

## 超冷對放電加工銅電極積碳影響之研究

黃立仁<sup>1</sup> 吳斌弘<sup>\*1</sup> 徐培欽<sup>2</sup>

Lih-Ren Hwang<sup>1</sup>, Wu-Bing Horn<sup>1</sup>, Pei-Chin Shui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中州科技大學 <sup>2</sup> 台灣超冷科技股份有限公司

電話: 0975-868102 E-mail: jordanwu123@gmail.com

### 摘要

本研究利用雕模放電加工機對燒結合金鋼進行放電加工實驗，主要探討電極極性、放電時間、放電間隙、高壓電流、低壓電流等加工之參數對材料去除率(MRR)、電極消耗率(EWR)、工件表面粗糙度、電極表面粗糙度等之影響。並以田口實驗計劃法之直交表規劃實驗，藉由統計方法中之變異數分析及貢獻度，探討燒結合金鋼放電加工電極極性、放電時間、放電間隙、高壓電流、低壓電流等五個主要加工參數，對電極超冷後進行放電加工時積碳的影響與關係，以評估放電加工參數對電極積碳之最佳加工參數組合水準值，以提供工業界及相關研究者參考。

**關鍵字：**放電加工、超冷處理、田口實驗計劃法

### ABSTRACT

The EDM electrode coke confuses the industry and researchers for a long time. So the copper electrodes after cryogenic treatment were introduced by this research. The relationship of electrode coke and EDMed parameters of polarity, duration time, discharge gap distance, high-voltage current, and low-voltage current of electrical discharge machining (EDM) were mainly processing parameters with powder metallurgical sintered alloy steel in this study.

The experimental results explored material removal rate (MRR), electrode wear rate (EWR), workpiece and electrode surface roughness highly relates processing parameters. Therefore, the statistical method and the contribution of relation with EDMed sintered alloy steel by Taguchi method of orthogonal array planning experiments. Analysis of variance by polarity, duration time, discharge gap distance, high-voltage current, and low-voltage current are the main processing parameters. Reduced electrode coke by ANOVA was negative polarity, 300  $\mu$ s duration time, 70 % discharge gap distance, 2.0 Amp high-voltage current, and 5 Amp low-voltage current.

**Keywords:** EDM, Cryogenic treatment, Taguchi method

## 一、前言

### 1-1 燒結合金鋼介紹

近年來隨著高科技產業的發展，各種機件應用的場合逐漸多元廣泛，所使用的環境也更加嚴苛，因此；各種不同用途的特殊材料便一一被開發出來，早期燒結製品強度要求不高的情況下，燒結材料大都是使用一元或二元合金，然而在市場的品質提高需要，高強度化燒結製品之要求日殷。在粉末冶金業中，鐵系燒結零件以往普遍使用鐵-銅-碳系統 (FC-xxxx)，但在高強度的鐵-銅-鎳-鉬-碳系統 (FLNC-xxxx 或 FD-xxxx) 現已成為主流之燒結材料。燒結硬化合物的基本概念乃是利用合金來提高硬化能 (hardenability)，使鐵系粉末冶金零件在燒結後能以控制冷卻速度的方式來避免波來鐵的成長，促使沃斯田鐵直接轉變為麻田散鐵，此燒結合金鋼種在不需要滲碳熱處理下即可達 HRC30 以上的硬度，因而使燒結硬化合物鋼能以更精簡的製程來達到提高效益的目的[1-7]，為了瞭解緻密且耐磨耗之燒結硬化合物加工性，改採用放電加工的方式對工件進行加工及表面改質，達到更優異的機械性質。

## 1-2 放電加工原理簡介

所謂放電加工是將工件(Workpiece)與電極(Electrode)分別安置在不接觸而由伺服機構維持工件與電極的間隙距離機器上,使加工部份浸於加工絕緣液中進行放電脈衝加工,主要放電加工參數為極性、放電電流、脈衝時間、脈衝休止時間、開路電壓、工作電壓、衝擊係數。伺服機構使工件與電極在加工絕緣液內接近,兩極間由電源供應數十至數百伏特電壓,當兩電極接近至數十 $\mu\text{m}$ 至數百 $\mu\text{m}$ 的距離時,發生放電火花,工件與電極的間隙形成一道離子化管道,高密度電流藉此流向工件而產生高溫、高熱的能量,當放電持續時,放電處熱量繼續增加,而使工件熔化,高溫使絕緣液氣化,並在放電處產生極大壓力,將熔蝕的材料沖離放電處,形成凹口,而凹口處的材料又被周圍的加工液迅速冷卻,這樣的過程在1秒內會反複了數萬甚至數十萬次,達到加工硬脆材料之目的。

放電加工特性以材料去除率(Material removal rate, MRR)、電極消耗率(Electrode wear rate, EWR)及表面粗糙度(Surface roughness, SR)三項為主。

- (1) 材料去除率(MRR):材料去除率是重量除以加工時間即為材料去除率(MRR),量測以重量除去法或體積量測法為主。
- (2) 電極消耗率(EWR):將電極消耗重量除以工件去除重量乘以百分之一百即為電極消耗率(EWR),量測以重量除去法為主。
- (3) 表面粗糙度(SR):加工面凹凸不平,其凹凸狀態即為表面粗糙度(SR),量測方法一般可分最大表面粗糙度 $R_{\text{max}}$ 、中心線平均粗度 $R_a$ 、十點平均粗糙度 $R_z$ 三種。

## 1-3 放電加工研究

放電加工的歷史最早始於1919年,在德國曾經利用放電腐蝕的觀念來製作金屬微細粉末,不過由於應用範圍不廣,因此未造成很大的迴響。此後在70年代末期對放電加工表面形貌、電極材料滲入母材的現象、電極消耗與加工表面粗糙度等等,逐步展開研究[8~11],而對加工表層特性有初步的瞭解。

1980年代開始,由於對加工表層特性的研究,除了定性的研究外,也逐漸展開定量之探討,並嘗試找出影響各表層特性的加工參數,並以統計方法與加工參數進行回歸分析,以其能由調整加工參數改善表層特性[12-18]作深入探討,並將表面裂紋生成的原因分為熱應力開離裂(thermal stress cracking)與張力開裂(tension cracking),並實際量測在不同加工參數作用下所引入殘留應力值與隨著深度的分佈[19-20]。以放電加工為主的微細精密加工則始於1960年代末期, Van Osenbruggen發表加工尺寸精密度可達到 $0.5\mu\text{m}$ 的放電加工機,其快速加工的技術可達到加工速度 $5\text{mm}^3/\text{min}$ ,而加工精密度也可以達到 $1.5\mu\text{m}$ ,最小的電極直徑也可以達到 $30\mu\text{m}$ [21~24]。

## 1-4放電加工表面缺陷

放電加工原理上乃是一種利用熱能加工的方式,在放電過程中,電極工具的電子高速撞擊其他粒子時會產生大量的熱能,使被加工件表面局部熔解甚至蒸發,被熔解之金屬一部份會被加工液帶走,以達到加工之目的。由於受熱是屬於局部性的,再加上急熱驟冷的交互作用,造成表面引進殘留應力、塑性變形及裂縫等缺陷。同時部份熱能繼續向被加工件內部傳遞,使材料金相組織發生變化,產生與原材不同的組織,即白層或變質層,而影響被加工件的機械性質。放電加工表面缺陷依加工物與電極種類、加工條件等的不同,則缺陷出現的型態就會有所不同,如:淺坑(Shallow craters)與痘瘡(Pockmarks)、球狀附著物(Globules of debris)、積碳、裂縫、白層與表面變質層、表面殘留應力..等[25-28]。

## 1-5 超冷處理

將真空隔絕的技術運用在超冷處理設備起源自美國 Applied Cryogenic, Inc. 公司總裁 Jeff Levin 麻省理工 博士。結合先進數位控制之微電腦處理器，全新技術的冷處理設備CP-100vi誕生於1985年。該設備於1991年由孫立德先生引進台灣後，將此設備製程處理命名為超冷處理(Cryogenic Treatment)。

極冷處理是公認對於工具鋼的增加磨耗壽命與減少殘留應力最有幫助的一種方法，與只有表面處理的表面鍍膜不同的是為一次性與永久性的全斷面處理，其最主要的目的在於：(1) 將殘留沃斯田體轉換成為麻田散體；(2) 使組織細膩、結構均勻並產生析出物；(3) 消除殘留應力。實驗方法為準備一個密閉空間，使用液態氮將溫度降至所需低溫，接著把材料放置於密閉空間中，保持一段時間，再取出，冷處理分為深冷處理 (sub-zero treatment  $-78^{\circ}\text{C}$ ) 與超深冷處理 (cryogenic treatment  $-196^{\circ}\text{C}$ )，兩者在實驗方法上完全一樣，僅處理溫度不同，而兩者所做出來的結果顯示超深冷試片的耐磨耗性優於深冷試片[29]。超冷處理可以改善工具的耐磨耗性，經過超深冷處理之工件比起被覆處理之工件在材質結構上較穩定 (Stable)、均勻 (Homogeneous)，且韌性 (Tough) 與耐震性 (Shock Resistant) 較佳。超深冷處理是由內而外的處理模式，可消除材料內能而表面被覆則是由外而內之處理，會增加材料內能[30]。

本研究利用燒結合金鋼為材料，電極分為一般紅銅棒與超冷處理過的紅銅棒，藉由兩種不同處理性質的電極，對燒結合金鋼放電加工時，更改不同加工參數，觀察微細放電不同參數對於積碳之影響。放電加工參數選擇以不同之放電電壓、放電電流、放電時間等加工特性之研究為主，輔以田口實驗分析最佳放電加工參數組合。

## 二、 實驗方法與步驟

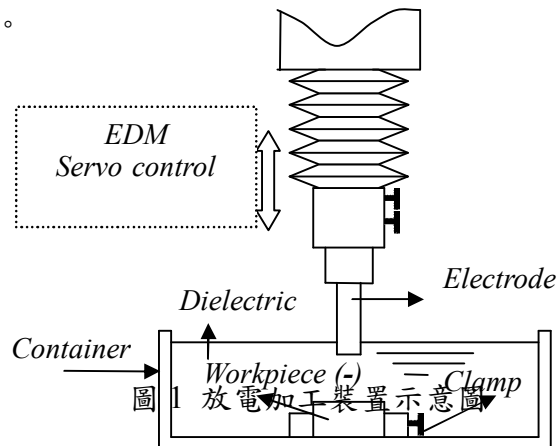
### 2-1 實驗材料

(1) 工件：本實驗所使用的材料為導電之燒結合金鋼材料(Mn 0.2%, Ni 1.8%, Mo 0.55%, Cu 2.0%, 0.9% Graphit, Bal.% Fe, Grain size 50  $\mu\text{m}$ ~300  $\mu\text{m}$ )，將此燒結合金鋼粉，壓製成尺寸大小為 10 mm×10 mm×60 mm 胚體，經  $1120^{\circ}\text{C}$ ~30 分鐘之燒結，燒結氣氛為裂解丙烷( $\text{C}_3\text{H}_8$ )，試片在離開燒結區後，即進入強制氣體淬火區(gas quenching zone)，在  $900^{\circ}\text{C}$  ~  $350^{\circ}\text{C}$  之間，冷卻速率為  $0.8^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ，而後自然冷卻至室溫，再施行  $200^{\circ}\text{C}$ 、1~4 小時的回火處理，硬度達 HRC 31.8。

(2) 電極：所使用的電極為紅銅電極，尺寸為  $\phi 8 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ ，其中電極在加工前，放電端面逐次研磨至平滑(1200#砂紙)並去除毛邊，以維持電極初始之放電加工表面粗糙度為固定值。電極 2 (紅銅超冷處理過程) 之放電加工面為  $8 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  圓棒，並把放電加工端面逐次研磨至平滑 (1000#砂紙) 並去毛邊，保持放電端面與工件表面垂直。再進行每分鐘冷卻  $0.33 \sim 0.55^{\circ}\text{F}/\text{min}$  至超冷處理溫度  $-300^{\circ}\text{F}$  ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) 約 6~小時熱由材料內向周圍環境傳遞。維持處理時間 4~6 小時，給與材料良好的變態環境。然後緩慢升溫( $0.55^{\circ}\text{F}/\text{min}$ ) 至  $150^{\circ}\text{C}$  ( $300^{\circ}\text{F}$ ) 冷由材料內向周圍環境傳遞，超冷總處理時間約 36H~48H，可消除殘留應力穩定工件尺寸作。

## 2-2 實驗設備

(1) 放電加工機：採用慶鴻 (YAMJET-505 型 ZNC)，絕緣液為煤油 (kerosene)，實驗設備圖如下圖 1 所示。



(2) 量測設備：精密電子秤採用 Precisa XT-220A 電子秤，精度為  $10^{-4}$ g。利用精密電子秤，量測加工前與加工後電極與工件的重量差，計算出材料去除率與電極消耗率。精度可達 (0.0001g)。表面粗度儀採用 Mitutoyo-surfest4 高精度表面粗糙度儀。放電加工時由於加工條件不同，表面狀態的平坦或粗糙，可藉由表面粗度儀量測。量測時工件表面需與扁面粗度儀的探針保持垂直，選取不同方向的五個路徑進行量測粗糙度，在取其平均值，粗度大小採平均粗值 (Ra) 表示。掃描式電子顯微鏡採用 JEOL JSM-6360(LV) 型掃描式電子顯微鏡，用來觀察工件表面刻痕與形狀。

## 2.3 實驗加工條件

(1) 探討在傳統與超冷放電加工之比較，實驗條件如下表 1 所示。主要參數包括電極極性、放電時間、休止時間、放電間隙、高壓電流、低壓電流等六個參數。

表 1 放電加工的實驗條件

	Working conditions	Parameters
1	Electrode	Cu (+, -)
	Workpiece	Sintered PM/steel
	Dielectric fluid $\mu$	Kerosene
2	Pulse duration ( $\mu$ s)	12, 100, 300
3	Off time ( $\mu$ s)	12, 100, 300
	No load voltage (V)	240
4	Auxiliary current (A)	0.8, 1.5, 2.0
5	Peak current (A)	1, 3, 5
6	Gap (V)	3, 5, 7
	Sevo reference voltage (A)	4(50%),6(75%),8(100%)
	Working time (mins)	30

(2) 利用田口實驗方法(L18)探討磁力輔助加工與傳統放電加工特性，實驗條件如下表四所示。主要參數包括加工方法(M)、脈衝時間( $\tau_p$ )、放電電壓( $I_p$ )與無負荷電壓(V)等四個參數。

## 2.4 田口實驗計畫法的步驟

燒結合金工具鋼放電加工特性之實驗及田口實驗計畫法之 L18 實驗，探討燒結合金工具鋼的放電加工特性，並求出最佳的加工參數組合水準。

根據田口實驗計畫法，在本實驗中選擇六個主要的放電加工參數進行實驗探討，分別為電極極性(P)、放電電流  $I_p$  (1、3 及 5 A)、脈衝時間  $\tau_p$  (25、100 及 300  $\mu$ s)、高壓引弧電流  $I_h$  (0.8、1.5 及 2.0 A)、休止時間(25、100 及 300  $\mu$ s)、放電間隙(3、5 及 7)，依田



口實驗計劃法的 L18 直交表，分別設定為二個及三個水準(levels)，實驗觀察值、加工控制參數及其水準值則如表 2 所示。實驗所得之觀察值分別依據觀察值之望大或望小的特性，求出訊號、雜訊比(S/N ratio)，再經由田口實驗計劃法中的訊號、雜訊比(S/N ratio)的比較，求出觀察值的最佳參數水準組合，並以變異數分析，評估各加工參數對 SKD 61 合金工具鋼放電加工特性影響較顯著的加工參數。

表 2 L18 直交表

Process parameters	Level		
	+		-
Method (P)			
Peak current ( $I_p$ , Amp)	1	3	5
High voltage ( $I_H$ , Amp)	0.8	1.5	2.0
Pulse duration ( $\tau_p$ , $\mu s$ )	25	100	300
Off time ( $\tau_{off}$ , $\mu s$ )	25	100	300
Gap (%)	3	5	7

在本研究中，使用擁有八個行數及 18 個列數的 L18 直交陣列表，此直交陣列表擁有十七個自由度，並且可以處理一個二水準的操作參數及七個三水準的操作參數，每一個放電加工參數均分配於直交陣列表之行中，因此共有 18 組不同的放電加工參數組合。由於使用 L18 直交陣列表的關係，故對於放電加工參數只需研究十八組實驗結果即可，本研究中田口法實驗計劃法雖僅採用六個放電加工參數，對 L18 直交陣列表而言，便有兩行是空著的，不過對參數的直交化並沒有失去其意義。表 2 六顯示出十八組實驗的加工參數設定值。

在本實驗中設定了四個實驗的觀察值，分別為材料去除率(WRR)、電極消耗率(EWR)、工件粗糙度(SR)及電極粗糙度(SR)。在田口實驗計劃法中各加工參數係依據直交表所設定的水準值進行實驗，分別量測出各個實驗的觀察值，並以實驗觀察值求出訊號、雜訊比(S/N ratio)。在本實驗所設定的實驗目標中，希望得到較大的材料去除率(WRR)、與較小的電極消耗率、工件粗糙度及電極粗糙度；因此材料去除率最佳值乃是設定在最大值，而電極消耗率、工件粗糙度及電極粗糙度則設定為極小值。

其中訊號、雜訊比(S/N ratio)的計算乃依據田口法中觀察值的望大(The higher the better, HB)及望小(The lower the better, LB)的特性是由下面的公式求出：

$$HB: \eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^{-2} \right] \quad (Eq.1)$$

$$LB: \eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2 \right] \quad (Eq.2)$$

其中 $\eta$ 表示由實驗觀察值計算得到的訊號/雜訊比(S/N ratio)的值，單位為 dB， $y_i$  為第  $i$  個實驗所量得的觀察值， $n$  則為各實驗條件重複的次數。

將量測所得之 S/N ratio，進行變異數分析(ANOVA)及 F 檢定，變異數分析的旨在釐清各個加工參數對實驗觀察值的影響，在本實驗中使用統計的變異數計算及 F 檢定來分析各個實驗數據的 S/N ratio，分析中各值所代表的意義及依據的公式如下所示：

$$S_m = \frac{(\sum \eta_i)^2}{18} \quad (Eq.3)$$

$$S_T = \sum \eta_i^2 - S_m \quad (Eq.4)$$

$$S_A = \frac{\sum \eta_{Ai}^2}{N} - S_m \quad (Eq.5)$$

$$S_E = S_T - \sum S_A \quad (Eq.6)$$

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (\text{Eq.7})$$

$$F_{A0} = \frac{V_A}{V_E} \quad (\text{Eq.8})$$

其中  $S_m$  為觀測值平方和之平均值； $S_T$  為所有變異數之平方和； $S_A$  為參數 A 值之平方和(例如 A=加工極性、放電電流等...);  $S_E$  為誤差值之平方和； $\eta_i$  為每一組實驗之  $\eta$  值 ( $i=1-18$ )； $\eta_{Ai}$  為參數 A 第  $i$  個水準值和 ( $i=1,2$  或  $1,2,3$ )； $N$  為參數 A 每一水準值之重複次數； $f_A$  為參數 A 之自由度； $V_A$  為參數 A 之變異數； $F_{A0}$  為參數 A 之 F 檢定值；可以藉由查表得知  $F_{0.05,n1,n2}$  之值，並將所計算出來的  $F_{A0}$  做比較，由此可以看出實驗中該參數對觀察值影響的程度。

### 三、結果與討論

#### 3-1 材料去除率

圖 2(a)(b) 顯示燒結合金鋼材料在不同放電電流及脈衝時間之材料去除率的比較。圖中影響燒結合金鋼材料去除率最主要的因素為放電電流的大小，由於增加放電電流和脈衝時間時極間輸入的能量相對地增加；在材料表面所產生的蒸發、熔融等材料去除效果就更為快速，所以材料去除率隨著放電電流的增加而呈現增加的趨勢。因燒結合金鋼材料所含的粉末冶金比例及粒度不同，又燒結鍵結強度有異，導致其材料去除率與一般材料會有差異。在此可得知在燒結合金鋼材料，在電流的 1A、5A 其材料去除率會較低，而在高電流 3A 之下材料去除率會較佳。同時；圖 2(b) 顯示增加脈衝時間則單發放電週期中，極間所輸入的能量相對增大，所以在小脈衝時間階段增加脈衝時間有助於材料的移除；當脈衝時間繼續延長時，放電柱勢必隨脈衝時間的增長而逐漸膨脹，放電柱的膨脹將導致放電點能量密度的降低，由於能量密度的降低，將造成材料去除效果的下降 [24, 25]。所以燒結合金鋼放電加工之材料去除率隨放電電流的增加而增加，但隨著脈衝時間的增加先呈現上升的走向，繼續增加脈衝時間，材料去除率卻反而呈現下降的趨勢。

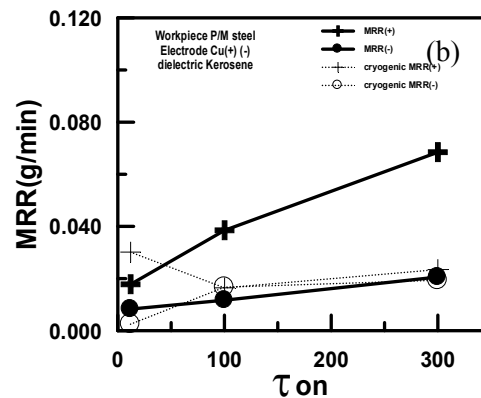
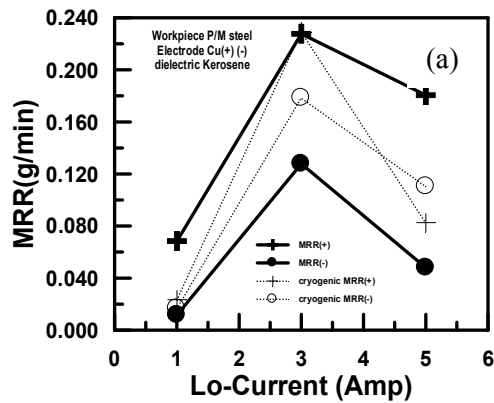


Fig. 2 Relation of material removal rate and (a) peak current; (b) pulse duration for P/M steel

### 3-2 電極消耗率

由圖 3 (a)結果顯示當放電電流值增加時，相對電極消耗率也隨之增加。然而隨著脈衝時間 $\tau_p$  逐漸增長，相對電極消耗率反而下降。因此藉由兩電極的能量分配及能量供給型態的改變，則可達到電極低消耗率的需求(相對電極消耗率比在 1%以下的加工狀態)。

由實驗結果圖 3(b)顯示，當在較小的加工電流 1A 時，因其本身的加工能量很小，Cu 電極的消耗量有限，而當脈衝時間較長 $\tau_p=100、300\mu s$  時，因燒結合金鋼材質轉移附著至銅 Cu 電極加工表面的量較多，造成 Cu 電極的消耗率不減反增。圖中顯示在較大的放電電流  $I_p=5A$  時，因其加工能量很大，Cu 電極的消耗量亦相對增加，超冷處理將使得 Cu 電極表面附著的積碳量減少，因而減少了對 Cu 電極表面的保護膜，所以使用超冷 Cu 電極的消耗率較傳統放電加工方式大。但因使用超冷時燒結合金鋼之材料去除率較高，因此其相對電極消耗率比仍較傳統放電加工方式低。

每個個別放電刻痕所造成劇烈的材料去除形成整個材料的體積去除率，而且同時造成相當程度的電極磨耗，它的磨耗值跟 EDM 製程參數、加工條件和正極與負極材料的物理性質有關。電極磨耗和材料去除率是隨著脈衝時間和電流而隨之變化，材料的去除和電極的磨耗隨脈衝電流的增加而增加；電極磨耗明顯地隨脈衝時間的增加而減少，不過材料去除率在脈衝一段時間內會有最佳的情形產生，少於這段時間金屬移除速率隨脈衝時間增加，大於則減少，如圖 3 (b)所示。

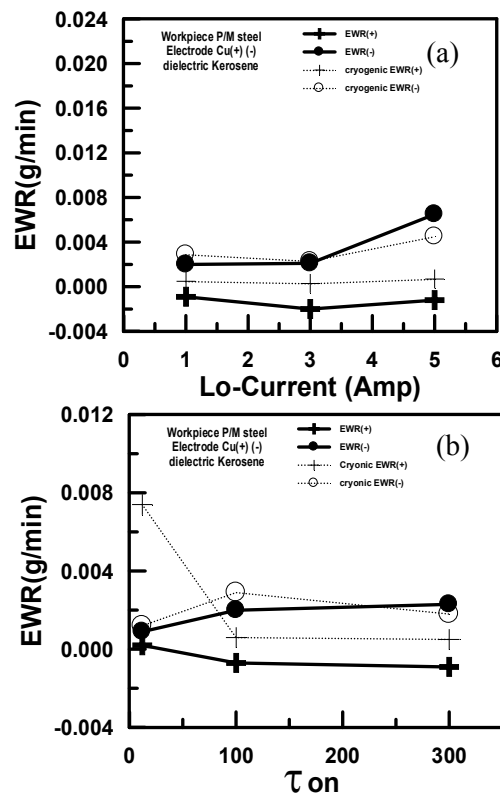


Fig. 3 Relation of electrode wear rate and (a) peak current; (b) pulse duration for with P/M steel

### 3-3 工件表面粗糙度

圖 4(a)(b)顯示燒結合金鋼材料在不同放電電流及脈衝時間之表面粗糙度的比較。由圖中可以得知，加工表面的粗糙度隨放電電流及脈衝時間的增加而增加，脈衝時間在 100  $\mu\text{s}$  下，表面粗糙度會慢慢減少，而在放電電流 3 A 以上會緩慢的增加。由於增加放電電流可產生較明顯的材料去除效果，在加工表面將形成較大的放電坑洞，因此隨著放電電流的增加，材料表面的粗糙度逐漸惡化，呈現出較大的表面粗糙度。所以高硬度燒結合金材料進行放電加工時，可使用較低電流、較長的脈衝時間獲得較佳的表面粗糙度。

由圖中可知影響表面粗糙度的主因仍然是放電電流的大小，脈衝時間也是影響表面的因素之一。在精加工方面為使表面粗糙度細緻一點，除了控制放電電流也要控制脈衝時間，在相同的放電電流下，延長放電的脈衝時間將導致放電點的能量密度不足，使得材料去除量減少，形成較平坦的放電表面，因此在加工表面粗糙度隨著脈衝時間的增加而呈現逐漸下降的趨勢。一般而言脈衝時間越短表面越好，對燒結合金鋼低電流放電加工時脈衝時間越長則表面較精細。在製造的製程中，尤其是 EDM，有一個特性就是高材料去除率不只會產生不好的表面粗糙度，而且會增加裂縫的形成。要克服這個困難，就是在製程的最後階段，要使用精細的切削情況，不要有太高的材料去除率。

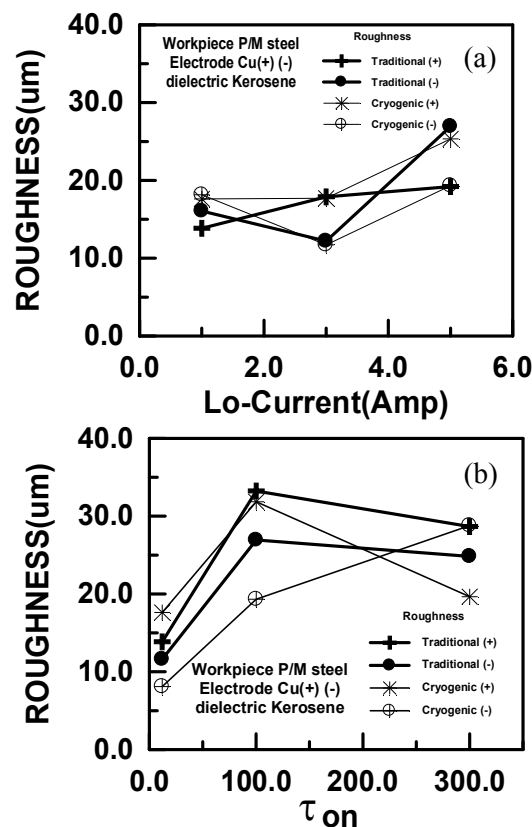


Fig. 4 Relation of workpiece surface roughness and (a) peak current; (b) pulse duration with P/M steel



### 3-4 電極表面粗糙度

圖 5(a)(b)顯示電極表面粗糙度與電流、脈衝時間的關係，可知電流越大電極表面粗糙度也就越大，短放電時間時電極表面粗糙度較小，且材料去除時會藉由合金鋼粉的剝離而去除，且材料表面受放電作用所引發的高溫將材料表面蒸發、熔融，並受到加工液因高溫氣化膨脹所衍生的局部爆壓衝擊力的作用，使材料加工表面沖離而形成大小不一的放電坑洞產生表面粗糙度。此粗糙度之放電坑洞及材料表面在放電時受急冷急熱作用而產生的微裂紋及微氣孔，使得放電加工表面的粗糙度受到影響，隨著脈衝時間增加有擴大趨勢。如圖 7 顯示燒結合金鋼放電時的微裂縫特性，其中微裂縫隨電流增加而減少其長度，但放電電流較短時因絕緣液冷卻補充快，使表面裂痕長度有較長趨勢。

脈衝電流看起來對直徑的變化比較有影響，而時間則是對深度變化比較重要。因此，放電刻痕尺寸會隨脈衝能量的增加而增加，而這是因為其溶解造成較大的滲透力量。由放電刻痕尺寸跟深度的比率的特徵解釋，可以知道其值是隨著脈衝能量的低和高能量而增加，而適當的脈衝能量則其比值保持一定，如圖 7 所示。這個顯示出超過某個能量範圍，放電刻痕只能向寬度擴大而不能向深度延伸。

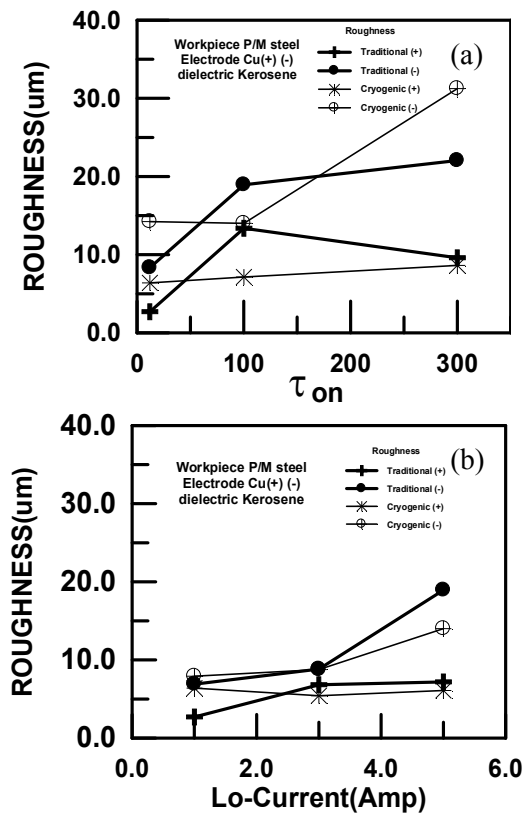


Fig. 5 Relation of electrode surface roughness and (a) peak current; (b) pulse duration with P/M steel

#### 4-5 田口方法分析

表 3 為根據表四 L18 直交表所得之材料去除率(WRR)、電極消耗率 (EWR)、工件粗糙度(SR)及電極粗糙度(SR)等實驗特徵值之實驗數據經由計算所得之 S/N ratio 值。以此用來計算及評估放電電流及脈衝時間對高硬度燒結合金材料之材料去除率(WRR)、電極消耗率 (EWR)、工件粗糙度(SR)及電極粗糙度(SR)材料去除率、電極消耗率、放電加工表面粗糙度及放電刻痕(CRATER)等實驗觀察值的影響。經由變異數分析 (ANOVA) 及 F 檢定貢獻度，可求出各放電加工參數對實驗觀察值影響的顯著程度及加工參數之最佳參數水準的組合。

Table 3 Taguchi experiment results of S/N ratio

Cryonic												
NO	P	Ton	Toff	Hamp	Lamp	Gap	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	MRR	EWR	Ry(W)	Ry(Cu)
1	+	12	12	0.8	1	3	1	1	0.0302	0.0074	17.64	6.4
2	+	12	100	1.5	3	5	2	2	0.0447	0.0010	17.71	5.432
3	+	12	300	2	5	7	3	3	0.0272	0.0026	25.36	6.105
4	+	100	12	0.8	3	5	3	3	0.2366	0.0007	31.87	7.167
5	+	100	100	1.5	5	7	1	1	0.5280	0.0004	23.595	7.865
6	+	100	300	2	1	3	2	2	0.0165	0.0006	16.98	5.83
7	+	300	12	1.5	1	7	2	3	0.0235	0.0005	19.66	8.34
8	+	300	100	2	3	3	3	1	0.2295	0.0003	34.49	8.535
9	+	300	300	0.8	5	5	1	2	0.0826	0.0007	18.73	8.645
10	-	12	12	2	5	5	2	1	0.0716	0.0106	8.12	14.24
11	-	12	100	0.8	1	7	3	2	0.0025	0.0012	18.17	7.93
12	-	12	300	1.5	3	3	1	3	0.0021	0.0029	11.73	8.787
13	-	100	12	1.5	5	3	3	2	0.0255	0.0034	19.35	14.02
14	-	100	100	2	1	5	1	3	0.0167	0.0029	20.69	13.67
15	-	100	300	0.8	3	7	2	1	0.0136	0.0007	15.83	10.45
16	-	300	12	2	3	7	1	2	0.1106	0.0023	28.81	31.26
17	-	300	100	0.8	5	3	2	3	0.1785	0.0045	15.96	22.71
18	-	300	300	1.5	1	5	3	1	0.0194	0.0018	21.91	13.16

#### 4-5-1 材料去除率

表 4 為放電加工高硬度燒結合金鋼之材料去除率之變異數分析(ANOVA)及 F 檢定表，圖 6 則為材料去除率之 S/N ratio 回應圖。由表六的變異數分析(ANOVA)及 F 檢定的結果顯示，在所選定的電極極性(P)、脈衝時間 $\tau_p$ 、休止時間 $\tau_{off}$ 、高壓引弧電流  $I_h$ 、放電電流  $I_p$ 、放電間隙 Gap 等六個放電加工的主要加工參數中，對材料去除率而言加工極性(P)和脈衝時間( $\tau_p$ )是顯著影響的加工參數。由於在較長脈衝的加工條件下陰極分配較多的能量[26]，因此負極性加工時材料的去除效率較高。而放電電流加大時，單發脈衝在兩極間所輸入的放電能量相對提高，因此對材料的去除效果會更明顯。而由圖 6 則為加工速率之 S/N ratio 回應圖中可知，燒結合金鋼放電加工時材料去除率(MRR) 之最佳加工參數組合水準為 P(-)、 $\tau_p$  (300  $\mu$ s)、 $\tau_{off}$  (300  $\mu$ s)、 $I_h$  (2.0A)、 $I_p$  (5A) 以及 Gap (7) 時可得到最佳之材料去除率。

Table 4 ANOVA of MRR (cryogenic) with EDM P/Msteel

Co1#/Factor	DOF(f)	Sum of Sqrs(s)	Variance(v)	F-Ratio(F)	Pure Sum(S <sup>2</sup> )	Percent P(%)
P	1	407.1	49.29	49.29	398.841	60.653
Ton	2	167.747	83.873	10.155	151.228	22.997
Toff	2	22.695	11.347	1.373	6.177	0.939
hamp	2	5.157	2.578	0.312	0	0
lamp	2	3.251	1.625	0.196	0	0
Gap	2	2.071	1.035	0.125	0	0

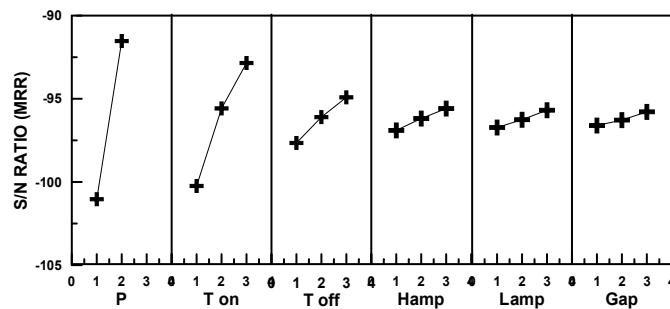


Fig. 6 Main effects plot means for MRR (cryogenic)

#### 4-5-2 電極消耗率

表 5 為放電加工高硬度燒結合金鋼之電極消耗率變異數分析(ANOVA)及 F 檢定表，圖 7 則為電極消耗率之 S/N ratio 回應圖。由表 6 的變異數分析(ANOVA)及 F 檢定的結果顯示，在所選定的電極極性(P)、脈衝時間 $\tau_p$ 、休止時間 $\tau_{off}$ 、高壓引弧電流  $I_h$ 、放電電流  $I_p$ 、放電間隙 Gap 等六個放電加工的主要加工參數中，對電極消耗率的影響最顯著的加工參數為加工極性(P)和脈衝時間( $\tau_p$ )。而由圖 7 的電極消耗率之 S/N ratio 回應圖中，可得到最小電極消耗率的加工參數組合水準，由圖中的分析結果顯示，在 P(-)、 $\tau_p$  (300  $\mu$ s) 、 $\tau_{off}$  (300  $\mu$ s) 、 $I_h$  (2.0A) 、 $I_p$  (5A) 以及 Gap (7)的加工參數條件時，可得到最小的電極消耗率。

Table 5 ANOVA of workpiece EWR (cryogenic) with EDM P/Msteel

Co1#/Factor	DOF(f)	Sum of Sqrs(s)	Variance(v)	F-Ratio(F)	Pure Sum(S <sup>2</sup> )	Percent P(%)
P	1	407.1	407.1	49.29	398.841	60.653
Ton	2	167.747	83.873	10.155	151.228	22.997
Toff	2	22.695	11.347	1.373	6.177	0.939
hamp	2	5.157	2.578	0.312	0	0
lamp	2	3.251	1.625	0.196	0	0
Gap	2	2.071	1.035	0.125	0	0

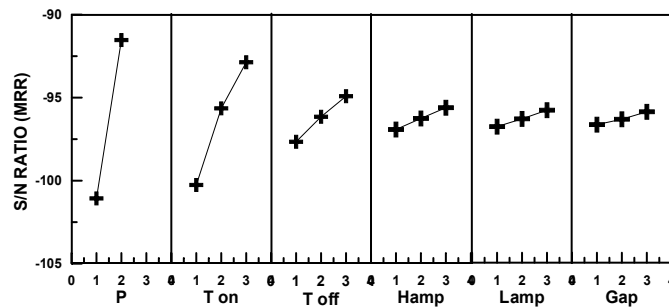


Fig. 7 Main effects plot means for workpiece EWR (cryogenic)



### 4-5-3 工件表面粗糙度

表 6 為放電加工高硬度燒結合金鋼之表面粗糙度變異數分析(ANOVA)及 F 檢定表，圖 8 則為表面粗糙度(SR)之 S/N ratio 回應圖。由表八的變異數分析(ANOVA)及 F 檢定的結果顯示，在所選定電極極性(P)、脈衝時間 $\tau_p$ 、休止時間 $\tau_{off}$ 、高壓引弧電流  $I_h$ 、放電電流  $I_p$ 、放電間隙 Gap 等六個放電加工的主要加工參數中，對表面粗糙度影響最為顯著的加工參數為加工極性(P)和脈衝時間( $\tau_p$ )。而由圖 8 的表面粗糙度之 S/N ratio 回應圖中可知，對表面粗糙度(SR)最佳之加工參數組合水準為 P(-)、 $\tau_p$  (25  $\mu$ s)、 $\tau_{off}$  (300  $\mu$ s)、 $I_h$  (1.5 A)、 $I_p$  (1 A) 以及 Gap (3)時，在這些加工參數的組合水準值下加工，可得到最小之表面粗糙度。

Table 6 ANOVA of SR (cryogenic) with EDM P/Msteel

Col#/Factor	DOF(f)	Sum of Sqr(s)	Variance(v)	F-Ratio(F)	Pure Sum(S <sup>2</sup> )	Percent P(%)
P	1	21.495	21.459	1.942	10.43	6.73
Ton	2	37.384	18.692	1.689	15.253	9.842
Toff	2	8.635	4.317	0.39	0	0
hamp	2	3.936	1.968	0.177	0	0
lamp	2	10.84	5.42	0.489	0	0
Gap	2	6.29	3.145	0.284	0	0

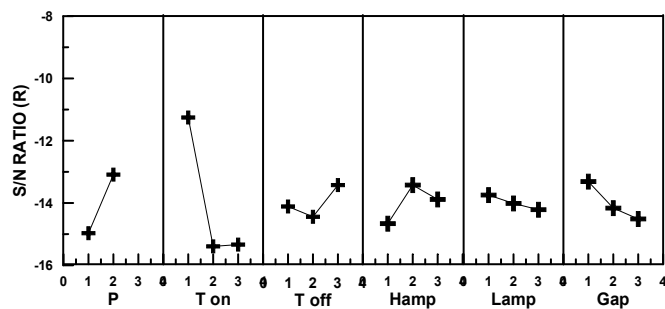


Fig. 8 Main effects plot means for SR (cryogenic)

#### 4-5-4 電極表面粗糙度

表 7 為電極表面粗糙度之變異數分析(ANOVA)及 F 檢定表，圖 9 則為電極表面粗糙度之 S/N ratio 回應圖。由表八的變異數分析(ANOVA)及 F 檢定的結果顯示，在所選定電極極性(P)、脈衝時間 $\tau_p$ 、休止時間 $\tau_{off}$ 、高壓引弧電流  $I_h$ 、放電電流  $I_p$ 、放電間隙 Gap 等六個放電加工的主要加工參數中，對電極表面粗糙度影響最為顯著的加工參數為加工極性(P)和脈衝時間( $\tau_p$ )。根據圖 9 放電電極表面粗糙度之 S/N ratio 回應圖，我們可以知道影響其放電電極表面粗糙度的主要因素，包括了 P、 $\tau_p$ 、 $\tau_{off}$ 、 $I_h$ 、 $I_p$  以及 Gap，當加工條件參數設定為 P(-)、 $\tau_p$  (25  $\mu$ s)、 $\tau_{off}$  (300  $\mu$ s)、 $I_h$  (1.5 A)、 $I_p$  (1 A) 以及 Gap (7) 時，放電表面的粗糙度會較佳。

Table 7 ANOVA of electrode SR (cryogenic) with EDM P/Msteel

Co1#/Factor	DOF(f)	Sum of Sqrs(s)	Variance(v)	F-Ratio(F)	Pure Sum(S <sup>2</sup> )	Percent P(%)
P	1	166.018	166.018	47.435	162.518	53.843
Ton	2	69.455	34.727	9.922	62.456	20.692
Toff	2	21.998	10.999	3.142	14.998	4.969
hamp	2	13.699	6.849	1.957	6.699	2.219
lamp	2	9.406	4.703	1.343	2.406	0.797
Gap	2	0.256	0.128	0.036	0	0

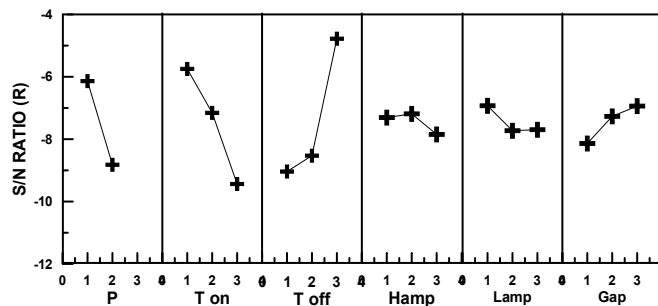


Fig.9 Main effects plot means for electrode SR (cryogenic)

#### 四、結論

1. 燒結合金鋼進行放電加工時，(a)材料去除率會隨放電電流的增加而逐漸增大，但隨著脈衝時間的增加材料去除率首上升，大約在  $100\ \mu\text{s}$  時達到最大值，然後隨脈衝時間的繼續增加，材料去除率卻反而呈現下降的趨勢。(b)電極消耗率會隨放電電流的增加有逐漸變大的現象；並且在各放電電流的加工條件下，電極消耗率隨著脈衝時間的增加而逐漸降低。(c)加工表面的粗糙度隨著放電電流的增加而變粗，且隨著脈衝時間的增加而呈現下降的趨勢。
2. 經由田口實驗計劃法的分析可知，超冷電極對燒結合金鋼放電加工時材料去除率之最佳加工參數組合水準為  $P(-)$ 、 $\tau_p$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $\tau_{\text{off}}$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $I_h$  ( $2.0\text{A}$ )、 $I_p$  ( $5\text{A}$ ) 以及  $\text{Gap}$  ( $7$ )時可得到最佳之材料去除率。
3. 經由田口實驗計劃法的分析，超冷電極對燒結合金鋼放電加工時得到最小電極消耗率的加工參數組合水準  $P(-)$ 、 $\tau_p$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $\tau_{\text{off}}$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $I_h$  ( $2.0\text{A}$ )、 $I_p$  ( $5\text{A}$ ) 以及  $\text{Gap}$  ( $7$ )的加工參數條件時，可得到最小的電極消耗率。
4. 經由田口實驗計劃法的分析，超冷電極對燒結合金鋼放電加工時工件表面粗糙度最佳之加工參數組合水準為  $P(-)$ 、 $\tau_p$  ( $25\ \mu\text{s}$ )、 $\tau_{\text{off}}$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $I_h$  ( $1.5\ \text{A}$ )、 $I_p$  ( $1\ \text{A}$ ) 以及  $\text{Gap}$  ( $3$ )時，在這些加工參數的組合水準值下加工，可得到最小之表面粗糙度。
5. 經由田口實驗計劃法的分析，超冷電極對燒結合金鋼放電加工時，當加工條件參數設定為  $P(-)$ 、 $\tau_p$  ( $25\ \mu\text{s}$ )、 $\tau_{\text{off}}$  ( $300\ \mu\text{s}$ )、 $I_h$  ( $1.5\ \text{A}$ )、 $I_p$  ( $1\ \text{A}$ ) 以及  $\text{Gap}$  ( $7$ )時，超冷後電極放電表面的粗糙度會較佳。

## 五、参考文献

1. F.Chagnon, D. Barrow (1997) "Effect of Temperature on Sintered Properties of Sinter Hardness PM Steels" Advances in Structural PM Components Production, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury, UK, pp. 273-282.
2. C. Ruas and F. Chagnon (1997) "The Development and Characterization of Low Alloyed Steel Powders for Sinterhardening Applications", Powder Metallurgy in Automotive Applications, Oxford & IBH Publishing Co., New Delhi, pp. 65-74.
3. W Brian James ( 1999) "Considerations in the Development of Ferrous P/M Alloys for Sinter Hardening Applications", Industrial Heating, pp.63.
4. F. Chagnon, G. Olschewski, (Nov. 2000) "Low Alloy Steel Powders for Sinter Hardening Applications", 2000 Powder Metallurgy World Congress in Kyoto, pp.927-pp. 930.
5. M. R. Haas, H. Suzuki (May 2001) "Properties of Sinter-Hardening and Heat-Treated Steels", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, New Orleans, Part 5.
6. F. Chagnon, Y. Trudel (Jun. 2002) "Effect of Copper Additions on Properties of 1.5% Mo Sintered Steels", 2002 PM2TEC World Congress, Orlando, Part 13-73.
7. H. Suzuki, M. Sato, M. Seki (Jun. 2002) "Sinter Hardening Characteristics of Ni-Mo-Mn-Cr Pre-Alloyed Steel Powder", 2002 PM2TEC World Congress, Orlando, Part 13-83.
8. J. R. Crookall and B. C. Khor, "Residual stress and surface effects in electro-discharge machining," Proceeding of 13th International Machine Tool Design and Research Conference, Birmingham, pp. 331-338, 1972.
9. J. E. Greene and J. L. Guerrero-Alvarez, "electro-erosion of metal surfaces," Metallurgical Transactions, vol. 5, pp. 695-706, 1974.
10. L. Massarelli and M. Marchionni, "Morphology of spark-affected surface layer produced on pure iron and steels by electro-discharge machining," Metals Technology, , pp. 100-105, February 1977.
11. P. H. Thornton and R. G. Davies, "High-rate spark hardening of hot-forging dies," Metals Technology, pp. 69-73, February 1979.
12. M. L. Jeswani, "Electrical discharge machining in distilled water," Wear, Vol. 72, pp. 81-88, 1981.
13. S. Tariq Jilani and P. C. Pandey, "Experimental investigations into the performance of water as dielectric in EDM," International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 24, No. 1, pp. 31-43, 1984.
14. K. P. Rajurkar and S. M. Pandit, "Quantitative expression for some aspects of surface integrity of electro discharge machined components," Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 171-177, 1984.
15. A. G. Mamalis, G. C. Vosniakos, N. M. Vaxevanidis, "Macroscopic and microscopic phenomena of electro-discharge machined steel surfaces: an experimental investigations," Journal of Mechanical Working, Vol. 15, pp. 335-356, 1987.
16. P. F. Thomson, "Surface damage in electrodischarge machining," Materials Science and Technology, Vol. 5, pp. 1153-1157, 1989.
17. M. A. E.-R. Merdan and R. D. Arnell, "Surface integrity of a die steel after electrodischarge machining: 2. Residual stress distribution," Surface Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 154-158, 1991.
18. W. J. Tomlinson and J. R. Adkin, "Microstructure and Properties of Electrodischarge machined surfaces," Surface Engineering, Vol. 8, No. 4, pp.283-288, 1992.
19. Y. Tsunekawa, M. Okumiya, N. Mohri, I. Takahashi, "Surface modification of aluminum by electrical discharge alloying," Materials Science and Engineering, A174, pp. 193-198, 1994.
20. J. P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen, B. Lauwers, "Study of the white layer of a surface



- machined by die-sinking electro-discharge machining,” *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 169-172, 1995.
21. J. C. Rebelo, A. Morao Dias, D. Kremer, J. L. Lebrun, “Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, pp. 90-96, 1998.
  22. J. C. Rebelo, A. Morao Dias, Ruy Mesdrita, Paulo Vassalo, Mario Santos, “An experimental study on electro-discharge machining and polishing of high strength copper-beryllium alloys,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 389-397, 2000.
  23. B. H. Yan, Y. C. Lin, F. Y. Huang, “Surface modification of Al-Zn-Mg alloy by combined electrical discharge machining with ball burnish machining,” *Journal of Materials Processing*, Vol. 42, pp. 925-934, 2002.
  24. S. Das, M. Klotz, F. Klocke, “EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 434-451, 2003.
  25. F. Ghanem, C. Braham, H. Sidhom, “Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity,” *Journal of Materials Processing*, Vol. 142, pp. 163-173, 2003.
  26. S. O. Lee, X. P. Li, “Study of the surface integrity of the machined workpiece in the EDM of tungsten carbide,” *Journal of Materials Processing*, Vol. 139, pp. 315-321, 2003.
  27. D. Reynaerts, P. H. Heeren, H. van Brussel, “Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM) part I: theory,” *Sensors and Actuators A*, Vol. 60, pp. 212-218, 1997.
  28. T. Sato, T. Mizutani and K. Kawata, “Electro-discharge machine for micro-hole drilling,” *National Technical Report*, vol. 31, pp. 725-733, 1985.
  29. D. Mohan Lai, S. Renganarayanan, A. Kalanidhi, “Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels”, *cryogenics* 41 2001 pp.149-155
  30. 熊仁洲，劉復龍，“超冷處理(Cryogenic Treatment)之簡介”，*金屬熱處理期刊*，第35期，1992，p.62-65