

## 24. 21世紀陶瓷雷射快速原型製程與設備

邱銘祿<sup>1</sup>、湯華興<sup>2</sup>、嚴孝全<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立台北科技大學 機電學院機械系博士後研究

<sup>2</sup>國立台北科技大學 機電學院機械系教授

<sup>3</sup>國立台北科技大學 機電學院機械系副教授

### 一、前言

因為陶瓷材料具有相當高的熔點，不易經過類似金屬鑄造或塑性加工的方法來成形，所以大部分的精密陶瓷是粉末壓縮成形再做高溫燒結的。而目前陶瓷粉末壓製方法有單軸壓製法、靜均壓製法、熱均壓製法等製程[1]。若以這些加壓製程來製作陶瓷工件，不但需要昂貴的模具、冗長的生產準備時間，而且製作形狀複雜的陶瓷工件時，難以使其緻密度均勻，所以其尺寸也就難以有效控制[2]。因此增加陶瓷產品的開發速度以及作出尺寸正確、高強度的複雜陶瓷工件為二十一世紀製造技術的重點研究方向。

二十世紀80年代以來，出現了實體自由成型製造(Solid Freeform Fabrication, SFF)技術：首先，利用CAD軟體將複雜的三維立體物件建構成3D圖形資料，經轉換為快速原型(Rapid Prototyping)系統所需的三角網格檔(stl檔)，再以切層軟體將3D圖檔切割成薄層，並轉換成2D的加工路徑檔(plt檔)，然後在快速原型系統以疊層的製造方式，一層一層的將工件堆疊接合一起，做出所需的3D立體元件。

顯然的，這種不同以往的成形方法具有以下幾點優點：

- (1)成型過程中無須使用任何硬質工具、模具、夾治具或模型，可以節省生產成本。
- (2)生產週期很短，不需作生產規劃，生產過程簡單，效率得以提高。
- (3)設計變更快速，成型物件的幾何形狀，可以由3D圖形資料中隨時變更或修改，直接就可以製造，省略了模具設計製造的時間，大大的增加新產品開發上市的速度。
- (4)此技術擺脫了傳統材料去除加工法的諸多限制，對於複雜形狀、微細特徵、空心的工件都可以全自動化的製作。

快速原型成型方法也存在著一些正待改進的缺點：

- (1)因疊層加工所產生的階梯效應，致使工件表面粗糙度不佳，精度不佳。
- (2)增加雷射掃描解析度及降低鋪層厚度可以改善工件精度，但也相對增加了雷射掃描的工作時間。
- (3)對於簡單外型的大尺寸的工件，需要較大型的快速原型機，製作成型時間也相對增加，不符經濟效益原則。

(4)甚多製程技術仍處於開發階段，可用的材料種類不多；因快速原型機的使用還不普遍，材料價格仍相當昂貴。

現在，快速原型技術由最初的應用於製造觀看的模型，已經擴展到應用於生產功能工件。使用的材料也由最初的塑膠材料擴展到金屬與陶瓷材料。高複雜度的精密陶瓷工件除了可以應用於機械工業、汽車產業、模具業外，在醫療工程及航太工程的應用，也正在積極發展中。再者，高複雜度的陶瓷工件製造技術也適合製作藝術品。因此，以快速原型技術製作高複雜度的精密陶瓷工件為一種值得發展的新興技術。

快速原型技術從發展至今已近三十年，已有數十種的製程發表。其中很多製程的原理可以用來製作陶瓷工件。若以黏結劑為基準來將這些陶瓷製程分類，可分成有機黏結劑製程、無機黏結劑製程與無黏結劑製程三大類。

以 Stereolithography (SL)、Fused Deposition Modeling (FDM)、Laminated Object Manufacturing (LOM)、Selective Laser Sintering (SLS)、Three-Dimensional Printing (3DP) 及 Direct Ink Writing (DIW) 等製程製作陶瓷快速原型工件，多是將陶瓷粉末與有機高分子材料混合，利用有機高分子材料連結陶瓷顆粒，然後將有機高分子材料燒失後再作緻密化燒結，得到陶瓷緻密工件，這些製程屬於有機黏結劑製程。例如：Brady [3,4]、Griffith、Halloran [5,6] 及 Hinczewski [7] 使用陶瓷粉末與感光樹脂之混合物為材料，以 SL 製程製作陶瓷生工件。Agarwala [8] 以陶瓷粉末混合有機黏劑製成細線，然後以 FDM 製程製作陶瓷生工件。Agarwala 等 [9]、Klosterman [10-12]，及 Griffin [13] 使用陶瓷粉末及高分子黏結劑混合物製作生薄片，經由 LOM 製程，利用雷射將生薄片沿著 2D 的輪廓切割，將切割之生薄片堆疊黏合一起成為生工件。Agarwala 等 [9]、Subramanian 等 [14]、Degarmo 等 [15] 與 Liu 等 [16] 以氧化鋁及高分子材料結合成粉粒，利用 SLS 選擇性雷射燒結製程製作陶瓷生工件。麻省理工學院 Sachs 等之 3DP 製程 [17]，以噴嘴進行選擇性的噴塗黏結劑，連結陶瓷粉末做出陶瓷生工件。Lewis [18] 將膠體或高分子聚合體基 (polymer-based) 墨水混合陶瓷粉末，再以直接噴墨沉積書寫方式 (DIW) 製作複雜的 3D 陶瓷生工件。

無機黏結劑的製程是將陶瓷粉末與無機材料混合，加熱使無機材料溶解連結陶瓷顆粒，得到陶瓷工件，此無機黏結劑在燒結後，留置於陶瓷工件之中。湯[19,20]、Gahler [21]均為無機黏結劑製程之例。

最後一種是無黏結劑製程，是指沒加任何黏結劑，將陶瓷粉末溶解使之互相連結的製程，例如Wirtz[22]及Ader[23]、Exner等[24]利用雷射熔結陶瓷粉末製成陶瓷工件。

有機黏結劑的製程中，以SL、FDM、LOM等原理做出的有機黏結劑製程多可以做出緻密的有高強度的工件。但以FDM、LOM兩原理因沒有利用雷射照射所以尚難以作出精細的陶瓷工件；利用雷射照射的SL雖有機會作出精細的陶瓷工件，卻因製程的困難度較高，尚無法商品化。基於SLS原理的有機黏結劑製程也是利用雷射照射，有機會做出精細的陶瓷工件，但卻還沒能做出高強度的工件。

表1是現有的基於SLS原理的快速原型陶瓷製程的成果比較表。Subramanian [14]以平均粒徑為 $15\mu\text{m}$ 之氧化鋁粉末及高分子材料結合成粉粒試圖改善SLS製程陶瓷成品的緻密度，但以標準的SLS製程製作陶瓷生坯 ( green parts )，再以燒結後處理製成陶瓷工件，其做出之成品強度最大為8 MPa，緻密度60%，層厚 $100\mu\text{m}$ 。Liu[16]使用平均粒徑為 $0.26\mu\text{m}$ 之次微米氧化鋁粉末與硬脂酸結合成粉粒，其製做出達到88%之理論密度之氧化鋁陶瓷工件，強度較強為255 MPa。

無機黏結劑的製程與無黏結劑製程多使用雷射選擇性燒結陶瓷粉末，形成陶瓷工件，但強度一直無法提高。Gahler等[21]利用無機黏結劑製程，將陶瓷漿料乾燥後以雷射掃描，利用液態燒結製成氧化矽/氧化鋁複合陶瓷薄蓋冠，其做出之成品表面粗糙度約為 $R_a\sim 1\mu\text{m}$ ，緻密度90%，層厚 $100\mu\text{m}$ ，三點抗彎強度平均5 MPa最高只為8 MPa。

Wirtz[22]利用無黏結劑製程，將矽酸鋁陶瓷粉末溶解使之連結成陶殼模，其做出之成品表面粗糙度約為 $R_z\sim 130\mu\text{m}$ ，緻密度62%，層厚 $150\mu\text{m}$ 。另外Exner等[24,25]利用真空微燒結技術，以Nd:YAG脈衝雷射直接燒結微細乾粉，作出的陶瓷工件的解析度小於 $80\mu\text{m}$ ，最佳緻密度可達98%，但抗彎強度卻只有100 MPa。Wilkes ( Faunhofer ILT ) 等[26]以其特有的SLM ( Selective Laser Melting ) 製程，製作氧化鋁義齒等工件，可以達到98%的緻密度，但平均抗彎強度只有10 MPa。

以雷射選擇性燒結法製做陶瓷工件的快速原型製程，使用的材料有兩種形式，一種為乾的粉末，另一種為濕的漿料。傳統的選擇性雷射燒結法(Selective Laser Sintering)使用的材料為粉末，所以也可以叫做粉末選擇性雷射燒結法(Powder Based Selective Laser Sintering)，是利用乾粉末鋪層然後用雷射掃描，形成工件的形狀。前述的Subramanian[14]及Liu[16]、Wirtz[22] Exner等[24,25]均使用此種方法。另一種漿料法是將粉末加水加黏結劑，調成漿料來鋪層，經乾燥後以雷射掃描成形，因使用的材料為漿料，所以也可以叫做漿料選擇性雷射燒結法(Slurry Based Selective Laser Sintering)，前述的湯[19,20]、Gahler[21]均使用此種方法。漿料法可使用小顆粒粉末，在乾燥時，水分蒸發產生拉緊粉末之力，可達到增加packing density的效果。因此力係毛細管力，其大小與粉末直徑大小成反比，所以也只在使用細粉才能使毛細管力產生較大作用，而拉動粉末顆粒，達到增加生坯密度的效果，例如 $0.68\mu\text{m}$ 產生1.1 MPa的壓力， $0.35\mu\text{m}$ 產生2 MPa的壓力[27]。因為有此作用力所以漿料法可以藉乾燥極微細粉末達到密集的顆粒分布，減小顆粒間間隙，在緻密燒結時可以達到98%以上緻密度。相對的使用乾粉鋪層的SLS就沒此機制。在品質上濕式製程可能比粉末法為佳。但表1.1中利用濕式漿料的Gahler及Tang的製程所做的陶瓷工件的強度都均在20 MPa以下，其原因是兩者均使用硬燒結。

所謂的硬燒結是雷射直接溶解陶瓷粉末，使陶瓷之間互相連結，表1.1中的無機黏結劑製程與無黏結劑製程均利用硬燒結的方式連結。連結的陶瓷材料，必須溶解，然後降溫凝固，因相變化以及從熔點降到常溫附近導致的收縮，容易引起熱應力以及裂痕。湯[20] [28-32]一直以無機陶瓷材料連結來製作工件，將陶瓷粉末部份或全部溶解連結成工件，若要組織緻密化會有裂痕產生，不緻密化強度不高，所得到的強度約在10~20 MPa。反之，有機黏結劑製程利用有機高分子溶解連結陶瓷粉末在此叫做軟燒結，不會產生裂痕。前述的以SL、FDM、LOM等原理做出的有機連結製程均可以得到緻密且高強度的工件，但利用SLS有機連結劑製程原理做出的工件卻強度不夠。例如Subramanian的工件只得到8 MPa的強度，Liu等人的強度只達到255MPa，究其原因乃其係使用乾粉末來製作，而快速原型製程缺乏壓緊的機制，所以難以得到應有的強度。

表1.1 現有基於SLS原理快速原型陶瓷製程的成果比較表

研究者 (單位、國家)	製程		材料 種類	緻密度 [%]	強度 (MPa)	層厚 ( $\mu\text{m}$ )	表面 粗糙度( $\mu\text{m}$ )	燒結 方式	備註
	黏結劑	噴塗							
Subramanian(Austin Texas, USA)	SLS	有機	乾式 粉末	60	8	100	/	乾	粉末平均 粒徑15 $\mu\text{m}$
Liu (Missouri-Rolla, USA)	SLS	有機	乾式 粉末	88	255	100	/	乾	粉末平均 粒徑0.26 $\mu\text{m}$
Gabler(Clausthal TU, Germany)	SLS	無機	濕式 漿料	90	2-8	100	Ra-1	燒	
Witzel(PT, Germany)	SLS	無	乾式 粉末	62	/	150	Ra-130	燒	
Exner(LIM, Germany)	SLS	無	乾式 粉末	98	100	/	/	燒	真空燒結
Wilkes (Fraunhofer ILT, Germany)	SLM	無	乾式 粉末	98	10	/	/	燒	
Tang(NTUT, Taiwan)	CLF	無機	濕式 漿料	75	20	小於15	Ra-1	燒	粉末平均 粒徑9-13 $\mu\text{m}$

分析傳統SLS有機黏結製程做出的工件強度不夠的原因可以得知，現有的製程多以粉末法來製作，所以利用有機黏結劑加上漿料法應可以做出較均質的生坯，所得的生工件再經燒失有機黏結劑後，所鋪出的生薄層之孔洞直徑與粉末顆粒直徑比小於0.5以下，然後以緻密化高溫燒結將可以獲得一個強度高的氧化鋁陶瓷工件。

國立台北科技大學湯教授與邱於2008年開發出一種陶瓷漿料間接選擇性雷射燒結法(Ceramic Slurry Based Indirect Selective Laser Sintering)快速原型製程[35] (簡稱陶瓷雷射燒結法快速原型製程)來製作陶瓷工件，提高陶瓷工件的強度，這種製程不需要模具就可運用疊層加工製造出高強度之複雜形狀的陶瓷生工件，再將陶瓷生工件以高溫緻密化燒結；而且自行研發數台快速原型系統，同時開發含有人機介面之控制系統，以及DSP技術作雷射能量一致控制系統、雷射光點縮小技術、陶瓷雷射燒結法的新式刮刀三項系統技術，可以製造出具有高強度複雜形狀之3D陶瓷工件。

## 二、陶瓷雷射燒結法快速原型製程

圖1為陶瓷雷射燒結法快速原型製程之示意圖，其步驟說明如下：(1)攪拌均勻成為樹脂氧化鋁陶瓷漿料；(2)陶瓷雷射快速原型機Z軸升降平台下降一個單層厚度距離；(3)經饋料機構鋪一層漿料於工作台上；(4)使用乾燥設備把漿料層加熱乾燥成生坯；(5)雷射光作選擇性掃描，直接燒結生坯層為陶瓷層。反覆2至5的堆疊動作，直至(6)完成3D工件；(7)將生薄層塊浸泡在水或化學崩解液，把未經雷射燒結的生坯部份崩解；(8)取出生工件；(9)將生工件在燒結爐中施以600°C溫度與適當時間燒失有機黏結劑，再

施以1600°C高溫緻密化燒結；(10)成為高強度高緻密度的陶瓷工件。

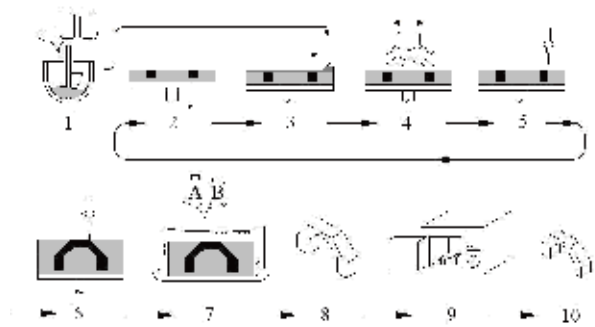


圖1 陶瓷雷射燒結法快速原型製程圖

圖1中的步驟(1)到步驟(4)是製作生薄層的步骤，此生薄層在步驟(5)雷射軟燒結成為生工件的形狀。當所有薄層堆疊完畢，在步驟(7)以水或化學溶劑去除未經雷射掃描之生薄層部分，即可取出陶瓷生工件。所以本製程的造形基本原理為雷射掃描過的生工件部份要具備不溶於水或化學溶劑的性質，未經雷射掃描的生薄層要能溶於水或溶劑，兩者溶於水的性質差異越大就越容易清料。樹脂氧化鋁漿料經雷射掃描後的液態燒結示意圖如2圖所示，左圖的生坯塊中的陶瓷粉末均披覆一層不溶於水的高醇解度的BF型PVA，以會溶於水的低醇解度的BC型PVA，來混合攪拌連結這些披覆粉末顆粒的漿料。右圖表示經過雷射掃描之生工件中的高醇解度的PVA與低醇解度的PVA溶解，形成不溶於水的PVA-BF + BC型之混合黏結劑；未經雷射掃描的部份，如左圖的生坯塊，會因PVA溶於水而崩解。

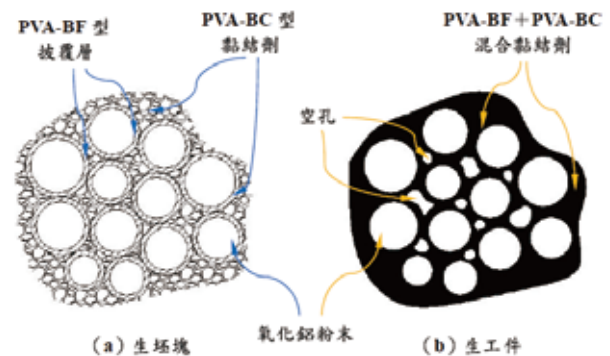


圖2 樹脂氧化鋁漿料經雷射掃描後液態燒結示意圖

### 三、陶瓷雷射燒結法快速原型系統

陶瓷雷射燒結法快速原型系統，如圖3(a)、(b)所示[19,20,32]。



(a)



(b)

圖3陶瓷雷射燒結法快速原型系統[19,20,32]

陶瓷雷射燒結法快速原型系統包括三個主要部分：鋪層系統、雷射掃描系統與控制系統。鋪層系統用來鋪設薄的陶瓷生薄層，整合了(1)漿料調製設備(2)漿料供應設備(3)鋪層設備(4)刮刀清理設備(5)工作平台升降設備及(6)鋪層乾燥設備建構而成。雷射掃描系統則根據程式檔案所選擇設定的路徑來掃描

所鋪設每一層的圖案，整合了(1)X-Y平面掃描機構(2)鏡片組與(3)50W CO<sub>2</sub>雷射。控制系統用來管理與監控陶瓷雷射燒結法快速原型機所作的一連串加工過程，以便於順利的反覆一層一層的堆疊陶瓷生薄層，直至完成3D生工件，控制系統包含了(1)個人電腦(2)人機介面(3)包含所有必要電氣零件之控制箱。

#### 3.1 鋪層系統

##### 3.1.1 漿料供應機構

本系統之漿料是以一台螺旋泵提供穩定的漿料量。在長時間的疊層加工時，還需要保持漿料的均質性、避免漿料沈澱及水分蒸發造成黏度升高，因此在漿料泵的供料容器上方加裝一個攪拌器，並且將漿料容器與外面大氣隔離，減少漿料表面與外界之接觸，減少漿料中之水分的蒸發。

##### 3.1.2 新式刮刀鋪層機構系統

新式刮刀機構系統是將先前快速原型機下料機構將漿料擠出形成一長條狀，再以刮刀系統將漿料鋪成一層薄片狀的鋪層機構，設計直接以線的方式下料，並且馬上以刮刀鋪成薄片，此系統在鋪層時效率會更佳，而且漿料水分流入下層也較易控制。所設計的一種分配器結構如圖4所示，使漿料均勻的分布在一直線上，方便刮刀將漿料均勻的鋪成製程所需要的面積。新式刮刀鋪層機構的刮刀係裝置於供料機構後方的支架上，以步進馬達驅動導螺桿來帶動刮刀鋪層機構及分配器機構前後移動；漿料經管路被擠送至分配器出口上；當刮刀（亦即分配器）向前移動時，刮刀與生坯之間的間隙就形成一層新的漿料層。刮刀鋪層機構的速度可以藉著調整步進馬達的控制參數調整之。



圖4現行使用之分配器

##### 3.1.3 刮刀清理機構

圖5所示的滾筒式刮刀清理機構，可以達到完全清除刮刀殘留漿料的目的。在圖示的容器上方裝設一個海綿滾筒，以馬達驅動之；容器內裝入清水，並

使海綿滾筒的一半高度浸泡於清水中不停的滾動；將刮刀清理機構置於刮刀鋪層行程之最前方停止點，使刮刀停止時可以頂住滾筒，藉由不停轉動的滾筒便可將刮刀上之漿料順利帶走，使刮刀恢復清潔可以讓下一鋪層循環所使用。

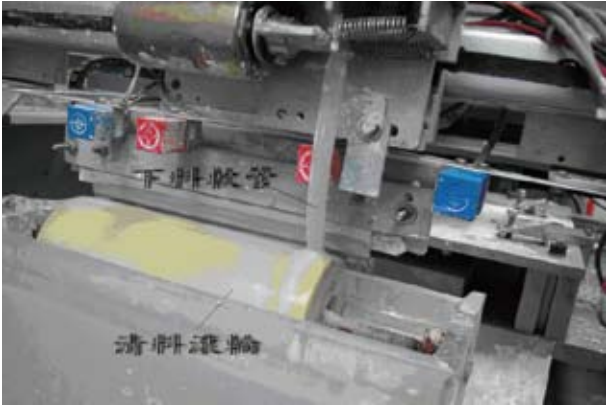


圖5刮刀清理機構

### 3.1.4 工作平台升降機構

工作平台升降機構是以微步進馬達為驅動裝置，經過精密減速機驅動導螺桿帶動工作平台逐層下降，並裝置光學尺校驗每一層下降距離之正確性，以確保鋪層厚度在容許的範圍內。

### 3.1.5 鋪層乾燥機構

為了要減少濕式製程的時間，對於鋪層進行快速乾燥，並且要做到快乾不裂是必要的。如圖6所示，乾燥系統是以平板加熱器裝置於陶瓷基板下，對鋪層堆疊而成之生坯塊直接以傳導方式加熱；但若堆疊之生坯塊較高時，則可啟動系統中之陶瓷紅外線加熱器加入運作，於鋪層上方直接照射鋪層，以輻射加熱做為輔助乾燥之用。

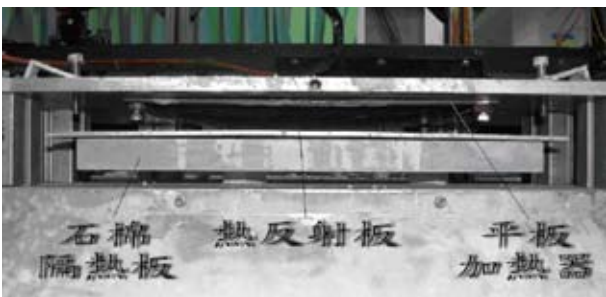


圖6裝置於陶瓷基板下之平板加熱器

## 3.2 雷射掃描系統

掃描系統使用CO<sub>2</sub>雷射為光源，並以X-Y平面運動機構帶動雷射掃描頭依照程式所規劃的掃描路徑進行掃描。陶瓷材料對CO<sub>2</sub>雷射光的吸收率高達百分之九十以上，設定適當的掃描參數(雷射功率、掃

描速度及掃描間距)，即可得到熔結或燒結的結果。為確保製程中的雷射功率在容許範圍內，裝設雷射功率感測器及雷射功率計，配合人機介面軟體自動調整功率，使功率隨時保持穩定，藉以在掃描後得到穩定之生坯變質深度。

雷射光點縮小系統是在縮小快速原型使用的雷射光點。陶瓷雷射燒結快速原型之雷射光點縮小系統除了利用擴束器、孔徑與聚焦鏡來縮小光點外，還特別以一台end pumping的Nd:YAG雷射機光源，並配合前述的擴束器、孔徑與聚焦鏡等組件來驗證縮小光點的成效。

以Nd-YAG雷射經聚焦後，光點直徑可縮小約為0.03 mm，此結果可應用於製作約0.5 mm之薄壁之陶瓷工件。

## 3.3 控制系統

控制系統架構如圖7所示，控制系統整合鋪層系統及雷射掃描系統達到全自動製作工件的目的。系統使用個人電腦為製程電腦，可程式控制器(PLC)透過RS232與製程電腦做連結。運用PLC控制鋪層系統；另外以雷射控制器及路徑控制器，控制雷射及X-Y平面掃描機構，依據掃描路徑檔案進行選擇性掃描。本系統之人機介面採用Visual Basic程式語言撰寫，使用模組化設計，以方便往後程式的修改及擴充等工作。

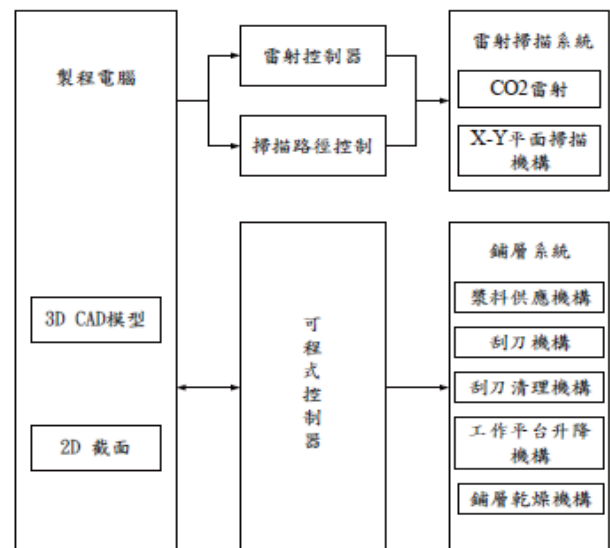


圖7陶瓷雷射燒結法快速原型設備之控制系統架構

### 3.3.1 DSP技術作雷射能量一致控制系統

雷射能量一致控制系統是利用TI的DSP開發兩軸雷射控制器，達成兩軸同時掃描時，雷射能量均勻

控制。並以不同的雷射控制方式(傳統、自製)、相同的雷射功率(2.2W)、相同的掃描速度(60mm/sec)掃描在製作的壓克力試片上，利用切割好的壓克力試片掃描單方向之雷射能量分佈情況；再利用未切割之壓克力試片掃描輪廓圖形，唯一的差異在於壓克力無需切割；最後則利用顯微鏡觀察其線寬。

在向量掃描時，傳統的雷射控制器會使雷射出現轉角處能量集中之問題，圖8為方形及菱形輪廓分別掃描於壓克力試片後的情況，可以觀察出轉角處之線寬明顯大出許多，說明了傳統的雷射控制器的確會造成能量集中於頭尾的問題，特別是頭尾兩端為能量集中最大的地方，造成輪廓掃描時，雷射在不等速運動下之工件成形不均勻的問題，讓工件表面精度降低；自製新式的控制器在固定距離下擊發雷射，因此不會有能量集中的問題，由圖9即可以明顯的觀察出改善後之效果，其加減速區與等速區之線寬誤差已經降低至 $10\mu\text{m}$ 以內，且明顯的改善了傳統雷射控制器加減速區與等速區線寬差異達 $30\mu\text{m}$ 之缺點，更重要的是改善了轉角處雷射能量集中之問題，提供了較佳的工件成形品質，使得製作出的工件符合精密製造之要求。

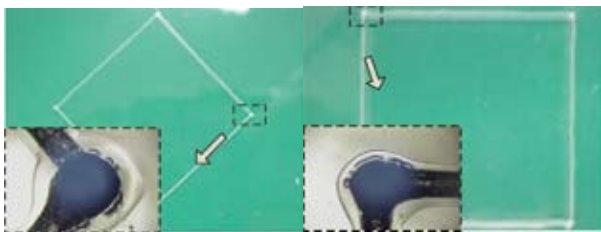


圖8傳統雷射控制器掃描方形及菱形輪廓於

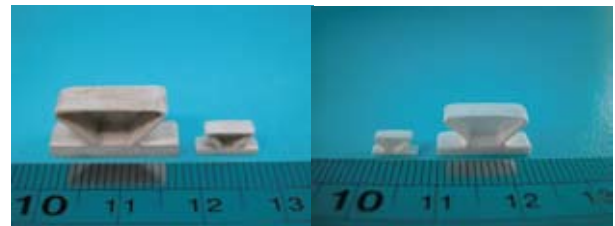


壓克力試片後的情況  
圖9自製新式雷射控制器掃描方形及菱形輪廓於  
壓克力試片後的情況

## 四、結果

我國的陶瓷工件快速原型製程之研究多在國立台北科技大學。如何提高陶瓷工件的強度與精確度是目前研究的主題。陶瓷工件的抗彎強度從2007年以前均在20 MPa以下，到目前之所製成的氧化鋁陶瓷工件平均緻密度達98%，抗彎強度已達到363.5MPa，比現有利用SLS製作陶瓷工件的255MPa強度成果為高[16]。在精度提昇上，以Nd-YAG雷射

經聚焦後，光點直徑可縮小約為0.03 mm，此結果已有能力製作約0.5 mm之薄壁陶瓷工件；在雷射掃描之加減速區與等速區之線寬誤差已經降低至 $10\mu\text{m}$ 以內，也改善了轉角處雷射能量集中之問題，提供了較佳的工件成形品質，使得製作出的工件更能符合精密陶瓷件之要求。圖10是分別展示以陶瓷漿料間接選擇性雷射燒結法快速原型製程所製作之生工件與高溫燒結後之陶瓷工件。



(a)生工件 (b)陶瓷工件  
圖10以漿料間接選擇性雷射燒結法快速原型製程製作的氧化鋁陶瓷0.4 mm細薄斷面及8mm小尺寸之陶瓷工件

## 五、結論與展望

目前在國內產業界所使用的快速原型系統多為外國採購，有礙於所使用之材料以及機構維修費用昂貴，使得產業界未能普及應用。國立台北科技大學開發的陶瓷雷射燒結法快速原型系統與製程為我國自創的技術，除了可以鋪設極薄之薄層、自然形成之固態支撐、無需特別之設計即可防止生坯之向上或向下之變形、並且可以回收原料無環境污染的問題。目前本校更著力於陶瓷工件強度與精度提升之研究發展，且已有能力依據產品需求予以調整製程參數及改變加工製程，製作快速原型專用機器供工業界應用，提昇產業競爭力。

本文利用陶瓷雷射燒結快速成型技術，成功地的製作出高強度的複雜形狀之3D氧化鋁陶瓷工件。由於陶瓷雷射燒結快速成型法的漿料可以鋪設低於 $10\mu\text{m}$ 以下的極薄層；且可利用DSP技術作雷射能量的一致性控制；雷射選擇掃描之光點可以控制得很小，是具有製作出微細特徵之微小複雜陶瓷工件的潛力。因此，若能進一步改善此製程，相信在未來可成為製作精密陶瓷件的另一種快速原型機與方法。

## 參考文獻

1. 黃坤祥，粉末冶金學，新竹縣：中華民國粉末冶金協會，2003，第234-238頁。
2. William D. and Callister, Jr. Material Science and Engineering an Interoduction, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997, pp.427-428.

3. G. A. Brady, T. M. Chu, and J. W. Halloran, "Curing Behavior of Ceramic Resin for Stereolithography", Proc. of The 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, ed. by D. L. Bourell, The U. of Texas at Austin, Texas, USA, 1996, pp. 404-410.
4. G. A. Brady, and J. W. Halloran, "Stereolithography of Ceramic Suspensions", Rapid Prototyping Journal, 3, 1997, pp. 61-65.
5. M. L. Griffith, and J. W. Halloran, "Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography", Journal of the American Ceramic Society, 79[10], 1996, pp. 2601-2608.
6. J. W. Halloran, M. L. Griffith, and T. M. Chu, "SL Resin for RP of Ceramics and Metals", United States Patent No.6117612, 2000.
7. C. Hinczewski, S. Corbel, and T. Chartier, "Ceramic Suspensions Suitable for Stereolithography", Journal of the European Ceramic Society, 18, 1998, pp. 583-590.
8. M. K. Agarwala, R. van Weeren, B., Bandyopadhyay, A., P. J. Whalen, A. Safari, and S. C. Danforth, "Fused Deposition of Ceramics and Metals: An Overview", Proc. of The 7th Solid Freeform Fabrication Symposium, ed. by D. L. Bourell, The U. of Texas at Austin, Texas, U.S.A, 1996, pp. 385-392.
9. M. K. Agarwala, D. Klosterman, N. Osborn, and A. Lightman, "Hard Metal Tooling via SFF of Ceramics and Powder Metallurgy", Proc. of The 10th Solid Freeform Fabrication Symposium, ed. by D. L. Bourell, The U. of Texas at Austin, Texas, U.S.A, 1999.
10. D. Klosterman, R. Chartoff, N. Osborne, and G. Graves, "Automated Fabrication of Monolithic and Ceramic Matrix Composites via Laminated Object Manufacturing (LOM)", Proc. of The 8th Solid Freeform Fabrication Symposium, ed. by D. L. Bourell, The U. of Texas at Austin, Texas, USA, 1997, pp. 537-549.
11. D. Klosterman, "Laminated Object Manufacturing (LOM) of Advanced Ceramic and Composites", Proc. of The 7th International Conference on RP, U. of Dayton and Stanford U., San Francisco, CA, USA, 1997, pp. 43-50.
12. D. Klosterman, R. Chartoff, G. Graves, N. Osborne, A. Lightman, G. Han, and A. Bezeredi, "Direct fabrication of ceramics and composites through laminated object manufacturing(LOM)", Materials and Process Affordability: Keys to the Future, Vol. 43.I, 1998, pp. 693-705.
13. C. Griffin, J. Daufenbach, and S. McMillin, "Solid Freeform Fabrication of Functional Ceramic Components Using a Laminated Object Manufacturing Technique", Proc. of The 5th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA, 1994, pp. 17-24.
14. K. Subramanian, N. Vail, J. Barlow, and H. Marcus, "Selective Laser Sintering of Alumina with Polymer Binders", Rapid Prototyping Journal, 1, 1995, pp. 24-35.
15. E. P. Degarmo, J. T. Black, and R. A. Kohser, "Materials and Processes in Manufacturing", Macmillan, New York, 1988.
16. Z. H. Liu, J. J. Nolte, J. I. Packard, G. Hilmas, F. Dogan, M. C. Leu, "Selective Laser Sintering of High-density Alumina Ceramic Parts", 35th International Matador Conference, National Taiwan University, Taipei Taiwan. July 18-20 2007.
17. E. M. Sachs, J. S. Haggerty, M. J. Cima, and P. A. Williams, "Three Dimensional Printing Techniques", United States Patent No. 5204055, 1993.
18. Jennifer A. Lewis, "Direct Ink Writing of Three-Dimensional Ceramic Structures", J. Am. Ceram. Soc., 89[12], 2006, pp. 3599-3609.
19. H. H. Tang, "Method for Rapid Forming of a Ceramic Work Piece". U.S. patent No.6217816, (2001).
20. H. H. Tang, "Direct Laser Fusing to Form Ceramic Parts", Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, no. 5, 2002, pp. 284-289.
21. Andre' Gahler and Juergen G. Heinrich, "Direct Laser Sintering of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Dental Ceramic Components by Layer-Wise Slurry Deposition", Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89 [10], pp. 3076-3080.
22. H. Wirtz, Selektives Lasersintern von Keramikformschalen für Giessanwendungen, PHD Dissertation, RWTH Aachen, Germany, 2000.
23. C. Ader, "Direct Laser Sintering of Ceramics", State of the Art Report, Fraunhofer Institute of Production Technology IPT, Aachen, Germany.
24. H. Exner, p. regnenfub, r.ebert, l. hartwig, a. streek, s. klötzer, m. horn, "Lasermikrosintern von keramischen Materialien", Rapid.Tech, users' conference for rapid technology,

- Erfurt (Germany), 2006, RTe Journal, Ausgabe 3, 3 (2006), S.1-18.
25. Horst Exner, Peter Regenfuss and Robby Ebert, "Laser Micro Sintering", Laser Technik Journal (LTJ), January 2007, No. 1, pp. 26-31.
  26. Jan Wilkes, Konrad Wissenbach, " Rapid Manufacturing of Ceramic Components for Medical and Technical Applications via Selective Laser Melting", Proc. Euro-uRapid, 2006, Frankfurt: A4-1.
  27. Chiu, Raymond C. Cima, Michael J. " Drying of granular ceramic films: II, drying stress and saturation uniformity", Journal of the American Ceramic Society, v 76, n 11, Nov, 1993, pp. 2769-2777.
  28. H. H. Tang, H. C. Yen and W. H. Lin, " On Ceramic Parts Fabricated Rapid Prototyping Machine Based on Ceramic Laser Fusion ", Pro. The 14th Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin, Texas, USA, 2003, pp. 456-464.
  29. H. H. Tang and H. C. Yen, " Ceramic Parts Fabricated by Ceramic Laser Fusion ", Materials Transactions, Journal of The Japan Institute of Metals, vol. 45, No. 8, 2004, pp. 2744-2751.
  30. H. H. Tang, H. C. Yen, S. M. Su and Z. Y. Lin, " Prospect of Making Ceramic Shell Mold by Ceramic Laser Fusion ", Pro. The 15th Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin, Texas, USA, 2004, pp. 268-280.
  31. H. H. Tang, " Building Ultra-Thin Layers by Ceramic Laser Sintering ", The Japan Institute of Metals, Materials Transactions, Vol. 47, No. 3, 2006, pp. 889-897.
  32. Yen, H. C., The Research and Development of Ceramic Laser Sintering in Rapid Prototyping Technology, Ph.D. thesis, College of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology Taiwan, 2007.
  33. Chiu Ming Lu, Fabricating Ceramic Parts by Slurry Based Indirect Selective Laser Sintering, Ph.D. thesis, College of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology Taiwan, 2009. H. H. Tang, "Direct Laser Fusing to Form Ceramic Parts" , Rapid Prototyping Journal, Vol. 8[5], 2002, pp 284 – 289.

## 六、附註

- 作者簡介
  1. 邱銘祿：國立台北科技大學機械系博士後研究  
專長：快速原型技術、機械製造、鑄造工程、  
精密鑄造。  
聯絡地址：台北市忠孝東路三段一號  
e-mail: S4669004@ntut.edu.tw  
Tel: 0932-258-169  
02-27712171 ext 2018
  2. 湯華興：國立台北科技大學機械系教授  
專長：快速原型、非傳統加工、機電整合、機  
械設計。  
聯絡地址：台北市忠孝東路三段一號  
e-mail: hhtang@ntut.edu.tw  
Tel: 0911-031-300  
02-27712171 ext 2030
  3. 嚴孝全：國立台北科技大學機械系副教授  
專長：快速原型、氣液壓控制、機械設計。  
聯絡地址：台北市忠孝東路三段一號  
e-mail: hcyen@ntut.edu.tw  
Tel: 0933-720-548  
02-27712171 ext 2086
- 聯絡作者  
邱銘祿 · e-mail: S4669004@ntut.edu.tw  
Tel: 0932-258-169  
02-27712171 ext 2018