



黄瓦窑琉璃构件胎釉原料及烧制工艺研究*

◆ 康葆强 段鸿莺 丁银忠 李 合 苗建民 (故宫博物院)

◆ 赵长明 富品莹 (辽宁鞍山市博物馆)

摘 要:黄瓦窑位于我国辽宁省鞍山市海城地区,经专家考证它是专门为清代辽宁地区烧制皇家建筑琉璃构件的窑厂。本文利用 X 射线荧光波谱法、X 射线衍射法、热膨胀分析等方法研究了黄瓦窑琉璃的胎釉原料及烧制工艺情况。研究表明,黄瓦窑烧制的建筑琉璃为低温铅釉、二次烧成,胎体属于我国陶瓷史上比较少见的 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元体系,胎体的热膨胀系数比釉层高 $2\sim 3\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

关键词:黄瓦窑,琉璃构件,原料组成,工艺

Abstract Huangwa Kiln is located at Haicheng area, Anshan City, Liaoning Province. According to historical documents and archaeological investigations, it is an imperial kiln for producing architectural glazed tiles in the Qing dynasty. The present research concentrates on manufacturing technology and properties of architectural glazed tiles produced by Huangwa Kiln. In the research, several techniques such as WDXRF, XRD, thermal expansion analysis were used. Some important results are as follows: the glazed tiles are low-fired lead glazes and twice-fired products; chemical compositions of the bodies fall into the $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ternary system, which is a rare system in the history of ancient ceramics in China; the coefficients of thermal expansion of the bodies are $2\sim 3\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ higher than those of the glazes.

Key words Huangwa Kiln, architectural glazed tiles, raw materials, technology

黄瓦窑遗址位于我国辽宁省鞍山市海城地区,遗址面积近 16 万平方米。2002 年 4 月 10 日至 2006 年 5 月,鞍山市博物馆考古队对黄瓦窑遗址进行了调查,在遗址及附近的缸窑岭村采集了建筑构件标本约 100 件,发现了一批具有“永陵”,“福陵”,“昭陵”,“清宁宫”“北镇庙”等文字标识的构件。根据历史文献记载及采集实物的情况来看,黄瓦窑应为烧造沈阳故宫及关外三陵、北镇庙等处琉璃构

件的窑厂。本工作主要从科技检测的角度对黄瓦窑琉璃的胎釉原料及烧制工艺情况进行了研究。

一. 实验样品

实验中用到的黄瓦窑遗址样品及辽宁地区古建筑琉璃样品都由鞍山市博物馆提供,遗址样品为鞍山市博物馆考古队在遗址发掘调查过程中采集,古建筑琉璃样品来自于古建筑维修卸下的构件。样品编号 WLLM-0008~WLLM-0048 为黄瓦窑遗址的样

* 本研究得到了国家“十一五”重点科技支撑项目 2006BAK31B02 和国家文物局指南针计划试点项目《黄瓦窑琉璃制作工艺科学揭示与建立多媒体数字化展示平台的研究》的资助。

品,WLLM-0049~WLLQ-0062 为沈阳故宫、北宁市北镇庙、沈阳福陵、抚顺新宾永陵的古建筑琉璃样品。辽阳八角金殿的琉璃样品为黄瓦窑的早期制品。另外,鞍山市博物馆考古队在黄瓦窑遗址调查时发现“采白土区”和“采红土区”两个原料采集点,LY-0014 为从“采白土区”采集的白色粘土,hongtu-hwy 为从“采红土区”采集的红色粘土。样品具体情况见表一。

表一 黄瓦窑样品及辽宁古建筑琉璃样品基本信息

序号	样品编号	样品名称	款识	来源
1	WLLM-0008	黄釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
2	WLLM-0010	红褐釉筒瓦	无	黄瓦窑遗址
3	WLLM-0011	红褐釉筒瓦	无	黄瓦窑遗址
4	WLLM-0012	红褐釉板瓦	无	黄瓦窑遗址
5	WLLM-0013	黄釉板瓦	无	黄瓦窑遗址
6	WLLM-0014	黄釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
7	WLLM-0015	黄釉勾头	无	黄瓦窑遗址
8	WLLM-0018	红褐釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
9	WLLM-0021	红褐釉当沟	无	黄瓦窑遗址
10	WLLM-0025	孔雀蓝釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
11	WLLM-0029	孔雀蓝釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
12	WLLM-0030	红褐釉勾头	无	黄瓦窑遗址
13	WLLM-0031	红褐釉滴水	无	黄瓦窑遗址
14	WLLM-0033	绿釉琉璃构件	无	黄瓦窑遗址
15	WLLM-0038	绿釉筒瓦	无	黄瓦窑遗址
16	WLLM-0039	黄釉筒瓦	无	黄瓦窑遗址
17	WLLM-0044	红褐釉构件	无	黄瓦窑遗址
18	WLLM-0045	黄釉滴水	无	黄瓦窑遗址
19	WLLM-0046	红褐釉构件	“福陵角娄□脊”	黄瓦窑遗址
20	WLLM-0047	红褐釉勾头	无	黄瓦窑遗址
21	WLLM-0048	红褐釉构件	“昭陵角楼”	黄瓦窑遗址
22	WLLM-0049	黄绿釉套兽	“大正殿”	沈阳故宫维修拆卸
23	WLLE-0050	绿釉龙纹垂脊兽	“北镇庙前山门”	辽宁省北宁市北镇庙调拨
24	WLLE-0051	绿釉龙纹滴水	无	辽宁省北宁市北镇庙拆卸
25	WLLE-0052	釉龙纹滴水	无	辽宁省北宁市北镇庙拆卸
26	WLLE-0053	红褐釉垂脊兽	“福陵角娄”	沈阳福陵维修拆卸
27	WLLQ-0054	红褐釉垂脊兽	“永陵四碑娄”	辽宁省新宾永陵遗址采集
28	WLLQ-0055	红褐釉垂脊兽	“启运殿”	辽宁省新宾永陵遗址采集
29	WLLQ-0056	黄釉脊筒残件	“永陵□□”	辽宁省新宾永陵遗址采集
30	WLLQ-0057	黄釉套兽	“永陵碑楼”	辽宁省新宾永陵遗址采集
31	WLLQ-0058	红褐釉龙纹脊筒残件	无	辽宁省新宾永陵遗址采集
32	WLLQ-0059	红褐釉筒瓦	无	辽宁省新宾永陵遗址采集
33	WLLQ-0061	红褐釉混砖	“永陵”	辽宁省新宾永陵遗址采集
34	WLLQ-0062	红褐釉大吻残件	无	辽宁省新宾永陵遗址采集
35	LY-0014	白色粘土	无	黄瓦窑遗址
36	hongtu-hwy	红色粘土	无	黄瓦窑遗址

注:“□”表示不能确定的文字

分析样品的釉色有红褐釉、黄釉、绿釉、孔雀蓝釉、黄绿两色釉。其中红褐釉样品 18 个,黄釉样品 8 个,绿釉样品 5 个,孔雀蓝釉样品 2 个,黄绿釉样品 1 个(釉色情况见图一~图四)。胎体情况:大多数样品的胎体基体中存在夹杂物,基体呈橘黄至橘红色,夹杂物以白色颗粒物为主,也有褐色、黑色颗粒物(见图五)。

二. 实验结果与讨论

2.1 胎体的化学组成和物相组成

对表一琉璃样品胎体及白色、红色粘土进行了元素分析和物相分析。元素分析方法见《WDXRF 对古代建筑琉璃构件胎体主微量元素定量分析方法研究》,红色粘土的元素组成利用 WDXRF 的 IQ 法,使用压片法制样,未测烧失量;物相分析使用理学 D/max-2550PC 型 X 射线衍射仪,工作条件为:管压 40kV,管流 150mA,扫描角度范围 $3^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扫描速度 $8^{\circ}/\text{min}$, $DS=SS=1^{\circ}$, $RS=0.3\text{m}$,制样用铝样品槽,背压法。元素分析结果见表二。

从对表二的分析可以看出,黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体属于我国陶瓷史上比较少见的 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元系统。 MgO 含量 $15\% \sim 25\%$, Al_2O_3 含量 $13\% \sim 17\%$, SiO_2 含量 $50\% \sim 56\%$,三种元素之合占总体的 $86\% \sim 90\%$ 。另外,胎体中的 Fe_2O_3 含量较高,胎体颜色偏红应与此有关。李文杰等总结了我国新石器时代至汉代制陶所用的粘土,其中的高镁质易熔粘土 MgO 含量在



图一 WLLM-0047(红褐釉)



图二 WLLM-0045(黄釉)



图三 WLLM-0051(绿釉)



图四 WLLM-0049(黄绿釉)



图五 WLLM-0048 胎体的断面

18.66% ~ 29.36%,
Al₂O₃ 含量在
5.41% ~ 5.84%, SiO₂
含量在 54.85% ~
68.06%, 具有此类
化学组成特征的
器物有湖北枝城

北遗址城背溪文化的白陶、关庙山遗址大
溪文化的白陶、广东后沙湾遗址新石器时
代文化的白陶、内蒙古敖汉旗夏家店上层
文化的陶串珠。李家治^⑥对新石器时代中、
晚期白陶的化学组成进行总结时也发现
MgO 较高、Al₂O₃ 较低的类型, 指出大溪文
化的白陶属于该类型。黄瓦窑、辽宁古建筑

表二 黄瓦窑样品及辽宁古建筑琉璃胎体的元素分析结果(wt%)

序号	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	LOI	sum
1	WLLM-0008	0.58	19.95	15.15	54.29	0.10	1.61	1.18	0.63	0.06	3.53	2.71	99.80
2	WLLM-0010	0.53	19.31	15.81	53.15	0.12	2.10	1.91	0.63	0.05	3.47	3.36	100.42
3	WLLM-0011	0.64	16.37	16.89	55.83	0.12	2.33	1.11	0.68	0.06	3.98	1.79	99.80
4	WLLM-0012	0.44	22.04	14.96	51.65	0.11	1.44	1.57	0.60	0.05	3.20	3.72	99.76
5	WLLM-0013	0.47	20.40	15.23	53.37	0.13	1.41	1.54	0.62	0.06	3.37	3.71	100.29
6	WLLM-0014	0.58	18.60	15.16	54.09	0.12	1.61	1.66	0.63	0.06	3.55	3.93	100.00
7	WLLM-0015	0.63	20.21	15.33	54.51	0.11	1.59	1.09	0.64	0.06	3.54	2.73	100.42
8	WLLM-0018	0.46	19.59	14.90	52.73	0.13	1.67	1.60	0.61	0.06	3.54	4.50	99.80
9	WLLM-0021	0.60	18.40	15.82	54.63	0.10	1.98	0.93	0.64	0.06	3.65	3.00	99.80
10	WLLM-0025	0.52	19.08	15.71	53.89	0.11	1.86	1.53	0.63	0.06	3.46	3.38	100.23
11	WLLM-0029	0.60	18.29	15.51	54.50	0.12	1.92	1.56	0.64	0.07	3.75	3.28	100.23
12	WLLM-0030	0.51	20.58	15.59	52.28	0.10	2.03	1.05	0.62	0.05	3.33	3.89	100.02
13	WLLM-0031	0.53	18.68	16.23	54.49	0.12	2.00	1.36	0.65	0.06	3.56	2.73	100.41
14	WLLM-0033	0.62	17.88	15.56	54.51	0.09	1.94	1.19	0.63	0.06	3.63	3.64	99.76
15	WLLM-0038	0.54	17.57	15.82	54.89	0.12	2.07	1.25	0.64	0.06	3.55	3.21	99.72
16	WLLM-0039	0.45	19.88	15.39	52.97	0.12	1.68	1.60	0.62	0.05	3.25	4.03	100.04
17	WLLM-0044	0.64	18.66	15.24	53.77	0.13	1.60	2.01	0.66	0.06	3.43	3.61	99.80
18	WLLM-0045	0.82	18.98	15.19	53.56	0.09	1.88	1.15	0.63	0.06	3.64	3.79	99.80
19	WLLM-0046	0.65	16.29	15.86	54.35	0.14	2.11	1.83	0.66	0.07	4.15	3.70	99.80
20	WLLM-0047	0.61	20.36	14.85	53.80	0.11	1.51	1.21	0.62	0.06	3.49	3.20	99.80
21	WLLM-0048	0.64	19.52	15.36	54.34	0.10	2.01	0.95	0.62	0.05	3.41	2.80	99.80
22	WLLM-0049	0.62	21.16	15.17	51.34	0.10	1.35	1.79	0.63	0.05	3.04	4.55	99.80
23	WLLM-0050	0.58	15.15	16.39	54.83	0.10	2.65	1.20	0.67	0.06	4.62	3.56	99.80
24	WLLM-0051	0.60	18.38	15.63	54.15	0.09	1.70	1.65	0.64	0.06	3.48	3.41	99.80
25	WLLM-0052	0.59	18.35	15.69	54.46	0.10	1.78	1.38	0.64	0.06	3.49	3.26	99.80
26	WLLM-0053	0.55	17.47	15.94	54.11	0.09	1.95	1.44	0.66	0.06	3.87	3.67	99.80
27	WLLM-0054	0.57	18.19	16.33	55.11	0.09	1.96	0.89	0.66	0.05	3.54	2.41	99.80
28	WLLM-0055	0.56	20.03	15.79	54.09	0.10	1.70	0.94	0.65	0.05	3.44	2.43	99.80
29	WLLM-0056	0.46	22.29	14.23	50.40	0.10	1.41	0.96	0.59	0.05	3.22	6.08	99.80
30	WLLM-0057	0.45	21.63	15.16	51.27	0.11	1.60	1.30	0.60	0.05	3.29	4.34	99.80
31	WLLM-0058	0.56	19.68	15.51	53.43	0.11	1.69	1.29	0.64	0.05	3.48	3.37	99.80
32	WLLM-0059	0.46	24.28	13.30	50.05	0.09	0.92	1.13	0.57	0.05	2.94	6.02	99.80
33	WLLM-0061	0.51	16.90	16.39	54.84	0.09	1.92	1.37	0.67	0.06	3.88	3.18	99.80
34	WLLM-0062	0.68	16.10	15.35	55.49	0.10	1.82	1.91	0.69	0.07	3.93	3.66	99.80
35	LY-0014	0.08	33.16	8.38	31.10	0.05	0.75	0.49	0.27	0.01	1.12	24.38	99.80

表三 黄瓦窑样品及辽宁古建筑琉璃胎体的 X 射线衍射物相结果

序号	样品编号	物相种类
1	WLLM-0008	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石、钠长石
2	WLLM-0010	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
3	WLLM-0011	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
4	WLLM-0012	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
5	WLLM-0013	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
6	WLLM-0014	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
7	WLLM-0015	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
8	WLLM-0018	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
9	WLLM-0021	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
10	WLLM-0025	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
11	WLLM-0029	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
12	WLLM-0030	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石、云母
13	WLLM-0031	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
14	WLLM-0033	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母、滑石
15	WLLM-0038	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母
16	WLLM-0039	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
17	WLLM-0044	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
18	WLLM-0045	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
19	WLLM-0046	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
20	WLLM-0047	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母、滑石
21	WLLM-0048	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母、滑石
22	WLLM-0049	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
23	WLLM-0050	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母
24	WLLM-0051	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
25	WLLM-0052	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
26	WLLM-0053	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母
27	WLLM-0054	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
28	WLLM-0055	石英、镁橄榄石、顽火辉石、尖晶石、微斜长石
29	WLLM-0056	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母、滑石
30	WLLM-0057	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母、滑石
31	WLLM-0058	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石、云母
32	WLLM-0059	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、钠长石
33	WLLM-0061	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石、云母
34	WLLM-0062	石英、镁橄榄石、顽火辉石、微斜长石
35	LY-0014	菱镁矿、斜绿泥石、滑石、石英、白云母、白云石
36	hongtu- hwy	石英、斜绿泥石、钠长石、微斜长石、白云母、滑石、菱镁矿

琉璃胎体与上述新石器时代的陶器与相比, SiO_2 含量较低, Al_2O_3 含量较高, 助熔成分中 K_2O 含量较高。

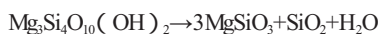
黄瓦窑样品及辽宁古建筑琉璃胎体的 X 射线衍射物相结果见表三。所有琉璃样品都含石英、微斜长石、镁橄榄石和顽火辉石。其中, 镁橄榄石和顽火辉石为特征矿物, 化学式分别为 Mg_2SiO_4 、 MgSiO_3 , 与胎体含镁量较高的化学组成相符。部分样品中存在白云母、钠长石、尖晶石, 少量样品中存在滑石。

WLLM-0045 和 WLLQ-0057 的 X 射线衍射图谱见图六、图七。

刘敦桢先生在《琉璃窑轶闻》中提到黄瓦窑烧琉璃所用的原料情况:“用料以白马牙石与坩子土、赭石为大宗, 皆产海城。又坩子土及白泥土出沈阳城东二十里王家沟, 但白土仍须向海城取之。”白马牙石和赭石可能为配制釉的原料, 坩子土和白土可能为制胎原料。白色粘土 LY-0014 的元素分析和物相分析结果表明:样品的 MgO 和烧失量都很高, 分别为 33.16% 和 24.38%, 扣除烧失量后其主要元素组成为: 43.97% MgO , 11.12% Al_2O_3 , 41.23% SiO_2 , 1% K_2O , 1.49% Fe_2O_3 。与琉璃样品的胎体相比, LY-0014 的 MgO 含量较高, Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 含量较低; 其物相结果为菱镁矿、斜绿泥石、滑石、石英、白云母、白云石。红色粘土中元素含量在 1% 以上的成分为: 0.99% Na_2O , 5.12% MgO , 18.44% Al_2O_3 , 64.58% SiO_2 , 2.56% K_2O , 1.05% CaO , 5.71% Fe_2O_3 。与白色粘土相比, SiO_2 、 Al_2O_3 含量较高, MgO 含量较低, 并含有一定量 Na_2O , K_2O , CaO 助熔成分, 含有较高 Fe_2O_3 的粘土。这一成分特征恰好可以弥补白色粘土与胎体相比“缺失”的部分。从红色粘土含有长石的物相特征来看, 也满足胎体的原料要求。

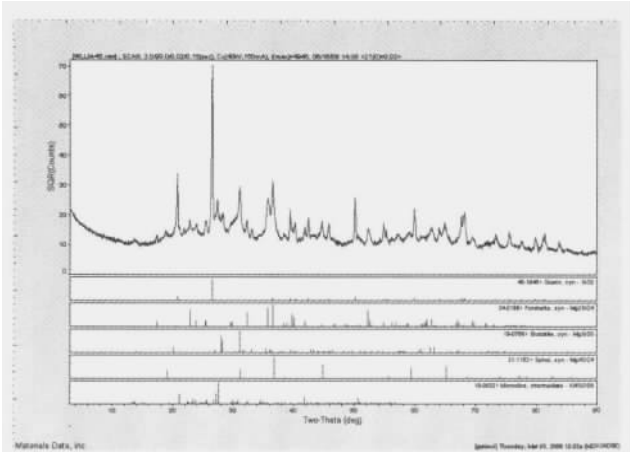
结合琉璃样品胎体的物相分析结果来看, 胎体中镁橄榄石和顽火辉石可能为斜绿泥石受热的产物。“加热到 700℃ 后, 斜绿泥石脱去层间片中羟基……当加热到 1000℃ 时, 出现镁橄榄石和顽火辉石的特征峰, 峰形清晰, 以前者为主。继续加热到 1200℃, 仍为上述两种矿物, 但顽火辉石的衍射强度大大提高。”顽火辉石也可能是滑石的受热产物。滑石脱羟后形成顽火辉

石和非晶质二氧化硅, 其变化为:

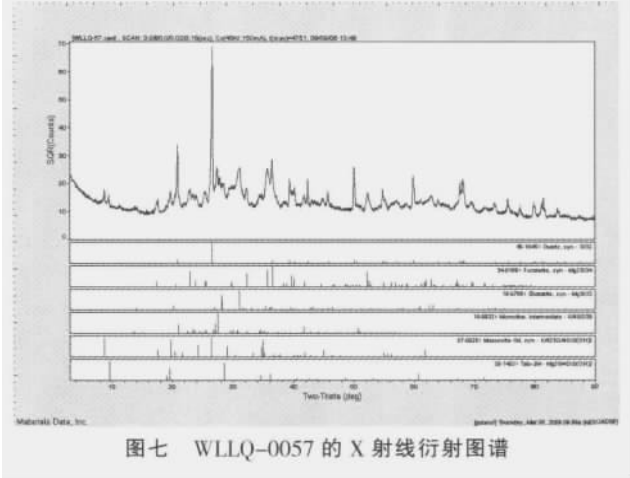


滑石 顽火辉石

根据元素、物相分析结果可初步判断, 白色粘土和红色粘土经过一定比例地配制可作为黄瓦窑制作琉璃胎体的原料。白色粘土是胎体中 MgO 的主要来源, 红色粘土的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量较高, 含有一定量 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 助熔成分, 物相组成中含有微



图六 WLLM-0045 的 X 射线衍射图谱



图七 WLLQ-0057 的 X 射线衍射图谱

斜长石、钠长石。

2.2 烧制工艺及高温实验

采用周仁、李家治先生的实验方法，用德国耐驰公司的 DIL-402C 型热膨胀分析仪，在空气气氛中以 5℃/ 分的升温速率测量坯体的热膨胀分析曲线，由此确定样品的烧成温度。利用电钻对釉层进行取

样，利用北京电影机械研究所生产的高温物性测试仪对釉的软化点、半球点、流动点进行观测，半球点到流动点的温度范围即为釉的熔融温度范围，见表四。表中 17 个样品中测量了 15 个样品胎体的烧成温度，7 个样品的釉的熔融温度范围，5 个样品对胎体和釉层都做了测量。

从表四可以看出，黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的烧成温度大约在 970~1030℃ 之间，釉的熔融温度范围在 700~950℃ 之间，应为先进行素烧，随后施釉进行釉烧。结合鞍山市博物馆对黄瓦窑的抢救发掘过程中^①发现素烧窑的事实，黄瓦窑的琉璃烧造为二次烧成。

鉴于黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的烧成温度较低（大多低于 1000℃），对 MgO 含量相差近 5% 的两个建筑琉璃样品 WLLQ-0049 和 WLLQ-0061 进行了高温实验。把两个样品分别切取两个样块，用高温电炉加热至 1050℃、1100℃ 保温 1 小时。对加热后的样品进行了 X 射线衍射分析。结果发现，在温度升高过程中，石英和微斜长石的含量下降，顽火辉石的量增加，尖晶石含量增加或大量出现。两个样品随温度升高不同的变化为：WLLQ-0061 在加热到 1050℃ 后，云母消失（WLLM-0049 样品中不含云母，见表三）；WLLM-0049 中镁橄榄石的量变化不明显，WLLQ-0061 的镁橄榄石量降低。它们随温度升高表现出略有差异的变化，应与两者 MgO 和 SiO₂ 的相对比例不同以及 K₂O、CaO、Fe₂O₃ 等助熔成分的含量不同有关，见表二。

结合表三和表四可以看出，胎体烧成温度在 1000℃ 以下的样品，如 WLLM-0014、WLLM-0033、WLLM-0038、WLLM-0039、WLLM-0046、WLLM-0047、

表四 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的烧成温度及釉层的熔融温度范围（℃）

序号	样品编号	烧成温度	软化点	半球点	流动点	熔融温度范围	序号	样品编号	烧成温度	软化点	半球点	流动点	熔融温度范围
1	WLLM-0008	1010± 20					10	WLLM-0044	1000± 20	710	850	940	850~940
2	WLLM-0012		700	820	920	820~920	11	WLLM-0045	1030± 20	630	730	860	730~860
3	WLLM-0013	1000± 20					12	WLLM-0046	980± 20				
4	WLLM-0014	970± 20					13	WLLM-0047	990± 20	660	850	920	850~920
5	WLLM-0015		690	830	930	830~930	14	WLLM-0048	980± 20				
6	WLLM-0021	1000± 20	660	780	930	780~930	15	WLLM-0049	1010± 20				
7	WLLM-0033	990± 20					16	WLLQ-0053	970± 20				
8	WLLM-0038	980± 20					17	WLLQ-0061	970± 20				
9	WLLM-0039	980± 20	690	770	920	770~920							

表五 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃釉层(红褐釉和黄釉)元素的半定量分析结果 (wt%)

序号	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
1	WLLM-00	0.20	1.01	1.59	36.42	55.84	0.70	0.66	0.03	3.37		
2	WLLM-00	0.31	0.36	1.55	33.02	56.11	0.52	0.69	0.03	3.63	3.67	
3	WLLM-00	0.31	1.91	4.33	34.07	52.15	0.93	0.82	0.15	5.06		0.12
4	WLLM-00	0.30	0.95	2.29	35.03	55.65	0.73	0.73	0.06	3.26	0.86	
5	WLLM-00	0.24	0.41	1.61	35.64	58.94	0.67	0.53	0.03	1.73		0.1
6	WLLM-00	0.28	0.82	1.81	40.58	53.64	0.64	0.53	0.06	1.55		
7	WLLM-00	0.36	1.91	3.75	32.89	56.88	0.65	0.42	0.13	2.89		
8	WLLM-00	0.15	0.78	2.51	33.81	54.57	1.88	0.88	0.05	4.59		0.65
9	WLLM-00	0.33	0.49	1.50	33.08	58.97	0.49	0.53	0.04	4.47		
10	WLLM-00	0.31	0.69	2.38	32.40	59.12	0.39	0.27	0.02	3.63	0.73	
11	WLLM-00	0.27	0.63	1.94	32.89	59.48	0.44	0.65	0.03	3.45	0.10	0.1
12	WLLM-00	0.32	1.15	2.84	35.00	54.84	0.75	0.58	0.04	4.34		
13	WLLM-00	0.31	0.82	1.65	33.67	59.87	0.37	0.45	0.08	2.65		
14	WLLM-00	0.36	0.31	1.59	33.90	58.94	0.52	0.46	0.03	3.72		
15	WLLM-00	0.22	0.69	2.86	29.74	59.09	0.63	1.27	0.02	5.17		0.15
16	WLLM-00	0.25	0.46	1.81	34.11	57.71	0.57	0.45	0.03	4.47		
17	WLLM-00	0.34	0.9	2.43	42.36	50.32	0.9	0.63	0.02	1.88		
18	WLLM-00	0.26	0.63	2.49	35.14	56.18	0.64	0.42	0.06	4.01		
19	WLLM-00	0.29	0.63	2.18	36.26	51.14	1.82	1.31	0.07	6.11		0.1
20	WLLM-00	0.32	1.08	3.08	34.32	54.30	1.16	0.34	0.08	5.20		
21	WLLM-00	0.31	0.62	2.87	33.98	57.66	0.35	0.75	0.03	3.22	0.12	
22	WLLM-00	0.20	0.60	3.19	35.34	55.81	0.53	0.98	0.02	3.14		
23	WLLM-00	0.33	0.62	2.35	33.85	56.05	0.76	0.41	0.03	5.45		
24	WLLM-00	0.38	0.63	3.70	35.60	54.86	0.44	0.71	0.04	3.39		
25	WLLM-00	0.20	1.07	2.43	35.47	54.78	0.70	0.87	0.05	4.15		
26	WLLM-00	0.38	0.54	2.78	36.65	54.36	0.43	0.71	0.07	3.90		

WLLM-0048,WLLE-0053, WLLQ-0061 都存在云母 而没有尖晶石 ;1000℃以上样品 如 WLLM-0008 ,WLLM-0045,WLLM-0049 不存在云母 WLLM-0008,WLLM-0045 中有尖晶石。云母和尖晶石在不同烧成温度胎体内的存留情况与上述高温实验结果是相符的。

2.3 胎釉的物理性能

利用 X 荧光能谱仪对黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃的红褐釉和黄釉的元素组成进行半定量分析 ,结果见表五 ;利用表五的结果 根据干福熹法^⑩计算釉的热膨胀系数 见表六。

从表六可以看出 ,黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃釉的热膨胀系数在 $5 \sim 7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间 ,胎体的热膨胀系数在 $8 \sim 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。釉层的热膨胀系数与故宫清代琉璃釉层接近 ,胎体的热膨胀系数明显高于故宫的胎体^⑪。从胎釉的热膨胀匹配关系来看 ,黄瓦窑及

表六 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体及釉层的热膨胀系数匹配情况 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

序号	样品编号	a胎 - a釉理论(干)	a釉理论(干) (50~400℃)	a胎 (50~400℃)	序号	样品编号	a胎 - a釉理论(干)	a釉理论(干) (50~400℃)	a胎 (50~400℃)
1	WLLM-0008	2.47	6.39	8.86	14	WLLM-0046	2.37	6.67	9.04
2	WLLM-0010		6.29		15	WLLM-0047	2.25	6.97	9.22
3	WLLM-0011		6.45		16	WLLM-0048	2.08	6.53	8.61
4	WLLM-0012		6.45		17	WLLM-0049	3.17	5.83	9
5	WLLM-0013	3.09	6.51	9.6	18	WLLQ-0053		6.38	
6	WLLM-0014	3.16	5.93	9.09	19	WLLE-0054		6.96	
7	WLLM-0015	2.11	6.57	8.68	20	WLLQ-0055		6.67	
8	WLLM-0018		7.1		21	WLLQ-0056		6.4	
9	WLLM-0021	3.02	6.73	9.75	22	WLLQ-0057		6.26	
10	WLLM-0031		6.51		23	WLLQ-0058		6.63	
11	WLLM-0039	2.63	6.64	9.27	24	WLLQ-0059		6.22	
12	WLLM-0044	2.77	6.47	9.24	25	WLLQ-0061	2.62	6.38	9
13	WLLM-0045	2.09	6.58	8.67	26	WLLQ-0062		6.21	

表七 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的吸水率(%)

序号	样品编号	吸水率	序号	样品编号	吸水率
1	WLLM-0008	16.79	14	WLLM-0046	17.27
2	WLLM-0010	15.47	15	WLLM-0047	16.18
3	WLLM-0011	16.83	16	WLLM-0048	15.34
4	WLLM-0012	16.07	17	WLLM-0049	12.30
5	WLLM-0013	17.27	18	WLLQ-0053	14.38
6	WLLM-0014	16.45	19	WLLQ-0054	12.78
7	WLLM-0015	17.35	20	WLLQ-0055	16.12
8	WLLM-0018	16.05	21	WLLQ-0056	15.08
9	WLLM-0021	16.34	22	WLLQ-0057	15.42
10	WLLM-0031	15.44	23	WLLQ-0058	14.80
11	WLLM-0039	19.19	24	WLLQ-0059	14.13
12	WLLM-0044	18.01	25	WLLQ-0061	17.55
13	WLLM-0045	16.96	26	WLLQ-0062	16.30

辽宁古建筑琉璃胎体比釉层的热膨胀系数高 $2 \sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 釉层承受胎体的压应力。肉眼观察,釉面裂纹不同于故宫清代琉璃样品。

参照国家标准 GB 2413-81 和 GB/T 3810.3-2006 对黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的吸水率进行了分析,分析结果见表七。从表中可以看出,胎体的吸水率较高,平均值约为 16%。

三. 结 论

1. 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体属于我国陶瓷史上比较少见的 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元体系。胎体中 MgO 含量 15%~25%, Al_2O_3 含量 13%~17%, SiO_2 含量 50%~56%, 三种元素之合占总体的 86%~90%。胎体中的 Fe_2O_3 含量较高,胎体颜色偏红应与此有关。所有样品中都含石英、微斜长石、镁橄榄石和顽火辉石。其中,镁橄榄石和顽火辉石为特征矿物,化学式分别为 Mg_2SiO_4 、 MgSiO_3 ,与胎体含镁量较高的化学组成相符。部分样品中存在白云母、钠长石、尖晶石,少量样品中存在滑石。

2. 根据元素、物相分析结果可初步判断,白色粘土和红色粘土经过一定比例地配制可作为黄瓦窑制作琉璃胎体的原料。白色粘土是胎体中 MgO 的主要来源,红色粘土的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量较高,含有一定量 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 助熔成分,物相组成中含有微斜长石、钠长石。白色粘土和红色粘土中均含有滑石、菱镁矿,反映出海城当地的地质矿产特征。

3. 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体的烧成温度在 $970 \sim 1030^{\circ}\text{C}$ 之间,胎体的吸水率较高,平均值约为 16%。釉的熔融温度范围在 $700 \sim 950^{\circ}\text{C}$ 之间,为低温铅釉、二次烧成的产品。

4. 黄瓦窑及辽宁古建筑琉璃胎体比釉层的热膨胀系数高 $2 \sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 釉层承受胎体的压应力,釉面的裂纹特征不同于故宫清代的琉璃样品。

致谢:感谢鞍山市博物馆的李刚、张旗、白文勋在协同遗址调查、取样过程中付出的辛勤劳动。

注释:

、 、 ⑪ 富品莹、路世辉:《辽宁海城黄瓦窑遗址调查报告》,《沈阳故宫博物院院刊》2007 年第 4 辑。

段鸿莺、梁国立、苗建民:《WDXRF 对古代建筑琉璃构件胎体主微量元素定量分析方法研究》,罗宏杰、郑欣森主编:《'09 古陶瓷科学技术国际讨论会论文集》,上海科学技术文献出版社,2009。

李文杰:《中国古代制陶工艺研究》,第 332 页,科学出版社,1996 年。

李家治:《中国科学技术史·陶瓷卷》,第 32 页,科学出版社,1998 年。

刘敦桢:《琉璃窑轶闻》,《刘敦桢全集》(第一卷),中国建筑工业出版社,2007 年。

杨雅秀等:《中国粘土矿物》,第 152 页,地质出版社,1994 年。

杨雅秀等:《中国粘土矿物》,第 72 页,地质出版社,1994 年。

周仁等:《中国古陶瓷研究论文集》,轻工业出版社,1983 年。

⑫ 干福熹:《硅酸盐玻璃物理性质变化规律及其计算方法》,第 124~128 页,科学出版社,1966 年。

⑬ 古代琉璃构件保护与研究课题组:《清代剥釉琉璃瓦件施釉重烧的再研究》,《故宫博物院院刊》2008 年第 6 期。

(责任编辑:周广明)