

國立交通大學
機械工程學系
碩士論文

壓電式噴孔片之液滴噴出行為之田口式分析

The analysis of Taguchi on droplet ejection process with the nozzle plate
connected to a piezoelectric actuator



研究生：黃昌彥

指導教授：林振德

中華民國 九十七年 七月

壓電式噴孔片之液滴噴出行為之田口式分析

The analysis of Taguchi on droplet ejection process with the nozzle plate
connected to a piezoelectric actuator

研究生：黃昌彥

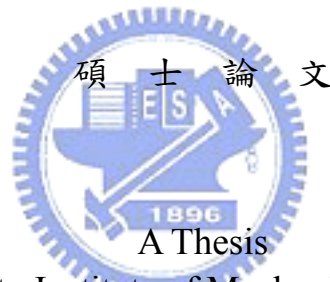
Student : Chang-Yan Huang

指導教授：林振德

Advisor : Jenn-Der Lin

國立交通大學

機械工程學系



Submitted to Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of The Requirements
For the Degree of
Master of Science
In
Mechanical Engineering
July 2008
Hsinchu, Taiwan, Republic in China

中華民國九十七年七月

壓電式噴孔之液滴噴出行為之田口式分析

研究生：黃昌彥

指導教授：林振德

摘要

本研究擬透過實驗觀察，探討噴孔片在不同的噴孔直徑以及不同的噴孔片厚度下，噴孔表面的親疏水性對液滴噴射行為的影響，並運用田口式品質分析方法，判斷出在哪種條件下，噴出液珠的效果較好。研究中採用微電鑄技術來製作噴孔片，並在其上施以塗層改變其表面親疏水性。經由可視化分析，本實驗詳細討論噴孔直徑與噴孔片厚度以及表面親疏水性的變化對液滴噴射速度、液滴斷裂時間與液滴體積之影響。

經由實驗結果，本實驗發現當噴孔直徑越小，噴孔片的厚度越厚，噴孔片的內表面呈現疏水性，上面任一條件皆可使噴出的液滴縮小，液珠脫離液柱的時間縮短，並且液珠不會因為倍頻的振幅干擾，而出現噴出的液珠體積不均勻或是速度不均勻的現象。三個控制因素用 S/N 的比值作為比較，本實驗發現液珠受到的影響以噴孔直徑與噴孔片厚度為主，內表面的接觸角雖有影響，但影響並沒有比前兩者為大。

The analysis of Taguchi on droplet ejection process with the nozzle plate connected to a piezoelectric actuator

Student : Chang-Yan Huang

Advisor : Jenn-Der Lin

Abstract

In this study, we use the experiment to observe the effect of wetting conditions on droplet ejection process at different nozzle size and different thickness of nozzle plate. In addition, using the Taguchi quality analytics to diagnosis droplet ejection process, which droplet ejection process is superior. The nozzle plate is fabricated using electroforming process and coated to vary wetting conditions at the air-water-solid interfaces. In the study, Using the high speed CCD camera connected to a video recorder will be utilized to visualize the droplet ejection process and further to analyze the droplet velocity, breakup time, and droplet volume at various wetting conditions.

In the study diagnosis, we dig out the diameter of nozzle is small, or the thickness of nozzle space is thick, or the surface of spraying sheet is anti-water. Any of these factors make the ejecting droplet shrinking, let abridgement of time to the ejecting droplet come off the water cylinder, and abatement Clock Multiplier affection of ejecting droplet. Abatement appearance unevenness affection of ejecting droplet and speed. The diameter, thickness size and contact angle by compare using the signal to noise ratio. According to the comparison of diameter, thickness and contact angle. It is found that the nozzle geometry including orifice diameter and nozzle thickness is more dominant than the contact angle of nozzle wall.

致謝

時光轉眼即逝，回想這一路走來的學習過程中，相信這是最難忘的一段回憶。在此先感謝林振德老師在此段作研究的過程中，以清晰適切的方式引導我們做研究，並指導我們以嚴謹且具邏輯的方式來理清問題點，接著要感謝林劉恭博士，在實驗上除了借用製程儀器之外，也提供製程上寶貴的建議與觀念，相信在這樣的訓練之下，必定受益良多。

感謝口試委員吳志陽教授、陳志臣教授、洪勵吳教授以及林劉恭博士對於論文上的指正與建議，才使得本文更加充實以及完善。

在交大的每一個日子裡，感謝涂文福、賴志銘、劉懋勳以及許豐庭學長對我的照顧，好友陳志豪、劉光倫在平時的互相打氣，學弟鄭守焜、藍順隆、李偉民、黃文錚以及黃泰碩的幫忙，這一段短暫但值得回味的實驗室時光，我將銘記於心，謝謝大家。

再來我要感謝我的家人，讓我可以無後顧之憂的專心致力於學業，安心的致力於課業，最後，僅以本論文獻給所有關心過我的人。

目錄

摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VIII
符號表.....	XII
第一章 序論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 文獻回顧.....	3
1-3 本文目的.....	5
第二章 實驗理論與噴孔片製程.....	6
2-1 噴出液滴動作原理.....	6
2-2 壓電材料.....	8
2-3 噴孔片製程.....	11
第三章 實驗量測與分析方法.....	18
3-1 實驗裝置與量測.....	18
3-2 田口式品質工程分析.....	21
第四章 結果與討論.....	27



4-1 田口式實驗分析.....	29
4-2 頻率變化實驗.....	36
4-3 無因次參數分析.....	37
4-4 倍頻原因與影響.....	39
第五章 結論與未來展望.....	42
5-1 結論.....	42
5-2 未來展望.....	44
參考文獻.....	45
附錄 1 各實驗振幅圖與速度圖.....	48



表目錄

表 2-1 電鑄金屬的特性[22].....	55
表 3-1 因素與因數分佈	56
表 3-2 $L_9(3^3)$ 田口式直交表.....	56
表 3-3 田口式 S/N 比值回應圖方程式	56
表 4-1 $L_9(3^3)$ 田口式內外直交表.....	57
表 4-2 田口式內外直交表	58
表 4-3 液滴為小液滴時 S/N 比回應表	59
表 4-4 液滴為小液滴時 S/N 比回應平均表	59
表 4-5 液滴為大型聚合液滴時 S/N 比回應表	60
表 4-6 液滴為大型聚合液滴時 S/N 比回應平均表	60
表 4-7 斷裂時間 S/N 比回應表	61
表 4-8 斷裂時間的 S/N 比回應平均表	61
表 4-9 液滴不均勻度 S/N 比回應表	62
表 4-10 液滴不均勻度 S/N 比平均回應表	62
表 4-11 小液滴對速度的 S/N 比回應表	63
表 4-12 小液滴對速度的 S/N 比平均回應表	63
表 4-13 大液滴對速度的 S/N 比回應表	64
表 4-14 大液滴對速度的 S/N 比平均回應表	64
表 4-15 Case3 在頻率 96kHz 與 64KHz 的比較	65

表 4-16 實驗中的無因次參數 65



圖目錄

圖 1-1 石英晶格的壓電效應	66
圖 1-2 壓電效應[20].....	66
圖 1-3 三明治型的轉換器[20].....	67
圖 1-4 實驗中噴孔片變化參數的位置圖	67
圖 2-1 液滴自噴孔凸出	68
圖 2-2 整體拉長	68
圖 2-3 主液滴與尾端斷裂	68
圖 2-4 尾液滴形成衛星液滴	68
圖 2-5 噴孔片製作流程	69
圖 2-6 噴孔片光罩圖(Auto CAD).....	70
圖 2-7 噴孔片光罩放大圖樣(Auto CAD).....	70
圖 2-8 電鑄過程中金屬的沉積圖	71
圖 2-9 噴孔剖面圖與正視圖(大圈為光阻痕跡，小圓為噴孔)	71
圖 2-10 液面接觸角為 74 度	72
圖 2-11 液面接觸角為 54 度.....	72
圖 2-12 液面接觸角為 112 度.....	72
圖 3-1 CCD 攝影機(X-strean VISION).....	73
圖 3-2 顯微鏡筒	73
圖 3-3 光學鏡頭	74

圖 3-4 FOI-250 的 250W	74
圖 3-5 訊號產生器 GFG-8015G	74
圖 3-6 噴孔片與壓電片接合示意圖	75
圖 3-7 噴孔片與壓電片接合後圖形	75
圖 3-8 噴孔片震動示意圖	75
圖 3-9 儀器架設位置	76
圖 3-10 儀器位置示意圖	76
圖 3-11 都卜勒振動量測儀(Polytec Demo 設備).....	77
圖 3-12 不同大小的拉丁方格	77
圖 3-13 液體無法自噴孔噴出	77
圖 4-1 Case1 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	78
圖 4-2 Case2 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	78
圖 4-3 Case3 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	78
圖 4-4 Case4 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	78
圖 4-5 Case5 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	79
圖 4-6 Case6 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	79
圖 4-7 Case7 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	79
圖 4-8 Case8 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	79
圖 4-9 Case9 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	80
圖 4-10 Case9.1 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m).....	80

圖 4-11 振幅與 Case 編號關係圖.....	80
圖 4-12 噴孔孔徑與體積的 S/N 比回應圖.....	81
圖 4-13 噴孔片厚度與體積的 S/N 比回應圖.....	81
圖 4-14 表面接觸角與體積 S/N 比回應圖.....	82
圖 4-15 振幅與對應 Case 的接觸角關係.....	82
圖 4-16 三因素對液滴體積影響的百分比(小液滴).....	83
圖 4-17 三因素對液滴體積影響的百分比(大液滴).....	83
圖 4-18 噴孔孔徑與斷裂時間的 S/N 比回應圖.....	84
圖 4-19 噴孔片厚度與斷裂時間的 S/N 比回應圖.....	84
圖 4-20 振幅與對應厚度的關係.....	85
圖 4-21 表面接觸角與斷裂時間的 S/N 比回應圖.....	85
圖 4-22 三因素對液滴斷裂時間影響的百分比.....	86
圖 4-23 噴孔直徑與液滴均勻度 S/N 比回應圖.....	86
圖 4-24 噴孔片厚度對液滴均勻度的 S/N 比回應圖.....	87
圖 4-25 表面接觸角對液滴均勻度的 S/N 比回應圖.....	87
圖 4-26 三因素對液滴均勻性影響的百分比.....	88
圖 4-27 噴孔直徑與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖.....	88
圖 4-28 噴孔片厚度與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖.....	89
圖 4-29 表面接觸角與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖.....	89
圖 4-30 三因素對液滴飛行速度影響的百分比(小液滴).....	90

圖 4-31 三因素對液滴飛行速度影響的百分比(大液滴)	90
圖 4-32 Case3 在 96kHz 下以 60kHz 速度拍攝圖片	90
圖 4-33 Case3 於 96kHz 時的振幅	91
圖 4-34 Case3 於 96kHz 時噴孔片的速度	91
圖 4-35 三因素與 Re 關係圖	92
圖 4-36 三因素與 We 關係圖	92
圖 4-37 三因素與 Ca 關係圖	93
圖 5-1 慣性方向與流動方向相同	93



符號表

A	噴孔直徑
A_m	欲鑄面積
B	噴孔片厚度
C	內表面接觸角
D	特徵長度
D_{ij}	壓電係數
E_j	外加電場
F	噴孔片振動頻率
I	電流大小
k	直交表的行數
L	拉丁方格(Latin Squares)的字頭
n	直交表的列數
N	液滴個數
\bar{P}	液滴的平均體積
P_i	單一液滴體積
Q_i	單位面積感應電荷量
S_j	材料應變量
T_b	主液滴斷裂時間



T_i	外加應力量
U	主液滴速度
θ	液體接觸角
ρ	流體密度
μ	流體黏滯係數
σ	表面張力



第一章 序論

1-1 前言

近來液滴噴射器相關應用產品已在生活上隨處可見，其可見的明顯趨勢是往小、快、精確方向演進。液滴噴射系統是一種結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫等多重技術整合的研發領域，其特色為可噴射出微小液滴來進行不同的應用。故相關研究人員近年來對於這具有廣大發展潛力的領域積極地發展其新的研究方向，如噴墨列印(inkjet printing)[1,2]、生醫流體的植佈(biofluid printing)、燃料噴射系統[3]、藥物服用(drug dosage)[4]、晶片冷卻與直接印表製程技術(IC cooling and direct writing)。高可靠度、高性能與低成本的微噴液裝置是近來致力研發的重點。

壓電性(piezoelectrics)[5,6]為一種機電能量互換的現象，對此一現象最早是在 1880 年由 Curie 兄弟所發現的[7]，他們在石英 (quartz)、電石 (tormaline)與酒石酸鈉鹽(Rochelle salt)等材料上所發現的特性。在一般壓電材料中，PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) 因具有優異的介電係數(dielectric constant)，電性及可隨添加劑種類改變電性的特性，故被廣泛的應用。在有極化耦合離子存在的結晶上施以電場時，正負離子會由平衡狀態產生位移，造成結晶的應變[圖 1-1]，或是在結晶上施加應力使其產生應變時，會產生電極化(electrical polarization)，是為壓電效應。壓電效應為機電能量轉換的現象，其作用方式包括正壓電效應跟逆壓電效應兩種。所謂正壓電效應(Direct

Piezoelectric Effect)是指壓電材料受到一機械應力作用時，其內部正負電荷中心會產生一相對位移，而產生一相對電場，如圖 1-2[圖 1-2]所示。反之當壓電材料受到電場作用時，內部也會產生一相對應變，此為逆壓電效應 (Converse Piezoelectric Effect)，如圖 1-2[圖 1-2]所示。此現象被 Hankel 定名為壓電性[8,9]。若是加入的電廠為交流電場，則材料的變型方向會隨著交流電壓而改變，而變形幅度可達到最大值。依正負半週期而變化，此時交流電場的頻率就等於材料本身的自然頻率(Natural Resonance Frequency)[10]。

微機電的原文”Micro Electro Mechanical System”其意為”微米級機電整合系統”，是一種技術，為現今被認為極具發展潛力和前瞻性的研究領域。其利用半導體製程技術，將機械結構微小化至微米等級，並可與電子元件結合製作於同一晶片上，使微機電系統具有體積小、質量輕、可大量製造 (Batch Fabrication)等等特點，且其尺寸和質量均縮小至數微米甚至奈米等級，和一般傳統元件相距甚大，因此許多物理特性及環境因素和巨觀世界有著明顯的差異，須用不同於以往的眼光、思考來面對，並以微觀的設計概念來運作。

結合壓電特性與微機電技術，本人先利用微機電技術，使用電鑄的方式製造出噴孔片，在將噴孔片接合於壓電片上，將噴孔片上放置液體，當液體流經微管道後，再經過壓電片的振動，帶動液滴自噴孔噴出，並用可

視化分析液體噴出後的狀況。

1-2 文獻回顧

壓電效應的真正用以實用化的是在 1917 年，Langevin 用石英及鋼材組成一 個三明治型的轉換器(transducer)[11][圖 1-3]，此一轉換器可將電能轉換為超聲波(ultra-sonic wave)振動，並用做水下探測之用；此後在 1921 年，Cady 發表了一篇有關壓電震盪器(piezoelectrics resonator)的論文[12]，之後壓電材料使用在超聲波及頻率處理方面就逐漸增加。

觀察液滴的變化現象，要從西元 1833 年開始說起，當時 Savart 發現由一小孔徑噴孔噴出一連串的液體會因為表面張力而形成均勻的液滴；於 1859 年 Magnus 利用有系統的實驗證明了 Savart 的發現，說明瞭液滴經過一小孔徑的噴孔所產生的變化，也證實了 Savart 實驗非偶然產生。又在西元 1878 年，Lord Rayleigh 利用數學式證明了 Magnus 的實驗，並正式提出將水柱變成水滴 (Droplet) 的概念，即讓大量的水通過一小孔徑的噴孔，液體會因為表面張力的關係，形成小液滴。Lee[13]以一維波動方程式來模擬非粘滯留體之液滴的形成，在方程式的處理上，分為線性與非線性分析兩方面來做探討。在線性分析上，其方程式提供了一個穩定的流體關係，並跟 Rayleigh 的結果相比較；而非線性方程式方面，利用數值模擬來探討衛星液滴的形成。Pimbley[14]以 Lee 的一維波動方程式加上邊界值微擾的問題來計算，根據其解來預測液滴的形成，並跟 Rayleigh 的解相比，發現

在較高的噴射速度下，所得的結果與 Rayleigh 的結果相近，但在較低地噴射速度下，所得的結果與 Rayleigh 的結果有明顯的差異。並探討微擾波長與噴嘴口周長兩者之間的關係，對於液滴產生的影響發現當波長大於週長時，液滴就會產生。

Burce [15]在實驗方面以水何其它高分子溶液進行噴射實驗，探討不同溶液對於液體速度、分離長度與穩定性的影響，發現高分子溶液的穩定性差，跟溶液的濃度與分子量成反比。Pimbley 和 Lee[16]在實驗量測上，於不同的操作條件下，觀測液滴分離的時間與距離，並對衛星液滴的形成與行為做探討，並與理論分析做比較對照，經證明發現，當整體波長達到 5 至 6.5 被噴孔的直徑大小時，可以阻止衛星液滴的形成。又 Fromm[17]使用數值近似法解二維 Navier-Stokes 方程式，硬針對具有固定長度的等圓截面噴嘴，探討再噴嘴入口處給予一隨時間變化的壓力與不同意體的性質時，對於噴出液體串速度與形狀變化的影響，結果發現當雷諾數與韋伯數之比越小時，則需越大的驅動壓力使液體噴出。

對於液滴流經噴孔後的噴出狀態，主要會影響液滴形狀的參數有噴孔形狀、氣泡生成、訊號頻率以及振動幅度等。文獻 18 分析噴孔形狀對於液滴噴濺的影響，他們發現圓型噴孔比起方形、三角形或是多角狀的噴孔，可以用較小的壓力就把液滴擠出噴孔，且速度與流量均較大[18]。文獻 19 單就圓形噴孔做分析，他們發現圓型噴孔的直徑越大，液體的流量也就越大，流速相對減小；而噴孔流道行程之傾斜角度越大，也就是從圓柱型越

接近圓錐型，則液體流速會越快，流量也就相對的減少[19]。

1-3 本文目的

可以廣泛應用在各種領域是噴液系統的最大優點，因此如何改善噴液系統的品質是目前各方面重要的議題之一。由前面的文獻探討可知，先前的研究大都著重在液體特性，操作電壓波形與噴孔幾何尺寸對液滴噴射行為的影響，沒有考慮噴孔表面性質，即表面親接觸角對液滴噴射行為的影響。

為了進一步瞭解液體經過一微小噴孔後，其所呈現的行為，本實驗目的在於使用壓電材料的逆壓電特性，加入電壓驅動壓電片來振動噴孔片，並藉由改變噴孔片中噴孔外部的直徑大小、整體厚度以及噴孔片內表面的接觸角，如圖所示[圖 1-4]，來觀測液體藉由噴孔噴出後，是否會呈現一種穩定的液滴噴射，或是出現噴出不同顆粒大小的液滴，並找出其中相對應的關係。本實驗預計選取的參數有：液體接觸角(θ)、噴孔片振幅(A)、噴孔片振動頻率(F)、主液滴體積(P_i)、主液滴速度(U)、主液滴斷裂時間(T_b)， Re (Reynolds number)、 We (Weber number)、 Ca (capillary number)= We/Re ，並以此探討液滴噴射過程中，表面張力，慣性力，黏滯力，與毛細作用力的交互影響與液滴噴射行為。

第二章 實驗理論與噴孔片製程

為進一步瞭解液體再開經過一微小噴孔後所呈現的行為，所以本研究本實驗藉由改變噴孔片中噴孔內部的直徑大小以及噴孔片表面的親水性，來觀測液體藉由噴孔噴出後之流體行為以及液滴之形成。

2-1 噴出液滴動作原理

壓電式微噴液裝置的液滴噴射過程，一般可分為補液、噴射、回拉與液滴生成等四個階段。

2-1-1 補液階段

補液階段，壓電片由於受電壓作用的影響，壓電片產生型變，因為噴孔片連接在壓電片上，當壓電片產生型變後，讓噴孔片整體向下移動，促使噴孔處的液體產生相對低壓，進而使液體由噴孔外的區域流至噴孔內，也同時拉動噴孔液體往回退縮。此時噴孔附近表面親疏水性即會對液體後退距離造成影響，導致液體在進入噴射階段時起始出發位置不同。

2-1-2 噴射階段

在噴射階段，壓電片會驅動噴孔片，促使噴孔片給噴孔處的液體一相對高壓，促使液體向外流出並逐漸突出噴孔之外，在噴嘴處形成一個突起，接著由於受到表面張力的影響，液滴前端會凝聚成球形，形成如圖(圖 2-1)。由於在補液階段，液體受噴孔附近壁面表面親疏水性的不同，導致液體在噴射階段起始出發位置不同，因此在噴射時，液體在噴孔內所走的距離也

不盡相同，進而使突出噴孔液體速度也不同。

2-1-3 回拉階段

在回拉階段，噴孔處之液體再度呈現一相對低壓，拉動噴孔外之液體往回縮，導致噴孔處的液體直徑縮小，速度減緩，但原先在噴孔外之液體噴流會因為慣性力的作用而持續往前推進，由於液滴前端的速度比噴孔處的液滴速度較快，所以整體液滴會逐漸拉長，如圖所示(圖 2-2)。液滴前端球狀稱為主液滴(main droplet)，後端拉長的稱尾液滴(tail droplet)。除了受到速度的影響以外，表面張力的影響也使主液滴凝聚成球狀。

2-1-3 液滴生成階段

在液滴生成階段，壓電片停止動作，使得壓力艙內的液體不再往噴孔流動，但噴出液體慣性作用造成液體繼續往前飛行，並於靠近噴孔處氣液界面向噴孔中心軸線內凹，在克服表面張力與黏滯力牽絆後，分裂為一拖尾狀液滴。當主液滴與尾液滴因為速度的差異，液滴就會斷裂成兩段或是更多，如圖所示(圖 2-3)，這過程稱為液滴斷裂(droplet breaking)。在液滴斷裂之後，主液滴繼續以較大速度前進，因為表面張力的關係，斷裂的尾液滴慢慢由長條狀，斷裂成許多小段落，之後再，每一個小段落又變成小液珠，這些液滴比主液滴小，又稱為衛星液滴(satellite droplet)(圖 2-4)。此時噴孔附近壁面不同表面親疏水性，將會對噴孔處氣液界面向內凹距離、速度、形狀造成變化，進而影響到液滴斷裂脫離噴孔時間、液滴長度、衛星液滴多寡等。不過在本實驗中是採用比一般噴墨印表機的噴射頻率高的驅

動頻率，驅動頻率為 63kHz，因為振動的時間間隔極短，所以噴孔片噴出的液滴屬於連續式，主液滴都是接連出現，未觀察到衛星液滴產生。

2-2 壓電材料

電偶極矩的產生在於晶體內部之陽離子和陰離子存在某一時特疏的排列方式，隨著材料中晶格系統，各有不同的電偶極矩產生，然而最基本的條件就是晶格本身存在不對稱中心。因為沒有對稱中心，因此造成陽離子和陰離子無法表現出中和的特性，於是導致電偶極矩的存在。能表現出較強電偶極矩的材料包括單晶體如水晶、鈮酸鋰、鉭酸鋰、鈦酸鋇，陶瓷體如鈦酸鋇及其複合物、鋇鈦酸鉛及其複合物，半導體如氧化鋅及有機體如 PVDF 等均為目前較常使用的壓電材料，以材料結構特徵可以分成以下三類 [20]。

1. 陶瓷類(Ceramics)：

陶瓷類壓電材料依照晶格排列的型態可以分成單晶結構及多晶結構。石英(Quartz)，鈮酸鋰(LiNbO₃)和鉭酸鋰(LiTaO₃)視常見的單晶體壓電材料，單晶結構壓電材料特點是在不同的切面會有不同壓電性質。多晶結構則是如鋇鈦酸鉛(PZT)、鈦酸鋇(BaTiO₃)等，本實驗所用的壓電片亦屬此類，其材質為鋇鈦酸鉛(PZT)。

2. 薄膜類(Thin film)：

壓電材料可以以薄膜的型態成長，而薄膜製程可與半導體製程整合，在不

同的製程條件下，壓電薄膜會有不同的性質表現。氧化鋅(ZnO)與氧化鋁(AlN)是常見的壓電薄膜材料。

3. 聚合物類(Polymer)：

聚合類的壓電材料即是高分子材料，材質柔軟有彈性，但壓電性質較陶瓷晶體差，常見的有聚氟化亞乙烯(PVDF)。

2-2-3 壓電方程式

運用壓電片當作工作元件，需要先行知道壓電片的動作原理，而壓電片的動作原理分為正壓電效應與逆壓電效應。

正壓電效應亦只當應力施加於壓電材料時，材料會伴隨產生與應力大小成比例的電荷，其電荷與應力關係如下[21]

$$Q_i = d_{ij}T_j \quad (i = 1-3 ; j = 1-6) \dots\dots\dots(2-1)$$

其中 Q_i = 單位面積感應電荷量(C/m^2)

$$d_{ij} = \text{壓電係數 (C/N)}$$

$$T_j = \text{外加應力 (N/m}^2\text{)}$$

逆電壓效應則是外加電場於壓電材料時，材料的應變會隨著電場大小而改變，其應變量與電場的關係如下 [21]

$$S_j = d_{ij}E_j \quad (i = 1-3 ; j = 1-6) \dots\dots\dots(2-2)$$

其中 S_j = 材料應變量

$$d_{ij} = \text{壓電係數 (m/V)}$$

$$E_j = \text{外加電場 (V/m)}$$

此外，壓電材料在電場作用下，依據電磁學理論得知會發生電位移現象 (Electric displacement)，其關係如下[21]

$$Q_i = \varepsilon_{ij} E_j \quad (i = 1-3 ; j = 1-6) \dots\dots\dots(2-3)$$

其中 Q_i = 電位移量 (C/m^2)

ε_{ij} = 介電常數 (F/m)

E_j = 外加電場 (V/m)

根據材料力學之基本概念，當外應力施加於物體，在材料彈性限內應變與應力成正比關係，得到

$$S_j = E_{ij} T_j \quad (i = 1-3 ; j = 1-6) \dots\dots\dots(2-4)$$

其中 S_j = 材料應變量

E_{ij} = 彈性係數 (m^2/N)

T_j = 施加應力 (N/m^2)



壓電效應同時作用在力場及電場中，總結上述四種條件可以得到壓電方程式 (2-5) (2-6) [21]

$$Q_i = d_{ij} T_j + \varepsilon_{ij} E_j \dots\dots\dots(2-5)$$

$$S_j = E_{ij} T_j + d_{ij} E_j \dots\dots\dots(2-6)$$

由上述壓電方程式可知，影響壓電效應有屬於機械量的應力與應變，以及屬於電器量的電場強度與電位移量，因此完整的壓電效應過程與材質本身具有機械量與電氣量的特性，稱為機電耦合關係。

2-3 噴孔片製程

2-3-1 噴孔片設計

由先前的文獻中提到，液滴流經噴孔擠出後的狀態，噴孔形狀以圓型為最佳，因為圓型噴孔與方形、三角形或是多角狀的噴孔相比，圓型噴孔可以用比較小的壓力便可把液滴擠出噴孔，且速度與流量均比方形、三角形或是多角狀的噴孔較大[18]。因此噴孔採用圓型噴孔，並為了讓流體容易流過噴孔，所以噴孔製做成一個圓錐形傾斜角度，使液體可以快速經過噴孔[19]。

2-3-2 噴孔片製程

噴孔片製成如下，詳細情形如圖(圖 2-5)所示

1. 光罩設計(Mask Design)

製作噴孔片所需要的光罩，本實驗採用市售的霧化器上噴孔片的尺寸，其中每片噴孔片的長寬為 10mm×13mm，使用 Auto CAD 製作光罩圖層，藉由軟體繪出之後，再將光罩圖案匯入雷射光罩製作系統(Laser Writer)對空白光罩(含鉻膜、光阻)定義圖案後製作，再經由顯影，製作出玻璃光罩。而噴孔片上方設計有 4 孔，4 孔呈現一直線排列，孔間間距為 2mm，實驗中觀測的噴孔為最接近壓電片的噴孔，以減少因為噴孔片晃動對液滴噴出的影響。光罩圖如圖 2-6、圖 2-7 所示(圖 2-6、2-7)

2. 基材前處理(Substrate pretreat)

先將欲濺鍍(Sputtering)的晶片基材先用硫酸(H_2SO_4)與氫氟酸(HF)進行

酸洗(Pickling)，讓基材表面的有機物以及氧化物去除。

3. 去水烘烤(Dehydration Bake)

基材表面依班會含有因空氣中的溼度而吸附的水分子，因此在光阻塗佈(Coating)之前，先將清潔乾淨的晶片表面以氮氣吹乾之後，至於加熱板上數分鐘，令水份從表面上去除。

4. 濺鍍(Sputtering)

濺鍍是將電漿(Plasma)內所產生的部份離子脫離電漿，轟擊(Bombard)在陰電極板上的靶材(Target)，使靶材原子進入電漿內，最後吸入到陽極的基材上，並於表面形成沉積為金屬薄膜。本實驗中，先用讓晶片表面沉積一層金屬鈦(Ti)，接著在沉積金(Au)，兩者的厚度皆為 100nm；用金屬鈦是因為可以讓噴孔片在振動時不易斷裂，金屬金則可以讓晶片再電鑄時金屬鎳 (Ne) 容易在表面附著。

5. 微影製程

(1) 光阻塗佈(Spin Coating)

先將濺鍍完成後的晶片置於旋轉器(Spinner)上吸附，再將本實驗中所使用的光阻 AZ-1500 正型光阻(Positive Photoresist)以同心圓的方式由內而外將光阻塗佈置晶片上。利用旋轉器帶動晶片旋轉之離心力使光阻向晶片外圍移動而形成一層厚度均勻的光阻薄膜(2 μ m)；選用 AZ-1500 光阻塗佈，是因為 AZ-1500 光阻可以產生較薄的光阻覆蓋層，可以讓後面的電鑄狀況較

為理想，因為若是光阻過厚，電鑄後會不易產生漸縮的孔穴，也就不易後續電鑄。

(2) 軟烤(Soft Bake)

光阻主要是由樹脂(Resin)、感光劑(Sensitizer)及溶劑(Solvent)所組成的。軟烤係將光阻旋塗後的基材放置在熱電板上加熱，使基材上的光阻中溶劑從光阻中驅除，而由原來的液態光組成為固態薄膜，加強光阻層對基材表面的附著力。軟烤的溫度與時間是相當重要的，假使軟烤的溫度或時間不夠，除了光阻層與基材表面的附著性會降低外，也會因為溶劑在光阻內的含量過高而導致曝光的精度變差；反之溫度與時間太高或是太長，會令光阻因脆化而使附著性降低，而光阻在曝光時對光的敏感度(Sensitivity)將會變差。



(3) 曝光(Expose)

曝光的目的主要是使基材上的光阻層吸收適當的能量，以進行光化轉換(Photochemical Transformation)，使經由顯影後的光阻能成功的轉移光罩上的圖案至基材上。本研究製作方式係將經軟烤固化後的光阻製作完成之光罩置於曝光機(Aligner)的試片區與光罩區，使用接觸式(Contact)曝光技術，利用近紫外光(405~420nm)套過光罩對基材上之光阻層進行照射。正型光阻本身難溶與顯影劑，遇光之後會解離成一種易溶於顯影液的結構。

(4) 顯影(Develop)

顯影是將基材表面經過曝光部分的光阻層，藉著與顯影液的中和反應

加以清除，使光阻層所轉移的潛在圖案顯現出來。而顯影時間的控制，基本上是要有足夠的時間讓曝光過的光阻層能順利的被顯影液中和。一般為了先除曝光時所產生的駐波(Standing Wave)現象，以及顯影後進一步將光阻內所殘留的溶劑含量驅除，通常在執行顯影前及顯影後分別進行一道曝光後烘烤(Post Exposure Bake)及硬烤(Hard Bake)，。

6. 微電鑄製成(Micro Electroforming Process)

顯影後基材表面上有當作絕緣層的光阻圖案以及電鑄用的導電起始層，在基材表面使用介面活性劑(AP-S)使基材表面濕潤，同時驅除浸入鎳槽後基材表面的氣泡，當試片以夾具夾持浸入氨基磺酸鎳(Nickel Sulfa mate Solution, $\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$)鎳槽後，通以所需電流量，利用裝有鎳塊之鈦籃(陰極)的還原反應，將鎳離子還原成鎳原子，之後在基材表面有裸露出金屬的地方附著。實驗中需要的噴孔形狀為一個漸縮式的圓形噴孔，噴孔的漸縮形狀利用電鑄時的金屬成長行為來完成。金屬成長的方式如圖[圖 2-8]，先是在有沒有被光阻覆蓋，有露出導電起始層的位置開始沉積金屬，當沉積的厚度超過光阻的厚度時，沉積的金屬便會開始在光阻上方，有金屬的位置繼續成長，當成長到適當的厚度便停止電鑄製程並進行金屬剝離母模的動作。電鑄後的金屬鎳會覆蓋過光阻，形成一個漸縮孔穴。

電鑄前需先計算所需的電流量，根據下列公式：

$$ASD = \frac{I(\text{mA})}{A_m(\text{dm}^2)} \dots\dots\dots(3-2)$$

I：電流大小(單位 mA)

A_m ：浴鑄面積(單位 dm^2)

電流(mA)大小等於電鑄面積(dm^2)乘上 ASD，ASD 代表電鑄速率，以本電鑄槽鑄鎳為例，1ASD 表示一小時可鑄出厚度 $12.3\mu\text{m}$ 的成品，因此計算出晶片上需電鑄的面積，再乘上所要的電鑄速率，即可得實驗所需電流大小。母模上當作絕緣層的圖案所使用的材料大部分為可被蝕刻或是去除的，可輕易去除進而得到微小電鑄元件，常見者如使用微影製程，於晶片表面上製作光阻圖案，再行電鑄。

電鑄原理是在電解液中對陰、陽兩極間施加電壓，電場使帶負電的陰離子(Anion)往陽極(Anode)移動，帶正電的陽離子(Cation)往陽極(Cathodes)移動，陰陽離子移動產生電流以陽離子移動方向為電流正方向。陰極比陽極電位低，擁有較多過剩的電子，到達此處的陽離子和電子結合還原為中性金屬並沉積在陰極上，同時放出氫氣。而掛在陽極上的金屬會析出金屬離子和電子，電子再經由導線移動至陰極，穩定陰極電子濃度並維持還原反應的進行。由於過程中陽極電解反應所生成的金屬離子恰等於陰極還原反應所消耗掉的金屬離子，所以整個過程中電鍍液中的金屬濃度保持固定。

本實驗所用電鑄槽主要有加熱、過濾、循環等功能，由於溫度是控制電鑄好壞的其中因素，因此在電鑄過程中，系統使用加熱器將電鑄液加熱，再經熱水循環系統使電鑄槽內維持在 43°C 恆溫。而循環系統也可使電鑄槽

內離子濃度均勻，讓陰極能迅速補充金屬離子。此外也可藉由自動補水系統及抽水幫浦的帶動，將雜質過濾，並使電鑄浴之濃度固定，提升電鑄品質。

任何可以電鑄的金屬或合金皆可作為微結構的材料，但在應用上微結構或塑膠成型模仁的標準是鎳，因鎳具有高張力強度、良好的機械性質及抗腐蝕的特性(表 2-1)[22]，而本實驗的噴孔片主體也是採用金屬鎳。

7. 光阻移除(Stripper Photoresist)

當電鑄完成後將基材浸入丙酮，把光阻溶解，待光阻完全去除後以去離子水(D.I. Water)沖洗乾淨，再將噴孔片自基材上剝除，即得到噴孔片，噴孔片剖面形狀如圖(圖 2-9)。



2-2-3 表面接觸角的影響

為探討不同的表面接觸角對液滴噴射行為的影響，本實驗進行表面改質的表面為噴孔片的內表面，因為內表面才會跟液體有接觸，且本實驗採用 DI-Water 當作工作流體，因為 DI-Water 中雜質含量比水低，而且液面接觸角可以有極大的變化，適合用於探討此型為觀測。實驗所採用的噴孔片材質為鎳鈦合金，金屬表面在未經處理時，水在其表面的靜態接觸角是 74 度，如圖所示(圖 2-10)，屬於親水性表面，再利用氣體乾蝕刻的方式將表面接觸角下降，本實驗使用反應式離子蝕刻(Reactive Ion Etching R.I.E)，反應式離子蝕刻是介於濺擊蝕刻(Sputtering Etching)與電漿蝕刻(Plasma Etching)

之間的乾式蝕刻技術，其結合了物理與化學兩種去除薄膜機制，因此具有非等向性蝕刻的優點。實驗中以氧氣(Oxygen)作為 RIE 反應氣體，藉由氧氣的撞擊噴孔片表面，改變噴孔片表面的親水性，讓接觸角降至 54 度(圖 2-11)，接觸角降低會增加表面附著力，且親水化會讓水與表面的附著力較水分子間的內聚力大，讓液體對固體表面的表面能增加，液體與固體的接觸角變小。另外也可以使用疏水性塗料，如鐵氟龍(Teflon)溶液，便可使噴孔片表面出現不同親疏液面，藉此用來探討不同表面的親疏水性對液體噴射行為的影響。

為了使金屬表面能夠改質成疏水性表面，本實驗預計在表面塗佈上四氟乙烯(Polytetra fluoroethylene, PTFE)，又稱鐵氟龍(Teflon)，其熔融溫度(melting temperature)為 327~347°C。PTFE 塗佈以沾附的方式覆蓋於噴孔片的表面上，塗佈厚度為 0.5 μm ，再用 150°C 的溫度烘烤 5 分鐘，令鐵氟龍附著於表面，水在噴孔片上的靜態接觸角經實驗後可得接觸角為 112 度(圖 2-12)，屬於疏水性表面。而 PTFE 可增加接觸角，其原因是因為氟離子對所有物質都具有排斥，會使液體與固體表面的表面能減少。

第三章 實驗量測與分析方法

本實驗的目的是觀察液滴噴出後的現象，因為噴出的現象需要可視化，所以下面介紹所需使用的儀器，以及實驗狀的架設方式。實驗過程中，若是使用完整的實驗，會需要大量的時間與經費，所以在本實驗中本實驗採用田口式品質分析法做為分析的工具

3-1 實驗裝置與量測

本實驗的目的，是藉由變化噴孔片上的孔徑，噴孔片的厚度，以及噴孔片表面的接觸角，來獲得不同的液體噴出狀況，所以本實驗在此先介紹實驗中所需要的儀器以及量測方法。

3-1-1 實驗儀器

於此我介紹在拍攝過程中，所會使用的設備儀器：

(1) 實驗中液滴影像擷取設備為 IDT 公司之高速 CCD 攝影機(X-stream

VISION) (圖 3-1)，此高速攝影機在解析度 512pixel × 512pixel 之下影像擷取速率範圍為每秒 30~5130 張畫面，內部記憶體大小為 4GB，在此解析度擷取畫面一次可擷取 16000 張圖片。將攝影機接至顯微鏡筒上，顯微鏡筒型號為 zoon-125(圖 3-2)，為 PTEM 公司所出產，放大被倍率為 0.57~6.5 倍，再加上 Mitutoyo 公司所出產的 5 倍放大顯微鏡頭(圖 3-3)，即成為一顯微攝影組。本實驗因為要拍攝的圖片屬於高頻率且微小的動作，所以拍攝張數定為 73500 張，並採用 7.5 倍放大倍率拍攝。

(2) 拍攝圖片用光源，使用 TECHNIQUIP 公司所出廠，型號為 FOI-250 的

250W 光源(圖 3-4)，因為若採用高頻率小範圍的拍攝狀態下，一般光源不能提供足夠的曝光量，所以使用此類強力型光源。

(3) 驅動壓電片的儀器，本實驗使用 GWINSTEK 公司的訊號產生器

GFG-8015G(圖 3-5)，此訊號產生器可以提供的電壓為 $\pm 12V$ ，頻率從 0~2M Hz，可輸出方波、三腳波與正旋波，此三種波型經測試後，以方波對於本壓電片的效果最佳，所以實驗也以方波作為輸入訊號。

3-1-2 實驗步驟

本實驗使用壓電片規格為 PEL24W18T07(長 24mm 寬 18mm 厚度:0.7mm)，壓電片的振動是利用加入電壓，令壓電材料產生型變，以方型壓電片而言，會產生振動的方向有三個方向，分別為長度振動、寬度振動以及厚度振動。為減少側向的振動，所以把噴孔片利用化學膠貼附在壓電片寬度較小的一面，因為在寬度較小，可以減少噴孔片被壓電片側向振動的影響。

把噴孔片運用黏膠方式，黏貼的於壓電片上方，重合的位置約 1mm，使最接近壓電片的噴孔可以不被覆蓋，又因為可以有足夠的空間粘合，不會讓噴孔片在振動中脫落(圖 3-6)。

把上面帶有噴孔片的壓電片固定在基座上，固定區域與可振動區域如圖(圖 3-7)，在壓電片的兩面接上訊號源，訊號源本實驗由訊號產生器提供，輸入的訊號頻率為 $63.3 \pm 0.8 \text{ KHz}$ ，訊號的 V_{p-p} 為 24V，訊號為 $\pm 12V$ ，噴孔片的振動示意圖如圖所示(圖 3-8)。

為了方便觀察，並減少重力對噴出液滴的影響，所以採用噴孔片向下噴出的方式，使用高速攝影機(CCD-camera)，橫向拍攝，拍攝所需的光源由攝影機的對面向攝影機照射，令攝影機、噴孔片的噴孔、光源在同一直線上，如圖所示(圖 3-9 與圖 3-10)。

在實驗時使用 D.I. Water 作為本實驗的流體，因為水具有高普遍性，而 D.I. Water 是將水去除雜質，達到近純水。於噴孔片上中間位置用微量滴管滴上 100 μ l 的 D.I. Water，液體在噴孔片表面處於開放空間中，不會有額外的力干擾；靜置約 5 分鐘，讓液滴可以進入噴孔之中，而非僅存在噴孔片的表面上，之後加入訊號源，再用 CCD Camera 做拍攝動作，得到影像後再用軟體 Image-J 做分析液滴的體積、速度以及斷裂時間。Image-J 是一個基於 java 的公共的圖像處理軟體，它是由 National Institutes of Health 開發的，能夠顯示、編輯、分析、處理、保存、列印 8 位、16 位元、32 位元的圖片。

之後再使用雷射都卜勒振動量測儀(Laser Doppler Vibrometer)(圖 3-11)做噴孔片表面震幅的量測，都卜勒振動量測儀的原理是利用雷射之都卜勒效應(Doppler Effect)來進行測量。都卜勒效應是兩個有相對運動的物體之間發出的頻率在互相觀測產生漂移變化的特性。雷射都卜勒振動量測儀即利用此原理，將雷射光照射在待測運動體上，反射回來的光波頻率會與原先入射的光波頻率產生差異，而此頻率的變化正比於運動體的速度。由於是非接觸式的量測技術且感測精度可以量測微小的位移及速度，因此特別適

合用於微系統的奈米尺度位移。

3-2 田口式品質工程分析

完全的實驗，即將各因素各水準的所有可能組合為實驗的處置，一一去作實驗，再比較那個處置較有效果。當然此種實驗可以找出最好的實驗處置，即生產條件，但實驗成本太大，且耗時費久。尤其考慮因素很多時，實驗規模太大而不可能完成。一般假如有 k 個因素，每個因素有 t_i 個水準 ($i=1,2,\dots,k$)，則完全的實驗就需要 $t_1 \times t_2 \times \dots \times t_k$ 次實驗。如共有 7 個因素各有 2 個水準，即七個變異量，每個變異量有兩個變數，共需 $2^7=128$ 次實驗，以實驗而言雖勉強可以執行，但實驗數量巨大，反而變的不可執行，所以利用直交表作實驗設計，除了實驗的統計效益外，可以有效減少實驗的次數，縮短實驗週期，節省人力、物力。尤其當考慮因素多時，其經濟效益更為顯著。

3-2-1 田口式品質工程技術架構

田口式實驗步驟

(1) 決定量測特性及計算特性

規劃實驗時必須依照其特性選擇適當量測特性集合適量測方法，因此必須判定為動態或靜態特性分析，動態特性分析為零點比例式、基準點比例式、一次式，靜態特性分析分為望大(Bigger the Better)、望小(Smaller the Better)、望目特性(Nominal the Best)[23]，並介紹其意義：

(一) 動態分析

(a) 零點比例式：特性值在信號因數(動態特性中與輸出會有線性關係的因數)

為零，其特性值亦為零之特性及此特性會通過原點，例如影印，射出成型等。

(b) 基準點比例式：特定值在信號因數為某一定值，其輸出為一特定值為其

理想，例如 PH 酸鹼計算。

(c) 一次式：特性值不一定會通過原點，但會和特性軸(y 軸)有一交點。例如

色彩調整鈕等。

(d)

(二) 靜態分析

(a) 望小特性：特性值越小越好的特性，例如表面粗糙、噪音等。

(b) 望大特性：特性值越大越好的特性，例如壽命、強度等。

(c) 望目特性：特定值有特定目標，越接近目標越好，例如尺寸，電阻等。

(2) 特性要因之決定

會影響到品質特性的東西(參數)通稱為因數，其因數在靜態分析分為兩類，即為控制因數(Control Factor)與誤差因數(Noise Factor)控制因數為影響品質特性的參數，也就是會影響實驗的參數，可以控制這參數來改變實驗的結果，能自由設定參數的數值，以期待對品質或是實驗有所改善者稱之，而誤差因數為製程外界影響產品品質特性或重覆量測的不同值，也就是變化控制因數後會得到的結果。

(3) 配置

利用直交表配置可分為內側、外側直交表，內側直交表唯控制因數，外側直交表為誤差因數，現挑選適合的直交表，依所屬表格操作並於與完成。

3-2-2 直交表

直交表是以拉丁方格的基本原理設計的多因素實驗配置法，目前已經出版許多適用於各種不同需求的制式直交表。以下說明直交表的結構，一個直交表以下面符號表示。

$L_n(t^k)$

L：拉丁方格(Latin Squares)的字頭。

n：直交表的列數，也就是實驗的處置數或是實驗的條件數。

k：直交表的行數，也就是實驗可考慮的因素個數。

t：直交表的行可考慮的水準數，也就是配置因素的水準數

拉丁方格(Latin Squares) 就是 A、B、C、D 四個拉丁字母配置在 4×4 的方格行列位置上，各字母在每行每列各只出現一次，稱為 4×4 的拉丁方格，如下圖(圖 3-12)所示，為不同大小的拉丁方格，是用來量測不同實驗尺度的表格。

將實驗放入可用的直交表後，運用直交表中所要求的參數做出指標性實驗，再按照自己的需求指定需要的結果指標，討論其目的是望大、望小還是望目，望大表示希望的結果越大越好，望小則反之，望目則是期望接

近的目標值。

3-2-3 田口式的實驗步驟

規劃實驗步驟，並利用儀器量測各種數據，而以田口式技術方法分析其最佳的操作條件，故需建立田口式品質工程技術架構以便分析其結果。

- (1) 決定量測特性及計算特性：本實驗欲觀察三個特性對液滴的影響，所以用靜態分析，而靜態分析又分為望大、望小、望目；在此分析的項目為4個，液滴速度為望大特性分析，液滴體積為望小特性分析，斷裂時間以望小特性分析，體積均勻度以望小特性分析，液珠速度以望大分析。
- (2) 特性要因決定及配置：運用田口式方法，將實驗區分為9個，並分別把三個因素的三個水準，放在不同的實驗組別中，本實驗的開始前，需先將要置入田口式的三個因素中各自的三個水準量測出來，所以先將每一個因素獨立出來作測試。首先先做噴孔直徑的測試，噴孔直徑的變化尺度為每次變化 $10\mu\text{m}$ ，使用壓電片帶動噴孔片振動，再用高速攝影機觀察是否有液滴自噴孔中噴出，在經過實驗觀測後發現在噴孔片表面未改質的情況下，也就是內表面的接觸角(Contact angle)呈現 74° 度時，在壓電片帶動噴孔片振動時，噴孔片可噴出液滴時噴孔的直徑，範圍為直徑 $30\mu\text{m}$ 到直徑 $110\mu\text{m}$ ，在此範圍外的噴孔直徑，噴孔片無法噴出液滴。接著在這噴孔直徑的範圍中，再加入表面接觸角的變化，表面接觸角的變化採用原本噴孔片的接觸角(74°)跟塗佈過鐵氟龍溶液的噴孔片的接觸角

(112°)以及經過 RIE 表面處理後噴孔片的接觸角(54°)。加入接觸角後再次觀測噴孔片噴孔的噴出情形，發現在表面疏水性的時候，也就是塗過鐵氟龍溶液的噴孔片，當噴孔孔徑小於 40 μm 的時候，因為表面疏水性的關係，液體因為表面張力的影響無法進入噴孔內部，使噴孔內部沒有液體可供噴出，所以本實驗最小的噴孔直徑就取用直徑 40 μm 以上；若是表面接觸角為 74°時，噴孔孔徑可噴出液滴的上限為 110 μm ，若是把噴孔直徑增加，繼續做噴出液滴的試驗，液體會因為表面界面能增加，讓液體都附著在噴孔內部，不能做噴出液滴，如圖所示(圖 3-13)。所以噴孔的界定範圍就定為 40 μm ~110 μm ，再把此範圍內取三個不同尺寸的直徑，分別為是直徑 44.7 \pm 1.8 μm 、77.4 \pm 2 μm 以及 104 \pm 2 μm ，不選用直徑剛好為 40 μm 是因為在電鑄製成中，不能很精確的控制鑄造後的噴孔直徑，所以採用最接近 40 μm 的噴孔直徑，噴孔直徑的上限不使用 110 μm ，也是同樣原因。表面接觸角取用的接觸角範圍為 112°、74°、54°，採用接觸角為 112°是因為此為 Teflon 溶液塗佈後表面的接觸角，表面接觸角為 74°是因為此接觸角是原本未改質噴孔片的接觸角，表面接觸角為 54°是用 RIE 乾式蝕刻處理後呈現的接觸角，厚度採用 25 \pm 2 μm 、36.5 \pm 1.3 μm 以及 46 \pm 2 μm ，是因為工研院的期刊中表示噴孔片厚度為 30 μm 時液滴噴出效果最佳，所以從 30 μm 的範圍再向上與向下增加厚度 10 μm ，取 20 μm 、30 μm 、40 μm 為水準，不選用噴孔片厚度剛好為 20 μm 是因為在電鑄製成中，不能很精確的控制鑄造後的噴孔片厚度，所以採用最接近

20 μm 的厚度，選用其它兩種厚度的理由同上。將因素整理為一表格，如表所示(表 3-1)，並整理出田口式直交表(表 3-2)。

3-2-4 利用田口式品質工程技術分析方法

實驗完成而輸入資料後，將直交表所得結果加以分析，使本實驗能得到較佳的 NO_x 特性，在進一步分析所對應的參數組合，尋找較好的操作條件，並以此參數組合操作，觀察其因素對於液滴顯現的狀態的影響。

信號雜音比(Signal to Noise Ratio)係用來衡量產品品質的一種統計量度簡稱 S/N 比，它可以表示製程或產品的水準及其誤差因素影響程度，用 S/N 比找出其影響變異的因素對產品影響的大小，並判別出影響較大的因素 [19]，其計算方法為表 3-3(表 3-3)而一般以分貝表示及依不同特性類別來考慮。傳統分析與 S/N 比分析的比較，傳統分析可以求出控制因數與誤差因素之主要效果，但會受到下列的限制條件：只能在變異一樣的狀況下比較，誤差要有常態分配以及會受到交互作用的影響。而 S/N 比則是著眼再平均值與異變數上，把交互作用視為誤差，可以觀察控制因素與誤差因素間有無交互作用的指標，並可以較容易的導出結論，但其缺點為不能定量化。

第四章 結果與討論

壓電片的振動頻率因為壓電片本體在出廠就有振動頻率的誤差，而在振動頻率中，本型號的壓電片有兩個已知的振動頻率，分別為 $63\pm 3\text{kHz}$ 以及 $95\pm 5\text{kHz}$ ，再測試過的振動後的結果發現在振動頻率為 $63\pm 3\text{kHz}$ 時，壓電片可出現最大振動的幅度，所以便以此頻率為實驗的主要振動頻率；接著實驗中再使用訊號產生器將輸出訊號微調，把所有實驗的輸入訊號調至約 $63.3\text{kHz} \pm 0.8\text{kHz}$ 的範圍內，控制頻率的變化是為了盡量減少因為頻率的變化而出現的影響。

實驗中用田口式直交表做三個因素(factor)的分析，每個因素(factor)再分別分出三個水準(levels)，做交叉比對，把外直交表計算完成，然後計算 S/N 比回應值。而外直交表，也就是藉由攝影機觀察後所得到的值，分為四個部份，內部包含液滴體積、斷裂時間、液滴均勻度以及液滴飛行速度；對於液滴速度，本實驗想要跟市面上所販售噴墨頭的期望目標相接近，也就是液滴體積同以噴墨頭的目標為目標，液滴體積越小越好，所以液滴體積以望小為目標；斷裂時間亦如液滴體積的目標相同，所以斷裂時間以望小為目標，而液滴均勻度為使用液滴之間的偏差值，偏差值越小越佳，所以液滴均勻度亦以望小為目標，液滴飛行越快越好，所以速度以望大為目標。

先將直交表內所包含的 9 個實驗列完成，完成過程中發現實驗中厚度在 $46\pm 2\mu\text{m}$ 的範圍，噴孔直徑在 $104\pm 2\mu\text{m}$ 的範圍，其液面接觸角為親水性

的 74 度時，該範圍的噴孔片無法做出噴出液滴的動作，但因為直交表需要有完整的 9 個實驗數據，不可以有任一組實驗數據為零，若是出現一組數據為零，就無法進行後續的分析過程，所以採用補一個噴孔直徑與噴孔片厚度與實驗 Case9 中噴孔的尺寸相近，而表面接觸角與實驗 Case9 相同的噴孔，把實驗 9.1 當做實驗 9 的替代品，讓其可觀測的實驗補足 9 個，以便後面 S/N 比回應值的處理與分析；攝影機拍攝出的圖片放置於圖 4-1 至圖 4-10(圖 4-1 至圖 4-10)，拍攝圖片的擷取，取液滴噴出後 0.2 秒的狀態，濾除前面的照片是因為初期液滴噴出會呈現液滴堆疊的狀況，取 0.2 秒後的噴出狀況會比較完善。攝影機拍攝完成後，運用 Image-J 軟體，此軟體可以算出攝影機拍攝出的照片中液滴的直徑、移動距離等，跟著計算液滴均勻度，之後再計算斷裂時間。



利用田口式方法操作，調整不同參數與自由度時記錄各種不同的狀態，經過實驗與量測後，完成表 4-1(表 4-1)，再運用都卜勒雷射儀量測噴孔片的振幅圖片與振動速度的圖片收錄至附錄(附錄 1)，而振動速度的定義為最大振動速度，將圖片中的數值置於表 4-2(表 4-2)中，運用田口式品質方法(表 3-3)分析各個水準的變化後，完成 NO_x S/N 比回應表，以及 NO_x S/N 比回應圖。

而表格中皆使用 A、B、C 為代號，A1、A2、A3 表示為直徑，分別為 44.7±1.8μm、77.4±2μm、104±2μm；B1、B2、B3 表示為厚度，分別為 25±2μm、36.5±1.3μm、46±2μm；C1、C2、C3 表示為接觸角，分別為 112 度、74 度、

54 度。

4-1 田口式實驗分析

4-1-1 田口式實驗方法對體積的分析

對於液滴體積作觀察，在實驗中發現部分實驗 Case 會出現連續噴出的前後兩顆液滴會產生追撞現象，也就是後面的液滴速度較快，碰撞到前面的液滴，之後兩個碰撞後的液滴會出現兩顆液滴合併成一顆大顆液滴的情況，尤其以實驗 Case1、2、4、5、7 可明顯看出，其中又以實驗 Case4、5、7 出現大顆液滴與小顆液滴為交錯出現。本實驗在使用軟體 Image-J 以及顯微鏡(OM)的觀察下，依照噴出液滴的型態區分為三類，第一種是只噴出液滴直徑比噴孔直徑大的液滴，液滴直徑與噴孔直徑的比值為 1.25，第二種是分別會噴出直徑比噴孔直徑大的液滴以及液滴直徑比噴孔直徑小的液滴，較大液滴的直徑與噴孔直徑的比值為 1.15~1.30，第三種是噴出液滴的直徑小於噴孔直徑，液滴直徑與噴孔直徑兩者的比值小於 0.84。第一種的液滴狀態在實驗 Case1 以及 Case2 中可見到，第二種液滴狀態在實驗 Case4 與 Case5 以及 Case7 中可見到，第三種液滴狀態可在實驗 Case3、Case6、Case8 以及 Case9.1 中可見到，而在實驗中記錄的方式是使用若有出現兩種不同大小的液滴體積，就用兩個數值做記錄，並在實驗記錄下分別用大液滴與小液滴來做區分，並分別做記錄。而 Case1 以及 Case2 的液滴自噴孔噴出後斷裂時就觀察到兩顆液滴因為前液滴速度較慢，後端液滴速度較快，

在液滴還是存在於液柱中，尚未與液柱分離的時候，就已經發生前後液滴撞擊之後合併的情形，噴出的液滴在使用 Image-J 軟體以及顯微鏡(OM)兩者的觀察下發現，兩個實驗 Case 中噴出的液滴直徑都比噴孔的直徑為大，其比值為 1.25 : 1，所以在此紀錄為大液滴。對於噴出後的液珠會產生小液滴與大液滴這種狀況，本實驗觀察振幅與比對每一個 Case 之後，發現於較薄的噴孔片比較容易同時出現兩種頻率，兩種頻率又會分別帶出兩個振幅，一個為訊號產生器輸入訊號時出現的振幅，如訊號產生器輸入頻率為 64kHz，則在噴孔片上量測到也為 64kHz，但在厚度較薄的噴孔片上，厚度為 20~30 μm 時，會量測到第二個頻率(圖 4-11)，其值大約為輸入訊號的一半，稱為倍頻，約為 32kHz，所以實驗中認為噴出液滴會被此頻率影響，讓噴出液滴不均勻，出現大液滴與小液滴的狀況。且經過實驗觀測後，此倍頻頻率的干擾會讓噴孔噴出比噴孔直徑要大的液滴，因為本實驗觀察實驗 Case1 以及 Case2，發現在這兩個 Case 的振幅中，倍頻震幅(31.3kHz)遠比原本的振幅(63kHz)為大，而噴出的液滴的直徑也比噴孔的直徑大，噴出的液珠直徑與噴孔直徑的比值為 1.15~1.30，所以推測因為倍頻振幅的干擾會使噴出的液滴變大，而實驗 Case4、Case5、Case7 中因為原本的頻率(63.5kHz)與倍頻(31kHz)的頻率兩者的振幅相近，所以出現噴出的液滴呈現不穩定輸出，出現噴出大顆液滴與小顆液滴的狀況。

接著討論液滴體積的 S/N 比回應值，此指標為觀察整體數值好壞的依據，對於體積的 S/N 比回應值，在此 S/N 比採用望小為目標，就是越接近 0

值，表示噴出的液滴越小，本實驗先看孔徑對於體積的影響(表 4-3 至表 4-6)(圖 4-12)，在此圖中可以看出，孔徑越小，噴出液珠的體積也就越小，且沒有出現液珠體積不穩定的狀況，而 S/N 比的最大與最小值的差值為 12.01，可知其孔徑越小，液珠體積的 S/N 比也就越接近 0，其噴出的液珠體積也就越小，原因是因為噴孔直徑小，可噴出的液滴直徑也就相對減小，液體的體積自然也就變小。接著本實驗觀察噴孔片厚度對於體積的影響(圖 4-13)，在圖中可以看到噴孔片的厚度越厚，S/N 比回應值會越高，表示液滴的體積越小，而 S/N 比值的最高與最低之間的差為 15.6。最後對於液滴體積的觀察，本實驗查看接觸角對於噴出液滴體積的影響(圖 4-14)，發現表面接觸角為疏水性(C1)時，液滴比較可以達到望小的目標，其原因是液體與固體作用力變小，讓噴出液滴的速度上升，噴出液體的液柱直徑變小，因為液柱的直徑變小，所以斷裂後液滴的體積也就變小，但在圖中卻發現在親水性為 74 度(C2)時 S/N 比為最低，而親水性為 54 度(C3)時的 S/N 比值比親水性為 74 度(C3)高，推測應該是因為噴孔片震幅的影響，見圖(圖 4-15)，兩個振幅在接觸角為 74 度(C2)的實驗 Case 上量到的比值差距為最大，值為 1483nm，因為差值大，所以噴出液滴的體積不穩定，影響了接觸角為 74~75 度(C2)時的 S/N 比值。S/N 比值的資料來看，發現對於液體體積的影響，以噴孔片厚度為大，噴孔片直徑次之，再來才是表面接觸角。三因素對液滴體積的影響，換算成百分比時如圖所示(圖 4-16 與圖 4-17)。

4-1-2 田口式實驗方法對斷裂時間的分析

再者本實驗觀察這三個因素對於斷裂時間的影響(表 4-7 至表 4-8)，首先觀察孔徑對斷裂時間的 S/N 比(圖 4-18)，這裡可以看到整體圖形呈現一個線性，以孔徑 A1 所呈現的值最為接近 0，推斷因為對斷裂時間而言，噴孔直徑小表示每次噴出的液滴直徑便小，其液柱的直徑也就相對較小，會使液滴較快脫離液柱，呈現斷裂狀態，而噴孔直徑對於斷裂時間的 S/N 比差值為 4.9。而厚度與斷裂時間的關係，由相關的 S/N 比回應圖可以看出(圖 4-19)在此範圍內，噴孔片的厚度越厚，液滴脫離液柱的斷裂時間越短，其 S/N 比的差質為 8，個人認為因該與振幅相關，因為在比較厚的噴孔片上所量測到的振幅，不管是頻率 63kHz 或是頻率 31.3kHz 的振幅(圖 4-20)，在厚度為 B3，又可噴出液滴的狀況下，兩者的振幅都偏小，所以斷裂時間會減短，當震幅大時，液體脫離噴孔表面時所呈現的液柱會越長，斷裂時間也就相對變長。而液面接觸角對於斷裂時間的影響(圖 4-21)，S/N 比最高與最低的差值為 2.8，而接觸角 70 度與 50 度之間的差值為 0.4，S/N 比的差值因為相近，所以這裡本實驗推斷是否是因為親水性處理的關係，親水性處理在本實驗中採用的方法是 RIE 乾式蝕刻，RIE 乾式蝕刻是由正上方向下打出氧氣粒子撞擊噴孔片，令表面光滑，達到親水的狀態，但因為噴孔內部屬於接近垂直的角度，因此 RIE 可能無法將噴孔的內部完全改質，所以雖然表面接觸角為 54~55 度(C3)，但噴孔內部接觸角可能不為 50 度，或者是因為接觸角 74~75 度(C2)與接觸角 54~55 度(C3)兩者的接觸角的差異不大，

兩者同為親水性，且接觸角只相差為 20 度，所以出現此現象屬於正常範圍。以此三個因素對液體斷裂時間的影響做分析，以噴孔片厚度為大，噴孔直徑次之，表面接觸角的影響再次之。三因素對液滴斷裂時間的影響，換算成百分比時如圖所示(圖 4-22)。

4-1-3 田口式實驗方法對液滴均勻性的分析

再下來本實驗探討三因素對於液滴均勻度的影響(表 4-9 至表 4-10)，在實驗中均勻度的演算法為

$$\text{均勻度} = \frac{\sum_i^N |p_i - \bar{p}|}{N} \dots\dots\dots(4-1)$$

p_i 代表每一顆液滴的體積， \bar{p} 代表液滴的平均體積，而 N 表個數，計算方式參考文獻[24]，實驗中的 N 為 100，也就是總共量測的液滴數目為 100 顆，用此均勻度計算方式是因為算式中 $|p_i - \bar{p}|$ 為參數變異量，變異量加總後再除以加總的個數，就是平均變異量，實驗中又把此當作均勻度。均勻度的數值希望越小越好，數值越小也就表示液滴越均勻，所以本值應也可以叫做不均勻度。Case 4、5、7 的均勻度參數本應有三個，分別為小顆液珠的均勻度，大顆液珠的均勻度以及總和液珠的均勻度，但因為探討均勻度需討論在單一實驗 Case 中全部液滴的均勻度，所以計算均勻度採用全部的液滴做計算，不分大液滴還是小液滴。先觀察孔徑與液滴均勻度的 S/N 比關係圖(圖 4-23)，可發現噴孔直徑的 S/N 比中出現 $44.7 \pm 1.8 \mu\text{m}$ (A1) 最高， $77.4 \pm 2 \mu\text{m}$ (A2) 次之， $104 \pm 2 \mu\text{m}$ (A3) 最低的狀況，噴孔的條件為 $44.7 \pm 1.8 \mu\text{m}$

(A1)時，S/N 比最高，表示在條件為 $44.7\pm 1.8\mu\text{m}$ (A1)時期均勻度最佳。噴孔的條件為 $77.4\pm 2\mu\text{m}$ (A2)時，S/N 比為最低，應是因為在此一範圍中的噴孔，受到兩個振幅的影響，出現不同大小的液滴，所以不均勻度比其他兩種孔徑的噴孔要高，其差值為 6.61。而噴孔片厚度對於均勻度的影響(圖 4-24)，可以見到厚度越厚，均勻度也就越高，因為噴孔片比較厚的時候，兩個頻率所產生的振幅都會降低，比較不會出現互相干擾的狀況。而接觸角對於均勻度的影響(圖 4-25)，發現表面接觸角 110 度時，均勻度越高，S/N 比的差值比為 6.32，表面接觸角越高，對液珠的均勻度也就越高，這是因為表面能減低，液體通過噴孔的速度會上升，讓液滴不會因為速度的減緩，造成液體的撞擊出現大液滴，造成液滴的不均勻。三個因素對於液滴的均勻度而言，影響力的大小分別是噴孔的直徑，其次為噴孔片的厚度，最後才為內表面的接觸角。三因素對液滴均勻度的影響，換算成百分比時如圖所示(圖 4-26)。

4-1-4 田口式實驗方法對液滴飛行速度的分析

最後本實驗檢視三個因素對速度的影響(表 4-11 至表 4-14)，在本實驗中，液滴的飛行速度，採用與市售噴墨頭的相同期望目標，以望大為目標，期望液滴飛行速度越快越佳；本實驗先觀察直徑對於液滴飛行速度的 S/N 比回應圖(圖 4-27)，圖中最高值與最低值的差值為 3.6。三個不同孔徑中，仍以 $44.7\pm 1.8\mu\text{m}$ (A1)可得到較高的速度，而孔徑 $77.4\pm 2\mu\text{m}$ (A2)與 $104\pm 2\mu\text{m}$

(A3)的點上的兩條線的距離漸遠，原因應該是因為若噴孔孔徑變大，讓兩個頻率所產生的振幅互相干擾的便會影響越明顯，會出現大液滴與小液滴兩者，而兩者的速度不一致，導致出現圖中的現象，且 $77.4\pm 2\mu\text{m}$ (A2)在小顆液滴的速度的 S/N 比上，出現比兩旁為低的數值，因該是因為在此集團 (Case4、Case5、Case6)的 Case4 以及 Case5 中，小顆液滴在振幅互相干擾的狀況下，導致速度不能提升，S/N 比的圖形也就不為線性。接著觀察噴孔片厚度對液滴飛行速度的關係(圖 4-28)，發現以厚度 B3 時速度比其餘兩者為高，所以厚度 B3 在此三點中為最佳，最大差值為 3.6，而 S/N 比在厚度為 B2($36.3\pm 1.3\mu\text{m}$)為最低點，是因為 Case4 與 Case8 的關係(表 4-2)，Case4 因為兩不同振幅間的互相干擾，液滴以不穩定的狀態下噴出，液滴的飛行速度也就無法提升，而 Case8 因為震幅小，所以速度低，兩個實驗 Case 的速度都低，所以讓 B2 的噴出速度無法提高。之後本實驗觀察接觸角對於速度的影響(圖 4-29)，先計算其 S/N 比的差值，發現圖中最高與最低的差值為 1.6，所以接觸角若為疏水性，可以略為提升液滴飛行的速度，其原因也是因為液體與噴孔表面的表面能降低，讓液體不會沾附在噴孔表面，噴出速度也就上升，屬於親水性(C2、C3)的兩點，可能因為受到兩個不同頻率的振幅影響，比較液滴的噴出呈現不穩定狀態，速度也因為不穩定的影響，而讓速度減慢，而這三個因素中，以厚度對速度的影響最大，為其他兩者的 1 倍。三因素對液滴飛行速度的影響，換算成百分比時如圖所示(圖 4-30 與圖 4-31)。

4-2 頻率變化實驗

完成先前的實驗後，再將壓電片的振動頻率調整到 $95\pm 5\text{kHz}$ ，這個振動頻率是此型號壓電片的第二個振動的頻率，使用此振動頻率是想藉由頻率的變化，觀察因為頻率變化而產生的液滴變化，在這實驗中輸入訊號以其電壓為 $\pm 12\text{V}$ ，波形同樣為方波。用這個訊號來驅動壓電片，把實驗中所有的實驗 Case 再做一次，但實驗進行過程中卻出現所有實驗 Case 都沒有出現液滴噴出的狀況，這表示因為壓電片提供的壓力不足以讓液滴脫離噴孔，所以便以改變壓電片固定的位置來增加振幅，就是將固定壓電片的位置由原本的 10mm 減少為 5mm ，讓壓電片因為固定的位置減少(圖 3-7)，可振動的範圍增加，振幅可以因為整體的可振動長度增加，但發現經過調整壓電片的固定位置後只有實驗 Case3 可會噴出液滴，所以只觀察在兩個不同頻率下，實驗 Case3 因為頻率的變化而產生的液滴變化，實驗 Case3 在工作頻率為 96kHz 時，液滴飛行動作如圖所示(圖 4-32)。用實驗 Case3 分別在工作頻率為 64kHz 與以及工作頻率為 96kHz ，所觀察到的液滴變化紀錄於表中(表 4-15)，運用督卜勒雷射儀量測在 96kHz 時的振動狀況，於圖 4-33 及圖 4-34 所示，頻率在 96kHz 時量測到的振幅比在頻率為 64kHz 量測到的震幅為小，約為頻率在 64kHz 時振幅的 0.25 倍，噴孔片的振動速度為 0.67 倍，因為此類型的壓電片在 $63\pm 3\text{kHz}$ 時可達此種噴孔片黏貼型態下的最大震幅，在 96kHz 時雖然也可以振動，但振動幅度仍比頻率在 64kHz 時為低，

所以在頻率為 96kHz 的狀態下的液滴飛行速度，也比 64kHz 時的液珠飛行速度為慢。雖然在 96kHz 時的液珠飛行速度較慢，但斷裂時間基本上為相同，平均僅相差約 1.37us，在連續式的液滴噴出裝置，噴出液滴的斷裂時間與頻率變化的關係不大；接著分析兩者液滴體積的變化情形，發現在頻率 96kHz 的狀態下，直徑變化為原本在頻率為 64kHz 時，液珠直徑的 2~2.5 倍，在此判斷可能是因為震幅比較小，且速度比較慢，而產生液體噴出後不會馬上斷裂，而是兩次振動所擠出的液滴合併為一顆，之後才斷裂，所以才會出現體積較大的情況。

4-3 無因次參數分析

無因次參數分析中，分別探討 Re(Reynolds number)、We(Weber number)、Ca(capillary number)，以此觀察在液滴噴射過程中，表面張力，慣性力，黏滯力，與毛細作用力的交互影響與液滴噴射行為，將實驗中得到的數據經或過換算後得到的 Re 數、We 數以及 Ca 數，記錄在表中(表 4-16)。

Re 數(Reynolds number)為慣性力與黏滯力的比值，數值越高表示慣性力越大，方程式為

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu} \dots\dots\dots (4-2)$$

ρ 為流體密度(kg/m³)，U 為噴出流滴的速度(m/s)，D 為特徵長度(m)，在本實驗中採用噴孔直徑當作特徵長度，因為觀察文獻中，都是使用噴孔直徑做當作特徵長度，所以本實驗也採用這種方式， μ 為流體之黏滯係數(kg/m·s)，

將表4-16中的Re數與三因數間的關係，畫成圖(圖4-35)可看出，Re數在噴孔直徑的變化下改變最大，Re數由270變化到540，因為孔徑變大讓一個振動週期時噴出的液體量變多，噴出的液滴體積變大，所以液滴的重量上升，慣性力也隨之上升。在厚度為B2的時候Re數數值低是因為實驗Case4與Case8的關係，Case4因為兩不同振幅間的互相干擾，液滴以不穩定的狀態下噴出，液滴的飛行速度低，所以慣性力小，Re數也就較小，而Case8因為震幅小，所以速度低，兩個實驗Case的液滴飛行速度都低，所以讓厚度為B2的Re值低。表面接觸角對Re數的影響沒有噴孔直徑來得大，是三者中影響力最低的。實驗中的Re數都大於0，所以實驗中是以慣性力為驅動液滴飛行的主要作用力。



We數(Weber number)為慣性力與表面張力的比值，數值越高表示慣性力越大，方程式為

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\sigma} \dots\dots\dots (4-3)$$

ρ 為流體密度(kg/m³)，U 為噴出液滴的速度(m/s)，D 為特徵長度(m)，在本實驗中採用噴孔直徑當作特徵長度， σ 為表面張力(kg/s²)，將表 4-16 中的 We 數與三因數間的關係，畫成圖(圖 4-36)可看出，We 數在噴孔片的厚度變化下改變最大，因為厚度為 B3 時速度最快，速度增加會使慣性力增加而讓 We 數上升。在厚度為 B2 的時候 We 數數值低的原因同樣是因為實驗 Case4 與 Case8 的關係，兩個實驗 Case 中的液滴飛行速度都較慢，所以讓厚度為 B2 的 We 數低。觀察 We 數可以看出當噴孔孔徑越大，這時慣性力

的作用也就越大。而表面接觸角越低時，慣性力的影響也就越低。觀察 We 數可以看出，We 數都大於零，所以慣性力是實驗中驅動液滴飛行的主要作用力。

Ca 數(capillary number)為毛細管數，為韋伯數(We)與雷諾數(Re)的比值，也就是黏滯力與表面張力的比值，數值越高，表示黏滯力越強，方程式為

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \dots\dots\dots(4-4)$$

μ 為流體之黏滯係數(kg/m · s)，U 為噴出流滴的速度(m/s)， σ 為表面張力(kg/s²)，將表 4-16 中的 Ca 數與三因數間的關係，畫成圖(圖 4-37)後可看出黏滯力的影響遠比表面張力小，實驗中會對 Ca 數有產生變化的為液滴飛行速度，所以途中所顯示的趨勢與三因數對速度的 S/N 比圖的整體趨勢相同(圖 4-27、圖 4-28、圖 4-29)。

表面張力，慣性力，黏滯力，與毛細作用力間的交互作用，可以看出在實驗中主要是以慣性力為主要作用力，表面張力與黏滯力對實驗 Case 雖然有影響，但影響沒有慣性力大，毛細作用力的影響在實驗中不明顯，是因為實驗中的流體採用 D.I. Water，水的黏滯係數極低，表面張力高，液體噴出的飛行速度又不高，所以毛細作用力在實驗中極小。

4-4 倍頻原因與影響

在實驗中液珠出現大液珠與小液珠交錯出現，其判斷原因可能為兩個

振幅的互相影響，就振動量測儀器上所量測到的圖形而言，在實驗 Case1、Case2、Case4、Case5 以及 Case7 中，倍頻(31kHz)的震幅比原本頻率(63kHz)的振幅大，倍頻的振幅越高噴出直徑比噴孔直徑大的液滴次數越多。

噴孔片上可以觀測到兩個頻率，分別是原本輸入額定訊號時所產生與訊號相同的頻率，另一個是頻率為輸入訊號的一半，稱為倍頻頻率，倍頻出現的原因，可能是因為壓電阻抗的變化。對壓電材料輸入不同頻率的訊號時，壓電材料會因為輸入訊號的不同，出現不同的阻抗值，其阻抗稱為壓電阻抗，當輸入訊號所產生的壓電阻抗，與其它頻率的壓電阻抗值相同時，具有相同壓電阻抗的頻率就會因為加入的訊號同時震動，如輸入訊號頻率為 100Hz 時其壓電阻抗為 10Ω ，而輸入訊號頻率為 50Hz 時壓電阻抗也為 10Ω ，當輸入的訊號頻率為 100Hz 時，頻率為 100Hz 時的對應振幅就會出現，而頻率為 50Hz 時對應的振幅也因為壓電阻抗相同，頻率以及對應的振幅也出現在噴孔片上，並可以被量測儀器量測到。倍頻振幅有原本的頻率所對應的振幅，因為只有一個頻率影響壓電片，所以噴出的液滴呈現穩定飛行，噴出的液滴與前後相鄰的液滴距離相同，因為倍頻的影響，讓壓電片上出現兩個震幅同時驅動噴孔片，使液滴的噴出不穩定，倍頻振幅會讓噴出液滴的速度不穩定，倍頻振幅的提高會讓在震幅高時噴出的液滴速度較快，撞擊前面的液滴，出現兩顆液滴因為噴撞而合併，成為大液滴的現象。倍頻振幅在不同的壓電片，會有不同的振動幅度，原因可能是因為每片壓電片材料結構上的的差異，才產生不同的倍頻振幅，且觀察圖

4-20(圖 4-20)發現，倍頻振幅會有因為噴孔片厚度降低，而倍頻振幅降低的趨勢，所以推測倍頻振幅可能也跟噴孔片厚度有關係。

想要減少倍頻的出現，在觀察中發現兩個方法，第一個方法是避開這個頻率範圍，前面提過，倍頻出現的原因是因為壓電阻抗相同，所以避開壓電阻抗相同的地方，讓壓電阻抗不相同，倍頻自然會消失。第二個方法是增加噴孔片的整體厚度，因為觀察圖 4-20(圖 4-20)發現，整體的趨勢是當噴孔片的厚度越厚，倍頻的振幅也就越小，所以增加噴孔片的厚度，應該可以改善倍頻振幅的影響。



第五章 結論與未來展望

5-1 結論

實驗中我們利用田口式直交表將實驗的數據完成分析，並以噴墨頭的期望目標值為標準，如液滴體積期望微小化，液滴斷裂時間期望縮短，不均勻度期望越小越好，而速度則為越大越好，以此為目標，計算出 S/N 比回應值後，在對 S/N 比回應值給予分析，可以得到下列幾點結論：

1. 孔徑的縮小可以讓整體的 S/N 比上升至預計的目標，因為孔徑小表示一次噴出的液量減少，使得液柱的直徑跟著變小，斷裂時間因為液柱的直徑縮小，時間自然縮短。且噴出的液滴在較大孔徑，出現液滴不均勻性比較明顯，是因為倍頻的影響在大孔徑的時候比較明顯。
2. 噴孔片厚度的上升可以讓整體的 S/N 比值接近預計的目標，因為噴孔片厚度的上升，可以讓噴孔片的振幅下降，讓噴出的液柱縮短，進而降低斷裂時間，縮小液滴體積，增加液滴均勻度。
3. 噴孔表面的接觸角越為疏水性，會越接近期望目標值，表面張力在疏水表面，合力與慣性力方向相同[圖 5-1]，因此會使得速度提高，液柱直徑縮短而容易斷裂，液體體積所小，液滴均勻度也就跟著上升。
4. 振幅會對液滴的體積產生影響，見圖 4-31，可以見到兩個頻率在同一個實驗 Case 時產生的影響，實驗 Case1 與 Case2 時，頻率 31.3kHz 比頻率 63kHz 的振幅為大，所以噴出液滴的直徑便比孔徑為大，實驗 Case4、Case5 以及 Case7 時，頻率 63kHz 與頻率 31.3kHz 兩者間的振幅差距不

大，便會出現大液滴與小液滴的狀況，實驗 Case3、Case6、Case8、Case9 時，頻率以 63kHz 為主，所以液滴直徑比噴孔孔徑為小。

實驗中液珠出現大液珠與小液珠交錯出現，其判斷原因可能為兩個振幅的互相影響，就振動量測儀器上所量測到的圖形而言，倍頻(31kHz)會令噴孔噴出比噴孔大的液滴，倍頻的振幅越高噴出大液滴的次數越多，反之倍頻的振幅越低則噴出的液滴直徑會小於噴孔的直徑。若是想要改善倍頻地影響，可以把加在壓電片上的頻率做變化，避開會發生倍頻的頻率範圍，會是增加噴孔片厚度，也可以達到減少倍頻的影響。



5-2 未來展望

在實驗的過程中，分別探討了噴孔片的噴孔直徑，噴孔片的厚度以及內表面的接觸角經過變化後，液滴噴出的變化情形，並藉由此三個因素經過變化後得到的整體趨勢，但實驗中出現倍頻現象，並未對倍頻現象做深入的討論，或是變化不同的噴孔片材質，觀察對噴出液體行為的變化，這些種種的問題都是未來值得去探討的。



參考文獻

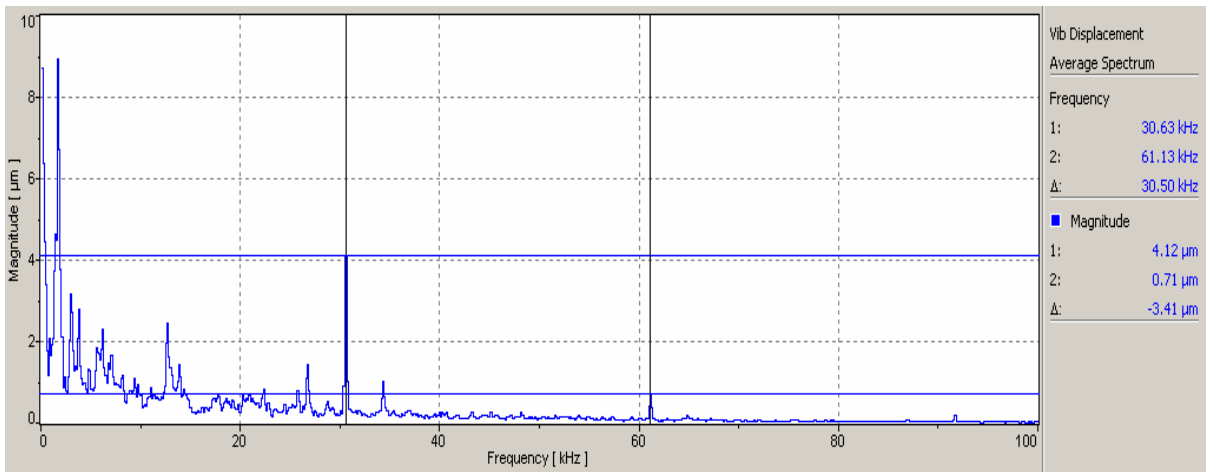
- 【1】 I. Endo, Y. Sato, S. Satio, T. Nakagiri, S. Ohno, and Canon, Inc., “Bubble Jet Recording Method and Apparatus in Which a Heating Element Generates Bubbles in Multiple Liquid Flow Paths to Project Droplets”, U.S. Pat. 4 740 796, 1988.
- 【2】 B.J. Keefe, M.F. Ho, K.J. Courian, S.W. Steinfield, W.D. Chiders, E.R. Tappor, K. E. Trucba, T.I. Chapman, W.R. Knight, J.G. Mortz, and Hewlett-Packard Company, “Inkjet Printhead Architecture for High Speed and High Resolution Printing”, U.S. Pat. 5 648 805, 1994.
- 【3】 F.G Tseng, C. Linder, C.J Kim, and C.M Ho, “Control of Mixing with Micro-Injectors for Combustion Application”, in Proc. MEMS, ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 59, DSC, Atlanta, GA, Nov. 1996, pp.183-187.
- 【4】 M. Fahndrich, B. Hochwind, and A. Zollner, “Fluid Dynamics in Micro Dosing Actuators”, in Tech. Dig. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95) Stockholm, Sweden, June 1995, pp.295-298
- 【5】 H. Le, “Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology”, Journal of Imaging Science and Technology, Vol.42, No.1, January/February, 1998, p49~p62.
- 【6】 S. Kamisuki, M. Fujii, T. Takekoshi, C. Tezuka and M. Atobe, “A high Resolution, Electrostatically-Driven Commercial Inkjet Head”, The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Jan. 23-27, 2000, p793~p798.
- 【7】 P. Curie, J. Curie, Bull. Soc. Min. de France, 3, 1880, p90.
- 【8】 W. G. Hankel, Abh. Sachs, 12, 1881, p457.
- 【9】 W. G. Hankel, Ber. Sachs, 33, 1881, p52.

- 【10】 S. Kamisuki, M.Fujii, T. Takekoshi, C. Tezuka and M.Atobe, “A high Resolution, Electrostatically-Driven Commercial Inkjet Head”, The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Jan. 23-27, 2000, p793~p798.
- 【11】 A. Langevin, “Utilisation de l’ effect Piezoelectique, Presses Unicersitaires de France”, Paris, 1942
- 【12】 W. G. Cady, "The Piezoelectric Resonator", Phys. Rev., 17, 1921, p531.
- 【13】 H. C. Lee, “Drop Formation in a Liquid Jet”, IBM J. Res. Develop, July 1974, p364~p369
- 【14】 W. T. Pimbley, “Drop Formation from a Liquid Jet: A Linear One-Dimensional Analysis Considered as a Boundary Value Problem”, IBM J. Res. Develop, March 1976, p148 ~p156.
- 【15】 C. A. Burce. “Dependence of Ink Jet Dynamics on Fluid Characteristics”, IBM J. Res. Develop, May 1976, p258~p270.
- 【16】 W. T. Pimbley, H. C. Lee, “Satellite Droplet Formation in a Liquid Jet”, IBM J. Res., Develop, January 1977, p21~p30.
- 【17】 J. E. Fromm, “Numerical Calculation of the Fluid Dymanics of Drop-on-Demand Jet” IBM J.Res. Develop, Vol. 28, no. 3, May 1984, p322~p333.
- 【18】 P McGuinness, W Drenckhan and D Weaire, “The optimal tap: three-dimensional nozzle design”, 2005, p3382~p3386
- 【19】 T. Lindemann , H. Ashauer , T.Goettsche , H. Sandmaier , “Bubble jet printhead with integrated polyimide nozzle plate”, Micro Electro Mechanical Systems, 18th, 2005, p560~p563.
- 【20】 吳朗著, 電子陶瓷：壓電陶瓷, 全欣資訊圖書股份有限公司, 台北, 民國八十三年

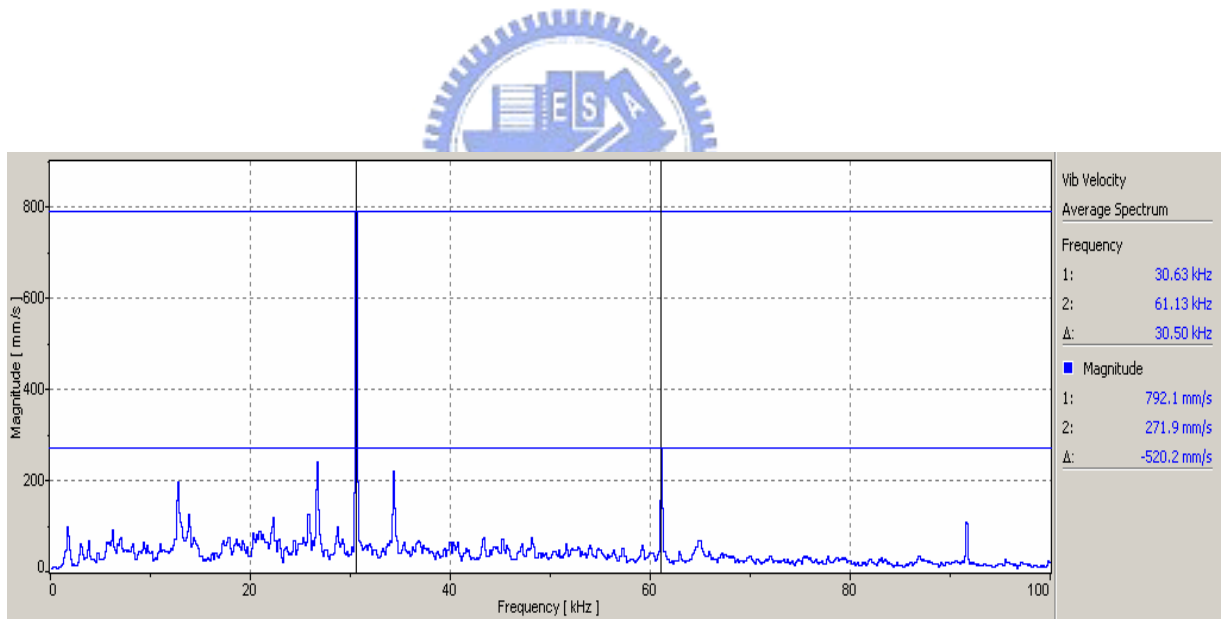
- 【21】 吳鉉忠,“壓電式微液滴噴射數學模擬系統之開發與實驗研究”, 國立成功大學材料科學及工業工程學系博士論文, 2004
- 【22】 周敏傑等人,“微結構之合金電鑄技術”, 機械工業雜誌, 八月, 150 (1998)
- 【23】 (日)田口玄一著, 田口式品質工程導論, 張季娜等譯, 中華民國品質管制學會, 台北, 民國七十八年
- 【24】 傅林, 董文楚, 鄭耀泉, 微觀工程技術指南 2, 北京: 水利電力出版社. 1988



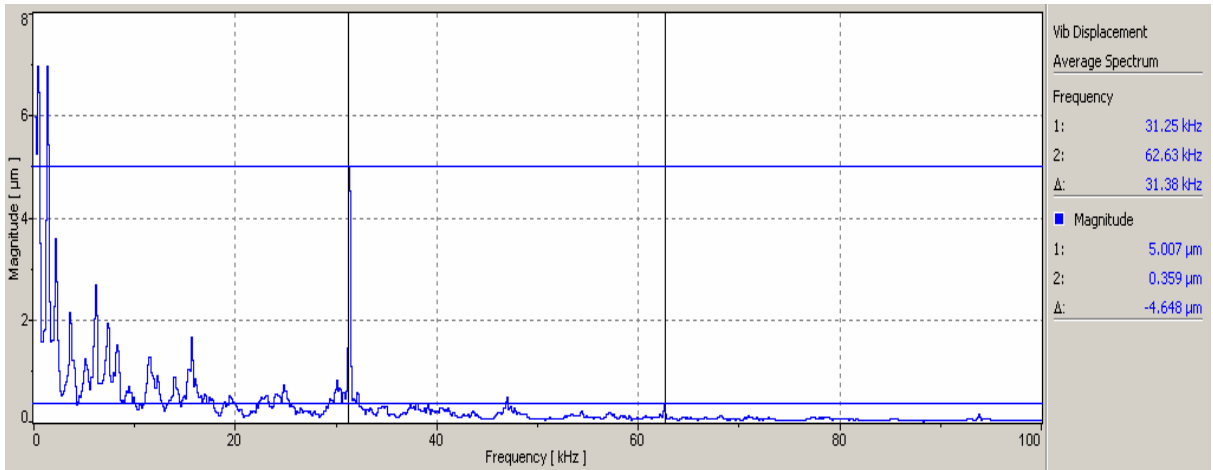
附錄1 各實驗振幅圖與速度圖



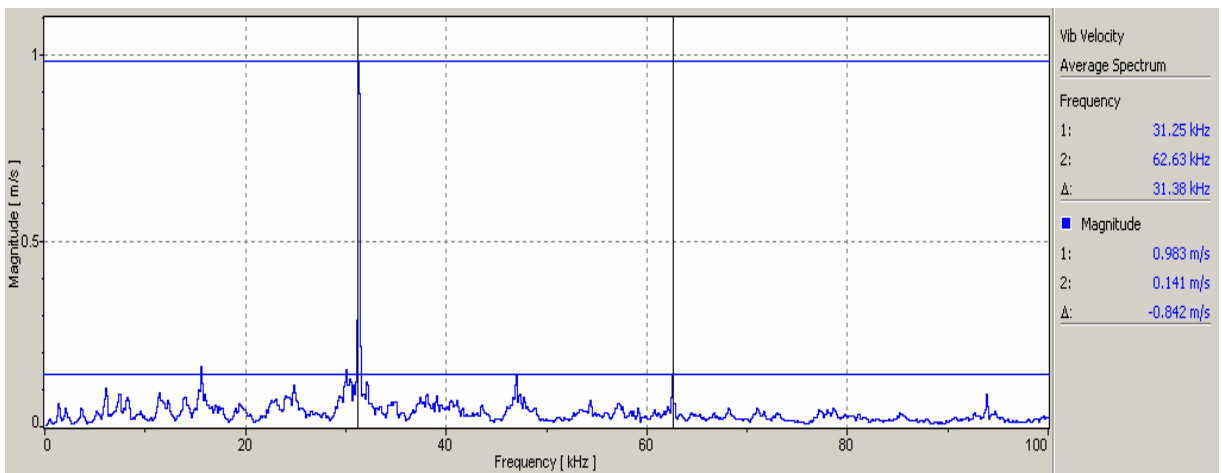
Case1 的振幅圖



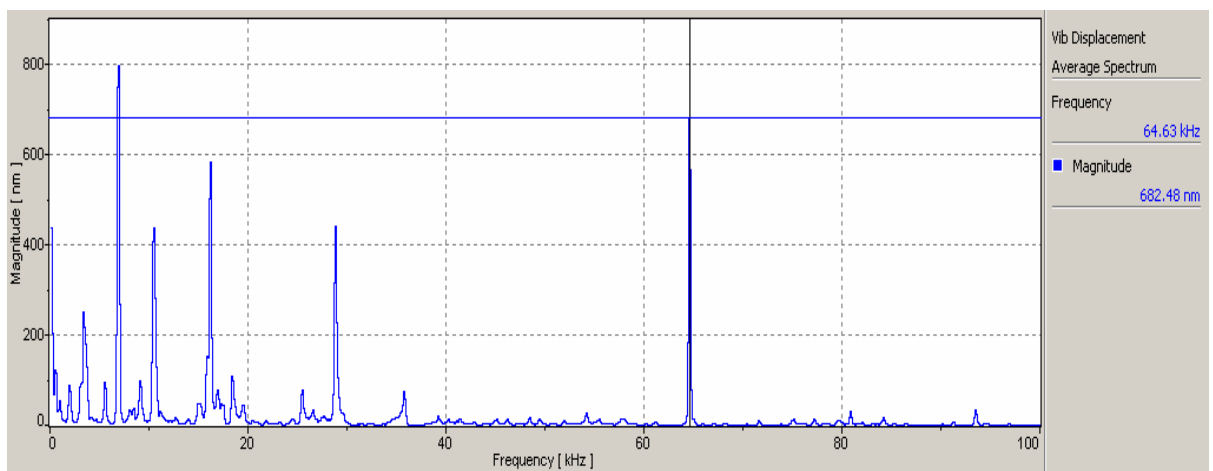
Case1 的速度圖



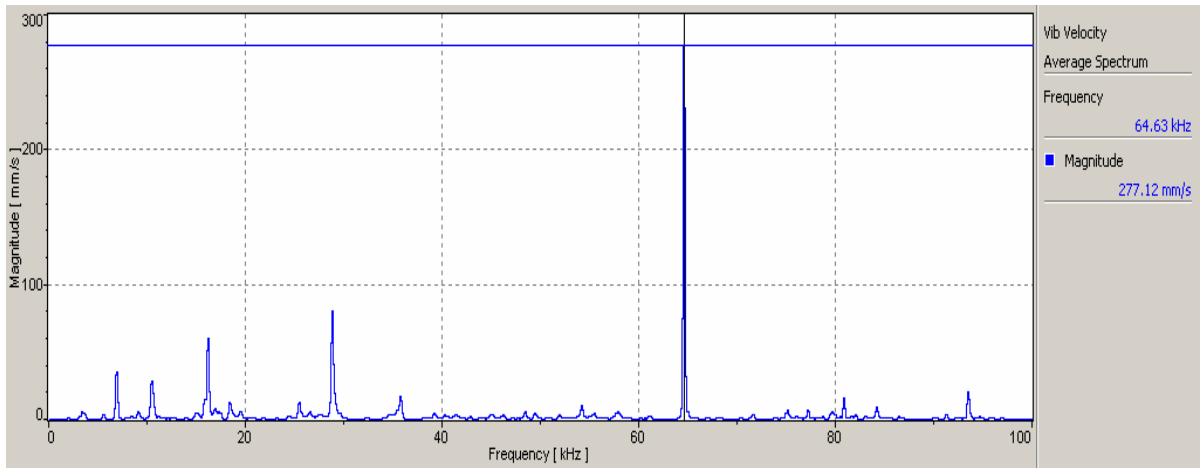
Case2 的振幅圖



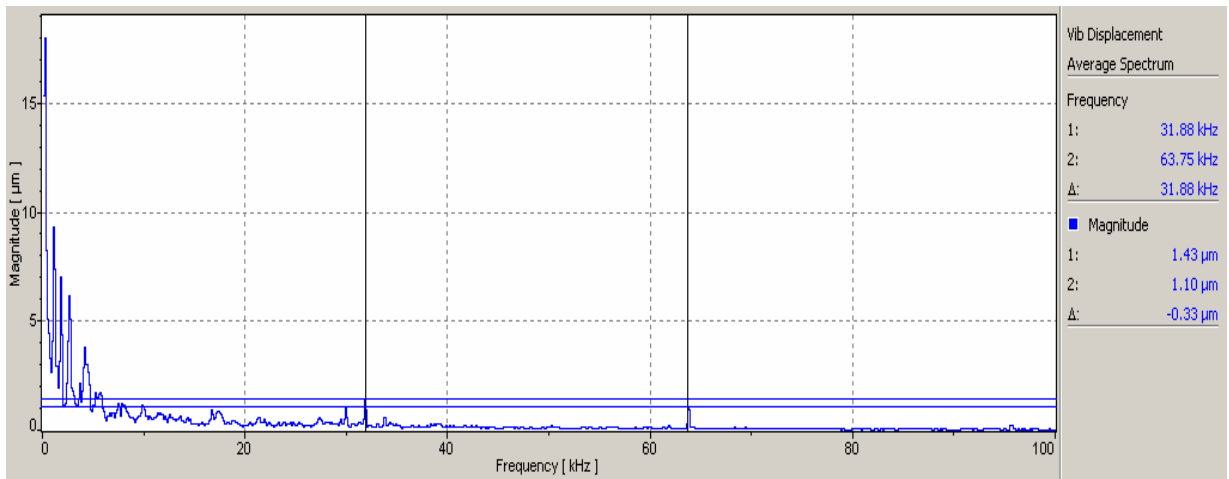
Case2 的速度圖



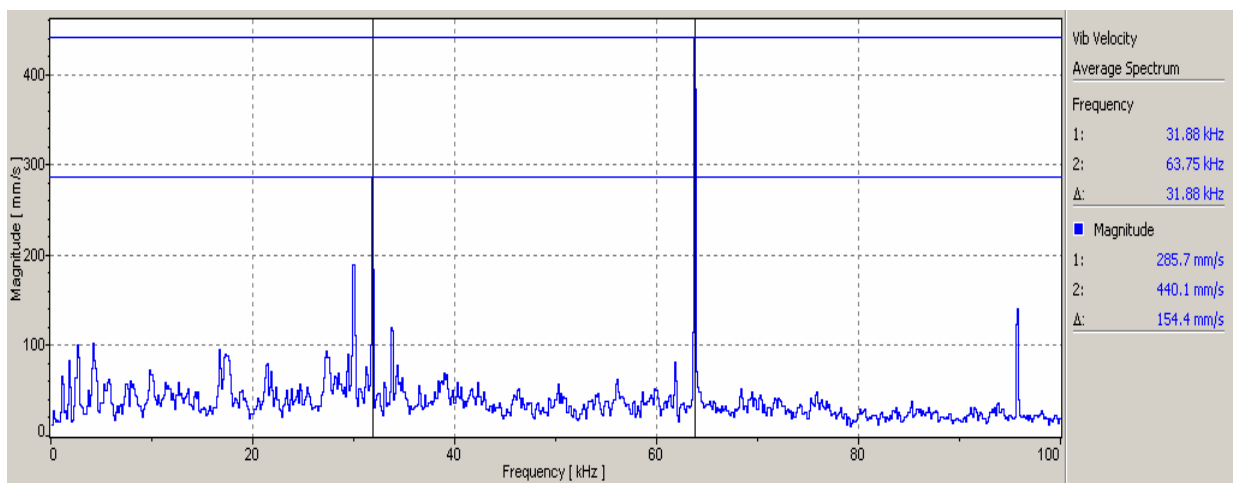
Case3 的振幅圖



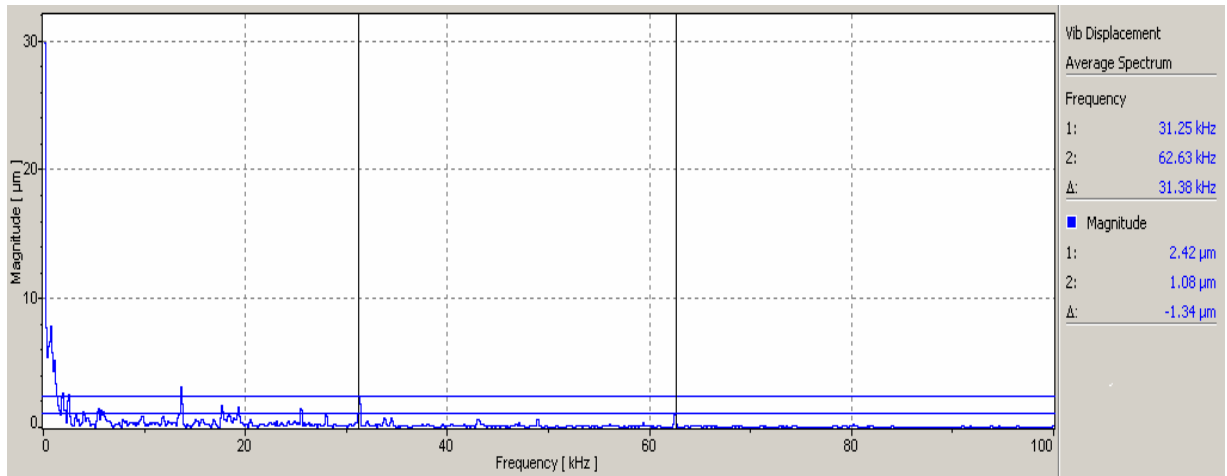
Case3 的速度圖



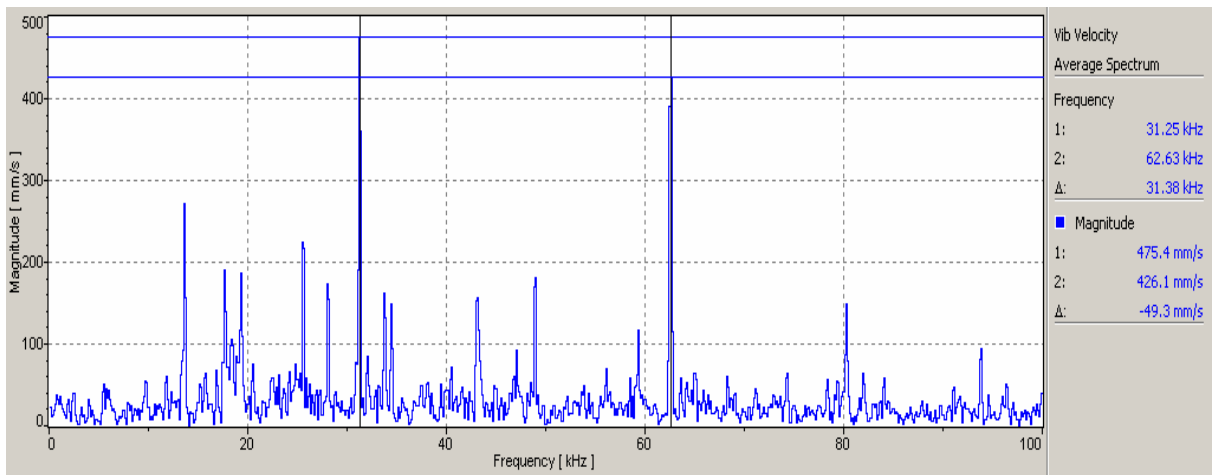
Case4 的振幅圖



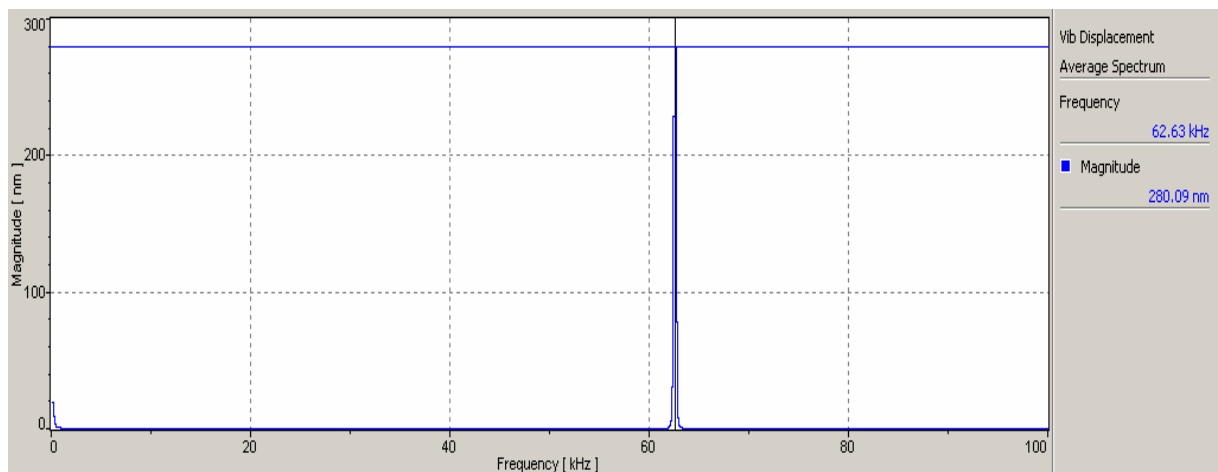
Case4 的速度圖



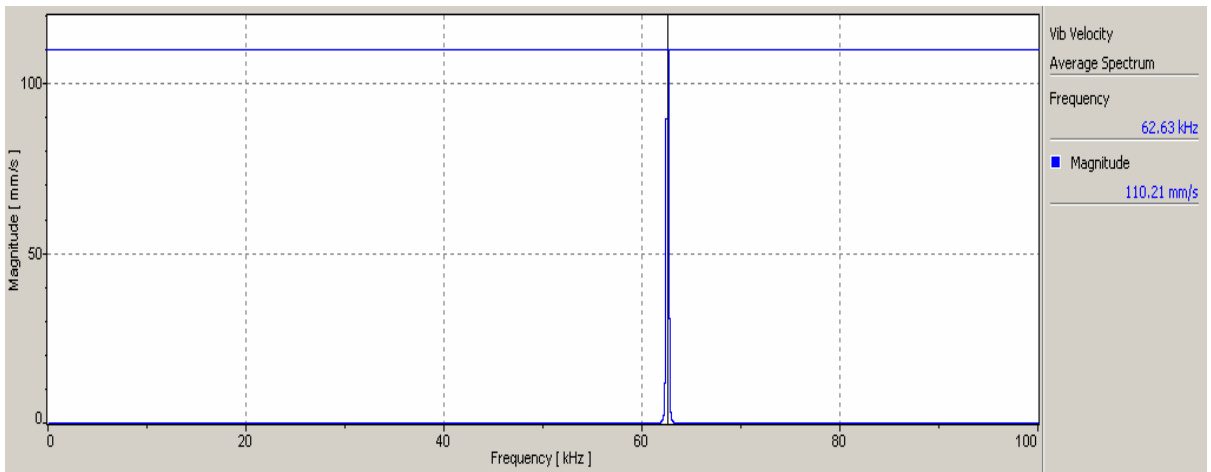
Case5 的振幅圖



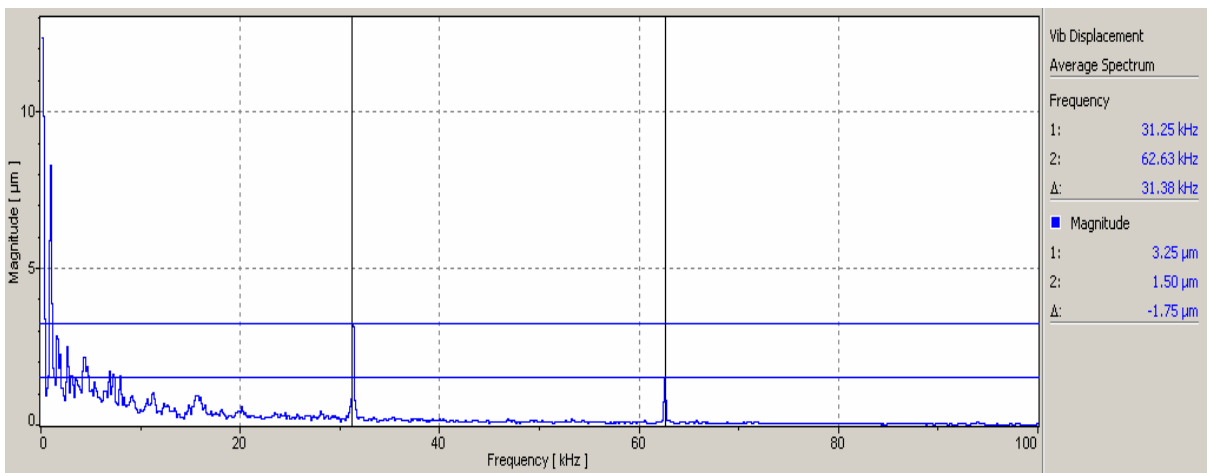
Case5 的速度圖



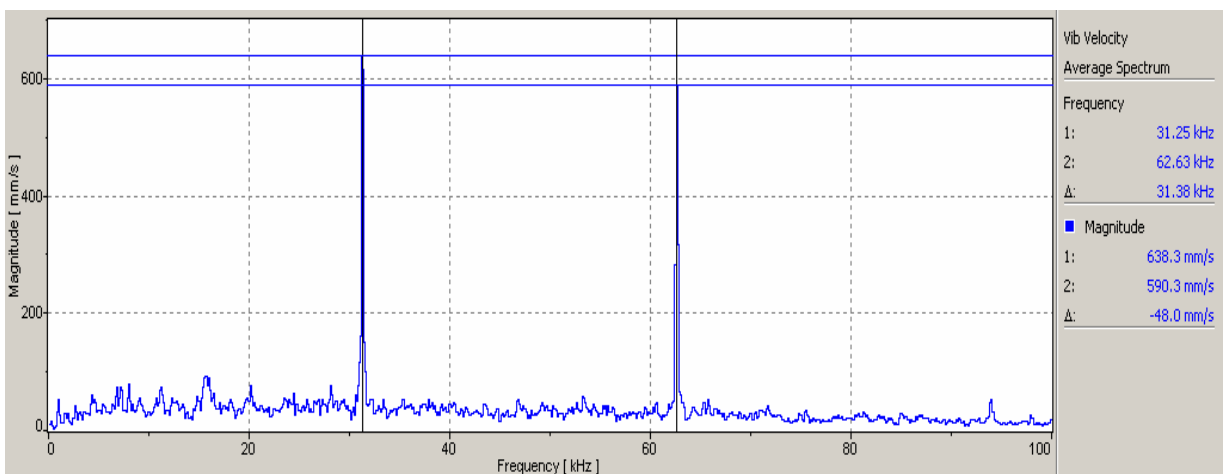
Case6 的振幅圖



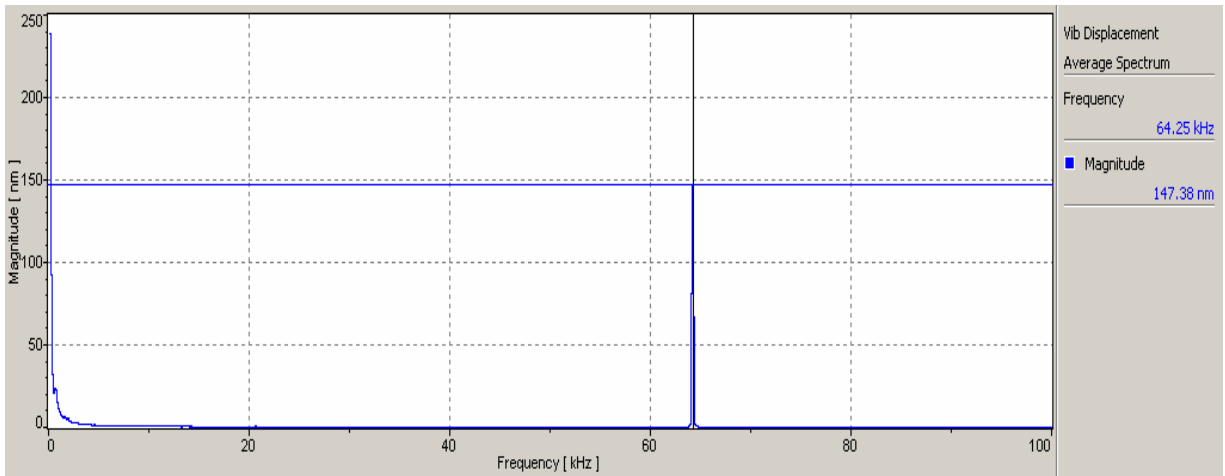
Case6 的速度圖



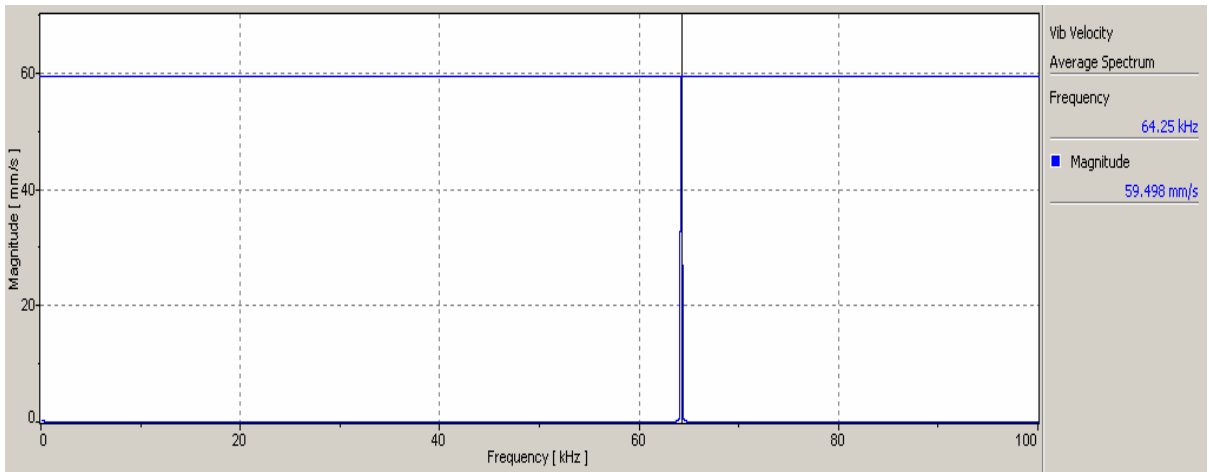
Case7 的振幅圖



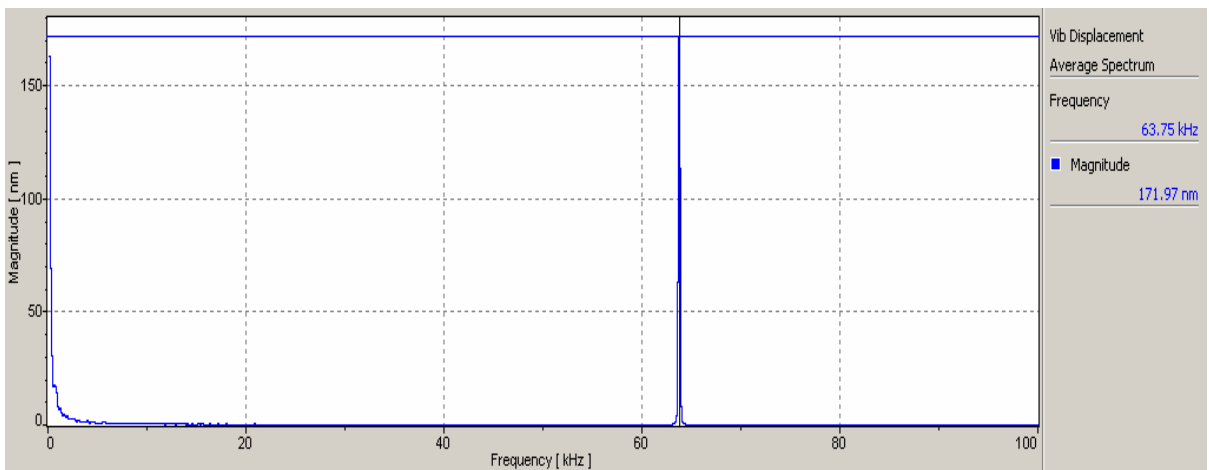
Case7 的速度圖



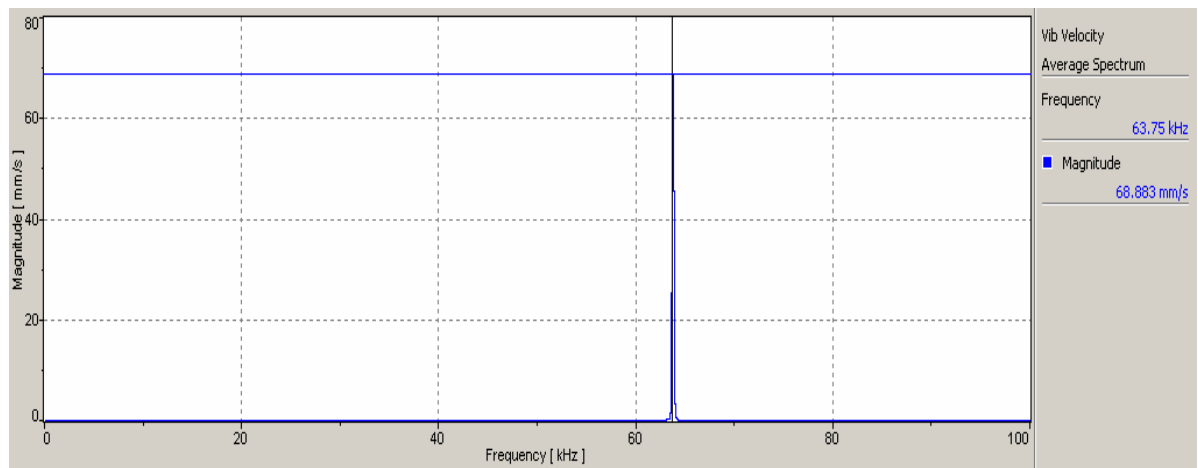
Case8 的振幅圖



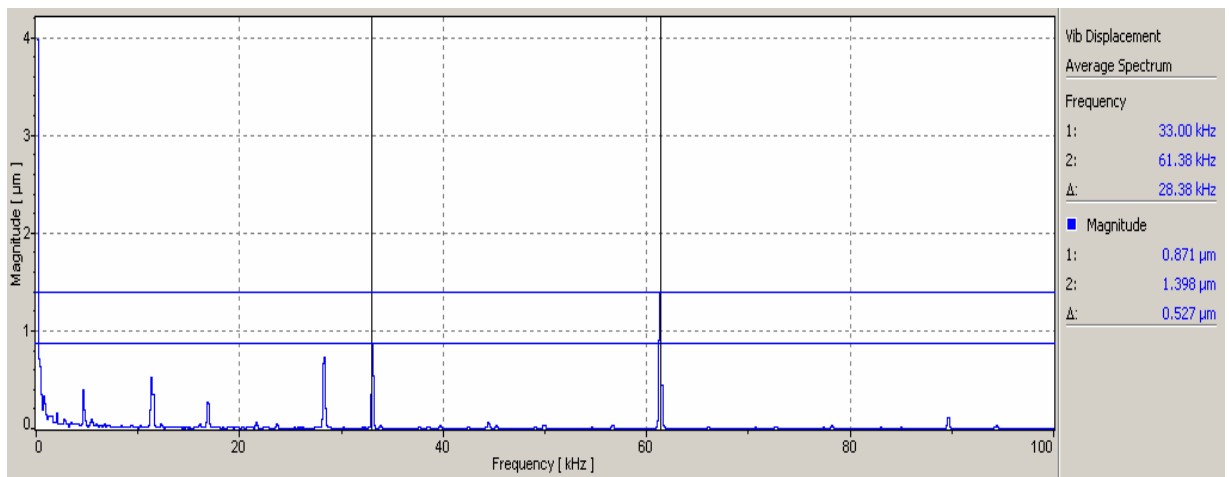
Case8 的速度圖



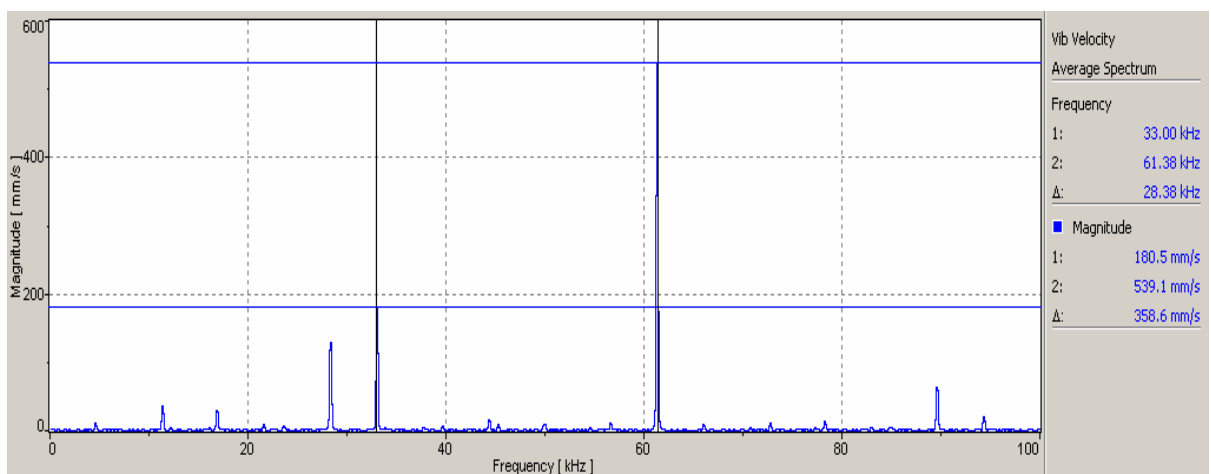
Case9 的振幅圖



Case9 的速度圖



Case9.1 的振幅圖



Case9.1 的速度圖

表2-1 電鑄金屬的特性[22]

電鑄金屬	材料特性 & 應用目的
鎳	金屬微結構、模仁
金	X-ray 光罩吸收層(absorber)材料 中間層(intermediate layer)材料
銅	金屬微結構、中間層材料
鎳-鐵	高磁性與耐腐蝕特性 Invar (64% Fe: 36% Ni) : 低熱膨脹係數特性 熱膨脹係數 (TCE) : 鎳: $13.4 \times 10^{-6}/K$ 銅: $16.5 \times 10^{-6}/K$ 矽: $2.6 \times 10^{-6}/K$ Invar: $2.0 \times 10^{-6}/K$ Permalloy (21% Fe: 79% Ni) : 高磁性特性 飽和磁化強度 : 鎳: 6K Gauss Permalloy: 10K Gauss
鎳-鈷	高強度特性適用於耐衝擊、耐磨耗沖模
鎳-錳	高硬度特性適用於耐衝擊、耐磨耗沖模
鎳-鎢	耐高溫特性

表 3-1 因素與因數分佈

Levels factor	Diameter (直徑(A))	Thickness (厚度(B))	Contact angle (接觸角(C))
1	44.7±1.8	25±2	110
2	77.4±2	36.5±1.3	70
3	104±2	46±2	50

表 3-2 L₉(3³)田口式直交表

L ₉ (3 ³)	Diameter (直徑(A))	Thickness (厚度(B))	Contact angle (接觸角(C))
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

表 3-3 田口式 S/N 比值回應圖方程式

田口式表格計算公式	MSD	S/N 比(單位為 db)
望大為目標	$\frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{y_i^2}$	-10 log MSD
望小為目標	$\frac{1}{n} \sum_i y_i^2$	-10 log MSD

表 4-1 $L_9(3^3)$ 田口式內外直交表

$L_9(3^3)$	Diameter (直徑)	Thickness (厚度)	Contact angle (接觸角)	速度(m/s)			斷裂時間(us)			平均體積(pl)			液滴均勻度		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	5.73	5.34	7.20	95.23	95.23	95.23	79.36	79.69	89.87	2.97	2.85	3.03
2	1	2	2	4.46	3.9	4.27	81.63	68.02	68.02	87.5	74.1	82.36	2.36	2.64	3.30
3	1	3	3	6.2	6.25	6.35	68.02	68.02	68.02	18.67	18.3	19.17	2.45	2.33	1.61
4*	2	1	2	3.56	4.69	4.52	163.2	163.2	149.6	162.6	165	174.6	11.01	9.02	8.56
				3.41	4.11	3.43				310	410.3	451			
5*	2	2	3	3.76	4.2	4.17	136.1	136.1	136.1	140.7	154.1	145.7	9.76	11.77	6.7
				3.66	3.81	4.12				311.1	382.6	261.3			
6	2	3	1	5.4	5.9	5.3	40.8	40.8	40.8	12.28	12.61	11.86	1.61	2.46	2.01
7*	3	1	3	3.99	5.85	3.88	149.6	149.6	163.2	215.6	255.6	294.3	10.45	7.33	10.7
				2.87	4.9	2.38				467	416	534			
8-	3	2	1	3.95	4.24	3.4	136.5	122.4	122.4	133.8	141.2	137.9	4.39	3.39	3.26
9	3	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.1	90.2	42.7	2	6.54	6.46	5.7	136.1	136.1	136.1	214.1	230.7	225.6	4.5	3.5	3.03

表 4-2 田口式內外直交表

case	直徑(A) (μm)	厚度(B) (μm)	接觸角 (C)($^{\circ}$)	振動頻率 (kHz)	振動幅度 (nm)	振動速度 (mm/s)
1	1	1	1	61.13	710	271.9
				30.63	4120	792.1
2	1	2	2	62.63	359	141
				31.25	5007	983
3	1	3	3	64.63	682	277.12
4	2	1	2	63.75	1100	440.1
				31.88	1430	285.7
5	2	2	3	62.63	1080	426
				31.25	2420	475
6	2	3	1	62.63	280.09	110.21
7	3	1	3	62.63	1500	590.3
				31.25	3250	638.3
8	3	2	1	64.25	147.38	59.498
9	3	3	2	63.75	171.97	68.88
9.1	90.2	42.7	2	63.5	1398	539.1
				31.75	871	180.5

表 4-3 液滴為小液滴時 S/N 比回應表

A	B	C	體積(pl)			MSD	S/N
1	1	1	126.6	131.5	134.8	17163.62	-42.34
1	2	2	65.85	68.96	73.29	4821.04	-36.83
1	3	3	18.67	18.3	19.9	359.82	-25.56
2	1	2	162	165	174	27915	-44.45
2	2	3	140.7	154.1	145.7	21590.6	-43.34
2	3	1	12.37	12.61	11.86	150.89	-21.78
3	1	3	215.6	255.6	294	66083.57	-48.20
3	2	1	133.8	141.2	137.9	18952.1	-42.77
3	3	2	229.2	241.6	238.6	55944.39	-47.47

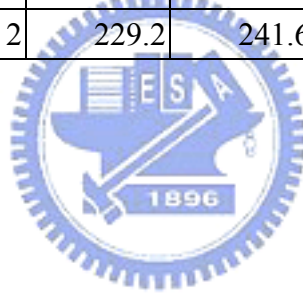


表 4-4 液滴為小液滴時 S/N 比回應平均表

	A	B	C
1	-34.91	-45.00	-35.63
2	-36.52	-40.98	-42.92
3	-46.15	-31.60	-39.03

表 4-5 液滴為大型聚合液滴時 S/N 比回應表

A	B	C	體積(pl)			MSD	S/N
1	1	1	126.6	131.5	134.8	17163.62	-42.34
1	2	2	65.85	68.96	73.29	4821.04	-36.83
1	3	3	18.67	18.3	19.9	359.82	-25.56
2	1	2	310	410.3	451	155949	-51.92
2	2	3	311.1	382.6	261.3	103814.6	-50.16
2	3	1	12.37	12.61	11.86	150.89	-21.78
3	1	3	467	322.8	534	202481.6	-53.06
3	2	1	133.8	141.2	137.9	18952.1	-42.77
3	3	2	229.2	241.6	238.6	55944.39	-47.47

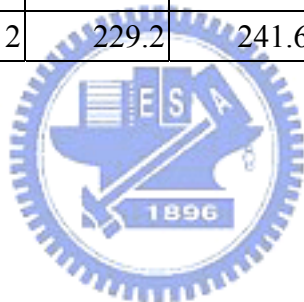


表 4-6 液滴為大型聚合液滴時 S/N 比回應平均表

	A	B	C
1	-34.91	-49.11	-35.63
2	-41.29	-43.25	-45.41
3	-47.77	-31.60	-42.92

表 4-7 斷裂時間 S/N 比回應表

A	B	C	斷裂時間(μ s)			MSD	S/N
1	1	1	95.23	95.23	95.23	9068.75	-39.57
1	2	2	81.63	81.63	95.23	7465.22	-38.73
1	3	3	68.02	68.02	68.02	4626.72	-36.65
2	1	2	163.2	163.2	149.6	25216.21	-44.01
2	2	3	136.1	136.1	136.1	18523.21	-42.67
2	3	1	40.8	40.8	40.8	1664.64	-32.21
3	1	3	149.6	149.6	163.2	23798.19	-43.76
3	2	1	122.4	122.4	122.4	14981.76	-41.75
3	3	2	136.1	136.1	136.1	18523.21	-42.67



表 4-8 斷裂時間的 S/N 比回應平均表

	A	B	C
1	-38.31	-42.45	-37.84
2	-39.63	-41.05	-41.80
3	-42.73	-37.18	-41.03

表 4-9 液滴不均匀度 S/N 比回應表

A	B	C	液滴不均匀度(%)			MSD	S/N
			21	12	26		
1	1	1	21	12	26	420.33	-26.23
1	2	2	25	20	18	449.67	-26.52
1	3	3	20	17	11	270	-24.31
2	1	2	57	30	30	1683	-32.26
2	2	3	24	25	23	576.67	-27.60
2	3	1	24	14	12	305.33	-24.84
3	1	3	25	19	29	609	-27.84
3	2	1	19	17	20	350	-25.44
3	3	2	16	13	9	168.67	-22.27

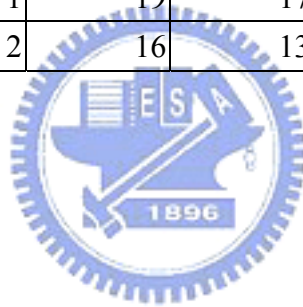


表 4-10 液滴不均匀度 S/N 比平均回應表

	A	B	C
1	-25.69	-28.7	-25.50
2	-28.23	-26.52	-27.02
3	-25.18	-23.81	-26.58

表 4-11 小液滴對速度的 S/N 比回應表

A	B	C	速度(m/s)			MSD	S/N
1	1	1	6.29	5.56	7.3	0.025	15.94
1	2	2	4.26	3.74	3.93	0.063	11.95
1	3	3	6.2	6.25	6.35	0.025	15.93
2	1	2	3.56	4.69	4.52	0.057	12.38
2	2	3	3.76	4.2	4.17	0.061	12.10
2	3	1	5.4	5.9	5.29	0.032	14.82
3	1	3	3.99	5.85	3.88	0.052	12.77
3	2	1	3.95	4.24	3.4	0.068	11.62
3	3	2	6.54	6.46	5.7	0.026	15.84

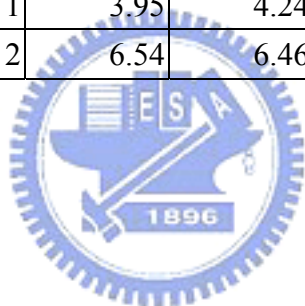


表 4-12 小液滴對速度的 S/N 比平均回應表

	A	B	C
1	14.61	13.69	14.13
2	13.10	11.89	13.39
3	13.41	15.53	13.60

表 4-13 大液滴對速度的 S/N 比回應表

A	B	C	速度(m/s)			MSD	S/N
1	1	1	6.29	5.56	7.3	0.025	15.94
1	2	2	4.26	3.74	3.93	0.063	11.95
1	3	3	6.2	6.25	6.35	0.025	15.94
2	1	2	3.41	4.11	3.43	0.076	11.15
2	2	3	3.66	3.81	4.12	0.067	11.71
2	3	1	5.4	5.9	5.29	0.033	14.82
3	1	3	2.87	4.9	2.38	0.113	9.46
3	2	1	3.95	4.24	3.4	0.068	11.62
3	3	2	6.54	6.46	5.7	0.026	15.84

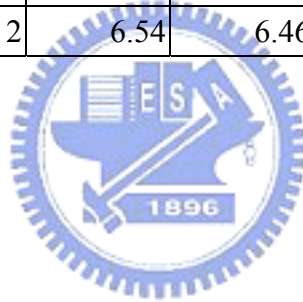


表 4-14 大液滴對速度的 S/N 比平均回應表

	A	B	C
1	14.61	12.18	14.13
2	12.56	11.76	12.98
3	12.31	15.53	12.37

表 4-15 Case3 在頻率 96kHz 與 64KHz 的比較

$L_9(3^3)$	Diameter (直徑) Mm	Thickness (厚度) μm	Contact angle (接觸角)	頻率 (kHz)	振幅 (nm)	振動 速度 (mm/s)	速度(m/s)		
							1	2	3
3	44	46	52	64	682.48	277.12	6.2	6.25	6.35
3	44	46	53	96	173.69	104.77	3	3.9	4.7
頻率 (kHz)	斷裂時間(us)			平均體積(pl)			液滴均勻度		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
64	68.02	68.02	68.02	18.67	18.3	19.17	2.45	2.33	1.62
96	69.2	63.6	67.14	35.48	46.97	42.05	2.63	2.72	2.66



表 4-16 實驗中的無因次參數

Case	A	B	C	備註	Re	We	Ca
1	1	1	1		332.51	26.56	0.079
2	1	2	2		196.01	9.66	0.049
3	1	3	3		294.84	22.84	0.077
4	2	1	2	小液滴	379.56	20.24	0.053
				大液滴	325.47	14.8	0.045
5	2	2	3	小液滴	347.86	17.43	0.05
				大液滴	332.37	15.91	0.047
6	2	3	1		469.85	32.21	0.068
7	3	1	3	小液滴	531.27	31.2	0.058
				大液滴	393.03	18.14	0.046
8	3	2	1		464.37	22.35	0.048
9.1	3	3	2		631.24	48.81	0.077

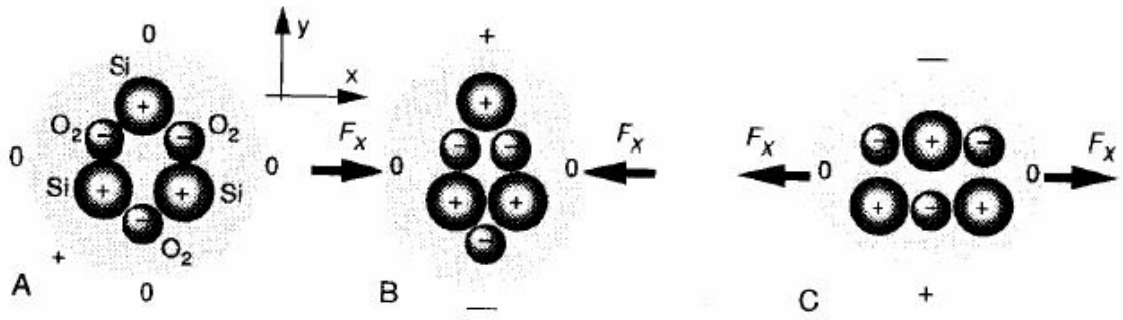


圖 1-1 石英晶格的壓電效應

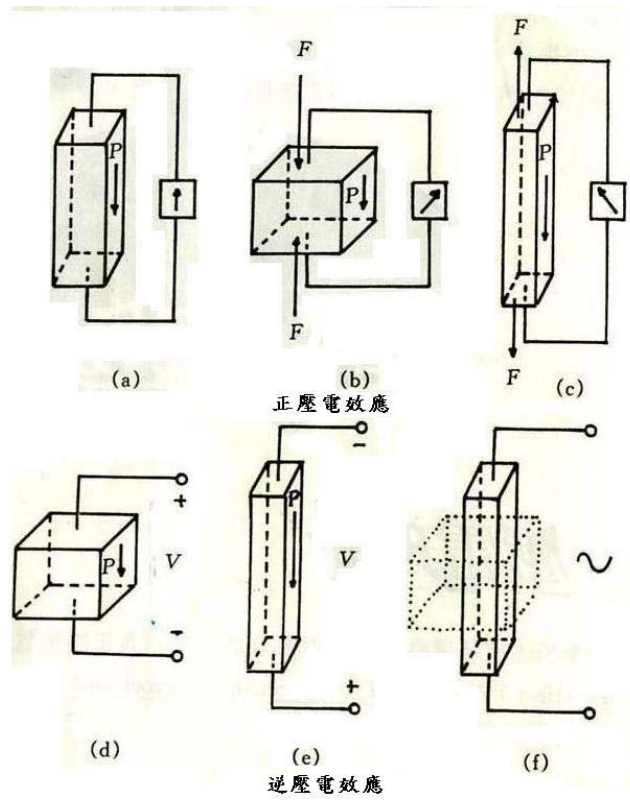


圖 1-2 壓電效應[20]

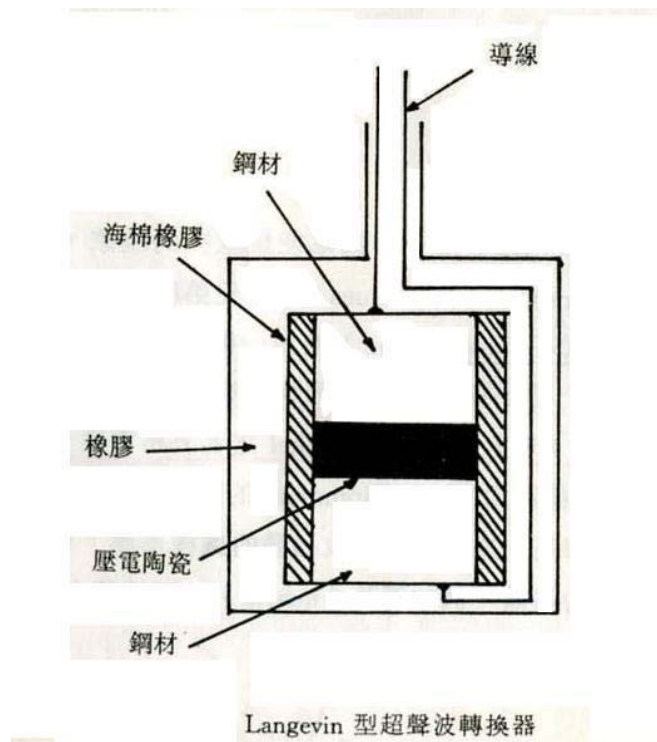


圖 1-3 三明治型的轉換器[20]

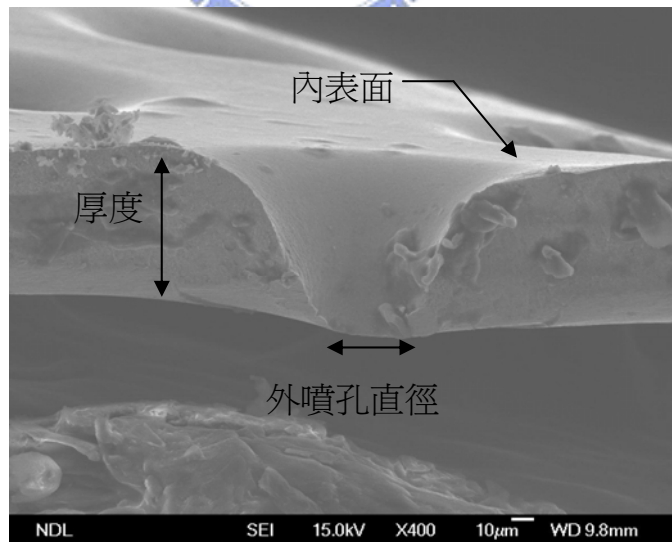


圖 1-4 實驗中噴孔片變化參數的位置圖

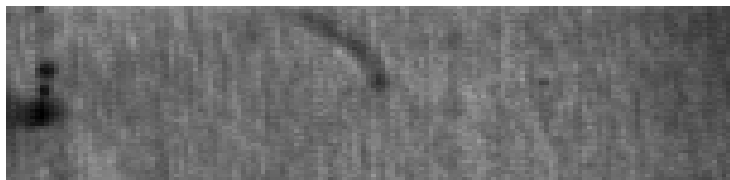


圖 2-1 液滴自噴孔凸出

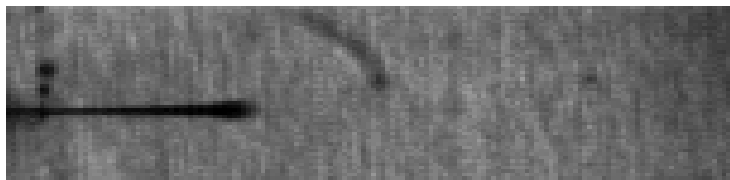


圖 2-2 整體拉長

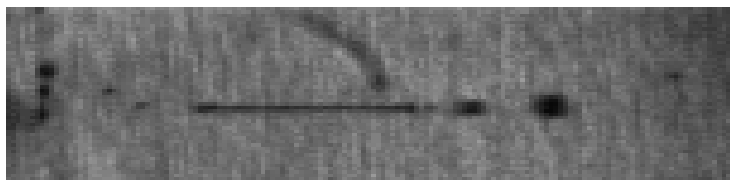


圖 2-3 主液滴與尾端斷裂

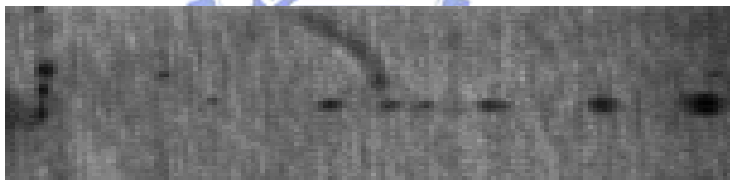
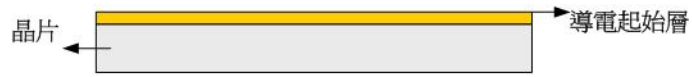
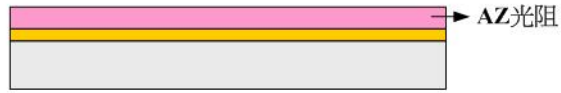


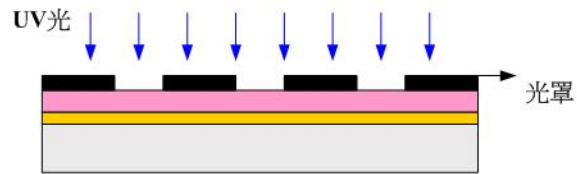
圖 2-4 尾液滴形成衛星液滴



(1) 濺鍍導電起始層



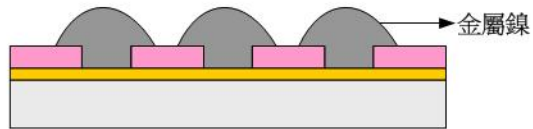
(2) 塗佈光阻



(3) 曝光



(4) 顯影



(4) 電鍍



(4) 脫膜

圖 2-5 噴孔片製作流程

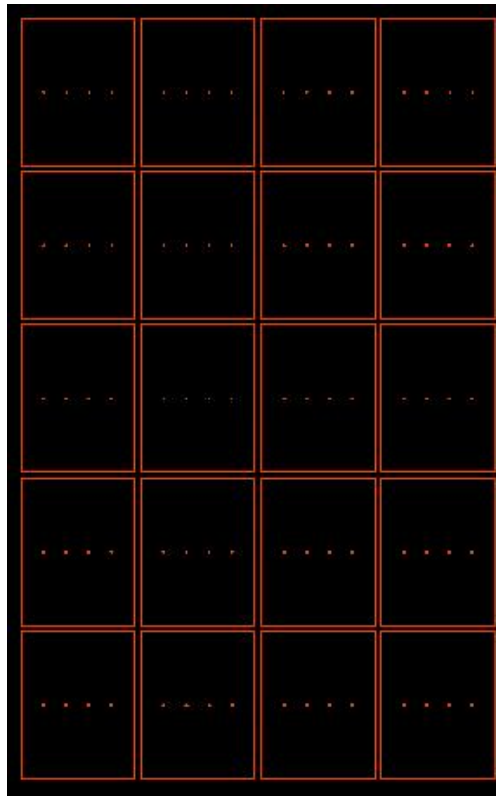


圖 2-6 噴孔片光罩圖(Auto CAD)

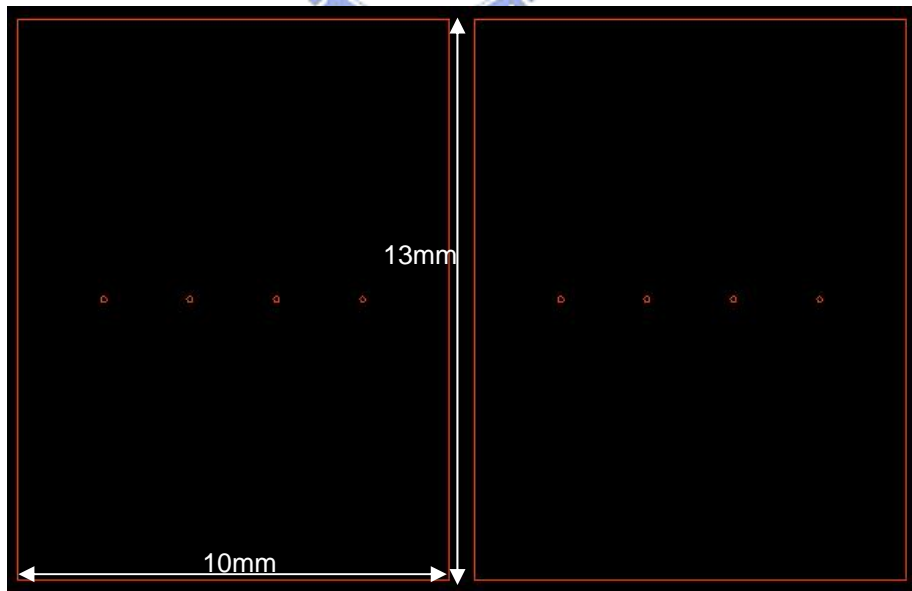


圖 2-7 噴孔片光罩放大圖樣(Auto CAD)

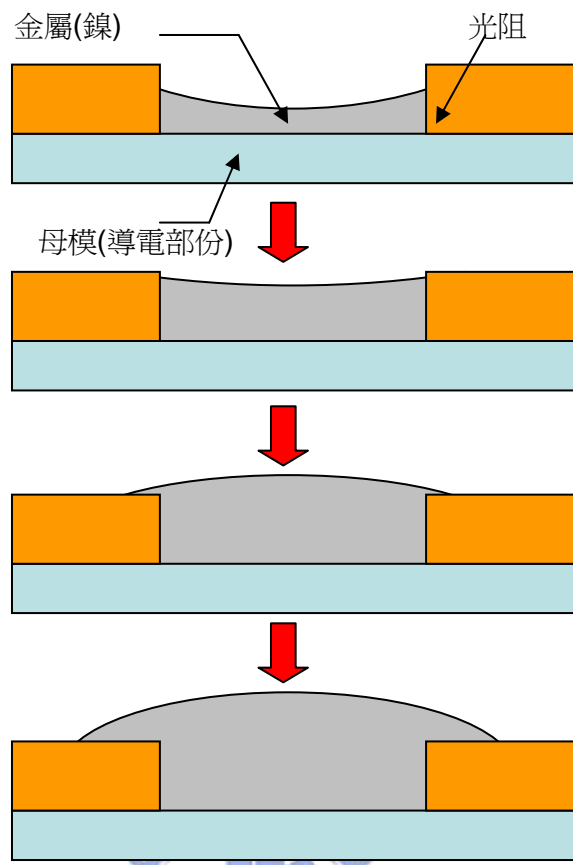


圖 2-8 電鑄過程中金屬的沉積圖

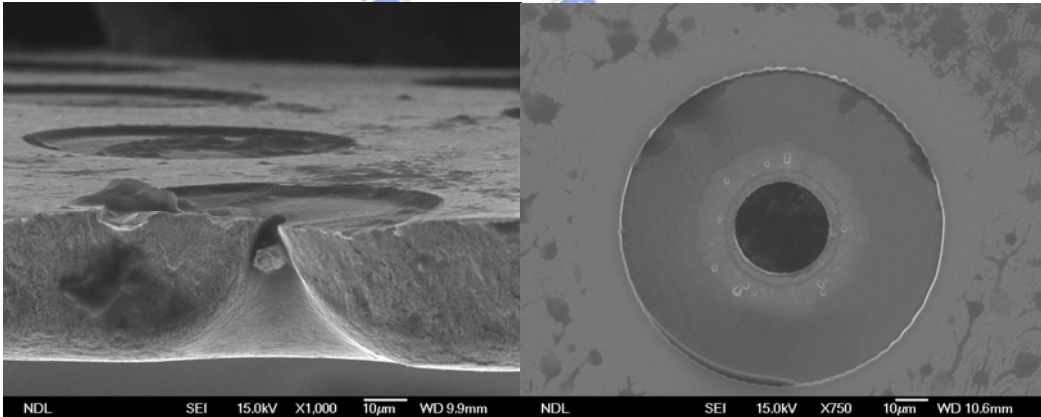


圖 2-9 噴孔剖面圖與正視圖(大圈為光阻痕跡，小圓為噴孔)

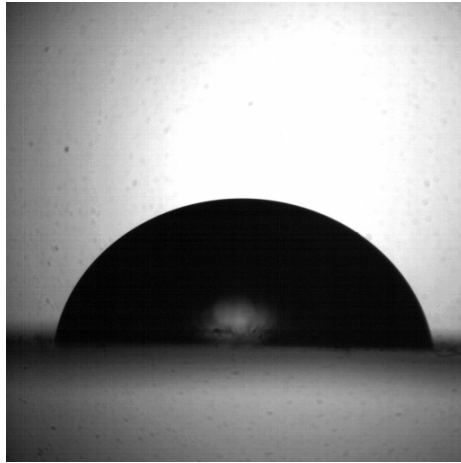


圖 2-10 液面接觸角為 74 度

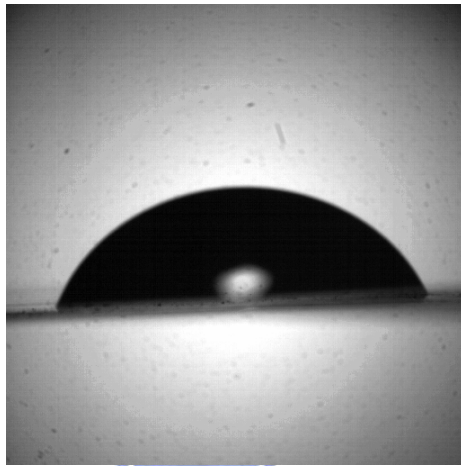


圖 2-11 液面接觸角為 54 度

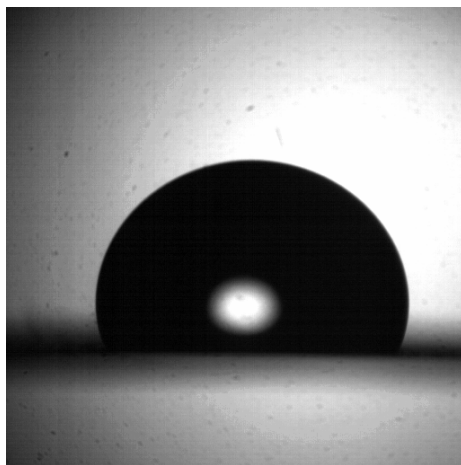


圖 2-12 液面接觸角為 112 度



圖 3-1 CCD 攝影機(X-stream VISION)



圖 3-2 顯微鏡筒



圖 3-3 光學鏡頭



圖 3-4 FOI-250 的 250W



圖 3-5 訊號產生器 GFG-8015G

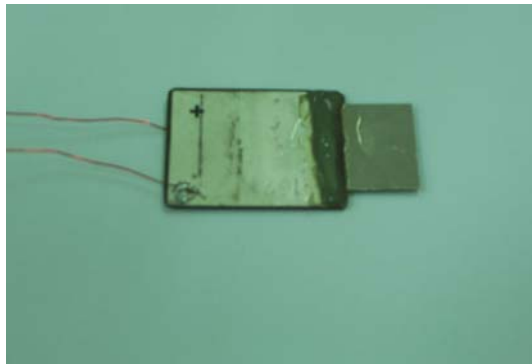


圖 3-6 噴孔片與壓電片接合示意圖

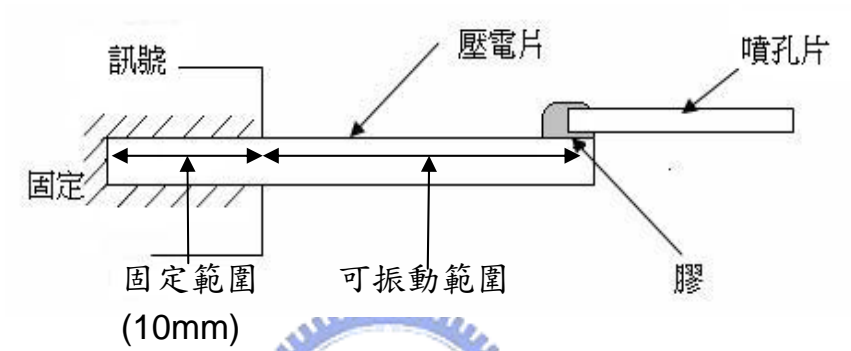


圖 3-7 噴孔片與壓電片接合後圖形

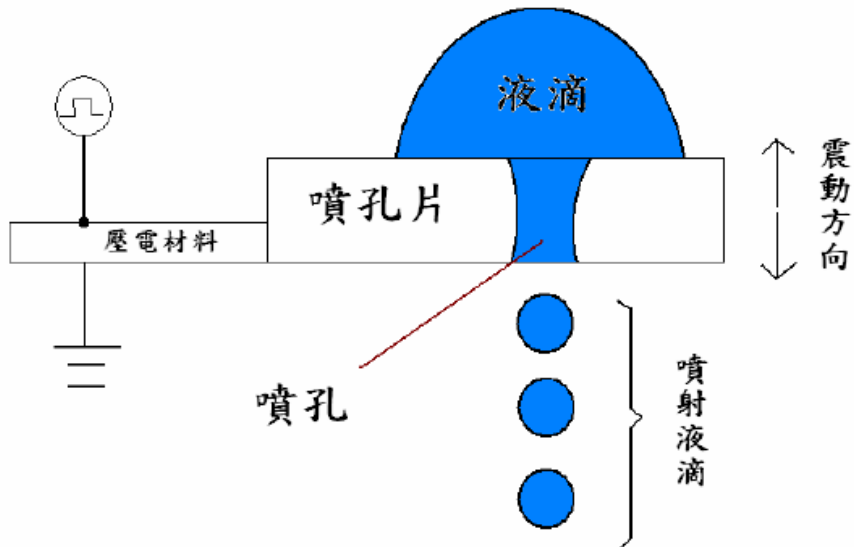


圖 3-8 噴孔片震動示意圖



圖 3-9 儀器架設位置

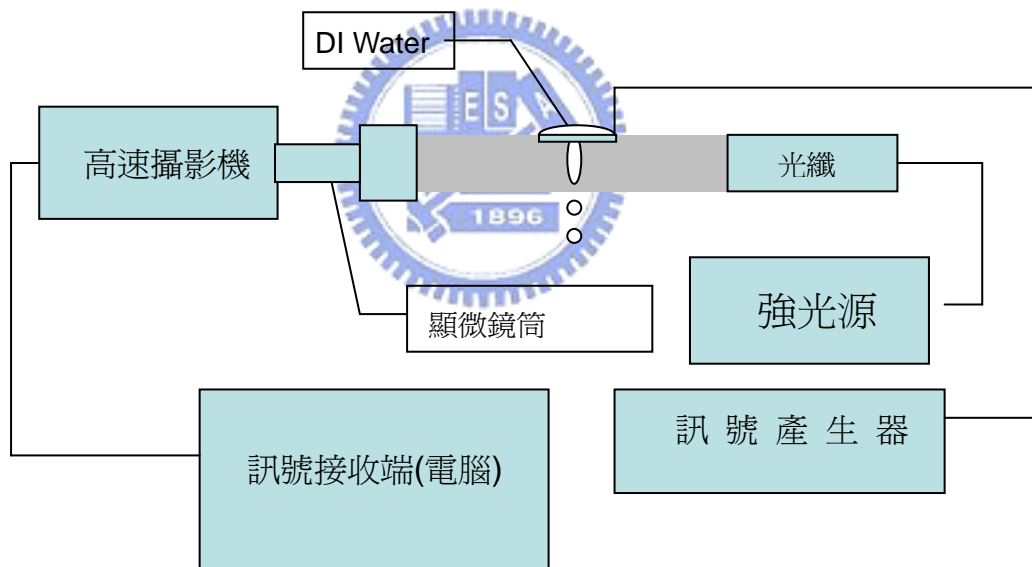


圖 3-10 儀器位置示意圖



圖 3-11 都卜勒振動量測儀(Polytec Demo 設備)

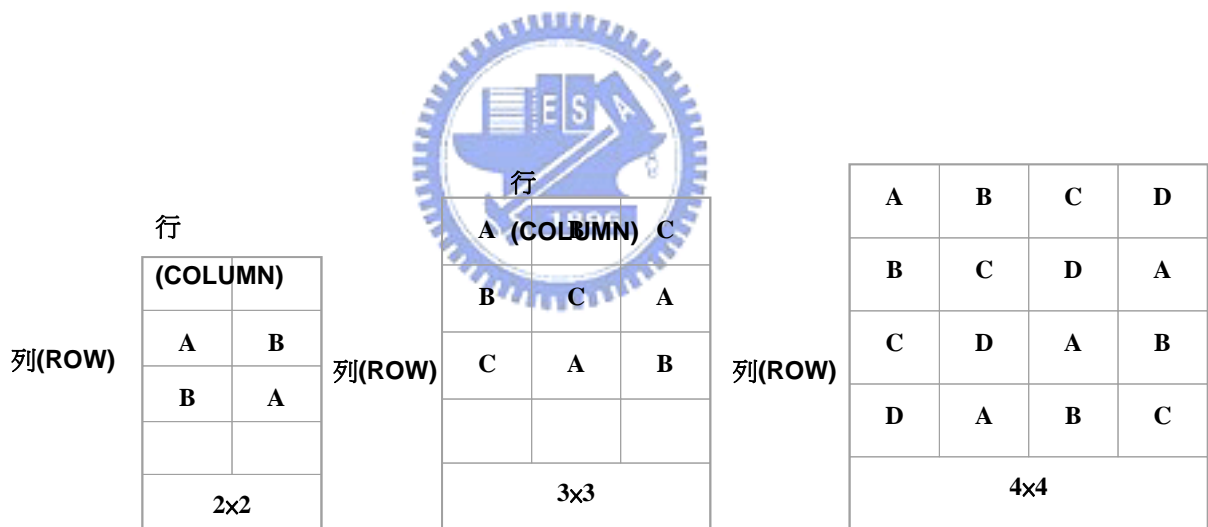


圖 3-12 不同大小的拉丁方格

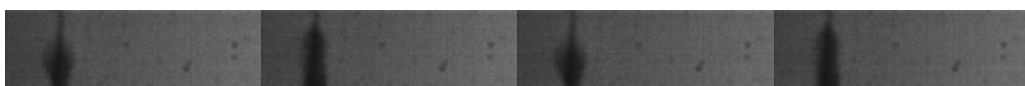


圖 3-13 液體無法自噴孔噴出

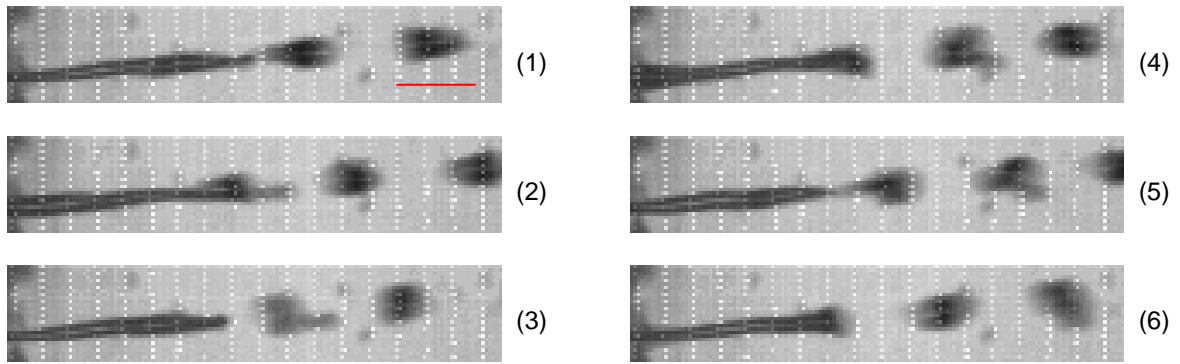


圖 4-1 Case1 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

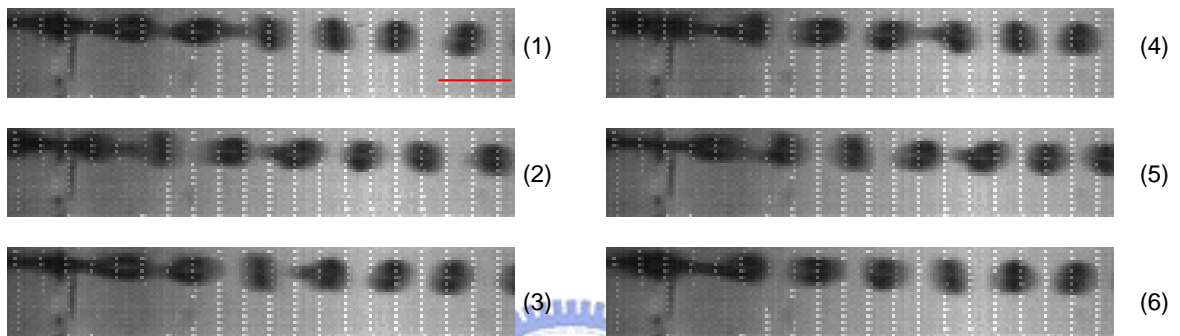


圖 4-2 Case2 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

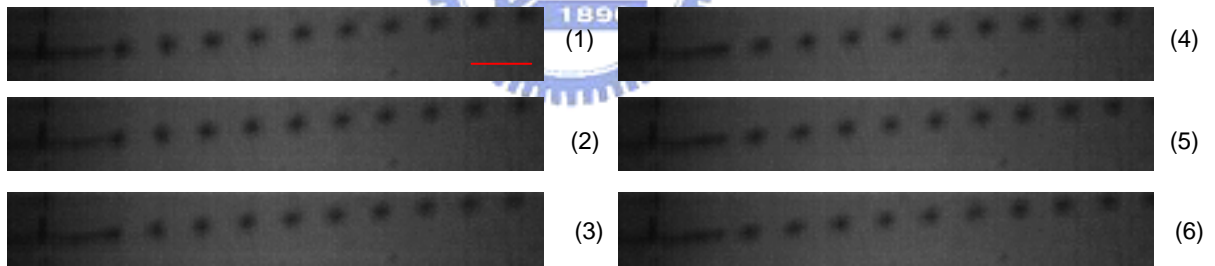


圖 4-3 Case3 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

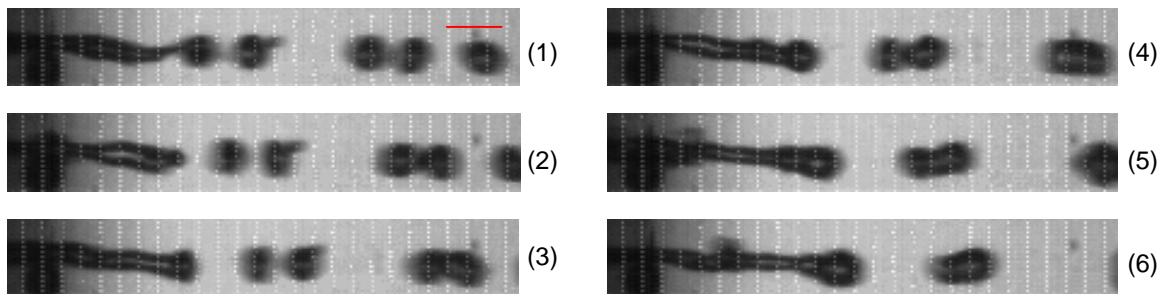


圖 4-4 Case4 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

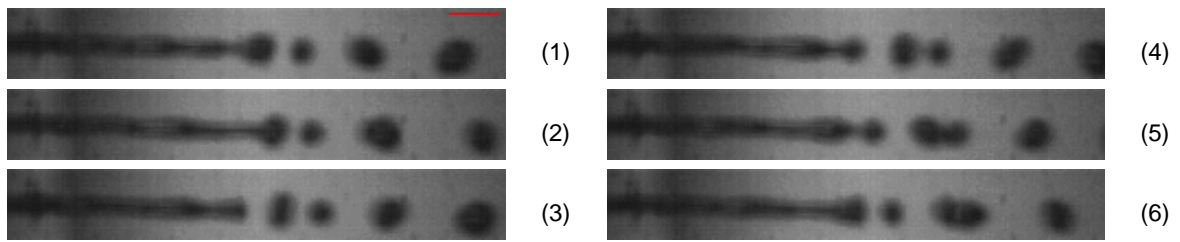


圖 4-5 Case5 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

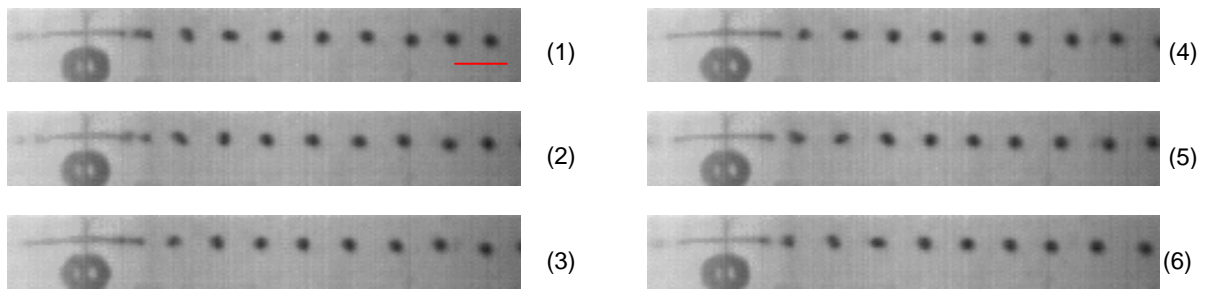


圖 4-6 Case6 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

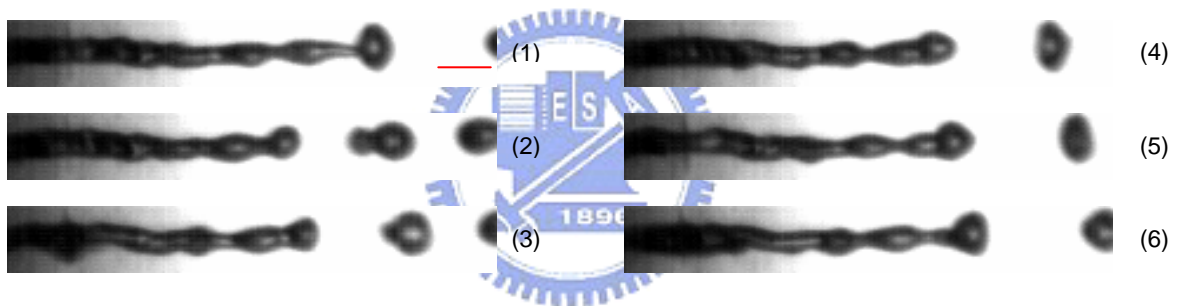


圖 4-7 Case7 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

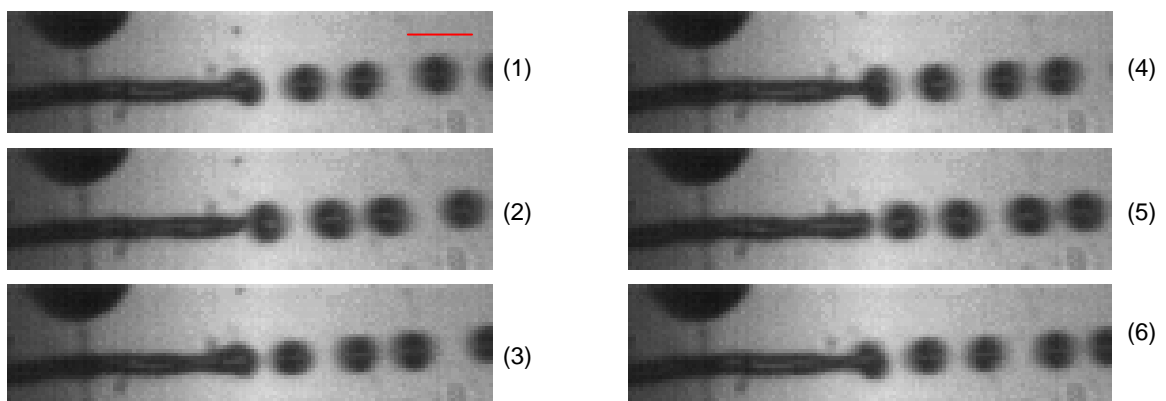


圖 4-8 Case8 液滴噴出狀態(紅線表 100 μm)

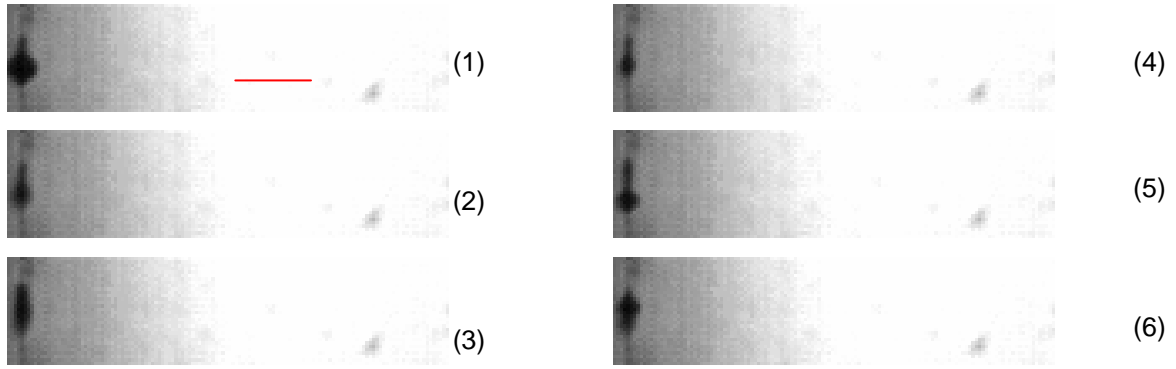


圖 4-9 Case9 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m)

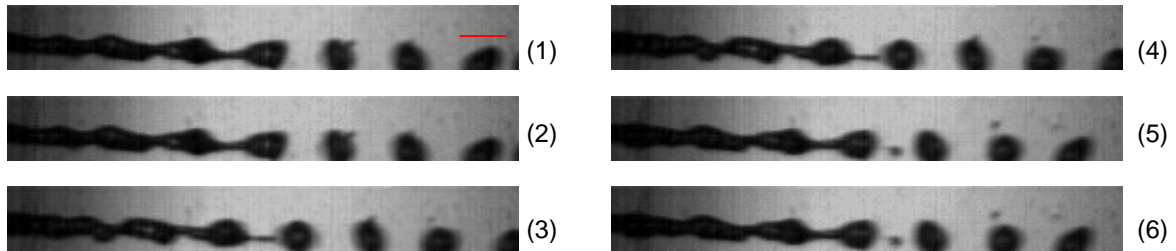


圖 4-10 Case9.1 液滴噴出狀態(紅線表 100 μ m)

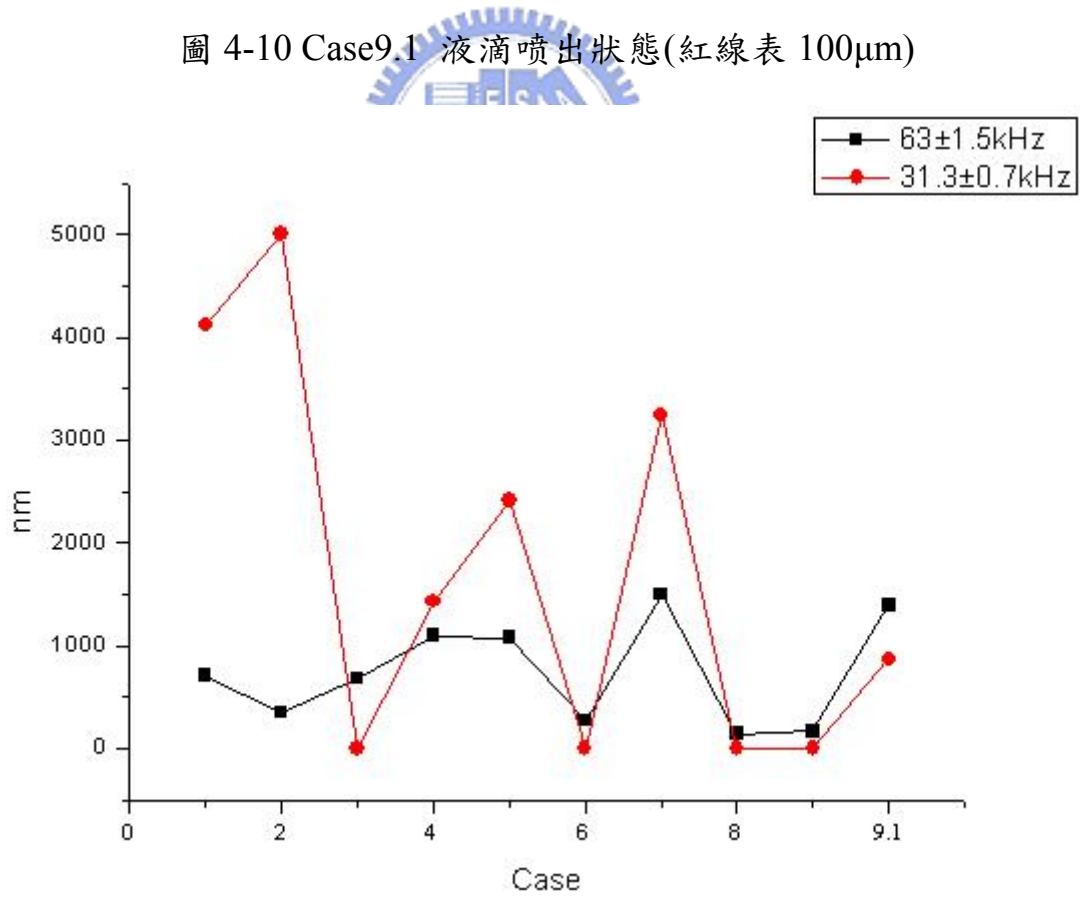


圖 4-11 振幅與 Case 編號關係圖

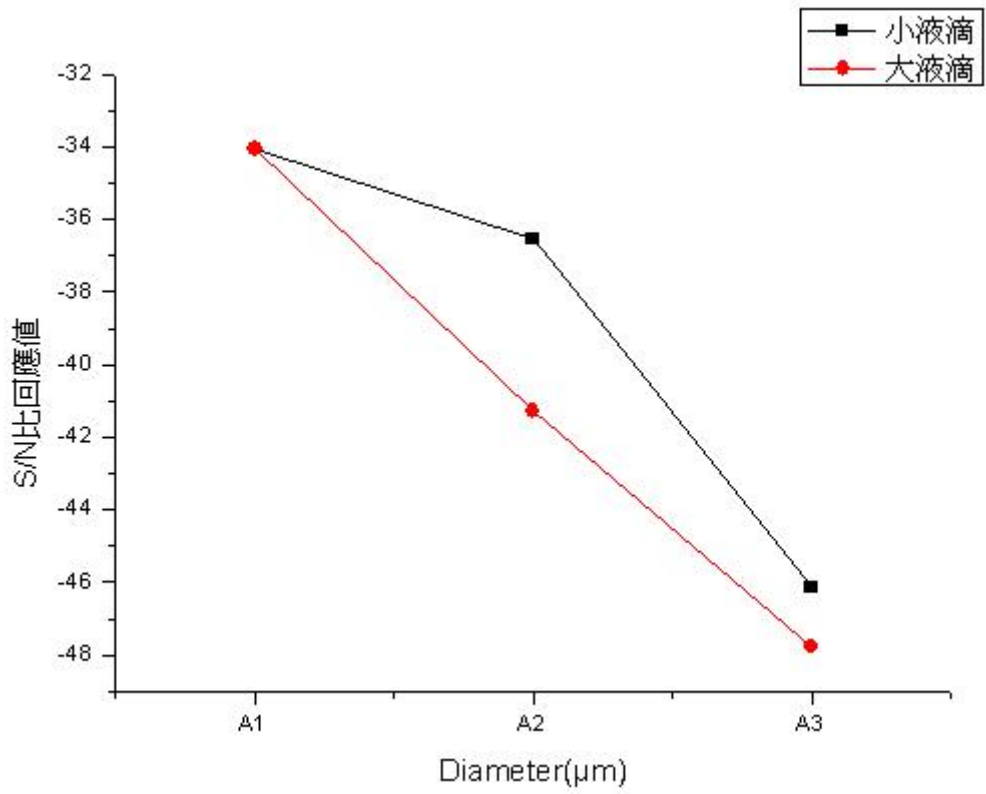


圖 4-12 噴孔孔徑與體積的 S/N 比回應圖

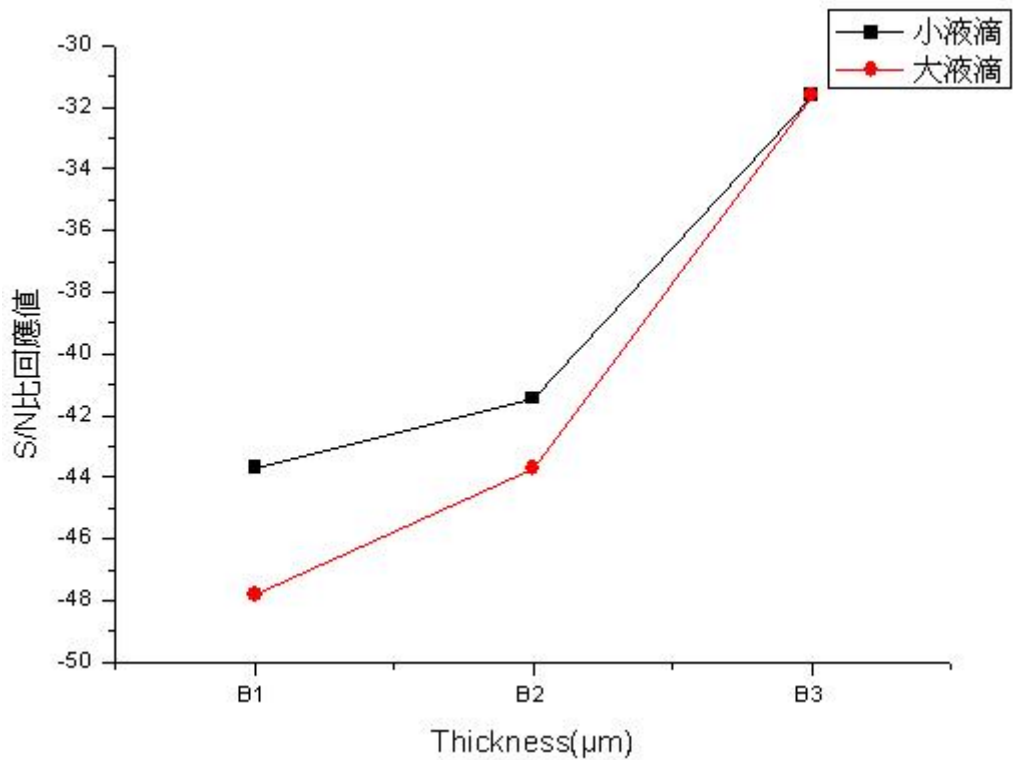


圖 4-13 噴孔片厚度與體積的 S/N 比回應圖

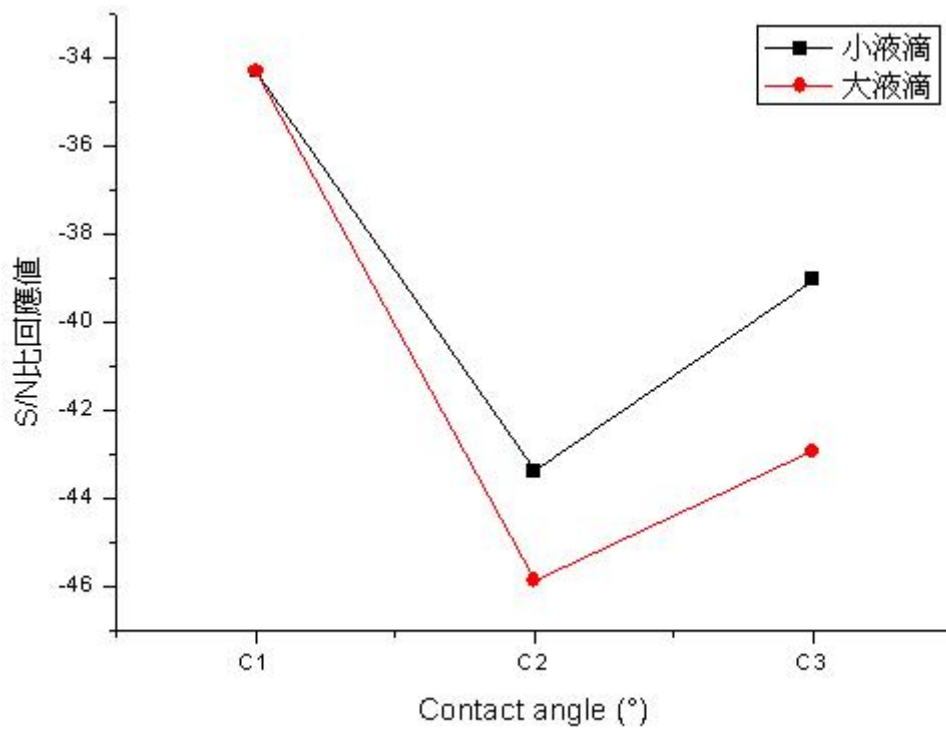


圖 4-14 表面接觸角與體積 S/N 比回應圖

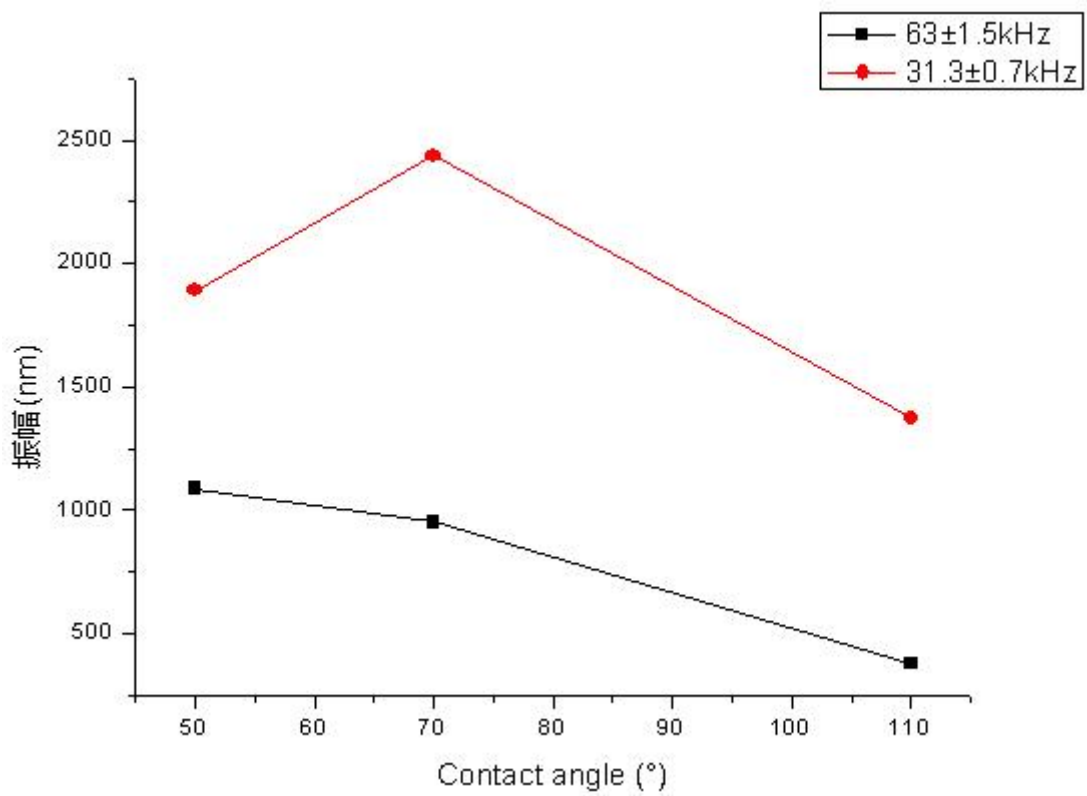


圖 4-15 振幅與對應 Case 的接觸角關係

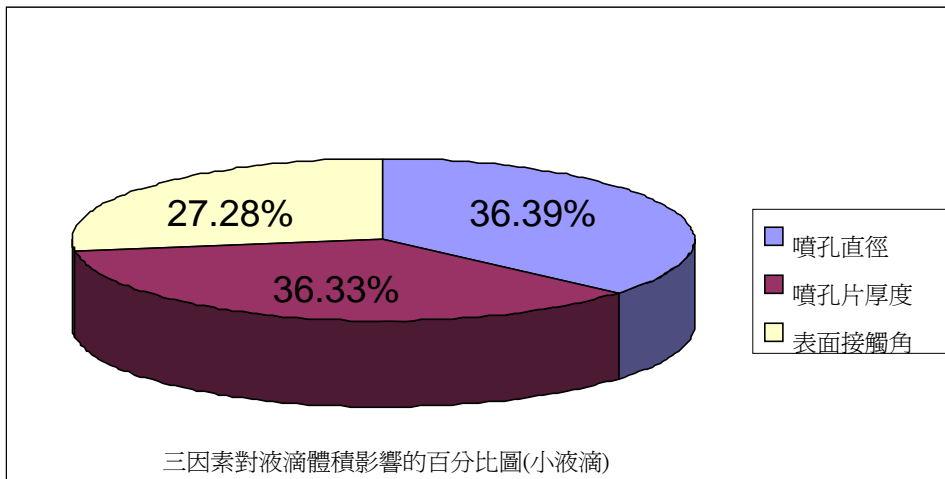


圖 4-16 三因素對液滴體積影響的百分比(小液滴)

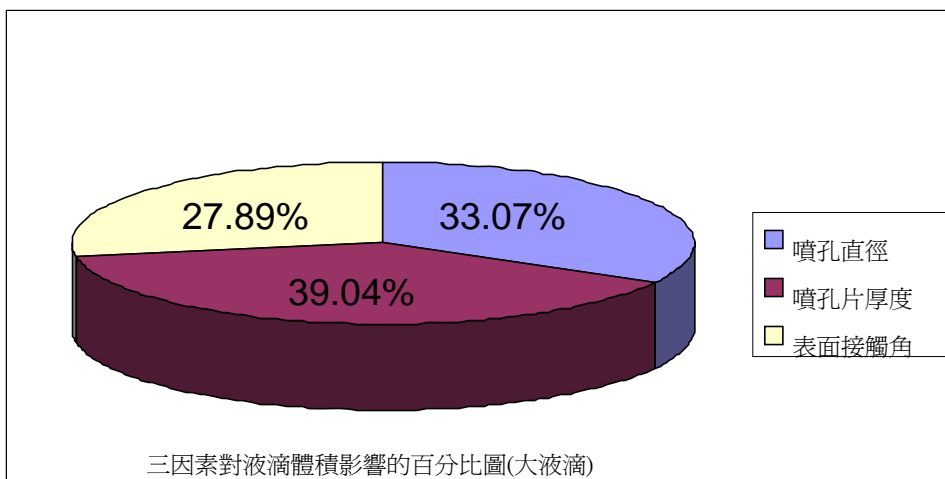


圖 4-17 三因素對液滴體積影響的百分比(大液滴)

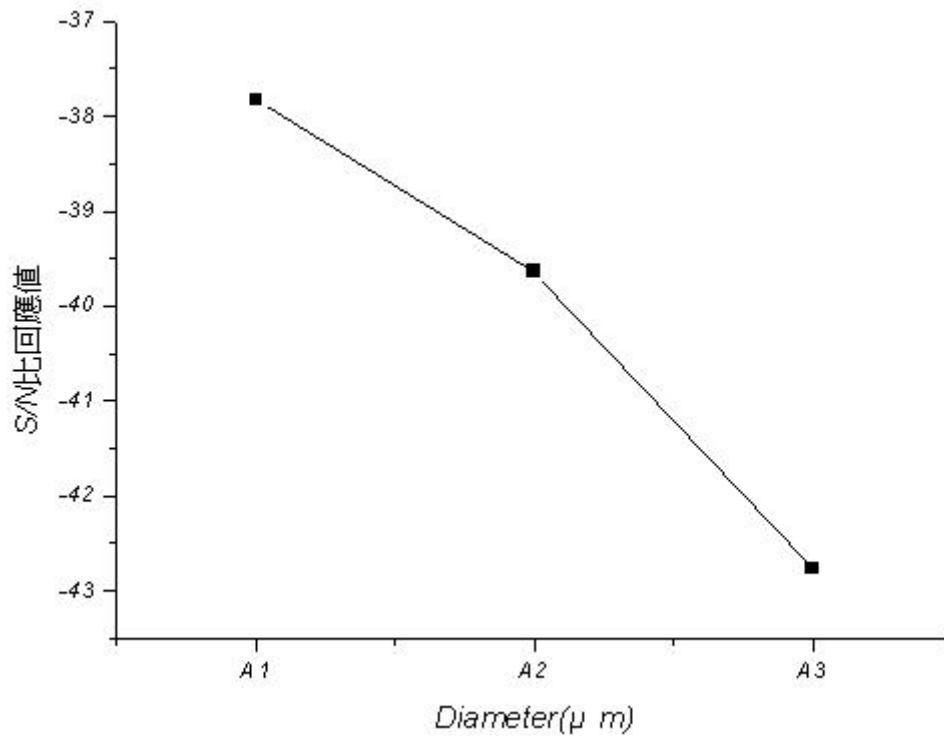


圖 4-18 噴孔孔徑與斷裂時間的 S/N 比回應圖

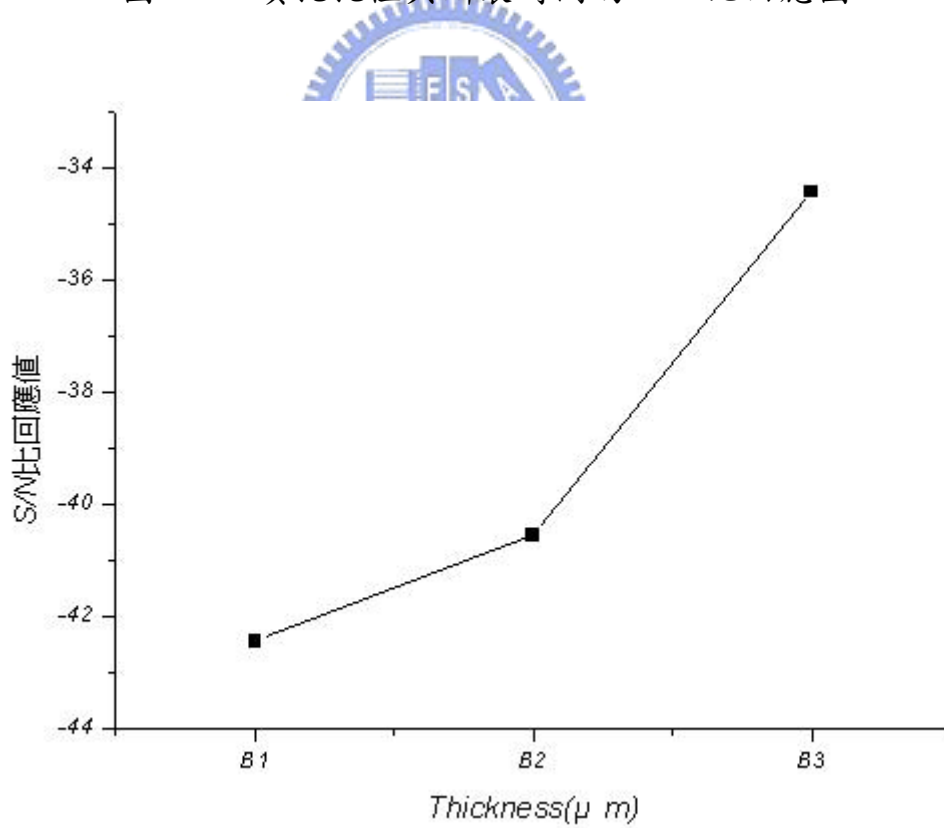


圖 4-19 噴孔片厚度與斷裂時間的 S/N 比回應圖

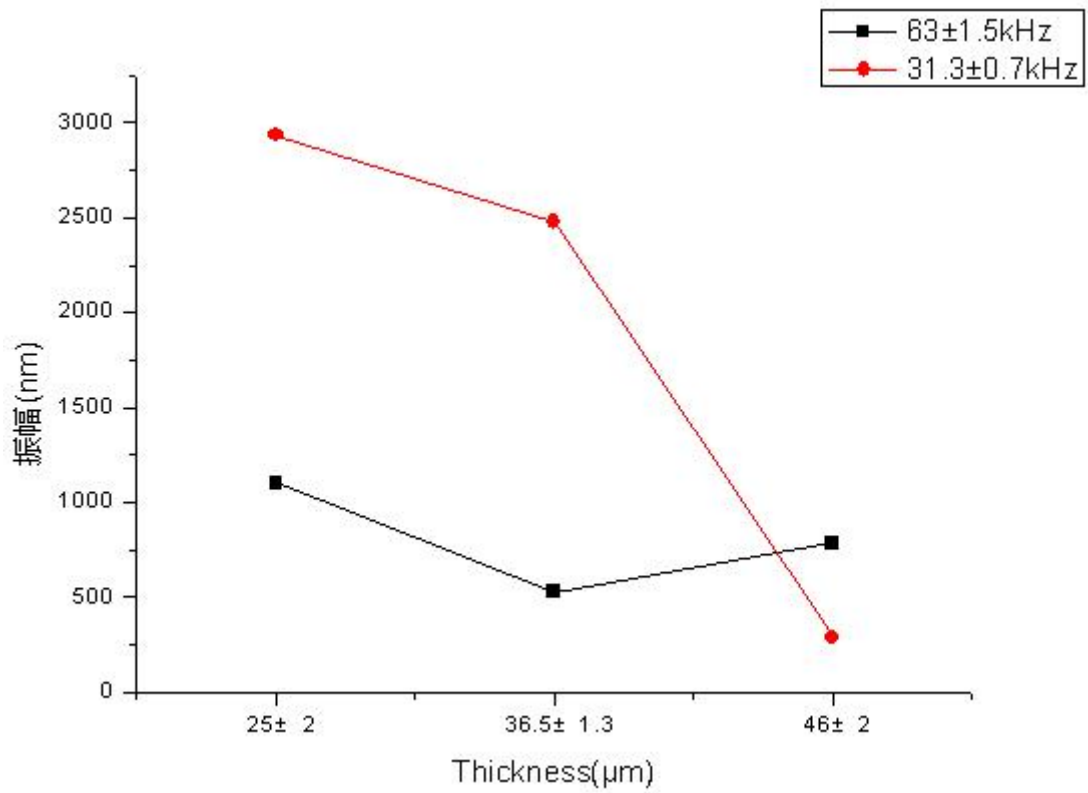


圖 4-20 振幅與對應厚度的關係

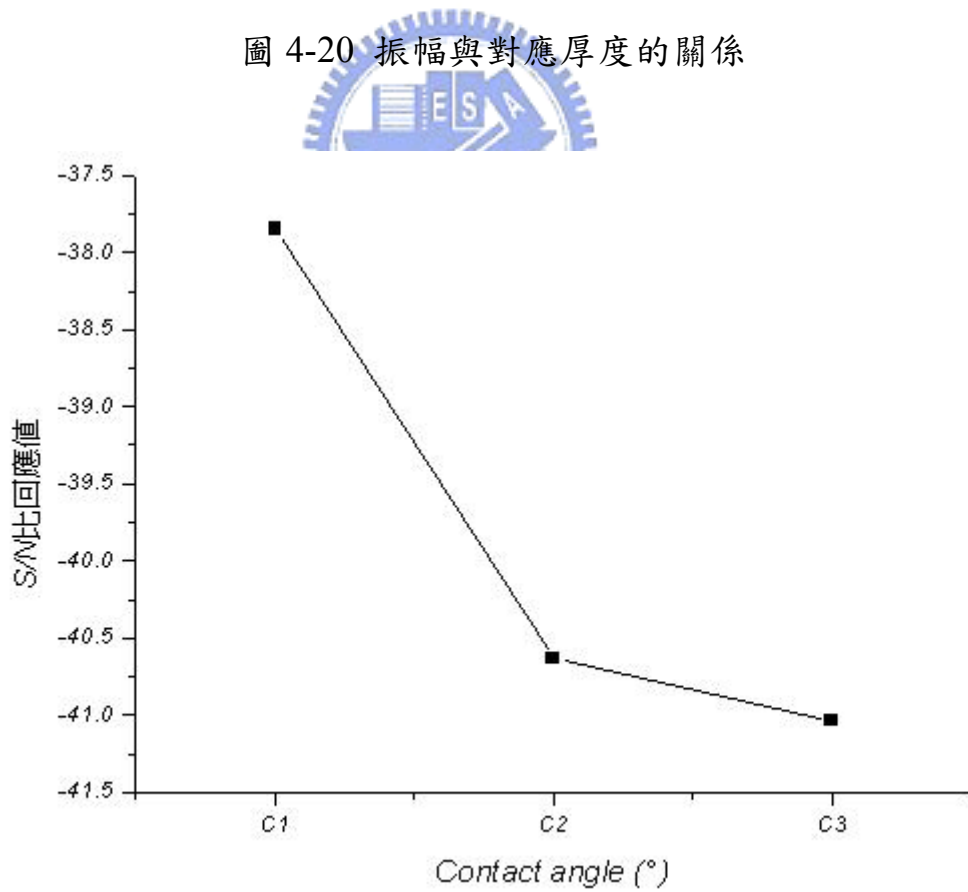


圖 4-21 表面接觸角與斷裂時間的 S/N 比回應圖

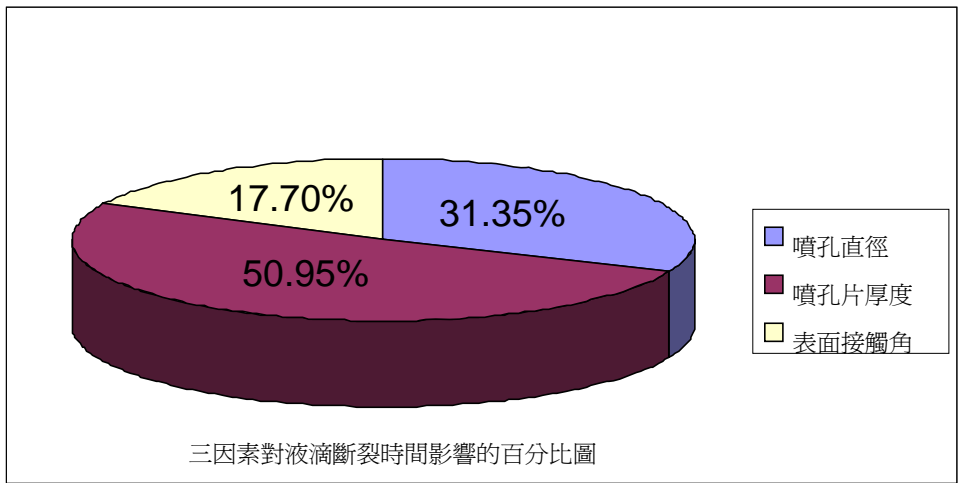


圖 4-22 三因素對液滴斷裂時間影響的百分比

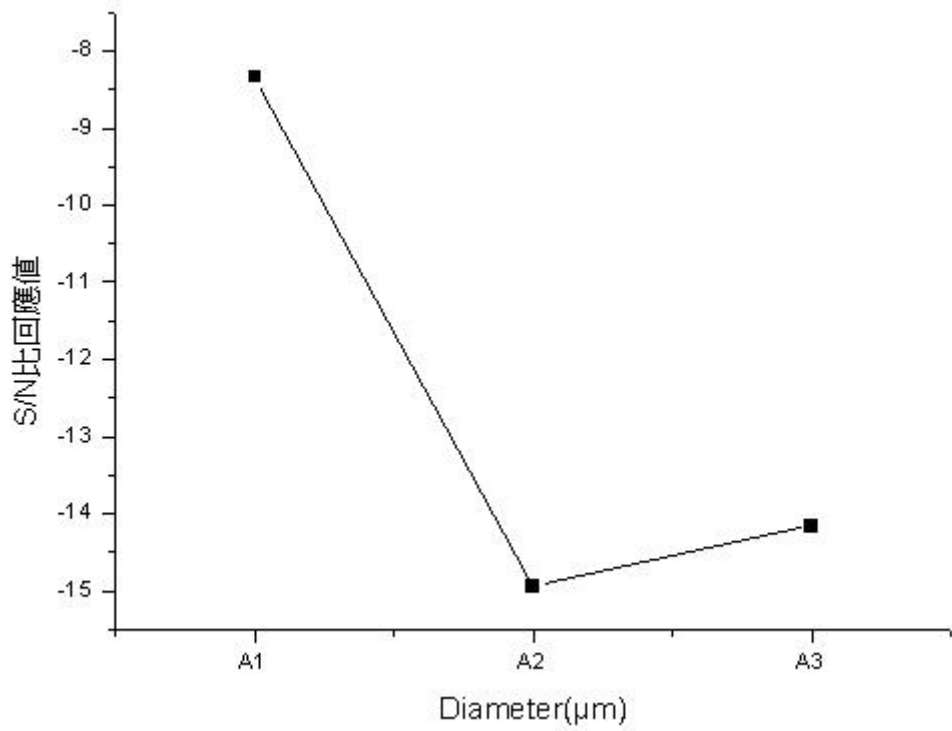


圖 4-23 噴孔直徑與液滴均勻度 S/N 比回應圖

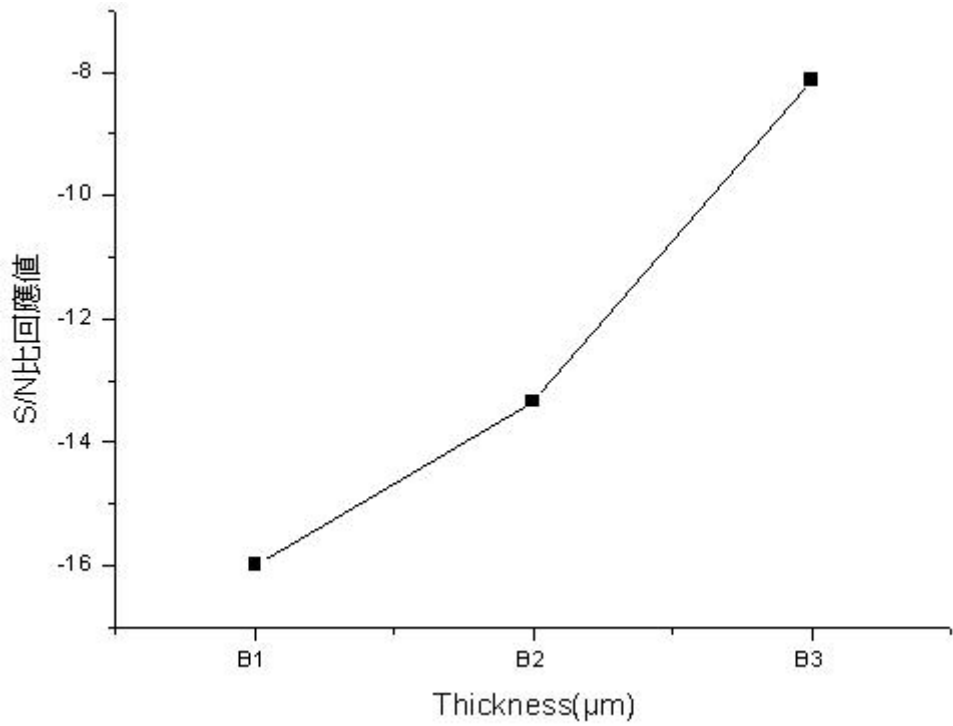


圖 4-24 噴孔片厚度對液滴均勻度的 S/N 比回應圖

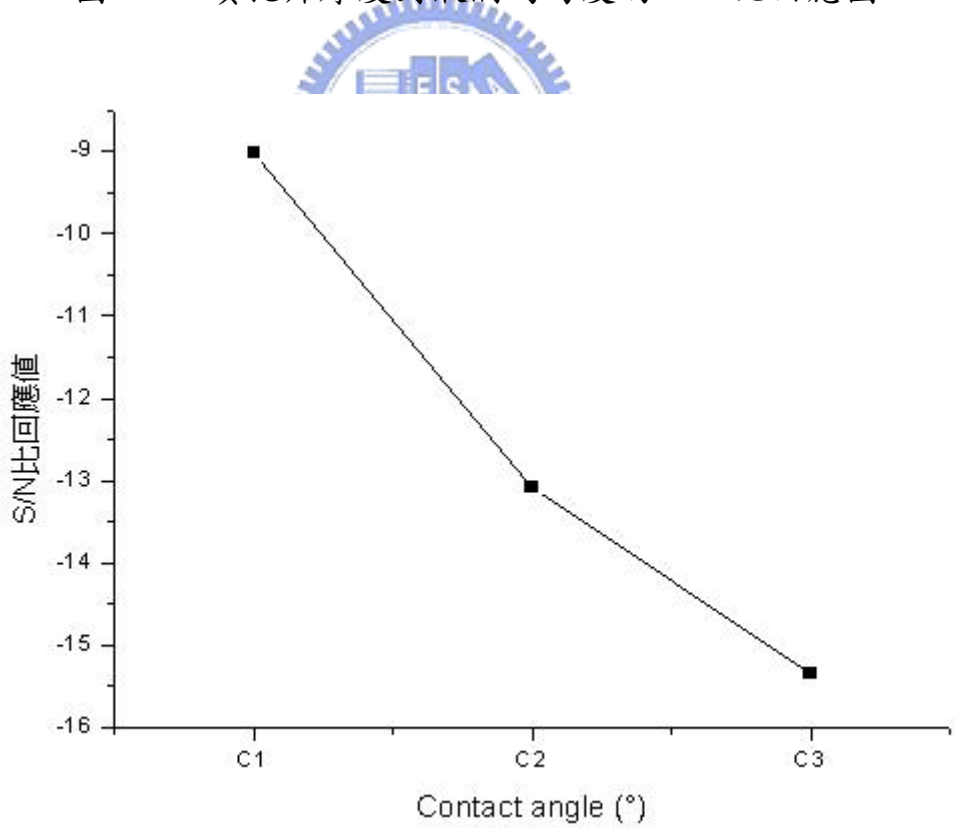


圖 4-25 表面接觸角對液滴均勻度的 S/N 比回應圖

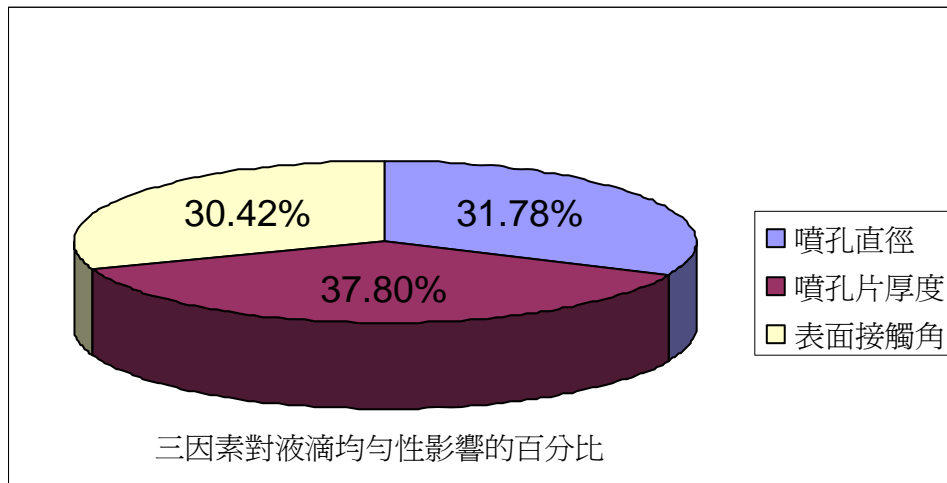


圖 4-26 三因素對液滴均勻性影響的百分比

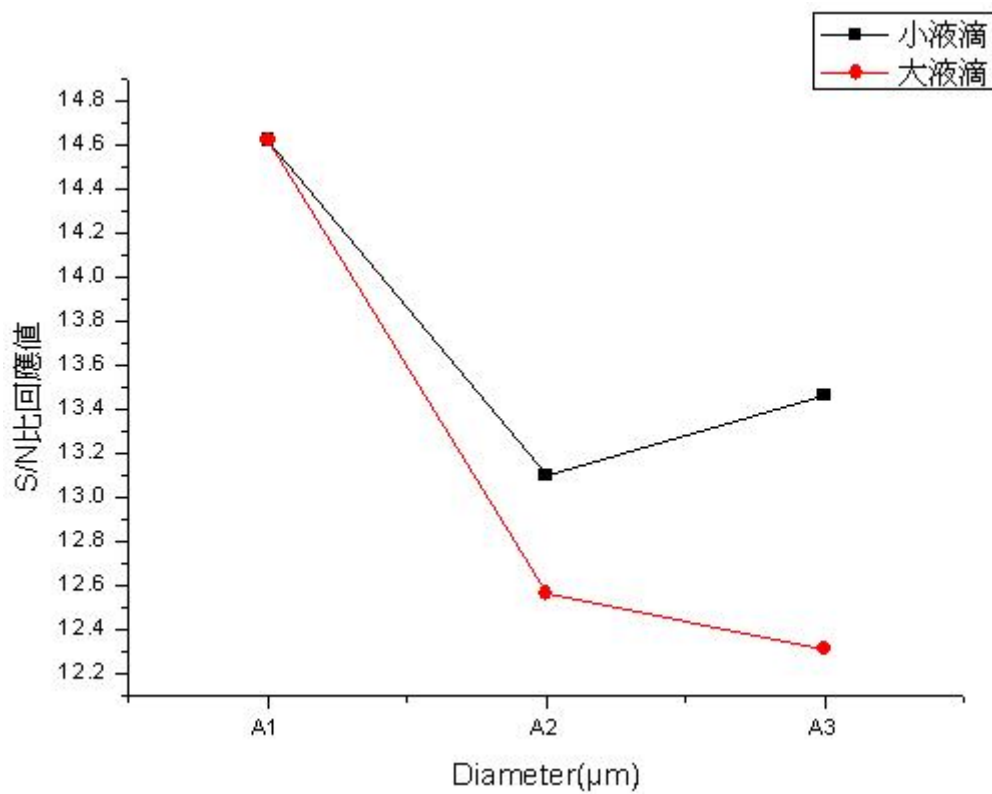


圖 4-27 噴孔直徑與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖

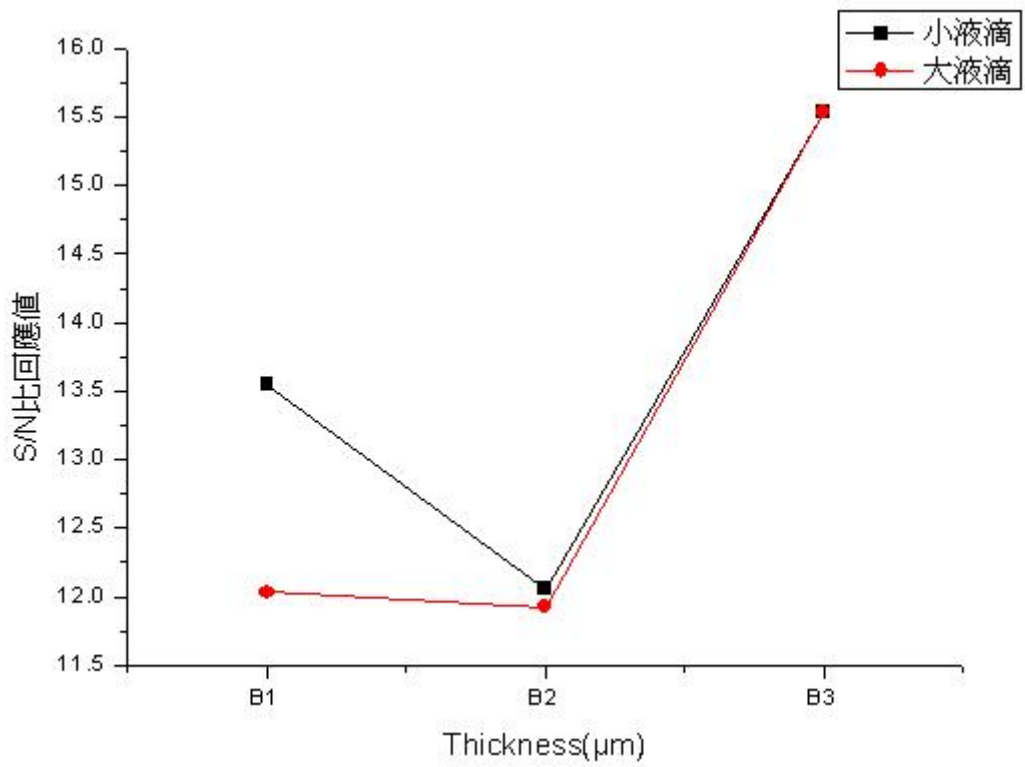


圖 4-28 噴孔片厚度與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖

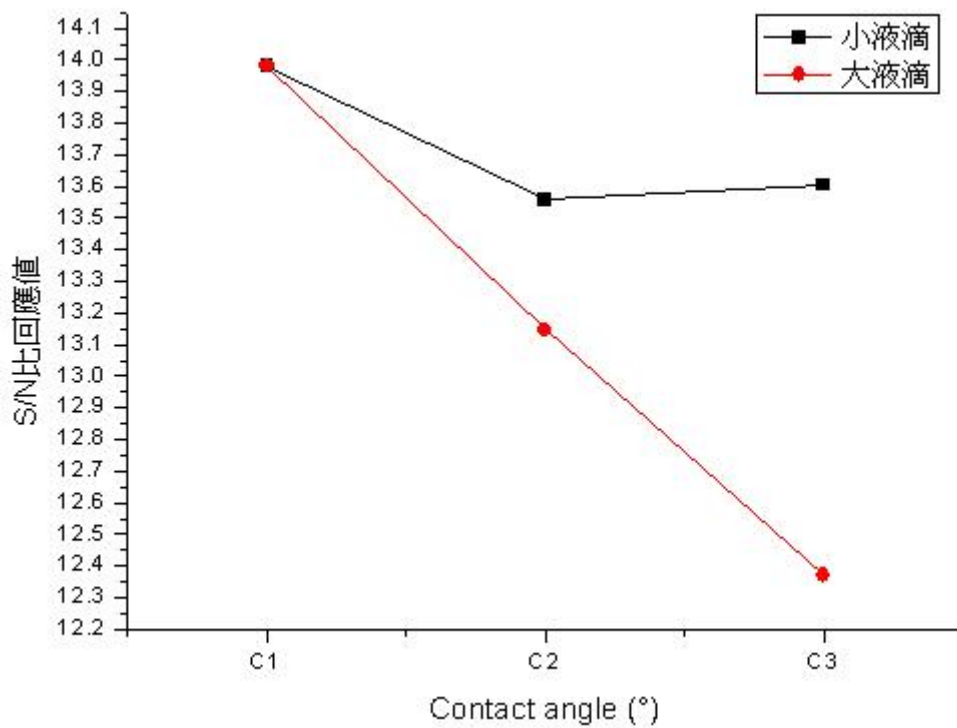


圖 4-29 表面接觸角與液滴飛行速度的 S/N 比回應圖

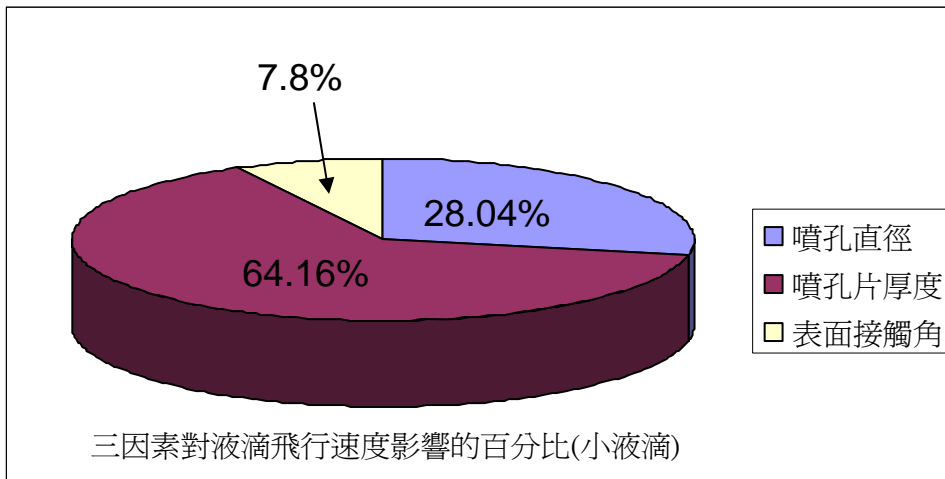


圖 4-30 三因素對液滴飛行速度影響的百分比(小液滴)

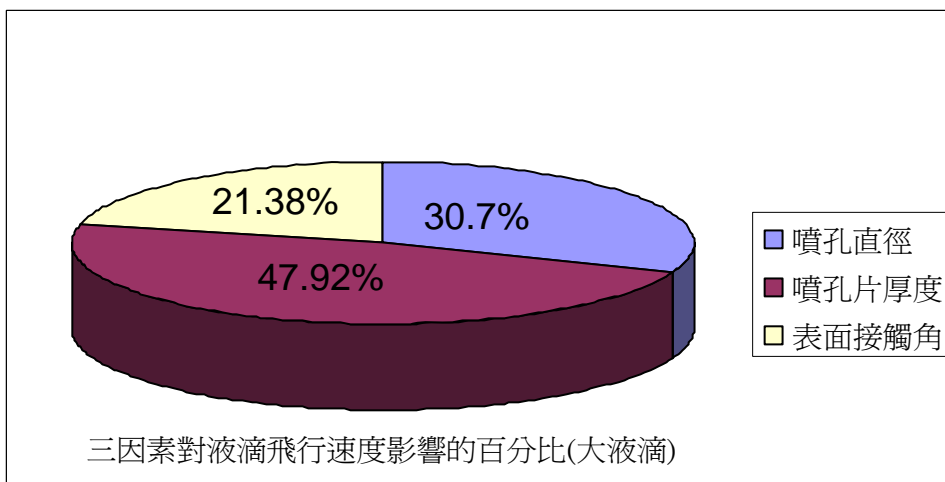


圖 4-31 三因素對液滴飛行速度影響的百分比(大液滴)

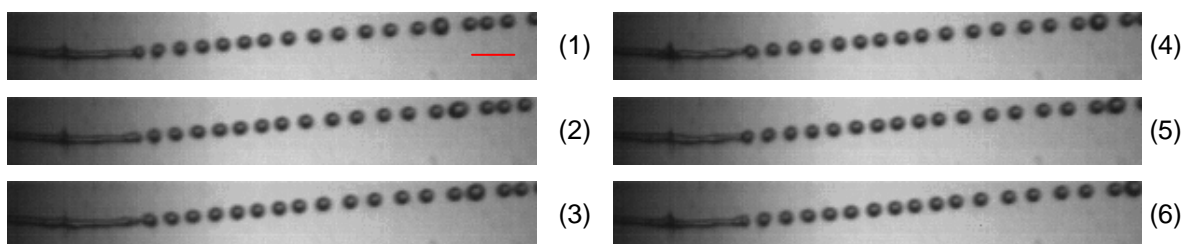


圖 4-32 Case3 在 96kHz 下以 60kHz 速度拍攝圖片

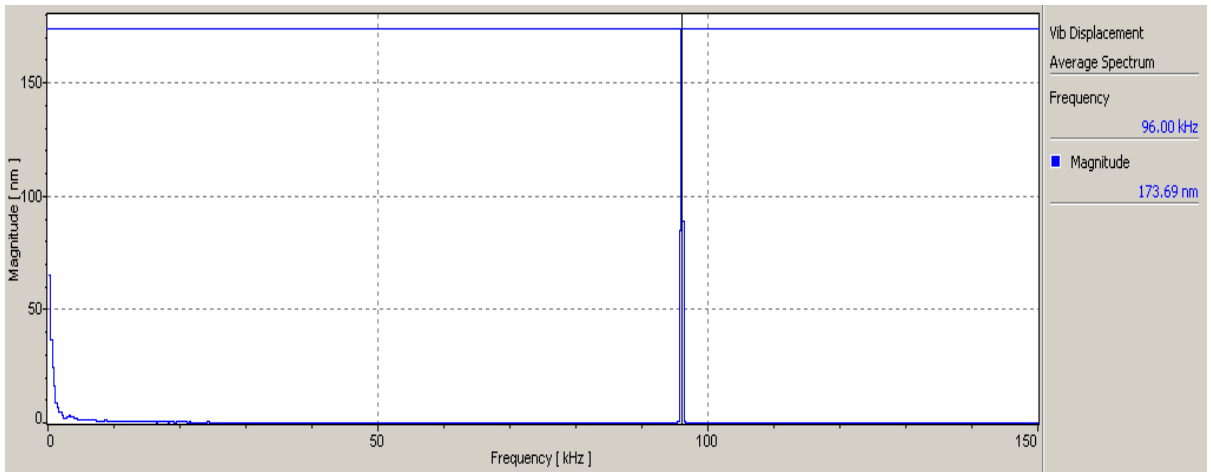


圖 4-33 Case3 於 96kHz 時的振幅

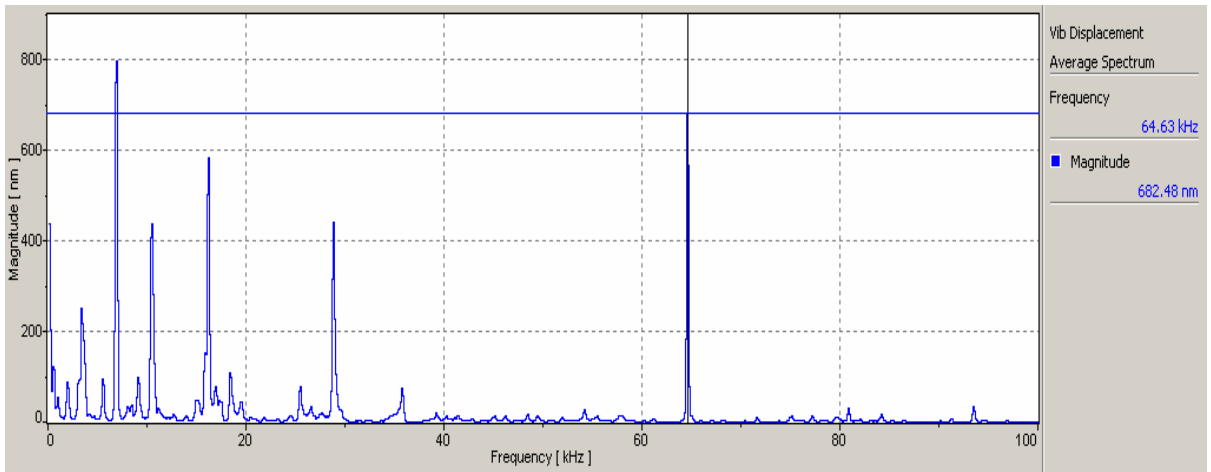


圖 4-34 Case3 於 96kHz 時噴孔片的速度

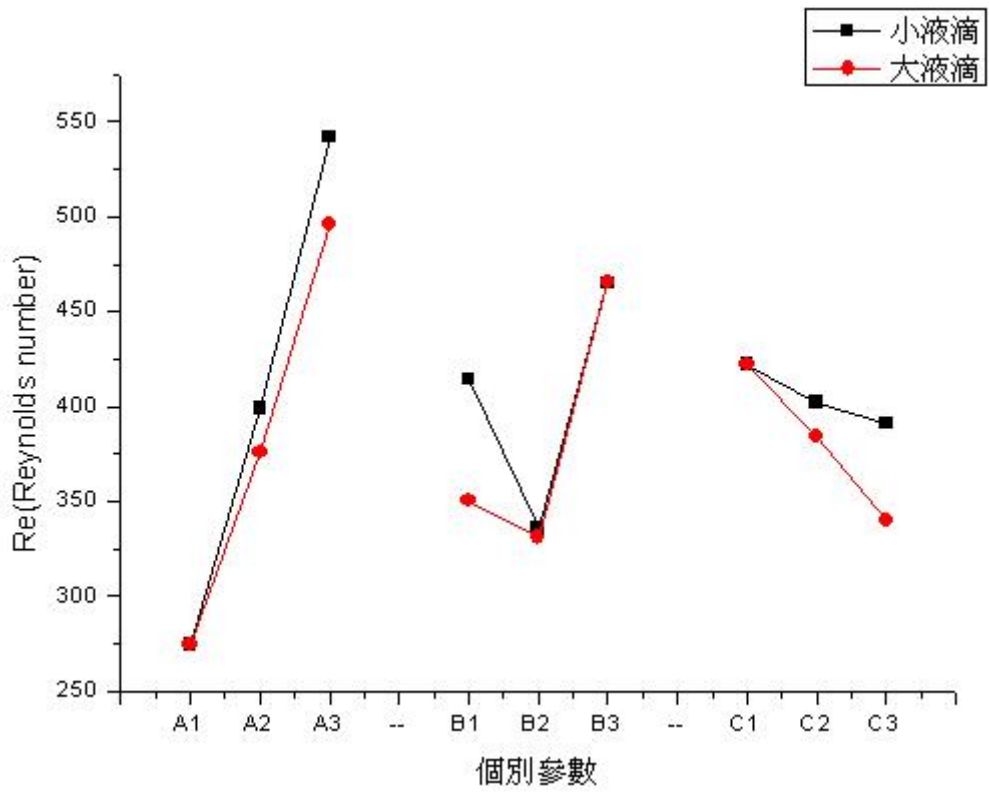


圖 4-35 三因素與 Re 關係圖

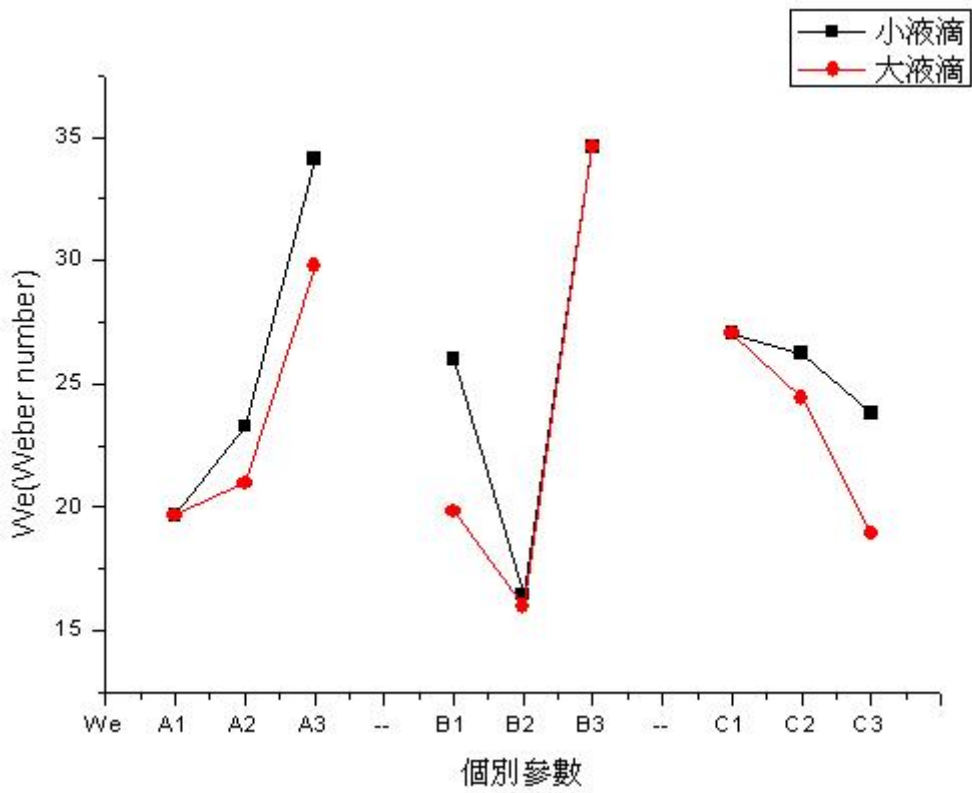


圖 4-36 三因素與 We 關係圖

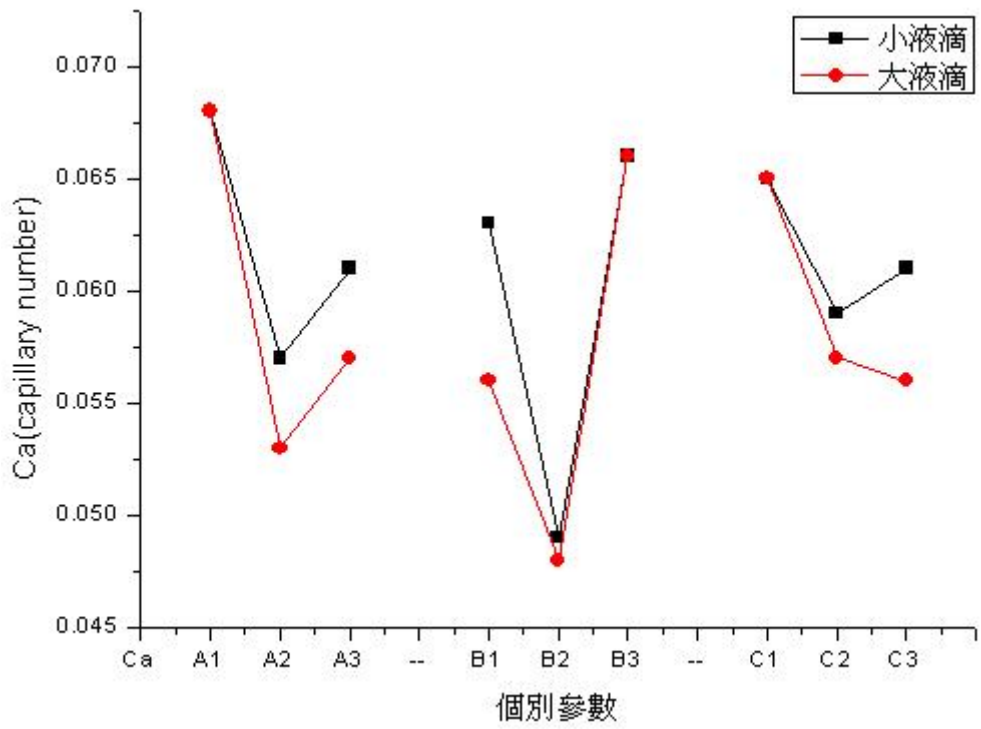


圖 4-37 三因素與 Ca 關係圖

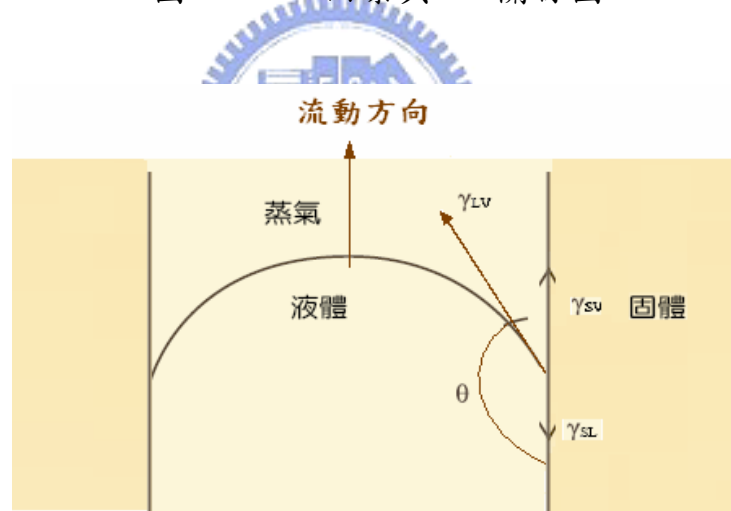


圖 5-1 慣性方向與流動方向相同