

# 填料对建筑节能涂层隔热性能的影响和机理

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** 探究反射型、阻隔型和辐射型填料对建筑节能涂层反射隔热性能的影响, 为填料在建筑节能涂料中的筛选应用提供一定的理论支撑。**方法** 分别将金红石型二氧化钛、空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉与苯丙乳液共混, 制备了反射型、阻隔型和辐射型建筑节能涂料。采用扫描电子显微镜、紫外/可见/近红外反射光度计、导热系数测量仪和红外发射率测量仪对涂层性能进行表征, 探究了三种填料添加量和平均粒径对涂层反射隔热性能的影响。**结果** 金红石型二氧化钛、空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉的最佳添加量(占成膜物质总质量的百分比, 全文同)和平均粒径分别为 25% 和 0.25  $\mu\text{m}$ 、9% 和 325 目、9% 和 1  $\mu\text{m}$ 。此时对应涂层的太阳光平均反射率、导热系数、8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外发射率分别为 85.88%、0.05 W/(m $\cdot$ K) 和 0.91, 隔热性能优异。**结论** 填料添加量和平均粒径对建筑节能涂层的隔热性能均具有一定的影响, 实际应用时可根据需要选择填料添加量和平均粒径。

**关键词:** 填料; 反射隔热; 建筑节能; 涂层; 导热系数; 近红外反射比; 红外发射率

**中图分类号:** TU56 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0218-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.032

## Effects and Mechanism of Functional Fillers on Insulation Performance of Building Energy-saving Coating

YANG Guang, DENG An-zhong

(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide theoretical support for filler selection and application to building-energy saving coating by studying effects of reflective, insulating and radiant fillers on reflective/thermal insulation performance of building energy-saving coating. The reflective, insulating and radiant building-energy saving paints were prepared by mixing rutile titanium dioxide, hollow glass bead and far infrared ceramic powder with styrene-acrylic emulsion, respectively. Properties of the coatings were characterized by using scanning electron microscope, ultraviolet/visible/near-infrared spectrophotometer, heat conductivity coefficient measuring instrument and infrared emittance measurement instrument. Effects of content and average grain size of the fillers on reflective/thermal insulation performance of the coating were investigated. Optimal content (percentage accounts for total mass of film forming material) and average grain size of rutile titanium dioxide, hollow glass bead and far infrared ceramic powder were 25% and 0.25  $\mu\text{m}$ , 9% and 325 mesh, 9% and 1  $\mu\text{m}$ , respectively. Meanwhile, average solar reflectance, heat conductivity coefficient and infrared emittance in 8~14  $\mu\text{m}$  band of corresponding coating was 85.88%, 0.05 W/(m $\cdot$ K) and 0.91, respectively. Excellent thermal insulation performance was obtained. Thermal insulation performance of

收稿日期: 2017-05-09; 修订日期: 2017-06-01

Received: 2017-05-09; Revised: 2017-06-01

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, 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.

building energy-saving coating is affected by both content and average grain size of filler, hence both shall be selected as required during actual application.

**KEY WORDS:** filler; reflective insulation; building energy-saving; coating; heat conductivity coefficient; near-infrared reflectance; infrared emittance

建筑节能涂料是一种功能涂料<sup>[1]</sup>, 也称为反射隔热涂料, 主要应用在建筑外墙、屋顶等部位。由于该涂料能被动地减少外部热量向建筑内部传导<sup>[2]</sup>, 降低建筑表面温度, 进而降低室内温度, 从而达到降低能耗的目的, 并且也可应用在油罐储运和军事装备等领域<sup>[3-4]</sup>, 因此该涂料具有广阔的发展前景。

根据节能机理不同, 建筑节能涂料可分为 3 类: 反射型、阻隔型和辐射型<sup>[5]</sup>。建筑节能涂料由成膜基料、(功能)填料和各种助剂组成, 其中填料对涂层的反射隔热效果具有巨大影响。为探究填料对隔热涂层性能的影响, 国内外科研工作者做了相关研究<sup>[6-7]</sup>。刘文涛<sup>[8]</sup>等制备了添加二氧化硅气凝胶、相变胶囊、六钛酸钾、钛白粉、陶瓷微珠和红外辐射粉等填料的隔热涂层, 探究了填料种类和涂层干膜厚度对涂层隔热性能的影响。实验结果表明, 反射型和辐射型填料的涂层干膜厚度以 300  $\mu\text{m}$  为宜, 增加阻隔型和相变型填料的涂层干膜厚度可提高涂层的隔热效果。

虽然关于填料对建筑节能涂层性能的影响的报道较多, 但关于同时系统探究填料添加量和粒径对涂

层性能的影响却鲜有报道。为此, 根据建筑节能涂层的三种节能机理, 本文选择了三种填料, 探究其添加量和粒径对涂层性能的影响, 旨在为建筑节能涂料的填料应用方面提供一定的借鉴意义。

## 1 实验

### 1.1 主要原料

苯丙乳液 503, 固含量 45%, 广东德润德化工有限公司。反射型填料: (金红石型) 二氧化钛 R902<sup>+</sup>, 美国杜邦集团有限公司; 阻隔型填料: 空心玻璃微珠 VS5500, 美国 3M 公司。辐射型填料: 远红外陶瓷粉 FSF-20, 河北灵寿县华润矿物粉体加工厂。增稠剂 SN-162, 日本诺普科基团; 消泡剂 L-1311, 美国亚什兰有限公司; 分散剂 BYK-163, 德国毕克化学品有限公司; 成膜助剂 Texanol, 美国伊士曼有限公司。以上所有原材料均为工业级产品。去离子水为实验室自制。铝合金板、玻璃板和石棉水泥板均为市售。其中, 三种填料的扫描电子显微镜照片如图 1 所示。

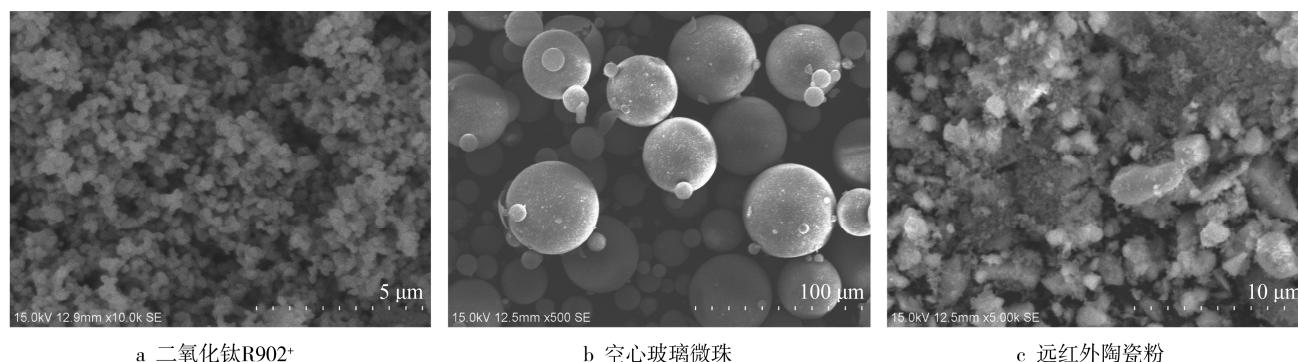


图 1 填料的 SEM 图  
Fig.1 SEM images of filler

### 1.2 实验方法

1) 涂料的制备。考虑到二氧化钛在涂料中易团聚, 需将二氧化钛配制成浆料形式。将二氧化钛与去离子水按照质量比 1:1 混合, 加入适量分散剂、消泡剂和增稠剂, 混合均匀得到浆料备用。向苯丙乳液中添加适量成膜助剂和不同添加量的浆料, 搅拌均匀, 得到反射型建筑节能涂料。向去离子水与苯丙乳液质量比为 1:5 的稀释液中添加适量成膜助剂和不同添加量的空心玻璃微珠或远红外陶瓷粉, 搅拌均匀得到阻

隔型或辐射型建筑节能涂料。

2) 涂层的制备。采用线棒涂布器在铝合金板和石棉水泥板表面分别刷涂不同种类的建筑节能涂料, 涂刷第一道后, 间隔 6 h 涂刷第二道。采用刮涂的方式在玻璃板表面制备涂层。养护条件: 温度(23±2) °C, 相对湿度(50±5)%。反射型和辐射型建筑节能涂料的干膜厚度约为 150  $\mu\text{m}$ , 阻隔型涂料约为 300  $\mu\text{m}$ 。

### 1.3 仪器与表征

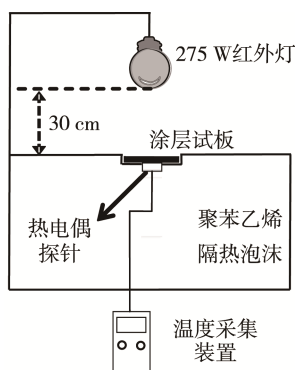
采用德国尼克斯 QNIX-4500 型涂层测厚仪测量

涂层的干膜厚度。采用澳大利亚安捷伦 Cary-5000 型紫外/可见/近红外分光光度计测量反射型涂层的太阳光 (400~2500 nm) 反射率光谱曲线。参照标准 JG/T 235—2014 《建筑反射隔热涂料》采用公式

$$TSR = \frac{\int_{400}^{2500} r(\lambda) i(\lambda) d(\lambda)}{\int_{400}^{2500} i(\lambda) d(\lambda)}$$

计算涂层的太阳光平均反射

率。式中,  $r(\lambda)$  和  $i(\lambda)$  分别表示涂层在波长  $\lambda$  处的反射率及标准辐射强度 ( $W/(m^2 \cdot \mu m)$ )。自制隔热性能测试装置如图 2 所示, 红外灯采用 Ge 275 W IR 型。测试时, 室温保持在 25 °C 左右, 采用稳压器保证红外灯功率为 275 W。将热电偶探针紧贴于石棉水泥板背面记录温度, 直至下一分钟温度变化在 0.5 °C 以内, 此温度记为平衡温度  $t$ 。采用湘潭市仪器仪表有限公司的 DRL-2 型导热系数测定仪测量阻隔型涂层的导热系数  $H$ 。采用中科院北京物理研究所的 IR-2 型红外发射率测量仪测量辐射型涂层 8~14  $\mu m$  波段的红外发射率  $\varepsilon$ 。



a 示意图



b 实物图

图 2 隔热性能测试装置图

Fig.2 Set-up diagram of thermal insulation performance test

## 2 结果与讨论

### 2.1 反射型填料对建筑节能涂层性能的影响

反射型填料主要依靠填料的太阳光反射率反射部分太阳光, 从而达到隔热降温的目的。该研究选择二氧化钛反射型填料, 不同二氧化钛添加量和平均粒

径涂层的反射率曲线如图 3 所示。可以看出, 二氧化钛对可见光具有很强的反射特性。除去制备过程的杂质和仪器光栅转换等外界因素影响, 改变二氧化钛添加量和平均粒径, 并未影响反射率曲线的变化趋势。即随着波长的增加, 反射率逐渐降低。这主要是由苯丙乳液中的有机基团对红外光的吸收所致。

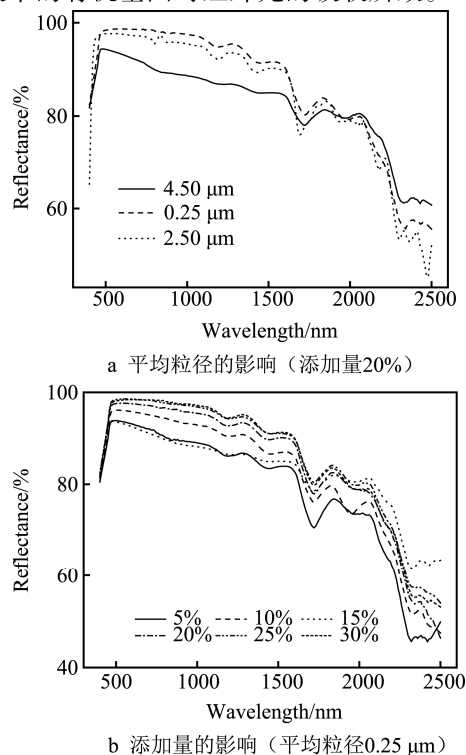


图 3 二氧化钛对涂层反射率曲线的影响

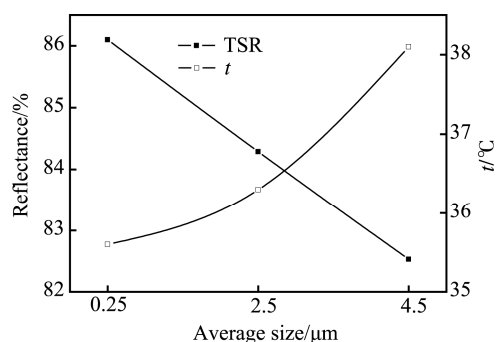
Fig.3 Effects of titanium dioxide on reflectance curves of coating

测试了二氧化钛添加量和平均粒径对涂层太阳光平均反射率和隔热性能的影响, 结果如图 4 所示。由图 4a 可知, 随着二氧化钛平均粒径的增大, 涂层太阳光平均反射率线性下降, 涂层试板平衡温度升

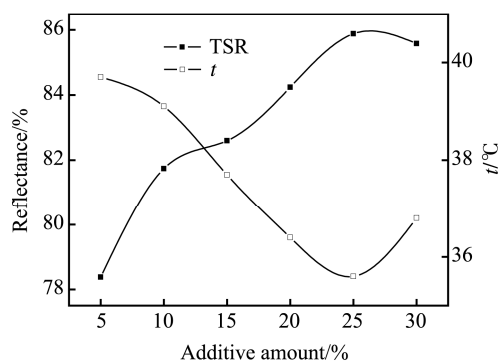
高。这可由下公式  $\lambda = \frac{d}{k}$ 、 $k = \frac{0.9(m^2 + 2)}{\pi n_R(m^2 - 1)}$ 、 $m = \frac{n_P}{n_R}$  来解释<sup>[9-11]</sup>, 式中,  $\lambda$  为入射光波长,  $d$  为填料的最佳粒径,  $m$  为涂层散射率,  $n_P$  为填料的折光指数,  $n_R$  为成膜基料的折光指数。通过计算可得二氧化钛最佳粒径约为 0.15~1.05  $\mu m$ , 这与实验结果相吻合。即平均粒径为 0.25  $\mu m$  的二氧化钛拥有较高的太阳光平均反射率, 隔热性能也相对较好。

由图 4b 可知, 二氧化钛添加量对涂层的太阳光平均反射率和隔热性能影响显著。二氧化钛添加量增大, 涂层太阳光平均反射率显著增加。这是因为增大二氧化钛添加量, 使涂层内反射粒子数量增大, 涂层反射性能增强。当二氧化钛添加量为 25% 时, 涂层太阳光平均反射率最大, 为 85.88%。当二氧化钛添加量达到 30% 后, 涂层太阳光平均反射率反而下降。这

是因为纳米二氧化钛粒子表面能较高,彼此间易发生团聚。当添加量为 25%时,二氧化钛在涂层中仍可较均匀地分布(图 5a);但当添加量达到 30%后,涂层



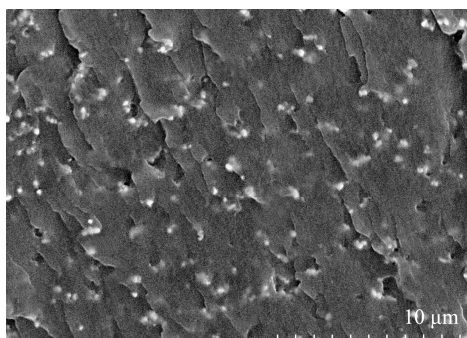
a 平均粒径的影响(添加量20%)



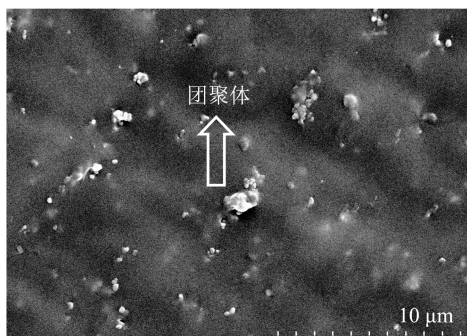
b 添加量的影响(平均粒径0.25 μm)

图 4 二氧化钛对涂层性能的影响

Fig.4 Effects of titanium dioxide on coating properties



a 二氧化钛添加量25%



b 二氧化钛添加量30%

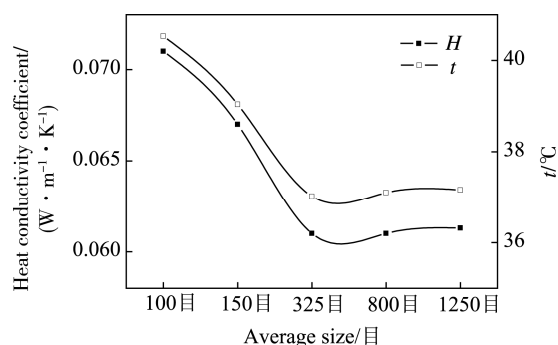
图 5 不同二氧化钛添加量涂层的 SEM 图

Fig.5 SEM images of coatings with different titanium dioxide content

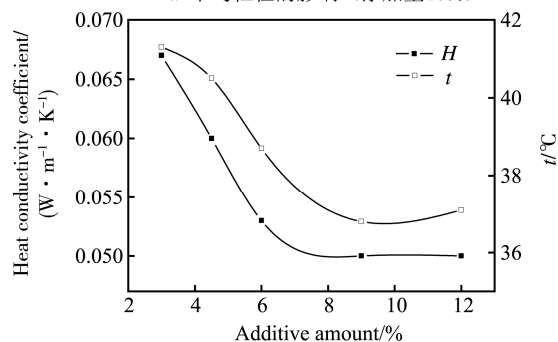
中出现一定量的团聚体(图 5b),使整体反射粒子的总面积减小,反射效果下降。此外,团聚体的出现使得涂料分散性变差,导致涂层表面光泽度降低,二者共同作用使涂层太阳光平均反射率下降。

## 2.2 阻隔型填料对建筑节能涂层性能的影响

阻隔型填料往往具有质轻、中空和低导热系数等特性,通过降低涂层导热系数达到隔热效果<sup>[12]</sup>。空心玻璃微珠是一种用途广泛的新型无机非金属空心球体,主要成分是硼硅酸盐。其粒径通常在 10~150 μm 之间,质轻,导热系数低,化学稳定性良好。表面改性后,亲油性和疏水性提高,在有机乳液和有机树脂中易分散。本研究测试了空心玻璃微珠添加量和平均粒径对涂层导热系数和隔热性能的影响,结果如图 6 所示。



a 平均粒径的影响(添加量10%)



b 添加量的影响(平均粒径325目)

图 6 阻隔型填料对涂层性能的影响

Fig.6 Effects of insulating filler on coating properties

由图 6a 可知,涂层导热系数随空心玻璃微珠目数的增大而逐渐降低,当空心玻璃微珠粒径为 325 目时,涂层导热系数和涂层试板平衡温度最低,分别为 0.061 W/(m·K)和 37.02 °C。添加平均粒径为 100 目和 150 目的空心玻璃微珠时,不易与成膜基料形成均质体系,颗粒之间的缝隙过大,因而导热系数较高,隔热性能较差。空心玻璃微珠粒径为 325 目时,颗粒相对适中,容易与成膜基料形成均质体系,颗粒之间的缝隙较小,因而导热系数较低、隔热性能较好。空心玻璃微珠平均粒径为 800 目和 1250 目时,由于颗粒小,不易于分散,在涂料中容易凝聚,因而隔热效果



不好。此外,在试验中还发现,空心玻璃微珠的平均粒径影响涂层的综合性能。粒径较大时,则涂层表面较为粗糙且表面缺陷较多。这是因为空心玻璃微珠的平均粒径较大时,其中含有的杂质也相对较多,这些杂质伴随空心玻璃微珠添加到涂料体系中时,会影响涂料的施工性和涂层表面粗糙度。综上,空心玻璃微珠平均粒径选择 325 目,此时涂层的导热系数较低,隔热性能较好。

由图 6b 可知,涂层导热系数和涂层试板平衡温度随空心玻璃微珠添加量的增大而逐渐降低,降低率梯度呈现先增大后减小的趋势。当空心玻璃微珠添加量为 9% 时,涂层导热系数低至  $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,涂层试板平衡温度最低,为  $36.8^\circ\text{C}$ 。继续增大添加量,涂层导热系数基本不再变化,涂层试板平衡温度反而升高。这是因为继续增大空心玻璃微珠添加量后,涂层表面不平整,出现裂痕和较大孔隙,光线和热量更易进入涂层内部,致隔热性能下降。当空心玻璃微珠的添加量和平均粒径分别为 9% 和 325 目时,测得涂层的附着力、铅笔硬度和抗冲击性分别为 2 级、H 和 52 mm,基本符合使用要求。综上所述,空心玻璃微珠添加量和平均粒径分别以 9% 和 325 目为宜。

结合图 7 分析阻隔型填料反射隔热的机理。阻隔型填料由于密度低,中空,内部含有较多空气,在涂料分散过程中会聚集在涂料上部。涂料固化后,涂层上部的阻隔型填料形成一层热缓冲层,外界热流在涂层中的传递路径变长,进一步阻隔了热量进入,隔热

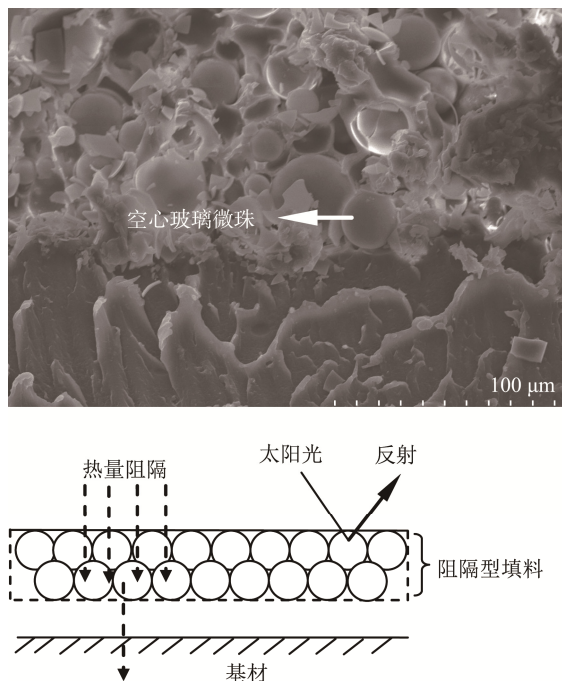


图 7 阻隔型涂层 SEM 图及隔热模型

Fig.7 SEM images and thermal insulation model of insulating coating

降温效果较好。另一方面,由于填料也具有一定的近红外反射性能,当外界太阳光照射涂层表面时,也可反射部分近红外线降温。二者协同使隔热效果较好。

## 2.3 辐射型填料对建筑节能涂层性能的影响

具有一定温度的物体都在不断向外辐射一定波长的电磁波,辐射的波长受物体温度、材料和表面特性等因素影响。物体中电子振动会向外辐射电磁波,温度升高可增强振动,使外层电子提高到能量较高的位置上。然而,电子不能长期保留在这种位置上,会跳回原来的位置,每跳一次就会产生辐射能,辐射能以红外线的形式输出<sup>[13-14]</sup>。据韦恩位移定律<sup>[15]</sup>  $\lambda_m \times T = b$  (式中,  $\lambda_m$  为一定温度下物体的最大辐射值对应的波长,  $T$  为物体的温度,  $b=2897.8 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ ) 可计算出,当涂层表面温度介于  $0\sim 50^\circ\text{C}$  之间时,最大辐射值对应的波长就介于  $8.97\sim 10.6 \mu\text{m}$  之间。因此,可将  $8\sim 14 \mu\text{m}$  波段作为涂层辐射制冷的大气窗口,涂层在此波段的红外发射率可近似代表其辐射散热性能。辐射型填料主要通过增加材料  $8\sim 14 \mu\text{m}$  波段红外发射率将涂层中的热量释放出去,使得热量不至于困顿其中。选取远红外陶瓷粉作为辐射型填料制备辐射型建筑节能涂层。远红外陶瓷粉通常由金属氧化物组成,如  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Pd}_2\text{O}_3$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  等。本研究测试了远红外陶瓷粉的添加量和平均粒径对涂层  $8\sim 14 \mu\text{m}$  波段红外发射率和隔热性能的影响,结果如图 8 所示。

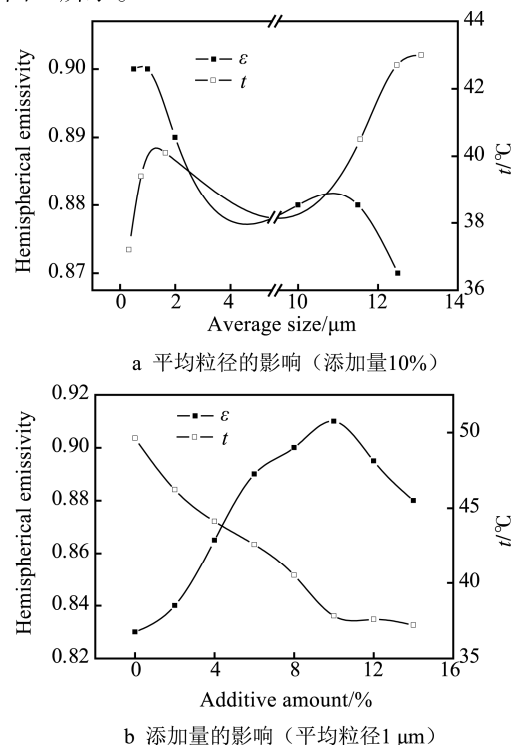


图 8 远红外陶瓷粉对涂层性能的影响

Fig.8 Effects of far-infrared ceramic powder on coating properties

由图 8a 可知, 远红外陶瓷粉平均粒径越小, 涂层 8~14  $\mu\text{m}$  波段红外发射率越高, 涂层试板平衡温度也越低。这是因为平均粒径较小的远红外陶瓷粉在相同质量的情况下, 粒子数目较多, 对光线的吸收较大, 物体的吸收率越大。由基尔霍夫定律可知, 红外发射率越高, 涂层试板平衡温度也较低。此外, 远红外陶瓷粉平均粒径越小, 表面积越大, 相对整体粒子而言, 表面原子数也越多, 表面能也增大, 粉体表面活性也显著增大。然而, 平均粒径越小, 粉体制造成本越高, 且在涂料中易团聚。远红外陶瓷粉平均粒径为 1  $\mu\text{m}$  时, 涂层红外发射率较高, 隔热性能较好。由图 8b 可知, 随着远红外陶瓷粉添加量的增加, 涂层试板平衡温度逐渐降低, 添加量大于 9% 时, 下降梯度变小。当远红外陶瓷粉添加量为 9% 时, 涂层的红外发射率达到最大值 0.91。这主要是因为, 在相同的涂料制备工艺下, 远红外陶瓷粉添加量较高时, 填料粉体粒子间易发生团聚, 降低了粒子的表面性能, 从而影响红外发射率与涂层隔热性能。因此远红外陶瓷粉适合的添加量为 9%。综上, 远红外陶瓷粉添加量和平均粒径分别为 9% 和 1  $\mu\text{m}$  时, 涂层红外发射率和涂层试板平衡温度分别为 0.91 和 39.4  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 结论

结合建筑节能涂层的三种节能机理进行了研究, 主要结论如下:

1) 对于反射型填料二氧化钛, 增大添加量和减小平均粒径可增加涂层的太阳光平均反射率, 提高涂层的隔热性能, 最佳添加量和平均粒径分别为 25% 和 0.25  $\mu\text{m}$ 。

2) 对于阻隔型填料空心玻璃微珠, 增大添加量和减小平均粒径可降低涂层的导热系数, 提高涂层的隔热性能, 最佳添加量和平均粒径分别为 9% 和 325 目。

3) 对于辐射型填料远红外陶瓷粉, 增大添加量和减小平均粒径可增大涂层 8~14  $\mu\text{m}$  波段红外发射率, 最佳添加量和平均粒径分别为 9% 和 1  $\mu\text{m}$ 。

#### 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(s1): 105-107.  
TAN Jin. Energy-saving Materials in Indoor Decoration of Residential Building[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2011, 30(s1): 105-107.
- [3] 杨闯. 节能门窗的材料性能、热工计算及模拟研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013.  
YANG Chuang. Material Properties, Thermal Calculation and Simulation Studies of Energy-saving Windows [D]. Zhejiang: 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] 吕霞, 俞成丙, 张云, 等. 保温涂料的研究现状及其展望[J]. *涂料工业*, 2011, 41(3): 45-48.  
LYU Xia, YU Cheng-bing, ZHANG Yun, et al. Present and Future of Heat Insulation Coatings[J]. *Paint & Coatings Technology*, 2011, 41(3): 45-48.
- [6] 周学梅, 李兵, 曹红锦, 等. 彩色建筑节能热反射隔热涂料研究[J]. *表面技术*, 2009, 38(5): 39-41.  
ZHOU Xue-mei, LI Bing, CAO Hong-jin, et al. Research on Thermal Insulation Coating for Colorful Buildings[J]. *Surface Technology*, 2009, 38(5): 39-41.
- [7] LEVINSOR R, BERDAHL P, AKBARI H. Solar Spectral Optical Properties of Pigments—Part One: Model for Deriving Scattering and Absorption Coefficients from Transmittance and Reflectance Measurements[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 89 (4): 319-349.
- [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] KINGERY W D, BOWEN H K, UHLMANN D R. Introduction to Ceramics[M]. New York: Wiley Professional Paperback Edition Published, 1976.
- [10] DAVID H. Protecting the Roof that Protects You[J]. *Construction Repaire*, 1989, 3(8): 24-25.
- [11] 官仕龙, 胡登华, 陈协. 涂料化学与工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
GUAN Shi-long, HU Deng-hua, CHEN Xie. Paint Chemical and Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [12] 姚梦佳, 李春福, 何俊波, 等. 隔热保温涂料的研究发展及应用[J]. *表面技术*, 2015, 44(7): 61-67.  
YAO Meng-jia, LI Chun-fu, HE Jun-bo, et al. Research Development and Application of Heat Insulation Coating [J]. *Surface Technology*, 2015, 44(7): 61-67.
- [13] 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.
- [14] 马刘宝, 朱靖. 红外辐射涂料的研究与发展趋势[J]. *表面技术*, 2007, 36(1): 68-70.  
MA Liu-bao, ZHU Jing. Trend in Development and Research of Infrared Radiative Coatings[J]. *Surface Technology*, 2007, 36(1): 68-70.
- [15] 尹达人. 再论热辐射体光谱“蓝移”及“红移”[J]. *红外技术*, 2007, 29(1): 1-3.  
YIN Da-ren. A Re-discussion on Spectra Blue Shift and Red Shift of Thermal Radiator[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(1): 1-3.