

# 水性太阳热反射隔热涂料的研究

刘 杰 李 翔 魏 刚\*

(北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 研制了一种太阳热反射型隔热涂料,考察了成膜基料、隔热颜料和填料的种类、颜基比及涂膜厚度对涂层隔热性能的影响。采用太阳热反射率和红外光反射率表征了涂料的隔热性能。结果表明,以水性丙烯酸树脂为成膜基料,以金红石型钛白粉、硫酸钡、空心陶瓷微珠为隔热功能颜填料,再加上云母、水及助剂等,制备出的反射型隔热涂料的热反射率达 92%,对红外线的反射率约为 95%。

**关键词:** 太阳热反射; 涂料; 隔热; 水性; 热反射率

**中图分类号:** TQ630.7

## 引 言

太阳能是人类生存和生活的必备条件,但强烈的辐射也给工业生产和日常生活带来诸多问题和不便<sup>[1-3]</sup>。为适应建筑业、石油工业、运输业、兵器工业等迅速发展,自 1970 年以来,英美日等国陆续开发了相关领域的隔热涂料<sup>[4-7]</sup>。在国内,隔热涂料的研究也取得了显著进展<sup>[8-11]</sup>。

隔热涂料是一种通过阻隔、反射、辐射等机理来降低被涂物内部热量的积累,从而达到节能和改善工作环境或安全等目的功能性涂料,主要包括阻隔型隔热涂料、反射型隔热涂料和辐射型隔热涂料<sup>[12]</sup>。其中,以反射型隔热涂料最有实用价值<sup>[8]</sup>。但是,目前对于反射型隔热涂料的研究仍然存在着诸多问题:金属表面用反射型隔热涂料基本上还是应用溶剂型体系,需要开发用于金属表面的水性体系反射型隔热涂料;用于制备反射型隔热涂料的反射填料价格普遍很高,造成其成本较高;目前关于涂膜反射光和热的性能还没有标准的测试方法;隔热涂料的隔热性能有待进一步的提高等。因此,本研究的目的是研制一种用于金属表面的水性反射型隔热涂料,在提高其隔热性能的前提下降低成本,使其同时满足隔热、耐候及装饰功能,达到节能环保的

效果。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料及主要仪器

水性丙烯酸树脂、水性环氧树脂、水性醇酸树脂均购自北京金汇利应用化工制品有限公司;水性丙烯酸乳液,北京东方永宇高分子制品有限公司;聚氨酯,北京百灵清月聚氨酯厂;黑色瓷漆,昊华精细化工总公司北京涂料分公司;云母、立德粉、重钙、金红石型二氧化钛、二氧化硅、硫酸钡,工业级,北京利国伟业超细粉体有限公司;空心微珠,工业级,北京安吉利安电子工程技术有限公司;自来水、助剂等。

高度分散用搅拌装置(自制);隔热性能测试装置(自制);KHW-1 型数字测温仪,德州市科华电子技术研究所;SWK-2 型表面温度计,浙江省慈溪市智能仪器厂;NEXUS 670 型傅立叶变换红外光谱仪,美国 Nicolet 公司;QCJ 型耐冲击测试仪、QHQ 型涂膜硬度测试仪、QTX-I 型漆膜弹性测定器,北方涂料工业研究设计院;电子天平,空调等。

### 1.2 涂料配制

由于本实验要求颜料充分混合,所以采用色浆法。隔热涂料的基本配方如表 1 所示,其它配方均为在基本配方的基础上改变树脂或颜填料。将自来水中加入分散防沉助剂及颜填料后高速搅拌,然后将用水稀释后的树脂加入并搅拌,加入其余助剂后高速搅拌,最后加入空心微珠慢速搅拌。值得注意的是,空心微珠因为容易破碎,所以不能对其进行高速搅拌。因此,待颜料浆与树脂混合完全后加入空心微珠,经慢速搅拌后即可。

收稿日期: 2008-03-18

基金项目: 国家“863”计划(2007AA05Z409)

第一作者: 男,1982 年生,硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: weigangmail@263.net

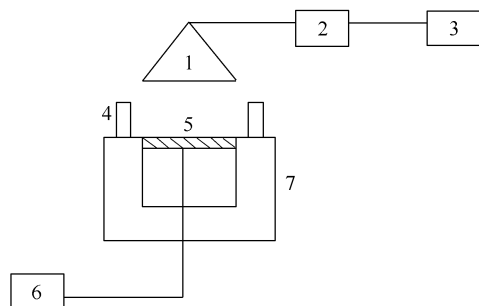
表 1 水性反射型隔热涂料配方  
Table 1 Formulation of the coatings

原料名称	$w/\%$	原料名称	$w/\%$
水性丙烯酸树脂	35~45	空心陶瓷微球	2~3
自来水	35~45	云母	2~4
二氧化钛	4~6	助剂	适量
硫酸钡	4~6		

### 1.3 涂料的性能检测

#### 1.3.1 隔热性能检测

如图 1 所示,将涂有隔热涂层的碳钢片放置好,用 100 W 红外灯进行照射。参考红外灯的功率,照射高度设定为 20 cm。实验证明此高度下的环境能有效模仿太阳光的直射环境。待温度达到稳定后,记录试片下层箱内的空气温度。



1—100 W 红外灯(飞利浦);2—调压器;3—电源;4—挡风板;  
5—测试样板;6—测温仪;7—聚苯乙烯泡沫板(厚度为 5 cm)

图 1 太阳热反射隔热涂料测试装置

Fig. 1 Schematic illustration of the testing device for solar heat-reflective insulating coatings

由于测试结果易受室温影响,因此参考美国军方标准和国外相关文献<sup>[7]</sup>对标准板进行测试。本试验采用处理后的光亮碳钢片作为标准板,具有简单易行且平行样间性能稳定的特点,并且相关文献中已采用未涂涂层的空白试板作为标准板。此外,为了减少误差,每次进行隔热涂层的测量时都进行标准板的测量,并且标准板的测量与隔热涂层的测量在同一时段进行。

此外,依照美国军方标准 MIL-E-46136<sup>[13]</sup>的规定构建了另一套实验装置,制备黑瓷漆标准板,利用空调将室温调节至 $(28.8 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,使用表面温度计测定太阳热反射率以作为对隔热性能的评价。热反射率计算公式如式(1)所示:

$$\rho = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为热反射率,  $T_1$  为黑瓷漆标准板温度,  $T_2$

为样板温度,  $T_3$  为当时的室温,一般固定在  $28.8^\circ\text{C}$ 。

#### 1.3.2 其他性能检测

耐候性能测试参照 GB/T 9276—1996,耐冲击测试参照 GB/T 1732—93,涂膜硬度测试参照 GB/T 6739—1996,涂料柔韧性测定参照 GB/T 1731—93,涂膜厚度测定参照 GB 1764—79。

## 2 结果与讨论

### 2.1 隔热性能检测方法的确定

对于涂料隔热性能的测试,目前还没有相应标准。一般采用两种方法:一是测定涂层的反射光谱,观察其光谱区域是否有高的反射率;二是直接测定,主要参照了美国军方标准,比较红外灯照射下(或阳光辐射下),反光涂层和其它涂层下表面的温度。直接法被认为更有说服力,也容易实现,所以本实验主要使用直接法对隔热性能进行测试。试样制作方法及试验装置如图 1 所示。

需要说明的是,采用如图 1 所示自制设备测试隔热性能虽然具有简单易行的特点,但不能用来测量热反射率,只能起到在本课题范围内快捷地筛选出配方的作用。相比此法,美国军方标准 MIL-E-46136<sup>[13]</sup>虽然操作复杂且对实验条件要求较高,但能测试出具有权威性的热反射率。因此,本文依照美国军方标准的规定构建了另一套实验装置,测定太阳热反射率以作为对隔热性能的评价。

### 2.2 基料的选择

基料是构成隔热涂料的重要组成部分,其性能与涂料的力学性能、防腐性能及施工应用紧密相关。近几年来,应用于隔热涂料的基料主要有:丙烯酸树脂、环氧树脂、醇酸树脂、丙烯酸乳液、聚氨酯等。实验过程中,将以上不同树脂或乳液配制成的清漆均匀地涂刷在试片上。为了方便对比,这些清漆均采用相同的固含量,并且其它实验条件均相同。

经过测试,含不同种基料的涂层间的下层温度相差仅  $1^\circ\text{C}$ ,基料种类的差异对涂料隔热性能的影响较小。其中丙烯酸树脂由于透明性好,折射系数较低,涂层的隔热性能也相应较好。此外,丙烯酸树脂本身因不含吸热基团,具有极好的耐水性、抗渗性、耐候性、柔韧性和与基层的粘接强度;其次,丙烯酸是单组分的,方便施工。被选取的丙烯酸树脂是水性的,能更好适应环保的趋势。综合上述条件,本实验主要采用水性丙烯酸树脂为成膜物。

## 2.3 颜料和填料的选择

### 2.3.1 不同颜填料对隔热性能的影响

衡量红外热反射涂层反射红外线的能力用散射率来表示,散射率越高,反射红外线的能力越强,散射率  $m$  定义如下:

$$m = n_P / n_R \quad (2)$$

式中,  $n_P$  为颜料的折射系数;  $n_R$  为基料的折射系数。由式(2)可知,要得到高散射率,必须采用折射系数高的颜料和折射系数低的基料,即颜料和基料的折射系数的差值越大则涂层对太阳光的反射就越强。一般采用基料的折射系数为 1.45~1.5,故基料种类的差异对涂料隔热性能的影响较小。与之相比,颜填料的折射系数<sup>[1]</sup>存在较大的变化范围。在基料一定的条件下,由于折射系数最大,金红石型二氧化钛对红外线的散射率最高。另外,根据辐射降温原理,如果物体在“大气窗口”范围内的辐射能力强,就能把物体的热量辐射到外层空间去,从而达到降温的目的。本课题选用的云母粉、滑石粉和沉淀硫酸钡等填料在 8~13  $\mu\text{m}$ <sup>[14]</sup> 这一“大气窗口”波段内存在较强辐射散热能力。功能性填料在太阳热反射隔热涂料的制备中具有十分重要的作用,本研究选用空心陶瓷微球作为功能性填料。空心陶瓷微球可在涂层内形成一道由空心微珠组成的真空腔体群,形成有效的热屏障,起到隔热效果。

### 2.3.2 二氧化钛用量的确定

二氧化钛有三种晶形,即板钛矿型、锐钛矿型和金红石型。三种晶形中,金红石二氧化钛热力学上最稳定。涂料体系中常用的为后两者。其中,金红石型二氧化钛具有更高的折光指数,并且对可见光有强烈的反射,所以隔热效果最好。不仅如此,二氧化钛还是遮盖力最强的颜料之一。由实验数据及经验可得到,钛白粉是热反射涂料中必要的颜料。因此,试验初步选定金红石型二氧化钛为颜料之一。以水性丙烯酸树脂为成膜物,分别加入不量的金红石型二氧化钛制成涂料。将其分别涂于试片上并待实干后进行隔热性能测试。测试结果如图 2 所示。可以看出,随着二氧化钛在涂料中含量的逐渐增加,涂层隔热性能逐渐提高。当添加量达到 40% 后,下层温度降低程度有所变缓。考虑到经济因素,40% 的添加量被认为是较为适合的。

### 2.3.3 空心陶瓷微球含量对隔热性能的影响

配方中选用的空心陶瓷微球由二氧化硅和三氧化二铝组成,中空,内含氮和二氧化碳等惰性气体,

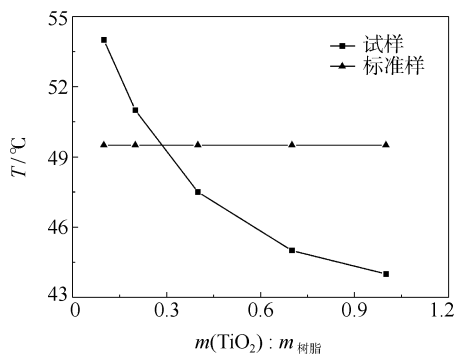


图 2 二氧化钛含量对隔热性能的影响

Fig.2 Influence of varying the rutile  $\text{TiO}_2$  contents on the thermal insulation properties

与陶瓷的组成相类似。所用空心微球除了可组成的真空腔体群,起到隔热效果外,还具有耐酸碱、抗辐射、阻燃、绝缘、吸油率低、无毒以及填充率高和流动性好等优点。

以水性丙烯酸树脂为成膜物,分别加入不同量的空心陶瓷微球制成涂料。将其分别涂于试片上并待实干后进行隔热性能测试。测试结果如图 3 所示。可以看出,随着空心陶瓷微球在涂料中含量的逐渐增加,涂层隔热性能逐渐下降。由于空心陶瓷微球本身呈灰色,所以随着其加入量的增加涂层颜色迅速加深而吸收大量热量。因此,要充分发挥空心微球的隔热效果,必须将其与遮盖力强的白色颜料搭配使用。

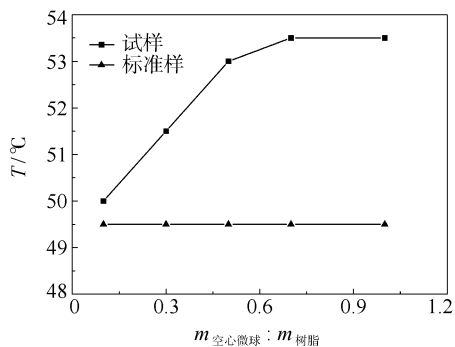


图 3 空心陶瓷微球含量对隔热性能的影响

Fig.3 Influence of the varying content of the hollow ceramic micro spheres contents on the properties of thermal insulation

### 2.3.4 二氧化钛和填料间的配比用量的确定

由实验数据及经验可得到,钛白粉是热反射涂料中必要的颜料。因此,试验初步选定金红石型二氧化钛为颜料之一。以水性丙烯酸树脂为成膜物,分别以不同的填料与二氧化钛配比制成涂料。将其



分别涂于试片上并待实干后进行隔热性能测试。测

试结果如图 4 所示。

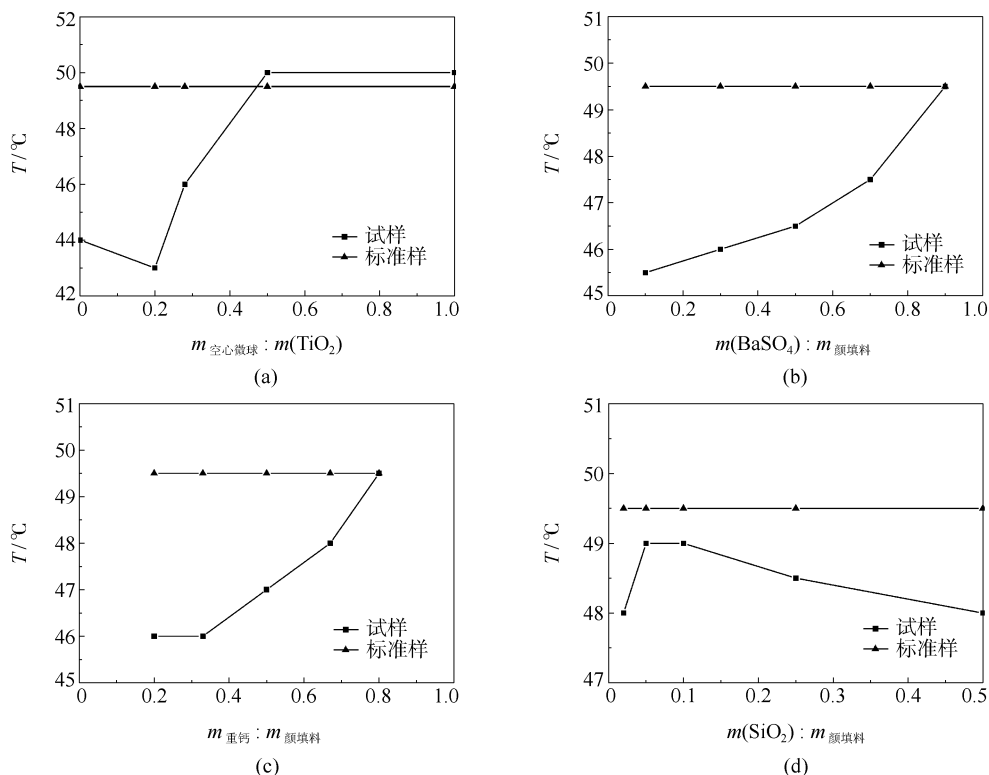


图 4 不同的颜填料配比对隔热性能的影响

Fig. 4 Influence of varying pigment to filler ratio on the thermal insulation properties

由于空心陶瓷微球本身呈灰色,所以随着其加入量的增加涂层颜色迅速加深而吸收大量热量。因此,要充分发挥空心微球的隔热效果,必须将其与遮盖力强的二氧化钛搭配使用,如图 4(a)所示。当空心陶瓷微球含量较少时,二氧化钛能有效遮盖其灰色。并且,空心微球可在涂层内形成真空腔体群而形成有效的热屏障,所以起到较好的隔热效果。但是,当空心陶瓷微球含量继续增加,涂层颜色变暗而吸光,使涂层隔热性能再次下降。

虽然硫酸钡的折射率相当低,不直接散射光,但是用作体制颜料可提高二氧化钛的散射效率,并且在“大气窗口”波段内存在较强辐射散热能力,如图 4(b)所示。当加入 50% 的硫酸钡后,下层温度上升仅一度,这说明硫酸钡可以替代一部分二氧化钛。当硫酸钡加入量超过 50% 后,随着硫酸钡加入量的增多,涂层对光的反穿透能力下降,隔热能力下降迅速。因此,兼顾隔热性能与经济两因素,选择 50% 的加入量较为适合。

如图 4(c)、(d)所示,重钙与二氧化硅的加入虽然也能替代一部分二氧化钛,但隔热性能较硫酸钡与二氧化钛的组合差。而且重钙耐酸雨性能较差,

不适宜用于户外面漆。二氧化硅的加入使涂层表面光泽度下降,特别是当加入 5%~10% 时最为严重,因此不适合用于反射型隔热体系。因此,本研究初步选定空心陶瓷微球与硫酸钡为隔热用填料。

此外,片状云母粉可以有效阻碍腐蚀介质对漆膜的渗透,起到防腐蚀和提高户外耐候性的作用。作为涂料中的填料,片状云母粉还可提高漆膜的柔韧性,耐龟裂、粉化等性能。

通过总结上述实验数据与经验,初步确定隔热涂料中隔热用颜填料的组成为:二氧化钛占 40%,硫酸钡占 40%,空心陶瓷微球占 20%。此外,占涂料总量 2% 的云母还被加入涂料中以提高其防腐蚀性能和户外耐候性。

## 2.4 水性反射型隔热涂料颜基比的确定

在涂料设计中,另一影响涂层隔热性能的重要因素是颜填料与树脂的质量之比,本文中简称为颜基比。在稳定其它实验条件的情况下,改变颜填料与树脂的质量之比,进而改变颜填料在干膜中所占的质量浓度,测试结果如图 5 所示。

当颜填料在涂料中含量较少时,随着其加入量的不断增加,涂层的隔热性能逐渐提高。这是由于

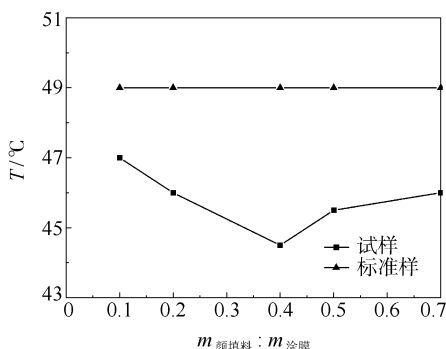


图5 颜填料在干膜中的质量分数对隔热性能的影响

Fig. 5 Influence of varying mass of pigment on the thermal insulation properties

颜料和填料在树脂基体内间隔不断缩小,能更有效地防止光辐射的穿透并将其反射出去。但是,当颜填料的含量继续增加,树脂无法对其进行完全包裹或填充颜料间的空隙,涂层中出现空隙与缺陷。此外,涂层不完整均匀造成耐腐蚀性能下降,涂刷一段时间后表面甚至出现锈点。这使得涂层的隔热性能逐渐下降。因此,本研究选定 40% 的颜填料加入量。

## 2.5 涂层性能

### 2.5.1 隔热性能

参照美国军标 MIL-E-46136,制备了黑瓷漆标准板,利用空调将室温调节至  $(28.8 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,使用表面温度计对本研究得到的水性日光热反射隔热涂料(单层,厚度为  $160\ \mu\text{m}$ )测定太阳热反射率,依照式(1)进行计算,结果如式(3)所示。现阶段反射隔热涂料的先进水平一般在 90% 左右<sup>[2]</sup>,本研究制备的隔热涂料的热反射率为 92%,已经达到同等产品的先进水平。

$$\rho = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} = \frac{87.8 - 59.5}{59.5 - 28.8} = 92\% \quad (3)$$

任何物质都具有反射或吸收一定波长红外光的性能。入射在涂膜上的红外光能被吸收、透射或反射,其吸收率  $\alpha$ 、透射率  $r$  和反射率  $\rho$  之间有如下的关系:  $\rho + \alpha + r = 1$ 。由于涂膜是不透明的,其透射率  $r$  近似为 0,即  $\rho + \alpha = 1$ 。因此,只有提高涂层的反射率  $\rho$ ,才可以使涂层表面吸收较少的能量,达到良好的隔热效果。

将一束红外线射向太阳热反射隔热涂料的涂膜表面,收集并检测被涂膜反射回的红外线各波段内损耗的百分比,如图 6 所示。由上可知,此损耗掉的百分比即为吸收率  $\alpha$ (图中纵轴即为吸收率  $\alpha$ ,横轴

表示不同波段),可通过数学积分软件 MATLAB 计算得出,约为 5%。因此,涂膜对红外线的反射率  $\rho$  约为 95%。

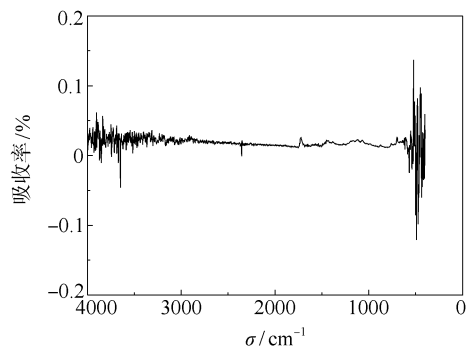


图6 隔热涂料的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectrum of the coatings

### 2.5.2 其他性能

本研究得到的水性日光热反射隔热涂料的产品其它性能指标见表 2。

表2 单涂层性能指标(单层厚度为  $160\ \mu\text{m}$ )Table 2 Properties of a single coating with a thickness of  $160\ \mu\text{m}$ 

项目	技术指标
表干时间( $25^\circ\text{C}$ )/min	50
硬度( $25^\circ\text{C}$ )	HB
柔韧性( $25^\circ\text{C}$ )/mm	2
耐冲击性( $25^\circ\text{C}$ )/cm	20
耐候性(30 d)	涂膜平整完好

## 3 结论

(1)成膜基料种类的差异对涂料隔热性能的影响较小。其中,水性丙烯酸类成膜基料由于透明性好,折射系数较低,不含吸热基团,涂层的隔热性能相应较好。

(2)本研究采用的空心陶瓷微球本身呈灰色,但成遮盖力强的二氧化钛混合使用可达到良好的隔热效果。用硫酸钡替代部分折射率高的钛白粉颜料所制备的涂料,具有优良的隔热性能,且产品成本较低。

(3)当颜填料在涂料中含量较少时,随着其加入量的不断增加,涂层的隔热性能逐渐提高。当颜填料的含量超过 40% 时,树脂无法完全填充颜材间的空隙,涂层中出现空隙与缺陷,隔热性能下降。

(4)参照美国军标 MIL-E-46136,测得隔热涂料的太阳热反射率为 92%。隔热涂料的红外光谱图

表明,涂膜对红外线的反射率约为 95%。

#### 参考文献:

- [1] 陈国栋,涂伟萍. 太阳热反射涂料的研究[J]. 涂料工业, 2002, 32(1): 3-5.
- [2] 夏正斌,涂伟萍,杨卓如,等. 建筑隔热涂料的研究进展[J]. 精细化工, 2001, 18(10): 599-602.
- [3] 童仲轩. 石化储罐应用高效太阳热反射涂料的研究[J]. 江西石油化工, 2004, 16(3): 1-7.
- [4] Santamouris M, Pavlou K, Synnefa A, et al. Recent progress on passive cooling techniques advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households[J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 859-866.
- [5] 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 & Solar Cells, 2007, 91: 304-314.
- [6] Synnefa A, Santamouris M, Apostolakis K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment[J]. Solar Energy, 2007, 81: 488-497.
- [7] Synnefa A, Santamouris M, Livada I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment[J]. Solar Energy, 2006, 80: 968-981.
- [8] 郭声波,叶建军. 反光隔热防水涂料的研究[J]. 新型建筑材料, 2005, 10: 46-49.
- [9] 于明涛,万隆. 硅酸盐系隔热涂料的配方研究[J]. 涂料工业, 2007, 37(9): 25-28.
- [10] 陆丕禾. 水性建筑保温涂料及其滚坛法制备工艺: 中国, 1810900A[P]. 2006-08-02.
- [11] 于志鸿. 日光热外墙反射涂料: 中国, 1749331A[P]. 2006-03-22.
- [12] 陆洪彬,陈建华. 隔热涂料的隔热机理及其研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 71-73.
- [13] 中国腐蚀与防护学会非金属材料专业委员会. 功能性防腐蚀涂料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 39-40.
- [14] 马庆芳,方荣生,项立成,等. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986: 335-368.

## Properties of waterborne solar-reflective heat-insulating coatings

LIU Jie LI Xiang WEI Gang

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to prepare solar-reflective heat-insulating coatings, the influence of varying the pigment resin, filler type and proportion, pigment/binder ratio and coating thickness on the coating performance has been investigated. The FT-IR spectra and heat reflectivity of the coatings were studied in order to characterize the heat insulation. The coatings were prepared using water-soluble polyacrylate resin as the base material, rutile type titanium pigment, mica, baritite and hollow ceramic microspheres as color filler. The maximum heat reflectivity of the coatings was 92% and the maximum infrared reflectivity was 95%.

**Key words:** solar-reflective; coatings; heat-insulating; waterborne; heat reflectivity