

為成形具大量規律的精微模坑模仁之電磁驅動高速衝印技術

A high-speed stamping technique with electromagnetic drive for making micro-core with regular and considerable amounts of the microdimples

蔣兆嶸*、林柏安、陳順同

國立臺灣師範大學 機電工程學系碩士研究生

*E-mail: cim8342@gmail.com

摘要

本研究旨在開發以市電電力驅動的高頻電磁衝印技術，應用於高速製作大量規律且精密的微模穴結構。研究以家用交流電源驅動的 E-I 型電磁鐵及衝印機構設計，透由交流電交變特性與電流磁效應，設計出電磁鐵能創造出 120 Hz 的高頻正弦波振動。碳化鎢衝擊頭受電磁鐵的弦波作用而瞬間提升加速度，形成急跳度運動，增加了衝擊頭的衝印動能。材料受衝擊頭的高速撞擊而形成設計的衝印造型與深度。衝印機構上設計 V 型軸承及彈簧復歸機構，衝印軸能密貼著 V 型軸承作上下線性運動，故衝印軸能維持一維自由度以獲致精確的衝程高度及衝印頻率。CNC 高頻衝印系統上亦設計線上研削機構，以提供球面及非球面的衝擊頭之即時研削成形，衝擊頭能免於線上校正並能隨時磨除沾黏的殘渣。

實驗結果證實，完成 400 個規律的非球面微模穴，時間僅需 3.4 秒，且微模穴周圍沒有毛邊，幾何形狀具高一一致性；並且，成形的弧長與設計的弧長之疊合率達 96%；而衝擊頭弧長與成形的弧長疊合率幾乎達 99%；由晶相實驗得知，受衝印的微模穴表面，因衝擊頭的急跳度運動使晶粒細化且晶界曲折，能阻擋差排發生及微裂紋擴展，且壓應力使晶格結構變得紮實，證實本研究提出的高頻電磁衝印技術不但具高速、高密度及高一一致性，更具高轉寫率及低成本特性，具商業化價值。

關鍵詞：電磁驅動、急跳度、高頻衝印、精微模坑

Abstract

A high-throughput stamping process technology is proposed for high-speed manufacturing of regular, accurate microdimple structures in large quantity. Due to the alternating nature of AC power and magnetic effect of current, the designed electromagnet is capable of creating sine vibrations at 120 Hz. Acceleration increases instantaneously when a tungsten carbide stamping head is subject to the electromagnet's sine vibrations, resulting in a jerk motion increasing kinetic energy of the stamping head. Desired shapes and depths are realized as the stamped material is subject to high-speed impact from the stamping head. To provide timely grinding with spherical and aspherical stamping heads, an on-process grinding mechanism is designed on the CNC high-frequency stamping system, where on-process calibration is not required for the stamping head and attached residues are removed instantly.

It took only 3.4 seconds to finish an array of 400 highly regular aspherical microdimples with no

burring around the dimples; in addition, the form of the arc length is 96% consistent with the design. The arc length of the stamping head overlaps nearly 99% the formed arc length. Metallographic testing shows that the proposed stamping jerking technique produces grain refinement and grain boundary indentation on the surface of stamped microdimples that prevents dislocation and expansion of microfractures. Moreover, compressive stress makes the lattice structure of stamped material more solid. The study proves that this high-frequency electromagnetic stamping technology combines high speed, density and consistency with an outstanding transcription-rate.

Keywords: electromagnetic drive, Jerk, high-throughput stamping process, microdimple

1. 前言

為提升製品外觀的美感價值及達到具有機能性表面的需求，零件表面經常製作各種微紋理 (Microtexturing)。微紋理可由各種大量的凹凸圖案構成，包括圓形，橢圓形或橄欖形等。最典型的微紋理圖案如大量的微型凹坑，外觀尺寸設計介於 2.0~0.2 mm 之間。零件表面施作大量的微模穴不但能提升美觀度，更具特殊的機械性質，如材料表面以微壓痕或珠擊法產生微模穴時，受撞擊的區域便產生具壓應力模式的柚皮面，晶粒細化，組織紮實，能改善零件的疲勞壽命。若將微型凹坑大量製作於機器床台的表面，則可當微小貯油池使用，提供適當的介面潤滑；而大量且規律的微模穴更有助於減少零件接觸的面積，降低磨耗和摩擦熱發生。大量微模穴的製程方法很多，Saito 和 Masuda (2004)報導[1]，以珠擊法撞擊退火鋼表面，其大量微模穴所產生的殘留壓應力可提升 200%；Sadeghi (2019)等人[2]以 CO₂ 雷射在 Ti₆Al₄V 表面製作微模穴陣列，能改善 TiO₂ 層的摩擦性能，Ding 等人(2021)[3]也認為微模穴的幾何形狀對零件的摩擦係數有明顯的影響，不過，雷射紋理也同時會在微模穴表面產生變質層或周圍發生突出部。機械式創成法能依 CNC 程式路徑，精準控制微模穴的特徵尺寸，Suzuki (2011)等人[4]透由超精密加工的橢圓振動切削，控制推力方向的振動幅度，能精準地控制切削深度，並製作出大量規律的微模穴。Yoshioka (2020)等人[5]利用超磁致伸縮致動器驅動快刀伺服系統，以便控制超精密加工機主軸旋轉中的銑刀軸向運動，進而在曲面上製造出大量的微模穴。上述每種技術都有它們的優勢與其侷限性。本研究透由電流磁效應驅動衝印軸，衝擊頭能產生高頻往復式的急跳度運動而以更高的衝擊能量撞擊工件表面，材料表面瞬間的彈塑性變形而形成大量且規律的微模穴，這些微模穴能用於儲油或改善工件表面的疲勞強度及耐磨耗性。

2. 研究方法

2.1 急跳度與衝印應用

一質點(Particle)在單位時間內位移的運動軌跡(圖 1(a)-(1))，從物理學觀點可得知此質點的速度(v)(圖 1(a)-(2))，加速度(a)(圖 1(a)-(3))與急跳度(Jerk)(J)(圖 1(a)-(4))。所以急跳度可視為加速度在單位時間的變化，如式(1)所示，式中，s 與 t 分別為距離與時間。當物體以急跳度模式撞擊另一物體時，其所產生的衝擊效應會高於以加速度撞擊的效應，主要原因是物體能在更短時間內，加速其加速度。如圖 1(a)-(4)所示的急跳度運動，幾乎呈現垂直直線的軌跡，意謂賦予此質點的動能被提高了。當成驅動的衝印軸可使衝印軸產生比加速度更快速的急跳度運動，

故可視為鈍擊力的衝量，使物體表面因衝印力而瞬間產生凹坑，凹坑表面的材料承受撞擊壓應力，晶粒被擊碎而細化(圖 1(b))，質地結構紮實且堅固地結合在一起，能有效抑制微裂紋發生。反之，材料若處於拉應力模式，則將導致疲勞破壞，Han (2016)等人[6]研究超高強度零件的熱衝壓，發現拉應力加速材料的損傷，原因是拉應力試圖將材料拉伸分離，終導致微裂紋發生。

$$J(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} = \frac{d^3s(t)}{dt^3} \tag{1}$$

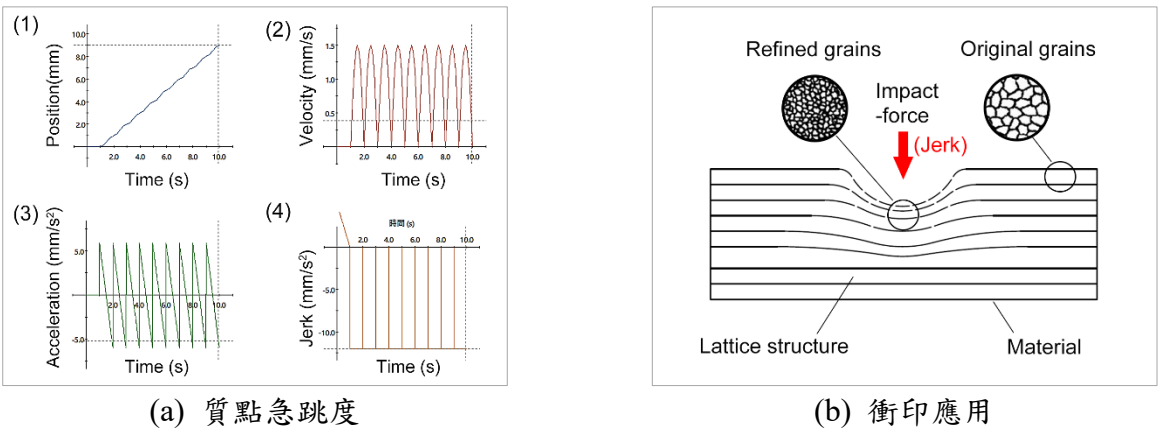


圖 1 急跳度之衝印應用

2.2 製程技術

碳化鎢衝擊頭經真空硬焊(圖 2(a))後；定位於自行設計的 CNC 高頻衝印系統上，進行線上研削成形(圖 2(b))；設計的電磁鐵被市電電力以 60 Hz 的電流交變相位驅動，能產生 120 Hz 的正弦波高頻往復運動(圖 2(c))，衝印軸受電磁鐵高頻往復運動的驅動而轉成高頻急跳度運動，遂賦予衝擊頭以鈍擊力模式進行高頻衝印；衝擊頭的高頻衝印與工件的快速且精準的位移，兩者需精密地嚙合，因此規律且等深度的微模穴陣列能被快速衝印成形(圖 2(d))；衝擊頭設計包括凸圓部與平面部，透由 CNC 路徑規劃，凸圓部可以被加工成球面或非球面，在急跳度作用下，被撞擊的材料能順著衝擊頭的造型，往深度方向快速塑性變形，終形成具有高平整度表面的微模穴(圖 2(e))；若衝擊頭未設計平面部，則部分材料將往上塑性變形，而形成毛邊(圖 2(e'))；衝擊頭在高頻的急跳度驅動下，大量具高一致性的微模穴能在數秒內於 6061 鋁合金工件表面上成形(圖 2(f))，過程中，幾乎沒有切屑及毛邊發生，是符合環保的綠能製程技術。

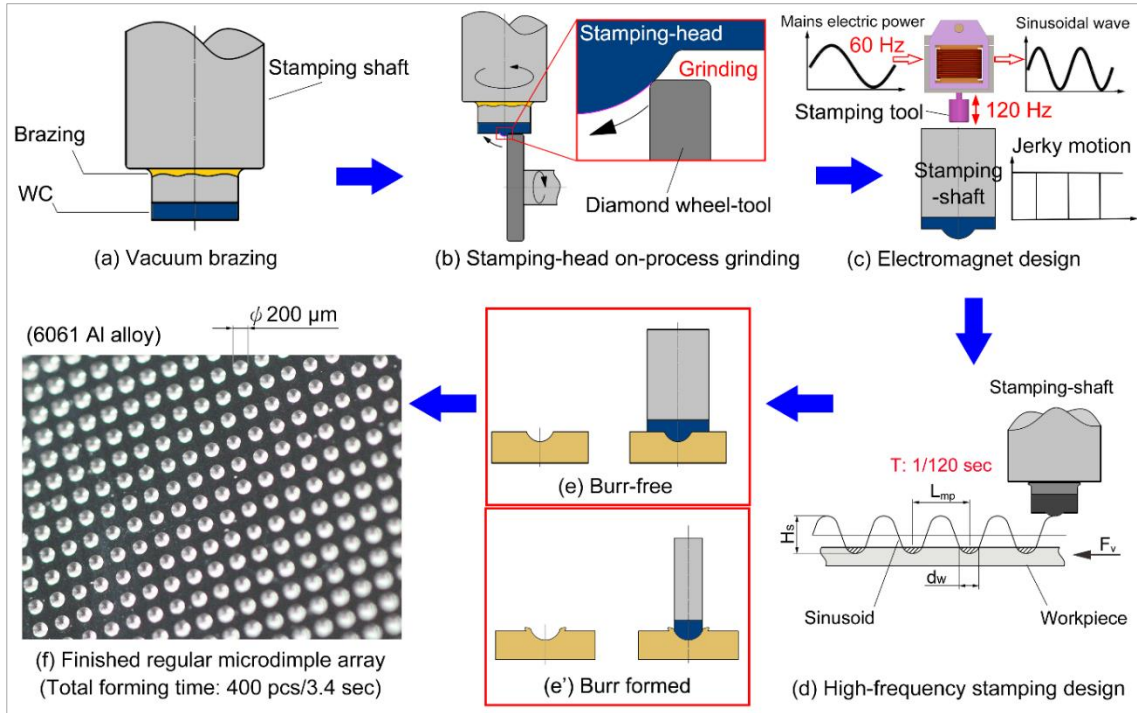


圖 2 高頻衝印製程技術

3. 實驗裝置

3.1 變壓器鐵芯設計

以電磁機構驅動工具進行衝印，可避免旋轉機構所發生的偏心震動問題，且工具作動頻率可達機械式驅動的三倍(即 120 Hz)。當電流輸入一工整纏繞且為封閉路徑的漆包線組時，垂直於線圈纏繞的方向，將產生一電磁力(F_m)，依必歐-沙伐定理(Jackson, 1999)[7]，漆包線的磁通密度(B)可表示如式(2)所示，式中， r_c , I , μ_0 , L_{coil} , N_{coil} 分別為漆包線圈所繞半徑，輸入的電流，導磁係數，漆包線長度以及線圈匝數(Norman et al., 1980)[8]。不過，只靠線圈磁通密度(B_{coil})並不足以有效驅動工具，因此本研究設計具絕緣的 E-I 型疊層矽鋼(圖 3(a))，使漆包線工整纏繞於疊層矽鋼片上，共同形成變壓器鐵芯(圖 3(b))，所以總磁通密度(B_{total})為線圈磁通密度(B_{coil})與疊層矽鋼片磁通密度(B_{si})之和，如式(3)所示，如此便可產生足夠的電磁力(F_m)，如式(4)所示。

$$B = \frac{\mu_0 \times I}{2\pi \times r_c} = \frac{\mu_0 \times N_{coil} \times I}{L_{coil}} \quad (2)$$

$$B_{total} = B_{coil} + B_{si} \quad (3)$$

$$F_m = B_{total} \times I \times N_{coil} \times L_{coil} \quad (4)$$

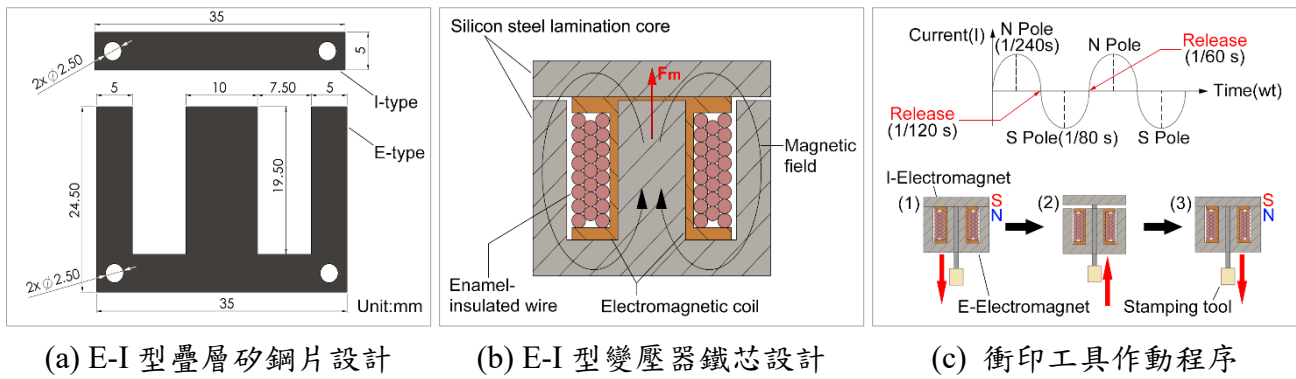


圖 3 E-I 型疊層變壓器鐵芯設計

3.2 輸出頻率

市電電力所提供的瞬時電功率(P)可表達如式(5)所示，式中， V_e , I , V_m , ω , t_e 及 R 分別為市電電壓，輸入電流，最大交流電壓值，角速度，經歷時間以及電阻。" $\sin^2(\omega t)$ "項透由三角恆等式關係可得出式(6)， ωt 可視為市電提供的交流電電流相位，呈現正弦波形(圖 3(c)上圖)。當電流達第一個弦波峰值時(1/240 秒)，E 型矽鋼片上方產生 N 極，I 型矽鋼片產生 S 極，兩者便在瞬間互吸，迫使衝印工具也在瞬間往下運動，其運動所用的時間，比加速度的時間更短(圖 1(a)-(4))，從物理學運動模式看，衝擊頭的運動模式為加速度在單位時間內的變化，故係以急跳度模式往下衝擊(圖 3(c)-(1))；當電流降至 X 軸時(1/120 秒)，矽鋼片釋放極性，衝印工具受壓縮彈簧作用而急速跳回(圖 3(c)-(2))；當電流達第二個弦波峰值時(1/80 秒)，兩矽鋼片再度吸引，衝印工具再往下衝擊(圖 3(c)-(3))，並在 1/60 秒時，矽鋼片再度釋放極性，因此衝印工具在 1/60 秒內，被驅動 2 次，意謂 60 Hz 的市電電力，可使衝印工具每秒創造出 120 次的急跳度運動。

$$P = V_e \times I = V_m \sin(\omega t) \times (V_m \sin(\omega t)/R) = (V_m^2/R) \times \sin^2(\omega t) \quad (5)$$

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \quad (6)$$

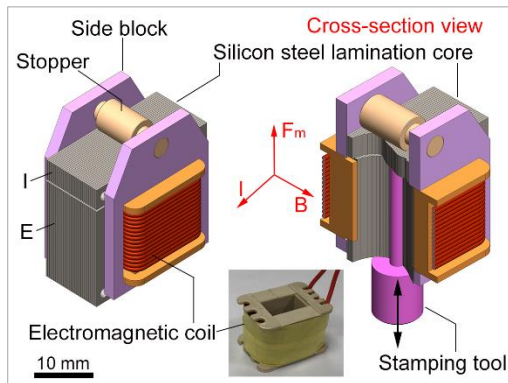
3.3 高頻衝印系統設計

由 E-I 型矽鋼片疊層組合而成的電磁鐵驅動機構設計如圖 4(a)左圖，表 1 是這項研究的規格設計，如圖 4(a)的剖視圖，漆包線以 4,100 匝工整地纏繞於矽鋼片疊層外圍，依弗萊明左手定則(Kim, 2017)[9]，電磁力(F_m)將由 E 型矽鋼片往 I 型矽鋼片方向作用(圖 3(b))，E 型及 I 型矽鋼片兩者便能隨輸入的電流交變，達高頻開合運動，故能驅動衝印軸執行相同的高頻上下運動。整組電磁鐵驅動機構精密組裝於衝印系統上，如圖 4(b)所示。為使衝擊頭端部形狀能直接於衝印系統上進行線上研削成形，衝印機構上配備一低速主軸穩定旋轉。而衝擊頭與工件表面間的時間，可透由微調機構調整，以便獲得所需的衝印深度。

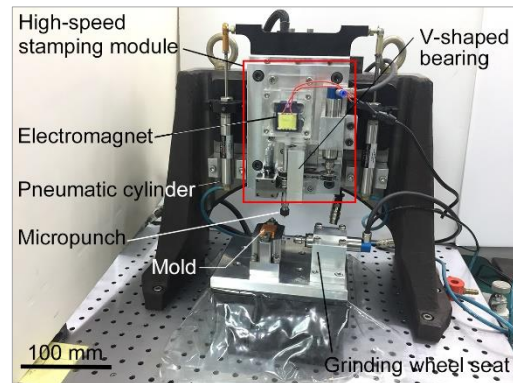
表 1 電磁鐵驅動系統設計規格

Parameters	Conditions
Mains voltage (V_e)	110 V

Input current (I)	0.05 A
Total magnetic flux density (B_{total})	1.82 T
Electromagnetic coil (N_{coil})	4,100 turns
Magnetic permeability (μ_0)	$4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$
Thickness of Si-steel sheet (t_{si})	0.35 mm
Electromagnetic force (F_m)	6.3 N



(a) 電磁鐵驅動機構設計



(b) 完成的高頻衝印系統

圖 4 高頻衝印系統

4. 實驗程序

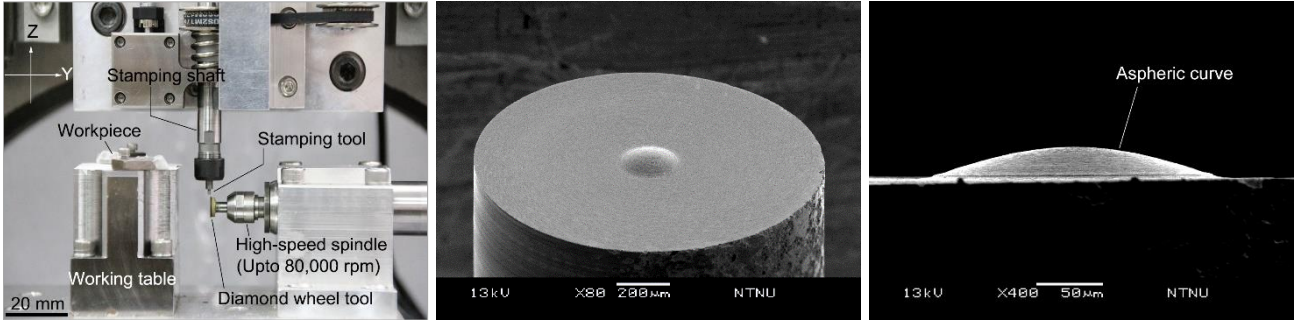
4.1 衝擊頭線上研削

微模穴最大直徑尺寸設計僅為 $\phi 200 \mu\text{m}$ ，這使得衝擊頭於工作台上不易對位。為使衝擊頭具自動對位能力，本研究設計線上研削機構於開發的 CNC 高頻衝印系統上(圖 5(a))，提供高達 80,000 rpm 的高速主軸及聚晶鑽石磨輪給衝擊頭研削。衝擊頭安置於衝印軸後，便不再拆卸，由 CNC 衝印系統上的座標系統對碳化鎢衝擊頭進行研削成形(圖 5(b))，研削路徑提供球面軌跡與非球面軌跡(圖 5(c))。完成的衝擊頭被改換至衝印工作座標以便對鋁合金進行高頻衝印，表 2 為衝擊頭與工件材料之機械性質，兩種材料的硬度與降伏強度差距懸殊，材料彼此撞擊，鋁合金承受超過 165.4 MPa 便發生降伏而變形，所以碳化鎢材料不易發生磨耗。由於鋁合金降伏強度低，容易在形變過程中，分解微量的殘渣並沾黏到碳化鎢衝擊頭表面，所以，線上研削設計的另一項重要目的是藉由研磨座標的補償，提供衝擊頭快速磨除沾黏的材料，以便再次且快速被線上使用，此可使衝擊頭免於重新定位與線上校正的繁瑣程序。

表 2 工件與衝擊頭材料之機械性質

Parameters	Mechanical properties	
	Tempered 6061 Al alloy (Workpiece)	Tungsten carbide (WC) (Stamping head)
Density	2.7 g/cm ³	15.63 g/cm ³
Hardness	40 HRA	91 HRA
Young's modulus	61.3 GPa	620 GPa

Shear modulus	28 GPa	270 GPa
Yield strength	165.4 MPa	5.0 GPa
Fracture toughness	28 MN/m ^{3/2}	3.7 MN/m ^{3/2}
Poisson's ratio	0.34	0.21



(a) 線上研削機構設計

(b) 研削完成的衝擊頭

(c) 非球面衝擊頭

圖 5 碳化鎢衝擊頭線上研削

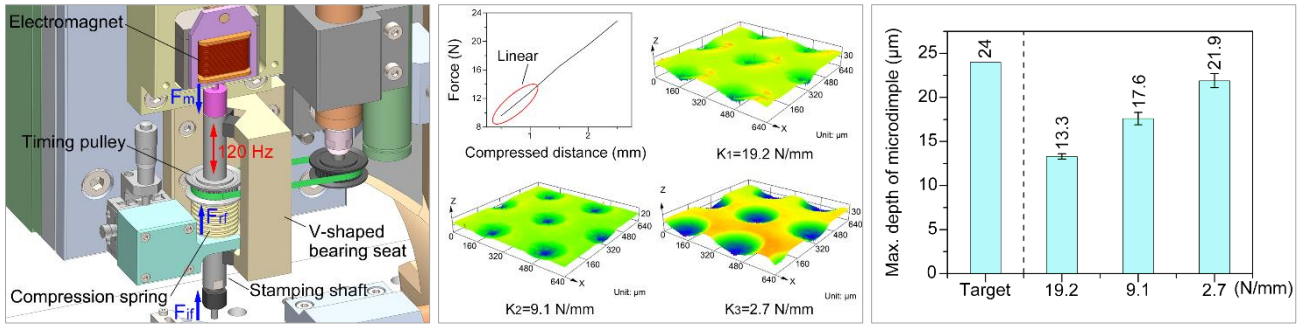
4.2 彈簧勁度影響

為使衝印軸在相應時間快速回復，衝印軸的復歸機構係以壓縮彈簧設計(圖 6(a))，同時可吸收多餘的作用力，所以彈簧的勁度(k_s)扮演重要角色。彈簧勁度的相關因子可如式(7)所示，式中， G , d_{sw} , D_m 與 N_a 分別為彈簧材料剛性模數，彈簧線徑(d_{sw})，彈簧節徑及有效圈數。實驗嘗試以各種不同的彈簧勁度進行衝印測試，表 3 為實驗參數。實驗結果僅列出可能性的深度(圖 6(b))。在固定的衝印力(F_{if})作用下，彈簧勁度愈小，衝擊頭固然可產生更高的衝擊速度(V_{iv})，形成更深的微模穴，但彈簧的回復力(F_{rf})也愈小，彈簧愈不容易在瞬間回復原位，會導致衝擊頭發生不精確的的作動頻率(f_a)。實驗結果顯示 2.7 N/mm 的彈簧勁度最接近目標深度(圖 6(c))。

$$k_s = \frac{1000 \times G \times d_{sw}^4}{8 \times D_m^3 \times N_a} \quad (7)$$

表 3 最適彈簧勁度實驗參數

Parameters	Conditions
Actuating frequency (f_a)	120 Hz
Pitch of microdimple (L_{mp})	300 μ m
Spring stiffness (k_s)	19.2, 9.1, 2.7, 2.2 N/mm
Workpiece feed-rate (F_v)	2,160 mm/min
Maximum depth of microdimple (d_d)	20 μ m
Workpiece material	Tempered 6061 Al alloy
Tool material	WC
Coolant	Dry air



(a) 彈簧復歸機構設計

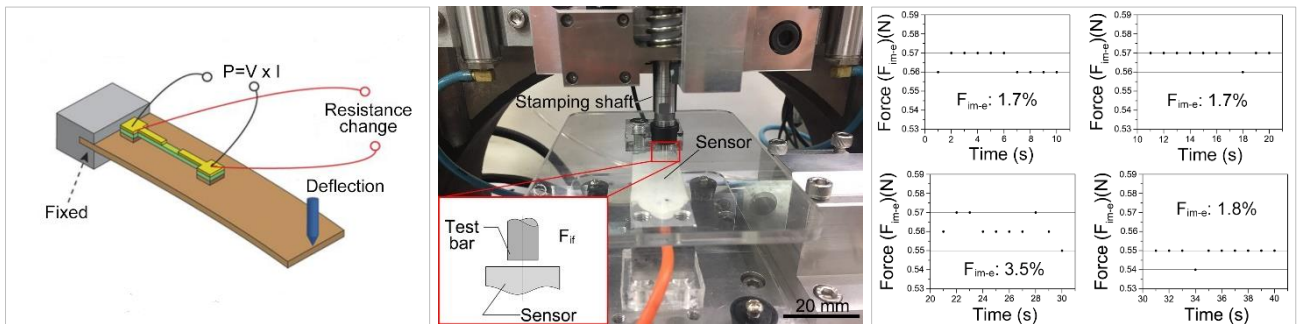
(b) 衝印的微模穴深度

(c) 彈簧勁度與微模穴深度

圖 6 彈簧勁度影響

4.3 衝印力重現性

為測得衝印力的重現精度，令衝印軸作用於壓阻式壓力感測器上(圖 7(a))，感測器會因壓阻效應而回饋作用力大小，本項裝置測得的衝印力解析度可達 0.01 N(圖 7(b))。在固定的衝印高度下，衝印深度定為 20 μm 以便模擬微模穴深度，並以每 10 秒平均的衝印力作紀錄。測試結果發現衝印力分佈在 0.54 N~0.57 N 之間，經統計得知，每 10 秒的衝印力百分比誤差(F_{if-e})小於 4%(圖 7(c))，誤差來源推估可能是電磁鐵作動所產生的熱影響，造成電磁鐵的電阻上升，致使作用力發生些微誤差。若模穴深度公差定為 1 μm (5%)，則此項誤差轉換至衝印深度約為 0.8 μm，是在可被接受的範圍。



(a) 壓阻感測器示意

(b) 衝印力測試

(c) 衝印力重現性

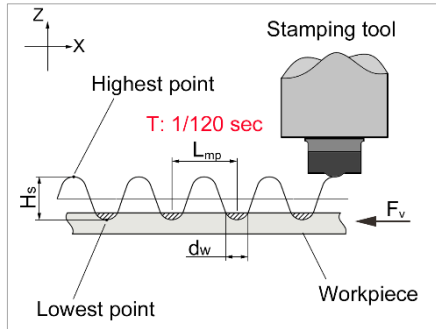
圖 7 衝印力重現性實驗

4.4 工件進給率決定

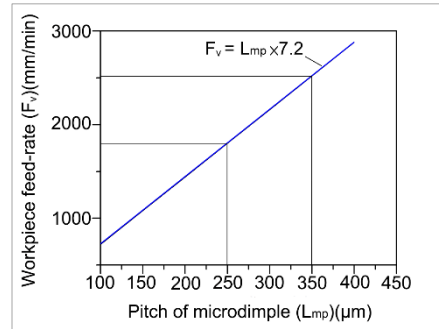
衝印過程，衝擊頭與工件共同描繪出衝擊頭正弦波形的運動軌跡(圖 8(a))。工件進給率(F_v)可由式(8)求出，式中， L_{mp} 與 T 分別為微模穴間距與衝擊頭的作動週期，所以工件進給率可視為單位時間工件的移動量。將作動週期 1/120 秒代入上式，並經單位換算後，可得式(9)，說明微模穴節距與工件進給率呈線性正比關係(圖 8(b))。Joshi (2016) 等人[10]報導，200 μm 的微模穴間距，可使賽隆相陶瓷材料的介面摩擦係數降低 60%。測試結果發現，工件進給率在 1,800~2,520 mm/min 之間，微模穴可得完整的真圓度及適當的凹坑間距(250, 300 及 350 μm)。當進給率提高至 2,880 mm/min 時，微模穴便發生刮削誤差，導致凹坑單方向擴大而影響凹坑的最大寬度(d_w)(圖 8(c))；至於微模穴的最大深度(d_d)，衝印過程可能因材料加工硬化導致衝印深度不足，不過因衝印力固定，所以深度具一致性(圖 8(d))。

$$F_v = \frac{L_{mp}}{T} \quad (8)$$

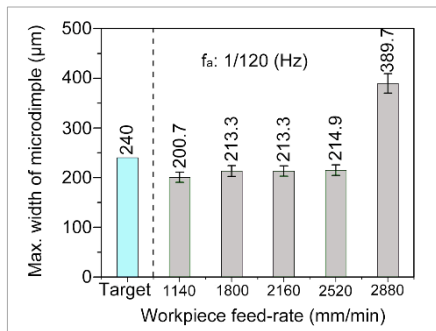
$$F_v = \frac{1000}{1/120} \times 60 = L_{mp} \times 7.2 \quad (9)$$



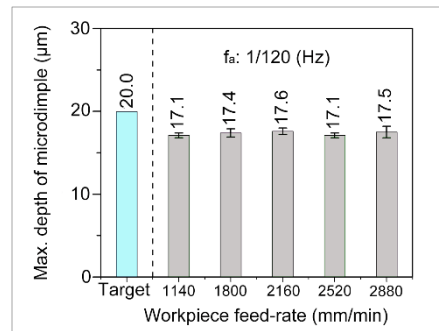
(a) 衝擊頭運動軌跡



(b) 微模穴間距與工件進給率關係



(c) 微模穴最大寬度



(d) 微模穴最大深度

圖 8 工件進給率決定

5. 驗證

由上述系列實驗獲得微模穴衝印的最適參數如表 4 所示。實驗以 400 個高密度微模穴陣列規劃(圖 9(a))，進行衝印驗證。實驗結果發現，大量微模穴能獲致整齊排列，且具高密度與高一致性外觀(圖 9(b))，全程時間僅需 3.4 秒；每顆微模穴具相同的表面形貌(圖 9(c))，意謂衝擊頭的衝印力與彈簧回復力能獲致精密匹配，且衝擊頭的作動頻率(120 Hz)能精密嚙合工件的進給率(2,160 mm/min)，遂能創造出高一一致性轉寫率與工整排列的大量微模穴。

表 4 衝印參數驗證

Parameters	Conditions
Actuating frequency (f_a)	120 Hz
Spring stiffness (k_s)	2.7 N/mm
Workpiece feed-rate (F_v)	2,160 mm/min
Maximum depth of microdimple (d_d)	20 μm

Workpiece material Tempered 6061 Al alloy
Coolant Dry air

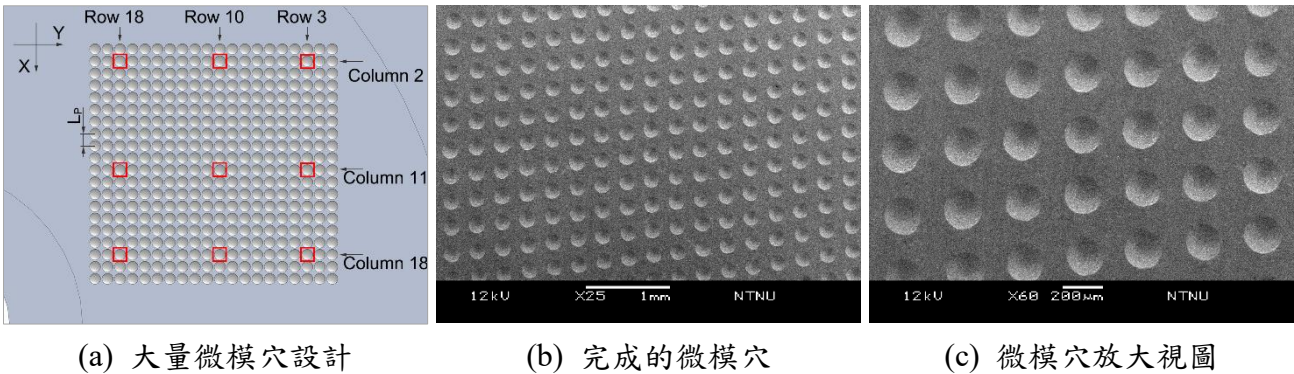


圖 9 大量規律微模穴之高頻衝印驗證

5.1 尺寸精度

以規律取樣檢驗，從成形的微模穴陣列取出 9 個微模穴(參考圖 9(a)所示)，並以雷射掃描式共軛焦顯微鏡量測。結果顯示微模穴平均深度與直徑分別為 15.2 μm (圖 10(a))及 189.2 μm (圖 10(b))，誤差可能原因是材料在高應變率下，可能發生回彈而影響衝印深度。至於微模穴間距，平均為 302.6 μm (圖 10(c))，誤差約 1%以內，可知微模穴陣列具規律與高一致性。

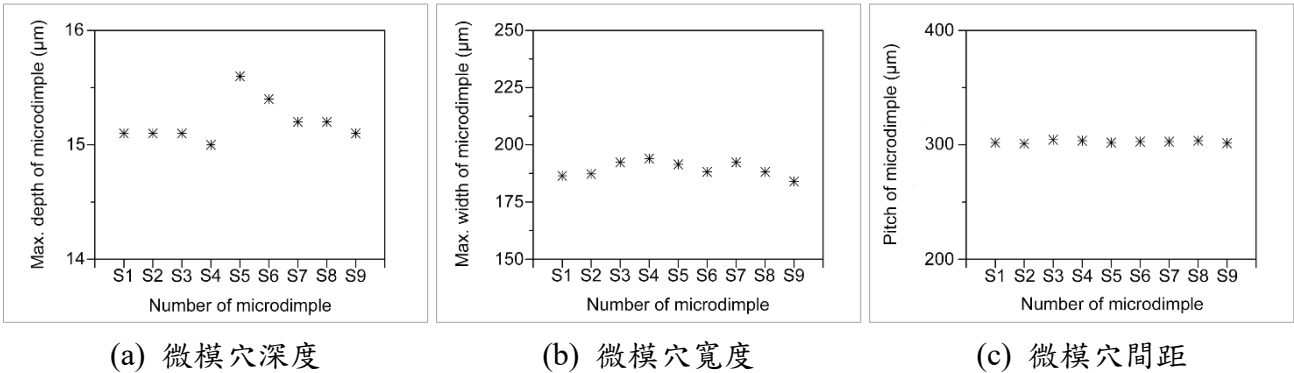


圖 10 成形微模穴的尺寸精度

5.2 斷面疊合率

實驗結果經量測後發現，每個微模穴都能保持完整的內圓輪廓及平坦的表面(圖 11(a))。取設計的微模穴，成形的微模穴及衝擊頭的三個曲面，以他們最大直徑的輪廓弧長作疊合(圖 11(b))，其疊合率(OL_{rate})可如式(10)所示，式中， $l_{overlap}$ 與 l_{design} 分別為重疊的弧長與設計的弧長，若將衝擊頭弧長(l_{head})與成形的弧長(l_{dimple})作疊合，其疊合的弧長與設計的弧長相比，發現其疊合率可達 96%；而衝擊頭弧長(l_{head})與成形的弧長(l_{dimple})之疊合率可達 99%，說明這項技術在合適的衝印參數下，不但具高成形效率，更具高轉寫率特性。

$$OL_{rate} = \frac{l_{overlap}}{l_{design}} \times 100\% = \frac{179}{187} \times 100\% \approx 96\% \quad (10)$$

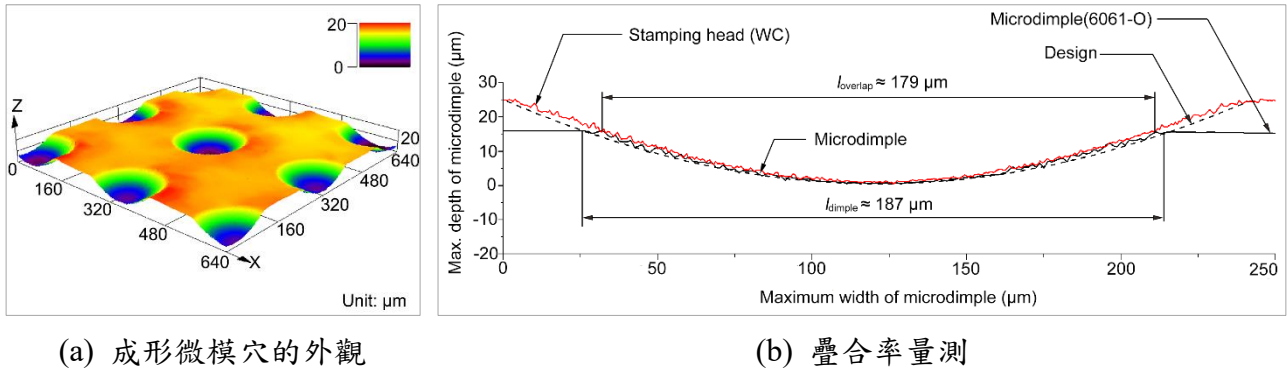
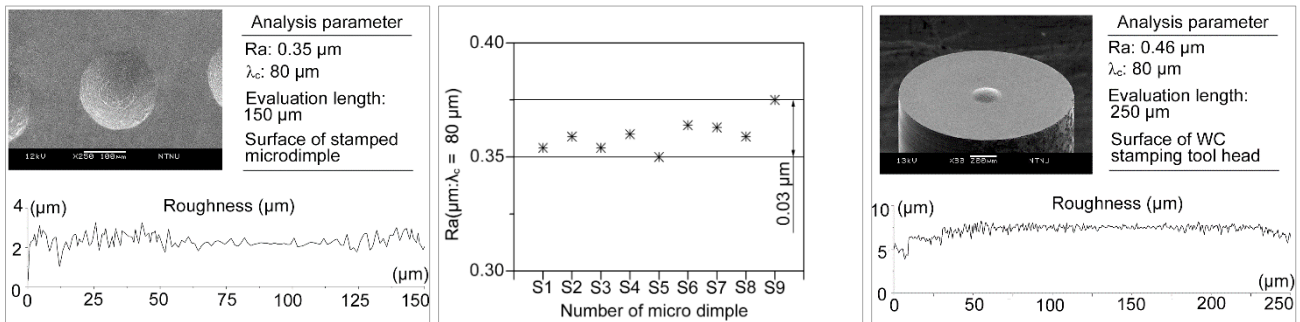


圖 11 微模穴斷面疊合率

5.3 表面粗糙度

取 9 個平均分佈的微模穴，進行表面粗糙度量測(圖 12(a))，所得之值平均落於 Ra 0.35~0.38 μm 之間(圖 12(b))，衝擊頭表面粗糙度為 Ra 0.46 μm (圖 12(c))。衝印過程，因衝擊頭設計了凸圓部與平面部，所以，工件表面除了形成凹坑外，凹坑周圍邊緣呈現平坦狀，沒有任何突出的毛邊，意謂高頻衝印能高速且忠實地轉寫出衝擊頭端部的形狀；在另一方面，受撞擊的材料表面，密度變高，表示微模穴表面組織變得更細緻且紮實，這說明了微模穴表面粗糙度之所以優於衝擊頭端部表面粗糙度的原因。



(a) 微模穴表面粗糙度

(c) S1~S9 表面粗糙度量測

(c) 衝擊頭表面粗糙度

圖 12 微模穴表面粗糙度量測

6. 結論

透由交流電的交變特性與電流磁效應，本研究成功開發出高頻衝印製程技術，衝擊頭受設計的電磁鐵驅動而產生高頻急跳度往復運動，衝擊頭能在極短時間內，提高加速度而提升衝印動能，大量非球面微模穴能在很短時間內被衝印成形，實現規律、高速、高密度與高一致性的衝印能力，證實此項製程是高效且具高可控性。實驗的相關過程以定性及定量法分析並獲得成功驗證。期望此技術未來可貢獻至精密機械產業。以下是本研究的結論摘要：

- 1) 一組以市電電力供應便可產生高頻交變的 E-I 型變壓器鐵芯被成功設計，它促使衝擊頭產生 120 Hz 的急跳度運動，能有效提升衝擊頭的衝印動能與衝印效率。
- 2) 透由線上研削機構設計，衝擊頭能於 CNC 高頻衝印系統上被研削成形；沾黏的衝擊頭，亦能被快速磨除再利用，省卻濺鍍類鑽膜的製程及繁瑣的校正時間。
- 3) 研發的高頻電磁衝印技術不但效率高，製程幾無切屑、毛邊及熱影響發生；比較起切削加工，

成本低且耗能少，是對環境友善的綠能製程技術。

- 4) 急跳度運動使衝擊頭以極高衝量的鈍擊力衝印材料，微模穴表面晶粒瞬間被擊碎並細化，晶界面積變多，強度增加，有助於改善零件的疲勞壽命。
- 5) 完成 400 個規律的非球面微模穴，時間僅需 3.4 秒，證實衝擊頭的衝印力能匹配設計的彈簧回復力，故能達成高效且精準的高頻衝印次數。
- 6) 實驗結果顯示，衝擊頭弧長(l_{head})與成形的微模穴弧長(l_{dimple})之疊合率幾乎達 99%，意謂高頻電磁衝印技術能實現高轉寫率的成形技術。

7. 致謝

本研究感謝科技部 MOST 109-2221-E-003 -008 -MY2 計畫經費支援，使實驗得以順利完成，在此表達誠摯謝意。

8. 參考文獻

1. Saito, H., Masuda, M., 2004. Modeling of blast process using indenting method. *Precision Engineering* 28, 369-377.
2. Sadeghi, M., Kharaziha, M., Salimijazi, H.R., Tabesh, E., 2019. Role of micro-dimple array geometry on the biological and tribological performance of Ti₆Al₄V for biomedical applications. *Surface & Coatings Technology* 362, 282-292.
3. Ding, S., Xu, J., Liu, P., Shi, Z., Yang, O., Hu, Y., 2021. Geometric influence on friction and wear performance of cast iron with a micro-dimpled surface. *Results in Engineering* 9, 100211.
4. Suzuki, N., Yokoi, H., Shamoto, E., 2011. Micro/nano sculpturing of hardened steel by controlling vibration amplitude in elliptical vibration cutting. *Precision Engineering* 35, 44-50.
5. Yoshioka, H., Kojima, K., Toyota, D., 2020. Micro patterning on curved surface with a fast tool servo system for micro milling process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 69, 325-328.
6. Han, X., Yang, K., Ding, Y., Tan, S., Chen, J., 2016. Numerical and experimental investigations on mechanical trimming process for hot stamped ultra-high strength parts. *Journal of Materials Processing Technology* 234, 158-168.
7. Jackson, J.D., 1999. *Classical Electrodynamics*, 3rd edition. John Wiley & Sons, New York, Chapter 5.
8. Norman, C.H., Edwin M.H., Mallmann A.J., 1980. *Physics Principles & Applications*, ISBN 0-07-026851-7, 704.
9. Kim, S.H., 2017. Chapter 2 - Control of direct current motors. *Electric Motor Control, DC, AC, and BLDC Motors* 39-93.
10. Joshi, B., Tripathi, K., Gyawali, G., Lee, S.W., 2016. The effect of laser surface texturing on the tribological performance of different Sialon ceramic phases. *Progress in Natural Science: Materials International* 26, 415-421.