

# 脫蠟鑄造水晶燒結製程之改良

陳源豐、林炎成、林耀章

南開科技大學 機械工程系

通訊作者：林耀章

聯絡地址：542 南投縣草屯鎮中正路 568 號

電子郵件：yjlin@nkut.edu.tw

投稿日期：2016 年 3 月

接受日期：2016 年 6 月

## 摘 要

本研究乃利用實驗方法探討在脫蠟鑄造水晶的製程中，影響產品品質與生產成本最具關鍵性的燒結過程，進行改良業界現行燒結製程所使用的溫度-時間曲線，期望能夠發展出最合適的燒結製程以有效節省成本並提高品質。實驗中首先尋求合理的電熱爐門關閉時間，以減少電能消耗並延長爐體的使用壽命。在燒結溫度的設定方面，採用含 24% 氧化鉛的水晶玻璃，以實驗方式獲得在不同燒結溫度下，水晶玻璃可以完全填滿模穴的時間。加熱過程以石膏鑄模容許的極限升溫速率為限制條件，冷卻過程則以水晶鑄件不致出現破裂損壞或產生殘留應力為前提，規劃出合理的燒結溫度-時間曲線。由研究的結果顯示，改良後的燒結溫度-時間曲線不但能保有原來的產品良率，更可以有效縮短製程時間、提高燒結爐的使用率，進而達到節約能源、降低生產成本與提高產品品質的設定目標。

**關鍵詞：**脫蠟鑄造、燒結、石膏鑄模、溫度-時間曲線

## 壹、緒論

脫蠟鑄造為眾多精密鑄造方法中的一種，是機械工業重要的成形製造法，具有尺寸精確、表面光平、不受複雜外形限制、材料選擇多元化等諸多優點，廣用於軍火、機器零件及航太工業等高附加價值產品之製造。民國 59 年，美國 Upland 公司的 Richard Robinson 在外埔鄉成立台灣亞普靈公司，同年稍後，英國蘇格蘭工程師於高雄加工出口區設立環球精密鑄造廠，此為國內最早的精密鑄造工業。藉由改變鑄件材料、鑄模材料及製程參數，精密工業應用之脫蠟鑄造將搖身一變成為精巧之工藝創作技術，產品之附加價值高達數十倍之多，然其製程極端繁瑣，製造流程中的任何疏失，都會使產品無從挽救而前功盡棄。

1906 年，位於法國南錫（Nancy）之杜慕兄弟公司研發玻璃粉脫蠟鑄造技術，將公司的經營型態由實用玻璃生產轉型為藝術玻璃創作，成功地將企業推向顛峰，歷經百年歲月而屹立不搖，其製程迄今仍被業界視為標準規範。1987 年，台灣琉璃工房成立，成功地運用脫蠟鑄造法製作精巧的琉璃工藝品，開啟現代華人玻璃藝術之新頁，在華人的玻璃藝術界，脫蠟鑄造水晶有另外一個浪漫的代名詞-琉璃。經由琉璃工房與琉園將近二十年的辛勤耕耘，目前本土化的琉璃作品不論在質或量上，都已經凌駕歐美地區，並且能依獨特的民族文化開創出自身之風格，不論寫意或寫實，名家創作總能獲得大眾熱烈迴響，蔚為收藏風潮。

脫蠟鑄造水晶的成形方式與金屬鑄造有相當大的差異。在金屬鑄造中，可使用電爐、瓦斯爐、重油爐等熱源對金屬



原料加熱，待其熔化成液狀後，再將液體金屬注入經過適當處理的鑄模中，在澆鑄過程中可使用真空或壓力輔助，以增進金屬液的充填效率並提昇鑄件品質。脫蠟鑄造水晶則使用塊狀或粉末狀的水晶玻璃原料，將其放入石膏鑄模上方的盛料盆中(亦可將原料直接置入開放式的石膏鑄模中)，接著將盛料盆連同石膏鑄模置於電爐中進行加熱，待溫度上升至某一高溫時，玻璃材料軟化經由盛料盆底部的料口，逐漸滴入並充滿鑄模，故為一種特殊的爐內鑄造成形方法，水晶鑄件是否可順利成形，完全取決於爐內的加熱/冷卻製程(亦稱為燒結製程)之控制，因此脫蠟鑄造水晶製程中的關鍵技術就是燒結時的溫度-時間曲線。

燒結溫度-時間曲線對脫蠟鑄造水晶產品的影響可歸納成下列數項:(1)燒結溫度之恰當與否。燒結溫度會影響產品的完整性與成形時間(製造成本)，溫度過低則成形時間過長，甚至會無法完全充填模穴(滯流)，溫度過高則會造成能源浪費，石膏鑄模強度減弱進而在爐內早期崩裂，並且鑄件材料易與石膏產生擴散反應，形成粗糙表面或其它瑕疵；(2)升溫速率之恰當與否。升溫速率會影響成形時間與石膏模的完整性，過慢會拉長製程時間，過快則熱應力會使鑄模產生裂縫甚至造成鑄模破裂；(3)冷卻速率之恰當與否。冷卻速率會影響產品之成敗，過快時會使水晶鑄件因熱應力而產生裂縫或破裂。非結晶質的玻璃材料由高溫狀態冷卻時，在 450°C 左右有一特殊的應力釋放溫度，當冷卻通過該溫度時，若無足夠的退火保溫時間以充分釋放應力，則成品在放置一段時間後終將會因為殘留應力而破裂。

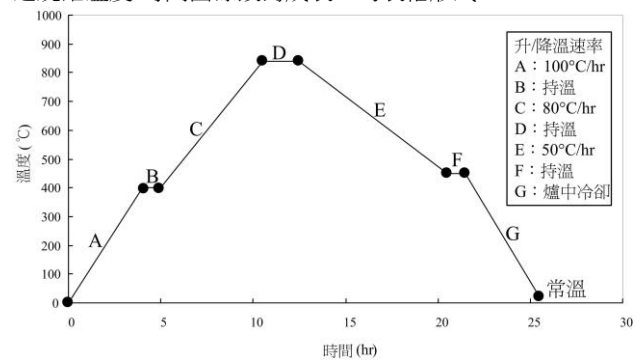
國內有關脫蠟鑄造水晶製程的參考文獻，符芝瑛 (1999) 提出燒結製程須於極高之溫度下進行，並且加熱與冷卻之所需時間甚長，對小型鑄件需數天之久，然而並未提及具體化的製程溫度與時間。陳秋萍 (1999) 與原來 (2004) 均提及燒結製程的大略概況，但仍然沒有說明製程參數的各項數據。張曉萍 (1999) 則以自身操作經驗為依據，建議製程中的升溫速率應小於 80°C/hr，冷卻速率則應低於 100°C/hr，燒結最高溫度介於 840 至 860°C，依此法則規劃出的完整燒結製程約需 35 小時。王鈴蓁 (2006) 則明確標示燒結各階段所設定的目標溫度與升/降溫速率，其完整燒結製程所需時間為 26 至 29 小時，這是所有文獻中耗時最短的燒結製程。

傅豪 (1996) 說明了各種鑄模材料之物理化學性質，期望操作者能靈活運用並加以變化，然其沒有提出石膏鑄模的製程參數。林宗獻 (2010) 則以 R & R910 石膏為鑄模材料，規劃出小型水晶鑄件(1kg 以下)燒結製程的各項參數，建議的燒結總時間高達 58 小時，可明顯看出幾乎是沿用杜慕兄弟公司當年所發展的製程技術。國外脫蠟鑄造水晶製程相關參考文獻，由水常雄 (1992) 所規劃的完整燒結製程總計有八道

升/降溫程序，製程總時間為 40 小時。

對非結晶質的玻璃材料，由於其凝固潛熱無法利用透過晶界成形的的方式來釋放，因而由液態或半固態冷卻凝固後，會產生極大的殘留應力，此種殘留應力最終會導致鑄件的破裂，因此在鑄件的冷卻過程中，必須於合適的溫度點進行應力消除(退火)處理，此一溫度稱為玻璃的應力釋放點。程道腴 (1995) 明確指出，儘管玻璃種類有許多種，彼此的應力釋放點稍有落差，但以 450°C 作為通用的應力釋放溫度，都可得到滿意結果，對於小型玻璃物件，退火時的恆溫時間為一小時。

脫蠟鑄造水晶發展至今已有一百餘年的歷史，然而由發行的文獻與書籍來看，有多位論述者的燒結程序仍然是沿用百年前的原貌而無顯著的改進。隨著鑄造材料性能的提升，對材料物理化學性質的精確掌握，加上電熱爐溫度控制技術的進步，此一傳統的燒結程序在今日實有甚大的改善空間。針對小型(重量約 1 公斤以下)的脫蠟鑄造水晶，目前常見的燒結溫度-時間曲線有下列三種:(1)源自法國而為歐美地區使用的溫度曲線，製程時間約為 60 小時；(2)日本東京玻璃工藝研究所開發的溫度曲線，製程時間約為 40 小時；(3)國內業界使用的溫度曲線，製程時間約為 27 小時。在三種溫度曲線中，以國內現行的溫度曲線最具生產競爭力，圖一為國內使用的燒結溫度-時間曲線，有時為方便閱讀起見，亦可將上述之燒結溫度-時間曲線改寫成表一的表格形式。



圖一 國內現行使用的燒結溫度-時間曲線

表一 國內現行使用的燒結溫度-時間曲線(表格式)

階段	預定到達溫度 (°C)	升/降溫速率 (°C/hr)	所需時間 (hr)
1↑	400	100	4.0
2→	400	持溫	1.0
3↑	840	80	5.5
4→	840	持溫	2.0
5↓	450	50	8.0
6→	450	持溫	1.0
7↓	室溫	90	4~8

說明：升溫↑ 降溫↓ 持溫→ 總時數：25~29 小時



本研究保留學理上的玻璃的應力釋放溫度與保溫時間，其餘則以實驗所獲得的結果重行規劃合理的升/降溫速率、燒結成形溫度及燒結時間，期望在水晶鑄件可以成功製成的情況下，能適度地縮短冗長的製程時間，以節約生產成本並提升產業的競爭力。

## 貳、方法

水晶玻璃依生產國別之不同，所含的氧化鉛含量都不相同。由於不同產地甚至是不同廠家的原料，其膨脹係數通常都不相等，因此不能隨意搭配使用。為推廣在地原料以方便業者應用，本研究選用新北市鶯歌區生產的含 24% 氧化鉛的原料。至於石膏鑄模所使用的石膏粉，因國內耐火石膏的生產規模較小，廠家無法提供明確的材料性質表，故實驗選用進口使用量最多的 R&R1070 石膏。

### 一、實驗材料

含氧化鉛之玻璃因色澤亮麗動人，故亦稱為水晶玻璃，其氧化鉛(PbO)含量為 1~48% 不等。歐盟組織稱氧化鉛含量高於 10% 的鉛玻璃為水晶，美國標準稱氧化鉛含量超過 1% 者為水晶，台灣與捷克則以 24% 氧化鉛含量做為水晶玻璃的標準。玻璃添加氧化鉛之後，可提高對光線的折射率，使玻璃呈現出品瑩剔透的外觀，氧化鉛含量愈高者，折射率即愈高，同時其熔點與流動點(流點)也會愈低而有利於鑄造。本實驗使用國產的水晶玻璃，主要成份為二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)與 24% 的氧化鉛，鉛玻璃原為無色透明狀，為求顏色之變化，可在原料熔煉時加入金屬氧化物(金屬離子)做為著色劑，即可得到多種不同顏色的玻璃原料。表二為 24% 氧化鉛玻璃的物理特性，表三則為著色離子與玻璃顏色的關係。實驗設定目標為小型脫蠟水晶鑄件，每一實驗鑄件均使用 1 公斤的水晶玻璃。

表二 水晶玻璃的溫度與物理性質的關係

溫度(°C)	物理性質
450	應力釋放點
600	靜置時有下墜現象
700	相互接觸時會黏合在一起
800	如同膏狀可以流動
1450	融熔點

表三 著色金屬離子與玻璃顏色的關係

離子種類	玻璃顏色
鈦	金黃色
釩	綠色
鉻	青綠色
錳	紅紫色
鐵	青色~青綠色
鈷	藍色
鎳	琥珀色
銅	青色
銻	紫色
金	紅色

目前脫蠟水晶業者所使用的鑄模均採用石膏質鑄模，其它材質的鑄模材料由於可能會與鑄件產生擴散融合，清砂不易而導致鑄件損壞，或是膨脹係數與水晶玻璃差距過大等因素，未見業界使用，然而並非所有可用於鑄造用途的石膏皆可適用於脫蠟水晶。石膏鑄模的兩大要求分別是：(1)在長時間的高溫燒結過程中，石膏內的成份不會與水晶玻璃產生化學反應或融合黏結現象，否則清砂時會在鑄件表面產生缺陷，甚至石膏鑄模會與水晶玻璃產生融合而無法清砂；(2)石膏的膨脹係數必須與水晶玻璃的膨脹係數相同，否則在成形之後的冷卻過程中，同屬脆性材料的水晶玻璃或鑄模，極易因膨脹係數不同所產生的熱應力而破裂。實驗中所使用的高溫石膏(或稱為耐火石膏)為美國 Dentsply International Company 所生產之 R&R1070 石膏，該型石膏合乎上述的兩大要求，水晶鑄件可成功製成且易於清砂，為目前業界使用最廣泛的石膏，表四為 R&R1070 石膏的物理性質表。近年來新北市鶯歌區的業者亦開始自行調配石膏使用，不但能降低生產成本而且使用性能亦相當優異。

表四 R&R1070 石膏性能表

成份	結晶態氧化矽、玻璃纖維、特殊耐火材料
粉/水重量比	100/28
操作時間	12-13分鐘
開始硬化時間	17-20分鐘
濕強度	600-800psi
燒結後強度	132psi
石膏漿液體積	668c.c./kg

### 二、實驗項目

經過蒸汽脫蠟後的石膏鑄模由於含有大量的水分及有機物質，因此在燒結初期的乾燥階段，應微微開啟爐門，以利石膏鑄模所產生之水蒸氣與有機物所形成的揮發性氣體可以順利消散。雖然在加熱時打開爐門會造成能源浪費、爐體之損傷，然而若是石膏鑄模在乾燥階段所產生之水蒸氣與其它



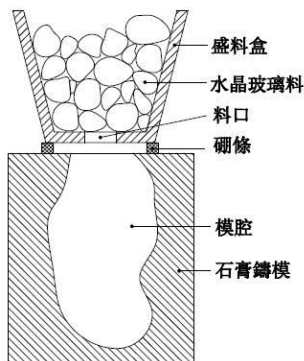


氣體無法充分散逸，將會導致電熱絲燒毀，並且在爐室內會出現壓力升高現象。實驗使用的電熱爐尺寸為 $300\times 300\times 300\text{mm}$ ，功率為 $5\text{KW}$ ，最大加熱速率為 $300^\circ\text{C}/\text{hr}$ ，配備數位式溫度顯示面板，可直接讀取溫度感測器量得的爐室溫度。實驗中設定之鑄模厚度為 $10\text{mm}$ ，首先將完成脫蠟的石膏鑄模分別以不同的升溫速率進行乾燥程序，每隔 $0.5$ 小時以電子秤量測石膏鑄模所減少的重量，藉以建立鑄模乾燥時間與重量減少量的相對關係。石膏鑄模所減少的重量即代表水分與揮發物的散失量，當重量減少量到達零值不再變化時，即代表石膏已完成乾燥，此時即可將爐門完全關閉以節省能源損耗並保護爐體。本階段的實驗除了可求得合適的爐門關閉時間外，尚可求得石膏鑄模的極限升溫速率，鑄模不致破裂的最大允許升溫速率即定義為極限升溫速率。

在燒結溫度的設定方面，是將定量的玻璃原料置入開放式的鑄模中，然後在各種不同的燒結溫度下，每隔 $5$ 分鐘打開爐門觀測原料的充填情形，量測原料完全充填模穴的時間，藉此可求得最低的容許燒結溫度與合適的最高燒結溫度(也就是燒結溫度的上、下限)。圖二為進行燒結溫度實驗時，材料與鑄模的裝置情形，模穴尺寸為直徑 $\times$ 高度 $125\times 27\text{mm}$ 。圖三為在燒結溫度下，原料與鑄模的裝置情況，用來量測充填模穴的所需時間，這也是實際進行生產時的裝置情況，實驗中設定盛料盆底部的料口為圓形，直徑為 $20\text{mm}$ 。



圖二 用於燒結溫度實驗的鑄模與材料裝置圖

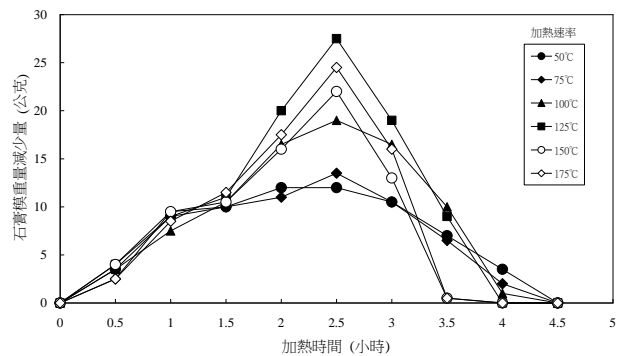


圖三 用於燒結時間實驗的鑄模與材料裝置圖

## 參、結果

### 一、爐門關閉時間

圖四為石膏鑄模在不同的升溫速率下，乾燥時間與鑄模重量減少量的相對關係，圖中各曲線分別代表每小時 $50$ 、 $75$ 、 $100$ 、 $125$ 、 $150$ 、 $175^\circ\text{C}$ 的升溫速率，當鑄模的重量維持定值不再變化時，即表示鑄模已經完全乾燥，此時即可將爐門完全關閉。由圖中可看出在 $175^\circ\text{C}/\text{hr}$ 的升溫速率下，爐門應該在 $3$ 小時 $15$ 分鐘後(約在爐溫 $570^\circ\text{C}$ 處)關閉，對其餘的升溫速率則在約 $400^\circ\text{C}$ 的爐溫處關閉爐門即可。



圖四 不同升溫速率下乾燥時間與鑄模重量減少量的關係

### 二、升溫速率限制

在燒結溫度-時間曲線的升溫(加熱)階段，石膏鑄模必須維持整體的完整性，不得產生裂縫或破裂，否則鑄件將無法成形，因此不致造成鑄模破裂的最大升溫速率即是容許的極限升溫速率。由實驗中發現，當加熱的升溫速率大於 $175^\circ\text{C}/\text{hr}$ 時，鑄模偶而會有破裂現象發生，其餘低於 $175^\circ\text{C}/\text{hr}$ 的升溫速率者，鑄模都能維持完好並且最終可得到成功的鑄件，因此 $R\&R1070$ 石膏在鑄模厚度為 $10\text{mm}$ 時，最大升溫速率不得超過 $175^\circ\text{C}/\text{hr}$ 。

### 三、燒結溫度設定

表五為在不同的燒結溫度下，原料完全充填開放式模穴的所需時間。當燒結溫度低於 $760^\circ\text{C}$ 時，原料不容易完全充填模穴，在 $800^\circ\text{C}$ 的溫度進行燒結時，雖然最終可以順利充滿模穴，但充填時間過長可能無法滿足實際生產時的經濟性，因此實驗結果選定 $800^\circ\text{C}$ 為燒結溫度之下限。當燒結溫度超過 $840^\circ\text{C}$ 時，其充填時間近乎相等而無顯著之變化，由於燒結溫度愈高時，鑄模強度會顯著下降而較易破裂，成品也較容易出現黏模現象，原料中的成分較易揮發而使產品顏色出現淡化並且不利於製造成本，基於上述諸項理由，實驗結果選定 $840^\circ\text{C}$ 為燒結溫度之上限，僅在鑄件外形較複雜時方採用 $860^\circ\text{C}$ 為燒結上限溫度。綜合上述結果，選定小型脫



蠟水晶鑄件合適的燒結溫度區間為 800-840℃，當鑄件使用開放式鑄模時，選用燒結溫度的下限，對一般使用封閉式鑄模的鑄件，則選用燒結溫度的上限。

表五 不同燒結溫度下充填開放式模穴所需要的時間

燒結溫度(°C)	充填模穴時間(分鐘)
760	90
780	60
800	35
820	20
840	10
860	10

#### 四、燒結充填時間

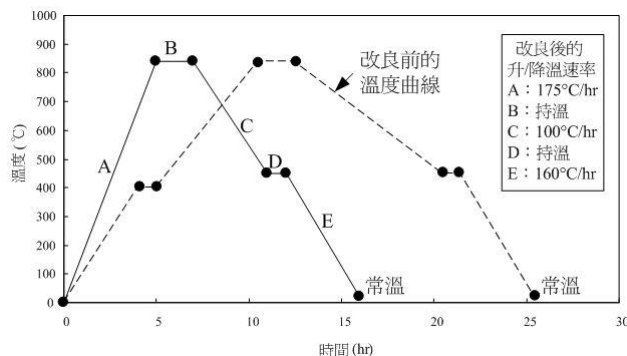
當使用不同粒度組合的玻璃原料進行圖三所示的燒結實驗時，不論玻璃原料的粒度為何，所有的原料均可在 2 小時內全數通過料口，完全充填進入模穴中。由於延長燒結時間所導致的缺點與燒結溫度過高所產生的缺點完全相同，因此在鑄件可順利成形的前提下，燒結充填時間以較短者為佳。基於上述理由，實驗結果選定小型脫蠟水晶鑄件合適的燒結充填時間以不超過 2 小時為限度。

#### 五、降溫速率設定

當脆性材料由高溫狀態冷卻時，若是冷卻速率過快，則表面與心部的冷卻速率會不相同，另外局部厚薄不一亦可能造成各部位的冷卻速率不同，此時材料內部會因而產生熱應力，當熱應力超過材料的拉伸強度時，材料便會破裂。由於水晶玻璃屬於脆性材料，而脆性材料的拉伸強度又遠低於壓縮強度，因此極易因為熱應力而產生破壞。在實驗中乃是以可程式控制器(PLC)來設定降溫速率，實驗顯示當冷卻速率低於 100℃/hr 時，鑄件即無破裂之慮，在經過 12 個月的長期置放之後仍然完好無恙。為考量生產速度與燒結爐的使用效率，實驗結果選定小型脫蠟水晶鑄件在成形之後的降溫速率為 100℃/hr。

#### 六、改良後的燒結溫度-時間曲線間

依據上述的各項結果選定，可重新繪製改良後的燒結溫度-時間曲線。圖五乃是將改良後的燒結曲線與國內現行使用的燒結曲線並列以方便比較，由圖中可看出當採用改良的燒結曲線時，全部的製程時間將會從原先的 27 小時大幅短為 16.5 小時，由此可明顯看出改良式燒結溫度-時間曲線的成本競爭力。表五為改良式燒結溫度-時間曲線的表格形式。



圖五 改良後與改良前的燒結溫度-時間曲線之比較

表六 改良式燒結溫度-時間曲線(表格式)

階段	預定到達溫度(°C)	升/降溫速率(°C/hr)	所需時間(hr)
1↑	840	175	5.0
2→	840	持溫	2.0
3↓	450	100	4.0
4→	450	持溫	1.0
5↓	室溫	100	4.5

說明：升溫↑ 降溫↓ 持溫→ 總時數：16.5

#### 肆、結論

本研究以實驗方式探討小型脫蠟鑄造水晶最合適的燒結溫度-時間曲線，經實驗結果的分析探討，可獲得以下幾點結論及建議：

1. 脫蠟水晶鑄件與金屬材質鑄件之最大差異點乃在於前者具有甚高之脆弱性，此脆弱性是根源於玻璃的非結晶質組織、硬脆性、不良的熱傳導性與特殊的應力釋放溫度，為避免產品失敗，製程中必須嚴格遵循特定的製程參數。
2. 燒結的升溫(加熱)階段只要考慮石膏鑄模的完整性即可，在鑄模不致破裂的情況下，應儘量採用較快的升溫速率以縮短製程時間。
3. 在鑄件可成功製成的原則下，應儘量採用較低的燒結溫度與較短的燒結時間。
4. 燒結的降溫(冷卻)階段，只要考慮水晶鑄件的完整性即可，在鑄件不致破裂的情況下，應儘量採用較快的降溫速率以縮短製程時間。
5. 在 450℃的應力釋放點，保溫時間必須足夠長，以求充分消除殘留應力，避免鑄件在久置之後出現破裂現象。

#### 參考文獻

王鈴蓁 (2006)。揭開玻璃藝術的神祕面紗。台北市，藝術家出版社。  
 黃寶賢 譯 (2007)。玻特琉璃燒成技法。台北市，圓就是藝



- 術創策股份有限公司，（由水常雄原著於1992年出版）。
- 林宗獻 (2010)。精密鑄造學。台北市，全華圖書有限公司。
- 原來 (2010)。中國玻璃工藝。台北市，旭昇圖書有限公司。
- 符芝瑛 (1999)。今生相隨。台北市，天下文化出版社。
- 陳秋萍 (1999)。閱讀王俠軍。台北市，暢通文化事業有限公司。
- 程道腴 (1995)。玻璃學。台北市，徐氏基金會出版社。
- 傅豪 (1996)。精密鑄造技術。台北市，文京圖書有限公司。
- 張曉萍 (1999)。脫蠟精鑄之製作流程與賞析。台北市，琉園。



# Research on modifying de-wax crystal sintering process

Yuan-Feng Chen , Yan-Cherng Lin, Yao-Jang Lin

Department of Mechanical Engineering, Nan Kai University of Technology

## Abstract

The study discusses the processes of de-wax crystal which have critical influences on quality and cost through experimental methods. We improve Temperature-Time curves and expect to develop the best process which can help reduce the cost and reach high quality. First, we tried to get a reasonable time-closing of the furnace to reduce electricity consumption and keep the furnace in longer use. As for the temperature setting, we got various timings about crystal-glass whole-filled cavity through experiments. At last, we developed a proper temperature-time curve under the condition of the extreme heating rate allowed by plaster casting mold. The study shows the refined temperature-time curve can not only reach the original achievement, shorten the time but also lengthen the use of sintering furnace. Furthermore, saving the energy, cutting down the cost as well as improving the quality can be reached.

**Keywords:** de-wax casting, sintering, plaster casting mold, temperature-time curve

