

向阳面砖墙热反射涂料隔热理论分析与试验研究

闫东^{1,2,3}, 时朋飞¹, 张雷², 肖梦晨³, 吕维鹏¹, 曹浪超¹

(1. 信阳师范大学 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000;

2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

3. 信阳市灵石科技有限公司, 河南 信阳 464000)

摘要: 为降低建筑物夏季的制冷能耗, 达到节能减排的目的, 研试了一种基于隔热机理分析的绿色热反射涂料, 并分析基于选定的功能性填充材料的涂料的隔热性能。通过改良的丙烯酸与隔热填料混合制备的热反射涂料, 采用正交试验与单因素试验, 对涂料的隔热性能与附着力进行研究分析, 并确定各组分的最优配比与最优综合性能。研究表明: 空心玻璃微珠能够有效提升涂料的隔热性能但对涂料的附着力有所影响; 远红外陶瓷粉的隔热效果相比于微珠较弱却能够提升涂料的附着力。确定最终配比后, 通过实验室模拟太阳光辐射测试得出热反射涂料内外表面温差可达到4℃。二氧化钛与空心玻璃微珠具备良好的隔热反射性能, 随着二氧化钛含量的增加, 隔热涂料的隔热温差不断增加, 出现热平衡现象。

关键词: 热反射涂料; 节能; 理论分析; 试验研究

中图分类号: TU55

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)05—0121—09

Theoretical Analysis and Experimental Study on Heat Insulation of Thermal Reflective Coatings on Sunlit Brick Walls

YAN Dong^{1,2,3}, SHI Pengfei¹, ZHANG Lei², XIAO Mengchen³, LV Weipeng¹, CAO Langchao¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China;

2. Yellow River Conservancy Research Institute of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, Henan 450003, China;

3. Xinyang Lingshi Technology Co., Ltd., Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: To achieve energy conservation and emission reduction by lowering summer cooling energy consumption in buildings, this work focuses on a green heat-reflective coating developed through an analysis of heat insulation mechanisms, and investigates its thermal insulation performance using selected functional filler materials. The heat reflection coating was prepared by mixing improved acrylic acid with heat insulation fillers. Through orthogonal tests and single-factor tests, the heat insulation performance and adhesion of the coating were analyzed, and the optimal ratio and optimal comprehensive performance of each component were determined. The results indicate that hollow glass microspheres can effectively enhance the thermal insulation performance of coatings, but they negatively affect the coating's adhesion. In contrast, far-infrared ceramic powder exhibits weaker insulation performance compared to microspheres, yet it improves the coating's adhesion. After determining the final formulation, laboratory simulations of solar radiation testing showed that the temperature difference between the inner and outer surfaces of the thermal reflective coating can reach 4℃. Titanium dioxide and hollow glass microspheres exhibit good thermal insulation and reflective properties; as the content of titanium dioxide increases, the thermal insulation temperature difference of the coating continuously increases until a thermal equilibrium state is reached.

Keywords: heat insulation coating; energy conservation; theoretical analysis; experimental study

收稿日期: 2025-06-19

修稿日期: 2025-07-26

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点资助项目(U23A20672); 河南省自然科学基金杰出青年项目(242300421015); 河南省国际科技合作项目(252102520083)

作者简介: 闫东(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程材料研发工作。E-mail: yandong@xynu.edu.cn

通讯作者: 张雷(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工材料研究工作。E-mail: hkyzhanglei@163.com

绿色建筑指在全寿命期内节约资源、保护环境、减少污染,为人们提供健康、适用、高效的使用空间,最大限度实现人与自然和谐共生的高质量建筑^[1]。绿色建筑首要问题就是温度问题,人体热舒适环境明显影响着工作效率,传统的空调环境能够维持室内温度但具有较高的能源损耗,而建筑物的墙体所导致的热量损失较大,这是因为建筑围护结构是太阳辐射热量获取的主要接收者^[2]。研究资料表明,在发展中国家,总耗电量的一半以上为建筑能耗,我国的建筑能耗约占能源消耗总量的 20%^[3]。目前,城市建筑外观大多老化破损,围护结构热工性能不足,已不再满足现代人们的使用需求^[4]。传统工艺上,采用聚氨酯泡沫材料来减少外墙引发的热量损失,但较厚的隔热层往往存在严重的维护问题,影响室内环境和建筑结构安全^[5-6]。

基于此,相关学者对隔热材料性能进行了大量的研究^[7],发现反射建筑保温材料可以有效地切断大部分热辐射减少墙体的表面热增益和空调负荷,提高室内热舒适性。例如,Givoni^[8]调查发现,在以色列,不通风的白色墙壁的小型建筑在夏季比涂成灰色的相同建筑凉爽约 3℃。Antonaia 等^[9]研究了一种作为凉爽屋顶材料进行测试,发现所选白色丙烯酸涂料展示出与商业产品相当的良好光谱反射率和热发射率值。Perdikis^[10]开发了许多高太阳反射和透气的涂层材料。在建筑环境中,尤其是建筑物围护结构中使用这种涂料,作为一种被动冷却技术,可以改善室内热舒适条件并减少冷却负荷。Rosso 等^[11]利用材料的内在特性来节省能源,把一种凉爽光致发光涂料应用于建筑环境中,以减少炎热季节的冷却能量并保持较低的表面和空气温度,从而提高房屋舒适度。Malz 等^[12]研究讨论了红外反射墙漆与历史悠久的砖砌体隔热相结合的应用,确定了使用红外反射墙面涂料时必须考虑的关键参数。Ponmurugan 等^[13]采用了不同的绝缘材料、反射涂层材料、油漆中的颜料和添加剂、相变材料、纳米颗粒和热能存储材料,通过使用合适的节能材料包裹某些建筑物,可以减少峰值负载条件下的能源需求。

近年来,国内也开始推广该保温涂料的应用^[14-18],并取得了良好的效果。然而,上述研究成果主要集中在隔热涂料的制备与降温效果分析方面,而对涂料隔热机理分析,特别是满足绿色建筑涂料附着力标准的研究较少。研究对象仅限于管道与仓库屋顶的热计算和保温效果,对于热反射涂料较为全面的隔热机理分析还缺乏基础研究,不仅影响节

能建筑应用上的效率,还限制绿色建筑材料的发展。

本文采用理论分析与试验研究相结合的方法,开发了一种热反射涂料,通过进行正交试验确定涂料各组分的初始配比并分析空心玻璃微珠与远红外陶瓷粉对涂料的隔热性能与附着力的影响,分析最终配比来提升涂料的综合性能。最后,进行常规理化性能试验,测试涂料的基本性能,为进一步研究绿色建筑墙体保温涂料的节能效果和应用提供参考。

1 光热传导分析

1.1 太阳光谱与能量分布

太阳光谱能量分布如图 1 所示,在白天阳光直射下,紫外光区在太阳能量中所占的比例为 7% 左右,可见光为 50%,近红外光为 43%。其中紫外光、可见光和近红外的波长范围分别在 300 nm~400 nm、400 nm~760 nm 和 760 nm~2 500 nm 之间。阳光照射下热量传递示意图如图 2 所示,在阳光直射的情况下,一部分太阳的辐射热量被该表面吸收,而另一部分则在接触到表面后产生反射效应。本文制备的隔热涂料兼具太阳反射率与红外发射率,将其施用于无遮挡的水平屋顶或墙体表面时,该涂料能有效抑制太阳热量的传递,并促进辐射散热。这一过程显著降低了建筑围护结构的表面温度,进而削减了由墙体向室内传导的热量。

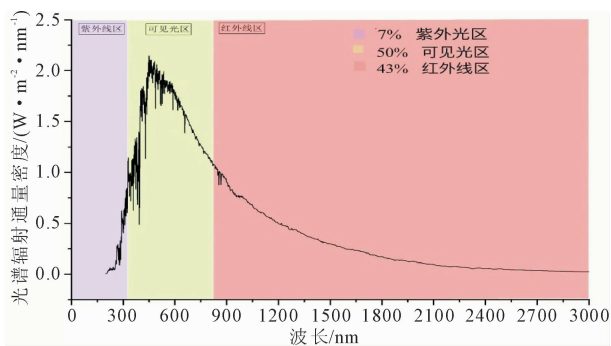


图 1 太阳光谱能量分布图

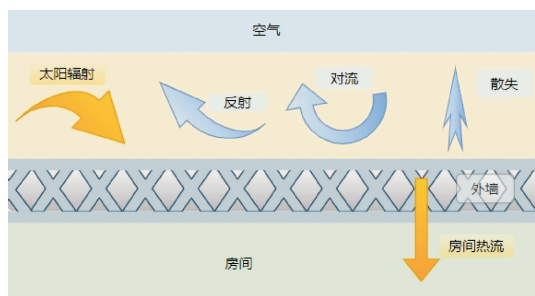


图 2 阳光照射下热量传递示意图

1.2 热反射材料热导率和传热系数分析

热反射材料的传热模式遵循对流、传导和辐射的三个基本原理。根据傅立叶定律的数学表达式可表示为^[19]：

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$
(1)

式中： q 为单位时间内通过材料的热量， W/m^2 ； k 为材料的热导率， $W/(m \cdot K)$ ； A 为热传导的面积， m^2 ； $\frac{dT}{dx}$ 为温度随位置的变化率， K/m ；负号表示热量总是从高温区域向低温区域传递。

在本研究下的隔热涂料由固体颗粒、球形空心颗粒和其他材料制成的多相复合结构组成，其微观结构出现在骨骼结构的混合物中，因此可以将复合隔热涂料视为具有轻便网络结构的固体材料。材料的热导率能够很好体现材料的隔热降温性能，并通过稳态热流法即可计算出材料的热导率。

传热系数 U 是描述在稳态条件下，单位面积通过建筑物墙体、窗户等传热面在单位温差下的热流量，如下式所示^[20]：

$$U = \frac{Q}{A(T_{hot} - T_{cold})}$$
(2)

式中： U 为传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； Q 为通过传热面的热流量， W ； A 为传热面的面积， m^2 ； T_{hot} 为传热面热侧的温度， K ； T_{cold} 为传热面冷侧的温度， K ； $T_{hot} - T_{cold}$ 为传热面两侧的温差， K 。

传热系数也可以通过热阻公式计算，该公式考虑了材料层的热阻和接触热阻^[21]：

$$U = \frac{1}{R_{total}}$$
(3)

式中： R_{total} 是总热阻， $R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_{hot} + \cdots + R_{cold}$ ， R_{hot} 和 R_{cold} 分别是热侧和冷侧的对流热阻， R_1 、 R_2 和 R_3 是各个材料层的热传导热阻， $R_{total} = \frac{d}{k}$ ，其中 d 是材料层的厚度， k 是材料的热导率。

传热系数和热导率是描述材料或系统传热性能的两个不同参数，热导率只与材料的种类和状态有关，而与材料的尺寸或形状无关，传热系数不仅取决于材料的热导率，还取决于材料的厚度、两侧的对流情况，它们之间的关系通过热阻联系起来。与隔热填料相关材料的热导率如表 1 所示。

表 1 隔热涂料相关材料热导率

材料	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
空气(自然对流)	0.024
水	0.6
空心玻璃微珠	1.1~2.0
二氧化钛	1.8~10.3

1.3 隔热涂料热平衡方程与隔热温差计算方程

在评估涂料在实际试验中的隔热效果和节能性能时，通过分析热平衡方程，可以模拟隔热涂料在不同环境条件下的热工性能，为涂料配方优化提供理论依据。阳光照射下像屋顶这样直面天空的水平表面，材料自身的太阳反射率、红外发射率、太阳辐照强度、有效天空温度、周边环境温度、对流和传导系数等在达到热平衡时的相互关系如下式^[22-23]：

$$(1 - R)I = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c(T_s - T_a) - \lambda \frac{dT}{dx}$$
(4)

式中： R 为太阳反射率； I 为光照的强度， W/m^2 ； ε 为热发射率； σ 为斯特藩 - 玻尔兹曼常数， $W/(m^2 \cdot K^4)$ ； T_s 为表面温度， K ； T_{sky} 为有效温度， K ； h_c 为传导和对流系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ； T_a 为环境周围气温， K ； λ 为导热率， $W/(m \cdot K)$ ； dT/dx 为温度梯度。

上述公式表明，外墙隔热降温材料的冷却效能不仅取决于材料本身的特性，包括其对太阳光的反射率、热辐射发射率以及热导率，同时还受到周围环境因素的影响，在确保良好隔热的前提下，墙体表面的温度主要受材料的太阳反射率和红外反射率控制。在阳光照射下时，太阳反射率是决定表面温度的主要因素，此时红外发射率的影响相对较小，可以不予考虑；而在晚上，太阳光消失，此时屋顶表面的温度主要受红外发射率的影响。

处理测量温差数据时，通过试验得到涂料两侧的温差，可能会存在其他外界因素的影响，故采用平均温差计算方程来计算温差，如公式(5)所示，从而更能直观反映涂料在降低建筑物内外温差方面的作用。

$$E = \frac{\sum_{n=1}^3 (T_n - T_{基准})}{3}$$
(5)

式中： E 为平均温差， $^{\circ}C$ ； T_n 为第 n 次测试板的内表面温度， $^{\circ}C$ ； $T_{基准}$ 为基准参考温度， $^{\circ}C$ 。

通过式(4)和式(5)可以计算在一定时间内温度变化的平均值^[24]，平均温差不仅影响材料的热传导性能，而且对数据处理具有一定的可靠性，避免外部环境所带来的误差，对于隔热涂料来说，平均温差越大代表隔热效果越好。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与方案

经过多次预试验后，对本研究所选取的丙烯酸

聚合物、氧化铝、二氧化钛三种因素的最初配比进行分析,可知:当丙烯酸聚合物含量超过 50% 后,会降低涂料的柔韧性影响其成膜性,当丙烯酸聚合物掺量小于 40% 时,涂料表现出较差的耐候性和耐腐蚀性,会导致涂料在长期使用中出现老化、脱落等问题,因此选取 40%、45%、50% 为三水平。

氧化铝具有优异的机械强度、热稳定性和化学稳定性,能够提高涂料的隔热性能与耐久性,当氧化铝掺量大于 12% 后,会导致涂料热传导率增加,反而降低隔热性能,成本也随之提高。氧化铝掺量小于 3% 后,对涂料的耐久性产生影响,不能满足耐候性试验。

当二氧化钛掺量低于 2.5% 时,在太阳光的照射下,涂料的折射率很低,从而达不到较好的隔热效果,而二氧化钛掺量超过 8% 后,导致涂料的机械强度变差影响其附着力与耐冲刷性。

考虑到使用价值和经济成本,对三因素取值为:丙烯酸聚合物掺量分为 40%、45%、50%;氧化铝掺量分为 3%、6.5%、12%;二氧化钛掺量分为:2.5%、6%、8%。

通过三因素三水平正交试验(表 2)确定涂料初始配比,以主要组分中丙烯酸聚合物乳液和氧化铝、二氧化钛所占质量比作为正交试验的三因素,考察每组配比的粘结强度、红外线阻隔率和温差。液体组分中的消泡剂、增稠剂、硅烷偶联剂等促进剂所占百分比根据预试验中涂料状态,采用胶头滴管进行微量调整,分别为 0.58%、0.8% 和 0.8%。当固体组分和液体组分质量比 1:5 时,涂料的粘度较好而且能够均匀覆盖基材,当粉液比超过 1:5 时,涂料粘稠影响施工,低于 1:5 后,涂料出现流挂现象,故本研究采用粉液比 1:5 进行后续试验。

表 2 正交试验表			
编号	A 丙烯酸聚合物/%	B 氧化铝/%	C 二氧化钛/%
1	40	3.0	2.5
2	40	6.5	6.0
3	40	12.0	8.0
4	45	3.0	8.0
5	45	6.5	6.0
6	45	12.0	2.5
7	50	3.0	8.0
8	50	6.5	2.5
9	50	12.0	6.0

无机填料改性试验。选用正交试验中性能较优的第 2 组和第 7 组配方,采用纳米级空心玻璃微珠

与远红外陶瓷粉占涂料质量比 1%、1.5%、2%、2.5%、3%,研究对隔热材料的附着力和温差等性能的影响。

为制备热反射涂料,选用下述原料:丙烯酸聚合物(产地:信阳灵石科技有限公司,固含量:40%~50%,pH 值:7.6~9.3,最低成膜温度:23℃,粘度:1 Pa·s~5.5 Pa·s);二氧化钛粉末(产地:信阳灵石科技有限公司,pH 值:7.6~9.4);氧化铝(产地:福晨化学试剂有限公司,目数:微米级,比表面积:74 m²/g);空心玻璃微珠(产地:信阳灵石科技有限公司,目数:纳米级,密度:0.40 g/cm³,抗压强度:25 MPa~30 MPa);远红外陶瓷粉(产地:信阳灵石科技有限公司,目数:纳米级,具有很强的红外发射能力)。

使用的仪器有数显式万能试验机、LS182 光学透过率测量仪、氙灯老化试验箱、旋转式粘度计、标准养护箱、恒温干燥箱以及自行搭建的室内测温设备等。

2.2 光学与隔热降温性能试验方法

光学性能测试。将涂料使用 SZQ 四面涂膜制备器,将涂料均匀涂抹在标准玻璃板上,使用 LS182 光学透过率测量仪对玻璃板涂层紫外阻隔率、红外阻隔率及可见光透过率进行测试。

隔热降温性能测试。将涂料充分搅拌均匀后,通过涂膜制备器涂覆于干净的铝板基材上。采用多层涂覆工艺,共涂 3~5 层,每层之间留有 8 h~24 h 的干燥时间,直至达到 1.5 mm 左右厚度,将顶层表面刮平,并将铝板基材在标准养护环境下养护 120 h。参考《建筑防水涂料试验方法》和太阳热反射涂料建筑工业标准的要求,在实验室搭建的室内测温设备中(图 3)进行试验,测试中,红外灯用来模拟阳光辐照,判断涂料降温隔热效果。

2.3 附着力与耐人工气候老化性能试验方法

附着力试验按《建筑防水维修用快速堵漏材料技术条件》(JG/T 316—2011)试验方法进行。将配制好的隔热涂料取少量均匀涂抹在样板的上夹具表面,把夹具放在砂浆试块中间位置,轻压使浆液均匀填充在夹具与砂浆块之间,水平放置 1 d 后用裁纸刀沿上夹具边缘割除多余固结体。然后再把试件放入标准养护箱中 6 d,取出 10 min 内进行检测,利用试验机(WDS-5,浙江大地仪器有限公司)进行附着力试验。按照国标 GB/T 1865—2009^[25]人工气候老化和人工辐射曝露,利用氙灯老化试验箱(SR-2130,东莞市顺瑞检测设备有限公司)测定涂料的

耐人工气候老化性能。测试时,涂层样品的上表面
向光源,如图 4 所示,老化试验箱温度和干燥期间的
湿度分别设定在 $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(40 \sim 60)\%$,400 h
后,老化试验结束。

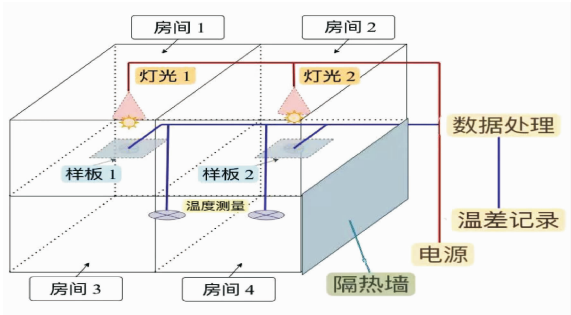


图 3 隔热涂料隔热性能检测装置示意图



图 4 耐候性测试试件

3 试验结果与分析

3.1 正交试验结果分析

基于 2.1 中的试验方案,得到了正交试验结果,
见表 3。

表 3 正交试验结果

编号	附着力/MPa	红外线阻隔率/%	温差/ $^\circ\text{C}$
1	1.05	39.2	3.65
2	1.70	65.1	6.70
3	2.00	58.2	5.20
4	1.47	54.1	4.15
5	0.94	50.2	3.70
6	0.86	51.2	3.55
7	1.16	50.4	6.60
8	1.12	46.2	3.90
9	0.97	49.8	4.65

对正交试验结果进行极差分析,见表 4、表 5、表
6,影响隔热涂料的附着力因素的主次顺序是 B(氧
化铝占总质量的百分比) > A(丙烯酸乳液占总质量
的百分比) > C(二氧化钛占总质量的百分比);影响

隔热涂料的红外线阻隔率因素的主次顺序是 C(二
氧化钛占总质量的百分比) > B(氧化铝占总质量的
百分比) > A(丙烯酸乳液占总质量的百分比);影
响隔热材料温差因素的主次顺序是 C(二氧化钛占
总质量的百分比) > B(氧化铝占总质量的百分比)
> A(丙烯酸乳液占总质量的百分比)。

表 4 附着力试验极差分析表

类别	因素 A	因素 B	因素 C
k_1	4.75	3.68	3.03
k_2	3.27	3.76	3.91
k_3	3.25	3.83	4.33
$\overline{k_1}$	1.58	1.23	1.01
$\overline{k_2}$	1.09	1.88	1.30
$\overline{k_3}$	1.08	1.28	1.44
极差 R	0.50	0.65	0.43
主次顺序	B > A > C		

表 5 红外线阻隔率试验极差分析表

类别	因素 A	因素 B	因素 C
k_1	162.50	143.70	136.60
k_2	155.50	161.50	158.20
k_3	146.40	159.20	169.60
$\overline{k_1}$	54.17	47.90	45.53
$\overline{k_2}$	51.83	53.83	52.73
$\overline{k_3}$	48.80	53.07	56.53
极差 R	5.37	5.93	11.00
主次顺序	C > B > A		

表 6 温差试验极差分析表

类别	因素 A	因素 B	因素 C
k_1	15.55	14.40	11.10
k_2	11.40	14.30	13.55
k_3	15.15	13.40	17.45
$\overline{k_1}$	5.18	4.80	3.70
$\overline{k_2}$	3.80	4.77	4.52
$\overline{k_3}$	5.05	4.47	5.82
极差 R	1.38	0.33	2.21
主次顺序	C > A > B		

通过表 3、表 4 和表 5 分析结果可以看出,二氧
化钛对隔热涂料的紫外线阻隔率和温差的影响最
大。二氧化钛具有优异的紫外线吸收和散射能力,
其高折射率和遮盖特性使其能有效阻挡阳光中的紫
外线,从而保护涂料基料和被涂覆的基材免受紫外
线降解,达到降温隔热效果。然而,当二氧化钛含量
达到一个临界体积浓度后,情况会发生变化。在涂

料中,二氧化钛的含量并非越高越好。一旦添加量超过一个最佳值,过多的颗粒会紧密堆积,反而会降低粘合剂的散射光线能力。这会导致涂料的遮盖力减弱,反射太阳光的效果变差。而氧化铝在涂料中起到了一种“骨架”的作用,能够增强涂膜的机械强度。涂料在固化过程中会发生体积收缩,这可能导致涂膜内部产生应力,从而形成裂纹。氧化铝颗粒的加入可以减少固化过程中的体积收缩,这是因为无机填料本身不发生显著的体积变化,从而减少了因收缩引起的内应力。当涂料固化后,氧化铝与树脂基体之间的界面相互作用,可以有效地传递应力,使得涂膜在受到外力作用时表现出更高的抗裂性和抗冲击性。考虑到隔热涂料的综合性能,正交试验中第 2 组和第 7 组在隔热性能效果优异。

3.2 降温涂料的热性能

隔热涂料可以降低红外灯照射下的被涂覆基材的表面温度。根据前面试验选取包括 2 组与 7 组在内的四组试验,将两组隔热涂料分别涂在测试样板上与未涂覆涂料的测试样板作为参照样品,采用在标准 JC/T 235—2008 中规定的自行搭建的设备测试热反射涂料的降温性能方法进行测试。

图 5 是隔热涂料在连续升温过程中测试样板与对照样板被照射表面下的温差随时间变化的曲线。当时间在 700 s 后,表面温度达到一种热平衡,隔热涂料的表面温度相对于参比样板的降温效果达到 5.5℃ 左右。

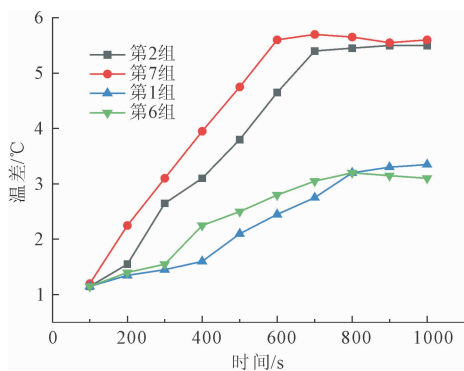


图 5 第 2 组与第 7 组隔热性能温差表

从图 5 中可以看出,第 2 组和第 7 组隔热涂料的降温效果相比其他两组性能较好,均能在长时间照射下保持稳定的降温效果。出现上述现象是因为第 2 组和第 7 组添加不同含量的二氧化钛与氧化铝本身材料属性所导致,二氧化钛和氧化铝的太阳反射率分别介于 0.8~0.9 和 0.3~0.5,认为这是隔热

涂料太阳反射率的工业极限^[26-28]。相比于二氧化钛,氧化铝的太阳反射率较低,因此,需要进一步试验其他具有隔热效果的无机填料来提高涂料隔热降温效果。

3.3 无机填料对隔热涂料热性能的影响

为了测试更好效果的热反射涂料性能,在其配方中加入无机填料,如图 6 所示。无机填料可以改善涂料的隔热性能,增加涂料的粘结强度。为了研究无机填料对隔热涂料的影响,选用滑石粉、纳米级空心玻璃微珠与远红外陶瓷粉考察 1%、1.5%、2%、2.5%、3% 含量对隔热涂料降温效果的影响。

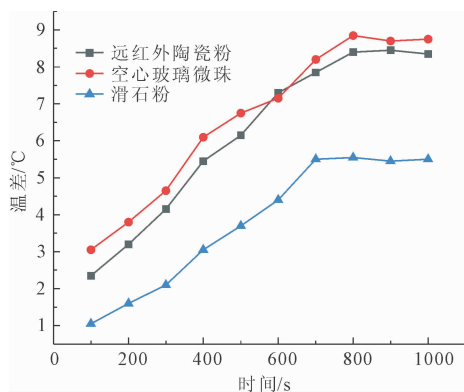


图 6 无机填料对温差影响

基于空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉对隔热涂料较好隔热的表现,将其掺量作为因素变量加入到第 2 组和第 7 组中考察对隔热涂料的温差和附着力的影响,如图 7—图 9 所示,三种无机填料分别加入到隔热基本涂料中对温差的影响,空心玻璃微珠优于远红外陶瓷粉优于滑石粉。在隔热涂料中,加入滑石粉对材料的反射率影响较小,因而也不能够优化涂料的隔热性能,因此滑石粉对温差影响较小。如图 7 所示,空心玻璃微珠内部是中空的,并且含有大量的空气,空气分子之间的热传导效率很低。空心玻璃微珠本身由玻璃制成,而玻璃的导热系数较低,中空的结构进一步降低了整体的导热系数。虽然远红外陶瓷粉本身的热传导率并不低,但是红外陶瓷粉能够发射特定波长的远红外线,当涂料表面温度较高时,这些粉末可以有效地发射红外线,从而带走热量。

基于空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉对隔热涂料较好隔热的表现,将其掺量作为因素变量加入到第 2 组和第 7 组中考察对隔热涂料的温差和附着力的影响,见图 8—图 9。

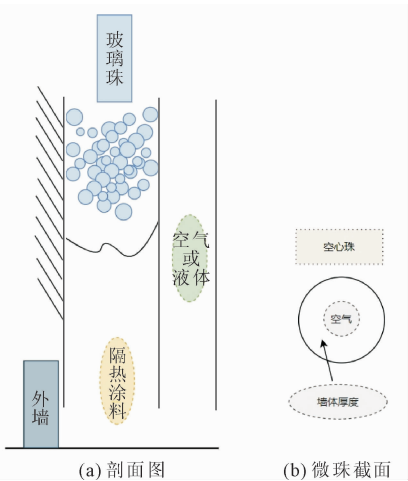


图 7 玻璃微珠的隔热涂层

由图 8、图 9 可知,第 2 组与第 7 组样品涂料的温差随着空心玻璃微珠的增加而逐渐增加,而涂料

的附着力却随着空心玻璃微珠的增加而下降。这是因为微珠的圆滑表面提高了涂料混合物的流动性,空心玻璃微珠的强度通常低于基体材料以及微珠的界面粘结不良或内部空洞可能导致应力集中,降低粘结力,因此微珠的加入会降低涂料的附着力。对于远红外陶瓷粉虽然能够提高隔热,但是效果并不明显,主要原因是:隔热机理通常是通过材料涂料的多孔结构或低导热系数来实现的而远红外陶瓷粉的主要功能是发射远红外线,而不是通过增加涂料内部的多孔结构来减少热量传递,因此它不会显著提高涂料的隔热性能。之所以远红外陶瓷粉能够提升涂料附着力,是因为远红外陶瓷粉的细小颗粒可以填充涂料中的微小孔隙,增加涂层的致密度以及远红外陶瓷粉的加入可以改善涂料的流变性,使其在涂敷时更容易形成均匀的涂层,减少涂层内部的应力集中,从而提高附着力。

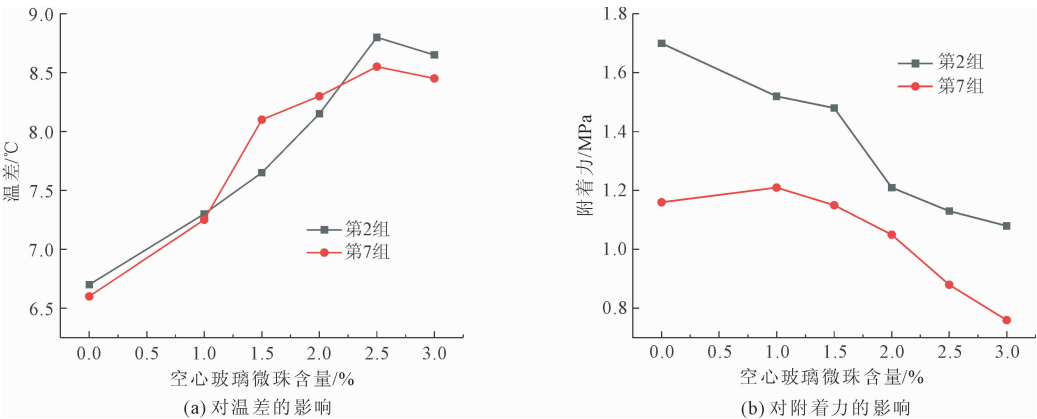


图 8 空心玻璃微珠含量的影响

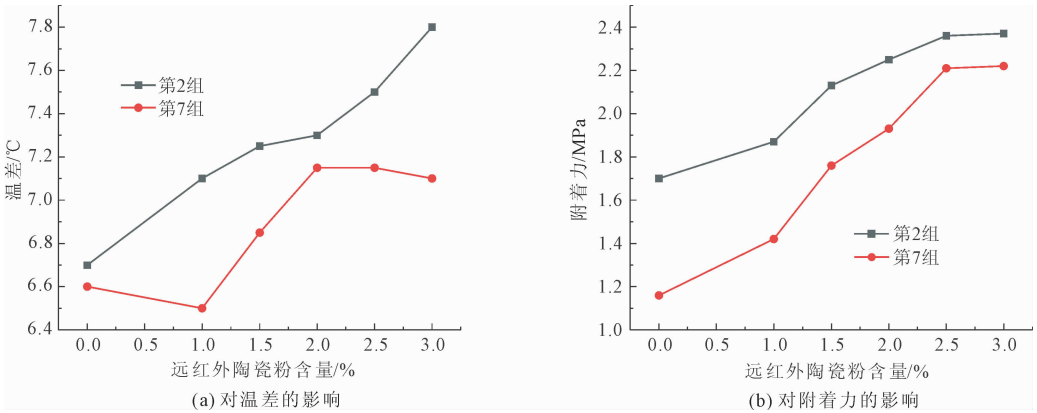


图 9 远红外陶瓷粉含量的影响

综合空心玻璃微珠与远红外陶瓷粉对热反射涂料的降温性能与附着力效果的影响选定使用 2.5% 掺量的空心玻璃微珠和 3% 的远红外陶瓷粉。

3.4 涂料常规理化性能测定

按照国家规定的测试方法测定出涂料的常规理化性能如表 7 所示。由表 7 可知,该降温涂料的常规理化性能完全满足建材行业标准的要求。国家行

业标准仅要求涂料的耐碱性达到 24 h,实测涂料耐碱性表现远超这一基准,该降温涂料能够长期抵御水泥、混凝土等碱性基材的侵蚀,不会因墙面返碱而出现粉化、起泡、褪色或脱落等问题。最常用的建筑外表面材料如砌石、混凝土和砖等均是碱性材料,因此涂覆在这些基材上的涂料应当具有良好的耐碱性,否则涂层将会失效^[24,29]。

表 7 涂料常规理化性能指标

理化性能	标准规定	测试结果	测试标准
施工性	涂刷两道无障碍	合格	JC/T 1040—2007
涂膜外观	无针孔、流挂,涂膜均匀	合格	GB/T 9755—2011
耐水性	96 h 无异常	≥200 h	GB/T 1733—1993
耐碱性	48 h 无异常	≥200 h	GB/T 9265—2009
表干时间	≤2 h	1 h	GB/T 1728—1989
耐温变性	循环 5 次无异常	合格	JC/T 25—1999
耐冲刷性	2000 次	合格	JC/T 1040—2007

表 7 表明,本涂料具备出色的耐洗刷性能,这主要归功于其使用的丙烯酸聚合物乳液。该乳液具有优异的成膜性和内聚强度,形成的漆膜坚韧且富有弹性,能够有效抵抗反复的水洗和机械摩擦。同时,丙烯酸聚合物分子结构中的羧基等功能基团增强了涂料与基材之间的附着力,进一步提升了涂层的整体耐久性。此外,配方中还添加了特定的促进剂,确保了填料的均匀分布和漆膜的致密性,这一特性显著提升了涂层的耐洗刷性和耐水性。

4 结 论

在本文中,采用改良的丙烯酸和二氧化钛等化合物作为涂料的基本材料,空心玻璃微珠与远红外陶瓷粉作为无机填料,制备新型外墙热反射涂料并进行理论分析与试验验证,得出以下结论:

- (1)本文分析太阳光谱辐射模型,结合隔热材料的热导率、传热系数阐述了热反射涂料隔热降温机理,并根据材料的热平衡方程建立了围护结构复合传热模型,得出二氧化钛与空心玻璃微珠在隔热填料中的优越性。
- (2)通过正交试验得出热反射涂料组分的最佳配比,并通过极差分析得出二氧化钛作为隔热材料的优良性和二氧化钛含量达到极限时会出现热平衡现象。
- (3)无机填料空心玻璃微珠能够有效提升涂料的隔热性能但对涂料的附着力有所影响,而远红外陶瓷粉的隔热效果相比于微珠较弱却能够提升涂料

的附着力,经分析选定使用 2.5% 掺量的空心玻璃微珠和 3% 的远红外陶瓷粉能够有效提升涂料的综合性能。

(4)根据国家相关行业标准测试隔热涂料,该涂料满足常规理化性能标准,通过实验室自制测温箱对隔热涂料进行隔热性能测试,测试涂覆涂料试板与参比试板的内外温度变化,以热模拟太阳辐射测试得出隔热涂料隔热效果,对外表面可有效降低 4℃ 左右。

综上所述,本研究所开发的热反射涂料不仅展现了卓越的隔热性能,而且经过成本效益分析表明,其在制备成本、应用成本以及能耗后的综合成本方面均表现出良好的经济效益,适合于大规模推广使用。此外,为进一步推动这种环保节能材料的应用,未来的工作将集中在优化生产工艺及配方组成,以进一步降低成本,增强产品的市场竞争力。

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知[R]. 2022-3-1.

[2] Gao Yafeng, Shi Dachuan, Levinson R, et al. Thermal performance and energy savings of white and sedum-tray garden roof: A case study in a Chongqing office building [J]. Energy and Buildings, 2017,156:343-359.

[3] 彭 琛,江 亿,姜克隽,等. 中国建筑能耗总量上限的确定[J]. 建设科技,2015(14):27-35.

[4] 丁 琪. 青岛近代独立式住宅围护结构节能优化策略研究[J]. 城市建筑,2020,17(32):100-102.

[5] Abdullaev A R, Zulfumori I N Q. A review on: analysis of the properties of thermal insulation materials[J]. The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research, 2021,3(5):27-38.

[6] 苏 姚,叶梦华,李 飞. 试论绿色建材的未来发展[J]. 绿色环保建材,2017(10):3-4.

[7] 庞华宇,马 立,赵 云,等. 反射隔热涂料现场性能测试及分析[J]. 建筑节能(中英文),2022,50(4):6-11.

[8] Givoni, Hoffman M E. Effect of building materials on internal temperatures[J]. Research Report, Building Research Station, Technion Haifa, 1968.

[9] Antonaia A, Ascione F, Castaldo A, et al. Cool materials for reducing summer energy consumptions in Mediterranean climate: In-lab experiments and numerical analysis of a new coating based on acrylic paint[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,102:91-107.

[10] Perdakis P. Cooling the Future: Bridging architectural

- aspects from the past with modern energy efficient paints [C]//Advanced Technologies for Sustainable Systems: Selected Contributions from the International Conference on Sustainable Vital Technologies in Engineering and Informatics, BUE ACEI 2016, 7-9 November 2016, Cairo, Egypt. Springer International Publishing, 2017, 106:99-108.
- [11] Rosso F, Fabiani C, Chiatti C, et al. Cool, photoluminescent paints towards energy consumption reductions in the built environment[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019,1343(1):012198.
- [12] Malz S, Krenkel W, Steffens O. Infrared reflective wall paint in buildings: Energy saving potentials and thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2020, 224: 110-212.
- [13] Ponmurugan M, Ravikumar M, Selvendran R, et al. A review on energy conserving materials for passive cooling in buildings [J]. Materials Today, 2022, 64: 1689-1693.
- [14] 潘启昭,魏继宏. 纳米复合型外墙隔热涂料的研制[J]. 现代涂料与涂装,2017,20(4):27-41.
- [15] 苏姚,叶梦华,李飞. 试论绿色建材的未来发展[J]. 绿色环保建材,2017(10):3-4.
- [16] 陈荣华,向波,瞿金清. 新型无机反射型隔热建筑涂料的研制[J]. 中国涂料,2017,32(1):32-35.
- [17] 林杰赐,陈明毅,陈炳耀,等. 低透水率反射隔热涂料的配方设计[J]. 中国涂料,2022,37(5):43-47.
- [18] 王润庭,高梦岩,李海燕,等. 空心玻璃微珠在涂料中的应用与研究进展[J]. 功能材料,2024,55(9):9071-9077.
- [19] 王栋. 基于傅里叶定律对热传导的分析[J]. 科学技术创新,2019(13):45-46.
- [20] 张向,黄振宇,徐立,等. 导热系数的测量方法研究现状与发展趋势[J]. 应用物理,2018,8(7):301-308.
- [21] Wang Qiuwang, Li Xiangxuan, Zhang Jiaqing, et al. Analysis methodology during heat transfer in fluid domain: Conduction-advection thermal resistance in parallel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024,226:125491.
- [22] 邱童. 建筑用隔热涂料热工性能评价方法分析[J]. 建筑节能,2012,40(10):42-45.
- [23] Hammad F, Abu-Hijleh B. The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building [J]. Energy and Building, 2010,42:1888-1895.
- [24] Guo W, Qiao X, Huang Y, et al. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone[J]. Energy and Buildings, 2012,50:196-203.
- [25] 色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙辐射:GB/T 1865—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [26] Takashi A, Vu Thanh C. Characteristics of permeable pavement during hot summer Weather and impact on the thermal environment [J]. Building and Environment, 2002,35:363-375.
- [27] Balades J, Legret M, Madiéc H. Permeable pavements: pollution management tools [J]. Water Science Technology, 1995,32(1):49-56.
- [28] Taha H, Konopacki S, Gabersek S. Impacts of large-scale surface modifications on meteorological conditions and energy use: a 10-region modeling study[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1999,62:175-185.
- [29] Synnefa A, Karlessi T, Gaitani N, et al. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate [J]. Building and Environment, 2011,46:38-44.