

超快雷射加工之研究與展望

Micro-Machining by Ultrafast Laser and Its Future Development

楊宏智、林芳妃、黃欣怡

Hong-Tsu Young, Fang-Fei Lin, Shin-Yi Huang

雷射加工具有熱解與光解兩種破壞機制，光解是以光子直接打斷材料的鍵結而去除材料，被去除的材料未歷經高溫熔解和汽化過程，加工精度和解析度勝過熱解加工的方式。而飛秒雷射的脈衝時間極短，易對材料產生光解機制，但目前國內飛秒雷射在加工方面的討論仍是有限。本研究即針對飛秒雷射與業界常用的 Nd:YVO₄ 雷射作比較與分析，期望對提升國內應用超快雷射加工之產品品質有所助益。

The material removal mechanism by laser micro-machining have two basic forms: pyrolysis and photolysis. The processing via photolysis removes materials in a way that photons break the interatomic bonds of the material directly, and the corresponding machining accuracy will be much higher than that via pyrolysis. The femtosecond laser has a characteristic of extremely short pulse, whose working mechanism falls in photolysis category. The research on femtosecond laser applications has not been widely carried out at present in Taiwan. This research was planned on the fundamental investigation and a comparison was made with the Nd:YVO₄ laser which has been widely applied in industry.

一、前言

近年來 3C 產業的蓬勃發展，微結構加工應用比起過往更為重要。而因雷射加工為非接觸式的加工，因此不受刀具的限制，在近期更受產業界的青睞。而一般奈秒 (10^{-9} ns) 雷射對材料的破壞主要為熱破壞，即物質吸收雷射的能量受熱，經過固態、液態及氣態的轉變，材料被雷射衝擊出洞口，因此被雷射加工的孔洞周圍就非常容易出現毛邊，以及材料被噴濺出來後在表面所形成的堆積物。而目前

有許多短波長的奈秒雷射，例如：準分子雷射 (excimer laser)，就可以使部分的破壞為熱破壞，而部分的破壞為光解破壞，其主要的影響還是脈衝長度^(1,12)，以及材料性質對光子吸收的能力所導致。

先進的飛秒 (10^{-15} s) 雷射因脈衝時間超短，主要是採光解的機制來進行材料的移除，可直接打斷原子、分子間的化學鍵，也就是說，飛秒雷射與材料作用的瞬間，因為多光子吸收 (multiphoton ionization)⁽²⁾，在此瞬間產生許多的自由電子，此自由電子亦可由穿隧解離 (tunneling ionization) 所產

生⁽³⁾。這些被解離出的自由電子，若再繼續吸收飛秒雷射瞬間所釋放的能量，使得其自由電子的能量超過激發電子所需能量時，將會產生更多的自由電子，此稱為衝擊離子化 (impact ionization)⁽⁴⁾。此時材料內的自由電子數量非常高，因此有些電子可輕易的脫離材料表面，這些帶著負電的電子離開材料表面後，材料內的正離子與正離子間相斥，因此會產生極大的庫倫作用力，在材料加工中稱之為庫倫爆炸 (Coulomb explosion)⁽⁵⁾。而這些機制所發生的時間相當短暫，因此在雷射將能量傳遞給材料的過程中，電子的溫度可以瞬間上升，而卻還來不及將熱傳遞給原子，稱之為 two-temperature model⁽⁶⁾，之後材料就已經被汽化。因此材料先是受到離子化後溢出，其中沒有經過高溫的熔解及汽化的過程⁽⁷⁾，因此加工完成後，可以有完整的表面。本論文主要在飛秒雷射光源後面架構簡易加工平台，再進行飛秒雷射加工測試，以及 Nd:YVO₄ 雷射的加工測試，主要測試材料為不鏽鋼及 PMMA；最後再針對未來精密製造之可行性作為探討。

二、雷射光源與實驗架構

本實驗觀察所用的飛秒雷射架構是以 Spectra-Physics 公司所販售的超快速摻鈦藍寶石雷射系統 (ultrafast Ti:sapphire laser system) 為主體，共分有超快速雷射源 (ultrafast laser source)，商品名為 Tsunami，是一具自鎖模摻鈦藍寶石雷射。另一具是再生能量放大器 (chirped-pulse regenerative amplifier, CPA)，商品名為 Spitfire，靠著此兩部雷射 (外加兩部激發雷射) 來作為研究飛秒雷射加工的主要光源，其特性為 800 nm、100 fs、1 kHz。光源由放大器出來後，先經過能量衰減片，再經過光圈，最後經過一聚焦鏡，焦距為 6.29 cm，使雷射光束聚焦在工件上時，係為最大的能量，此時光能量被調控主要是調整光圈的直徑。另外，所使用的奈秒雷射光源為星雲電腦公司所製造的雷射打標機，型號 Laser Stellar Mark I，規格為 1064 nm、頻率為 1–100 kHz、12.5 kW 之 Nd:YVO₄ 雷射光源。

三、實驗步驟

選擇 SUS 430 不鏽鋼、316L 不鏽鋼和 PMMA 作為加工材料，並研磨拋光至實驗所需的粗糙度。再用酒精擦拭加工前材料表面，目的為將粘附於材料表面的雜質清除，並以夾具將試片固定在加工平臺上，調整實驗架構所需之加工參數後進行加工，經過儀器量測後，確定雷射機台的穩定度及試片本身的變異度可以信任，接著進行實驗。每一組實驗重複三次後，用白光干涉儀、電子掃描顯微鏡 (SEM) 觀察加工完成後之試片表面，並整理加工完成後之量測數據，最後作分析。

四、雷射加工測試結果

為了確保雷射加工重複性，本研究進行之實驗觀察分別在三個試片的四個角落以相同的參數作雷射加工，加工試片為 SUS 430 不鏽鋼，加工表面粗糙度為 1.8 μm ，Nd:YVO₄ 雷射功率 3.1 W，脈衝重複頻率為 30 kHz。飛秒雷射功率 16 mW，脈衝重複頻率為 1 kHz。首先，比較在相同試片內四個孔的深度，由此可知 Nd:YVO₄ 雷射在相同的試片鑽孔，其誤差值皆在 5% 以內，飛秒雷射其誤差值皆在 7% 以內。接著比較不同試片上的孔徑深度平均值，兩種雷射誤差也在 5% 之內。表示此次實驗用的試片品質穩定，故確定本實驗具有高度的加工重複性，接下來我們分別探討所觀察到之測試結果。

本實驗的第一項重點為：Nd:YVO₄ 在不同的脈衝重複率對加工移除率的影響。雷射平均功率為 3.1 kW，以 30 kHz、60 kHz 與 90 kHz 等三種不同的脈衝重複率對 SUS 430 不鏽鋼進行加工，加工材料表面粗糙度為 1.8 μm 。在圖 1 中可以看出加工 1 秒之後，孔洞的深度相差不大，這是因為當雷射加工孔洞變深時，因為雷射照射材料，所產生的電漿雲將更不易溢出蝕刻孔洞，因此雷射能量無法對材料加工，且材料碎屑不易溢出孔洞，而全部沉積蝕刻孔洞的周圍或底部，最後造成蝕刻速率維持一固定值。

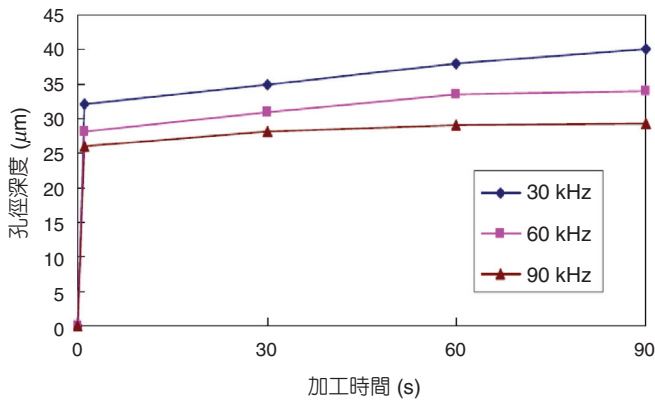


圖 1. Nd:YVO₄ 不同脈衝重複率之加工時間對孔徑深度關係圖。

本實驗固定雷射平均功率，所以脈衝重複頻率越高，其單位雷射脈衝能量越低。另外，在相同時間內雷射給予材料相同的能量，脈衝頻率高，則表示所給予材料的雷射脈衝較多。由圖 1 可以看出，脈衝頻率越高，其加工移除效率則越低，在同時加工 1 秒的條件下，雷射脈衝頻率為 90 kHz 所加工出的深度小於雷射脈衝頻率為 30 kHz 者。此外，當孔徑深度到一定程度時，三者的移除速率漸趨相同，因此也說明雷射脈衝重複率僅在一定的孔徑深度下才具有影響力。

本實驗觀察的第二個重點為：飛秒雷射加工時不同的脈衝能量密度對加工產生的影響。雷射的脈衝重複率為 1 kHz，以 8 mW、16 mW 及 64 mW 等三種不同的脈衝功率對 SUS 430 不鏽鋼進行加工，加工材料表面粗糙度為 0.18 μm。由加工結果可知，加工 1 秒之後孔洞的平均蝕刻速率值相差不

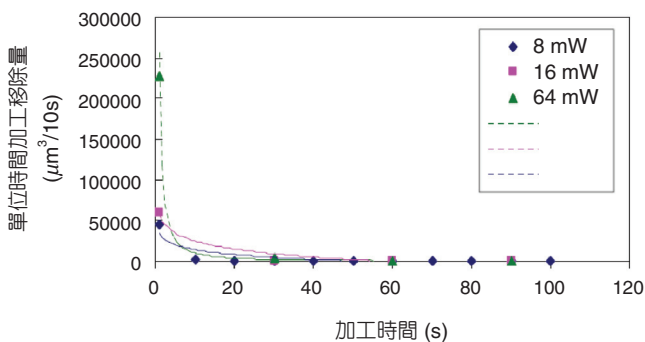


圖 2. 飛秒雷射平均功率之加工時間對加工移除量關係圖。

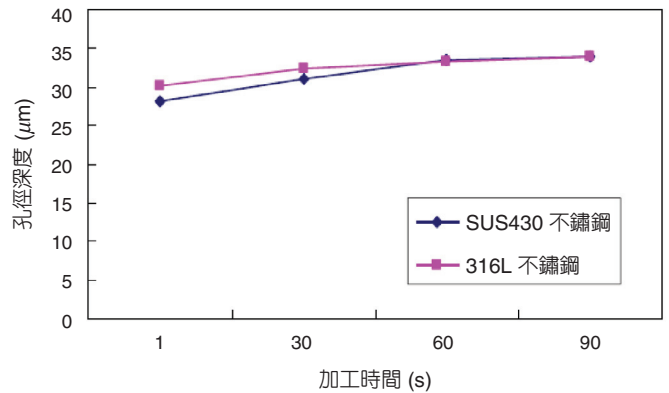


圖 3. Nd:YVO₄ 在不同不鏽鋼之加工時間與孔徑深度關係圖。

大，這是因為材料表面已經離開雷射的景深範圍，因此雷射能量無法對材料加工，且材料碎屑不易溢出孔洞，而全部沉積蝕刻孔洞的周圍或底部，最後造成蝕刻速率維持一固定值。

在該實驗中利用光圈改變了雷射平均功率，在相同時間內雷射給予材料不同的能量，平均功率高，則表示所給予材料的能量較多，由圖 2 可以看出，脈衝平均功率愈高，其加工移除效率愈高。但是有研究指出⁽⁸⁾，當雷射脈衝頻率高，破壞所需的能量較低，且加工品質較高。此外，在此實驗中可得知，當孔徑深度到一定程度時，三者的移除速率漸趨相同，因此也說明雷射脈衝平均功率僅在一定的孔徑深度下才具有影響。

實驗中觀察之第三個重點為：Nd:YVO₄ 與飛秒雷射對於不同性質材料之加工的影響。在此研究中我們所用的 SUS 430 不鏽鋼和 316L 不鏽鋼皆為市面上常見的工程材料。而在實驗中所使用 Nd:YVO₄ 雷射功率為 3.1 W，脈衝重複頻率為 60 kHz，加工時間為 1 秒、30 秒、60 秒與 90 秒，加工結果如圖 3 所示，可以看出在相同的加工時間內，Nd:YVO₄ 雷射對 SUS 430 不鏽鋼與 316L 不鏽鋼的蝕刻孔徑深度約略相同，說明此兩種不鏽鋼的材質對 Nd:YVO₄ 雷射的加工結果來說並無太多影響。此外，圖 5 中在比較 Nd:YVO₄ 雷射對 PMMA 材料的加工，發現 Nd:YVO₄ 加工在 PMMA 材質上，效果並不如預期，這是因為 PMMA 為透明材質，無法吸收 Nd:YVO₄ 雷射的波長。而在飛秒雷

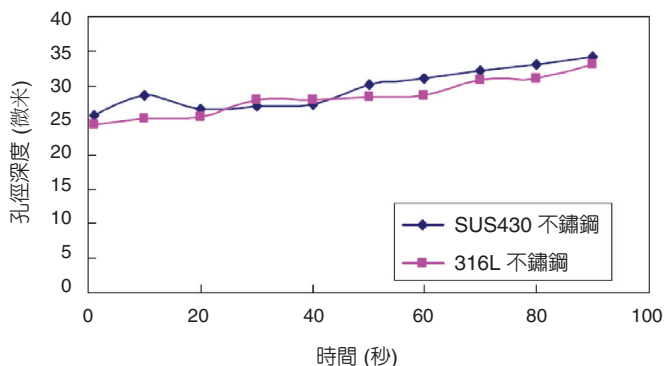


圖 4. 飛秒雷射在不同不鏽鋼之加工時間與孔徑深度關係圖。

射的加工方面，實驗所使用的雷射功率為 16 mW，脈衝重複頻率為 1 kHz，加工時間由 1 秒到 90 秒，每次增加 10 秒的加工間隔，加工結果如圖 4，可以看出在相同的加工時間內，飛秒雷射對 SUS 430 不鏽鋼與 316L 不鏽鋼的蝕刻孔徑深度約略相同，其主要原因為材料內部分子的鍵結大多是

C-Fe，因此加工結果亦不會有太大影響。

有研究指出飛秒雷射可在多種材料上加工⁽⁹⁾，亦可以輕易在 PMMA 材質上進行加工，如圖 6 所示，即使 PMMA 的透明材質無法完全吸收飛秒雷射的波長，但是由於飛秒雷射的脈衝時間短，使得單位脈衝峰值極高，即使 PMMA 吸收率不佳，但是得到的能量也足以打斷其分子鍵結，這也證實飛秒雷射可加工在多種材料的優異性。

本研究第四項探討：Nd:YVO₄ 與飛秒雷射於不同材料表面粗糙度加工之影響。在此研究中的加工材料 SUS 430 不鏽鋼有三種不同的表面粗糙度，分別為 22.5 μm、10.5 μm 與 1.8 μm，而 Nd:YVO₄ 參數設定雷射平均功率為 3.1 W，脈衝重複頻率為 60 kHz，加工時間為 1 秒、30 秒、60 秒與 90 秒，實驗結果如圖 7 所示。

由實驗結果可以明顯的看出，當表面粗糙度為 1.8 μm 時，其孔徑深度遠高於其他兩者，由此推論加工材料的表面粗糙度小，雷射能量可以平均的

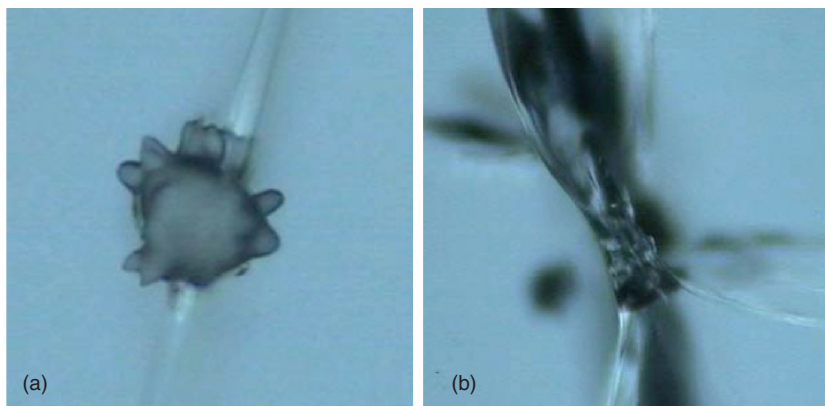


圖 5. Nd:YVO₄ 雷射於 PMMA 的加工，(a) 為平視圖，(b) 為剖面圖。

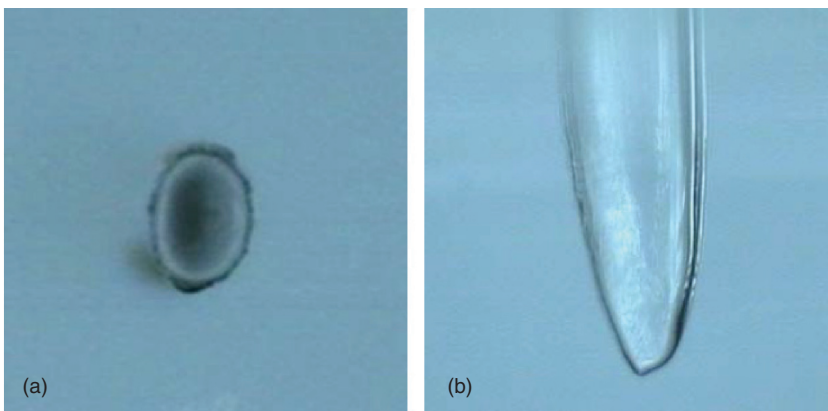


圖 6. 飛秒雷射於 PMMA 的加工，(a) 為平視圖，(b) 為剖面圖。

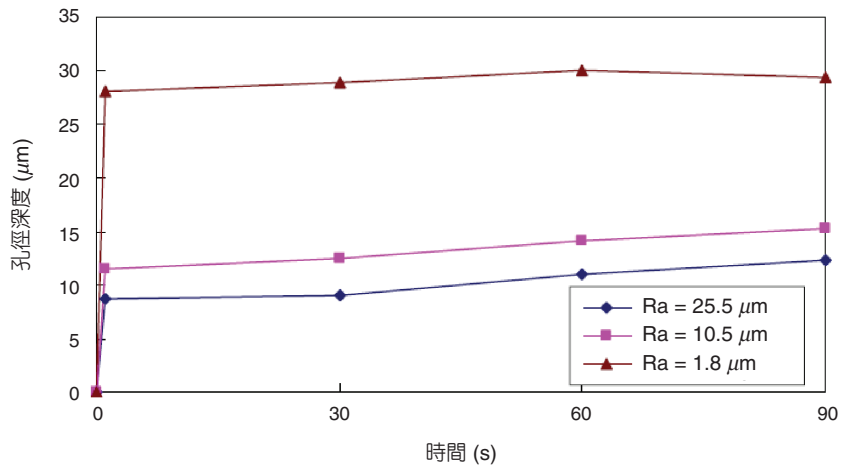


圖 7.

Nd:YVO₄ 加工時，材料的表面粗糙度與加工時間對孔徑深度的關係圖。

傳到材料當中，接收到的能量也比表面較粗糙者來得多。但是脈衝數量達到一定值之後，移除效率便不再增加。這也說明表面粗糙度僅對加工初期有影響，當蝕刻孔洞到某一深度時，加工表面已經被完全移除，材料是以內部的結構來吸收雷射光束能量，因此加工深度便不再依賴材料表面粗糙度。而飛秒雷射參數設定分別為平均功率 16 W、脈衝重複頻率 1 kHz、加工時間由 1 秒到 90 秒，實驗結果如圖 8 所示。由結果可知，表面粗糙度不同對飛秒雷射的加工沒有太大的影響。推論是因為飛秒雷射為光解加工的關係，因此加工材料只要接收到飛秒雷射的脈衝能量，分子鍵結即遭到破壞，因此跟加工表面粗糙度無關。而飛秒雷射的脈衝數量到一定值後，移除效率也不再增加，跟 Nd:YVO₄ 的加工情形相同。

第五項觀察的重點：Nd:YVO₄ 與飛秒雷射加工之形貌探討。試片經雷射加工後，以白光干涉儀量測之，圖 9 為飛秒雷射的加工結果，除了聚焦點外，加工表面沒有其他破壞的情況，加工的孔壁垂直度高，加工底面平整，這是因為飛秒雷射屬於冷加工機制，因此材料沒有明顯熱效應的產生。圖 10 為 Nd:YVO₄ 雷射的加工結果，孔壁並非垂直，越往材料表面，則孔徑越大，此外，加工表面除了聚焦點外，尚有其他缺陷，推因為 Nd:YVO₄ 為光熱加工。再以掃描式電子顯微鏡觀察，可得出圖 11 為飛秒雷射對 SUS 430 不鏽鋼的加工結果，材料表面僅有蝕刻的孔洞，不似圖 12 中，Nd:YVO₄ 雷射的加工結果，在加工孔洞周圍有堆積的殘料，且四周還有出現噴濺的現象，影響了加工後的表面精度。

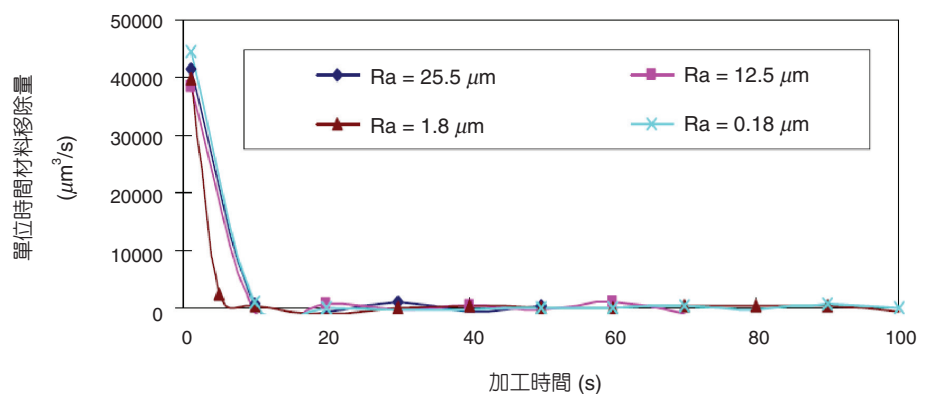


圖 8.

飛秒雷射加工時，材料的表面粗糙度與加工時間對單位時間移除量關係圖。

五、探討與分析

目前微機電技術應用於微細加工及精密加工已相當普遍，如何能做出微小零件等裝置都是現在的重要課題，雷射加工因為其優良的加工特性近幾年來受到業界的重視。但雷射種類眾多，應用範圍相對也更加廣泛，本文針對國內目前尚未有許多研究之飛秒雷射的基本加工性質作探討，這是期望能對雷射的精密加工有所貢獻。以下分別針對 Nd:YVO₄ 雷射和飛秒雷射的實驗結果作一詳細的說明。

1. 飛秒雷射加工

由實驗結果證實，飛秒雷射加工機制主要為光解作用，且適合加工於金屬材料和 PMMA 等高分子材料。另外，隨著雷射脈衝數量的增加，SUS 430 和 316L 不鏽鋼板的蝕刻深度亦隨之增加、剝蝕速率降低；而在相同雷射脈衝重複頻率下，當雷

射脈衝平均功率比較高時，其材料移除率大於雷射脈衝平均功率較低時的材料移除率；至於材料表面粗糙度對飛秒雷射加工並無顯著影響。

2. Nd:YVO₄ 雷射加工

由實驗結果證實 Nd:YVO₄ 雷射加工機制大多為光熱作用，適合於加工在金屬材料，無法精密加工於 PMMA，因為雷射波長無法被此類材料吸收。在加工參數方面，隨著雷射脈衝數量的增加，SUS 430 和 316L 不鏽鋼板的蝕刻深度亦隨之增加、剝蝕速率降低；而在相同雷射脈衝平均功率下，當雷射重複頻率比較低時，單位雷射脈衝能量較高，其材料移除率大於雷射重複頻率較高時的材料移除率，但雷射重複頻率比較高時，其加工表面精度較高；其中對 SUS 430 及 316L 不鏽鋼板的加工移除率相當，但是 316L 不鏽鋼板加工後的表面形貌較佳；至於材料表面粗糙度愈低，其加工效率愈高，但僅限於初期加工。

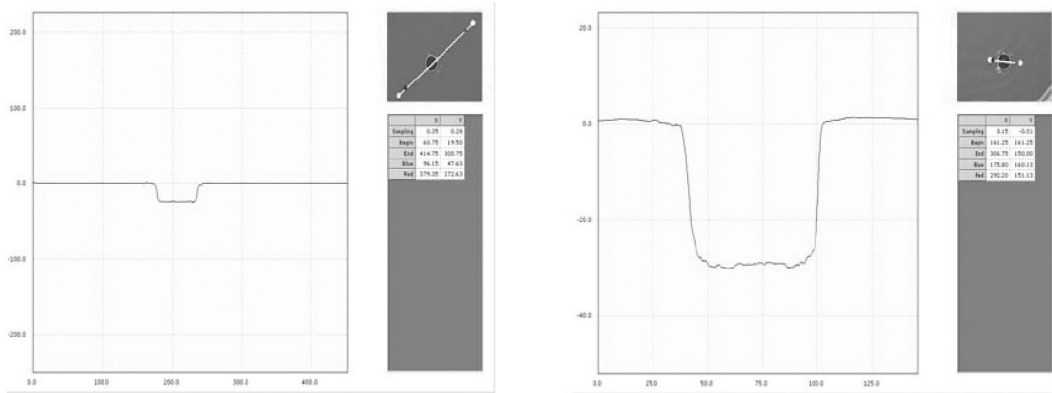


圖 9. 飛秒雷射加工 SUS 430 不鏽鋼之孔徑剖面圖。

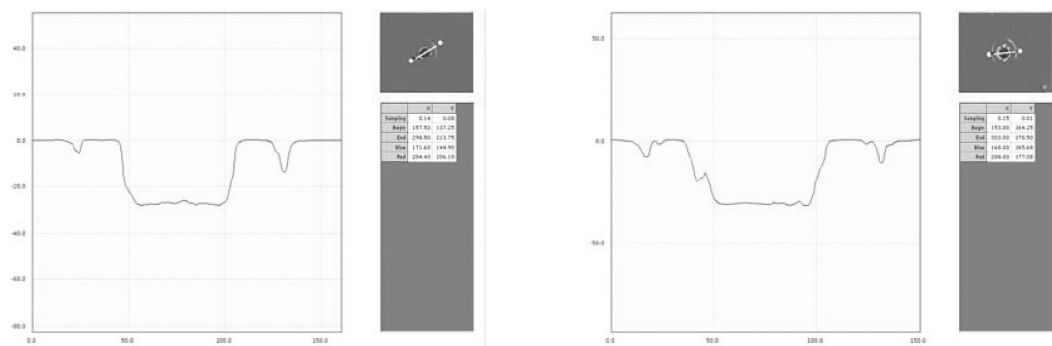


圖 10. Nd:YVO₄ 雷射加工 SUS 430 不鏽鋼之孔徑剖面圖。

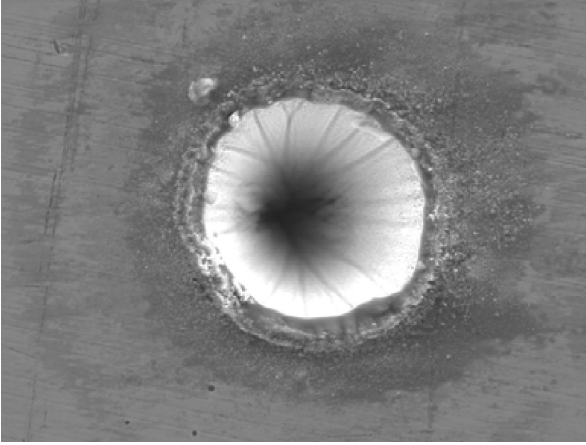


圖 11. 飛秒雷射加工 SUS 304 不鏽鋼孔之 SEM 掃描圖。

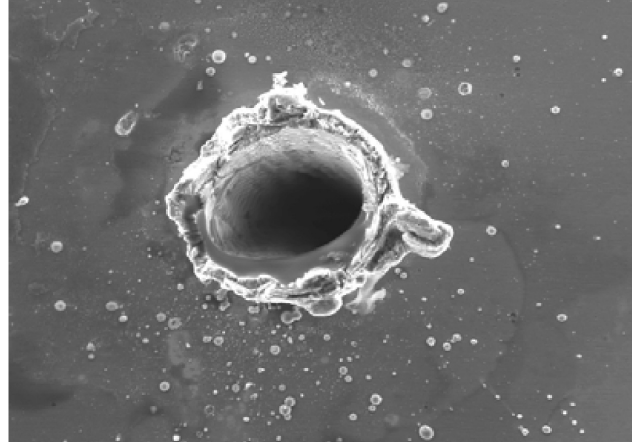


圖 12. Nd:YVO₄ 雷射加工 SUS 304 之 SEM 掃描圖。

六、飛秒雷射加工之未來展望

飛秒雷射具有優異的光解加工機制，而且沒有加工材料上的限制，比起其他加工方式更加有彈性。因此期待未來可更廣泛的應用於業界，例如：導光板結構、生醫科學之心導管支架、精密光學結構，以及近視手術等精密製造及治療。而在研究方面，希望可對其加工機制有更清楚且深入的了解，俾在應用上可以輕易的操控飛秒雷射。

參考文獻

1. M. Lenzner¹, *et al.*, *Appl Phys A*, **68**, 369 (1999)
 2. M. D. Perry, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **85**, 6803 (1999).
 3. L. V. Keldysh, *Sov. Phys. JETP*, **20**, 1307 (1965).
 4. M. D. Perry, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **85**, 6803 (1999).
 5. R. Stoian, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 097603 (2002).
 6. D. Breistling, *et al.*, *SPIE*, **5339**, 49 (2004).
 7. B. Rethfeld, *et al.*, *Appl. Phys. A*, **79**, 767 (2004).
 8. C. Y. Chien and M. C. Gupta, *Appl. Phys. A*, **81**, 1257 (2005).
 9. F. Korte, *et al.*, *Appl. Phys. B*, **77**, 229 (2003).
 10. F. Dousinger, *et al.*, *Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications*, Springer-Verlag (2004).
 11. J. Kruger and W. Kautek, *Adv. Polym. Sci.*, **168**, 247 (2004).
 12. S. Notle, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 2416 (1997).
-
- 楊宏智先生為澳洲新南威爾斯大學機械工程博士，現任國立台灣大學機械工程研究所教授。
 - 林芳妃女士為國立台灣大學機械工程研究所博士班學生。
 - 黃欣怡女士為國立台灣大學機械工程研究所碩士。
 - Hong-Tsu Young received his Ph.D. in mechanical engineering from the University of New South Wales, Australia. He is currently a professor in the Institute of Mechanical Engineering at National Taiwan University.
 - Fang-Fei Lin is a Ph.D. candidate in the Institute of Mechanical Engineering at National Taiwan University.
 - Shin-Yi Huang received her MSc. in mechanical engineering from National Taiwan University.