

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2019.02.019

古陶瓷釉面析晶的研究

王恩元¹, 熊樱菲¹, 吴婧玮¹, 龚玉武¹, 王建文²

(1. 上海博物馆文物保护科技中心, 上海 200003; 2. 上海博物馆考古部, 上海 200003)

摘要: 研究选取青龙镇出土唐宋时期汀溪窑, 东张窑, 越窑, 长沙窑等十个南方各窑口瓷片, 并结合窑址出土的建窑、德清窑、龙泉窑瓷片, 通过偏光显微镜显微观察了各窑口瓷片的釉层析晶现象, X射线荧光光谱仪测试了青龙镇出土各窑口瓷器的胎釉成分, 研究了胎釉的原料配方。结果显示古代陶瓷析晶釉可以分为三种: (1) 釉面上层氧化铁析晶; (2) 釉层中靠近釉泡处钙长石析晶; (3) 胎釉结合处钙长石针状析晶。析晶结构影响古代陶瓷的视觉效果, 例如: 汀溪窑和福建一带仿烧龙泉窑的胎釉结合处细碎状钙长石析晶结构与龙泉窑梅子青微观结构相似, 这可能是其被称为“土龙泉”的原因。

关键词: 釉面析晶; 氧化铁; 钙长石; 青龙镇

图法分类号: K878.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-2278(2019)02-0239-08

Crystallization of Ancient Porcelain Glaze

WANG Enyuan¹, XIONG Yinfei¹, WU Jingwei¹, GONG Yuwu¹, WANG Jianwen²

(1. Shanghai Museum Conservation Center, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Museum Archaeology Department, Shanghai 200003, China)

Abstract: Samples of different porcelain wares such as Tingxi ware and Dongzhang ware, etc. excavated from Qinglong Town were tested by EDXRF, SEM and polarizing microscope. Specimens of Jian ware, Deqing and Longquan wares were also tested for comparison. The results show that crystallization glazes of ancient times can be divided into three types: 1. iron oxide crystals on the glaze surface; 2. calcium feldspar crystals in the middle of the glaze layer which is close to the glaze bubble; 3. crystallization in the junction of the glaze and body. Disorderly anorthite crystallization of Tingxi ware and imitated Longquan ware is similar to the microstructure of Longquan ware, which resulted in the distinctive visual effect of 'crude Longquan ware'.

Key words: crystallization glaze; iron oxide crystal; calcium feldspar crystal; Qinglong Town

0 引言

中国古代各地窑口其原料选取, 成型工艺, 装饰手法等都有其各自的特点, 这为眼学及科技鉴定古陶瓷的年代与产地提供了良好的技术基础。然而不同窑口的也并毫无关联, 据传龙泉制瓷工艺在清初已失传, 据传近代制瓷工艺则为福建德化人于咸丰年间重新建窑烧制粗瓷所传授^[1], 这就说明在古代, 福建北部与浙江南部制瓷工艺是有联系的。从显微结构, 釉面析晶等方面来说, 不同窑口尽管选料不同, 烧制工艺迥异, 但其内部却往往也会显示出一些共性的规律, 从物理化学等科学角度总结归纳并解释这些共性规律, 有助于从亚微

米结构来探讨古陶瓷釉面结构, 为复原古代工艺提供科学依据。

前人对釉面的析晶等现象有过科学的观察, 对于汝窑、哥窑的析晶情况做过详细分析^[2-8], 同时也对历代青花瓷器的胎釉成分与胎釉间钙长石的析晶有过报道^[3-5]。而本次进行显微结构观察的样品基本来自于青龙镇出土的唐宋时期瓷片, 而建窑、龙泉窑等窑址采集的瓷片也作为补充对比样品进行测试分析。青龙镇遗址中中青釉瓷与黑釉瓷占据大部分, 从产地上来说又以福建, 浙江, 湖南以及江西为主。福建瓷器主要为闽江流域的产品, 其中以义窑、东张窑、建窑等为主。浙江瓷器有越窑、龙泉窑、瓯窑等。湖南以长沙窑为代表。江西瓷器有

收稿日期: 2018-09-27。

修订日期: 2018-12-12。

基金项目: 上海市科委基金; 上海青龙镇遗址出土文物安全保护关键技术研究与应用(17DZ1205100)。

通信联系人: 王恩元(1991-), 男, 硕士, 助理馆员。

Received date: 2018-09-27.

Revised date: 2018-12-12.

Correspondent author: WANG Enyuan(1991-), male, Master, Assistant Archivist.

E-mail: weyjsdy@163.com

景德镇窑等^[6]。青龙镇所出土的瓷片几乎包含了当时南方所有民窑窑口所出产的瓷器,为系统性研究唐宋时期民窑烧造工艺提供了便利。

本文通过研究青龙镇出土的各地窑口瓷片及一些参比样品胎釉特征,归纳出古陶瓷釉面三种不同的析晶机理,同时通过研究析晶解释了福建地区仿龙泉窑及珠光瓷与龙泉大窑瓷器在微观结构与视觉效果的相似性,全面展现古代陶瓷普遍的析晶特征。

1 实验

本次检测青龙镇出土汀溪窑,宜兴窑,东张窑,越窑,长沙窑,福建仿龙泉窑,瓯窑,景德镇窑,龙泉窑,义窑各1片;龙泉窑梅子青参比瓷片采自龙泉大窑遗址;建窑样品来自大路后山建窑遗址;德清窑样品来自德清窑遗址。青龙镇出土瓷片及参比龙泉窑、建窑瓷片年代分布于唐至南宋之间,出土德清窑瓷片年代为六朝时期。采用EDAX-EagleIII XXL能量散射X射线荧光光谱仪测定釉层的主量元素组成,设定电压15 KV、电流150 mA、束斑直径2 mm、测量时间为400 s。采用Axio Lab A1型偏光显微镜观测胎釉的内部结构,采用加拿大树胶粘接,制样厚度为30 μm 。

2 结果与讨论

2.1 釉面析晶分析

2.1.1 釉底(胎釉结合处)析晶

(1)东张窑(kg-dz-3)瓷片相对于同属黑釉瓷的建窑,其胎体明显偏淡,胎中含铁量也较少,说明其原料经过一定程度的淘洗去除铁元素,其制作工艺相比于建窑有所提高,胎釉结构显示其中钙长石晶簇长度小于建窑黑釉瓷与定窑黑釉瓷,胎体致密度也较建窑有较大的提高。

(2)汀溪窑(kg-tx-1)釉面洁净,几乎不含未熔融的石英颗粒及其它矿物晶体,胎釉之间存在有较为杂乱的钙长石晶体,胎釉结构类与同时期景德镇同为石灰釉的影青瓷差异较大(图9a),景德镇影青瓷胎釉结构分明,不含中间反应层;也不同于东张窑瓷器(图1a),东张窑胎釉之间的钙长石晶体为细碎针尖状分布较为规则。汀溪窑的胎釉结构却类似于龙泉窑梅子青瓷,两者胎釉间均生长有杂乱晶体结构,但汀溪窑釉层较薄(图2b)。一般认为龙泉窑的厚釉及釉泡再加上其胎釉间少量的钙长石晶体造成龙泉窑独特的玉质效果^[7]。而汀溪窑从成分上讲其高 P_2O_5 含量造成釉面分相,再加上胎釉间钙长石

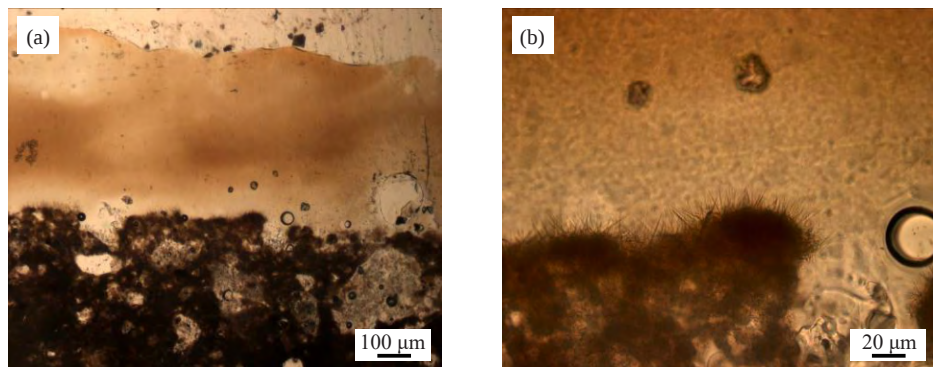


图1 东张窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 500$

Fig.1 Microstructure pictures of Dongzhang ware (a) $\times 100$, (b) $\times 500$

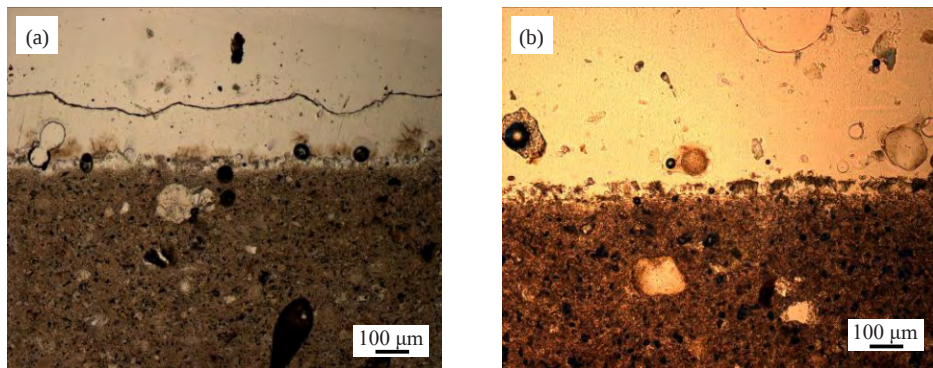


图2 偏光显微镜单偏光 $\times 100$ 倍照片: (a)汀溪窑TX-4, (b)龙泉窑梅子青

Fig.2 Microstructure pictures ($\times 100$) of porcelain wares: (a) Tingxi ware, (b) Longquan ware

的杂乱生长两者均对入射光线造成散射作用,造成汀溪窑珠光青瓷独特的视觉效果,这也印证了其“土龙泉”的说法。

(3)宜兴窑(kg-yx-2)瓷片其胎体致密化程度高,未熔融矿物较少,胎釉间及釉泡边缘均有晶体析出。

2.1.2 釉层中间析晶

(1)越窑kg-yy-11号样品釉层气泡较大,气泡周围有针状结晶。

(2)瓯窑(kg-oy-2)瓷片表面气泡较少,与越窑相

似,气泡周围存在少量析晶相。

(3)龙泉窑(kg-lq-1)偏光显微镜照片显示,龙泉窑釉层肥厚,仔细观察釉泡周围可见有少量析晶,而福建仿龙泉窑的胎釉间钙长石析晶明显,与汀溪窑及龙泉窑梅子青胎釉结构较为相似(图6c),但其釉层较薄与浙江龙泉窑有显著的区别。

(4)义窑(kg-yi-3)其釉中 K_2O 含量超过5%,釉灰用量较其它窑口瓷器进一步增多, K_2O 与 CaO 共同作为了助熔剂增加烧成过程中的高温粘度,釉面中

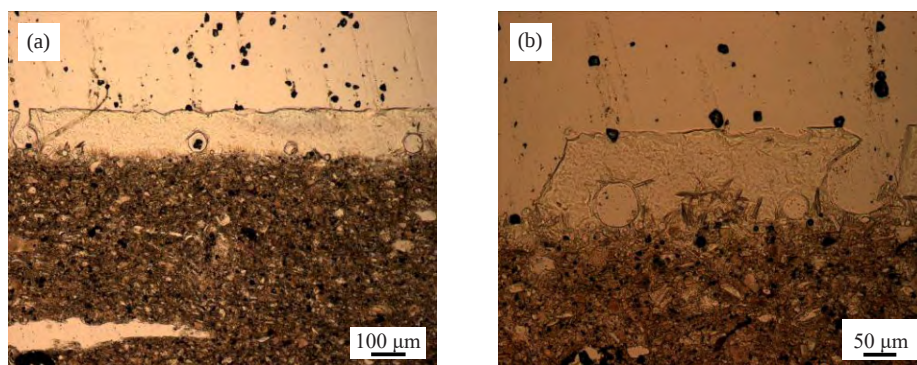


图3 宜兴窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 200$
Fig.3 Microstructure pictures of Yixing ware: (a) $\times 100$, (b) $\times 200$

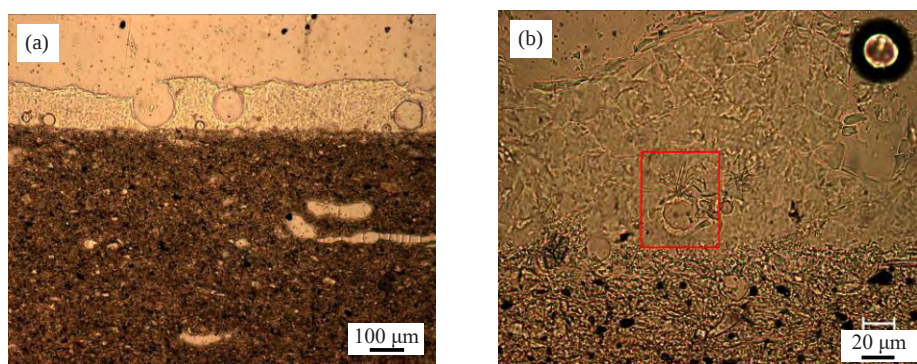


图4 越窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 500$
Fig.4 Microstructure pictures of Yue ware: (a) $\times 100$, (b) $\times 500$

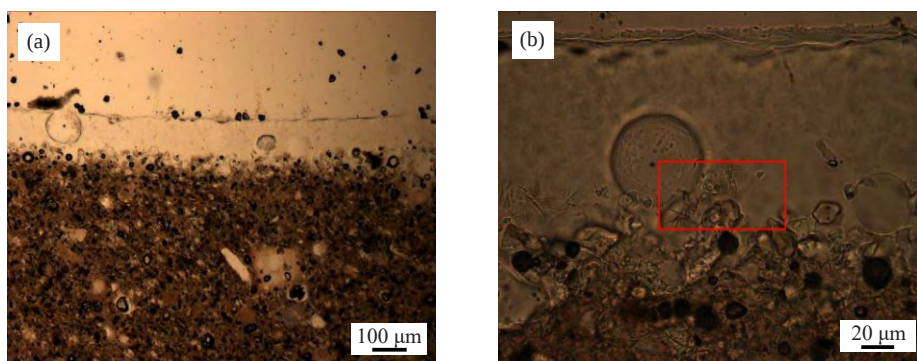


图5 瓯窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 500$
Fig.5 Microstructure pictures of Ou ware: (a) $\times 100$, (b) $\times 500$

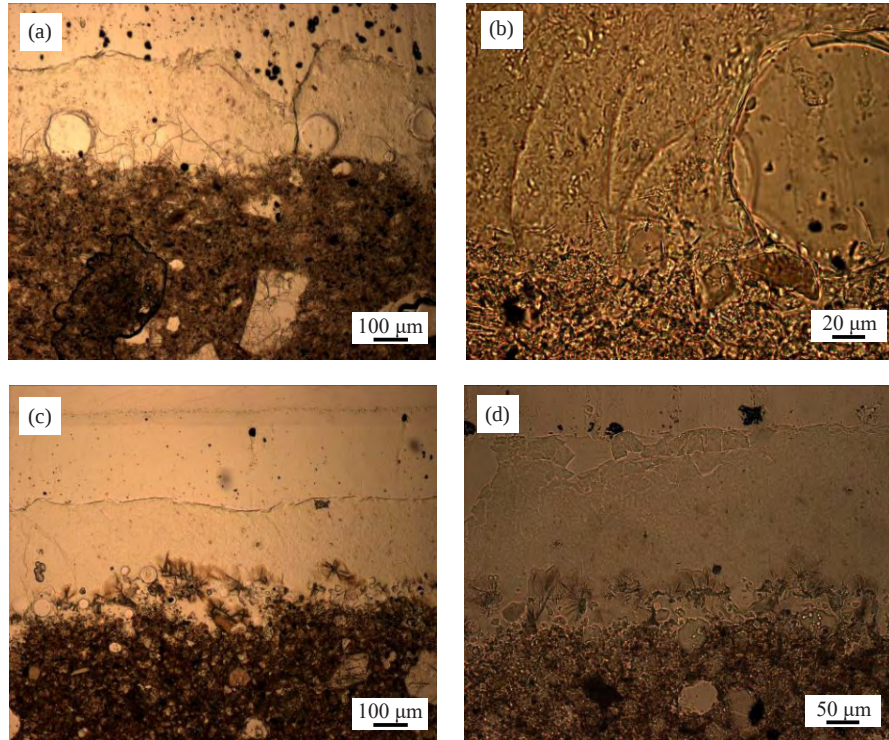


图6 龙泉窑和福建仿龙泉窑的显微结构图(a)龙泉窑单偏光 $\times 100$, (b)龙泉窑单偏光 $\times 500$, (c)福建仿龙泉窑单偏光 $\times 100$, (d)福建仿龙泉窑单偏光 $\times 200$

Fig.6 Microstructure pictures of Longquan ware and imitation of Longquan ware: (a) Longquan ware $\times 100$, (b) Longquan ware $\times 500$, (c) imitation of Longquan ware $\times 100$, (d) imitation of Longquan ware $\times 200$

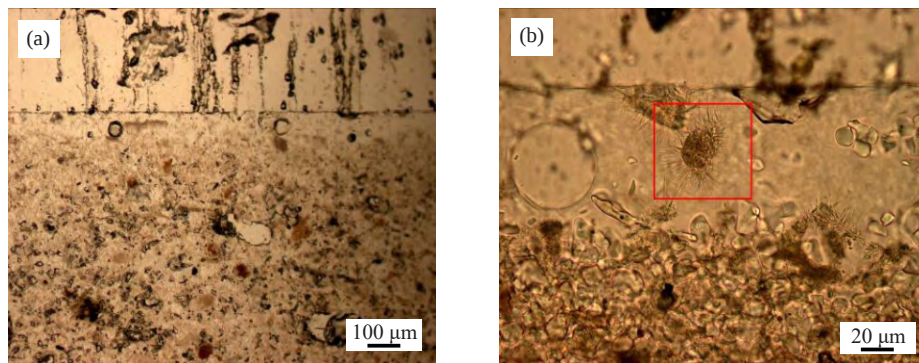


图7 义窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 500$

Fig.7 Microstructure pictures of Yi ware: (a) $\times 100$, (b) $\times 500$

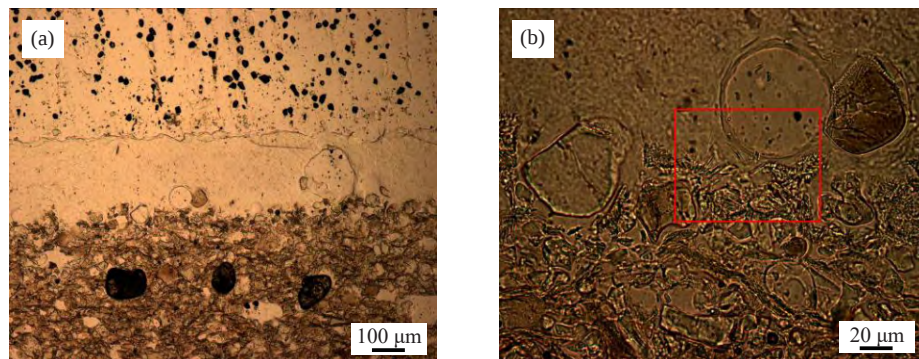


图8 景德镇窑显微结构图(a)单偏光 $\times 100$, (b)单偏光 $\times 500$

Fig.8 Microstructure pictures of Jingdezhen ware: (a) $\times 100$, (b) $\times 500$

2.1.3 釉面上层析晶

建窑釉面含铁量高，烧制过程中会因为氧化铁富集于釉面上层，导致上层釉液富铁，当冷却时，釉液内的氧化铁因过饱和而析晶，生成 Fe_2O_3 或者 Fe_3O_4 晶体。德清窑青釉瓷因为原料处理较差，混入微量含铁量较高的粘土质颗粒，烧制过程中也会在釉面产生花瓣状的氧化铁结晶，通过宏观肉眼也

可以清楚看见青釉间含有细微的棕黄色颗粒。

2.2 析晶机理及釉面成分分析

2.2.1 析晶机理分析

(1)胎釉结合处

如果把二价氧化物归入 CaO ，三价氧化物归入 Al_2O_3 ，四价氧化物归入 SiO_2 ，通过 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元相图(图10a)可以看出，古代陶瓷成分点均处

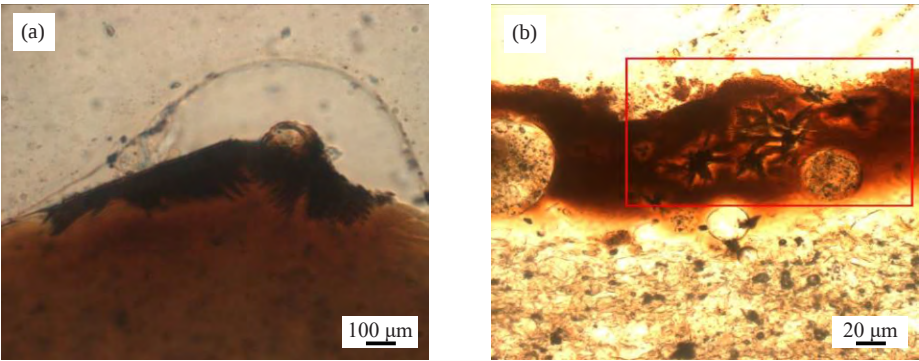


图9 釉面上层析晶结构单偏光照片(a)建窑×1000，(b)德清窑×500
Fig.9 The crystallization structure in top glaze: (a) Jian ware × 1000, (b) Deqing ware × 500

表1 出土各窑口瓷器的胎釉元素组成
Tab.1 Major elemental compositions of porcelains

Sample name	Sample number	Test point	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Tingxi ware	kg-tx1	glaze	0.36	2.82	16.37	61.62	2.10	1.59	12.27	0.13	1.26	3.52
	kg-tx2	glaze	0.39	2.70	16.54	58.11	2.15	1.49	14.33	0.13	1.27	3.39
	kg-tx3	glaze	0.35	2.83	15.13	60.86	1.60	1.87	13.01	0.12	1.54	10.22
	kg-tx4	glaze	0.38	2.79	15.42	59.71	2.24	1.93	15.11	0.12	1.28	2.16
Yixin ware	kg-yx-2	glaze	0.52	2.90	16.01	54.84	2.32	1.20	18.89	0.26	0.69	5.89
Dongzhang ware	kg-dz-1	glaze	0.45	2.92	17.29	66.16	0.86	2.44	5.17	0.22	1.29	7.53
	kg-dz-2	glaze	0.43	2.74	19.15	61.73	1.50	2.73	6.39	0.28	1.56	8.47
	kg-dz-3	glaze	0.46	2.61	18.10	60.89	0.40	3.62	7.35	0.26	1.6	7.43
Yue ware	kg-yy-11	glaze	0.45	3.07	15.32	57.60	1.59	1.41	16.61	0.24	1.47	2.89
Imitation Longquan ware	kg-fjflq-1	glaze	0.32	0.50	16.53	65.52	0.24	3.88	9.53	0.26	0.15	3.06
	kg-fjflq-2	glaze	0.63	1.76	13.86	64.21	0.35	2.52	12.78	0.32	0.65	2.92
Ou ware	kg-oy-2	glaze	1.06	2.31	11.48	62.53	0.53	3.19	15.86	0.67	0.42	1.96
Jingdezhen ware	kg-jdz-1	glaze	0.77	0.70	11.95	67.61	0.12	2.28	15.43	0.06	0.05	1.04
	kg-jdz-2	glaze	0.40	1.49	11.40	67.18	0.46	2.54	15.38	0.06	0.13	0.96
	kg-jdz-3	glaze	0.79	0.72	11.88	65.46	0.14	2.01	17.56	0.09	0.05	1.31
Longquan ware	kg-lq-1	glaze	1.04	2.24	11.43	60.24	0.49	3.18	18.10	0.36	0.64	2.29
Yi ware	kg-yi-1	glaze	0.55	1.69	16.44	67.90	0.30	5.40	5.57	0.21	0.38	1.56
	kg-yi-2	glaze	0.65	1.25	16.36	69.24	0.36	4.79	4.64	0.22	0.46	2.06
	kg-yi-3	glaze	0.57	1.39	16.40	69.24	0.33	5.52	4.98	0.31	0.22	1.05
	kg-yi-4	glaze	0.51	1.00	15.51	67.11	0.25	3.50	9.73	0.15	0.22	2.04

存在有显著的游离钙长石晶体。

(5)景德镇瓷片(kg-jdz-3)号样品显微结构图可以看出其釉面洁净,无未熔融矿物颗粒,釉泡小且少,釉泡周围有少量结晶,胎釉间没有中间反应层,胎体致密均匀,原料配方单一。相对于其它各窑口的瓷片,景德镇所产瓷器釉面最为均匀,可以反映出当时制瓷水平以很高。

2.1.3 釉面上层析晶

建窑釉面含铁量高,烧制过程中会因为氧化铁富集于釉面上层,导致上层釉液富铁,当冷却时,釉液内的氧化铁因过饱和而析晶,生成 Fe_2O_3 或者 Fe_3O_4 晶体。德清窑青釉瓷因为原料处理较差,混入微量含铁量较高的粘土质颗粒,烧制过程中也会在釉面产生花瓣状的氧化铁结晶,通过宏观肉眼也可以清楚看见青釉间含有细微的棕黄色颗粒。

2.2 析晶机理及釉面成分分析

2.2.1 析晶机理分析

(1) 胎釉结合处

如果把二价氧化物归入 CaO ,三价氧化物归入 Al_2O_3 ,四价氧化物归入 SiO_2 ,通过 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元相图(图10a)可以看出,古代陶瓷成分点均处于莫来石区域内,当烧结温度达到后降温过程中发生的相变为:

液相 $\rightarrow$ 磷石英+钙长石+莫来石

以往对于釉面钙长石的析晶观察主要为汝窑、官窑、龙泉窑等高 K_2O 含量瓷片^[8],本次实验结果表明古陶瓷无论釉面成分如何变化,其胎釉间总是普遍存在析晶相。

从上述十个窑口瓷片显微结构照片观察可知,不同窑口的陶瓷均会产生一定的析晶现象,氧化铝含量的提高表明会析出更多的钙长石及莫来石晶体,釉液中含有丰富的氧化钙,胎釉分别提供氧化铝与氧化钙也造成了钙长石晶体呈现线性的生长方向,从而导致了胎釉间晶丛生长的现象,也即为胎釉反应层,该种现象在东张窑、汀溪窑、龙泉梅子青等胎釉结合处较为常见,一般胎釉反应层难以用肉眼观察,但是如果反应层较厚,且胎质显白,则能通过肉眼进行区分。

(2) 釉泡处析晶

当胎体氧化铝含量较低时,析晶多存在于釉泡处,其原因可概述为:在陶瓷烧造冷却过程中,碳酸盐类高温生成的气体及有机物分解产生的气体生成釉泡,釉泡的存在于釉液生成了新的气-液界面,成核依附于该已有的釉泡与釉液形成的气-液界面上,所需的界面能低于胎釉结合处的液-固界

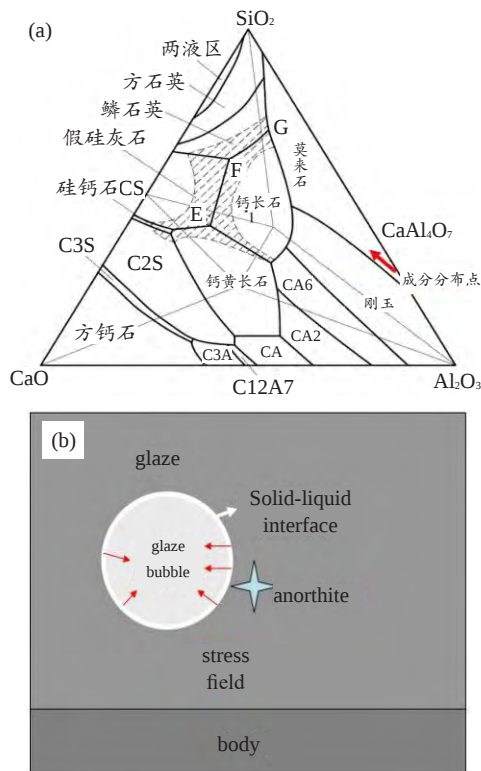


图10 (a) $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 三元系统相图^[7];

(b)钙长石釉泡处析晶示意图

Fig.10 (a) Ternary phase diagram of $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$;

(b) Diagrammatic sketch of crystal near glaze bubble

面能,所以胎釉结合处上方釉面的析晶更倾向于在釉泡周围形成,同时釉泡因密度低于釉液固有自胎向釉面顶层上升的趋势,釉泡与釉液周围随之会存在一个较大的应力场,该应力场有助于钙长石相的生成与发育(图10b)。

(3) 釉面顶层析晶

从显微照片可以看出,氧化铁结晶一般集中于釉面上方,且较为富集(图9),与钙长石结晶差别较大。从析晶原理上说,釉面上层氧化铁的析晶是因为原料中自身含铁量较高,富集于釉面发生的过饱和析晶过程,类似于冷却热饱和溶液,而釉面中下层的钙长石析晶则是釉液高温熔融状态下氧化铝,氧化硅与氧化钙三者汇合而发生的晶体成核与生长过程。两者在晶体形态与析晶机理上都存在有巨大差异。

值得一提的是,氧化铁浓度较高并不一定会导致氧化铁析晶,如建窑兔毫纹部分,一般认为兔毫纹为氧化铁析晶所致,若析出 Fe_2O_3 则表现为金兔毫,若析出 Fe_3O_4 则表现为银兔毫。但实际情况则是在显微镜下釉面上层或兔毫纹区域的确会出现一个呈现棕色较浓的区域,但该区域也可能只是氧化

铁富集区,并不一定会出现针状的氧化铁晶体,即毫纹的产生更多的是因为氧化铁非晶态溶解于釉液所致。同样在图10b德清窑显微结构照片也能看到此现象:整个釉面都呈现富铁状态,但是氧化铁的析晶并不是全区域的,而是连成一片的析晶结构。

2.2.2 釉面成分分析

根据十个窑口釉面成分的测试结果,可以 K_2O 含量将其分为 K_2O 含量较高与较低的两种:较高为龙泉窑,福建仿龙泉窑,东张窑,义窑,景德镇窑,瓯窑;较低者为汀溪窑,宜兴窑,越窑,长沙窑。以地域来分,浙南闽北一代瓷釉 K_2O 含量高于其它地区。东张窑,仿龙泉窑及义窑这三个窑口瓷器的釉面含 K_2O 多超过3%表明东张窑,仿龙泉窑及义窑的釉浆制作过程中加入了一定量的长石,引入 K_2O 作为助熔剂,同时 CaO 含量也较低,而 P_2O_5 含量多低于0.5%即表明加入的草木灰十分少量,即福建大多数地区窑口釉浆多为石灰石+草木灰(少量)+长石。

然而同为处于福建地区的汀溪窑的釉面成分却与以上三个窑口差距较大,其釉面主要助熔剂为氧化钙,属于典型的钙釉配方,且磷含量偏高,甚至达到2%以上,这就表明汀溪窑釉浆的配置使用原料更接近于影青瓷与越窑,只不过草木灰的使用量却大大提高,图11各窑口的 P_2O_5 、 CaO 、 K_2O 含量三维分布图显示汀溪窑青瓷在这三种元素方面与福建其它窑口存在显著差异。 P_2O_5 本身具有和 SiO_2 一样形成四面体玻璃网状结构的性能(PO_4), PO_4 四面体在硅酸盐釉面中的溶解度降低,釉面形成 PO_4 四面体与 SiO_4 四面体的分相结构,从而产生釉面的乳浊效果。一般当釉面中 P_2O_5 含量超过1.5%即容易形成乳浊效果,汀溪窑釉层中的 P_2O_5 含量基本超过2%,这导致尽管釉层没有达到龙泉的玉质感,但在较薄的石灰釉体系中也形成了一定的乳浊性。

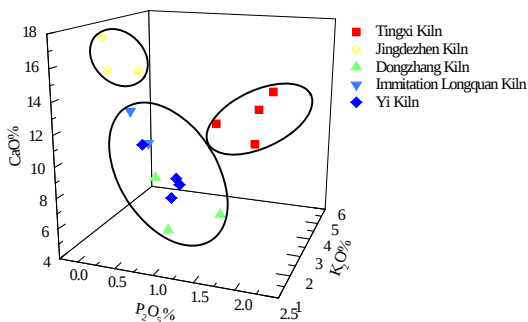


图11 各窑口的 P_2O_5 、 CaO 、 K_2O 含量三维分布图
Fig.11 3D distribution diagram of P_2O_5 , CaO and K_2O

汀溪窑一直保持传统石灰釉工艺,其原因可能与福建地质矿产分布有关。福建地区的地质构造受区域性构造-岩浆活动成矿的影响,钾长石矿产具有有分区、分带的特点,空间分布不均匀,钾长石矿主要分布在闽中莆田、闽北的邵武、建阳、光泽等地;这些地方钾长石矿 $Na_2O + K_2O$ 含量超13%,然而汀溪窑所在厦门同安县处于闽东南地区,其出产的瓷土矿中 $Na_2O + K_2O$ 却在1.18%—4.48%之间浮动^[9],不能满足在釉中引入较多的碱金属需求,因此即使宋代汀溪窑的窑工们学得长石入釉的配方,但是同安地区却少产长石,从而只能延续唐代以来的石灰釉配方。

由上述讨论可知,古陶瓷釉面的析晶与原料选用以及呈现的视觉效果关系密切,原料选用影响着析晶区域,同时也决定了视觉效果。例如福建地区仿烧龙泉窑其胎釉结合处的钙长石析晶决定它与龙泉梅子青有着类似的发色效果,氧化铁的富集于析晶会造成兔毫纹等。同时古陶瓷胎釉析晶是普遍存在的现象,但并不能说所有古陶瓷都是析晶釉,相比较于建窑兔毫纹以及其它酱色釉顶层釉面的氧化铁大面积析晶现象来说,越窑、景德镇窑等釉面析晶相对难以观测,其釉层还是以纯玻璃相为主;相比于建窑及定窑等高铝质胎体瓷器的胎釉间钙长石析晶,汀溪窑、宜兴窑等胎釉间钙长石相也更加细微,古陶瓷釉面还是分为分相釉、析晶-分相釉与玻璃态釉三种。

3 结论

(1)古陶瓷釉面析晶是普遍现象,析晶普遍集中于胎釉之间以及釉泡周围,釉泡与釉液处更易发生非均匀成核。

(2)釉面析晶规律可以归纳为:釉面顶层(氧化铁析晶);釉面中部(钙长石枝状晶,接近釉泡);釉面底部胎釉结合处(钙长石针状晶)。

(3)福建地区仿烧的龙泉窑瓷器与所谓“土龙泉”瓷器,其胎釉结构与龙泉梅子青结构接近,胎釉间生长有杂乱的钙长石析晶相,钙长石析晶相对入射光的散射作用造成其发色效果接近于龙泉窑。

参考文献:

- [1]浙江省轻工业厅. 龙泉青瓷研究[M]. 文物出版社, 1989.
- [2]陈显求, 李家治, 黄瑞福. 元大都哥窑型和青瓷残片的显微结构[J]. 硅酸盐学报, 1980, (2): 43-54.

CHEN X Q, LI J Z, HUANG R F. Journal of the Chinese Ceramic

- Society, 1980, (2): 43-54.
- [3]李家治. 中国科学技术史陶瓷卷[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 385-386.
- [4]陈尧成, 张志刚, 郭演仪. 景德镇元明清青花着色和显微结构特征[J]. 中国陶瓷, 1981, (4): 39-50.
- CHEN Y C, ZHANG Z G, GUO Y Y. China Ceramics, 1981, (4): 39-50.
- [5]张志刚, 郭演仪, 陈尧成, 等. 唐代青花瓷器研讨[J]. 陶瓷学报, 1989, (2): 65-72.
- ZHANG Z G, GUO Y Y, CHENG Y C, et al. Journal of Ceramics, 1989, (2): 65-72.
- [6]何继英, 王建文, 高文虹, 等. 上海市青浦区青龙镇遗址2012年发掘简报[J]. 东南文化, 2014, (4): 52-60.
- HE J Y, WANG J W, GAO W H, et al. Southeast Culture, 2014, (4): 52-60.
- [7]周仁, 张福康, 郑永圃. 龙泉历代青瓷烧制工艺的科学总结[J]. 考古学报, 1973, (1): 131-156.
- ZHOU R, ZHANG F K, ZHENG Y P. Acta Archaeologica Sinica, 1973, (1): 131-156.
- [8]李伟东, 邓泽群, 李家治. 中国古代钙釉中的析晶与分相[C]. 古陶瓷科学技术国际讨论会, 2005.
- [9]福建省地质矿产局. 厦门地质图[M]. 地质出版社, 1989.