

北京故宫和辽宁黄瓦窑清代建筑琉璃构件 的比较研究

李 合, 段鸿莺, 丁银忠, 窦一村, 侯佳钰, 苗建民

(故宫博物院古陶瓷检测研究实验室, 北京 100009)

富品莹, 赵长明

(鞍山市博物馆, 辽宁鞍山 114001)

摘要: 为了更好地揭示清代不同地区建筑琉璃构件的原料、烧制工艺及其性能关系, 本工作以北京故宫和辽宁黄瓦窑清代建筑琉璃构件为研究对象, 利用 WDXRF、EDXRF 测定琉璃构件胎、釉的化学组成, 利用热膨胀仪和理论计算方法测试计算胎、釉的热膨胀系数。在此基础上, 研究了两地清代建筑琉璃构件胎釉的化学组成规律和胎釉热膨胀系数的匹配性关系。结果表明: 两地琉璃构件釉料的化学组成基本一致, 而琉璃构件胎体原料不同, 北京故宫清代琉璃构件胎体化学组成属于硅-铝体系, 辽宁黄瓦窑的琉璃构件则属于硅-铝-镁体系, 因此两地胎釉热膨胀系数的匹配关系也不同。

关键词: 建筑琉璃构件; 化学组成; 胎釉匹配

中图分类号: K876.3 **文献标识码:** A

0 引言

北京是元、明、清封建王朝的皇都所在地, 留存了大量的宫殿、寺庙、陵寝等建筑, 且多以琉璃构件为饰。经考证: 北京地区烧造琉璃的赵氏自元代由山西迁来, 初在海王村, 后迁门头沟琉璃渠村, 承造了元、明、清三代宫殿陵寝坛庙^[1]。辽宁“黄瓦窑”又称“黄瓦厂”, 位于辽宁省鞍山市海城市析木镇缸窑岭村^[2-3], 窑主侯氏系山西介休人, 万历三十五年迁居于此, 顺治修大政殿设琉璃窑, 侯氏主其事^[4]。据清雍正《大清会典》卷二一九《盛京工部》记载: “凡陵寝、宫殿需用黄绿砖瓦, 兽头等物, 定例于海城县所属四门城地方烧造”。2002年鞍山博物馆对海城黄瓦窑遗址进行了实地调查并采集了大量的琉璃样品^[5]。文献[1~3, 6]表明, 两地的琉璃匠人均由山西迁入, 因此两地琉璃构件的烧制工艺以及釉料的配方多受山西琉璃制作技术的影响。

为了更好地揭示清代不同地区建筑琉璃构件的原料、烧制工艺及其性能关系, 本工作以北京故宫和辽宁黄瓦窑清代建筑琉璃构件为研究对象, 利用

WDXRF、EDXRF 测定胎釉料的化学组成, 利用热膨胀仪及理论计算方法测试和计算胎釉的热膨胀系数。在此基础上, 结合相关文献记载, 初步研究了两地琉璃构件胎釉料的化学组成规律及胎釉热膨胀系数的匹配关系。

1 实验方法和样品

实验采用美国 EDAX 公司的 EAGLE III XXL 大样品室能量色散 X 射线荧光光谱仪测试琉璃釉的化学组成^[7]。采用荷兰帕纳科公司的 Axios 型 WDXRF 测试琉璃胎体化学组成^[8]。用德国耐驰公司的 DIL-402C 型热膨胀分析仪测量胎体的热膨胀系数, 根据干福熹先生提出的玻璃材料热膨胀系数计算方法^[9], 对釉料热膨胀系数进行理论计算。

实验选取北京故宫清代黄色琉璃构件 18 块, 辽宁黄瓦窑遗址出土的琉璃构件及福陵、永陵的琉璃构件 23 块。总体而言, 两地琉璃釉呈现不同的黄、棕红色甚至酱色。北京故宫、辽宁典型建筑琉璃构件见图 1~2。



图 1 北京故宫建筑琉璃构件

Fig. 1 The samples of the Palace Museum of Beijing



图 2 辽宁黄瓦窑建筑琉璃构件

Fig. 2 The samples of Huangwa kiln of Liaoning

2 实验结果与讨论

2.1 两地琉璃构件釉料成分的比较

尽管我国很早就掌握了琉璃釉的配制方法,但对于详细的配方,在古代却很少有记载。多数情况下,釉料的配方秘不外传,匠人素有“父传子,

子传孙,琉璃不传外姓人”和“传子不传女”的习惯^[1,10]。经过时代更迭变迁,配方难免失传,因此目前保留下来的琉璃釉的配方,少之又少。因此,研究琉璃釉料的组成、揭示琉璃釉料配方显得尤为重要。表 1 和表 2 列出了两地琉璃釉料的化学组成。

表 1 北京故宫清代琉璃构件釉层化学组成

Table 1 The element contents of the lead glazes of the Palace Museum of Beijing

(%)

编号	款识	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	PbO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
1-1	雍正八年	0.14	0.28	8.59	28.29	59.21	0.71	0.67	0.33	1.78
1-3	雍正八年	0.09	0.26	6.64	27.60	61.96	0.51	0.74	0.35	1.99
1-4	雍正八年	0.29	0.28	1.92	36.87	56.02	0.42	1.22	0.15	2.68
1-5	雍正八年	0.00	0.28	3.28	32.95	59.24	0.43	1.12	0.19	2.37
5-1	乾隆年造	0.00	0.28	3.34	30.53	59.54	0.39	0.65	0.24	5.05
5-2	乾隆年造	0.23	0.29	4.66	32.25	57.52	0.49	0.54	0.21	3.74
6-6	乾隆年制	0.13	0.31	3.60	32.66	57.57	0.42	0.80	0.21	4.19
6-8	乾隆年制	0.25	0.29	3.60	31.76	58.94	0.43	0.93	0.15	3.62
8-1	乾隆三十年	0.50	0.27	3.87	32.78	57.23	0.69	0.88	0.26	3.48
8-2	乾隆三十年	0.25	0.28	3.21	33.10	57.92	0.55	0.64	0.18	3.82
11-1	嘉庆三年	0.40	0.27	3.35	32.85	57.92	0.68	0.61	0.20	3.65
11-3	嘉庆三年	0.38	0.31	3.50	34.77	55.08	0.88	1.21	0.15	3.65
15-1	嘉庆十一年	0.23	0.26	1.42	29.76	61.88	0.38	0.57	0.14	5.28
16-1	嘉庆拾贰年造	0.02	0.29	3.25	35.19	53.17	0.58	1.38	0.07	5.98
18-1	嘉庆*年	0.00	0.30	1.73	32.37	59.01	0.28	0.70	0.12	5.47
18-3	嘉庆*年	0.45	0.18	2.46	31.76	58.64	0.36	0.51	0.17	5.45
19-2	宣统	0.00	0.29	1.85	33.78	58.28	0.38	0.59	0.14	4.70
19-3	宣统	0.42	0.28	2.24	34.51	56.88	0.40	0.53	0.18	4.55

注: * 表示辨认不清。

表 2 辽宁黄瓦窑清代琉璃构件釉层化学组成

Table 2 The element contents of the lead glazes of Huangwa kiln of Liaoning

(%)

样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	PbO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SnO ₂	ZnO
WLLM-0010	0.31	0.36	1.55	33.02	56.11	0.52	0.69	0.03	3.63	3.67	
WLLM-0011	0.31	1.91	4.33	34.07	52.15	0.93	0.82	0.15	5.06		0.12
WLLM-0012	0.30	0.95	2.29	35.03	55.65	0.73	0.73	0.06	3.26	0.86	
WLLM-0013	0.24	0.41	1.61	35.64	58.94	0.67	0.53	0.03	1.73		0.10
WLLM-0014	0.28	0.82	1.81	40.58	53.64	0.64	0.53	0.06	1.55		

(续表 2)

样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	PbO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SnO ₂	ZnO
WLLM-0015	0.36	1.91	3.75	32.89	56.88	0.65	0.42	0.13	2.89		
WLLM-0018	0.15	0.78	2.51	33.81	54.57	1.88	0.88	0.05	4.59		0.65
WLLM-0021	0.33	0.49	1.50	33.08	58.97	0.49	0.53	0.04	4.47		
WLLM-0031	0.31	0.69	2.38	32.40	59.12	0.39	0.27	0.02	3.63	0.73	
WLLM-0039	0.27	0.63	1.94	32.89	59.48	0.44	0.65	0.03	3.45	0.10	0.06
WLLM-0044	0.32	1.15	2.84	35.00	54.84	0.75	0.58	0.04	4.34		
WLLM-0045	0.31	0.82	1.65	33.67	59.87	0.37	0.45	0.08	2.65		
WLLM-0046	0.36	0.31	1.59	33.90	58.94	0.52	0.46	0.03	3.72		
WLLM-0047	0.22	0.69	2.86	29.74	59.09	0.63	1.27	0.02	5.17		0.15
WLLM-0048	0.25	0.46	1.81	34.11	57.71	0.57	0.45	0.03	4.47		
WLLM-0053	0.26	0.63	2.49	35.14	56.18	0.64	0.42	0.06	4.01		
WLLQ-0054	0.29	0.63	2.18	36.26	51.14	1.82	1.31	0.07	6.11		0.10
WLLQ-0055	0.32	1.08	3.08	34.32	54.30	1.16	0.34	0.08	5.20		
WLLQ-0056	0.31	0.62	2.87	33.98	57.66	0.35	0.75	0.03	3.22		
WLLQ-0057	0.20	0.60	3.19	35.34	55.81	0.53	0.98	0.02	3.14	0.12	
WLLQ-0058	0.33	0.62	2.35	33.85	56.05	0.76	0.41	0.03	5.45		
WLLQ-0059	0.38	0.63	3.70	35.60	54.86	0.44	0.71	0.04	3.39		
WLLQ-0062	0.38	0.54	2.78	36.65	54.36	0.43	0.71	0.07	3.90		

由表 1~2 可知,北京故宫琉璃黄釉主要由 27.60%~36.87% 的 SiO₂、53.17%~61.96% 的 PbO、1.42%~8.59% 的 Al₂O₃ 以及 1.78%~5.98% 的 Fe₂O₃ 组成;辽宁釉料主要由 29.74%~40.58% 的 SiO₂、51.14%~59.87% 的 PbO、1.50%~4.33% 的 Al₂O₃ 以及 1.55%~6.11% 的 Fe₂O₃ 组成。

在实验分析的基础上,根据相关文献记载,如明代万历年间的《工部厂库须知》记载的琉璃釉料配方、清康熙年间孙廷铨的《颜山杂记》以及清光绪三十年(1905 年)北京门头沟琉璃窑各色釉料配方,不难得到:两地清代琉璃构件釉层主要由氧化硅(SiO₂)、作为助熔剂的氧化铅(PbO)和作为着色剂的氧化铁(Fe₂O₃)三部分组成的。氧化硅作为琉璃釉中最重要的成分之一,通常由石英、洛河石,水晶、马牙石等^[1]引入。而氧化铅作为琉璃釉的助熔材料,可以使琉璃构件产生耀眼的光泽^[11]。古代引入氧化铅的原料主要是黄丹、铅末、铅粉(官粉)等^[1]。铅丹(Pb₃O₄),俗称黄丹,古代用人工方法可炒制黄丹。宋《营造法式》记载,“凡合琉璃药所用黄丹阙,炒造之制,以黑锡(铅)、盆硝等入镬,煎一日为粗,第三日炒成”。古代琉璃釉中引入氧化铁的目的在于着色。明宋应星著《天工开物》中有“其制为琉璃瓦者……赭石、松香、蒲草等涂染成黄”。赭石又称代赭石,即赤铁矿(Fe₂O₃),《天工开物》有“代赭石,殷红色,处处山中有之,以代郡者为最佳”。明代《工部厂库须知》琉璃釉原料配方中写作“黛赭石”,

“黛”可能同“代”。此外,古代琉璃釉中引入氧化铁的原料还有紫石、红土(石)等^[12]。据黄色琉璃构件有少黄(娇黄)、中黄(明黄)、老黄(深黄)之说,少黄多用于园林,中黄多用于宫殿,老黄多用于陵寝^[13]。此外,氧化铝也是琉璃釉的重要组成,虽然关于琉璃釉配方中引入氧化铝的文献记载少见,但在古代所使用的原料中,氧化铝不可避免以共存、共生的形式存在于马牙石、紫石、赭石等矿物当中。因此,在所测釉料元素组成当中,都含有一定量的氧化铝。

从上述结果可知,两地清代琉璃构件釉层基本由 50%~60% 的 PbO、30%~40% 的 SiO₂、1~9% 的 Al₂O₃ 和 2%~6% 的 Fe₂O₃ 组成,这与文献[10,14]的结论基本一致。“琉璃的制作,起始于山西,盛行于山西,而向外流传到各处烧造的,又是山西一个系统,似无可疑^[3]”。

2.2 两地琉璃构件胎体成分的比较

明沈榜的《宛署杂记》中记载“对子槐山,在县西五十里。山产甘(矸)子土,堪烧琉璃”。这表明在明代时期,北京地区已经使用门头沟琉璃渠一带的矸子土烧制琉璃胎体了。而辽宁黄瓦窑胎体原料主要取自海城,“用料以白马牙石与矸子土、赭石为大宗,皆产海城。又矸子土及白泥土出沈阳城东二十里王家沟,但白土仍需向海城取之^[2]”。由此可见,两地琉璃构件胎体原料都是就地取材的。为了比较两地琉璃胎体原料成分的差异,表 3~4 列出了两地清代琉璃构件胎体的化学组成。

表3 北京故宫清代琉璃构件胎体样品的化学组成

Table 3 The element contents of the samples Body of the Palace Museum of Beijing

(%)

样品编号	款识	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
1-1	雍正八年	0.88	0.35	30.85	59.32	0.06	2.71	0.31	1.34	0.02	2.51
1-3	雍正八年	0.88	0.35	30.83	59.47	0.06	2.64	0.34	1.35	0.02	2.52
1-4	雍正八年	1.18	0.43	33.24	55.11	0.06	2.77	0.45	1.27	0.03	3.56
1-5	雍正八年	1.04	0.40	32.48	56.82	0.07	2.63	0.41	1.28	0.03	2.97
5-1	乾隆年造	1.36	0.35	25.94	65.04	0.05	3.19	0.23	1.11	0.01	1.31
5-2	乾隆年造	1.38	0.37	26.08	64.64	0.05	3.13	0.25	1.12	0.01	1.32
6-6	乾隆年制	1.30	0.41	32.57	57.07	0.05	3.61	0.33	1.26	0.02	2.05
6-8	乾隆年制	1.25	0.48	32.45	56.91	0.09	3.54	0.38	1.24	0.02	1.99
8-1	乾隆三十年	1.62	0.29	23.22	68.59	0.05	2.68	0.26	1.08	0.00	1.04
8-2	乾隆三十年	1.65	0.28	23.06	68.43	0.05	2.76	0.23	1.08	0.00	1.02
11-1	嘉庆三年	1.22	0.30	23.92	67.92	0.05	2.98	0.18	1.08	0.01	0.88
11-3	嘉庆三年	1.28	0.39	24.05	67.36	0.05	3.02	0.22	1.08	0.01	0.83
15-1	嘉庆十一年	1.69	0.28	24.63	66.69	0.05	2.93	0.23	1.13	0.01	1.10
16-1	嘉庆拾贰年造	1.73	0.29	24.99	66.08	0.05	2.99	0.25	1.15	0.01	1.31
18-1	嘉庆*年	1.67	0.29	24.80	66.35	0.08	2.92	0.27	1.12	0.01	1.14
18-3	嘉庆*年	1.75	0.30	24.73	66.51	0.05	2.88	0.23	1.13	0.01	1.12
19-2	宣统	1.03	0.29	20.97	70.69	0.05	2.77	0.23	1.09	0.02	1.67
19-3	宣统	1.03	0.29	20.97	70.73	0.05	2.81	0.23	1.10	0.01	1.65

注:*表示辨认不清。

表4 辽宁黄瓦窑清代琉璃构件胎体样品的化学组成

Table 4 The element contents of the samples Body of Huangwa kiln of Liaoning

(%)

样品编号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
WLLM-0010	0.53	19.31	15.81	53.15	0.12	2.10	1.91	0.63	0.05	3.47
WLLM-0011	0.64	16.37	16.89	55.83	0.12	2.33	1.11	0.68	0.06	3.98
WLLM-0012	0.44	22.04	14.96	51.65	0.11	1.44	1.57	0.60	0.05	3.20
WLLM-0013	0.47	20.40	15.23	53.37	0.13	1.41	1.54	0.62	0.06	3.37
WLLM-0014	0.58	18.60	15.16	54.09	0.12	1.61	1.66	0.63	0.06	3.55
WLLM-0015	0.63	20.21	15.33	54.51	0.11	1.59	1.09	0.64	0.06	3.54
WLLM-0018	0.46	19.59	14.90	52.73	0.13	1.67	1.60	0.61	0.06	3.54
WLLM-0021	0.60	18.40	15.82	54.63	0.10	1.98	0.93	0.64	0.06	3.65
WLLM-0031	0.53	18.68	16.23	54.49	0.12	2.00	1.36	0.65	0.06	3.56
WLLM-0039	0.45	19.88	15.39	52.97	0.12	1.68	1.60	0.62	0.05	3.25
WLLM-0044	0.64	18.66	15.24	53.77	0.13	1.60	2.01	0.66	0.06	3.43
WLLM-0045	0.82	18.98	15.19	53.56	0.09	1.88	1.15	0.63	0.06	3.64
WLLM-0046	0.65	16.29	15.86	54.35	0.14	2.11	1.83	0.66	0.07	4.15
WLLM-0047	0.61	20.36	14.85	53.80	0.11	1.51	1.21	0.62	0.06	3.49
WLLM-0048	0.64	19.52	15.36	54.34	0.10	2.01	0.95	0.62	0.05	3.41
WLLE-0049	0.62	21.16	15.17	51.34	0.10	1.35	1.79	0.63	0.05	3.04
WLLE-0053	0.55	17.47	15.94	54.11	0.09	1.95	1.44	0.66	0.06	3.87
WLLQ-0054	0.57	18.19	16.33	55.11	0.09	1.96	0.89	0.66	0.05	3.54
WLLQ-0055	0.56	20.03	15.79	54.09	0.10	1.70	0.94	0.65	0.05	3.44
WLLQ-0056	0.46	22.29	14.23	50.40	0.10	1.41	0.96	0.59	0.05	3.22
WLLQ-0057	0.45	21.63	15.16	51.27	0.11	1.60	1.30	0.60	0.05	3.29
WLLQ-0058	0.56	19.68	15.51	53.43	0.11	1.69	1.29	0.64	0.05	3.48
WLLQ-0059	0.46	24.28	13.30	50.05	0.09	0.92	1.13	0.57	0.05	2.94
WLLQ-0062	0.68	16.10	15.35	55.49	0.10	1.82	1.91	0.69	0.07	3.93

从表3可见,北京故宫清代琉璃构件胎体主要由55.11%~70.73%的 SiO_2 、20.97%~33.24%的 Al_2O_3 、2.64%~3.61%的 K_2O 以及0.83%~3.56%的 Fe_2O_3 组成。从表4可见,辽宁黄瓦窑清代琉璃构件胎体主要由50.05%~70.73%的 SiO_2 、15.15%~22.29%的 MgO 、13.30%~16.89%的 Al_2O_3 、0.92%~2.65%的 K_2O 以及3.22%~4.62%的 Fe_2O_3 组成。对表3和表4数据中 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 十个氧化物的含量进行主因子分析,使这十种氧化物的主要信息显示在因子1、2当中,用来观察两地清代琉璃构件胎体间成分的差异。因子1和因子2的特征值之和为92.2%,即涵盖所有数据中的92.2%的信息。从图3可见,北京故宫清代琉璃构件胎体化学组成与辽宁黄瓦窑清代琉璃胎体组成分布在不同的区域内,这表明两地的琉璃胎料组成明显不同。此外,结合表3分析结果,北京故宫清代琉璃构件胎体组成也可分为两小类:一类为高硅低铝,一类为高铝低硅。北京故宫和辽宁黄瓦窑胎体原料的差异具体可见康葆强的工作^[15]。

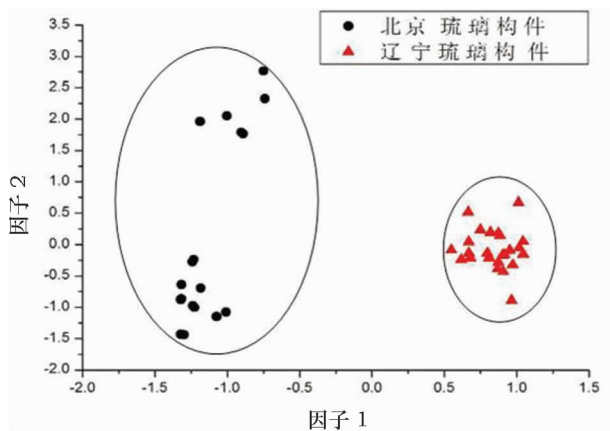


图3 两地清代琉璃构件胎体组成因子分析

Fig. 3 The Factor Analysis of the Body of the Palace Museum and Huangwa kiln samples

从上述分析结果来看,北京故宫清代琉璃构件胎体属于硅-铝体系;辽宁黄瓦窑的琉璃构件则属于硅-铝-镁体系。

2.3 琉璃构件胎釉匹配关系的比较

在以往的工作中,曾系统的对北京地区清代琉璃构件剥釉机理的内在因素进行了研究,其中胎釉的热膨胀系数不匹配是造成釉面开裂、后期剥釉的原因之一^[11]。根据两地清代琉璃构件胎釉化学分析结果(表1~表4)可知,两地的琉璃釉料化学组成基本一致,而胎体组成则差别很大。这样的组成

模式,显然对两地琉璃构件胎釉的匹配关系有显著的影响。表5~6分别列出两地部分琉璃构件胎釉的热膨胀系数及匹配情况。

表5 北京故宫清代琉璃构件的热膨胀系数 α

Table 5 The thermal expansion coefficient of the samples of the Palace Museum of Beijing ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

样品编号	a 胎 (50~400 $^{\circ}\text{C}$)	a 釉理论 (20~400 $^{\circ}\text{C}$)	a 胎-a 釉理论
1-1	5.29	6.31	-1.02
1-3	5.58	6.41	-0.83
1-4	4.78	6.30	-1.52
1-5	4.29	6.30	-2.01
5-2	6.08	6.31	-0.23
6-6	5.53	6.30	-0.77
6-8	5.20	6.55	-1.35
8-1	7.09	6.74	0.35
8-2	6.78	6.48	0.30
11-1	6.25	6.68	-0.43
11-3	6.27	6.61	-0.34
15-1	6.68	6.95	-0.27
16-1	6.96	6.13	0.83
18-1	6.73	6.35	0.38
18-3	7.16	6.74	0.42
19-2	6.10	6.25	-0.15
19-3	6.53	6.47	0.06

表6 辽宁黄瓦窑清代琉璃构件胎体及釉层的热膨胀系数 α

Table 6 The thermal expansion coefficient of the samples of Huangwa kiln of Liaoning ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

样品编号	a 胎 (50~400 $^{\circ}\text{C}$)	a 釉理论 (20~400 $^{\circ}\text{C}$)	a 胎-a 釉理论
WLLM-0013	9.60	6.51	3.09
WLLM-0014	9.09	5.93	3.16
WLLM-0015	8.68	6.57	2.11
WLLM-0021	9.75	6.73	3.02
WLLM-0039	9.27	6.64	2.63
WLLM-0044	9.24	6.47	2.77
WLLM-0045	8.67	6.58	2.09
WLLM-0046	9.04	6.67	2.37
WLLM-0047	9.22	6.97	2.25
WLLM-0048	8.61	6.53	2.08
WLLM-0049	9.00	5.83	3.17

从表5~6可以看出,北京故宫清代琉璃釉层的热膨胀系数在 $(6\sim7)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间,这与辽宁黄瓦窑清代建筑琉璃样品釉层的热膨胀系数是非常接近的。而北京故宫琉璃构件胎体的热膨胀系数在 $(4\sim7)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间,辽宁黄瓦窑清代建筑琉璃构件胎体的热膨胀系数在 $(8\sim10)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间,

差别很大。

从图4的两地清代琉璃构件胎釉匹配关系(a胎-a釉理论)来看,北京故宫琉璃构件胎的热膨胀系数与釉层的热膨胀系数接近或略低一些,即a胎-a釉理论多为负值。在这种匹配关系下琉璃釉层承受胎体的张应力,其釉层上的裂纹应表现为张应力裂纹。而辽宁黄瓦窑胎的热膨胀系数比釉层的热膨胀系数一般要高 $(2\sim 3)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,显然琉璃釉层承受胎体的压应力。在通常情况下,釉的抗压强度比抗张强度大得多^[16]。已有的研究工作也认为^[17],釉比胎体的热膨胀系数小 $(1\sim 2)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 较为适宜,可使釉层承受适当的压应力。即当釉层的热膨胀系数略小于胎体的热膨胀系数时,釉层不易开裂。从这个角度来看,辽宁黄瓦窑清代琉璃构件的胎釉热膨胀系数匹配性要好于北京故宫清代琉璃构件。至于胎釉匹配关系对釉层开裂、剥落的影响还有待于进一步研究。

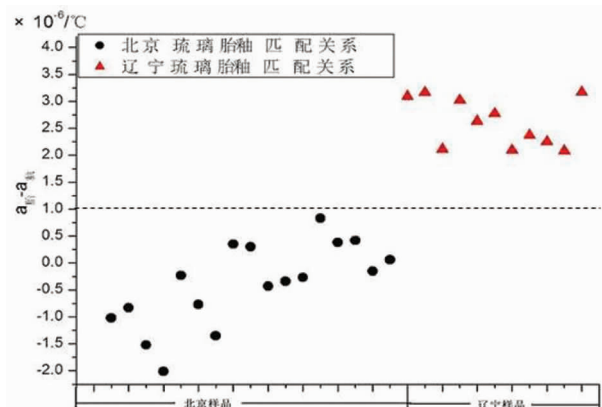


图4 两地琉璃构件胎釉匹配关系

Fig. 4 The matching of the thermal expansion coefficient of body and glaze

3 结论

两地的琉璃匠人多由山西迁入,因此两地琉璃构件的烧制以及釉料的配方多受山西琉璃制作技术的影响。同时,北京门头沟琉璃渠和辽宁黄瓦窑均属清代官窑,在官府的统一监督管理^[4]下,两地有琉璃制作技术的交流,如“侯氏厂工与北平官窑赵氏通,有大工则互助挹注”^[2]。因此,两地古代建筑琉璃构件存在相似性。但是北京地区使用门头沟琉璃渠一带的矸子土烧制琉璃胎体,而辽宁黄瓦窑胎体原料主要取自海城^[2],因此两地古代建筑琉璃构件也存在着差异。通过本文的研究得到以下三点结论:

1) 两地清代琉璃构件釉料的化学组成基本一

致,均由50%~60%的 PbO 、30%~40%的 SiO_2 、1~9%的 Al_2O_3 和和2%~6%的 Fe_2O_3 组成,均属于铅-硅-铝体系。

2) 两地清代琉璃构件胎体原料不同,北京故宫清代琉璃构件胎体化学组成属于硅-铝体系,辽宁黄瓦窑的琉璃构件则属于硅-铝-镁体系。

3) 北京故宫清代琉璃构件胎的热膨胀系数比釉层的热膨胀系数一般要低一些,琉璃釉层承受胎体的张应力;而辽宁黄瓦窑胎的热膨胀系数比釉层的热膨胀系数一般要高 $2\sim 3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,琉璃釉层承受胎体的压应力。

参考文献:

- [1] 潘谷西. 中国古代建筑史[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001:492-498.
PAN Gu-xi. China Ancient Architectural History[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001:492-498.
- [2] 刘敦桢. 琉璃窑轶闻[J]. 中国营造学社汇刊, 1932,3(3):173-178.
LIU Dun-zhen. The fame about the Glazed tile kiln[J]. China Archit Org J. 1932,3(3):173-178.
- [3] 陈万里. 陈万里陶瓷考古文集[M]. 北京:紫禁城出版社,1997:210-217.
CHEN Wan-li. The archeological corpus of CHEN Wan-li[M]. Beijing:Forbidden City Press, 1997:210-217.
- [4] 王光尧. 中国古代官窑制度[M]. 北京:紫禁城出版社,2004.
WANG Guang-yao. Ancient Chinese kiln system[M]. Beijing:Forbidden City Press, 2004.
- [5] 富品莹,路世辉. 辽宁海城黄瓦窑遗址调查报告[J]. 沈阳故宫博物院院刊,2007,(4).
FU Pin-ying, LU Shi-hui. Report for the Huangwa kiln in Haicheng[J]. Shenyang Palace Museum J, 2007,(4).
- [6] 李全庆. 中国古建筑琉璃技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1987:5-6.
LI-Quan-qing. Chinese ancient buildings glazed technology[M]. Beijing:China Architecture & Building Press, 1987:5-6.
- [7] 李合,丁银忠,段鸿莺,等. EDXRF无损测定琉璃构件釉主、次量化学[J]. 文物保护与考古科学, 2008,20(4):36-40.
LI-He, DING Yin-zhong, DUAN Hong-ying, et al. Non-destructive determination of the major and minor elements of the lead glaze by EDXRF[J]. Sci Conserv Archaeol, 2008,20(4):36-40.
- [8] 段鸿莺,梁国立,苗建民. WDXRF对古代建筑琉璃构件胎体主、次量化学定量分析方法研究[C]//《古陶瓷科学技术论文集》. 上海:上海科学技术文献出版社,2009:119-124.
DUAN Hong-ying, LIANG Guo-li, MIAO Jian-min. The WDXRF quantitative analysis method research on the major and minor element compositions of the bodies of ancient building glazed tiles[C]//The Memoir of the international symposium on ancient ceramics. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 2009:119-124.
- [9] 干福熹. 硅酸盐玻璃物理性质变化规律及其计算方法[M]. 北

- 京:科学出版社,1966:124-128.
GAN Fu-xi. The variation and calculation method of physical properties of silicate glass[M]. Beijing:Science Press,1966:124-128.
- [10] 苗建民,王时伟. 紫禁城清代剥釉琉璃瓦件施釉重烧的研究[J]. 故宫博物院院刊,2005,(1):472-488.
MIAN Jian-min, WANG Shi-wei. Research on reglazed and re-firing the peeled glazed tiles of the Palaces in the Forbidden city of the Qing dynasty[J]. Palace Mus J,2005,(1):472-488.
- [11] 古代建筑琉璃物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 Mus J, 2008,(5):115-129.
- [12] 中国科学院自然科学史研究所. 中国古代建筑技术史[M]. 北京:科学出版社1985.
Institute for the History of Natural Science Chinese Academy of Sciences. China ancient architectural technology history[M]. Beijing:Science Press,1985.
- [13] 刘大可. 明清官式琉璃艺术概论(上)[J]. 古建园林技术, 1995,(4):29-32.
LIU Da-ke. Glazed tiles Art Conspectus of Ming and Qing dynasties[J]. Ancient Archit Landscape Technol,1995,(4):29-32.
- [14] 苗建民,王时伟. 元明清建筑琉璃瓦的研究[C]//古陶瓷科学技术论文集. 上海:上海科学技术文献出版社,2005:108-115.
MIAN Jian-min, WANG Shi-wei. Research on the architecture glazed tiles of Yuan, Ming and Qing dynasties[C]//The Memoir of the international symposium on aneient ceramics. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 2005:108-115.
- [15] 康葆强,段鸿莺,丁银忠,等. 黄瓦窑琉璃构件胎釉原料及烧制工艺研究[J]. 南方文物,2009,(3):116-122.
KANG Bao-qiang, DUAN Hong-ying, DING Yin-zhong, et al. The Research on raw materials and manufacturing technology of architectural glazed tiles produced of Huangwa Kiln. [J]. Southeast Culture, 2009,(3):116-122.
- [16] 李家驹. 陶瓷工艺学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003:205-208.
LI Jia-ju. The ceramic technology[M], Beijing:China Light Industry Press,2003:205-208.
- [17] 朱肇春,叶龙耕,王满林. 日用精陶坯釉结合性能的研究[J]. 硅酸盐学报,1978,6(4):270-275.
ZHU Zhao-chun, YE Long-geng, WANG Man-lin. Research on the combining properties of body and glaze of ceramics[J]. Je Chin Cer Soc,1978,6(4):270-275.

The comparison of glazed tiles from the Palace Museum, Beijing and Huangwa kiln of Liaoning, Qing Dynasty

LI He, DUAN Hong-ying, DING Yin-zhong, DOU Yi-cun, HOU Jia-yu, MIAO Jian-min

(The examination laboratory on ancient ceramics, the Palace Museum, Beijing 100009, China)

FU Pin-ying, ZHAO Chang-ming

(The Anshan Museum, Anshan 114001, China)

Abstract: To reveal the raw materials, technology and property difference of the Qing Dynasty glazed tiles from different regions, the chemical composition of the body and lead glaze of the glazed tiles from the Palace Museum, Beijing and Huangwa kiln, Liaoning were analyzed by WDXRF and EDXRF. The thermal expansion coefficient of the body and glaze was investigated by thermal expansion instrument and theoretical calculation. Based on the result, the correlation of the chemical contents of the body and lead glaze of the glazed tiles and its thermal expansion coefficient was studied. The results showed that the glazed tiles from the two places have very similar glaze composition but their tile bodies are different. Qing Dynasty glazed tiles from the Palace Museum have Si-Al tile body, while those from the Huangwa kiln belong to Si-Al-Mg group. Therefore, their thermal expansions have different correlation factors.

Key words: Architectural glazed tiles; Chemical composition; Correlation of body and glaze