

運用氧化還原兩用電窯於青瓷釉之發色機制研究

The Application of the Electric Kiln with Oxidized and Reduced Atmospheres on the Research of Coloring Mechanisms of the Celadon Glaze

文·圖／沈俊良 Shen Jyung-lyang (國立臺灣工藝研究發展中心／鶯歌多媒材研發分館副研究員)

前言

青瓷廣泛的定義是指帶有灰綠及灰藍色調含氧化鐵的單色釉。根據H.A.Seger的研究，中國古代青瓷釉的基礎為 $RO \cdot 0.5R_2O_3 \cdot 3.82SiO_2$ (註1)。而J.S.Laird (註2) (1919)的分析報告指出，青瓷基本組成是SK4的瓷器釉，其中RO大部分是CaO，發色劑以氧化亞鐵為主，CaO及 Al_2O_3 特別多，不含銅、鉻、鈷等發色劑。其他研究也指出青瓷釉的發色與其2價及3價氧化鐵的比例有關 (註3)。

青瓷歷代被稱為縹瓷、千峰翠色、艾青、翠青、粉青等 (註4)。有時青瓷因含鐵分純度不一，及還原氣氛不足，色調便呈現黃色或黃褐色 (註5)。原始青瓷最早出現在商周時期，歷經春秋戰國時期，到東漢有了重大突破 (註6,7,8)，從東漢到唐代期間發展迅速，到宋代時五大名窯更為知名。宋代五大名窯是指官窯、哥窯、定窯、鈞窯、汝窯等五個窯口 (註9)。其中哥窯及汝窯主要產青瓷，汝窯更有「雨過天青雲破處」的美譽 (註10) 以及作為宮廷用器 (註11)。南宋時期的浙江龍泉青瓷 (註12) 應是青瓷的巔峰時期。龍泉青瓷產品有兩種：哥窯以及弟窯。弟窯是白坯和硃砂坯，特色為瓷釉層豐潤如翡翠，釉色包含梅子青、粉青、月白、豆青、淡蘭、灰黃等；哥窯則是深灰、淺灰、黑灰、土黃坯青瓷，釉色有粉青、月白、油灰、青黃等。哥窯釉面常

見裂紋，稱之為「開片」。哥窯所生產之青瓷尤以「紫口鐵足」為珍貴 (註13)。

以傳統瓦斯窯燒製青瓷不但耗費時間與人力，也因為耗費瓦斯，廢氣排放多，不符合環保，但若使用本研究所採用的氧化還原兩用電窯來燒製青瓷之類的還原性釉藥，則可節省人力及時間，同時瓦斯用量少且大多能完全燃燒，故相對來得環保，尤其氣氛控制也較為精確，受到氣候或氣壓之影響也少，而且可具有量產之規模。本研究同時針對所蒐集之14種青瓷釉藥配方進行此種兩用電窯之可行性驗證，並進行膨脹係數之測試與釉裂之關係探討，以及成份改變對青瓷發色之影響。

實驗步驟

1. 製作試片：以陶板機將26號瓷土、陶土、紫紅土製成試片，乾燥後加以素燒。收集14種青瓷釉式及準備所需原料，經秤重配料後加適當水經過快速球磨機研磨5分鐘，過篩並以浸釉法上釉待燒。

2. 燒成設備：使用之中聯電熱有限公司所生產之電窯／瓦斯窯兩用窯，瓦斯由電窯正下方經由爐嘴一具導入並由正上方導出，利用瓦斯內之強氣體如還原CO、 CH_4 、 C_2H_6 烷類等將爐室內氧氣消耗掉達到缺氧還原之效果。

3. 燒成曲線：本研究所採用之燒成曲線為以4°C/h從室溫至120°C，再以92°C/h從120°C升至950°C，於950°C持溫1h，持溫完畢後開始通入瓦斯進行還原，並以約86°C/h升至1250°C後關瓦斯，最後在1250°C持溫30分鐘，以自然冷卻降溫。

4. 青瓷釉藥配方及所需原料：表1為本研究所採用之14種青瓷釉藥樣品名稱及其配方表：

相種類以及玻璃相之比率等。通常像紫紅土及一成陶土等陶坯燒成後之孔隙率比瓷坯高，故膨脹係數較低，在這些膨脹係數普遍高的青瓷釉中大都產生裂紋或開片的情形。在釉藥方面，以常見之石英而言，在其為結晶結構狀態下，不同之同分異構物之膨脹係數都非常高，但其熔融成玻璃相就屬低膨脹係數物質，故釉藥燒成後是否殘留游離石英成為關鍵。而孔隙率或氣孔也普遍存在於坯體及釉藥之中，具降低膨脹係數之作用，但釉藥

表1·本研究所採用之14種青瓷釉藥樣品名稱及其配方表。其中RGTiIn配方額外添加5%之白雲石。

名稱	長石	高嶺土	滑石	石英	碳酸鈣	磷酸鈣	碳酸鋇	氧化錫	氧化鋅	氧化鐵	土灰
CC04	釜戶長石60			10				5		1	30
CL01	釜戶長石69	2		12	8			2	2	1.5	
CPN2-3	鈉長石42	4		33	20	3	4			1.5	
RGTiIn	霞正長石39	8	4	31	8				6	0.75	
CN2-3	鈉長石41.5	4	2.5	32.5	19.5					1	
CC03	日化長石44.2	6.8		31.7	10.6					1.5	
CC02	霞正長石80		5		15		5			1.5	5
CBH2B3	霞正長石42	1.5	11.5	37	8		9			1.5	
CBH2	霞正長石31.5	1.5	11.5	37	8	3				1	
CCB02	霞正長石81		8	5	6		8			1	
RG307-9	日化長石69			25	6	1		0.6		1	
CA03P5	霞正長石33	8.5	2.46	39	17.25	1				1.5	
CBH2P3	霞正長石31.5	1.37	11.4	37	8.12	3				1	
F107	澳洲鉀長石32	2	7	27	17	6	9			1.5	

5. 膨脹係數分析：使用堯富精密科技股份有限公司所生產的熱膨脹係數檢測儀檢測。將已燒結之坯體試體及熔融之釉條，以切割機將試片裁切成適當尺寸，升溫速率為每分鐘8.33°C，量取100°C至400°C溫度點的線膨脹係數值。

氣孔不易測得，故通常最直接之方式就是燒製成長條狀以儀器直接測之。表中以CPN2-3之體膨脹係數為最高為210x10E-7，故於3種坯土上皆產生裂紋之現象，CC04次之，RG307-9再次之，CCB02則產生類似表面結晶或無光之現象，膨脹係數為最低

結果與討論

1. 坯體及釉藥膨脹係數分析結果：表表2及表3分別為本研究所選用之3種坯體及14種青瓷釉藥燒成後之膨脹係數分析結果。影響坯體及釉藥膨脹係數之主要因素為孔隙率、晶

表2：本研究所選測之3種坯體之膨脹係數分析結果。

土種樣品	線膨脹係數	體膨脹係數
紫紅土	5.33×10E-6	159.7×10E-7
日本26號瓷土	6.14×10E-6	184.1×10E-7
一成陶土	5.10×10E-6	154.5×10E-7

表3：本研究所選測之14種青瓷釉藥之膨脹係數分析結果。

釉藥編號	線膨脹係數	體膨脹係數
CC04	$6.82 \times 10E-6$	$204.6 \times 10E-7$
CL01	$6.18 \times 10E-6$	$185.3 \times 10E-7$
CNP2-3	$6.99 \times 10E-6$	$209.6 \times 10E-7$
RGTiLn	$6.08 \times 10E-6$	$182.4 \times 10E-7$
CN2-3	$6.62 \times 10E-6$	$198.6 \times 10E-7$
CC03	$5.95 \times 10E-6$	$178.6 \times 10E-7$
CC02	$5.58 \times 10E-6$	$167.4 \times 10E-7$
CBH2B3	$6.59 \times 10E-6$	$197.7 \times 10E-7$
CBH2	$6.06 \times 10E-6$	$181.9 \times 10E-7$
CCB02	$4.54 \times 10E-6$	$136.1 \times 10E-7$
RG307-9	$6.77 \times 10E-6$	$202.9 \times 10E-7$
CA0305	$6.13 \times 10E-6$	$183.9 \times 10E-7$
CBH2P3	$6.14 \times 10E-6$	$184.2 \times 10E-7$
F107	$6.56 \times 10E-6$	$196.8 \times 10E-7$

2. 氧化還原兩用電窯燒製試片之

結果：（見右頁圖）圖為使用氧化還原兩用電窯燒製14種青瓷釉藥試片之結果，由左至右分別為紫紅土、26號瓷土以及一成陶土。由圖可知大部分試片呈現出青瓷之效果，故可證明氧化還原兩用電窯可以用來燒製青瓷類之還原性釉藥。試片CC04使用5%之氧化錫及大量土灰高達30%加以助熔，在紫紅土試片上顯現出類似汝窯之偏白乳濁加上裂紋效果，而CNP2-3、CN2-3、CCB02以及CBH2P3試片也有類似此乳濁效果；CL01採用較多府戶長石（69%），少量2價助熔劑，氧化鐵使用1.5%，故呈現青翠之綠色，但因遮蔽率不佳，故當施釉厚度不足時，效果便不佳如一成陶土試片所示。流釉通常發生在釉藥溫度不足或黏度過低時，其中以添加霞正長石或鈉長石較易發生，例如CA03P5、CNP2-3、RGTiLn、CCB02以及CN2-3等，可增加中性以及酸性氧化物之比例或者降低燒成溫度來改善之。試片中偏向藍色者為CA03P5、RG307-9以及F107，其餘則偏向綠色。

3. 釉中各成分對青瓷釉色之影響：

在青瓷釉藥配方鉀長石為60%、石英為25%、碳酸鈣為5%以及三氧化二鐵為2%之條件下逐漸添加以下各成分，可得知各種成分對發色之影響：二氧化錫添加量為分別為1%、3%、5%以及7%，結果發現可添加至7%，對顏色影響不大，此乃因為基礎釉中之氧化鈣含量偏低，導致失透之效果不明顯；碳酸鈣從5%、10%、15%增加至20%則會增加無光效果，因碳酸鈣加熱分解後之氧化鈣熔點極高（ $>2500^{\circ}\text{C}$ ），且因氧化鐵被稀釋導致顏色變淡；碳酸鋇添加量為3%、6%、9%、12%，顏色會偏藍且氣泡漸增，可能是因為鋇原子半徑比較大或者二氧化碳釋出形成許多細小氣泡所造成之光學折射現象；三氧化二鐵添加量為分別改為1%、2%、3%以及4%，發現添加3%以上則產生表面再氧化之現象，切開之後內部依然呈現青瓷色澤；磷酸鈣添加量為分別為5%、10%、15%以及20%，約可添加至10%，過多也會產生氣泡及膨脹現象，因為磷酸鈣中的氧化磷及氧化鈣會產生共熔之現象，故也具有助熔的效果。

結論

1. 本研究共計蒐集了14種青瓷配方，搭配3種坯土包含紫紅土、26號瓷土以及一成陶土並製成上釉試片，使用氧化還原兩用電窯於 $950\sim 1250^{\circ}\text{C}$ 區間通入瓦斯加以還原，結果證明氧化還原兩用電窯可以用來量產燒製青瓷類之還原性釉藥。

2. 14種青瓷釉藥中燒成後部分有流釉現象產生如CA03P5、CNP2-3、RGTiLn、CCB02以及CN2-3，顯示這些釉藥之溫域或黏度比較低。

CC04				CBH2B3			
CL01				CBH2			
CPN2-3				CCB02			
RGTiLn				RG307-9			
CN2-3				CA03P5			
CC03				CBH2P3			
CC02				F107			

(圖)

本研究蒐集之14種青瓷釉藥試片燒成結果，由左至右分別為紫紅土、26號瓷土以及一成陶土。

青瓷釉之乳濁度也與2價氧化物添加比例量成正比關係，添加比例略高則容易顯現類似汝窯之效果，例如CC04、CPN2-3、CN2-3、CCB02以及CBH2P3等。

3.26號瓷土之膨脹係數與大部分青瓷釉配方之膨脹係數比較接近，故產生釉裂之機率比較低；紫紅土以及一成陶土因膨脹係數低於這些釉藥，故大多產生釉裂之現象。CPN2-3之

體膨脹係數高達約 210×10^{-7} ，故於3種坯土上皆產生裂紋之現象。

4.釉中各成分對青瓷釉色之影響如下：二氧化錫可添加至7wt%，對顏色影響不大；碳酸鈣會增加無光效果，且顏色變淡；增加碳酸鋇會偏藍且氣泡漸增；三氧化二鐵應於2wt%以下，過多則產生表面再氧化之現象；磷酸鈣則可添加至約10%，過多也會產生氣泡。

註釋

- 註1 薛瑞芳編著，《釉藥學》，藝術家出版社，2013。
- 註2 J.S.Laird：The Composition Chinese Celadon Pottery. Jour. Amer. Ceram. Soc.,1(10)675-678(1918)。
- 註3 張玉南，《陶瓷藝術釉工藝學》，江西省景德鎮陶瓷學校，1992，頁79。
- 註4 〈九秋風露越窯開，奪得千峰翠色來〉，出自壹讀網站<https://read01.com/mMgoBK.html>。
- 註5 青瓷，出自維基百科網站<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9D%92%E7%93%B7>。
- 註6 青瓷，出自互動百科網站<http://www.baik.com/wiki/青瓷>。
- 註7 《典藏投資》，試刊號第22期（2009.8）。
- 註8 張福康著，《中國古陶瓷的科學》，上海人民美術出版社，頁44。
- 註9 〈中國古代陶瓷史〉，出自陶瓷藝術欣賞網站 <http://web.ptes.tp.edu.tw/big6/ceamics/history.htm>。
- 註10 五大名窯，出自維基百科網站<https://zh.wikipedia.org/wiki/五大名窯>。
- 註11 余佩瑾主編，〈貴似星辰 清宮傳世12至14世紀青瓷特展〉，國立故宮博物院，2016。
- 註12 龍泉青瓷，出自維基百科網站<https://zh.wikipedia.org/wiki/龍泉青瓷>。
- 註13 宋光梁主編，《陶瓷工業論叢》，中華民國陶業研究學會出版，1987，頁114。