

# 景德镇古瓷原料瓷石的矿物组成和结晶过程

杨 薇<sup>1</sup>, 信 迪<sup>2</sup>, 王书遥<sup>3</sup>

(1. 景德镇艺术职业大学, 江西 景德镇 333000; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 景德镇陶瓷大学, 江西 景德镇 333403)

**摘要:** 瓷都景德镇制瓷产业早期使用的是单一原料——瓷石。在瓷业发展过程中,景德镇制瓷先人发明了二元配方工艺:将瓷石与高岭土按一定比例混合组成制瓷原料,极大提高了瓷器品质和制瓷效率。然而我们至今仍不清楚古代瓷石为何能成为合适的制瓷原料。为此本文对取自高岭山瓷石古采坑岩壁上的瓷石样品开展了详细的显微结构研究、电子探针矿物成分分析。分析结果表明,高岭山瓷石为一种特殊的淡色花岗岩,其矿物组合包括钠长石、钾长石、石英、少量黑云母以及铁白云母(?),发育被绿泥石部分充填的微裂隙网格结构。这一成分及结构特点使得瓷石成为容易采掘、加工的早期优良制瓷原料。结合最近发表的富水酸性岩浆高温结晶实验结果,认为景德镇瓷石为水饱和花岗岩浆在较低冷却速率、过冷却条件下,经动态结晶过程形成的具有钠长石(+黑云母)→钾长石+石英→铁白云母(?)矿物组合序列的淡色花岗岩,其中铁白云母(?)可能是一种新矿物,需要进一步研究以确定其晶体结构、晶格参数。瓷石中铁白云母(?)的发现将有助于理解古代瓷胎成分变化与制瓷配方变化之间的关系,从而更合理地推断二元配方工艺的出现时代。

**关键词:** 景德镇; 瓷石; 矿物组合; 动态结晶; 水饱和; 花岗岩

中图分类号: P588.12<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0374-09

## Mineral composition and crystallization process of porcelain stone, the raw material of ancient Jingdezhen porcelain

YANG Wei<sup>1</sup>, XIN Di<sup>2</sup> and WANG Shu-yao<sup>3</sup>

(1. Jingdezhen Vocational University of Art, Jingdezhen 333000, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 3. Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, China)

**Abstract:** In the early days of the porcelain industry in Jingdezhen, the porcelain capital, a single raw material—porcelain stone was used. During the developing process of porcelain industry, the ancestors of Jingdezhen porcelain invented the binary-compositions formulation: mixing porcelain stone and kaolin in a certain proportion to form porcelain raw materials, which greatly improved the quality and efficiency of porcelain production. However, we still do not know why ancient porcelain stones could become suitable raw materials for ancient porcelain making. For this purpose, this article conducted detailed microstructural studies and electron probe mineral composition analysis on porcelain stone samples taken from the rock walls of ancient mining pits in Gaoling Mountain. The results show that the porcelain stone from Gaoling Mountain is a special type of leucogranite, consisting of albite, K-feldspar, quartz, a small amount of biotite, and Fe-muscovite (?), and develops a micro fracture grid structure partially filled by chlorite. This composition and structural characteristics make porcelain stone an early excellent raw material for porcelain production that is easy to mine and process. Combined with the recently published experimental

收稿日期: 2024-09-11; 接受日期: 2025-02-12 ; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202250); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J2318)

作者简介: 杨 薇(1998- ), 女, 硕士, 从事环境设计教学与科研工作, E-mail: 3273443365@qq.com; 通讯作者: 信 迪(1985- ), 女, 博士, 助理研究员, 构造地质学专业, 从事造山带构造变化、岩浆演化相关研究, E-mail: xindi@cags.ac.cn。

results of high-temperature crystallization of water rich acidic magma, we suggest that the Jingdezhen porcelain stone is a kind of leucogranite formed by dynamic crystallization of a water-saturated granite melt under the lower cooling-rate and lower undercooling degree conditions, with a mineral combination sequence of albite (+biotite) → K-feldspar+quartz → Fe-muscovite (?). Fe-muscovite (?) may be a new mineral, and further research is needed to determine its crystal structure and lattice parameters. The discovery of Fe-muscovite (?) in porcelain stones will help to understand the relationship between changes in the composition of ancient porcelain bodies and changes in porcelain-making formulas, and thus more reasonably infer the onset time of the emergence of binary formula technology.

**Key words:** Jingdezhen; porcelain stone; mineral assemblage; dynamic crystallization; water-saturated; granite

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China(42202250); Basic Research Funds Project of Institute of Geology, CAGS (J2318)

合适的原材料以及先进的制瓷工艺是成就景德镇瓷器盛名的必要条件。早期制瓷原料单一(一元配方),为瓷石(制瓷之石),制成的瓷器坯体烧结程度较低,耐火程度也不高,但以此制造的青白瓷和白瓷仍具有较高品质,在唐、宋期间就已名扬海内外(方邺森等,1985)。在制瓷技术发展过程中,景德镇制瓷先人们还完成了一次制瓷工业的革命,创制了著名的二元配方工艺,即瓷器坯料由瓷石和高岭土按照一定比例配制而成的工艺。逐步优化的坯料配方、窑体结构、烧制过程的改良(莫云杰等,2023),极大提高了瓷器成品率和品质,使景德镇陶瓷享有“白如玉、明如镜、薄如纸、声如磬”的美誉。二元配方工艺从发明、渐趋成熟直至广泛传播是景德镇制瓷先人们对世界制瓷工业的重大贡献,确定其发明时代是历史学、考古学的重大科学问题(肖红艳等,2020)。

我国历代文献中关于瓷石的描述不在少数,但瓷石究竟是什么成分并不很清楚。鉴于古时挖掘、研磨工具简陋,它应该是一种在简易工具帮助下易于开采、容易粉碎的岩石。目前一般认为,瓷石主要由石英、绢云母、长石组成,是长英质火成岩经后期热液蚀变作用及风化作用等过程而形成的一种岩石(郭演仪,1984)。

现代制瓷工业依然在使用二元配方,只是配料更为复杂、精细。岩石开采、加工技术的提高极大降低了对瓷石易加工性的要求,现代意义上的瓷石成分(制瓷材料配方中除高岭土外的其他成分)范围变得很宽,因此目前对制瓷材料研究最多的是高岭土,而非瓷石(方邺森等,1985;张天乐等,1992;张术根等,2006;王国龙等,2018;袁钟池等,2021),致使对古文献中瓷石的属性了解很少,尚不清楚为何

瓷石能成为古代优良的制瓷材料。本文对产于景德镇地区典型瓷石古采坑的瓷石样品开展了岩相学、矿物成分研究,试图通过对岩浆结晶过程的探讨,解答为什么该区的瓷石能成为优良的传统制瓷材料。

## 1 景德镇瓷石古采坑概况及取样

作为历史悠久的陶瓷重镇,景德镇周边地区常见古代制瓷相关遗址,包括古采坑、古窑、古工场、古生活设施等。挖掘、调查比较充分的采矿遗址集中区有6处:高岭山瓷土矿遗址、三宝蓬瓷石矿遗址、陈湾瓷石矿遗址、大洲瓷土矿遗址、长明露天瓷土矿遗址、乐平瓷土矿遗址。其中,长明露天瓷土矿遗址规模最大(长达20 km露天采场),高岭山瓷土矿的开采历史最为悠久,在景德镇制瓷业中具有举足轻重的地位。

高岭山瓷土矿遗址位于景德镇市东北约50 km的鹅湖镇高岭山,分布在方圆10 km<sup>2</sup>的范围内,包括采掘矿洞、淘洗设施和尾砂堆积场。多数古矿洞坑道与淘洗池遗迹清晰可辨,其尾砂堆积物中遗留有明、清时代的粗瓷碗和瓷灯盏残片(胡萍,2022)。高岭山古瓷矿区始采于元代,兴盛于明代中期(易桂秀等,2022),清乾隆以后虽有开采,但规模已不大。

根据现有数据统计(胡萍,2022),高岭山瓷土矿遗址区内保留较好的遗址有淘洗池遗址24处、槽坑遗址2处、洞采遗址20处、露采遗址8处、灶台遗址2个、石台遗址1个、祭祀台遗址2个、工棚遗址3处和房屋遗址1处。本文样品取自高岭村村西受保护的古采坑边部(图1),采样点地理坐标为北纬29.482°,东经117.537°。

## 2 分析方法及流程

用小木棍从矿坑边部岩壁上撬(敲)下小块岩石样品。样品由全新地质分析有限公司完成探针片制作,采用莱卡偏光显微镜(Leica 2700)完成详细的显微观察。

岩石矿物成分分析在中国地质科学院地质研究所电子探针实验室完成,显微分析仪(EPMA)为日本电子 JEOL 公司的 JXA-8100, 加速电压 15 kV, 束流  $2 \times 10^{-8}$  A, 摄谱时间 10 s, 束斑 5  $\mu\text{m}$ , ZAF 校正, SPI 组合标样校正。在矿物成分分析过程中,随时拍摄背散射电子(BSE)图像。



图 1 高岭村及邻区地质简图 [a, 据王国龙等(2018)修改] 和高岭村西古采洞野外照片(b)

Fig. 1 Simplified geological map of the Gaoling Village and its adjacent regions (a, modified after Wang Guolong *et al.*, 2018) and the photograph of the ancient mining tunnel for porcelain stone (b)

## 3 分析结果

### 3.1 岩相学特点

显微镜下观察发现,瓷石样品由钠长石、钾长石、石英、铁白云母(?)、少量黑云母以及副矿物锆石等组成。各种矿物的空间分布不均匀,常集中呈带状。钠长石呈自形、半自形,聚片双晶尚保留完好,但整体十分污浊(图 2a、2b)。钾长石、石英形态不规则,两者稍显污浊,大部分石英颗粒内部见不规则次级颗粒边界(图 2b)。铁白云母(?)颗粒形态也极不规则,由诸多片晶平行排列而成,常见片晶弧形弯曲以及膝折构造(图 2a、2b、图 3a)。在单偏光下,大部分铁白云母(?)颗粒色调不均匀,绝大部分呈无

色,局部呈浅粉色、浅黄色(图 2a)。在正交偏光镜下,无色部位显示一级灰干涉色,极似高岭石,而浅粉、浅黄位置的干涉色往往可达二级中部(图 2b)。这些光性特点与标准的黑云母或白云母不一致。

岩石内见较多微裂隙,不仅发育于矿物颗粒之间,还穿入矿物颗粒内部。部分微裂隙被绿泥石充填,没被充填的微裂隙边界常见铁染现象。微裂隙形态、方向多变,相互交织形成网络(图 2a)。

背散射图像(图 3)显示了瓷石的矿物组合及其穿插关系。由图 3b 可见,钠长石内部包含较多极细粒铁氧化物包体矿物,钾长石中常见斜长石“小碎块”及不规则状石英包体矿物,石英内部偶见黑云母包体矿物及铁氧化物(图 3c),次级石英颗粒之间的边界上常见断续出现的水滴状铁白云母(?) (图 2c、

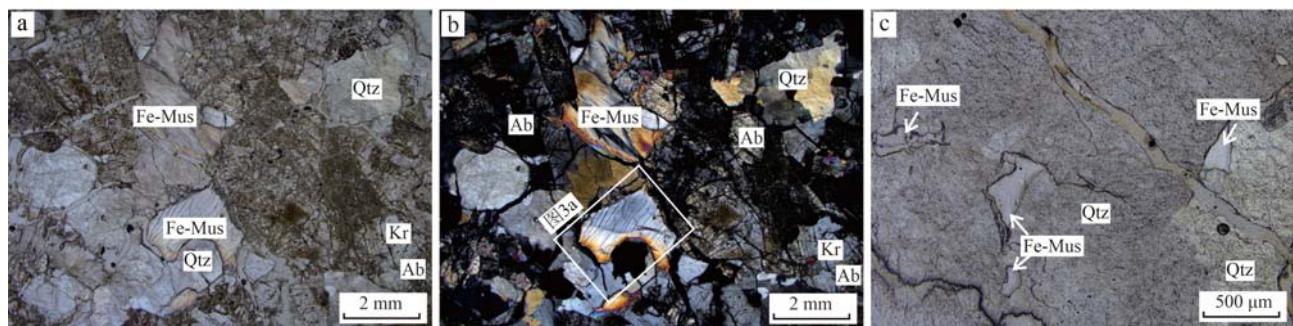


图2 景德镇瓷石样品的显微照片

Fig. 2 Microphotographs of Jingdezhen china-stone

a,b—同一位置的单偏光、正交偏光照片; c—次级石英颗粒边界处的铁白云母(?)，单偏光; Ab—钠长石; Kr—钾长石; Qtz—石英; Fe-Mus—铁白云母

a, b—plane-polarized and cross-polarized microphotos of a same area of the thinsection; c—Fe-muscovite(?) at the boundary of secondary quartz particles; Ab—albite; Kr—K-feldspar; Qtz—quartz; Fe-Mus—Fe-muscovite

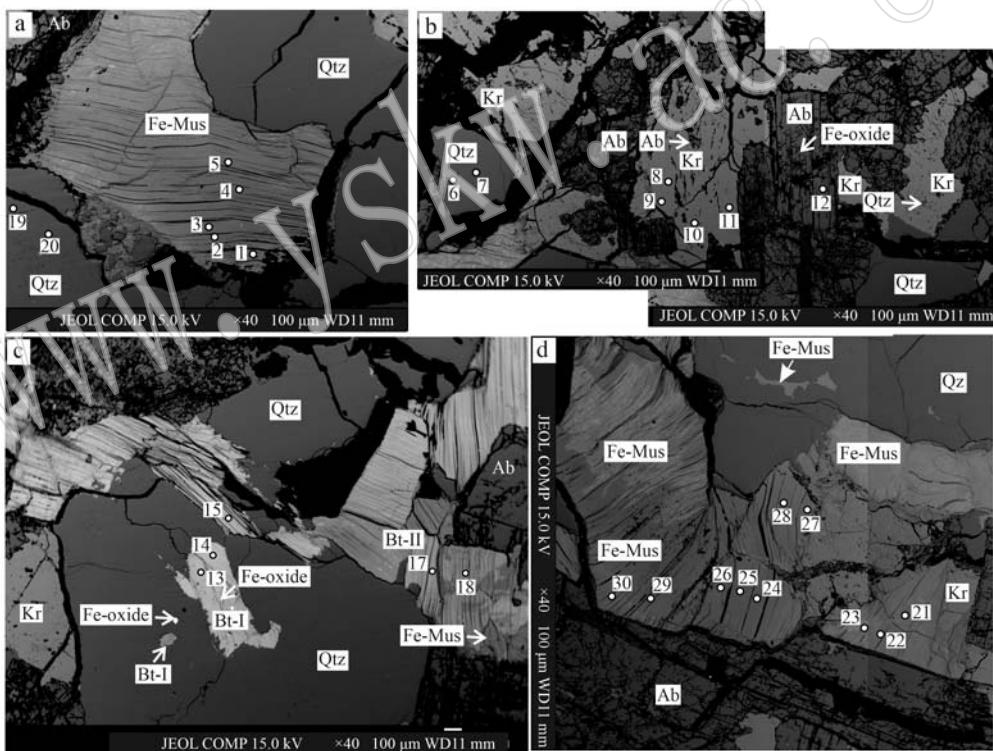


图3 景德镇瓷石样品的背散射电子图像

Fig. 3 Backscattering electronic images of the Jingdezhen porcelain stone samples

Ab—钠长石; Bt—黑云母; Fe-Mus—铁白云母; Fe-oxide—铁氧化物; Kr—钾长石; Qtz—石英  
Ab—albite; Bt—biotite; Fe-Mus—Fe-muscovite; Kr—K-feldspar; Qtz—quartz

图3d)。铁白云母(?)的背散射图像色调不均匀(图3d),表明其存在成分变化。

### 3.2 矿物成分

斜长石几乎为纯钠长石,  $K_2O + CaO$  含量低于 0.5% (表1)。大部分钾长石中的  $CaO$  含量低于检

测限,  $Na_2O$  含量大部分低于 0.5%, 表明其为很纯的钾长石。作为石英中包体矿物的黑云母(图3c 和表1 中的黑云母-I)具有较高的  $TiO_2$  含量(大于 1.5%)。

电子探针成分分析显示, 铁白云母(?)的  $K_2O$

表1 景德镇瓷石样品主要造岩矿物成分电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 1 Microprobe analytical results of the major minerals from a Jingdezhen porcelain stone samples

矿物名 分析点号	石英				钾长石				钠长石				黑云母-I				黑云母-II				石英				标准样		
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20	STD- 黑云母	STD- 钾长石	STD- 钠长石					STD- 黑云母	STD- 钾长石	STD- 钠长石			
Na <sub>2</sub> O	-	0.01	0.35	0.49	0.56	0.50	11.55	0.16	0.23	0.19	0.29	0.21	0.01	0.01	0.08	3.00	11.59										
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.04	0.02	0.02	-	-	-	0.03	0.06	0.06	0.02	0.04	0.02	0.06	0.04	-	-										
K <sub>2</sub> O	-	-	16.23	16.14	15.91	16.16	0.10	10.37	10.10	10.56	10.21	10.52	0.03	0.00	9.89	12.12	0.11										
MgO	0.01	0.00	-	-	-	-	-	0.58	0.62	0.66	0.57	0.62	-	-	19.55	-	-										
MnO	-	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.00	0.53	0.53	0.68	0.67	0.62	-	-	0.13	0.02	-										
CaO	0.00	-	0.00	-	-	-	0.32	-	-	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.04				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.03	18.63	18.68	18.61	18.35	19.72	22.01	21.66	22.56	23.85	23.70	0.03	0.01	15.11	18.74	19.56										
FeO	-	0.01	0.01	0.02	0.03	-	-	19.90	21.24	19.30	16.81	16.65	0.03	0.03	10.72	0.15	0.0										
TiO <sub>2</sub>	0.03	-	-	-	0.04	0.01	-	2.34	2.21	1.53	0.87	0.68	0.01	-	1.78	0.07	-										
SiO <sub>2</sub>	99.15	99.49	64.32	63.79	64.01	64.34	67.35	39.32	39.25	39.72	42.35	41.42	99.43	99.18	38.71	64.66	68.52										
NiO	-	-	0.00	-	-	-	0.03	0.04	-	-	-	0.01	0.04	0.01	0.09	-	-										
Total	99.20	99.60	99.56	99.14	99.18	99.40	99.07	95.28	95.88	95.26	95.63	94.49	99.60	99.32	96.12	98.76	99.83										

(平均 10.93%)、SiO<sub>2</sub>(平均 46.02%)含量与白云母(Deer et al., 2013)类似(表2)。然而,该矿物含 5.66%的 FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低(平均 30.87%, 而正常白云母含 38.5% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 显然, 该矿物既不是高岭石, 也不是正常白云母, 我们暂将该矿物称为铁白云母(?)。电子探针分析揭示的该矿物各组成元素之间

的比值关系符合白云母结构式, 按此结构式计算其平均成分为 (K<sub>0.95</sub>Na<sub>0.08</sub>) (Al<sub>1.60</sub>Fe<sub>0.29</sub>Ti<sub>0.01</sub>Mg<sub>0.05</sub>Mn<sub>0.01</sub>) [(Al<sub>0.87</sub>Si<sub>3.13</sub>)O<sub>10</sub>] (OH)<sub>2</sub>(表2)。该矿物 FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量具有极高的负相关性( $R^2$  值为 0.95, 图4), 推测其中的 Fe 以 Fe<sup>3+</sup>的形式替代正常白云母结构式 XY<sub>2</sub>(Z<sub>4</sub>O<sub>10</sub>) (OH)<sub>2</sub> 中 Y 位置的 Al。

表2 景德镇瓷石样品铁白云母(?)成分电子探针分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 2 Microprobe analytical results of the Fe-muscovites(?) from the Jingdezhen porcelain stone samples

点号	1	2	3	4	5	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	平均值
Na <sub>2</sub> O	0.49	0.572	0.65	0.74	0.67	0.35	0.36	0.33	0.46	0.66	0.70	0.73	0.73	0.71	0.80	0.60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05	0.05	0.03	0.02	0.00	-	-	0.00	0.04	-	0.04	-	-	0.02	0.00	0.03
K <sub>2</sub> O	10.93	10.91	10.73	11.01	10.69	11.07	11.34	11.24	11.00	10.91	10.82	10.83	10.85	10.71	10.92	10.93
MgO	0.52	0.47	0.44	0.51	0.59	0.24	0.30	0.31	0.45	0.47	0.48	0.51	0.55	0.49	0.42	0.45
MnO	0.36	0.20	0.23	0.17	0.27	0.32	0.33	0.44	0.29	0.20	0.15	0.11	0.16	0.12	0.17	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.57	30.27	30.15	31.52	30.57	30.37	29.31	28.04	31.00	31.76	32.64	32.27	31.77	32.55	32.28	30.87
FeO	8.71	6.12	6.48	4.91	6.27	6.20	6.42	8.43	5.83	4.70	4.03	4.02	4.87	3.95	3.86	5.66
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.35	0.37	0.14	0.19	0.47	0.54	0.34	0.18	0.13	0.11	0.17	0.11	0.17	0.15	0.26
SiO <sub>2</sub>	44.93	46.14	45.63	46.09	45.31	46.17	46.43	45.45	46.18	46.41	46.60	46.43	46.07	46.29	46.08	46.02
Total	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04	95.04

基于 12 个 O 原子的阳离子数

Na	0.06	0.08	0.09	0.10	0.09	0.05	0.05	0.04	0.06	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.11	0.08
K	0.96	0.94	0.93	0.95	0.93	0.96	0.99	0.99	0.95	0.94	0.92	0.93	0.93	0.92	0.94	0.95
Mg	0.05	0.05	0.05	0.06	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	2.30	2.41	2.42	2.51	2.45	2.42	2.35	2.27	2.46	2.52	2.57	2.55	2.52	2.58	2.57	2.46
Fe <sup>3+</sup>	0.50	0.35	0.37	0.28	0.36	0.35	0.36	0.48	0.33	0.26	0.23	0.23	0.27	0.22	0.22	0.32
Ti	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Si	3.08	3.13	3.11	3.11	3.09	3.13	3.16	3.13	3.12	3.12	3.12	3.12	3.11	3.11	3.12	3.12
阳离子总数	7.00	6.98	6.99	7.01	7.01	6.97	6.98	6.99	6.98	6.99	6.99	6.99	7.00	6.99	7.01	6.99

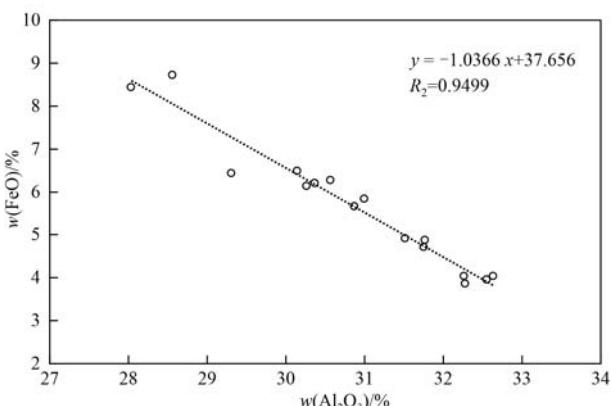


图 4 铁白云母(?)中 FeO 含量与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量之间的协变关系

Fig. 4 Diagram showing the correlation between the FeO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents of Fe-muscovite(?)

## 4 讨论

### 4.1 瓷石的结晶过程

前述矿物组合及穿插关系(图 2、3)表明,样品中的矿物形成于岩浆结晶的不同阶段。自形、半自形的钠长石最早从岩浆中结晶,此时岩浆可为钠长石的生长提供空间,从而形成较为完整的自形晶体。随后钾长石、石英从包含钠长石晶体的熔浆(晶粥)中结晶,少量钠长石晶体发生破碎,破碎的钠长石晶体被新生钾长石包裹(图 3b)。偶见钾长石与石英生成形成文象结构(图 3b、3c),表明两者近同时结晶。在钾长石和石英结晶生长过程中,偶见石英包裹黑云母(图 3c),指示少量黑云母可能与斜长石近同时结晶。

铁白云母(?)发育于长石、石英颗粒之间的空隙中,颗粒形态受控于空隙形态(图 2、图 3d),表明两者均结晶于钾长石、石英之后,而充填微裂隙、切穿铁白云母(?)的绿泥石形成最晚。以上表明景德镇瓷石样品的组成矿物具有如下结晶顺序:钠长石(+黑云母)→钾长石+石英→铁白云母(?)→绿泥石。切穿钠长石、钾长石、石英、铁白云母(?)的微裂隙被绿泥石部分充填,微裂隙可能代表岩浆期后热液残留或逃逸通道,绿泥石属于岩浆期后热液矿物。

上述矿物组合序列可能是含水岩浆在过冷却状态下动态结晶的产物。最近完成的针对含水花岗岩浆(花岗质伟晶岩浆)受控冷却实验结果(Sirbescu *et al.*, 2017; Devineau *et al.*, 2020)显示,含水量1%~3%的花岗质岩浆的固-液相转化温度为720℃左右

(围压小于0.2 GPa),低于该温度,岩浆开始结晶。若结晶作用发生在固相线附近,则为平衡结晶,结晶过程形成花岗结构;若岩浆骤冷至玻璃化温度条件(约540℃),则岩浆由于骤冷而快速固结,形成火山玻璃(黑曜岩)。若岩浆在固-液转化温度与玻璃化温度之间(540~720℃)发生结晶,此时发生非平衡结晶(即动态结晶, dynamic crystallization)。发生结晶时的温度与固液转化温度之间的温差为过冷却度。在动态结晶过程中,不同的矿物结晶于不同阶段,从而形成典型的非平衡结构——序列化矿物组合(sequential assemblages)。自然界中通过动态结晶作用形成的典型岩石为伟晶岩,其不同阶段结晶形成的矿物组合展现出清晰的条带构造(London, 2008, 2014)。

本文报道的瓷石虽然没有显示出明显的由不同矿物组成的条带状构造,但显微结构(图 2、图 3)显示了清晰的钠长石(+黑云母)→钾长石+石英→铁白云母(?)→绿泥石的序列化矿物组合。这一序列化组合很好反映了过冷却状态下岩浆的结晶过程:  
①最先结晶的矿物为钠长石(可能还有少量黑云母),其直接从熔浆中结晶,形成自形、半自形晶体。  
②钾长石、石英同时发生结晶,形成粗晶文象结构。  
③无水钠长石、钾长石、石英的结晶提高了残余熔浆的水含量(水活度),随着温度的降低以及高水活度形成的强氧化状态,残余熔浆中的部分 Fe 以 Fe<sup>3+</sup>的形式进入白云母结构中,形成铁白云母(?)。④前 3 个阶段结晶的矿物不含 Fe 元素,少量 Fe 元素沉淀于铁白云母(?)中,初始岩浆中的绝大部分 Fe 元素聚集在岩浆演化最后阶段残留的水流体中。这些水流体储存在微裂隙内,铁质沉淀造成微裂隙的两壁发生铁染,部分铁质形成绿泥石沉淀于微裂隙中,而大部分铁质随着流体迁移出岩体,由此形成含大量岩浆期铁白云母(?)的瓷石。

从上述矿物组合、结构特点可以合理推测,网格状微裂隙的发育造成景德镇瓷石易于挖掘、开采、粉碎,较高的铁白云母(?)含量使得瓷石强度较低,易于研磨,也使瓷石具有很高的铝含量。因此,不论是从物理性质还是化学成分分析,瓷石都非常适合作为古代制瓷原料。

高岭山瓷石(土)矿区遗址位于鹅湖花岗岩岩基边部(图 1a)。野外考古(即田野调查)发现,瓷石(土)矿呈不规则囊状位于风化壳之下,宽不超过3 m,长度变化较大,显然,鹅湖花岗岩并非全岩矿化。古矿洞的大量存在表明矿脉并非风化作用形

成。古时矿工直接用锄、铲挖矿,碰到新鲜花岗岩便无能为力,因此可以合理推测,瓷石矿囊是发育于花岗岩中、强度明显低于正常花岗岩的一类特殊花岗岩,以包含较多铁白云母(?)为主要特征。

为何大型花岗岩岩基内会形成瓷石矿囊,是一个值得探讨的问题。从矿物组合及结晶过程看,瓷石矿囊与花岗岩围岩的最大区别在于前者具有更高的水含量。我们推测,瓷石矿囊可能代表大型岩体中的局部水饱和部位,常表现为边界不明显的、形态不规则的椭球体构造(spheroidal texture) (Ballhaus *et al.*, 2015)。这类构造在大型岩浆岩系统内部十分常见,是岩浆结晶过程中水流体局部集中的产物。对于大型岩基而言,水饱和的部位比水不饱和部位具有更低的固相线。因而,瓷石矿囊代表的花岗岩浆比围岩花岗岩浆具有更低的过冷却度,动态结晶过程更为缓慢,形成的矿物组合更完整。

本文数据表明,在水饱和岩浆动态结晶过程的晚期阶段可以形成铁白云母(?)。结合伟晶岩研究进展(London, 2014)、高温高压动态结晶实验结果(Sirbescu *et al.*, 2017; Devineau *et al.*, 2020)推测,岩浆热液型矿床蚀变带中的部分黏土矿物可能是岩浆动态结晶的产物,而非岩浆期后热液蚀变的结果。

#### 4.2 铁白云母(?)可能是一种新矿物

云母类矿物成分极其复杂(孙世华等, 1989),如果不考虑X位置(一价碱金属离子)的离子替换,按Tischendorf等的分类(2007),大部分岩浆岩中的云母成分属于如下3种固溶体混合序列:白云母-绿鳞石序列、多硅锂云母-铁叶云母序列和金云母-铁羟云母序列。前两个固溶体系列混合涉及契尔马克替换,而后一个序列则涉及较为简单的Fe-Mg替换。在这3个序列的6个端员矿物中,只有白云母、多硅锂云母颜色较浅,镜下近无色,且仅后者干涉色较低,与本文报道的铁白云母(?)光性相似,然而本文的铁白云母(?)显然不可能是多硅锂云母。从电子探针成分分析结果(表2)看,本文的铁白云母(?)可能属于白云母-绿鳞石固溶体系列。

在低温浅成热液矿床的蚀变带中,云母类矿物很常见(Runyon *et al.*, 2019),铁白云母(Fe-muscovite)也常被提及(Arbiol *et al.*, 2021)。然而,矿床蚀变带中的铁白云母(?)铝含量更高,铁含量更低(Arbiol *et al.*, 2021),与本文的铁白云母(?)具有不同的成分。更重要的差别在于它们的光学性质明显不同,前者蚀变带中的铁白云母(?)具有正常白云母

的光学性质,而本文发现的铁白云母(?)则普遍具有低的干涉色,因此需要更细致的晶体学研究以确定本文报道的铁白云母(?)是否是一种新矿物。

#### 4.3 古瓷成分与古瓷成瓷时代之间的关系

二元配方工艺的起始时间是一个古瓷学研究中的重大科学问题(肖红艳等, 2020)。从前人数据及本文结果看,瓷石为一种具有特殊结构(发育微裂隙)及矿物组合(含铁白云母?)的淡色花岗岩;其 $\text{SiO}_2$ 含量高于71%(郭演仪, 1984), $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量随铁白云母(?)的含量而变化。二元配方工艺出现以后,高岭石( $\text{SiO}_2$ 含量50%左右, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量33%左右)的加入必将提高瓷胎 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量。鉴于此,李家治(1998)通过总结景德镇历代瓷器胎体的化学组成,创造性地提出了“ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量高于20%的瓷胎,必然是加入高岭土的结果”,进而将瓷胎 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量20%作为判断使用瓷石加高岭土二元配方的标准,并沿用至今。然而,如果瓷石本身就含有不同比例的铁白云母(?),则上述标准可能会失效。由于铁白云母(?)的高铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量约30%,表2)特点,瓷石的铝含量与岩浆期铁白云母(?)的含量成正比。如果古瓷胎使用具有较高铁白云母(?)含量的单一瓷石配方,则其 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量也会高于正常高硅花岗岩( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量平均14%~18%,Sirbescu *et al.*, 2017),也就是有可能高于20%。因而,将20%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量作为二元配方的鉴别标准并不能确保有效。实际上,唐宋时期的瓷胎具有高于20%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的情况比比皆是(郭演仪, 1984)。

除了提高铝含量外,高岭石与瓷石混合配方还将降低瓷胎 $\text{SiO}_2$ 含量。而且,相对于铝含量的提高,瓷胎 $\text{SiO}_2$ 含量的降低效应更为显著。从现有数据看,清代之前的瓷胎 $\text{SiO}_2$ 平均含量高于72%,而清代瓷胎 $\text{SiO}_2$ 平均含量为68%(肖红艳等, 2020)。前者与瓷石成分(郭演仪, 1984)十分接近,也与景德镇浅色花岗斑岩(王国龙等, 2018)、鹅湖花岗岩(白玉岭等, 2015)的 $\text{SiO}_2$ 含量相差无几。因此, $\text{SiO}_2$ 含量的变化也可以作为判断瓷胎是否为二元配方制作的依据之一。有鉴于此,建议将古瓷 $\text{SiO}_2$ 含量与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量综合考虑,以探讨二元配方工艺的起始时间。

## 5 结论

(1) 景德镇瓷石由水饱和的花岗岩浆经过动态结晶(非平衡结晶)过程形成,具有钠长石、钾长石、

石英和铁白云母(?)的矿物组合序列。其中最晚期的结晶矿物——铁白云母(?)以及在动态结晶过程中析离出的水流体的网格状微裂隙活动通道,使得景德镇瓷石矿囊易于开采、加工,成为合适的古代制瓷原料。

(2) 瓷石中新发现的铁白云母(?)可能为一种新矿物,有待进一步深入研究以确定其晶体结构。

(3) 分析不同时期古瓷胎  $\text{SiO}_2$  含量与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的协变关系有可能为解决二元配方工艺的起始时间提供有效约束。

**致谢** 感谢审稿专家及编辑为本文提供了建设性的修改意见。

## References

- Arbiol C, Layne G D, Zanoni G, et al. 2021. Characteristics and genesis of phyllosilicate hydrothermal assemblages from Neoproterozoic epithermal Au-Ag mineralization of the Avalon Zone of Newfoundland, Canada[J]. Applied Clay Science, 202: 105960.
- Bai Yuling, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age, geochemistry and petrogenesis of the Yaoli pluton in north-eastern Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34 (1): 35~50 (in Chinese with English abstract).
- Ballhaus C, Fonseca R O C, Münker C, et al. 2015. Spheroidal textures in igneous rocks—Textural consequences of  $\text{H}_2\text{O}$  saturation in basaltic melts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 167: 241~252.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 2013. An Introduction to the Rock-Forming Minerals[M]. 3rd Edition. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Devineau K, Champallier R and Pichavant M. 2020. Dynamic crystallization of a haplogranitic melt: Application to pegmatites[J]. Journal of Petrology, 61(5): egaa054.
- Fang Yesen, Fang Jinman and Zheng Guoliang. 1985. Dazhou Kaolin in Jingdezhen, Jiangxi Province[J]. China Ceramics, 21(5): 37~45 (in Chinese).
- Guo Yanyi. 1984. Raw materials for porcelains and porcelain ware of North and South China in the ancient times [J]. Journal of Jingdezhen Ceramic Institute, 5(1): 55~68 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ping. 2022. A Study on Traditional Porcelain Mining Settlement System in Gaoling Village, Jingdezhen (Dissertation for Master Degree [D]). Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture (in Chinese).
- Li Jiazh. 1998. A History of Science and Technology in China (Ceramics)[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- London D. 2008. Pegmatites [C]//The Canadian Mineralogist, Special Publication 10: 1~347.
- London D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites[J]. Lithos, 184: 74~104.
- Mo Yunjie, Cao Chune, Han Guangda, et al. 2023. Analysis on the spectral characteristics and origin of “binary” formula of Jingdezhen traditional ceramic body [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 43 (11): 3 412~3 418 (in Chinese with English abstract).
- Runyon S E, Seedorff E, Barton M D, et al. 2019. Coarse muscovite veins and alteration in porphyry systems[J]. Ore Geology Reviews, 113: 103045.
- Sirbescu M C, Schmidt C, Veksler I V, et al. 2017. Experimental crystallization of undercooled felsic liquids: Generation of pegmatitic texture [J]. Journal of Petrology, 58(3): 539~568.
- Sun Shihua and Yu Jie. 1989. Interpretation of chemical composition and subdivision of magnesium iron micas, part a basic substitution and biotite plane[J]. Chinese Journal of Geology, 24(1): 33~48 (in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Förster H J, Gottesmann B, et al. 2007. True and brittle micas: Composition and solid-solution series[J]. Mineralogical Magazine, 71(3): 285~320.
- Wang Guolong, Hu Jinshan, Hu Fulin, et al. 2018. Characteristics and prospecting direction of pulse type Kaolin in Jingdezhen—A case of study in ehu Kaolin deposit[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 41(4): 379~388 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Hongyan, Ai Qinze and Cui Jianfeng. 2020. The invention of Jingdezhen porcelain’s ‘binary formula’ and the history of Kaolin mineral exploitation[J]. Palace Museum Journal, (5): 23~33, 109 (in Chinese with English abstract).
- Yi Guixiu, Wang Yidong and Liu Peng. 2022. Research on the protection and development of traditional villages under the background of Jingdezhen imperial kilns: Taking Gaoling Village, Fuliang County, Jingdezhen City as an example[J]. China Ancient City, 36(10): 75~82 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhongchi, Zheng Binghua and Huang Zhide. 2021. Study on the difference of geological characteristics between fine-grained vein type porcelain clay and granite weathering crust residual Kaolin deposits [J]. Advances in Geosciences, 11(2): 175~184 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Shugen, Liu Xiaohu and Ding Jun. 2006. A tentative discussion on mineralogical characteristics and genesis of Xianrenwan halloysite type Kaolin in Chenxi, Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (5): 433~439 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianle and Wang Zongliang. 1992. A study of Kaolin minerals from the Guoshan Kaolin deposit, Fujian Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(2): 146~156, 190~191 (in Chinese with English abstract).
- 白玉岭, 王宗起, 王 涛, 等. 2015. 赣东北地区瑶里花岗岩年代学、地球化学及其岩石成因 [J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 35~50.
- 方邺森, 方金满, 郑国良. 1985. 江西景德镇大洲高岭土 [J]. 中国陶瓷, 21(5): 37~45.
- 郭演仪. 1984. 南北方古代的制瓷原料和瓷器的特征 [J]. 景德镇陶瓷学院学报, 5(1): 55~68.
- 胡 萍. 2022. 景德镇高岭村传统瓷土矿业聚落体系研究 [D]. 北京: 北京建筑大学.
- 李家治. 1998. 中国科学技术史. 陶瓷卷 [M]. 北京: 科学出版社.
- 莫云杰, 曹春娥, 韩光大, 等. 2023. 景德镇传统陶瓷坯体“二元”配方谱学特性及其出现原因探析 [J]. 光谱学与光谱分析, 43(11): 3 412~3 418.
- 孙世华, 于 洁. 1989. Mg-Fe 云母化学成分的解释和分类 (I)——基本置换和黑云母平面 [J]. 地质科学, 24(1): 33~48.
- 王国龙, 胡金山, 胡福林, 等. 2018. 景德镇脉型高岭土矿特征及找矿方向探讨——以鹅湖高岭土矿为例 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 41(4): 379~388.
- 肖红艳, 艾沁哲, 崔剑锋. 2020. 景德镇瓷器生产“二元配方”起源初探——兼论高岭土开发史 [J]. 故宫博物院院刊 (5): 23~33, 109.
- 易桂秀, 王益东, 刘 鹏. 2022. 景德镇御窑厂整体申遗背景下传统村落保护发展研究——以景德镇市浮梁县高岭村为例 [J]. 中国名城, 36(10): 75~82.
- 袁钟池, 郑兵华, 黄至德. 2021. 细晶岩脉型瓷土(瓷石)与花岗岩风化壳残积型高岭土矿床地质特征差异性研究 [J]. 地球科学前沿, 11(2): 175~184.
- 张天乐, 王宗良. 1992. 福建郭山高岭土矿床中高岭矿物的研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 11(2): 146~156, 190~191.
- 张术根, 刘小胡, 丁 俊. 2006. 湖南辰溪仙人湾埃洛石型高岭土的矿物学特征与成因简析 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(5): 433~439.

## 附中文参考文献