

凤阳明中都遗址出土琉璃瓦胎体制作工艺研究

杨桂美^{1,2}, 杨玉璋^{1*}, 姚政权², 张茂林³, 王志², 张居中¹

1. 中国科学技术大学科技史与科技考古系, 安徽 合肥 230026
2. 安徽省文物考古研究所, 安徽 合肥 230601
3. 景德镇陶瓷大学古陶瓷研究所, 江西 景德镇 333001

摘要 为探索明代初期中国琉璃瓦制作工艺技术水平与工艺特点, 运用能量色散 X 射线荧光光谱法(energy disperse X-ray fluorescence, EDXRF), 对安徽凤阳明中都及南京明故宫遗址出土 69 件琉璃瓦样品胎体化学组成进行了测定, 同时利用热膨胀仪、吸水率测定仪和偏光显微镜等仪器设备对样品胎体的烧成温度、吸水率、显气孔率、体积密度与显微结构等进行了分析。分析结果显示, 明中都样品胎体根据元素化学组成差异可分为高钙高铁、低钙高铁和低钙低铁三种类型, 表明该遗址琉璃瓦样品胎体制作原料可能具有不同来源, 同时, 部分明中都样品的化学组成与南京明故宫样品较为接近, 而上述两处遗址样品与北京故宫样品在化学组成上皆具有显著差异。烧成温度、物理性能和显微结构分析结果显示, 明中都琉璃瓦瓷质胎体样品的烧成温度较高, 达到了 1 141 °C, 且吸水率和显气孔率明显较低, 达到了瓷胎的标准, 而陶质胎体琉璃瓦样品的烧成温度约为 880~1 100 °C, 吸水率和显气孔率较大, 且不同样品间差异明显, 这可能是由于明中都琉璃瓦胎体的来源不同, 导致不同样品在烧成温度、吸水率、显气孔率等方面差异较大。与北京、南京二处的琉璃瓦样品相比, 明中都样品吸水率及显气孔率稍微高于二处, 但三处陶胎琉璃瓦样品胎体的烧成温度基本都在 1 100 °C 以下。明中都三种不同类型样品胎体显微结构差异较小, 矿物颗粒粒径和孔隙大小相近, 其中部分石英晶体具有明显的熔蚀边。此外, 明中都和明故宫样品的显微结构特点显示两处遗址样品胎体原料加工皆较为精细, 原料淘洗和烧结程度较高, 琉璃瓦物理性能较好。对明初洪武时期明中都出土琉璃瓦烧制工艺的研究结果, 不仅可为了解我国琉璃瓦工艺发展历程、还可对探索明初琉璃制作工艺和明中都营建的组织形式等提供科学依据。

关键词 明中都; 琉璃瓦; 化学组成; 制作工艺

中图分类号: TU522.2+3

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1280-08

引言

古陶瓷制作工艺及产地来源研究是目前考古学研究的一个重要领域^[1-2]。琉璃瓦是陶瓷材料的一个重要分支。公元 4 世纪南北朝时期, 琉璃瓦开始作为建筑材料被应用在建筑上, 此后的几十年, 琉璃的生产与使用陷入低潮, 生产技术几近失传, 至隋初何稠^[3]“以绿瓷为之, 与真无异。”恢复了琉璃的生产, 为唐代琉璃生产技术的发展奠定了基础, 唐朝时期一方面在隋朝基础上继续恢复琉璃瓦生产技术, 同时又扩大了琉璃制品的应用范围, 此时, 琉璃开始大规模的应用于屋面构件。宋代以后, 开始制作琉璃墙面材料, 使用范围

扩展到构筑物上, 发展到了明代出现了琉璃照壁、琉璃塔、琉璃牌楼和一些琉璃构件, 但是, 明代的琉璃几乎成了官式建筑的专用材料, 并且在种类和颜色的使用上也有了严格的约束^[4]。

近年来, 国家对古建筑保护修复日益重视, 如北京故宫、南京大报恩寺等明清官式建筑先后经历了多次修复或重建, 其中建筑材料中的琉璃瓦引起了很多学者的关注。段鸿莺等^[5]利用波长色散 X 射线荧光光谱法(WDXRF)对北京、江苏、辽宁、湖北、安徽等 13 个省、市 398 个古建筑琉璃构件胎体的化学组成进行了测试, 结果表明, 南方的琉璃构件胎体具有典型的高硅低铝的特点, 北方的琉璃构件则具有高铝低硅的特点, 这与我国南北方陶瓷胎体元素组成的总体特

收稿日期: 2018-03-01, 修订日期: 2018-08-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41772172)和安徽省文物考古研究所合作项目资助

作者简介: 杨桂美, 女, 1984 年生, 中国科学技术大学科技史与科技考古系博士研究生 e-mail: gmyang@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: zzyang@ustc.edu.cn

征是一致的；丁银忠等^[6]通过对南京大报恩寺塔琉璃构件胎体主微量元素和 28 种微量元素组成的研究，初步证实了南京报恩寺塔琉璃胎体原料来源于安徽当涂；康葆强等^[7]以故宫神武门大修中拆下的屋檐琉璃构件为研究对象，利用热释光测年技术判定了瓦件早于故宫清代瓦件，同时利用 X 射线荧光光谱和 X 射线衍射分析 (XRD) 对瓦件进行了成分和物相分析，结果表明神武门瓦件胎体 Na_2O 和 CaO 的含量高于清代瓦件，且物相成分含有脱水叶腊石，判定其产地可能为北京门头沟；康葆强等^[8]利用 WDXRF, XRD 和热膨胀分析法对清代黄瓦窑琉璃构件的胎釉原料及烧制工艺进行了研究，得出黄瓦窑烧制的建筑琉璃为二次烧成的低温铅釉，且胎体属于 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元体系的研究结果。上述研究为了解明清时期琉璃瓦的制作工艺及古建筑的修复等提供了重要的科学依据。然而，目前所见的研究工作基本是以明中期至清这一时期的琉璃瓦为研究对象，而对明代初期琉璃瓦制作工艺等迄今未开展过系统研究。

凤阳明中都是明初都城之一，洪武二年 (1369 年) 九月，朱元璋“诏以临濠为中都……命有司建置城池宫阙，如京师之制”^[9]。为建造中都城，洪武初，“欲以 (凤凰) 山前为京师，定鼎是方，令天下名材至斯”^[10]，全国各地的能工巧匠和优质建材汇聚中都城。自洪武二年下诏起建中都城，至洪武八年罢建，一座规模宏大的都城基本建成，明中都城是中国古代最豪华富丽的都城建筑之一，虽然未被启用，但在城市规划、都城建筑、石雕艺术等方面都具有重要的研究价值。为

配合明中都国家考古遗址公园的建立，2015 年 8 月起安徽省文物考古研究所开始对其进行系统全面的考古发掘，发掘过程中出土了大量的城墙砖、琉璃瓦和琉璃构件，其中琉璃瓦样品釉色丰富，胎质细腻，胎体颜色有砖红、浅红、灰白等色。明中都琉璃瓦代表着明初琉璃制作的最高水平，本文利用 X 射线荧光光谱等多种现代分析技术对该遗址出土琉璃瓦胎体的化学组成、烧成温度、物理性能及显微结构等进行分析，研究结果可为了解明初中国琉璃制作的工艺特点与技术水平提供科学资料。

1 实验部分

1.1 样品

实验样品选自凤阳明中都遗址，共计 55 块，样品主要出土于皇城內奉天殿、承天门等重要地点，有筒瓦和板瓦两种。样品胎体厚度为 19~28 mm，大多数样品胎质细腻，少数较为疏松，胎体以陶胎为主，仅样品 FMZD-26 和 FMZD-31 为瓷胎，胎色有砖红、浅红、灰白等色，部分样品断面上可见明显的褐色斑点。为对明中都琉璃瓦制作工艺进行综合对比研究，实验同时选取 14 块南京明故宫遗址琉璃瓦样品进行分析，样品均为南京市文物考古研究所对南京明故宫遗址进行发掘时采集，样品胎色灰白，胎质坚硬致密，断面可见明显的石英颗粒，胎体厚度为 19~25 mm，部分样品照片见图 1。



图 1 凤阳明中都 (FMZD) 及南京明故宫 (NMGG) 部分琉璃瓦样品

Fig. 1 Pictures of some samples from FMZD and NMGG

1.2 方法

(1) 采用能量色散 X 射线荧光光谱分析方法测量全部琉璃瓦样品胎体的主微量元素。实验设备为美国 EDAX 公司生产的 Eagle-III 型能量色散 X 射线荧光分析仪，束斑直径为 300 μm 。经毛细管光学系统聚焦后的光斑直径为 40 μm ，掠

射和出射角分别为 65° 和 60°。Si(Li) 探测器采用 Al-Cu 合金的 $\text{AlK}\alpha$ 和 CuK 峰来标定能量刻度。

(2) 利用德国耐驰公司生产的 402C 型高温电子膨胀仪，对部分琉璃瓦样品进行烧成温度分析，将样品胎体砌成 0.5 cm × 0.5 cm × 2 cm 的柱状，其中 L_0 , L 分别为样品的原长

表 1 凤阳明中都 (FMZD) 和南京明故宫 (NMGG) 遗址出土琉璃瓦样品胎体的化学组成 (Wt%)
Table 1 Chemical composition of the sample tile glazed bodies from FMZD and NMGG sites (Wt%)

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
FMZD-1	0.82	3.55	15.66	59.54	2.86	10.63	0.32	5.63
FMZD-3	0.27	3.36	17.36	58.93	3.37	9.16	0.50	6.04
FMZD-5	1.34	3.64	15.61	58.29	3.31	10.23	0.43	6.14
FMZD-6	0.68	3.00	13.41	62.20	3.45	10.23	0.39	5.64
FMZD-12	0.03	3.84	14.75	59.85	2.80	11.40	0.66	5.66
FMZD-15	0.63	3.41	13.99	60.98	3.10	10.54	0.36	5.99
FMZD-53	1.32	3.03	15.72	59.17	3.44	9.75	0.36	6.20
FMZD-54	0.91	3.02	15.31	60.22	3.12	9.94	0.37	6.10
FMZD-55	0.92	4.45	16.52	56.92	3.24	10.63	0.48	5.84
FMZD-56	1.68	3.76	15.32	58.14	2.87	10.99	0.33	5.91
FMZD-57	0.88	4.10	16.81	56.41	3.18	10.88	0.45	6.28
FMZD-61	1.80	4.54	16.99	56.36	3.58	9.53	0.53	5.68
FMZD-62	0.03	2.45	14.35	55.60	3.31	17.70	0.29	5.27
FMZD-63	0.88	3.56	15.19	60.08	3.02	10.00	0.54	5.73
FMZD-64	1.69	3.72	15.32	60.04	3.17	8.91	0.41	5.75
FMZD-65	1.40	3.85	15.59	58.58	2.88	10.02	0.48	6.20
FMZD-67	0.74	2.95	13.67	60.91	3.38	11.48	0.51	5.36
FMZD-72	1.57	3.30	15.87	59.34	3.61	8.89	0.52	5.89
FMZD-76	1.09	3.79	16.72	56.36	3.19	11.00	0.46	6.14
FMZD-80	1.05	3.08	14.90	59.68	3.24	10.82	0.40	5.83
FMZD-137	1.52	3.55	14.85	59.76	3.00	10.11	0.42	5.79
FMZD-18	0.03	0.95	18.60	73.00	2.44	0.23	0.59	3.16
FMZD-22	0.66	1.16	20.08	69.86	2.14	0.21	0.73	4.16
FMZD-23	0.44	0.88	21.67	68.78	2.58	0.17	0.66	3.82
FMZD-26	0.03	0.66	21.25	71.83	3.23	0.13	0.46	1.41
FMZD-30	0.85	1.51	20.87	69.38	2.39	0.27	0.66	3.07
FMZD-31	0.28	0.77	24.05	68.27	3.13	0.47	0.52	1.51
FMZD-33	0.48	1.27	22.36	67.96	2.84	0.23	0.71	3.16
FMZD-36	0.38	1.02	20.07	70.22	2.94	0.17	0.75	3.45
FMZD-39	0.03	0.95	19.50	71.80	2.66	0.24	0.62	3.20
FMZD-40	0.78	1.14	21.44	69.18	2.34	0.24	0.66	3.22
FMZD-45	0.43	1.00	22.01	68.39	2.88	0.20	0.69	3.40
FMZD-48	0.42	0.95	21.79	68.72	2.58	0.23	0.67	3.63
FMZD-49	0.64	0.81	19.49	72.79	1.96	0.25	0.61	2.45
FMZD-51	0.66	1.28	22.54	66.97	4.28	0.58	0.56	2.13
FMZD-58	1.71	1.18	13.69	74.66	1.96	1.18	0.31	4.30
FMZD-68	0.40	1.31	19.43	70.26	2.37	0.52	0.62	4.09
FMZD-70	0.03	1.02	23.29	67.48	2.75	0.20	0.67	3.56
FMZD-71	0.03	1.30	14.39	74.39	2.19	1.21	1.21	4.28
FMZD-88	0.2	0.84	18.69	72.79	2.33	0.19	0.69	3.27
FMZD-116	0.43	0.89	20.61	69.39	2.38	0.28	0.73	4.29
FMZD-118	0.41	0.78	20.68	70.70	2.28	0.22	0.60	3.33
FMZD-120	0.03	0.85	20.34	72.01	2.22	0.25	0.63	2.67
FMZD-121	0.42	0.83	19.01	73.30	1.90	0.22	0.65	2.69
FMZD-122	0.53	0.85	22.10	68.43	2.52	0.18	0.80	3.60
FMZD-124	0.30	0.84	20.69	70.35	2.44	0.19	0.66	3.53
FMZD-136	0.03	1.27	22.48	67.89	2.82	0.19	0.62	3.70
FMZD-10	2.24	2.53	18.71	65.60	2.47	1.20	0.56	5.68
FMZD-59	0.84	1.62	17.66	68.46	2.44	1.35	0.43	6.20
FMZD-85	0.20	1.05	21.65	66.44	3.17	0.32	0.57	5.60
FMZD-95	0.93	1.74	23.26	62.53	3.28	0.37	0.56	6.32
FMZD-96	1.00	1.73	23.98	61.99	3.09	0.39	0.65	6.17

续表 1

FMZD-98	0.54	1.80	24.68	62.03	3.14	0.45	0.61	5.76
FMZD-99	0.50	1.54	24.48	62.49	2.93	0.67	0.61	5.77
FMZD-113	0.89	2.17	17.03	68.35	2.35	1.62	0.53	6.05
NMGG-1	0.33	1.08	23.41	67.46	3.81	0.32	0.74	1.86
NMGG-2	1.03	1.70	23.88	64.36	4.95	0.32	0.69	2.07
NMGG-3	0.99	1.13	21.11	69.54	3.62	0.28	0.56	1.77
NMGG-4	0.79	1.04	21.24	70.18	3.44	0.24	0.40	1.67
NMGG-5	0.38	0.94	23.22	68.36	3.11	0.38	0.66	1.95
NMGG-6	0.49	1.75	24.91	65.22	3.38	0.38	0.73	2.15
NMGG-7	0.67	1.20	22.41	68.04	4.21	0.27	0.51	1.69
NMGG-8	0.78	0.91	22.44	69.06	3.48	0.29	0.55	1.49
NMGG-9	0.80	0.80	19.73	71.23	3.72	0.22	0.85	1.64
NMGG-10	0.94	1.20	22.33	67.74	4.07	0.30	0.59	1.82
NMGG-11	0.54	0.96	21.28	69.41	4.17	0.31	0.69	1.64
NMGG-13	0.78	1.04	24.04	66.05	4.34	0.31	0.48	1.95
NMGG-14	0.86	1.17	21.65	68.51	4.05	0.24	0.76	1.76
NMGG-15	0.51	0.96	23.54	67.15	4.14	0.29	0.59	1.82

表 2 凤阳明中都 (FMZD) 和南京明故宫 (NMGG) 胎体主要元素组成平均值及标准偏差 (Wt%)

Table 2 Average contents and SD of major elements in bodies of FMZD and NMGG

		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Si/Al
FMZD	Mean	1.01	3.52	15.42	58.92	3.20	10.62	0.44	5.86	3.84
(高 CaO 高 Fe ₂ O ₃)	S. D.	0.52	0.51	1.07	1.75	0.23	1.79	0.09	0.27	0.36
FMZD	Mean	0.41	1.01	20.43	70.34	2.56	0.32	0.66	3.27	3.44
(低 CaO 低 Fe ₂ O ₃)	S. D.	0.36	0.22	2.35	2.21	0.49	0.28	0.15	0.77	0.94
FMZD	Mean	0.89	1.77	21.43	64.74	2.86	0.79	0.56	5.94	3.02
(低 CaO 高 Fe ₂ O ₃)	S. D.	0.61	0.44	3.18	2.81	0.38	0.52	0.07	0.27	0.88
NMGG	Mean	0.71	1.13	22.51	68.02	3.89	0.30	0.63	1.81	3.04
	S. D.	0.22	0.27	1.42	1.90	0.48	0.05	0.12	0.18	0.27

表 3 部分凤阳明中都 (FMZD)、南京明故宫 (NMGG) 琉璃瓦样品的物理性能及烧成温度

Table 3 Physical properties and Firing temperature in some tile glazed samples of FMZD and NMGG

	Absorption /%	Porosity /%	Density / (g · cm ⁻³)	Temperature / °C
FMZD-1	14.66	24.15	1.65	~1 055±20
FMZD-5	20.17	34.50	1.71	~1 080±20
FMZD-31	0.21	0.37	1.75	~1 141±20
FMZD-45	19.30	32.39	1.65	~954±20
FMZD-56	23.29	39.35	1.69	
FMZD-85	13.04	21.81	1.67	~956±20
FMZD-88	13.63	23.15	1.69	
FMZD-95	21.56	36.51	1.69	~951±20
FMZD-118	22.12	36.42	1.65	~882±20
FMZD-136	18.57	30.67	1.65	~966±20
NMGG-1	12.65	21.23	1.68	
NMGG-3	11.42	19.24	1.68	~983±20
NMGG-4	12.76	21.48	1.68	~1 010±20
NMGG-7	14.03	23.71	1.69	~989±20

度和热膨胀后的长度。

(3) 利用 TXY-400 陶瓷吸水率测定仪对部分样品胎体的

吸水率、体积密度、显气孔率进行测定, 参照 GB2413—1981 《压电陶瓷材料体积密度测量方法》和 GB/T3810.3—1999 《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》。根据烧成温度常规的测温方法, 以温度 (Temp · °C⁻¹) 作为横坐标, 以收缩率 (dL/Lo) 作为纵坐标, 在热膨胀曲线的拐点两侧做切线, 两条切线的交点即为样品的原始烧成温度, 一般认为该方法的测试误差在 ±20 °C^[11]。

(4) 利用德国莱卡 DM2700P 型偏光显微镜对部分样品显微结构进行观察, 岩相薄片是先将样品磨成 0.03 mm 厚的薄片, 置于载玻片盖上盖片, 再用树胶固存。

2 结果与讨论

2.1 凤阳明中都遗址出土琉璃瓦样品胎元素的组成特征

实验测定了琉璃瓦胎中 Si, Al, K, Na, Ca, Mg, Fe 和 Ti 共八个主次要元素的含量, 测试结果见表 1。从表中可见, 凤阳明中都遗址出土琉璃瓦胎体中 SiO₂ 的含量变化范围较大 (55% ~ 75%), Al₂O₃ 的含量在 13% ~ 25% 之间浮动, SiO₂/Al₂O₃ 的比值约为 2.51 ~ 5.45, 助熔剂氧化物 R_xO_y (K₂O, Na₂O, CaO, MgO) 的含量在 3.35% ~ 23.49% 之间波动, 差异较大。本文利用 SPSS 软件分析程序提取二至三

个可以反映数据绝大部分信息的因子对测试结果进行统计分析,其结果(数据点)不仅反映样品间的关系,即邻近的样品点具有相似的性质而属于同一类,而且可反映出(变量)元素和样品间的关系,即同类型的样品点将被邻近的变量所表征^[12]。图 2 是凤阳明中都琉璃瓦、南京明故宫琉璃瓦及北京故宫明代琉璃瓦样品^[13]胎体的主次量元素组成因子载荷图,提取两个因子 Factor1 和 Factor2,累积贡献率为 73.53%,可以反映出数据的绝大部分信息。

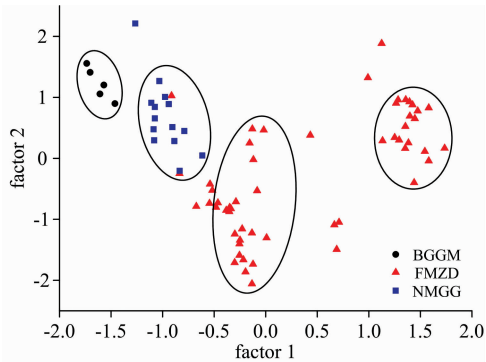


图 2 凤阳明中都 (FMZD)、南京明故宫 (NMGG) 及北京故宫明代 (BGGM) 琉璃瓦样品胎体化学组成的统计分析
Fig. 2 Statistical analysis of chemical compositions for bodies of glazed tile samples from FMZD, NMGG and BGGM

由图 2 可知,明中都样品的数据点比较分散,但主要集中在两个区域,而南京明故宫和北京故宫明代琉璃瓦样品的数据点分布相对集中且各自分布于不同区域,表明上述三处地点琉璃瓦样品化学组成存在明显差异。值得注意的是,有少量凤阳明中都样品数据点分布于南京明故宫样品的集中区域内,这一现象表明,南京明故宫和凤阳明中都城的少量样品在化学组成上较为接近,二者采用的制作原料比较相似,而北京故宫明代样品的分布距凤阳和南京出土样品明显较远,其化学组成和二者差异显著。

为进一步了解明初三都琉璃瓦胎体的差异,对实验结果进行了元素组成的散点分析,分析结果发现,三处地点样品胎体的化学组成差异主要体现在各地样品胎体中 CaO, Fe₂O₃, MgO 和 TiO₂ 的含量不同(见图 3)。

由图 3(a)可见,北京故宫琉璃瓦胎体中 TiO₂ 的含量明显高于明中都及南京明故宫样品,同时其 MgO 的含量相对较低于二者,造成这一现象的原因是北京故宫明代琉璃瓦胎体^[7]主要原料是来自北京门头沟的煤矸石,其 TiO₂ 含量较高,在 1.13%~1.48%,也进一步说明了北京故宫琉璃瓦胎体的原料不同于凤阳、南京二处,而南京明故宫和明中都样品部分重叠,说明这两处样品在化学组成上具有相似性,进一步说明了二处原料较为相似。

由图 3(b)CaO-Fe₂O₃ 的散点图可见,明中都样品数据点按 CaO 和 Fe₂O₃ 含量的不同集中在三个区域, I 区样品 CaO 含量最高,其平均含量为 10.62%,且 SiO₂ 的含量平均在 58.92%, Al₂O₃ 的含量平均在 15.42%, Fe₂O₃ 的平均含量 5.86%, TiO₂ 的平均含量为 0.44%,具有高钙高铁的特点。这部分样品的胎体成分与我国河南、山西、甘肃、青海、

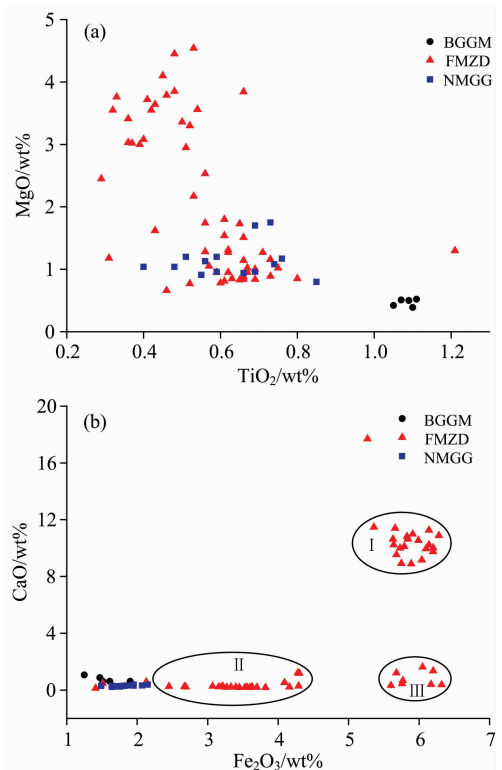


图 3 明初三都琉璃瓦胎体样品中 MgO-TiO₂ (a) 和 CaO-Fe₂O₃ (b) 的散点图

Fig. 3 Scatter diagram of MgO-TiO₂ (a) and CaO-Fe₂O₃ (b) for the bodies of glazed tile from FMZD, NMGG and BGGM

四川、辽宁等地区的一部分彩陶、夹砂红陶及绿陶的胎体类似^[14],像这种低 SiO₂、低 Al₂O₃、高助熔剂的胎体,使用的是北方普通的易熔黏土^[5],容易成型,具有很好的可塑性。II, III 区 CaO 含量相对较低且较为接近,其平均含量为 0.44%,然而,二区样品的 Fe₂O₃ 的含量差别较大。其中,II 区 Fe₂O₃ 的平均含量在 3.27%,且其 SiO₂ 的含量在 67.48%~74.66%, Al₂O₃ 的含量在 13.69%~24.05%之间,这部分样品的化学组成与文献记载^[15]的安徽祁门、江西和浙江等南方等地瓷石成分相比,其 Al₂O₃ 含量偏高,而 SiO₂ 含量偏低,而相对于高岭土的化学成分而言,其 Al₂O₃ 含量又明显偏低, SiO₂ 含量明显偏高,因此,推测这部分低钙低铁琉璃瓦样品胎体原料可能采用了具有一定风化程度的南方瓷石为原料,然后进行严格粉碎和精细处理后用于制胎。III 区样品 Fe₂O₃ 的含量较高,最高达 6.32%,与 I 区比较发现,这部分样品胎体与使用北方普通易熔粘土烧制胎体的化学组成有非常显著的差别。其 SiO₂ 的含量为 61.99%~68.46%, Al₂O₃ 的含量为 17.03%~24.68%,胎体组成与江西、浙江的印纹硬陶^[16]组成类似,由于印纹硬陶基本都在南方出土,使用的原料是南方所产的紫金土或掺有一定瓷石类粘土,因此对于 III 区低钙高铁样品,推测其原料可能就是南方的紫金土或掺有瓷石的粘土。此外,Fe₂O₃ 作为着色剂,明中都琉璃瓦大部分胎体中 Fe₂O₃ 的含量远远高于南京明

故宫和北京故宫明代的琉璃瓦,明中都琉璃瓦胎体偏红应与此有关。

古代陶瓷制品的生产原料大都就地取材,其化学组成直接取决于所用的原料。凤阳明中都的城墙砖既有地方负责烧造的,也有军队烧造^[17],其中地方负责烧造的城墙砖来源22府69州县,包括今安徽、江苏、江西、湖北、湖南五省。然而,对于建筑琉璃瓦的烧造是否也采取了同样的政策目前尚无相关研究。从本化学组成分析结果来看,明中都琉璃瓦胎体的制作至少采用了三类不同性质的原料,且很可能分别选用北方普通的易熔粘土、南方的紫金土和风化的瓷石,表明明中都琉璃瓦的制作原料也有很大可能有不同来源。

明正德《大明会典》、万历《大明会典》及《天工开物》均记载“凡在京营造合用砖瓦每岁于聚宝山置窑烧造,……烧造琉璃砖瓦,所用白土例于太平府采取”,南京明故宫琉璃瓦胎体用土已被证实来源于安徽当涂且所用原料是风化的瓷石^[6],由图2可见,明中都、明故宫数据点分布均有个别相互重合,说明了其化学组成基本相似,因此凤阳明中都部分样品胎体原料可能来源于安徽当涂。

2.2 明中都遗址出土琉璃瓦样品的物理性能

琉璃瓦胎体的性能与原料和工艺等因素都有关系,明中都琉璃瓦胎体的原料不同,为了探索明中都琉璃瓦胎体原料和性能之间的关系,对明中都琉璃瓦胎体的吸水率、显气孔率、体积密度和烧成温度进行了研究,结果见表3。有研究显示,烧成温度高低直接影响胎体中方石英的转化率和胎体的吸水率^[18],由表3可见,明中都琉璃瓦瓷胎的吸水率及烧成温度皆已达到了公认的瓷器标准,而对于陶胎琉璃瓦,其烧成温度在880~1100℃之间,明显低于瓷胎样品,南京明故宫琉璃瓦胎体的烧成温度在1000℃左右,结合吸水率、显气孔率及体积密度分析结果可见,明中都琉璃瓦的吸水率等差别较大,而南京明故宫样品相对一致,且整体上明中都样品的吸水率除瓷胎外,均高于明故宫的吸水率。

从化学组成来看,明中都琉璃瓦高钙高铁、低钙低铁、低钙高铁样品的吸水率没有明显的规律,而烧成温度方面,高钙高铁的样品烧成温度较高,均高于1000℃,而另外两类样品的烧成温度相对低些。由化学组成可知,明中都的原料组成比较分散,说明其原料不是来源于同一个地方,可能

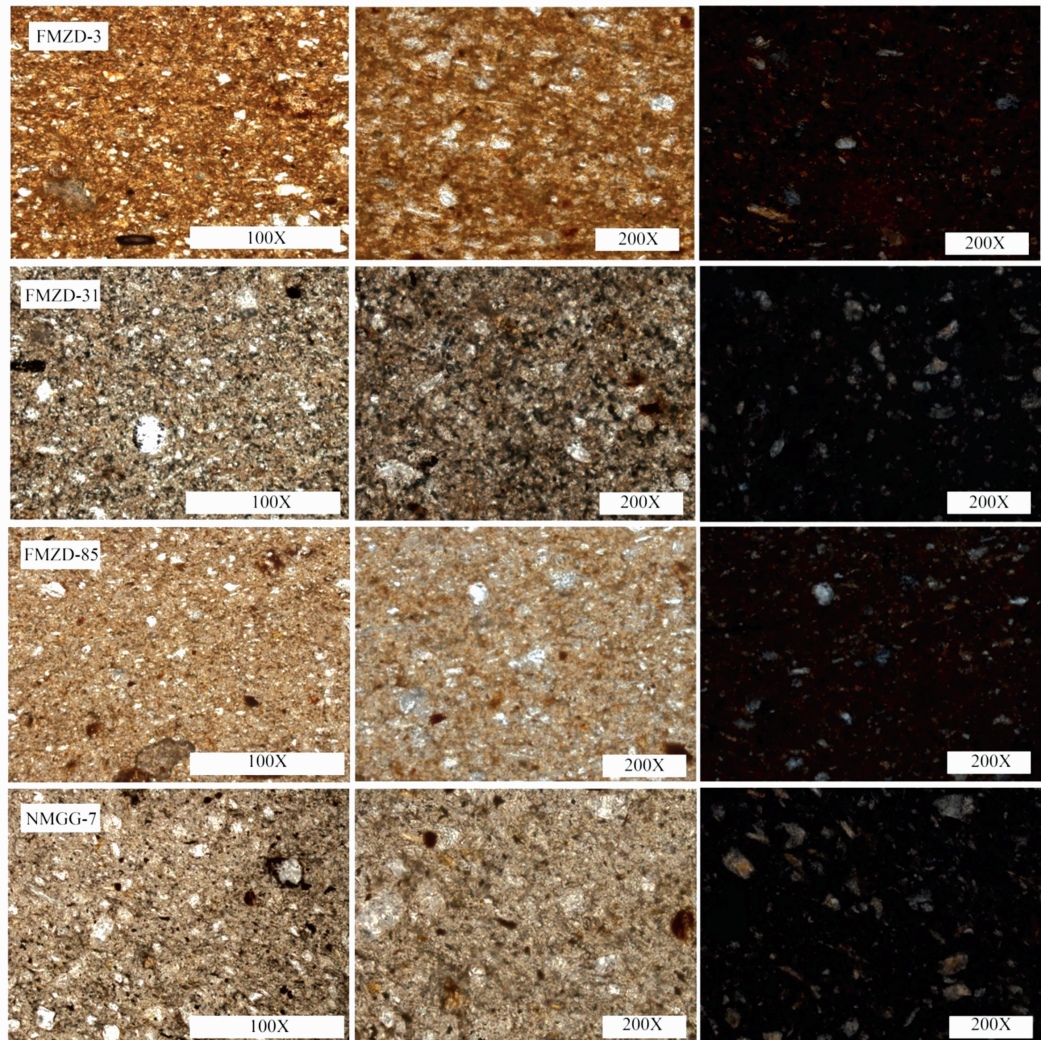


图4 凤阳明中都和南京明故宫琉璃瓦样品胎体的显微结构照片

Fig. 4 Micrographs pictures of some tile glazed bodies for FMZD and NMGG

是在各地分别烧造,因此导致不同来源的琉璃瓦在烧成温度及吸水率、显气孔率、体积密度方面存在差异。

2.3 凤阳明中都城出土琉璃瓦样品胎体的显微结构

由图 4 显微结构照片可以清晰看出,琉璃瓦的胎体基本是由基质、颗粒物质、孔隙组成,凤阳明中都样品中原料的颗粒尺寸相对比较均匀,且颗粒尺寸比较小,从正交偏光下只能观察到石英晶体,FMZD-3 胎体原料可能为普通易熔粘土,FMZD-31 和 NMGG-7 胎体主要原料可能是风化的瓷石,FMZD-85 胎体原料推测为紫金土,比较这三种类型的琉璃瓦在颗粒大小和空隙大小并无明显差别,由明中都和南京明故宫样品显微照片发现,二者琉璃瓦胎体的显微结构差别不大,说明两处的样品胎体原料粉碎的都较精细,淘洗的程度比较高,烧结程度高,在很大程度上改善了原料成型的工艺性能。

3 结 论

(1)凤阳明中都遗址出土琉璃瓦胎体的元素组成不具有

一致性,根据 CaO 和 Fe_2O_3 含量的高低将样品分为了三部分,高 CaO 高 Fe_2O_3 的样品其胎体原料可能使用的是北方普通易熔粘土,低 CaO 高 Fe_2O_3 的样品其胎体原料推测为南方的紫金土或掺有一定量瓷石的粘土,而低 CaO 低 Fe_2O_3 样品的胎体原料有可能是风化的瓷石,且明中都琉璃瓦胎体中 Fe_2O_3 的含量高于北京、南京二处。

(2)明中都部分琉璃瓦陶胎烧成温度在 $880\sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$,吸水率和显气孔率比较高,体积密度在 2% 以下,瓷胎的烧成温度高达 $1\ 141\ ^\circ\text{C}$,吸水率和显气孔率较低达到了公认瓷胎的标准。

(3)明中都琉璃瓦胎体使用的原料不同,且陶瓷样品在物理性能方面又有明显差异,推测可能是由于明中都琉璃瓦胎体具有不同的产地来源造成的。

(4)显微结构观察结果显示,凤阳明中都与南京明故宫遗址出土琉璃瓦样品总体上胎质较为细腻,制胎原料加工精细,淘洗程度较高。

References

- [1] YANG Yu-zhang, ZENG Ling-yuan, ZHANG Ju-zhong, et al(杨玉璋,曾令圆,张居中,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(4): 1009.
- [2] YANG Yu-zhang, CUI Wei, ZHANG Ju-zhong, et al(杨玉璋,崔 炜,张居中,等). Cultural Relics of Central China(中原文物), 2014 (4): 113.
- [3] WEI Zheng(魏 徵). 《Sui Book》(《隋书》). Zhonghua Book Company(中华书局). Volume 68.
- [4] WANG Yong-ping(汪永平). Traditional Chinese Architecture and Gardens(古建园林技术), 1989, (4): 48.
- [5] DUAN Hong-ying, DING Yin-zhong, LIANG Guo-li, et al(段鸿莺,丁银忠,梁国立,等). China Ceramics(中国陶瓷), 2011, (4): 69.
- [6] DING Yin-zhong, DUAN Hong-ying, KANG Bao-qiang, et al(丁银忠,段鸿莺,康葆强,等). China Ceramics(中国陶瓷), 2011, (1): 70.
- [7] KANG Bao-qiang, WANG Shi-wei, DUAN Hong-ying, et al(康葆强,王时伟,段鸿莺,等). Journal of Gugong Studies(故宫学刊), 2013, (2): 234.
- [8] KANG Bao-qiang, DUAN Hong-ying, DING Yin-zhong, et al(康葆强,段鸿莺,丁银忠,等). Relics from South(南方文物), 2009, (3): 116.
- [9] 《Ming Taizu Records》(明太祖实录). Emended by Institute of History and Philology, Academia Sinica(中央研究院历史语言研究所校勘影印). Volume 450.
- [10] 《Ming Taizu Records》(明太祖实录). Emended by Institute of History and Philology, Academia Sinica(中央研究院历史语言研究所校勘影印). Volume 83.
- [11] Tite M S. Archaeometry, 1969, 1(11): 131.
- [12] LUO Hong-jie(罗宏杰). Chinese Ancient Ceramic And Multivariate Statistical Anaysis(中国古陶瓷与多元统计分析). Beijing: China Light Industry Press(北京:中国轻工业出版社), 1997. 22.
- [13] MIAO Jian-min, WANG Shi-wei(苗建民,王时伟). ISAC'05(古陶瓷科学技术 5 国际会议论文集). Shanghai: Shanghai Sci-Tech Press(上海:上海科学技术出版社), 2005. 108.
- [14] LI Jia-zhi(李家治). Chinese History of Sci-Tech • Volume of Ceramics(中国科学技术史 • 陶瓷卷). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 1995. 33.
- [15] GUO Yan-yi, LI Guo-zhen(郭演仪,李国桢). Technological Bases of Famous Chinese Porcelains(中国名瓷工艺基础). Shanghai: Shanghai Sci-Tech Press(上海:上海科学技术出版社), 1985. 25.
- [16] LI Jia-zhi(李家治). Chinese History of Sci-Tech • Volume of Ceramics(中国科学技术史 • 陶瓷卷). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 1995. 71.
- [17] TANG Geng-sheng, KAN Xu-hang(汤更生,阚绪杭). Word Bricks of Fengyang MingZhongdu(凤阳明中都字砖). Beijing: Cultural Relics Press(北京:文物出版社), 2016. 6.
- [18] MA Tie-cheng(马铁成). Ceramic Technology(陶瓷工艺学). Beijing: China Light Industry Press(北京:中国轻工业出版社), 2011. 102.

Study on Manufacturing Technique for Glazed Tiles Bodies from *Mingzhongdu* Site, Fengyang

YANG Gui-mei^{1, 2}, YANG Yu-zhang^{1*}, YAO Zheng-quan², ZHANG Mao-lin³, WANG Zhi², ZHANG Ju-zhong¹

1. Department for the History of Science and Scientific Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Archaeology Institute of Anhui Province, Hefei 230061, China

3. Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333001, China

Abstract In order to explore the manufacturing technique level and characteristic for glazed tiles in early Ming dynasty, Energy Disperse X-Ray Fluorescence(EDXRF) was used to the determination of chemical composition of 69 pieces glazed tiles bodies from *Mingzhongdu* Site in Fengyang(FMZD), and *Minggugong* Site in Nanjing(NMGG), thermal expansion instrument, water absorption rate determinator and polarizing microscope were used to analyze the bodies' firing temperature and the rate of water absorption and apparent porosity, bulk density, microstructure. The results showed that, the sample bodies were divided into three types: high Ca and Fe, low Ca high Fe and low Ca low Fe, which meant that the raw materials of samples were from different areas. The chemical composition of some FMZD's samples had a great similarity with NMGG, while the two places had obvious difference in chemical composition compared with Beijinggugong's glazed tiles bodies, which suggested the raw materials for Beijinggugong's samples were different from the *Mingzhongdu* and *Minggugong*'s samples. The results of firing temperature and physical properties, microstructure showed that: firing temperature of porcelain body in FMZD was so high that reached 1 140 °C, lower in water absorption and porosity, and the porcelain body met the requirement of standards. While firing temperature of the pottery bodies was about 880~1 100 °C, higher in water absorption and porosity, obvious differences in the samples of the FMZD's, and it was speculated that the dispersion of the raw materials origin of the FMZD's tiled glazes caused the differences on the firing temperature, water absorption and porosity. Compared with samples of NMGG and BGGM, absorption and porosity of the FMZD's samples were higher than that's, but firing temperature of the pottery bodies of the three places was below 1100°C. The microstructures of the FMZD and NMGG's samples were rarely different from the pictures of the microstructures, which showed that the bodies raw materials were smashed subtly and elutriated highly, sintered higher, and tiled glazes had the better performance comparison. By studying the firing technology for tiled glazes during Hongwu Period in early Ming Dynasty, it not only enriched the course of the technological development of the tiled glazes, but also offered the gist for understanding the making-technology of tiled glazes and organization form of building *Mingzhongdu*.

Keywords *Mingzhongdu* tiled glazes; Multi-variate statistical analysis; Firing technology; Raw materials of origin

(Received Mar. 1, 2018; accepted Aug. 9, 2018)

* Corresponding author