近红外长波波段（2000~2500 nm）的能量较高，底漆在此波段对涂层的影响不大。

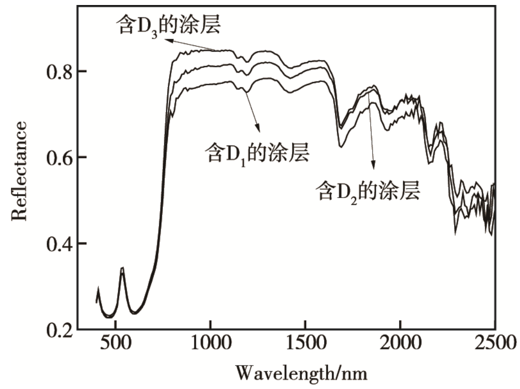


图 2　涂层的反射比曲线
Fig.2 Reflectance curves of coatings

表 2 为计算得到的不同底漆涂层的近红外反射比。由表 2 可知，使用底漆 D_3 和底漆 D_2 涂层的太阳光反射比分别比无底漆涂层提高 5.54%和 3.79%，而涂层红外发射率并未产生明显变化。这是因为这两种底漆自身的太阳光反射比和近红外反射比均较高，从而提高了对应涂层反射比[11-13]。

表 2　涂层的反射比
Tab.2 Reflectance of coatings

性能	铬绿涂层（无底漆）	含 D_1 的涂层	含 D_2 的涂层	含 D_3 的涂层
TSR	0.6280	0.6187	0.6518	0.6628
NIR	0.7003	0.6884	0.7288	0.7396

2.3　面漆对建筑节能涂层性能的影响

使用不同面漆的涂层太阳光反射比曲线如图 3 所示。对不同面漆涂层进行人工气候老化处理（氙灯照射 250 h），性能测试结果如表 3 所示。由图 3 可知，涂层的光谱反射曲线在 540 nm 处的反射峰基本没有偏移，说明面漆并未改变涂层的颜色。相应地，表 3 中的太阳光反射比在使用面漆前后变化不大。但是，使用面漆涂层的人工老化后太阳光反射比变化率降低，这是因为面漆对涂层而言，相当于一种“保护层”。氙灯照射后，面漆开始分解，对下面的铬绿涂层影响较小，说明使用面漆可增强涂层的耐老化性。此外，使用面漆可降低人工老化后涂层的色差。色差与视觉的关系为：$\triangle E^* < 0.5$ 时，视觉感觉为痕迹；$\triangle E^*$=0.5~1.5 时，视觉感觉为轻微；$\triangle E^*$=1.5~3.0 时，视觉感觉为可察觉；$\triangle E^*$=3.0~6.0 时，视觉感觉为可

识别；△E^*=6.0~12.0 时，视觉感觉为大。由此可知，使用面漆前，涂层老化后的色差为可识别。使用面漆后，涂层老化后的色差降低为可察觉。这是由于氙灯照射一段时间后，无面漆的铬绿涂层有机高分子中的分子链氧化、分解产生一定发色基团，发色基团使涂层发生色变。而使用面漆后，对铬绿涂层可以起到保护作用，色差降低。此外，实验中还发现，涂层老化后，其明度增加。这是因为老化使材料表面发生降解而断链，导致材料在非结晶区的纠缠部分密度下降，短链分子向表面迁移，最终引起材料明度的提高[14]。

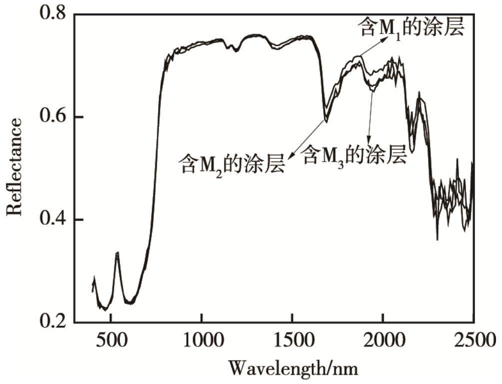


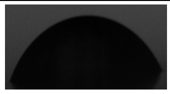
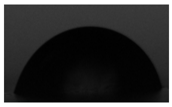
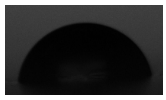
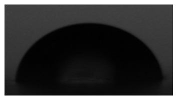
图 3　面漆对涂层太阳光反射比的影响
Fig.3 Effect of base coat on total solar reflectance composite coatings

表 3　不同面漆涂层老化处理前后的性能
Tab.3 Properties of different finishing coat coatings with/without aging treatment

涂层	L^*	a^*	b^*	TSR	NIR	ΔTSR_l/%	ΔE^*
无面漆	36.41	−7.71	10.07	0.6280	0.7003	4.78	3.10
含M_1	36.69	−7.66	11.36	0.6078	0.675	3.34	2.33
含M_2	37.31	−7.60	9.950	0.5983	0.6629	3.21	1.88
含M_3	38.23	−7.65	12.34	0.6003	0.6666	3.11	1.56

漆膜的耐水性和耐沾污性直接影响了整个涂料体系的使用寿命和实用性。测试了不同面漆涂层的静态接触角、耐水性及污染前后涂层的太阳光反射比变化率，结果如表 4 所示。由表可知，面漆可显著增大涂层的静态接触角，且随着面漆中硅溶胶掺量的增大，涂层的静态接触角由 60.2°增大到 89.3°。这是因为铬绿涂层表面存在较多缺陷和孔隙，硅溶胶中的纳米二氧化硅在固化过程中填充在这些缺陷和孔隙中，增大了涂层的致密度和交联程度[15]，从而增大了涂层的静态接触角。此外，面漆可改善涂层的耐沾污性，且随着面漆中硅溶胶掺量的增大，涂层污染后太阳光反射比变化率由 14.2%逐渐下降至 9.9%。这是因为使用面漆后增大了涂层的静态接触角，污染物不易粘附在涂层表面，易随液体滚落所致。而且，面漆可改善涂层的耐水性。这是由于面漆填充了涂层表面的缺陷和孔隙，对涂层进行“密封”的结果。

表 4　面漆对涂层性能的影响
Tab.4 Effect of finishing coat on properties of coatings

涂层	ΔTSR_w/%	静态接触角/(°)	耐水性（96 h）
无面漆	14.2	60.2	 轻微泛白
含M_1的涂层	13.1	69.1	 基本不泛白
含M_2的涂层	12.0	73.4	 不泛白
含M_3的涂层	9.9	89.3	 不泛白

2.4　涂层结构正交试验及结果

综合考虑影响涂层性能的主要因素——底漆中空心微珠的掺量（A）、底漆中二氧化钛的掺量（B）、面漆中苯丙乳液与硅溶胶的质量比（C），选用正交试验法探究三种因素对涂层性能的影响，选择 $L_9(3^3)$正交表安排试验，因素水平如表 5 所示。测试涂层的太阳光反射比（TSR）和隔热温差（t），结果见表 6。

表 5　正交试验因素水平表
Tab.5 Factors and levels of coatings

因素	水平1	水平2	水平3
A/%	5	10	0
B/%	5	0	10
C	14:1	12:1	10:1

表 6　正交实验方案及结果
Tab.6 Scheme and results of orthogonal test

序号	组合	TSR	t/℃
1#	A1B1C1	0.6455	6.9
2#	A1B2C2	0.5945	6.2
3#	A1B3C3	0.6056	6.7
4#	A2B1C2	0.6308	6.4
5#	A2B2C3	0.6157	6.3
6#	A2B3C1	0.6687	7.2
7#	A3B1C3	0.6326	6.4
8#	A3B2C1	0.6078	5.7
9#	A3B3C2	0.6478	6.6

由表 6 可知，6#的太阳光反射比最高,隔热温差最大。但试验过程中发现，其由于填料掺量过多，涂层易开裂，成膜性不佳，不利于实际应用。9#的太阳光反射比虽高于 1#，但隔热温差却低于 1#。这是因为 1#中含有一定量的空心微珠，可降低涂层的导热系数，因此 1#实际隔热温差较高。根据分析，选择 1#作为最佳正交试验方案，即：底漆中空心微珠掺量为

5%、二氧化钛掺量为 5%，面漆中苯丙乳液和硅溶胶质量比为 14∶1。此时涂层拥有较高的太阳光反射比和隔热温差。

2.5 最佳正交试验方案涂层的综合性能

对 1#涂层进行了综合性能测试，结果如表 7 所示。由表可知，相比于铬绿涂层，除了铅笔硬度外，1#涂层的各项性能均得到了一定程度的提升。其中，污染后太阳光反射比变化率提高了 3.6%，人工气候老化后太阳光反射比变化率提高了 1.44%，这对于涂层的实际应用具有较大参考意义。

表 7 涂层性能测试结果

Tab.7 Performance test of coating

涂层	附着力/级	硬度 (H)	耐水性（96 h）	TSR	ΔTSR_w/%	ΔTSR_l/%	t/℃
铬绿	1	3	轻微泛白	0.6280	14.2	4.78	6.6
1#	1	2	不泛白	0.6455	10.6	3.33	6.9

将涂层结构对涂层性能影响的机理概括于图 4，结合图 4 分析底漆和面漆影响涂层性能的原因。底漆的作用是增强透过涂层的太阳光二次反射、降低导热系数以及增大涂层的太阳光反射比。面漆的作用是增强涂层的耐沾污性和耐老化性，降低涂层的污染后和人工气候老化后太阳光反射比变化率。此外，面漆也具有一定的增强太阳光反射比的作用。对照涂层（铬绿涂层）既没有底漆，也没有面漆，综合性能相对较差。

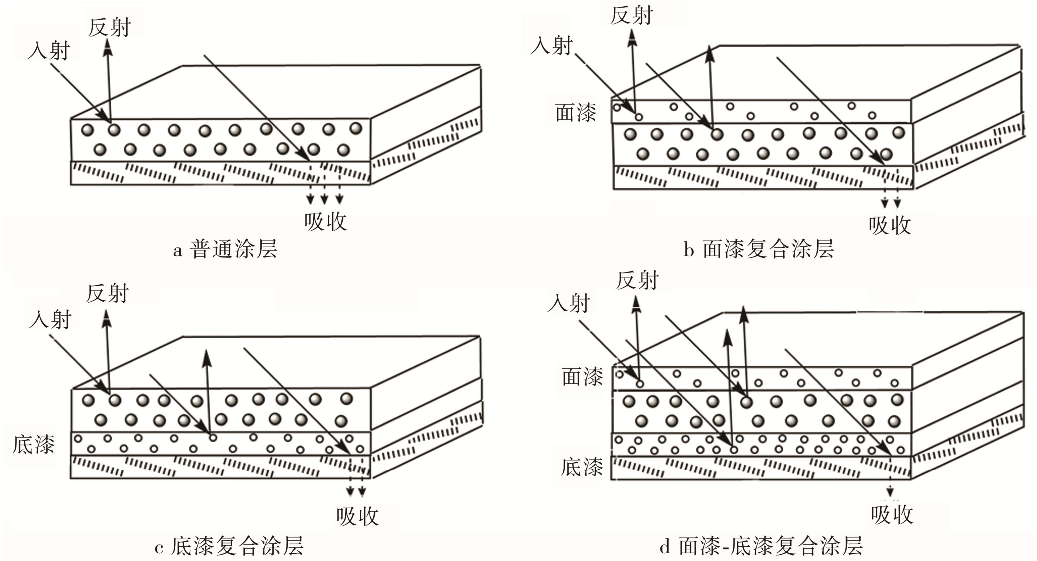


图 4 涂层结构影响涂层性能示意图

Fig.4 Schematic illustration of effect of coating structure on properties of coatings:a) common coating, b) finishing coating, c) undercoat composite coating, d) finishing coat-undercoat composite coating

3 结论

1）底漆和面漆对涂层颜色基本无影响。

2）底漆的作用主要是增加涂层的太阳光反射比。

3）面漆的作用主要是增大涂层的静态接触角，增强涂层的耐水性、耐沾污性和耐老化性，降低涂层污染后和人工气候老化后的太阳光反射比变化率及色差。

4）最佳正交试验组合为：底漆中空心微珠掺量为 5%、二氧化钛掺量为 5%，面漆中苯丙乳液和硅溶胶质量比为 14 : 1。此时涂层的各项性能均较好。

参考文献：

[1] ZINZI M, AGNOLI S. An Energy and Comfort Comparison between Passive Cooling and Mitigation Urban Heat Island Techniques for Residential Buildings in the Mediterranean Region[J]. Energy and Buildings, 2012, 55(12): 66-76.

[2] ZAGROMOV Y A, KULIKOV V V, TOKAR B Z. Thermophysical Characteristics of Thermalin-sulation on Metal Backing[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1978, 35(1): 778-782.

[3] 蔡森. 油罐用太阳热反射涂料研究进展[J]. 化工新型材料, 2010, 38(1): 32-34.
CAI Sen. The Situation and Development of Solar Energy Reflectivity Coating on Tank[J]. New Chemical Materials, 2010, 38(1): 32-34.

[4] 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.

[5] 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 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. 钛镍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] 曾国勋, 张海燕, 陈易明, 等. 核壳型 ATO/空心玻璃微珠复合材料的制备及其热反射性能[J]. 功能材料, 2013, 44(10): 1395-1398.
ZENG Guo-xun, ZHANG Hai-yan, CHEN Yi-ming, et al. Preparation and Properties of Reflection Infrared Radiant for Core/Shell Style ATO/Hollow Glass Microspheres Composites[J]. Functional Materials, 2013, 44(10): 1395-1398.

[8] 李瑞. 苯乙烯丙烯酸醋/硅溶胶复合乳液的合成及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
LI Rui. Study on Polymerzation and Performance of Styrene Acrylate/Silica Compound Emulsion[D]. Xi'an: University of Changan, 2009.

[9] JIAN Zou, WEI Zheng. TiO_2@$CoTiO_3$ Complex Green Pigments with Low Cobalt Content and Tunable Color Properties[J]. Ceramics International, 2016, 42: 8198-8205.

[10] LIANG Shu-ting, ZHANG Hong-ling, LUO Min-ting, et al. Preparation of Cr_2O_3-based Pigments with High NIR Reflectance Via Thermal Decomposition of CrOOH[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 2646-2652.

[11] LEVINSON R, BERDAHL P, AKBARI H, et al. Methods of Creating Solar-reflective Nonwhite Surfaces and Their Application to Residential Roofing Materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(4): 304-314.

[12] LEVINSON R, AKBARI H, BERDAHL P, et al. A Novel Technique for the Production of Colored Concrete Tile and Asphalt Shingle Roofing Products[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(6): 946-954.

[13] SLEIMAN M. Soiling of Building Envelope Surfaces and Its Effect on Solar Reflectance—Part Ⅱ: Development of an Accelerate Aging Method for Roofing Materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 122: 271-281.

[14] YANG R, YU J, LIU Y, et al. Effects of Coupling Agents on the Natural Aging Behavior and Oxidation Profile of High-density Polyethylene/Sericite Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(1): 610.

[15] WANG X, WANG L, SU Q, et al. Use of Unmodified SiO_2 as Nanofiller to Improve Mechanical Properties of Ploymer-based Nanocomposites[J]. Composites Science Technology, 2013, 89: 52-60.