

# 建筑外墙反射隔热涂料研究进展

任晓琳, 谢德龙, 张心亚\*

(华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**介绍了反射隔热涂料的隔热机理及组成, 综述了国内外的研究进展情况, 指出目前反射隔热涂料存在的问题并提出今后的发展方向。

**关键词:**建筑节能; 反射隔热; 涂料

**中图分类号:** TQ630.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2014)05-0035-04

## Progress in reflective heat-insulation coatings of building walls

REN Xiao-lin, XIE De-long, ZHANG Xin-ya\*

(School of Chemistry & Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The mechanism and components of the reflective heat-insulation coatings are introduced. Their research progress is reviewed. Some problems related to the reflective heat-insulation coatings are also pointed out. The research directions of this functional coating are proposed as well.

**Key words:** architectural energy saving; reflective heat-insulation; coatings

我国现有建筑面积为 400 亿  $m^2$ , 99% 属于高能耗建筑。每年新增 20 亿  $m^2$ , 其中仍有 95% 以上为高能耗建筑, 建筑能耗已达社会总能源消耗的 32%, 成为我国经济发展的软肋, 推行建筑节能迫在眉睫。

目前, 外墙外保温成为建筑节能的主要途径, EPS 板薄抹灰外墙保温系统和 EPS 颗粒外墙保温系统已在我国夏热冬冷和夏热冬暖地区广泛应用, 但这 2 种保温体系自身存在很多缺点: 如前者施工烦琐, 体系中存在大量 EPS 板缝, 形成许多热桥, 在炎热的夏季, EPS 板会因剧烈变化的温差而产生开裂、脱落现象, 导致保温效果降低; 后者单独使用时难以达到 65% 的节能要求。另一方面, 这些隔热材料只能减慢但不能阻挡热量的传递。白天太阳能经屋顶、墙壁进入室内后, 导致热能困在其中。

建筑隔热保温涂料是一种新型功能性涂料, 因隔热保温效果好、经济等优点而受到人们的青睐。反射隔热涂料是隔热保温涂料的一种, 具有装饰和隔热双重功能。近年来, 国内外研究者对反射隔热涂料做了大量研究, Synnefa 等<sup>[1]</sup>将 14 种反射型涂料用于城市环境中外表面(如建筑外墙、屋顶、路面、停车场), 并与普通深色涂料及未涂刷混凝土砖瓦进行对比, 实验发现, 选择合适的反射型涂料有助于降低空调冷负荷, 缓解城市热岛效应。Shen 等<sup>[2]</sup>研究了反射型涂料对室内环境和建筑能源消耗的影响, 结果表明, 根据地理位置、季节和方位的不同, 使

用不同的反射型涂料最多可使内外墙温度分别降低 20℃ 和 4.7℃, 全年电量消耗降低 116 kWh。Moujaes 等<sup>[3]</sup>将自开发的 1-D 瞬态模型应用于涂刷反射隔热涂料的居民住宅, 研究发现, 若只将屋顶涂刷反射型涂料, 白天用电量消耗降低 17%; 屋顶和墙壁均涂刷反射隔热涂料后, 白天用电量消耗可降低 41%, 全天降低 33.3%。由此可见, 反射隔热涂料的开发对建筑节能有着重要的推动作用, 本文中根据反射隔热涂料各部分组成, 着重介绍成膜树脂和功能性颜填料的国内外研究进展。

## 1 反射隔热涂料的组成

建筑物的主要热源来自太阳辐射, 反射隔热涂料具有高反射率及低导热系数, 通过高效反射太阳光减少建筑物对辐射热的吸收, 从而达到隔热目的。混凝土、砂浆、砖石等普通建筑材料对太阳辐射能吸收率为 85%~95%, 而反射型隔热保温涂料在较宽范围内热反射率可达到 60%~90%, 远远超过了普通涂料的反射率。反射隔热涂料主要由成膜树脂、颜填料和助剂组成。下面就成膜树脂和功能性颜填料进行重点介绍, 普通颜填料及助剂不再详述。

### 1.1 成膜树脂

隔热涂料起源于硅酸盐复合涂料, 其主要应用在处于高温环境中的设备, 如油箱、发动机、铸造模具等, 这类隔热涂料存在很多缺点: 干燥时间长、抗震性差、收缩性大、易吸潮及装饰性差, 较少应用于

建筑外墙。近几年来,以有机物为成膜物质的水性建筑隔热涂料因其环境友好性及高性价比成为研究热点。树脂是乳胶漆的成膜物质,直接影响着涂料的性能。用于反射型隔热涂料的树脂对可见光和近红外光的吸收越小越好,透光率在 80% 以上,结构中应尽量少含—C—O—C—、C=O 和—OH 等吸热基团。丙烯酸类、有机硅改性丙烯酸类及含氟乳液是隔热反射涂料最常用的几种乳液。

任秀全等<sup>[4]</sup>采用自交联型丙烯酸乳液和纯丙乳液,玻璃化温度( $T_g$ )分别为 -22、27℃,将 2 种乳液以不同比例混合时,涂膜的拉伸强度随着纯丙乳液比例的增大而增强,因此可通过调节 2 种乳液的混合比例,使涂膜满足不同的使用需求。马小强等<sup>[5]</sup>选用 3 种不同类型的乳液(苯丙乳液、纯丙乳液、硅丙乳液)分别与弹性乳液复合制备成膜物质(A、B、C),在其他基础配方相同的情况下制备了 3 种反射隔热涂料,通过对比发现,乳液 C(硅丙乳液+弹性乳液)的耐水性和水蒸汽透湿性最好。以氟碳乳液为成膜物质的涂料与普通涂料相比,具有更强的耐腐蚀性、耐候型、耐玷污性及独特的自清洁作用。孙明杰等<sup>[6]</sup>将氟碳树脂与二氧化钛及空心微珠等颜填料配合使用制备出一种常温固化双组分涂料,与市售丙烯酸反射隔热涂料相比,反射隔热性能和耐腐蚀性能更加优异。但是氟碳涂料存在柔韧性、伸缩性差等缺点,将其作为饰面涂料与外墙外保温配合使用时,漆膜容易产生裂纹,影响保温效果。一些研究者将氟碳乳液和自交联弹性乳液以一定比例混合使用,然后与一系列颜填料和助剂配合制备出的涂料既克服了传统氟碳涂料的缺点,又具有很好的隔热保温效果。Chen 等<sup>[7]</sup>在制备水性建筑隔热涂料的研究中发现:苯乙烯-丙烯酸共聚物乳液的玻璃化温度高、弹性差、易产生裂纹,但加入弹性乳液和有机硅改性的丙烯酸乳液后可显著改善涂膜的弹性和耐水性。通过比较一系列质量分数不同的苯乙烯-丙烯酸乳液、弹性乳液和有机硅改性丙烯酸乳液的混合体系发现:当苯乙烯-丙烯酸乳液占 66.92%、弹性乳液占 16.59%、有机硅改性丙烯酸乳液占 16.49%时,涂膜性能优异,且成本较低。

反射型隔热涂料应用于建筑外墙属于湿法施工,故成膜物质应具有适当的弹性和耐水性,否则漆膜干燥后将产生裂缝,从而使隔热涂料失去装饰性,达不到外墙隔热的要求。此外,一些功能性填料如中空微珠,反射能力依赖于自身表面光洁度,所以极易受到环境的影响,要求涂层具有一定的耐玷污性。

可见,成膜树脂对涂料的性能起着至关重要的作用。

## 1.2 功能性颜填料

建筑外墙涂料常用的颜填料有滑石粉、云母粉、膨润土、灰钙粉、石英粉、白云石粉、方解石粉等,主要用于提高涂膜遮盖力或增强涂膜性能,如耐擦洗、耐候性等。到达地面的太阳光辐射中,波长在 0.15~4 μm 的占 99% 以上,可见光区和近红外光区分别占 45% 和 50%,紫外光区仅占 5%。可见,涂层对可见光和近红外光的反射率越高,隔热效果越好,而涂层对太阳光的高反射率主要依赖颜填料来实现,因此,选择合适的功能性颜填料对反射隔热涂料的性能起着至关重要的作用。

### 1.2.1 二氧化钛

反射隔热涂料一般以白色或浅色为主。金红石型 TiO<sub>2</sub> 的折光指数为 2.8,是目前已知的功能填料中折光系数最高的白色颜料,成为外墙涂料的首选颜料。以屋顶的涂刷效果为例,灰色系混凝土屋顶自身的近红外反射率很低,但在涂刷金红石型白色涂料后,其近红外反射率可达到 0.60;当把颜料为金红石型二氧化钛的白色底漆和含有红外透明颜料的面漆配合使用时,其反射率高达 0.85<sup>[8]</sup>。

Guo 等<sup>[9]</sup>以 TiO<sub>2</sub>(PVC 为 17%)为颜料,研究了涂膜厚度与涂层反射率的关系,测得当干膜厚度为 134 μm 时,反射率达到 93%,厚度继续增大,反射率不变。然后以二氧化钛 PVC 为 17% 的白色涂料为分散介质,将 3 种有色颜料(苝黑、甲苯胺红、苯胺黄)分别与其混合,利用紫外可见近红外分光光度 250~2 500 nm 测得各自的反射率,当有色颜料体积分数与二氧化钛体积分数之比低于 5% 时,反射率倒数的对数与颜料浓度呈正比,有色颜料的吸收率可根据斜率求得,此研究对于涂料原材料的选择有很大的帮助。

浅色颜料相比深色系颜料有更高的折射率,但其反射的大量可见光会造成严重的光污染,对人的视觉环境造成不利影响,Baneshi 等<sup>[10]</sup>为了提高近红外区的反射率,同时最大程度降低可见光反射率以降低对眼睛的伤害,以二氧化钛为颜料进行了研究,将涂料在近红外区反射总能量与在可见光区反射能量之比定义为优化参数  $R$ ,并设  $b$  为颜料体积分数与涂层厚度的乘积。运用 Mie 理论、射线反射模型及光谱反射率等理论,得出理论最佳优化参数为 4.3, $b$  为 0.27 μm,最优粒径为 0.778 μm。

### 1.2.2 中空微珠

反射型隔热涂料是在铝基反光隔热涂料的基础

上发展而来的,以铝银粉等金属粉末为填料,主要用于溶剂型涂料中。考虑到环保的要求,如今的建筑外墙涂料多采用水性涂料,而铝银粉在水性涂料中会因氧化变黑而失去反光性能,故反射型隔热涂料所用填料多为空心微珠或其他特殊反射型填料。空心微珠不仅有较高的反射率和辐射率,还可在干燥后的涂膜中形成空心腔体群,阻断了“热桥”,达到良好的隔热效果。

余龙等<sup>[11]</sup>选用普通填料、氧化锌、玻化微珠和陶瓷微珠作为填料,在其他成分相同且各种填料加入量均为10%的情况下,制备了4种水性涂料并测试其反射率,发现玻化微珠和陶瓷微珠的反射率较高,但与玻化微珠相比,陶瓷微珠制备的涂料黏度大,储存性能差,故选玻化微珠作为反射主填料较为合适。Wang等<sup>[12]</sup>将陶瓷空心微球与含氟聚苯乙烯-丙烯酸酯共聚物水性乳液配合使用,并利用样机设备进行隔热性能测试,结果表明,隔热涂料的使用使涂层表面温度降低 $6.5^{\circ}\text{C}$ ,涂膜稳定性和耐久性优异。杨鸿斌等<sup>[13]</sup>考察了空心玻璃微珠用量对涂料反射性能的影响,在其他助剂、填料及乳液用量不变的情况下,加入不同量的空心微珠。结果表明,反射率随着空心微珠含量的增加而增大,当质量分数为35%时,反射率达到最大。马承银等<sup>[14]</sup>制得一种反射近红外辐射的功能性材料,利用红外反射机理,将锐钛型二氧化钛通过化学沉积方式包裹在中空玻璃微球表面。经研究发现,当二氧化钛的包裹厚度 $<0.5\ \mu\text{m}$ 时,近红外反射率随膜厚的增加而增加;将苯丙乳液与此红外反射功能材料配和使用制得的涂层对近红外光和可见光反射率分别为81%和86%。Skelhorn<sup>[15]</sup>发明了一种红外反射涂料,由反射红外光的面漆和降低热导率的底漆2部分组成,底漆中起主要作用的是空心微珠,可有效降低热导率,减少热量的传递,且当空心微珠热导率 $<0.1\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,粒径在 $10\sim 150\ \mu\text{m}$ 时,隔热效果最佳。

空心微球虽然隔热保温效果显著,但它在应用上存在一些潜在的问题。例如,微珠属于硬质材料,易破损,反射效率大大降低;另外,空心微珠涂料的漆膜较厚,涂层表面粗糙、装饰性差且比普通涂料的成本高。

为了解决上述问题,Huang等<sup>[16]</sup>应用微纳米级材料研制出一种红外反射涂料,由微米级的初级颗粒、纳米级的次级颗粒,疏水性聚合物以及其他助剂组成。其中,初级颗粒为 $\text{SiO}_2$ ( $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ),次级颗粒

为 $\text{TiO}_2$ ( $15\sim 40\ \text{nm}$ ),疏水性聚合物是黏度为 $80\ 000\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 和 $10\ 000\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 的PDMS(聚二甲硅氧烷)的混合物, $\text{SiO}_2$ 和 $\text{TiO}_2$ 颗粒包裹在PDMS中。所得涂层具有良好的耐污性和疏水性,太阳光反射率 $>85\%$ ,其中90%以上为近红外反射。

### 1.2.3 其他类型功能性填料

除比较常用的中空微珠以外,还有一些其他功能性颜填料。Ye等<sup>[17]</sup>观察到杨树叶表面的茸毛有降温作用,可使其自身避免因强光照而自燃,受此现象的启发,他们利用同轴静电纺丝技术制得了与杨树叶茸毛空心结构相似的人造纤维,以聚苯乙烯或聚乙烯吡咯烷酮等高分子为成膜物质,研制出一种高反射率的超疏水白色涂料,其保温效果好,且防水性和耐腐蚀性能优异。Huang等<sup>[18]</sup>发明了一种近红外反射涂料,用聚合物空心微粒替代了常用的玻璃或陶瓷中空微球,其外壳是由玻璃化温度较高和较低的2种聚合物组成。涂料干燥成膜过程中,水分通过高聚物外壳扩散出来,空心微粒中只留下气体存在,外壳与气体二者折光指数的不同使光线发生散射,赋予涂膜不透明性和光反射性。当聚合物空心微粒的平均粒径为 $0.38\ \mu\text{m}$ 时,对可见光的反射率较高;平均粒径为 $1.0\ \mu\text{m}$ 时,太阳光总反射率和近红外区反射率均达到最高。

## 2 反射隔热涂料存在的问题及发展方向

反射隔热涂料通过高效反射太阳光,阻止热量传递,有效降低了空调冷负荷,符合建筑节能的需求。但就目前发展情况来看,该类功能性涂料仍存在几个重要问题。

(1)目前我国已制订的建筑反射隔热涂料标准包括:JC/T 1040—2007《建筑外表面用反射隔热涂料》、JG/T 238—2008《建筑反射隔热涂料》和GB/T 25261—2010《建筑用反射隔热涂料》。但是这些标准规定了相关的性能指标,关于隔热性能的测试方法并无统一标准。因此,研究者还需对建筑隔热涂料进行深层次研究,制定出相应的测试方法,推动反射隔热涂料朝着健康、规范的方向发展。

(2)反射隔热涂料相比普通外墙涂料,对太阳光的反射率高,导热系数小,应用于实际施工时的涂膜较薄,属于薄涂层涂料。单独使用时保温效果并不明显。应将其与聚苯乙烯板和聚苯颗粒保温浆料等外墙外保温系统结合起来使用,实现既隔热又保温的效果,延长保温层的使用期限,达到室内热环境舒适和节约能耗的目的。

(3)反射隔热涂料大多为白色或浅色。一方面,白色涂料的高折射率会使人产生眩晕感,对视网膜照成一定程度的伤害;另一方面,白色过于单调,无法满足建筑物外墙的色彩需求,红外反射功能颜料是一种功能颜料,具有较宽的颜色范围,且能反射近红外光,可将其作为辅助填料对涂料进行调色。

外墙反射隔热涂料存在的这些缺点限制了其自身的发展,研制出更多反射型深色系的颜料及如何避免中空微球在涂料制备过程中易粉化,均是亟待解决的难题,也是打通隔热涂料市场的关键所在。

### 3 结语

总的来说,我国对反射隔热涂料的研究尚处起步阶段,美国、日本、澳大利亚等国家对反射隔热涂料的研究起步较早,取得了令人瞩目研究成果,阿克苏诺贝尔的“cool chemistry”系列涂料已经进入中国市场。降低建筑能源消耗的迫切要求,势必推动着反射隔热涂料的快速发展,反射隔热涂料面临前所未有的机遇和挑战。

### 参考文献

- [1] Synnefa A, Santamouris M, Livada I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(8): 968-981.
- [2] Shen H, Tan H, Tzempelikos A. The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(2): 573-580.
- [3] Moujaes S F, Brickman R. Thermal performance analysis of highly reflective coating on residences in hot and arid climates[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2003, 129(2): 56-68.
- [4] 任秀全, 陈鹏, 张国英, 等. 太阳热反射弹性涂料的研究[J]. *新型建筑材料*, 2004, (2): 26-28.
- [5] 马小强, 陈华山, 茹伟峰, 等. 光反射保温隔热外墙漆的研制

[C]. 上海: 全国涂料工业信息中心, 2012.

- [6] 孙明杰, 贾梦秋, 文倩倩. 太阳热反射隔热涂料的研制[J]. *涂料工业*, 2010, (9): 37-40.
- [7] Chen L, Shi H, Xiang J, et al. Preparation and recipe optimization of water-based architectural heat insulation coatings [J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, 2008, 23(6): 932-937.
- [8] 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.
- [9] Guo H, Li X, Wang P. Characterization of absorptivities to solar radiation for colored pigments in coatings [J]. *Journal of Coatings Technology*, 2001, 73(923): 71-75.
- [10] Baneshi M, Maruyama S, Nakai H, et al. A new approach to optimizing pigmented coatings considering both thermal and aesthetic effects [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(3): 192-204.
- [11] 余龙, 何海华. 新型水性高反射高辐射隔热涂料的制备及性能研究 [C]. 上海: 全国涂料工业信息中心, 2012.
- [12] Wang P, Zhang X Z, Wei Z Y, et al. Preparation and properties of water-based solar-reflective coatings with color hollow ceramic microsphere [C]. *Trans Tech Publ*, 2011.
- [13] 杨鸿斌, 蔡会武, 陈创前, 等. 新型反射保温涂料的制备与性能研究 [J]. *涂料工业*, 2007, 37(4): 41-42.
- [14] 马承银, 李延升, 段远琼. 二氧化钛包覆中空玻璃微珠制备近红外反射材料 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2004, 35(5): 806-809.
- [15] Skelhorn A D. Composition of a thermal insulating coating system; US, 8287998 B2 [P]. 2012-10-16.
- [16] Huang Y, Wang D, Huang Q. Solar reflectance coating; WO, 2013029252A1 [P]. 2013-03-07.
- [17] Ye C, Li M, Hu J, et al. Highly reflective superhydrophobic white coating inspired by poplar leaf hairs toward an effective “cool roof” [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3364-3367.
- [18] Huang Q, Rokowski J M, Zhang Y. Infrared reflective coating compositions; US, 20120121886A1 [P]. 2012-05-17. ■

## 拜耳新的纺织涂层生产线在拜耳上海正式落成启用

拜耳材料科技 2014 年 4 月 11 日宣布其最新的纺织涂层生产线在拜耳上海聚合物研发中心正式落成启用。同时,其在德国勒沃库森的纺织涂层实验室也启用了全新的设施。包括美国匹兹堡实验室在内,拜耳材料科技投资研发,进一步提升其在纺织涂料领域从产品化学合成创新,到开发新一代生态纺织涂料解决方案的能力。这也将加强拜耳与纺织行业的全面合作,提供基于水性聚氨酯技术的创新型纺织材料。

全新启用的纺织涂层生产线处于国内领先地位。该生产线装备了 1 个多功能涂布装置、2 个层压装置、12 m 长烘箱、冷却装置以及拼接和缝制单元。它能实现高度自动化的工艺流程,并使得直接涂布、转移涂布、湿/干式层压、压花加工等多种应用方法在一条生产线上得以实现。该生产线的设置可适用于大规模工业生产,它意味着在拜耳实验室生产线开发的新型纺织材料将更易于推广到工业生产中,减少制造商停工时间。(杨瑛)