【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

色彩对涂料立面光热性能影响的实测研究

崔冬瑾^{1,2}, 许筱雯¹, 杨振宇¹, 李相逸¹, 袁磊^{1,2}

1) 深圳大学建筑与城市规划学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳市建筑环境优化设计研究重点实验室, 广东深圳 518060

摘要: 在夏热冬暖地区, 建筑外表面涂料需适应当地的气候特征, 从而减轻热负荷, 提升热舒适度. 为研究不同色彩涂料的光热性能差异, 提取 1 891 条兴趣点数据, 统计深圳幼儿园建筑典型的外立面色彩, 分析得到高频颜色 (红、黄、绿和蓝). 在建筑密度较高的城市街区中, 选取含有高频颜色且形式、布局相同的行列式建筑, 对表面可见光光谱、壁面温度和反射率进行实地测量. 结果表明, 不同色彩的涂料立面因光谱反射率不同, 呈现壁面温差, 最大可达 14.47 °C, 壁面温度与光谱反射率呈明显负相关; 同时, 壁面温度随着涂料明度的升高而降低. 可为建筑立面优化设计提供参考.

关键词: 绿色建筑; 涂料色彩; 光热性能; 行人层热环境; 热负荷; 实地测量

中图分类号: TU201; TU115

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.06604

On-site measurement of the different painting colors' effects on optical-thermal performance of building facades

CUI Dongjin^{1,2}, XU Xiaowen¹, YANG Zhenyu¹, LI Xiangyi¹, and YUAN Lei^{1,2}

1) College of Architecture and Urban Plan, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Shenzhen Key Laboratory for Optimizing Design of Built Environment, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: In hot summer and warm winter zone, the exterior coating of the building needs to adapt to the local climate in order to reduce the thermal absorption and improve indoor and outdoor thermal comfort. In this paper, we use POI (point of interest) data among 1891 kindergartens to analyze the typical colors of facades, and cluster four highest frequency colors (red, yellow, green and blue) from the POI data. We measure the spectrum of visible light, surface temperature, and the reflectance of different color coatings of a determinant block which is composed of buildings with same façade form and layout in the high-density city. The results confirm that surface temperature has a significant negative correlation with reflectance among different colors of paints. Furthermore, as brightness of paints increases, surface temperature decreases. The results can provide suggestions on building facade optimization design.

Key words: green building; color of paints; optical-thermal performance; pedestrian thermal comfort; thermal load; on-site measurement

Received: 2020-01-22; Accepted: 2020-07-20

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFC0704900); National Natural Science Foundation of China (51808342, 51908364)

Corresponding author: Professor YUAN Lei. E-mail: yuanlei@szu.edu.cn

Citation: CUI Dongjin, XU Xiaowen, YANG Zhenyu, et al. On-site measurement of the different painting colors' effects on optical-thermal performance of building facades [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 604-609. (in Chinese)

围护结构是室内环境与室外环境的缓冲界面,提高围护结构的热工性能可以提升室内外环境舒适度,节约能源,降低能耗。为改进维护结构的热工性能,近年来,许多学者致力于研究各类建筑材料的光热性能及其节能作用。以隔热涂料为例,SYNNEFA等^[1]发明了10种高反射率的彩色涂料,通过实验证明高反射率的彩色涂料样本比常规样本表面温度更低;胡家晖等^[2]介绍了涂料降温性能检测方法,发现普通白漆反射率较高,光热性能较好;时志洋等^[3]在研究色浆对热反射隔热涂料热反射性能的影响时,发现不同色浆的色彩及浓度对可见光和近红外波段的反射率影响显著;董海荣等^[4]研究发现建筑外饰面涂料的颜色对建筑的节能影响较大。周晓宇等^[5]发现高反射率的屋面材料比屋顶绿化降温效果更明显;SYNNEFA等^[6]发现,与常规沥青相比,彩色沥青样品具有更好的反射性能。以上文献主要分析了涂料色彩对屋顶和路面材料性能的影响,但建筑立面材料的反射隔热研究却较为滞后。一方面是由于建筑外立面处于更为复杂的城市街谷环境中,容易受周围环境影响;另一方面,外立面设计过程中较少考虑材料对建筑物理环境的影响,倾向从美学和心理学出发营造建筑氛围和性格。近年来,一些学者以量化的心理感受值来定量描述色彩的特征,并基于色彩特征从心理学角度进行设计^[7-8]。儿童相对容易被丰富的色彩吸引,所以幼儿建筑外立面色彩较为鲜艳、丰富。然而,幼儿对热环境的敏感度相对其他人群更高,外立面的隔热性能会由于色彩而改变。基于此,本研究利用高德地图提取兴趣点(point of interest, POI)数据,对深圳市1891所幼儿园的外饰面进行统计分析,可视化结果如图1,并基于POI数据提取4种高频色彩(红、黄、绿和蓝),研究不同色彩涂料立面光热性能的差异。

图1 深圳市彩色立面幼儿园分布地图

Fig. 1 The map of colorful coating façade kindergartens

1 实验原理

地球上接收到的太阳辐射波段主要集中在250~2500 nm,不同波段的辐射能在太阳光总辐射能中的占比不同,其中,包括约5%的紫外线辐射(波长<400 nm)、46%的可见光辐射(波长在400~700 nm)和49%的近红外辐射(波长在700~2500 nm)。绝大部分的太阳辐射能来自于可见光和近红外波段,约占总能量的95%。

SYNNEFA等^[1,6,9]研究发现,颜填料影响涂料的光学特性,提高可见光和近红外波段的反射率可有效提高隔热效果^[10-11]。在近红外光谱范围内,光谱反射率遵循二相流原理^[9],

$$\frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} = F(R) = \frac{K}{S} \quad (1)$$

其中, K 是吸收系数; S 是散射系数; R_{∞} 是样品在无限厚度下的反射率; $F(R)$ 称为缓解函数。 S 与平均粒径 d 的倒数之间存在线性关系,即涂料的平均粒径越小, S 越大,导致 R_{∞} 增大。

ZHANG等^[12-13]通过调整涂料的分子结构来增加近红外波段的反射率,弥补可见光波段低反射率的弊端,提升涂料总体隔热性能。至今,该项技术已广泛应用在反射性红外无机涂料的制备中。有机涂料分子设计难度很大,通过配比或制备方式来合成新的分子或改变分子结构较困难^[13],因此反射性有机涂料的推广应用远不及反射性无机涂料。但从装饰效果方面考虑,有机涂料相对无机涂料具有更好的着色率,且色谱范围广、色泽鲜艳,因此被广泛应用于幼儿建筑等需要鲜艳色彩立面的建筑类型中。

在不改变分子结构的前提下,涂料的颜色可一定程度影响反射率^[9],涂料反射率 R 为

$$R = \frac{\Phi_p(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (2)$$

其中, $\Phi_p(\lambda)$ 是反射光束光通量; $\Phi_i(\lambda)$ 为入射光束光通量。

2 实验

2.1 实验简介

选取晴朗无云的天气进行实验。实测时间为2019-09-28,最高气温35℃,平均相对湿度68%,

平均风速 2.6 m/s. 实测地点位于中国深圳市设计产业园厂区, 该街区呈典型行列式布局, 如图 2. 选取红、黄、绿和蓝 4 种外立面颜色的 4 栋建筑作为实测对象, 研究西立面和南立面 (街谷宽度 $W = 10$ m, 建筑高度 $H = 20$ m) 不同色彩涂料立面的光热性能差异, 见图 3. 该街区内建筑群统一规划、统一建造, 采取相同的建筑表面材料, 可以认为表面粗糙度和导热系数相近.

图 2 街区卫星图及立面现状

Fig. 2 Satellite imagery of site and coating façade

图 3 二维街谷示意图

Fig. 3 Two-dimensional image of street canyon

2.2 实验设置

观测时段为 12:00—15:00, 测量间隔为 1 h. 采用 GSAT 280 热成像仪和 SPIC-300 光谱仪同时采集立面温度数据和光谱数据, 确保光谱仪测点位于热成像仪测量范围内. 每个样品选取 3 个角度测量, 得出平均值, 记录数据. 研究不同朝向立面的表面温度变化, 分别采集建筑群沿街西立面和街谷内部南立面的数据. 研究同一朝向不同色彩、明度的表面温度差异: 同种颜色的墙体按照明度差异区分为浅、中和深 3 组数据, 通过红外热成像图分区读取温度数据, 结果如图 4, 分别记录最大值、最小值和平均值.

(a) 黄色墙面热成像图

(b) 蓝色墙面热成像图

(c) 绿色墙面热成像图

(d) 红色墙面热成像图

图 4 红外热成像图

Fig. 4 Infrared thermal images

3 彩色涂料光热性能实测分析

3.1 不同色彩的光热性能差异分析

为了研究色彩影响下的立面光热性能差异, 选取相同朝向, 同一高度的各色测点为观测对象, 每

隔1 h记录测点温度.结果显示,不同色彩的涂料立面壁温差异很大.以南立面白色测点表面温度为基准,计算南立面各彩色涂料的相对温差(图5).由图5可见,13:00时绿色立面与白色立面的相对温差达到最大值,高达14.47℃,蓝色和红色的相对温差分别为10.80℃和10.02℃,黄色立面的相对温差较小,为5.42℃.不同色彩平均表面温度差异并不符合色彩心理学中“冷色调温度更低、暖色调温度更高”的认知,相反,蓝色和绿色涂料立面表面温度总体比红色和黄色更高.

图5 南立面相对温差示意图

Fig. 5 Relative surface temperature of south façade

3.2 不同朝向的光热性能差异

本实验分为2组,同时记录建筑群南立面和西立面测点表面温度,见图6和图7.由图6和图7可知,不同朝向立面温度变化趋势有较大差异,南立面平均表面温度变化趋势比西立面更平缓,于12:00时起整体呈上升趋势,14:00时后开始下降.各色涂料立面的温度变化趋势大致相同,绿色立面的表面温度最高,其次是蓝色立面和红色立面,黄色立面的表面温度最低.西立面蓝色测点于14:00时受街道对面建筑物的遮蔽影响,出现反常下降现象,其余测点受西晒影响,温度从13:00开始大幅上升.总体来说,南立面表面温度整体较西立面更高,但温差较小;西立面表面温度较低,但逐时温差变化较大.

3.3 不同明度的光热性能差异分析

明度是表达表面颜色明亮程度的指数.XIE等^[9]研究指出,在近红外波段,颜料的明度变化不影响反射率,但在可见光波段,明度会影响反射率.实测对象同一色彩有多种明度差异,因此将样本划分为浅、中和深3个明度区间,测量表面温度

图6 南立面平均温度变化趋势图

Fig. 6 Mean surface temperature trend of south façade

图7 西立面平均温度变化趋势图

Fig. 7 Mean surface temperature trend of west façade

并记录.保证各个测点位于同一朝向、同一高度,结果如图8.由图8可知,测点的表面温度随明度的降低而增加,明度的差异会造成样本表面温度的差异,相同色彩涂料的明度越低,平均表面温度越高.15:00时西立面绿色测点呈现最大温度差,深绿和浅绿涂料立面温度差高达6.38℃,深红和浅红涂料立面温度差次之,为4.52℃,深蓝和浅蓝涂料立面温度差为2.17℃.黄色立面个别数据出现异常是由于周围建筑物遮挡所致.

3.4 可见光谱反射率与表面温度的相关性分析

人眼之所以能产生不同的颜色感觉即颜色视觉,是由于外界刺激辐射光谱的组成不同造成的.人眼能感知到不同的立面色彩,是由于墙面反射了太阳光谱中不同波段的可见光^[14].红色墙面之所以呈现红色,是因为其反射了太阳光中大部分780~622 nm波段的可见光,因此红色立面光谱曲线在780~622 nm波段区间出现峰值.同一色彩由于明度不同,光谱曲线也会呈现差异,如浅红立面相对

图 8 不同明度立面温差示意图

Fig. 8 Mean surface temperature of different brightness of façade

中红立面 780 ~ 622 nm 波段区间具有更高的峰值。对于建筑外立面来说,不同色彩的涂料主要是通过反射来自太阳的短波辐射,降低建筑物表面温度,以减少建筑得热。不同色彩涂料可见光波段的反射

率可根据太阳辐射光谱的能量分布在可见光范围内积分求得。将几种彩色涂料可见光波段的反射率和建筑外立面平均表面温度进行相关性分析,结果如图 9。由图 9 可见,两者呈负相关,可见光波段的反射率越高,平均表面温度越低。

图 9 平均表面温度和可见光波段反射率相关性分析
Fig. 9 Correlation between mean surface temperature and VIS reflection

由此可知,即使是在复杂的现实街区环境中,色彩的选择依然对涂料光热性能影响较大。提高彩色涂料可见光波段的反射率,可有效提高建筑立面光热性能,从而降低建筑得热,达到节能目的。

结 语

通过 POI 数据统计分析,提取深圳幼儿建筑涂料外立面典型的色彩种类,在行列式布局的街区中进行了实测研究,结果发现:

1) 色彩的差异会对涂料立面的光热性能产生影响。黄色立面测点表面温度最低,与红色立面的温度差最高可达 5.67 °C,与蓝色立面的温度差最高可达 7.44 °C。绿色立面测点表面温度最高,与黄色立面的温度差最高可达 10.87 °C。

2) 同种色彩的明度不同,光热性能也不同。在可见光波段,明度越高,反射性能越好,平均表面温度越低。

3) 在行列式布局的街区中,改变涂料色彩能有效提高建筑外立面的隔热性能。无论在街区沿街面还是高宽比为 2:1 的街谷内部,可见光波段反射率较高的样本都呈现出较低的平均表面温度。

4) 色彩心理学中颜色的冷暖感知与色彩光热性能导致的温度差有较大差异。色彩心理学上感觉偏冷的颜色(如蓝色和绿色涂料),反射率较低,

平均表面温度较高;色彩心理学上感觉偏暖的颜色(如黄色和红色涂料),反射率较高,平均表面温度较低。

幼儿建筑是使用彩色涂料较为频繁的建筑类型,然而在外墙涂料的色彩选择上往往忽略色彩带来的光热性能差异。在今后的幼儿建筑设计中,设计师应兼顾装饰效果与光热性能进行立面设计。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0704900);国家自然科学基金资助项目(51808342, 51908364)

作者简介:崔冬瑾(1987—),深圳大学助理教授。研究方向:绿色建筑。E-mail: jena.djcui@szu.edu.cn

引文:崔冬瑾,许筱雯,杨振宇,等.色彩对涂料立面光热性能影响的实测研究[J].深圳大学学报理工版,2020,37(6):604-609.

参考文献 / References:

- [1] 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(4): 488-497.
- [2] 胡家晖, 胡传焱. 热反射隔热涂料研究及应用现状[J]. *节能与环保*, 2009(1): 34-37.
HU Jiahui, HU Chuanxin. Research on heat reflection thermal insulating paint and its application [J]. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2009(1): 34-37. (in Chinese)
- [3] 时志洋, 诸秋萍, 王 伶. 色浆对热反射隔热涂料热反射性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2008(11): 78-79.
SHI Zhiyang, ZHU Qiuping, WANG Ling. Influence of color pastes on heat reflection of heat reflection and insulation coatings [J]. *New Building Materials*, 2008(11): 78-79. (in Chinese)
- [4] 董海荣, 祁少明, 麻建锁, 等. 涂料外饰面的太阳辐射性能及对建筑节能影响的试验研究[J]. *建筑技术*, 2011(1): 70-72.
DONG Hairong, QI Shaoming, MA Jiansuo, et al. Experimental study on solar radiation of coatings and influencing on energy-saving of buildings [J]. *Architecture Technology*, 2011(1): 70-72. (in Chinese)
- [5] 周晓宇, 王咏薇, 孙绩华, 等. 冷却屋顶对北京城市热环境影响的模拟研究[J]. *气象学报*, 2019, 77(1): 129-141.
ZHOU Xiaoyu, WANG Yongwei, SUN Jihua, et al. A simulation study on the influence of cooling roof on the thermal environment in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, 77(1): 129-141. (in Chinese)
- [6] 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(1): 38-44.
- [7] 田少煦, 申品品, 郭昱竹. 基于眼动跟踪技术的色彩情感研究[J]. *现代传播*, 2015, 37(6): 70-76.
TIAN Shaoxu, SHEN Pinpin, GUO Yuzhu. Research on color emotion based on eye tracking technology [J]. *Modern Communication*, 2015, 37(6): 70-76. (in Chinese)
- [8] 王元泽, 王浩鑫. 幼儿园建筑色彩设计原则[J]. *设计*, 2014(12): 137-138.
WANG Yuanze, WANG Haoxin. Principles of color design for kindergarten buildings [J]. *Design*, 2014(12): 137-138. (in Chinese)
- [9] XIE N, LI H, ABDELHADY A, et al. Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation [J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 231-240.
- [10] JOUDI A, SVEDUNG H, BALES C, et al. Highly reflective coatings for interior and exterior steel cladding and the energy efficiency of buildings [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4655-4666.
- [11] 马一平, 杨 帆, 谭 畅, 等. 隔热涂料研究现状[J]. *材料导报*, 2015, 29(增刊1): 300-304.
MA Yiping, YANG Fan, TAN Chang, et al. Research status of thermal insulation coatings [J]. *Materials Reports*, 2015, 29(Suppl. 1): 300-304. (in Chinese)
- [12] ZHANG J, LIN W, ZHU C, et al. Dark, infrared reflective, and superhydrophobic coatings by waterborne resins [J]. *Langmuir*, 2018, 34(19): 5600-5605.
- [13] 冯小娟. 有机-无机复合彩色红外反射颜料的制备研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
FENG Xiaojuan. Study on the preparation of organic-inorganic composite color infrared reflective pigments [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] BORN M, WOLF E, HECHT E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [J]. *Physics Today*, 2019, 53(10): 77-78.

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】