

# 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 工程學(二)科

第三名

052411

粗糠「鋅」用途—以廢棄稻穀灰為主要原料製  
備氧化鋅結晶釉之研究

學校名稱：臺中市立大甲高級中等學校

作者：  高三 郭潔蓉  高一 黃巧甯  高三 卓亭妤	指導老師：  黃嘉男
---	------------------

關鍵詞：稻穀灰、鋅結晶、磁磚用釉

## 摘要

本研究文獻探討並將碾米後剩餘的稻殼灰為主要原料製備鋅結晶釉及實驗含稻殼灰之鋅結晶釉的各種變化並以溫度控制法，將美麗的矽酸鋅結晶體留下來，研究結果含 50.66% 稻殼灰釉式升至 1240°C 後，在 40 分鐘快速降至成核期在攝氏 1120 度，持溫 1 至 7 小時均能產生美麗的結晶。產生結晶的氧化鋅重量百分比為 25%，若想追求藝術上的美感，氧化鋅重量百分比可在 26~30% 為佳。結晶成核時期的持溫時數，與結晶核數量及結晶最大粒徑成正比。鋅結晶生成燒製須以氧化的氣氛燒製，還原燒的火焰及缺氧狀態會干擾結晶生成。含 50.66% 稻殼灰之釉製成建築磁磚用釉在硬度及耐酸鹼測試均滿足台灣 CNS 磁磚品質規定，使用廢棄稻殼灰為主要原料製備氧化鋅結晶釉可大幅減少釉用原料成本。

## 壹、研究動機

在高中時參加了陶藝社團，在社團課程中我們學習到陶瓷釉藥相關的知識，得知結晶釉的釉面玻璃質主要成分為二氧化矽，而結晶的主要原料為氧化鋅。在日常生活當中，我們發現瓷器上方經常會覆蓋一層帶有玻璃質感的美麗色彩，有些瓷器上是樸素的單色，卻不失高雅的姿態；有些則是開滿了朵朵的結晶花，擁有另一種風格的美。這些特殊的結晶釉使我們驚訝不已，有的瓷器上結晶很大，有的則相當微小，我們對此有些許疑惑，為什麼其大小會有所不同呢？結晶數量的多寡又與什麼有相關聯？



圖 1 釉面美麗的結晶花



圖 2 稻殼筷(資料來源：三立新聞)

近年來較重視環保的商家開始將傳統的免洗筷改成利用稻殼製成的稻殼免洗筷，但稻殼免洗筷價格比市售免洗筷貴了 2.5 倍且經過使用後仍然需要進行丟棄至焚化爐燃燒處理。文獻探討中我們發現也發現稻殼灰中有高達 80% 以上的二氧化矽，因此我們利用這些經過燃燒後的稻殼灰製備成氧化鋅結晶釉，如此一來便能夠使廢

棄粗糠擁有二次利用的機會。

稻殼過去的主要用途多做為燃料，因稻殼本身含水量低，燃燒後產生的腐蝕性氣體非常少，其量大便宜且取得方便，過去是磚瓦廠常用的燃料，但現今一般碾米廠或農會多採露天燃燒或傾倒在空地的方式將粗糠處理掉，如此一來則容易造成環境的污染。根據統計，台灣每年的稻殼廢棄物約有 260,000 公噸，若能將稻殼灰取代陶瓷釉藥中的二氧化矽，將能使「粗糠」資源化，可減少其處理費用及隨意棄置所造成的環境污染，更能大量節省國家其他天然資源的消耗。於是我們決定進行相關文獻探討與實驗，探討鋅結晶釉的形成原理及燒製技巧，並



實驗使用「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽，使廢棄的粗糠也能成為藝術或生活用陶瓷及建築中磁磚的釉的主要成分。「稻殼」燃燒成「稻殼灰」的能量擷取不在本研究範圍，本研究主要研究燃燒後已產生能量的「稻殼灰」的再利用價值。

圖 3 稻殼灰富含二氧化矽

## 貳、研究目的

- 一、找出「鋅結晶」釉結晶的原理及釉藥中各式原料配比中最適合結晶生成的重量百分比、氧化氣氛燒製與還原氣氛燒製對鋅結晶釉的影響、並找出「鋅結晶釉」釉的正確昇溫曲線。
- 二、找出使用「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽之比例，試著燒製「粗糠鋅結晶釉」。
- 三、找出「粗糠鋅結晶釉」釉中矽酸鋅濃度的影響。
- 四、試著用金屬氧化物「粗糠鋅結晶釉」呈現不同的藝術色彩及製成建築用磁磚。

## 參、研究設備器材及原料

此研究使用文獻探討級學校的釉藥實驗室之原料及電窯進行研究。首先由網路資料及文獻書籍中找出結晶釉的種類及燒製方式，然後進行連串實驗找出最適合鋅結晶釉的升溫曲線、原料配比濃度，再利用將廢棄稻殼以計算及實驗取代用中原料。最後再使用不同的金屬氧化物呈現不同色彩，實現粗糠鋅結晶釉的藝術表現及應用於生活建築磁磚上。本研究主要使用之研究設備及器材如下表1。

表 1 主要研究設備器材

名稱	果汁機	噴槍	白鐵篩網	電子秤
圖片				
附註	釉藥原料粉碎用	噴塗釉藥用	#200 號篩網	測量原料重量 (0.1g~6kg)
名稱	白金高溫測溫棒	研磨鉢	實驗用電窯	水洗式噴釉台
圖片				
附註	測量釉藥燒結溫度	實驗釉藥研磨用	試片素燒及釉燒 (可八段控溫)	用於上釉

陶瓷釉的主要成分是二氧化矽，主要源自於天然礦石，例如石英、矽石岩、瑪瑙但由於純粹的石英熔點為 $1650^{\circ}\text{C}$ ，配在釉中可藉著長石、碳酸鋇、氧化鋅、碳酸鎂等媒熔原料的共熔作用而降低熔融溫度。

氧化鋅在釉中是種強而有效的助熔劑。除了能增加釉面光澤，還能改良發色團的作用。然而和氧化鈣一樣，用量太多時，將使釉太黏稠，而且也升高成熟溫度。氧化鋅本身在 $1800^{\circ}\text{C}$ 昇華，雖然是個很有效的助熔劑，但在 $1110^{\circ}\text{C}$ 以下卻無法發揮功效，所以可以說是種高溫的助熔劑。含氧化鋅的釉和含氧化鈣一樣，可以降低釉的膨脹係數，不過其效力不及氧化鈣。本研究主要使用之研究的原料如下表 2。

表 2 主要研究設備器材

名稱	稻殼	氧化鋅	石英	二氧化鈦
圖片				
附註	用於製作稻殼灰	使用鋅使得結晶	天然礦石	釉用原料

名稱	氧化錳	紅氧化鐵	碳酸銅	氧化鈷
圖片				
附註	釉藥顏色呈現用	釉藥顏色呈現用	釉藥顏色呈現用	釉藥顏色呈現用

石英的主要成分為二氧化矽，而氧化矽亦為製作玻璃及釉藥的主要材料。除此之外，氧化矽在釉藥的配置中和借助媒溶原料—氧化鋅，產生共溶作用，因而降低熔融溫度。二氧化鈦在此實驗中作為促進著色劑，能讓釉藥產生特殊的效果，並促進結晶釉析晶。

氧化錳作為褐色著色劑，除此之外，它也具有助熔劑的特性，可降低釉藥的熔融溫度以及增加流動性。紅氧化鐵質地較密且顆粒較細的特性，因此在釉藥中較可完全溶解。此外，紅氧化鐵作為著色劑使用可形成赤紅、黃綠、褐等顏色。碳酸銅在此實驗中作為著色劑使用，形成顏色為綠及青綠。氧化鈷發色穩定的特性，在實驗中只需加入少許的量(0.3%~1%)就可呈色明顯，形成青、藍紫、深藍等顏色。

## 肆、研究過程及方法

本研究經過相關文獻探討與實驗，探討鋅結晶釉的形成原理及燒製的相關技巧，研究燒製方法及升降溫曲線，並且在實驗中使用「廢棄稻殼灰」經計算及實驗調整取代釉中二氧化矽，使廢棄的粗糠也能成為藝術或生活用陶瓷及建築中磁磚的釉的主要成分，依照台灣的建築法規磁磚的規範進行磁磚釉面硬度及耐酸鹼測試，研究過程如下圖 3，研究方法如下所述。

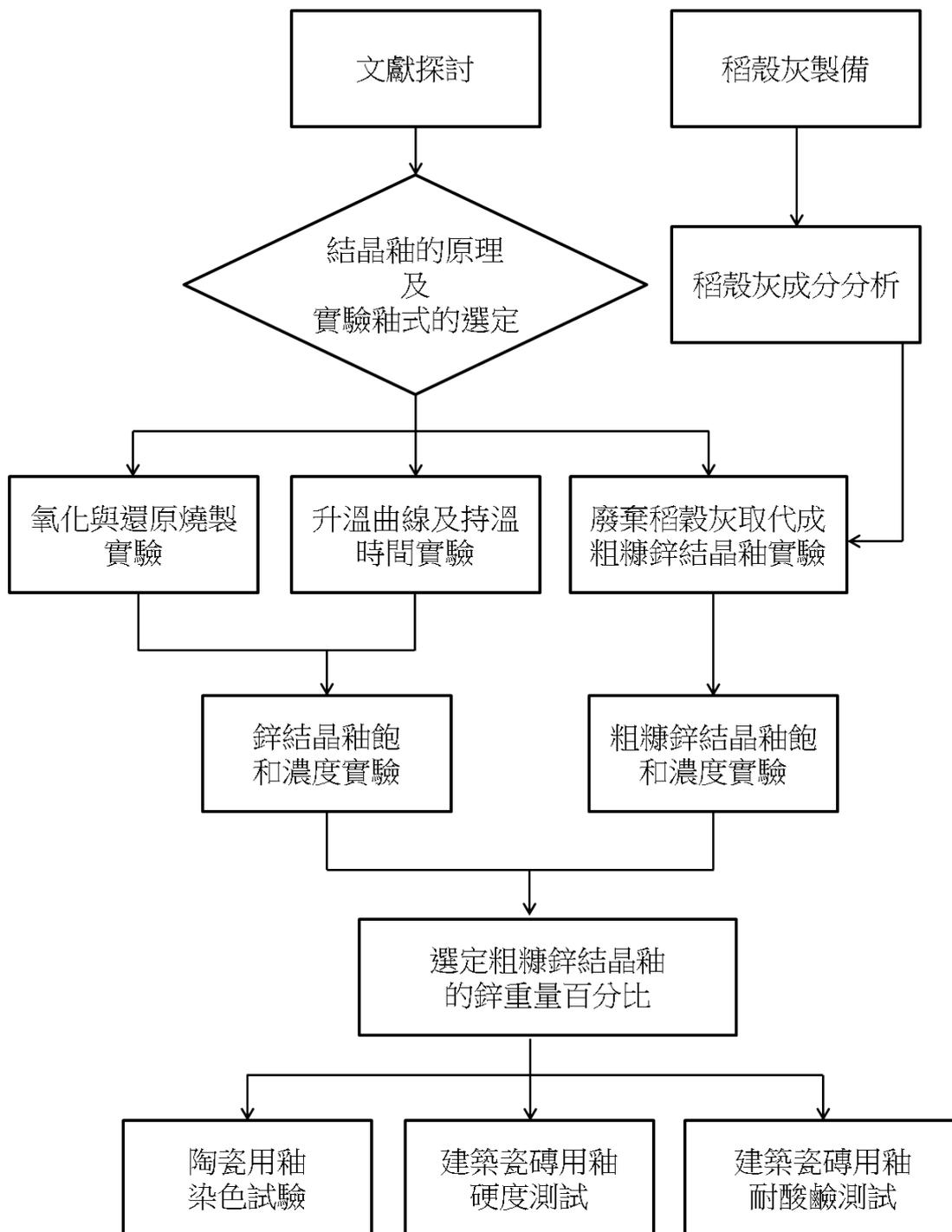


圖 4 研究過程及方法流程圖

## 一、粗糠

臺灣人的主食是稻米，「粗糠」是碾米後剩餘的稻殼，所生產的量相當可觀，稻殼約佔穀粒中重量 20%，早期都將之視為廢料，或拿粗糠混入飼料餵養雞鴨，殘餘價值不高。經過實地訪查農民，現在雞鴨養殖業注重營養，粗糠已經不混入飼料，只能作為墊在雞鴨舍的地板上，方便雞鴨的排泄物便於清理使用。目前稻殼再利用在臺灣較為值得一提的是它可利用高壓及黏劑製成可降解餐具—免洗筷，但成本高。



圖 5 廢棄的稻殼

稻殼是種廉價的燃料，燃燒每公斤可產生 3600 卡的能量，使用稻殼取代燃料油，就可以省下一筆可觀的燃料費。稻殼燃燒後成為「稻殼灰」後，我們利用臺灣工藝發展研究中心的成分分析，發現成分中有高達 83.49% 為  $SiO_2$ ，「稻殼灰」的成分分析如下表。

表 3 「稻殼灰」的成分分析

成分	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$K_2O$	$Na_2O$	$B_2O_3$	燒失量
重量百分比	83.49	3.55	0.18	4.22	1.04	0.21	0.01	2.7	3.36

我們知道陶瓷釉的主要成分  $SiO_2$  (二氧化矽)，於是我們想像稻殼燃燒後的「稻殼灰」可以再利用成為釉藥中的主要成分，於是我們選定以現代具代表性的鋅結晶釉作為研究的方向，並進行一系列的含有「稻殼灰」的釉藥試驗。



圖 6 稻殼為碾米工廠碾壓糙米後的廢棄物

## 二、結晶釉的開始

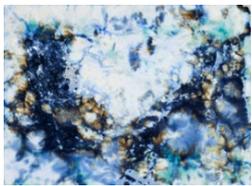
結晶釉的歷史，可追至十世紀的宋朝，宋人首先在釉中運用了很多氧化鐵土礦，使其在燒火冷卻過程中因為「過飽和」而析出晶體，因而有了史上最早的結晶釉，包括像宇宙星塵的「油滴天目」，柔軟似毫毛的「兔毫釉」，沉穩的鐵紅釉，及顏色多變的「茶葉末釉」。

現代的鋅結晶釉，是19世紀法國皇家陶瓷廠(現為法國國立陶瓷博物館)以氧化鋅在釉中的運用。1889年，這種新釉由丹麥哥本哈根陶瓷廠在巴黎發表。隨後，法國皇家陶瓷廠也發表了它的製作工藝，指出結晶釉是一種氧化鋅與矽酸鉀的化合物，在窯中經熔融、冷卻析出晶體。

### 三、鋅結晶釉的藝術表現與著名的結晶釉藝術家

「從藝術性來說，結晶釉不是人工彩繪能達到的，一旦燒製成功，就不必再彩飾、彩燒、亦無鉛毒之害」(來寶藝術品交易中心，2019)。結晶釉的藝術創作需要在攝氏1100度至1280度之間完成，作品非常容易因為釉厚且高溫而流釉沾黏失敗，釉若太薄則結晶無法形成。台灣當代以結晶釉為主要藝術創作的藝術家有孫超(台灣)、彭文雄(台灣)、Owen Mann(美國)、Matt Horne(英國)，我們將其作品風格及成型方式、特色整理如下表4。

表4 以鋅結晶釉為主要藝術創作的藝術家

結晶釉藝術家	孫超	彭文雄	Owen Mann	Matt Horne
藝術家照片				
國籍	台灣	台灣	美國	英國
創作類型	瓷板畫結晶釉	結晶釉瓶	立體雕塑結晶釉	金工結合結晶釉
作品照片				
備註	2018 國家工藝成就獎	2014中國陶瓷 十大藝術家	2020美國紐約 陶藝雕塑家	2020英國金工 陶藝家

#### 四、以科學實驗的方式燒製鋅結晶釉

結晶釉的藝術表現在於高溫釉中過飽和的氧化鋅與矽酸結合，就會結晶出來，加上在攝氏1120度恆溫1至6個小時使得結晶體成長，溫度經過自然的降溫，便可能產生美麗花紋的結晶，在常溫下我們也能觀賞到高溫下的科學藝術創作。但結晶釉形成的溫層極窄，升溫及降溫需精準地控制，釉藥配比的選定，持溫的時間都會影響釉藥結晶表現，所以我們選定了數個實驗，實驗結果可供將來我們做陶瓷釉藥藝術創作或製成建築磁磚用釉的參考。

##### (一)實驗一：實驗釉式的選定

本實驗採用Brian Taylor在2018年出版的《*Glaze : The Ultimate Collection of Ceramic Glaze*》一書中，提出了鋅結晶釉的實驗式及配方，再以臺灣可購買的礦石原料調配，輔以三角座標試驗法，找出三種的矽酸鋅結晶釉式，試驗方法如下：

##### 1. 「釉方三角座標試驗法」(范振金，2001)

三角座標試驗法是畫出一個名為「三角座標試驗表」的正三角形，在其內平行每一底邊繪製九條平行線，含三頂點共產生66個交點，每一個交點都代表釉方三原料：玻璃質、助熔劑與、粘稠劑的比例，依各交點釉方比例調配釉藥並測試燒製的試釉方法。

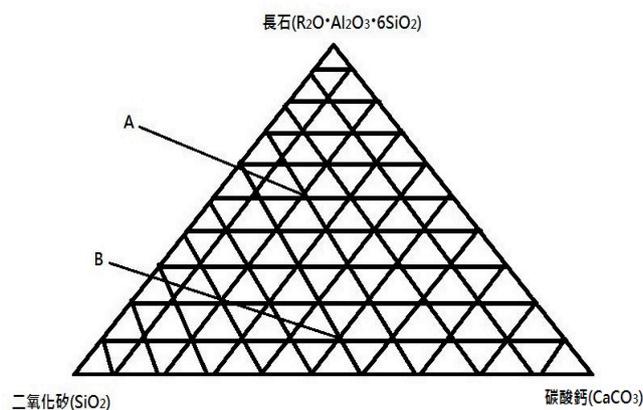


圖7 釉方三角座標試驗法

本研究採點發散式釉方三角座標試驗法及兩階段式釉方三角座標試驗法，輔以大間距三角座標試驗法(李堅萍，2004)，實驗鋅結晶釉的最佳釉式配比(重量百分比)如下表5，為了方便辨識，我們在釉式N138添加1%氧化鈷，釉式N139添加3%氧化鐵，釉式N153添加6%碳酸銅。

表5 鋅結晶釉的最佳釉式配比實驗(重量百分比)

原料	$SiO_2$	$P_2O_3$	$Al_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	氧化鋅	石英	高嶺土	$TiO_2$
N138	35.95	1.34	1.91	7.88	1.18	3.24	25.8	18.6	3.1	3.1
N139	33.85	1.20	1.79	7.42	1.12	3.05	24.3	17.5	1.00	8.7
N153	35.60	1.33	1.89	7.80	1.17	3.21	25.50	18.40	1.00	4.10

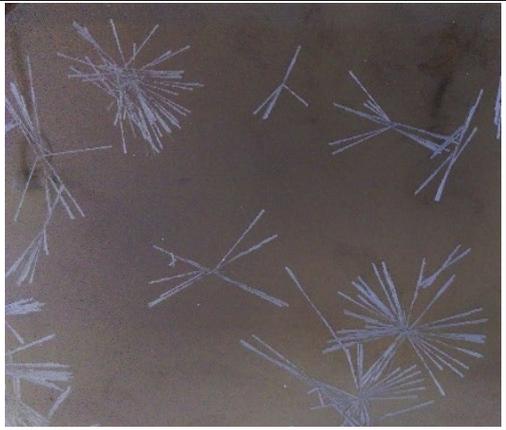
## 2. 氧化與還原氣氛對結晶釉影響試驗

陶瓷成型之後的燒製的方法，可分為氧化燒與還原燒兩種。氧化燒指的是在陶瓷燒製過程中，給足夠的氧氣助燃；還原燒則是在陶瓷燒製過程，大量給予燃氣，燃氣過量，其燒成的特性如下：

- 一、氧化燒：陶瓷燒製過程中給予大量氧氣助燃，而過多的氧氣，會與陶土、瓷土裡面大量的金屬物質形成氧化作用，產生氧化鋁、氧化鐵、氧化鎂等。其中氧化鐵，也就是俗稱的鐵鏽，會讓陶瓷表面顏色形成象牙白的顏色。
- 二、還原燒：陶瓷燒製過程中給予過量的燃氣，燃燒需要氧氣，在氧氣不足的情況下，會將陶土、瓷土中的氧氣釋放提供過量燃氣燃燒用。還原燒時，會將陶土、瓷土中的金屬物質改變成二價鐵（氧化亞鐵）及三價鐵，因此質地堅硬，顏色雪白，燒製成本較氧化燒高出許多。

氧化與還原氣氛對結晶釉影響試驗燒火試驗中，我們選用釉式編號N138以氧化及還原氣氛燒製，實驗結果得知，還原燒製後鋅結晶根本未生成，推論是還原焰中的火，會干擾氧化鋅結晶的生成；鋅結晶釉的氧化氣氛燒製狀態穩定，釉面有許多結晶體生成。實驗結果圖片及釉面性狀分析如下表6。

表6 氧化與還原氣氛燒火試驗結果

燒製氣氛	氧化燒	還原燒
燒製結果圖片		
性狀分析	釉面有許多結晶體生成	釉面無任何結晶體生成

## (二)實驗二：鋅結晶釉的升溫曲線

經過反覆試驗，本研究由常溫加熱，以 $150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率緩慢升溫到 $400^{\circ}\text{C}$ ，然後以 $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升溫到 $900^{\circ}\text{C}$ ，保溫30min，再以 $175^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升溫到 $1240^{\circ}\text{C}$ ，再降溫到 $1120^{\circ}\text{C}$ 持溫1~7h，自然冷卻到室溫。此昇溫曲線結晶釉晶花之花形均勻，具光澤度，釉面平滑溫潤，持溫時間長短是否會影響結晶核數量及結晶半徑，由實驗三試驗。

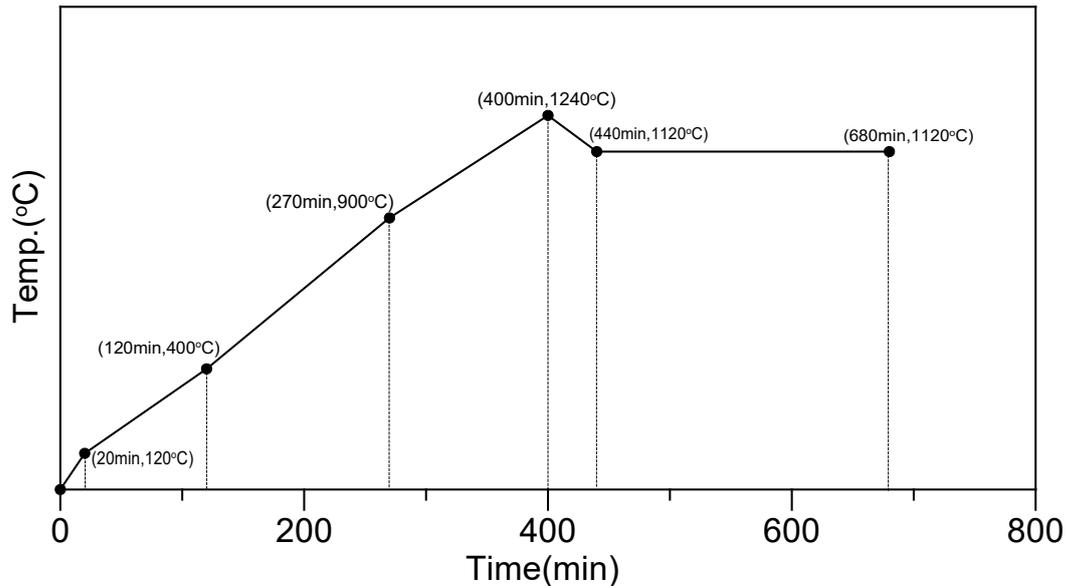


圖8 本研究升溫曲線

## (三)實驗三：鋅結晶釉的最佳釉式持溫長短與結晶核數量、結晶花半徑的實驗

結晶核數量及結晶粒徑影響釉面美觀及其藝術性，本研究結晶核數量計算方式及最大結晶粒徑(半徑)的量測如下圖9所示。

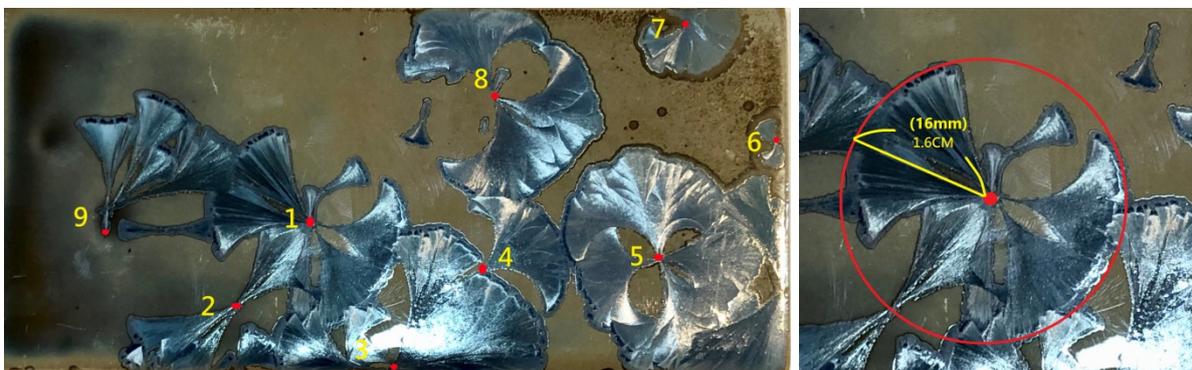


圖9 本研究結晶核數量計算方式及最大結晶粒徑的量測方式

本研究三種釉式，分別在成核期(經文獻探討，本實驗設定於 1120°C)，持溫 1、2、3、4、5、6、7 小時，在 100cm<sup>2</sup> 的瓷板上各燒製 10 次(編號 A~J)所得的最大結晶粒徑平均值、結晶核數量平均值及標準差結果如下表 7、表 8 所示。

表 7 結晶核數量量測結果

釉式	編號	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	結晶核數量平均	標準差
N138	1hrs	8	7	7	8	8	8	8	9	8	9	8.00	0.632
N138	2hrs	11	11	12	13	14	13	15	13	11	14	12.70	1.345
N138	3hrs	8	9	8	9	9	11	11	9	10	10	9.40	1.020
N138	4hrs	18	23	25	22	22	19	19	23	22	22	21.50	2.062
N138	5hrs	17	18	16	17	17	18	17	19	18	17	17.40	0.800
N138	6hrs	18	19	19	21	20	19	19	20	20	19	19.40	0.800
N138	7hrs	19	20	20	21	19	23	20	19	22	21	20.40	1.281
N139	1hrs	5	5	6	8	6	7	7	6	6	6	6.20	0.872
N139	2hrs	11	11	13	12	13	14	15	12	13	12	12.60	1.200
N139	3hrs	14	14	15	16	15	14	16	13	15	15	14.70	0.900
N139	4hrs	17	18	16	17	17	17	18	15	18	16	16.90	0.943
N139	5hrs	17	18	18	18	16	17	17	17	18	18	17.40	0.663
N139	6hrs	14	14	15	16	20	21	16	14	15	19	16.40	2.498
N139	7hrs	22	20	19	20	21	22	19	20	20	20	20.30	1.005
N153	1hrs	11	12	11	12	13	11	12	11	12	12	11.70	0.640
N153	2hrs	11	13	12	12	14	13	15	15	16	13	13.40	1.497
N153	3hrs	15	16	15	17	16	16	17	17	16	17	16.20	0.748
N153	4hrs	30	31	32	30	32	33	32	33	31	32	31.60	1.020
N153	5hrs	33	33	32	34	33	33	32	34	34	35	33.30	0.900
N153	6hrs	36	35	32	35	36	34	36	35	36	36	35.10	1.221
N153	7hrs	39	38	37	38	39	40	38	38	37	38	38.20	0.872

表 8 結晶粒徑量測結果

釉式	編號	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	最大結晶 粒徑平均 (mm)	標準差
N138	1hrs	5	4	3	6	5	4	5	4	7	6	4.9	1.14
N138	2hrs	11	10	12	11	11	10	1	8	10	8	10.4	1.50
N138	3hrs	12	13	14	13	12	14	15	11	13	14	13.1	1.14
N138	4hrs	21	19	17	19	18	19	21	18	19	20	19.1	1.22
N138	5hrs	23	24	24	22	21	25	23	22	24	25	23.3	1.27
N138	6hrs	31	40	39	38	40	41	38	38	37	39	38.1	2.62
N138	7hrs	42	45	43	42	37	41	48	40	41	43	42.2	2.79
N139	1hrs	14	15	14	17	13	14	15	14	14	16	14.6	1.11
N139	2hrs	18	17	16	19	15	19	19	17	18	17	17.5	1.28
N139	3hrs	18	19	19	19	21	17	2.0	18	17	16	18.3	1.49
N139	4hrs	30	31	34	33	32	30	3.3	28	31	30	31.2	1.72
N139	5hrs	35	34	32	31	31	30	3.1	33	34	33	32.4	1.56
N139	6hrs	38	43	42	41	38	42	3.9	38	40	42	40.3	1.85
N139	7hrs	39	39	43	43	42	44	4.4	41	45	44	42.4	2.01
N153	1hrs	3	6	4	3	4	5	3	5	6	4	4.3	1.10
N153	2hrs	12	8	11	10	12	10	9	9	11	12	10.4	1.36
N153	3hrs	23	20	21	23	23	19	22	19	17	18	20.5	2.11
N153	4hrs	24	21	22	22	24	20	21	22	18	19	21.3	1.85
N153	5hrs	26	28	32	24	29	27	30	31	26	25	2.77	2.62
N153	6hrs	29	25	30	31	30	34	29	33	35	28	30.4	2.84
N153	7hrs	35	24	27	26	22	25	22	22	21	19	24.3	4.24

結晶核數量於持溫 6~7 小時的狀態下，標準差皆較大，我們推測與結晶重疊造成釉面不易辨別所致，如圖 10，許多結晶重疊造成結晶數量我們使用肉眼不易判別。



圖 10 結晶重疊造成釉面不易辨別

表9 釉式持溫長短與結晶核數量、結晶花粒徑的實驗結果圖

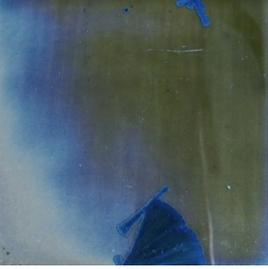
持溫	1 小時(釉 N138)	2 小時(釉 N138)	3 小時(釉 N138)	4 小時(釉 N138)
燒成結果				
平均結晶核數量	8	13	9	22
最大結晶粒徑平均	5 mm	10 mm	13 mm	1.9 mm
持溫	5 小時(釉 N138)	6 小時(釉 N138)	7 小時(釉 N138)	1 小時(釉 N139)
燒成結果				
平均結晶核數量	17	19	20	6
最大結晶粒徑平均	23 mm	38 mm	42 mm	15 mm
持溫	2 小時(釉 N139)	3 小時(釉 N139)	4 小時(釉 N139)	5 小時(釉 N139)
燒成結果				
平均結晶核數量	13	15	17	17
最大結晶粒徑平均	18 mm	18 mm	31 mm	32 mm

表9 釉式持溫長短與結晶核數量、結晶花粒徑的實驗結果圖(續)

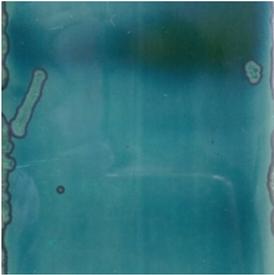
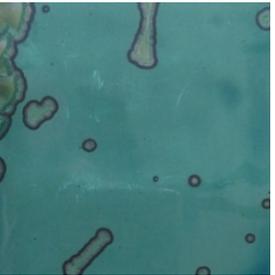
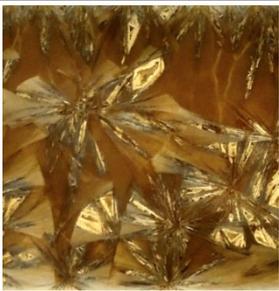
持溫	6 小時(釉 N139)	7 小時(釉 N139)	1 小時(釉 N153)	2 小時(釉 N153)
燒成結果				
平均結晶核數量	16	20	12	14
最大結晶粒徑平均	40 mm	42 mm	4 mm	10 mm
持溫	3 小時(釉 N153)	4 小時(釉 N153)	5 小時(釉 N153)	6 小時(釉 N153)
燒成結果				
平均結晶核數量	16	32	33	35
最大結晶粒徑平均	21 mm	21 mm	28mm	30 mm
持溫	7 小時(釉 N153)	1 小時(粗糠鋅結晶釉)	2 小時(粗糠鋅結晶釉)	3 小時(粗糠鋅結晶釉)
燒成結果				
平均結晶核數量	38	64	39	50
最大結晶粒徑平均	24 mm	15 mm	20 mm	16 mm

表9 釉式持溫長短與結晶核數量、結晶花粒徑的實驗結果圖(續)

持溫	4 小時(粗糠鋅結晶釉)	5 小時(粗糠鋅結晶釉)	6 小時(粗糠鋅結晶釉)	7 小時(粗糠鋅結晶釉)
燒成結果				
平均結晶核數量	55	60	116	23
最大結晶粒徑平均	22 mm	14 mm	15 mm	42 mm

(四) 使用「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽之比例，燒製「粗糠鋅結晶釉」實驗

我們選用 N138 釉式為基礎做為「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽的目標釉式，將釉式計算取代如下表 10。

表 10 「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽釉式計算表

原料	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	ZnO	石英	高嶺土	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
N138	35.95	1.34	1.91	7.88	1.18	3.24	25.8	18.6	3.1	3.1	0	0
稻殼灰	83.49	2.7	3.55	0.01	0.21	4.22	0	0	0	0	0.18	1.04
稻殼灰 *0.54	45.08	1.46	1.92	0.01	0.11	2.39	0	0	0	0	0.10	0.56
計算 釉式	-9.13	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	18.6	3.1	3.1	-0.1	-0.56
石英調 整釉式	0	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	9.47	3.1	3.1	-0.1	-0.56
原料	稻殼灰	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	ZnO	石英	高嶺土	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
稻殼灰 取代	54.00	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	9.47	3.1	3.1	-0.1	-0.56
調整為 重量百 分比	50.98	1.26	-0.01	7.43	1.01	0.80	24.36	8.94	2.93	2.93	-0.09	-0.53
負值 取0	50.98	1.26	0	7.43	1.01	0.80	24.36	8.94	2.93	2.93	0	0
調整為 重量百 分比	50.66	1.25	0.00	7.38	1.00	0.79	24.21	8.88	2.91	2.91	0.00	0.00

經過整理，製備「粗糠鋅結晶釉」的原料重量百分比如下表 11。

表11 粗糠鋅結晶釉釉式 (重量百分比)

原料	稻殼灰	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	氧化鋅	石英	高嶺土	TiO <sub>2</sub>
粗糠鋅 結晶釉	50.66	1.25	7.38	1.00	0.79	24.21	8.88	2.91	2.91

經本研究升溫曲線後於攝氏 1120 度持溫 4 小時，釉面燒成結果良好，結晶花分布均勻，實驗結果如下圖 11。



圖 11 粗糠鋅結晶釉燒成結果

#### (五) 鋅結晶及粗糠鋅結晶釉的飽和重量百分比實驗

我們研究了以釉式 N138 為基礎，氧化鋅添加由 10%~35%的釉式，在 $100\text{cm}^2$  的瓷板上進行「氧化鋅形成矽酸鋅結晶的飽和重量百分比實驗」及「含粗糠氧化鋅形成矽酸鋅結晶的飽和重量百分比實驗」，在本研究升溫曲線後攝氏 1120 度持溫 2 小時，找出矽酸鋅飽和結晶的重量百分比。各原料重量百分比及釉式編號如下表 12、表 14 所示，燒成結果如表 13、表 15。

表 12 氧化鋅形成矽酸鋅結晶的飽和重量百分比實驗原料釉式重量百分比

原料/釉式編號	N13810	N13815	N13820	N13825	N13830	N13835
氧化矽	41.73	39.59	37.74	36.17	34.84	33.75
氧化硼	1.56	1.48	1.41	1.35	1.30	1.26
氧化鋁	2.22	2.10	2.01	1.92	1.85	1.79
氧化鈉	9.15	8.68	8.27	7.93	7.64	7.40
氧化鉀	1.37	1.30	1.24	1.19	1.14	1.11
氧化鈣	3.76	3.57	3.40	3.26	3.14	3.04
氧化鋅	11.43	15.98	19.89	23.23	26.05	28.37
石英	21.59	20.48	19.53	18.71	18.03	17.46
美國高嶺土	3.60	3.41	3.25	3.12	3.00	2.91
氧化鈦	3.60	3.41	3.25	3.12	3.00	2.91

表13 氧化鋅結晶的飽和重量百分比實驗燒成結果(攝氏1120度持溫2小時在 $100\text{cm}^2$ 的瓷板上)

濃度	11.43%	15.98%	19.89%
燒成結果			
結晶核數量	0	0	2
最大結晶粒徑	0 mm	0 mm	0.5 mm
濃度	23.23%	26.05%	28.37%
燒成結果			
結晶核數量	20	12	35
最大結晶粒徑	3 mm	13 mm	15 mm

表 14 含粗糠之氧化鋅形成矽酸鋅結晶的重量百分比濃度實驗原料釉式(重量百分比)

原料/釉式編號	N14110	N14115	N14120	N14125	N14130	N14135
稻殼灰	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66	50.66
氧化硼	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
氧化鋁	0	0	0	0	0	0
氧化鈉	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38	7.38
氧化鉀	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
氧化鈣	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
氧化鋅	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00
石英	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88
美國高嶺土	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91
氧化鈦	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91

表15 含粗糠之氧化鋅結晶的飽和重量百分比實驗燒成結果(攝氏1120度持溫2小時在 $100\text{cm}^2$ 的瓷板上)

濃度	10%	15%	20%
燒成結果			
結晶核數量	0	0	0
最大結晶粒徑	0 mm	0 mm	0 mm
濃度	25%	30%	35%
燒成結果			
結晶核數量	10	39	35
最大結晶粒徑	3 mm	20 mm	21 mm

#### (六)賽格式及其計算

釉藥原料的種類雖然繁多，然而若將每個釉方中所含的各項原料加以分析其成分，將會發現釉的組成並不如想像中複雜。為了有系統地分析釉方，瞭解其中各項原料與其成熟溫度、表現行為間的關係，必須先有一套釉的計算法，將原料中作用性質相近的，歸於一類。也可使原本複雜、神秘的釉藥配方，以一種較簡單且容易瞭解的面目呈現。在釉藥的分類與計算上，常見的是賽格式(H.A.Seger)的計算法。將原料在釉中的作用大致分為三類：鹼類( $RO$ )、中性類( $R_2O_3$ )和酸類( $RO_2$ )。鹼類在釉中主要是鹼金屬、鹼土金屬氧化物。更廣泛地說，鹼類包含了其他一切具有助熔效果的金屬氧化物。這一類的物質在賽格式中，被列為在最前面一類，其主要的功用是釉的助熔劑。第二類的中性物質類，通常是 $Al_2O_3$ 有時也將 $B_2O_3$ 列入， $Al_2O_3$ 在釉中是控制黏度的物質，高 $Al_2O_3$ 含量可以矯治流釉，但也影響到熔釉中物質的擴散。所以在結晶釉的配方中，這一項通常很低。

放在最後的，也是釉裡最主要的成分  $SiO_2$ 。這一類被稱為酸類，是構成釉的基本物質。所謂釉的酸鹼度，指的即是  $RO / RO_2$  的比例。 $RO$  含量高的稱為鹼性較強的釉。

要把釉藥配方化成賽格式，先要將原料的重量比轉化為各組成成分的莫耳數比，再依上述分類法寫出。最後調整  $RO$  項的總和使其等於 1，依此比例去更動  $R_2O_3$ 、 $RO_2$ ，寫出相對應的量。要注意的是各成分均以氧化物表示，因為像碳酸鈣在加熱過程中將會分解為氧化鈣，所以釉藥中的鈣雖有不同的原料來源，然而在賽格式中表示中，一律是以  $CaO$  來表示。

利用這樣的計算過程，可將眾多的釉方加以歸納整理。而在操作上除了能明確地指出各原料增減時所產生的影響，更有助於解決原料替換上的困難。所以拿到一個釉方的賽格式，即使不知道原作品所用的原料，也可以用手邊現有的原料配出相當的釉方。我們將實驗的四種釉式經下表 16~表 19 計算成賽格式，方便歸納整理。

表 16 釉式 N138 賽格式計算表

N138	初始賽格式計算	賽格式計算															
計算過程	$SiO_2: 35.947 \div 60.1 = 0.6 \text{ mole}$ $B_2O_3: 1.339 \div 69.6 = 0.02 \text{ mole}$ $Al_2O_3: 1.9055 \div 102 = 0.02 \text{ mole}$ $Na_2O: 7.8795 \div 62 = 0.13 \text{ mole}$ $K_2O: 1.1845 \div 94.2 = 0.01 \text{ mole}$ $CaO: 3.2445 \div 56.1 = 0.06 \text{ mole}$ $ZnO: 25.8 \div 81.4 = 0.32 \text{ mole}$ $SiO_2: 18.6 \div 60.1 = 0.31 \text{ mole}$ $Al_2O_3: (1 \div 258.2) \times 1 = 0.0038 \text{ mole}$ $2SiO_2: (1 \div 258.2) \times 2 = 0.0076 \text{ mole}$ $TiO_2: 3.1 \div 79.9 = 0.04 \text{ mole}$	$K_2O = 0.01 \div 0.52 = 0.02$ $CaO = 0.06 \div 0.52 = 0.12$ $Na_2O = 0.13 \div 0.52 = 0.25$ $ZnO = 0.32 \div 0.52 = 0.62$ $Al_2O_3 = 0.02 \div 0.52 = 0.04$ $B_2O_3 = 0.02 \div 0.52 = 0.04$ $SiO_2 = 0.92 \div 0.52 = 1.77$ $TiO_2 = 0.04 \div 0.52 = 0.08$															
	初始賽格式	賽格式															
	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><math>RO / R_2O</math></th> <th style="text-align: center;"><math>R_2O_3</math></th> <th style="text-align: center;"><math>RO_2</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} K_2O &amp; 0.01 \\ CaO &amp; 0.06 \\ Na_2O &amp; 0.13 \\ ZnO &amp; 0.32 \end{bmatrix}</math> </td> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} Al_2O_3 &amp; 0.02 \\ Al_2O_3 &amp; 0.0038 \\ B_2O_3 &amp; 0.02 \end{bmatrix}</math> </td> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} SiO_2 &amp; 0.59 \\ SiO_2 &amp; 0.31 \\ SiO_2 &amp; 0.01 \\ TiO_2 &amp; 0.05 \end{bmatrix}</math> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0.52</td> <td style="text-align: center;">0.04</td> <td style="text-align: center;">0.96</td> </tr> </tbody> </table>	$RO / R_2O$	$R_2O_3$	$RO_2$	$\begin{bmatrix} K_2O & 0.01 \\ CaO & 0.06 \\ Na_2O & 0.13 \\ ZnO & 0.32 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ Al_2O_3 & 0.0038 \\ B_2O_3 & 0.02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} SiO_2 & 0.59 \\ SiO_2 & 0.31 \\ SiO_2 & 0.01 \\ TiO_2 & 0.05 \end{bmatrix}$	0.52	0.04	0.96	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><math>RO / R_2O</math></th> <th style="text-align: center;"><math>R_2O_3</math></th> <th style="text-align: center;"><math>RO_2</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} K_2O &amp; 0.02 \\ CaO &amp; 0.12 \\ Na_2O &amp; 0.25 \\ ZnO &amp; 0.62 \end{bmatrix}</math> </td> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} Al_2O_3 &amp; 0.04 \\ B_2O_3 &amp; 0.04 \end{bmatrix}</math> </td> <td style="text-align: center;"> <math>\begin{bmatrix} SiO_2 &amp; 1.77 \\ TiO_2 &amp; 0.08 \end{bmatrix}</math> </td> </tr> </tbody> </table>	$RO / R_2O$	$R_2O_3$	$RO_2$	$\begin{bmatrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.12 \\ Na_2O & 0.25 \\ ZnO & 0.62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.04 \\ B_2O_3 & 0.04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} SiO_2 & 1.77 \\ TiO_2 & 0.08 \end{bmatrix}$
$RO / R_2O$	$R_2O_3$	$RO_2$															
$\begin{bmatrix} K_2O & 0.01 \\ CaO & 0.06 \\ Na_2O & 0.13 \\ ZnO & 0.32 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ Al_2O_3 & 0.0038 \\ B_2O_3 & 0.02 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} SiO_2 & 0.59 \\ SiO_2 & 0.31 \\ SiO_2 & 0.01 \\ TiO_2 & 0.05 \end{bmatrix}$															
0.52	0.04	0.96															
$RO / R_2O$	$R_2O_3$	$RO_2$															
$\begin{bmatrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.12 \\ Na_2O & 0.25 \\ ZnO & 0.62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.04 \\ B_2O_3 & 0.04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} SiO_2 & 1.77 \\ TiO_2 & 0.08 \end{bmatrix}$															

表 17 釉式 N139 賽格式計算表

N139	初始賽格式計算	賽格式計算
計算過程	$SiO_2: 33.853 \div 60.1 = 0.56 \text{ mole}$ $B_2O_3: 1.201 \div 69.6 = 0.02 \text{ mole}$ $Al_2O_3: 1.7945 \div 102 = 0.02 \text{ mole}$ $Na_2O: 7.4205 \div 62 = 0.12 \text{ mole}$ $K_2O: 1.1155 \div 94.2 = 0.01 \text{ mole}$ $CaO: 3.0555 \div 56.1 = 0.05 \text{ mole}$ $ZnO: 24.3 \div 81.4 = 0.3 \text{ mole}$ $SiO_2: 17.5 \div 60.1 = 0.29 \text{ mole}$ $Al_2O_3: (1 \div 258.2) \times 1 = 0.0038 \text{ mole}$ $2SiO_2: (1 \div 258.2) \times 2 = 0.0076 \text{ mole}$ $TiO_2: 8.7 \div 79.9 = 0.11 \text{ mole}$	$K_2O = 0.01 \div 0.48 = 0.02$ $CaO = 0.05 \div 0.48 = 0.1$ $Na_2O = 0.12 \div 0.48 = 0.25$ $ZnO = 0.3 \div 0.48 = 0.63$ $Al_2O_3 = 0.02 \div 0.48 = 0.04$ $B_2O_3 = 0.02 \div 0.48 = 0.04$ $SiO_2 = 0.86 \div 0.48 = 1.79$ $TiO_2 = 0.11 \div 0.48 = 0.23$
初始賽格式		賽格式
$RO / R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\left[ \begin{matrix} K_2O & 0.01 \\ CaO & 0.05 \\ Na_2O & 0.12 \\ ZnO & 0.30 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ Al_2O_3 & 0.0038 \\ B_2O_3 & 0.02 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} SiO_2 & 0.59 \\ SiO_2 & 0.29 \\ SiO_2 & 0.0076 \\ TiO_2 & 0.11 \end{matrix} \right]$ 0.48                  0.04                  0.97	$RO / R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\left[ \begin{matrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.10 \\ Na_2O & 0.25 \\ ZnO & 0.63 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} Al_2O_3 & 0.04 \\ B_2O_3 & 0.04 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} SiO_2 & 1.79 \\ TiO_2 & 0.23 \end{matrix} \right]$	

表 18 釉式 N153 賽格式計算表

N153	初始賽格式計算	賽格式計算
計算過程	$SiO_2: 35.598 \div 60.1 = 0.59 \text{ mole}$ $B_2O_3: 1.326 \div 69.6 = 0.02 \text{ mole}$ $Al_2O_3: 1.887 \div 102 = 0.02 \text{ mole}$ $Na_2O: 7.803 \div 62 = 0.13 \text{ mole}$ $K_2O: 1.173 \div 94.2 = 0.01 \text{ mole}$ $CaO: 3.213 \div 56.1 = 0.06 \text{ mole}$ $ZnO: 25.5 \div 81.4 = 0.31 \text{ mole}$ $SiO_2: 18.4 \div 60.1 = 0.31 \text{ mole}$ $Al_2O_3: (1 \div 258.2) \times 1 = 0.0038 \text{ mole}$ $2SiO_2: (1 \div 258.2) \times 2 = 0.0076 \text{ mole}$ $TiO_2: 4.1 \div 79.9 = 0.05 \text{ mole}$	$K_2O = 0.01 \div 0.51 = 0.02$ $CaO = 0.06 \div 0.51 = 0.12$ $Na_2O = 0.13 \div 0.51 = 0.26$ $ZnO = 0.31 \div 0.51 = 0.62$ $Al_2O_3 = 0.02 \div 0.51 = 0.04$ $B_2O_3 = 0.02 \div 0.51 = 0.04$ $SiO_2 = 0.92 \div 0.51 = 1.80$ $TiO_2 = 0.05 \div 0.51 = 0.1$
初始賽格式		賽格式
$RO / R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\left[ \begin{matrix} K_2O & 0.01 \\ CaO & 0.06 \\ Na_2O & 0.13 \\ ZnO & 0.31 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ Al_2O_3 & 0.0038 \\ B_2O_3 & 0.02 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} SiO_2 & 0.59 \\ SiO_2 & 0.31 \\ SiO_2 & 0.01 \\ TiO_2 & 0.05 \end{matrix} \right]$ 0.51                  0.04                  0.96	$RO / R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\left[ \begin{matrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.12 \\ Na_2O & 0.26 \\ ZnO & 0.62 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} Al_2O_3 & 0.04 \\ B_2O_3 & 0.04 \end{matrix} \right]$ $\left[ \begin{matrix} SiO_2 & 1.80 \\ TiO_2 & 0.1 \end{matrix} \right]$	

表 19 粗糠鋅結晶釉賽格式計算表

粗糠鋅結晶釉	初始賽格式計算	賽格式計算
計算過程	$SiO_2: 50.66 \div 60.1 = 0.84 \text{ mole}$ $B_2O_3: 1.25 \div 69.6 = 0.02 \text{ mole}$ $Na_2O: 7.38 \div 62 = 0.12 \text{ mole}$ $K_2O: 1.00 \div 94.2 = 0.01 \text{ mole}$ $CaO: 0.79 \div 56.1 = 0.01 \text{ mole}$ $ZnO: 24.21 \div 81.4 = 0.30 \text{ mole}$ $SiO_2: 8.88 \div 60.1 = 0.15 \text{ mole}$ $Al_2O_3: (2.91 \div 258.2) \times 1 = 0.01 \text{ mole}$ $2SiO_2: (2.91 \div 258.2) \times 2 = 0.02 \text{ mole}$ $TiO_2: 2.91 \div 79.9 = 0.04 \text{ mole}$	$K_2O = 0.01 \div 0.42 = 0.02$ $CaO = 0.01 \div 0.42 = 0.02$ $Na_2O = 0.12 \div 0.42 = 0.29$ $ZnO = 0.3 \div 0.42 = 0.71$ $Al_2O_3 = 0.01 \div 0.42 = 0.02$ $B_2O_3 = 0.02 \div 0.42 = 0.05$ $SiO_2 = 1.01 \div 0.42 = 2.40$ $TiO_2 = 0.04 \div 0.42 = 0.10$
	初始賽格式	賽格式
	$RO/R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\begin{bmatrix} K_2O & 0.01 \\ CaO & 0.01 \\ Na_2O & 0.12 \\ ZnO & 0.30 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.01 \\ B_2O_3 & 0.02 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SiO_2 & 0.84 \\ SiO_2 & 0.15 \\ SiO_2 & 0.02 \\ TiO_2 & 0.04 \end{bmatrix}$ 0.42                  0.03                  1.05	$RO/R_2O$ $R_2O_3$ $RO_2$ $\begin{bmatrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.02 \\ Na_2O & 0.29 \\ ZnO & 0.71 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ B_2O_3 & 0.05 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SiO_2 & 2.40 \\ TiO_2 & 0.10 \end{bmatrix}$

(七) 粗糠鋅結晶釉磁磚釉面測試

磁磚好壞的分別和優劣有一定的規範，如台灣 CNS、日本 JIS 等規範，本研究進行磁磚釉表面硬度和酸鹼值測試。台灣 CNS 磁磚品質規定如表 20。硬度及耐酸鹼測試如下：

表 20 CNS 磁磚品質規定

種類/項目	陶質磁磚	石質磁磚	瓷質磁磚
耐酸鹼性要求	10%酸鹼溶液，靜置 24 小時以上，釉面無污染變色		
莫式硬度要求	施釉磚：3~3.9 無釉射出磚：6~8	3.5~5.5	5~6

1. 硬度測試

本研究選用含粗糠鋅結晶釉磁磚釉面進行硬度測試，在一未知硬度的釉面上，選定一個平滑面，用莫式礦物硬度計加以刻劃，如果出現劃痕，則說明硬度小於該等級所對應之礦物。莫氏礦物硬度表及測試結果如下表 21。

表 21 莫氏礦物硬度表及本實驗測試結果

硬度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
礦物	滑石	石膏	方解石	螢石	磷灰石	正長石	石英	黃玉	剛玉	鑽石
試片	氧化鋅結晶磁磚釉面					粗糠鋅結晶釉磁磚釉面				
圖片										
硬度測試結果	5~6 之間					6~7 之間				

根據 CNS 對磁磚品質的規定，瓷質磚塊莫氏硬度需在 5~6 之間，本研究的含粗糠鋅結晶釉磁磚釉硬度值達 6~7，符合瓷質磚塊硬度之標準，故本研究含粗糠鋅結晶釉之建築磁磚用釉在硬度測試方面極為成功。



圖 12 莫氏礦物硬度計

## 2.耐酸鹼測試

將含粗糠鋅結晶釉磁磚其進行耐酸鹼測試，並觀察其結果。依據台灣 CNS、日本 JIS 等規範，以 10% 酸鹼溶液，靜置 24 小時以上，釉面若無污染變色，則待測物耐酸鹼，反之若污染變色，則不耐酸鹼。

針對耐酸鹼性作測試，鹼性溶液為 pH 值 12.7 的強鹼與 pH 值 2.0 強酸 (如下圖 13)。根據資料，我們在 25°C 的環境下，將試片漂白水與鹽酸浸泡 24 小時。

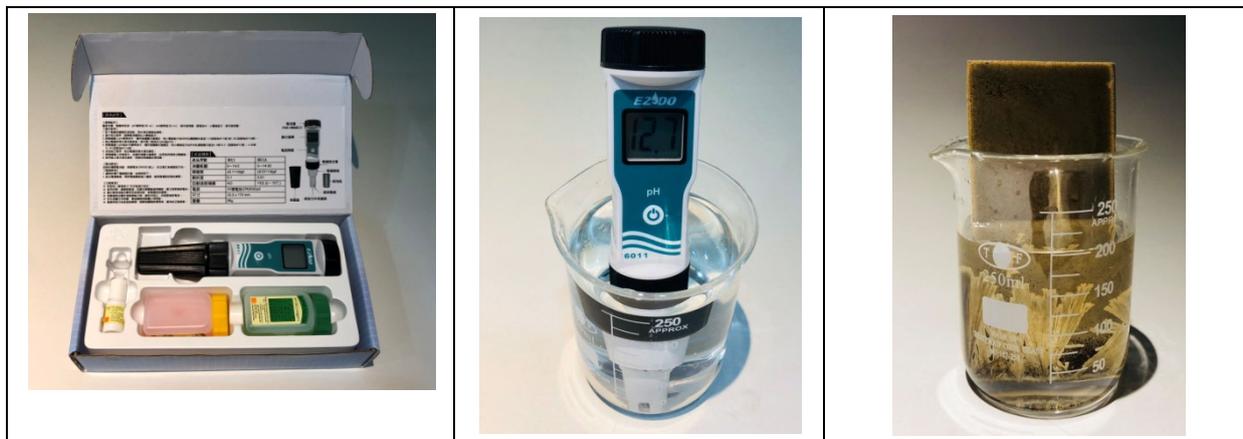


圖 13 耐酸鹼測試圖

將試片取出後，目測觀察其結果，發現皆無明顯污染變色，故可知粗糠鋅結晶釉磁磚釉面之耐鹼程度良好。

(八)粗糠鋅結晶釉陶瓷藝術染色試驗

我們以氧化鋅重量百分比 30%的含粗糠鋅結晶釉做市售高溫色料及金屬氧化物做染色測試，可使得結晶花形成不同的花色及底色，我們將添加高溫色料及金屬氧化物施釉於直徑 21cm，高度為 7.5cm 的瓷碗上，觀察其藝術色彩表現如下表 22。

表 22 粗糠鋅結晶釉陶瓷藝術染色試驗結果

試驗	添加 氧化鈦 0.6%+氧化錳 3.1%+氧化鐵 3.1%	添加 碳酸銅 6.1%
圖片		
描述	結晶花呈現藍色結晶，底色呈現咖啡色如兔毫般流動效果，流釉至碗底釉厚呈現黑色	結晶花呈現綠黃色結晶，底色呈現湖水綠，流釉至碗底釉厚呈深綠色
試驗	添加 氧化鐵 2.1%	添加 市售紅色高溫色料 10%
圖片		
描述	結晶花呈現綠白色不透明結晶，底色呈現黃色，流釉至碗底釉厚呈深咖啡色	釉面視覺上幾乎無結晶花生成，底色黃紅色

## 伍、研究結果

(一)成核期持溫時數與結晶核數量及最大粒徑(mm)的關係表如下表 23：

表 23 成核期持溫時數與結晶核數量及最大平均粒徑(mm)的關係表

持溫 小時	釉式 N138 結晶核 數量	釉式 N139 結晶核 數量	釉式 N153 結晶核 數量	粗糠鋅釉 結晶核 數量	釉式 N138 最大結晶 粒徑(mm)	釉式 N139 最大結晶 粒徑(mm)	釉式 N153 最大結晶 粒徑(mm)	粗糠鋅釉 最大結晶 粒徑(mm)
1	8	6	12	64	5	15	4	15
2	13	13	14	39	10	18	10	20
3	9	15	16	50	13	18	21	16
4	22	17	32	55	19	31	21	22
5	17	17	33	60	23	32	28	14
6	19	16	35	116	38	40	30	15
7	20	20	38	23	42	42	24	42

在最大結晶粒徑與持溫數關係的數據中，釉式 N153 的最大結晶粒徑在持溫七小時的情況，不符合窯燒時間越久最大結晶粒徑越長的現象，推論其原因是相較於 N138 與 N139 的結晶狀況，N153 結晶的數量是非常可觀的，在持溫五小時、六小時以及七小時的試片，表面上已經布滿了許多結晶，它們層疊在一起，而且有些更是大到無法完整在僅限的試片上顯現出來，眾多因素也就造成無法準確測量實際的最大結晶粒徑，但我們推論，事實上最大結晶粒徑與持溫時數確實是呈現正面增加的。粗糠鋅結晶釉根據實驗結果最大結晶粒徑與持溫時數雖在持溫五小時及六小時有下降，推估與結晶和重疊有關，整體而言最大結晶粒徑，是呈現窯燒成核期持溫時間越久，則最大結晶則粒徑越長。

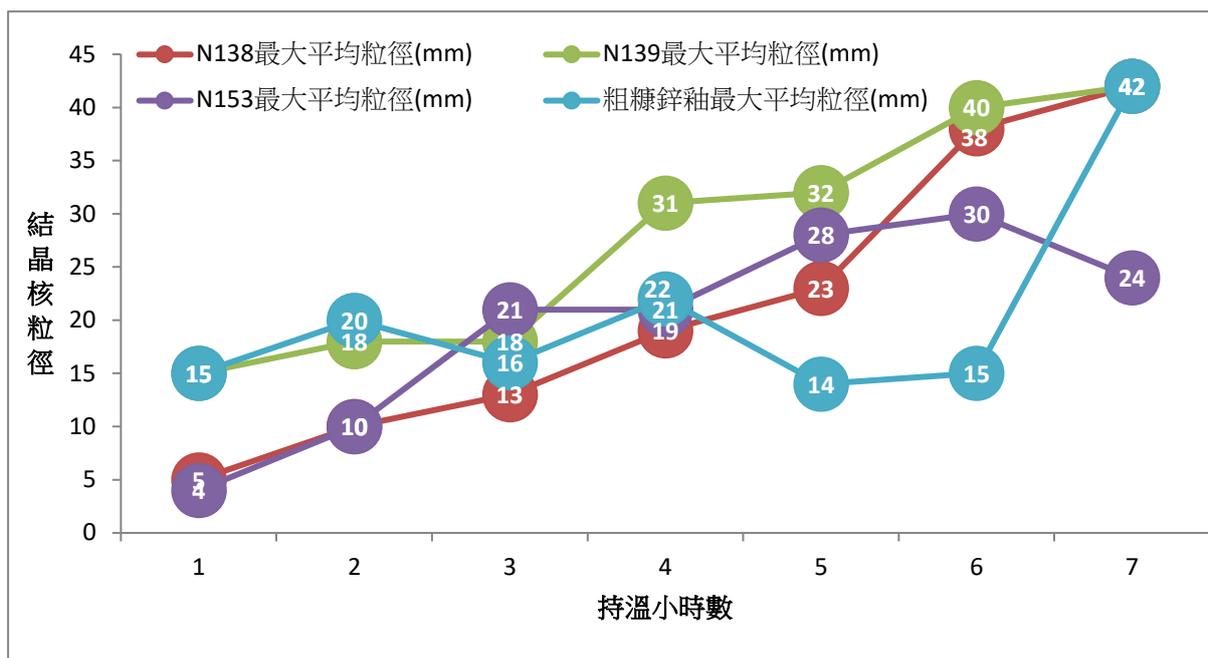


圖14 本研究持溫時間與最大結晶核粒徑關係圖

在結晶核數量與持溫時數關係的數據當中，釉式 N138 在持溫三小時的結晶核數量卻比二小時的還要少，我們認為屬於實驗的誤差值，在持溫五小時、六小時以及七小時的數據中，也比持溫四小時的結晶核數量少，但這狀況我們覺得是因為在持溫五、六、七小時的試片中，結晶數量已經非常多了，而且結晶的粒徑也很大，所以容易形成數個結晶重疊在一起的情形，因而我們推論極有可能有許多結晶核覆蓋在下層，導致無法精準的算出實際的結晶數量，且釉式 N139 在持溫六小時的結晶核數量也應與此同理，所以事實上，結晶核數量與持溫時數確實是呈現正面增加的。

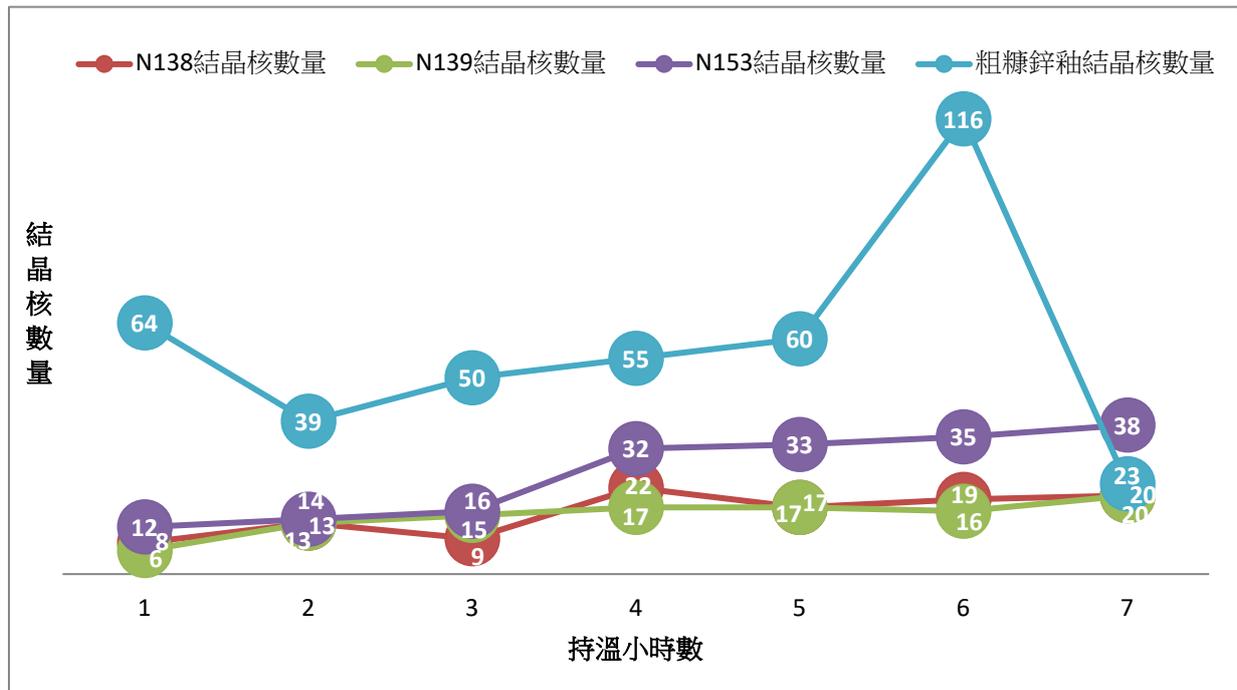


圖15 本研究持溫時間與結晶核數量關係圖

根據本研究之研究結果顯示，結晶核數量折線圖就整體方面論述，是呈現窯燒時間越久則結晶核數量越多，但含有粗糠的結晶釉在持溫 1 小時就比一般結晶釉的 7 小時還多，在燒窯時間及電費成本上，若要製作相同結晶數量時含有粗糠的結晶釉就有時間及經濟上較為節省的優勢。

## 陸、討論

- 一、根據本研究結果顯示，氧化鋅結晶釉及「粗糠鋅結晶釉」結晶核數量折線圖就整體方面論述，是呈現窯燒於攝氏 1120 度持溫時間越久則結晶核數量越多；最大結晶粒徑曲線圖就全體方面分析，是呈現窯燒成核期持溫時間越久，則最大結晶則粒徑越長，持溫若有別於攝氏 1120 度，例如攝氏 1100 度或攝氏 1140 度是否有差別有待後續探討。
- 二、在結晶核數量與持溫時數關係的數據當中，釉式 N138 在持溫三小時的結晶核數量卻比二小時的還要少，我們認為屬於實驗的誤差值，在持溫五小時、六小時以及七小時的數據中，也比持溫四小時的結晶核數量少，但這狀況我們覺得是因為在持溫五、六、七小時的試片中，結晶數量已經非常多了，而且結晶的粒徑也很大，所以容易形成數個結晶重疊在一起的情形，因而我們推論極有可能有許多結晶核覆蓋在下層，導致無法精準的算出實際的結晶數量，且含有粗糠的結晶釉在持溫 1 小時就比一般結晶釉的 7 小時還多，在燒窯時間及電費成本上，若要製作相同結晶數量時含有粗糠的結晶釉就有時間及經濟上較為節省的優勢。
- 三、在最大結晶粒徑與持溫數關係的數據當中，釉式 N153 的最大結晶粒徑在持溫七小時的情況，不符合窯燒時間越久最大結晶粒徑越長的現象，其原因是因為相較於 N138 與 N139 的結晶狀況，N153 結晶的數量是非常可觀的，所以在持溫五小時、六小時以及七小時的試片，表面上幾乎都已經布滿了許多結晶，它們層疊在一起，而且有些更是大到無法完整在僅限的試片上顯現出來，眾多因素也就造成無法準確測量實際的最大結晶粒徑，但我們推論，事實上最大結晶粒徑與持溫時數亦是呈現正面增加的。

- 四、經文獻探討，氧化鋅結晶釉結晶釉是一種氧化鋅與矽酸鉀的化合物，在窯中經熔融、冷卻析出晶體，為一種矽酸鋅物質( $2ZnO \cdot SiO_2$ )，我們將結晶結構示意圖化為圖 16。詳細的晶體為結構須利用穿透式電子顯微鏡(TEM)進行後續探討。

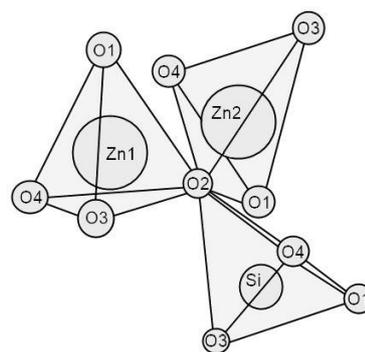


圖 16 矽酸鋅結晶結構示意圖

- 五、稻殼燃燒產生熱量後成為稻殼灰經本研究實驗剩餘重量為 14.6%，若以臺灣每年產生 260000 公噸的廢棄稻殼，經燃燒產生熱量後尚有 37960 公噸的廢棄稻殼灰可供使用，對照二氧化矽每公斤市價約為台幣 500 元，若能充分使用廢棄稻殼灰，則可節省購買二氧化矽的成本。

## 柒、結論

根據這研究目的及實驗調查發現，我們將結論列點整理如下：

- 一、氧化鋅結晶釉在需在氧化氣氛燒的環境下生成才能生成結晶，還原焰中的火，會干擾氧化鋅結晶的生成。升溫曲線部分在攝氏900度至1240度須維持每分鐘2.6度的快速升溫，然後以每分鐘3度降溫速率降至1120度結晶才能生成，建議燒製時使用中小型的窯，才能快速升降溫度。
- 二、本研究使用稻殼灰成為製備鋅結晶釉可達釉藥重量百分比為50.66%，燒製結果釉面光滑，呈色雖與原目標釉式些許差異，但不失其藝術性及當作磁磚用釉的實用美觀功能，能大幅減少原料的經費。
- 三、實驗中以三角試驗法研發了三種釉式及粗糠鋅結晶釉，氧化鋅重量百分比越高，其結晶開的越大越多，氧化鋅結晶成矽酸鋅的飽和重量百分比以本實驗釉式為23.23%開始結晶，若要達藝術效果，則以26%~30%為佳。四種釉式在結晶釉成核期，其持溫時間越久結晶半徑越大。
- 四、實驗裡我們使用碳酸銅做為染色劑的N153綠色結晶、使用紅色氧化鐵作為染色劑的N139珍珠色結晶以及使用氧化鈷做為染色劑的N138藍色結晶，在這三種釉料燒製的試片中N139、N153在持溫6小時以上時，其結晶混合重疊的現象比N138來的嚴重許多，因此，如果就藝術美感方面來說，建議使用藍色結晶N138的釉料會來的比較好。粗糠鋅結晶釉陶瓷藝術染色試驗中使用金屬氧化物染色後各有其藝術表現，但使用市售高溫色料並無結晶生成，不建議使用。

五、本研究含粗糠鋅結晶釉賽格式為

$$\begin{bmatrix} K_2O & 0.02 \\ CaO & 0.02 \\ Na_2O & 0.29 \\ ZnO & 0.71 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Al_2O_3 & 0.02 \\ B_2O_3 & 0.05 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SiO_2 & 2.40 \\ TiO_2 & 0.10 \end{bmatrix}$$

六、粗糠鋅結晶釉製成建築磁磚釉方面，在硬度測試及耐酸鹼測試均能滿足台灣CNS磁磚品質規定，其釉面結晶花在陽光下能反射出多樣光澤，從咖啡色到梨黃色光澤，亦可摻入用碳酸銅及氧化鈷將其變成綠色及藍色磁磚用釉，粗糠鋅結晶釉在建築磁磚釉上，兼具實用及美觀功能。

七、廢棄稻殼灰使用於取代二氧化矽的釉藥成本上，可節省購買二氧化矽的成本，本研究粗糠鋅結晶釉製成建築磁磚釉實際燒成300×85mm之建築磁磚(如圖17)，並發展出綠色、藍色、黃色結晶釉面，在光線底下更有折射效果。



圖17 本研究實際燒成300×85mm之建築磁磚

## 捌、引註資料

李堅萍(2004)。陶藝釉方三角座標試驗法之改進研究。臺北市立師範學院學報，人文藝術類社會科學類科學教育類，35:1，21-36。

李賢學(1994)。矽酸鋅結晶釉藥製備之研究。國立成功大學化學研究所，台南市。

陳恭誠(2002)。油滴天目釉的製備與燒成及其藝術表現。國立成功大學藝術研究所，台南市。

薛瑞芳(2003)。釉藥學。新北市：新北市立鶯歌陶瓷博物館。

范振金(2009)。陶藝釉藥學。新北市：新北市立鶯歌陶瓷博物館。

林錦鐘(2015)。釉藥系統。台北市：五行圖書。

Brian ,T.(2018). *Glaze : The Ultimate Collection of Ceramic Glaze*. Canada : Barron's Educational Series, Inc.

來寶藝術品交易中心(2019)。最妖的結晶釉。2021年3月1日，取自 <https://kknews.cc/culture/bp2gn2n.html>

## 【評語】 052411

本作品利用「廢棄稻殼灰」取代傳統釉原料中的二氧化矽，燒製「粗糠鋅結晶釉」，探討鋅結晶釉的形成原理及燒製技巧，期使廢棄的粗糠成為藝術或生活用陶瓷及建築用磁磚釉的應用價值。同學對於研究的想法和實驗的認真，值得鼓勵。由於釉料配方成分多，溫度控制，環境氛圍，諸多變因均會影響所燒製結晶釉形狀、大小、結晶核數量等，燒製程序誠屬工藝技術，要燒製出符合藝術美感作品，仍需大量嘗試不同配方及溫控技術，希望同學再接再勵。

## 作品簡報

# 粗糠「鋅」用途 - 以廢棄稻殼灰為主要原料 製備氧化鋅結晶釉之研究

**Preparation of zinc oxide(ZnO) crystal glaze with  
abandoned rice ashes as important resource**

組別：高級中等學校組

科別：工程學科（二）

# 研究動機-廢棄稻殼再利用

市面上已研發出將稻殼高壓製成的稻殼筷，相較於傳統竹筷環保，但使用後仍需要丟棄並焚燒，焚燒後產生的稻殼灰若能夠取代結晶釉中的二氧化矽，那麼即便稻殼筷的成本比傳統竹筷高了2.5倍，依然有其發展的可能，稻殼能夠「再次」利用，稻殼製品才有更佳的價值



廢棄稻殼灰含有  
高含量二氧化矽

從陶藝社習得  
釉藥知識

二氧化矽是玻璃質  
的主要成分

廢棄殼灰取代二氧化矽  
「粗糠」資源化

探討結晶釉形成原理  
及燒製的技巧

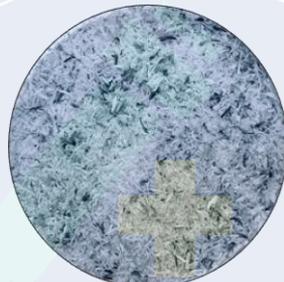
使廢棄的粗糠能成為  
多樣用瓷的釉藥成分

# 研究目的及實驗方法

**01** 最適合結晶生成的重量百分比  
氧化與還原對鋅結晶釉的影響  
鋅結晶釉的正確昇溫曲線



**02** 「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽比例  
「粗糠鋅結晶釉」中氧化鋅濃度的影響



**03** 「粗糠鋅結晶釉」用金屬氧化物呈現不同色彩  
「粗糠鋅結晶釉」製成建築用磁磚



成分	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$K_2O$	$Na_2O$	$B_2O_3$	燒失量
重量百分比	83.49	3.55	0.18	4.22	1.04	0.21	0.01	2.7	3.36

## 實驗釉式的選定

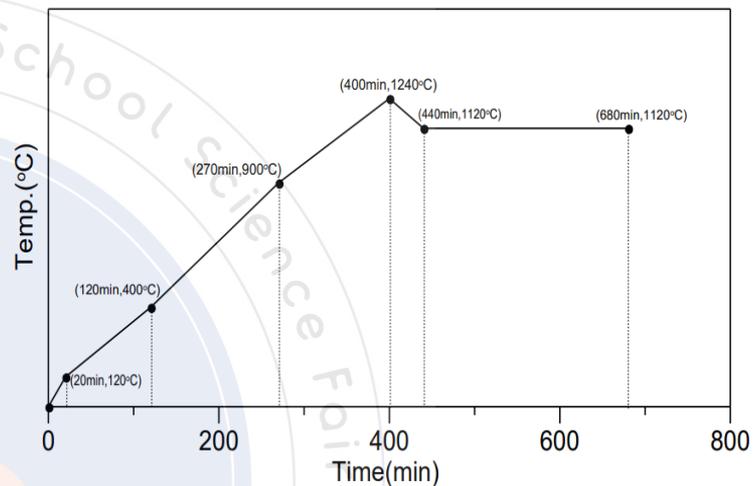
鋅結晶釉的最佳釉式配比實驗(重量百分比)

原料	$SiO_2$	$P_2O_3$	$Al_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	氧化鋅	石英	高嶺土	$TiO_2$
N138	35.95	1.34	1.91	7.88	1.18	3.24	25.8	18.6	3.1	3.1
N139	33.85	1.20	1.79	7.42	1.12	3.05	24.3	17.5	1.00	8.7
N153	35.60	1.33	1.89	7.80	1.17	3.21	25.50	18.40	1.00	4.10

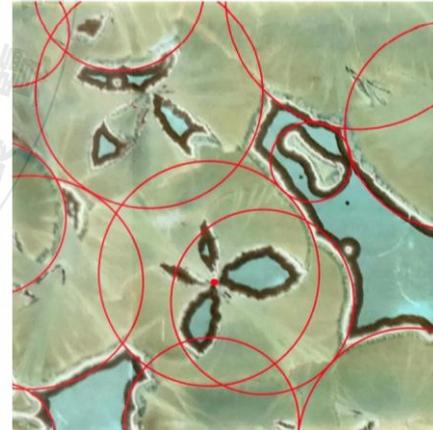
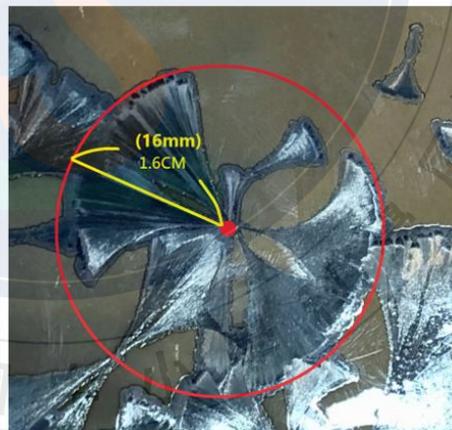
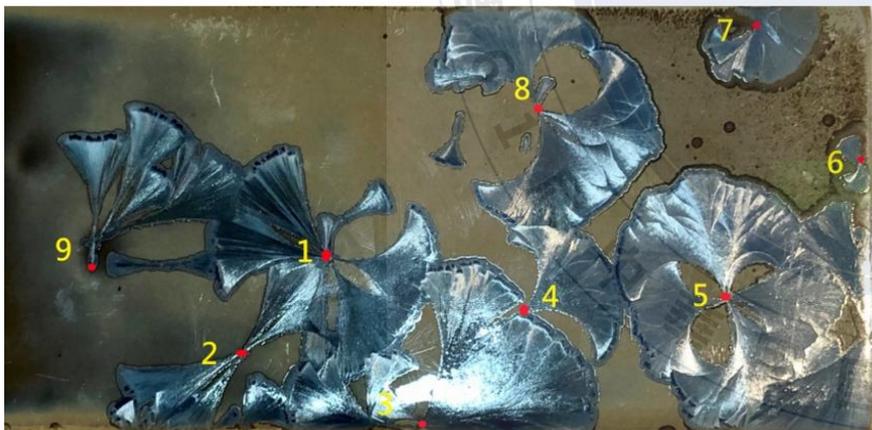
# 氧化燒 VS 還原燒

燒製氣氛	氧化燒	還原燒
燒製結果 圖片		
性狀分析	釉面有許多結晶體生成	釉面無任何結晶體生成

# 鋅結晶釉的升溫曲線



# 鋅結晶釉的最佳釉式持溫長短與結晶核數量、結晶花半徑的實驗



# 結晶核數量量測結果

釉式	編號	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	結晶核數量平均	標準差
N138	1hrs	8	7	7	8	8	8	8	9	8	9	8.00	0.632
N138	2hrs	11	11	12	13	14	13	15	13	11	14	12.70	1.345
N138	3hrs	8	9	8	9	9	11	11	9	10	10	9.40	1.020
N138	4hrs	18	23	25	22	22	19	19	23	22	22	21.50	2.062
N138	5hrs	17	18	16	17	17	18	17	19	18	17	17.40	0.800
N138	6hrs	18	19	19	21	20	19	19	20	20	19	19.40	0.800
N138	7hrs	19	20	20	21	19	23	20	19	22	21	20.40	1.281



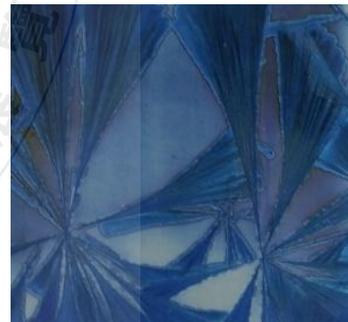
1hr



3hr



5hr



7hr

# 使用「廢棄稻殼灰」取代釉中二氧化矽之比例燒製「粗糠鋅結晶釉」實驗

釉式計算取代

原料	$SiO_2$	$B_2O_3$	$Al_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	$ZnO$	石英	高嶺土	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	$MgO$
N138	35.95	1.34	1.91	7.88	1.18	3.24	25.8	18.6	3.1	3.1	0	0
稻殼灰	83.49	2.7	3.55	0.01	0.21	4.22	0	0	0	0	0.18	1.04
稻殼灰 *0.54	45.08	1.46	1.92	0.01	0.11	2.39	0	0	0	0	0.10	0.56
計算 釉式	-9.13	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	18.6	3.1	3.1	-0.1	-0.56
石英調 整釉式	0	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	9.47	3.1	3.1	-0.1	-0.56
原料	稻殼灰	$B_2O_3$	$Al_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	$ZnO$	石英	高嶺土	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	$MgO$
稻殼灰 取代	54.00	1.34	-0.01	7.87	1.07	0.85	25.8	9.47	3.1	3.1	-0.1	-0.56
調整為 重量百 分比	50.98	1.26	-0.01	7.43	1.01	0.80	24.36	8.94	2.93	2.93	-0.09	-0.53
負值 取0	50.98	1.26	0	7.43	1.01	0.80	24.36	8.94	2.93	2.93	0	0
調整為 重量百 分比	50.66	1.25	0.00	7.38	1.00	0.79	24.21	8.88	2.91	2.91	0.00	0.00

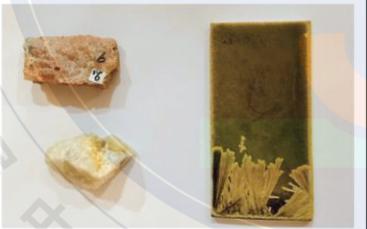


製備「粗糠鋅結晶釉」的原料重量百分比

原料	稻殼灰	$B_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	氧化鋅	石英	高嶺土	$TiO_2$
粗糠鋅 結晶釉	50.66	1.25	7.38	1.00	0.79	24.21	8.88	2.91	2.91

# 粗糠鋅結晶釉磁磚釉面耐酸鹼及硬度測試結果

種類/項目	陶質磁磚	石質磁磚	瓷質磁磚
耐酸鹼性要求	10%酸鹼溶液，靜置 24 小時以上，釉面無污染變色		
莫式硬度要求	施釉磚：3~3.9 無釉射出磚：6~8	3.5~5.5	5~6

硬度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
礦物	滑石	石膏	方解石	螢石	磷灰石	正長石	石英	黃玉	剛玉	鑽石
試片	氧化鋅結晶磁磚釉面					粗糠鋅結晶釉磁磚釉面				
圖片										
硬度測試結果	5-6 之間					6-7 之間				

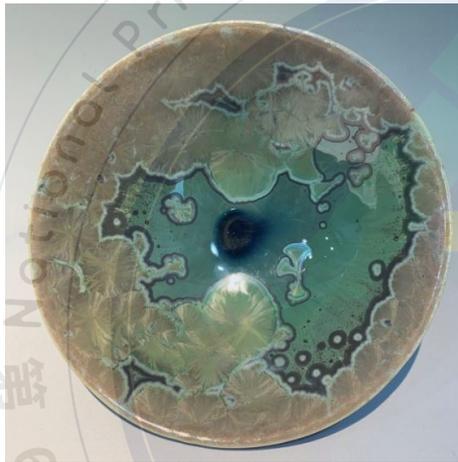


本實驗之粗糠鋅結晶釉磁磚釉面耐酸鹼及硬度測試皆滿足台灣國家建築法規要求

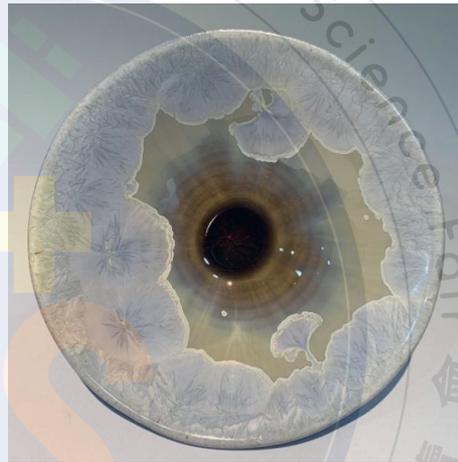
# 粗糠鋅結晶釉陶瓷藝術染色試驗



氧化鈷0.6%  
氧化錳3.1%  
氧化鐵3.1%



碳酸銅6.1%



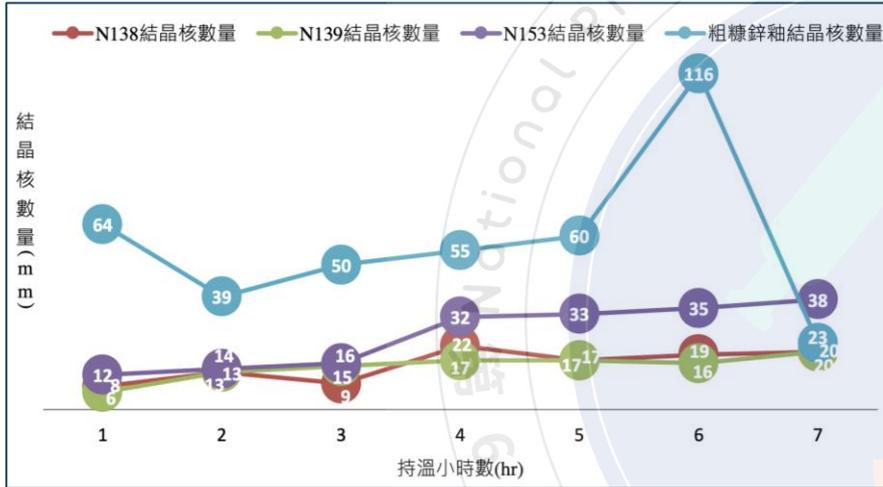
氧化鐵2.1%



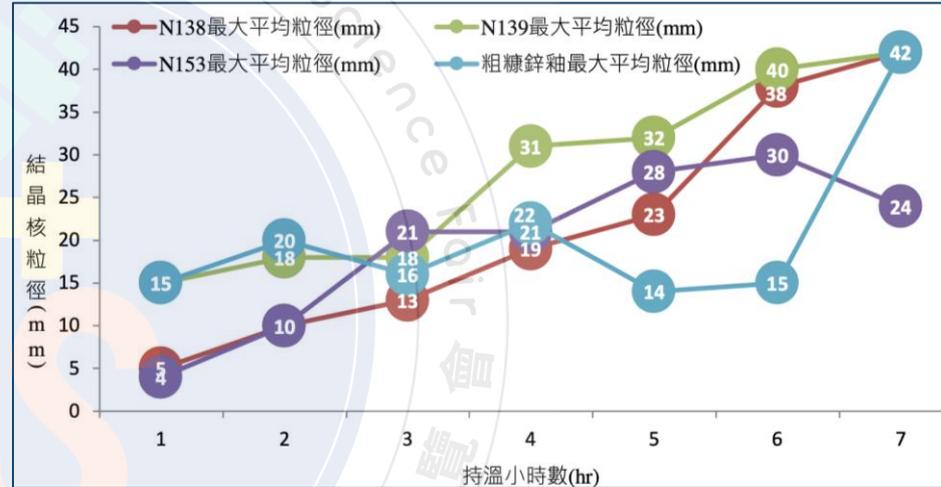
市售紅色  
高溫色料10%

粗糠鋅結晶釉陶瓷藝術染色試驗，以金屬氧化物均能成功染色，使用色料則**使結晶無法生成**

# 研究成果



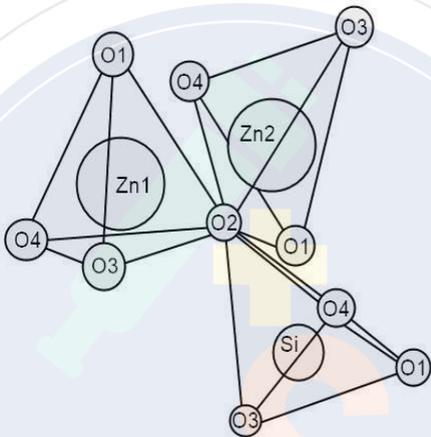
本研究持溫時間與最大結晶核粒徑數量關係



本研究持溫時間與結晶核數量關係圖

最大結晶粒徑曲線圖就全體方面分析，是呈現**窯燒成核期持溫時間越久，則最大結晶粒徑越長**。結晶核數量與持溫時數確實是呈現**正面增加** (持溫5小時以上結晶重疊情形，結晶數量不易判別)

# 氧化鋅結晶釉在需在氧化氣氛燒的環境下生成才能生成結晶



本研究使用稻殼灰成為製備鋅結晶釉可達釉藥重量百分比為**50.66%**

原料	稻殼灰	$B_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$CaO$	氧化鋅	石英	高嶺土	$TiO_2$
粗糠鋅 結晶釉	50.66	1.25	7.38	1.00	0.79	24.21	8.88	2.91	2.91



9.09%



16.67%



23%



25.92%



30%



35%

含稻殼灰之釉中氧化鋅形成結晶的飽和重量百分比  
以本實驗為**25.92%**開始結晶。若要達藝術效果，則以**26%~30%**以上為佳

## 結論

- ◆ 稻殼燃燒產生熱量後成為稻殼灰經本研究實驗剩餘重量為 14.6%
- ◆ 臺灣每年產生260000公噸的廢棄稻殼，燃燒後有37960公噸可供使用
- ◆ 二氧化矽每公斤市價500元，使用廢棄稻殼灰可節省購買二氧化矽的成本



- ◆ 粗糠鋅結晶釉製成建築磁磚釉方面，在硬度及耐酸鹼測試滿足台灣CNS磁磚品質規定。
- ◆ 其釉面結晶花在陽光下能反射出多樣光澤，從咖啡色到梨黃色光澤。
- ◆ 可摻入用碳酸銅及氧化鈷將其變成綠色及藍色磁磚用釉，兼具實用及美觀功能。