

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.018



高反射涂料自然老化后的隔热性能

高亚锋^{a,b}, 郭睿^b, 徐江民^c, 庄超群^c, 向瑞骥^c, 范东叶^c

(重庆大学 a. 绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室; b. 国家级低碳绿色建筑国际联合研究中心; c. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为研究高反射涂料在夏热冬冷地区一年自然老化后的隔热性能,以重庆市某办公建筑两间建筑外形、围护结构和朝向均相同的顶层房间为研究对象,在屋顶上涂敷普通灰色涂料、白色高反射涂料分别作为基准屋顶、高反射屋顶,分别选取 2014 年 7 月和 2015 年 7 月的连续 3 个晴朗日进行夏季隔热性能实测。研究表明:经过一年自然老化后的高反射屋顶反射率下降,隔热性能有所降低,在相同空调工况下,内外壁面降温幅度分别减小 3.2 °C 和 4.2 °C,空调耗电量降低 0.03 kWh/m²·d;非空调工况时,室内空气温度降温幅度减小 2.5 °C。

关键词:高反射涂料;自然老化;隔热性能;空调节电量

中图分类号:TU111.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0129-06

Thermal insulation performance of high reflective coatings after natural aging

Gao Yafeng^{a,b}, Guo Rui^b, Xu Jiangmin^c, Zhuang Chaoqun^c, Xiang Ruiji^c, Fan Dongye^c

(a. Joint International Research Laboratory of Green Building and Built Environment, Ministry of Education; b. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings; c. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Experiment was carried out to investigate the impact of natural aging of high reflective coating on its thermal insulation performance in hot-summer and cold-winter zone. White reflective coatings and gray coatings were applied respectively on two identical top-floor rooms of an office building in Chongqing with same floor area, envelope material and orientation. Thermal insulation performance was investigated by analyzing the records of three consecutive sunny day in July 2014 and July 2015. The results showed that reflectivity of reflective roof and thermal insulation performance decreased after one-year natural aging. When the room was conditioned with the setting point of 26 °C, average temperatures of interior and exterior surfaces decreased by 3.2 °C and 4.2 °C respectively, and the energy consumption of air conditioners decreased by 0.03 kWh/m²·d in July 2014 compared with those in July 2015. When air-

收稿日期:2017-04-07

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划一般项目(CSTC2014jcyjA90018);“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0702903);中国中冶重大科技专项(0012012006)

作者简介:高亚锋(1979-),男,博士,副教授,主要从事建筑室外环境与绿色建筑研究,(E-mail)gaoyafeng79@126.com.

Received:2017-04-07

Foundation item:Chongqing Fundamental and Advanced Research Projects(No. CSTC2014jcyjA90018); China National Key R & D Program(No. 2017YFC0702903); Major Science and Technology Special Project of China Metallurgical Group Corporation (No. 0012012006)

Author brief:Gao Yafeng (1979-), PhD, associate professor, main research interests: building outdoor environment and green building, (E-mail)gaoyafeng79@126.com.

conditioners were off, there was a decrease of 2.5 °C in average indoor air temperature in July 2014 compared with those in July 2015.

Keywords: reflective coatings; natural aging; thermal insulation performance; air-conditioning energy consumption

屋顶是位于房屋顶部具有承重、防渗止漏和保温隔热等作用的建筑构件,其直接受太阳辐射和周期性变化的大气温度等自然因素的作用,对于建筑能耗和室内热舒适均有较大影响。据统计,在多层建筑中,屋顶的能耗约占建筑总能耗的 5%~10%,占顶层能耗的 40%以上^[1]。而涂敷高反射涂料的屋顶有利于改善屋顶热工性能,从而提高建筑顶层房间室内热舒适、降低空调能耗、缓解城市热岛效应及实现碳减排^[2-6]。Levinson 等^[7]对美国多个城市的办公建筑实测发现,高反射屋顶可在夏季降低空调能耗 3.30~7.69 kWh/m²,能有效减少发电厂 CO₂、SO₂ 和 NO_x 的排放。Xu 等^[8]对印度某项目的冷屋顶实验监测数据表明,冷屋顶每年节电量可达 20~22 kWh/m²,相当于减少制冷能耗 14%~26%。然而,高反射涂料反射率会因天气变化、风蚀和灰尘污垢导致的自然老化而衰减,降低隔热性能。Dornelles 等^[9]在巴西圣保罗对 12 种标准涂料和 8 种高反射涂料进行了为期 18 个月的老化性能测试,研究表明,反射率较高的浅色涂料受气候和沾污影响在最开始的 6 个月内反射率均有大幅度下降。Mastrapostoli 等^[10]在希腊雅典对两栋学校建筑进行的冷屋顶老化降温效果实验测试表明,高反射涂料老化后的屋顶(反射率为 0.5~0.55)与刚涂敷高反射涂料的屋顶(反射率为 0.71~0.74)外表面温度相差可达 7~12 °C。目前,中国对高反射屋顶的研究多集中在高反射涂料的工艺、特性^[11-12]以及刚涂敷高反射涂料的隔热性能方面^[13-14],缺乏针对高反射屋顶在夏热冬冷地区自然老化后的隔热性能研究。本文以重庆市某办公建筑为对象,对屋顶用高反射涂料一年自然老化后的隔热性能及其在夏季的应用实效进行了测试分析。

1 实验概况

1.1 实验场地的选取及布置

选择重庆市江津区某工厂办公楼顶层相邻的 2 间房为实测用房,其建筑朝向、房间面积、窗户尺寸均一致,屋顶均为平屋顶。房间的空间尺寸为 5.92 m×3.62 m×3.30 m,面积为 21.4 m²,窗户形式为单层推拉式,尺寸为 1.40 m×1.46 m。实验平台于 2014 年 7 月 15 日搭建,共选取 2 种涂料,其中,白色

涂料为 2014 年 1 月生产的 W 型高反射隔热涂料,主要成分为陶瓷钛硅色釉空心微珠颜料、有机硅-丙烯酸树脂、玻璃微珠、水、添加剂,涂料产品检测参数如表 1 所示。符合《建筑用反射涂料》(GB/T 25261—2010)^[15]和《建筑反射涂料》(JG/T 235—2008)^[16]要求。Sleiman 等^[17-18]研究发现,普通灰色屋面的反射率一般维持在 0.2 左右,故选用反射率为 0.2 的普通灰色涂料为基准涂料,其主要成分为:炭黑颜料、钛白粉、丙烯酸树脂、水、添加剂。依据《建筑反射涂料应用技术规程》(JGJ/T 359—2015)^[19]的施工要求,在 2 个实验房的屋顶上分别涂上这 2 种涂料,其施工主要分为 3 步:1)屋顶处理:清除屋顶灰尘、油脂及污垢,使其平整;2)封底漆涂刷:在清理后的干燥屋顶上涂刷一道底漆;3)涂刷:采用滚涂法对屋顶进行两道涂刷。

实验办公楼南立面图及屋顶测试效果图如图 1 所示。依据《重庆市人民政府办公厅关于主城区行政事业单位全年实行朝 9 晚 6 作息时间的通知》(渝办发〔2011〕351 号)^[20],空调运行时间段设为 8:00 至 18:00,空调夏季设置温度为 26 °C,3 个房间空调器均为美的 KFR-35GW/DY-1A(R3)型风冷热泵空调,制冷量、制热量为 3 520、4 000 W,COP、EER 为 3.29、3.67。

表 1 高反射隔热涂料产品检测参数

Table 1 Product testing parameters of the solar reflective coatings

序号	检验项目	检验结果	标准要求	检测依据
1	隔热温差	11.2 °C	≥10 °C	
2	隔热温差衰减,白色	2.6 °C	≤12 °C	JG/T 235—
3	太阳光反射比,白色	0.84	≥0.80	2008
4	半球发射率	0.85	≥0.80	
5	太阳光反射比,白色	0.84	≥0.80	GB/T 25261—
6	半球发射率	0.85	≥0.80	2010



图 1 实验办公楼南立面及屋顶测试效果图

Fig. 1 North facade of the office building and external view of the roof

1.2 测试内容与条件

1.2.1 测试内容 根据《建筑热环境测试方法标准》(JGJ/T 347—2014)^[21]和《地面气象观测规范》^[22]实测过程动态监测的参数主要包括:3间办公室的空调耗电量,屋顶接收和反射的太阳辐射照度,室外空气温度、湿度,室内空气温度,屋顶内、外表面温度,屋顶外壁面导热热流密度。其中,热流计安装方式为:在屋顶中线 1/3 处打孔 5 cm,将热流计埋入,并涂敷导热膏以使其与屋面紧密接触,然后注入水泥砂浆抹平洞口,并涂敷对应的白色高反射涂料和普通灰色涂料。具体测点布置及测量仪器见图 2、表 2。

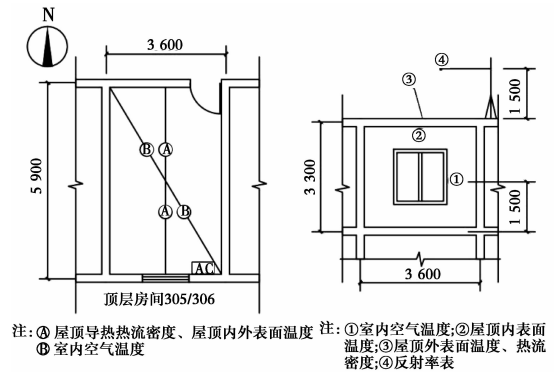


图 2 测点位置

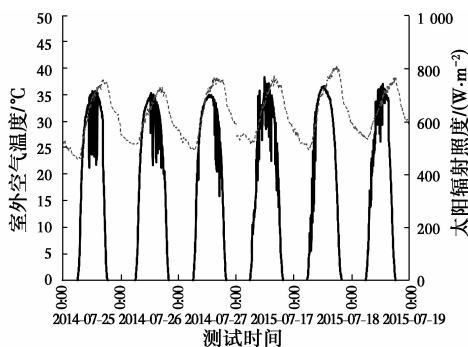
Fig. 2 Installation positions of the test apparatus

表 2 实测仪器规格

Table 2 Specifications of apparatus

测量参数	测试仪器	型号	量程	精度
空调耗电	电力监测仪	PowerBay-T8005	0~2.2 kW	1.0 级
屋顶内外表面、室内空气温度	温度传感器	Pt100	-40~150 °C	0.2 °C
屋顶热流密度	热流传感器	HFP01-10	-2 000~2 000 W/m ²	<5 %
室外空气温湿度	温、湿度记录仪	RR002	-10 °C~+50 °C 0~95% RH	±0.5 °C ±3% RH
屋顶反射率	反射率表	TBQ-8	0~2 000 W/m ²	±5 %
太阳辐射强度	太阳辐射记录仪	PC-2		0.5 %

1.2.2 测试条件 测试时间为 2014-07-25—2014-07-27 和 2015-07-17—2015-07-19,共计 6 d。测试期间多为晴天多云天气,图 3 为测试期间的每室外空气温度与太阳辐射照度曲线,表 3 为测试期间室外气象参数,由表 3 可知,2014 年测试日内,室外平均温度为 30.7 °C,温度波动范围在 22.9~38.4 °C,辐射强度最大值为 795.0 W/m²(2014 年 7 月 25 日),日平均总辐射量为 23.6 MJ/m²·d。2015 年测试日内,室外平均温度为 31.7 °C,温度波动范围在 24.6~40.5 °C,辐射强度最大值为 768.0 W/m²(2015 年 7 月 17 日),日平均总辐射量为 22.6 MJ/m²·d。通过对比发现,2014 年与 2015 年测试期内的气象条件类似。



注:—太阳总辐射 ---- 室外空气温度

图 3 测试期间室外天气状况

Fig. 3 Ambient conditions during the test

表 3 测试期间室外气象参数

Table 3 Meteorological parameter during the test

测试日期	温度/°C			太阳辐射强度	
	max	mean (±s. d.)	min	max/ (W·m ⁻²)	日平均总 辐射量/ (MJ·m ² ·d ⁻¹)
2014-07-25	37.9	30.4±5.0	22.9	795	21.7
2014-07-26	36.5	30.3±3.6	25.8	786	24.5
2014-07-27	38.4	31.4±4.7	24.6	779	24.7
2015-07-17	38.7	31.2±4.1	25.8	768	22.5
2015-07-18	40.5	32.2±5.2	24.6	734	24.9
2015-07-19	38.3	31.7±3.6	26.6	742	20.4

2 结果与讨论

2.1 两种屋顶反射率实测

Paolini 等^[23]对高反射涂料自然老化反射率的变化研究表明,大部分高反射涂料反射率在 6 个月内下降最快,一年以后保持稳定。采用反射率表,在晴朗少云的天气下依次对近一年内 3 种屋顶在 250~2 500 nm 波长范围内的反射率进行测定,然后,利用美国 ASTM E1918—06(2015)^[24]中的视角系数式(1)对反射率进行校准,得到涂料在各波段范围内的反射率,如表 4 所示。

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left\{ X - \sqrt{X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right\} \quad (1)$$

式中： F_{1-2} 为视角系数； R_1 为反射率表半径与距屋顶高度之比， $R_1 = r_1/h$ ； R_2 为反射率表的最大可视圆半径与距屋顶高度之比， $R_2 = r_2/h$ ； $X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$ 。

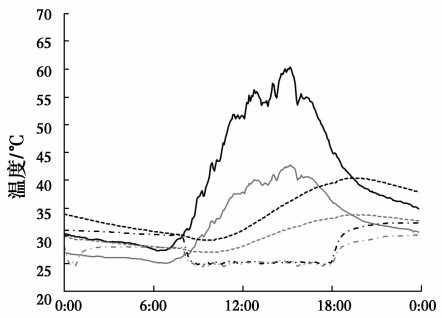
表 4 3种屋顶的反射率
Table 4 The reflectivities of roofs

老化情况	屋面类型	反射率/%
初始(2014年7月)	基准屋顶	21.3
	高反射屋顶	82.1
老化后(2015年7月)	基准屋顶	25.1
	高反射屋顶	58.5

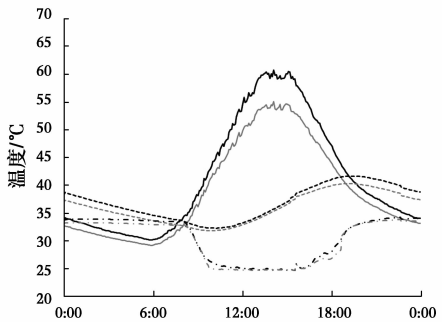
由表 4 可知，高反射屋顶由于天气变化、风蚀和灰尘玷污导致涂料自然老化，反射率较 2014 年下降近 20%，老化后的反射率与 Sleiman 等^[17-18]研究的白色高反射屋顶老化衰减后的反射率 0.6 接近。基准屋顶由于沾灰，其反射率则小幅增长。

2.2 屋顶隔热性能实测

将 2014 年和 2015 年测试期各自 3 d 的温度分别取平均，两个房间 24 h 的室内外温度变化曲线如图 4 所示。



(a) 测试时间(2014-07-25—2014-07-27)



(b) 测试时间(2015-07-17—2015-07-19)

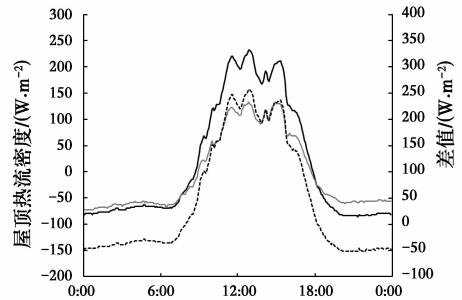
注：——基准屋顶外壁 ——高反射屋顶外壁
 - - - - -基准屋顶内壁 - - - - -高反射屋顶内壁
 ······基准屋顶室内空气 ······高反射屋顶室内空气

图 4 空调工况下 3 间房间室内外温度变化曲线
Fig. 4 Indoor and outdoor temperature distributions of three rooms with air conditioning

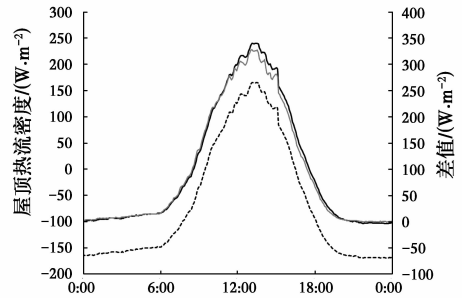
由图 4 可知，随着室外气象参数的波动，屋顶内外壁面温度及室内空气温度也随之变化，且变化趋势基本一致。基准屋顶内外壁面温度均高于对应的高反射屋顶内外壁面温度，其中，2014 年基准屋顶内外壁面平均温度分别为 34.4、39.8℃，分别比高反射屋顶内外壁面温度高 4.2、6.6℃；2015 年基准屋顶内外壁面平均温度为 37.0、41.6℃，比高反射屋顶内外壁面温度高 1.0、2.4℃。由于屋顶热惯性，房间内壁面温度在晚间达到最大值，2014 年高反射屋顶内壁面最高温度出现在 19:15，比基准屋顶延迟了 15 min；2015 年高反射屋顶内壁面最高温度出现在 19:10，比基准屋顶延迟了 5 min。基准屋顶由于白天吸收更多热量及蓄热作用，峰值提前，其内壁面温度也比高反射屋顶要高。综上，高反射率能够减少太阳辐射热，从而降低屋顶内外壁面温度，而随着自然老化，高反射屋顶反射率逐渐下降，导致高反射屋顶的内外壁面降温效果有所降低。

空调在运行阶段，空调温度设定一致，受到各自屋顶和外墙等围护结构对流换热影响，两个房间内平均空气温度差在 1℃以内。在空调关闭阶段，由于壁面辐射换热及墙体蓄热的影响，2014 年、2015 年基准屋顶的室内空气平均温度分别为 31.0、33.5℃，分别比对应的高反射屋顶高 2.6、0.5℃。

流经屋顶外壁面的导热热流密度是衡量屋顶节能效果的重要指标。图 5 为屋顶外壁面热流密度



(a) 测试时间(2014-07-25—2014-07-27)



(b) 测试时间(2015-07-17—2015-07-19)

注：——基准屋顶 ——热反射屋顶 - - - - -基准屋顶-种植屋顶

图 5 屋顶外壁面热流密度
Fig. 5 Heat flux through exterior surface of roofs

图。由图5可知,基准屋顶与高反射屋顶外壁面导热热流密度均随室外气象参数波动幅度较大。2014年基准屋顶外壁面热流密度峰值为 232.0 W/m^2 ,高于高反射屋顶热流密度峰值(133.0 W/m^2);2015年基准屋顶外壁面热流密度峰值为 241.0 W/m^2 ,高于高反射屋顶热流密度峰值(229.3 W/m^2)。

2.3 空调用能分析

图6为基准屋顶房间和高反射屋顶房间在测试期内每天的空调能耗对比图。

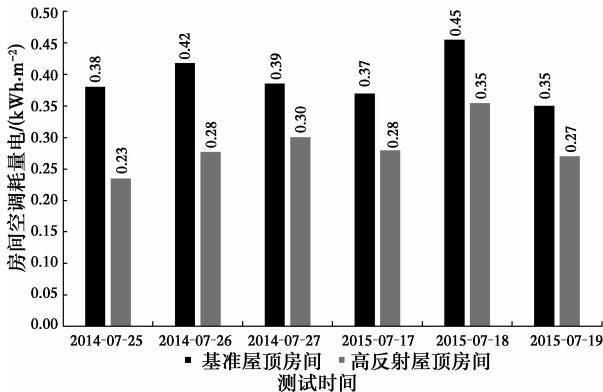


图6 房间空调能耗对比

Fig. 6 Energy consumption of air conditioning

由图6可以看出,在夏季测试期内,基准屋顶房间空调能耗均高于对应的高反射屋顶房间空调能耗。其中,2014年、2015年基准屋顶房间日均空调能耗分别为 0.39 、 $0.39\text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,分别比对应的高反射屋顶房间多耗电 0.12 、 $0.09\text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,节电率分别为 31.2% 、 23.1% 。表明高反射屋顶随着涂料反射率的衰减,反射太阳辐射得热量减少,其节电量会有所降低。

3 结论

1)在夏季高温天气,自然老化前后的高反射涂料均能减少屋顶得热,相比基准屋顶,外壁面温度平均可分别降低 6.6 、 $2.4\text{ }^\circ\text{C}$,内壁面温度可分别降低 4.2 、 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$,并且,使内表面温度峰值时间分别延迟了 15 、 5 min ,房间夏季空调平均可分别节能 0.12 、 $0.09\text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;在非空调开启时段,室内空气温度可分别降低 2.6 、 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$,室内空气温度可分别降低 2.6 、 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2)与老化前相比,高反射涂料经过一年自然老化后,反射率下降 23.6% ,屋顶得热增加,对屋顶内外壁面和室内空气的降温效果分别降低 2.4 、 $1.4\text{ }^\circ\text{C}$,内壁面温度峰值延迟时间减少 10 min ,夏季空调

节电量降低 $0.03\text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,高反射涂料由于自然老化,其降温隔热性能会有所衰减。

参考文献:

- [1] 孟庆林,刘亚. 聚乙烯隔热屋面节能试验研究[J]. 新型建筑材料,2002(8):29-32.
MENG Q L, LIU Y. Experimental study on energy saving of polyethylene insulation roof [J]. New Building Materials,2002(8):29-32. (in Chinese)
- [2] MIDDEL A, CHHETRI N, QUAY R. Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015,14(1):178-186.
- [3] COSTANZO V, EVOLA G, MARLETTA L. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs [J]. Energy and Buildings,2016,114:247-255.
- [4] PISELLO A L, CASTALDO V L, PIGNATTA G, et al. Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation [J]. Energy and Buildings, 2016,114:180-190.
- [5] LI X X, NORFORD L K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore [J]. Urban Climate,2016,16:59-74.
- [6] ROSADO P J, FAULKNER D, SULLIVAN D P, et al. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home [J]. Energy & Buildings,2014,80:57-71.
- [7] LEVINSON R, AKBARI H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants [J]. Energy Efficiency,2010,3(1):53-109.
- [8] XU T, SATHAYE J, AKBARI H, et al. Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions [J]. Building and Environment,2012,48:1-6.
- [9] DORNELLES K, CARAM R, SICHIERI E. Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces [J]. Energy Procedia,2015,78:1587-1592.
- [10] MASTRAPOSTOLI E, SANTAMOURIS M, KOLOKOTSA D, et al. On the ageing of cool roofs: Measure of the optical degradation, chemical and biological analysis and assessment of the energy impact [J]. Energy and Buildings,2015.
- [11] 孙顺杰,杨文颐,冯晓杰,等. 彩色热反射隔热涂料的研

- 制与性能研究[J]. 涂料工业, 2013(4):17-22.
- SUN S J, YANG W Y, FENG X J, et al. Preparation and performance of color solar reflective thermal insulation coatings [J]. *Paint and Coatings Industry*, 2013(4):17-22. (in Chinese)
- [12] 倪余伟, 张松, 董建民. 热反射隔热防腐涂料的性能研究[J]. 涂料工业, 2015(4):5-9.
- NI Y W, ZHANG S, DONG J M. Properties of heat-reflective insulation anticorrosive coating [J]. *Paint and Coatings Industry*, 2015(4):5-9. (in Chinese)
- [13] 徐江民. 热反射屋面与种植屋面节能对比研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- XU J M. Contrastive research on energy savings from application of reflective roof and green roof [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [14] 庄超群, 高玉羨, 高亚锋, 等. 热反射涂料性能及其在冬季非空调工况下的应用实测研究[J]. 涂料工业, 2015(10):55-59.
- ZHUANG C Q, GAO Y X, GAO Y F, et al. Performance of thermal reflective coatings for non-air-conditioned buildings in winter [J]. *Paint and Coatings Industry*, 2015(10):55-59. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家标准质量监督检验检疫总局. 建筑用反射涂料: GBT 25261—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Solar heat reflecting insulation coatings for buildings: GBT 25261-2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑反射涂料: JGJ/T 235—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Architectural reflective thermal insulation coatings: JGJ/T 235-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [17] SLEIMAN M, BAN-WEISS G, GILBERT H E. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance—Part I: Analysis of roofing product databases [J]. *Solar Energy Maters and Solar Cells*, 2011, 95:3385-3399.
- [18] LEIMAN M, KIRCHSTETTER T W, BERDAHL P. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance—Part II: Development of an accelerated aging method for roofing materials [J]. *Solar Energy Maters and Solar Cells*, 2014, 122: 271-281.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑反射涂料应用技术规程: JGJ/T 359—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Architectural reflection coating technology procedures: JGJ/T 359-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [20] 重庆市人民政府. 重庆市人民政府办公厅关于主城区行政事业单位全年实行朝 9 晚 6 作息时间的通知[Z]. Chongqing Municipal People's Government. Circular of the general office of the people's Government of Chongqing Municipality on the implementation of the "9 nights and 6 schedules" during the whole year for the administrative institutions in the main urban areas[Z]. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑热环境测试方法标准: JGJ/T 347—2014 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of building thermal environment: JGJ/T 347-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 中国气象局. 地面气象观测规范[S]. 北京: 气象出版社, 2003.
- China Meteorological Administration. Ground meteorological observation specification [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. (in Chinese)
- [23] PAOLINI R, ZINZI M, POLI T, et al. Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: Natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings [J]. *Energy & Buildings*, 2014, 84:333-343.
- [24] Standard test method for measuring solar reflectance of horizontal and low-sloped surfaces in the field: ASTM E1918-06 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.