

宋代龙泉青瓷的研究

叶宏明 李国桢 郭演仪 周绍达 叶培华 胡兆雄
沈世耕 叶国珍 曹鹤鸣 程朱海

(中国硅酸盐学会陶瓷分会)

摘 要

研究了在浙江龙泉大窑地区窑址群中出土的质量很高的南宋哥窑和弟窑瓷片胎、釉的化学组成、显微结构和烧制工艺,分析了影响青瓷釉呈色的基本因素,讨论了青瓷釉“开片”、“鸡爪纹”、“朱砂底”、“紫口铁足”的主要成因,论证了哥、弟窑产品的不同特点及区别。

关键词 古陶瓷科学技术, 龙泉青瓷, 工艺研究

A STUDY ON RECOVERING THE TECHNOLOGY OF SONG DYNASTY LONGQUAN CELADON

Ye Hongming Li Guozhen Guo Yanyi Zhou Shaoda Ye Peihua Hu Zhaoxiong
Shen Shigeng Ye Guozhen Cao Heming Cheng Zhuhai
(The Chinese Ceramic Society)

Abstract

This paper studies the chemical compositions, microstructures and sintering techniques of the high-quality unglazed wares and glazes discovered in the Geyao (elder brother kiln) and Diyao (younger brother kiln) in the Dayao District, Longquan City, Zhejiang Province. With mineral purple gold clay and porcelain clay as raw materials, the production of celadon wares has been recovered, and a new generation of Longquan celadon products developed.

Keywords science and technology of ancient ceramics, Longquan celadon, fabrication techniques

1 引 言

中国是世界上著名的文化古国,瓷器是中国的伟大发明。陶瓷是我国民族文化发展的重要组成部分,因此研究中国陶瓷工艺发展过程包括对浙江历代陶瓷名窑工艺的研究有着十分重要的意义。这不仅使我们更加了解中华民族对人类文化的进步所作出的重要贡献,而且对失传的历史名窑的恢复也有很大的参考价值。

在中国陶瓷发展过程中,龙泉窑占有其独特的地位,它是中国瓷器全盛时期的代表,被誉为“青瓷之

花”,可惜,新中国成立时久已失传。本课题在系统研究中国陶瓷工艺发展的过程中,着重对宋代龙泉青瓷工艺及其恢复作了详尽的研究,终于使这颗灿烂的中国瓷器明珠重放光芒。

2 试验部分

2.1 样品外观鉴定

(1)S-001 南宋菊花瓣碗残片:釉呈粉青色,较厚,半光亮,釉内含极细气泡,无纹片,釉色颇佳。胎骨坚实,断面呈贝壳状,淡青色,略有小气孔,底足呈黄色。从器形和胎釉色泽推断系弟窑产品,作者 1959 年

表 1 南宋龙泉哥窑胎釉的化学成份

Table 1 Chemical Composition of Southern Song Longquan Geware Bodies and Glazes

编 号	名 称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	总数	备 注
SG-1	南宋哥窑小碗残片胎	63.12	26.53	4.46	0.41	0.67	4.01	0.42	99.62	残片标本系作者在大窑采得, 并进行化学分析。
SG-1	南宋哥窑小碗残片釉	63.47	16.92	1.13	10.82	1.08	4.72	1.21	99.35	
SG-2	南宋哥窑炉残片胎	61.59	28.72	4.03	0.62	0.44	3.78	0.61	99.79	
SG-2	南宋哥窑炉残片釉	61.12	17.23	1.05	15.66	0.83	4.21	0.37	100.47	标本系 1982 年初由浙江省博物馆提供, 我们进行测试。
SG-3	南宋哥窑缸残片胎	62.02	27.83	3.87	0.74	0.61	4.14	0.53	99.74	标本系 1982 年由龙泉文化馆提供, 我们进行测试。
SG-3	南宋哥窑缸残片釉	65.26	18.24	0.99	9.44	0.93	4.17	0.93	99.96	
SG-4	南宋哥窑小碗胎	60.96	28.51	4.82	0.63	0.78	3.67	0.43	99.80	标本系 1959 年浙江省文管会提供, 我们进行测试。
SG-4	南宋哥窑小碗釉	65.27	16.89	0.92	11.93	0.76	3.68	0.52	100.07	
SG-5	南宋哥窑炉残器胎	58.23	28.79	3.53	0.23	0.44	3.79	0.64		引自文献〔3〕
SG-5	南宋哥窑炉残器青灰釉	61.06	19.23	1.40	8.68	1.14	4.75	1.35		引自文献〔3〕
SG-6	南宋哥窑瓶残器胎	63.04	27.03	3.55	0.11	0.69	3.33	0.54		引自文献〔3〕
SG-6	南宋哥窑瓶青灰釉	63.54	17.23	1.04	8.84	1.36	5.24	1.68		引自文献〔3〕
SG-7	南宋哥窑缸残器胎	58.72	28.95	3.36	0.19	0.39	3.74	0.60		引自文献〔3〕
SG-7	南宋哥窑缸残器釉	63.37	18.68	1.34	7.37	1.13	4.78	1.35		引自文献〔3〕
SG-8	南宋哥窑缸残片胎	65.47	24.17	3.75	0.38	0.44	3.31	0.63		引自文献〔3〕
SG-8	南宋哥窑缸残片釉	66.18	17.82	1.83	6.23	0.92	4.40	0.91		引自文献〔3〕
SG-9	南宋哥窑觚残器胎	61.37	27.98	4.50	0.87	0.73	3.74	0.38		引自文献〔4〕
SG-9	南宋哥窑觚残器釉	65.31	16.61	0.83	12.24	0.82	3.75	0.45	100.31	引自文献〔4〕
SG-10	南宋哥窑胎	62.18	27.31	4.30	0.45	0.64	4.08	0.39	100.01	引自文献〔5〕
SG-10	南宋哥窑釉	63.13	15.26	0.93	16.18	0.32	3.39	0.41	99.70	引自文献〔5〕
SG-11	南宋哥窑胎	63.79	25.54	4.07	0.76	0.51	4.34	0.36	99.34	引自文献〔5〕
SG-11	南宋哥窑釉	65.67	15.88	1.03	12.11	0.85	4.24	0.22		引自文献〔5〕
SG-12	南宋哥窑胎	58.81	32.02	3.53	0.69	0.35	4.28	0.33		引自文献〔5〕
SG-12	南宋哥窑釉	68.07	15.81	1.19	11.98	0.33	3.97	0.38		引自文献〔5〕
SG-13	南宋哥窑胎	64.73	24.77	4.25	0.69	0.50	4.19	0.26		引自文献〔5〕
SG-13	南宋哥窑釉	60.91	15.73	1.16	16.83	0.82	4.09	0.26		引自文献〔5〕

在龙泉大窑古窑址采得。

(2)S-002 南宋龙泉青釉洗残片:釉呈梅子青色,较厚,半光亮,釉色佳。釉内含有极细气泡,无纹片。胎骨坚硬,断面有小气孔,底足呈朱砂色。作者 1960 年在龙泉大窑古窑址采得。

(3)S-003 南宋龙泉小碗残片:釉呈浅梅子青(接近粉青),釉层较薄,半光亮,色泽佳,釉内含有极细气泡,无纹片。胎骨较粗,断面有小气孔,底足呈黄色。作者 1960 年在龙泉大窑古窑址采得。

(4)S-004 南宋菊花瓣碗残片:釉呈淡粉青微带蓝色,较厚,半光亮,无纹片,釉内含有极细气泡。胎骨较粗,断面不规则,底足呈黄色(略红)。作者 1959 年在龙泉大窑古窑址采得。

(5)SG-1-3 龙泉哥窑残片:釉色较官窑稍浅,

呈半光亮,釉层较厚,釉面纹片较小;胎断面呈浅灰色,底足呈褐黑色。系作者最近才收集到的标本。

(6)SG-4 南宋龙泉黑胎青瓷碗残器:制造规矩,釉呈灰青色,较厚,有大纹片,釉色晶润。胎骨薄(仅为釉厚度一半)而坚实,质颇轻,底足匀和圆净,呈黑色。系哥窑产品,由浙江省文物管理委员会提供。

(7)G-2 龙泉瓷厂生产的菊花瓣小碗:釉呈豆青,较薄,玻璃光泽,无纹片,釉内气泡较多且大。胎骨较细致,断面不规则,底足呈朱砂色。

2.2 胎、釉的化学成分

如表 1 和表 2 所示。

2.3 胎、釉的 X 射线分析

采用日本理学 D-9C X-射线衍射仪对哥窑和弟窑几种样品进行了胎、釉分析。结果表明,南宋龙泉哥

表 2.1 南宋龙泉弟窑青瓷胎的化学成分与分子式

Table 2.1 The body's chemical compositions and Molecular formula of Southern Song Longquan Diware

编 号	名 称	化 学 成 分 %									分 子 式
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	总数	
S-001	南宋菊花瓣碗 残片胎	68.11	22.10	2.37	0.27	0.23	微量	5.48	1.22	99.87	$\left. \begin{matrix} 0.0173\text{CaO} \\ 0.2492\text{K}_2\text{O} \\ 0.0842\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9364\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0636\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 6.0800\text{SiO}_2 \\ 0.0147\text{TiO}_2 \end{matrix} \right\}$
S-002	南宋龙泉青釉 洗残片胎	67.74	23.18	2.40	少量	少量	少量	5.56	1.36	100.24	$\left. \begin{matrix} 0.2632\text{K}_2\text{O} \\ 0.0979\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9332\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0668\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 5.0200\text{SiO}_2 \end{matrix} \right\}$
S-003	南宋龙泉小碗 残片胎	67.09	23.41	2.02	少量	少量	少量	5.96	1.54	100.01	$\left. \begin{matrix} 0.2617\text{K}_2\text{O} \\ 0.1027\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9478\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0522\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.6100\text{SiO}_2 \end{matrix} \right\}$
S-004	南宋菊花瓣碗 残片胎	73.22	19.10	2.19	0.32	0.29	少量	3.26	1.09	99.88	$\left. \begin{matrix} 0.0260\text{CaO} \\ 0.1918\text{K}_2\text{O} \\ 0.0881\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9345\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0655\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 6.0800\text{SiO}_2 \\ 0.0196\text{TiO}_2 \end{matrix} \right\}$
B-2*	现代龙泉青瓷 坯 料	68.29	24.53	2.27	少量	0.41	少量	3.81	0.42	99.73	$\left. \begin{matrix} 0.0287\text{CaO} \\ 0.1918\text{K}_2\text{O} \\ 0.0268\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9442\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0558\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.4600\text{SiO}_2 \end{matrix} \right\}$
B-1*	现代龙泉青瓷 坯 料	64.65	23.37	1.99	0.39	0.20	少量	4.52	0.18	95.30	$\left. \begin{matrix} 0.0148\text{CaO} \\ 0.1982\text{K}_2\text{O} \\ 0.0192\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.9471\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.0529\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.4400\text{SiO}_2 \\ 0.0198\text{TiO}_2 \end{matrix} \right\}$

* 为了便于比较,故将解放后龙泉瓷厂生产的二种坯料列入,B-1坯料的烧失量为4.77%,B-2为产品分析数据。

表 2.2 南宋龙泉弟窑青瓷釉的化学成分与分子式

Table 2.2 Chemical composition of Southern Song Longquan Diware

编 号	名 称	化 学 成 份									分 子 式
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	总数	
S-001	南宋弟窑粉 青 釉	68.77	15.66	1.05	少量	9.05	少量	4.83	0.82	100.18	$\left. \begin{matrix} 0.710\text{CaO} \\ 0.277\text{K}_2\text{O} \\ 0.063\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.678\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.025\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 5.049\text{SiO}_2 \\ \text{R}_2\text{O} \\ \text{RO} \end{matrix} \right\} 0.703\text{R}_2\text{O}_3 \cdot 5.049\text{RO}_2$
S-002	南宋弟窑梅子 青 釉	68.02	14.14	0.91	少量	9.88	0.77	4.41	1.54	99.67	$\left. \begin{matrix} 0.660\text{CaO} \\ 0.072\text{MgO} \\ 0.175\text{K}_2\text{O} \\ 0.093\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.511\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.021\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.226\text{SiO}_2 \\ \text{R}_2\text{O} \\ \text{RO} \end{matrix} \right\} 0.532\text{R}_2\text{O}_3 \cdot 4.228\text{RO}_2$
S-003	南宋弟窑浅梅 子青釉	67.99	14.15	1.32	少量	9.05	少量	5.36	1.41	99.64	$\left. \begin{matrix} 0.669\text{CaO} \\ 0.236\text{K}_2\text{O} \\ 0.095\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.589\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.034\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.676\text{SiO}_2 \\ \text{R}_2\text{O} \\ \text{RO} \end{matrix} \right\} 0.603\text{R}_2\text{O}_3 \cdot 4.563\text{RO}_2$
S-004	南宋弟窑浅粉 青 釉	68.29	14.96	1.08	少量	11.38	少量	3.53	0.48	99.72	$\left. \begin{matrix} 0.817\text{CaO} \\ 0.152\text{k}_2\text{O} \\ 0.031\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.590\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.27\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 4.568\text{SiO}_2 \\ \text{R}_2\text{O} \\ \text{RO} \end{matrix} \right\} 0.617\text{R}_2\text{O}_3 \cdot 4.563\text{RO}_2$
G-2	龙泉瓷厂生产 的豆青釉	65.82	15.53	1.40	少量	12.54	少量	4.33	0.48	100.08	$\left. \begin{matrix} 0.807\text{CaO} \\ 0.169\text{K}_2\text{O} \\ 0.024\text{Na}_2\text{O} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 0.549\text{Al}_2\text{O}_3 \\ 0.032\text{Fe}_2\text{O}_3 \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} 3.939\text{SiO}_2 \\ \text{R}_2\text{O} \\ \text{RO} \end{matrix} \right\} 0.581\text{R}_2\text{O}_3 \cdot 3.939\text{RO}_2$

窑、弟窑釉内都含有残余的石英晶体,其含量次序是:哥窑大于弟窑,未发现莫来石晶体(见表 3)。

其衍射图见图 1 和图 2。

表 3 X-射线分析结果
Table 3 Result of XRD Analysis

产品名称	胎的特点	釉的特点
龙泉哥窑	石英稍多于莫来石	有石英晶体
龙泉弟窑	石英多、莫来石少	有少许石英晶体

2.4 釉的光谱分析

在青瓷生产实践中已经证实,釉内存有微量着色元素时,对釉的呈色会发生影响。为了鉴定釉内是否含有铁以外的微量着色元素,我们对 S-001、S-002、

SG-004 和 G-2 四个标本进行了光谱分析,分析的取样是用钻石刀从标本上细心地刮下来的,这四个标本的釉色有弟窑粉青、梅子青、豆青和哥窑灰青等色。粉青和梅子青是弟窑最具代表性的最好釉色,灰青色是哥窑产品,豆青的标本是龙泉瓷厂生产的釉色之一,选择这四个标本的目的是希望能具有较广泛的代表性。光谱分析是用苏联 KCA-1 大型摄谱仪,所得分析数据如表 5 所示。

2.5 胎、釉的偏光显微镜观察

为了观察胎、釉的物相组成和显微结构,我们选取了几个标本,在北京科技大学赵万智教授协助下制成薄片,在法国“NACHEF”型偏光显微镜下进行鉴定。现将观察结果列于表 4 和图 3 和图 4。

同时,对样品采用美国 SEMQ 扫描电镜进行了扫描电子显微镜观察,其结果列于表 6。

2.6 釉的色度及釉的反射率测定

表 4 南宋龙泉哥窑和弟窑胎釉岩相鉴定表

Table 4 Petrographic determination table of Southern Song Geware and Diware's Bosies and Glazes

试样名称	釉 层 情 况	胎 层 情 况
哥窑灰青釉 SG-1	釉层厚薄不匀,厚的釉层可达 2.1 毫米,薄的釉层为 0.49 毫米,有石英小晶体,毛发状的析晶体分层出现在釉中,中间层明显。	胎中石英晶体细小,有较多的气孔。胎中云母晶体呈黄瓜状与包谷状出现。长石玻璃中的二次莫来石偶尔可看见。
南宋龙泉哥窑 SG-2	釉层厚度为 0.3~0.8 毫米,有石英小晶体,釉中气泡较多,大气泡约 0.21 毫米,小气泡为 0.05 毫米,釉中析晶体生长良好。	胎中石英晶体小,气孔呈长岛状与不规则的形状,胎不够致密。
南宋龙泉哥窑 SG-3	釉层厚度为 0.49~0.56 毫米,整个釉层布满了毛发状的钙斜长石细小析晶体与小气泡,釉层混浊不清晰,中间层明显。	胎中石英晶体细小,气孔较多,胎不够致密。
南宋弟窑粉青釉 S-001	气泡多,含量大于 5%,大小在 0.04~0.15 毫米之间,普遍长得较小,釉内含有 5%左右未熔石英,晶体小,较稠密,而且分布较均匀。中间层极为显著,宽约 0.4 毫米,呈浅黄色的带。在中间层处发现有大量的晶体,大部分为石英,针状晶体甚少。	石英含量约占 20%左右,分布致密而均匀,颗粒大小在 0.01~0.08 毫米之间,其中以 0.03 毫米者居多。玻璃态和莫来石晶体含量共约占 80%,莫来石晶体易见,大小约为 0.015 毫米左右。
南宋弟窑梅子青釉 S-002	釉内气泡多,大小不太悬殊,石英晶体分布均匀,且较稠密,釉的折射率低于石英晶体,即小于 1.48,针状晶体少见。胎釉之间的过渡层亦极显著,石英晶体和针状晶体均有。	石英晶体含量约占 20~25%。分布均匀,莫来石可见,但长得较小,有堆积生长现象,与玻璃态一起约占 75~80%。

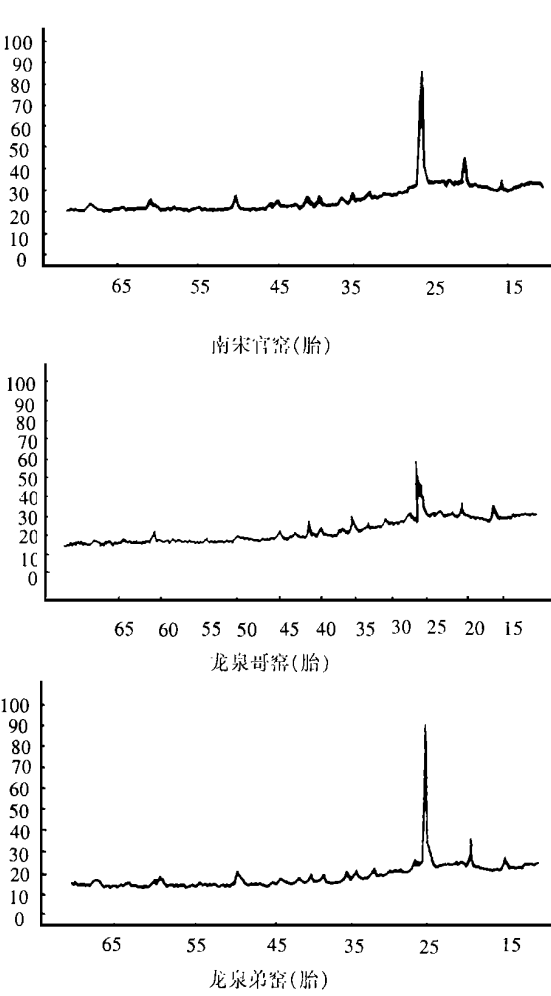


图 1 官窑、哥窑、弟窑胎 X-射分析照片
Fig.1 XRD patterns of Geware Diware, and Guanware bodies

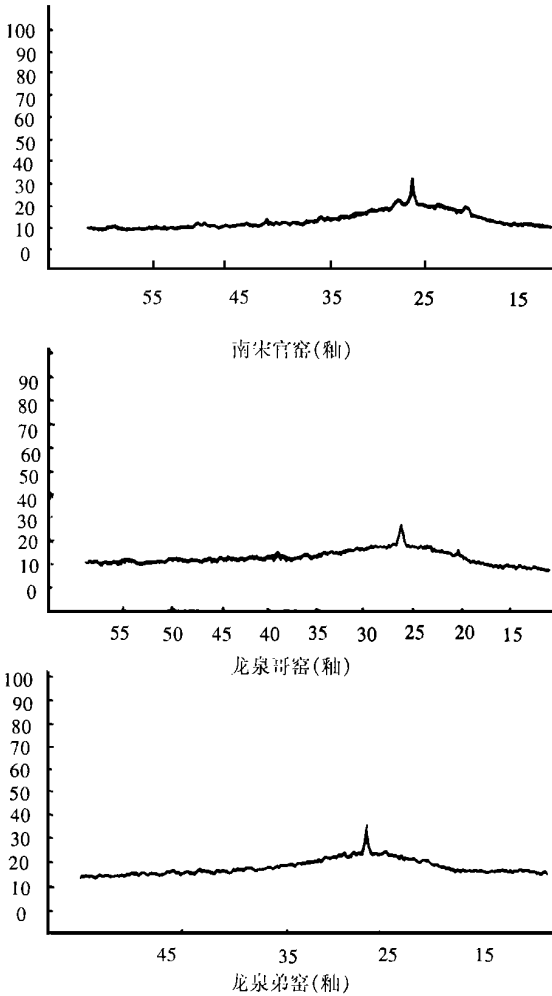
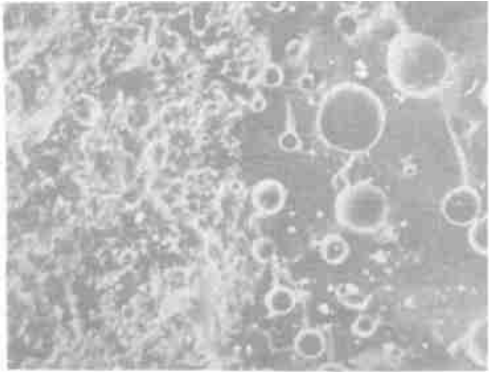
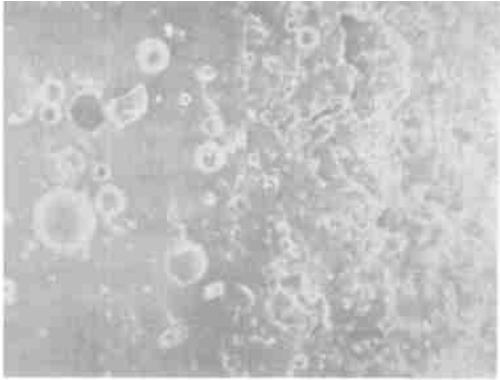


图 2 官窑、哥窑、弟窑釉 X-射线分析照片
Fig.2 XRD patterns of Geware, Diware and Guanware glazes



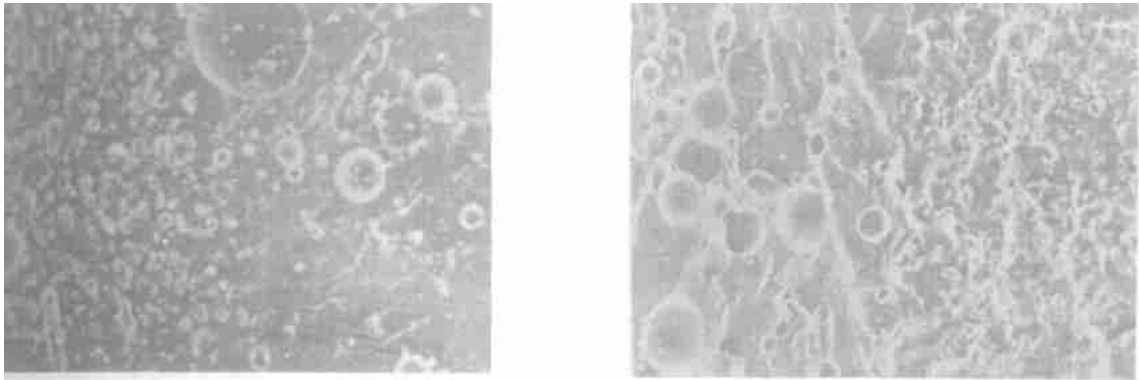
南宋官窑



南宋弟窑粉青瓷

图 3 胎釉扫描电镜照片

Fig.3 SEM micrograph of bodies and glazes



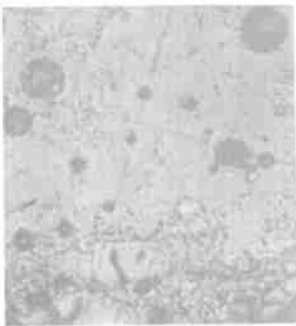
南宋弟窑梅子青瓷

南宋哥窑瓷

图 3 胎釉扫描电镜照片
Fig.3 SEM micrograph of body and glaze



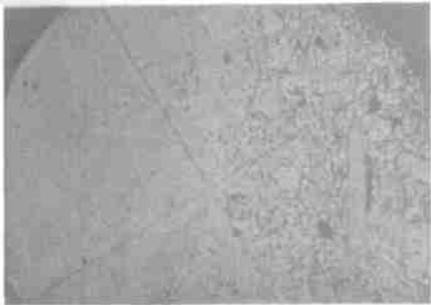
南宋官窑瓷(胎)320×平行偏光



南宋官窑瓷(釉)320×斜交偏光



南宋官窑瓷中间层 320×平行偏光



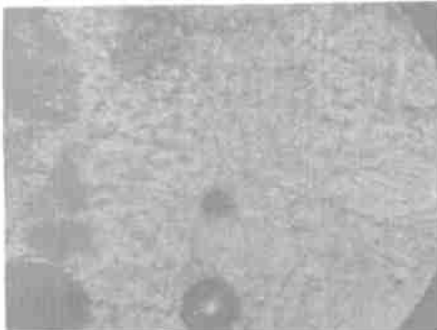
南宋官窑瓷中间层 320×斜交偏光



南宋哥窑瓷中间层 320×单偏光



南宋哥窑瓷(釉)320×斜交偏光



南宋哥窑瓷(釉)640×单偏光

图 4 南宋哥窑及官窑胎釉的偏光照片

Fig.4 Polarizing microscope micrograph of body and glaze



南宋官窑 174×釉及中间层处钙斜长石发育不良
南宋哥窑 174×釉及中间层处钙斜长石发育良好
图 4 南宋哥窑及官窑胎釉的偏光照片

Fig. 4 Polarizing microscope micrograph of body and glaze

表 5 南宋龙泉青瓷釉及龙泉瓷厂生产的青釉光谱分析

Table 5 Spectrographic analysis of Southern Song Longquan celadon glaze and the one by Longquan Porcelain Factory

编 号	试 样 名 称	Si	Al	Ca	Fe	Mg	K	Na	Ti	Ba	Sr	Mn	Y	La	Pb	Zr	Ge	Yb	Cu	Ca	Ce	Mo	Ni
S-001	粉青釉	>10	>10	>5	1-3	>1	>1	>1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.01	0.01	0.01	0.005	0.003	0.003	0.003	0.003	—	0.001	—
S-002	梅子青釉	>10	>10	>5	1-3	>1	>1	>1	0.3	0.5	0.3	0.3	0.01	0.01	0.03	0.005	0.003	0.003	0.003	0.003	—	0.001	—
G-2	豆青釉	>10	>10	>5	3	>1	>1	>1	>1	0.5	0.3	0.1	0.03	0.01	0.03	0.005	0.020	0.010	0.003	0.003	0.005	>0.001	>0.001
SG-4	灰青釉	>10	>10	>6	1-3	>1	>1	>1	>1	0.3	0.3	0.1	0.01	0.01	0.01	0.005	0.003	0.003	0.003	0.003	—	0.001	—

表 6 龙泉哥窑与弟窑胎釉扫描电镜观察结果

Table 6 SEM observation of Longquan Geware and Diware bodies and glazes

编号	名 称	气孔(泡)形状	气孔(泡)大小 (mm)	其 它
1	南宋哥窑灰青胎	气孔少,较致密	5	有细微石英颗粒
1	南宋哥窑灰青釉	气泡较少,分布均匀	5~50	有石英残留物
2	南宋弟窑粉青胎	扁平	2~50	有细分散石英颗粒
2	南宋弟窑粉青釉	球形气泡,大小和分布均匀	7~60	
3	南宋弟窑粉青胎	大气孔	10 左右	有细分散石英颗粒
3	南宋弟窑粉青釉	多为球形	10~50	有细微未溶解的石英残留物
4	南宋弟窑梅子青胎	不规则	5	
4	南宋弟窑梅子青釉	大球形气泡	5~100	有未溶解的石英残留物

选取了龙泉哥窑灰青釉以及弟窑粉青釉的标本，
进行如下测定：
(1)釉色度测定
①青瓷釉的颜色，其数据列于表 7(1)中。
②青瓷釉的色度图座标。青瓷釉的色度图座标数据，如表 7(2)和图 5 所示。
(2)釉的反射率测定
青瓷釉的反射率，其数据如表 7(3)所示。

3 分析与讨论

综合以上实验所得的结果,我们对南宋龙泉青瓷工艺,有以下几点分析推断。

(1)从化学分析得知龙泉哥窑和弟窑青瓷胎的化学组成有显著的差别:

SiO₂ 含量哥窑在 66% 以下,弟窑为 67~70%; Al₂O₃ 含量哥窑为 25~29%,个别达 32%,弟窑为 19~24; Fe₂O₃ 含量哥窑为 3.5~5%,而弟窑为 2~2.5%; 哥窑 K₂O、Na₂O 的含量均比弟窑低。胎的化学组成成分

布如图 6 和图 7 所示。由于胎内氧化铁的含量相差很大,因而胎的呈色深浅不一,哥窑产品大多数为铁足,弟窑为朱砂足。

哥窑釉内 SiO₂ 含量一般高于 62%,个别高达 66%,弟窑为 68~69%;哥窑釉中 Al₂O₃ 含量一般为 16~19%,弟窑较低,为 14~16%;哥窑釉中 CaO 含量为 6~17%,弟窑为 9~11%,哥窑波动范围较弟窑大;哥窑釉中 K₂O、Na₂O 含量为 3.8~6.9%,弟窑与哥窑相差不大,为 4~6.3%。釉的化学成份分布如图 8 和图 9 所示。

(2)从南宋龙泉青瓷胎、釉化学分析数据中可以看出,几个标本胎釉的主要化学成分大致在下列范围:

名 称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	总数
南宋哥窑胎	60.96	28.51	4.82	0.46	0.63	0.78	3.67	0.43	100.26
南宋哥窑釉	65.27	16.89	0.92	少量	11.93	0.76	3.68	0.52	100.07

表 7.1 青瓷釉颜色测定数据

Table 7.1 The experimental data of tested celadon glaze color

名 称	亮 度	主波长	饱和度
哥窑灰青釉	16.40%	570 毫微米	13.0%
弟窑粉青釉	24.28%	547 毫微米	6.0%

表 7.2 青瓷釉色度图座标数据

Table 7.2 The data of celadon glaze chromaticity coordinates

编号	名 称	Y 轴	X 轴
1	仿龙泉弟窑釉	0.3697	0.2956
2	仿龙泉哥窑釉	0.2953	0.3405
3	南宋弟窑梅子青釉	0.3670	0.3300
4	南宋弟窑粉青釉	0.3830	0.3360
5	南宋弟窑浅梅子青釉	0.3790	0.3380
6	南宋龙泉哥窑釉	0.3462	0.3281
7	南宋弟窑粉青釉	0.3407	0.3084

表 7.3 哥窑和弟窑釉的反射率测试数据

Table 7.3 The determination data of the reflection ratio of Geware and Diware's Glaze

波长(m ^μ)	南宋哥窑釉反射率(%)	南宋弟窑釉反射率(%)
400	13.2	19.3
450	17.7	26.3
500	20.5	30.7
550	21.5	29.8
600	21.3	25.2
650	19.0	17.5
700	16.2	11.6
750	13.3	7.3
800	11.1	4.9
850	9.7	4.0
900	8.8	3.3
950	8.5	3.2
1000	8.3	3.2

从南宋瓷胎的化学成分范围来看,其成分极近似于现在大窑的瓷土和紫金土原料的成分,故推断当时弟窑的朱砂胎制品,其胎泥很可能是只用一种瓷土原料加上 10~25%左右的紫金土原料配合而成的;而弟

窑白胎制品的胎泥则可能采用一种瓷土制备成的。坯料配制时采用含铁量较高的紫金土原料是南宋朱砂胎产品制备的工艺特点之一,这与现代白瓷产品对坯料配制的要求颇不相同。

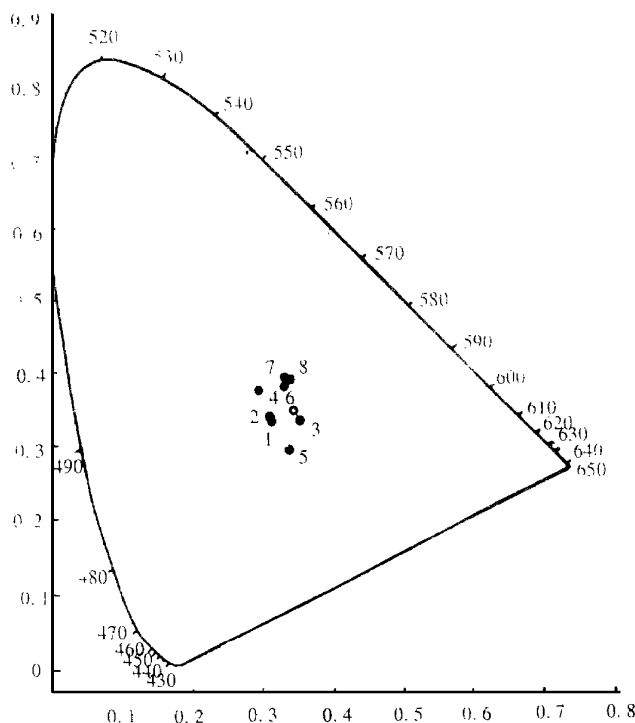


图 5 青瓷釉在色品图上的位置

Fig. 5 Position of celadon glaze in chromaticity diagram

1. 宋官窑粉青釉
2. 仿官窑粉青釉(1980 年杭州瓷厂仿)
3. 仿官窑月白釉(1980 年杭州瓷厂仿)
4. 仿弟窑翠青釉(1981 年龙泉瓷厂仿)
5. 仿哥窑灰青釉(1981 年龙泉瓷厂仿)
6. 宋弟窑梅子青釉
7. 宋弟窑粉青釉
8. 宋弟窑浅梅子青釉

注:9 号哥窑釉的位置在图 5 中的 1 号和 2 号点的右侧,10 号弟窑釉的位置在 1 号和 2 号点的左侧,因 4 个点的位置较密集,故 9 号和 10 号点未列上。

从釉的化学成分可以看出,弟窑釉的化学组成中, SiO_2 和 K_2O 含量较龙泉瓷厂生产的青瓷釉高,而 CaO 含量较低。但四个标本釉内 CaO 含量仍在 9~13% 左右,根据成分应属石灰碱釉。关于釉中 5% 左右 R_2O 的来源,我们认为在配料时一部分系由瓷土和紫金土原料引入的;因宋代采用木叶灰配釉,另一部分可能是毛竹灰或凤尾草灰等一类木叶灰引入。4 个标本的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量相差不大,尤其是 Fe_2O_3 的含量相差更少,釉的氧化比约在 3 左右,而且釉的外观色泽均极

晶莹滋润,这说明当时釉的配制具有丰富经验,釉料操作的控制也是相当严格的。南宋弟窑青瓷釉当 $\text{R}_2\text{O} + \text{RO} = 1$ 时,釉内 R_2O_3 的分子数大部分为 0.5~0.7, R_2O 的分子数大部分为 3.5~5.0,釉的氧化比约为 2.8~3.3,这也可说明当时釉的配制技术具有相当高的水平。

关于南宋青瓷釉配方中有没有掺和糠灰和紫金土问题,根据我们试验体会,可以断言南宋青瓷釉的配方中肯定是没有采用糠灰的;至于紫金土,我们认为对于色调较淡的釉(如月白等),可不用掺和紫金土;而色调较深的釉(如梅子青等),是需要掺和紫金土的。

(3)南宋龙泉青瓷的烧成温度,从釉的化学成分来分析,作为助熔剂的 CaO 含量大于或接近于 10%,而 K_2O 和 Na_2O 总量亦在 5% 左右,所以,推测釉的熔融温度不会超过 1300℃。从胎的化学成分来分析,胎内 R_2O 和 RO 及 Fe_2O_3 含量较高,所以,胎的烧成温度也不可能超过 1300℃。判断胎的烧成温度时,可以采用下列公式进行大体的计算:

$$\text{胎的烧成温度} = \frac{360 + \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{RO}}{0.228} \times 75\%$$

式中, Al_2O_3 为当胎内 Al_2O_3 与 SiO_2 总量为 100% 时氧化铝的百分率; RO 为胎内 Al_2O_3 与 SiO_2 总量为 100% 时, K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 和 Fe_2O_3 总和的百分率。公式中的 75%,系胎的烧成温度系数,此可根据实际情况来确定。

为了测定南宋龙泉青瓷的烧成温度,我们曾在大窑采集发掘宋代窑址所出土的宋代装窑用的匣钵以及尚未烧成的制品,放在龙泉瓷厂倒焰窑中进行试验,采用光学高温计和 1600℃ 铂—铂铑热电偶以及三角锥相互对照来测定宋代未烧成制品的烧成温度,并大体观察匣钵的高温荷重软化温度。从几次试验测定得知,南宋梅子青制品的烧成温度约在 1260~1300℃ 之间,但粉青制品的烧成温度仅在 1200~1260℃ 左右,而且匣钵在温度超过 1300℃ 时,也会发生坍塌现象。从周仁和张福康先生等对龙泉历代青瓷的烧成温度和气氛性质研究的数据亦可看出,龙泉青瓷的烧成温度是在 1300℃ 以下,其数据如表 8 所示。

(4)从表 4 的光谱分析数据可看出,现代龙泉青瓷釉中含有不少的稀有元素及微量的着色元素,如 Ti 、 Mn 、 Y 、 La 、 Zr 、 Cu 、 Mo 、 Ni 以及 Sr 、 Ba 、 Pb 等,这些元素对青瓷釉的呈色是产生一定影响的。因为其中如钡和铅是强烈的助熔剂,锡和锆是乳浊剂,钛和铜以及锰等是着色剂。按照理论, Ba^{++} 、 Sr^{++} 的阳离子半径较 Ca^{++}

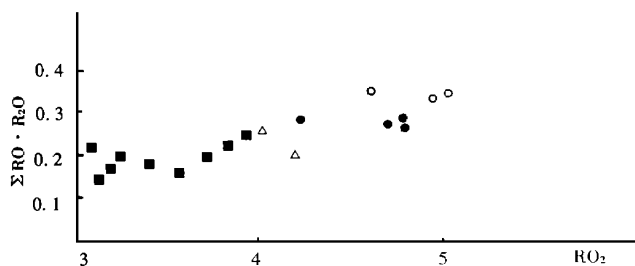


图 6 南宋官窑、龙泉哥窑和弟窑胎的化学组成分布图

Fig. 6 Distribution diagram of the bodies chemical composition of Guanware Longquan Geware and Diware in the Southern Song Dynasty

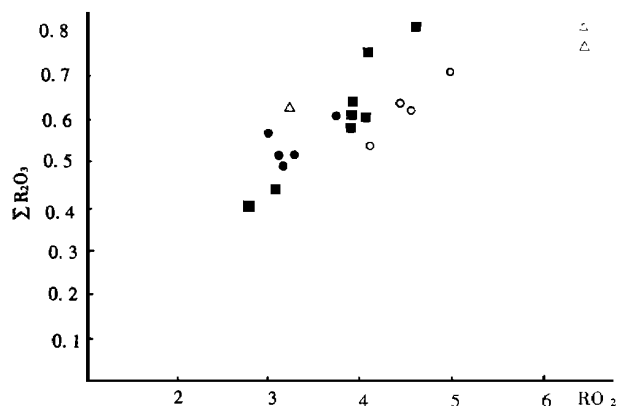


图 7 南宋官窑、龙泉哥窑和弟窑胎的化学组成分布图

Fig. 7 Distribution diagram of the bodies chemical composition of Guanware Longquan Geware and Diware in the Southern Song Dynasty

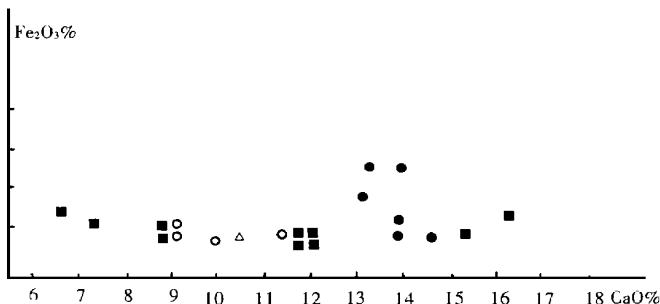


图 8 南宋官窑、龙泉哥窑和弟窑釉的化学成份分布图

Fig. 8 Distribution diagram of the glazes chemical composition of Guanware, Longquan Geware and Diware in the Southern Song Dynasty

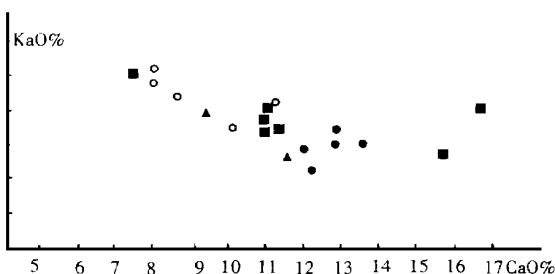


图 9 南宋官窑龙泉哥窑和弟窑釉的化学成份分布图

Fig. 9 Distribution diagram of the glazes chemical composition of Southern Song Guanware, Longquan Geware and Diware

大,对加强青釉呈现青色的色调是有利的;锡则使青瓷釉的透明度降低;稀土元素镧和铈对青釉的作用尚待进一步研究,但由于它们的含量很微,所以,对青瓷釉的呈色起决定性作用的还是铁元素。

从光谱分析数据还可看出,南宋青瓷釉内未发现锌、钴、镍、铬、镉、铋等元素,这与龙泉大窑瓷土和紫金土原料光谱分析结果亦大体一致。此亦可判断当时釉所用的原料,虽系采用石灰石、瓷土及紫金土等天然性的原料,但与龙泉瓷厂以往曾用宝溪地区的原料不同。

(5)从南宋弟窑几个样品的胎釉显微结构观察,胎内石英颗粒和莫来石晶体分布比较均匀,石英颗粒大部分都在 20 微米以下,证明当时对坯泥的捏练方面还是很细致的,并且这种分布对于提高坯体的机械强度有一定的好处。至于釉的显微结构观察结果,釉内含有 5~10%肉眼不易看到的小而均匀的气泡,气泡大

小大部分都在 0.01~0.05 毫米之间,并发现含有 5%左右均匀分布的石英晶体。这也可推知南宋青瓷釉料的粘度较大,粉青产品的烧成温度较低,并可说明釉的光泽为什么有柔和的表现。

釉内含有 5~10%左右细分散的小气泡是龙泉青瓷釉的特征之一,气泡产生的原因,可从下列几方面来分析:

1)因为青瓷釉中含有 0.8~3%的氧化铁,由于 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightleftharpoons 4\text{FeO} + \text{O}_2$ 这一平衡在高温时极易变动,这就使它对烧成气氛和温度的反应很敏感,在 1000℃以上的高温和有还原剂存在的条件下,很容易促使 Fe_2O_3 还原或热分解,即平衡易于向生成 FeO 的方向移动。因青瓷釉内铁的氧化物含量较白釉高,因而釉料在烧成过程中产生液相的开始温度比一般白釉为低,加上青瓷釉层较厚,所以,在还原期内 Fe_2O_3 所放出的氧很

表 8 龙泉历代青瓷的烧成温度和气氛性质

Table 8 Properties of firing temperature and atmosphere of Longquan celadon in the past dynasties

编号	胎				釉				烧成温度 ℃	气氛性质	备 注
	FeO%	Fe ₂ O ₃ %	还原比值 FeO/Fe ₂ O ₃	胎 色	FeO%	Fe ₂ O ₃ %	还原比值 FeO/Fe ₂ O ₃	釉 色			
S3-3	0.61	1.74	0.35	白中带灰黄	0.11	0.87	0.13	淡黄带灰	—	强氧化	南宋产品
ML-3	0.37	1.29	0.20	灰 黄	0.25	1.16	0.21	深黄带灰	1231±20	强氧化	明代产品
MSL-1	—	—	—	白中略带灰	0.50	1.23	0.38	黄 绿	—	弱还原	北宋产品
S3-4	—	—	—	灰 黑	0.17	0.64	0.40	灰 青	—	弱还原	南宋产品
MSL-1	1.56	0.51	3.06	淡 灰	0.17	0.62	1.14	绿中带灰黄	1180±30	弱还原	北宋产品
SSL-2	1.77	0.10	17.70	白中带灰	0.59	0.28	2.10	淡粉青	1230±20	还 原	南宋产品
S3-1	1.90	0.25	7.6	白中带灰	0.77	0.23	3.34	粉 青	—	还 原	南宋产品
YL-1	1.31	0.15	8.7	白中略带灰	1.13	0.23	4.10	粉青带黄绿	—	较强还原	元代产品
SSL-7	—	—	—	白度很高, 略带灰	0.83	0.07	11.9	梅子青	估计: 1250~1280	强还原	南宋产品
110	—	—	—	接近现在景 德镇普通白 瓷水平	0.87	0.10	8.7	接近梅子青	1300	强还原	1961 年生 产产品
S3-2	—	—	—	白中带灰	1.89	0.16	11.8	虾 青	—	强还原	南宋产品

难全部冲破釉层阻力而逸出;当 1200℃ 以后釉面密闭,未逸出的氧便遭受熔融的釉层所阻抑而留在釉内形成气泡。另一方面,在高温时,青瓷釉料虽已熔融或釉面密闭,但 Fe₂O₃ 的热分解过程在 1200℃ 以上仍会继续进行,此时所放出的氧气更难逸出,故含有铁分的青瓷釉料较其它一般釉料易于形成气泡。

2)因为青瓷釉一般是以石灰石为熔剂,在烧成过程中,如果在比较低的温度下釉还处在多孔性的状态时,碳酸钙分解的气体来不及从瓷釉中完全排出,便会在已经玻化或已充分熔融又具有一定粘度的釉层中产生气泡。特别是在过烧时,由于氧化钙的多量存在,使釉料在烧成后高温冷却时的粘度增长较快,因而在高温分解或残存的各种气体无法冲破釉层而逸尽,导致气泡显得更为突出。但过烧而引起的大气泡不仅对青瓷釉晶莹滋润的色泽无助,而且此时因流釉导致制品的釉色不一致,使产品的美观遭受影响。

3)因为青瓷系用强的还原焰烧成,在强还原焰烧成过程中,由于大量碳素的沉积,这也是青瓷釉产生气泡的原因之一。

青瓷釉内气泡的含量和大小,与釉料的化学成分(尤其是 CaO 的含量)、熔融温度、高温粘度、烧成温度及气体在熔融釉中的溶解度等有关。釉料烧成时的始熔温度较高和高温粘度较低,则釉内气泡含量就较少。南宋青瓷的几个标本,其釉内气泡均小而匀,这与当时

对釉料配制的技巧具有较高的造诣和制品在较低的温度下烧成有关。

(6)青瓷釉的厚度和中间层,据我们在显微镜观察的结果,釉层厚度一般都在 1 毫米上下,中间层厚度亦在 0.1 毫米以上。与白瓷对照,可见其釉层是很厚的。施釉的厚薄取决于上釉的技术和生坯的强度等条件以及制品美观上的要求;一般青瓷制品的釉层愈厚,釉色愈深并显得更为幽雅。小件制品有此厚釉,推测在当时制瓷的条件下,生坯是采用素烧的,否则强度不够,并易变形,同时烧成后制品会发生跳釉现象,所以,生坯采用素烧是南宋青瓷的工艺特点之一。另外,从实物观察可以看出,“哥窑”、“弟窑”制品是施釉二至三次。因为一次施釉的制品不可能获得厚的釉层,制品的釉色也就不可能显得如此柔和悦目。从实物资料观察,我们认为南宋青瓷部分制品的裹里是采用荡釉法,外面是采用浸釉法上釉的。从实物观察还可以看出,南宋龙泉青瓷部分制品的成型是采用车盘成型的;在装饰方法上,除采用了浮雕等外,已采用印花的方法来提高生产效率,如双鱼洗的双鱼即采用印花。

虽然“弟窑”标本的釉层很厚,但由于胎釉的中间层显得十分清楚,因而釉层牢固地附着在坯体上没有剥落现象。根据显微观察,在中间层处发现有石英晶体和莫来石的微小晶体,这些晶体是在高温时由坯和釉相互扩散和熔融的结果而形成的。中间层是胎釉性

质上的过渡层,它使胎釉之间的少许热膨胀差异得到补偿而将胎釉牢固的胶结在一起,从而使釉不致产生龟裂和剥釉等现象。

(7)从 X-射线衍射结果得知,青瓷釉内含有石英晶体。所以,南宋龙泉青瓷釉具有柔和的半光亮状态的原因,除了因为它的釉层较厚、釉内含有无数的小气泡和经历的时间较长等外,釉内含有 5%左右均匀的石英晶体也是造成半光亮的原因之一。当然,弟窑制品的烧成温度稍低于正烧温度以及釉的高温粘度较大等,亦是造成釉呈半光亮状态的原因。正是由于这些因素的作用,因而使南宋青瓷釉多少呈现一些无光状态,显得深沉雅静。

表 9 紫金土的含量与釉内鸡爪纹的关系
Table 9 The relation of Zijin clay content and chicken paw pattern in the glaze

编号	配 方 (%)				备 注
	紫金土	釉土	石灰石	糠灰	
1	9	47	17	27	1. 釉表面没有裂纹,但在釉内具有鸡爪纹,并且随着紫金土含量增高,鸡爪纹愈显著。 2. 本表系试验紫金土含量与釉内鸡爪纹的关系,所以与龙泉瓷厂生产配方有较大出入。
2	11	45	17	27	
3	13	43	17	27	
4	15	41	17	27	
5	17	39	17	27	

(8)从釉的反射率测定数据可知,青瓷釉主要是反射波长 500~600 毫微米的光。在波长 500~550 毫微米范围内,弟窑釉的反射率较哥窑釉高得多,因而颜色显得格外翠青。此点,从龙泉哥、弟窑釉在色品图上的位置也得到相同的结论。因而,在外观上,弟窑青瓷显得特别耀青流翠。

(9)根据郭演仪教授研究,龙泉地区原料中一部分属于瓷石类,另一部分属于原生硬质粘土类,这些瓷土原料极近似江西景德镇制瓷所采用的各种瓷石。采用瓷石配方在烧成时由于坯体急剧收缩制品易产生变形,南宋龙泉青瓷胎质较粗和弟窑粉青色釉的绝大部分制品都有微生烧现象,这可能是当时为了克服制品变形所采取的措施之一。

(10)从图 10 仿官窑青瓷胎、釉膨胀系数与温度关系图中可以看出,在 500℃ 时,胎、釉的膨胀系数二者相差很小;温度下降到 200℃ 时,胎、釉的膨胀系数差异显著上升;到 100℃ 时,釉的膨胀系数大大超过胎的膨胀系数,因而产生开片现象。从图 10 中还可看出,

仿弟窑青瓷胎、釉膨胀系数差值则恰恰相反,故无开片现象。推断南宋哥窑青瓷釉纹片的形成及弟窑青瓷釉无纹片,其原因也是如此。

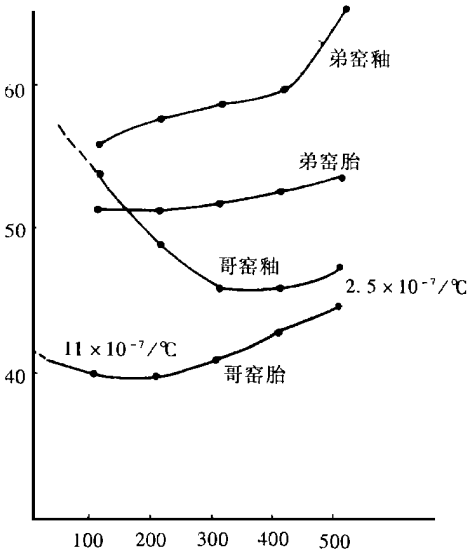


图 10 仿官窑、仿弟窑青瓷胎、釉膨胀系数与温度关系
Fig. 10 The relation between the coefficient of expansion and the temperature of imitated Guanware and imitated Diware's celadon bodies and glazes

表 10 石灰石的含量与釉内鸡爪纹的关系
Table 10 The relation of limestone content and chicken paw pattern in the glaze

编号	配 方 (%)				备 注
	紫金土	釉土	石灰石	糠灰	
6	11	49	13	27	釉面无光和裂纹,釉内鸡爪纹较多
7	11	47	15	27	釉面半木光,无裂纹,釉内有鸡爪纹。
8	11	45	17	27	釉面晶润,色泽柔和,釉面无裂纹,釉内没有鸡爪纹。
9	11	43	19	27	釉面出现小裂纹,玻璃光泽,釉内没鸡爪纹。
10	11	41	21	27	釉面裂纹很多,裂纹的形态似冰裂纹,玻璃光泽,浮光较强。

(11)关于南宋龙泉弟窑产品的釉内“鸡爪纹”和哥窑产品的开片问题,我们亦曾附带进行试验,证明鸡爪纹的成因与釉料的组成和烧成温度等有关。1962 年

龙泉瓷厂生产的青瓷釉,当青瓷制品素烧上釉后,尚未入窑烧炼时,釉层表面便开始出现多量的裂纹,且当烧成温度在 1180°C 以前釉面尚未密闭时,青瓷制品釉的表面上仍然保持不少的裂纹,直到烧成温度在 1180°C 时,釉料内熔融温度较低,粘度较小,比较容易流动的玻璃质才逐渐填满裂纹的间隙部位而使制品呈现出釉内裂纹(鸡爪纹)。在青瓷釉正烧温度前,即在 $1180\sim 1260^{\circ}\text{C}$ 时,釉内鸡爪纹随着烧成温度的增高而逐渐地减少,直至到达烧成温度时,釉内鸡爪纹现象才完全消逝。所以,如果在低于烧成温度 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 就止火,出窑后的部分产品便会存在有釉内鸡爪纹现象;反之,如果在高于烧成温度 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的情况烧成,则产品很少有釉内鸡爪纹现象。除了烧成温度的因素外,我们还曾有意地逐步改变其他条件,对青瓷釉内鸡爪纹的成因进行试验,发现釉料配方中糠灰的组分愈多,釉料化学组成中 Al_2O_3 的含量就愈多或 CaO 含量就愈低、釉料的粉碎度也愈大、釉浆没有陈腐,釉层愈厚,釉料高温粘度愈大,高温烧成阶段的保温时间愈短,则易产生釉内鸡爪纹现象。釉料配制时紫金土和 CaO 含量与釉内呈鸡爪纹现象的关系如表 9、10 所示。

釉面纹片(开片)是哥窑产品的重要特征之一。哥窑产品釉面上的裂纹的成因,根据我们在工作中探索的结果,证明主要是取决于胎和釉的化学组成,即产生开片的主要原因是胎和釉的膨胀系数不一致,这一因素起着主导作用。由于一般瓷釉抵抗张应力的能力远较抵抗压应力的能力小。所以,当釉的膨胀系数较坯体大时,釉在冷却中便处于张应力状态,并且受到张应力作用,当所发生的应力超过容许弹性和强度极限后,釉便没有足够的弹性和抗张机械强度来抵抗其间所发生的应力,因而釉层趋向龟裂。此外,釉层厚度、烧成温度和冷却的速度等因素对青瓷釉开片的形成亦具有密切的关系。特别是釉层厚度的影响较为明显,即使是胎和釉的膨胀系数很接近,但当制品的釉层厚度超过一定的正常厚度时,亦可出现龟裂;推敲其原因可能是制品在烧成过程中,由于胎和釉的化学成分交互作用(扩散和溶解)而形成中间层,而中间层厚度的大小只与胎和釉的化学成分、烧成时间和温度、颗粒细度、坯体的孔隙以及素烧温度等有关,而与釉层的厚度没有关系。所以,当胎釉的化学组成和烧成温度等条件相同时,中间层的厚度也是一样的;如果是在 0.2 毫米厚度的釉层中所产生的应力,这种中间层能有效的予以缓和,那么,在釉层为 1 毫米的情况下,由于其中所产生的应力超过釉的容许弹性和抗张机械强度极限,

即中间层未能很好地予以缓和。因此,在坯釉膨胀系数即使很接近的情况下,过厚的釉层也易趋向龟裂。当然,在坯釉膨胀系数不同的情况下,过厚的釉层则更易出现龟裂。因为中间层的膨胀系数约相当于坯釉膨胀系数的平均值,所以,愈接近于坯体部分的釉,其膨胀系数也愈与坯体相接近,而距离坯体表面愈远的釉层,其膨胀系数也就与坯体相差愈大,加上一般坯釉都是导热性很差的物质,釉层过厚,内层在冷却过程中不易散热,热平衡较难建立,因此产生较大的应力,使釉面发生裂纹。烧成温度过高,釉层亦易于出现龟裂的原因,主要是在一定的温度范围内,烧成温度愈高,则釉溶融就愈充分,因而热稳定性就较差,而且烧成温度愈高,瓷器烧成后的热余效应也愈大,从而导致釉层出现龟裂。至于冷却后期(900°C 以下)制品冷却的速度愈大,釉易生成“惊风”现象,主要是由于此时液相已经消失而且有石英晶型发生转变的缘故。

釉面上呈现裂纹的大小,主要取决于胎釉膨胀系数差别的大小和釉层厚度。一般胎釉的膨胀系数相差较大和釉层较薄时,裂纹多形成小片。反之,即成大片。此外,我们曾试验将形成“釉内鸡爪纹”和“开片”的因素同时作用在同一制品上,结果,烧成后的产品即同时存在“开片”和釉内“鸡爪纹”现象。

(12)“朱砂底”是南宋弟窑产品存在比较普遍的现象(青瓷制品烧成后,在产品底部没有上釉的部位呈显出黄色或红色,称为“朱砂底”),而“紫口铁足”是南宋哥窑产品的重要特征之一。青瓷制品形成“朱砂底”或“紫口铁足”的原因,据我们对龙泉青瓷研究过程中所得的结果,证明是由于胎内含有一定量的铁的氧化物,而且在烧成后期的冷却阶段产生二次氧化,有一定数量的氧化亚铁被氧化的缘故。制造“朱砂底”的青瓷坯料,其氧化铁的含量一般在 2.5% 左右,而制造“紫口铁足”的青瓷坯料内氧化铁含量往往在 4~5% 左右。当青瓷坯料内氧化铁含量在 1.5% 以下时,制品烧成后胎坯未上釉的部位呈现白色或微黄色;若氧化铁含量在 1.5~2.5% 时,烧成后胎坯未上釉的部位就呈现黄色或红色;当坯料内氧化铁含量在 4~5% 时,烧成后胎坯未上釉的部位便呈现灰色、褐色或黑色。

在青瓷烧成过程中由于 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightleftharpoons 2\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$ 是可逆反应,所以坯中一部分铁被还原为氧化亚铁——氧化铁被还原为氧化亚铁的数量与烧成制度有关,即与还原性气氛的强弱、还原期的起始和终结的温度、还原的时间长短和烧成后期的高温冷却速度等有关,也与原来坯内所含氧化铁的数量有关。以“朱砂

底”为例,假如烧成后胎面上氧化铁的数量占优势,胎坯未上釉的部位便呈朱砂色。反之,假如胎面上氧化亚铁占优势,则胎面便呈现出白色或淡青色。所以,若采用氧化焰烧成时,制品底部没有上釉部位的表面上,必然产生朱砂色。但是,即使制品在还原焰中烧成,因烧成后期的高温冷却阶段窑炉内的气氛转为氧化的性质,制品底部未上釉的部位表面上仍然会被氧化,形成“朱砂底”。

应该指出,“朱砂底”的现象只发生在青瓷制品未上釉部位的表面上,而胎坯的内部仍为白色,因为二次氧化现象只在表面上进行(朱砂底的产品,虽然底部未施釉部位的表面上呈轻黄色或红色,而胎的内部断面呈白色或淡青色,但它们所含铁的氧化物($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)总量仍是相同的。但“紫口铁足”产品,不仅是制品未上釉部位的表面上呈现褐色或黑色,而且胎质内部亦同样呈较淡的颜色,这是因为哥窑产品胎所含的铁的氧化物含量较弟窑产品高的缘故。

由于哥窑“紫口铁足”产品胎的氧化铁($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)含量较弟窑“朱砂底”产品约高一倍左右,在高温烧成过程中胎骨所含铁份可部分地扩散和熔入釉内而加深釉色,兼而青瓷釉是以石灰石作熔剂,一般透明性较好,胎面中间层的颜色多少能给予釉的色调以一定的影响,所以,哥窑产品釉内铁的氧化物的含量一般可较弟窑釉稍低一些。

(13)弟窑的梅子青和粉青两种色釉,可以说是中国青瓷釉的代表,也可以说是青瓷的整个制造工艺和技巧达到了相当成熟地步的产物,以“粉青”釉色的制品为例来分析。

1)从釉料方面来说,如其釉料中铁份或 CaO 的含量增加,就要变成梅子青或豆青;若釉料中铁份含量减少时,就会形成白湖或月下白;若 CaO 含量少而铁份多时,釉就可能呈现灰褐色或古铜色。据我们试制研究的结果,证明如果釉的组成不变,则釉所呈现的色调与其铁份含量成正比,即铁的氧化物含量愈少,色调愈浅;含量愈高,色调亦愈深。其成份范围大致是:含量在 $0.8 \sim 1.05\%$ 时,釉呈粉青色,含量在 $1.05 \sim 1.40\%$ 时呈梅子青色,在 $1.40 \sim 2.00\%$ 时呈豆青色,在 2% 以上时则呈深豆青、蟹壳青或茶叶末等较深的色调。上述铁的成分范围与我们对南宋样品分析结果亦是一致的。若以釉的化学分子式中铁氧化物的分子数来观察,亦是铁的分子数愈高,釉色愈深。其范围大致是:铁氧化物($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)的分子数在 $0.020 \sim 0.025$ 时釉呈粉青,在 $0.025 \sim 0.040$ 时呈梅子青,在 $0.040 \sim 0.$

060 时呈豆青,在 0.06 以上时呈深豆青或蟹壳青等色调。

2)从坯料方面来说,坯料内铁份含量的变化同样会使釉的呈色发生影响。我们的实验证明,若胎内铁份含量在 2.5% 左右时,釉呈粉青色;胎内铁份含量在 1.5% 以下时釉便呈浅粉青色;铁份含量在 5% 左右时釉便呈灰青色,并可能产生“开片”现象。如果坯料内不掺加紫金土而是采用白胎时,同一种釉料,则釉色呈色较浅。

3)在上釉工序中,假如制品的釉层上的很薄,不仅不能呈现出晶莹滋润的粉青色而变成月下白等色调,而且釉可能出现“青中带黄”现象;若釉层太厚的话,则会发生流釉或产生釉内鸡爪纹及釉面开裂等现象。

4)在烧成过程中,若气氛控制不当,自然不能呈现出美丽的粉青色——氧化性气氛中烧成时,釉便呈现不同程度的黄色;在轻还原性气氛中烧成时,由于釉内具有较大比例的 Fe_2O_3 ,釉便呈现“青中带黄”;在重还原焰中烧成时,若控制不当,则易产生熏烟现象;在高温烧成阶段如果气氛性质反复波动,便会使釉呈现出“青中带黄”的现象;高温还原阶段采用湿的木柴作燃料时,就会形成很不美观的灰青色或灰褐色;烧成的温度如过高了,就要发生流釉和形成较深的翠青色,若烧成的温度过低时,便可能出现釉内鸡爪纹和形成没光亮的淡青色。在冷窑过程中若在高温时冷却的速度很慢,则会发生二次氧化从而使釉呈现出“青中带黄”的现象,若低温阶段时冷却速度太快,则易产生“惊风”现象。当然,弟窑产品胎质较粗,且粉青产品多数为生烧或微生烧,而梅子青产品往往因流釉而使同一产品色调不一,从工艺观点来看,这些还是一种缺陷。

(14)在宋代出土的器物中,有时也常发现胎骨系“紫口铁足”但釉没有碎纹的器物,或胎骨为白胎与“朱砂底”而釉有碎纹的器物,人们往往认为它们不是哥窑或弟窑的产品。其实,若单凭碎纹来鉴别哥、弟窑产品是不全面的。虽然釉有无碎纹是鉴定和区别哥、弟窑的特征之一,但不能单以釉的碎纹为标准来判断。因为即使是同一个人和同一座窑炉,制造的工艺因素也相同,在古代手工操作的情况下是很难保证所制造出来的产品全部有碎纹或无碎纹。这是由于胎和釉所用的原料,虽然都是同一地区和相同种类,但因原料随着所开采的矿层深度不同而化学成分发生波动,因而影响了制品胎和釉的化学组成。制品胎和釉的化学组成既然发生波动,而胎和釉的热膨胀系数是否相适应是釉能否发生碎纹的重要因素之一,所以“紫口铁足”的

哥窑制品,有时因为原料化学成分发生变化等原因,其釉亦可能不出现碎纹;反之,白胎或朱砂底的弟窑制品,由于原料化学成分变更等原因,其釉亦可能出现碎纹。何况,碎纹釉的形成因素很多。所以不能单纯以碎纹来划分或判断哥窑、弟窑产品。我国古籍上亦有不以碎纹而采用釉色加以区别者,如《春风堂随笔》中说:“弟所陶青器,纯粹如美玉,为世所贵,即官窑之类。兄所陶色淡。”

4 结 论

(1)青瓷釉内含有0.8~3%的铁的氧化物,所以,采用还原焰烧成时,由于氧化铁被还原为氧化亚铁,釉呈不同程度的青绿色。釉内氧化亚铁与氧化铁的比值大小,决定釉呈不同的青绿色的色调。

(2)影响青瓷釉呈色的因素颇多,如胎和釉的化学组成、烧成气氛、釉料颗粒度、釉层厚度、烧成温度、燃料的成分等等对青瓷釉的呈色皆发生显著的影响。

(3)“鸡爪纹”、“开片”、“朱砂底”和“紫口铁足”现象的成因,通过试验研究,证明“鸡爪纹”的成因主要取决于釉的化学组成和烧成温度等因素;“开片”的成因主要取决于胎和釉的化学组成,但也与釉层厚度和烧成温度等因素有关;“朱砂底”和“紫口铁足”形成的原因系由于胎内含有一定量的铁质在烧成后期由于二次氧化引起的,当胎内含有1.5~2.5%铁质时呈“朱砂底”现象,4~5%左右则呈“紫口铁足”现象。

(4)哥窑和弟窑产品的区别,主要取决于胎的化学组成,釉的化学组成二者比较接近。由于哥窑胎骨含有较弟窑高的 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 而 SiO_2 含量较低,所以产品具有“开片”和“紫口铁足”等现象。

(5)研究结果表明,龙泉哥窑、弟窑青瓷的胎在化学组成上有显著差别:

①弟窑胎的成分在高硅区;哥窑胎的成份分布在高铝区。

②弟窑青瓷釉属石灰—碱釉,哥窑有石灰釉,也有石灰—碱釉。

南宋哥窑釉的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 克分子比,较弟窑低。釉中氧化钙含量,哥窑较弟窑高,哥窑钙含量分布范围较广;釉中氧化铁含量,哥窑与弟窑相近。

釉中氧化钾含量,哥窑和弟窑接近。

哥窑和弟窑釉的基本成份接近,其差别主要在胎的化学组成。胎的化学组成对龙泉青瓷釉的色调和开片具有极密切的关系。

由于胎、釉的化学组成有显著的差别,可见南宋龙泉哥窑、弟窑配制是不相同的。

(6)青瓷釉的开片,主要是胎釉膨胀系数随着冷却温度下降,差值愈来愈大。仿哥窑粉青釉在500℃以上,胎釉的膨胀系数接近,釉的膨胀系数仅比胎大 $2.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$;在100℃时差值为 $11 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,釉面产生冰裂纹。而仿弟窑青瓷胎釉的膨胀系数随冷却温度下降,差值反而缩小,故釉面很少开片。其次,釉层厚度对开片大小也有密切关系,一般釉层愈厚,釉面纹片愈大。推断南宋哥窑釉面形成冰裂纹和弟窑釉面无纹片,原理也是如此。反射率测试数据可知,在500~600毫微米范围内,南宋哥窑的反射率较南宋弟窑低得多。尤其是在波长550毫微米左右的绿光反射率,南宋弟窑较哥窑的反射率高40%以上,而这正是人的眼睛感受度最大部分,因而弟窑青瓷釉显得特别醒目,在外观上与哥窑和南宋官窑青瓷釉有显著不同。

(7)从扫描电镜可以看出,南宋哥窑釉内气泡较弟窑梅子青釉多而小,说明其烧成温度较弟窑梅子青釉低。由于二者釉内都含有未溶融的石英残留物和气泡,促使进入釉层的光线发生强烈的散射,因而釉面呈现柔和的光泽。

(8)从釉用原料化学成份分析得知,龙泉宝溪紫金土内有害杂质二氧化钛含量较大窑紫金土和木岱口紫金土高一倍以上,显然,采用宝溪紫金土配釉,较难获得粉青和梅子青釉色。

从大窑采拾的南宋粉青、梅子青标本釉的光谱分析也可看出,二个标本釉内二氧化钛含量都较龙泉瓷厂采用宝溪紫金土原料配制的豆青釉低得多,因而釉的呈色显得特别青翠。

从原料的光谱分析还可看出,龙泉地区所产的紫金土原料都含有镧元素,而所有瓷土原料都没有发现镧元素。紫金土原料内稀土元素镧等对青瓷釉呈色的影响,尚待深入研究。

参 考 文 献

- 1 中国硅酸盐学会·中国陶瓷史.北京:文物出版社,1982
- 2 叶宏明,曹鹤鸣.关于我国瓷器起源的看法.文物,1978,(10):35—41
- 3 叶宏明·南宋龙泉青瓷的研究.考古学集刊.北京:考古出版社,1984:251—275
- 4 叶宏明等·龙泉青瓷研究.北京:文物出版社,1989
- 5 浙江省轻工业厅编·龙泉青瓷研究.北京:文物出版社,1989