

热反射颜填料对建筑节能涂料的影响

程 明 吉 静* 常雨鑫

(北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘 要: 首先研究了颜填料的折光指数、含量和粒径等因素对涂层反射率的影响,通过正交分析实验,获得了浅色系涂料的优化配方;进一步分析了颜填料的光谱属性与反射率之间的关系,并利用现有颜填料数据库,开发出五种深色系的具有近红外高反射的颜填料。实验结果为:浅色系涂料的优化配方为(质量分数)金红石钛白粉 25%,白色陶瓷微珠 13%,重钙 10%;颜填料折光指数越大,热反射性能越好;添加高反射颜填料制得的节能涂料与同色系普通涂料相比,平衡温度下降了 10~20℃,表面吸收的热量大幅降低。

关键词: 颜填料;节能涂料;近红外;热反射

中图分类号: TQ630.4

引 言

节能涂料对太阳光具有很高的反射率,能阻缓热能向物体内部传导,并将吸收的热能辐射出去。这种涂料在高温的夏季降低了建筑表面温度,进而影响了周围环境温度,使得空调等制冷设备能耗降低^[1];同时涂料的基料为水性乳液,对环境友好。因此节能涂料具有环保节能的功用,符合当今发展的趋势。

颜填料是节能涂料重要的组成部分之一,起主要的反射隔热作用。目前,国内对颜填料的研究还处在初级阶段,主要是通过大量的选择配比实验来确定配方,对颜填料本身属性以及反射原理的认识还不够深入,方法上存在着不够系统和严谨的问题,所以急需理论上的指导,以便可以依据理论有目的地选择和配制高反射率的颜填料^[2-5]。另外,现有的研究主要是侧重浅色系颜填料的选择和配比,但从美学的角度上看,深色系更受青睐,不过普通的深色系颜填料一般吸热都很大,因此研究和开发具有高反射率的深色系颜填料具有重要意义^[6-8]。

本文全面考察了浅色系和深色系颜填料各因素对热反射性能的影响。浅色系颜填料由于本身具有高反射性,因此提高反射率主要是在配方设计上。

文中对 3 种浅色系颜填料进行正交实验,找到一个最优配方,并确定了主要影响因素。深色系颜填料由于吸热率较大,所以需要从颜填料本身属性上来考虑提高反射率。本文参考国外已经建立起来的近百种颜填料的数据库,分析其中一些颜填料的属性和组分,联合厂商开发多色系高反射颜填料,所用方法对颜填料的开发具有一定的参考意义。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

纯丙烯酸乳液,美国罗门哈斯公司;分散剂 D-80,化学纯,北京顺义福利化工厂;白色陶瓷微珠,北京祥瑞公司提供;空心玻璃微珠、金红石型钛白粉、重钙均为北京国利超细粉体有限公司提供;黑色浆由北京德利建筑材料有限公司提供;Ferro Blue V-9250 铝酸钴蓝、Bayer Bayferrox 6622 氧化铁红、Dominion Color Krolor KY-781-D 铬黄,均市售。

LP2102 电子天平,常熟市衡器厂;高速分散机,江阴精细化工机械厂。

1.2 测试仪器和方法

1.2.1 平衡温度的测量

参照美国军标 MIL-E-46906C,以 2 个 250 W 工业用反射型红外灯(GE NO. 25)模拟太阳光的照射,自制了热反射温度测量仪器,如图 1 所示。采用 CENTER-300 数字式温度计和热电偶。测试时,将反射灯调整到离底板 61 cm 的高度,在泡沫板上放置两块准备好的黑色标准板,打开红外灯电源,在 30 min 内使两块黑板背面升温至 $(87.8 \pm 1.1)^\circ\text{C}$,

收稿日期: 2008-03-24

第一作者: 男,1983 年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: jijing226@sina.com

此时仪器内部与外界环境达到热平衡, 黑板温度保持稳定。移出其中一块黑板, 换上涂刷后的待测样板, 在仪器内部的高温环境中, 待测样板温度在 15 min 内迅速达到平衡, 记录此时样板的平衡温度。

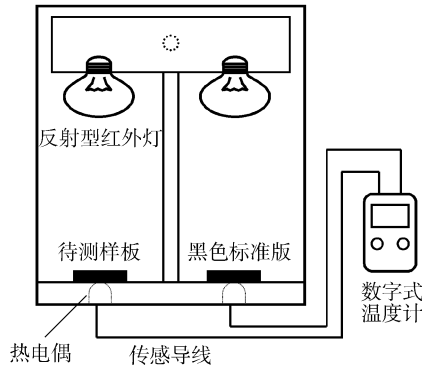


图 1 热反射率测量仪

Fig.1 Heat reflectance equipment

1.2.2 太阳反射率的测量

用配有积分球装置的紫外-可见-近红外分光光度计测反射涂料的太阳热反射率, 测定波长范围为 200 ~ 2500 nm, 型号为 Perkin-Elmer Lambda-900 UV-VIS-NIR 分光光度计。

2 结果与讨论

2.1 浅色系颜填料的选择和配比

2.1.1 颜填料折光指数对热反射性能的影响

选择金红石型钛白粉、白色陶瓷微珠、重钙、二氧化硅 4 种不同折光指数的浅色系颜填料, 以相同的质量分数 25% 配成涂料并制备样板。各样板的平衡温度见表 1。

表 1 颜填料折光指数与热反射性能的关系

Table 1 Relationship between refractive index and heat reflectance for the pigments

浅色系颜填料	折光指数	平衡温度/℃
金红石型钛白粉	2.80	54.6
白色陶瓷微珠	2.20	55.8
重钙	1.63	57.9
二氧化硅	1.54	61.4

由表 1 看出, 相同条件下, 加入折光指数高的颜填料, 样板平衡温度就低, 热反射性能就好。因此, 颜填料的折光指数可以作为衡量反射率的一个参考指标。

2.1.2 颜填料含量对热反射性能的影响

选择金红石型钛白粉和白色陶瓷微珠两种折光指数较高的浅色颜填料。以钛白粉为颜填料, 质量分数取值为 5%、10%、15%、20%、25%、30% 依次递增, 制备样板测平衡温度; 同理以白色陶瓷微珠为颜填料, 制备样板测平衡温度。测得各样板的平衡温度如图 2 所示。

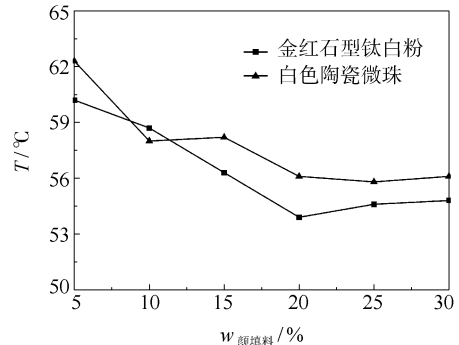


图 2 颜填料含量对平衡温度的影响

Fig.2 Influence of content of the reflective pigments on the surface temperature of the coatings

由图 2 看出, 在相同的配方下, 金红石型钛白粉和白色陶瓷微珠各自的质量分数在 20% ~ 25% 的区间范围内, 样板的平衡温度较低, 热反射性能也就较好。

2.1.3 颜填料粒径对热反射性能的影响

在涂料中加入一定量的空心玻璃微珠, 可以大大提高涂层的孔隙率, 起到隔热作用。同时在微珠制备中混入的金属粒子沉积在空心球内表面, 也大大提高了对光的反射作用^[9]。本文考察了 100 μm、10 μm 和 5 μm 3 种同一牌号的空心玻璃微珠对涂料热反射性能的影响。图 3 所示的为不同粒径和不同含量的空心玻璃微珠对涂料热反射性能的影响曲

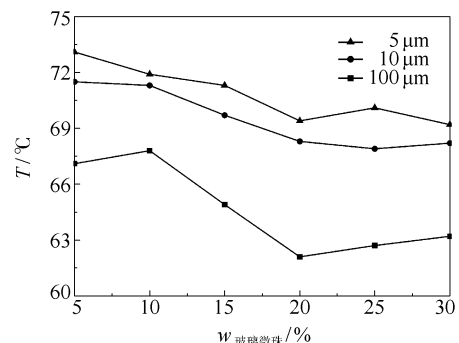


图 3 颜填料的粒径大小对平衡温度的影响

Fig.3 Influence of particle size of reflective pigments on surface temperature of coatings

线。由图 3 可以看出,微珠粒径越大,平衡温度越低。这是因为玻璃微珠的空心结构起主要的隔热反射作用,在相同质量分数下,粒径大的玻璃微珠空心体积大,隔热反射效果更佳。但粒径大的玻璃微珠制得的样板表面较为粗糙,可作隔热中间涂层。

2.1.1.4 多种颜填料配比的优化

为满足对涂料各种性能的要求,一般涂料中都添加有多种颜填料,因此考察各颜填料间的配比对最终涂层的热反射性能的影响更有实际意义。运用正交实验对 3 种浅色系颜填料进行正交实验,可以确定出最优的一个浅色系涂料配方。金红石型钛白粉、白色陶瓷微珠和重钙都具有较好的热反射性能,选为 3 因素,并进行 3 水平实验,因素水平表如表 2,实验设计和实验结果分析如表 3 所示。

表 2 正交实验各因素与水平表

Table 2 Factors and levels of the orthogonal test

水平	因素		
	Am 钛白粉/g	Bm 陶瓷微珠/g	Cm 重钙/g
1	25	15	10
2	20	12	8
3	15	10	5

表 3 正交实验 $L_9(3^3)$ 安排和实验结果分析

Table 3 Experimental arrangement and analytical results of the orthogonal test

实验序号	因素			平衡温度/℃
	A	B	C	
1 [#]	1(25)	1(15)	1(10)	48.4
2 [#]	1(25)	2(12)	2(8)	48.1
3 [#]	1(25)	3(10)	3(5)	48.0
4 [#]	2(20)	1(15)	2(8)	49.0
5 [#]	2(20)	2(12)	3(5)	48.6
6 [#]	2(20)	3(10)	1(10)	46.1
7 [#]	3(15)	1(15)	3(5)	49.1
8 [#]	3(15)	2(12)	1(10)	50.6
9 [#]	3(15)	3(10)	2(8)	47.6
K_1	144.5	146.5	145.1	
K_2	143.7	147.3	144.7	
K_3	147.3	141.7	145.7	
$k_1 = K_1/3$	48.2	48.8	48.4	
$k_2 = K_2/3$	47.9	49.1	48.2	
$k_3 = K_3/3$	49.1	47.2	48.6	
极差	1.2	1.9	0.4	
优水平	A2	B3	C2	

K 为同 1 因素在同 1 水平时 3 次试验平衡温度之和, k 为 3 次试验的平均平衡温度。

从表 3 分析来看,最佳的组合方案为 $A_2B_3C_2$,即金红石钛白粉 20 g(25%),白色陶瓷微珠 10 g(13%),重钙 8 g(10%)。极差为每一因素各水平的平均指标中最大值减去最小值所得的差。表中 A 和 B 的极差较大,C 最小,说明 A 和 B 对实验指标的影响大,为主要因素,而 C 则为次要因素。即颜填料中起主要反射作用的为金红石型钛白粉和白色陶瓷微珠,而重钙所起的作用不大,可根据需要不用或少用。

2.2 深色系颜填料

太阳光的主要能量集中在可见光和近红外光区,相比于浅色系颜填料的高反射,深色系颜填料吸收率很大,需要从颜填料自身属性上去提高反射率。如果深色系颜填料在近红外区的反射率高,则可以使整个波段的平均反射率提高,降低物体表面温度。美国 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) 对近百种颜填料的光学属性进行了系统的分析,并按照色系分类建立了完善的数据库,本文参照其中的部分数据,对颜填料的属性和成分进行了分析。

2.2.1 颜填料光学属性的分析

根据 Kubelka-Munk 理论^[10-12],吸收率能更好地反映颜填料的实际吸热情况,可以由测量的颜填料的光谱反射率和透过率导出 Kubelka-Munk(简写 K-M 系数):吸收系数 K 和背向散射系数 S 。根据各颜填料的 K 和 S 全波段光谱曲线图,了解各种颜填料在各波段的散射和吸收情况,从而就能直观判断哪些颜填料在近红外区具有高反射性能。根据以上原理用分光光度计分析了两种黑色颜填料,它们的 K-M 系数谱线图如图 4 所示。

由图 4(a)可见普通碳黑的在全波段上的吸收系数都很大;而散射系数则仅在紫外和可见的一小部分区域有值,且数值较低。因此判断碳黑是一种全波段热吸收颜填料。在图 4(b)中,Ferro Black V-799 改性氧化铁黑的吸收系数 K 在紫外和可见光波段与碳黑一致。但在 NIR 波段 K 的值大幅降低,虽然在 1500 nm 时有所回升,但平均吸收系数仍大大低于碳黑的值。而散射系数 S 在可见和 NIR 波段数值大幅提高。因此该种深色颜填料是一种 NIR 高反射颜填料。

2.2.2 多色系颜填料

通过以上对颜填料光学属性的分析,可以很清楚地了解其热反射性能,从而给开发高反射深色颜填料提供依据。本文参考分析了数据库中深色高反

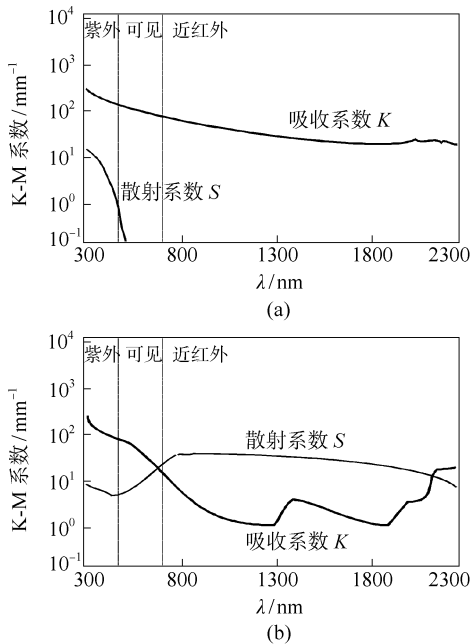


图 4 两种黑色颜填料的 K-M 系数全波段光谱曲线图
Fig. 4 K-M coefficients of coatings with two black pigments obtained by diffuse reflectance spectrophotometry

射颜填料的属性和成分,联合颜填料生产商开发出 3 种符合 NIR 高反射要求的颜填料,分别为红、黄、蓝色系。为得到更多色系的颜填料,又运用配色原理,将红黄蓝按比例混合均匀分散又配得了五种新色系的深色颜填料。然后将它们制备成涂料并与普通涂料进行热反射性能的对比,如表 4 所示。

表 4 同色系的高反射涂料与普通涂料平衡温度的对比
Table 4 Comparison of surface temperature between solar reflective coatings and normal coatings

色系	平衡温度/℃	
	普通涂料	热反射涂料
黑色	85.4	67.8
绿色	78.5	68.8
橙黄色	57.7	54.5
蓝灰色	80.5	70.2
深棕色	83.9	72.1

由表 5 可以看出,热反射涂料除了橙色系外,其余的要比普通涂料的平衡温度要低 10~20℃。这主要是由于多种 NIR 热反射深色颜填料在混合配色后,虽然对可见光区的属性发生改变,但各自保持了对近红外区的高反射属性,因此均匀混合后的新色系颜填料也对 NIR 具有高反射率。

参考 LBNL 颜填料数据库,分析其中 NIR 高反射颜填料的光学属性和成分,结合配色原理,这大大缩短了多色系深色高反射颜填料的开发时间,并可以有目的地设计开发所需的颜填料。

3 结论

(1) 依据美国军标 MIL-E-46906C 自制平衡温度测试装置经实际测量,证明能比较不同样品的热反射性能大小,具有一定的实用价值。

(2) 颜填料折光指数越大,则热反射性能越好;颜填料的质量分数一般在 20%~25% 会有好的反射效果;粒径大的空心玻璃微珠绝热性能好,但涂层表面比较粗糙。

(3) 通过对 3 种浅色系颜填料含量做正交实验,获得了一个最优的配方:金红石钛白粉 25%,白色陶瓷微珠 13%,重钙 10%。

(4) 利用 K-M 系数光谱曲线选择的 NIR 热反射颜填料经混合均匀分散得到多色系颜填料,制成的样板与同色系的普通涂料样板相比,平衡温度一般要低 10~20℃,解决了深色涂层吸热大的问题。

参考文献:

- [1] Akbari P, Bretz S, Kurn M. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs[J]. Energy and Buildings, 1997,25:117-126.
- [2] 祝小娟,林安. 太阳热反射涂料的研制[J]. 装备环境工程,2006,3(2):29-32.
- [3] 王金台,路国忠. 太阳热反射隔热涂料[J]. 涂料工业,2004,34(10):17-19.
- [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,2004(2):26-28.
- [5] 屠平亮,陈健康,周建初. 高反射率节能涂料及其应用[J]. 红外与毫米波学报,1993,12(6):436-440.
- [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] Parker P S, Barkaszi S F Jr. Roof solar reflectance and cooling energy use: Field research results from Florida [J]. Energy and Buildings,1997,25:105-115.
- [8] Akbari H, Dickerhoof D, Pollak J. The effect of a cool-coating on the thermal effectiveness of exposed exterior ducts[J]. Energy and Buildings, 2007,39:681-692.
- [9] 郭鸿霖. 功能性中空微珠在工业防腐隔热涂料中的应用[J]. 现代涂料与涂装,2007,10(9):11-15.

- [10] Levinson R, Berdahl P, Akbari H. Solar spectral optical properties of pigments-Part I : Model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005, 89(4):319 – 349.
- [11] Levinson R, Berdahl P, Akbari H. Solar spectral optical properties of pigments-Part II : Survey of common colorants[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 89(4): 351 – 389.
- [12] Brady R F, Wake L V. Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties [J]. *Prog Org Coat*, 1992, 20(1):1 – 25.

Study of solar heat-reflective pigments in cool roof coatings

CHENG Ming JI Jing CHANG YuXin

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

Abstract: Three properties of a pigment which affect the reflectance of coatings—refractive index, content and particle size—have been investigated. An optimum formulation for light-color coatings was obtained by the orthogonal design method. Further analysis of the relationship between the spectra and the values of reflectance was carried out in order to develop new species of dark-color pigments with high near-infrared reflectance. Consequently, five dark-color pigments were prepared. The results suggested that the optimum formulation involved rutile type titanium dioxide with 25% weight content, white ceramic microspheres with 13% weight content and heavy calcium carbonate with 10% weight content. The refractive index varied in direct proportion to the heat-reflective performance; compared to normal coatings, the back temperatures of coatings mixed with these highly reflective pigments were lowered by 10 – 20 °C, which implied a significant decrease in absorbed energy on the face of the samples.

Key words: pigment; energy-efficient coatings; near-infrared; heat-reflective