

金属颜料对保温涂料发射性和反射性的影响

张永娟, 沈中林, 张 雄

(同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 基于高原、严寒及寒冷地区对外墙涂料光学性能的要求, 研究涂料组分中各类金属颜料对其红外发射率及太阳能反射比的影响。研究表明: 金属颜料能显著降低油性涂料的红外发射率, 颜料种类、掺量及形貌对涂料的发射率有较大影响; 铜粉对油性涂料发射率的降低效果最好; 发射率随颜料掺量的增加而降低, 在 40%~50% 范围内达到最低; 同掺量下片状铜粉在油性涂层中的效果优于球状的; 漂浮型铝颜料对油性涂料发射率的降低效果优于非漂浮型铝颜料。水溶性金属铝粉能显著降低水性涂料的红外发射率, 红外发射率和太阳能反射比均随铝粉的粒径增大而下降。上述各类涂料涂层的红外发射率均可达到 0.35~0.45、太阳能反射比为 0.39~0.56, 基本符合采暖地区外墙涂料光学性能的要求。

关键词: 保温涂料; 金属颜料; 低红外发射率; 低太阳能反射比

中图分类号: TQ628.1

文献标志码: A

Influence of Metal Paint on Emissivity and Solar Reflectance of Insulation Coating

ZHANG Yongjuan, SHEN Zhonglin, ZHANG Xiong

(Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the optic requirement of insulation coating used for outside wall in plateau, cold and freezing area, lots of experiments were made for research on the influence of metal paint on insulation coating with low emissivity and solar reflectance. The results indicate that the infrared emissivity of oil insulation coating is digressive evidently with metal paint such as copper, aluminum and nickel. The infrared emissivity of coating is influenced by kinds of metal paint, dosage and shape of metal powder. Copper is the best. The best dosage of these metal paints is about 40%~50%. The effect of sheet copper powder on the decrease of the infrared emissivity for oil insulation coating is better than the spherical powder, and the floating aluminum powder better than the non-floating. For water soluble coating, the infrared emissivity is digressive evidently with

soluble aluminum powder and the infrared emissivity and solar reflectance decrease, but the powder particle size increases instead. The above insulation coatings are approximate with the optic requirement of insulation coating used for outside wall in plateau, cold and freezing area with infrared emissivity upto 0.35~0.45 and solar reflectance 0.39~0.56.

Key words: thermal insulation coating; metal paint; low infrared emissivity; low solar reflectance

随着各国经济的高速发展, 能源和环境已逐渐成为全球关注的重大战略问题。相对于其他形式的能耗, 建筑能耗在总的能耗中占有很大的比重, 欧美发达国家为 42%~47%, 我国已达 27.6%, 且每年递增 1%。根据发达国家的经验, 这一比例将随着居民生活水平的提高逐步增加到 35% 左右。据统计, 北方地区采暖空调能耗约占建筑能耗的 50%~60%^[1-2]。在建筑围护结构中, 墙体在采暖能耗中所占的比例最大, 约占总能耗的 32%~36%。所以改善墙体的保温性能是建筑节能工作的重中之重。

目前外保温体系主要有聚苯乙烯板玻纤网格布聚合物砂浆体系、现浇混凝土模板内置保温板体系、胶粉聚苯颗粒保温浆料玻纤网格布抗裂砂浆体系以及喷涂硬泡聚氨酯外墙外保温体系。但这几种保温体系存在施工繁琐、成本高、保温层过厚时易脱落开裂、存在防火隐患等不足。因此需要研制开发薄层、高性能、施工简便的外墙保温节能涂料以满足外墙保温体系市场的各类需要。

对于保温隔热涂料, 目前研究比较多的是阻隔型、反射型和辐射型建筑保温隔热涂料。国内外已有不少研究单位和企业在进行保温涂料的研究工作, 各生产厂对产品的称呼也不尽相同。阻隔型应用于建筑外墙或屋顶时, 涂层两侧的温差较小, 如果要起到明显的隔热效果, 需要涂层具备很高的热阻。而建筑涂料厚度施工较薄, 所以涂料仅具有导热系数小

的特性,在建筑领域实用价值有限;反射型与辐射型节能涂料隔热效果明显,主要针对的是冬季寒冷天气较短,夏季酷热天气较长的地区^[3-12].

国内外有不少学者研究了金属颜料对低发射率涂料的影响^[13].李凤雷等^[14]用双层涂覆的方法,以特殊形态片状微米级铝粉作为填料制备红外隐身涂料,表明填充量为 40%且涂层厚度达到 20 μm 时,涂层的红外发射率可达 0.15 左右.王自荣等^[15]研究显示,铝粉粉末粒径在 0.105~0.125 μm 范围时发射率最低,为 0.58,含量以 25%~30%为宜,最大不超过 40%.

目前对低发射率涂料的研究主要应用在军事上,降低目标与周围环境的热辐射对比度,使红外探测与成像系统不能够识别目标的形状特征,实现红外隐身的目的.对低发射率涂料应用于建筑保温节能的研究尚极少涉及,本文试图将低发射率和低反射率涂料用作建筑外墙保温节能,不仅满足市场对外墙保温产品的需要,也是对节能涂料研究方向的拓展^[16-17].

基于文献^[18]运用软件 Energy Plus 4.0 作为建筑能耗模拟研究工具的研究结果:在高原地区、严寒地区和寒冷地区这 3 类采暖区,节能涂料的合理光学性能参数设计红外发射率为 0.3~0.4,太阳能反射比为 0.3~0.5,本文研究了多种金属颜料对保温节能涂料红外发射率及太阳能反射比的影响,为今后配制低发射、低反射保温涂料奠定一些基础.

1 研究内容

1.1 试验仪器设备与测试内容

本研究采用电动搅拌机、电子天平、AE1 型辐射率仪(美国的 Devices & Services Company 生产)、Shimadzu UV 3600 型紫外-可见光谱仪和 EQUINOXSS/HYPERION2000 红外光谱仪,对所制得的试样进行涂层发射率、涂层太阳能反射比以及红外吸收光谱分析.

1.2 试验原材料

试验所用原材料见表 1.

1.3 试验方案

1.3.1 水溶性基料与金属颜料发射率制样及测试方法

分别称取一定量(以乳液固含量为基准)的水溶性铝粉,再加入至纯丙弹性乳液(固含量 50%,质量分数,后同)中,加入适量成膜助剂,充分搅拌至颜料

均匀分散于乳液中后,将涂料在玻璃板上制成 100 mm \times 100 mm \times 5 mm 的湿膜,置于(23 \pm 2) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度(50 \pm 5)%条件下干燥养护 3 d,然后从玻璃板上将涂膜取下.水溶性铝粉与 VAE(醋酸乙烯-乙烯共聚)乳液的配制方法同上.

表 1 试验原材料

原材料	规格	生产商
镍粉	58 μm	中国医药集团总公司
球状铜粉	58 μm	中国医药集团总公司
片状铜粉	25 μm	上海丹泽电子有限公司
漂浮型铝浆	45 μm	上海华亭烫金银粉厂
非漂浮型铝浆	45 μm	上海华亭烫金银粉厂
漂浮型铝粉	12 μm	上海崇明冶金材料厂
水溶性铝粉	18 μm	上海崇明冶金材料厂
水溶性铝粉	30 μm	上海崇明冶金材料厂
水溶性铝粉	40 μm	上海崇明冶金材料厂
科腾树脂 (简称 Kraton 树脂)	G1650	上海溢承贸易有限公司
三元乙丙橡胶 (简称 EPDM)	工业级	上海神诺贸易有限公司
聚氨酯	工业级	上海神诺贸易有限公司
纯丙弹性乳液	工业级	罗门哈斯
醋酸乙烯-乙烯共聚乳液 (简称 VAE 乳液,后同)	工业级	罗门哈斯

测试时干膜分别置于半球发射率为 0.05 的镜面背景和 0.95 的近黑体背景上.

1.3.2 油性基料与金属颜料发射率制样及测试方法

分别称取 EPDM、科腾树脂一定量置于烧杯中,待完全溶解后,加入颜料及助剂,其中颜料掺量分别为基料质量的 10%,20%,30%,40%,50%,60%,分散剂掺量为颜料质量的 0.7%,继续加热搅拌约 10 min 后将其倒在玻璃板上制成 100 mm \times 100 mm \times 5 mm 厚湿膜,在常温通风环境下养护,当溶剂完全挥发后,形成干膜,即可测试.测试方法同上.

1.4 涂料反射率试样制样及测试方法

制样方法同发射率试验.测试在 230~2 550 nm 范围的可见光及近红外光反射比.

2 研究结果与分析讨论

2.1 机理分析

从基尔霍夫定律可知,不透明物体的反射率越高,发射率就越低.金属粒子一般属于不透明体,因此有较高反射率的金属粒子的发射率一般都较低.金属粒子,尤其金属片状粒子是红外频段的首选填料.

这可以用特鲁德色散模型来解释.金属是具有自由载流子(自由电子)的材料.其高反射(低发射)

频率范围主要受到等离子频率 ω_p 的影响,而等离子频率主要受到电子浓度的影响,如下式:

$$\omega_p = \left(\frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: N 为导体的自由电子浓度; m 为电子的有效质量; e 为电子的有效电荷; ϵ_0 为等离子体相对介电常数. 因此自由电子浓度越高则等离子频率越高,在低于等离子频率的一个频率范围可存在一个低频高反射区. 金属导体的电子浓度高,等离子频率在紫外及更高的波段,因此对于红外波段都有较强的反射.

2.2 金属种类、形态、掺量对涂层发射率的影响

金属种类、形态、掺量对涂料发射率的影响见图 1~7.

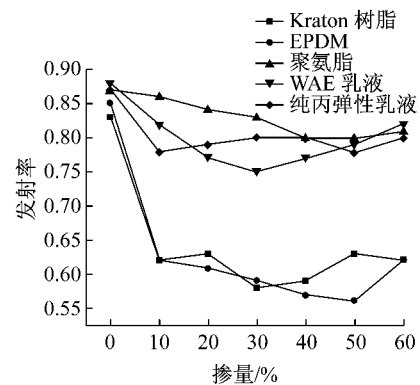


图 1 镍粉对涂层发射率的影响

Fig.1 Influence of nickel powder on coating emissivity

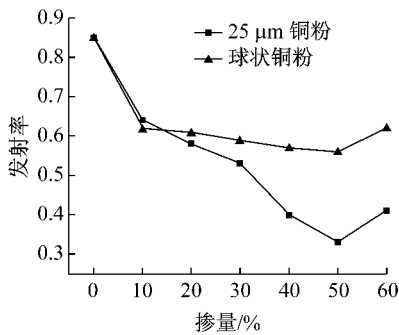


图 2 铜粉对 EPDM 涂层发射率的影响

Fig.2 Influence of copper powder on EPDM coating emissivity

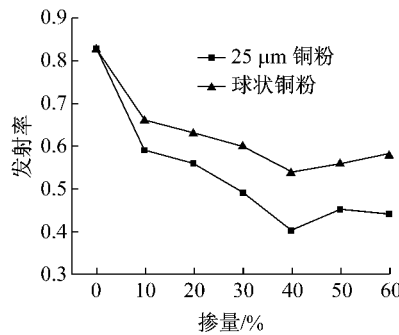


图 3 铜粉对 Kraton 树脂涂层发射率的影响

Fig.3 Influence of copper powder on Kraton coating emissivity

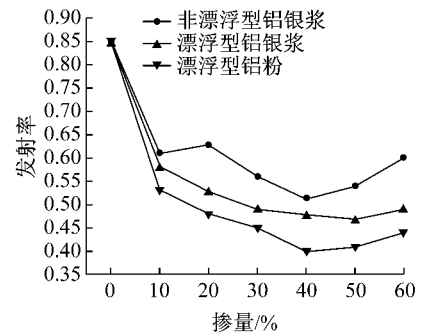


图 4 铝颜料对 EPDM 涂层发射率的影响

Fig.4 Influence of aluminium on EPDM coating emissivity

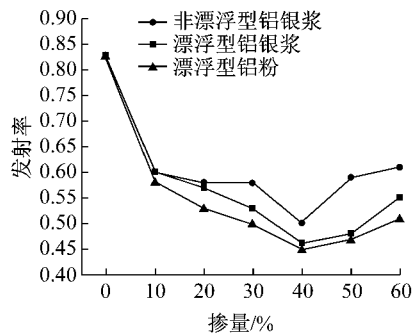


图 5 铝颜料对 Kraton 树脂涂层发射率的影响

Fig.5 Influence of aluminium on Kraton coating emissivity

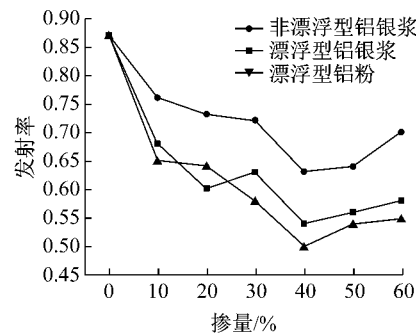


图 6 铝颜料对聚氨酯涂层发射率的影响

Fig.6 Influence of aluminium on polyurethane coating emissivity

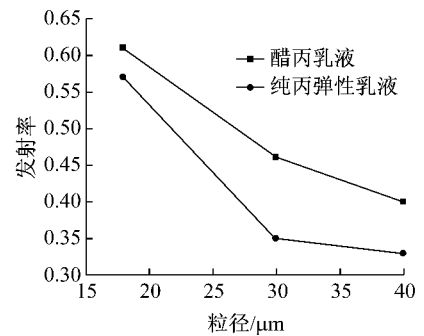


图 7 可溶性铝粉粒径对水性涂层发射率的影响 (40% 掺量)

Fig.7 Influence of soluble aluminium on emissivity of soluble coating (40% content)

由图 1 可以看出,加入镍粉后 EPDM 和 Kraton 树脂涂层的发射率有一定程度的降低,降低范围在 0.2~0.3. 但对水性乳液及聚氨酯涂层的发射率降低不明显. 可能是水性乳液及聚氨酯涂料试验中所

用的镍粉储存时间过长,部分发生氧化,失去了金属特性. 这也从侧面证明了金属氧化物的发射率确实比金属高.

图 2 和图 3 对比两种铜粉在同掺量下油性涂层

的发射率.可以看出,片状铜粉的发射率折线均位于球状铜粉的下面,因此片状铜粉能更大程度地降低涂层的发射率.这是因为片状结构由于在相同体积下比针状、球状等结构的填料有更大的比表面积,对于光的散射衰减也更为强烈,而且存在边缘散射,故片状填料比其他形貌填料的发射率要低.

铜粉的掺量也对 EPDM 或 Kraton 树脂涂层的发射率产生影响,发射率随铜粉掺量的增加而先降低后升高,掺量在 40%~50% 范围内,发射率可达最低.此时 EPDM-片状铜粉发射率为 0.33, Kraton-片状铜粉发射率为 0.41.而继续增加掺量,发射率反而增大.这是因为当铜粉添加量较小时,铜粉不能完全覆盖在基料表面,铜粉之间存在空隙,不能充分地反射红外光,当铜粉掺量不断增加,达到 40%~50% 时,铜粉能紧密堆积,均匀分布在涂层表面,形成致密且光滑平整的表面.此时可近似认为辐射与物体的相互作用发生在 2 维界面上,此时红外反射率最高,发射率最低.但继续增加掺量,此时铜粉不能均匀分散于涂料中,导致涂料表面凹凸不平,对于粗糙的表面,辐射在物体凹凸不平的表面上发生多次漫反射,一方面增加了物体表面对红外辐射吸收的机会,从而增加了发射率,另一方面粗糙的表面也减少了物体表面法向反射功率,因此发射率会增大.

图 4~6 分别为 3 种不同形态的铝对油性涂层发射率的影响.漂浮型铝效果最优.漂浮型铝是有叶展型的铝,它能在流体介质中形成连续的漂浮薄膜,似叶片漂浮在水面,又称叶展性.漂浮过程可解释为一个转移过程.当漂浮性铝粉(或浆)与基料混合制备成涂层后,溶剂如二甲苯分子或环己烷由于挥发会向空气表面运动.此时,从物体至空气界面间的薄膜之间,就形成了一个旋涡运动.这种由于溶剂挥发而形成的垂直对流运动就把自重轻的漂浮型铝粉带至涂膜的基料空气界面间.干燥后片状铝便紧密平行排在涂膜表面,形成连续致密光泽度高的金属铝膜,基料则极少分配在单层间和在上层及膜-空气界面间,这样红外辐射就通过基料的最小厚度而达到片状铝粉的最大表面积,并被很大程度地反射掉,从而降低了涂层对红外辐射的吸收,即降低了红外发射率.

而漂浮型铝粉所形成的油性涂层发射率比漂浮型铝银浆形成的油性涂层发射率低.这是因为铝银浆的漂浮性及分散性不如铝粉.铝浆表面有一部分

附聚物,重力略大于铝粉,在上浮的过程中受到的阻力也略大于铝粉,这就影响了铝浆的转移,因此其漂浮速度(颜料颗粒达到空气-基料界面的时间)比铝粉慢.随着溶剂的不断挥发,涂膜的黏度也就不断增加,由于黏度的阻力,未达到空气界面的铝浆就被固定住了,即有一部分铝被固定在涂膜内了.

铝颜料掺量对油性涂层发射率的影响与铜粉类似,涂层发射率随铝掺量的增加而降低,在 40% 左右达到最低,此时 EPDM-漂浮型铝粉发射率为 0.40, EPDM-漂浮型铝银浆为 0.47, EPDM-非漂浮型铝银浆为 0.51.继续增加颜料掺量,发射率不再降低,反而提高,且涂层的其他性能也变差.

图 7 为水溶性铝粉粒径变化与水性涂层发射率的关系.当铝粉掺量为 40% 时,涂层发射率随着铝粉粒径的增大而降低,当粒径大于 30 μm 时,涂层发射率的降低幅度变小.根据红外辐射理论,朝不透明涂层内漫射的红外辐射,将受到两个因素的影响而衰减:①被分布在涂层内的颜料颗粒吸收;②被颜料颗粒所散射.当颜料粒子的散射比较大,吸收比较小时,整个系统的红外辐射(红外辐射流)发生弥散和改变方向.由于红外波长在 2.5~25.0 μm 范围内,小于散射源尺寸,因此可适用于公式 $\kappa(\lambda) = \pi r^2 MS(\lambda)$. 式中: $\kappa(\lambda)$ 为散射系数, r 为粒子半径, M 为散射粒子浓度, $S(\lambda)$ 为散射平均总截面积.由于铝粉掺量固定,因此可认为 $S(\lambda)$ 相同,这样散射系数与铝粉 r^2 成正比,即铝粉粒径越大,整个涂层的散射系数越大,红外辐射在其中衰减得越多.根据能量守恒定律及基尔霍夫定律,散射越大,吸收越小,即发射率越低.当粒径为 40 μm 时,纯丙弹性乳液-铝发射率为 0.33, VAE 乳液-铝为 0.4.

2.3 各类涂层的红外光谱分析

各类涂层的红外光谱分析结果见图 8~11.

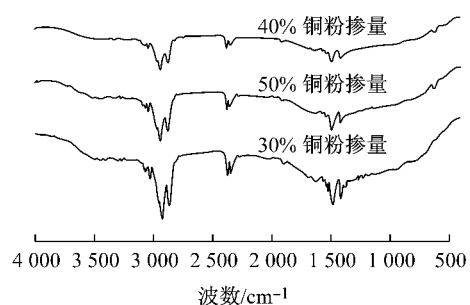


图 8 EPDM-25 μm 铜粉涂层红外光谱图
Fig.8 Infrared spectrum of EPDM-25 μm flake copper

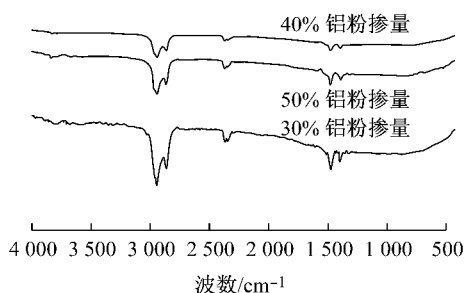


图 9 EPDM-漂浮型铝粉涂层红外光谱图

Fig.9 Infrared spectrum of EPDM coating with floating aluminum powder

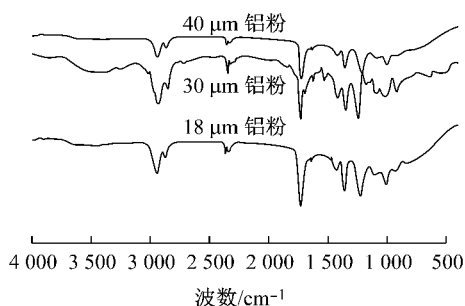


图 10 纯丙-铝粉涂层红外光谱图(铝粉掺量 40%)

Fig.10 Infrared spectrum of acrylic acid coating with 40% soluble aluminium powder

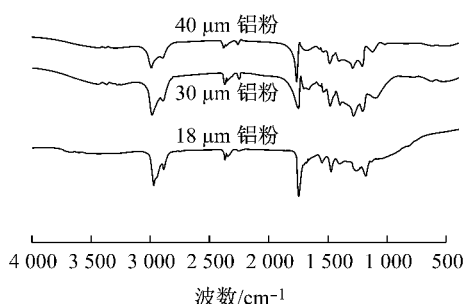


图 11 VAE-铝粉涂层红外光谱图(铝粉掺量 40%)

Fig.11 Infrared spectrum of VAE coating with 40% soluble aluminium powder

图 8 与图 9 在 $2\ 960\sim 2\ 850\text{ cm}^{-1}$ 有相对较强的吸收峰,对应于甲基— CH_3 和亚甲基— CH_2 的饱和 C—H 伸缩振动;在 $1\ 300\sim 1\ 450\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰对应于亚甲基— CH_2 的变形振动,其吸收相对较弱.而在 $2\ 360\text{ cm}^{-1}$, $2\ 335\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的较弱的吸收峰是空气中 CO_2 的特征吸收峰,可忽略.与纯 EPDM 的红外光谱图相似.位于最上面的为铜粉和铝粉掺量为 40% 的 EPDM 涂层,相应波段的吸收峰最弱,据基尔霍夫定律,对于不透明物体,反射率与吸收率之和等于 1,故其红外反射率较高,而相对应的是其发射率必定较低.这一结果与 2.1 一致.

图 10 和图 11 分别为纯丙弹性乳液-铝粉和

VAE 乳液-铝粉的红外光谱图,表明位于 $2\ 960\sim 2\ 850\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰对应于甲基和亚甲基中饱和的 C—H 伸缩振动,位于 $1\ 900\sim 1\ 650\text{ cm}^{-1}$ 附近对应于羰基 C=O 的伸缩振动,位于 $1\ 300\sim 1\ 000\text{ cm}^{-1}$ 对应于 C—O 的伸缩振动.从铝粉粒径对反射率的影响来看,粒径越大,涂层红外反射率越高即发射率越低,但反射率开始增加较快,后逐渐减慢. $40\ \mu\text{m}$ 铝粉所形成的涂层红外发射率最低.

2.4 各类涂层的太阳能反射比结果

各类涂层的太阳能反射比结果见表 2 和表 3.

表 2 各类涂层的太阳能反射比

Tab.2 Solar reflectance of EPDM coatings

金属涂料种类	金属掺量		
	30%	40%	50%
片状铜粉(25 μm)	0.45	0.39	0.51
漂浮铝浆	0.51	0.52	0.55
漂浮铝粉	0.53	0.53	0.56

表 3 不同粒径铝粉与 VAE 乳液涂料和纯丙弹性乳液的太阳能反射比(铝粉掺量为 40%)

Tab.3 Solar reflectance of soluble coating / soluble aluminum powder with 40% content

涂层种类	铝粉粒径		
	18 μm	30 μm	40 μm
VAE	0.64	0.55	0.44
丙烯酸	0.51	0.49	0.45

EPDM-铜粉涂层的太阳能总反射比在 0.39~0.51 内,基本满足节能涂料的要求.而铜粉颜料的掺量 30%~50% 对涂层太阳能总反射比的影响较小且无明显规律.

铝颜料-油性涂料的太阳能反射比随铝颜料掺量的增加,涂层太阳能总反射比只是略有增大,EPDM-漂浮型铝银浆从 0.51 增大到 0.55,EPDM-漂浮型铝粉从 0.53 增大到 0.56,因此可认为铝颜料的掺量 30%~50% 对涂层的太阳能总反射比影响很小.相同铝颜料掺量下,EPDM-漂浮型铝粉的太阳能总反射比稍高于 EPDM-漂浮型铝银浆涂层.

40% 可溶性铝粉水性涂层的太阳能反射比随粒径铝粉的粒径增大,对应涂层的太阳能总反射比降低,这与涂层对红外波段发射率一致.当铝粉粒径为 $40\ \mu\text{m}$ 时,涂层的太阳能反射比最低,其中纯丙弹性-铝粉为 0.45,VAE-铝粉为 0.44,所设计的太阳能反射比位于 0.3~0.5 范围内,完全满足要求.

3 结论

(1) 金属颜料能显著降低油性涂料的红外发射

率,颜料种类、掺量及形貌对涂料的发射率有较大影响。铜粉对涂料发射率的降低效果最好,铝颜料次之,最差为镍粉。

(2) 不同种类金属颜料的掺量对油性涂料发射率的影响规律类似,发射率随颜料掺量的增加而降低,在 40%~50% 范围内达到最低,随后增加掺量发射率反而升高。

(3) 同掺量下,漂浮型铝颜料对油性涂料发射率的降低效果优于非漂浮型,片状铜粉颜料优于球状铜粉颜料。

(4) 水溶性铝粉可显著降低水性涂料的红外发射率,采用粒径为 40 μm 、掺量 40% 铝粉时,发射率最低可达 0.33。

(5) EPDM-铝、EPDM-铜、纯丙-铝及 VAE-铝涂层的红外发射率均可达到 0.35~0.45、太阳能反射比 0.39~0.56,基本符合采暖地区外墙涂料光学性能的要求。

参考文献:

- [1] 李仕国,王焯. 中国建筑能耗现状及节能措施概述[J]. 环境科学与管理,2008,33(2): 6.
LI Shiguo, WANG Ye. Building energy consumption situation and energy saving measures of China [J]. Environmental Science and Management, 2008,33(2): 6.
- [2] 庞海卫. 建立建筑节能长效机制[J]. 中华建设,2012(7):182.
PANG Haiwei. The establishment of building energy-saving long-term mechanism [J]. The Construction of China, 2012(7):182.
- [3] Schossig P, Henning S G, Haussmann T S. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, 89(3): 297.
- [4] 刘成楼,魏功祥. 相变储能柔性保温隔热外墙涂料的研制[J]. 中国涂料,2011,26(11): 35.
LIU Chenglou, WEI Gongxiang. Preparation of phase change energy storage flexible insulation coatings used for exterior wall [J]. China Paint, 2011,26(11): 35.
- [5] 邢俊,林庆文,陈孟. 新型隔热保温涂料的研制[J]. 中国涂料,2010,25(5): 40.
XING Jun, LIN Qingwen, CHEN Meng. Preparation of new heat insulation coating [J]. China Paint, 2010,25(5): 40.
- [6] VShinkareva E, Safonova A M. Conducting and heat-insulating paint work materials based on nickel-plated glass spheres [J]. Glass and Ceramics, 2006, 63(1): 32.
- [7] 余丽蓉,陆春华,赵石林,等. 弹性薄层反辐射保温涂料的研究[J]. 材料科学与工程学报,2007,25(2): 265.
YU Lirong, LU Chunhua, ZHAO Shilin. Study on flexible thin anti radiation insulation coatings [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007,25(2): 265.
- [8] 李冰,孟庆红. 水性薄层热反射隔热保温涂料的研制[J]. 上海涂料,2009,47(6): 14.
LI Bing, MENG Qinghong. Preparation of water soluble thin heat reflective thermal insulation coatings [J]. Shanghai Paint, 2009,47(6): 14.
- [9] 刘杰,李翔. 水性太阳热反射隔热涂料的研究[J]. 北京化工大学学报,2009,36(1): 44.
LIU Jie, LI Xiang. Study on solar reflective thermal insulating coatings [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2009,36(1): 44.
- [10] 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.
YANG Hongbin, CAI Huiwu, CHEN Chuangqian. Research on new reflective thermal insulation coatings [J]. Coating Industry, 2007,37(4): 41.
- [11] 殷武,孔志元,蔡青青,等. 新型薄层保温涂料的研制[J]. 涂料工业,2010,40(2): 27.
YIN Wu, KONG Zhiyuan, CAI Qingqing, et al. Preparation of new thin thermal insulation coatings [J]. Coating Industry, 2010,40(2): 27.
- [12] 徐峰,蒋宇平. 建筑反射隔热涂料隔热保温性能研究[J]. 上海涂料,2011,49(6): 42.
XU Feng, JIANG Ziping. The research for heat insulation property of architectural reflective thermal insulation coatings [J]. Shanghai Paint, 2011,49(6): 42.
- [13] HU Chen, XU Guoyue, SHEN Xingmei, et al. The epoxy-siloxane/Al composite coatings with low infrared emissivity for temperature applications [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(3):3459.
- [14] 李凤雷,徐国跃,余慧娟,等. 红外隐身涂层的制备及其与雷达吸波涂料的兼容性研究[J]. 红外技术,2009, 31(7):415.
LI Fenglei, XU Guoyue, YU Huijuan. Preparation of both Infrared invisible and Radar wave absorbing coating [J]. Infrared Technology, 2009, 31(7):415.
- [15] 王自荣,孙晓泉. 铝粉涂层的红外发射率研究[J]. 功能材料,2004,35(增刊):338.
WANG Zirong, SUN Xiaoquan. Study on the Infrared emissivity of aluminum powder coating [J]. Functional Materials, 2004,35(Supplement):338.
- [16] YU Huijuan, XU Guoyue, SHEN Xingmei, et al. Corrosion resistance and infrared emissivity properties of EPDM (EPDM-g-MAH) film on low infrared emissivity PU/Cu coating [J]. Electrochimica Acta, 2010,55(7): 1843.
- [17] 邵春明,徐国跃,余慧娟. 改性三元乙丙橡胶用于红外隐身涂层的研制[J]. 宇航材料工艺,2008,38(3): 62.
SHAO Cunming, XU Guoyue, YU Huijuan. Study on Infrared invisible coating with modified EPDM [J]. Aerospace Materials and Technology, 2008,38(3): 62.
- [18] SHI Zhiyang, ZHANG Xiong. Analyzing the effect of the longwave emissivity and solar reflectance of building envelopes on energy-saving in buildings in various climates [J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 28.