

琉璃瓦颜色测量方法研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2019.05.012

武震雄

武汉大学

印刷与包装系

湖北 武汉 430072

摘 要: 选择常用的两类分光光度计, 以色差为评价指标, 探索分光光度计在不同测量参数下, 对琉璃瓦颜色测量的规律。研究表明: 在 SCI 和 SCE 两种测量模式下, 固定测量孔径重复测量结果稳定性好, 但不同测量孔径对测量结果具有显著影响; 在 CIE 推荐测量条件下不同测量孔径时, SCI 与 $45^\circ/0^\circ$ 的色差稳定性优于 SCE 与 $45^\circ/0^\circ$ 的色差, 但 SCI 与 $45^\circ/0^\circ$ 的色差显著大于 SCE 与 $45^\circ/0^\circ$ 的色差, 且 SCE 在 10 mm 测量孔径下与 $45^\circ/0^\circ$ 的色差最接近; 琉璃瓦曲率越大, 不同测量模式结果的稳定性越差, 采用较大孔径 (10 mm) 测量结果差异最为明显; 与 SCI 和 $45^\circ/0^\circ$ 相比, SCE 对于琉璃瓦表面形态的变化更加敏感。总体而言, 积分球式分光光度计的 SCE 测量模式更适合于琉璃瓦颜色的测量, 测量时应选择较大尺寸的测量孔径。

关键词: 琉璃瓦; 颜色测量; 测量模式; 测量孔径; 曲率; 表面形态

中图分类号: O432.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2019)05-0085-06

引文格式: 武震雄. 琉璃瓦颜色测量方法研究 [J]. 包装学报, 2019, 11(5): 85-90.

1 研究背景

琉璃瓦是以氧化铅和二氧化硅为基础釉料, 通过加入金属氧化物 (着色剂) 烧制而成的带色陶器。在继承宋元工艺技术的基础上, 明代初年发展了黄、绿、红、紫、蓝、黑等多种釉色。多种釉色的琉璃瓦被大量应用于皇家园林、陵墓等建筑中, 其中黄釉的使用最多^[1-6]。琉璃瓦使用的釉料属于 $\text{PbO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基础釉体系, 导致其在酸雨与含有 P、S、Cl 的尘粉环境中容易被腐蚀, 进而造成琉璃瓦颜色的变化^[7-9]。开展琉璃瓦颜色测量方法的研究, 有助于获得古建筑琉璃瓦当前的颜色信息, 并且可以监测琉璃瓦在腐蚀条件下颜色变化情况, 对琉璃瓦的实体修复、数字化虚拟再现等都具有重要意义。

对琉璃瓦的研究中, 窦金海等^[10]利用能量色散 X 射线荧光光谱 (energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry, EDXRF)、X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 方法, 分析了圆明园琉璃釉层变色的化学机理。段鸿莺等^[7]利用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)、X 射线光电子能谱手段, 分析了绿色琉璃构件病害变色的化学机理。李合等^[11]利用能量色散 X 射线荧光光谱分析了明清黄色琉璃构件釉料成分与主观颜色变化规律。众多文献研究结果表明, 对琉璃瓦变色的化学机理分析已逐渐趋于成熟。然而, 大多数文献局限于对琉璃瓦变色的物质变化机理的研究, 忽略了其颜色物理特性的重要性。对具有多种釉色的琉璃瓦古建筑而言, 能否准确获取琉璃瓦颜色信息, 对琉璃瓦的实体修复、数字

收稿日期: 2019-08-11

作者简介: 武震雄 (1995-), 男, 山西临汾人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为颜色测量, E-mail: 1164986224@qq.com

化虚拟再现等至关重要,因此,开展琉璃瓦颜色测量方法的研究十分必要。

受琉璃瓦表面透明釉质、颜料以及表面形态等多种因素的影响,目前并没有成熟的测量仪器和方法,对琉璃瓦颜色进行客观准确地测量。杨桂美^[3]利用 X-rite VS450 分光光度计,在 $45^\circ/0^\circ$ 测量几何条件下对明中都出土的古建筑琉璃瓦进行了颜色测量和分析,但该研究只是采用一组国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)推荐的 $45^\circ/0^\circ$ 测量几何条件对琉璃瓦颜色进行测量,并未涉及琉璃瓦测量方法的研究。采用 $45^\circ/0^\circ$ 测量几何条件对琉璃瓦颜色测量的适用性不得而知。由 CIE 推荐的标准照明/观察几何条件可知,除 $45^\circ/0^\circ$ 测量几何条件外,还有采用积分球构建的 $d/8^\circ$ 测量几何条件。其中 $d/8^\circ$ 测量几何条件包括包含镜面反射成分(specular component include, SCI)和不包含镜面反射成分(specular component exclude, SCE)两种实际应用测量模式。邓体俊等^[12]以多种颜色的大理石瓷砖为对象,进行了颜色测量方法的研究,对比了 SCI、SCE 和 $45^\circ/0^\circ$ 这 3 种测量几何条件下的色度值信息,但该研究并未对不同测量几何条件的整体差异性和相关性进行分析。在实际应用中,设备的测量孔径、琉璃瓦自身的曲率以及表面形态都会对测量结果造成影响,而现有研究并未对这些影响颜色测量的因素开展相关研究,因此当前对于琉璃瓦颜色测量的研究仍不完善。

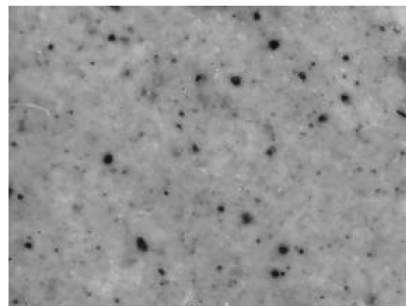
针对上述琉璃瓦颜色测量研究存在的不足,本研究将进一步开展琉璃瓦颜色测量方法的研究,以颜色科学领域常用的两类分光光度计为基础,以色差为评价指标,针对琉璃瓦颜色的测量,探索分光光度计在不同测量参数条件下,对琉璃瓦颜色测量的相关性和差异性,总结不同测量仪器在各测量参数条件下对琉璃瓦颜色测量的整体规律,以期对琉璃瓦的颜色测量提供方法参考。

2 研究原理与方法

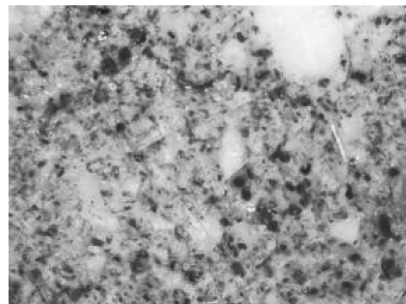
2.1 实验样本

实验使用爱色丽 BTS3300C 标准陶瓷色卡,检验仪器颜色测量结果的稳定性。标准陶瓷色卡施釉均匀、无黑点,釉面光滑具有较强的镜面反射。琉璃瓦颜色测量研究选择的样本为表面施釉均匀、无剥釉开裂现象、釉面无冰裂纹、无污染的黄色琉璃瓦。选取

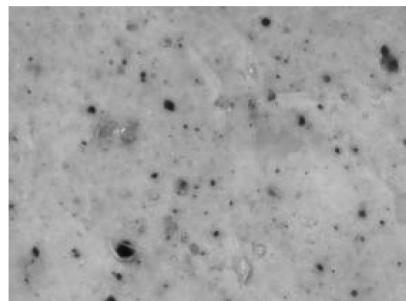
的 4 个琉璃瓦样本(见图 1): a 样本为高曲率样本、b 样本为低曲率样本、c 样本为光滑样本、d 样本为划痕样本,其中 c 与 d 样本琉璃釉材质相同。将选取的琉璃瓦样本置于去离子水中清洗,完成清洗后使用擦镜纸拭去釉面残留水滴,置于 110°C 烘箱内烘干 12 h,冷却后进行颜色测量。



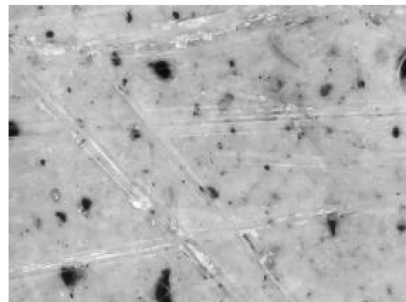
a) 高曲率样本



b) 低曲率样本



c) 光滑样本



d) 划痕样本

图 1 黄色琉璃瓦样本

Fig. 1 The samples of yellow glazed tile



彩图

2.2 仪器照明观察几何条件

爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计, 采用 D65 光源积分球式漫射光照明, 积分球内壁涂有漫射涂层, 如图 2a 所示。光线经内壁反射后漫射, 观测方向与样本法线呈 8° ($d/8^\circ$)。由积分球的光阱控制镜面反射的“包含”与“去除”, 关闭光阱后可以测量包含镜面漫射的颜色数据 (SCI); 打开光阱后可以测量去除镜面反射的颜色数据 (SCE); 其提供的测量孔径分别是: 3.5, 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm^[13]。BYK-mac i 多角效果测色仪采用 LED 光源模拟不同的光源需求, 实验使用的是 D65 光源 10° 视场, 单侧 45° 照明、垂直 (0°) 观测角度, 观测方向与样本法线重合 ($45^\circ/0^\circ$), 如图 2b 所示。

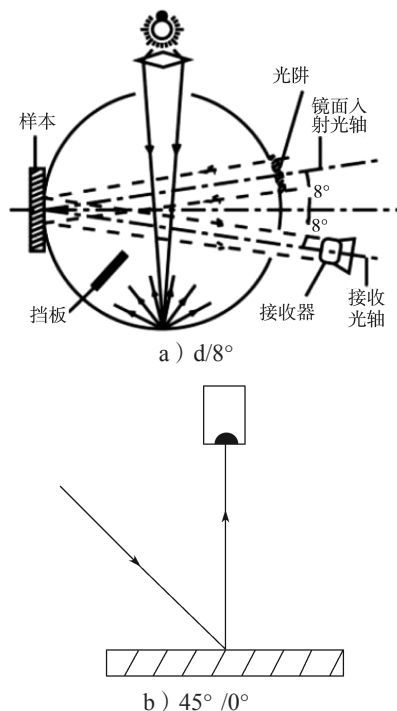


图 2 仪器照明观测几何条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of instrument illumination observation geometry

2.3 研究方法

2.3.1 测量仪器稳定性分析

在对琉璃瓦进行颜色测量前, 首先检验爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计和 BYK-mac i 多角效果测色仪颜色测量结果的稳定性: 通过连续 / 非连续测量标准陶瓷色卡 B、G、Y、R 各 5 次, 计算 5 次结果的均方色差 (mean color difference from the mean, MCDM) 反映稳定性检验结果, 均方色差越大稳定性越差^[14-16]。在完成仪器检验后对 4 个琉璃瓦样本

进行同样的检验过程, 并对 4 个样本的检验结果求平均, 从而确定琉璃瓦在不同测量模式、不同测量孔径 (3.5, 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm) 下的稳定性。均方色差的计算公式为

$$MCDM = -\frac{\sum_{i=1}^N \left[\left(L_i^* - \bar{L}^* \right)^2 + \left(a_i^* - \bar{a}^* \right)^2 + \left(b_i^* - \bar{b}^* \right)^2 \right]^{1/2}}{N} \quad (1)$$

2.3.2 测量仪器差异性分析

测量仪器的差异性包括相同样本在同一仪器不同参数设置下测量结果的差异性和相同样本在不同仪器下测量结果的差异性。

1) 相同样本在同一仪器不同参数设置下测量结果的差异性。通过设置仪器爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计 SCI 测量模式, 改变测量孔径: 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm 各测量 3 次, 取平均值作为各个测量孔径的测量结果, 计算 4 个测量孔径测量结果的平均值, 同时计算各个孔径测量结果与平均值的色差。同样设置仪器 SCE 测量模式测量, 并计算不同测量孔径色差。根据色差大小衡量同一仪器不同参数设置下测量结果的差异性。

2) 相同样本在不同仪器下测量结果的差异性。设置仪器爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计 SCI 测量模式, 改变测量孔径: 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm 各测量 3 次, 取平均值作为各个测量孔径的测量结果。同样, 设置爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计 SCE 测量模式和 BYK-mac i 多角效果测色仪 $45^\circ/0^\circ$ 测量条件, 分别得到不同孔径下的测量结果。计算 $45^\circ/0^\circ$ 测量条件与 SCI 测量模式和 SCE 测量模式在 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm 孔径下的色差, 通过色差大小衡量不同仪器测量结果的差异性, 色差越大两个颜色间的差异越大。色差的计算公式为

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\left(L_2^* - L_1^* \right)^2 + \left(a_2^* - a_1^* \right)^2 + \left(b_2^* - b_1^* \right)^2} \quad (2)$$

2.3.3 琉璃瓦曲率差异性分析

为了提升琉璃瓦的观赏与实用价值, 古代琉璃工艺匠人根据使用场景的不同, 设计了板瓦、筒瓦、勾头 (猫头)、滴水等造型来构建古建筑园林、陵墓等, 且各种造型具有不同的曲率。在实际颜色测量过程中, 不同曲率的琉璃瓦在不同测量孔径下, 测量结果存在差异。因此在对琉璃瓦进行颜色测量时, 还需考虑琉璃瓦的不同曲率对颜色测量的影响, 从而保证颜色测量结果的全面准确性。

用爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计在 SCI 和 SCE 测量模式下, 测量孔径为 6.0, 10.0, 17.0, 25.0 mm 时各测量 3 次, 取平均值作为各个测量孔径的测量结果。计算 SCI 测量模式与 SCE 测量模式在不同测量孔径下的色差, 通过色差大小衡量不同琉璃瓦曲率下测量结果的差异性。

2.3.4 琉璃瓦表面形态差异性分析

古建筑琉璃瓦在烧制过程中, 表面铅釉在高温烧制时黏度降低、流动性增强, 形成了光滑的釉面, 使釉面具有较强的镜面反射。但琉璃瓦长时间受到风沙侵蚀, 釉面划痕增加表面形态发生改变。因此为监测琉璃瓦表面形态的变化情况, 借助爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计和 BYK-mac i 多角效果测色仪, 在 SCI 测量模式、SCE 测量模式和 $45^\circ/0^\circ$ 测量条件下, 改变测量孔径对光滑琉璃瓦样本和划痕琉璃瓦样本进行颜色测量, 测量 3 次取平均值作为各个测量孔径的测量结果。计算 3 种测量模式在不同测量孔径下的色差, 通过色差大小衡量不同表面形态琉璃瓦测量结果的差异性。

3 分析与讨论

3.1 测量仪器稳定性分析

测量仪器测量标准陶瓷色卡和琉璃瓦时的稳定性分析结果如表 1 所示。

表 1 仪器稳定性分析结果比较
Table 1 Comparison of instrument stability analysis results

| 测量模式 | 测量孔径 / mm | 均方色差 | | | |
|--------------------|-----------|--------|-------|------|-------|
| | | 标准陶瓷色卡 | | 琉璃瓦 | |
| | | 连续测量 | 不连续测量 | 连续测量 | 不连续测量 |
| SCI | 3.5 | 0.04 | 0.06 | 0.26 | 1.04 |
| | 6.0 | 0.02 | 0.03 | 0.09 | 1.03 |
| | 10.0 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.38 |
| | 17.0 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.22 |
| | 25.0 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.14 |
| | STD | 0.01 | 0.02 | 0.1 | 0.44 |
| SCE | 3.5 | 0.02 | 0.11 | 0.37 | 1.98 |
| | 6.0 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.73 |
| | 10.0 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.69 |
| | 17.0 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.41 |
| | 25.0 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.49 |
| | STD | 0.01 | 0.04 | 0.15 | 0.64 |
| $45^\circ/0^\circ$ | | 0.02 | | 0.01 | |

由表 1 中的标准差 (standard deviation, STD)

与均方色差 (MCDM) 的结果可知, 不同的仪器在不同的测量条件下均具有较好的稳定性。同时根据多个琉璃瓦样本颜色测量结果均方色差 (MCDM) 平均值可知, 3.5 mm 小孔径不适应琉璃瓦的颜色测量与分析, 因此在随后的测量分析中不采用 3.5 mm 小孔径的测量。

3.2 测量仪器差异性分析

3.2.1 同一仪器不同参数设置下的差异性

积分球式分光光度计在 SCI 和 SCE 测量模式下, 测量的差异性分析结果如表 2 所示。由表 2 可知, SCE 测量模式在不同测量孔径下存在显著差异, 而 SCI 测量模式差异较小, 且 SCE 测量模式下的均方色差大于 SCI 模式下的均方色差。

表 2 同一仪器不同参数设置下分析结果比较

Table 2 Comparison of analysis results under different parameter settings of the same instrument

| 测量模式 | 不同测量孔径下的色差 | | | | 均方色差 | 标准差 |
|------|------------|---------|---------|---------|------|------|
| | 6.0 mm | 10.0 mm | 17.0 mm | 25.0 mm | | |
| SCI | 1.20 | 0.79 | 0.81 | 0.63 | 0.86 | 0.21 |
| SCE | 2.58 | 3.06 | 2.13 | 3.15 | 2.73 | 0.41 |

3.2.2 不同仪器不同参数设置下的差异性

3 种测量模式下, 测量的差异性分析结果如表 3 所示。由表 3 可知, SCI 测量模式在不同孔径下的测量结果与 $45^\circ/0^\circ$ 测量结果的色差较为稳定, 而 SCE 测量模式在不同孔径下的测量结果与 $45^\circ/0^\circ$ 测量结果的色差稳定性较差。SCI 测量模式与 $45^\circ/0^\circ$ 测量的色差总体上显著大于 SCE 测量模式与 $45^\circ/0^\circ$ 测量的色差, SCE 测量模式在较大孔径 (10 mm) 时与 $45^\circ/0^\circ$ 测量的色差最小。

表 3 3 种测量模式下分析结果比较

Table 3 Comparison of the analysis results under three measurement modes

| 对比项目 | 不同测量孔径下的色差 | | | | 均方色差 | 标准差 |
|--------------------------|------------|---------|---------|---------|-------|------|
| | 6.0 mm | 10.0 mm | 17.0 mm | 25.0 mm | | |
| SCI 与 $45^\circ/0^\circ$ | 19.21 | 19.27 | 17.13 | 18.05 | 18.42 | 0.89 |
| SCE 与 $45^\circ/0^\circ$ | 5.85 | 2.68 | 12.67 | 14.52 | 8.93 | 4.84 |

3.3 琉璃瓦曲率差异性分析

琉璃瓦不同曲率下, 测量的差异性分析结果如表 4 所示。根据测量结果和表 4 中的分析结果可知, 低曲率琉璃瓦 SCI 测量模式与 SCE 测量模式测量结果的色差总体上显著大于高曲率琉璃瓦 SCI 测量模式与 SCE 测量模式测量结果的色差, 高曲率琉璃瓦在 17.0, 25.0 mm 孔径下 SCI 测量模式与 SCE 测量模式

测量结果的色差明显降低。琉璃瓦曲率增加, SCI 测量模式与 SCE 测量模式测量结果的标准差增大, 不同测量孔径下的色差稳定性降低。高曲率琉璃瓦 SCI 测量模式与 SCE 测量模式测量结果在较大孔径(10 mm)测量条件下差异最为明显。

表 4 琉璃瓦不同曲率下分析结果比较

Table 4 Comparison of analysis results under different curvatures of glazed tile

| 对比项目 | 不同测量孔径下的色差 | | | | 标准差 |
|------------------|------------|---------|---------|---------|------|
| | 6.0 mm | 10.0 mm | 17.0 mm | 25.0 mm | |
| 低曲率琉璃瓦 SCI 与 SCE | 22.12 | 20.85 | 20.65 | 17.17 | 1.84 |
| 高曲率琉璃瓦 SCI 与 SCE | 13.43 | 16.65 | 4.83 | 3.76 | 5.50 |

3.4 琉璃瓦表面形态对比分析

琉璃瓦不同表面形态下, 测量的差异性分析结果如表 5 所示。根据测量结果和表 5 中的分析结果可知, 相同材质琉璃瓦光滑样本表面存在较强的镜面反射, 划痕样本表面镜面反射较弱。光滑样本与划痕样本在 SCI 测量模式下的色差均小于 SCE 测量模式色差。在 10, 17 mm 测量孔径下, 光滑样本与划痕样本 45°/0° 测量条件下的色差均小于 SCE 测量模式色差。与 SCI 测量模式和 45°/0° 测量条件相比, SCE 测量模式对于琉璃瓦表面形态的变化检测结果更加敏感。

表 5 琉璃瓦不同表面形态下分析结果比较

Table 5 Comparison of analysis results under different surface morphology of glazed tile

| 对比项目 | 不同测量孔径下的色差 | | | |
|------------------------------|------------|---------|---------|---------|
| | 6.0 mm | 10.0 mm | 17.0 mm | 25.0 mm |
| 光滑样本 SCI 与 SCE | 5.74 | 19.08 | 11.89 | 3.44 |
| 划痕样本 SCI 与 SCE | 1.41 | 4.27 | 4.10 | 4.45 |
| 光滑样本 SCI 与划痕样本 SCI | 2.02 | 0.73 | 0.99 | 1.47 |
| 光滑样本 SCE 与划痕样本 SCE | 3.31 | 15.23 | 8.05 | 1.76 |
| 光滑样本 45°/0° 与 划痕样本 45°/0° | 5.24 | | | |

4 结论

应用爱色丽 Ci7800 积分球式分光光度计和 BYK-mac i 多角效果测色仪, 综合分析琉璃瓦在 SCE、SCI、45°/0° 几何测量条件下不同测量孔径时, 颜色测量的整体规律。数据分析表明, SCI 测量模式在不同测量孔径时, 测量结果稳定性好; SCE 测量模式受测量孔径影响较大。SCE 测量模式与 45°/0° 测量模式的结果更加接近, 较大测量孔径(10 mm)色差最小, SCE 测量模式对样本划痕的检测更加灵敏。总体而言,

积分球式分光光度计的 SCE 测量模式更适合于琉璃瓦颜色的测量, 测量时应选择较大尺寸的测量孔径。

参考文献:

- [1] 樊桂敏. 中国古代琉璃瓦初探 [D]. 南京: 南京大学, 2011.
FAN Guimin. Research About Chinese Ancient Glazed Tile[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [2] 陆明华. 明代琉璃陶烧造初论 [J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(5): 110-119.
LU Minghua. A Preliminary Study on Ming Glazed Potteries[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(5): 110-119.
- [3] 杨桂美. 凤阳明中都遗址出土琉璃瓦制作工艺信息与原料来源的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
YANG Guimei. Studies on Manufacturing Techniques' s Information and Provenance of Glazed Tiles from Mingzhongdu[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [4] 康葆强, 李 合, 段鸿莺, 等. 故宫出土元代孔雀蓝釉琉璃瓦的原料及工艺研究 [J]. 故宫学刊, 2018(1): 191-199.
KANG Baoqiang, LI He, DUAN Hongying, et al. Research on the Yuan Dynasty Raw Materials and Firing Technique of Turquoise-Glazed Tiles Excavated from the Palace Museum[J]. Journal of Gugong Studies, 2018(1): 191-199.
- [5] 窦金海, 王彩旗, 崔剑锋, 等. 圆明园琉璃瓦片状云母氧化铁的形成机理 [J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(4): 492-499.
DOU Jinhai, WANG Caiqi, CUI Jianfeng, et al. Forming Mechanism of Mica Iron Oxide from Glazed Tiles in Yuanmingyuan[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(4): 492-499.
- [6] 杨桂美, 杨玉璋, 姚政权, 等. 凤阳明中都遗址出土琉璃瓦胎体制作工艺研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1280-1287.
YANG Guimei, YANG Yuzhang, YAO Zhengquan, et al. Study on Manufacturing Technique for Glazed Tiles Bodies from Mingzhongdu Site, Fengyang[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1280-1287.
- [7] 段鸿莺, 苗建民, 李 媛, 等. 我国古代建筑绿色琉璃构件病害的分析研究 [J]. 故宫博物院院刊, 2013(2): 114-124.
DUAN Hongying, MIAO Jianmin, LI Yuan, et al. Research on Diseases & Damages to Green-Glazed Tiles on Chinese Traditional Architecture[J]. Palace Museum

- Journal, 2013(2): 114–124.
- [8] 古代琉璃构件保护与研究课题组. 古代建筑琉璃构件剥釉机理内在因素研究[J]. 故宫博物院院刊, 2008(5): 115–129.
- Ancient Architecture Conservation and Research Group for Glazed Ware Components. Research on the Elements in the Vitreous Glazed Components Used in Ancient Chinese Buildings[J]. Palace Museum Journal, 2008(5): 115–129.
- [9] BERTONCELLO R, MILANESE L, BOUQUILLON A, et al. Leaching of Lead Silicate Glasses in Acid Environment: Compositional and Structural Changes[J]. Applied Physics A, 2004, 79(2): 193–198.
- [10] 窦金海, 金和天, 张中华, 等. 圆明园琉璃瓦表面釉层变色机理的研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2547–2552.
- DOU Jinhai, JIN Hetian, ZHANG Zhonghua, et al. Color Change Mechanisms of Yuanmingyuan Glazed Tiles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8): 2547–2552.
- [11] 李合, 丁银忠, 陈铁梅, 等. 北京明清建筑琉璃构件黄釉的无损研究[J]. 中国文物科学研究, 2013(2): 79–84.
- LI He, DING Yinzong, CHEN Tiemei, et al. An Analysis on the Yellow Lead-Glaze of Architectural Tiles of the Ming and Qing Dynasties in Beijing[J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2013(2): 79–84.
- [12] 邓体俊, 付文亭. 颜色测量仪器的几何结构对陶瓷颜色测量的影响研究[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(4): 410–413.
- DENG Tijun, FU Wenting. Effects of Geometric Structure of Color Measuring Instrument on Ceramic Color Measurement[J]. Journal of Ceramics, 2015, 36(4): 410–413.
- [13] 何成栋. 镀铝卡纸印刷品颜色测量及评价方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- HE Chengdong. Research on the Color Measurement and Evaluation Methods of the Printed Paper of Aluminized[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [14] WYBLE D R, RICH D C. Evaluation of Methods for Verifying the Performance of Color-Measuring Instruments Part I: Repeatability[J]. Color Research & Application, 2007, 32(3): 166–175.
- [15] WYBLE D R, RICH D C. Evaluation of Methods for Verifying the Performance of Color-Measuring Instruments Part II: Inter-Instrument Reproducibility[J]. Color Research & Application, 2007, 32(3): 176–194.
- [16] WANG M M, XIAO K D, LUO M R, et al. An Investigation into the Variability of Skin Colour Measurements[J]. Color Research & Application, 2018, 43(4): 458–470.

(责任编辑: 邓光辉)

Color Measurement Method of Glazed Tile

WU Zhenxiong

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Two kinds of spectrophotometers were selected and the color difference was taken as the evaluation index to explore the overall rule of color measurement of glazed tile by spectrophotometer under different measurement parameters. The results showed that the measurement results were stable under fixed measurement aperture in SCI and SCE measurement modes, but different measurement apertures had significant influence on the measurement results. Under the measurement conditions recommended by CIE, the color difference stability of SCI and $45^\circ/0^\circ$ was better than that of SCE and $45^\circ/0^\circ$ in different measurement apertures. However, the color difference of SCI and $45^\circ/0^\circ$ was significantly greater than that of SCE and $45^\circ/0^\circ$ and the color difference of SCE at 10mm measurement aperture was close to $45^\circ/0^\circ$ measurement result. The greater the curvature of the glazed tile, the less stable the measurement results of different measuring modes were. The results of measurement with large aperture (10 mm) showed the most obvious difference. SCE was more sensitive to surface morphology changes of glazed tiles comparing with SCI and $45^\circ/0^\circ$. In general, the SCE measurement mode of integrating sphere spectrophotometer was more suitable for the color measurement of glazed tile, and the larger size measurement aperture should be selected.

Keywords: glazed tile; color measurement; measurement-mode; measuring aperture; curvature; surface topography