

Inconel 718 深孔放電加工的特性研究 A Study of EDM Hole Drilling Characteristics for Inconel 718

陳紹賢¹、黃國泰²
Shao-Hsien Chen¹, Kuo-Tai Huang²

¹ 國立勤益科技大學機械工程系 助理教授
¹ Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology Assistant professor
E-mail:e6036@ncut.edu.tw

² 國立勤益科技大學機械工程系 研究生
² Department of Mechanical Engineering,
National Chin-Yi University of Technology
E-mail:terry@ams.com.tw

摘要

鎳基超合金在航太、能源等領域被廣泛地使用，其為極難加工之材料，由於所應用領域之蓬勃發展，使得此難加工材之生產品質與速度也逐漸有所重視。於深孔放電加工鎳基超合金的相關技術目前未被有效的討論，此外針對鎳基合金的相關放電參數目前仍高度仰賴經驗值，業界普遍仰賴經驗值及試誤法找出一組放電參數來加工，但當材料改變時往往要花很多時間重新找出一組可靠的參數來加工，本文將透過回歸分析實驗法有效找出相關放電參數裡對於放電效率影響性之因子，以利後續實驗來求出最佳深孔放電參數組合；經由實驗結果得知對於鎳基合金深孔放電加工之主要影響因子為放電電壓(V)其次要因子為放電休止時間(off time)，透過此顯著影響性放電參數將可提升深孔放電加工對鎳基合金過孔技術加工的相關應用。

關鍵字詞：鎳基合金、迴歸分析、深孔放電加工機。

Abstract

Nickle-base super-alloy, is extremely difficult to be machined, and widely used in aerospace, energy industries.... Due to flourishing application, the machining quality and speed of nickel-base-super-alloy is getting more attended. However, the related technology of Drill E.D.M on nickel-base-super-alloy has not been discussed effectively. In addition, the parameters of electronic discharge highly depend on experience. The industry is generally depends on trial and error to find out the parameters. Once the material is changed, it takes time to find out another set of parameters by trial and error again. This essay aims to find the influent factors of electronic discharge parameters on working efficiency through regression experiment method, so, to find the optimal of Drill E.D.M parameter combination by the following experiments. We learn that the major influents factor of the working efficiency of Drill E.D.M on nickel-base-supper-alloy is discharge voltage and second factor is discharge off time by experiment result. Via the significant influence of electronic discharge parameter, we are able to improve the related application technology of Drill E.D.M on nickel-base-super-alloy.

Keywords: nickel-base-supper-alloy, regression analysis, Drill E.D.M

1. 前言

航太發展為世界經濟與全球民眾跨國旅行的源頭，各國於此領域中都投注龐大之研發能力。於航太相關性零件之應用壽命為之重要，因

此迫使航太材料技術迅速發展，其材料之特性必須為耐高熱、耐熱衝擊與高韌性，如鈦合金、高溫鎳基超合金(Inconel 718)等等。航太零件在製造過程中著重於避免在加工時於零件表面造成應

力殘留及重鑄層，其重點在加工方式的決定[1]。一般以傳統加工法進行切削時，因材料本質上屬於高強度性材料，且於高溫中保持相當韌性與強度，故容易導致刀具的急速磨耗及破損而難以加工，進而導致加工成本高昂，加工上遭遇到的難度日漸增加。於航太材之深孔加工已長期被認定為最重要加工工藝之一，於零件製造中約50至70%的生產時間都花費在鑽孔。當以傳統鑽削方式來進行這些既細小且加工深度較深的孔加工時，將面臨切屑易阻塞及切削熱不易散掉等問題，使得鑽孔加工往往無法順利地進行，然而應用傳統加工中的孔放電加工(HEDM)將可替代傳統鑽削加工，以解決深孔加工之問題[2]，如圖1所示。由於深孔放電時影響加工效率與精確度之因素極多，如何透過適當參數設定，以提高品質及效率為之重要。

Lee等人[3]提出溫度梯度的變化會依電極材料、加工液及放電條件而改變，而放電能量將會影響放電加工表面形貌，當放電能量高，則淺坑、痘瘡、球狀附著物及裂縫將較多。

學者李驊登[4]以S45C、SKD11材料進行放電加工，並以放電電流、放電電壓及放電持續時間為加工之參數，然後針對材料表面粗糙度、白層與裂縫進行影響分析，結果指出表面粗糙度隨放電電流及放電持續時間增加而變大，而放電電壓影響不大，脈衝能量越高其白層厚度會越厚，脈衝能量越高裂縫會隨之增加。

學者彭金日[5]以直徑2mm的紅銅管與黃銅管電極，分別對SKD11、P10與導電陶瓷，進行加工深度12.5mm的放電鑽孔研究，搭配放電電流、水壓、放電持續時間、電容等參數對材料去除率、電極消耗率及表面粗糙度之影響。

Soni等人[6]探討放電加工過程中，電極與工件元素互相轉移與合金化之現象，其於實驗中對放電電流、放電電壓、放電持續時間、加工液和電極材料之相關性參數做變化，以探討對加工後表面微硬度及熱影響區厚度之探討。

學者戴子堯[7]利用放電加工鑽孔法來量測模具鋼TiN硬鍍層之殘留應力，以全因素實驗配置，探討放電加工參數對表面粗糙度、裂縫、白層等缺陷的影響，研究結果顯示，放電持續時間對表面粗糙度、裂縫、白層的影響最大，而白層也受熱傳係數影響。

Wang等人[8]以Cu、Gr、Ag-Cu之電極，針對AISI EK2、D2與H13材料，利用田口法來分析放電加工參數，實驗結果指出放電電流參數大小將會影響材料去除率和電極消耗率。

2. 深孔放電相關理論

2.1 深孔放電理論

深孔放電加工法(Hole Electric Discharge Machining, 簡稱 HEDM)，主要是由電阻器與電解電容形成充/放電迴路，V 為直流電源、C 電容器充電，而後電極(銅管)與被加工物之間隙中(gap)加工液(去離子水)，以伺服機構控制，加入電壓後，當電極與加工物逐漸接近至 5~10 μm 時，加工液中的自由離子排列成一細橋式電路，使電極與工件之間產生電場，形成一離子道而引發成電弧注(Arc)，以 8000 $^{\circ}\text{C}$ ~12000 $^{\circ}\text{C}$ 的高溫，將被加工物的表面層除去面粗糙度、裂縫、白層的影響最大，而白層也受熱傳係數影響。

放電火花是由陰極、陽極、電漿(Plasma)、陰極位降區和陽極位降區所組成，如圖1所示。陰、陽極位降區分別位於陰、陽極表面附近，電漿則為兩位降區之間所產生的氣體，其中包含電子、正離子和中性原子，溫度約在6,000 $^{\circ}\text{C}$ 到10,000 $^{\circ}\text{C}$ 左右。藉由陰極處足夠的熱量激發和陰極附近的正離子吸引，將使電子從陰極放射出來，並與陰極附近的正離子形成一位降區，此一位降區極薄，僅足夠加速電子撞擊陰極附近的原子，使之離子化。正離子和電子受電場作用的影響而產生反向運動，最後分別撞擊陰極和陽極，因能量傳遞的緣故，使放電點產生高溫而熔融或氣化，此位降區的壓降端視材料而定，從銅的12V到石墨的25V 不等。

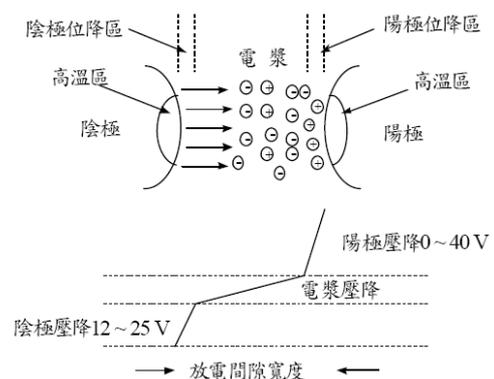


圖1.放電火花能量分佈的結構圖

當極間電流不大時，電子將被陽極吸引且迅速吸收，因而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。不過當電流足夠大時，陽極會伴隨溫度升高而氣化，此氣化原子會干擾電子進入陽極，此時陽極位降區便可形成。陽極位降區的壓降約在0V(位降區不存在)到40V之間，若所施加的放電流較小時，電極應接於陽

極，工件則接於陰極，可以利用控制電流使陽極的位降區為0V，促使電極工具的零消耗或低消耗情況出現，此種接法稱為「正極性加工法」；當施加的放電流較大時，電極應接於陰極，而工件改接於陽極，藉由控制電流的大小，使陽極位降區在0V到40V間，儘管電極仍會消耗，不過卻因而可控制加工物粗糙度，且雖然電極具有較高的消耗率，但工件的去除量卻更高，此種接法稱為「負極性加工法」。

2.2 深孔放電加工機組成

放電加工機的組成係指加工機的硬體設備，其硬體結構主要由下列幾個部分組成：放電電源供應系統、介電液循環過濾系統以及機械結構，如圖2所示：

- 放電電源供應系統：本實驗機器設備的放電迴路為附有Mosfet控制的電容器放電迴路。
- 介電液循環過濾系統：深孔放電加工機在進行孔加工的過程中，所選用的工具電極通常以中空管電極為主，介電液(通常為水)在氣壓供給系統的增壓協助下，經由迴路通過中空管電極進行加工所需的噴流，作為工具電極和工件間所需介電液供給之用途。
- 機械結構：孔放電加工機的機械結構，主要區分為放電加工機頭部分和工作平台兩大部分。在加工進行過程中，放電加工機頭本身作垂直方向移動，電極夾具則依附於加工機頭並做旋轉運動，藉以驅動電極旋轉和控制工具電極與工件間的間距，加工機頭的垂直方向行程約達250mm~600mm 左右，藉由伺服馬達帶動滾珠導螺桿的方式來完成。工作平台主要目的作為承載工件。

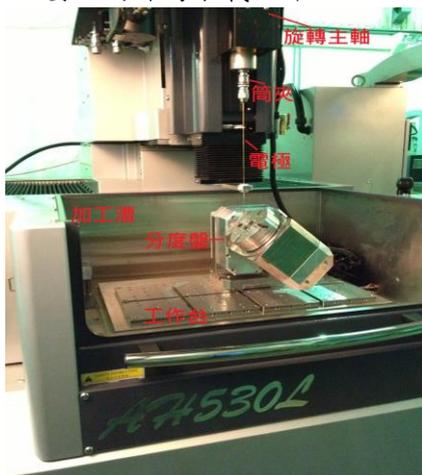


圖 2.深孔放電機示意圖

2.3 電極總類

加工時允許加工液通過電極中心來排渣及冷卻加工部位，但過大的孔及過大的電極卻會因

此產生如圖3所示的問題，因此有多孔電極的出現解決短路問題，電極一般可以分為：

- 單孔電極。
- 多孔電極。

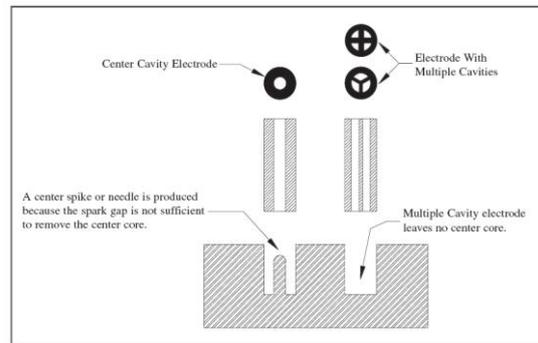


圖 3.電極種類

2.4 深孔放電加工的優點

- 可以在彎曲和傾斜的表面上鑽孔：一般的傳統加工很難在彎曲或傾斜的表面上鑽洞，但深孔放電加工因為加工時無接觸表面，因此可很輕易的做此類加工。
- 可以加工高硬度材料：有些材料太硬無法使用傳統加工方式，HEDM的加工方式只跟導電與否有關與硬度無關
- 加工過程不會產生切削應力。
- 深徑比很高。

3. 實驗設計法

實驗設計三個基本原理[9][10]:重覆、隨機化、區集劃分；重覆為使實驗減少誤差必須重覆實驗，它允許實驗者可估計實驗誤差之變異數，這誤差變異數的估計值就成為判斷所觀察到之資料中差異是否為統計上顯著的基本衡量單位。隨機化是避免因效果與實驗場所變化產生之影響，透過實驗隨機化採亂數產生，可有效的扯平外來因子干擾，以確保假設成立。區集劃分於眾多因子比較能改善比較精確度，應用於減低或消除干擾因子形成變異。依實驗分兩階段來探討，第一階段篩選實驗，主要為找出顯著因子，其需判斷實驗次數與解析度之後以進行實驗分析。第二階段優化實驗，目的為優化找出最佳值，並利用篩選實驗結果採用Central Composite Design方法，以求出迴歸方程式，來尋找出最佳值。

3.1 篩選實驗

篩選實驗細分三步驟，其說明如下：

3.1.1 實驗設計選擇

篩選實驗討論出顯著因子方法有兩種，第一為實施全因子實驗，第二為部分因子實驗，全實驗因子可明確得出哪些因子顯著、哪些因子較不

顯著、或是交互作用關係顯著性。由於全因子實驗的次數過多，於實驗時無足夠時間及精力來配合，然而部分因子實驗需有一些相關經驗或佐證資料來進行，因此須先知道因子可能的交互作用之關係才可以進行顯著因子判別。依據實驗目的、客觀條件、變數因子與水準選擇，即為實驗之型態，於本實驗中採用二分之一因子實驗法。

3.1.2 資料統計分析

資料分析採用變異數分析及相關理論如檢定係數 R^2 、F值或t值檢定、假設性檢定進行實驗，以下針對上述說明：

一、變異數分析如表1所示，其步驟：

表1. 變異數分析表

變異來源	平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	F_0	P-value
因子A	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$	P(A)
因子B	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$	P(B)
交互作用	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$	P(AB)
誤差	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$		
總和	SS_T	$abn-1$			

- 總變異量區分為實驗因子變異與誤差變異。
- 決定各變異對應自由度。
- 變異平方和除以自由度，化為變異數。
- 求F統計量。
- $F > F_{\alpha}(vR, vE)$ 時，表示R因子對反應值之影響為顯著； $F < F_{\alpha}(vR, vE)$ 時，R因子影響則不顯著。

二、檢定係數 R^2

模式之適切性可由檢定係數 R^2 來判斷，定義為：

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (4)$$

SS_R 為迴歸平方和 (Regression Sum of Square)

，又稱母體間的變異：

$$SS_R = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_i - \bar{y} \dots)^2 = \sum_{j=1}^{n_i} (y_i - \bar{y} \dots)^2 \quad (5)$$

SS_T 為總和平方和 (Total Sum of Square)，又稱總變異量：

$$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 \quad (6)$$

$$SST = SSR + SSE$$

SS_E 為殘差平方和 (Residual Sum of Square)，又稱母體內的變異：

$$SS_E = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 \quad (7)$$

R^2 值為母體間的變異對實驗總變異值描述之比率，即對實驗數據總變異質所能描述之比率。

三、F值或t值檢定：

檢測實驗因子其迴歸係數否有顯著性，可由F值或者t值來進行統計檢定。 MS_E 為殘差平方和， MS_R 則為平均平方和。F值與t值檢定方式大致相同。

$$F = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (8)$$

$$t^2 = F \quad (9)$$

四、假設性檢定：

假設性檢定目的為判斷對立假設 (Alternative Hypothesis) 與虛無假設 (Null Hypothesis)。篩選實驗顯著因子分析利用半常態機率圖、柏拉圖與變異數分析來判斷效應

顯著性。

五、實驗分析

目的是求出迴歸方程式，採用缺適性檢定與殘差檢定來確定迴歸方程式是合適的。於分析過程又分為四個步驟[11]：

- 迴歸模型之建構。
- 迴歸模型之檢定。
- 歸模型之診斷。
- 迴歸模型之分析與評估。

4. 實驗規劃與設備

本文將透過實驗設計法有效找出相關放電參數裡，對於鎳基合金的主要影響因子及其他次要因子，來提升深孔放電加工對鎳基合金的相關應用技術，研究分析方面運用變異數分析 (ANOVA) 與統計分析軟體 Minitab R15，以繪製出半常態柏拉圖、半常態機率圖、殘差分析圖等以進行探討，實驗流程如下所示：



4.1 實驗設備

本實驗所使用設備如下：

- (a) 高速深孔加工機(慶鴻機電公司 CHMER AD5L 型)，如圖 4 所示。
- (b) 輪廓投影機。
- (c) 銅電極(直徑 1.0mm * 長度 400mm)。



圖 4. 高速深孔加工機

5. 結果與討論

5.1 深孔放電加工效率顯著參數篩選

放電加工參數為影響放電加工品質之重要指標，主要以電極消耗率、材料移除率與電極消耗比...等來評比，研究顯示不同的放電加工參數對於上述之加工效率都有所影響，如把全部參數作為實驗因子將耗費大量時間與成本[12]，本實驗選取放電持續時間(on time)、放電休止時間(off time)、放電電流(I)、放電電壓(V)之四種加工參數來進行篩選實驗，應用廠商所建議之參數設定值如表 2 所列，並利用 Minitab 軟體來進行實驗規劃如表 3 所列，依據實驗規劃之排列組合進行深孔放電加工實驗，經由此方式找出影響深孔放電加工效率之顯著參數，以利後續加工參數優化實驗。

表 2. on time、off time、I、V 建議參數設定表

	on time	off time	I	V
參數最小值	20	20	33	42
參數最大值	40	40	50	60

表 3. 實驗規劃結果

實驗組合	實驗順序	on time	off time	I	V	Result(sec)
1	1	40	20	33	42	175
2	2	40	40	33	42	270
3	3	40	20	50	60	53
4	4	40	40	50	42	162
5	5	40	20	33	60	73

6	6	40	40	50	60	90
7	7	20	20	50	60	58
8	8	40	40	33	60	83
9	9	40	20	50	42	101
10	10	20	40	33	60	149
11	11	20	20	33	42	188
12	12	20	40	50	60	119
13	13	20	40	33	42	345
14	14	20	40	50	42	329
15	15	20	20	33	60	87
16	16	20	20	50	42	118

利用「Minitab」統計軟體繪出效用半常態機率圖如圖 5 所示，圖中「■」即為顯著之主效用或交互作用，顯著因子放電持續時間(on time)、放電休止時間(off time)、放電電壓(V)有偏離其它點，其代表因子 on time、off time、V 是有顯著差異的。利用「Minitab」統計軟體繪出效用柏拉圖如圖 6 所示，得知放電電流(I)因子並不顯著，可以發現與圖 5 有相同之現象，圖中 Y 軸接近 2.201 地方有一紅線，在 P 值=0.05，圖 6 中 P 值大於 0.05 的包含 on time、off time、V 三項，表示其有顯著差異。

將所建構的迴歸模型進行殘差分析，以檢驗此迴歸模型是否適當，經由圖 7 殘差分析檢定可以檢視出，無違反假設之圖形變化，表示此配置模式符合假設。

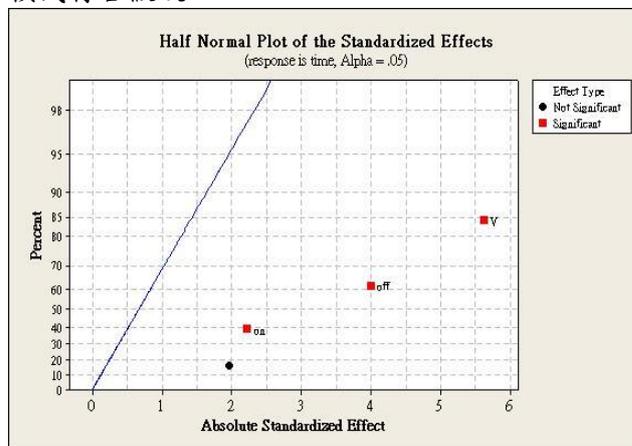


圖 5. 深孔放電加工效率之半常態柏拉圖

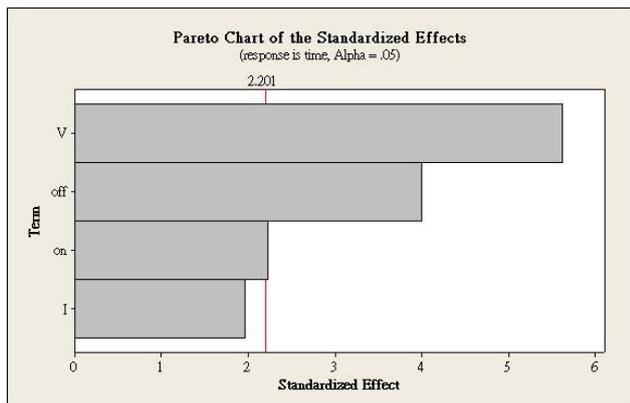


圖 6. 深孔放電加工效率之半常態機率圖

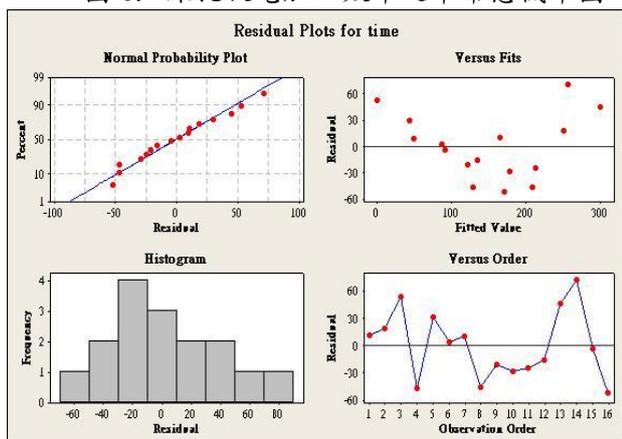


圖 7. 深孔放電加工效率之殘差分析圖

5.2 深孔放電電極過孔現象探討

由實驗結果得知第三組電極加工總耗費時間為 53 秒,第三組能量條件是十六組參數裡面最強的,由加工完的電極表面可以看到放電面積及放電坑洞既深且均勻分布,能量充分以熱能的方式對鎳基材料釋放,當放電持續時間達 $40\mu\text{s}$ 時,電極消耗率為最高點,放電電流達到最大 50A,放電能量增加最為顯著,電極的熱量也會增加但電極消耗也會增加。但放電持續時間繼續增加的時候,由圖 8 所示電極的消耗會開始減少,主要是加工液因放電加工時高溫會分解出碳素,因放電持續時間長,碳素大量的產生,加工液循環排渣的量固定,而沒有隨加工液排出附著在電極上的碳素具有保護電極的功能,因此電極消耗率減少,由圖面上又可發現當深度持續增加時,電極與工件持續產生放電現象,因此本組條件電極過孔(Through hole)快速且尖端部分完整。



圖 8. 第三組實驗電極過孔現象圖

於實驗中第十三組電極加工總時間 345 秒,能量條件是十六組參數裡面最弱的,由加工完的電極表面可以看到放電面積沒有辦法觀察到放電坑洞且並非均勻散布,由此發現能量過低,無法充分產生放電現象,當放電持續時間為 $20\mu\text{s}$ 時電極消耗最低,放電電流為最低的 33A,放電能量幾乎沒有產生,因此可以觀察到整根電極的表面幾乎相當完整,電極消耗相當少如圖 9 所示,可以觀察到當放電深度持續增加時,約到達一半深度時放電現象有中止的問題發生,因此本組條件無法有效過孔(Through hole),且已經產生嚴重短路現象。



圖 9. 第十三組實驗電極過孔現象圖

6. 結論

本次實驗進行深孔放電參數裡對於過孔加工效率的顯著參數篩選,並找出對於鎳基合金加工的主要影響因子及其他次要因子,本實驗可以歸納出以下幾點:

1. 放電電壓(V)為影響過孔的顯著因子。
2. 電極表面的有效放電面積影響到加工效率與過孔時間。

3. 實驗發現當能量越低以及加工孔深度越深時越不容易產生有效放電。
4. 本文於實驗中也發現除了電極之損耗與相對移除率關係性外，於主軸之迴轉速和噴流壓力間也有著相互影響性，因此仍待未來實驗研究和探討驗證其關係性。

7. 致謝

本實驗非常感謝指導教授陳紹賢老師給予實做上的理論指導。

8. 參考文獻

1. 侯憲欽，2004，雷射鑽孔 Inconel718 之重鑄層探討，國立屏東科技大學機械工程研究所，碩士論文，屏東。
2. P. Kuppan, A. Rajadurai, S. Narayanan, "Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718" Int J Adv Manuf Technol (2008) 38:74-84
3. L.C. Lee, L.C. Lim, Y.S. Wong, H.H. Lu, Towards a better understanding of the surface features of electro-discharge machined tool steels, Journal of Materials Processing Technology 24 (1990) 513-523.
4. 李驊登等，“放電加工參數對加工表面缺陷及粗糙度之影響分析”，材料科學（Chinese Journal of Material Science），Vol.28, No.4, pp.270~278, 1996.
5. 彭金日，“數種難加工材料之快速穿孔放電加工特性研究”，國立中央大學碩士論文，1998。
6. J.S.Soni and G. Chakraverti, "Experimental investigation on migration of material during EDM of die steel" Journal of Materials Processing Technology, 1996, pp.439-451.
7. 戴子堯，利用放電加工鑽孔法量測硬度層表面殘留應力，成功大學機械工程研究所碩士論文，1999。
8. P.J.Wang and K.M.Tsai, "Semi-empirical model on work removal And tool wear in electrical discharge machining" Journal of Materials Processing Technology, Vol.114, 2001, pp.1-17.
9. 黎中正譯，Montgomery 著，實驗設計與分析，第五版，高立圖書有限公司，2003。
10. D.C.Montgomery, Design and Analysis of Experiment, 5th, New York, 2001.
11. 李純真，印刷電路板工作底片尺寸變異分析，屏東科技大學工業管理系碩士論文，2003。
12. 楊振坤，添加石墨粉末之快速穿孔放電加工特性研究，國立中央大學機械工程研究所碩士論文，1998。