上林湖后司岙窑址晚唐五代秘色瓷的显微结构研究

故宫博物院　浙江省文物考古研究所

内容提要　本文运用扫描电子显微镜及 X 射线能谱仪对后司岙秘色瓷窑址出土晚唐、五代秘色瓷和普通越窑青瓷的显微结构进行鉴别与定量分析。研究表明:(1)秘色瓷与同一时期普通越窑青瓷胎、釉的显微结构存在差异,秘色瓷釉层中几乎没有原料残余相和晶体生成,胎体中大孔隙少,残余石英小且圆润,表明秘色瓷在原料处理、装烧方法等工艺上进行了革新和改变。(2)晚唐至五代,普通越窑青瓷釉中草木灰残余相组成和形貌差异明显,推测晚唐至五代时期越窑釉料配方可能发生了改变。(3)研究证实了秘色瓷的烧制工艺更为规范、标准,是越窑工匠精益求精地进行工艺创新的产物。

关键词　秘色瓷　普通越窑青瓷　显微结构　工艺

2015至2017年,浙江省慈溪县上林湖畔后司岙发现一处龙窑窑址,出土了大量精美的瓷器碎片和匣钵,通过与法门寺秘色瓷标准器的对比,后司岙窑址被确定为晚唐、五代时期的一处集中烧造秘色瓷的窑场,从而揭开了秘色瓷的产地之谜。尽管秘色瓷的真实面目与生产地点已尘埃落定,学界也普遍接受秘色瓷是晚唐、五代到北宋初期越窑质量上乘的贡瓷产品,但秘色瓷是如何烧造的,它与普通越窑青瓷的关系如何等秘色瓷工艺和性质的相关问题却仍是众说纷纭。有学者认为秘色瓷是越窑产品中挑选的最佳瓷器‹1›,也有学者认为秘色瓷可以泛指一切青瓷‹2›,还有学者认为"贡窑"烧造秘色瓷,而秘色瓷不全是"贡窑"烧造‹3›。

目前,秘色瓷的科技研究工作主要集中在胎釉原料、瓷釉的呈色机理、装烧工具评价等方面,学术成

‹1›　童兆良:《贡窑概论》,《中国古代陶瓷的外销:一九八七年福建晋江年会论文集》页147—151,紫禁城出版社,1988年。

‹2›　董其祥:《秘色瓷考辨兼论蜀窑秘色瓷》,前揭《中国古代陶瓷的外销:一九八七年福建晋江年会论文集》,页152—155。

‹3›　谢纯龙:《秘色瓷诸相关问题》,《东南文化》1988年第5期。

果基本揭示了后司岙窑址出土的秘色瓷的原料[1][2]、工艺[3]、釉色[4]及装烧工具材料[5]的时代特征以及发展变化规律。然而，从显微结构的角度来探讨秘色瓷工艺的相关研究鲜有报道，基于此，本研究拟采用扫描电子显微镜及X射线能谱仪，对后司岙秘色瓷窑址出土的晚唐、五代秘色瓷和普通越窑青瓷进行研究，结合元素和物相的定量结果，考察二者显微结构上的异同点，讨论原料处理、瓷质匣钵等对显微结构的影响，并在此基础上探讨秘色瓷的工艺及其与普通越窑青瓷的关系。

一　实验方法和样品

（一）实验方法

采用美国FEI公司的Quanta 600扫描电镜和美国EDAX公司Genenis X射线能谱仪对瓷片标本的胎、釉显微结构及微区元素组成进行测试分析。测试条件见文献[6]。为使观察结果更具代表性，标本胎、釉分别选取5个区域进行物相的识别与统计分析。采用背散射电子像可以快速识别所分析标本胎、釉中不同元素组成的物相特征。采用National Institutes of Health（NIH）开发的ImageJ图像处理软件进行图片区域内像素分析计算、统计及柱状图和剖面图的创建。

（二）样品

本文分析的后司岙窑址出土的普通越窑青瓷及秘色瓷样品均由浙江省文物考古研究所提供，时代包括晚唐、五代，样品外观如〔图一〕所示。

二　测试结果及讨论

对古代陶瓷而言，由于缺少文献记载，人们已无法确切了解当时所用的原料及工艺，但从胎、釉的显微结构可以推知其概况。由现代材料科学可知，不同成分的材料，其显微结构不同；相同成分的材料，不同的工艺过程其显微结构也不相同。

‹1›　李合、史宁昌、王光尧：《上林湖后司岙窑址秘色瓷的成分特征研究》，《故宫博物院院刊》2017年第6期。

‹2›　X. Gao, B. Zhang, H. Cheng, “Microstructure, firing temperature and composition characteristics of Mi-se porcelain unearthed from Housi’ao kiln site, China”, *Ceramics International*, 2021, No. 47.

‹3›　金欣园、周少华、郑建明：《上林湖越窑秘色瓷工艺技术研究》，《文物保护与考古科学》2018年第5期。

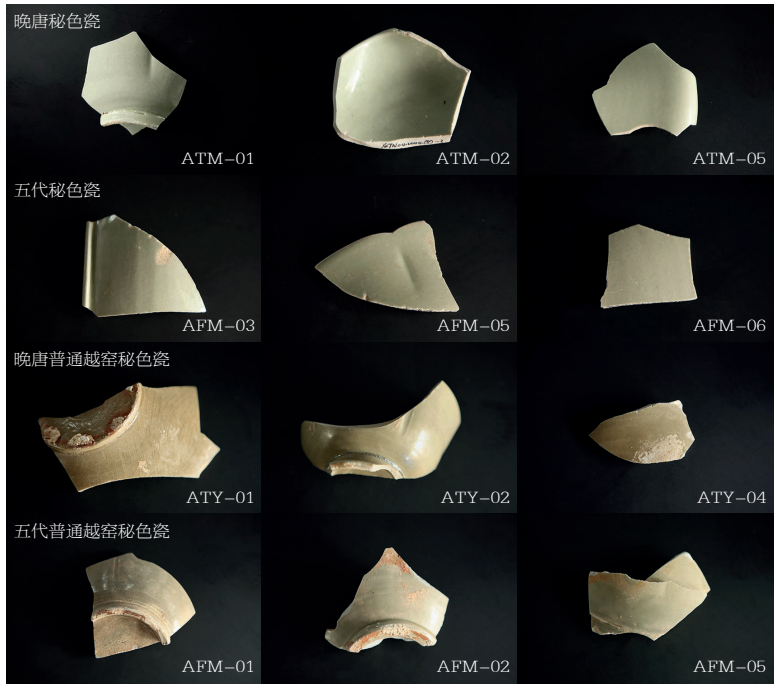
‹4›　侯佳钰、徐巍、厉祖浩：《上林湖后司岙窑址秘色瓷的釉色特征及呈色影响因素研究》，《故宫博物院院刊》2017年第6期。

‹5›　丁银忠、单莹莹、谢纯龙：《上林湖后司岙窑址瓷质匣钵的工艺特征研究》，《故宫博物院院刊》2017年第6期。

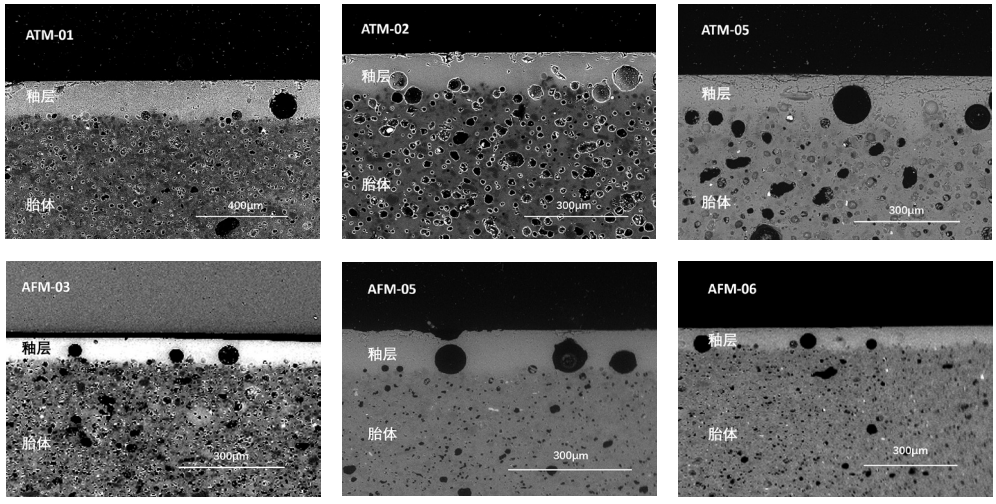
‹6›　李媛、张汝藩、苗建民：《紫禁城清代建筑琉璃构件显微结构研究》，《’09古陶瓷科学技术7国际讨论会论文集》页111－118，上海科学技术文献出版社，2009年。

（一）釉层显微结构特征及影响因素研究

〔图一〕上林湖后司岙窑址出土的晚唐、五代秘色瓷和普通越窑青瓷样品照片



〔图二〕上林湖后司岙窑址晚唐（ATM–01、ATM–02、ATM–05）、五代（AFM–03、AFM–05、AFM–06）秘色瓷釉层断面的背散射电子像



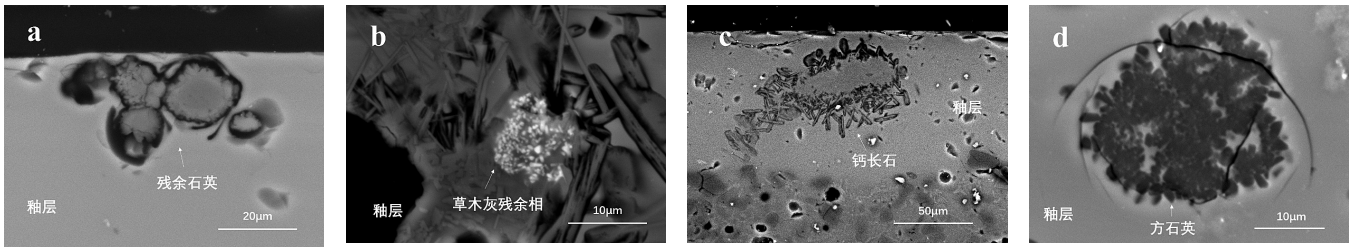
〔图一〕是上林湖后司岙窑址晚唐、五代秘色瓷釉层断面的背散射电子像。由图可知，晚唐、五代秘色瓷的釉层都比较简单均匀，熔融程度比较高，除一些气孔以外，未见到析出晶体、原料残余相等其他物相，釉料经过烧制全部熔融成纯净透明的玻璃釉。〔图三〕是上林湖后司岙窑址晚唐、五代普通越窑青瓷釉层断面的背散射电子像。由图可知，普通越窑青瓷釉中物相相对复杂，主要有两类物相：原料残余物相（未熔石英、草木灰残余相）和新生成物相（钙长石、方石英等晶体），这些物相约占总釉层的10%－20%（按面积计算）。这表明普通越窑青瓷虽为透明玻璃釉，但其釉层所含杂质量相对较多，从而导致普通越窑青瓷所呈现出釉色和质感不如秘色瓷纯净和均一。

现有研究表明秘色瓷与普通越窑青瓷采用了相同的制釉原料和配釉技术[1][2]，但以上分析表明两者釉中物相种类与数量存在明显差异。通常，陶瓷的原料、工艺和结构有相互制约关系，据此推测，越窑工匠可能在能够影响到釉中物相的工艺环节上进行了改变和革新：其一，秘色瓷可能采用了更加精细的处理工艺，降低了制釉原料的粒度，从而起到降低釉料熔融温度的作用，并且减少了瓷釉中原料类

‹1› 李家治、陈显求、陈士萍：《上林湖历代越瓷胎、釉及其工艺的研究》，《'89古陶瓷科学技术1国际讨论会论文集》页336－344，上海科学技术文献出版社，1989年。

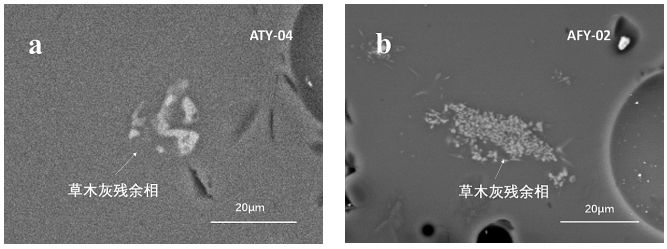
‹2› 李国帧、叶宏明、朱伯谦：《历代越窑青瓷胎釉的研究》，《中国陶瓷》1988年第1期。

〔图三〕上林湖后司岙窑址晚唐、五代普通越窑青瓷釉层中残余石英颗粒断面的背散射电子像



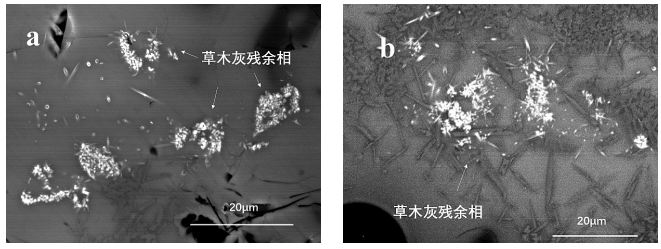
a. 残余石英颗粒　b. 草木灰残余相　c. 钙长石针晶　d. 方石英晶体

〔图四〕上林湖后司岙窑址晚唐（ATY-04）、五代（AFY-02）普通越窑青瓷釉层中草木灰残余相的背散射电子像



a. 晚唐　b. 五代

〔图五〕北宋龙泉青瓷和南宋官窑青瓷釉中草木灰残余相的背散射电子像



a. 北宋　b. 南宋

物相的残余；其二，瓷釉封口的瓷质匣钵的运用能阻隔空气的热交换，尽量避免釉层二次氧化，且促进了釉料各种物化反应的充分进行；其三，工匠也可能在其他工艺如施釉方法、在龙窑中的摆放位置等方面进行过探索。

草木灰是历代越窑青瓷釉的主要原料之一，对比晚唐与五代的普通越窑青瓷釉中草木灰残余相特征发现：晚唐瓷釉中草木灰残余相呈致密的块状，带有比较明显的熔蚀边以及少量的气孔，而五代瓷釉中草木灰残余相呈微粒集合体状，两者存在明显差异〔图四〕。据[表一]可知，晚唐与五代瓷釉中草木灰残余相的氧化钙、氧化磷和氧化锰的含量分别为18.5%、8.0%、0.3%和35.9%、22.6%、0.6%。综上分析表明晚唐与五代时期的普通越窑青瓷釉中草木灰残余相形貌和元素组成皆有所不同。结合〔图五〕中北宋龙泉青瓷、南宋官窑青瓷釉中常见的草木灰残余相的背散射电子像可知：五代普通越窑青瓷釉中微粒集合体状的草木灰残余相在后期龙泉青瓷、官窑青瓷釉中也比较多见，而晚唐瓷釉中致密块状的草木灰残余相相对少见，从显微结构角度进行的研究证实了晚唐至五代时期越窑青瓷釉料配方可能发生了改变的观点[1]。

综上所述，虽然秘色瓷和普通越窑青瓷在同一窑场、同一时期采用相同釉料烧制而成，但二者瓷釉的显微结构和工艺是不同的，换句话说，秘色瓷是越窑工匠有意识地进行工艺创新的产物。其中，原料加工、装烧方式以及釉灰种类的创新和改革或许是越窑工匠成功烧制秘色瓷的关键。

［表一］上林湖后司岙窑址晚唐、五代普通越窑青瓷釉中草木灰残余相元素组成（wt%）

编号	时代	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
ATY-04	晚唐	0.7	2.1	10.7	55.5	8.0	1. 9	18.5	0.6	0.3	1.7
AFY-02	五代	0.3	1.8	5.3	29.9	22.6	1.3	35.9	0.7	0.6	1.7

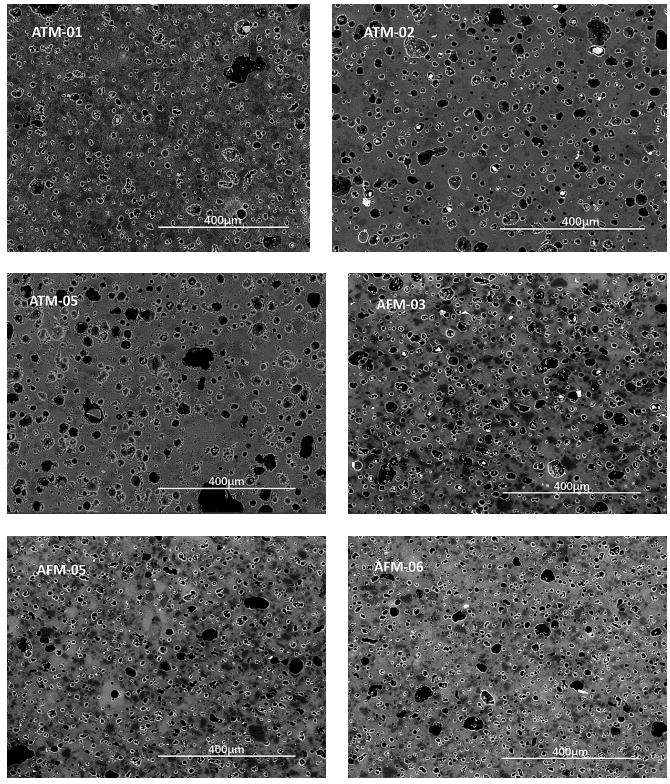
‹1› 前揭丁银忠等《上林湖后司岙窑址秘色瓷的成分特征研究》，页124－132。

（二）胎体显微结构特征及影响因素研究

〔图六〕为上林湖后司岙窑址晚唐、五代秘色瓷胎体断面的背散射电子像。〔图七〕为上林湖后司岙窑址晚唐、五代普通越窑青瓷胎体断面的背散射电子像。这些背散射电子像依据灰度不同可分为四类物相：其一为灰白色相，主要由胎体的基质玻璃相构成。其二为灰黑色相，主要由残余石英颗粒构成。其三为白色相，主要由含Fe、Ti的残余物相颗粒构成。其四为黑色相，主要由各种类型的孔隙构成。

同一时期普通越窑青瓷和秘色瓷胎体皆由上述四类物相构成，属于多晶多相结构体系，但二者所含各物相的数量、大小、分布以及形貌是有差别的。因此从胎体中孔隙和残余石英两方面做进一步对比研究。

〔图六〕上林湖后司岙窑址晚唐（ATM-01、ATM-02、ATM-05）、五代（AFM-03、AFM-05、AFM-06）秘色瓷胎体断面的背散射电子像



1. 胎体中孔隙特征及影响因素

孔隙是我国传统陶瓷不可避免出现的一种特征，依据胎体孔隙的分类标准‹1›，将秘色瓷胎体孔隙分为三类：坑洞类、微孔隙类和近圆形孔隙类。利用ImageJ对上述三类孔隙大小、数量进行了分析，以五代普通越窑青瓷和秘色瓷为例进行讨论，结果列于[表二]。

［表二］上林湖后司岙窑址五代普通越窑青瓷和秘色瓷胎体孔隙比例（%）

编号	第一类／坑洞类	第二类／微孔隙类	第三类／（近）圆形孔隙类
普通越窑青瓷AFY-01	35	40	25
秘色瓷AFM-03	5	35	60

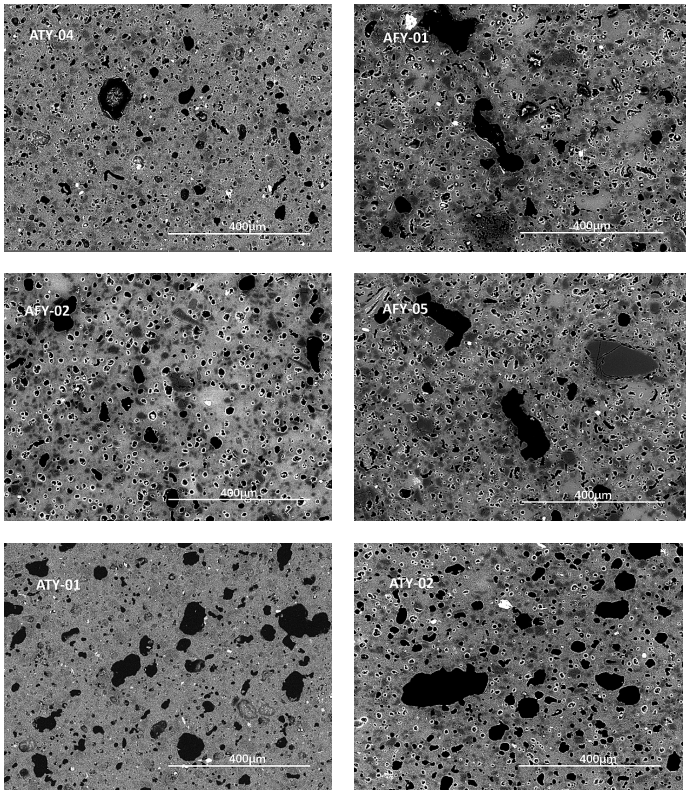
首先，胎体中坑洞类的孔隙差别明显，秘色瓷中坑洞类孔隙仅占总孔隙的5%，而普通越窑青瓷则高达35%。同时，从〔图七〕可以看出，秘色瓷胎中坑洞类孔隙大多为数十微米，而普通越窑青瓷中大者可达数百微米。通常坑洞类孔隙是由于原料中有机类物质的存在或制样过程中空气未排尽而形成，而且在生坯放进窑炉烧制前就已存在。因此，坑洞类孔隙的差别对于确定秘色瓷与普通越窑青瓷的关系是非常重要的，尽管它们的胎体化学组成相同‹2›‹3›。这种差别的原因，推测是在制胎中的原料处理和成型工艺中存在不同。

‹1› 李媛、翟毅、吴明俊：《基于显微结构特征对龙泉金村大窑犇窑历代青瓷原料和烧制工艺演变规律的初步探讨》，《天下龙泉：龙泉青瓷与全球化·卷二·国家公器》页352—362，故宫出版社，2019年。

‹2› 前揭李家治等《上林湖历代越瓷胎、釉及其工艺的研究》，页336—344。

‹3› 前揭李国帧《历代越窑青瓷胎釉的研究》，页46—57。

〔图七〕上林湖后司岙窑址晚唐（ATY-01、ATY-02、ATY-04）、五代（AFY-01、AFY-02、AFY-05）普通越窑青瓷胎体断面的背散射电子像



其次，胎体中近圆形孔隙的比例悬殊，秘色瓷胎中大部分都是近圆形孔隙，高达60%，而普通越窑青瓷胎中仅为25%。因为近圆形孔隙多是由于气体从粘土类或长石类形成的熔融玻璃体中逸出而形成，尺寸较小且多呈圆形或近圆形，所以胎体中这一类孔隙增多时，通常代表胎体的烧结程度比较高。如前所述，在瓷质匣钵的密闭保温作用下，秘色瓷的瓷釉变得非常透彻、纯净。虽然胎体不会因此全部变成玻璃相，但极好地促进了胎体原料在高温阶段的反应，使胎体的烧结程度提高是毋庸置疑的。

2. 胎体中残余石英特征及影响因素

〔图八〕为五代普通越窑青瓷和秘色瓷胎中残余石英粒度分布图。由图可知，二者胎中石英粒度的分布趋势是比较相似的，但秘色瓷中75%的石英在5－15μm之间，其余25%的石英颗粒也均在30μm之内，石英尺寸非常细小。而普通越窑青瓷胎中75%的石英在30－70μm之间，还有10%左右的较大石英在90－150μm之间，其余15%的石英介于二者之间。大尺度石英颗粒形成通常与原料的粉碎和淘洗有关，以上数据表明秘色瓷胎体较普通越窑青瓷在原料粉碎与淘洗上都要精细。

〔图九〕为普通越窑青瓷和秘色瓷胎体中残余石英的圆度分布图。圆度（Circ）为ImageJ中评价颗粒形状的指标，数值范围介于0、1之间，它的理论公式如下所示：

$$Circ = 4\pi \times \frac{[Area]}{[Perimeter]^2}$$

$Area$：颗粒面积

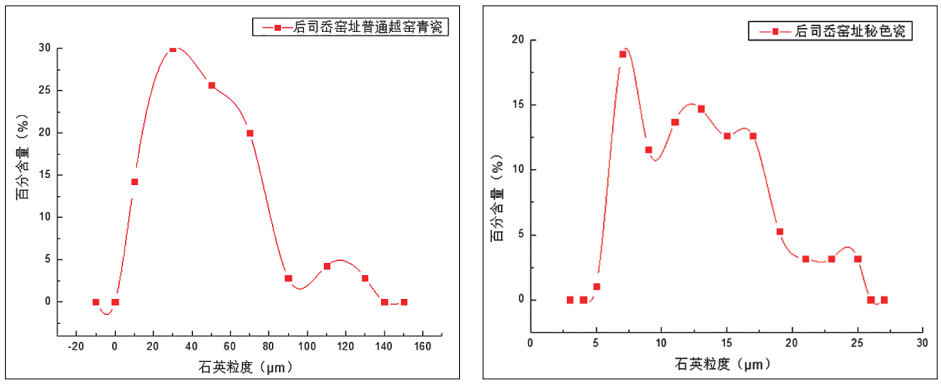
$Perimeter$：颗粒周长

Circ值越接近1表明颗粒越接近于圆形，Circ值越接近0表明颗粒越不规则。根据统计结果可知，秘色瓷中石英圆度平均值为0.3，标准偏差为0.13，而普通越窑青瓷圆度0.2，标准偏差为0.12，表明秘色瓷中石英更加圆润，造成这一现象原因可能与秘色瓷采用瓷质匣钵有关，通常瓷质匣钵内还原气氛具有一定降低烧成温度的作用，促使石英更多地熔融或边缘变圆润。

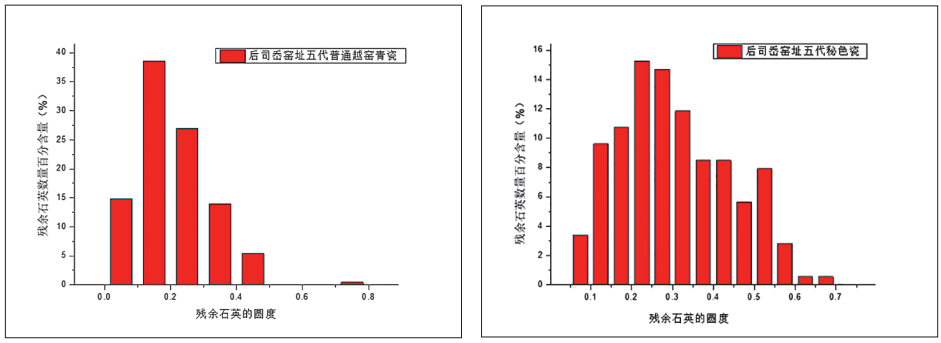
由以上胎体的分析可知，越窑工匠在秘色瓷工艺的创新上，并不只满足于对釉的追求，胎料同样经过了规范、标准的加工处理。胎中坑洞类孔隙、近圆形孔隙以及残余石英颗粒特征进一步证实了秘

色瓷的工艺不同于普通越窑青瓷，秘色瓷是越窑工匠们的创新产品。

〔图八〕上林湖后司岙窑址五代普通越窑青瓷和秘色瓷胎中石英粒度分布图



〔图九〕上林湖后司岙窑址五代普通越窑青瓷和秘色瓷胎中残余石英圆度分布直方图



三　结论

通过对比研究上林湖后司岙秘色瓷窑址出土晚唐、五代时期的秘色瓷和普通越窑青瓷的显微结构，初步得出以下结论：

(1)秘色瓷与同一时期普通越窑青瓷釉的显微结构存在差异，秘色瓷釉层仅有一些气孔，釉层为纯净、透明的玻璃釉；而普通越窑青瓷釉层除气孔外，还有一定量的残余石英颗粒、草木灰残余相、钙长石晶体和方石英晶体，釉中各物相占总釉层的10%—20%，釉层为含杂质量相对较多的透明玻璃釉。

(2)晚唐到五代，普通越窑青瓷釉中草木灰残余相由呈致密块状转变为微粒集合体状，且釉中氧化磷、氧化锰和氧化钙的含量均明显升高。

(3)秘色瓷胎体中大孔隙仅占5%，大者也仅为数十微米，小孔隙比例很高，可达60%；普通越窑青瓷胎体中大孔隙高达35%，且尺寸普遍较大，大者可达数百微米，小孔隙比例不高，仅为25%。此外，与同一时期普通越窑青瓷相比，秘色瓷胎中残余石英的粒径更小，也更加圆润。

(4)从显微结构特征角度进行的研究，初步证实了秘色瓷的制作工艺比较规范、标准，是越窑工匠基于制作普通青瓷的经验，进行工艺优化和创新的产物。

[李媛、沈岳明、郑建明、王光尧执笔]

[执笔者单位：李媛，故宫博物院文保科技部；沈岳明、郑建明，复旦大学文物考古系；王光尧，故宫博物院器物部]

（责任编辑：何　芳）