

引用格式:陈百发,高峰,孙超,等. 琉璃瓦胎体氧化物成分与胎体颜色、吸水率、显气孔率及机械强度的相关性研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 33–39.

CHEN BaiFa, GAO Feng, SUN Chao, et al. The correlation between oxide composition and color, water absorption rate, apparent porosity and mechanical strength of glazed tile bodies[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2021, 48(6): 33–39.

琉璃瓦胎体氧化物成分与胎体颜色、吸水率、显气孔率及机械强度的相关性研究

陈百发¹ 高峰¹ 孙超^{2,3,4} 吴玉清^{2,3,4} 王菊琳^{2,3,4*}

(1. 故宫博物院, 北京 100009; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029;

3. 北京化工大学 材料电化学过程与技术北京市重点实验室, 北京 100029;

4. 文物保护领域科技评价研究国家文物局重点科研基地, 北京 100029)

摘要:以故宫南三所绿釉琉璃瓦胎体为研究对象,分别采用X射线荧光光谱仪(XRF)、X射线衍射仪(XRD)、色差计测试了样品的氧化物成分、晶相、色度,参照GB/T 3810.3—2016测定了样品的吸水率、显气孔率和密度,使用万能力学试验机测试了样品的力学性能,并探究了氧化物含量与胎体颜色、吸水率与显气孔率的相关性,利用SPSS软件对琉璃瓦胎体的机械强度和氧化物含量进行多重线性回归分析。结果表明,所选用的8个琉璃瓦胎体样品的氧化物组成大致相同,其中主要的氧化物成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ; Fe_2O_3 含量与红绿度之间呈显著的正相关关系,与亮度之间呈显著的负相关关系; Fe_2O_3 含量与吸水率、显气孔率之间存在正相关关系;琉璃瓦胎体的显气孔率与吸水率呈线性关系,可通过测量吸水率的方法得到胎体的显气孔率;琉璃瓦胎体的机械性能在一定范围内受其氧化物含量的影响,提高 SiO_2 和 Al_2O_3 含量、降低 CaO 含量均有利于提高抗折强度和抗压强度,提高 K_2O 含量不利于提高抗折强度,但有利于提高抗压强度。

关键词:琉璃瓦胎体; 氧化物; 颜色; 吸水率; 显气孔率; 机械强度; 相关性

中图分类号: TQ174 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2021.06.005

引言

琉璃瓦是一种低温釉陶,与汉代的陶器、唐代的唐三彩等属于同一体系,是中国陶瓷史上的一个重要品类,中国古代琉璃瓦由于体现了中国古代陶瓷技术的发展而具有很高的考古价值与文化价值^[1]。但是,琉璃瓦长期暴露于空气中,会使得釉层、胎体出现剥落、开裂等病害,如不及时修复保护,这些具有历史价值的珍贵文物将受到严重的损坏,因此对古代琉璃瓦进行保护成为急需解决的问题。

近年来,人们在琉璃瓦的修复保护方面进行了较多研究。韩向娜等^[2]制备了具有桥联结构的硅

氧烷用于琉璃瓦的保护,保护后的琉璃瓦具有较好的憎水性,强度有所提高,釉面剥落的现象得到明显抑制。龚云等^[3]合成了一种侧链含有3个长链烷基的硅氧烷,该保护材料可填充琉璃瓦的内部孔隙,起到黏结加固的作用,并且可降低琉璃瓦的吸水性,提高其抗压强度和耐冻融老化性能。李静等^[4]探究了故宫南薰殿琉璃瓦的脱釉原因,发现釉层的热膨胀系数大于胎体是导致釉层出现裂痕甚至脱落的原因。“古代琉璃构件保护与研究”课题组^[5]对古代建筑琉璃构件剥釉机理进行了分析,发现釉层厚度、坯釉结合层、坯釉热膨胀系数的匹配、坯体烧结程度等方面均为影响剥釉的内因。高峰等^[6]对古代建筑琉璃构件的褪色机理进行了研究,发现釉层中Pb、Cu元素的流失是导致釉层褪色的原因。以上研究主要集中在琉璃瓦保护材料的研发以及釉层脱落与变色的原因和机理等方面,而对琉璃瓦胎体方面的研究、尤其是对琉璃瓦胎体性能影响因素的研究

收稿日期: 2021-06-24

第一作者: 男, 1989年生, 工程师

* 通信联系人

E-mail: julinwang@126.com

很少。

故宫南三所位于紫禁城东路,在明、清时期为皇子居所,其建筑群所用的琉璃瓦均为绿釉琉璃瓦^[7],因年久失修,部分琉璃瓦失去了原有的颜色及光泽,甚至琉璃瓦胎体出现了断裂、破损等病害。本文以在故宫百年大修之际从南三所修缮替换下来的破损绿釉琉璃瓦的胎体为研究对象,对其氧化物成分、基本理化指标和力学性能进行了测试,并通过相关性分析,探究琉璃瓦胎体的氧化物含量对胎体的颜色、吸水率、显气孔率和机械强度的影响,以期

为琉璃瓦的修复保护提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

所选用的 8 块琉璃构件样品全部为绿釉琉璃瓦,大部分样品没有年代款识,少量样品如 R-3 和 R-5 分别带有“公造”和“工部”的款识,其信息及实物照片分别见表 1 和图 1。

表 1 琉璃瓦样品信息
Table 1 Information of the glazed tile samples

样品编号	类型	釉层状况	胎体状况	款识	尺寸 $L_{\max}^{\text{a)}} \times b_{\max}^{\text{b)}} / (\text{cm} \times \text{cm})$
R-1	红胎板瓦	少部分施有绿釉及黄釉	红胎,残破	无	13 × 12
R-2	红胎绿釉板瓦	表面脱釉约 60%	红胎,残破	无	23 × 20
R-3	红胎绿釉筒瓦	绿色釉层褪色	红胎,残破	公造	14 × 19
R-4	红胎绿釉筒瓦	完好	红胎,残破	无	17 × 16
R-5	红胎绿釉筒瓦	表面脱釉约 10%,绿色釉层褪色	红胎,残破	工部	35 × 15
W-1	白胎绿釉板瓦	表面脱釉约 60%,釉面脱落处有黑色物质	白胎,残破	无	20 × 19
W-2	白胎绿釉板瓦	表面脱釉约 30%,绿色釉层变黑	白胎,残破	无	13 × 10
W-3	白胎绿釉板瓦	完好	白胎,残破	无	32 × 22

a—样品的最大长度(纵向),b—样品的最大宽度(横向)。

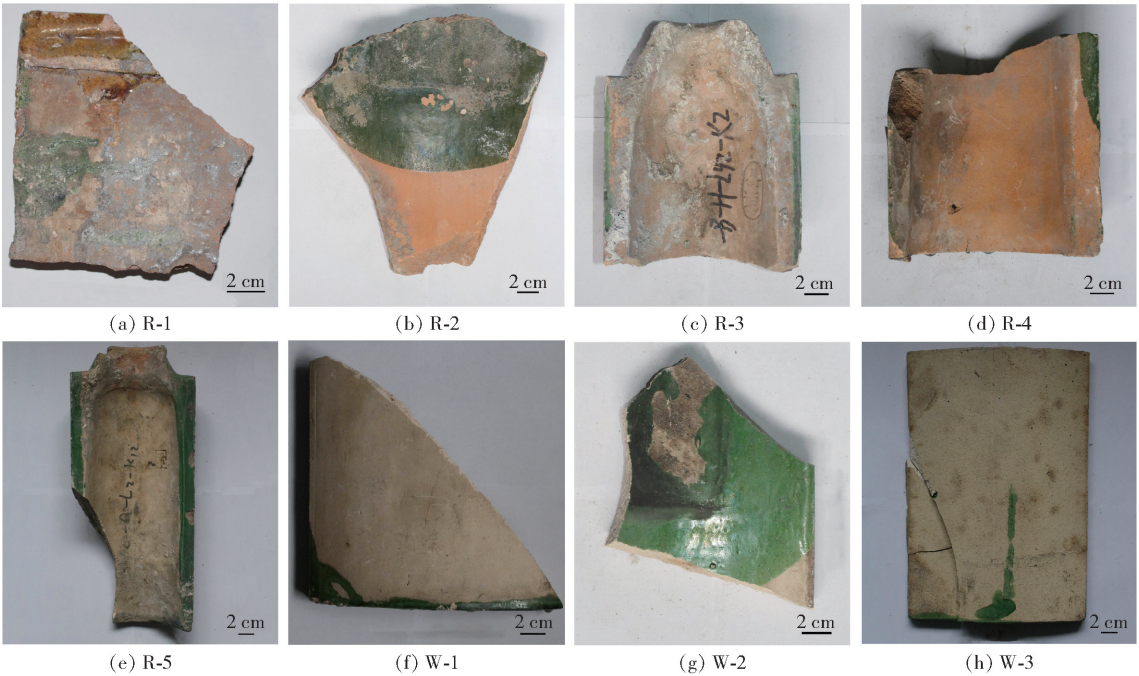


图 1 琉璃瓦样品的实物照片

Fig. 1 Actual photos of the glazed tile samples

1.2 测试方法

化学成分测试 为获取琉璃瓦胎体元素及氧化物组成,将样品切割出小样块,研磨成粉末,使用 X 射线荧光光谱仪(XRF)(EDX-800HS 型,日本岛津公司)进行测试,采用粉末压片法,实验前用铝锡合金标准块 A750 校正仪器。

晶相测试 为确定琉璃瓦胎体中的晶相组成,使用 X 射线衍射仪(XRD)(RINT2000 型,日本岛津公司)对样品进行测试。Cu 靶,波长 0.154 nm,工作电压 40 kV,扫描范围 5°~75°,扫描速度 5(°)/min。

色度测定 使用通用色差计(JZ-300 型,深圳市金准仪器设备有限公司)测量琉璃瓦样品的胎体色度,每个试样选取未变色的胎体部分分别测量 5 次,结果取平均值。

基本理化指标测试 参考 GB/T 3810.3—2016^[8],将琉璃瓦样品切割成体积符合实验要求的试样,并磨去表面釉层,测试处理后的胎体试样的吸水率、显气孔率、表观密度和体积密度。

力学性能测试 分别将琉璃瓦胎体样品切割成 10 cm×1 cm×1 cm 的长条试样和 1 cm×1 cm×1 cm 的立方试样,采用电子万能试验机(LETRY 型,无锡建材试验仪器设备厂)测试琉璃瓦样品的抗折强度和抗压强度。

2 结果与讨论

2.1 琉璃瓦胎体氧化物成分及晶相

胎体样品的 XRF 和 XRD 测试结果分别如表 2 和图 2 所示。

表 2 琉璃瓦胎体的 XRF 检测结果

Table 2 XRF test results for the glazed tile bodies							
样品	质量分数/%						
编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	BaO
R-1	50.8	35.3	4.6	5.5	1.7	1.6	0.5
R-2	59.5	28.0	2.4	7.9	1.1	0.7	0.4
R-3	59.0	31.9	3.0	3.8	1.3	0.7	0.3
R-4	55.3	32.6	4.3	5.1	1.6	0.7	0.4
R-5	55.4	34.0	3.0	5.4	1.3	0.4	0.5
W-1	60.9	31.7	2.5	2.1	1.6	0.8	0.4
W-2	61.4	30.2	3.9	2.2	1.4	0.4	0.5
W-3	48.5	42.4	2.3	3.7	1.7	0.9	0.5

由结果可知,8 个琉璃瓦胎体样品的氧化物组成大致相同,其主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,同时含有少量 K₂O、Fe₂O₃、TiO₂、CaO 和 BaO。其中, SiO₂ 一部分以莫来石(Al₂(Al_{2.8}Si_{1.2})O_{9.6})晶体和残余石英(SiO₂)晶体的形式存在^[9],另一部分以玻璃相的形式存在。两件红胎(R-1、R-2)和两件白胎(W-1、W-2)的晶体成分的主要区别是红胎含有

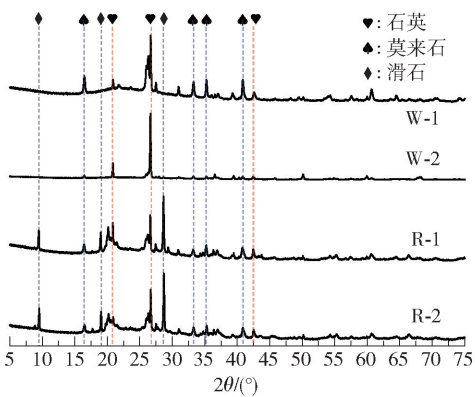


图 2 琉璃瓦胎体的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the glazed tile bodies
滑石(3MgO·4SiO₂·H₂O)^[10],而白胎不含滑石,并且红胎的 Fe₂O₃ 含量明显高于白胎,这可能是红胎与白胎样品坯体的原料来源不同所致。胎体中的碱金属氧化物 K₂O 在胎体烧制过程中充当助熔剂,部分碱金属氧化物与 SiO₂ 在高温下生成玻璃相。

2.2 胎体色度

各胎体样品的色度值比较如图 3 所示。8 块琉璃瓦胎体样品的表面颜色差别较大,其中亮度值 L 的波动最大,样品 R-5 的 L 值(59.9)最低,W-2 的 L 值(81.0)最高;红绿度 a 和黄蓝度 b 的波动较小。

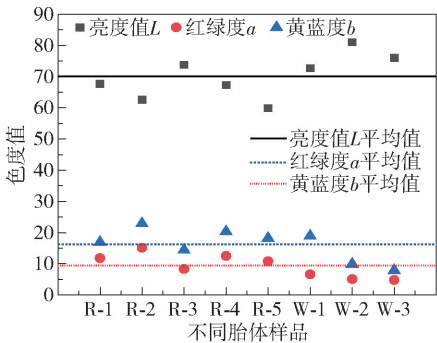


图 3 琉璃瓦胎体的色度值比较

Fig. 3 Comparison of the chromaticity values of the glazed tile bodies

使用 SPSS 软件对琉璃瓦胎体中 7 种主要氧化物的含量与琉璃瓦胎体的色度值进行 Spearman 相关性分析,结果如表 3 所示。其中, Fe₂O₃ 含量与红绿度 a 之间的相关系数为 0.905, P<0.01,说明琉璃瓦胎体的红绿度 a 与 Fe₂O₃ 含量之间呈显著的正相关关系。Fe₂O₃ 含量与亮度 L 之间的相关系数为 -0.857, P<0.01,说明琉璃瓦胎体的亮度 L 与 Fe₂O₃ 含量之间呈显著的负相关关系。其余 6 种氧化物的

含量与胎体色度值之间未表现出明显的相关关系。

表 3 氧化物含量与色度值的相关性分析

氧化物 含量	红绿度 <i>a</i>		黄蓝度 <i>b</i>		亮度 <i>L</i>	
	相关系数	<i>P</i> 值	相关系数	<i>P</i> 值	相关系数	<i>P</i> 值
SiO ₂ 含量	-0.381	0.352	-0.524	0.183	0.429	0.289
Al ₂ O ₃ 含量	0.024	0.955	0.167	0.693	-0.214	0.610
K ₂ O 含量	0.156	0.713	-0.263	0.528	-0.060	0.888
Fe ₂ O ₃ 含量	0.905	0.002	0.690	0.058	-0.857	0.007
TiO ₂ 含量	-0.214	0.610	-0.024	0.955	0.214	0.610
CaO 含量	0.119	0.779	0.143	0.736	0.167	0.693
BaO 含量	-0.143	0.736	-0.190	0.651	-0.143	0.736

使用 OriginPro 2021 软件,以琉璃瓦胎体样品中 Fe₂O₃ 含量为自变量,红绿度 *a* 为因变量进行线性回归分析,结果如图 4 所示。决定系数 $R^2 = 0.935$, *F* 检验结果 ($F = 85.737, P = 0.000 < 0.05$) 表明琉璃瓦胎体的红绿度与 Fe₂O₃ 含量之间存在显著的线性关系,琉璃瓦胎体的红绿度随 Fe₂O₃ 含量的升高而增大。

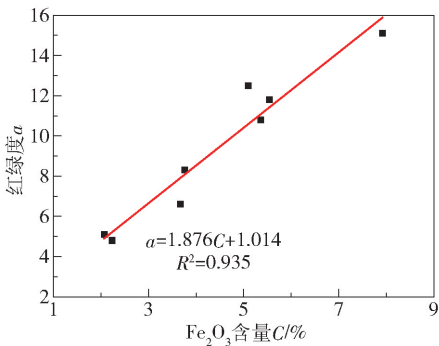


图 4 Fe₂O₃ 含量与红绿度的拟合直线

Fig. 4 Fitting line between Fe₂O₃ content and red-greenness

2.3 吸水率、显气孔率及密度

对琉璃瓦胎体样品进行吸水率、显气孔率及密度测试,结果如表 4 所示。琉璃瓦胎体样品的吸水率为 5% ~ 14%,显气孔率为 10% ~ 24%,表观密度为 2.3 ~ 2.5 g/cm³,体积密度为 1.7 ~ 2.2 g/cm³。其中 W-3 样品的吸水率及显气孔率最低,分别为 5.03% 和 10.71%。

使用 SPSS 软件对氧化物含量与吸水率、显气孔率进行 Spearman 相关性分析,结果如表 5 所示。由结果可知,除 Fe₂O₃ 含量外,其余氧化物含量与吸水率、显气孔率之间没有相关性;Fe₂O₃ 含量与吸水率、

表 4 琉璃瓦胎体的吸水率、显气孔率及密度

Table 4 Water absorption rate, apparent porosity and density of the glazed tilec bodies

样品编号	吸水率/ %	显气孔率/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	体积密度/ (g·cm ⁻³)
R-1	9.74	18.71	2.36	1.92
R-2	10.22	19.81	2.42	1.94
R-3	11.16	20.88	2.37	1.87
R-4	8.80	17.14	2.35	1.95
R-5	8.71	17.05	2.36	1.96
W-1	13.67	23.92	2.30	1.75
W-2	7.51	14.73	2.30	1.96
W-3	5.03	10.71	2.39	2.13

表 5 氧化物含量与吸水率、显气孔率的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between the oxide content and water absorption rate or apparent porosity

氧化物含量	吸水率		显气孔率	
	相关系数	<i>P</i> 值	相关系数	<i>P</i> 值
SiO ₂ 含量	0.119	0.779	0.119	0.779
Al ₂ O ₃ 含量	-0.310	0.456	-0.310	0.456
K ₂ O 含量	0.180	0.670	0.180	0.670
Fe ₂ O ₃ 含量	0.714	0.047	0.714	0.047
TiO ₂ 含量	-0.473	0.237	-0.473	0.237
CaO 含量	-0.295	0.479	-0.295	0.479
BaO 含量	-0.052	0.902	-0.052	0.902

显气孔率之间的相关系数均为 0.714, $P < 0.05$,说明它们之间存在正相关关系。

使用 OriginPro 2021 软件对吸水率和显气孔率进行线性回归分析,结果如图 5 所示。由 $R^2 = 0.988$ 及 *F* 检验结果 ($F = 556.226, P = 0.000 < 0.05$) 可

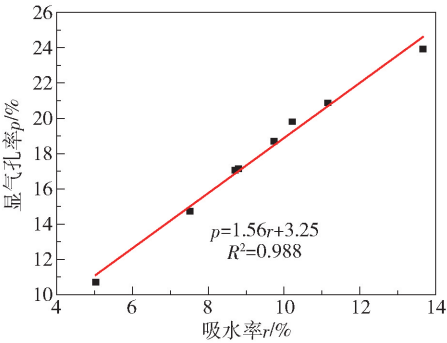


图 5 吸水率与显气孔率的拟合直线

Fig. 5 Fitting line of the water absorption rate and apparent porosity

知,吸水率与显气孔率二者之间有明显的线性关系,吸水率越大,显气孔率越大。因此对于不具备显气孔率指标采集条件(破坏性测试)的琉璃瓦件,可以采集其吸水率指标(采集过程无损),通过公式拟合推算琉璃瓦件的显气孔率,以评估琉璃瓦胎体的烧结程度和耐侵蚀能力^[11]。

2.4 抗压强度和抗折强度

对琉璃瓦胎体样品分别进行抗折强度和抗压强度测试,结果如表 6 所示。

表 6 琉璃瓦胎体的力学强度

Table 6 Mechanical strength of the glazed tile bodies		
样品编号	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa
R-1	6.06	13.46
R-2	9.53	14.18
R-3	14.42	19.84
R-4	7.06	14.69
R-5	12.90	13.40
W-1	10.48	14.86
W-2	13.80	19.48
W-3	21.97	18.14

为了确定胎体成分及含量对琉璃瓦抗压强度和抗折强度的影响大小,利用 SPSS 统计软件对琉璃瓦胎体的抗压强度和抗折强度的影响因素进行多重线性回归分析。根据文献^[9],陶瓷胎体组成中对机械强度可能有影响的氧化物种类有 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、CaO,故本文以这 4 种氧化物的含量为自变量,抗折强度、抗压强度为因变量,进行多重线性拟合。

对抗折强度的拟合方程为: $Y_1 = 0.65X_1 + 1.51X_2 - 1.28X_3 - 4.49X_4 + 67.02$ 。式中, Y_1 为抗折强度,MPa; X_1 为 SiO₂ 含量,%; X_2 为 Al₂O₃ 含量,%; X_3 为 K₂O 含量,%; X_4 为 CaO 含量,%。决定系数 R^2 为 0.84。

对抗压强度的拟合方程为: $Y_2 = 0.91X_1 + 1.04X_2 + 1.01X_3 - 0.77X_4 - 72.4$ 。式中, Y_2 为抗压强度,MPa。决定系数 R^2 为 0.46。

虽然决定系数均未达到 0.9 以上,但是从现有的线性回归方程可知,琉璃瓦胎体的抗折强度和抗压强度在一定范围内受其内部氧化物含量的影响。通过比较方程中各氧化物含量的系数正负可知,提高 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量有利于提高抗折强度和抗压强度。这是因为 SiO₂ 在胎体中的主要存在形式为莫来石和石英石,它们是构成胎体玻璃相的骨架。提

高 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量可增强骨架的强度,使玻璃相强度增加,而玻璃相强度与胎体强度呈正相关关系;提高 Al₂O₃ 含量可以增加烧成后显微结构中刚玉相的含量,从而增加胎体强度^[9-10]。

碱土金属氧化物 CaO 和碱金属氧化物 K₂O 在烧结中均起助熔剂的作用,助熔剂可促进胎体烧结、产生玻璃相,从而提高胎体的致密化程度,但玻璃相也是胎体所有相组成中机械强度的薄弱环节。添加少量助熔剂时以降低胎体的熔融温度、促进胎体的烧结为主导,此时产生的玻璃相含量不足以降低胎体强度,但过量添加会导致过多玻璃相的产生,同时晶粒变得粗大,使得胎体强度降低^[12-14]。由拟合方程的系数可知,增加 K₂O 含量有利于提高抗压强度,但不利于提高抗折强度,其原因在于在本实验的 K₂O 含量范围内,K₂O 作为助熔剂可促进胎体的烧结,使得胎体的致密化程度上升,而致密化程度可以反映出胎体的抗压强度^[13],所以抗压强度有所提高;但因助熔剂产生的液相增加,导致晶界玻璃相含量升高,因此使得抗折强度降低。降低 CaO 含量有利于提高抗折强度和抗压强度,其原因在于在本实验的 CaO 含量范围内,添加较多量的 CaO 在提高致密度的同时,导致过多玻璃相的产生,致密度提高对胎体强度的有利影响不足以抵抗过多玻璃相对胎体强度的不利影响,从而使得抗压强度和抗折强度同时降低。若降低 CaO 含量,玻璃相减少,抗压强度和抗折强度将有所提高。

3 结论

(1)所选取的 8 个琉璃瓦胎体样品的主要氧化物成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃,同时含有少量 K₂O、Fe₂O₃、TiO₂、CaO 和 BaO;胎体样品的氧化物组成大致相同,红胎样品的 Fe₂O₃ 含量高于白胎样品。

(2)Fe₂O₃ 是琉璃瓦胎体色度的主要影响因素,Fe₂O₃ 含量与红绿度间呈显著的正相关关系,与亮度间呈显著的负相关关系。

(3)Fe₂O₃ 含量与吸水率、显气孔率之间存在正相关关系;琉璃瓦胎体的吸水率与显气孔率呈线性关系,可通过测量吸水率的方法得到胎体的显气孔率。

(4)琉璃瓦胎体的力学性能在一定范围内受其氧化物含量影响。提高 SiO₂、Al₂O₃ 含量有利于提高抗折强度和抗压强度;提高 K₂O 含量不利于提高抗折强度,但有利于提高抗压强度;降低 CaO 含量有

利于提高抗折强度和抗压强度。

参考文献:

- [1] 王健, 王梦章. 琉璃瓦的历史、生产及发展[J]. 陶瓷工程, 1994, 27(6): 42-48.
WANG J, WANG M Z. The history, production and development of glazed tiles [J]. Ceramic Engineering, 1994, 27(6): 42-48. (in Chinese)
- [2] 韩向娜, 黄晓, 罗宏杰. 用于紫禁城清代建筑琉璃瓦保护的桥式硅氧烷的制备及性能研究[J]. 无机材料学报, 2014, 29(6): 657-660.
HAN X N, HUANG X, LUO H J. Synthesis and properties of a bridged siloxane for protection of architectural glazed tiles of the Qing Dynasty in the Forbidden City [J]. Journal of Inorganic Materials, 2014, 29(6): 657-660. (in Chinese)
- [3] 龚云, 俞忠华, 徐恒. 长链烷基硅氧烷的合成及其对古琉璃瓦的保护研究[J]. 化学研究与应用, 2017, 29(7): 957-961.
GONG Y, YU Z H, XU H. Synthesis and application of long-alkyl chains substituent siloxane as a protective material for ancient glazed tiles[J]. Chemical Research and Application, 2017, 29(7): 957-961. (in Chinese)
- [4] 李静, 房小妹, 郑贵元, 等. 故宫南薰殿琉璃瓦脱釉原因研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8716-8723.
LI J, FANG X M, ZHENG G Y, et al. Study on the causes of glaze stripping of glazed tile in Nanxun Temple of the Palace Museum[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8716-8723. (in Chinese)
- [5] “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, 139(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, 139(5): 115-129. (in Chinese)
- [6] 高峰, 余佳波, 王菊琳, 等. 清代绿釉琉璃瓦的褪色机理研究[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(4): 43-50.
GAO F, YU J B, WANG J L, et al. Study on fading mechanism of green glazed tiles in Qing Dynasty[J]. China Ceramics, 2020, 56(4): 43-50. (in Chinese)
- [7] 章剑华. 故宫三部曲: 守望[M]. 北京: 人民文学出版社, 2015.
ZHANG J H. The Forbidden City trilogy: watching [M]. Beijing: People's Literature Publishing House, 2015. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 陶瓷砖试验方法 第3部分: 吸水率、显气孔率、表观相对密度和容重的测定: GB/T 3810. 3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test method of ceramic tiles—Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density: GB/T 3810. 3—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [9] 陆小荣. 陶瓷工艺学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
LU X R. Ceramic technology [M]. Changsha: Hunan University Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 李家驹. 陶瓷工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006.
LI J J. Ceramic technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 方涛. 古陶瓷元素组成分析技术的对比和应用[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷学院, 2011.
FANG T. Comparison and application of the ancient ceramics elements composition analysis technology [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2011. (in Chinese)
- [12] 吴国天. 煤矸石制备堇青石多孔陶瓷的烧结与性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2015.
WU G T. The study on sintering and properties of cordierite porous ceramic prepared with coal gangue [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015. (in Chinese)
- [13] 周玉. 陶瓷材料学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHOU Y. Ceramic materials [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 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 G M. Studies on manufacturing techniques' s information and provenance of glazed tiles from Mingzhongdu [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)

The correlation between oxide composition and color ,
water absorption rate , apparent porosity and mechanical
strength of glazed tile bodies

CHEN BaiFa¹ GAO Feng¹ SUN Chao^{2,3,4} WU YuQing^{2,3,4} WANG JuLin^{2,3,4 *}

(1. The Palace Museum, Beijing 100009; 2. College of Material Science and Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

3. Beijing Key Laboratory of Electrochemical Process and Technology for Materials, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

4. Key Research Base of National Cultural Heritage Administration for Science and Technology Evaluation and
Research in the Field of Cultural Heritage Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: The oxide composition, crystal phase and chromaticity of samples of the green glazed tile bodies from Nansansuo in the Forbidden City were investigated by X-ray fluorescence spectrometry (XRF), X-ray diffraction (XRD), and color difference measurements. The water absorption rate, apparent porosity and density of the samples were also determined according to GB/T 3810.3—2016 and the mechanical properties of the samples were tested with a universal mechanical testing machine. The correlations between oxide content and color, water absorption rate and apparent porosity of the glazed tile body were explored. The mechanical strength and oxide content of the glazed tiles were analyzed by multiple linear regression using SPSS software. The results showed that the oxide compositions of the eight selected glazed tile body samples are similar, with their main constituent oxides being SiO₂ and Al₂O₃. There is a significant positive correlation between Fe₂O₃ content and red-greenness, and a significant negative correlation between Fe₂O₃ content and brightness. There is a positive correlation between Fe₂O₃ content and water absorption or apparent porosity. There is a linear relationship between the apparent porosity and water absorption rate of the glazed tile body, indicating that the apparent porosity could be obtained by measuring the water absorption rate. The mechanical properties of the glazed tile bodies are affected by their oxide content over a certain range. Increasing the SiO₂ and Al₂O₃ content and decreasing the CaO content both lead to improved flexural strength and compressive strength. Increasing the K₂O content does not improve flexural strength, but does improve compressive strength.

Key words: glazed tile body; oxide; color; water absorption rate; apparent porosity; mechanical strength; correlation

(责任编辑:于少云)