

**東南技術學院機械系**

**專題研究報告**

**添加活性介面劑對放電加工表面特性之探討**

**指導老師:吳坤齡**

**學 生:3902052 黃均達**

**3902053 顏志偉**

**3902054 廖令凱**

**3902055 蔡瑾銘**

**3902056 周朝陽**

**中華民國九十一年十一月二十五日**

# 目 錄

目錄	01
摘要	03
第一章 導論	04
第二章 放電加工原理	06
2-1 放電加工原理	06
2-2 放電微觀物理現象	08
2-3 EDM 的兩種基本功能	10
2-4 放電加工參數	11
2-5 加工參數分析	12
2-6 放電加工液的特性	14
2-7 放電加工液之種類	15
第三章 實驗相關流程	16
3-1 實驗設	16
3-2 量測儀器	19
3-3 實驗材料	21
3-4 實驗步驟	24
3-5 實驗數據的相關計算	25
3-6 加工條件-一般加工液	26
3-6 加工條件-添加鋁粉	27
第四章 實驗結果與討論	28
4-1 放電加工液中添加非導電性粉末的加工特性	36
第五章 結果與討論	40
5-1 電流與放電效	41
5-2 極性的影響	41
5-3 微硬度試驗	42
5-4 放電能量對改質深度的影響	43
參考文獻	44

## 附錄 圖表

圖 2-1 放電加工形狀生成圖	07
圖 2-2 放電加工除去機構圖	09
圖 2-3 放電脈波訊號圖	12
圖 3-1 放電加工液再生循環系統實體圖	17
圖 3-2 放電加工機機械本體結構圖	18
圖 3-3 實驗材料尺寸圖	22
圖 3-4 實驗流程圖	23
圖 4-1 粗糙度(Ra)比較長條圖	28
圖 4-2 粗糙度(Ra)比較曲線圖	28
圖 4-3 粗糙度(Rmax)比較長條圖	29
圖 4-4 粗糙度(Rmax)比較曲線圖	29
圖 4-5 極消耗率之對照比較長條圖	30
圖 4-6 電極消耗率之對照比較曲線圖	30
圖 4-7 再鑄層厚度之對照比較長條圖	31
圖 4-8 再鑄層厚度之對照比較曲線圖	31
表 4-9 加工後表面的相關數據(未加粉)	32
表 4-11 加工後表面的相關數據(添加鋁粉)	32
圖 4-12 再鑄層厚度比較	35
圖 4-13 放電加工液中添加氧化鋁粉材料去除機圖	37
圖 4-14 放電加工實碳素附著於電極微觀情形圖	38
圖 4-15 鋁粉放電機構圖	39

## 摘 要

為配合工業的需求，新開發出許多硬、脆、韌的材料相繼問世，假如再以傳統的切削加工法，已無法克服一些切削時所產生的問題了，隨著工業界對所有產品精度的要求越來越嚴格，產品除了必須有高效率外並且還要可靠度以及精度，提高並增加產品的附加價值，傳統的機械加工無論切割或銑削時，會因為作用力而有變形的現象發生，而高精度要求的加工總是難以滿足，而放電加工法是以高能量的方式將材料去除，因此對工件材料的限制比較少，適合對有較佳性質的新材料進行加工，並且高能量切削可避免因刀具與工作物直接接觸所產生切削力，而能達到較佳的精度需求及作細微形狀的加工。其主要是利用兩電極局部放電所產生的熱能對工件造成融熔，以達加工目的的一種特殊加工方法。

一般輸入不同能量，加工特性結果亦不同，由實驗得知，電流增加，切削量快、而加工精度及表面粗糙度比較差；反之，電流小，精度、表面變好，但是切量則變慢，因此加工前必須要由其目的，才能得到事半功倍的效果。

本專題研究的探討項目主要目的，是以相同的放電時間及電流的條件下，電極材料及被加工物的表面粗糙度還有電極相對消耗率之影響。我們使用的材料為 SDK11 模具鋼來進行實驗；加工液方面，我們分別添加鋁粉，並選定其粉末粒度、粉末濃度、放電電流、放電電壓及放電持續時間為實驗參數，來分析各參數對鋁粉放電加工表面粗糙度、再鑄層厚度、材料去除率及電極消耗率等計量品質特性的影響，透過電子顯微鏡分析，針對 SDK11 模具鋼放電加工表面的再鑄層，進行微結構、成分變化與相變化的探討。

# 第一章 導論

由於美國科學家富蘭克林，在下雨時的雷電與閃光讓他證明了正負電間產生火花放電的現象。至於首先在 1770 年發表觀察放電後的蝕刻效果則是英國科學家 priestley，經過不斷的研究一直到 1943 年蘇俄 Lazarenko 夫婦提出一套基本的金屬放電成形法，建立電阻、電容放電加工電路（R-C EDM Circuit），將放電應用於加工金屬這時才正式開始。

近年來隨著機械工業的發展，時代的進步，產業的升級，高科技材料因應工業需要不斷推出，對材料的品質也要求逐漸提高，這些材料具有高硬度、高強度、高韌性等特殊機械性質，若要以一般傳統工具機切削這種需求之下，利用刀具與工件兩者間硬度差以除去加工物的加工方法，逐漸無法適用，放電加工因而被採用。因此具有非接觸（Non-contact）的放電加工，更顯現出其重要性，尤其在核能工業、航空工業所用之金屬是屬於難切削的材料及精密的陶瓷加工上，所以放電加工為現今不可或缺的加工方法。

放電加工法（Electric Discharge Machining）簡稱 EDM 加工法，是將工件與電極分別放置，使其不接觸而由伺服機來維持工件與電極之微小間隙，係利用加工電極工具（tool）和被加工物（work）之間隙中有雙電性加工液（即煤油），加工電壓後，加工液中的自由離子因而排列成一細橋式的通路，使電極與工件之間產生電場，形成一離子道而引發成電弧柱（Arc），將被加工物之表面層去除，電極在慢慢接近於工件，兩極間由

電源供應數十至數百伏特電壓，當兩極接近至數  $\mu\text{m}$  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離子化，高密度電流藉此流向工件而產生，在  $1800^{\circ}\text{C}\sim 12000^{\circ}\text{C}$  的高溫的能量，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，這樣的過程在一秒內反覆了數萬甚至數十萬次，達到加工方法。

放電加工法對複雜形狀及小孔，均可以成功適用，且不受被加工物的硬度、韌性、強度為何影響均可加工，其唯一之先決條件為工件必須是導電性的金屬材料，由於其兩電極間並不接觸，其加工過程主要是在介電液 ( dielectric fluid ) 中，轉變電能為熱能，經由熔解、蒸發、電場力、流力及氣體動力的綜合作用，去除多餘金屬，再經由快速淬火、回火等現象，造成其加工面層之獨有特性。

針對這問題我們將利用放電加工機，以 SDK11 模具鋼為實驗材料，在放電加工液 ( Dielectric fluid ) 中添加高硬度非導電性粉末 ( 鋁粉末 ) 進行高速精密複合放電加工實驗，其能改善加工速度並降低表面粗糙度，藉由實驗調查放電加工進行時，由於高硬度微細粒子的泳動作用，對加工電極表面的附著炭素以及放電痕凸出點進行研磨作用的可能性，及以不同粉末、電極，做出比較，求出最佳的加工條件，並探討添加非導電性粉末的添加狀態對工件表面粗糙度、加工速度、相對電極消耗量、電極極間間隙、等加工特性影響。

## 第二章 放電加工原理

### 2-1 放電加工原理

放電加工( Electro - discharge machining )又稱為火花腐蝕( Spark erosion )是把導電性工件和電極( Electrode )同時浸入絕緣液( 煤油或放電加工液 )中，並施以 115v 的高壓，使兩極徐徐接近，由於電極及工件並非完全平滑常有無數微小凹凸，當電極與工件表面上某一點逐漸接近到很小間隙(約 5~50  $\mu$  m)時，兩極間的高壓使得絕緣破壞，而產生放電，工件表面亦因高溫而被局部熔化、蒸發，同時周圍的加工液氣化膨脹產生高壓，將熔融的金屬吹散，形成細小凝固加工屑藉著流動的加工液將粒狀的加工屑沖離，並將加工部位冷卻，接著電極與工件間又恢復絕緣，以便再進行下一次的放電。

實際上放電加工是一秒間反覆數百 數十萬次的脈衝性放電，各單發放電為  $10^{-7}$   $10^{-8}$  秒間的火花放電與後續的  $10^{-3}$   $10^{-6}$  秒間的過度電弧放電所組成，各單發放電在工件表面上生成微小的放電痕(crater)，如圖 2-1 所示，累積如此無數個放電痕而達到加工的目的。

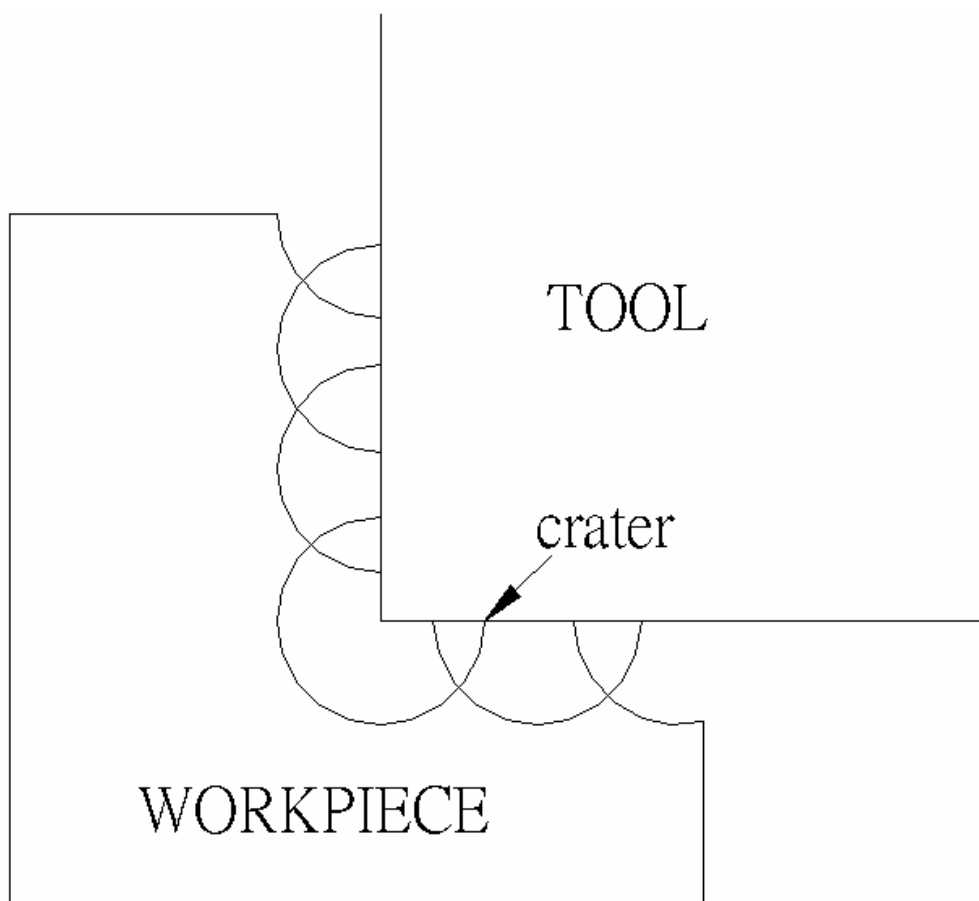


圖 2-1 放電加工中加工形狀的生成



## 2-2 放電微觀物理現象

放電加工的除去機構可由圖 2-2，清楚看出放電微觀物理現象。

### (1) 放電開始發生：

電場強度使得絕緣開始破壞時，在兩極間最近距離點，大量的自由電子由陰極移動至陽極，因為電子的撞擊而產生火花放電，而發生了放電的現象。

### (2) 產生電離作用：

自由電子撞擊陽極被加工物之同時，帶正電的陽離子從陽極釋放，造成正電離子與自由電子產生電離的作用。

### (3) 蒸發與熔融：

因電離作用而產生的高溫，使得被加工與電極表面有熔融層產生。

### (4) 衝擊作用力：

因高溫使得加工液亦瞬間被氧化，而產生極高的壓力，藉加工液而將加工屑排除。

### (5) 加工週期的完成：

放電休止時，兩極間再度回復絕緣狀態，兩極間亦再度充滿了加工液，以及加工屑與加工液氣化所產生的碳化物，而被加工物表面已被去除，電極亦有微量消耗。

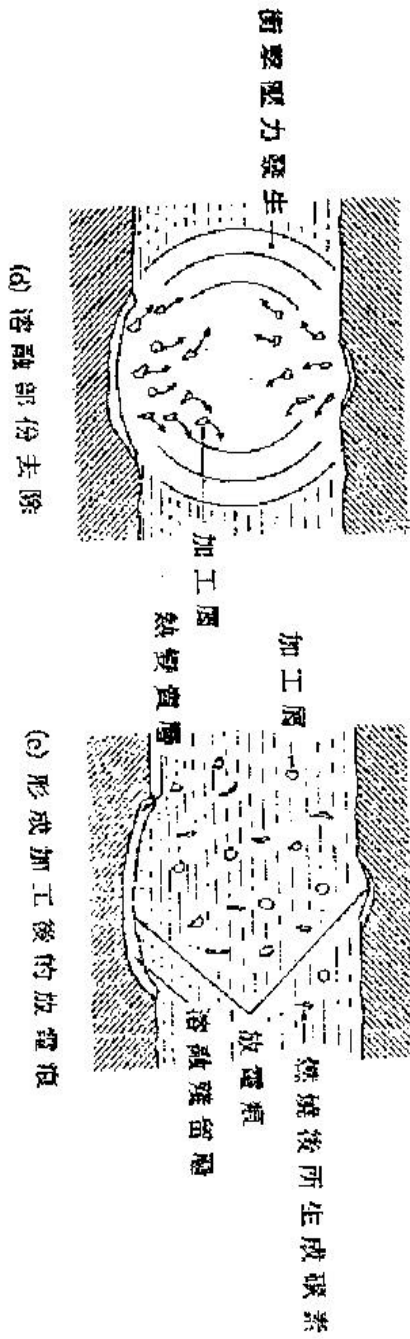
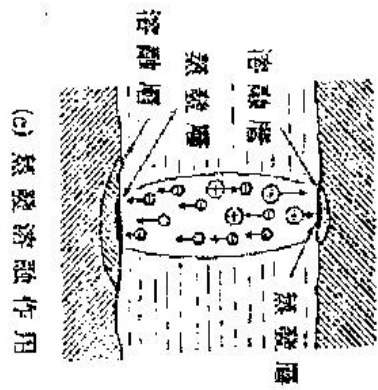
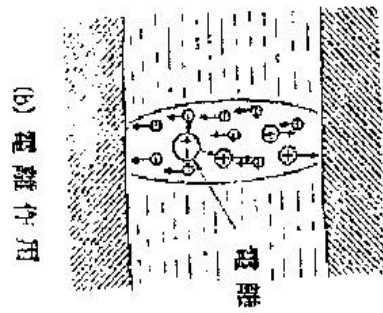
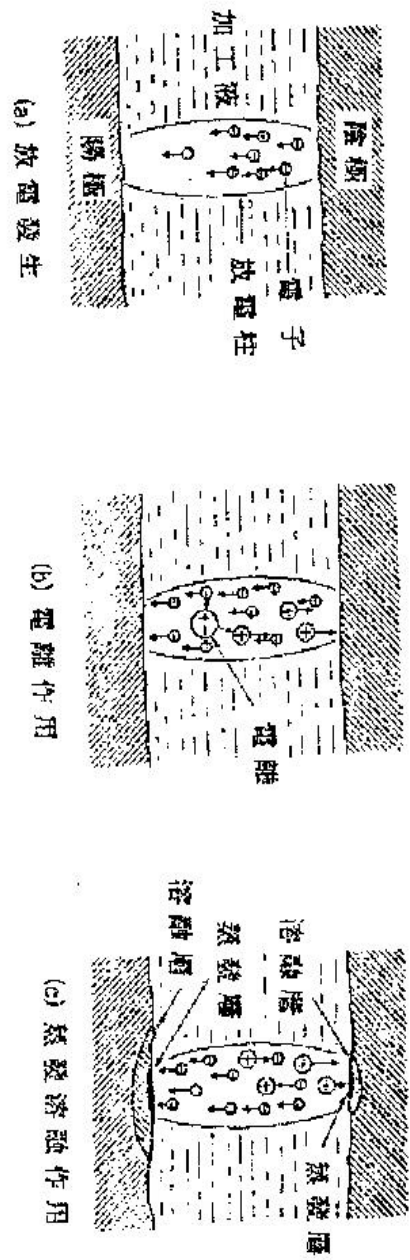


圖 1 放電加工除去機構

圖 2-2 放電加工除去機構 [3]

## 2-3 EDM 的兩種基本功能

放電加工法可對以往許多傳統方法所不能加工之堅硬金屬或合金材料如鎢鋼、硬化鋼、鉻鋼 . . . 等模具及工件。而其他特殊材料如 Nitralloy、Wasdalloy、Hastolloy . . . 等，亦可以放電加工法來處理，且零件也可應用於航空工業上。

放電加工是以電極（視為刀具）來貫穿被加工物，但因為過程中產生的火花去料不需電極與工件作相對運動，所以只要電極的穿進方向沒有凹凸不平時，使用一支電極便可加工成各種所需的形狀。

放電加工之特性如下：

1. 加工速度，即是被加工物去除速度。
2. 加工表面的粗糙度。
3. 電極的消耗率。
4. 電極與被加工物之間隙。

以上加工特性是由加工條件中電氣條件所支配。其說明如下：

放電電流 ( $I_p$ ) 脈衝時間 ( $T_p$ ) 衝擊係數 ( $D$ )。

1. 加工速度是  $I_p$ ， $T_p$  愈大時愈大， $D$  愈接近 100% 時愈大。
2. 加工表面粗糙度是  $I_p$ ， $T_p$  愈大時愈粗糙，加工速度愈大時愈粗糙。
3. 電極材料與被加工物材料都是  $T_p$  大時，電極消耗率小。間隙是支配加工精度。

## 2-4 放電加工參數

放電加工條件則是改變加工特性的參數，謂之放電加工的參數，放電輸入參數可由操作者依加工需要調整。

### 一. 加工輸入參數：

操作一放電加工機主要設定的參數有：閉路電壓  $U_o$ ， $I_p$  值電流  $I_p$ ，放電時間  $t_p$ ，休止時間  $t_o$ ，伺服間隙，極性 P 等，如圖 2-3 所示。

(1) 開路電壓  $U_o$  ( open voltage , V )

電源系統供應的電壓位準。實驗用慶鴻 ( 2MPP005A ) 型放電加工機的開路電壓為 90V。

(2)  $I_p$  值電流  $I_p$  ( peak current , A )

電流值最高者。在放形波裏， $I_p$  值電流等於平均電流 (  $I$  )。

(3) 放電時間  $t_p$  ( on-time ,  $\mu s$  )

放電的持續時間。在方形波裏，放電時間就是電流脈衝寬度值。

(4) 休止時間  $t_o$  ( off-time ,  $\mu s$  )

放電休止的時間。

(5) 絕緣崩潰放電電壓  $U_b$  ( breakdown voltage , V )

絕緣遭受破壞，電流驟升至放電電流時的電壓值。此值與兩極間的電阻有關。

(6) 伺服間隙 ( servo gap )

兩極間放電的距離。間隙小時放電效率高但排渣不易，易發生積碳。

(7) 極性 P ( polarity )

正極性 - 電極工具為陽極，工件為陰極。

負極性 - 電極工具為陰極，工件為陽極。

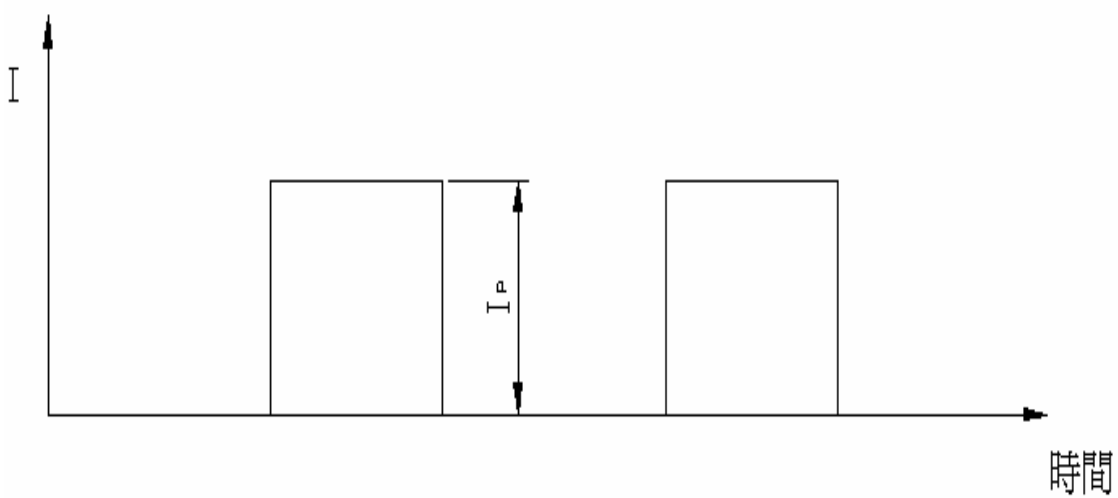
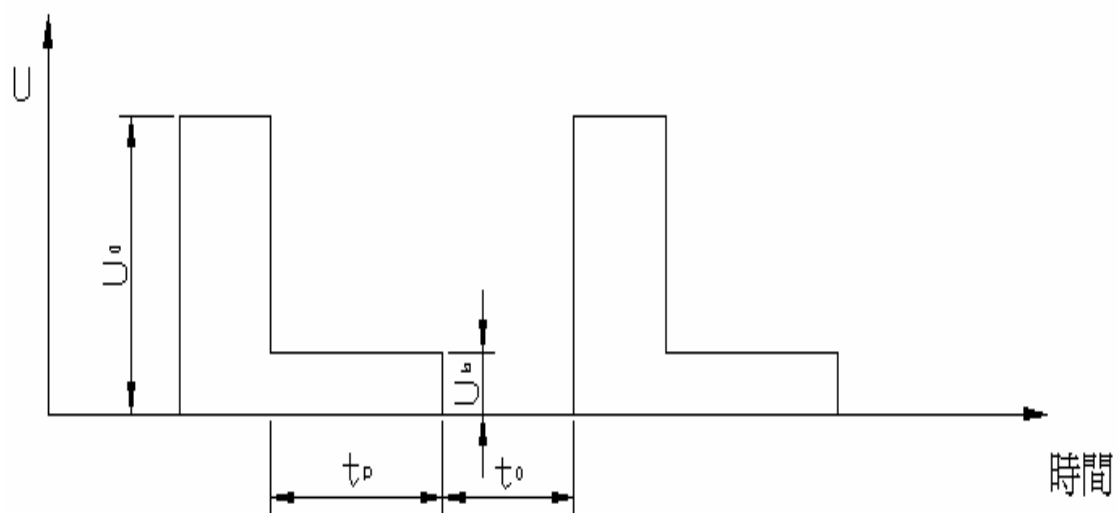


圖 2-3 放電脈波訊號 [2]

## 2-5 加工參數分析

放電輸入參數在放電後的加工結果，主要可分為( )加工速度 ( )電極消耗率 ( )表面粗糙度 ( )材料去除率 ( )再鑄層厚度。實際上無法同時兼顧。以下分別說明詳述四種放電加工性能。

### ( ) 加工速度

加工速度又稱材料去除率，是衡量放電加工快慢的參數，其意義為單位時間之材料去除量。測定加工的方法，係藉著精密電子天平，在工件未加工前，先測其重量再減去加工後的重量除以加工時間及工件密度即為所求。加工速度大小與放電電流(  $I_p$  )及放電時間(  $t_p$  )有關， $I_p$ 、 $t_p$  越大則加工速度越大。

### ( ) 電極消耗率

各次放電加工後的電極材料分別以精度達 0.0001g 的電子式精密天秤秤重 3 次記錄，求取其算數平均數與標準差。

### ( ) 表面粗糙度

以 Hommel T1000 表面粗糙度儀沿著試樣放電加工表面量測其粗糙度  $R_a$ ，每個式樣沿不同方向量測 3 次，求取其算數平均數與標準差。

### ( ) 再鑄層厚度測量分析

放電加工式樣沿著加工形成的孔洞直徑方向切開，式樣以酚醛樹脂熱鑲埋後再進行研磨、拋光、浸蝕等處理。經由光學顯微鏡與掃描式電子顯微鏡觀察並量測再鑄層厚度，由於再鑄層厚度變化較大，因此每隔 200  $\mu\text{m}$  距離量測一次，以了解其式樣再鑄層之厚度分布。每個式樣厚度數據求取其算數平均數與標準差。本品質特性為望小特性，可以找出各個參數對於放電加工試樣之再鑄層厚度的變動情形與貢獻率。

## 2-6 放電加工液的特性

放電加工時所使用的加工液，在加工的過程裡是用來引弧一種介質，其主要目的為：

1. 促使極間的絕緣恢復。
2. 將放電加工時所產生的熱部份加以冷卻。
3. 促使放電加工時所產生的熔融金屬粒子飛散。
4. 將飛散的加工粉（渣）排除於極間外。

當選擇加工液時，須能滿足下列六點要素：

1. 放電效率良好的持性。
2. 適當的黏度。
3. 燃點高。
4. 氧化安定性良好。
5. 臭味性少。
6. 價格低廉。

通常黏度高的加工液適合粗加工業，黏度低的加工液，適合於細加工。

## 2-7 放電加工液之種類

### 1. 碳化油：

使用不含香料或其他添加物的油類，可獲得最佳的效果，油的黏度非常重要，高黏性的油，不適合於細加工，因為在細加工其間隙非常的狹窄，且高黏度液體在電極與工件間循環非常困難，另一方面，這種重油對於粗加工效果較佳。加工液的燃點很重要，容易汽化，並且產生大量瓦斯，使加工減緩。

### 2. 白酒精或煤油：

這兩種油黏度非常低，絕緣程度非常適合於作細加工或超細加工，對碳化鎢材料加工也很有效。加工液需要留意的是加工液溫度愈高、電極的冷卻不良，電極消耗會增加，通常加工槽內多置一油溫過熱及火警警報裝置，通常設定在 60°C，當超過此溫度時，機械會發出警報並且切斷放電電源。

## 2-8 加工液之規格表

代表性檢驗結果	昭和株式后油加工油
美制比重:Gravity, °API 15.6 °C	35.1
粘 度:Viscosity	
Kin.cst at 40.0 °C	3.72
閃 光 點:Flash point COC °C ( °F)	136(277)
顏 色:Color D1500	L1.0
銅片腐蝕:Copper strip Corrosion Test	1a
蒸餾範圍:Distillation range °C	
I.B.P	266
F.B.P	322



## 第三章 實驗相關流程

### 3-1 實驗設備

#### (1). 電源供應系統：

由早期的發展到最新的研究，電源供應系統可分為三大類：(1) 電容器放電迴路 (2) 電晶體放電迴路 (3) 電晶體與電容器混合式控制迴路。本實驗係採用國產的雕模放電加工機，其迴路設計係採用等能量電晶體與電容器混合控制迴路，此優點係放電迴路功率大、能量損失小、頻率範圍寬、電壓提供範圍為 90 270 伏特。

#### (2). 伺服控制系統：

自動控制經常保持適當的加工極間間隙，才能使放電加工安定的進行。其原理係放電電壓訊號經過濾波後所得到的值與設定的參考電壓比較得其差值，利用此差值調節主軸上下，其控制方式可分為 (a) 電動機控制 (b) 油壓伺服控制。本實驗機器係採電動機控制伺服控制系統。

#### (3). 放電加工液迴路循環系統：

放電加工時使用加工液的目的有：

- (1) 促使放電加工時所產生的熔融金屬濺散。
- (2) 將濺散的加工屑排除於極間外。
- (3) 將放電加工時的加工熱部份冷卻。
- (4) 促使極間的絕緣恢復。

( 1 ) 放電加工液的好壞影響到加工後工件的表面粗度與加工速度而黏性為放電加工液最主要的因素之一，本實驗則採用一般的煤油做為放電加工液，煤油黏性低，流動性好，在精加工方面有良好的加工特性。在放電加工時，加工屑會隨著加工液的噴流而混雜在加工液中，若持續加工時，加工屑會愈來愈多，進而破壞極間的絕緣性，而造成放電不安定，降低加工速度，如圖 3-1 所示。



圖 3-1 放電加工液再生循環系統實體圖

( 2 ) 機械本體結構：

放電加工機的加工方式係非接觸性的熱熔加工，與傳統工作母機藉刀具與工件接觸的切削不同。無噪音、振動之考慮，故對結構的剛性要求較低，所作出的成品精度亦可提高，本實驗機器在放電加工機(Z軸)精度要求在(  $\pm 2 \mu\text{m}/100\text{mm}$  行程 )，本實驗是使用慶鴻( 2MPP005A )放電加工機，如圖 3-2 所示。



圖 3-2 放電加工機機械本體結構

### 3-2 量測儀器

成功的實驗是需要量測設備的輔助，才能得到正確的結果，由於實驗需要，本研究借重了很多精密量測設備及加工機本體的總監控設備，量測設備分述如下：

#### (一) 精密電子天平：

用精密的電子天平，量測加工前與加工後電極與工件的重量差，計算出加工速度及電極消耗比。本實驗係採用 SWISS QUALITY 的精密電子天平，精密度可達 0.0001g。

#### (二) 電子顯微鏡：

加工後的工件與電極表面，不同加工條件下有明顯的差異，為比較其表面凹凸不平的顯微特徵，實驗中以 OLYMPUS 牌的電子顯微鏡視察並照相。

#### (三) 表面粗度儀：

放電加工時由於條件不同，表面狀態的平坦或粗糙，可由表面粗度儀量出。量測在工件表面以輻射狀方式量取五個不同路徑的粗度值，再取其均值。

## 表面粗糙度表示法：

表面粗糙度有非常多種制度來表示其粗糙的程度，種類共計有：中心線平均粗糙度( $R_a$ )、自乘平均平方根粗糙度( $R_q$ )、最大高度粗糙度( $R_{max}$ )、波峰中心線粗糙度( $R_p$ )、波谷中心線粗糙度( $R_r$ )以及本實驗所採用的是十點平均粗糙度( $R_z$ )。其中以( $R_{max}$ )、( $R_z$ )、( $R_a$ )；這三種最為常用。以下，便舉出最常用的三種來說明：

### 1. 最大高度粗糙度： $(R_{max})$

最大高度粗糙度，係指以表面粗糙度曲線的平均線為基準，以平行於平均線的二條通過最高點與最低點之平行線的距離，來表示表面粗糙度的一種方法。

### 2. 十點平均粗糙度： $(R_z)$

十點平均粗糙度係指以表面粗糙度曲線之平均線為基準，於一基準長度分別於平均線上方選取五個波峰平均值及五個波谷平均值，此兩值之差，及即為十點平均粗糙度。

### 3. 中心線平均粗糙度： $(R_a)$

中心線平均粗糙度係指一種以表面粗糙度曲線的中心線為基準，以表面粗糙度曲線距之中心線距離之絕對平均值，來表示表面粗糙度的一種方法，又稱為算術平均粗糙度。

### 3-3 實驗材料

以下分別將實驗中所使用的工件、電極及粉末，材料說明如下：

#### (一)工件：SKD11 模具鋼

SKD11 材料特性：

屬於高碳高合金鋼，是沖壓模、塑膠模等多用途之代表。淬火後之沃斯田體殘留量約在 13%~20%，可藉由深冷處理或高溫回火加以消除。對於硬度及韌性兩方都重視的塑膠模具，以高溫回火後二次硬化為 HRC58 左右的硬度使用，較為安全。

#### (二)電極：電解銅

以電解銅做為電極有效電加工速度快、成本低、放電穩定性良好等優點，故本實驗以市售退火電解銅棒為電極材料，一般市面上又稱紫銅，其純度達 99.9%以上，其尺寸大小如圖 3-4(b)。加工成直徑 8 mm，長度 60 mm 的電極棒，並浸泡於丙酮溶液以超音波震盪清洗 5 分鐘去除油漬，烘乾後分別以精達 0.0001g 的電子式精密天平秤重紀錄，供每次實驗之用。

#### (三)粉末：非導電性粉末

本實驗選用市售之鋁微粉，添加進入放電加工液中。

非導電性粉末：鋁粉，粉末的物理性質粉末粒徑：約 5  $\mu$ m。

## 電極材料之尺寸

紅銅： 8mm 50mm

鐵鋁錳合金鋼 15mm 10mm

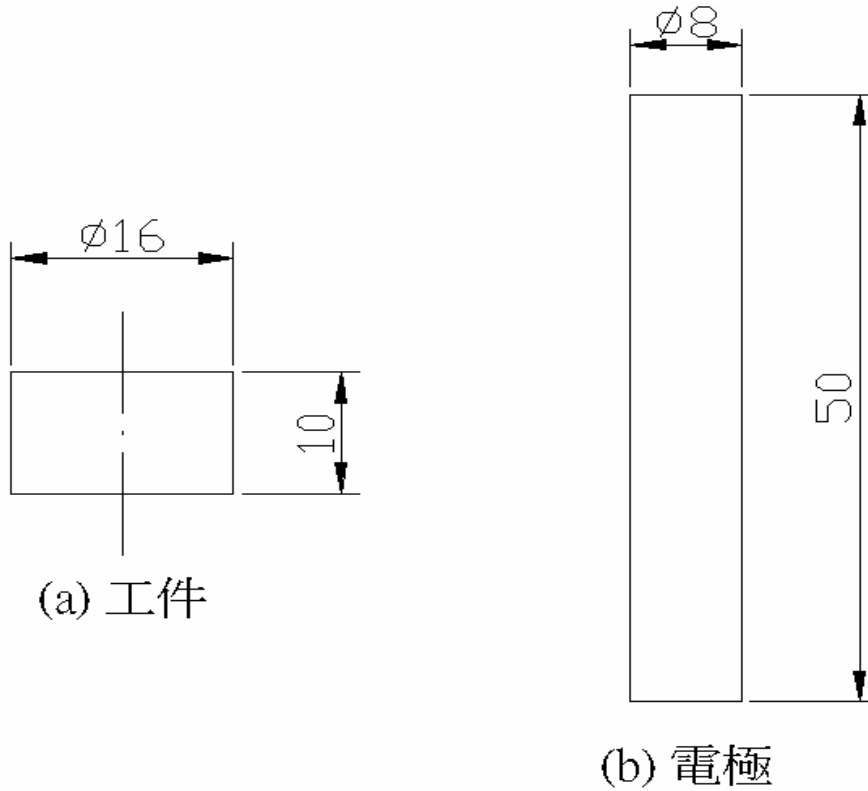


圖 3-3 實驗材料尺寸圖

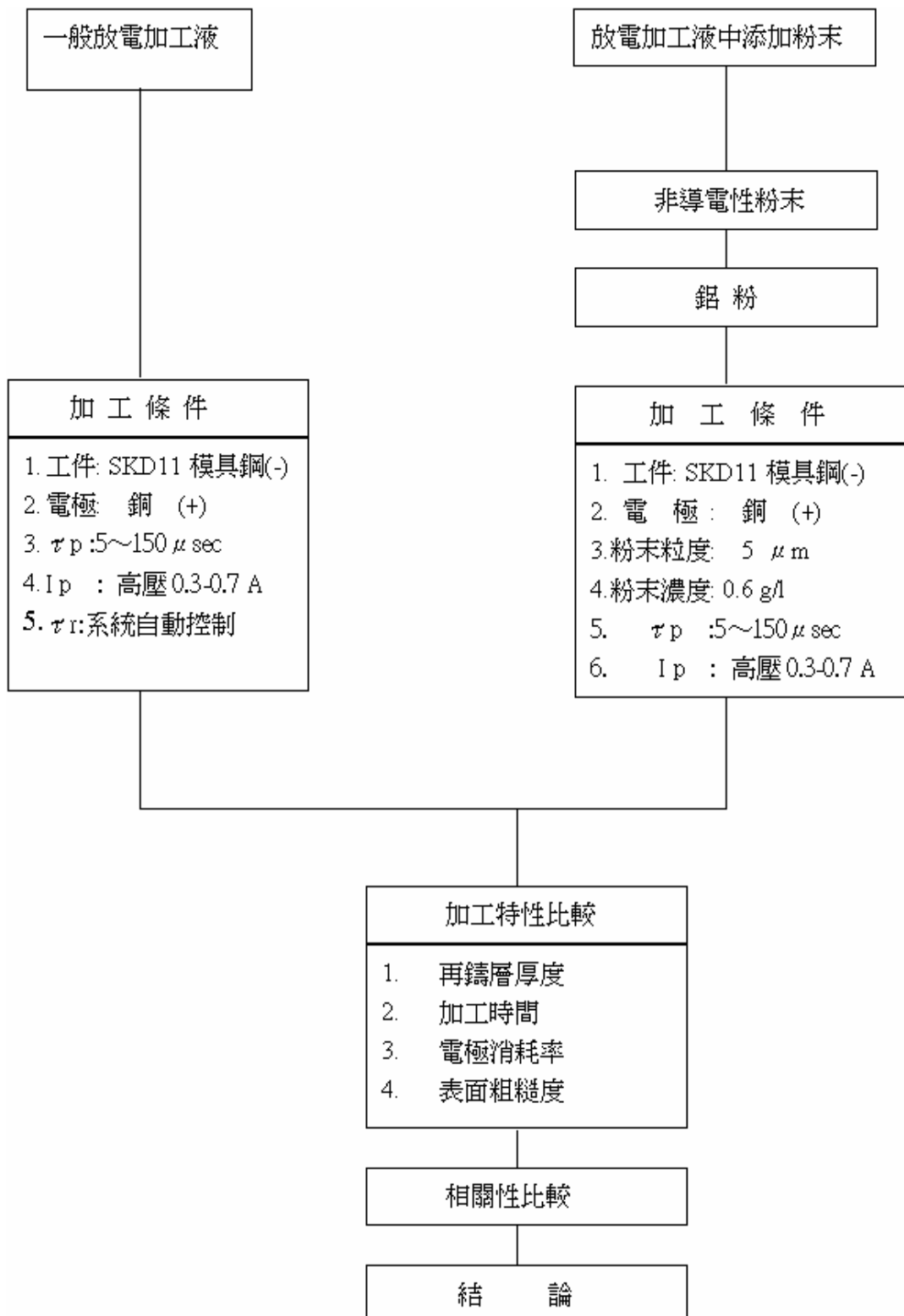


圖 3-4 實驗流程圖



### 3-4 實驗步驟

基本實驗步驟如下

(一) 材料準備與安置：

先將  $\varnothing 16$  的 SKD11 模具鋼棒材與  $\varnothing 8$  的銅條加工成的尺寸，並將工件與電極兩面，用研磨機研磨，在電極研磨後，再以細砂紙拋光，緊接著將電極與工件放超音波洗淨機內洗淨，洗淨後拿出用吹風機吹乾，放精密電子天平內秤重量並做記錄。然後再將電極安置於放電加工機主軸上(正極)，工件固定於特別設計的加工液容器內(負極)。

(二) 安裝放電加工液再生裝置並注入放電加工液(連接放電加工液再生裝置管路，並注入煤油。)若為添加粉末的加工液，則需將粉末先以天平定量為所需的重量，再將粉末加入與煤油混合。

(三) 設定放電加工參數：

依照的加工輸入參數來變更加工條件，進而操作實驗。

(四) 整理加工後的加工特性：

以電子天平量測加工工件電極的減少量，並求出加工速度、電極消耗量，再利用精密表面粗度儀，量測加工後工件表面的情形，最後再以週邊的輔助儀器，量測極間間隙。

(五) 觀察與照相：

將特殊情況的試片或電極經超音波洗淨後，置入熱鑲埋內，以不同的放大倍率觀察，並找出所需的部位照相紀錄。

(六) 分析與討論：

分析比較不同粉末液、不同加工條件時，之間特性的差別，並討論其原因與相關性。

### 3-5 實驗數據的相關計算

#### (1) 材料去除率測量分析

各試樣分別以精度達 0.0001g 的電子式精密天秤秤重 3 次紀錄，求取其算數平均數與標準差，並依序計算出各組放電加工條件的 SN 比，算出各放電參數在不同水準下的 SN 比強度，並畫出回應圖來觀察各參數的影響。本品質特性為望大特性，由 SN 比計算結果透過變異數分析 (ANOVA)，可以找出各參數對於放電加工材料去除率的變動情形與貢獻率。

#### (2) 放電加工試樣表面粗糙度測量分析

以 Hommel T1000 表面粗糙度儀沿著試樣放電加工表面量測其粗糙度  $a$ ，每個試樣沿不同方向量測 3 次，求取其算數平均數與標準差，並依序計算出各組放電加工條件的 SN 比，算出各放電參數在不同水準下的 SN 比強度，並畫出回應圖來觀察各參數的影響。本品質特性為望小特性，由 SN 比計算結果透過變異數分析 (ANOVA)，可以找出各參數對於放電加工試樣表面粗糙度的變動情形與貢獻率。

#### (3) 再鑄層厚度測量分析

放電加工的試樣沿著加工形成的孔洞直徑方向切開，試樣以酚醛樹脂熱鑲埋後再進行研磨、拋光、浸蝕等處理。經由光學顯微鏡與掃描式電子顯微鏡觀察並量測再鑄層厚度，由於再鑄層厚度變化較大，因此每隔 200  $\mu\text{m}$  距離測量一次，以了解其試樣再鑄層之厚度分布。各試樣厚度數據求取其算數平均數與標準差，並依序計算出各組放電加工條件的 SN 比，再根據表算出各放電參數在不同水準下的 SN 比強度，並畫出回應圖來觀察各參數的影響。本品質特性為望小特性，由 SN 比計算結果透過變異數分析 (ANOVA)，可以找出各參數對於放電加工試樣再鑄層厚度的變動情形與貢獻率。

### 3-6 加工條件-一般加工液

1. 放電加工深度：0.2 μm

( S1 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.3 安培 )

( S2 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.7 安培 )

( S3 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培 )

S 碼	放電幅 ( μ sec )	休止幅 ( μ sec )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 ( v )	最低電 壓 ( v )	放電時 間
S1	1.5	3	1	1	120	100	1:03:10
S2	1.5	3	2	2	135	110	1:00:24
S3	3.5	4	3	3	130	100	59:10

2. 放電加工深度：0.2 μm

( S4 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培 )

( S5 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 0.3 安培 )

( S6 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 0.7 安培 )

S 碼	放電幅 ( μ sec )	休止幅 ( μ sec )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 ( v )	最低電 壓 ( v )	放電時 間
S4	6.5	6.5	4	4	125	90	43:19
S5	9	9	5	5	125	95	40:07
S6	9	12	6	6	120	80	50:11

3. 放電加工深度：0.2 μm

( S7 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 1.0 安培 )

( S8 放電電流：低壓 1.2 安培、高壓 0.3 安培 )

( S9 放電電流：低壓 1.2 安培、高壓 0.7 安培 )

S 碼	放電幅 ( μ sec )	休止幅 ( μ sec )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 ( v )	最低電 壓 ( v )	放電時 間
S7	12	12	7	7	125	75	21:45
S8	12	12	8	8	110	55	19:10
S9	18	9	9	9	110	55	11:08

### 3-7 加工條件-添加鋁粉

1. 放電加工深度：0.2  $\mu\text{m}$

( S1 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.3 安培 )

( S2 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.7 安培 )

( S3 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培 )

S 碼	放電幅 ( $\mu\text{sec}$ )	休止幅 ( $\mu\text{sec}$ )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 (v)	最低電 壓 (v)	放電時 間
S1	1.5	3	19	19	115	100	1:20:27
S2	1.5	3	20	20	135	110	1:10:04
S3	3.5	4	21	21	125	100	1:02:40

2. 放電加工深度：0.2  $\mu\text{m}$

( S4 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培 )

( S5 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 0.3 安培 )

( S6 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 0.7 安培 )

S 碼	放電幅 ( $\mu\text{sec}$ )	休止幅 ( $\mu\text{sec}$ )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 (v)	最低電 壓 (v)	放電時 間
S4	6.5	6.5	22	22	125	90	45:29
S5	9	9	23	23	125	90	46:14
S6	9	12	24	24	120	80	42:41

3. 放電加工深度：0.2  $\mu\text{m}$

( S7 放電電流：低壓 0.5 安培、高壓 1.0 安培 )

( S8 放電電流：低壓 1.2 安培、高壓 0.3 安培 )

( S9 放電電流：低壓 1.2 安培、高壓 0.7 安培 )

S 碼	放電幅 ( $\mu\text{sec}$ )	休止幅 ( $\mu\text{sec}$ )	試片編 號	電極編 號	最高電 壓 (v)	最低電 壓 (v)	放電時 間
S7	12	12	25	25	120	75	27:54
S8	12	12	26	26	110	55	23:10
S9	18	9	27	27	110	55	16:08

## 第四章 實驗結果與討論

### 一、實驗結果比較圖表：

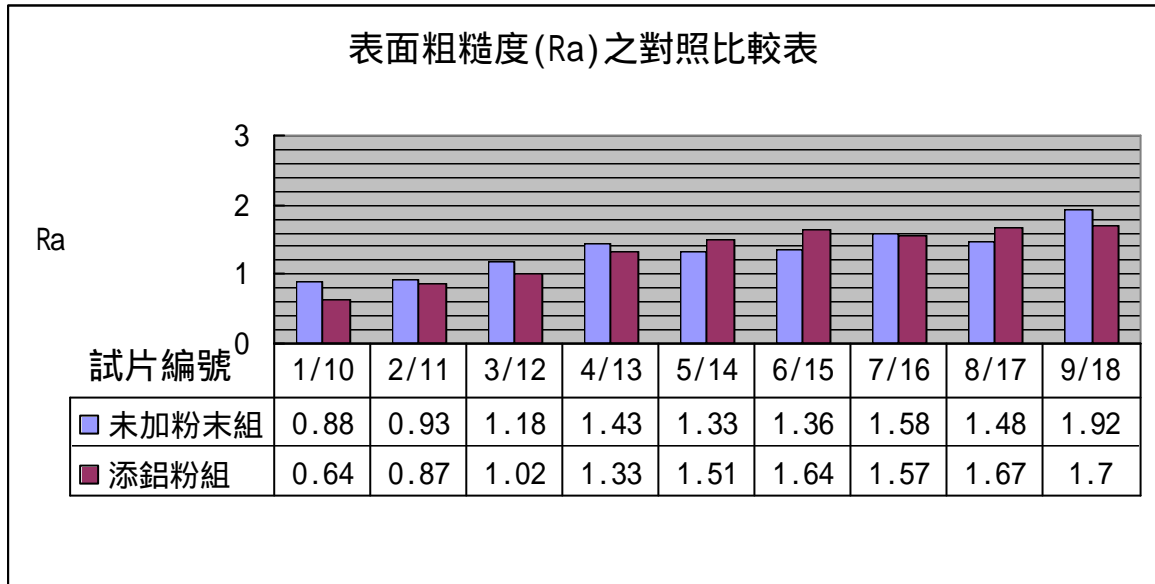


圖 4-1 粗糙度(Ra)比較長條圖

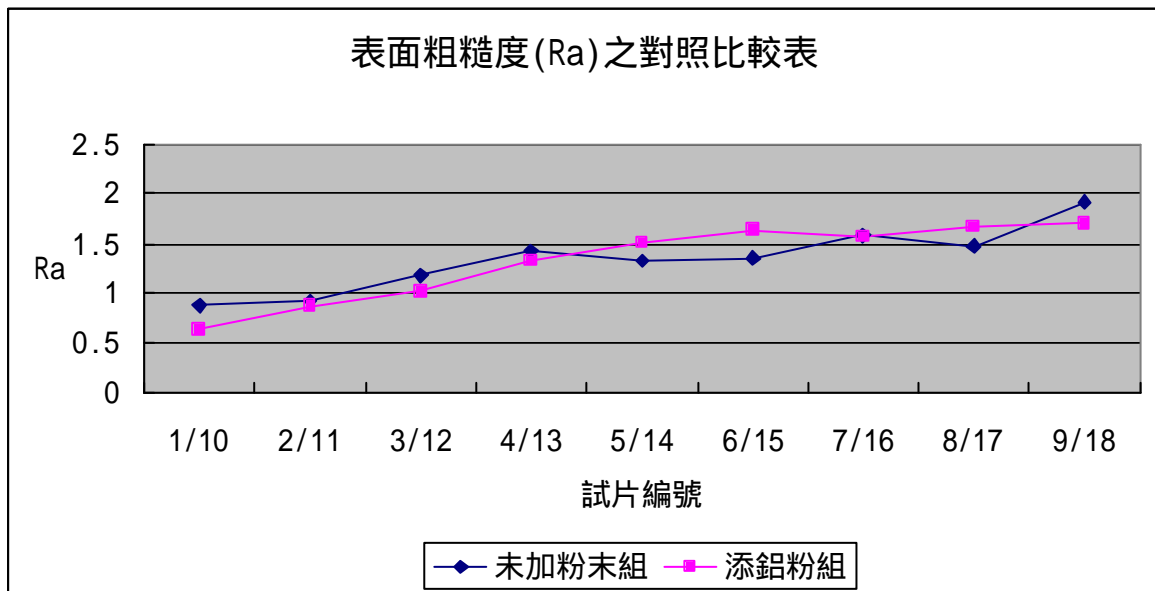


圖 4-2 粗糙度(Ra)比較曲線圖

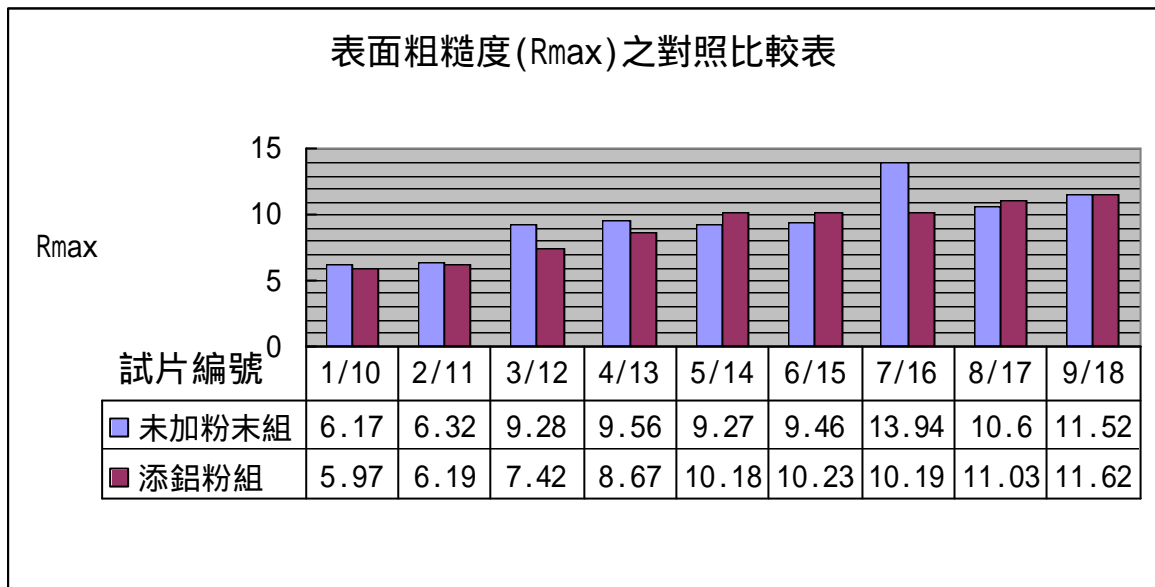


圖 4-3 粗糙度(Rmax)比較長條圖

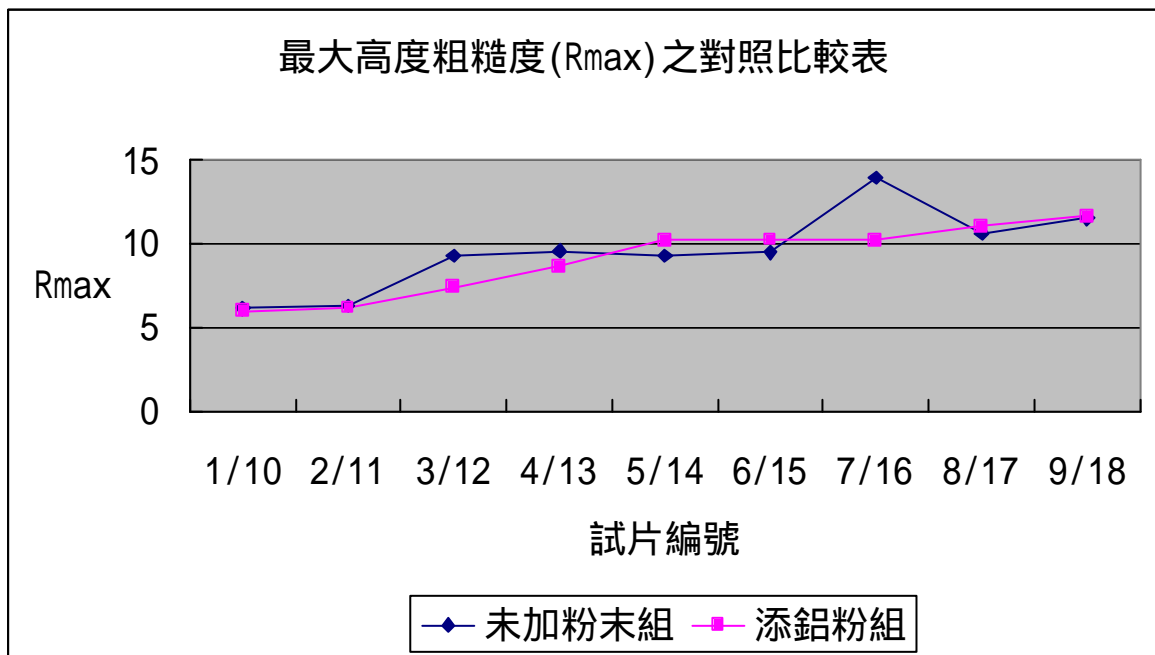


圖 4-4 粗糙度(Rmax)比較曲線圖

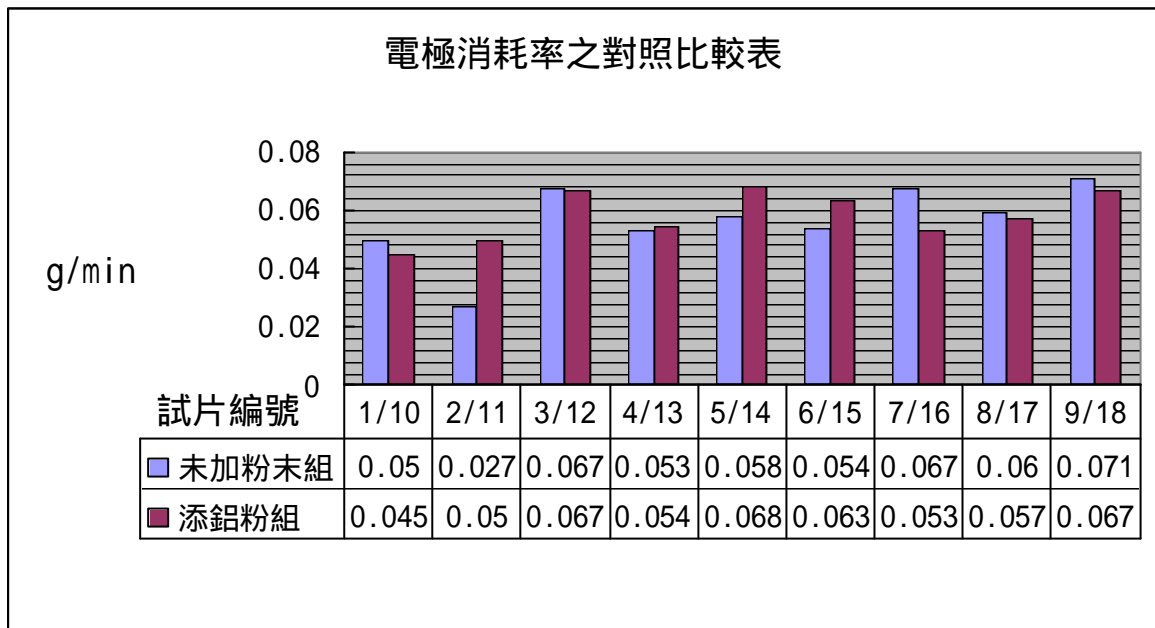


圖 4-5 電極消耗率之對照比較長條圖

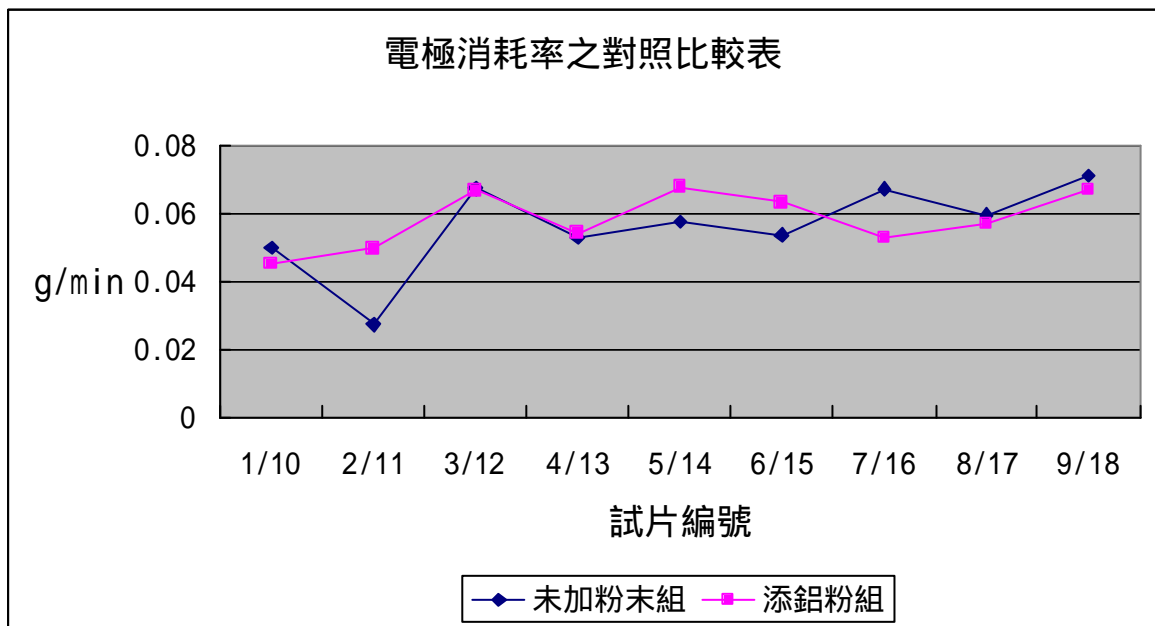


圖 4-6 電極消耗率之對照比較曲線圖

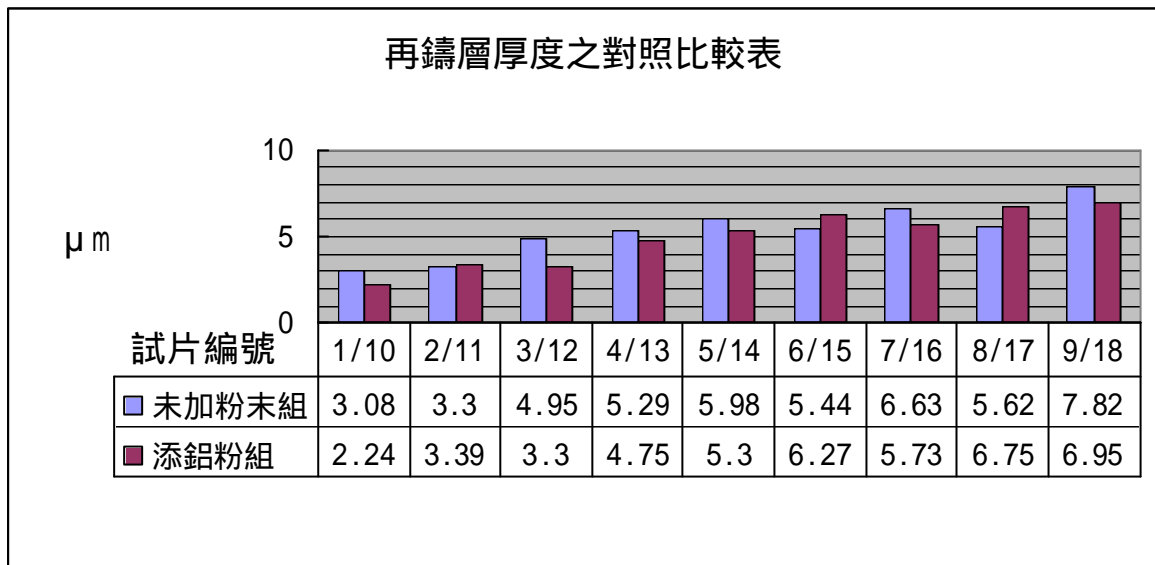


圖 4-7 再鑄層厚度之對照比較長條圖

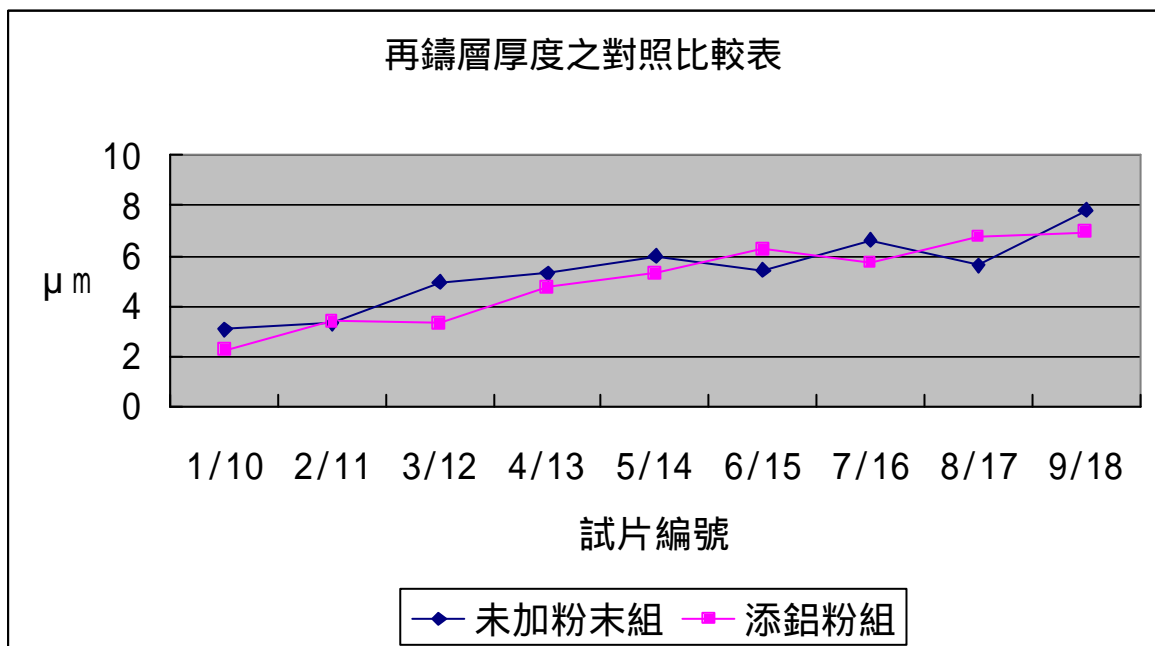


圖 4-8 再鑄層厚度之對照比較曲線圖



## 二、放電加工後表面粗糙度、電極消耗率與鑄層厚度數據：

試片編號	表面粗糙度 (Ra)	表面粗糙度 (Rmax)	放電幅 (μ sec)	休止幅 (μ sec)	電極消耗率 (g/min)	最高電壓 (v)	最低電壓 (v)	放電時間	再鑄層厚度 (μ m)
1	0.88	6.17	1.5	3	0.0499	120	100	1:03:10	3.08
2	0.93	6.32	1.5	3	0.0272	135	110	1:00:24	3.30
3	1.18	9.28	3.5	4	0.0674	130	100	59:10	4.95
4	1.43	9.56	6.5	6.5	0.0529	125	90	43:19	5.29
5	1.33	9.27	9	12	0.0577	125	95	40:07	5.98
6	1.36	9.46	9	12	0.0537	120	80	50:11	5.44
7	1.58	13.94	12	12	0.0672	125	75	21:45	6.63
8	1.48	10.60	12	12	0.0596	110	55	19:10	5.62
9	1.92	11.52	18	9	0.0712	110	55	11:08	7.82

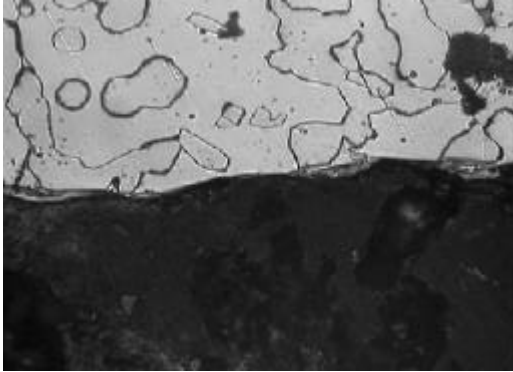
表 4-9 加工後表面的相關數據(未加粉)

試片編號	表面粗糙度 (Ra)	表面粗糙度 (Rmax)	放電幅 (μ sec)	休止幅 (μ sec)	電極消耗率 (g/min)	最高電壓 (v)	最低電壓 (v)	放電時間	再鑄層厚度 (μ m)
10	0.64	5.97	1.5	3	0.0452	115	100	1:20:27	2.24
11	0.87	6.19	1.5	3	0.0497	135	110	1:10:04	3.39
12	1.02	7.42	3.5	4	0.0667	125	100	1:02:40	3.30
13	1.33	8.67	6.5	6.5	0.0543	125	90	45:29	4.75
14	1.51	10.18	9	12	0.0679	125	90	46:14	5.30
15	1.64	10.23	9	12	0.0633	120	80	42:41	6.27
16	1.57	10.19	12	12	0.0529	120	75	27:54	5.73
17	1.67	11.03	12	12	0.0571	110	55	23:10	6.75
18	1.70	11.62	18	9	0.0670	110	55	16:08	6.95

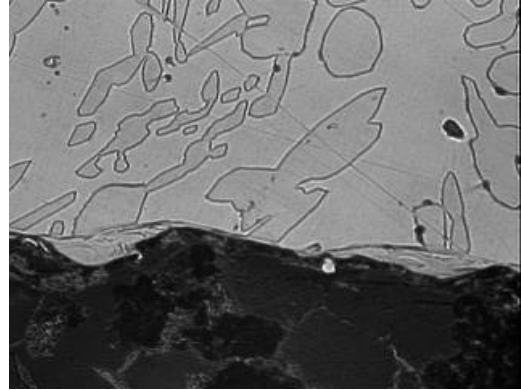
表 4-10 加工後表面的相關數據(添加鋁粉)

## 材料金相圖

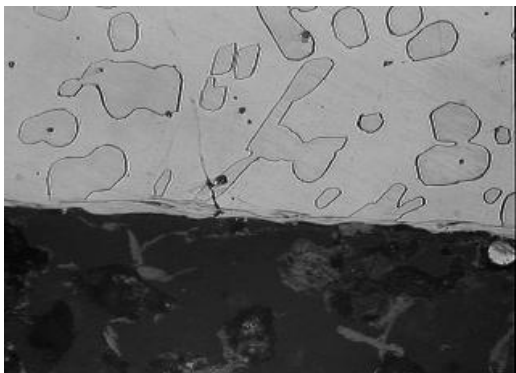
放電加工深度：0.2  $\mu\text{m}$



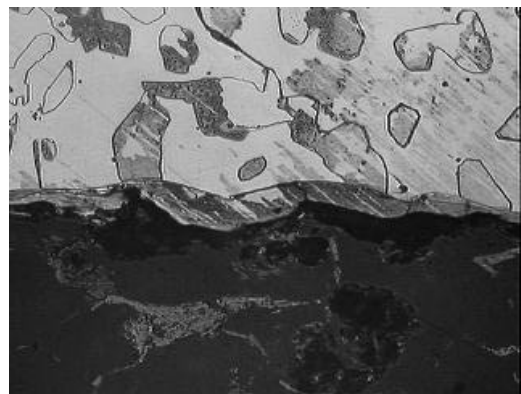
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S1 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.3 安培)



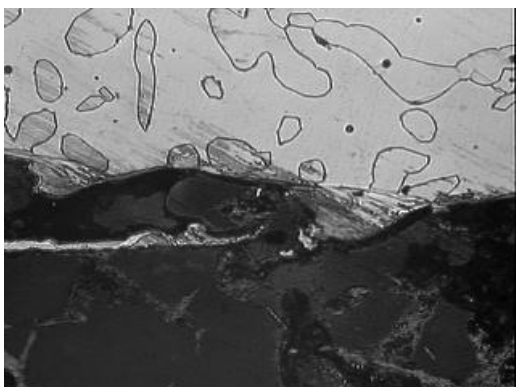
左圖 -- 一般加工液



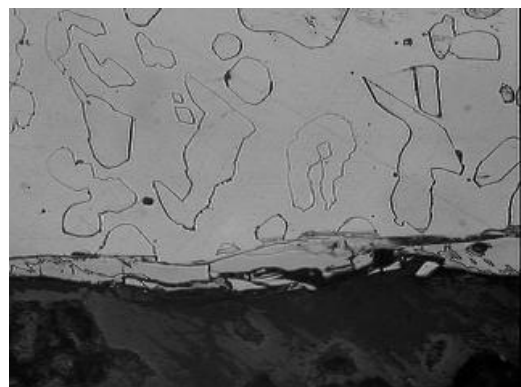
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S2 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 0.7 安培)



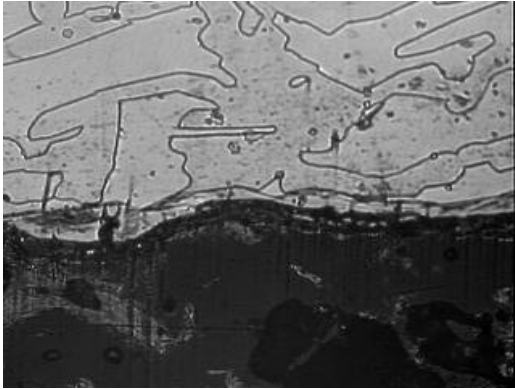
左圖 -- 一般加工液



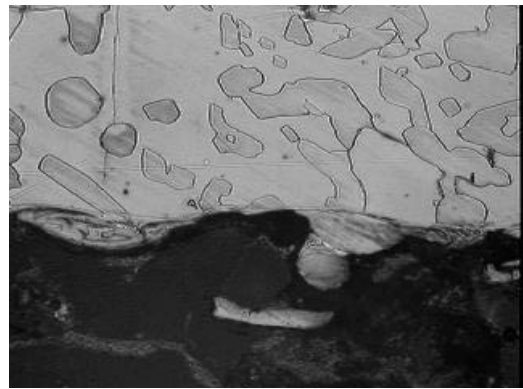
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S3 放電電流：低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培)



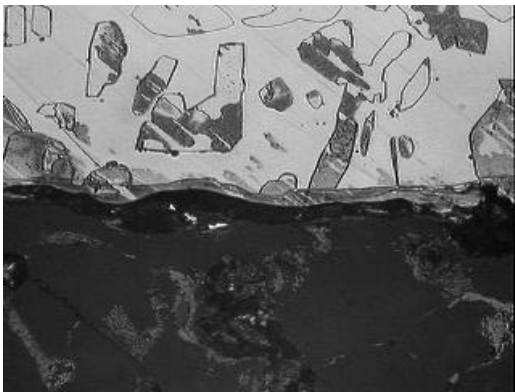
左圖 -- 一般加工液



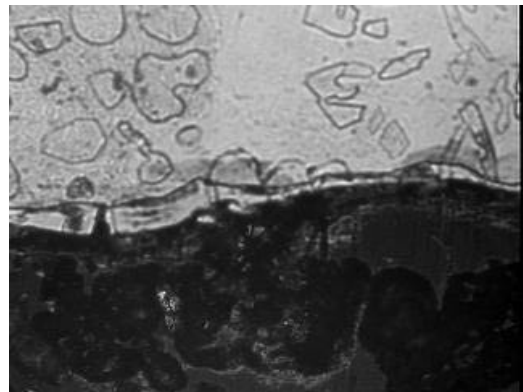
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S4 放電電流: 低壓 0.0 安培、高壓 1.0 安培)



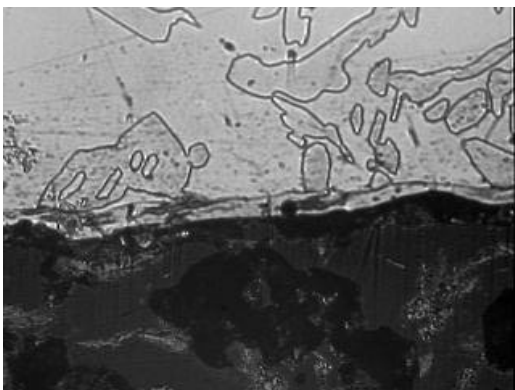
左圖 -- 一般加工液



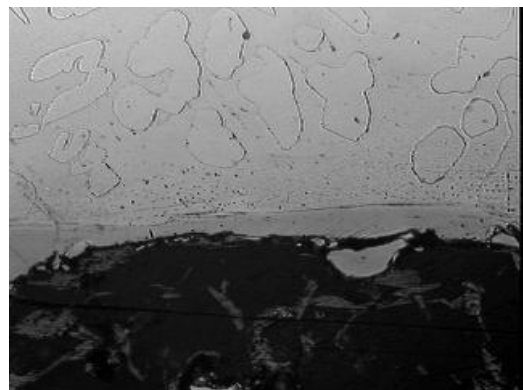
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S5 放電電流: 低壓 0.5 安培、高壓 0.3 安培)



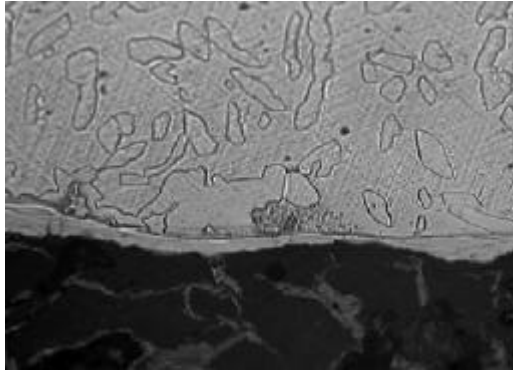
左圖 -- 一般加工液



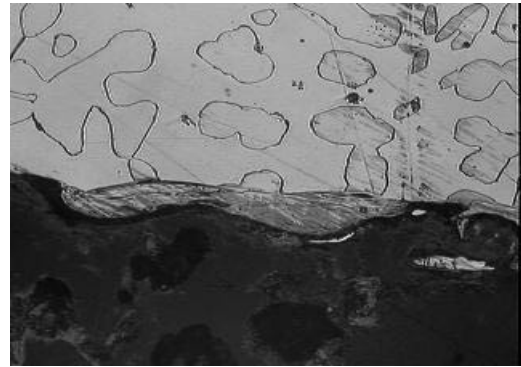
右圖 -- 添加鋁粉  
加工條件 (S6 放電電流: 低壓 0.5 安培、高壓 0.7 安培)



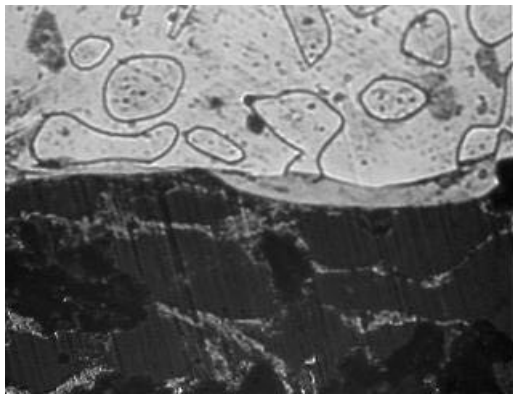
左圖 -- 一般加工液



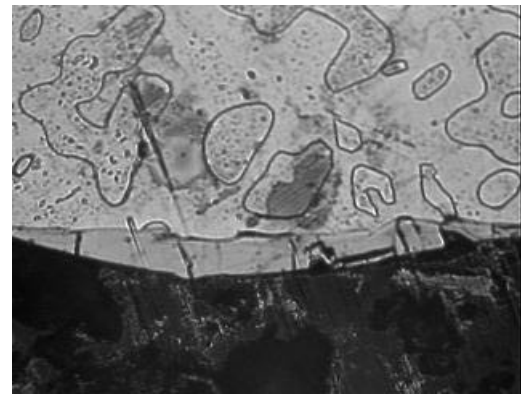
右圖--添加鋁粉  
加工條件 ( S7 放電電流： 低壓 0.5 安培、高壓 1.0 安培 )



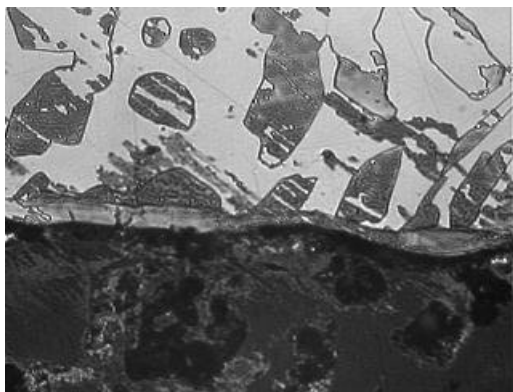
左圖--一般加工液右圖



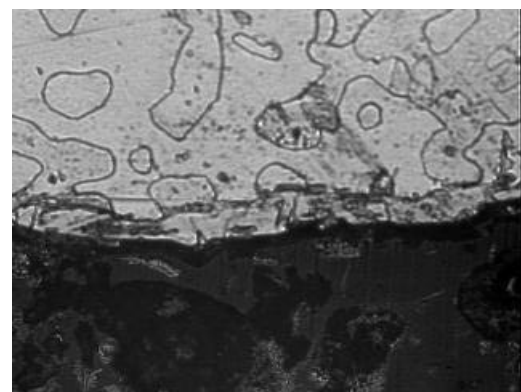
右圖--添加鋁粉  
加工條件 ( S8 放電電流： 低壓 1.2 安培、高壓 0.3 安培 )



左圖--一般加工液右圖



右圖--添加鋁粉  
加工條件 ( S9 放電電流： 低壓 1.2 安培、高壓 0.7 安培 )



左圖--一般加工液右圖

圖 4-11 再鑄層厚度比較圖

#### 4-1 放電加工液中添加非導電性粉末(鋁粉末)的加工特性:

利用上述最佳的加工條件，在不同  $\rho$  條件下實驗，將所的放電加工特性與一般放電加工液做一比較。

##### (一)極間間隙：

鋁屬於非導電性的陶瓷材料，所以對電極與工件間的極間間隙影不大，由此看出添加粉末與未加粉末電極極間間隙，幾乎相重合。

##### (二)表面粗度

在不同  $\rho$  條件下，工件表面粗度，在  $\rho = 26 \mu \text{ sec}$  時，添加鋁粉的放電加工液所得到的表面粗度比未加粉末好。首先來討論添加鋁粉的放電機構圖，如圖 4-1。當放電柱由電極撞到工件時，由頗高溫高熱會產生似火山口凹痕，其周圍則形今相當厚度的高，此時若加工液中含有鋁粉末，則因噴流加速鋁粉泳動，干擾嶺高形成。鋁粉未能將熔融高出的部份分化為加工屑，隨著加工液的沖流而去除，由此可看出加工液中添加鋁粉末，加工後工件的表面有鋁的元素存在。何以在時間  $26 \mu \text{ sec}$  時添加鋁粉末加工可將表面粗度值改善為原來的  $1/3$ 。加工後電極來看，未添加粉末的加工電極，由於碳素的附著呈現凹凸不平的表面 ( $R_{mx}=41.45 \mu \text{ m}$ )，而添加鋁的粉末加工後電極，極間間隙小，粉末在電極與工件間泳動，微細且高硬度的氧化鋁粉，對電極表面的附著炭素可能進行了研磨，使得電極展現較均勻平坦的表面形態。基於這兩種原因，嶺高被分化及電極表面較平坦，所以添加鋁粉的加工液加工後工件的表面粗度可獲得極大的改善。唯隨著放電時間增加，且放電能是密度加大，加工速度快，添加鋁粉的表面粗度比未加粉末好。

### (三)加工速度：

由圖 4-2 可看出放電加工時，碳附著於電極的微觀情形：一般銅電極的電阻係數為  $17 \times 10^{-9}$  (ohm-m) 而碳的電阻係數為  $10^{-5}$  (ohm-m) 比銅大。若電極積碳層厚，且碳的附著不均勻時，放電路徑進行放電，電阻會增大，而減弱了放電能量是降低了加工速度。

### (四)相對電極消耗率：

當  $\rho = 26 \mu \text{ sec}$  時添加鋁粉的電極消耗量大於未加粉末的電極消耗量。原因為  $\rho$  極小時，極間間隙小所添加硬且細的鋁粉末在電極間運動，造成  $\rho$  小時電極消耗增大。

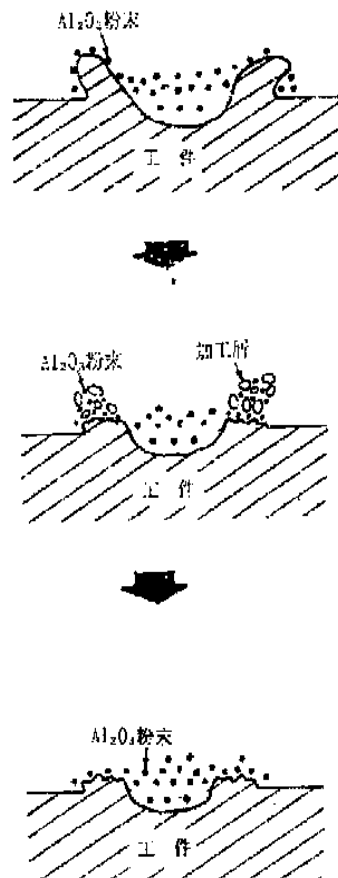
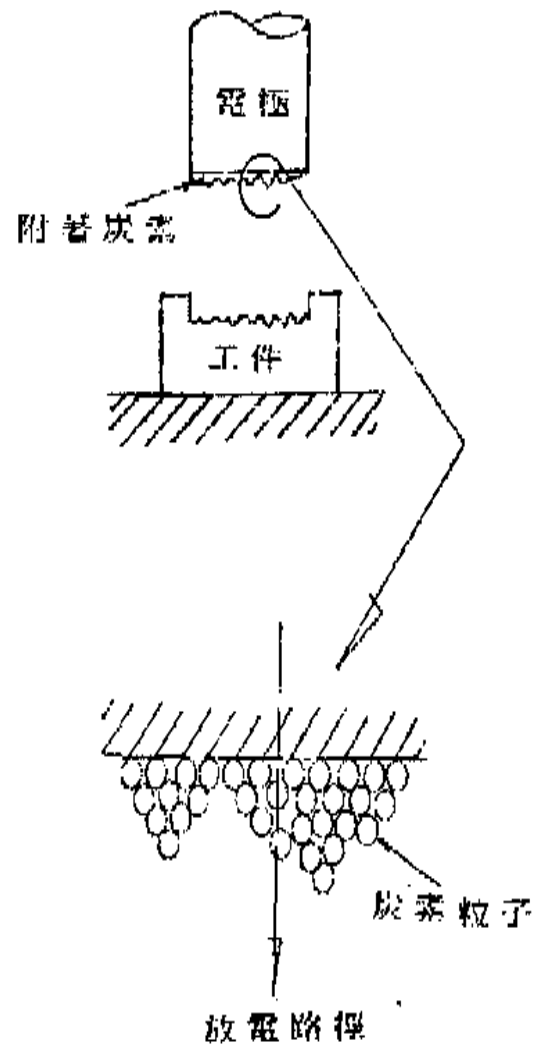


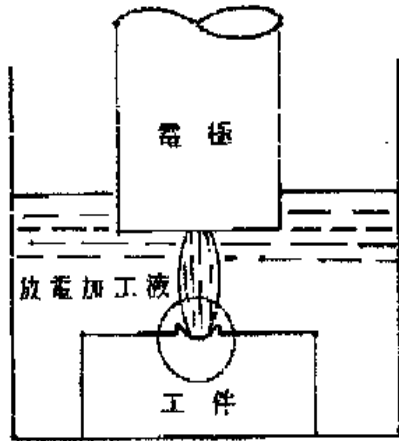
圖 4-12 放電加工液中添加氧化鋁粉的材料去除機構圖 [3]



炭素附著微觀狀態

圖 4-13 放電加工時，碳素附著於電極的微觀情形 [3]

(a) 一般放電加工液



(b) 添加鋁粉放電加工液

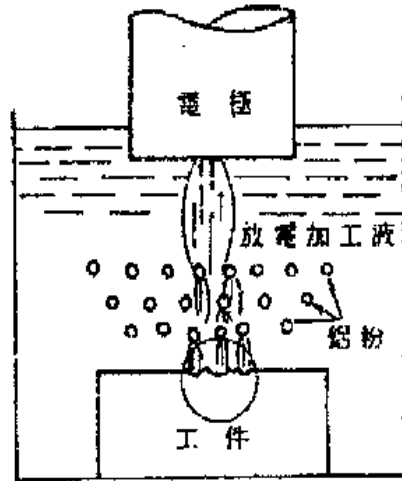


圖 4-14 鋁粉放電機構圖 [3]



## 第五章 結果與討論

綜合以上實驗結果可得以下結論：

本學期專題我們所討論的是放電加工，並添加粉末。放電加工(EDM)是現代精密加工的一種，其主要是利用兩電極間，產生局部放電，產生的熱能，再對工件造成融熔已達加工目的的一種特殊加工法。再放電中所造成的高溫使得煤油分解，兩極間形成電漿通道，使表面產生硬脆的白層、裂縫及結構上的改變；此種加工法是針對加工易硬化、堅硬材質、韌性較大、極薄細小的工件或是複雜度極高的工件來進行加工。

本專題除了對放電加工之工件表面做探討之外，還在放電加工液中添加粉末，以研究其粉末特性，進而對工件加工表層之影響。這次我們所使用的粉末可分為導電性及非導電性的，其主要實驗參數為：粉末粒度、粉末種類、放電電流、放電電壓、放電持續時間...等。粉末中，鋁粉為非導電性粉末，粒度為  $5\ \mu\text{m}$ 。

在實驗中，除了放電加工機外，我們還自製了粉末循環系統，其主要目的是可以讓粉末不被加工機的濾網濾除，而能循環使用，並且還加裝了攪拌馬達，使粉末不至於沉澱。在加入非導電性粉末-(鋁粉)在  $I_p = 4\ \text{A}$   $S_{\text{碼}} = 26$  的加工參數下，加工條件為粉末粒徑  $5\ \mu\text{m}$  粉末濃度  $0.6\text{g/l}$ ，可獲得較佳的表面粗糙度。其原因係藉著極硬且細的鋁粉在電極與工件之間流動，對加工電極表面的附著碳素及放電痕的凸出點進行研磨，以達加工後，擁有良好工件表面粗糙度的目的。

上述兩種加工液，加工後其工件表糙度的優劣順序如下：添加鋁粉末>未添加粉末一般電加工液。

由上述實驗結果看來，放電加工液中添加非導電性粉末(鋁粉)，可展現優良的加工特性，因此建議在一般放電加工時可採用粗、精的二段式加工法，如此既可提高加工速度，又可兼顧表面粗糙度。

## 5-1 電流與放電效果

加工效果隨工作電流值大小而改變，其關係如下：

工作電流量設定	小 <-> 大
切削量	少 <-> 多
表面粗糙度	細 <-> 粗
電極消耗	少 <-> 多

由實驗數據，可得知在放電加工中對切削率，和表面粗糙度影響最大的是電流的大小，大的電流的確可以有較快的切削速度，但是相對的其加工精度和比較差，而且會比較容易出現積碳的現象，而小的電流有較好的精度和加工表面，但是要達到所需的切削量，卻需要很長的時間，因此在進行放電加工前要先以其加工目的來選擇其放電時的電流，如在要求細加工時適合使用較小的電流，而粗加工時適合選用較大的電流以達到經濟效益的目的。

## 5-2 極性的影響

正極性及負極性加工時單一放電痕之比較，可以發現放電加工所形成放電痕的中央部分，在正負極性加工中有明顯的差異，正極性加工時放電的中央部有較多熔融未被沖除的材料再凝固而形成凸起的形狀，但在負極性加工時則在放電痕的中央部分的材料，大部分都在放電加工的過程中充分的予以去除，所以形成較深的凹陷且在放電痕周圍形成較大嶺高。

加工後典型的加工表面狀態及平均粗糙度佳的比較，由放電表面的觀察可以得知負極性加工時表面放電痕較粗大且深陷，所測得的表面粗度  $Ra=8.8\mu m$  明顯大於使用正極性加工時  $Ra=5.1\mu m$ 。同時熔融的材料受到絕緣液燃燒氣化所生成衝擊力的作用，將熔融部分的材料濺離中央部分而黏附在放電痕周圍形成較大的嶺高，因此在大部分熔融材料均被沖除，以負極性加工可得到較佳的材料去除效果但加工表面的粗糙度將比正極性差。

由於表面改質的目的並未在追求材料去除的效率，而是希望在加工材料表面能形成合金化層及顆粒強化機構，所以在表面改質的需求下，採用正極性加工，可得到較佳的改質效果，所以表面改質所進行的實驗在加工極性的選擇上均以正極性為主。

### 5-3 微硬度試驗

傳統放電加工法斷面微硬度在鄰接加工面有一層軟化層，其厚度約  $80\mu m$ ，這一層軟化層的存在是因為鋁合金乃是析出強化型的材料，放電加工時所輸入的局部高熱會對鋁合金的析出強化相產生過時效甚至於使強化相回入基地的現象，造成材料的軟化而使用放電與超音波複合加工則在加工斷面先產生一層約  $40\mu m$  硬化層，然後才是軟化層，因為使用放電與超音波複合加工會在加工區域產生硬質顆粒強化相及合金元素的固溶強化，所以使用放電與超音波複合加工可大幅改善鋁合金加工表面的硬度分佈型態，在加工表面可獲得較高的硬度。

#### 5-4 放電能量對改質深度的影響

放電電流及極間電壓對改質層深度的關係，其中改質層的深度乃是沿加工斷面 Si 成分的 EPMA 定量分析時，Si 含量高於母材的深度。Si 含量隨著放電電的增加加大，當放電電流在 12A 時達到最大值，然後隨放電電流的繼續增大，改質層的深度並沒繼續增大而是呈現微幅下降的趨勢。由於放電電流增加，所引發的材料熔融深度增加所以改質層的深度增加。但在長脈衝時間的加工條件下，電流的增大（超過 12A），會促成熔融部分材料在放電的過程中被去除的更為完全，所以在高電流的條件下改質層的深度會微幅下降。

改質層的深度隨極間電壓的增大而增加，極間電壓約在 80-100V 時達到最大值，然後隨極間電壓的增加，改質層的深度亦呈現微幅下降的趨勢。由於增加極間電壓將擴大加工時的極間間隙，間隙的增加將使更多的 SiC 懸浮於極間，因此改質層的厚度會隨極間間隙的增加而增加。但過大極間間隙使得極間密閉的局限效果降低，將使放電時所產生的爆炸衝擊效果減少，因此當極間電壓太大時（大於 100V），改質層的深度呈現微幅下降的趨勢。

## 參考文獻

- [1] 費百利編著，放電加工表層之研究，1994/5，台灣大學機械研究所論文。PP.23-26
- [2] 洪道南編著，放電加工極性之研究，1996/6，中正理工學院機械研究所論文。PP.10-14
- [3] 顏炳華編著，放電加工添加粉末之特性，1998/11，中央大學機械研究所論文。PP.5-15
- [4] 王朝正、李志偉、高景海編著，不銹鋼極鐵錳鋁合金鋼於氯化鈉沉積之熱腐蝕，1995，中國機械工程學會第十二屆全國學術研討會。PP.101-108
- [5] 趙志燁、秦崇德、羅鴻慶、洪振毓編著，鐵-X 鋁-30 錳-1 碳合金鑄件之切削性研究，1999，中國材料學會年度年會論文集。PP.10