

古建筑琉璃瓦抗冻融性影响因素探究

李 静¹, 李雪婷^{2,3,4}, 王菊琳^{2,3,4}, 郑贵元^{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: 自然环境中的冻融作用不仅会造成琉璃瓦表面釉层脱落, 还会导致胎体断裂等严重破坏。以清代琉璃瓦及现代烧制琉璃瓦为研究对象, 分析胎体和釉层的化学组成、形貌、致密度、显气孔率、吸水率、抗冻融性等。结果发现, 冻融产生的破坏主要为胎体开裂和釉层脱落两种类型, 部分样品在釉面脱落的同时带下了相邻的胎体。现代烧制琉璃瓦整体上呈现较好的抗冻融性能, 较低的胎体吸水率可提高琉璃瓦的抗冻融性能, 胎体中间层尤其是化妆土层可缓解冻融过程中胎体体积的变化对釉层的破坏; 在烧制条件相同时, Al_2O_3 含量的降低与 K_2O 含量的升高有利于提高胎体的烧结程度, 进而提高琉璃瓦的抗冻融性能, 研究成果可为古建筑修缮提供一定的科学依据。

关键词: 琉璃瓦; 冻融; 胎釉破坏; 吸水率

中图分类号: TU523

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0697-07

Study on the factors influencing the freeze-thaw resistance of ancient architectural glazed tiles

LI Jing¹, LI Xueting^{2,3,4}, WANG Junlin^{2,3,4}, ZHENG Guiyuan^{2,3,4}

(1. The Palace Museum, Beijing 100009, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Beijing Key Laboratory of Material Electrochemical Process and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 4. Research on Scientific and Technological Evaluation in the Field of Cultural Relics Protection, Key Research Base of State Administration of Cultural Relics, Beijing 100029, China)

Abstract: The freeze-thaw effect in the natural environment will not only cause the glaze layer on the surface of the glazed sample to fall off, but also lead to serious damage such as fracture of body. Taking glazed tile of Qing Dynasty and modern fired glazed tile as research object, the chemical composition, morphology, density, apparent porosity, water absorption and freeze-thaw resistance of glazed tile were analyzed. The results show that the damage caused by freeze-thaw mainly falls into two types: body cracking and glaze shedding, and some samples take down the adjacent body while the glaze falls off. Modern fired glazed tiles generally exhibit good freeze-thaw resistance, and lower body water absorption can improve the freeze-thaw resistance of glazed tiles. The intermediate layer of the body glaze, especially the makeup layer, can alleviate the damage of the glaze layer caused by the volume change of the body during the freeze-thaw process. Under the same firing conditions, the decrease of Al_2O_3 content and the increase of K_2O content are beneficial to improve the sintering degree of the body. The research results can provide a scientific basis for the repair of ancient buildings.

Key words: glazed tile; freeze-thaw; damage of glaze and body; water absorption

琉璃瓦是由陶制瓦发展而来、施以铅釉而烧成的带色陶器, 一般用于建筑及艺术装饰^[1]。相比传统陶瓦, 琉璃瓦化学性质更稳定且不易腐蚀, 其较高的硬度及低吸水性可有效降低瓦因吸水而造成的屋面负荷的危险^[2], 所以在古代特别是明清

时期, 琉璃瓦常作为建筑材料应用于皇家建筑。

琉璃瓦作为建筑材料常处于露天环境中, 温度、湿度、降水及其变化等均会对其造成不同程度的破坏。北京地区冬季整体温度较低、最低可达 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、昼夜温差大, 还伴有雨雪天气, 春秋

收稿日期: 2022-04-04

修回日期: 2023-08-15

第一作者: 李 静(1978—), 女, 硕士, 副研究馆员, 研究方向为古建筑保护。E-mail: 1037020669@qq.com

通信作者: 王菊琳(1966—), 女, 博士, 教授, 研究方向为文化遗产保护。E-mail: julinwang@126.com

季节虽然短促但整体温差较大,这些环境因素常会形成冻融循环,可能是造成古建筑琉璃瓦胎体开裂及釉面剥落现象的主要因素之一。

目前对琉璃瓦的研究工作主要集中在器物造型^[3]、胎釉成分^[4-6]、胎体原料来源^[7-8]、胎釉烧制工艺^[9-10]、剥釉原因^[11-12]、加固与保护等^[13]方面,对琉璃瓦冻融方面的研究较少。Anufrik等^[14]分析瓷砖的成分及微观结构得出,瓷砖表面微孔的存在使其吸水率增加,抗冻融性能降低;赵兰等^[15]研究清代官式琉璃瓦复制品的耐候性发现,烧结程度越高,越有利于提高琉璃瓦的抗冻融性;Zhao Jing等^[16]研究发现釉层与基体之间热膨胀系数、吸水率的不匹配及釉层厚度的不同为琉璃瓦在环境中的破坏提供了条件;Tomas Hulan等^[17]通过声发射方法发现陶瓷胎体经冻融循环后生成了微裂纹且微裂纹数量随吸水率的增加而增加。

本文以清代琉璃瓦及修缮用新烧制琉璃瓦为研究对象,通过两种琉璃瓦的对比研究,探究新烧制琉璃瓦是否满足长期抗冻融性要求,并分析了吸水率、氧化物组成及含量、中间层等对琉璃瓦抗冻融性能的影响,为提高新烧制琉璃瓦抗冻融性能及古琉璃瓦的保护修缮提供一定的科学依据。

1 实验部分

1.1 实验样品

样品取自北京古建筑修缮时更换下的保存状态相似的清代琉璃瓦(QDH-1、QDH-2、QDH-3),以及按照清代琉璃瓦传统工艺烧制的现代琉璃瓦(XDH-1、XDH-2、XDH-3)。切割后样品的釉面形貌见图1,由图可见,清代和现代烧制的6个琉璃瓦釉面保存状况相似,除边缘处有部分脱落外,釉面状况保存良好。

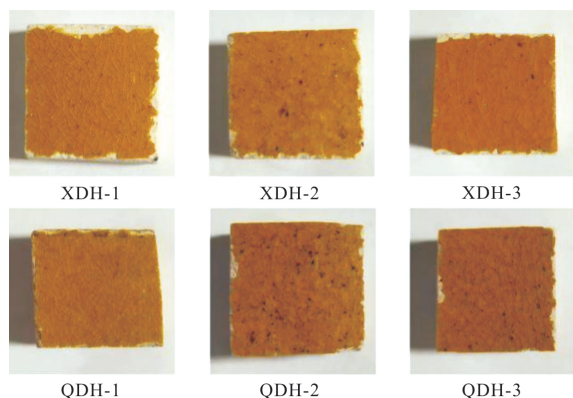


图1 琉璃瓦样品

Fig.1 Glazed tile samples

1.2 实验仪器

EDX-800HS型大腔体微束X-射线荧光光谱仪,日本岛津公司;ZL500LPT透反射偏光显微镜,上海奋业光电仪器设备有限公司;S-4800型场发射扫描电子显微镜,日本日立公司;卡斯特瓶,北京万晶通达科技有限公司;D型邵氏硬度计,北京云飞达仪器仪表有限公司。

1.3 实验方法

参考GB/T3810.3—2016《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》,测试琉璃瓦样品胎体的吸水率、显气孔率、体积密度及表观密度;因釉层较薄,采用上述方法无法获得其吸水率,因此使用卡斯特瓶测试琉璃瓦釉层单位面积的吸水量。

参考WW/T0073—2017《清代官式建筑修缮材料-琉璃瓦》进行冻融实验,将样品放入常温水中浸泡3h后取出,用饱水的麂皮快速擦干试样表面,放入-20℃的冷冻箱中冷冻3h,取出后再次放入常温水中,融化3h并取出后快速擦干试样,再次放入-20℃的冷冻箱中冷冻3h,依次循环,记录循环周期内样品的变化,样品尺寸为40mm×40mm×20mm。

冻融循环后的琉璃瓦样品,釉面损失面积利用Image J软件统计、分析;琉璃瓦破损处的胎体硬度利用邵氏硬度计表征。

2 实验结果与讨论

2.1 琉璃瓦性能测试结果

由图2样品的胎釉断面形貌可见,釉层厚度在65~100μm,胎釉界面较明显;与胎体相比,釉层熔融得较为均一,无明显杂质,存在少量气泡,有些釉层的“冰裂纹”深至胎釉结合处(如图2中XDH-3右),这对釉面的剥落有一定的负面影响。除QDH-3外,所有样品在胎釉间存在明显的中间层,其形貌介于胎体与釉层间,此外,观察到QDH-1胎釉间存在一层明显的白色物质,较为细腻,与胎体相比,无大的晶体颗粒、无红色着色颗粒,推测为化妆土^[18]。化妆土在我国多种陶瓷中均有发现^[19-21],在元代琉璃构件中也有使用^[18]。

为了更清晰地获得不同样品胎体、釉的致密度、孔隙、颗粒及胎釉界面的差别,使用SEM进一步观察了琉璃瓦样品的断面,发现釉层与胎体的显微形貌区别较大,釉层更致密,而胎体内存在较多孔隙。QDH-1中胎釉间的白色层及其邻近

胎体的 EDS 测试结果见表 1, 结合 SEM 形貌可知, 该白色层的致密度、颗粒均匀性与胎体的相比, 明显更致密、更均匀, 颗粒度小于胎体的白色层与胎体的元素种类及含量明显不同, 且在白色层中无显红色的元素 Fe 而存在显白色的元素 Ca, 佐证了其为化妆土的推断^[22].

表 1 QDH-1 白色层及胎体 EDS 化学分析 (wt%)

Tab. 1 EDS chemical analysis of QDH-1 white layer and body (wt%)

位置	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
白色层	2.2	34.8	53.4	6.6	1.4	1.6	/
胎体	/	28.7	61.7	6.3	/	/	3.3

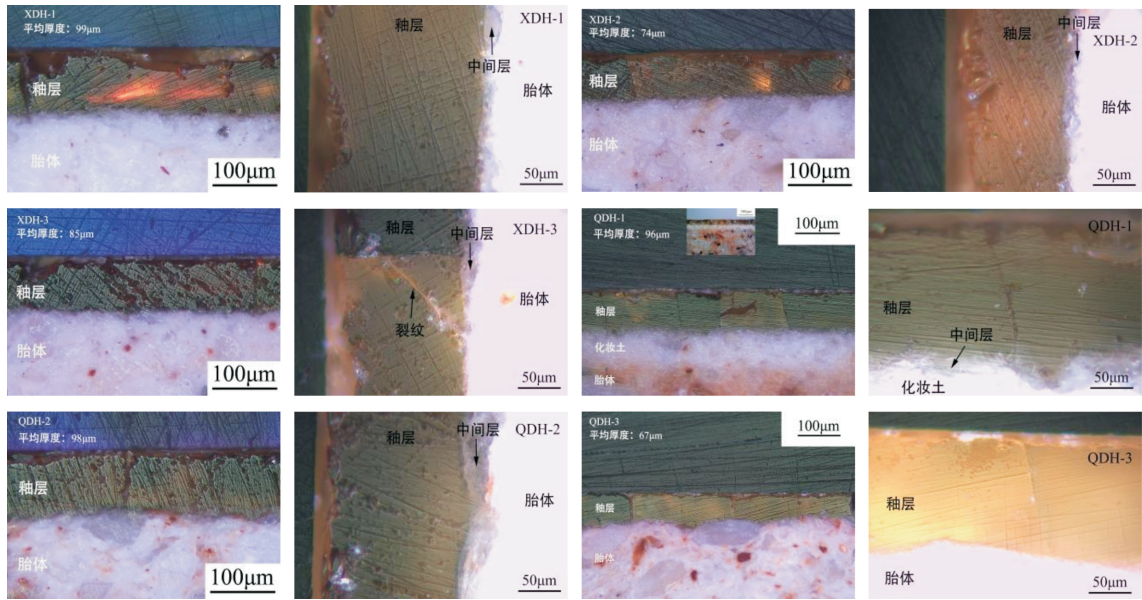


图 2 样品偏光显微形貌及釉层厚度

Fig. 2 Polarized microscopic morphology and glaze thickness of samples

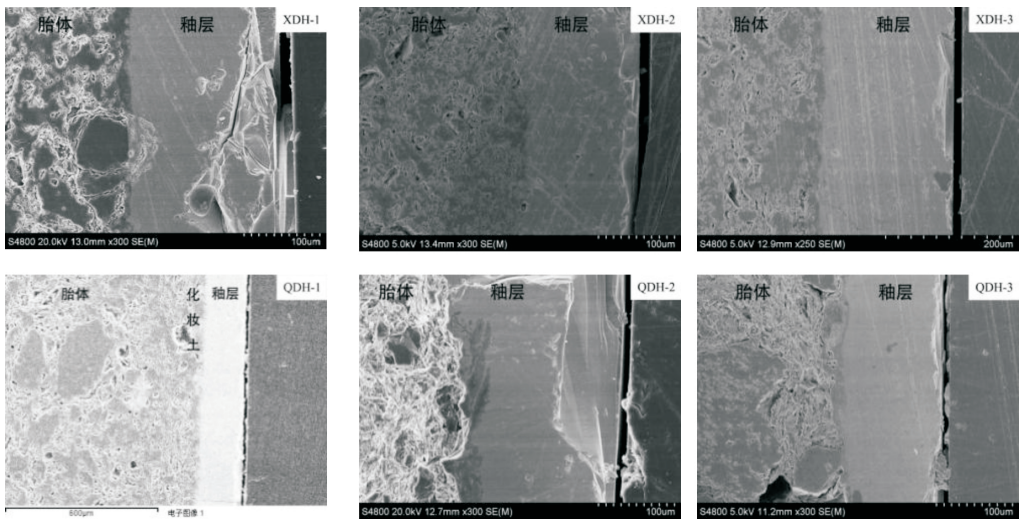


图 3 样品胎釉断面扫描形貌图

Fig. 3 Cross section scanning topography of sample glazes

琉璃瓦胎体成分、釉层成分、吸水率、显气孔率、体积密度、表观密度等测试结果见表 2、3、4. 现代烧制的琉璃瓦 Al_2O_3 含量均相对较高, 在 43.9% 左右, K_2O 含量均相对较低, 在 0.5% 左右. 清代琉璃瓦样品 K_2O 含量则在 0.8% ~ 1.3%, QDH-1 的 Al_2O_3 含量与其他样品相差较大, 只有 34.6%, Al_2O_3 含量增加会提高烧成温

度, K_2O 则起助熔作用, 可降低胎体的烧成温度^[23]. 琉璃瓦釉层的主要成分为 SiO_2 和 PbO , 属于传统的铅硅玻璃体系, 其中 Fe_2O_3 为黄色釉层的着色剂. 结合图 4、表 4 及微观形貌可知, 胎体的微观形貌、物理性能与釉层的明显不同, 胎体多孔吸水, 而釉层致密, 单位面积吸水量接近 0.

表 2 琉璃瓦胎体主次量化学组成 (wt%)

Tab. 2 Major and minor chemical compositions of glazed tile bodies (wt%)

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	BaO	TiO ₂	其它
XDH-1	55.12	43.04	0.62	0.60	0.19	0.09	0.32	0.02
XDH-2	54.28	43.56	0.90	0.53	0.25	0.08	0.38	0.02
XDH-3	52.98	45.15	0.71	0.46	0.22	0.10	0.33	0.05
QDH-1	62.59	34.57	1.09	1.04	0.24	0.10	0.36	0.01
QDH-2	54.02	42.98	1.10	0.87	0.49	0.19	0.35	/
QDH-3	54.65	42.08	1.04	0.96	0.67	0.15	0.45	/

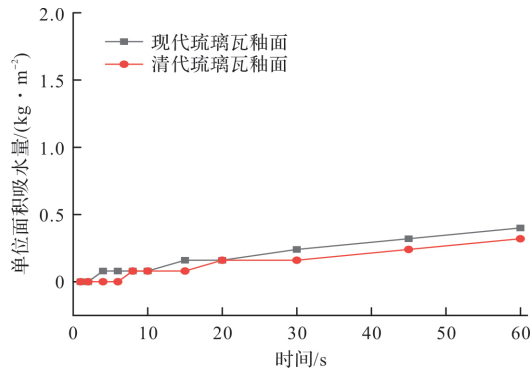


图 4 琉璃瓦釉层单位面积吸水量

Fig. 4 Water absorption per unit area of glazed tile glaze layer

表 3 琉璃瓦釉层主次量化学组成 (wt%)

Tab. 3 Major and minor chemical compositions of glazed tile glaze (wt%)

样品编号	PbO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	CaO	K ₂ O
XDH-1	48.08	48.64	2.95	/	0.33	/
XDH-2	44.46	52.34	3.20	/	/	/
XDH-3	51.51	44.70	3.39	/	0.40	/
QDH-1	49.82	46.70	3.01	0.09	0.29	0.09
QDH-2	49.75	46.98	2.89	/	0.38	/
QDH-3	49.90	47.14	2.89	0.07	/	/

表 4 琉璃瓦胎体的吸水率、显气孔率、密度测试结果

Tab. 4 Water absorption, apparent porosity and density of glazed tile bodies

样品	体积密度 B/ (g·cm ⁻³)	表观密度 T/ (g·cm ⁻³)	吸水率 E/%	显气孔率 P/%
XDH-1	2.06	2.52	8.92	18.34
XDH-2	2.02	2.47	8.95	18.12
XDH-3	1.98	2.51	10.60	21.02
QDH-1	2.12	2.46	6.39	13.56
QDH-2	1.81	2.50	15.27	27.60
QDH-3	1.73	2.38	15.74	27.25

2.2 冻融循环试验结果

2.2.1 琉璃瓦破坏现象

本次实验共进行了 80 次冻融循环, 各样品出

现破坏现象较为明显的循环次数及宏观形貌如图 5 所示。可见冻融产生的破坏主要分为两种类型, 一种是胎体的破坏, 胎体出现裂缝甚至断裂; 一种是表面釉层脱落, 部分样品在釉面脱落的同时带下了胎体组分。XDH-1 在 68、73、80 次冻融循环后分别出现了裂纹、釉层突起、突起釉层及胎体脱落; XDH-3 在 50、63、80 次冻融循环后釉面出现了微小剥落、剥落面积增大及裂缝、裂纹加深的现象; QDH-2 在 50、73 次冻融循环后釉面出现裂纹及小面积剥落现象; XDH-2 在 68、80 次冻融循环后胎体出现裂纹及裂纹加深现象, 几乎未出现釉面剥落现象; QDH-3 在 14 至 80 次循环后釉面从微小剥落至釉面面积仅剩约 20%, 但胎体未明显受损。QDH-1 经 80 次冻融循环后无明显变化。

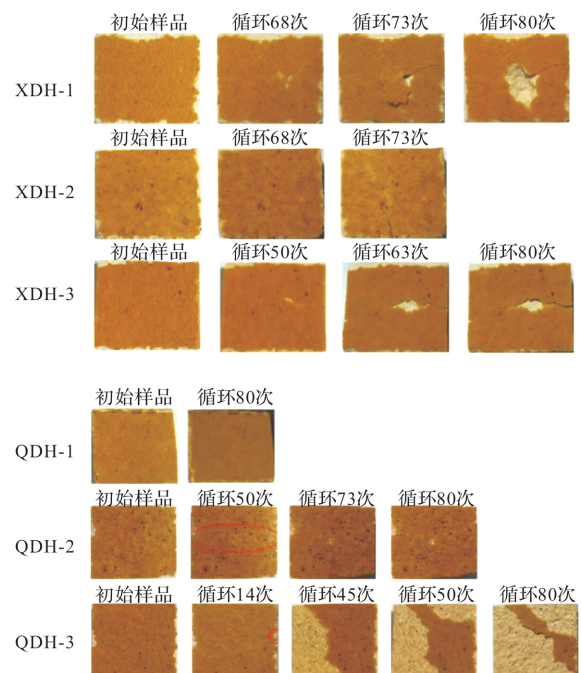


图 5 琉璃瓦冻融破坏情况

Fig. 5 Freeze-thaw damage of glazed tile

2.2.2 琉璃瓦釉面损失率

从图 6 的曲线可见, 当循环至 14 次后,

QDH-3 釉面即开始破损, 且釉面损失率随冻融次数的增加上升幅度较大, 当循环 80 次后, 釉面的损失达 78.28%, 说明该样品抗冻融性最差; 其次为 XDH-1, 该样品从第 68 次循环后釉面开始脱落, 且釉面损失率随冻融次数的增加增幅较大, 经历 80 次循环后釉面损失率为 11.31%, 且釉面脱落对胎体也造成了一定的损伤; XDH-3 冻融 50 次时出现了点状的釉面脱落, 此后, 该点成为优先破坏位置; XDH-2 和 QDH-2 样品的主要破坏现象均为生成裂隙, 其中 QDH-2 样品在裂隙的交汇处有小面积釉层剥落; QDH-1 样品抗冻融性较好, 未发生明显破坏现象。

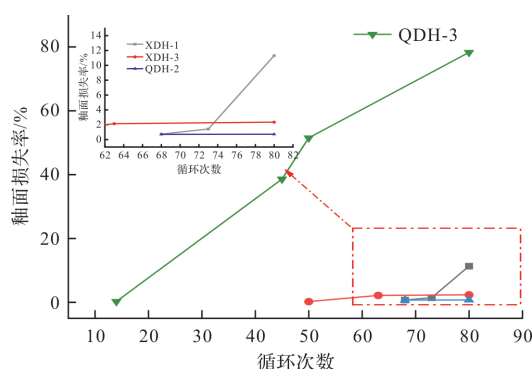


图6 琉璃瓦釉面损失率变化曲线

Fig. 6 Glazed tile surface loss rate curve

2.2.3 胎体邵氏硬度变化

分别测试初始样品及经过 80 次冻融循环后破坏严重处胎体的邵氏硬度值, 结果如图 7 所示。其中 QDH-1 样品冻融前后硬度值相差不大, 说明 80 次冻融循环后该样品力学性能未发生明显变化; 此外, 其余样品的邵氏硬度均有不同程度的降低; 裂隙周边的胎体(XDH-2、QDH-2)硬度稍高于釉面剥落处胎体(XDH-1、XDH-3、QDH-3)的, 说明釉面剥落过程对琉璃瓦胎体造成了一定的损伤, 胎体颗粒粉化较为明显, 邵氏硬度较低、力学性能较差。

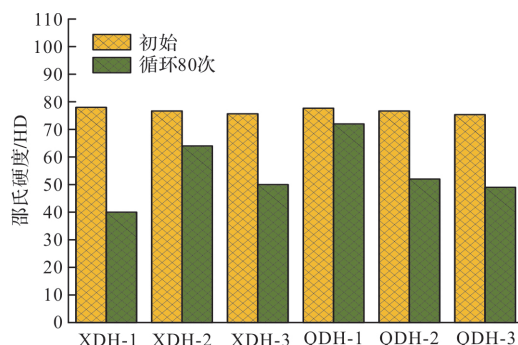


图7 琉璃瓦胎体邵氏硬度对比图

Fig. 7 Shore hardness of glazed tile body

结合以上试验结果, 得出现代琉璃瓦样品的吸水率和显气孔率相对较低, 胎体的致密度较高, 因此多次冻融循环后胎体才受损, 尤其是 XDH-2 样品, 在经历了 68 次冻融循环后才受损。

对于清代琉璃瓦样品, QDH-1 吸水率最低, 为 6.39%, 在冻融循环中吸水较少, 因而水在胎体中冻结导致的体积膨胀也较少, 对胎体及釉层影响均较小, 且 QDH-1 胎釉间存在化妆土层, 该层减弱了胎体膨胀对釉层的作用力, 从而对釉层起到了保护作用。此外, 其相对较高的 K_2O 含量降低了胎体的烧成温度, 在相同的烧制温度下, 使其胎体比其他清代样品更充分地熔融, 并使得胎体的致密度更大、气孔率更小, 从而降低了冻融破坏的影响。QDH-2 中的 Al_2O_3 含量相对较高, K_2O 含量虽然高于新烧制琉璃瓦样品的, 但低于其他清代样品的, 在相同的烧制温度下, 体现出较小的致密度及较大的气孔率、吸水率, 从而在冻融循环中, 因胎、釉结合处所产生的应力较大, 致使釉层较早出现裂纹。

冻融循环对琉璃瓦的破坏原因主要在于胎与釉吸水率相差较大, 胎体吸水、受冻膨胀, 而釉层几乎不吸水, 受冻后基本不膨胀, 在胎/釉结合处产生应力, 致使釉层裂纹加重, 裂纹数量、宽度的增加拓宽了水进入胎体的通道, 进一步加剧了琉璃瓦在冻融循环中的破坏程度。

通过对清代完整琉璃瓦与现代烧制琉璃瓦的冻融实验结果的总体比较, 得出现代烧制琉璃瓦的抗冻融性能满足作为修缮使用琉璃瓦的要求, 且均在 50 次冻融循环后才出现损坏现象, 抗冻融性能较好; 清代琉璃瓦 QDH-1 样品因有化妆土作为中间层及较低的吸水率, 其抗冻融性能最好, 其余样品 QDH-2 及 QDH-3 在 50 次以内即发生了明显的破坏现象(裂缝及釉面小面积脱落), 其中 QDH-3 由于其较高的胎体吸水率, 釉面几乎完全脱落, 损坏现象十分明显。

3 结论

(1)冻融对琉璃瓦样品产生的破坏主要分为两种类型, 一是胎体出现裂缝, 二是釉层脱落。部分样品在釉面脱落的同时胎体也有一定程度的损坏, 胎体的邵氏硬度降低;

(2)琉璃瓦的抗冻融性与吸水率、胎釉中间层及胎体组成及含量等均有关。较低的吸水率可降低冻融循环时胎体的破坏及对釉层的不利影响;胎、釉中间层可减弱冻融过程对釉层的剥落破坏;化妆土层减弱了胎体由于吸水受冻膨胀对釉层的应力,防止了釉层的破坏;

(3)在同等烧制条件下, Al_2O_3 含量的降低与 K_2O 含量的升高有利于提高胎体的烧结程度,进而提高琉璃瓦的抗冻融性。

参考文献 References

- [1] 中国硅酸盐学会. 硅酸盐词典[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984: 6.
The Chinese Ceramic Society. Silicate Dictionary[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1984: 6.
- [2] 杨桂美, 杨玉璋, 姚政权. 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 G M, YANG Y Z, YAO Z Q. Study on manufacturing technique for glazed tiles bodies from Mingzhongdu Site, Fengyang[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1280-1287.
- [3] 夏秀敏. 清代官式建筑中屋面构造及瓦饰的特点[J]. 建筑与文化, 2020(2): 218-219.
XIA X M. The characteristics of roof structure and tile decoration in official buildings in Qing Dynasty[J]. Architecture & Culture, 2020(2): 218-219.
- [4] BAG A, EC B. Compositional investigation and phase identification of 13th century Anatolian Seljuk glazed tiles[J]. Vibrational Spectroscopy, 2019:102997.
- [5] 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 H, DING Y Z, CHEN T M, 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.
- [6] YANG G M, WANG Z, YAO Z, et al. Provenance study of the glazed tiles body in the mingzhongdu site [J]. Archaeometry, 2022, 64(1): 71-83.
- [7] MÉTREAU L, CATTIN F, VILLA I M, et al. Lead provenance for medieval decorated tile glazes from Brittany and Anjou (13th-14th c.)[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 2021, 38(1): 103037.
- [8] 康葆强, 王时伟, 段鸿莺, 等. 故宫神武门琉璃瓦年代和产地的初步研究[J]. 故宫学刊, 2013(2): 234-241.
TANG B Q, WANG S W, DUAN H Y, et al. Preliminary research on the manufacture location and date of glazed tiles for the Forbidden City's Gate of Divine Prowess (Shenwumen)[J]. Journal of Gugong Studies, 2013(2): 234-241.
- [9] 段鸿莺, 康葆强, 丁银忠. 北京清代官式琉璃构件胎体的工艺研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 430-434.
DUAN H Y, TANG B Q, DING Y Z. Research of technology of Qing Dynasty official glazed tile bodies in Beijing[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 430-434.
- [10] HOU J Y, LI H, KANG B Q, et al. The origins of imperial yellow glazed porcelain in the Ming Dynasty (1,368 to 1,644) China: Technical comparison to low-fired tile with yellow glaze[J]. Archaeometry, 2022, 64(1): 59-70.
- [11] 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 Ceramic, 2020, 56(4): 43-50.
- [12] 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 the Nanxun Temple of The Palace Museum[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(21): 8716-8723.
- [13] ADILI, D, ZHAO, J, YANG L et al. Protection of glazed tiles in ancient buildings of China[J]. Heritage Science, 2020(8):37.
- [14] ANUFRIK, S S, KURIAN N N, ZHUKOVA I I, ZNOSKO K F, BELKOV M V. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes. Journal of Applied Spectroscopy

- py, 2016(5): 764-770.
- [15] 赵兰, 苗建民, 丁银忠. 清代官式建筑琉璃瓦件复制品耐候性评价研究[J]. 砖瓦, 2014(5): 7-10.
- ZHAO L, MIAO J M, DING Y Z. Study on weatherability evaluation of glazed tile replicas of Qing Dynasty official buildings[J]. Brick-Tile, 2014(5): 7-10.
- [16] ZHAO J. Research on protection of the architectural glazed ceramics in the Palace Museum, Beijing [J]. Journal of Cultural Heritage, 2010, 11(3): 279-287.
- [17] HÚLAN T, KNAPEK M. The formation of microcracks in water-saturated porous ceramics during freeze-thaw cycles followed by acoustic emission[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40(1): 1-11.
- [18] 李媛, 苗建民, 段鸿莺. 元代建筑琉璃化妆土工艺的初步研究[C]//中国文物保护技术协会第七次学术年会论文集. 2012: 514-518.
- LI Y, MIAO J M, DUAN H Y. Preliminary Study on the Technology of mask clay for architectural glazed tiles in Yuan Dynasty[C]//Proceedings of the seventh academic annual conference of China cultural relics protection technology association. 2012: 514-518.
- [19] 吴燕春, 吴 隽, 吴军明, 等. 化妆土对鄱阳淮王府琉璃构件釉面品质的影响[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(3): 415-420.
- WU Y C, WU J, WU J M, et al. The impact of mask clay on glaze quality of glazed tiles on Prince Huai's Palace in Poyang[J]. Journal of Ceramics, 2017, 38(3): 415-420.
- [20] 凌雪, 姚政权, 魏女, 等. 耀州窑青瓷白色中间层和化妆土的 EDXRF 光谱分析[J]. 文物保护与考古科学, 2008(1): 12-17, 73.
- YAO X, YAO Z Q, WEI N, et al. Analysis of white middle layer and masking layer of porcelains from Yaozhou kiln using EDXRF[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008(1): 12-17, 73.
- [21] 朱铁权, 王昌燧, 毛振伟, 等. 我国北方唐宋时期白瓷化妆土 EDXRF 成分分析[J]. 中国陶瓷, 2006(3): 44-46, 38.
- ZHU T Q, WANG C S, MAO Z W, et al. Microanalysis of the mask clay of white porcelain from Gong and Yiyang kiln Chinese Tang and Song dynasty using EDXRF[J]. China Ceramics, 2006(3): 44-46, 38.
- [22] 杨益民, 汪丽华, 朱剑, 等. 红绿彩瓷化妆土的线扫描分析[J]. 核技术, 2008(9): 653-657.
- YANG Y M, WANG L H, ZHU J, et al. Line scan micro XRF analysis of engobe of whiteware painted with red, green and yellow patterns[J]. Nuclear Technique, 2008(9): 653-657.
- [23] 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.

(编辑 桂智刚)