

東南技術學院機械系

專題研究報告

鐵鋁錳線切割放電加工參數之探討

指導教授：吳坤齡

學 生：周政運 連怡馨

王彥勝 張政勳

陳奕璋 丁肇瑋

中華民國九十一年十一月十八日

摘要

線切割放電加工 WEDM 的加工參數眾多而且複雜，選取時需要仰賴技術與經驗，而廠商所提供的參數表又侷限於某些特定的範圍，無法滿足操作者的實際需求，針對此問題，本研究提出一解決方法，以田口式的實驗規劃法配合變異數分析。

未來線切割之發展，將會朝下述之方向努力;建立了加工參數對鐵鋁錳之加工特性間的關係，引用的加工特性有加工溝槽寬與表面粗糙度，最後考慮實際的加工情況，利用可行方向法的最佳化技術，在要求的多種限制條件下，得到適當的加工參數設定，經過實驗證明加工參數與加工特性的關係後，而求出之加工參數能符合實際的要求。最後由實驗結果得知，在加工參數方面: 水流強度設為 5 (Kg/cm²)，加工電流設為 4 (μ s)，休止時間設為 20 (μ s)，短路放電時間設為 2 (μ s)，輔助電流休時間設為 15 (μ s)，送線速度設為 12 (mm /s)。可得最佳表面品質。

目錄

摘要.....	
目錄.....	
圖表目錄.....	
第一章 前言.....	1
1-1 研究動機與背景.....	1
1-2 研究目的與方法.....	1
第二章 基本理論.....	3
2-1 線切割放電加工原理.....	3
2-2 放電加工與極性.....	7
2-3 放電加工過程.....	9
2-4 線切割加工參數.....	12
2-5 線切割加工特性.....	14

2-6 線切割機之用途及發展現況.....	17
第二章 實驗設備與方法.....	19
3-1 實驗材料.....	19
3-2 實驗設備.....	23
3-3 實驗加工參數.....	27
3-4 實驗方法.....	29
3-5 實驗流程.....	30
第四章 相關理論分析.....	31
4-1 田口式實驗設計.....	31
4-2 直交表矩陣實驗.....	32
4-3 因子水準效果.....	34
第五章 實驗結果分析.....	36
5-1 實驗結果分析.....	36

第六章 結論.....	47
6-1 線切削放電加工參數最佳化.....	47
6-2 未來研究方向.....	49
參考文獻.....	50
附錄.....	52

圖表目錄

圖 2-1 放電加工原理圖.....	5
圖 2-2 放電加工機構圖.....	6
圖 2-3 放電加工過程說明圖.....	11
圖 3-1 材料 10 倍之金相組織.....	21
圖 3-1-2 材料 50 倍之金相組織.....	22
圖 3-2 線切割放電加工機外觀圖.....	24
圖 3-3 表面粗糙測量儀.....	25
圖 3-4 工具顯微鏡.....	25
圖 3-5 鑲埋機.....	26
圖 3-6 拋光機.....	26
圖 4-1 因子效果圖.....	35
圖 5-1 表面粗糙度之回應圖.....	40

圖 5-2 表面粗糙度之回應圖.....	41
圖 5-3 表面粗糙度之回應圖.....	42
圖 5-4 表面粗糙度之回應圖.....	43
圖 5-5 表面粗糙度之回應圖.....	44
圖 5-6 表面粗糙度之回應圖.....	45
圖 5-7 加工溝槽寬之回應圖.....	50
圖 5-8 加工溝槽寬之回應圖.....	51
圖 5-9 加工溝槽寬之回應圖.....	52
圖 5-10 加工溝槽寬之回應圖.....	53
圖 5-11 加工溝槽寬之回應圖.....	54
圖 5-12 加工溝槽寬之回應圖.....	55
表 3-1 線電極的機械與物理性質.....	19
表 3-2 鐵鋁錳合金主要成份(重量百分比).....	20

表 3-3 鐵鋁錳之機械性質.....	20
表 3-4 參數設定.....	27
表 3-5 為 L-18 表.....	28
表 4-1 為 L-9 直交表.....	33
表 5-1 表面粗糙度實驗數據.....	37
表 5-2 表面粗糙度 S/N 回應表.....	39
表 5-3 加工溝槽寬實驗數據表.....	42
表 5-4 加工溝槽寬 S/N 回應表.....	44
表 6-1 最佳參數設定.....	48

第一章 前言

1-1 研究動機與背景

隨著機械工業的發展，近年來對於高硬度，高韌性、高韌性、高耐衝擊的合金材料需求日益增高。然而、此類材料利用傳統方式加工已漸漸不能滿足需求，因此電解研削法、超音波加工法及放電加工法等非傳統加工方式就廣泛的被應用於切削加工。而在加工方面，更是講求工件的表面品質(變質層厚度、表面成份、表面粗糙度等)。

線切割放電加工機是一種利用放電原理以銅線為電極對工件施予切割加工之數控工具機，因其精密、準確、方便之優異性能。使用線切割放電加工，特別是在高速粗加工下，除了因為放電熱而造成熱變質層，導致加工面品質的低落外，其傳統的直流式電源亦使得工件長期處於正極性的狀態，因而促使工件易於氧化電解，造成腐蝕，再次降低加工面的品質。然而欲達到高精度及良好表面品質的工件，需進行多道精加工以除去熱變質層及提高表面品質，所以線切割放電加工參數設定對加工後工件表面品質影響是值得去深入加以研究探討的。

1-2 研究目的與方法

放電加工面的狀況是由各個單發放電所造成凹陷所組成的，在所

使用的加工能量越大情形下，表面的品質即越差，會造成工件表面凹凸起伏不平，產生組織結構上的改變，以及裂縫，殘留應力的形成，此一表面之變質層會導致工件表面粗糙度變大、硬脆以及疲勞強度、抗腐蝕能力和耐磨耗性之降低，最後使得表面品質及壽命降低，另外，工件因氧化造成的電解腐蝕，亦使得微裂縫，表面硬度低落等問題更加嚴重。

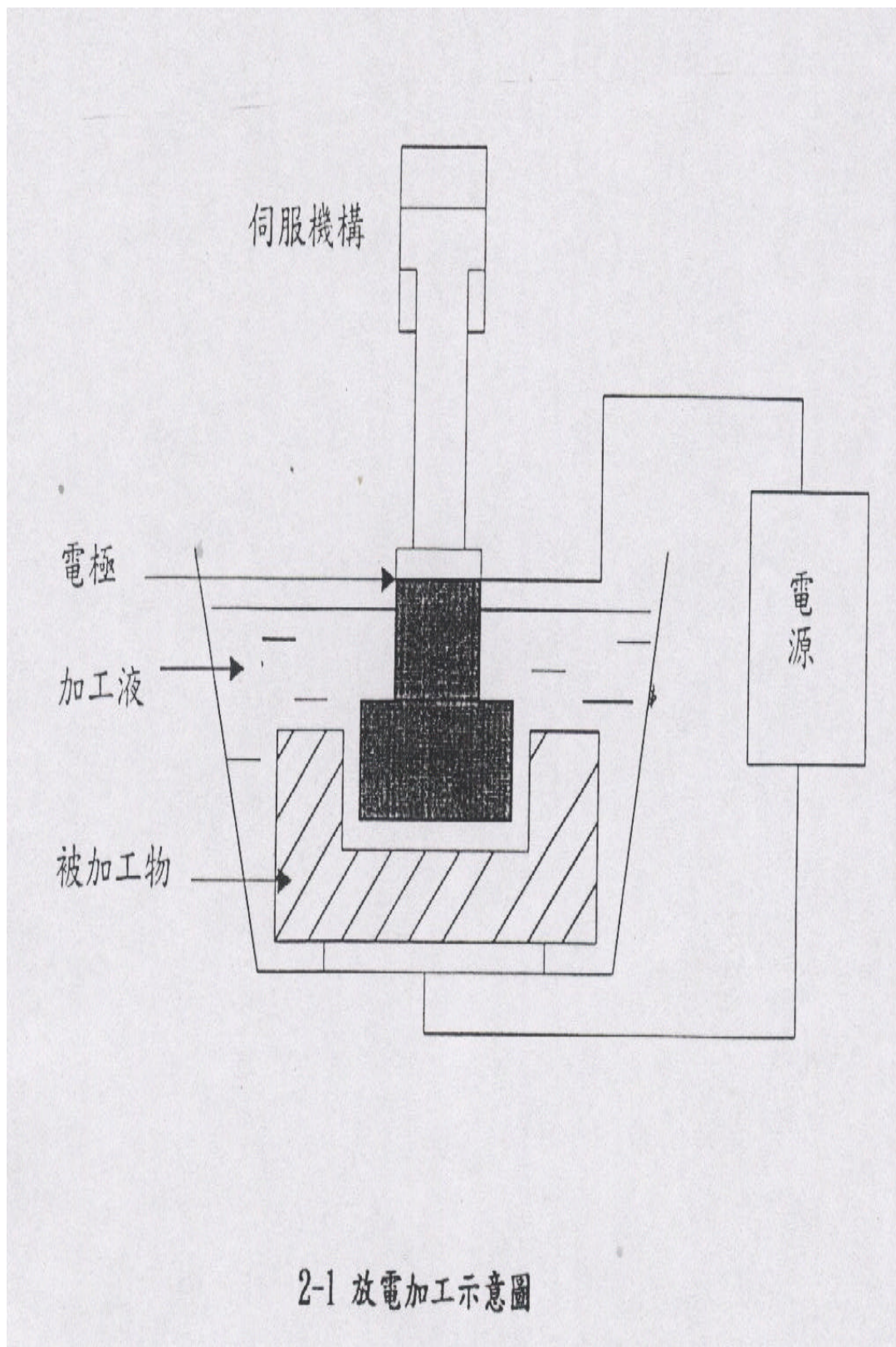
因此，本實驗選定某些參數以配合田口式 L-18 直交陣列表來進行加工金屬材料鐵鋁錳合金，並探討其加工特性：表面粗糙度及加工溝槽寬，在實驗後適著找出適合實際加工參考的較佳加工條件。

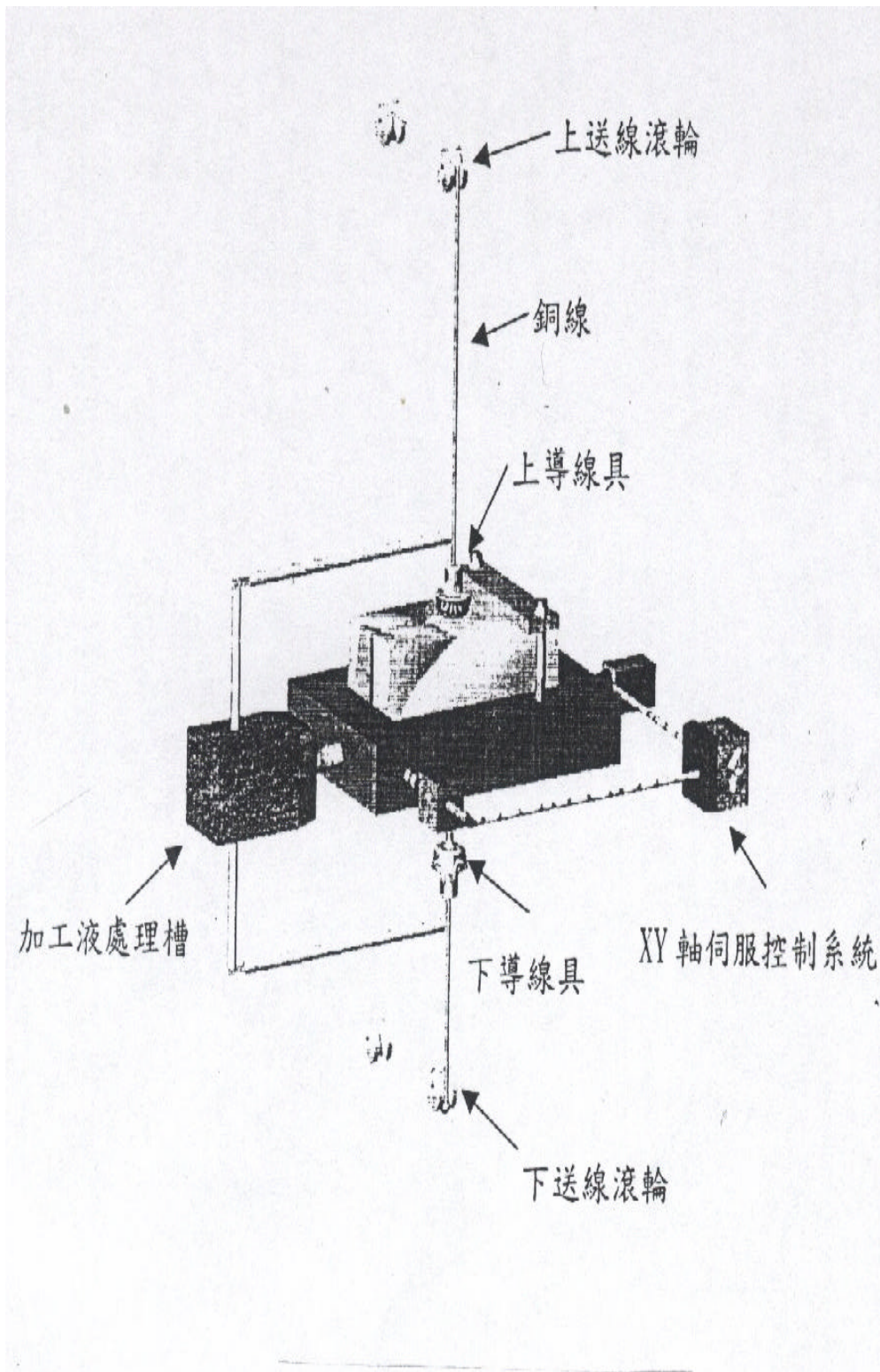
第二章 基本理論

2-1 線切割放電加工原理

放電加工的原理如圖 2-1 所示，將具有導電性的電極與工件置於絕緣液中，由一電源供給放電所需的能量，利用伺服機構將電極慢慢接近工件，同時控制一定的極間間隙，當兩極間間隙縮短到一定距離時(約數 μm 至數十 μm)，由於極間的高壓使得絕緣液發生絕緣破壞，形成了電漿通道，此即所謂的放電現象，而由於放電產生的高溫使材料表面產生局部熔解與蒸發，周圍的加工液因高溫汽化膨脹而發生極大的爆壓力，將熔解的金屬部分衝離，達到材料去除的效果，當放電後將電源切斷，使兩極間恢復絕緣，等待下一次的放電，如此週而復始的重複放電現象，即可將工件加工成與電極輪廓相似的形狀。線切割放電加工機之加工機構亦如上所述如圖 2-2 所示，所不同者係改用線為電極，使用銅、黃銅或鎢等細線以線鋸方式加工，因此線切割機可給予如下之定義：係利用連續送出之細線為電極，而將工件置於 CNC 控制之 XY 工作台上，以放電法高精度加工成任意輪廓形狀之數控工具機，至於加工速度主要因工件材質，厚度及銅線直徑而有變化。以工件材質而言，通常 SKD-11，碳化鎢較慢，而切割 SK-3、SS4、鋁時可略快，以工件厚度而言，工件越薄則加工速度越快，反之則越慢，而加工速度之計算係以每分鐘所能切割之最大工件截面積為基準。如加工速度為 $100\text{mm}^2/\text{min}$ ，表示對 50mm 厚之材料每分鐘能切割 2mm 之長度，或對 20mm 厚之材料每分鐘能切割 5mm 之長

度，而其表面粗糙度通常在 3~25 μm 之間，另外利用加工液處理槽過濾加工液以獲得低導電度的去離子水，並使用噴水幫浦產生較高的噴水壓力，來衝除加工屑及冷卻加工液。近年來各線切割機製造廠均致力於改善加工速度及表面粗糙度。





2-2 線切割放電加工機構圖

2-2 放電加工與極性

放電加工法中，相當於一般機械加工法中所使用之刀具或磨石等之工具，我們稱之為電極（electrode），而被加工之素材則稱之為工件（work）。因為加工條件與極性的不同，正負極的材料消耗也有所差異，對這一種現象的說明如下：

一放電火花是由陰、陽極位降區及電漿（Plasma）構成，陰、陽極位降區位於陰陽極表面附近，而電漿則是產生在兩位降區之間的氣體，其中包含電子、正離子和原子，其溫度約在 8000 到 10000 左右。正離子和電子受電場的影響而產生反向運動，最後將撞擊陰極和陽極，因能量傳遞的緣故，使放電點產生高溫而熔融或氣化。是故放電流係包含電子流和離子流，但電子質量較輕，移動較快，所以大部份的電流是電子移動所造成的。電子由陰極提供，並與陰極附近的正離子形成一極薄的位降區，電子受此電場作用而加速，撞擊位降區內的原子使離子化，此位降區的壓降是材料而定，約為 12-25V 之間。當電流不大時，電子被陽極吸引且被迅速吸收，因無法滯留在陽極附近，故不能與陽極表面的正電荷形成位降區；然而當電流足夠大時，陽極因溫度升高而氣化，此氣原子會阻礙電子進入陽極，這時陽極位降區便可形成。電子受到此電場加速而撞擊氣化原子使之離子化，這些電子（來自電漿區和位降區）受到陽極吸引而撞擊陽極，加速了陽極的熔融和氣化。陽極位降區的壓降約在 0V 到 40V 之間，而電區的電場梯度（Gradient）明顯小於兩位降區，因此對電子作用主要來自兩位降區的影響，而利用兩位降區之壓降差異的特性，可達到電極低消耗的目的，即當放電流較小時，電極應接陽極（+），工件則接

陰極（-）的接續狀態，使電極為零或低消耗，此種接法稱之為「正極性接法」或正極性加工；相反的，當施加的放電流加大時，但工件的消耗更大，此種接法稱為「負極性接法」或負極性加工。線切割放電加工機的電極是捨棄式的，故常用此種接法以提高加工速度。

電極材料

電極材料的選擇對放電加工的特性發揮具有相當深的影響，通常選擇電極材料應具備下列各項條件：

- (1) 加工速度高。
- (2) 電極消耗量小。
- (3) 放電加工安定性好。
- (4) 電極的加工性能良好。
- (5) 導電性良好。
- (6) 機械強度高。
- (7) 價格便宜。

加工液

放電加工法多在加工液中進行放電去除，而加工液需同時兼具電極間絕緣、衝擊壓力的產生、加熱部份的冷卻、加工粉屑的排除等功能，因此加工液對放電加工特性的發揮，扮演著極為重要的角色。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飛散。
- (2) 將飛散的加工粉屑排除於電極間隙之外。
- (3) 放電加工時的加熱部份冷卻。

(4) 促始電極間的絕緣恢復。

2-3 放電加工過程

放電加工是把加工電極和待加工工件置於絕緣的加工液中(其中雕模式放電加工以成型電極為加工電極，加工液以煤油為主，而線切割放電加工 0.5mm 以下，黃銅 鎢 鉬等材料的金屬線為加工電極，加工液以去離子水為主)，當兩極間間隙足夠小的時候(約 5~50 μ m)，即造成絕緣破壞進而發生放電作用，而每秒數千至數十萬次的放電次數產生的許多放電凹坑，就是放電加工切削工件之方式，其整個過程說明如下及圖 2-3 所示。

(a) 放電發生

在電極與工件兩端加上電壓，並使兩極間充滿絕緣的加工液，而當電極與工件表面上兩較相近點間之電場強度最先超過加工液的絕緣耐壓強度時，此時加工液絕緣耐壓強度崩潰，電子由陰極射出向陽極前進，此時放電現象開始。

(b) 電離作用

當運動中的電子撞到中性的絕緣液原子時，會將其最外層的電子激發出來形成陽離子，而使得電子數目將大為增加。

(c) 氣化熔融作用

由於電子，離子持續性的電離作用並向陰陽電極運動，當其與電極撞擊時，動能轉換成熱能，並產生高達 10,000 左右的高溫，使得電極與工件發生熔融，氣化現象。

(d) 氣化膨脹、熔屑除去

高溫造成加工液突然氣化膨脹，對很微小的放電面積而言，產生了巨大的膨脹壓力(約為 40~50 kgw/cm)，其爆炸力產生金屬融屑去除的效果。

(e) 放電痕形成及極間復原

氣化爆炸的壓力使熔融之金屬噴成小圓團，四散於加工液中，於工件表面形成凹坑，接著關閉兩極間之外加電壓，熔融屑被循環加工液帶走，於是放電痕形成，而凹坑周圍未噴散的熔融金屬形成隆起的部份，此部份可能是下次的放電點，此時間隙之絕緣耐壓重新恢復，等待進行下一次的放電。

2-4 線切割加工參數

線切割放電加工時，由於加工物材料不同，為了達到良好的加工精度，必須改變與更改各加工參數之數據，而重要的參數如下所述：

(1)放電時間 (On Time)

脈衝時間又稱放電時間，其範圍 $1\sim 10(1=0.1\mu\text{s}\sim 10=1\mu\text{s})$ ，係指實際加工時單發放電的持續時間，在實驗由於機器電路採用適應式控制，故增加脈衝時間同時會提高放電尖峰電流值 (I_p)，在一般加工中，脈衝時間加長時，材料去除率會增加，表面粗糙度會增加，電極消耗也會增加。

(2)休止時間 (Off Time)

指單發放電後的休止時間，其意義在使絕緣回復後與加工屑能有效的去除，其範圍 $7\sim 50(7=7\mu\text{s}\sim 50=50\mu\text{s})$

(3)線張力 (Wire Tension)

通常線切割加工機是以金屬線流經電磁之張力裝置，用電流來量來控制線張力提，高線張力會減少加工中線的震動幅度，提高加工速度與加工精度，但是由於線本身的抗拉強度有限，太高的線張力有時會使線拉長變成頸縮狀，進而使加工時容易斷線，其範圍 $1\sim 15$ (CN)。

(4)銅線供給速度 (Wire Feed)

線切割加工是以銅線不斷的供給進行加工，並在銅線消耗後將其捨棄不使用，通常銅線供給速度是以每分鐘銅線進給幾米為單位，而銅線供給速度不但影響加工的進行，並且關係到加工成本，其範圍 $1\sim 15$ (mm/s)。

(5)噴水流率 (Water Injection Quantity)

即水流大小，線切割加工通常以低導電度的脫離子水為加工液，而使用噴水幫浦產生高的噴水壓力來衝走加工屑，而噴水流率指機器上下噴水頭噴水的流率噴，水流率高會使加工屑容易衝除，提高加工速度，但也會造成線的擺動，影響加工精度，其範圍 0~7 (kg/cm²)。

(6) 伺服電壓 (Servo Voltage)

伺服電壓又稱極間電壓或工作電壓，為加工中實際的工作電壓，伺服壓影響極間間隙的大小，增加伺服電壓會使極間間隙加大，其範圍 30~70 (μs)。

(7) 進給倍率 (Feedrate Override)

本參數用於微調進給速度，每增減一單位，即增減所設定速度的 0.1 倍，其範圍 0~50 (mm²/min)。

(8) 進給控制模式 (Feedrate Mode)

本參數為切割進給控制模式。

(9) 固定進給之速度 (Feedrate)

此參數為固定時之進給速度。

(10) 短路休止時間 (Arc off time, Aff)

本參數控制輔助放電休止時間大小，其值越大則放電休止時間越長，而放電越穩定，但切割速度越慢，越不易斷線，其範圍 3~50 (μs)。

(11) 短路放電時間 (Arc on time, An)

本參數主要作為控制放電時輔助電流大小，其值越大則輸出電流越大，而切割速度快，但其切割表面越粗糙，越不容易斷線，其範圍 1~7 (μs)。

(12) 開路電壓 (Voltage of open circuit)

(13) 精修回路 (Fine finish circuit)

2-5 線切割加工特性

通常線切割的加工特性係以加工速度、加工表面粗糙度、加工溝槽寬度為評估基準。由於線切割加工所使用的線電極為消耗性，在加工後即將銅線捨棄，故較少考慮到電極消耗的問題。

1.加工速度

一般以金屬移除率與面加工速度兩種方式來表示加工速度，金屬移除率是以單位時間內去除的工件材料體積或質量來表示，定義為 mm / min 或 g / min ，而面加工速度定義為床台進給速度(mm / min)工件厚度(mm)，通常以 mm / min 表示。一般而言，雕模放電加工以金屬移除率來表示，而線切割放電加工則以面加工速度較為常用，線切割放電加工機的加工速度基本上正比於平均加工電流或尖峰電流，一般而言，影響線切割放電加工速度的因素包括工件厚度、線極特性、沖水壓力、離子水比電阻值與放電條件等。此外因為平均加工電流與切屑排出效果的關係，會產生所謂面積效應，亦即在特定工件厚度，可獲得最大加工速度，而且線電極的直徑越大，最大加工速度亦隨之增大。

2.加工精度

一.加工精度包括：

(a) 形狀精度

形狀精度的內容包括(1)偶角部位形狀精度(2)剖面的真直度。線切割放電加工的剖面真直度，在於描述加工面的垂直方向形成鼓行量的程度，而造成這種鼓形狀的原因，主要原因與線極的擺振，加工液的比電阻值，工件厚度，加工速度以及殘渣留存在中間部位所造成的

二次放電有關，當線極張力較大時，由於電導致的線極擺振幅度小，鼓狀現象可獲得改善，提高加工速度及加工液的比電阻值，能減小放電間隙，亦可使真直度提高，工件越厚會使真直度越差，這是由於上下導具的跨距變長，線極造成的振幅相對加大。此外在角偶處幾乎不可避免的會產生過切現象，會影響到角偶處的形狀精度，尤其對於多處轉角的微細工件來說，其影響程度更為嚴重，造成此種現象的主因在於線極受到來自工件的反作用力，而使線極產生撓曲現象，造成線極中央部分落後上下導具，在轉角時形成角偶處的崩塌。

(b) 定位精度

一般定位的方法分為孔基準與以工件壁面基準兩種，定位精度會受尋邊時的電壓，極間狀況(如水滴與工件毛邊)以工件傾斜的影響。

(c) 尺寸精度(加工溝槽寬)

由於線切割機是以一條銅線前進時與工件放電所走出的軌跡在加工時不僅銅線前面與工件間需維持適當的放電間隙，銅線側面亦因放電作用在加工後產生一定的溝槽寬度，此加工溝槽寬為線徑加上兩側放電間隙寬度。

加工溝槽寬會影響到加工精度值、加工屑的衝除與加工液的冷卻等，故為線切割加工的一項重要加工特性。通常影響加工溝槽寬較大的因素有放電能量的大小、加工物材質的不同、加工進給速度、線張力大小、加工液比電阻等因素。

二.表面品質包括：

(a) 表面粗糙度

表面粗糙度係指加工表面凹凸不平的程度。表面粗糙度越小代表加工面越良好。通常影響表面粗糙度的因素為放電能量的大小、工件

與電極材料的特性、加工液的物理性質、加工屑的衝除等。而通常使用的表面粗糙度表示方法有列二種：

(1) 最大表面粗糙度 (Rmax):

最大表面粗糙度係由加工斷面的輪廓曲線中取一段基準長度 L ，而此段曲線中最高與最低處的差異，即為最大表面粗糙度值，單位以微米(μm) 表示。

(2) 中心線平均粗糙度 (Ra)：

中心線平均粗糙度係將量測所得粗糙度曲線 $f(x)$ 依 X 軸分割上下兩部份，並使這兩部份曲線所圍成的面積相等，以 X 軸上下所圍成的總面積除以基準長度 L ，即為中心線平均粗糙度(Ra)。

$$Ra = 1 / L \int |f(x)| dx$$

(b) 表面變質層

放電加工的熱效應會使得工件表面產生一變質層，此變質層乃母材經過熔融以及低溫加工液的淬火後，滲入其他元素所造成的再鑄層，此變質層會降低工件的疲勞強度，抗腐蝕能力和耐磨耗性，使得加工件的壽命降低。

(c) 殘留應力及裂縫

因為殘留應力所產生的拉應力，會引起了應力腐蝕，裂縫以及破裂，而且降低了疲勞限和衝擊抵抗，而材料的殘留應力分佈會受到冷卻能力、電流峰值、比電阻和線張力的影響而加工表面下的殘留應力值及其深度與表面變質層大小有很大的關係，控制加工條件或改變材料性質的方式可以減低殘留應力的發生，提高線切割加工工件的品質。

2-6 線切割機之用途及發展現況

線切機主要係用於模具加工製造，故購置使用者除專業代工者外其餘如較大規模之模具製造廠，車輛製造，電器用品製造或專業零件製造廠亦有頗多使用者，此外如職訓中心，高工等教育訓練機構之模具科亦有數所已購置使用中，至於其用途約可分為下列數種：

- (1) 衝壓模。
- (2) 朔膠模。
- (3) 碳化鎢模具。
- (4) 放電加工之電極。
- (5) 試片切割。
- (6) 齒輪切割。
- (7) 凸輪切割。
- (8) 一般及特殊材料切割。
- (9) 特殊錐度或圓角切割。
- (10) 形狀複雜之樣板切割。

目前在全世界線切割機之使用相當普遍，製造廠商亦隨之增多，然以國內而言，所使用的線切割機約有 70% 以上係由日本廠商製造，其價格自台幣一百多萬至上千萬不等，而未來線切割之發展，將會朝下述之方向努力：

- (1) 更快之加工速度。
- (2) 更良好之表面粗糙度。
- (3) 更準確之尺寸精密度。
- (4) 更厚之工件厚度及更微小之加工。

- (5) 其他特殊材料(如半導體、複合材料或非金屬等)。
- (6)無人化、自動化加工。

第三章 實驗設備與方法

3-1 實驗材料

1. 線電極

在實驗中所使用的電極材料為直徑 0.25mm 的黃銅線，其材料性質如表 3-1 所示。

表 3-1 線電極的機械與物理性質

線電極	抗拉強度 (kg/mm)	導電率 IACS(%)	伸長率%	熔點 C
CuZN 黃銅	100	27	1.66	900~910

2. 工件材料

本實驗所使用之工件為鐵鋁錳合金，其主要成分如表 3-2 所示，材料機械性質如表 3-3 所示，圖 3-1 至圖 3-1-2 為材料拋光後經腐蝕之微結構組織。

表 3-2 鐵鋁錳合金主要成份 (重量百分比)

Fe	Mn	Al	C
40	30	9	1

表 3-3 鐵鋁錳之機械性質

材料種類	降伏強度 (Mpa)	抗拉強度 (Mpa)	伸長率 (%)	洛氏硬度	熱處理條件
(L 向)	628.8	984.6	45.1	28.2HRC	熱軋後
(T 向)	672.9	989.4	33.8	28.7HRC	熱軋後

材料 10 倍之金相組織

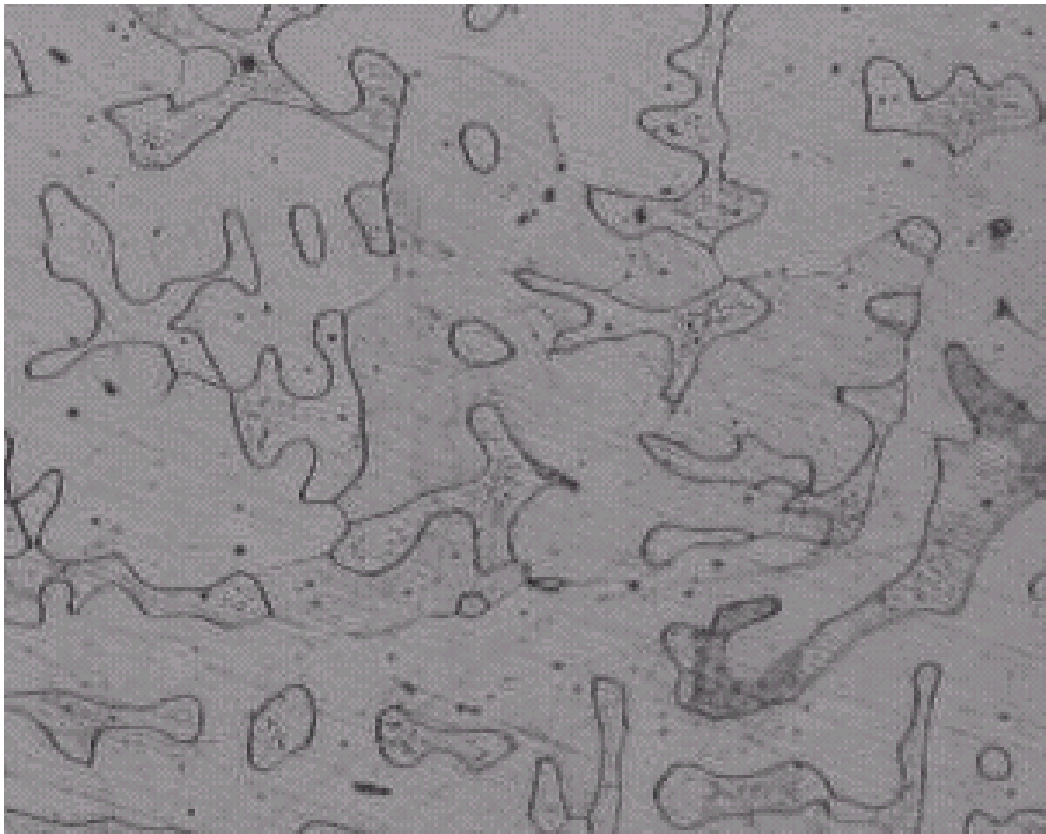


圖 3-1

材料 80 倍之金相組織

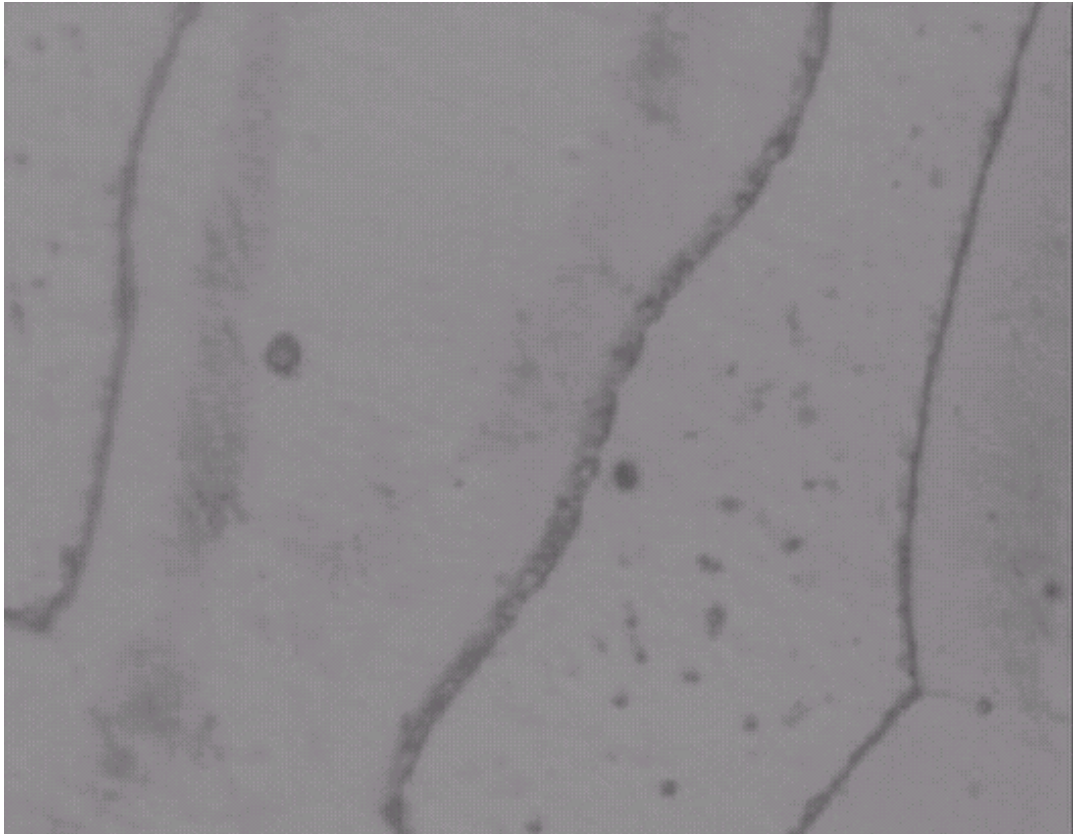


圖 3-1-2

3-2 實驗設備

1. 線切割放電加工機

本實驗所使用的線切割放電加工機是由慶鴻公司所提供的，主要裝置包括有：加工機本體(含 X、Y、U、V 四軸伺服控制與銅線驅動進給裝置)，加工電源供應系，CNC 控制器，加工液供給裝置，其外觀如圖 3-2 所示，而加工機構如圖 2-2 所示。

2. 表面粗糙度測量儀

表面粗糙度儀是用來量測工件加工後的表面粗糙度值，如圖 3-3 所示，在實驗中量測 7 個不同路徑的粗糙度值(Ra)，經過去除最高與最低值，再取其平均值來表示。

3. 工具顯微鏡

工具顯微鏡是用來量測加工溝槽寬，其外觀如圖 3-4 所示，其放大倍率為 10 倍。

4. 超音波洗淨機

在實驗中有關表面粗糙度，加工溝槽寬前，皆使用超音波洗淨機來清洗。

5. 游標卡尺

游標卡尺主要之用途為量工件之尺寸大小。

6. 磨床加工機

主要在線切割加工前，使用磨床將工件表面黑皮磨去，及使工件表面平滑，以避免影響線切割加工。

7. 加熱加壓鑲埋機

在實驗過成中，加工前預先作金相實驗，而鑲埋機主要把材料鑲

埋固定以便作拋光之動作，如圖 3-5 所示為加熱加壓鑲埋機。

8. 研磨拋光機

照金相前需先使材料拋光，而研磨拋光機如圖 3-6 所示。

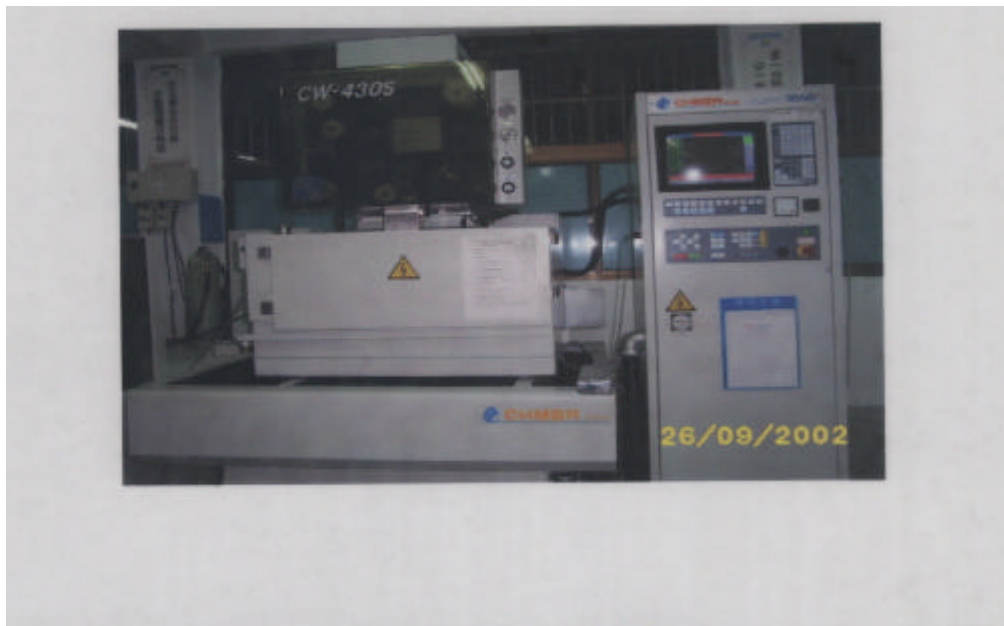


圖 3-2 為線切割放電加工機外觀圖

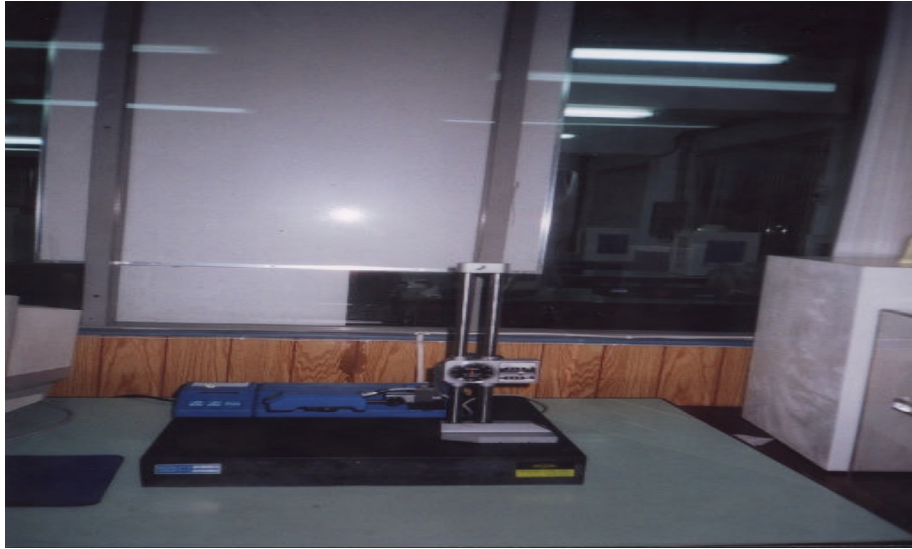


圖 3-3 為表面粗度測量儀

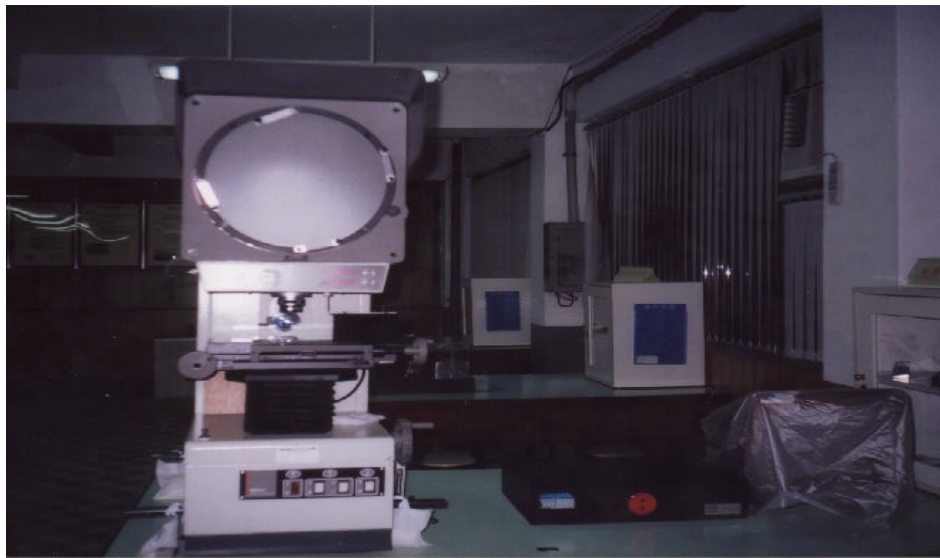


圖 3-4 為工具顯微鏡



圖3-5為鑲埋機



圖3-6為拋光機

3-3 實驗加工參數

本實驗參數設定係選定某些參數以配合田口式 L-18 直交陣列表，其參數設定如表 3-4 所示，表 3-5 為 L-18 表。

表 3-4 參數設定

觀察值	操作參數	水準值			單位
表面粗糙度 (um)	水流強度 WL	4	5		Kg/cm²
	加工電流 Ton	2	4	6	μs
溝槽寬度 (mg/min)	休止時間 Toff	15	20	25	μs
	短路放電時間 AN	1	2	3	μs
	輔助電流休止時間 Aff	10	15	20	μs
	送線速度 FW	10	12	14	mm /s

表 3-5 L-18 混合型直交表

No	因 素							
	wl	Ton	Toff	An	off	Fw	E1	E2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

3-4 實驗方法

1. 實驗材料準備

實驗中使用鐵鋁錳合金鋼作為材料，為因工件本身之毛邊及表面黑皮影響加工，於是須先經過磨床加工其表面，以利線切割放電加工。

2. 金相實驗

在加工前先切取一小塊材料作為金相實驗之試片，其流程如下：

(1)切取試片 —— (2)粗磨 —— (3)鑲埋—— (4)細磨—— (5)用水洗淨試片—— (6)拋光 —— (7)用水洗淨試片 —— (8)用酒精洗淨試片拋光面 —— (9)吹乾試片—— (10)檢查拋光面 —— (11)腐蝕 —— (12)用酒精或水洗淨試片 —— (13)吹乾試片 —— (14)觀察 —— (15)拍攝金相。

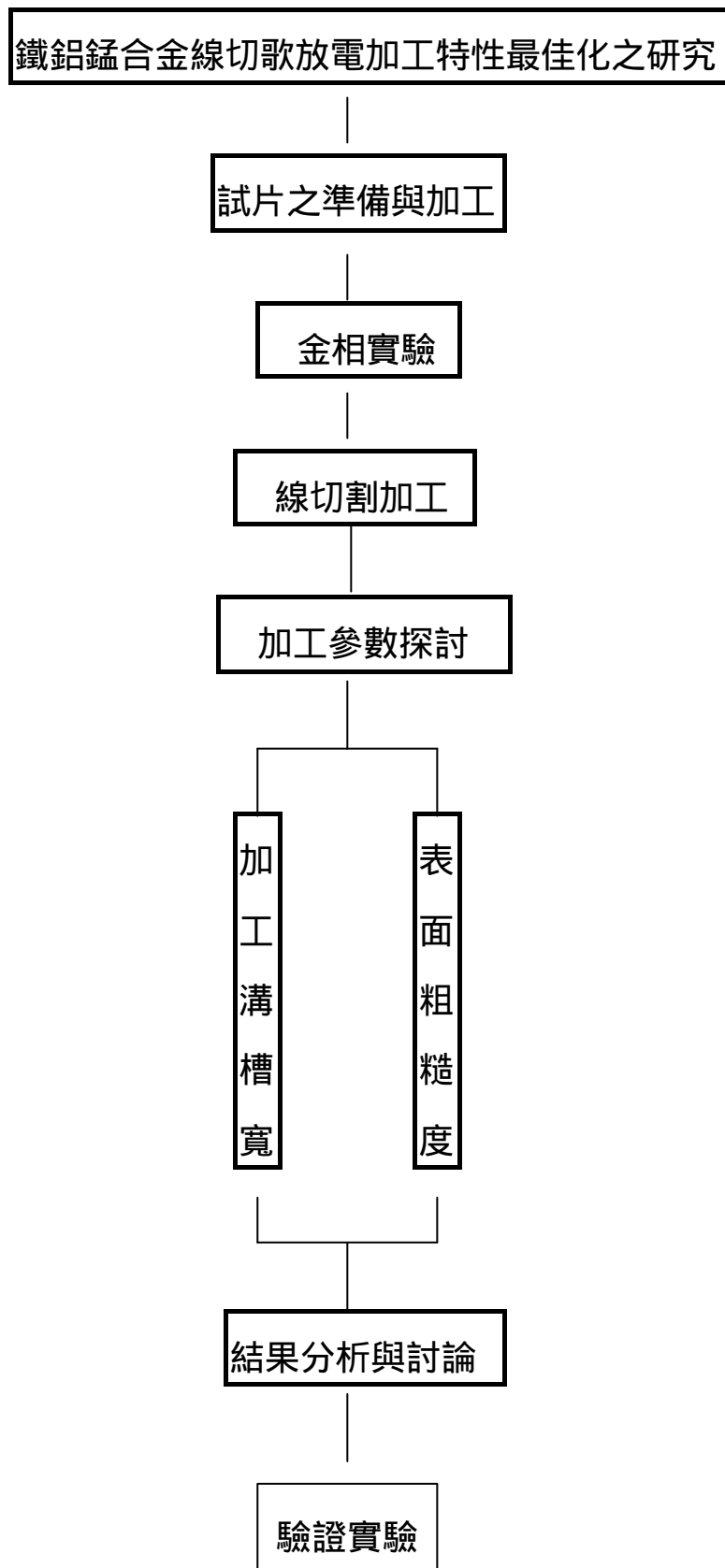
3. 表面粗糙度量測

將工件與線電極安裝完成後，依照所設定之加工條件，將工件加工切割成每片 15*5*21mm 之試片，再利用表面粗度儀量測各試片之表面粗糙度。

4. 加工溝槽量測

在加工溝槽寬的量測中，先設定好加工條件，然後進行直線加工，加工總長為 13mm，不同加工條件的溝槽間隔在 5mm 以上，以避免溝槽受應力變形的影響。而利用工具顯微鏡量測之溝槽寬。

3-5 實驗流程



第四章、相關理論分析

4-1 田口式實驗設計

田口法實驗設計，係利用直交表(orthogonal array)的矩陣實驗，能以最少的實驗次數分析眾多參數，並可獲得到可靠資訊。幾乎所有的工程設計都包括許多的參數，且各需給定一個值以完成設計，至於如何使這些參數產生最有利的效果，除了經驗外也可以使用實驗方式，然而習慣用來進行的實驗方式會採用試誤法或是一次因子法，此種作法所產生的結果往往不適當而且耗時昂貴，而以田口式的直交表設計並進行實驗即可用來解決耗時昂貴等問題。該方法係將各實驗結果經由平均數分析，以選定各參數的最佳設定值，若以變異數分析則可進一步求得參數對實驗結果的影響程度。

田口式的實驗步驟約可分為五點：

- (1) 實驗結果目標的訂定，以選擇訊號雜訊比(S/N)的計算方式。
- (2) 控制因子及水準值的設定。
- (3) 選擇適合本研究的直交表進行實驗。
- (4) 取得實驗結果的雜訊比作因子效果分析。
- (5) 進行變異數分析求得因子影響程度。

其中，田口式訂定目標函數上係利用品質的觀念，並將目標函數訂為產品品質好壞的性能指標，而產品品質會受到兩種因子影響，其一為雜訊因子(noise factor)係設計人員無法控制的因素，並使產品偏

離目標值影響產品品質，另一可控因子(control factor)為設計人員可自由設計水準值的因子。因此，田口式將目標函數定義為信號雜訊比，為：

$$= -10 \log_{10} \left[\left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \ln \right] \quad \text{單位 bB} \quad 4.1$$

的目標函數，供可控因子的水準值在不同設定下比較，其中 y_i 為在一定的可控因子水準下第 i 次試驗的功能結果值，而 n 為該設定下試驗的總次數，當實驗值 y 越小，則信號雜訊比越大，如此確定產品功能及其品質特性的目標函數後，即可依下節設計產品的可控因子及其水準值，並依田口式的直交表，建立實驗規劃的矩陣，並依各實驗設定，進行實驗，由其結果值，得出各實驗的信號雜訊比後，處理其平均值及其變異量以供後續的因子設定分析使用。

4-2 直交表矩陣實驗

田口式的直交表，係根據各因子及其水準數，所計算出的總自由度而建立的實驗設定型態量。該總自由度係由實驗總平均值的自由度及各因子自由度所組成，其中各因子的自由度，恰為其水準數，因此對於一具有四個因子且分別各有三水準的設計，其總自由度則為 $9=1+4*(3-1)$ ，意即此設計即需作 9 種不同的設定，即能估計各因子水準的效果，而非如一次因子法，該法需進行 81 種設定，始能了解各因子水準的效果，因而田口式是一種有效率的設計實驗法。

根據總自由度、因子數及其水準數，即可依田口式所定義的直交表建立各實驗設定，例如前述四因子各有三水準的設計變化，田口式

提供如表 4-1 之 L9 直交表，以建立實驗的設定。

表 4-1 田口式 L9 直交表

實驗編號	因子				信號雜訊比 (dB)
	A	B	C	D	
	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	1
	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	2
	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	3
	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	4
	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	5
	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂	6
	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂	7
	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃	8
	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁	9

田口式直交表中，共有 9 組實驗設定，對於四個因子 A、B、C、D 各有三水準數，分別以 1、2、3 表示，因此實驗設定中以 A1、B1、C1、D1 因子水準組合設定實驗，亦即該設定中因子 A、B、C、D 皆以水準 1 來設定，而實驗設定中，則除因子 A 以水準 1 來設定外，其餘 B、C、D 因子均以水準 2 設定。

實驗設定可各自進行多次實驗，對記錄功能的實驗結果值，並依據公式 4.1 計算出該設定的信號雜訊比。據以分析因子水準對功能的效果或進行變異數分析。

4-3 因子水準效果

因子水準對設計功能的效果係定義為所有含有該因子水準的實驗設定，所得的信號雜訊比平均值與所有實驗設定所得的總平均值偏離差。若依表 4-1 的實驗結果，則所有實驗設定的信號雜訊比總平均值 m 為：

$$m = 1/9 \sum_{i=1}^9 h_i \quad 4.2$$

其中 h_i 為 i 次實驗設定所有的信號雜訊比，則因子 A 水準 1 對設計功能的效果可定義為 $m_{A1} - m$ ，其中 m_{A1} 係含有水準設為 1 的因子 A 所有的實驗設定，所得的信號雜訊比平均值，因表 4-1 含有因子水準 A1 的實驗設定共有 1、2、3 三組，所以：

$$m = 1/3 [h_1 + h_2 + h_3] \quad 4.3$$

其中 h_1 、 h_2 、 h_3 分別為實驗設計 1、2、3 所得的信號雜訊比，依此可求得其他各因子水準的功能效果，而繪製成如圖 4-1 的因子效果

圖。該圖橫軸為該因子及其水準分布，縱軸則為信號雜訊比，如此可以據以比較，各因子水準間對設計功能的效果或趨勢，各因子擁有信號雜訊比最大的水準即為該因子的最佳水準，則對圖 4-1 所列的實驗結果應以 A3、B2、C1、D1 的水準組合，亦即因子的最佳組合，亦即因子 A 以水準 3、因子 B 以水準 2、因子 C 及 D 均以水準 1 來作實驗設定，可以得到最佳的實驗結果或目標特性。

第五章 實驗結果分析

5-1 實驗結果分析

本實驗將實驗過程中所量測所得的加工特性值，利用 S/N 品質特性公式及變異數分析理論來對實驗的結果進行討論，其能確定控制因子對品質特性的影響程度，之後配合 S/N 回應表對實驗過程中加工參數與加工特性間的關係作一完整的討論。

實驗中，我們討論的加工特性主要為表面粗糙度及加工溝槽寬，而為了要更加容易能了解加工參數對加工特性的影響程度，我們必須對量測到的加工特性進行處理，因此，我們引用信號雜訊比 S/N 作為衡量產品品質的一種量度，可分為望大、望小及望目三種型態。

針對我們所要探討的加工特性，也就是表面粗糙度及加工溝槽寬而言，歸類為望小特性，利用式 4.1 來計算其分貝單位的 S/N 比。計算結果如表 5-1、5-3 所示，表中列出了實驗的數據與最後經過公式計算轉換的結果(值)。

要了解加工參數在不同水準下對加工特性的影響程度，需先對每個參數計算其在不同水準下對個別加工特性的 S/N 和，進而比較其差異，如此才能獲得參數與特性間之最佳化。由表 5-1、5-3 中可求出三水準下之個參數之表面粗糙度及加工溝槽寬之 S/N 比的總和，如表 5-2、5-4。

表 5-1 表面粗糙度實驗數據表

No	因 素								實驗值 μm	(db)
	wl	Ton	Toff	An	off	Fw	E1	E2		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.23	- 6.96609
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2.16	- 6.68907
3	1	1	3	3	3	3	3	3	2.22	- 6.92705
4	1	2	1	1	2	2	3	3	2.45	- 7.78332
5	1	2	2	2	3	3	1	1	2.43	- 7.71212
6	1	2	3	3	1	1	2	2	2.51	- 7.99347
7	1	3	1	2	1	3	2	3	2.92	- 9.30765
8	1	3	2	3	2	1	3	1	2.47	- 7.85393
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2.50	- 7.95880
10	2	1	1	3	3	2	2	1	2.35	- 7.42135
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2.31	- 7.27223
12	2	1	3	2	2	1	1	3	2.23	- 6.96609
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2.55	- 8.13080
14	2	2	2	3	1	2	1	3	2.65	- 8.46491
15	2	2	3	1	2	3	2	1	2.51	- 7.99347
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2.70	- 8.62727
17	2	3	2	1	3	1	2	3	2.74	- 8.75501
18	2	3	3	2	1	2	3	1	3.02	- 9.60013

W1 之水準值 1 : -6.96609-6.68907-6.92705-7.78332-7.71212-

7.85393-7.99347-9.30765-7.9588= -69.19829

Wl 之水準值 2 : -7.42135-7.27223-6.96609-8.1308-8.46491-
7.99347-8.62727-8.75501-9.60013= -73.23131

Ton 之水準值 1 : -6.96609-6.68907-6.92705-
7.42135-7.27223-6.96609= -42.24192

Ton 之水準值 2 : -7.78332-7.71212-7.99347-
8.13080-8.46491-7.99347= -48.07811

Ton 之水準值 3 : -9.30765-7.85393-7.9588-
8.62727-8.75501-9.60013= -52.10282

Toff 之水準值 1 : -6.96609-7.78332-9.30765-
7.42135-8.1308-8.62727= -48.23651

Toff 之水準值 2 : -6.68907-7.71212-7.85393-
7.27135-8.46491-8.75501= -46.7473

Toff 之水準值 3 : -6.92705-7.99347-7.9588-
6.99609-7.99347-9.60013= -47.43904

An 之水準值 1 : -6.96609-7.78332-7.9588-
7.27223-7.99347-8.75501= -46.72894

An 之水準值 2 : 6.68907+7.71212+9.30765+
6.96609+8.1308+9.60013=48.46589

An 之水準值 3 : -6.92705-7.99347-7.85393-
7.42135-8.46491-8.62727= -47.05003

Off 之水準值 1 : -6.96609-7.99347-9.30765-
7.27223-8.46491-9.60013= -49.60452

Off 之水準值 2 : -6.68907-7.78332-7.85393-
6.96609-7.99347-8.62727= -45.91318

Off 之水準值 3 : -6.92705-7.71212-7.9588-

7.42135-8.1308-8.75501= -46.90515

Fw 之水準值 1 : -6.96609-7.99347-7.85393-

6.96609-8.1308-8.75501= -46.66542

Fw 之水準值 2 : -6.68907-7.78332-7.9588-

7.42135-8.46491-9.60013= -47.9176

Fw 之水準值 3 : -6.92705-7.71212-9.30765-

7.27223-7.99347-8.62727= -47.83982

由上述之計算結果可列表如表 5-2 所示。

表 5-2 表面粗糙度 S/N 回應表

	WL	Ton	Toff	AN	Off	FW
1	-69.19829	-42.24192	-48.23651	-46.72894	-49.60452	-46.66542
2	-73.23131	-48.07811	-46.7473	-48.46589	-45.91318	-47.9176
3		-52.10282	-47.43904	-47.05003	-46.90515	-47.83982

而由表 5-2 之表面粗糙度可繪製如圖 5-1 至 5-6 之 S/N 回應圖。

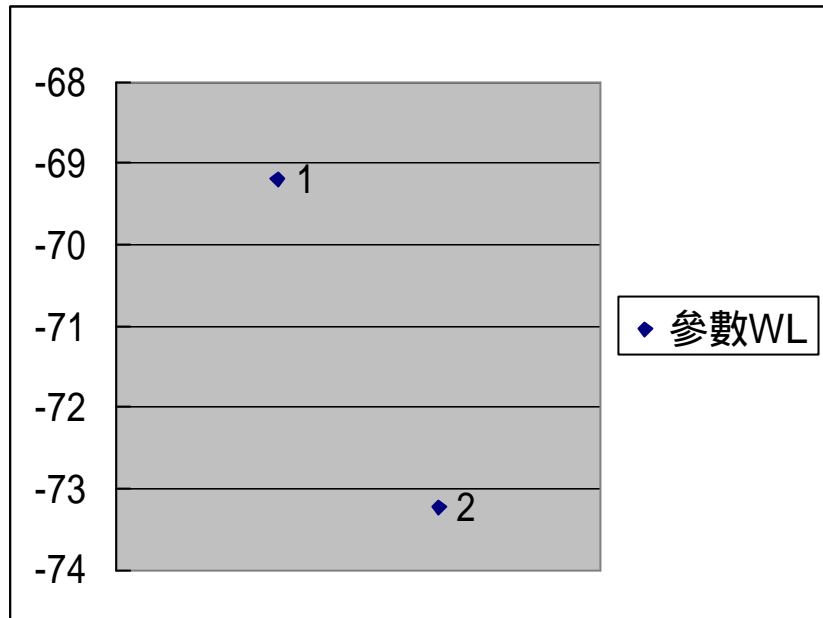


圖 5-1 表面粗糙度之回應圖

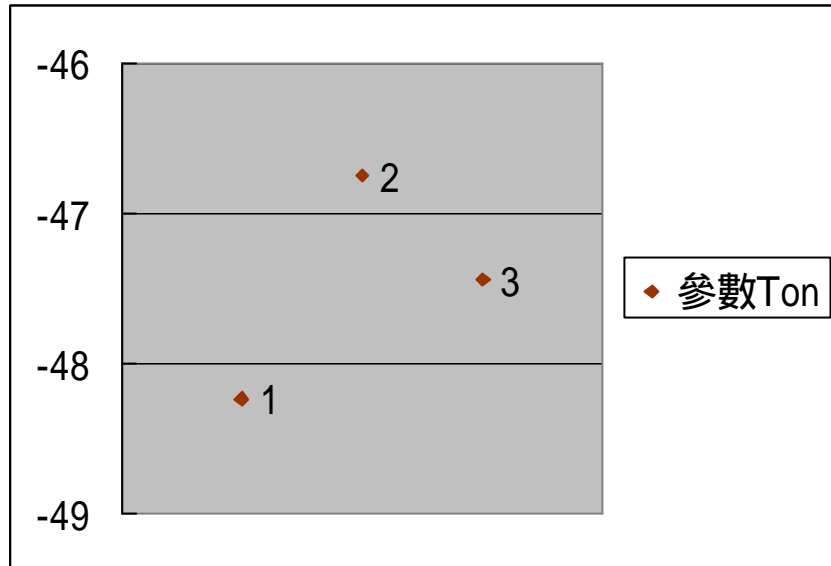


圖 5-2 表面粗糙度之回應圖

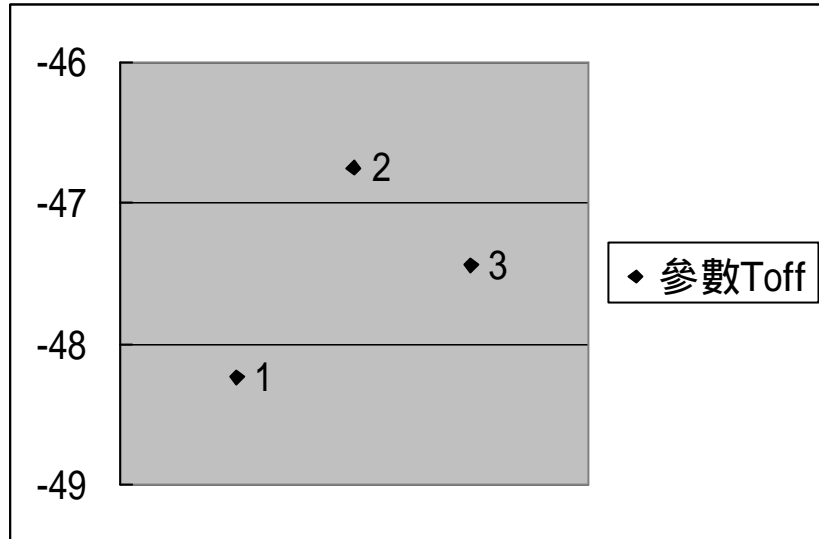


圖 5-3 表面粗糙度之回應圖

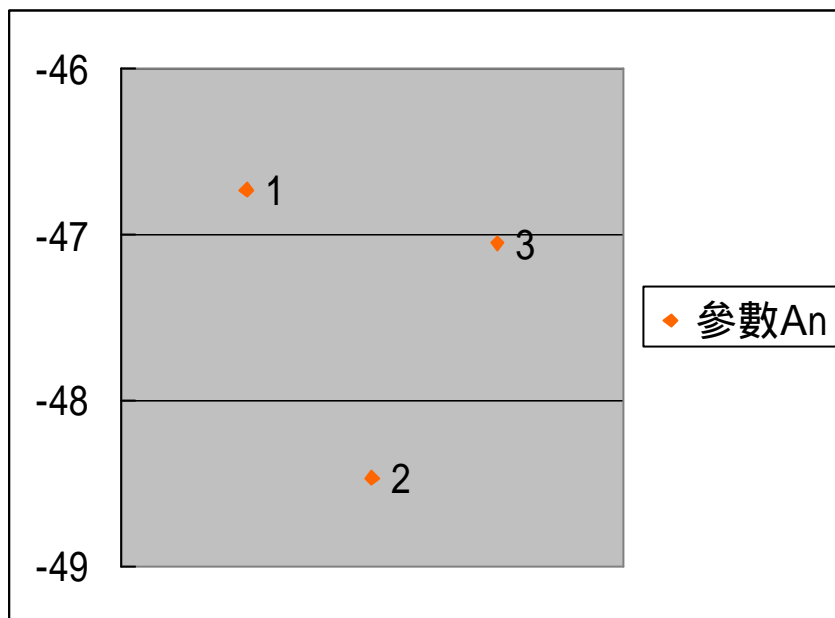


圖 5-4 表面粗糙度之回應圖

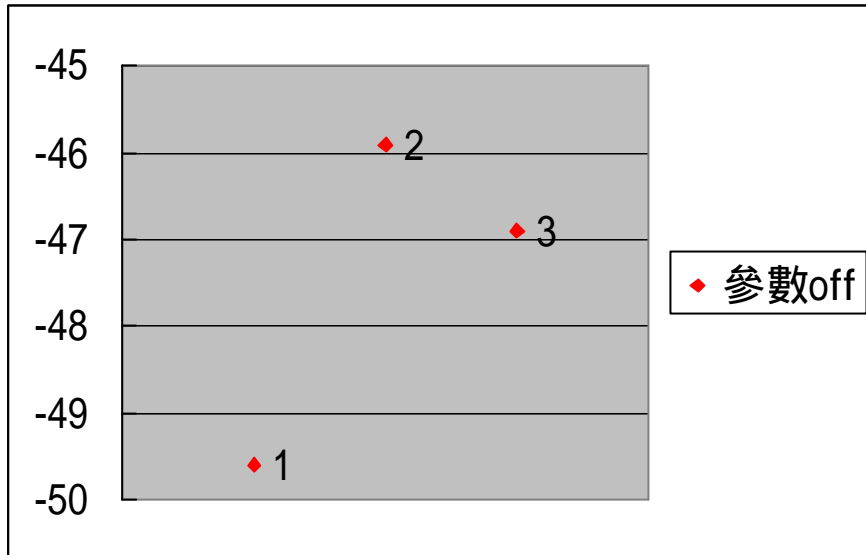


圖 5-5 表面粗糙度之回應圖

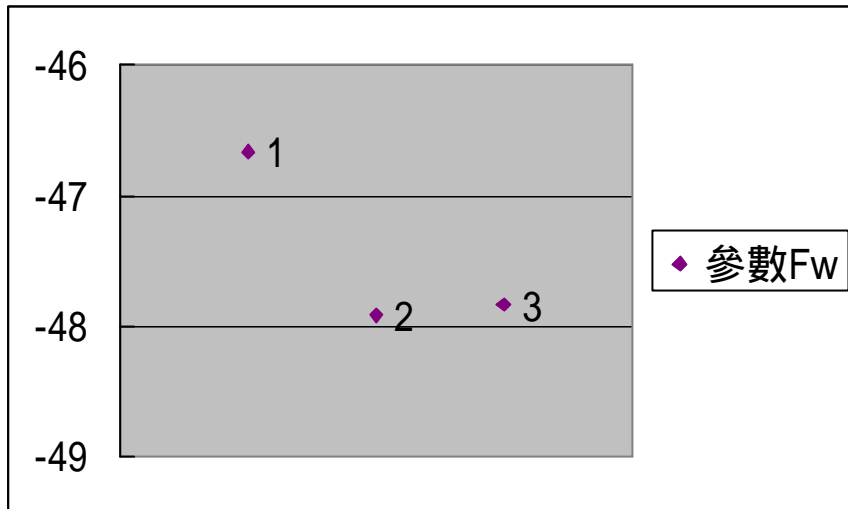


圖 5-6 表面粗糙度之回應圖

由上述之表面粗糙度之 S/N 回應圖中,可得知影響表面粗糙度之顯著的參書數為,水流強度、加工電流及輔助電流休止時間,並可知使之最佳化的特性為 WL2、Ton5、Toff6、An10、Aff12、Fw16,也就是說水流強度最佳之水準值為 2,也就是設定為 5 (Kg/cm²),加工電流最佳之水準值為 3,也就是設定為 6 (μs),休止時間最佳之水準值為 1,也就是設定為 15 (μs),短路放電時間最佳之水準值為 2,也就是設定為 2 (μs),輔助電流休止時間最佳水準值為 1,也就是設定為 10 (μs),送線速度最佳水準值為 2,也就是設定為 12 (mm /s)。

最後,經由驗證實驗可知,本實驗參數數據之最佳設定為,水流強度 5 (Kg/cm²),加工電流 6 (μs),休止時間 15 (μs),短路放電時間 2 (μs),輔助電流休止時間 10 (μs),送線速度 12 (mm /s)的時候,所量得的表面粗糙度值為 2.0 (μm),比之前所量得的數值還要小,由此可知這項實驗是正確的。因此在最佳參數切割時可得良好的表面粗糙度。

表 5-3 加工溝槽寬實驗數據表

No	因 素								實驗值 mm	(db)
	wl	Ton	Toff	An	off	Fw	E1	E2		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.601	4.42251
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.639	3.88998
3	1	1	3	3	3	3	3	3	0.646	3.79534
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.649	3.75510
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.677	3.38822
6	1	2	3	3	1	1	2	2	0.688	3.24823
7	1	3	1	2	1	3	2	3	0.717	2.88961
8	1	3	2	3	2	1	3	1	0.701	3.08563
9	1	3	3	1	3	2	1	2	0.700	3.09803
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.647	3.78191
11	2	1	2	1	1	3	3	2	0.594	4.52427
12	2	1	3	2	2	1	1	3	0.605	4.36489
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.658	3.63548
14	2	2	2	3	1	2	1	3	0.674	3.42680
15	2	2	3	1	2	3	2	1	0.636	3.93085
16	2	3	1	3	2	3	1	2	0.648	3.76849
17	2	3	2	1	3	1	2	3	0.696	3.14781
18	2	3	3	2	1	2	3	1	0.671	3.46554

WI 之水準值 1 : $4.42251+3.88998+3.79534+3.7551+3.38822+$
 $3.24823+2.88961+3.08563+3.09803=31.57269$

WI 之水準值 2 : $3.78191+4.52427+4.36489+3.63548+3.42680+$
 $3.93085+3.76849+3.14781+3.46554=34.04608$

Ton 之水準值 1 : $4.42251+3.88998+3.79534+$
 $3.09803+3.78191+4.52427=24.77891$

Ton 之水準值 2 : $3.7551+3.38822+3.24823+$
 $3.63548+3.42680+3.93085=21.3847$

Ton 之水準值 3 : $2.88961+3.08563+3.09803+$
 $3.76849+3.14781+3.46554=19.45515$

Toff 之水準值 1 : $4.42251+3.7551+2.88963+$
 $3.78191+3.63548+3.76849=22.25312$

Toff 之水準值 2 : $3.88998+3.38822+3.08563+$
 $4.52427+3.42680+3.14781=21.46273$

Toff 之水準值 3 : $3.79534+3.24823+3.09803+$
 $4.36489+3.93085+3.46554=21.90291$

AN 之水準值 1 : $4.42251+3.75510+3.09803+$
 $4.52427+3.93085+3.14781=22.87859$

AN 之水準值 2 : $3.88998+3.38822+2.88961+$
 $4.36489+3.63548+3.46554=21.63374$

AN 之水準值 3 : $3.79534+3.24823+3.08563+$
 $3.78191+3.42680+3.76849=21.10643$

Off 之水準值 1 : $4.42251+3.24823+2.88961+$
 $4.52427+3.42680+3.46554=21.97697$

Off 之水準值 2 : $3.88998+3.75510+3.08563+$

$$4.36489+3.93085+3.79849=22.49497$$

Off 之水準值 3 : $3.79534+3.38822+3.09803+$

$$3.78191+3.63548+3.14781=20.84682$$

Fw 之水準值 1 : $4.42251+3.24823+3.08563+$

$$4.36489+3.63548+3.14781=21.90456$$

Fw 之水準值 2 : $3.88998+3.7551+3.09803+$

$$3.78191+3.4268+3.46554=21.41739$$

Fw 之水準值 3 : $3.79534+3.38822+2.88961+$

$$4.52427+3.42680+3.46554=22.29681$$

由上述之計算結果可列表如 5-4 所示。

表 5-4 加工溝槽寬 S/N 回應表

	WL	Ton	Toff	AN	Off	FW
1	31.57269	24.77891	22.25312	22.87859	21.97697	21.90456
2	34.04608	21.3847	21.46273	21.63374	22.49497	21.41739
3		19.45515	21.90291	21.10643	20.84682	22.29681

由上表 5-4 可繪製如圖 5-7 至 5-12 之加工溝槽寬之 S/N 回應圖。

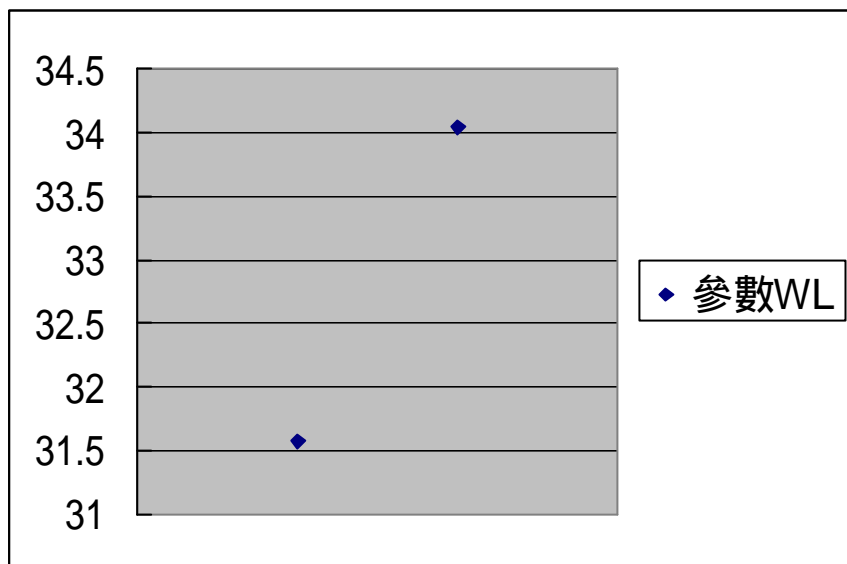


圖 5-7 加工溝槽寬之回應圖

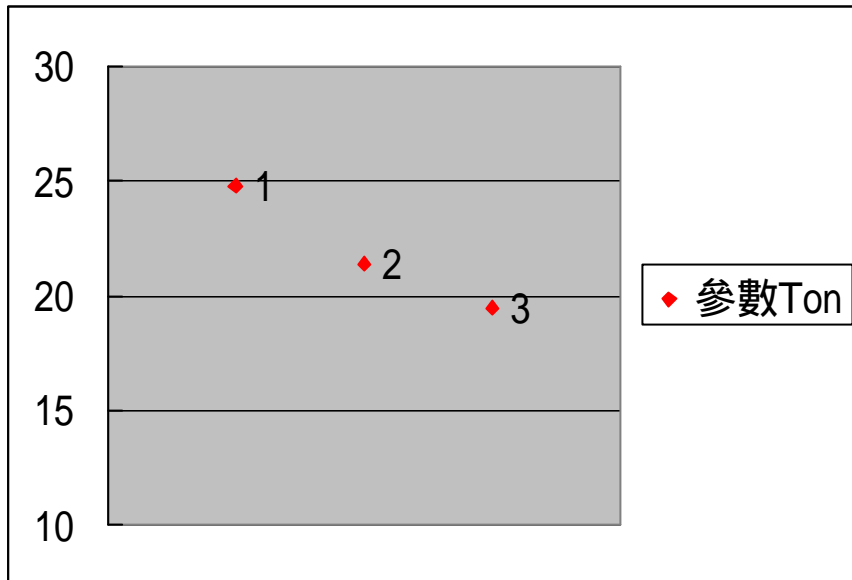


圖 5-8 加工溝槽寬之回應圖

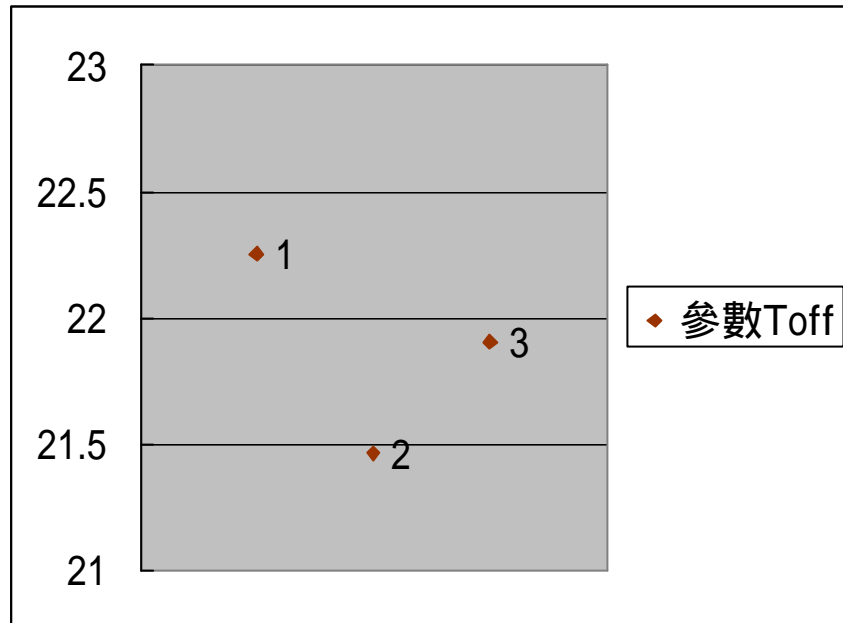


圖 5-9 加工溝槽寬之回應圖

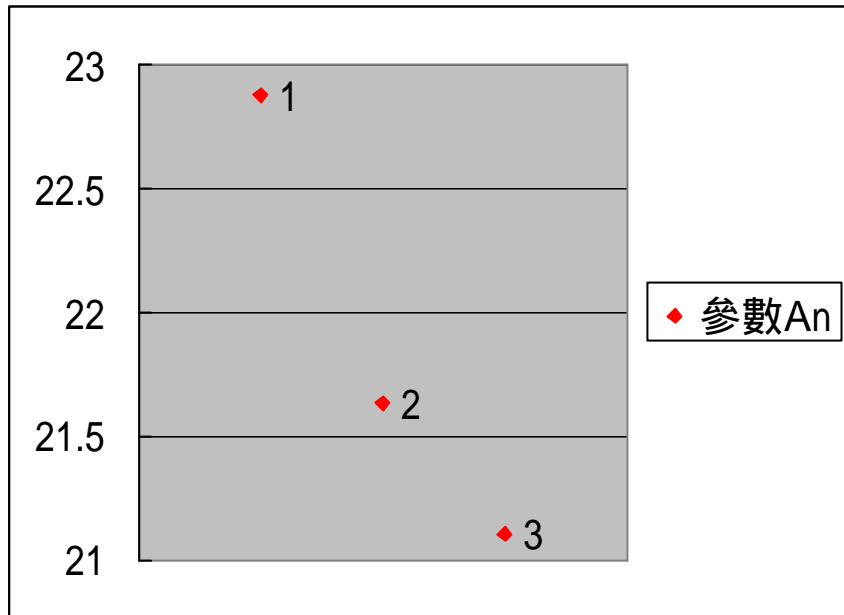


圖 5-10 加工溝槽寬之回應圖

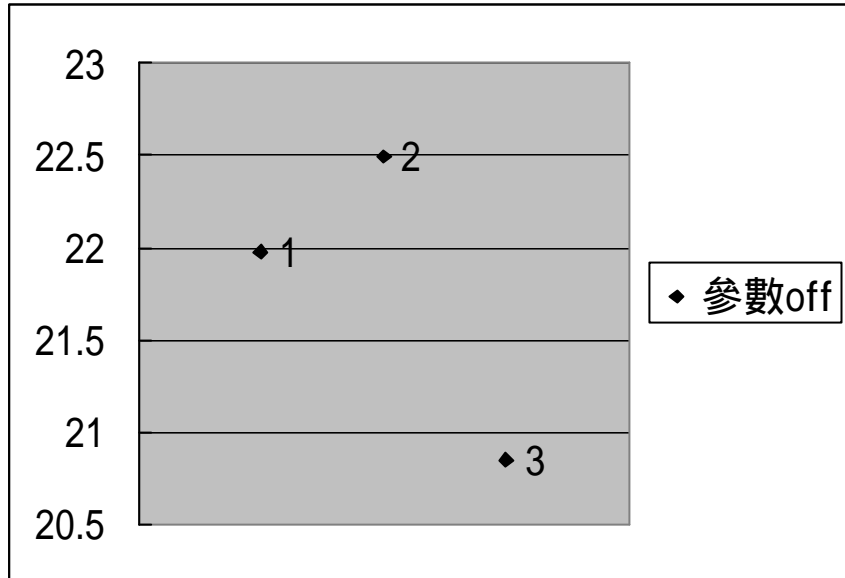


圖 5-11 加工溝槽寬之回應圖

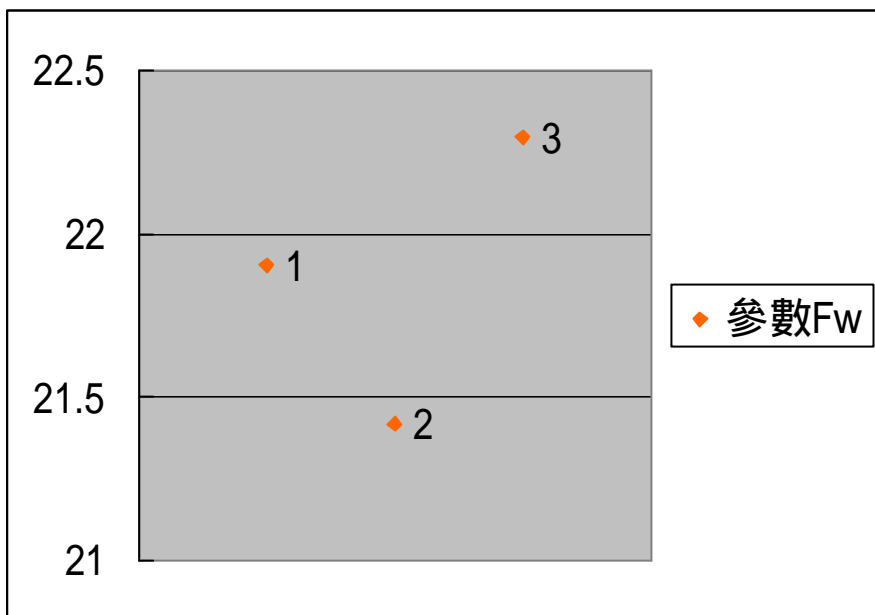


圖 5-12 加工溝槽寬之回應圖

由上述之加工溝槽寬之 S/N 回應圖中,可得知影響加工溝槽寬的顯著參數為水流強度、加工電流及短路放電時間,並可得知使之最佳化特性為 WL2、Ton3、Toff6、An9、Aff13、Fw17,也就是說水流強度最佳水準值為 2,也就是水流強度設為 5 (Kg/cm²),加工電流最佳水準值為 1,也就是加工電流設為 2 (μs),休止時間最佳水準值為 1,也就是休止時間設為 15 (μs),短路放電時間最佳水準值為 1,則短路放電時間因設為 1 (μs),輔助電流休止時間最佳水準值為 2,則輔助電流休止時間因設為 15 (μs),送線速度最佳水準值為 3,則設為 14 (mm /s)。

最後,經由驗證實驗可知,本實驗參數數據之最佳設定為,水流強度 5 (Kg/cm²),加工電流 2 (μs),休止時間 15 (μs),短路放電時間 1 (μs),輔助電流休止時間 15 (μs),送線速度 14 (mm /s)的時候,所量得的溝槽寬值為 0.225 (mm),比之前所量得的數值還要小,由此可知這項實驗是正確的。因此在最佳參數切割時可得良好的加工溝槽寬。

第六章、結論

除了目前機器現有功能的改進外，一個好的線切割放電加工機在加工前必須能夠提供適當的加工參數，接著開始進行加工時，必須隨時控加工狀況，同時配合精度控制與線上段差控制，隨時調整加工參數，以提高加工速度及穩定度。本文對 WEDM 的加工規劃系統與線上段差控制部份，分別提出了加工參數最佳化、比放電能與段差控制，形成一包含理論分析與實際應用於製程規劃與線上段差控制的研究。實驗經由田口式 L-18 直交陣列表變異數分析後，可容易得知各參數對加工特性影響之差別，也很快速的達到加工特性之最佳化，對於未來在線切割放電加工中是有極大的幫助，不僅能達快速有效率，及其表面品質更是完美。

6-1 線切割放電加工參數最佳化

1 表面粗糙度：

- (1)水流強度對表面粗糙度影響極大，若其水流強度越強，表面粗糙度越佳，因水流強度越強，越能有效的沖除切屑，以能有效達到最佳之加工特性。
- (2)加工電流對表面粗糙度最具有極大的影響力，加工電流越大，表面粗糙度越好，反之則越小，而不同加工電流下的表面粗糙度，其值差的最多。

- (3) 休止時間對表面粗糙度影響不大，但對於影響斷線的因素極大。
- (4) 短路放電時間跟休止時間一樣對表面粗糙度影響不是很大，但短路放電時間太小時，加工中會產生短路的現象。
- (5) 輔助電流休止時間越小，表面粗糙度越良好。
- (6) 送線速度對表面粗糙度也不具太大之影響，不過它也是影響斷線的因素之一。
- (7) 由這次實驗可知切割鐵鋁錳合金材料最佳參數，如表 6-1 所示。

表 6-1 最佳參數設定

參數	水準值		單位
水流強度 WL	4	5	Kg/cm ²
加工電流 Ton	4		μs
休止時間 Toff	20		μs
短路放電時間 AN	2		μs
輔助電流休止時間 Aff	15		μs
送線速度 FW	12		mm /s

2.加工溝槽寬：

- (1) 水流強度對加工溝槽寬具有影響力，同樣的水流強度越強，加工溝槽寬越小，因能有效的沖除切屑，以防止切屑卡在溝槽中，而使溝槽變大。

- (2)加工電流對溝槽寬一樣也具有極大之影響力，加工電流越小，溝槽寬越小。
- (3)休止時間對溝槽寬之影響是最小的。
- (4)短路放電時間越小，溝槽寬越小。
- (5)輔助電流休止時間大約取中間值，對溝槽寬越良好。
- (6)送線速度對溝槽寬之影響力不大。

6-2 未來研究方向

所提出的比放電能觀念是一廣泛適用的基本原理，其可應用的範圍應更多，針對未來的研究方向可朝下列幾點出發：

- 1.所發展之加工參數最佳化系統，可進一步應用於精加工的加工參數規劃。
- 2.比放電能與比特性能的觀念應可進一步應用於雕模式放電加工中。
- 3.未來可將所發展之加工規劃的結果，引含在已發展的雛型專家系統中，在結合其他線上控制系統，為未來整合線切割放電加工系統必備之功能。

參考文獻

1. 陳彥宏，「線切割放電加工精修表面細緻化之研究」，國立台灣大學碩士論文。
2. 余永平，「線切割放電加工材料之能量性質及其應用」，國立台灣大學碩士論文。
3. 蘇信政，「線切割放電加工參數最佳化之研究」，國立台灣大學碩士論文。
4. 馬士創，「線切割機參數最佳化之研究」，國立台灣大學碩士論文。
5. 魏維良，「CNC 線切割放電加工」，全華科技圖書。
6. 蘇品書譯，「線切割放電加工」，復漢出版社。
7. 張渭川編譯，「放電加工的結構與實用技術」，全華科技圖書。
8. 倉藤尚雄、鳳誠三郎著，鄒大鈞譯，「放電加工」，復漢出版社。
9. 梁瑞芳，「線切割機與放電加工機之物理現象比較」，機械工業雜誌。
10. 鐘雅健，「線切割放電加工機的放電伺服進給控制系統」，機械工業雜誌。
11. 黃錦鐘譯，「線切割放電加工面的硬度變化」，機械月刊。
12. 邱雲堯、廖運炫，「線切割加工之斷線偵測研究」，機械月刊。
13. 田口品質工程組譯，「品質設計的實驗計劃法」，中國生產力中心出版。

14. R . Snoeys , F . Staelens , and W . Dekeyser , 「 Current Trends in Non-Conventional Material Removal Processes 」 Annals of the CIRP.
15. T . Masuzawa and T . Takawashi , 「 Recent Trends in EDM/ECM Technologies in Japan 」 12th International Symposium for Elector-Machining.
16. E . B Guitrau , 「 Wire EDM-An Overview of Technology and Trends 」 Technicl Paper Published by Society of Manufacturing Engineers.
17. Hung N . P , Yang L . J , Leong K . W . 「 Electrical discharge machining of cast metal matrix composites 」 Journal of Materials Processing Technology.
18. Tetsuo Matsuo , Eiichi Oshima , Sadami Tomishige , 「 Influence of Duty Factor on Wire Electro-Discharge Machining of Conductive Ceramic 」 Journal of the Ceramic Society of Japan.
19. Y . S . LIAO , Y . Y . CHU , M . T . YAN , 「 Study of Wire breaking Process and monitoring of WEDM 」 Int . J . March . Tools Manufact.

附錄

符號說明:

Ton : 放電時間

Toff : 休止時間

WF : 線進給速度

WT : 線張力

WL : 水流強度

AN : 短路放電時間

AFF : 短路休止時間

SV : 伺服參考電壓

FR : 進給比倍率

FM : 進給控制模式

F : 固定進給速度

St : 變異數平方和

sm : 平均變異平方和

sa : 變數 A 的平方和

se : 誤差的平方和

Ni : 每次實驗的 值($i=1\sim 18$)

ni : 變數 A 第 I 層次的和($i=1,2$ or $i=1,2,3$)