

内蒙地区农宅围护结构太阳辐射吸收系数研究

王文新¹, 梁 雨^{1,2}, 李金娟³, 汪建文¹

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 中衡设计集团股份有限公司, 北京 100044;

3. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089)

摘要: 以内蒙古农村住宅围护结构外表面为研究对象, 通过实验研究的方法, 定量分析了吸收系数的两个影响因素—颜色和粗糙度对围护结构外表面热物性的影响。结果表明: 墨黑色试件的表面温度最高, 信号白试件的表面温度最低, 二者在白天 9:00~17:00 平均温度相差 15.198℃。粗糙度为 10.032 μm 的表面温度最高, 4.504 μm 的表面温度最低, 二者在白天 9:00~17:00 平均温度相差 2.46℃, 夜间各粗糙度试件平均温度最大偏差为 0.57℃。深颜色表面热稳定性较差, 浅颜色表面相对较好。粗糙度为 13.423 μm 的全天表面净得热量波动最小, 粗糙度越小, 表面热稳定性越差。

关键词: 农村住宅; 太阳辐射; 吸收系数; 热工性能; 围护结构

中图分类号: TU111

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0730-10

Study on solar absorption coefficient of building envelope in Inner Mongolia

WANG Wenxin¹, LIANG Yu^{1,2}, LI Jinjuan³, WANG Jianwen¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. ARTS Group Co., Ltd, Beijing 100044, China; 3. China Ippr International Engineering Co.

Beijing 100089, China)

Abstract: In this present work, the external surface of envelope structure for rural housing in Inner Mongolia is studied. Based on the experimental methodology, the influence of two factors, color and roughness, on the thermal properties of exterior surface of building envelope is analyzed. Results show that the surface temperature of the dark black sample is the highest, and that of the signal white sample is the lowest. The difference of the average temperature with the two specimens about different color between 9:00 to 17:00 is 15.198℃. The highest surface temperature is the specimen with roughness of 10.032 μm , and the lowest surface temperature is with roughness of 4.504 μm . The difference of average temperature with the two specimens about different roughness is 2.46℃ in the daytime from 9:00 to 17:00, and the maximum deviation of the average temperature at night is 0.57℃. The thermal stability of the envelope surface with dark color is poor, while the surface with light color is relatively good. The results show that the fluctuation of net heat gain is the smallest when the roughness is 13.423 μm . The smaller the roughness, the worse the thermal stability of the surface is.

Key words: rural houses; solar radiation; absorption coefficient; thermal performance; envelope structure

内蒙古地区处于太阳能富饶集中的地区, 仅次于西藏的青藏高原, 故应大力开发利用太阳能资源到建筑物中, 改善室内热舒适性, 降低建筑能耗。而太阳辐射吸收系数是围护结构重要的热工参数, 是指围护结构外表面吸收的太阳辐射能量与投射到的太阳辐射能量之比值^[1]。

目前, 国内外专家和学者针对围护结构的太阳辐射吸收系数对热物理性的影响已开展了一系列研究工作。V. Cheng^[2]等研究了围护结构表面颜色和热流对室内温度的影响。M Ozel^[3]研究了动态热条件下, 围护结构表面太阳吸收率与热特

性和最佳保温厚度的关系。H Liu^[4]等采用分光光度计设计并测量了近二百个不同油漆的钢材, 以获得其太阳辐射吸收系数。根据测试结果, 分析了表面颜色, 涂装类型和涂装厚度与吸收系数的关系。近几年来我国围护结构热工性能的研究目的主要是降低建筑能耗, 改善室内热环境。罗松钦等^[5]研究了夏热冬冷地区围护结构太阳辐射吸收系数和热阻对内外表面温度的变化和建筑冷热负荷需求特征。陈志华等^[6]测定了钢结构常用面漆的吸收系数, 不同颜色的吸收系数差距明显。张红

收稿日期: 2020-04-21

修改稿日期: 2020-09-10

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2017MS0527)

第一作者: 王文新(1976—), 男, 副教授, 主要研究建筑节能。E-mail: wangwenxin@imut.edu.cn.

婴^[7]研究了冬、夏两季吸收系数对四个朝向的表面温度和净得热量的影响,同时发现降低外墙外表面太阳辐射吸收系数可以有效减少因太阳辐射导致的传入围护结构内部的热量^[8]。曾晰^[9]通过研究夏热冬冷地区室外空气温度与采取保温措施的墙体的表面温度和净得热量的关系,得出室外温度越高,墙体表面吸收的太阳能越多。王晓腾^[10]研究分析了夏热冬冷地区连续晴朗天时南墙净得热量与室内外空气温度、内外保温形式之间的关系。董海荣^[11]通过对室外综合温度的分析,介绍一种测试涂料外饰面太阳辐射吸收系数的间接方法,得到深色涂料外饰面的建筑吸收的太阳辐射热较颜色浅的多。部分学者基于我国相关区域的情况进行了研究,马超^[12]对西北地区农村住宅建筑的围护结构构造形式进行调查统计,并对外围护结构热工性能和建筑能耗进行分析,提出了适宜于西北农村住宅建筑节能及采暖策略。李峥嵘^[13]根据贵州地扞侗寨传统民居改造前后围护结构热工性能的变化,阐述其对室内热湿环境的影响。以上研究未定量分析太阳辐射下围护结构吸收系数,且针对内蒙古地区的相关研究更少。因此,针对内蒙古地区从吸收系数的颜色和粗糙度两个影响因素入手,定量分析其对围护结构外表面热物理性的影响,以便合理选用围护结构外表面,取更合适的吸收系数,这样既能达到降低冬季供暖能耗又能保障夏季室内热舒适性的目的。

1 太阳辐射吸收系数测定

1.1 实验原理

基于光谱法测定太阳辐射吸收系数。通常根据是否使用标准白板,又把光谱法分为绝对法和相对法。相对法是用标准白板对基线进行校准,测得材料在各波长相对于标准白板的反射率,精度较高,操作简便,是目前测定材料反射率和吸收率的常用方法。

试件的太阳辐射反射比计算如式:

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_0(\lambda_i) \rho(\lambda_i) E_s(\lambda_i) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_s(\lambda_i) \Delta\lambda_i} \quad (1)$$

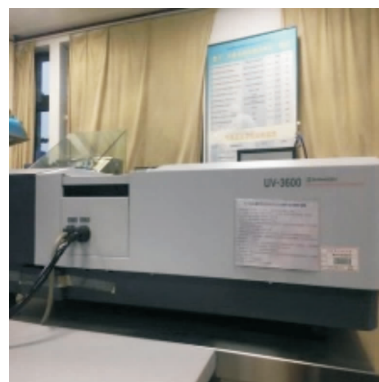
式中: $\rho_0(\lambda_i)$ 为在波长 λ_i 处,标准白板的光谱反射比; $\rho(\lambda_i)$ 为在波长 λ_i 处,试件相对于标准白板的光谱反射比; $E_s(\lambda_i)$ 为在波长 λ_i 处太阳辐射照度的光谱密集度, $W/(m^2 \cdot nm)$; $\Delta\lambda_i$ 为波长间隔, $\Delta\lambda_i = (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})/2$, nm; n 为测点的数量。

对于非透明围护结构,则有透过率为 0,为:

$$\alpha + \rho_r = 1 \quad (2)$$

1.2 测定仪器

颜色吸收系数测定采用日本岛津 UV3600 紫外可见近红外分光光度计。该仪器内置三检测器,具有高灵敏度、高分辨率、宽测试范围和超低杂散光。积分球规格为内径 60 mm,内层为硫酸钡涂层,标准白板使用的为仪器配备的硫酸钡白板,见图 1。实验室温度在 18 ± 5 °C,湿度在 30%~40%之间,达到标准中试验要求。



(a) 分光光度计



(b) 样品室



(c) 硫酸钡白板

图 1 UV3600 紫外可见近红外分光光度计

Fig. 1 UV 3600 UV-Vis NIR spectrophotometer

试件表面粗糙度采用德国蔡司 LSM700 激光共聚焦显微镜来测定,这为后续研究提供轮廓算术平均偏差 Ra 参数。LSM700 具备完善的非接触

式3D轮廓分析功能,可以准确快速地测定材料表面性能,图2为仪器图片。

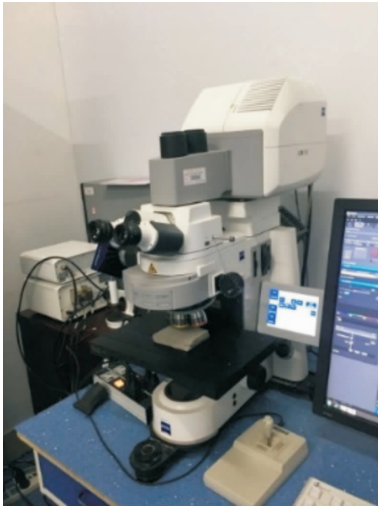


图2 LSM700 激光共聚焦显微镜

Fig. 2 LSM700 laser scanning confocal microscope

1.3 试件制备

笔者根据在内蒙古农村地区实地调研,选取了试验所用六种表面颜色,红色表征的为外露红砖、外贴红瓷砖等,白色表征的为蒙古包、外贴白瓷砖和外涂白色乳胶漆等,黄色表征的为土坯墙体、外涂黄色乳胶漆等,蓝色及黑色通常表征的为墙体外表面装饰所用颜色、灰色表征的为墙体外层水泥砂浆、外涂灰色乳胶漆等。而本试验

选用黑色主要是用于与其他颜色进行对比。农村住宅围护结构外表面的粗糙度多种多样,没有统一的标准,为探究粗糙度对热工性能的影响,参照《产品几何技术规范(GPS)表面结构轮廓法评定表面结构的规则和方法》(GB/T 10610-2009)对粗糙度评定的简化程序中指出,当表面粗糙度与规定值能明显分别出优劣,或表面有明显缺陷时,可以不采用精密仪器来测定表面粗糙度,直接选用目视法。因此本实验制备了有明显差距、肉眼可区别的不同粗糙度试件。

制备试件统一为水泥板材料,其表面颜色采用快干热塑性丙烯酸气雾漆(俗称自喷漆)多次均匀喷涂(喷涂手法一致,且喷漆环境空气流畅,阴凉干燥、无灰尘,满足喷漆环境要求)。在水泥板试件(试件表面平整光滑,粗糙度一致)。为可以将试件表面颜色清晰确切地分类,采用了国际上广泛通用的德国RAL-K7色卡,将试件表面颜色与色卡上色彩进行对照,得到颜色编号和名称,六种试件表面颜色的编号和名称见表1。试验所用颜色试件规格为 $5\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ 左右,厚度均为 1.7 cm ,如图3。经LSM700激光共聚焦显微镜对试件表面粗糙度的测定,颜色试件轮廓算术平均偏差 R_a 平均为 $1.275\text{ }\mu\text{m}$ 。

表1 试件颜色编号和名称

Tab. 1 Specimen color number and name

试件编号	颜色试件 1	颜色试件 2	颜色试件 3	颜色试件 4	颜色试件 5	颜色试件 6
颜色编号	RAL9003	RAL7043	RAL9005	RAL3020	RAL1016	RAL5017
和名称	信号白	交通灰 B	墨黑色	交通红	硫磺色	交通蓝

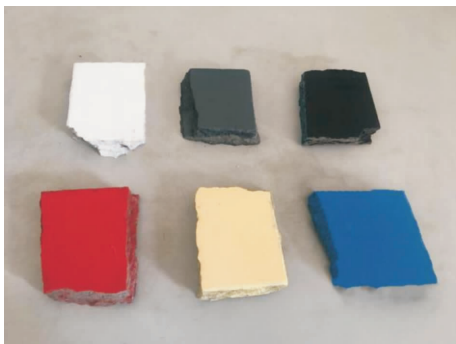
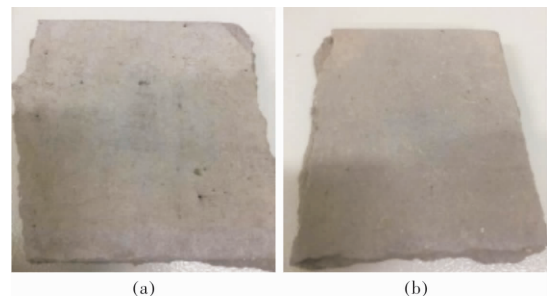


图3 不同表面颜色的试件

Fig. 3 Specimens of different surface colors

制备四种表面粗糙度不同的水泥板试件,如图4所示。试件制作方法分别为:(a)为水泥板原本的表面,未做过处理;(b)是用120目砂纸多次均匀摩擦过后的表面;(c)是用尖锐器物反复打磨

过的表面;(d)是用锤子和螺丝刀在表面凿出大小近似、较为均匀凹陷的表面,试件大小为 $8\text{ cm} \times 9\text{ cm} \times 1.7\text{ cm}$,采用LSM700激光共聚焦显微镜对试件表面粗糙度进行测定,表2列出了四种试件的具体情况。表面有凹槽试件在有凹槽的地方 R_a 平均为 $22.235\text{ }\mu\text{m}$,平整地方 R_a 平均为 $4.612\text{ }\mu\text{m}$,试件整体粗糙度取 R_a 为 $13.423\text{ }\mu\text{m}$ 。



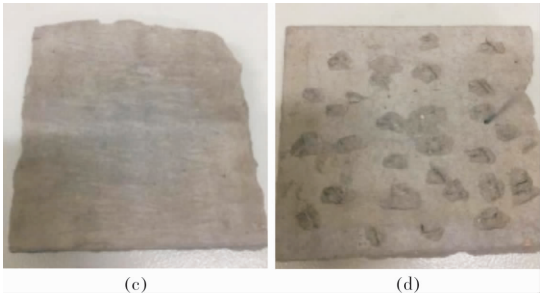


图 4 不同表面粗糙度的试件

Fig. 4 Specimens of different surface roughness

表 2 试验所用粗糙度试件的具体情况

Tab. 2 The specific conditions of the roughness test piece used in the test

试件编号	平均 $Ra/\mu\text{m}$	制作方法
(a)	4.504	未处理
(b)	8.326	120 目砂纸打磨
(c)	10.032	尖锐器物反复打磨
(d)	13.423	锤子和螺丝刀凿出大小近似、较为均匀的凹陷

1.4 测定过程

基于光谱法, 使用 UV3600 紫外可见近红外分光光度计测定试件在设定的波长范围内相对于标准白板的光谱反射比, 根据权重系数计算出试

件表面的反射率, 因为试件为非透明结构, 透射率为零, 从而间接得到试件表面的吸收系数, 进而分析颜色和粗糙度与建筑围护结构外表面太阳辐射吸收系数之间的关系. 围护结构外表面接受的太阳辐射由直射、散射和地面反射三部分组成, 所以测定太阳辐射吸收系数时采用总辐射光谱, 本次试验波长范围设定为 280~2 500 nm.

依据测定结果, 取颜色试件中吸收系数最大、最小的两种工况和粗糙度试件中吸收系数最大、最小两种工况, 颜色和粗糙度共同考虑, 再次制备试件并进行吸收系数的测定, 方差分析其结果.

1.5 测定结果分析

对六种不同表面颜色和四种不同表面粗糙度试件的太阳辐射吸收系数测定结果进行处理分析, 计算式(1)时太阳辐射照度的光谱密集度和波长间隔都取自美国材料与试验协会的 ASTM G173-03 (2012)^[14].

(1)表面颜色对吸收系数的影响

在太阳总辐射光谱中, 波长 200~380 nm 为紫外线区, 波长 380~780 nm 为可见光区, 780~2500 nm 为近红外线区. 太阳辐射能量有一半左右都集中在可见光区, 有 43%分布在红外区, 只有很少部分能量分布在紫外线区^[15]. 六种不同表面颜色试件的吸收系数测定结果见表 3 和图 5.

表 3 不同表面颜色试件的吸收系数测定结果

Tab. 3 Measurement results of absorption coefficient of different surface color test pieces

试件颜色	信号白	墨黑色	交通红	硫磺色	交通蓝	交通灰 B
反射率	0.831 7	0.047 0	0.397 7	0.732 9	0.334 6	0.100 4
吸收系数	0.168 3	0.953 0	0.602 3	0.267 1	0.665 4	0.899 6

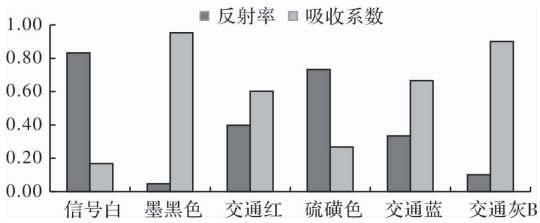


图 5 不同表面颜色试件的反射率和吸收系数

Fig. 5 Reflectance and absorption coefficient of different surface color test pieces

从图表 5 中可以看出, 六种试件中墨黑色的吸收系数最大为 0.953 0, 信号白的吸收系数最小为 0.168 3, 相差 0.784 7, 差距较大, 其他试件表面吸收系数从大到小依次为交通灰 B、交通蓝、交通红、硫磺色, 不同表面颜色的六种试件的太阳辐射吸收系数变化较大, 可见围护结构表面颜色对

太阳辐射的吸收有强烈的选择性.

(2)表面粗糙度对吸收系数的影响

粗糙度表征了表面的平整度, 与反射率直接相关, 进而影响吸收系数, 四种不同表面粗糙度试件的吸收系数测定结果见表 4 和图 6.

表 4 不同表面粗糙度试件的吸收系数测定结果

Tab. 4 Measurement results of absorption coefficient of different surface roughness test pieces

试件粗糙度参数 $Ra/\mu\text{m}$	反射率	吸收系数
13.423	0.350 5	0.649 5
4.504	0.351 6	0.648 4
10.032	0.307 3	0.692 7
8.326	0.310 8	0.689 2

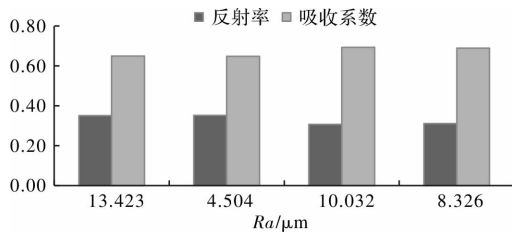


图6 不同表面粗糙度试件的反射率和吸收系数

Fig. 6 Reflectivity and absorption coefficient of different surface roughness specimens

从表4和图6中可以看出,四种粗糙度对应的吸收系数总体介于0.64~0.70之间,粗糙度为10.032 μm的吸收系数最大,为0.692 7;4.504 μm的吸收系数最小,为0.648 4,相差0.044 3,其他试件表面吸收系数从大到小粗糙度依次是8.326 μm、13.423 μm。表面有凹槽的试件粗糙度最大,但吸收系数小于其他两种表面处理过的试件,分析原因是试件只是局部有凹槽,剩余部分完整未被破坏,而其他两种表面处理过的试件,试件整体都被破坏,所以对光谱的选择性增强。

(3)表面颜色和粗糙度共同作用时对吸收系数的影响

根据颜色和粗糙度试件的吸收系数测定结果可知,墨黑色和粗糙度为10.032 μm的吸收系数最大,信号白和粗糙度为4.504 μm的吸收系数最小,为探究表面颜色和粗糙度共同作用时对吸收系数的影响,制备四种试件,分别为墨黑色表面有划痕、墨黑色表面未处理、信号白表面有划痕、信号白表面未处理,并进行粗糙度和吸收系数的测定,测试结果采用方差分析。制备的四种试件

见图7,吸收系数测定结果见表5,方差分析表见表6。

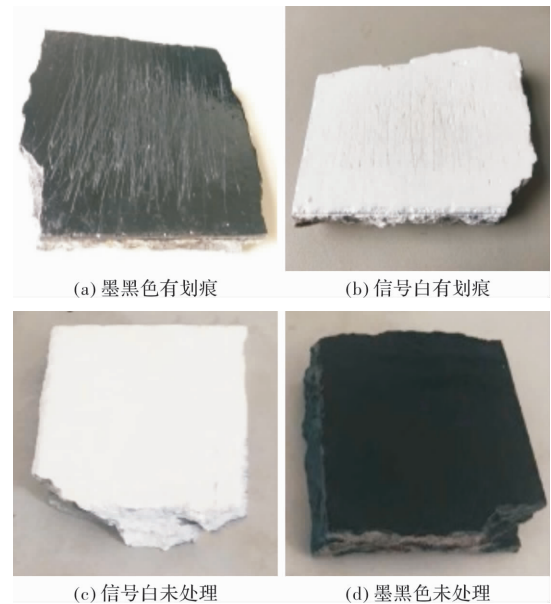


图7 表面颜色和粗糙度共同作用的试件

Fig. 7 Test piece with surface color and roughness interaction

表5 表面颜色和粗糙度共同作用试件的吸收系数测定结果

Tab. 5 Measurement results of absorption coefficient of test pieces of surface color and roughness interaction

试件	平均 Ra/μm	反射率	吸收系数
a. 墨黑色表面有划痕	3.756	0.048 0	0.952 0
b. 信号白表面有划痕	3.872	0.783 0	0.217 0
c. 信号白表面未处理	1.182	0.831 7	0.168 3
d. 墨黑色表面未处理	1.351	0.047 0	0.953 0

表6 吸收系数测定结果方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of measurement results of absorption coefficient

方差来源	离差平方和	自由度	均方误差	F 值	F 临界值(α=0.05)	显著性
表面颜色	0.577 37	1	0.577 37	662.6	161	*
表面粗糙度	0.000 31	1	0.000 31	0.36		
误差	0.000 87	1	0.000 87			
总和	0.578 55	3				

从测定结果和方差分析可知,表面颜色与粗糙度相比对太阳辐射吸收系数的影响程度更显著。

2 表面温度实测

2.1 试验方案

太阳辐射照射下,影响建筑围护结构表面热物理性的因素很多,如空气温度、室外风速风向、

太阳辐射强度、围护结构表面材料(颜色和粗糙度)、朝向、空气质量、地理纬度等,较为复杂。本节采用控制变量、组间对照的实验方法,重点研究表面颜色和粗糙度这两个与太阳辐射吸收系数有关的因素对围护结构表面温度、单位面积净得热量的影响。

测试时间为2018年12月13日~18日,地点选

在内蒙古呼和浩特市(北纬 40.50° , 东经 111.40°), 是在内蒙古严寒地区冬季典型气候条件下进行的, 测试期间天气晴朗无云, 室外空气温度在 $-16.83 \sim 3.17^{\circ}\text{C}$ 之间, 西北风 $1 \sim 2$ 级. 测试试验选取上述介绍的六种表面颜色的试件和三种表面粗糙度的试件(表 2 中(a)、(c)和(d)), 试件规格均为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 1.7\text{ cm}$. 分别测试表面颜色和粗糙度对水泥板试件表面温度变化的影响. 测试时间均为两天, 测试期间, 试件被测表面朝南.

2.2 测试内容与仪器

测试内容主要包括室外空气温度、风速风向、太阳辐射强度和试件表面温度. 室外气象参数采用 PC-3 型便携式自动气象站, 试件表面温度测量采用 JTNT-C 多通道温度热流测试仪, 每 15 分钟记录一组数据. 温度传感器布置在试件正中心, 温度传感器用凡士林与试件被侧面完全接触, 不留空隙, 且温度传感器探头用锡纸包裹, 以减轻太阳辐射对探头的温升效应.

2.3 试验结果分析

2.3.1 颜色对试件表面温度的影响

六种颜色试件表面温度实测过程见图 8, 测试架高 0.46 m , 测试时试件能完全接受到太阳辐射, 无高大建筑和树木的遮挡. 测试时间为 2018 年 12 月 13 日 $10:00 \sim 19:30$ 和 14 日 $9:00 \sim 19:30$. 依据测试出的试件表面温度、室外气象参数对吸收系数的影响, 分析表面颜色对试件表面温度和表面单位面积净得热量的影响规律.

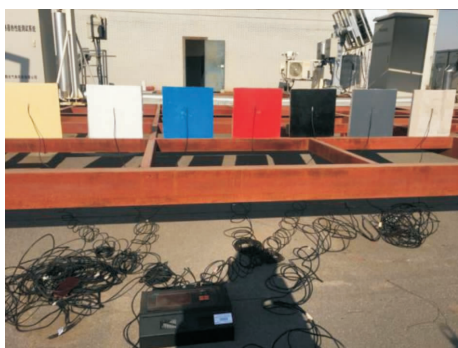


图 8 表面颜色不同时试验测试过程图片

Fig. 8 Test process picture when the surface color is different

(1) 试件表面温度变化规律

图 9 给出了 12 月 14 日试件表面温度的变化曲线. 从图 9 中可以看出, 测试期间, 在白天 $9:00 \sim 17:00$ 时, 六种试件表面温度有明显差距, 在 $17:00$ 之后基本重合, 这是因为日落时间在 $17:00$ 左右, 日落之后没有太阳辐射, 试件表面只有

对流换热和长波辐射换热, 由此可得出, 表面颜色主要影响白天太阳辐射作用时试件表面温度, 对夜间长波辐射换热作用下的试件表面温度影响不大.

白天时六种表面颜色对试件表面温度有不同程度的影响, 墨黑色试件表面温度最高, $9:00 \sim 17:00$ 间两日试件表面温度平均为 22.28°C , 信号白试件表面温度最低, 日平均温度为 7.08°C , 二者温差为 15.198°C . 其他试件表面温度从大到小依次为交通灰 B、交通蓝、交通红、硫磺色, 颜色对表面温度的影响规律正好和颜色对太阳辐射吸收系数的影响规律吻合, 可见表面颜色对温度的影响根本是其吸收系数的不同.

(2) 试件表面单位面积净得热量变化规律

依据表面温度的测试结果和六种颜色试件的吸收系数, 分别计算出各试件的室外空气综合温度和表面单位面积净得热量, 分析其相应的变化规律. 经分析测试期间 12 月 13 日和 14 日表面单位面积净得热量的变化规律基本一致, 以下是以 14 日的数据来具体探究, 图 10 为各颜色试件表面单位面积净得热量的变化情况.

从图 10 中可以看出, 颜色对试件表面净得热量影响很大, 在 $16:30$ 之后各颜色试件表面单位面积净得热量差距不大, 而在白天 $9:00 \sim 16:30$ 内各颜色试件有明显差距, 交通灰 B 试件和墨黑色试件在白天 $9:00 \sim 16:00$ 外表面得热, 信号白试件和硫磺色试件全天外表面散热, 交通红试件和交通蓝试件在 $11:30 \sim 16:00$ 外表面得热, 其他时间散热, 观察 $16:30$ 左右这个时刻, 因为有了太阳辐射直射, 试件表面净得热量骤减, 其中交通灰 B 试件和墨黑色试件净得热量衰减的最大, 表明深颜色试件受太阳辐射影响波动较大, 浅颜色试件相比波动较小. 与颜色对试件表面温度影响规律不同的是, 交通灰 B 试件全天净得热量最大, 这是由于交通灰 B 试件室外空气综合温度与试件表面温度的温差最大. 14 日全天平均单位面积净得热量交通灰 B 试件最大, 为 75.45 W/m^2 , 信号白试件最小, 为 -96.39 W/m^2 , 两个试件相差 171.84 W/m^2 , 差距较大.

图 11 给出了各颜色试件与自身全天平均单位面积净得热量的差值, 以此来看全天试件表面的热稳定性, 可以看出交通灰 B 的日波动性最大, 与平均净得热量最大相差 347.18 W/m^2 , 硫磺色的日波动性最小, 与平均净得热量最大相差 73.16 W/m^2 , 整体来看深颜色表面热稳定性较差, 浅颜色表面相对热稳定性较好.

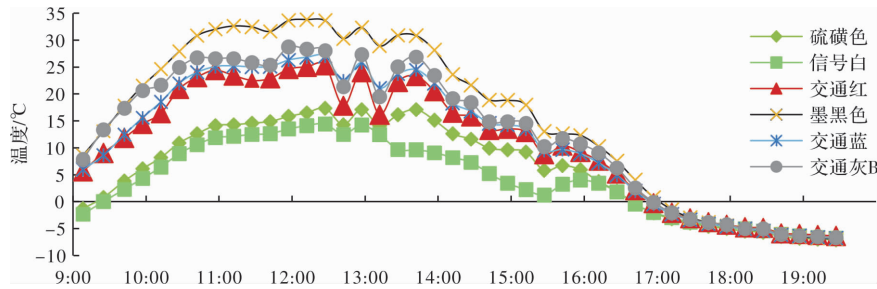


图9 试件表面温度变化曲线

Fig. 9 Test piece surface temperature curve

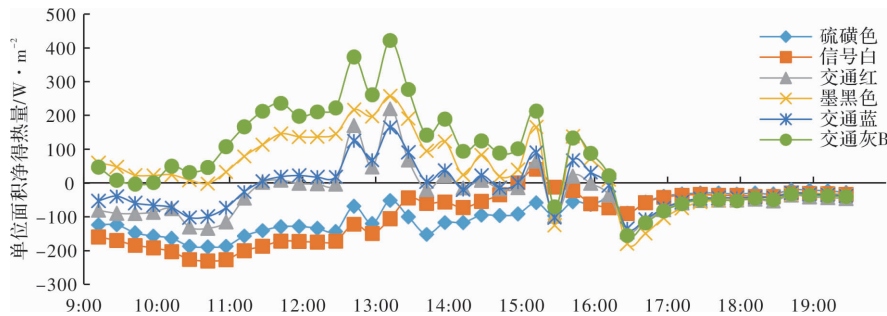


图10 试件表面单位面积净得热量变化曲线

Fig. 10 The net heat gain curve per unit area of the test piece surface

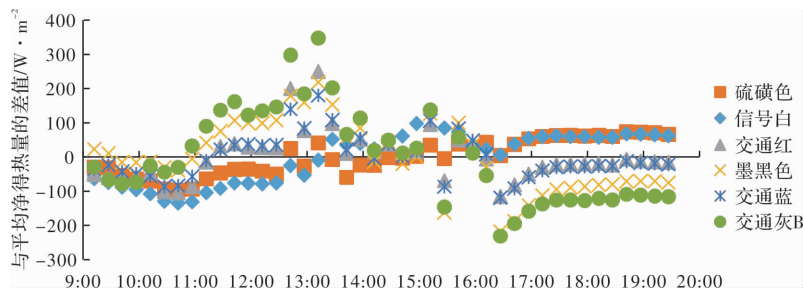


图11 各颜色试件与平均净得热量的差值

Fig. 11 Difference between each color test piece and the average net heat gain

2.3.2 粗糙度对试件表面温度的影响

建筑围护结构外表面并非都是光滑平整的,有的是凹凸不平的,存在一定的表面粗糙度,造成围护结构外表面粗糙度不同的原因可能是原本围护结构材质不同决定的或风沙侵蚀等的影响.通过对三种粗糙度试件表面温度的实测来探究表面粗糙度对围护结构表面热环境的影响.测试时间为2018年12月16日10:00~18日6:00,测试过程图片见图12,依据测试出的试件表面温度、室外气象参数对吸收系数的测定,分析表面粗糙度对试件表面温度和表面单位面积净得热量的影响规律.

(1) 试件表面温度变化规律

图13给出了12月16日~18日试件表面温度的变化情况.从图13中可以看出,三种表面粗糙度不同的试件表面温度差距不大,用表面温度日

平均值来比较,12月16日至18日9:00~17:00的两日平均温度分别是,10.032 μm 为15.29 $^{\circ}\text{C}$ 、13.423 μm 为14.76 $^{\circ}\text{C}$ 、4.504 μm 为12.82 $^{\circ}\text{C}$,最大与最小的温差为2.46 $^{\circ}\text{C}$;夜间17:00~次日9:00的平均温度分别是,10.032 μm 为-9.13 $^{\circ}\text{C}$ 、13.423 μm 为-9.48 $^{\circ}\text{C}$ 、4.504 μm 为-9.71 $^{\circ}\text{C}$,最大温差为0.57 $^{\circ}\text{C}$,可见表面粗糙度对太阳辐射作用下的试件表面温度也有不同程度的影响,但影响程度比颜色对表面温度的影响程度小,表面粗糙度对夜间长波辐射换热影响不大.

粗糙度对试件表面温度的影响是因为粗糙度越大,表面反射出去的热量减少,同时吸收能力增强,表面热量聚集,温度升高;光滑表面反射出去的热量多,同时吸收能力弱,表面热量聚集的慢,温升也缓慢.



图 12 表面粗糙度不同时试验测试过程图片
Fig. 12 Picture of testtest process when surface roughness is different

(2) 试件表面单位面积净得热量变化规律

依据表面温度的测试结果和三种粗糙度试件的吸收系数, 分别计算出各试件的室外空气综合温度和表面单位面积净得热量, 分析其相应的变化规律, 以下是以 17 日的数据来具体探究. 图 14 为各粗糙度试件表面单位面积净得热量的变化曲线.

从图 14 中可以看出, 三块粗糙度试件在白天 9:00~16:00 基本处于得热状态, 在 6:00~9:00 和 16:00~23:00 之间时, 试件表面散热, 但差距较小, 表明粗糙度对夜间表面净得热量影响较小. 三块试件 17 日全天平均单位面积净得热量粗糙度为 $4.504\ \mu\text{m}$ 时最大, 为 $12.20\ \text{W}/\text{m}^2$, $13.423\ \mu\text{m}$ 时最小, 为 $-16.55\ \text{W}/\text{m}^2$, 两个试件相差 $32.75\ \text{W}/\text{m}^2$.

图 15 给出了各粗糙度试件与自身全天平均单

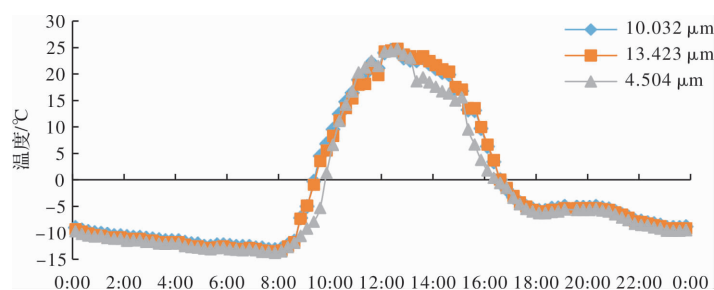


图 13 试件表面温度变化曲线

Fig. 13 Test piece surface temperature curve

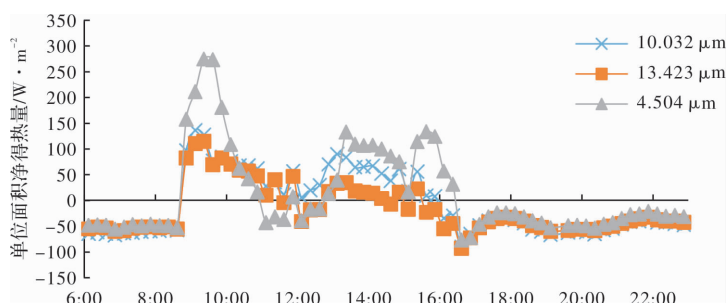


图 14 试件表面单位面积净得热量变化曲线

Fig. 14 The net heat gain curve per unit area of the test piece surface

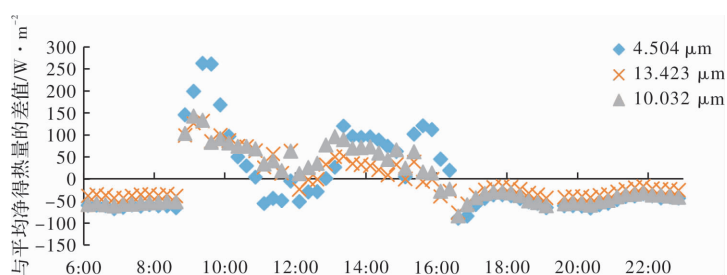


图 15 各粗糙度试件与平均净得热量的差值

Fig. 15 The difference between each roughness test piece and the average net heat gain

位面积净得热量的差值,从试件表面热稳定性来看,粗糙度为 $4.504\ \mu\text{m}$ 时表面热量全天波动较大,最大与平均净得热量相差 $262.56\ \text{W}/\text{m}^2$, $13.423\ \mu\text{m}$ 时日波动最小,最大与平均净得热量相差 $130.97\ \text{W}/\text{m}^2$,可见粗糙度越小,表面热稳定性越差,这是由于光滑的表面得到的热量又迅速反射出去,而粗糙的表面反射出去的热量较少,都聚集在表面。

3 结论

(1)通过测定常用表面颜色和粗糙度的吸收系数,得出墨黑色的吸收系数最大,为 $0.953\ 0$,信号白的吸收系数最小,为 $0.168\ 3$,这两种试件的吸收系数相差 $0.784\ 7$ 。粗糙度为 $10.032\ \mu\text{m}$ 时吸收系数最大,为 $0.692\ 7$, $4.504\ \mu\text{m}$ 时的吸收系数最小,为 $0.648\ 4$,这两种试件的吸收系数相差 $0.044\ 3$ 。通过对四种颜色和粗糙度共同作用的试件吸收系数的测定,方差分析出颜色对吸收系数的影响程度高于粗糙度对其的影响。测定结果为后续温度实测分析和能耗分析提供参数。

(2)通过温度实测,分析出表面颜色和粗糙度主要影响白天太阳辐射作用时试件表面温度,对夜间表面温度影响不大,在实测期间,夜间各粗糙度试件平均温度最大偏差为 $0.57\ ^\circ\text{C}$ 。

(3)墨黑色试件的表面温度最高,信号白试件的表面温度最低,二者在白天 $9:00\sim 17:00$ 平均温度相差 $15.198\ ^\circ\text{C}$,粗糙度为 $10.032\ \mu\text{m}$ 时的表面温度最高, $4.504\ \mu\text{m}$ 时的表面温度最低,二者在白天 $9:00\sim 17:00$ 平均温度相差 $2.46\ ^\circ\text{C}$,可见粗糙度对表面温度的影响程度比颜色对表面温度的影响程度小。

(4)全天平均单位面积净得热量交通灰 B 最大,为 $75.45\ \text{W}/\text{m}^2$,信号白最小,为 $-96.39\ \text{W}/\text{m}^2$,交通灰 B 全天表面热量波动最大,硫磺色的最小,可见深颜色表面热稳定性较差,浅颜色表面相对较好。全天平均单位面积净得热量粗糙度为 $4.504\ \mu\text{m}$ 最大,为 $12.20\ \text{W}/\text{m}^2$, $13.423\ \mu\text{m}$ 时最小,为 $-16.55\ \text{W}/\text{m}^2$,粗糙度为 $4.504\ \mu\text{m}$ 时的表面热量全天波动较大, $13.423\ \mu\text{m}$ 时的波动最小,可见粗糙度越小,表面热稳定性越差。

参考文献 References

- [1] 彦启森,赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986:5-10.
YAN Qisen, ZHAO Qingzhu. Thermal process of building [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1986:5-10.
- [2] CHENG V, NG E, GIVONI B. Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate [J]. Solar Energy, 2005, 78 (4): 528-534
- [3] OZEL M. The influence of exterior surface solar absorptivity on thermal characteristics and optimum insulation thickness [J]. Renewable Energy, 2012, 39 (1):347-355
- [4] LIU H, CHEN Z, CHEN B, et al. Studies on the temperature distribution of steel plates with different paints under solar radiation[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1):342-354.
- [5] 罗松钦,杨昌智,李洪强,等. 夏热冬冷地区太阳辐射对建筑围护结构能耗影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5):149-156.
LUO Songqin, YANG Changzhi, LI Hongqiang, et al. Analysis of the influence of solar radiation on the energy consumption of building envelopes in hot summer and cold winter area[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2018, 45 (5): 149-156.
- [6] 陈志华,陈滨滨,刘红波. 钢结构常用涂料太阳辐射吸收系数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 81-87.
CHEN Zhihua, CHEN Binbin, LIU Hongbo. Experimental research on solar radiation absorption coefficient of common coatings for steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (5): 81-87.
- [7] 张红婴,钟珂,刘加平. 太阳辐射吸收系数对建筑物全年空调能耗的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2017, 43(2): 266-273.
ZHANG Hongying, ZHONG Ke, LIU Jiaping. Impact of solar radiation absorption coefficient on air conditioning energy consumption of buildings throughout the year[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2017, 43 (2): 266-273.
- [8] 张红婴,钟珂,刘加平. 太阳辐射吸收系数对围护结构夏季净得热量的影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38

- (1): 156-163.
- ZHANG Hongying, ZHONG Ke, LIU Jiaping. Effect of solar radiation absorption coefficient on net heat gain of envelope structure in summer[J]. Journal of Solar Energy, 2017, 38 (1): 156-163.
- [9] 曾晰. 室内外温度对建筑围护结构吸收太阳能的影响[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- ZENG Xi. Effect of indoor and outdoor temperature on solar energy absorption of building envelope [D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [10] 王晓腾. 室内外气温对冬季墙体太阳辐射净得热量的影响[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- WANG Xiaoteng. Effect of indoor and outdoor temperature on net solar heat gain from winter wall[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [11] 董海荣, 祁少明, 麻建锁. 涂料外饰面的太阳辐射吸收性能测试方法分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1600-1603.
- DONG Hairong, QI Shaoming, MA Jiansuo. Analysis of test methods for solar radiation absorption performance of coating exterior finishes[J]. Journal of Solar Energy, 2012, 33 (9): 1600-1603.
- [12] 马超, 刘艳峰, 王登甲, 等. 西北农村住宅建筑热工性能及节能策略分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 427-432.
- MA Chao, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, et al. Analysis of thermal performance and energy saving strategy of rural residence building in Northwest China [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 427-432.
- [13] 李峥嵘, 曾诗琴, 赵群. 贵州地扞侗寨传统民居围护结构改造对室内热湿环境影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(6): 908-911.
- LI Zhengrong, ZENG Shiqin, ZHAO Qun. The impact of envelope materials on indoor thermal and moist environment in Dimen Dong Nationality in Guizhou [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(6): 908-911.
- [14] Standard tables for referencesolar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37 ° tilted surface ASTM G173 [S]. West Conshocken PA, USA: American Society for Testing Materials, 2008: 34-35.
- [15] 陈滨滨, 陈志华, 刘红波. 钢结构常用涂料太阳辐射吸收系数试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 81-87.
- CHEN Binbin, CHEN Zhihua, LIU Hongbo. Experimental Research on Solar radiation absorption coefficients of common coatings for steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 81-87.

(编辑 桂智刚)