



國立中山大學機械與機電工程研究所

碩士論文

Department of Mechanical and Electro-Mechanical
Engineering

National Sun Yat-sen University

Master Thesis

以微機電麥克風之聲學震動進行精密型沖壓模具

失效偵測

Failure Prediction on Micro-stamping Mold utilizing Acoustic

Vibration Transduction via MEMS Microphones

研究生：王君敏

Chun-Min Wang

指導教授：林哲信 博士

Dr. Che-Hsin Lin

中華民國 106 年 7 月

July 2017

論文審定書

國立中山大學研究生學位論文審定書

本校機械與機電工程學系碩士班

研究生王君敏（學號：M043020036）所提論文

以微機電麥克風之聲學震動進行精密型沖壓模具失效偵測
Failure Prediction on Micro-stamping Mold Utilizing Acoustic Vibration
Transduction via MEMS Microphones

於中華民國 106 年 7 月 26 日經本委員會審查並舉行口試，符合
碩士學位論文標準。

學位考試委員簽章：

召集人 邱源成 邱源成

委員 林哲信 林哲信

委員 潘正堂 潘正堂

委員 莊承鑫 莊承鑫

委員 黃昆明 黃昆明

委員 _____

指導教授(林哲信) 林哲信 (簽名)

中文摘要

本研究提出一套新的聲學震動偵測系統檢測精密型沖壓模具失效情形，其方法為使用低成本的商用微機電麥克風模組監控連動精密型沖壓機台。精密型沖壓機台的沖壓訊號相當微弱，故以永久磁鐵將微機電麥克風模組磁吸於精密型沖壓機台模具的下模，如此一來震動訊號便可以金屬塊作為介質直接傳遞至微機電麥克風的音孔，有效阻隔高負載組件或環境噪音的干擾。接收到的震動類比訊號會以專業錄音介面轉換為數位訊號，訊號取樣率為 96 kHz 以確保在錄製過程中沖擊訊號未被略過。為了辨識精密型沖壓機的單一工作循環訊號，將蒐集到的訊號轉換為 20 Hz 到 40 kHz 的頻譜圖。工作循環訊號以視覺被辨識挑選出後，將 5 kHz 到 10 kHz 的功率譜密度疊加並轉換為分貝單位。此計算方法可增加沖壓特徵訊號的強度，而背景雜訊的強度則相對削弱，微弱的沖壓訊號可被凸顯出來以便觀察。正常負載破壞的實驗結果顯示，沖壓瞬間的訊號由主要由兩個訊號構成：撞擊訊號及撕裂訊號，由於在精密衝壓的條件中，沖壓截面的撕裂區愈小愈好，故亦可藉由撕裂訊號的成長回推沖頭的使用狀況，故沖頭的磨耗狀況可藉由訊號的組成型態判別，撕裂訊號愈大沖頭磨耗愈嚴重。在另一組使用不同精密沖壓機台的實驗中，機台在過負載的條件下進行破壞實驗，經觀察發現 25 kHz 至 30 kHz 的高頻諧波總功率和磨耗程度呈正相關，可作為後續研究參考。此論文研究的偵測系統可有效提升精密型沖壓機的加工良率，並提供一套具有普及可能性新偵測方法。

Keyword：聲學震動偵測系統、精密型沖壓模具失效、微機電麥克風、功率譜密度疊加、沖頭磨耗

Abstract

The thesis presents an acoustic detective system to continuous monitoring of micro-stamping failure utilizing low-cost commercial MEMS microphone modules. A MEMS microphone module is fixed on the bottom die plate with a permanent magnet to receive acoustic signals via metal conduction such that the tiny punch signals can be discriminated out of a noisy machining environment. A commercial audio recorder was used for recording the acoustic signals and converting the analog signals into digital signals at a sampling rate of 96 kHz. The collected signals are converted into frequency spectrum (20 Hz~40 kHz), so the signals of stamping processes can be recognized visually and picked out. The signals are then analyzed with a proposed power spectra density algorithm for the frequency between 5 kHz to 10 kHz. Therefore, background noise and low-frequency vibrations can be excluded to interfere the tiny micro-punch signal. Results show that the punch signal is constructed with a strike signal and a fracture signal during the normal load failure experiment. The strength of the fracture signal grows as the area of the fracture zone expand which also represent the defect level of the punch. Another experiment which provides over load condition to the machine shows that the total power among 25 kHz to 30 kHz is a lot associate with the defect condition as well. The developed method has the potential to predict the abnormal punches created by a defective punch pin. The new method reported in the present study has shown its potentials in Industry 4.0 applications.

Keyword : acoustic detective system 、 micro-stamping failure 、 MEMS microphone 、 power spectra density algorithm 、 defective punch pin

目錄

論文審定書	i
中文摘要	ii
Abstract.....	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
符號表	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 震動感測元件.....	2
1.2.1 加速規.....	2
1.2.2 工業麥克風.....	5
1.2.3 聲發射震動檢測.....	6
1.3 震動聲學訊號分析.....	7
1.3.1 包絡檢波分析.....	7
1.3.2 小波分析.....	11
1.3.3 聲壓.....	14
1.3.4 聲強.....	15
1.4 精密型沖壓沖切面解析.....	16
1.5 研究動機與目的.....	18
1.6 論文架構.....	19
第二章 實驗方法與架構	20
2.1 微機電麥克風.....	20
2.1.1 微機電麥克風模組製程簡介.....	22

2.1.2 微機電麥克風模組一致性測試.....	23
2.2 訊號分析與觀察.....	24
2.3 訊號頻譜繪製.....	26
2.3.1 音框分割.....	26
2.3.2 窗函數取樣.....	28
2.3.3 短時距傅立葉轉換.....	30
2.4 功率譜密度疊加.....	32
2.5 精密型沖壓系統工作循環檢測.....	33
2.6 量測位置比較.....	36
2.7 系統架設與實驗設備.....	39
第三章 實驗結果與討論.....	41
3.1 板材厚度比較.....	41
3.2 正常負載破壞檢測.....	44
3.3 過度負載破壞檢測.....	49
第四章 結論與未來展望.....	61
4.1 結論.....	61
4.2 未來展望.....	62
參考文獻.....	63
自述.....	69

圖目錄

圖 1-1 壓電式加速規內部結構示意圖	4
圖 1-2 麥克風偵測系統隔音腔	6
圖 1-3 包絡分析法	9
圖 1-4 單點破壞滾珠螺桿包絡運算	10
圖 1-5 小波分析檢測滾珠螺桿	13
圖 1-6 沖壓變形示意圖	17
圖 1-7 沖切斷面解析	17
圖 1-8 論文架構組織圖	19
圖 2-1 震動波於不同介質的能量傳遞	21
圖 2-2(A)微機電麥克風結構圖 (B)微機電麥克風頻響圖	21
圖 2-3 微機電麥克風模組製程示意圖	22
圖 2-4 麥克風模組一致性測試	23
圖 2-5 訊號分析示意圖	25
圖 2-6 頻譜轉換計算步驟	26
圖 2-7 同一段訊號以不同音框長度計算	27
圖 2-8 漢明窗取樣	29
圖 2-9 頻譜轉換	31
圖 2-10 功率普密度計算	33
圖 2-11 精密沖壓循環之曲柄滑塊示意圖	34

圖 2- 12 工作循環計算結果	35
圖 2- 13 單一循環的頻譜圖及功率譜密度圖	36
圖 2- 14 精密型沖壓機單一循環工作步驟分解圖	36
圖 2- 15 微機電麥克風模組固定於精密型沖壓機四處	37
圖 2- 16 不同量測位置的功率譜密度圖	38
圖 2- 17 微機電麥克風磁吸於下模板之示意圖及實體照片	39
圖 2- 18 機電麥克風震動偵測系統架設示意圖	40
圖 3- 1 不同厚度的不鏽鋼板材沖擊結果	42
圖 3- 2 沖壓孔內側截面 SEM 觀察圖	43
圖 3- 3 破壞檢測實驗於各階段之功率譜密度圖對照沖壓孔 SEM 觀察圖	45
圖 3- 4 取樣訊號資料點	46
圖 3- 5 各次沖壓撕裂訊號資料點	47
圖 3- 6 沖頭精度偏移	48
圖 3- 7 沖壓後不鏽鋼金屬板材實體圖	49
圖 3- 8 精密型沖壓機台側視圖及內部上視圖	50
圖 3- 9 第一次加工循環功率譜密度圖	51
圖 3- 10 沖頭 A 第一個沖壓孔 SEM 圖	52
圖 3- 11 沖頭 B 第 18 個沖壓孔 SEM 圖(沖頭 A 斷裂後第一個沖壓孔).....	52
圖 3- 12 沖頭 A 各階段沖壓孔截面 SEM 圖	54
圖 3- 13 沖頭 A 各階段沖壓行程頻譜圖	55
圖 3- 14 各個頻率範圍的功率譜密度圖	56

圖 3- 15 沖頭 B 各階段沖壓孔截面 SEM 圖	57
圖 3- 16 沖頭 B 各階段沖壓行程頻譜圖.....	58
圖 3- 17 沖頭 B 加工初期沖壓循環之功率譜密度圖(5 kHz~10 kHz)	59
圖 3- 18 各次沖壓循環損壞訊號區間總功率	60

符號表

A ：振幅

a ：尺度參數

b ：時間變換參數

d_o ：損壞嚴重性

$d(t)$ ：損壞程度

$e(t)$ ：加速規量測訊號的衰弱方程式

f ：頻率

f_m ：待測物受加速規影響的震動頻率

f_s ：待測物原始的震動頻率

h ：兩麥克風的距離

I ：聲音強度

L_p ：聲壓級

M ：待測物的質量

m_a ：加速規的質量

P ：聲壓

\hat{P} ：有效聲壓

P_1 、 P_2 ：兩麥克風接收到的聲壓

P_o ：參考聲壓，通常為 20 μPa

P_{stat} ：靜壓力

P_{total} ：總壓力

$q(t)$ ：負載隨位置分布的方程式

T_d ：脈衝訊號發生週期

T_e ：衰弱期的時間常數

t ：時間

v ：音波速度

$W_x(a, b)$ ：小波分析

$x(t)$ ：暫存訊號

$Y_\psi(\omega)$ ： $\psi(t)$ 的傅立葉轉換式

$\frac{\partial P}{\partial x}$ ：聲音壓力梯度

$\delta(t)$ ：脈衝函數

ε ：負載分布因子

θ_{max} ：負載區最大延展位置

$\psi_{a,b}(t)$ ：母小波

$\psi_{a,b}^*(t)$ ： $\psi_{a,b}(t)$ 的共軛複數

ρ ：介質密

第一章 緒論

1.1 研究背景

自德國政府於 2011 年提出工業 4.0 計畫後，各國亦開始推出類似的工業改革政策，台灣便於 2015 年提出生產力 4.0 計畫，希望能追上第四次工業革命的腳步。工業 4.0 的概念即利用物聯網(IoT)結合智慧機械(IM、IR)建立網宇實體系統(Cyber-Physical System)[1]，而後整合雲端計算及大數據分析以達成高度自動化生產，此機制能使生產線的彈性提高以符合「最大客製化」、提高生產速度以及大幅提升產品良率。為了實現智慧工廠的目標，首先必須掌握機台運作情形並瞭解刀具、模具的磨耗狀況，以便於模具過度磨耗影響生產前即時更換，進而掌握刀具壽命且降低損品成本。此時，於獲取實體端製程資訊的過程中，感測器便扮演十分重要的角色。

工具機運作時機台內部的零件交互傳動、摩擦產生大大小小的震動，這些震動反映著當時機具本身的狀態，由此，在幾十年前開始震動檢測便一直被廣泛應用於傳統機械檢測。然而，這類機械震動檢測對象多為機台的輪軸、齒輪箱...等高負載組件而非模具本身，且由於震動模態會因機台的組成方式而異，使得震動檢測高度仰賴操作人員的技術及經驗難以量化。隨著精密型產業的發展，產品製造走向精緻、微小化，加工機的精度大幅提升使得損壞預測變得更不容易。

本研究以震動檢測的基礎提供聲學震動檢測的方法，希望提供更完整的頻譜資訊以更細微地分析機台運作的狀態，並以模具做為檢測目標。為了阻隔高負載組件及周遭環境影響，本研究選用微機電麥克風作為感測元件緊密貼附於待測物表面。微機電麥克風為現有高度規格商業化的產品，不僅成本低廉，其小體積的特色亦使微機電麥克風能簡單地裝置於任何想要的位置，故為彈性相當高的感測元件，配合現代高客製化的生產需求，能簡單地蒐集到大量且多樣的加工數據，完成工業 4.0 的願景。

1.2 震動感測元件

在工具機運作過程中，機台內部的零件互相傳動、碰撞、摩擦產生大大小小的震動，這些震動直接反映機具當下的運作狀態，因此震動訊號是最能豐富表現機台狀況的資訊。震動訊號主要由三個參數表現：振幅、時間及相位(Phase)，依據不同機台條件又可將參數表現方式轉換，一般振幅以位移、速度及加速度三種單位表現，由於震動感測器多輸出電流訊號，故分析上多使用電壓或功率表示，下面將針對幾種傳統上常使用的震動感測器作介紹。

1.2.1 加速規

加速規是在進行震動量測時最常使用到的震動量測儀器，加速規主要用來偵測物體震動瞬間的加速度及位移，其量測到的加速度數值受地球重力所影響。加速規可分為壓電式、壓阻式及電容式，其中壓電式最常被應用於機台量測中[2]。壓電式及壓阻式加速規多利用複合壓電材料或壓電水晶(eg. 電氣石、石英)作為機械能轉換為電能的基質，其結構如圖 1-1 所示。當震動產生時，質量塊(Seismic Mass)會隨震動施加外力給壓電材料(Piezoelectric Material)，壓電材料產生形變其電阻值因此發生變化而有電流出現，其形變及電流值在壓電材料的彈性區間內和質量塊施加的外力成正比，此時可依據牛頓第二運動定律將外力反除質量塊的質量推出當時的加速度，而彈簧的作用為平衡質量塊以避免施加過多外力到壓電材料。由於加速規量測的震動值受質量塊擺動所影響，故施加加速度於加速度軸的垂直面時靈敏度會大幅降低[3]。

加速規量測高負載且具有重複性運動的機台零件時，有相當好的靈敏度及穩定性，故常被用來量測機台的輪軸[4]、渦輪[5]...等組件。1977 年 Sunnersjö 及其團隊就將加速規裝置於滾珠螺桿(type N206)的基座進行量測，該滾珠螺桿負荷 75 kg 以低速運作。滾珠螺桿的震動是由轉子不斷變換位移及負載的變動柔度(Compliance)所造成的，該研究以量測結果配合模擬，並參考前人的針對滾珠螺

桿的形變及位移計算，對滾珠螺桿的週期性震動建立震動計算模型[6]。

由於加速規的量測主要受質量塊移動的方向所影響，其方向又受重力所牽引，在量測時，待測物的位置和三軸定義非常重要，故加速規多用來量測物體的表面震動[7]，也由於此特性加速規也常被拿來搭配其他感測元件使用。2014 年伊朗學者 Safizadeh 及 Latifi 將壓電式加速規及荷重元(Load Cell)裝置於兩組 V 型皮帶傳導的滾珠螺桿上，其中一組滾珠螺桿透過腐蝕處理製造出損壞對照組。經由頻譜轉換...等計算與統計過後，得到荷重元擅於辨別正常狀態及損壞狀態；而加速規對損壞位置的敏感度較佳的結論[8]。該篇研究雖利用加速規僅對表面震動敏感度較高的特性判別出滾珠螺桿的損壞位置，但也指出加速規對於損傷較小的滾珠螺桿幾乎無判別能力。本論文的量測目標為精密型沖壓機的沖頭，該物件本身的尺寸就相當小，即便發生斷裂也為相對傳統機台來說很小的損傷，故在此對加速規的靈敏度產生疑慮。

經由上述資訊可知加速規輸出的訊號和質量塊擺動有很大的關係，加速規本身的重量會影響震動訊號傳遞的準確性並影響精度[9, 10]，故選擇適當重量的加速規是非常重要的。一般而言，加速規的重量必須小於待測物重量的 10% [11]，在計算時加速規本身的重量才能被忽略，如下式所示，

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{M}{M+m_a}} \dots\dots\dots(1-1)$$

f_m ：待測物受加速規影響的震動頻率

f_s ：待測物原始的震動頻率

M ：待測物的質量

m_a ：加速規的質量

Baharin 的研究團隊便在 2009 年針對此問題提出研究，該研究的待測物為一端夾持固定的鋁合金薄板，薄板質量 447 g、規格為 240 mm × 230 mm × 3 mm，而加速規的質量從 5.84 g 增加到 45.84 g 在三個不同的位置進行量測。依據該研究的分析，加速規若至於震動波節點線上，加速規本身的重量便不會影響結果；但

當加速規置於非波動節點位置時，量測結果則會隨加速規重量的增加而有相當大的變異[12]。該研究中加速規重量的最高值約為待測物重量的 10%，在不打破挑選規則的條件下，加速規的重量依然有可能影響量測結果。本論文中所使用的沖頭質量比上述研究的鋁合金薄板要小得多，若在該條件下加速規重量依然能影響量測結果，正常尺寸的加速規恐怕不適用於此論文。然而，小型尺寸的 MEMS 加速規大多由單一懸臂樑組成，懸臂樑多為壓電材料接收震動後，會產生形變並改變其阻抗值產生電流傳出，原理和一般加速規類似。雖然學界上 MEMS 加速規一直在發展進化，但在商業上能直接購買使用的 MEMS 加速規容易受環境及線材影響，導致 MEMS 加速規在實際使用時靈敏度較傳統加速規低，又在本論文的實驗中，感測器僅能裝置於精密沖壓模具外部而非直接接觸沖頭，無論是 MEMS 加速規還是傳統加速規，裝置位置皆影響基準的建立以及感測各軸震動的靈敏度，故在本論文中不考慮加速規作為感測器。

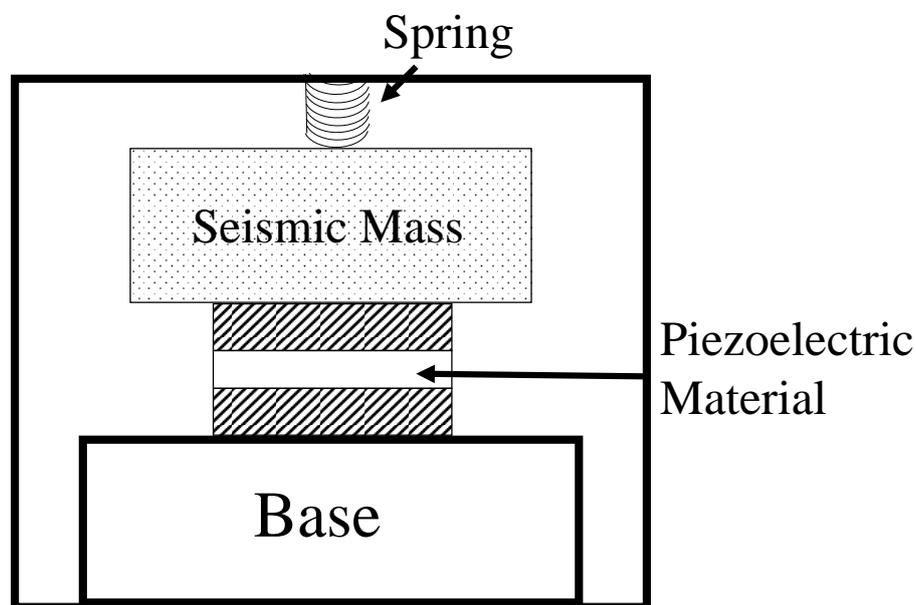


圖 1- 1 壓電式加速規內部結構示意圖：質量塊會隨震動施加外力給壓電材料，壓電材料產生形變其電阻值因此發生變化而產生電流輸出。

1.2.2 工業麥克風

麥克風主要分為動圈式及電容式兩種類型，動圈式麥克風由內部振膜接收外來聲波，聲波牽引振膜震動帶動線圈造成磁場變動，而後產生感應電流輸出[13]；電容式麥克風則是由內部電容的其中一端極板接收訊號，該極板通常為金屬薄膜，聲波帶動該極板產生震動改變電容值產生電流。一般來說，電容式麥克風具有較廣的頻響範圍及較高的靈敏度，故在檢測時多使用電容式麥克風接收聲學訊號。

一般認知上聲音是由空氣傳遞且頻率在人耳接受範圍內，而震動是由固體傳遞的波動，但事實上震動及聲音乃一體兩面，聲音即由一系列的震動所組合而成，故兩者的基本原理是一致的。於感測元件設計上來說，震動訊號主要量測方式為待測物於震動瞬間促使元件內懸臂樑晃動產生電流輸出，且主要蒐集資訊為加速度及位移量；聲學訊號主要量測方式則為待測物震動產生波動促使內部振膜波動，其主要蒐集資訊為波動產生的聲壓。1982年 Ananthapadmanaban 的實驗團隊設計一個聲音檢測實驗，他們利用馬達使一個表面不平整的圓盤以非平衡轉動的方式摩擦一個圓周 26 mm、長 8 mm 的小型球軸承，並以電容式麥克風收音分析，藉此了解不平整表面所產生的滑動及滾動震動訊號。結果顯示整體的噪音訊號會隨圓盤表面的粗糙度增加而放大，而圓盤接觸摩擦造成的訊號雖然容易被系統覆蓋，但若依據分離的頻率作分析仍可被辨識出[14]，此實驗顯示聲學訊號應用於檢測系統的可能性。隔年日本學者 Igarashi 的研究團隊將三顆電容式麥克風擺放於環上有凹痕損傷的滾珠螺桿周圍，並裝置一個加速規於滾珠螺桿上蒐集震動訊號，其結果顯示三個不同位置的麥克風接收到的訊號亦有所差異，三者皆能判依聲壓判別損耗程度，但和加速規蒐集到的震動訊號相比仍然偏弱[15]。上述研究及其他多篇研究在進行麥克風檢測實驗時，皆特別設計隔音腔將待測物及電容式麥克風包覆[16-18]，如圖 1-2 所示。由此可知麥克風與待測物間的空氣間隔為檢測時的一大考驗，由於難以界定存在於空氣介質中的噪音來源，即便利用訊號處理進行濾波也難以根除，即便上述實驗中所使用的隔音腔能稍稍改善噪音的影

響，卻也因為隔音腔的設計使得電容式麥克風的偵測彈性大幅降低。

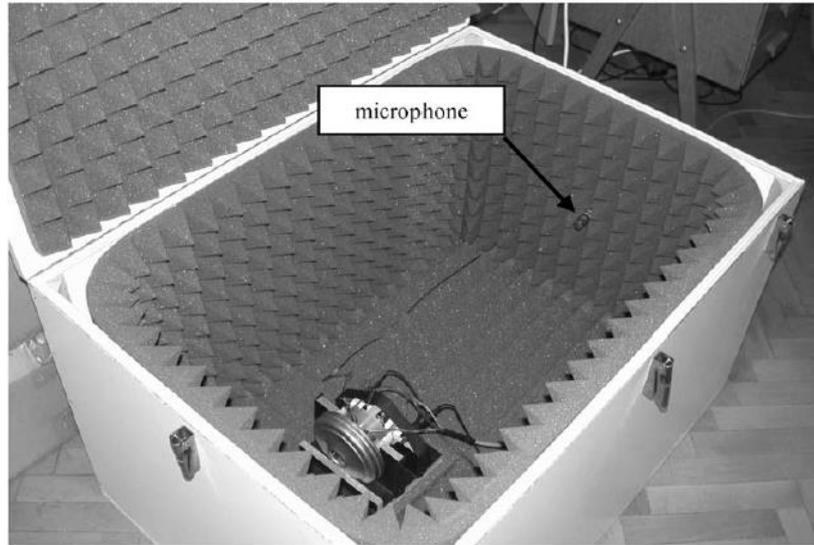


圖 1-2 麥克風偵測系統隔音腔：隔音腔將待測物及電容式麥克風包覆，以阻隔環境噪音。[19]

1.2.3 聲發射震動檢測

聲發射(Acoustic Emission)是指材料或結構受應力發生形變或破裂，傳遞出應力波藉以釋放應變能的現象[20]。聲發射感測器通常為單一指向性的壓電傳感器，該傳感器以壓電材料(通常為陶瓷)薄膜直接碰觸待測物表面接收其應力波，而後產生電流輸出[21]。由於應力波屬超音波動，其頻率多遠高於機械震動及噪音且強度極其微弱，故一般聲發射傳感器所能接受的訊號頻率約介於 20 kHz 至 400 kHz 或更高，頻率範圍依量測材料調整[22]。

聲發射震動分析檢測已在業界中被廣泛使用[23]，Iwata 及其研究團隊在 1977 年首次驗證聲發射分析於工具損壞檢測的可能性，該團隊提出聲發射的功率頻譜在超過 350 kHz 時會隨工具磨耗程度增加，而聲發射的總計值與工具的狀態有很大的關係[24]。而後，2006 年 Al-Ghamd 的研究團隊利用壓電型聲發射感測器及加速規各別感測不同損壞程度的滾珠螺桿，藉以比較震動訊號及聲發射訊號的震測效果，結果顯示聲發射感測在各方面的靈敏度都較震動訊號來得高，且聲發射訊號能準確地指出滾珠螺桿的損耗程度[25]。2011 年 Gutkin 的實驗團更

藉由聲發射傳感器量測碳纖維強化複合材(CFRP)中的微型破壞，並建構出多組破壞模組訊號[26]。由上述研究可知，聲發射檢測技術在大至機台檢測、小至材料微型破壞[27]都有很相當良好的效果。

由前段敘述可看出聲發射訊號檢測的發展成熟度相當高，但在近年的工具機震動檢測中仍有許多研究人員選擇加速規做為檢測工具[28]而非發射檢測器。有兩個原因造成此結果：一、在傳統加工產業中，機台上的小型損傷並不影響產品需求精度，故以加速規做為檢測元件便足以應付。二、聲發射技術所使用的感測器單顆要價約 100-300 美金不等，更別提訊號收錄儀器、前置放大器...等開銷。對於產品及機台不斷在變換的加工環境來說，這樣的檢測成本過高以至於無法普及，甚至連感測器製造商都不多，故聲發射檢測多在航太、煉油廠...等這類高危險、高精度的場合使用。

1.3 震動聲學訊號分析

1.3.1 包絡檢波分析

包絡檢波(Enveloped Detection)為常使用於滾珠螺桿及齒輪箱的震動檢測方式，此方法適用於具有連續性震動機具。一般而言，具有連續性震動的機具如：滾珠螺桿，其元件基礎頻率表現會和該系統的轉動速度有關[29, 30]，當元件間摩擦時通常會伴隨產生基礎頻率整數倍的諧波(Harmonic)，其中磨耗的元件與其他元件摩擦時會產生結構性共振，此時會產生高頻諧波使原本即存在的高頻諧波振幅大幅提高，故高頻諧波的振幅表現與元件磨耗的程度高度相關[31]。以上述特性作為基礎，機台震動訊號藉由帶通濾波器(Band Pass Filter)選定頻率範圍，其中最低截止頻率(Low Frequency Cut Off)要高於元件基礎特徵頻率，再將基礎頻率分布在給定頻率範圍中的諧波以數學方法疊加而成，其數學方法隨檢測機具而有些許差異，最後將訊號以傅立葉轉換為二維頻譜，此過程即為包絡檢波，如圖 1-3 所示。以單點破壞的滾珠螺桿運算模型為例[32]，當損壞元件和其他正常

元件接觸摩擦時，損壞訊號會以短而強的脈衝訊號形式出現，並依損壞位置及螺桿轉速週期性發生，以 $\delta(t)$ 表示。其中損壞訊號會受損壞程度的嚴重性 $d(t)$ 、損壞位置 $q(\theta)$ [33]、震動振幅 $a(t)$ [34]以及訊號傳遞時衰弱的現象 $e(t)$ 影響，各自的關係式如下，

$$d(t) = d_o \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d) \dots\dots\dots(1-2)$$

$d(t)$ ：損壞程度

d_o ：損壞嚴重性，為常數

$\delta(t)$ ：脈衝函數

T_d ：脈衝訊號發生週期

$$q(\theta) = q_o [1 - (1/2^\varepsilon)(1 - \cos\theta)]^n \dots\dots\dots(1-3)$$

由於施加負載隨角度產生的改變 $< 0.5\%$ ，故角度可以時間直接代換為

$$q(t) = \begin{cases} q_o [1 - (1/2^\varepsilon)(1 - \cos\theta)]^n, & |\theta| < \theta_{max} \\ 0, & elsewhere \end{cases} \dots\dots\dots(1-4)$$

$q(t)$ ：負載隨位置分布的方程式

ε ：負載分布因子

θ_{max} ：負載區最大延展位置

ε 及 θ_{max} 皆由滾珠螺桿本身的間隙數值決定，

$$n = \begin{cases} \frac{3}{2}, & \text{for ball bearing} \\ \frac{10}{9}, & \text{for roller bearing} \end{cases}$$

$$e(t) = \begin{cases} e^{-t/T_e}, & t > 0 \\ 0, & elsewhere \end{cases} \dots\dots\dots(1-5)$$

$e(t)$ ：理想假設下，加速規量測訊號的衰弱方程式

T_e ：衰弱期的時間常數

最後損壞包絡方程式 $v(t)$ 即為上述方程式的乘積，

$$v(t) = d(t)q(t)a(t)e(t) \dots\dots\dots(1-6)$$

其傅立葉轉換式依摺基定理[35]可寫為下式，

$$V(f) = D(f) * Q(f) * A(f) * E(f) \dots\dots\dots(1-7)$$

最終運算式分別以時域及頻域表示結果如圖 1-4 所示，如此一來便能藉由上式推測損壞的滾珠螺桿可能表現的二維頻譜形式，或由二頻譜反推滾珠螺桿的損壞位置及嚴重性。

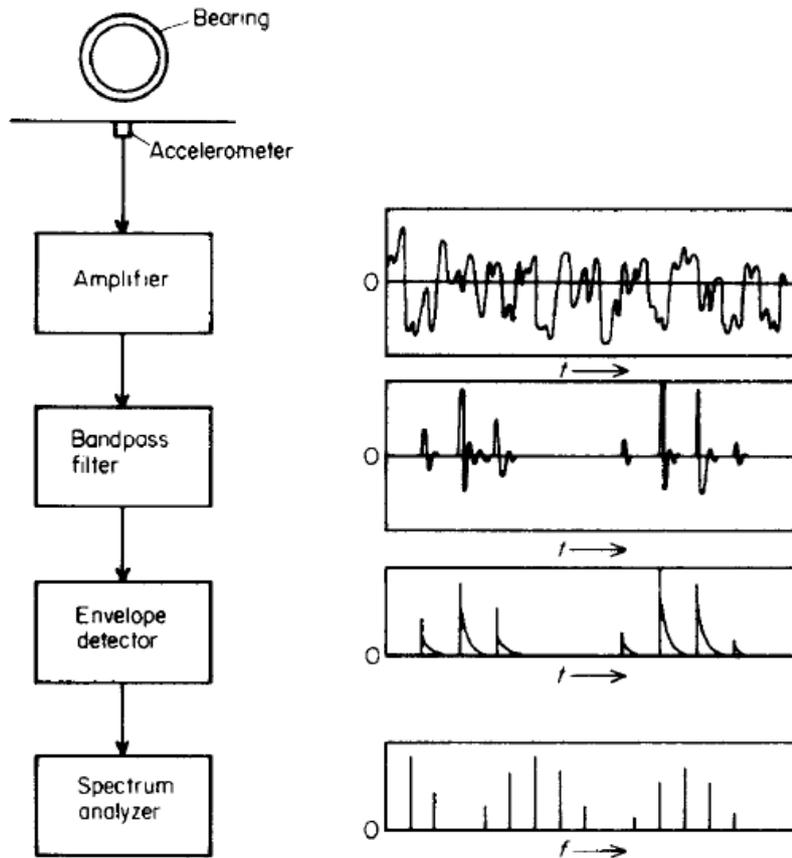


圖 1-3 包絡分析法：由帶通濾波器選定震動訊號的頻率範圍，其中最低截止頻率高於元件基礎特徵頻率，再將基礎頻率分布在給定頻率範圍中的諧波以數學方法疊加，其數學方法隨檢測機具而有差異，最後以傅立葉轉換為二維頻譜[32]。

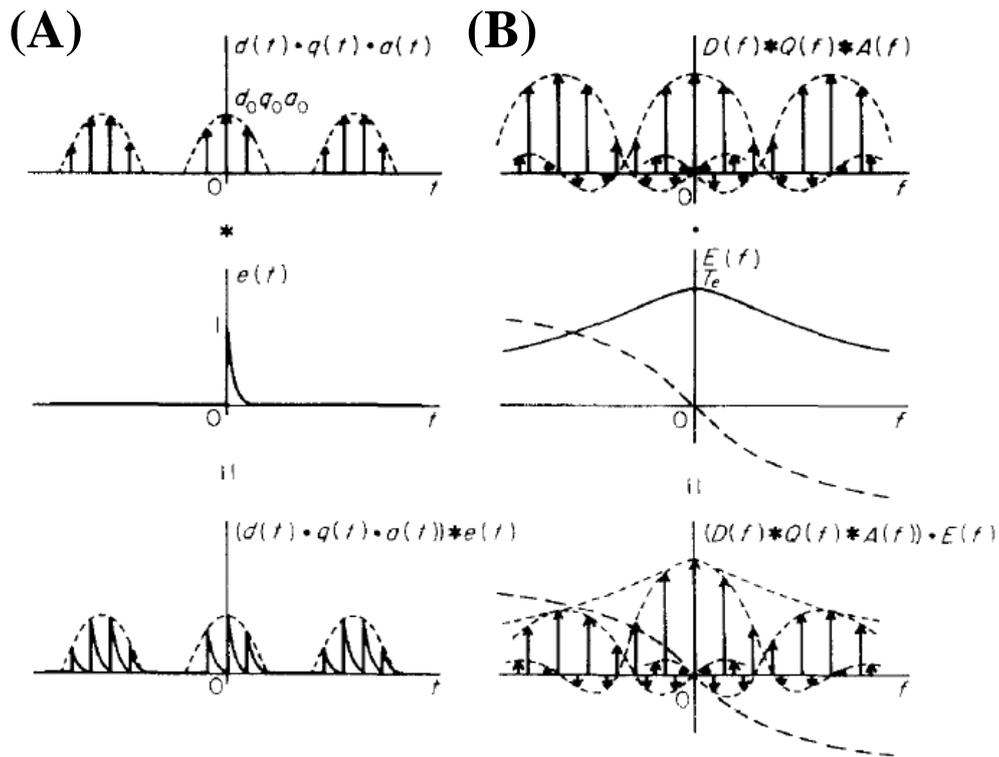


圖 1-4 單點破壞滾珠螺桿包絡運算：將損壞位置、振幅強度、負載位置以及衰弱方式，依上述理論計算結果乘積並進行傅立葉轉換，即可完整呈現震動模態，並依此進行分析。(A)時間域表示 (B)頻率域表示[32]

經由滾珠螺桿的損壞特性可瞭解，當機台內部元件有磨耗時，會和周圍元件摩擦產生結構性共振形成高頻諧波，因此本篇論文在進行訊號分析時，主要觀察高頻範圍的震動訊號。然而，要利用包絡波檢測必須對機具內部各組件的頻率表現要有相當程度的瞭解才能準確地將不需要的訊號濾除，應用於元件頻率特徵明顯的連續性震動機具才會有良好的偵測成效，反之則可能因為濾波範圍不當，而使分析結果嚴重失真，對於元件頻率特徵難以掌控的衝擊震動機台來說並不合適，又包絡檢波的複雜運算模式常需搭配昂貴的儀器，故在不適用於本論文。

1.3.2 小波分析

上段所提到的包絡波檢測在使用上最大的問題即無法準確偵測非固定 (Nonstationary) 形式的震動訊號，小波分析 (Wavelet Analysis) 即分別對時域及頻域進行多重解析的方式，亦稱為小波轉換 (Wavelet Transform)，以簡單計算的方法解析於不同時間區間產生的高頻脈衝破壞訊號 [36]。小波分析利用有限長或快速衰減的母小波 (Mother Wavelet) 振盪波表示時頻訊號圖，其中母小波的定義如下，

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \dots\dots\dots(1-8)$$

$\psi_{a,b}(t)$ ：母小波 (Mother Wavelet)

t：時間

a：尺度參數，> 0

b：時間變換參數

其中尺度參數的壓縮或延展讓母小波可在不同頻率範圍下分析，當 $a < 1$ 時，母小波被壓縮變窄且變化速度快，對應到高頻訊號；當 $a > 1$ 時，母小波被延展變寬且變化速度慢，對應到低頻訊號。時間變換參數使母小波可在時間軸上自由平移以蒐集時間資料，運算分子 $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 則是用來確保經由尺度、時間調整的母小波能量和原始相同 [37]，應用上母小波需符合下列條件，

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty \dots\dots\dots(1-9)$$

即母小波 $\psi(t)$ 需為窗函數 (Window Function)，

$$C_g = 2\pi \int \frac{|Y_\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \dots\dots\dots(1-10)$$

$Y_\psi(\omega)$ ： $\psi(t)$ 的傅立葉轉換式

則 $\omega = 0$ 時， $Y_\psi(\omega) = 0$ ，由此 $\psi(t)$ 才可被訂定為「小波」。

小波分析以母小波組成定義如下式，

$$W_x(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \dots\dots\dots(1-11)$$

$W_x(a, b)$ ：小波分析(Wavelet Analysis)

$x(t)$ ：暫存訊號(Temporal Signal)

$\psi_{a,b}^*(t)$ ： $\psi_{a,b}(t)$ 的共軛複數

為表現出時頻域圖，需另計算分析訊號所帶有的能量值。 ω_c 及 Δ 分別為母小波的中心頻率及頻寬，尺度參數 a 則代表尺度調整過後的母小波頻寬，其中心頻率及頻寬分別 ω_c/a 和 $2\Delta/a$ ，而調整過後的頻帶寬 $\Delta_a = 2\Delta/a$ 內所帶有的能量值如下式，

$$E_a = \int |W_a(a, b)| db \dots\dots\dots(1-12)$$

小波分析依據不同假設條件及理論的套用有多種不同的計算法，上述的計算法僅為其中一種[38]。

圖 1-5 為利用小波分析各別解析滾珠螺桿不同磨耗位置所產生的磨耗訊號，圖 1-5(A)為正常滾珠螺桿，其高頻區域及低頻滾珠螺桿特徵頻率區(Bearing Characteristic Frequency, BCF)帶有的能量都很低；圖 1-5(B)(C)磨耗位置分別為外環及內環，這兩訊號的高頻諧波區及低頻特徵頻率區皆帶有極高的能量；圖 1-5(D)磨耗位置為轉子，該訊號高頻諧波區帶有高能量，然而低頻特徵頻率區的能量偏低[39]。此實驗不僅再次證明磨耗訊號多產生偏高頻的訊號，以顯示以時頻域圖表示損耗訊號更能精準抓出非特定位置、時間間隔所產生的磨耗訊號。訊號分析法中有三大分析方式是以時頻域解析非固定形式的震動訊號，除了前面解釋小波分析、短時距快速傅立葉轉換(Short-time Fourier Transform)以及維格納準概率分佈(Wigner Distribution)，由於本論文蒐集的為聲學訊號，故選擇適合聲學訊號分析的短時距快速傅立葉轉換作為頻譜分析基礎[40]。

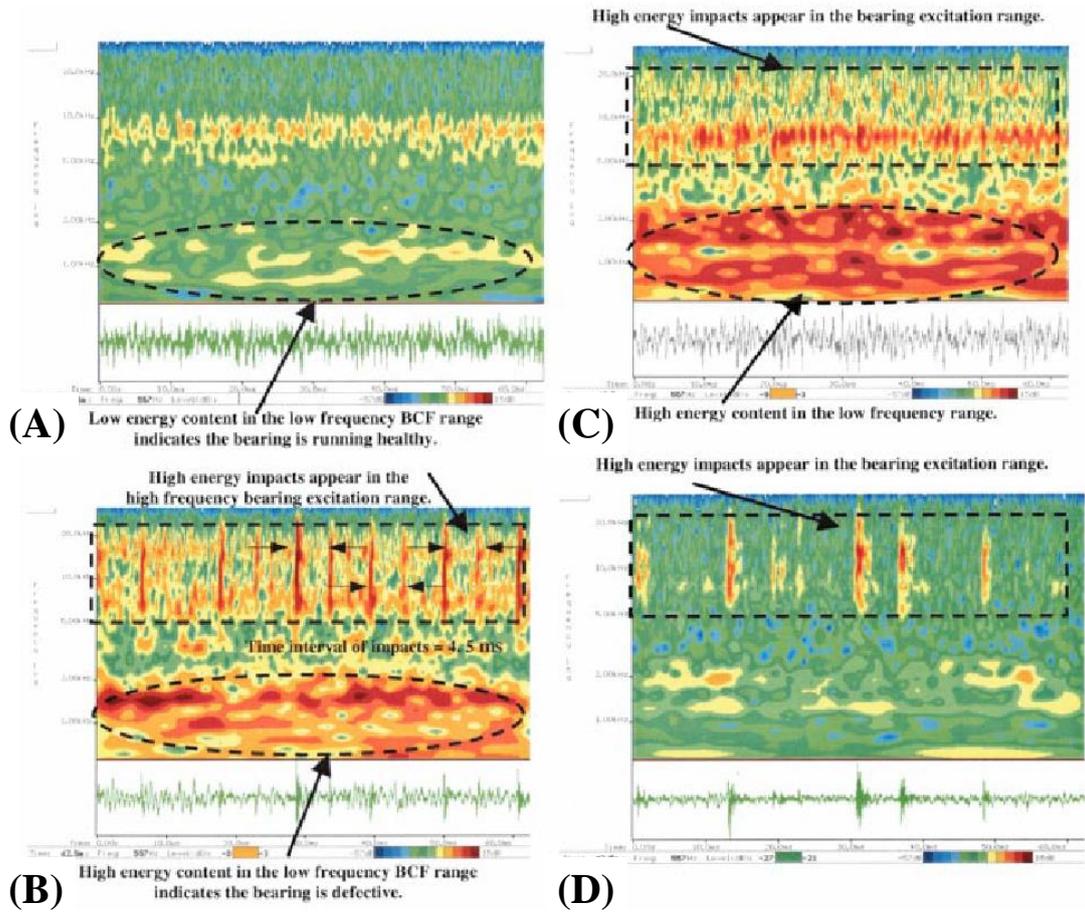


圖 1-5 小波分析檢測滾珠螺桿：(A)為正常滾珠螺桿，其高頻區域及低頻滾珠螺桿特徵頻率區帶有能量皆偏低，(B)(C)分別為外環磨耗及內環磨耗，兩者的高頻諧波區及低頻特徵頻率區都帶極高的能量，(D)為轉子磨耗，該訊號高頻諧波區帶有高能量，然而低頻特徵頻率區的能量偏低[39]

1.3.3 聲壓

聲壓(Sound Pressure)為聲波傳遞至接收器媒介時，促使介質震動產生壓強的改變量，其單位為帕斯卡(Pa)，定義式如下，

$$P_{total} = P_{stat} + P \dots \dots \dots (1-13)$$

P_{total} ：總壓力(Total Pressure)

P_{stat} ：靜壓力(Static Pressure)

P ：聲壓(Sound Pressure)

一般聲噪音量測結果多以聲壓級(Sound Pressure Level)表示，其值為有效聲壓(Effective Sound Pressure)與基準聲壓的比值取指數對換後的結果，單位為分貝(dB)，定義式如下，

$$L_p = 20 \log \left(\frac{\hat{P}}{P_o} \right) \dots \dots \dots (1-14)$$

L_p ：聲壓級(Sound Pressure Level)

\hat{P} ：有效聲壓(Effective Sound Pressure)，為聲壓 P 的均方根值

P_o ：參考聲壓，通常為 20 μ Pa

於震動偵測中，學者們很直覺地判斷機台損壞時會使聲壓提高，依據實驗事實也的確如此，但實驗僅限於高負載機台。聲壓除了判別損壞與否之外多無法提供損壞位置、損壞程度...等更多訊息[41]，其中更有研究直接指出聲壓在震動偵測當中是無用的[25]。聲壓直接表現麥克風振膜接收聲波當下所承受的聲波總壓力，直接顯示麥克風當下接收訊號的真實情況且為客觀事實，但在麥克風暴露於空氣介質的情況下非常容易受到周遭噪音的影響。多參考數值都是以聲壓為基礎，將聲壓總值展開成各個頻段細部分析，如接下來會提到的聲強分析及本論文中所使用的功率譜密度分析，故聲壓仍然為重要的參考資料。

1.3.4 聲強

在先前的研究中有提到，聲音強度(Sound Intensity)在檢測系統中表現出的辨識度比聲音壓力要好得多[25]，而聲音強度的定義為單位時間內聲波通過單位面積帶有的功率積分，故又稱聲功率，為客觀物理強度，其基本定義式如下，

$$I = Pv = \frac{\hat{p}^2}{\rho v} = 2\pi^2 f^2 A^2 \rho v \dots\dots\dots(1-15)$$

I ：聲音強度(Sound Intensity)

P ：聲音壓力(Sound Pressure)

v ：音波速度(Sound Velocity)

\hat{p} ：有效聲壓(Effective Sound Pressure)

ρ ：介質密度(Medium Density)

f ：頻率(Frequency)

A ：振幅(Amplitude)

由上述定義式可瞭解到聲音強度和聲速、頻率及振幅呈正相關。和聲音壓力不同，聲音強度為向量值，其方向向量由介質粒子移動的方向決定，即和音波速度 v 平行。一般量測音強需使用兩支非常靠近的麥克風，藉由兩麥克風的壓力梯度訂定聲強方向向量，

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) = (P_1 - P_2)/2h \dots\dots\dots(1-16)$$

$\frac{\partial P}{\partial x}$ ：聲音壓力梯度(Sound Pressure Gradient)

P_1 、 P_2 ：兩麥克風接收到的聲壓

h ：兩麥克風的距離

要滿足上式，兩麥克風的距離須滿足 $2h < \lambda/3.7\pi$ 及 $2h/r < 0.4$ 的條件始能將誤差降低，其中 λ 為最小音波波長、 r 為兩麥克風距離震動源的平均距離，並須利用雙頻段傅立葉分析器(Dual-channel FFT Analyzer)交叉兩麥克風頻譜取得頻率域[42]。1990年 Tandon 及 Nakra 便利用此計算系統量測滾珠螺桿的損耗情形，並

將聲強分析結果及聲壓分析結果相互做比較，其中聲壓分析無法辨別出內環及轉子的損壞訊號，對於磨耗尺寸的響應也較聲強分析來得低。由於麥克風裝置的限制，聲強雖能個別分析出外環、內環及轉子的磨耗訊號，其中僅有外環訊號的強度遠大於其他兩者[43]。由上述計算可瞭解到，聲強的向量特性顯示該方法為單點量測，即分析結果深受麥克風裝置位置影響，且聲強的量測結果需由兩麥克風相互裝置搭配，兩麥克風的距離更直接影響量測頻率範圍，大大地限縮量測彈性，本論文所量測的精密型沖壓機台所產生的基礎頻率無法像滾珠螺桿以轉速回推，在基礎頻率無法精確掌控的情況下，需盡可能地擴大訊號頻率範圍以捕捉高頻諧波，故不適用於本論文分析。

1.4 精密型沖壓沖切面解析

本研究中主要的目的為觀察並預測精密型沖壓模具的損壞情形，但由於實驗中精密型沖壓機為自動送料運作，無法直接觀察沖頭每段時間的磨耗情形，故本論文比對訊號的對象為加工後的沖壓孔，藉由沖壓孔呈現的樣貌回推沖頭當時的狀態。

沖切過程由彈性變形、塑性變形及斷裂三個動作組成，影響著沖擊訊號的呈現方式以及沖切面的形成，如圖 1-6 所示。沖壓沖切面大約分四個區塊：毛邊(Burr)、撕裂面(Fracture Zone)、剪切面(Shear Zone)及模輓(Roll-over)，高品質的沖壓加工一般盡量降低毛邊及撕裂面在沖壓切面中所占有的比例，如圖 1-7 所示。模輓區是沖壓模具下壓接觸到金屬把材後擠壓造成的圓弧結構，剪切面為沖頭及下模板擠壓產生的平滑曲面，其形成受工件延性影響，延性愈大的工件抗拉強度愈強，塑性變形的區域愈大，經由沖切後的剪切面愈大[44]，而撕裂面及毛邊則為材料內部強度無法承受外在應力所產生的破裂現象，會使表面粗糙並影響產品精度。2005 年 Azevedo 及其研究團隊以電容式麥克風量測高負載大型沖壓機，得到沖壓瞬間的訊號組成材料受到衝擊及材料被撕裂的時候[45]。一般傳統沖壓成品

會留有 80%的撕裂面，而精密型沖壓則追求 100%的剪切面[46]。本研究中檢測對象為精密型沖壓機，故可依撕裂面及毛邊的變化判別沖頭的磨耗情形。

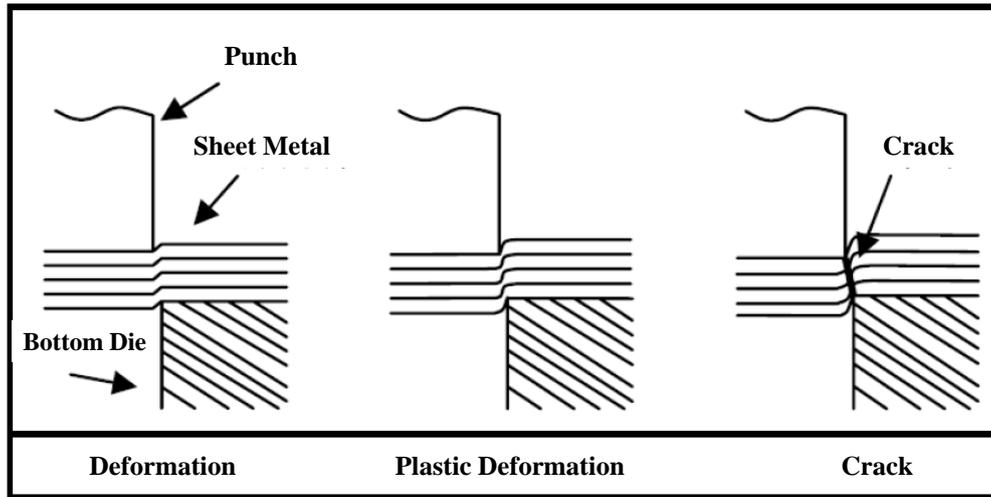


圖 1-6 沖壓變形示意圖：沖切由彈性變形、塑性變形及斷裂三個動作組成[47]。

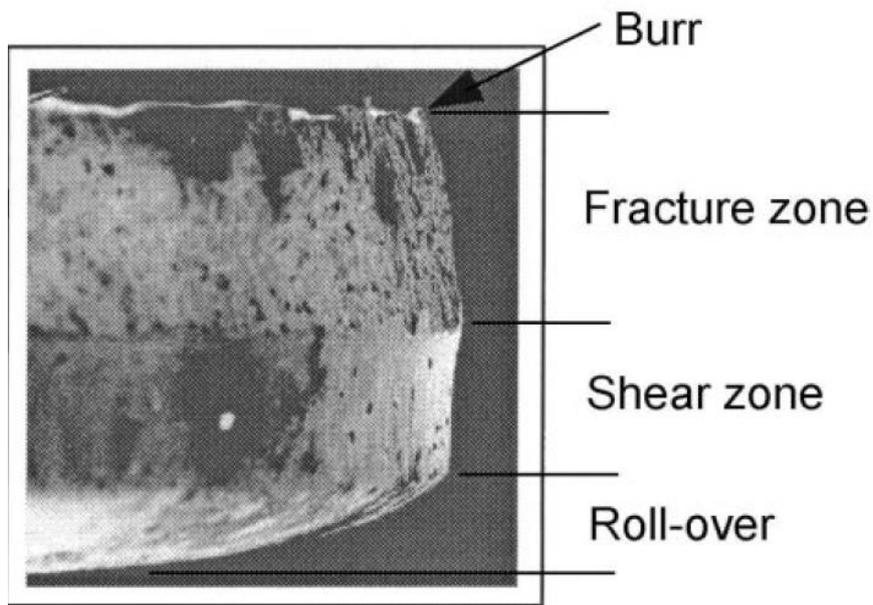


圖 1-7 沖切斷面解析：沖壓沖切面大約分為毛邊、撕裂面、剪切面及模靛，高品質的沖壓加工一般盡量降低毛邊及撕裂面在沖壓切面中所占有的比例[48]。

1.5 研究動機與目的

半導體產業在上個世紀末的興起開始為產業界帶來日新月異的變化，牽引整個高科技產業大躍進，到這個世紀精密型產業的服務對象不再侷限於政府或上流社會，而是整個社會大眾。消費者對於產品的精緻度愈來愈要求，因此各家製造商也開始求新求變，並且提高生產標準以迎合市場需求。在這樣要求高精緻度、高速的產業環境下，製造商除了發展新的技術外，更重要的是確保生產成本。在進行高速生產時，最令人害怕的就是機台在未知的情況下產生異常，異常的機台製造出來的瑕疵組件使精度跑位，造成後續整個生產線的工作都白費掉，而高速生產出來的大量產品也就只能當廢料處理。這樣的結果不僅增加生產成本亦對環境造成負擔，此時偵測系統的發展就顯得十分重要。傳統上，機台偵測多使用加速規作為感測元件，然而震動瞬間的加速度及位移資訊不足以辨識機台上的小型磨耗，這樣的靈敏度無法有效應用於結構愈發複雜的精密型加工模具。反之，靈敏度極高的聲發射感測器能有效偵測精密型加工模具，卻因成本過高無法普及。

在折衷考慮下，本論文針對精密型加工模具提出一套檢測系統，將微機電麥克風作為感測元件裝置於精密型沖壓模具上，以固體傳導聲波的方式接收沖壓機產生的震動，而後蒐集訊號加以分析。微機電麥克風的封裝結構使音孔能直接緊貼於模具表面，有效降低空氣間隔造成的噪音干擾。再者，微機電麥克風的靈敏度足以辨識精密型沖壓模具的異常訊號，其低廉的價格亦使感測元件的普及性大幅增加，在後續的訊號分析也有突破性的結果。本論文希望提供低廉有效的感測方法，在未來有效提升精密型產業的生產良率。

1.6 論文架構

本論文第一章先介紹震動檢測相關背景及檢測技術，第二章解釋微機電麥克風感測器及沖切面解讀方法。第三章為微機電麥克風模組的組裝、訊號分析計算及檢測系統架設，第四章為實驗的結果與討論，最後會在第五章提出結論及未來發展方向，如圖 1-8 所示。

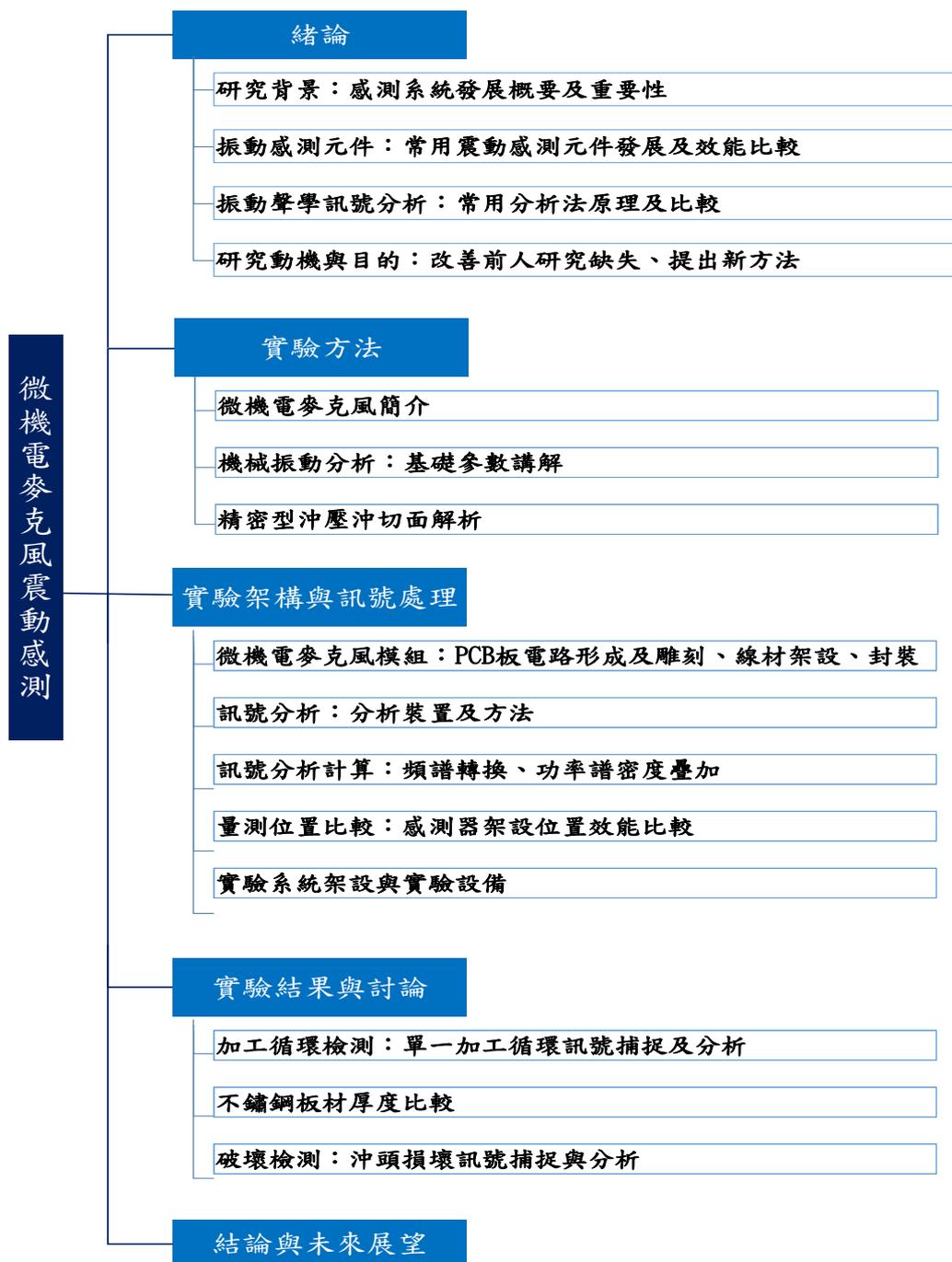


圖 1-8 論文架構組織圖

第二章 實驗方法與架構

2.1 微機電麥克風

本論文中檢測的目標為精密型沖壓機台所使用的沖頭，經由前段敘述可知機台組件磨耗後容易與周邊結構摩擦產生高頻諧波，高頻波雖然能量較高但傳遞距離較短，又震動波在介質轉換或經過非均質結構時強度會大幅降低[49](圖 2-1)，為了減少訊號能量損失，感測元件尺寸需夠小以貼近震動源。在 1.1 節已解釋過微機電加速規不適合的原因，而在 1.2 節提到電容式麥克風雖然接收訊號較弱，但依然能辨識出機台損壞特徵，故在此選用接收訊號方向較為全面的微機電麥克風(MEMS Microphone)作為感測元件，微機電麥克風成本遠低於聲發射感測器，未來在使用上普及性相對較高。本論文所使用的微機電麥克風接收聲波的原理和電容式麥克風相似，皆以電容的一端極版當作振膜接收聲波，振膜材料多為氮化矽或複晶矽，當振膜音聲壓產生起伏時，兩極板的距離變化會產生電壓差並輸出電流。由於微機電麥克風封裝結構將振膜完整包覆如圖 2-2(A)，故可將音孔貼合於待測物表面，精密型沖壓機運作時所產生的震動便可藉由沖壓模具下模板傳遞至微機電麥克風封裝結構，進而傳遞至振膜輸出訊號，中間幾乎無空氣介質，故阻隔大部分周圍環境噪音及高負載機具震動訊號。由圖 2-2(B)可看出本論文中使用的微機電麥克風接收訊號的頻率範圍可從 100 Hz 到 100 kHz，而較為穩定的部分為 100 Hz 到 10 kHz，可瞭解到微機電麥克風的頻率響應範圍也較傳統麥克風來得廣，能從較廣的頻率範圍蒐集到較多的訊號。

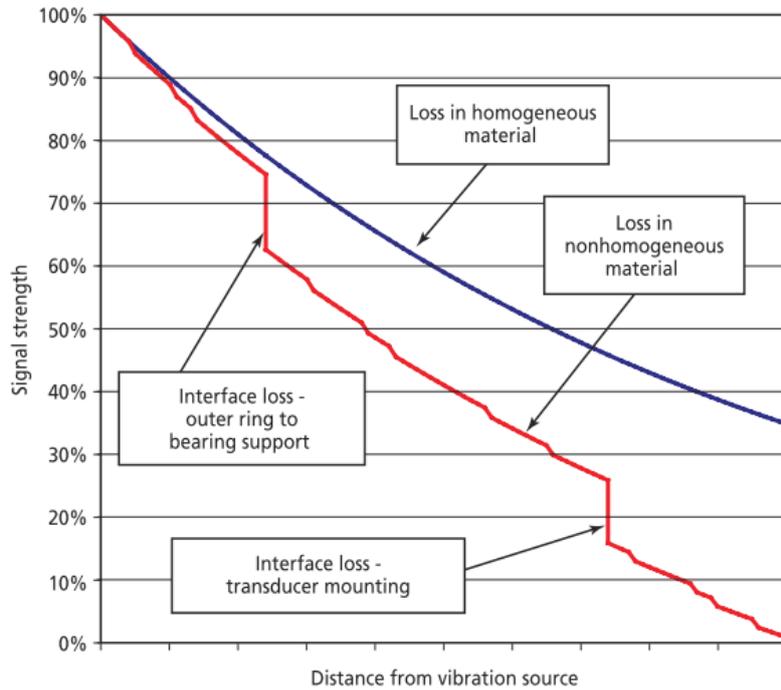


圖 2- 1 震動波於不同介質的能量傳遞:震動波在介質轉換或經過非均質結構時，強度會大幅降低。[49]

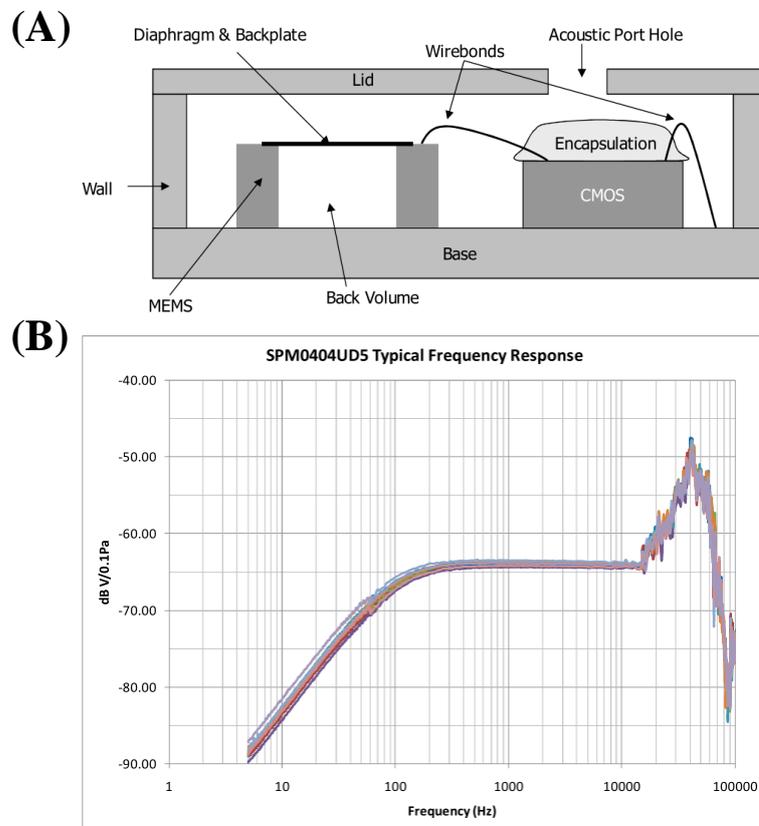


圖 2- 2(A)微機電麥克風結構圖 (B)微機電麥克風頻響圖[50]

2.1.1 微機電麥克風模組製程簡介

圖 2-3 為本研究所使用的微機電麥克風模組製作流程圖，為使微機電麥克風的音孔良好地貼合於下模板，本實驗選用厚度 0.6 mm 的玻璃纖維電路板作為基板。首先，將欲輸出之電路以紫外光燈管曝印於印刷電路板，而後用氯化鐵(FeCl_3)將多餘的銅層表面蝕刻去除。隨後利用一台 Micro-CNC 銑床(Model SD3025, SUDA Instrument Company, China)將手洗電路板依電路範圍分割為長 15 mm、寬 10 mm、厚 0.6 mm 的電路基板，並於基板中間銑出一長 3.76 mm、寬 2.95 mm 的方孔放置麥克風，如此一來微機電麥克風的音孔就能直接貼合於下模板，兩者之間便不會存在空氣介質，換言之，周遭環境噪音無法藉由空氣介質傳遞至微機電麥克風，此舉可大幅降低雜訊的干擾使之後的訊號辨識更為容易。一條三芯導線及一顆 $0.22 \mu\text{F}$ 鉭質電容以電烙鐵焊接於手洗電路板上，前者用來連接乾電池電源及錄音設備；後者用來過濾低頻機械震動訊號以及阻斷直流訊號輸出，而後利用桌上型超音波接線機(SPB-U668, Super Power Precision Company, Taiwan)將微機電麥克風的焊盤與手洗電路板導通。為防止電路受損，在此將樹脂及硬化劑以 1:1 的比例混合覆蓋在電路基板上，並盡量小心不讓氣泡產生以及維持表面平整，然後放在加熱板上以 60°C 烤一個小時待樹脂硬化，最後以三秒膠將永久磁鐵固定於樹脂層上。

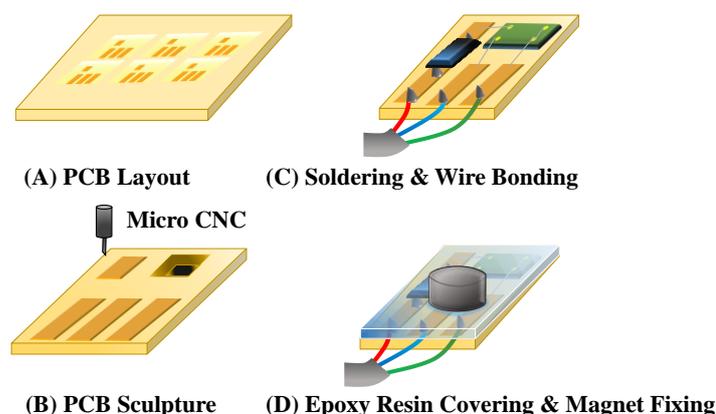


圖 2-3 微機電麥克風模組製程示意圖：

(A)手洗電路板輸出 (B)微機電麥克風放置凹槽切割

(C)元件焊接及微機電麥克風打線接合 (D)樹脂封裝及永久磁鐵黏合

2.1.2 微機電麥克風模組一致性測試

為確保微機電麥克風在封裝過後的特性表現一致，此實驗將六組微機電麥克風模組磁吸於咖啡磨豆機上，同時收錄磨豆機空轉時所產生的震動訊號，六組微機電麥克風模組裝置位置非常接近以降低收錄位置造成的訊號差異，如圖 2-4(A)所示。而後，將六組微機電麥克風收錄到的震動訊號以傅立葉轉換為強度對頻率的二維頻譜圖，六組微機電麥克風所測得的頻譜圖相互堆疊後可發現，各組麥克風接收同一個震動源所產生的訊號時，其頻率響應重複率相當高，顯示各組微機電麥克風在封裝過後的特性表現一致性相當高，故往後的實驗結果受微機電麥克風模組穩定度影響的成分相當低，如圖 2-4(B)所示。

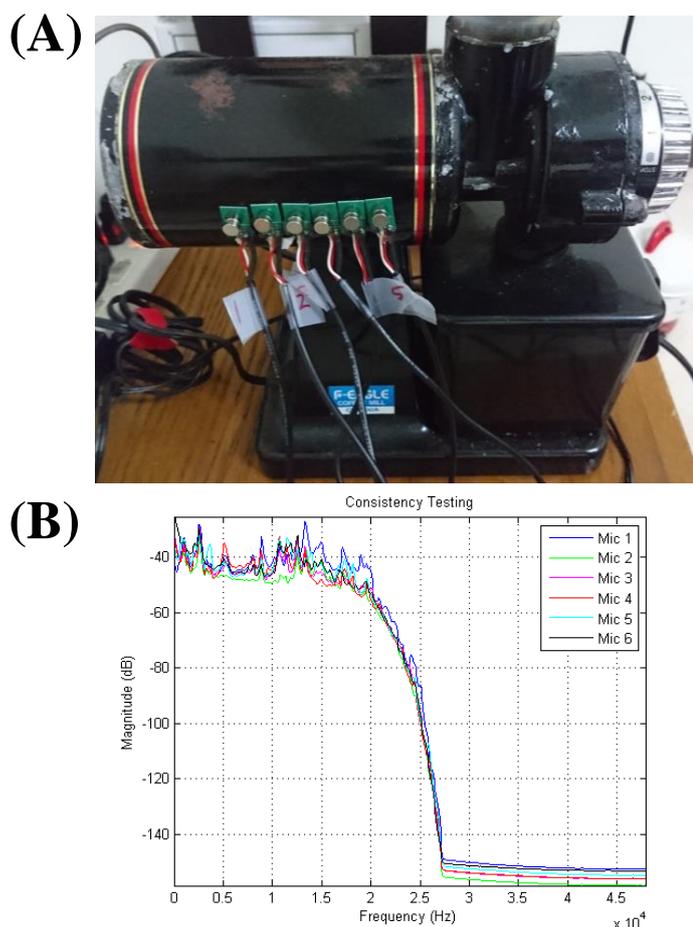


圖 2- 4 麥克風模組一致性測試：(A)將六組微機電麥克風裝置於咖啡磨豆機上，收錄咖啡磨豆機空轉時所產生的震動訊號。(B)將六組為機電麥克風收錄結果各自以傅立葉轉換為頻譜圖，其結果相互堆疊後可發現麥克風於相似的位置對震動訊號的反應也相當一致。

2.2 訊號分析與觀察

本節將簡單介紹實驗中轉換原始訊號所使用的裝置及方法，並於下節詳細說明訊號轉換分析的計算方式及代表意義。實驗中利用錄音器廠商提供的錄音軟體 Cubase LE[®] (Element 8 64 bit, Steinberg Company, Germany) 收錄精密型沖壓機的運作訊號，將取樣率調整至最高值 96 kHz 以確保沖壓瞬間的訊號不會被忽略掉。收錄的音源檔以手動的方式剪切、轉錄為 wav 檔，並導入 Cool Edit Pro 2.1[®] 免費試用版做第一階段分析。圖 2-5(A) 為音檔導入 Cool Edit Pro 2.1[®] 後顯示的原始聲波圖，該圖會提供所有頻率的聲波疊加產生的振幅對時間關係圖。為了觀察方便，訊號以頻率為單位展開，並用短時距傅立葉轉換為頻率對時間的頻譜圖，其中又以顏色展現振幅的強度，以 Cool Edit Pro 2.1[®] 為例，顏色愈紅愈亮振幅強度就愈強，如圖 2-5(B) 所示。如此一來，精密型沖壓機的運動型態便能以視覺判別，並拉出更細的區間做運算。圖 2-5(C) 即為利用頻譜圖判斷、拉出更細的時域後，以 MatLAB[®] 計算出有效頻域功率譜密度圖。功率譜密度圖是以頻譜圖作為基礎，選定特定的頻率範圍將其振幅值加總後的結果，其頻率範圍依麥克風的頻率響應及待測物特型而異。由於功率譜密度圖為加總後的結果，故原始訊號愈強的資料點加總後愈強；原始訊號愈弱的資料點加總後相對愈弱，由此對比更能凸顯當時精密型沖壓機的狀態。此研究中所選定的頻率範圍為 5 kHz 至 10 kHz，是經由觀察後最能清楚表現精密型沖壓機型態的頻率範圍。

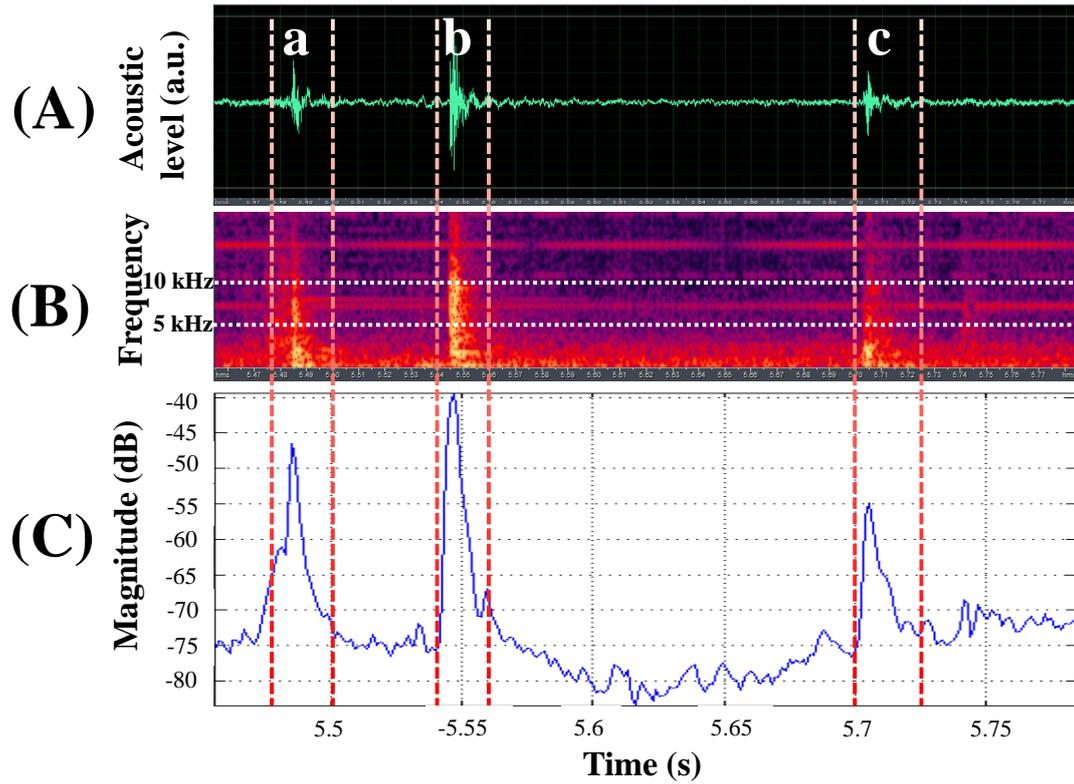


圖 2- 5 訊號分析示意圖：(A)原始聲波訊號，提供所有頻率的聲波疊加產生的振幅對時間關係。(B)將原始訊號以頻率為單位展開，並用短時距傅立葉轉換為頻率對時間的頻譜圖。(C)以頻譜圖作為基礎，選定特定的頻率範圍將其振幅值加總後繪製為功率譜密度圖。

2.3 訊號頻譜繪製

頻譜轉換是震動訊號分析中最常使用的手法，該分析方式將時域訊號對振幅的二維訊號轉為頻域亦共存的三維訊號。分析者能從頻譜中找出特徵頻率、特徵參數等，使後續的訊號特徵及代表現象更容易辦分辨。頻譜轉換一般分為取音框(Frame)、窗函數轉換(Window Function)及短時距傅立葉轉換(Short-time Fourier Transform, STFT)三個步驟，如圖 2-6 所示。



圖 2-6 頻譜轉換計算步驟

2.3.1 音框分割

由於精密型沖壓機加工時所產生的沖壓訊號極其短促且微弱，為了確保該訊號在收錄時不會被遺漏，我們將收錄時的取樣頻率調整至錄音軟體內建的最大值 96 kHz。在如此高的取樣頻率條件下，音訊檔所產生離散時間訊號的資料點非常龐大，故須使用音框進行分割。

音框分割時包含三個主要參數，音框長度(Frame Size)、重疊率(Overlap Rate)及音框率(Frame Rate)。音框長度決定一段時間內的音頻訊號被分割為幾段，其值一般被設定為 2 的冪次以便後續短時距傅立葉轉換的計算。音框長度愈長計算量愈小，該音訊特性隨時間變化的細緻性亦愈容易被忽略，如圖 2-7(A)；音框長度愈短計算量愈大，計算結果愈容易受突發變化影響，如圖 2-7(B)，故音框長度須依據音頻訊號的特性調整。訊號經由音框切割為不同的連續集合序列後，若音框與音框間的差異值太大容易使分析結果和實際意義比對不上，故一般在計算時會將音框相互重疊，此規則即為重疊率。重疊率一般設定為 50%，為了增加訊號分析結果的準確率，此論文中所設定的重疊率為 75%，而重疊率愈高電腦所需承擔的計算量愈大。最後，音框率為每秒所囊括的音框個數，其公式如下：

$$fps = fs / (S_f - S_o) \dots \dots \dots (2-1)$$

fps : 音框率(Frame Rate)

fs : 取樣頻率(Sampling Rate)

S_f : 音框長度(Frame Size)

S_o : 重疊長度(Overlap Size) , 其值為音框長度和重疊率的乘積

音框率顯示電腦每秒所需運算的音框個數, 電腦運轉速度最少須達到音框率其結果才算即時處理當下訊號[51]。

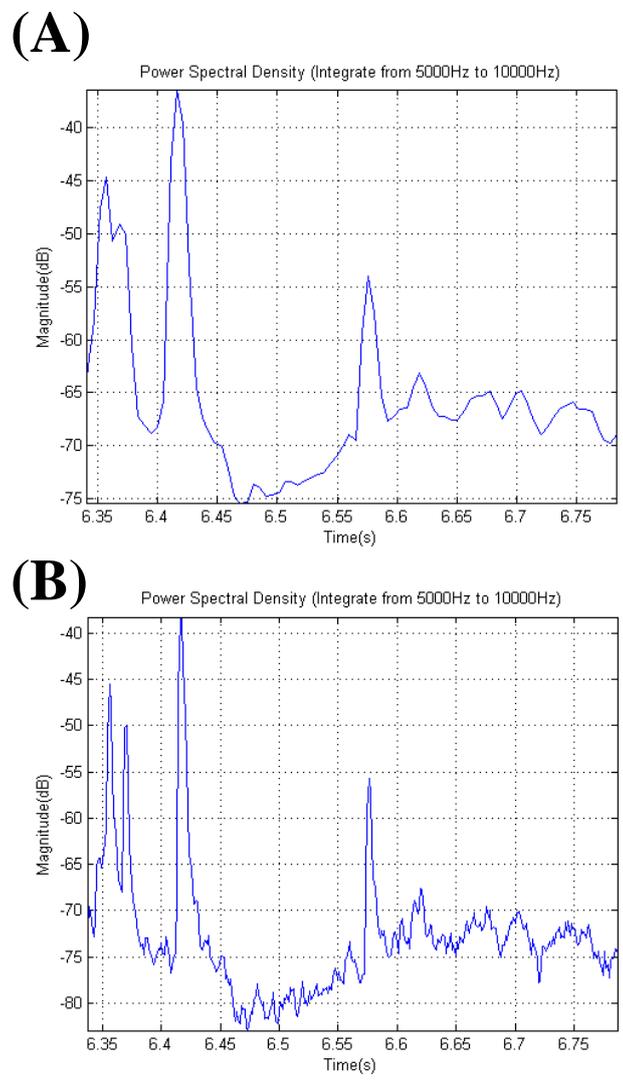


圖 2-7 同一段訊號以不同音框長度計算：音框長度愈長計算量愈小，該音訊特性隨時間變化的細緻性亦愈容易被忽略；音框長度愈短計算量愈大，計算結果愈容易受突發變化影響。(A)2048 點 (B)512 點

2.3.2 窗函數取樣

單獨未設定音框取樣方式為矩形窗(Rectangular Window)，取樣方式如下，

$$W_R = \begin{cases} \hat{x}(n), & 0 \leq n \leq S_f - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(2-2)$$

W_R ：矩形窗(Rectangular Window)

$\hat{x}(n)$ ：離散時間訊號

S_f ：音框長度(Frame Size)

由上述公式可看出矩形窗取樣時會保留音框長度內的訊號強度，並將音框長度外的訊號歸零，如此取樣會令音框序列兩端的訊號偏高，使兩個音框間的訊號產生斷層造成不連續性，影響震動訊號特性表現[52]。

一般在分析音頻訊號時，習慣在音框上加漢明窗(Hamming Window)用以舒緩上述矩形窗造成的不連續性，其取樣方式如下，

$$W_H(n) = \alpha - \beta \cos\left(2\pi \frac{n}{S_f-1}\right), \quad 0 \leq n \leq S_f - 1 \dots\dots\dots (2-3)$$

$$\alpha = 0.54, \quad \beta = 1 - \alpha = 0.46$$

W_H ：漢明窗(Hamming Window)

S_f ：音框長度(Frame Size)

$$\hat{\hat{x}}(n) = \hat{x}(n) \times W_H(n) \dots\dots\dots(2-4)$$

$\hat{\hat{x}}(n)$ ：加窗後離散時間訊號

$\hat{x}(n)$ ：原始離散時間訊號

由上述公式可看出漢明窗的特性在於保留中間訊號強度的同時，壓抑兩端訊號的強度，如圖 2-8 所示。配合前一段所提到的音框重複訊號取樣，音框兩端的訊號即可互補建構出接近原形的連續性資料庫[53]。

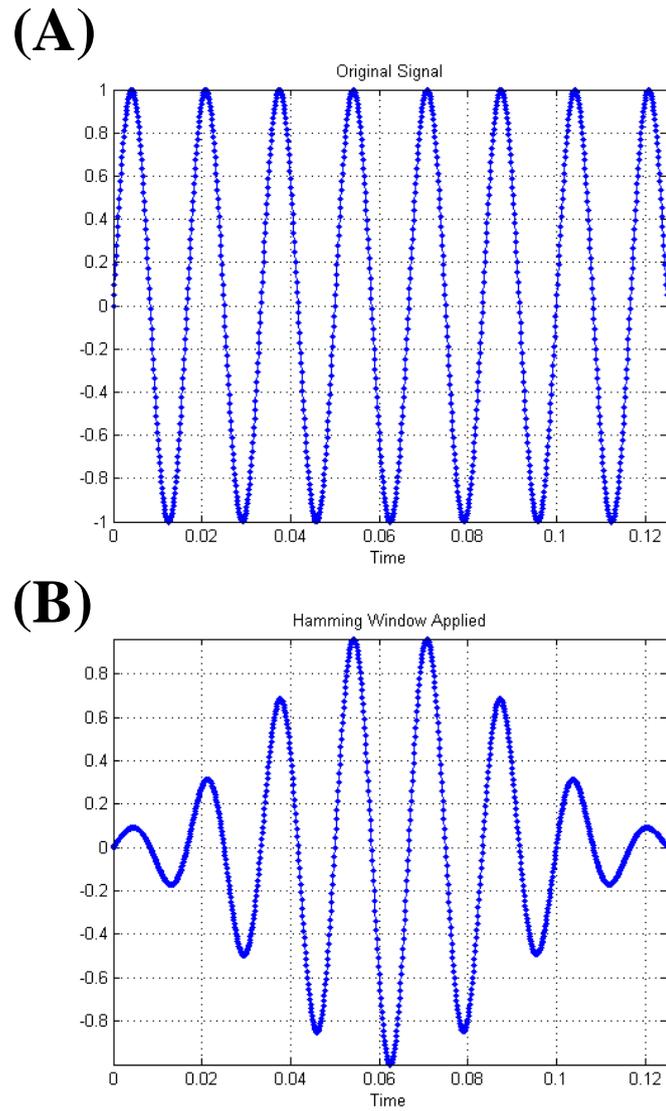


圖 2- 8 漢明窗取樣：(A)矩形窗取樣會造成音框序列兩端的訊號偏高，使兩個音框間的訊號產生斷層造成不連續性。(B)漢明窗取樣可以舒緩矩形窗造成的不連續性。

2.3.3 短時距傅立葉轉換

傳統上，訊號會藉由傅立葉轉換(Fourier Transform)得到頻域資料並加以分析，但是對於隨時間流動變化的聲學訊號來說，時間也是不可忽視的重要資訊，為同時保留時域及頻域兩軸，音頻訊號會利用短時距傅立葉轉換(Short-time Fourier Transform)為頻譜進行分析。

短時距傅立葉轉換的數學定義即將離散的音頻訊號套上窗函數，並對各個窗函數進行傅立葉轉換，各自得到的結果再以窗函數建立時切割的時間序列排開得到二維頻譜，其中傅立葉轉換及短時距傅立葉轉換的公式如下，

$$\text{傅立葉轉換: } \hat{F}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-j2\pi f t} dt \dots\dots\dots(2-5)$$

t ：時間(s)

$F(t)$ ：以時域表現個原始訊號

f ：頻率(Hz)

$\hat{F}(f)$ ： $F(t)$ 的傅立葉轉換，以頻域表現訊號

$$\text{短時距傅立葉轉換: } X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w_H(t - \tau)\hat{x}(\tau)e^{-j2\pi f \tau} d\tau \dots\dots\dots(2-6)$$

t ：時間(s)

f ：頻率(Hz)

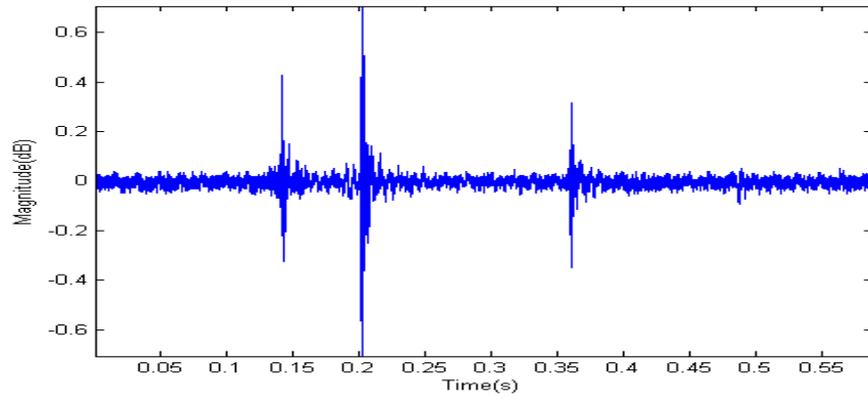
$w_H(t)$ ：漢明窗(Hamming Window)

$\hat{x}(n)$ ：原始離散時間訊號

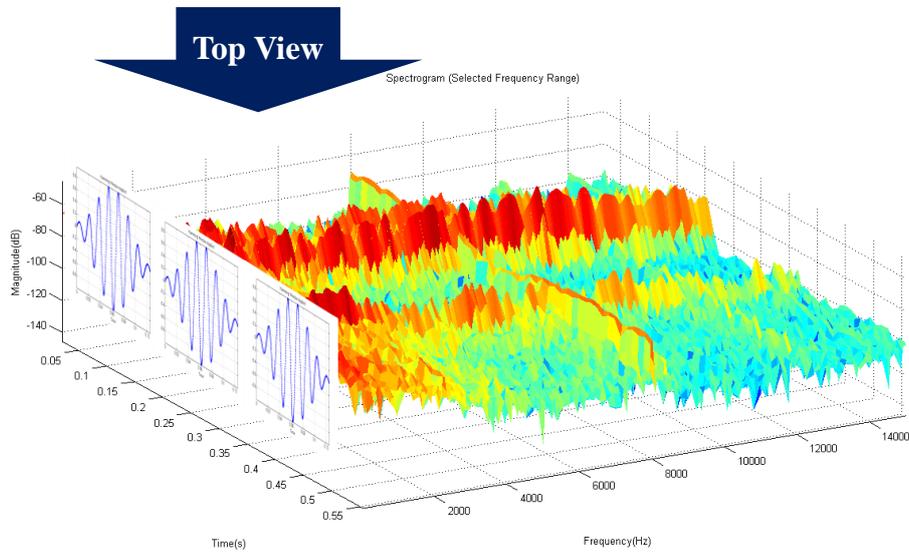
$X(t, f)$ ： $w_H(t - \tau)\hat{x}(\tau)$ 的傅立葉轉換

其中頻譜圖即為訊號短時距傅立葉轉換後，以時間、頻率、振幅三軸拉開的上視圖，如圖 2-9 所示。

(A)



(B)



(C)

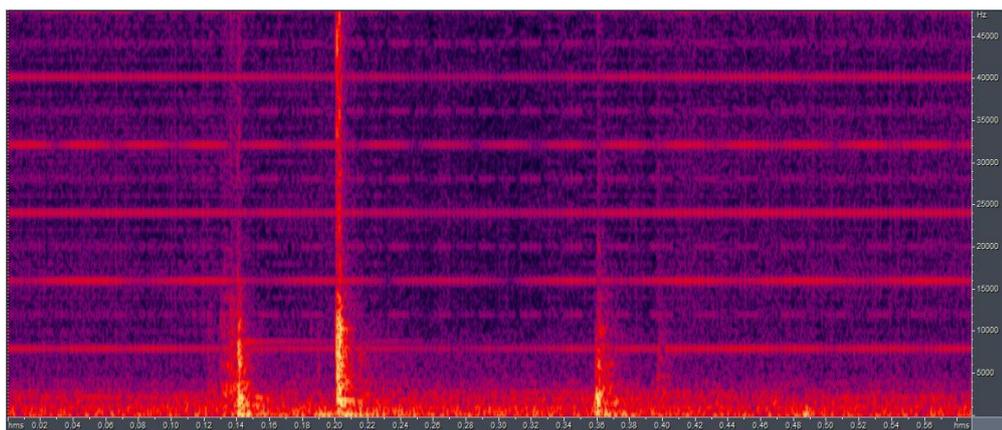


圖 2- 9 頻譜轉換：(A)實驗收錄的原始訊號 (B)短時距傅立葉轉換即將離散的原始訊號套上窗函數，並對各個窗函數進行傅立葉轉換。(C)頻譜圖為訊號短時距傅立葉轉換後，以時間、頻率、振幅三軸拉開的上視圖。

2.4 功率譜密度疊加

當音頻訊號經過上述取樣後，訊號以不同頻率展開為多個波，其時間軸被音框分割為新定義的連續序列，各個音框單位內所帶有的能量總和即為功率譜密度 (Power Spectral Density)，可視為各個頻率波以音框切割所新定義的時間點帶有的振幅值(圖 2-10)，其中訊號攜帶功率能量定義如下，

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \dots\dots\dots(2-7)$$

E：音頻訊號所攜帶的總能量

$x(t)$ ：音頻訊號

藉由帕賽瓦爾定理可將上式藉由傅立葉轉換為，

$$\hat{x}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi ift} x(t) dt \dots\dots\dots(2-8)$$

(2-7)式則可被轉換為，

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{x}(f)|^2 df \dots\dots\dots(2-9)$$

由於(2-9)左式總和為音頻訊號總能量，那麼右式的積分函數 $|\hat{x}(f)|^2$ 則可視為單位頻率含有能量的密度函數，故功率譜密度可被定義為下式，

$$S_{xx} = |\hat{x}(f)|^2 \dots\dots\dots(2-10)$$

S_{xx} ：功率譜密度(Power Spectral Density)

由於以原始單位(W/Hz)表示功率普密度尺規會過大，故在此將其計算單位轉換為分貝(dB)，

$$dB = 10\log(S_{xx}) \dots\dots\dots(2-11)$$

依據功率譜密度的定義及計算方式，可將功率譜密度視為聲音功率在頻譜中展開的結果。在本研究中，經由觀察發現 5 kHz 到 10 kHz 的頻譜訊號最能表現此精密型沖壓機台的特性，故將此頻段的功率譜密度值加總起來畫成橫軸為時間(s)、縱軸為振福(dB)的功率譜密度圖，如此一來較強的訊號被突顯放大，能更容易解讀出對應精密型沖壓機台加工的代表意義。

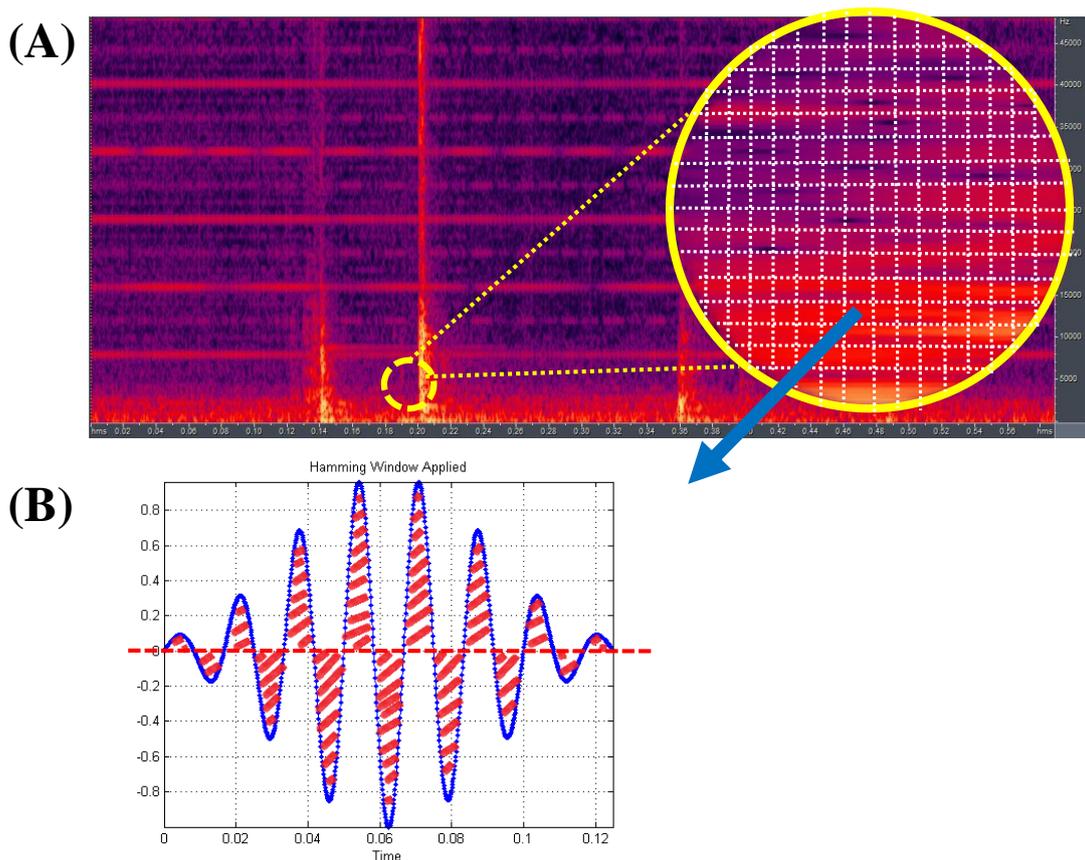


圖 2- 10 功率普密度計算：(A)頻譜的時間軸被音框分割為新定義的連續序列，再依不同的頻率分離得到各音框功率圖。(B)各個音框單位內所帶有的功率積分，即為功率譜密度。

2.5 精密型沖壓系統工作循環檢測

在此篇論文中，所有訊號分析都是以時間軸作為判斷依據，而非一般認知較為直觀的工作角度，故需先釐清時間軸與工作角度的關係，以便定義特定時間範圍內計算峰值的意義。一般沖壓機台是由一組曲柄滑塊機構作為基底設計而成，其中上死點與圓心的連線和曲柄夾成的角度即為工作角度，如圖 2-11 所示。由於精密型沖壓機台的尺規較小，所以使用不同厚度的板材時，工作角度會有相對較大的差異，如脫料板碰到金屬板材的角度約介於 $159^{\circ}\sim 161^{\circ}$ 、脫料板離開金屬板材的角度約介於 $198^{\circ}\sim 200^{\circ}$ ，又沖頭下壓的瞬間是由彈簧控制幾乎無法回推於角度。這些差異再加上精密型沖壓機本身的高速運作，使得單從時間或角度去定

義沖壓瞬間這件事變得不夠直觀，為此我們需要定義一個簡單、準確的範圍去囊括沖壓瞬間的訊號。

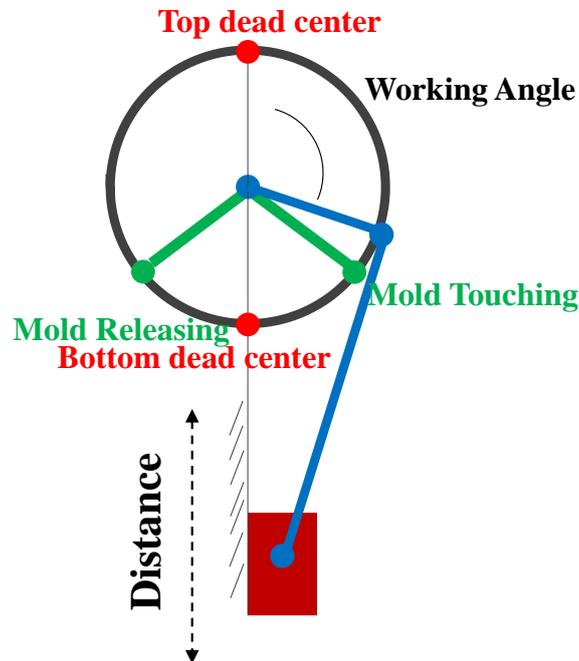


圖 2- 11 精密沖壓循環之曲柄滑塊示意圖：精密型沖壓機台是由曲柄滑塊機構為基底設計而成，其中上死點與圓心的連線和曲柄夾成的角度即為工作角度。

在一開始的實驗中，為了較為簡易地找到工作循環的模式，精密型沖壓機的運做速度被調降至 10 SPM (Strikes Per Minute) 以便觀察。在如此低的運轉速度下，沖壓瞬間的訊號也因為加速度不足變得十分微弱，但仍然能藉由脫料板撞擊下模板及脫料板脫離下模板的訊號輕易地判斷個別工作循環，如圖 2-12(A) 所示。因此，脫料板撞擊下模板及脫料板脫離下模板的訊號便被定義為導引訊號 (Trigger Signal)，在此區段所產生的訊號即為沖壓訊號，如圖 2-12(B)。

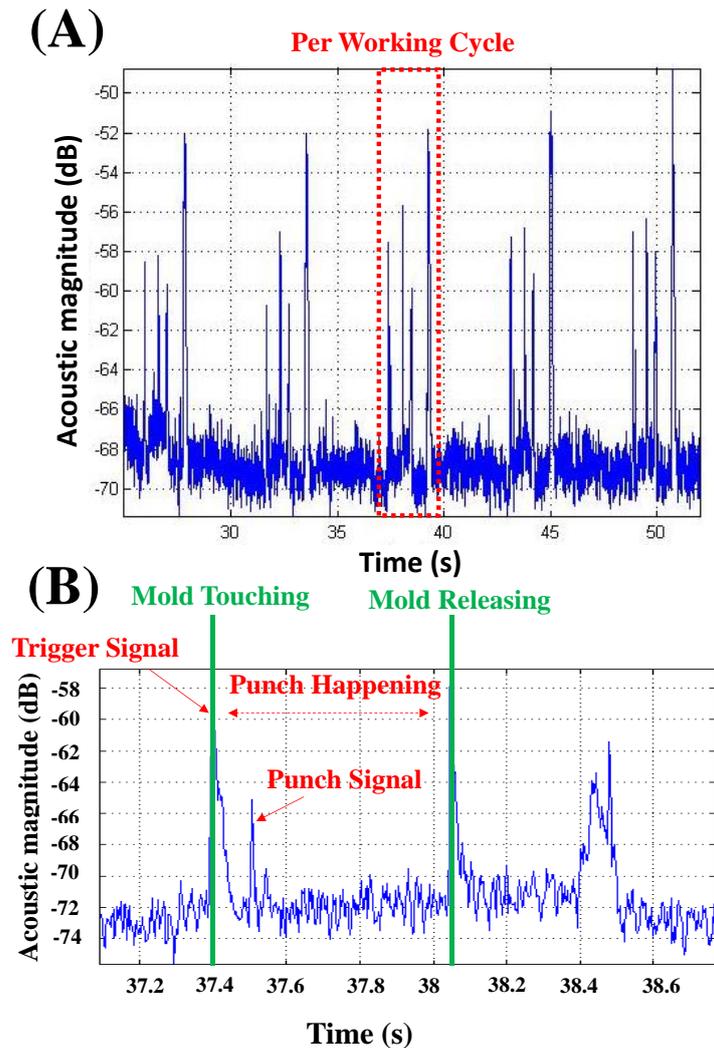


圖 2-12 工作循環計算結果：(A)在沖壓訊號極微弱的情況下，依然能藉由脫料板撞擊下模板及脫料板脫離下模板的訊號判別連續運作的沖壓循環。(B)以脫料板撞擊下模板及脫料板脫離下模板的訊號為導引訊號判斷單一工作循環，沖壓訊號會在該區段形成。

經過多次實驗觀察後發現精密型沖壓機每個工作循環一般會產生四個計算峰值(圖 2-13)，這些峰值代表著六個工作流程如圖 2-14，分別為(A)初始狀態、(B)脫料板下壓撞擊下模板、(C)沖頭固定塊下壓(沖頭衝破金屬板材)、(D)沖頭固定塊上升(沖頭抽離金屬板材)、(E)脫料板上壓脫離下模板、(F)金屬板材前移(自動換料)，其中(C)及(D)雖然為主要分析對象，但因為沖頭固定塊下壓及上升是由彈簧所控制故變異較大，故定義(B)至(E)為主要觀察區間。

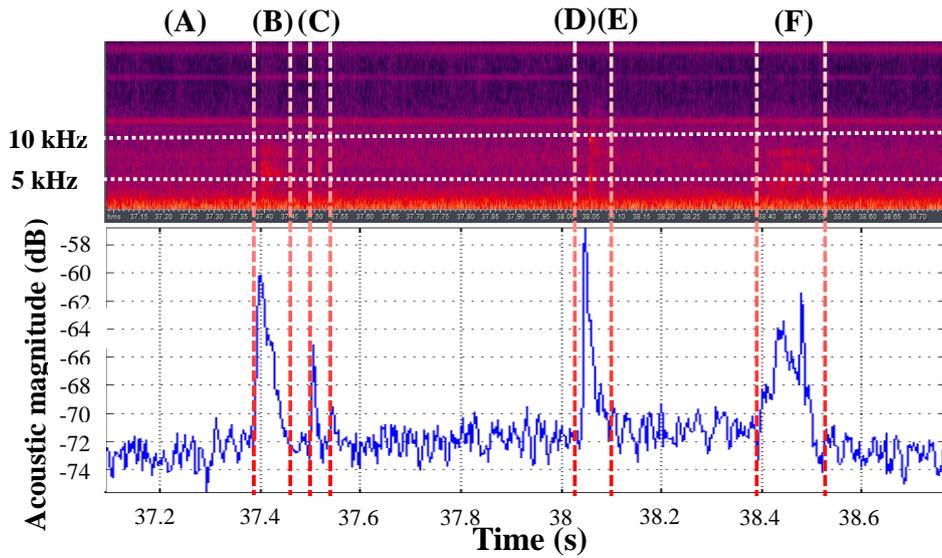


圖 2- 13 單一循環的頻譜圖及功率譜密度圖：各區間訊號意義依字母代碼對應圖 2-14 精密型沖壓機台工作步驟。

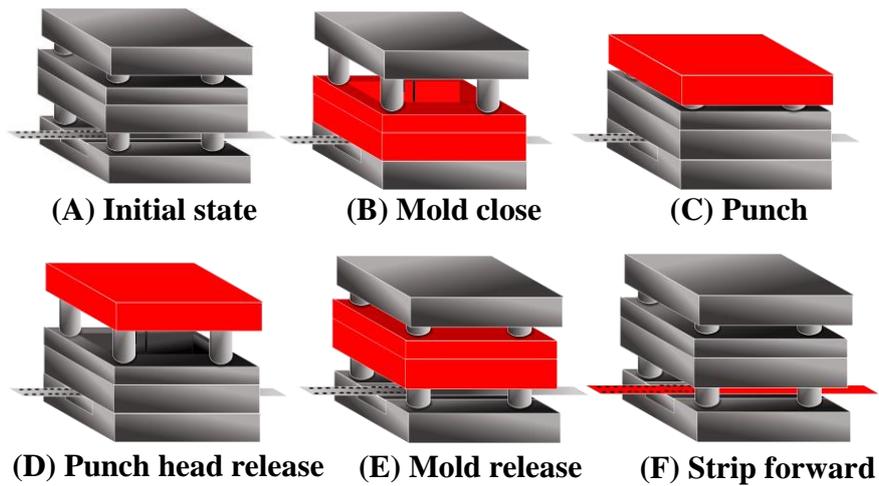


圖 2- 14 精密型沖壓機單一循環工作步驟分解圖：(A)原始狀態 (B)脫料板下壓 (C)沖固板下壓(沖頭刺穿試片) (D)沖固板上移(沖頭抽離試片) (E)自動換料

2.6 量測位置比較

此研究的目的是將精密型沖壓機的沖壓訊號以聲學震動的傳導方式蒐集至微機電麥克風模組加以觀察、分析，為了盡可能地蒐集到足夠多且有用的訊號，微機電麥克風模組必須被固定在盡可能接近震動源頭，但又不能被其他雜訊干擾的位置，為此在這次實驗中使用金屬工業發展中心所有的精密型沖壓機台，四顆

微機電麥克風分別被安置於沖頭固定塊、脫料板、料橋及下模板，同時收錄沖壓訊號，如圖 2-15 所示。

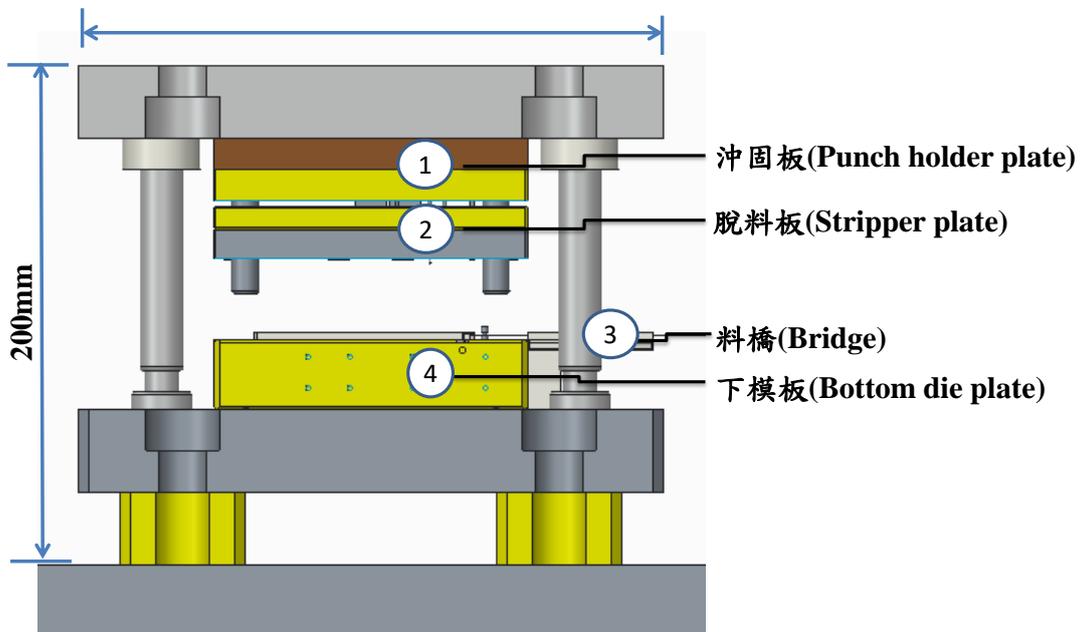


圖 2-15 微機電麥克風模組固定於精密型沖壓機四處

這次實驗中使用直徑 0.8 mm、鎢鋼材質、硬度為 HRC90 的沖頭，工件為 0.4 mm 的不鏽鋼板(SUS304-1/2H)，精密型沖壓機的運作速度為 10 SPM。圖 2-16 為將微機電麥克風安置於不同位置的量測結果，由於微機電麥克風主要的偵測對象為沖頭，原先預期在沖頭固定塊的位置磁吸微機電麥克風會明顯接收到加工時沖擊的訊號，但結果如圖 2-16(A)所示，沖頭與夾具間的作用吸收掉部分沖擊所產生的震動訊號，又微機電麥克風和沖頭的間距太長使原本就相當微弱的震動訊號削弱至幾乎法辨別。由此觀察到，脫料板、料橋及下模板接收到的沖擊訊號事實上是由工件傳遞出來的，沖頭觸碰、衝破不鏽鋼板材時，不鏽鋼板材本身產生的震動即為前文所定義的沖擊訊號。這三個位置中，料橋離不鏽鋼板材距離最近，故接收到的整體訊號強度最強，但單就沖擊訊號本身來討論，該訊號強度和脫料板及下模板接收到的強度差不多，卻因為周圍訊號太強使得沖擊訊號本身變得難以辨別，且由於料橋跟送料機的位置太過接近，使得不必要的訊號也一併被收錄，

如圖 2-16(C)。沖頭正上方的脫料板及正下方的下模板接收到的訊號皆可清楚地辨別沖壓訊號，但由於脫料板在沖壓行程中會來回移動，所以微機電麥克風模組脫落、拉扯的機率較大，且脫料板接收到的背景噪音也較多，如圖 2-16(B)。下模板除了磁吸位置較穩定之外，微機電麥克風接收到的重點訊號(脫料板下壓、沖擊、脫料板上移)振幅強度也普遍較強，如圖 2-16(D)所示，由此實驗結果訂定下模板為此實驗所使用之精密型沖壓機台最理想的偵測位置。

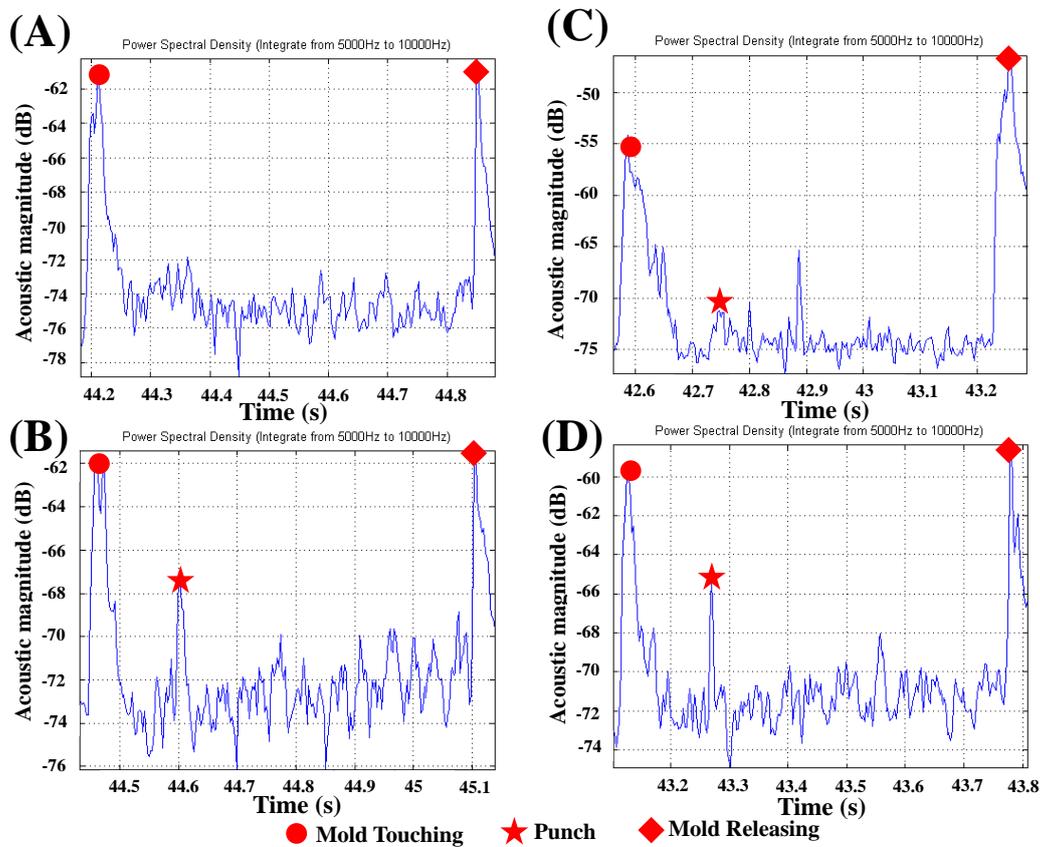


圖 2- 16 不同量測位置的功率譜密度圖：(A)將微機電麥克風固定於沖頭固定塊時，沖頭與夾具間的作用吸收掉部分沖擊所產生的震動訊號，又微機電麥克風和沖頭的間距太長使原本就相當微弱的震動訊號削弱至幾乎無法辨別。(B)脫料板可清楚地辨別沖壓訊號，但由於脫料板在沖壓行程中會來回移動，微機電麥克風模組較易脫落、拉扯。(C)料橋跟送料機的位置非常接近，使得周圍訊號過強導致沖擊訊號變得難以辨別。(D)下模板磁吸位置較穩定，接收到的重點訊號(脫料板下壓、沖擊、脫料板上移)振幅強度也普遍較強，為此實驗所使用之精密型沖壓機台最理想的偵測位置。

2.7 系統架設與實驗設備

如圖 2-17(A)所示，此研究所使用的精密型沖壓機台是高約為 2.75 m 的大型機台，其零組件包含馬達及大型風扇...等，會產生極大噪音的高負載元件。依上段實驗結果，微機電麥克風模組以永久磁鐵磁吸於精密型沖壓機台的下模板，如圖 2-17(B)所示，微機電麥克風模組被固定於沖頭正下方的區域以更準確地接收到沖壓瞬間的訊號。

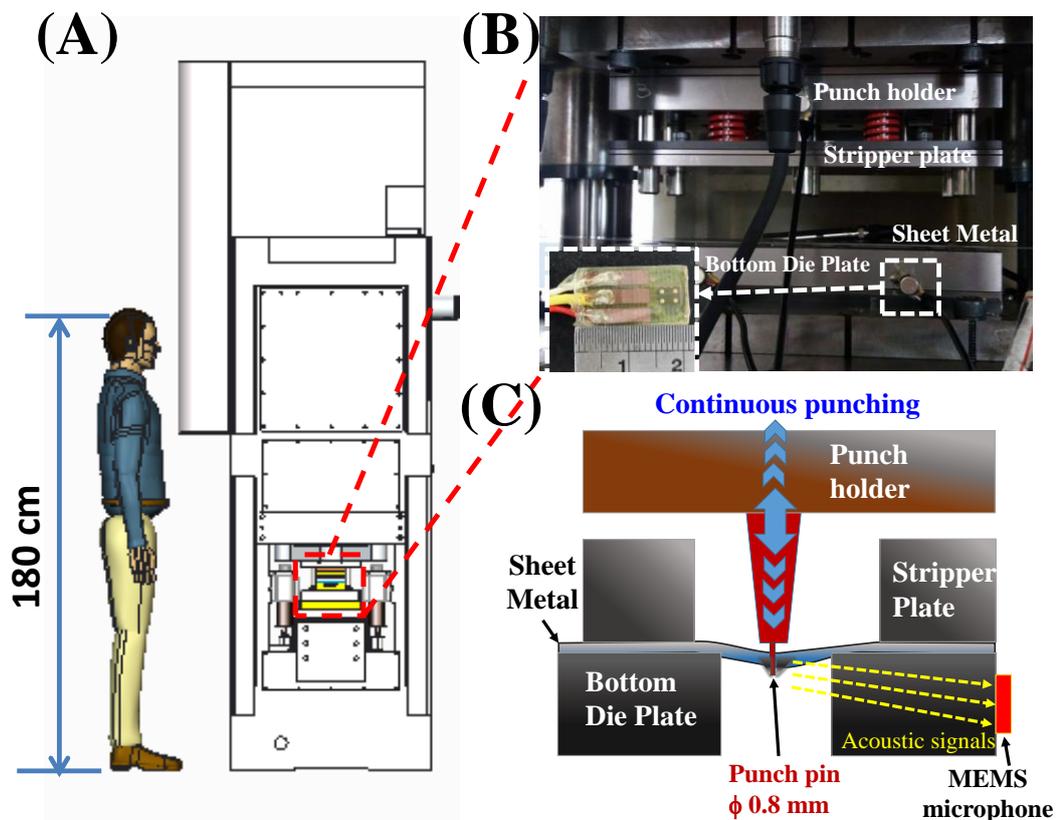


圖 2-17 微機電麥克風磁吸於下模板之示意圖及實體照片：(A)精密型沖壓機比例尺示意圖 (B)微機電麥克風磁吸於下模板之實體照片(C)裝置剖面示意圖

本實驗中使用的沖頭材質是直徑 0.8 mm 的圓柱體，其材質為鎢鋼，分析並判斷出該沖頭斷裂的瞬間即為此研究的最終目標。在連續過程中，沖頭擠壓、衝破料帶產生的震動訊號會藉由下模板傳遞至微機電麥克風接收訊號如圖 2-17(C)，之後該震動類比訊號會藉由專業八軌錄音機(UAC 8, Zoom Corp., Japan)轉換為

數位訊號，並以 USB 3.0 作為傳遞媒介傳遞至個人電腦。為使訊號更為乾淨清澈，微機電麥克風及個人電腦分別以乾電池及鋰電池作為電源供應，以降低電流干擾的可能性，如圖 2-18 所示。

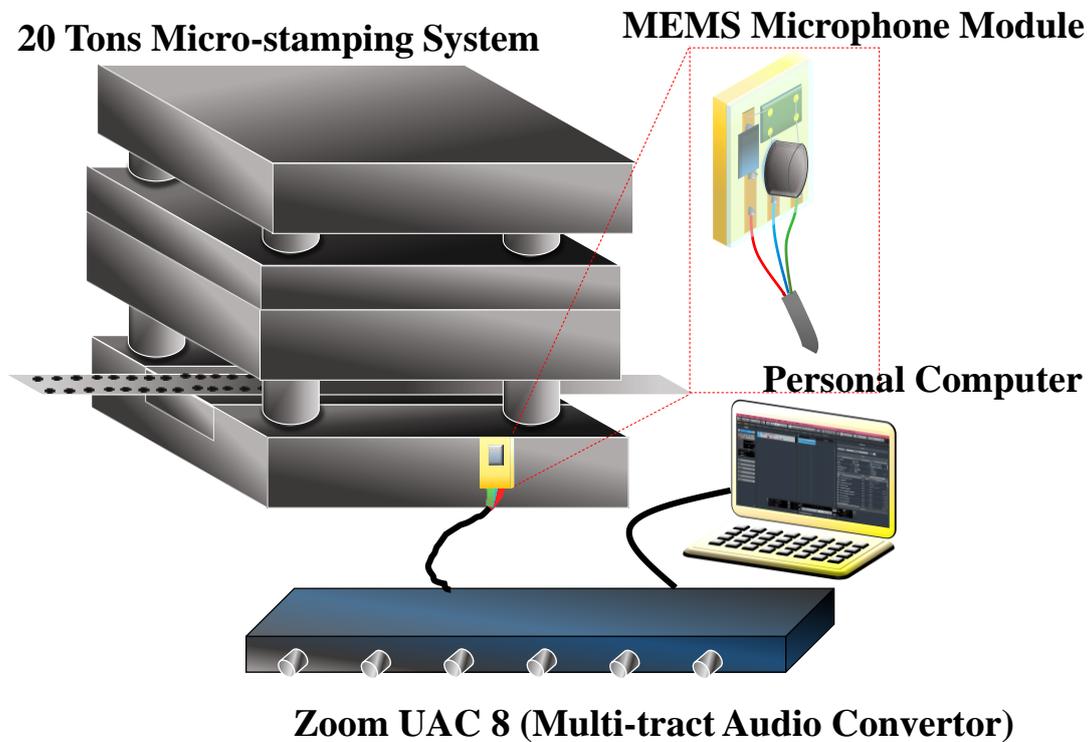


圖 2-18 機電麥克風震動偵測系統架設示意圖：震動類比訊號會藉由專業八軌錄音機轉換為數位訊號，並以 USB 3.0 作為傳遞媒介傳遞至個人電腦，而後進行訊號分析。

第三章 實驗結果與討論

3.1 板材厚度比較

此次實驗使用金屬工業發展中心所有的精密型沖壓機台，裝有直徑 0.8 mm、鎢鋼材質、硬度為 HRC90 的沖頭，備有四種不同厚度的不鏽鋼板材 (SUS304-1/2H)，厚度分別為 0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm 及 0.5 mm，精密型沖壓機的運作速度為 10 SPM，此次實驗的目的是為了比較、觀察精密型沖壓機加工於不同厚度的板材，即沖頭承受不同程度的負載時，其分析訊號表現的差異性。實驗中所使用的沖頭模具於一般正常加工中所使用的板材厚度為 0.2 mm，故其餘厚度的不鏽鋼板為沖頭不同程度的過載現象。圖 3-1 為精密型沖壓機加工不同厚度的不鏽鋼板材所計算出來的功率譜密度圖，圖中星號紅框範圍即為沖壓訊號，經觀察可看出其振幅強度不會因為不鏽鋼板材愈厚而有大幅度的差異，但訊號形態卻因板材厚度不同而有明顯的差別。圖 3-1(A) 為加工厚度 0.2 mm 不鏽鋼板材的分析結果，從圖中可看出其沖壓訊號由兩個間隔約 0.01 秒的峰值訊號組成；圖 3-1(B) 為加工厚度 0.3 mm 不鏽鋼板材的分析結果，該沖壓訊號組成方式和沖壓 0.2 mm 不鏽鋼板材時類似，大多由兩個間隔約 0.01 秒的峰值訊號組成，當中第一個峰值相對沖壓 0.2 mm 不鏽鋼板材時所產生的訊號有較大的起伏；圖 3-1(C) 為加工厚度 0.4 mm 不鏽鋼板材的分析結果，其沖壓訊號由三個各間隔約 0.03 秒的峰值訊號組成，第二個峰值訊號通常較小，有時易被背景雜訊覆蓋；圖 3-1(D) 為加工厚度 0.5 mm 不鏽鋼板材的分析結果，這個條件下的沖壓訊號表現一致性極高，該沖壓訊號僅由一個峰值組成。

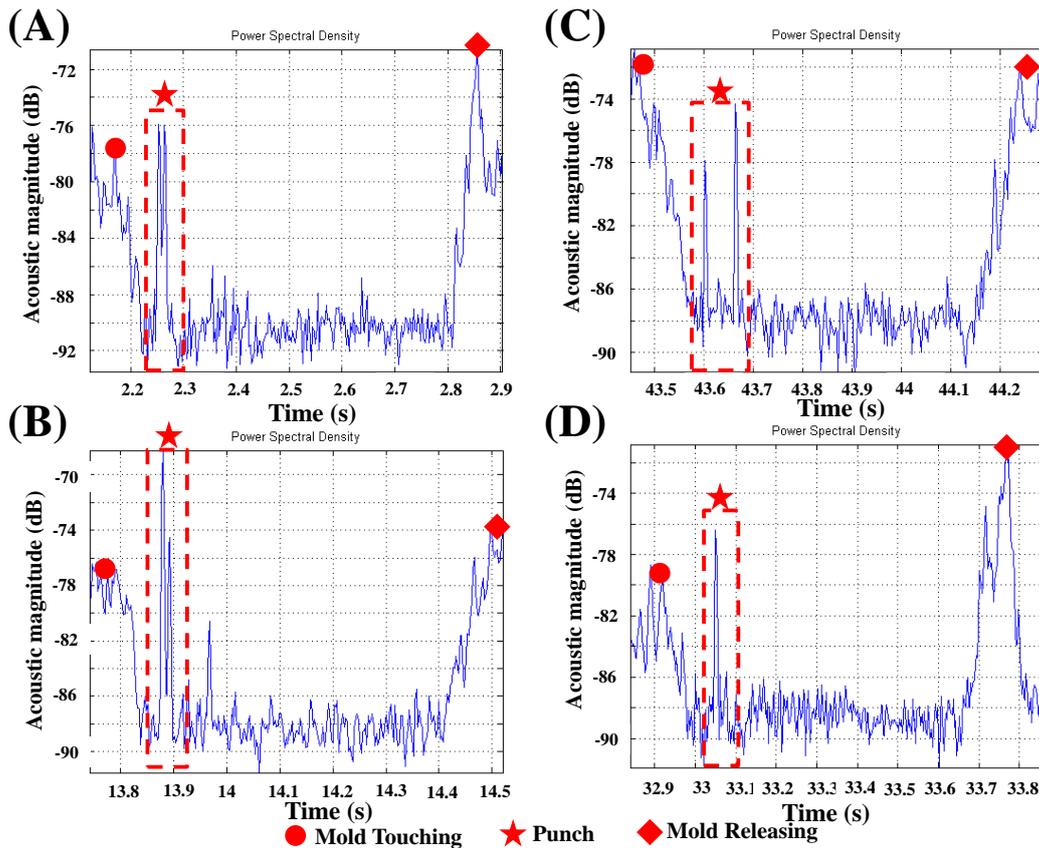


圖 3-1 不同厚度的不鏽鋼板材沖擊結果:為了比較精密型沖壓機加工於不同厚度的板材時,其分析訊號表現的差異性,實驗中備有(A)0.2 mm、(B)0.3 mm、(C)0.4 mm、(D)0.5 mm,四種不同厚度的不鏽鋼板材。其中圓形符號為脫料板下壓訊號,稜型為脫料板上升訊號,星號為沖頭衝破不鏽鋼板材瞬間所產生的沖壓訊號。

為了瞭解各訊號峰值所產生的原因,我們利用掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)觀察板厚 0.2 mm 及 0.4 mm 不鏽鋼板上的沖壓孔。雖然這次實驗所使用的沖頭是為板厚 0.2 mm 的不鏽鋼板所設計,但由圖 3-2 可看出 0.2 mm 不鏽鋼板材上的沖壓孔的撕裂區及毛邊都較大,而加工於 0.4 mm 不鏽鋼板材上的沖壓孔幾乎看不出撕裂區,由此可推測該精密沖壓模具所設計的間隙過大,導致沖頭在沖壓較薄的板材時產生較大的撕裂區,反之,較厚的板材在沖頭下壓擠壓材料時,擠出的材料將沖頭固定反而縮小撕裂區的形成。由上述現象可推測,精密型沖壓機在沖壓 0.2 mm 不鏽鋼板材時,沖頭和下模板的壓應力略高於其抗拉強度,故在沖頭撞擊到 0.2mm 不鏽鋼板後,很快地便衝破、撕裂

不鏽鋼板產生第二個峰值，故 0.2 mm 不鏽鋼板在接受沖壓的瞬間會產生 2 個間隔約 0.01 秒的峰值訊號，如圖 3-1(A)所示。0.4 mm 不鏽鋼板材對於實驗中所使用的沖頭而言是負載較大的材料，沖頭在擠壓 0.4mm 不鏽鋼板時難以突破其抗拉強度，故在沖頭撞擊不鏽鋼板產生第一個峰值訊號後，擠壓促使 0.4 mm 產生塑性變形時，產生大小不等的第二個峰值訊號，並在最後衝破、撕裂不鏽鋼板時產生第三個峰值訊號，如圖 3-1(C)所示，0.4mm 不鏽鋼板材在接受沖壓瞬間會產生三個各間隔約 0.03 秒的峰值訊號，第二個峰值訊號通常較小，有時易被背景雜訊覆蓋。

此次實驗的結果顯示沖壓訊號主要受兩個動作影響：沖頭撞擊金屬板材的瞬間以及沖頭壓應力超過金屬板材的抗強度產生撕裂區的瞬間，而剪切區的形成於此頻段幾乎不會產生峰值訊號。不同條件下的沖壓型態及計算結果亦隨之改變，若要預測沖頭的使用壽命，就必須依照不同的條件建立各自的資料庫逐一比對。

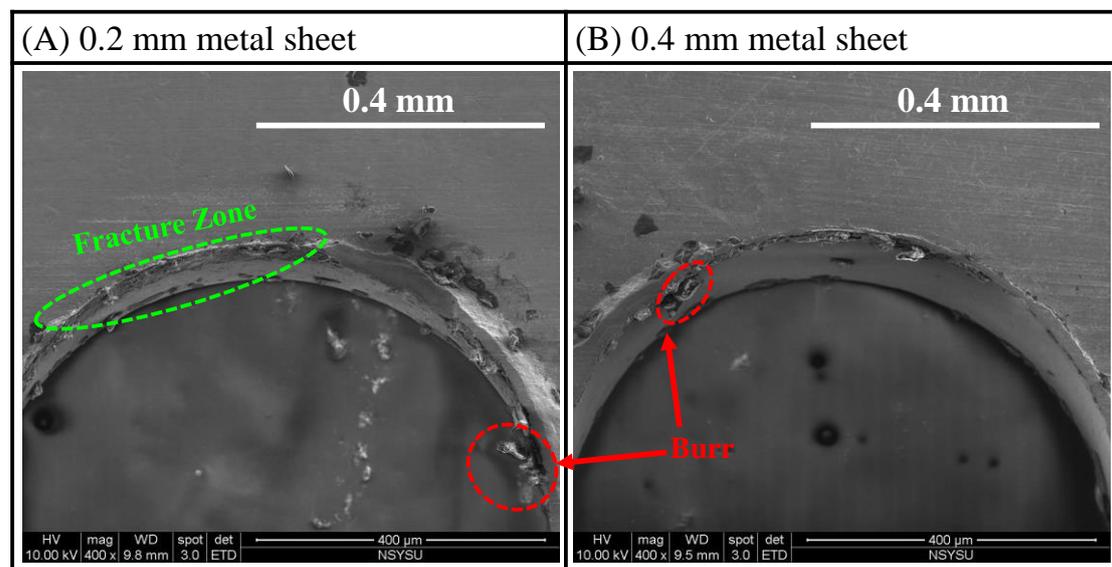


圖 3- 2 沖壓孔內側截面 SEM 觀察圖：(A) 精密沖壓模具所設計の間隙過大，使 0.2 mm 不鏽鋼板材的沖壓孔撕裂區較大且毛邊明顯。(B) 在沖頭下壓擠壓 0.4 mm 不鏽鋼板材時，擠出的材料將沖頭固定反而縮小撕裂區的形成。

3.2 正常負載破壞檢測

此次實驗使用的為國立高雄第一科技大學林柏村教授實驗室所有的精密型沖壓機台，實驗目的為將沖頭使用至損壞斷裂以瞭解沖頭損壞前後的訊號形貌。為了增加沖頭損壞的機率，此次實驗選用板厚 0.5 mm 不鏽鋼板材(SUS304)作為沖壓工件以增加沖頭負載，三支沖頭同時加工並改用硬度較低的高碳合金鋼(SKD11)，且將精密型沖壓機的運作速度提高至 50 SPM，除了使加工速率加快之外，高速運作亦會使沖頭加工時的衝量增加，亦會增加其損耗率。

上一節有提到在量測精密型沖壓時，不同的量測條件會產生不同訊號型態，故在更換量測條件時，需先蒐集初始加工的沖壓訊號作為比較基準，而後進行後續判斷。圖 3-3(A)即為初期沖壓所產生的訊號圖，可看出紅框部分的沖壓訊號和圖 3-1(D)所產生的沖壓訊號非常相似。在上一段中有提到，沖壓訊號主要受兩個動作影響：沖頭撞擊金屬板材的瞬間以及沖頭施加壓力超過金屬板材的抗強度產生撕裂區的瞬間，而剪切區的形成於此頻段幾乎不會產生峰值訊號。由圖 3-3(A)的 SEM 圖可看出，此機台於初期加工時雖然會使沖壓孔產生少量毛邊，但幾乎無撕裂區的存在，也就是說在此條件下，加工初期沖頭對不鏽鋼板材僅有撞擊和剪切的動作，故沖擊瞬間僅有一個峰值產生。由圖 3-3(B)的 SEM 圖可看出撕裂區的形成在沖壓加工中期愈來愈明顯，沖壓訊號的結構也開始發生改變，如圖 3-3(B)的紅框區域。隨著沖頭磨耗的程度愈來愈嚴重，沖壓孔的剪切區也不再平滑，如圖 3-3(C)(D)的 SEM 圖所示，沖頭撕裂不鏽鋼板所產生的訊號也愈來愈大、愈來愈亂，如圖 3-3(C)(D)功率譜密度圖所示。

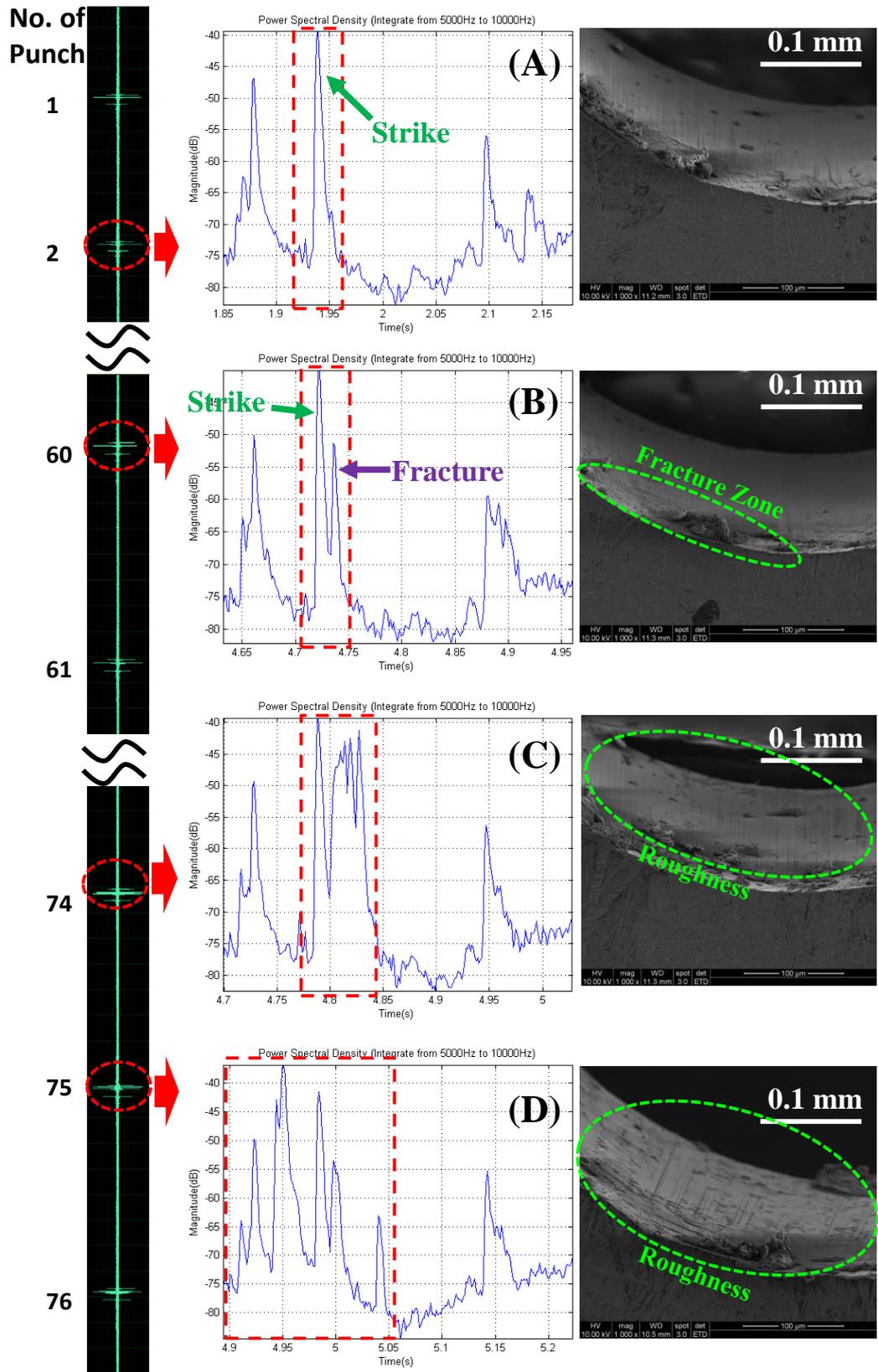


圖 3-3 破壞檢測實驗於各階段之功率譜密度圖對照沖壓孔 SEM 觀察圖：
 (A)沖壓初期 (B)沖壓中期 (C)沖壓末期 (D)斷裂前一沖壓孔

由上述的演變可發現，精密型沖壓模具在此條件下的磨耗與撕裂區的形成有著高度相關，不同時期的沖壓訊號相互比對過後亦發現，除了沖頭撕裂不鏽鋼板材的訊號之外的其他訊號有著相當高的重複率，如圖 3-4 所示。

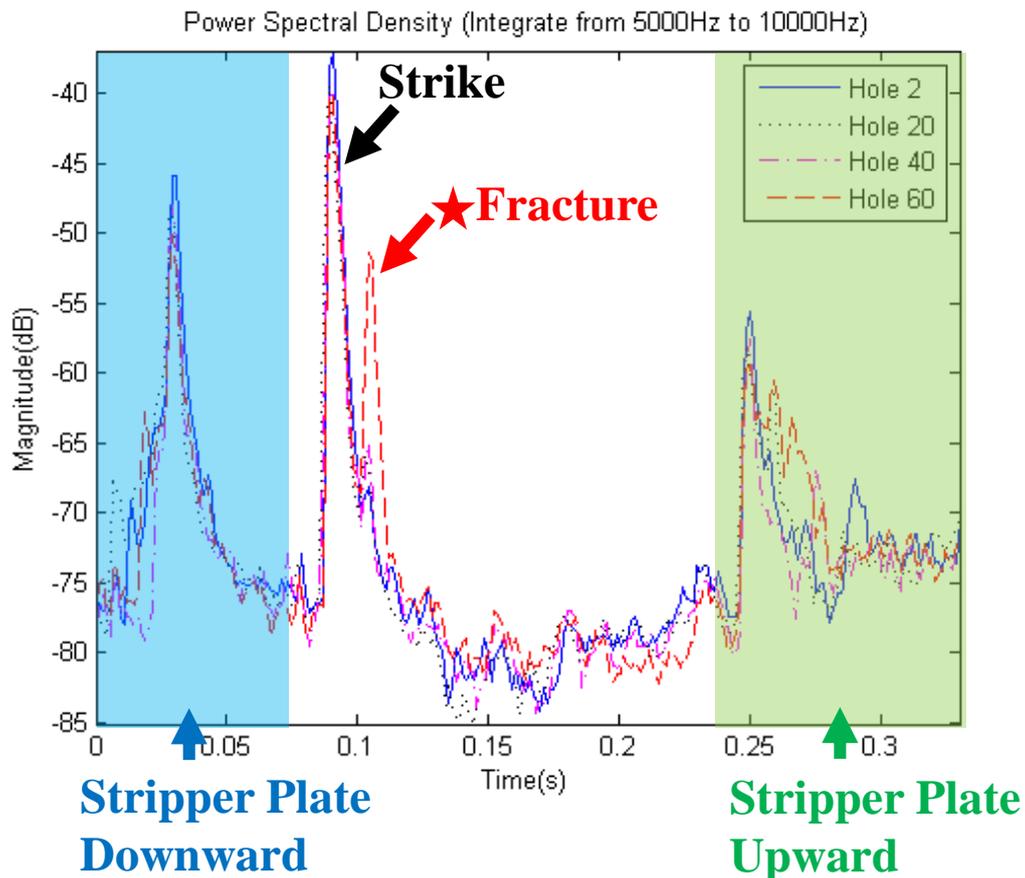


圖 3-4 取樣訊號資料點：各次沖壓循環訊號經重疊比對後發現有相當高的重複率，其中星號標示為撕裂訊號。

經由上述討論，我們將撕裂訊號的峰值蒐集並相互比較得到圖 3-5 的結果，從分析結果可看出沖壓初期及中期的撕裂訊號峰值有微弱的起伏，經由圖 3-6 觀察發現該機台在進行沖壓時沖頭的精度有些許的偏移，可解讀出沖頭本身並沒有均勻地被磨耗，每次沖壓時撕裂區的形成亦隨之有所變異，故撕裂訊號的峰值會有微弱的起伏，但仍不影響大方向的趨勢。沖頭在進行第 50 到 60 次的沖壓時撕裂訊號有大幅度的變動，顯示著沖頭在此時已磨耗到趨近於加工極限，沖壓孔的

狀態亦可視為瑕疵品，在正常機台運作中已達停機標準，而後在第 75 次沖壓達到第一個高峰，此時第一支沖頭斷裂。在這樣條件下，從圖 3-5 便可解讀沖頭在不同階段的加工狀態。

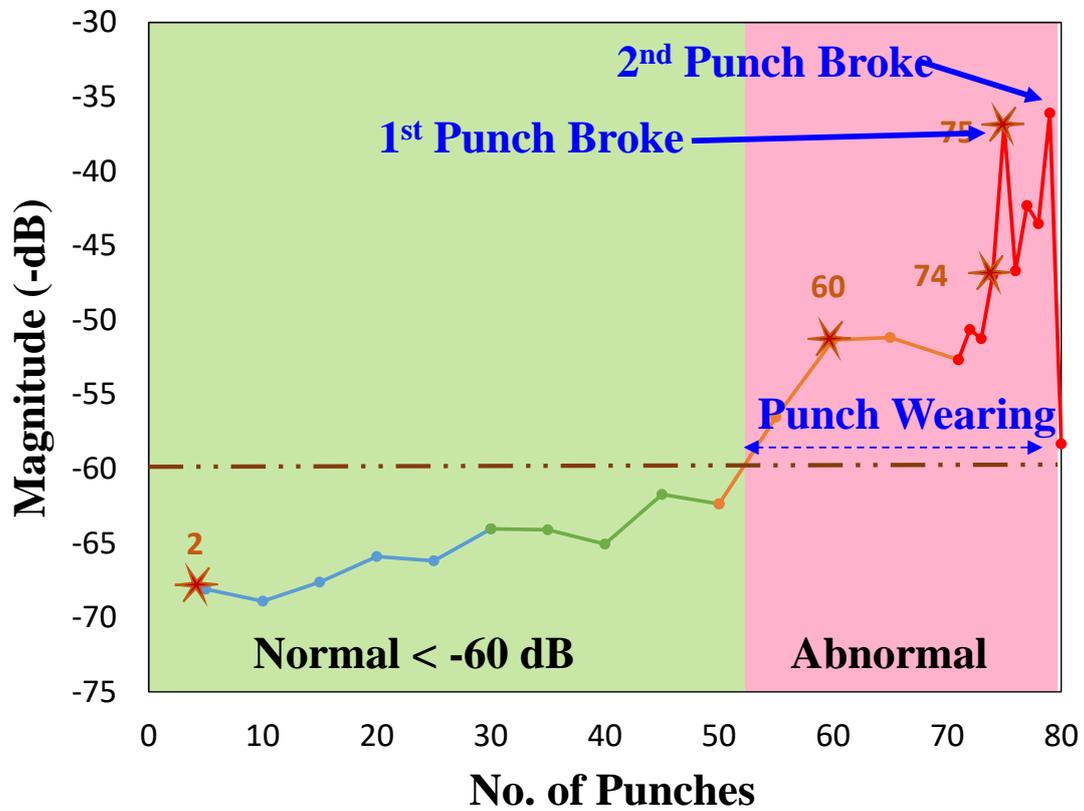


圖 3-5 各次沖壓撕裂訊號資料點：沖頭位置的偏移使沖壓初期及中期的撕裂訊號峰值有微弱的起伏，在第 50 到 60 次沖壓時撕裂訊號有大幅度的變動，顯示沖頭在此時已磨耗到趨近於加工極限，而後在第 75 次沖壓達到第一個高峰，此時第一支沖頭斷裂。

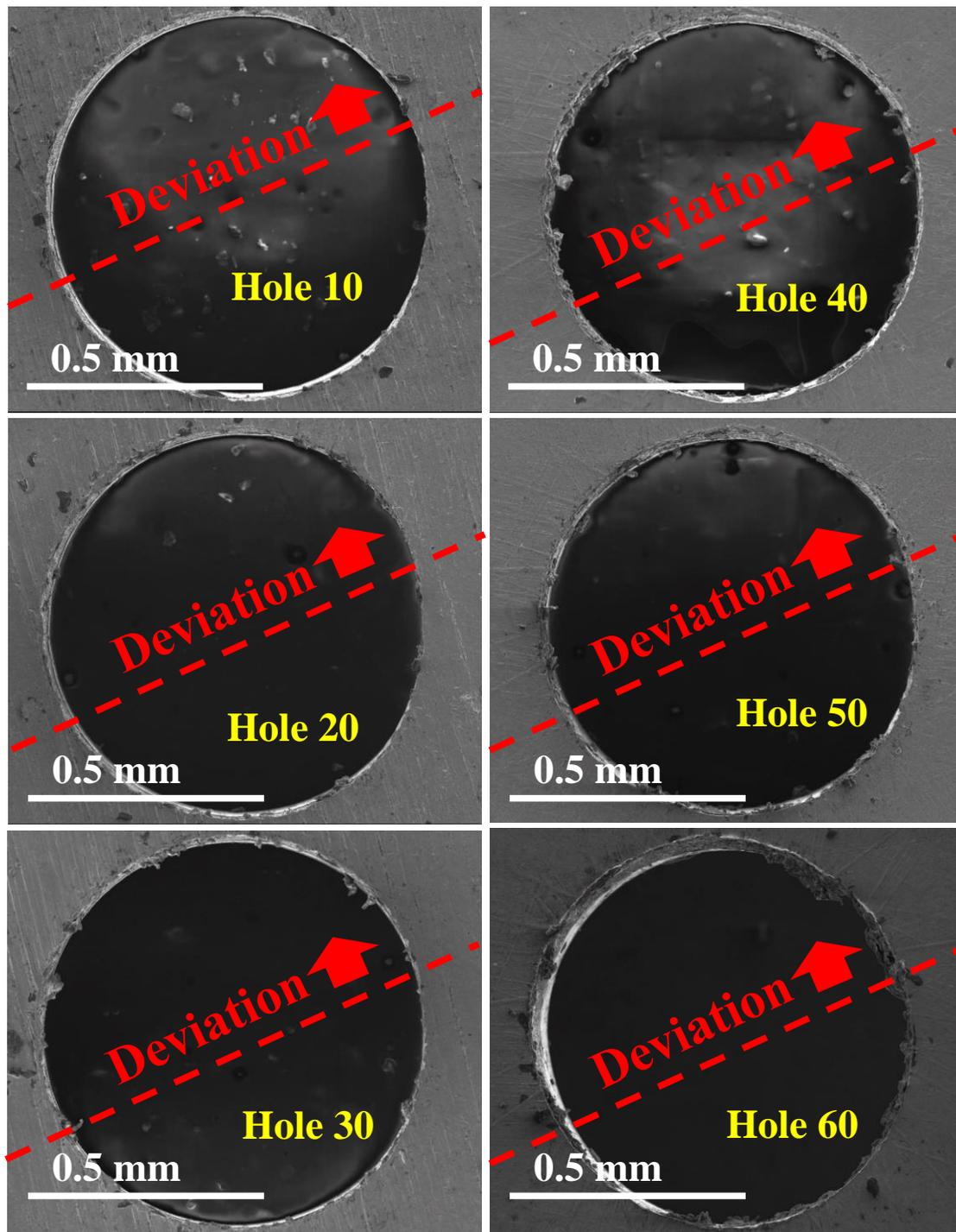


圖 3- 6 沖頭精度偏移：由各階段的沖壓孔觀察可發現，沖頭稍微往左上方偏移，顯示沖頭並沒有均勻地被磨耗，故每次沖壓時撕裂區的形成不定。

3.3 過度負載破壞檢測

此次實驗使用的為財團法人金屬工業研究中心所有的精密型沖壓機台，實驗目的為將沖頭使用至損壞斷裂以瞭解沖頭損壞前後的訊號形貌。此次實驗選用板厚 0.4 mm 不鏽鋼板材(SUS304-1/2H)作為沖壓工件，兩支沖頭同時加工並改用硬度較低的高碳合金鋼(SKD11)，金屬中心所使用的精密型沖壓機台一般設定最高連動速度為 30 SPM，為了和上段實驗條件保持一致，工程師將加工速度提高到 50 SPM，此速度所提供的衝量使模具間的作用力與反作用力相當大，且實驗中使用的工件厚度亦超過模具負荷，使機台在不協調的情況下加工，可視為機台過度負載的情況。本次實驗中所使用的精密型沖壓機台與上段所使用的機台加工方式不同，此機台沖壓位置為不鏽鋼板材兩側，如圖 3-7，為了清楚標示後面的實驗數據，靠機台內側的沖頭為沖頭 A，而靠近微機電麥克風的那側為沖頭 B，如圖 3-8 所示。

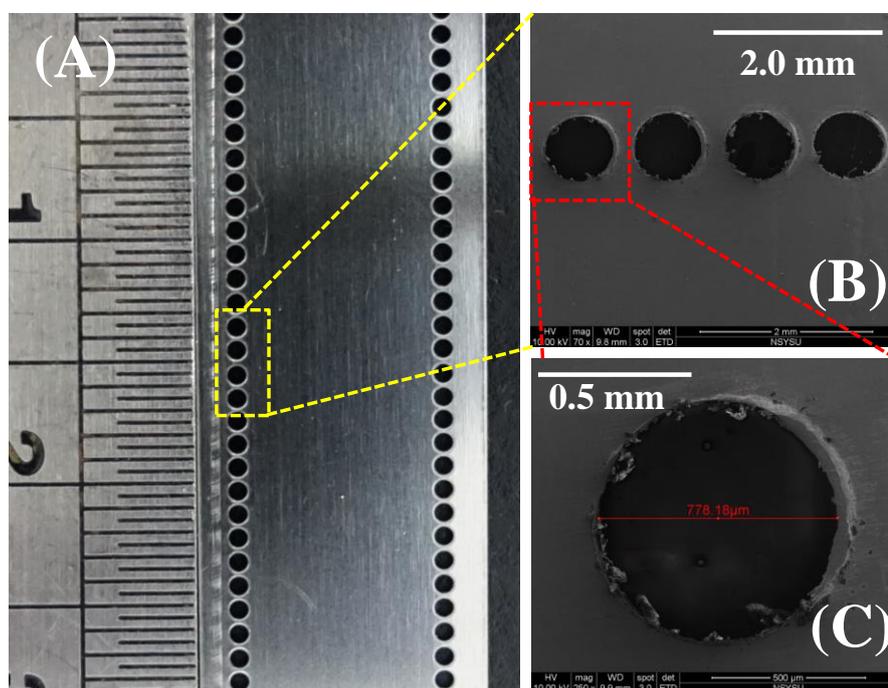


圖 3-7 沖壓後不鏽鋼金屬板材實體圖：此次實驗所使用的精密型沖壓機台是由兩支沖頭同時加工，加工位置為不鏽鋼板材兩側。(A)沖壓板材照片 (B)70 倍 SEM 圖 (C)250 倍 SEM 圖

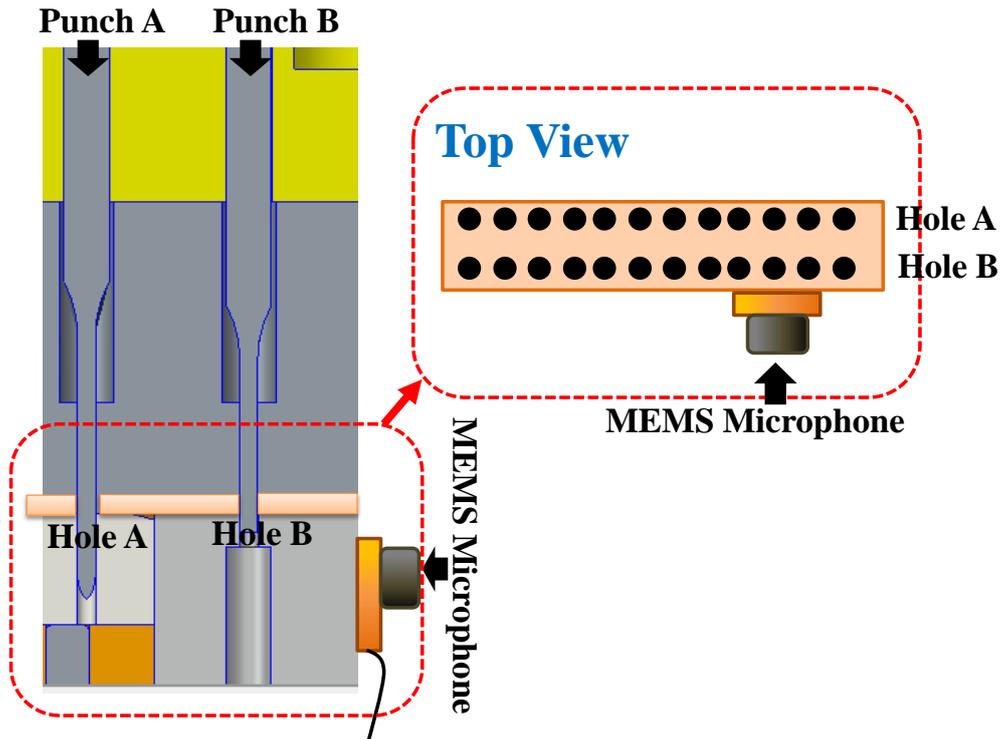


圖 3- 8 精密型沖壓機台側視圖及內部上視圖：靠機台內側的沖頭為沖頭 A，而靠近微機電麥克風的那側為沖頭 B。

由於金屬中心所使用的精密型沖壓機台一般設定最高連動速度為 30 SPM，為了在這次實驗中順利將加工速度提高到 50 SPM，操作工程師在實驗開始之前先進行幾次慢速沖壓測試。此次實驗依然是採連續加工直至沖頭沖切至斷裂後才停止，在這次實驗中沖頭 A 在加工第 17 次循環時斷裂，而沖頭 B 在加工第 128 次循環時斷裂。將第一加工循環進行功率譜密度計算後發現這次實驗的加工循環功率譜密度圖與之前型態相差甚大，如圖 3-9，初度判斷為機台在過度負載的情況下加工所致，亦可能和沖頭狀態有關，故以 SEM 觀察沖壓孔以瞭解原因。從圖 3-10(B)可發現，沖頭 A 所加工的第一個沖壓孔截面已有相當大比例的撕裂區，其剪切區的表面也非常粗糙。以上一節的實驗結果來看，沖頭 A 在加工第一個沖壓循環時的磨耗狀態已接近沖頭壽命末期，也就是說沖頭 A 在實驗前的慢速測試中磨耗相當嚴重，使沖頭 A 的使用壽命遠短於沖頭 B 的使用壽命。由於此機台是由兩個沖頭同時加工於不鏽鋼工件兩側，若有一個沖頭先行損壞會使接下

來的沖壓加工施力不平衡，訊號計算結果亦屬於異常狀態。故在此實驗中不會對沖頭壽命進行預測，而會針對沖頭與沖壓孔的損壞程度及其訊號表現討論。

圖 3-11 為沖頭 A 斷裂後沖頭 B 加工的第一個沖壓孔，由圖 3-11(B)可觀察到截面部分幾乎無撕裂區的形成且剪切面成平滑，顯示沖頭 B 於這個階段仍未被磨耗到很嚴重，因此沖頭 B 的加工行程，故第 16 次以前的沖壓主要討論沖頭 A 磨耗程度對訊號產生的影響。

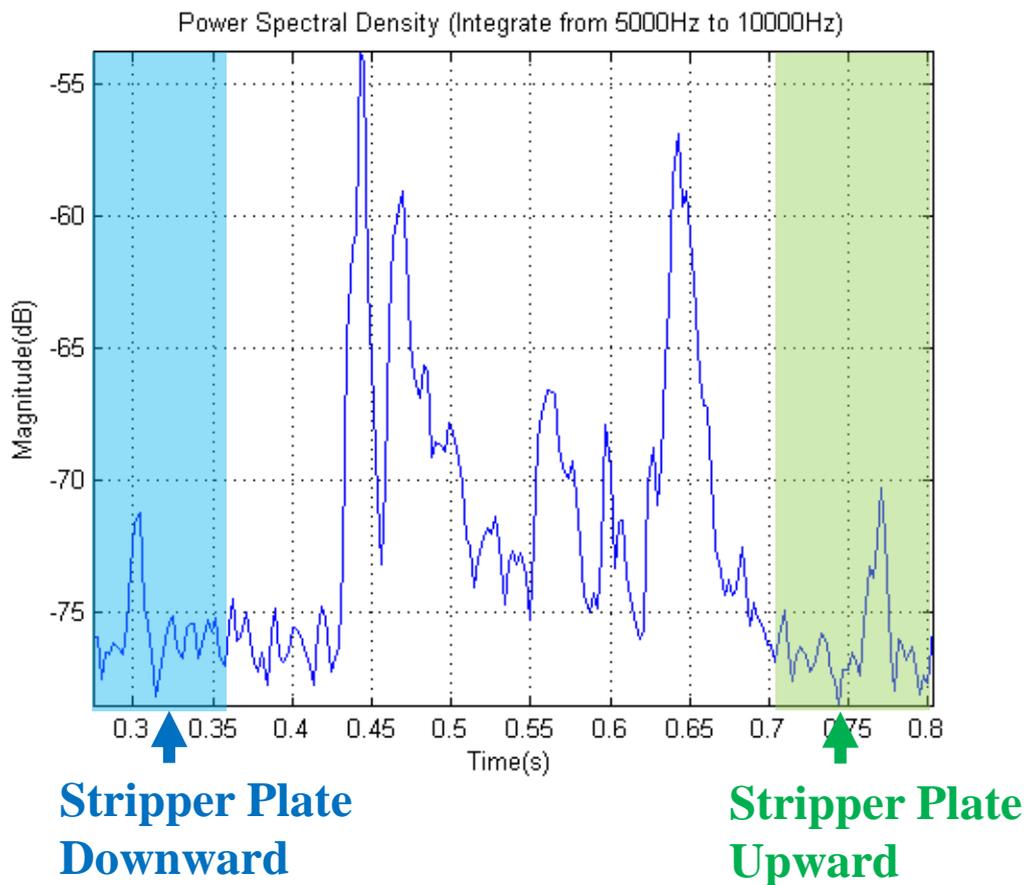


圖 3-9 第一次加工循環功率譜密度圖：此次實驗沖壓循環功率譜密度圖型態與之前實驗結果相差甚大，初度判斷為機台在過度負載的情況下加工所致，亦可能和沖頭狀態有關。

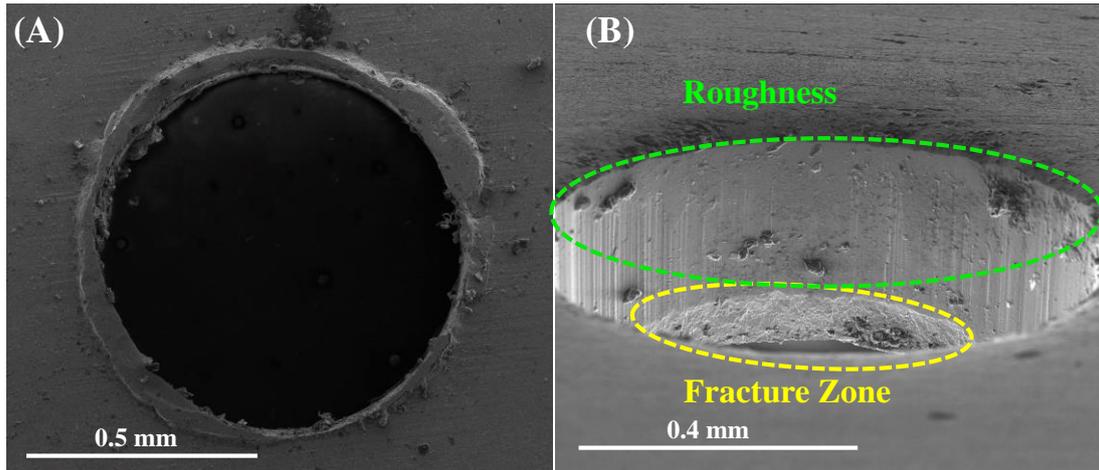


圖 3- 10 沖頭 A 第一個沖壓孔 SEM 圖：沖頭 A 所加工的第一個沖壓孔截面已有相當大比例的撕裂區，其剪切區的表面也非常粗糙，顯示沖頭 A 在前段慢速沖壓過程中已磨耗得相當嚴重。(A)沖頭 A 第一個沖壓孔上視圖 (B)沖壓孔 A 第一個沖壓孔截面圖

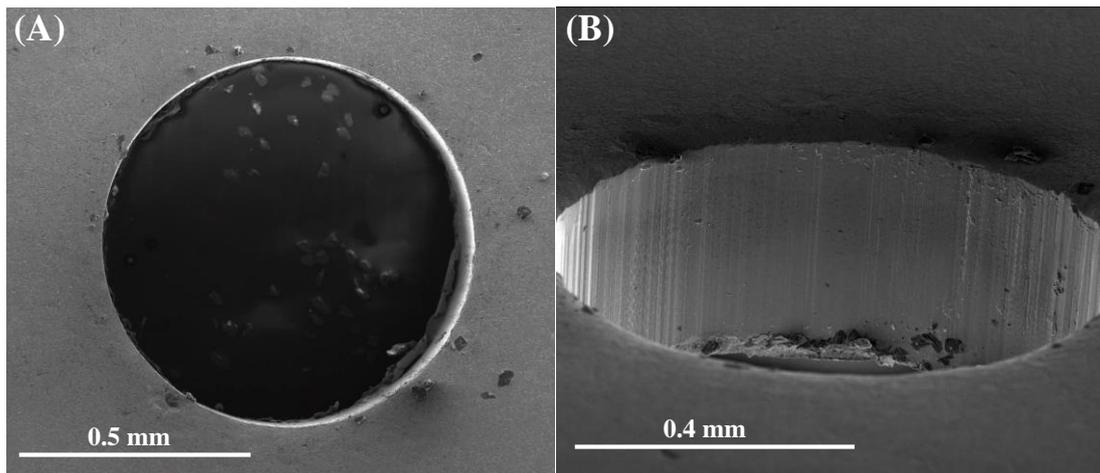


圖 3- 11 沖頭 B 第 18 個沖壓孔 SEM 圖(沖頭 A 斷裂後第一個沖壓孔)：沖頭 B 家工的沖壓孔截面幾乎無撕裂區的形成，且剪切面成平滑。(A)沖頭 B 第 18 個沖壓孔上視圖 (B)沖壓孔 B 第 18 個沖壓孔截面圖

在此次實驗沖頭 A 僅加工至第 17 次即斷裂實屬異常，經由 SEM 觀察發現沖頭 A 在加工的第一個沖壓孔已產生面積比例偏高的撕裂面，如圖 3-10(B)所示，觀察接下來的沖壓孔截面後發現，撕裂面的比例在第一次沖壓行程之後便沒再增長，而剪切面的粗糙度則隨著沖壓次數的增加而提高，如圖 3-12 所示。隨著沖切面粗糙度的提高，沖頭 A 行經沖切面所接觸、摩擦的表面積亦增加，在第一

章有提到當零件與零件間摩擦時會因結構性共振產生高頻諧波，其組成隨基本頻率變動，零件磨耗的程度增加會使摩擦時接觸的表面積提高，高頻諧波的能量亦會提高。由此，圖 3-13 為沖頭 A 斷裂前各階段的沖壓行程循環頻譜圖，藉由觀察頻譜圖可將訊號區分為三個區塊：基礎特徵訊號區間(Basic Characteristic Signal)、工作循環判斷區間(Working Cycle Distinguishing)以及損壞訊號區間(Defect Signal)。基礎特徵訊號區間是由精密型沖壓機台自身機械震動及供電電流波動所構成，此區間選取的範圍為 3 kHz 至 5 kHz，此範圍內的訊號強度最強，但由於囊括各組件運作及周遭環境所產生的訊號，故在前段實驗中多不採用。而這次實驗中，由於機台在不協調的情況下加工，精密沖壓模具組件間大幅度碰撞、摩擦，導致周遭訊號強度提高，使脫料板移動的訊號相對削弱，故此次實驗多利用此區間的訊號判斷加工循環區間，如圖 3-14(C)所示。工作循環區間為精密沖壓機台內部組件在加工運作期間正常接觸、摩擦所產生的高頻諧波，頻率選取範圍為 5 kHz 至 10 kHz，由於高頻訊號無法傳遞到很遠的距離，所以這個頻率範圍能將周圍環境及較遠的工作組件訊號排除，僅保留感測器附近組件正常接觸摩擦的訊號，故在此區間的資料點能清楚展現機台運作的模態。組件磨耗所產生的訊號也能在此區間觀察得到，在前面實驗中多使用這個區間觀察所有精密型沖壓機台的工作循環及模號訊號。由於此次實驗的條件過於極端，單以此區間難以觀察出訊號在不同磨耗階段所發生的改變，但仍能為此條件的沖壓循環訊號建立基準，如圖 3-14(B)所示。損壞訊號區間僅有在沖頭磨耗較嚴重或沖壓方式不正確時，與周圍組件或不鏽鋼金屬板材有過多接觸、摩擦才換產生高頻諧波資料點，頻率選取範圍為 25 kHz 至 30 kHz，如圖 3-14(A)所示。

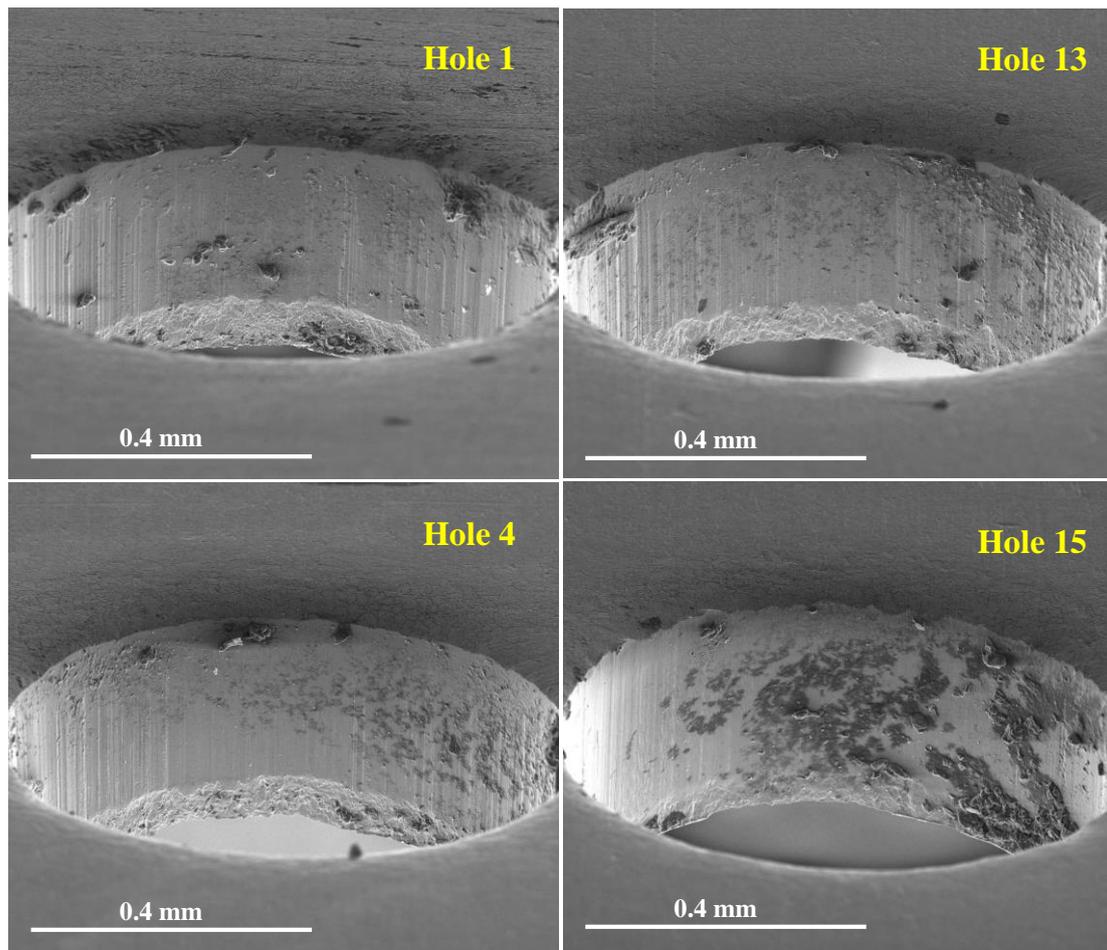


圖 3- 12 沖頭 A 各階段沖壓孔截面 SEM 圖：撕裂面的比例在第一次沖壓行程之後便沒再增長，而剪切面的粗糙度則隨著沖壓次數的增加而提高。

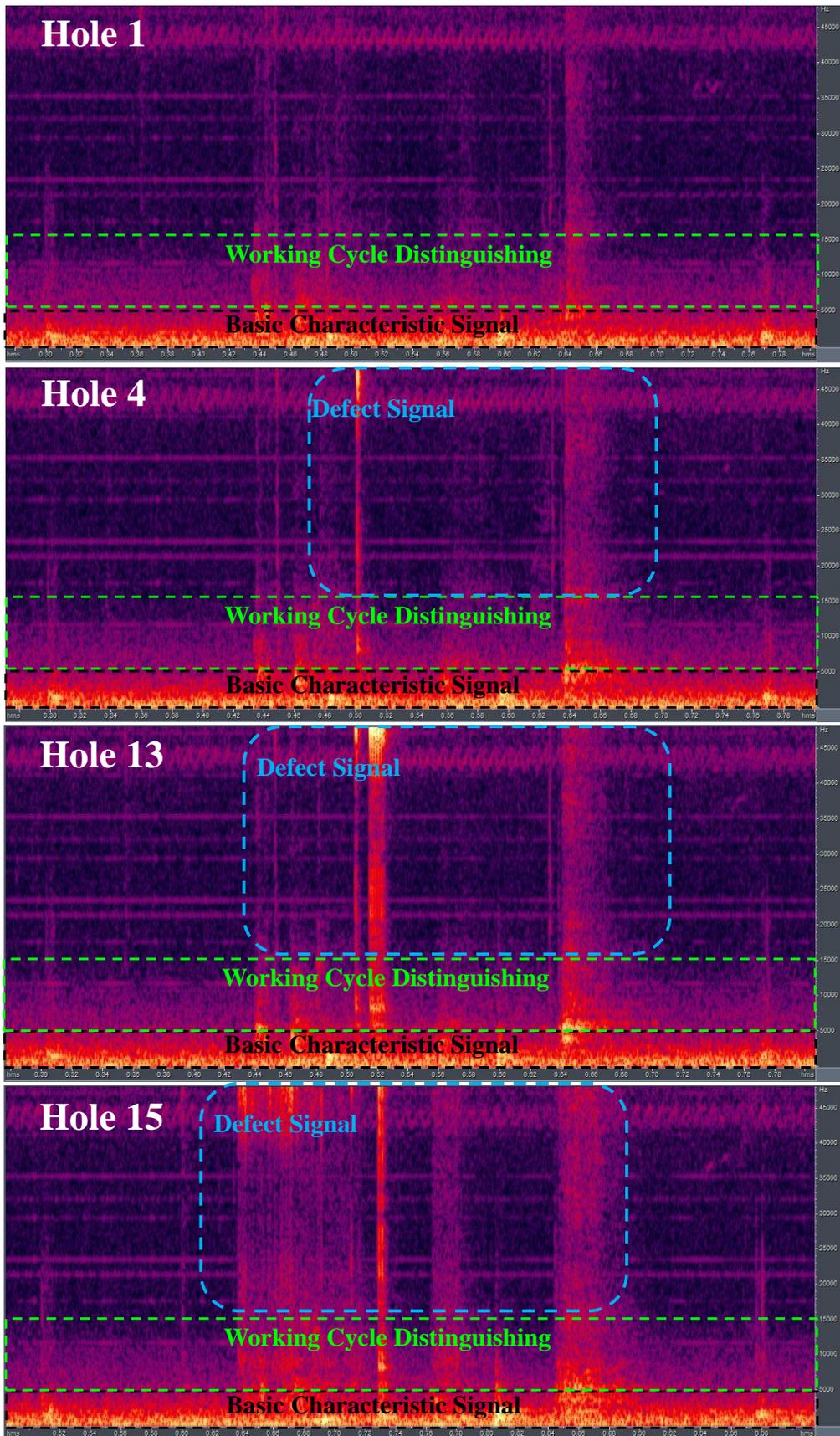


圖 3- 13 沖頭 A 各階段沖壓行程頻譜圖

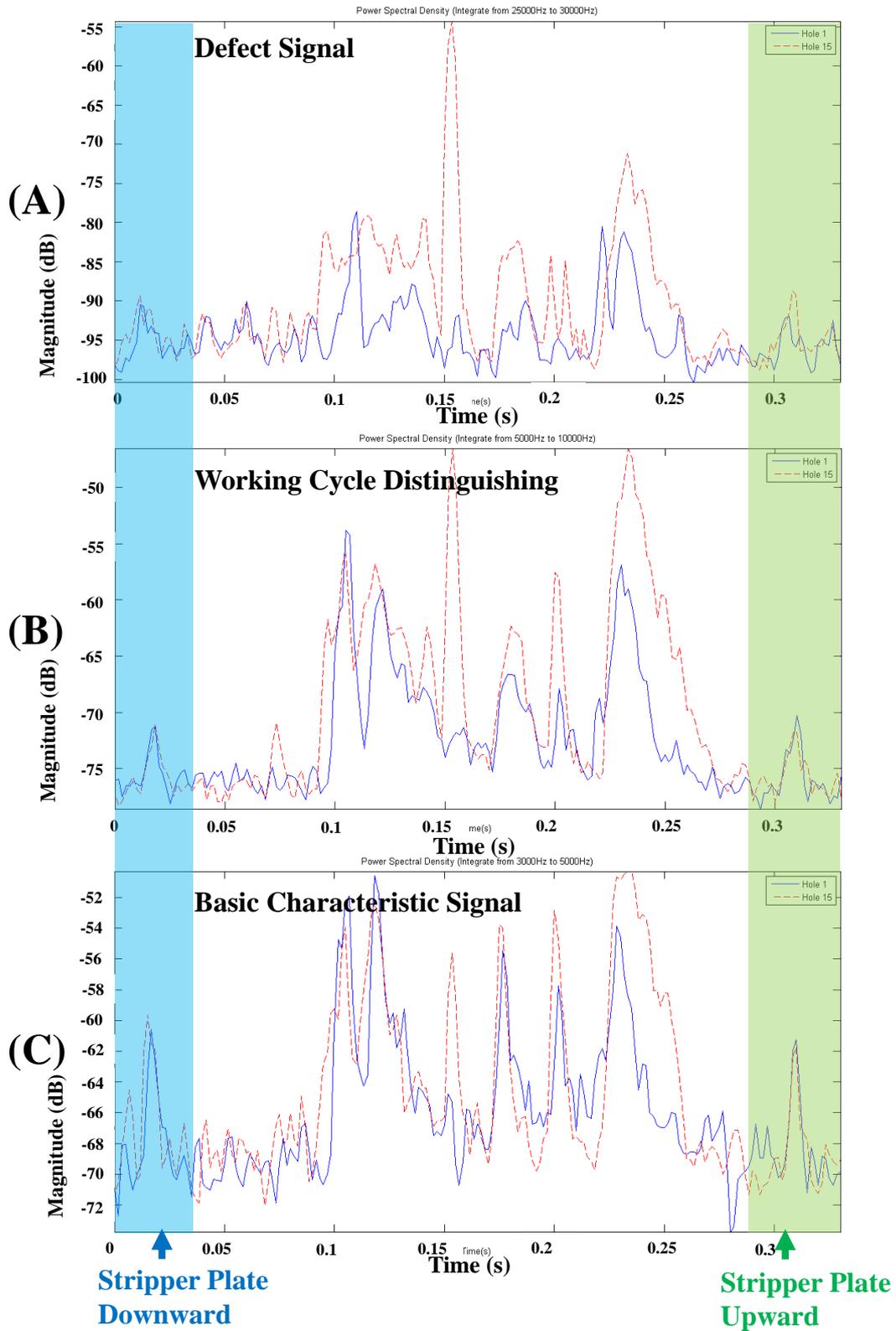


圖 3- 14 各個頻率範圍的功率譜密度圖：(A)損壞訊號區間(25 kHz~30 kHz)(B)工作循環判斷區間(5 kHz~10 kHz)(C)基礎特徵訊號區間(3 kHz~5 kHz)

由於此次實驗所使用的精密型沖壓機台是由兩支沖頭對不鏽鋼板材兩側進行加工，沖頭 B 在沖頭 A 斷裂過後以不平衡的方式進行加工。沖頭 B 於各階段單獨加工的成果如圖 3-15 所示，可發現沖頭 B 所加工的沖壓孔截面撕裂面比例雖有成長，但到接近斷裂前撕裂面的比例仍然非常低，且剪切面依舊相當平滑，如圖 3-15(Hole 126)。由此瞭解到沖頭 B 的損耗方式並非逐漸磨耗崩壞，而可能是因長期不平衡加工而突然斷裂。圖 3-16 為沖頭 B 於不同階段的頻譜圖，於上段分析一樣分為三個頻率區間，雖然沖頭 B 並非逐漸磨耗斷裂，仍可從工作循環判斷區間及損壞訊號區間看出隨撕裂區緩慢成長而增強的高頻諧波。

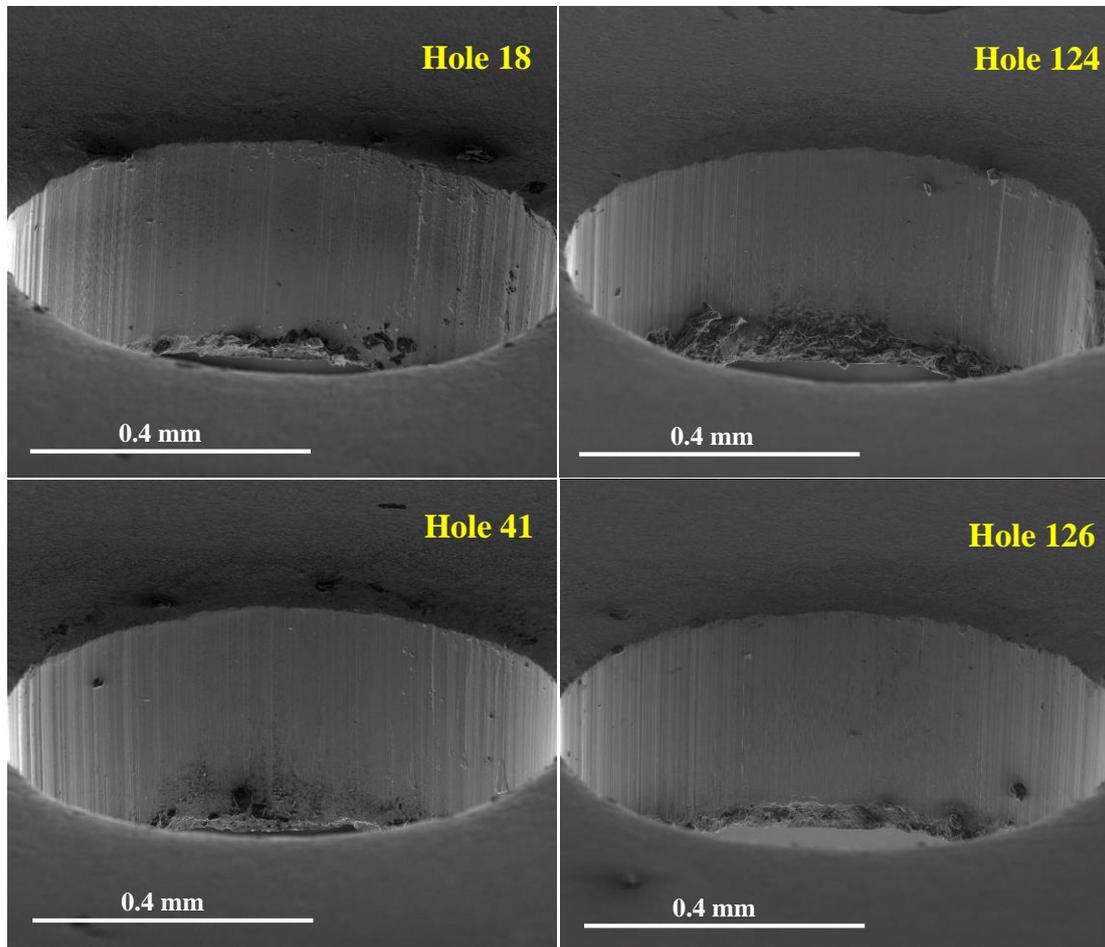


圖 3- 15 沖頭 B 各階段沖壓孔截面 SEM 圖：沖頭 B 所加工的沖壓孔截面撕裂面比例雖有成長，但接近斷裂前撕裂面的比例仍然非常低，且剪切面依舊相當平滑。由此觀察到沖頭 B 的損耗方式並非逐漸磨耗崩壞，而可能是因長期不平衡加工而突然斷裂。

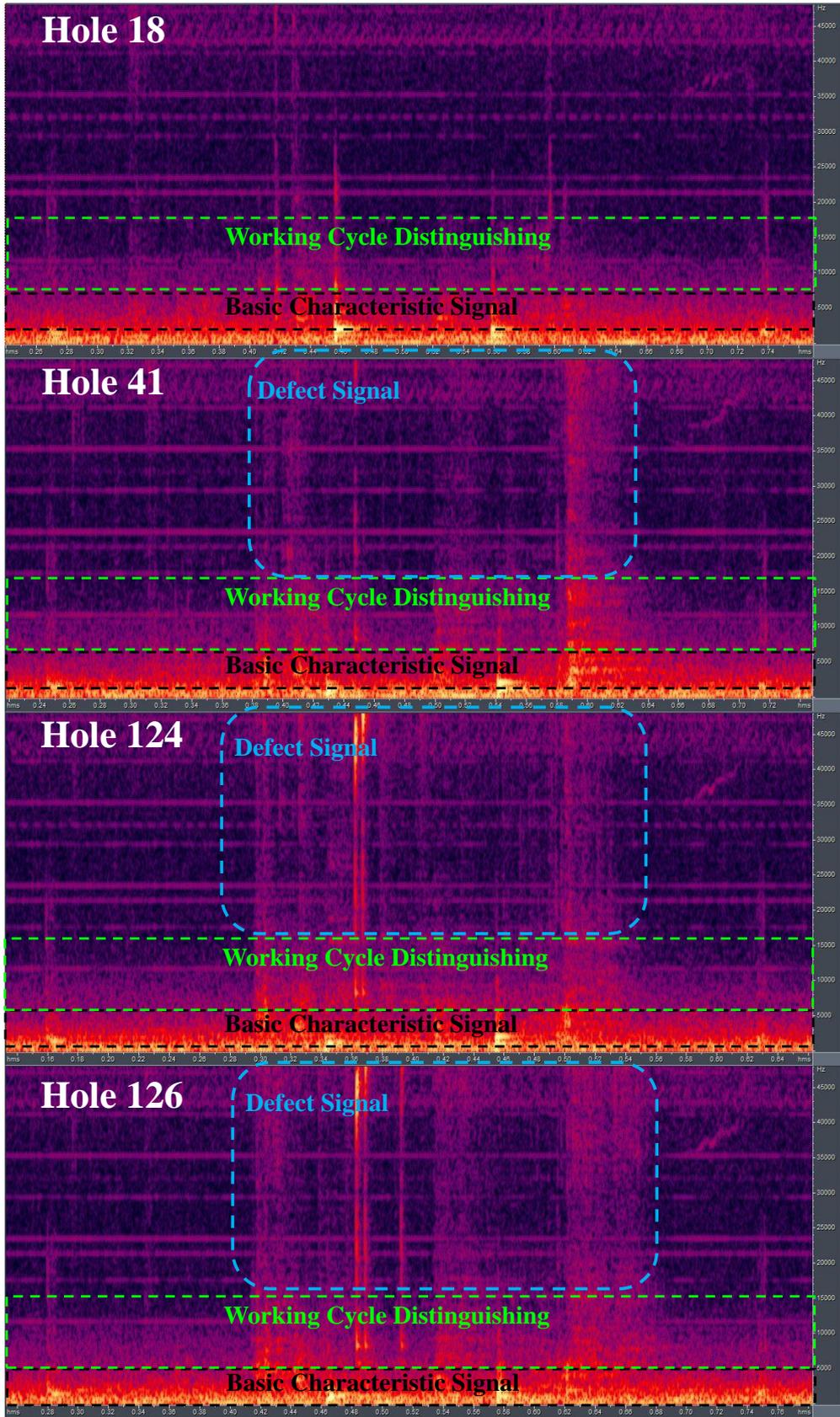


圖 3- 16 沖頭 B 各階段沖壓行程頻譜圖

雖然此次實驗全部循環皆屬過度負載加工，在將沖頭 B 初期沖壓循環的功率譜密度圖相互疊加後發現重疊率依然相當高，如圖 3-17，由此可知只要加工條件一致，其震動訊號特徵表現就會依機台加工系統的基礎特徵訊號規律展現。經觀察發現工作循環判斷區間及損耗訊號區間的總功率有隨沖頭磨耗程度提高而增加的趨勢，如圖 3-14(A)(B)所示，故擷取各次沖壓循環脫料板下壓後 0.05 秒至脫料板上生前 0.05 秒的訊號，將其損耗訊號區間的功率積分比較，結果如圖 3-18 所示。結果顯示各循環損耗訊號區間的總功率的確可以表現沖頭磨耗的程度，其中由於沖頭 B 為突然斷裂而非逐漸磨耗毀損，故功率積分結果難以看出沖頭 B 的斷裂瞬間，但仍然可以做為後續研究參考。

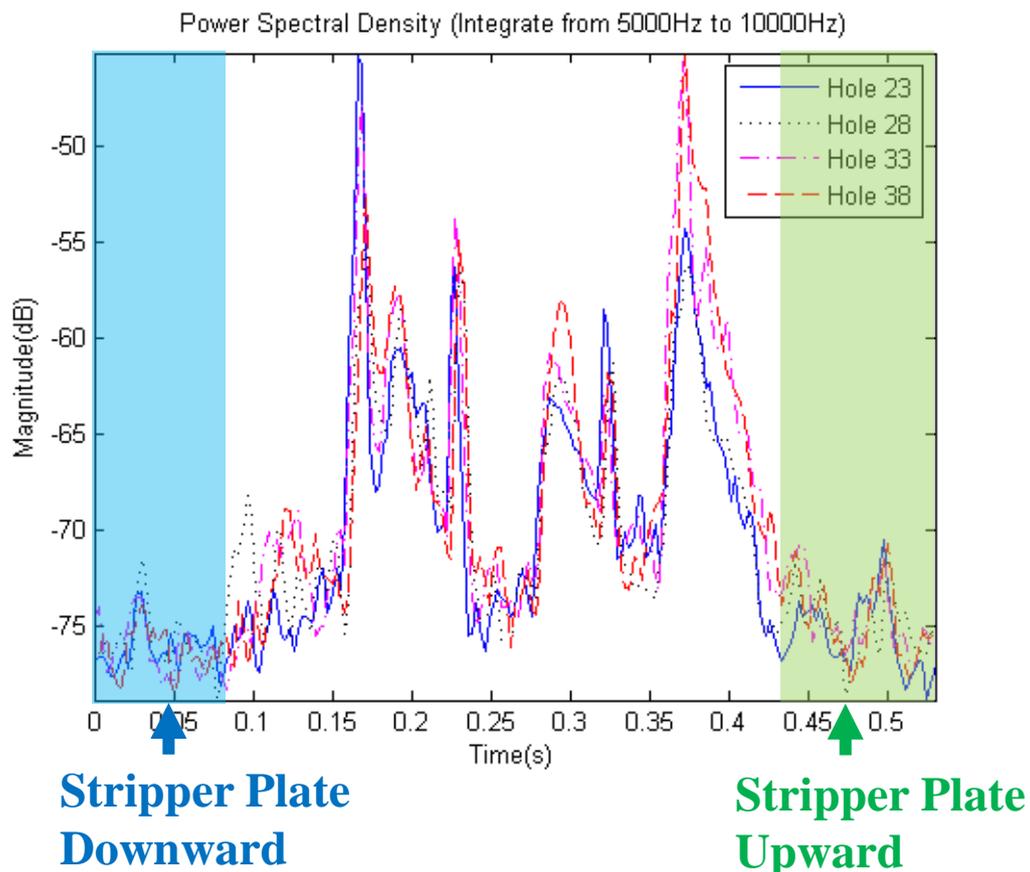


圖 3- 17 沖頭 B 加工初期沖壓循環之功率譜密度圖(5 kHz~10 kHz)：將沖頭 B 單獨加工初期的功率譜密度圖相互疊加後發現重疊率依然相當高，顯示只要加工條件一致，其震動訊號特徵表現就會依機台加工系統的基礎特徵訊號規律展現。

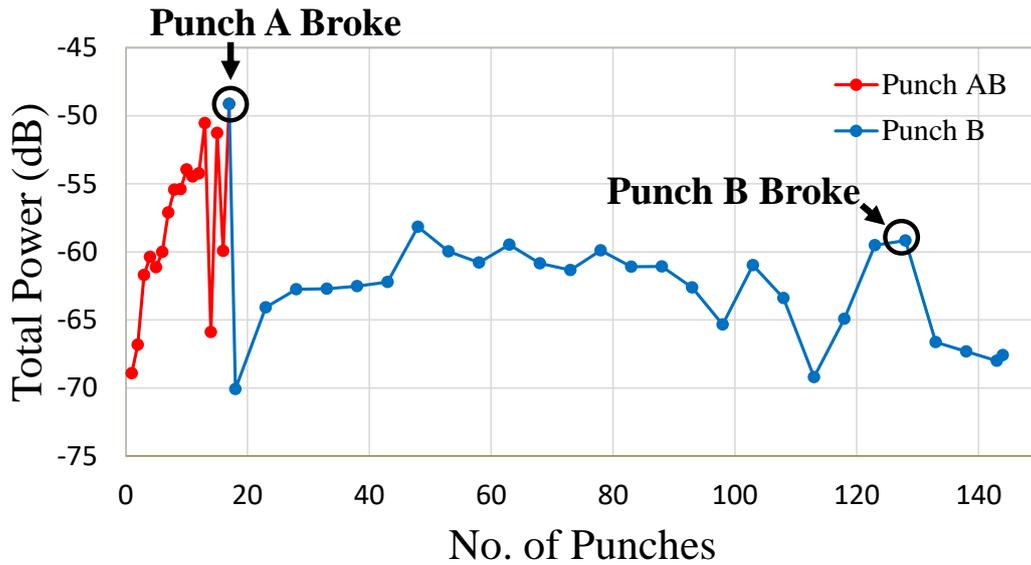


圖 3- 18 各次沖壓循環損壞訊號區間總功率：擷取沖壓循環脫料板下壓後 0.05 秒至脫料板上生前 0.05 秒的訊號，將其損耗訊號區間的功率積分比較，其中紅線部分為沖頭 A 及沖頭 B 同時加工的功率積分值，而藍線為沖頭 B 單獨加工的功率積分值。可看出沖頭 A 斷裂前功率積分值提高，並在斷裂前劇烈起伏，由於沖頭 B 為突然斷裂而非逐漸磨耗毀損，故功率積分結果難以看出沖頭 B 的斷裂瞬間，但仍然可以做為後續研究參考。

第四章 結論與未來展望

4.1 結論

本研究提出以聲學震動為基礎的微機電麥克風感測模組，成功地從吵雜的工廠環境中辨識出微弱的精密型沖壓訊號，並且更深入地從沖壓訊號探討精密型沖壓的加工精度及沖頭使用狀態。微機電麥克風以永久磁鐵固定於下模板表面，其收音孔緊貼模具表面以接收由金屬介質傳遞的震動訊號，該震動訊號經由頻譜轉換後可順利解讀出精密型沖壓工作循環的三個步驟：脫料板下壓撞擊下模板、沖壓瞬間、脫料板上升脫離下模板。由於沖頭是由彈簧控制下壓步驟，因此沖壓瞬間的訊號無法以工作角度精密定義出，故脫料板下壓及上升的訊號的區間被簡單定義為沖壓訊號觀察區。為了瞭解沖壓瞬間的訊號在不同負載下的表現，便實驗沖壓 0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm 及 0.5 mm 四種不同板厚的不銹鋼板材，加工後的沖壓孔以 SEM 觀察。藉由四種條件的訊號分析結果及 SEM 圖比較，發現沖壓訊號主要由撞擊訊號及撕裂訊號構成，其中撞擊訊號為沖頭撞擊不銹鋼板材時產生的訊號峰值；而撕裂訊號則為壓應力超過不銹鋼板材抗拉強度時，板材發生不規則破裂造成的訊號峰值。在此可發現，精密型沖壓訊號的比較基準須分別以加工精度需求及加工條件分別定義。實驗結果顯示撕裂訊號會隨著撕裂區截面面積的增加而放大，而剪切區在後期加工會變得較為粗糙，使功率普密度計算圖的模態脫離正常規律，且功率值隨磨耗程度上升而增加。在另一組使用不同精密沖壓機台的實驗中，由於該機台一般使用的最高速度為 30 SPM，在強制提高至 50 SPM 後加工產生的訊號相當凌亂。經觀察發現 25 kHz 至 30 kHz 的高頻諧波總功率和磨耗程度呈正相關，可作為後續研究參考。此論文研究的偵測系統可有效提升精密型沖壓機的加工良率，並提供一套具有普及可能性新偵測方法。

4.2 未來展望

本研究的微機電麥克風模組雖然藉由音孔緊貼的方式有效阻隔掉大部分的高負載震動及環境干擾，但周遭環境若有突發的高分貝噪音仍會使沖壓訊號分析失真。且在此研究中，沖頭的狀況多由沖壓孔的狀態推測，故比起量測沖頭的狀態，此研究提供的更多是沖壓孔的精度及粗糙度解析。由於研究中使用的精密型沖壓機台並非由本實驗室所有，故微機電麥克風感測模組僅能侷限於表面裝置。希望未來能將微機電麥克風模組裝置於精密型沖壓模組內部，除了完全阻隔周遭干擾外，更能近距離貼近沖頭位置，細緻地分析沖頭的使用狀態。

在裝置微機電麥克風偵測系統時，微機電麥克風模組及個人電腦皆使用電池供電，這樣的方式雖然能在蒐集訊號時提高訊號的乾淨度，卻也使實驗時間限縮。精密型沖壓模具在一般使用情況下，沖頭磨耗至斷裂需要運作相當長的時間，故希望在未來能建構出完整的濾波、供電系統使微機電麥克風偵測系統能夠長時間運作。

由實驗結果與討論中所提到，此研究中提供的功率普密度分析法在不同的精度要求、不同的加工條件下，描繪出來的模態及比較基準皆不同。因此，比起針對各個條件設定各自參數，不如以建構、蒐集各個條件的基準資料庫，以功率譜密度疊加計算出來的圖形做相似度判別，並以相似率作為磨耗標準。由於現代機具的客製化程度相當高，若要做到這樣程度的分析需要仰賴物聯網大數據的蒐集分析，是非常遠程的偵測目標。

參考文獻

- [1] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, "A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [2] P. F. Rizos, N. Aspragathos, and A. D. Dimarogonas, "Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 138, pp. 381-388, 1990.
- [3] R. O. Yavne, "Accelerometer," United States Patent US3363470, 1968.
- [4] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review," *Tribology International*, vol. 17, pp. 3-10, 1984.
- [5] A. Tétreault and Z. Zhengping, "End-winding vibration monitoring: pivotal in preventing major damage on a large turbo-generator," *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Ottawa, Canada, 2-5 June 2013, pp. 1-6
- [6] C. S. Sunnersjö, "Varying compliance vibrations of rolling bearings," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 58, pp. 363-373, 1978.
- [7] N. Servagent, T. Bosch, and M. Lescure, "A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, pp. 847-850, 1997.
- [8] M. S. Safizadeh and S. K. Latifi, "Using multi-sensor data fusion for vibration fault diagnosis of rolling element bearings by accelerometer and load cell," *Information Fusion*, vol. 18, pp. 1-8, 2014.
- [9] O. Dossing, "Prediction of transducer mass-loading effects and identification of dynamic mass," *Proceeding of the 9th International Modal Analysis Conference*,

Firenze, Italy, 15-18 April 1991, pp. 306-312

[10] N. Baldanzini and M. Pierini, "An assesment of transducer mass loading effects on the parameters of an experimental statistical energy analysis (SEA) model," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, pp. 885-903, 2002.

[11] M. R. Ashory, "Assessment of the mass-loading effects of accelerometers in modal testing," *Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference*, California, USA, 2002, pp. 1027-1031

[12] N. H. Baharin and R. A. Rahman, "Effect of accelerometer mass on thin plate vibration," *Jurnal Mekanikal*, vol. 29, pp. 100-111, 2009.

[13] S. Uzawa and Y. Kikuti, "Diaphragm of dynamic microphone," United States Patent US5148492, 1990.

[14] T. Ananthapadmanaban and V. Radhakrishnan, "An investigation of the role of surface irregularities in the noise spectrum of rolling and sliding contacts," *Wear*, vol. 83, pp. 399-409, 1982.

[15] T. Igarashi and S. Yabe, "Studies on the vibration and sound of defective rolling bearings : second report : sound of ball bearings with one defect," *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)*, vol. 26, pp. 1791-1798, 1983.

[16] R. B. W. Heng and M. J. M. Nor, "Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition," *Applied Acoustics*, vol. 53, pp. 211-226, 1998.

[17] U. Benko, J. Petrovčič, Đ. Juričić, J. Tavčar, and J. Rejec, "An approach to fault diagnosis of vacuum cleaner motors based on sound analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, pp. 427-445, 2005.

[18] D. Tinta, J. Petrovčič, U. Benko, Đ. Juričić, A. Rakar, M. Žele, J. Tavčar, J. Rejec,

and A. Stefanovska, "Fault diagnosis of vacuum cleaner motors," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 177-187, 2005.

[19] U. Benko, J. Petrovčič, Đ. Juričić, J. Tavčar, J. Rejec, and A. Stefanovska, "Fault diagnosis of a vacuum cleaner motor by means of sound analysis," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 276, pp. 781-806, 2004.

[20] X. Li, "A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 157-165, 2002.

[21] T. Kishi, M. Shiwa, Y. Ohara, and Y. Nakagami, "Acoustic emission sensor," United States Patent US5191796, 1990.

[22] I. Grabec and P. Leskovar, "Acoustic emission of a cutting process," *Ultrasonics*, vol. 15, pp. 17-20, 1977.

[23] X. Li, "A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 157-165, 2002.

[24] K. Iwata and T. Moriwaki, "An application of acoustic emission measurement to in-process sensing of tool wear," *Annals of the CIRP*, vol. 26, pp. 21-26, 1977.

[25] A. M. Al-Ghamd and D. Mba, "A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1537-1571, 2006.

[26] R. Gutkin, C. J. Green, S. Vangrattanachai, S. T. Pinho, P. Robinson, and P. T. Curtis, "On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 1393-1407, 2011.

- [27] Z. Han, H. Luo, J. Cao, and H. Wang, "Acoustic emission during fatigue crack propagation in a micro-alloyed steel and welds," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 7751-7756, 2011.
- [28] R. Kumar and M. Singh, "Outer race defect width measurement in taper roller bearing using discrete wavelet transform of vibration signal," *Measurement*, vol. 46, pp. 537-545, 2013.
- [29] O. L. Sandora, "Transmission condition assessment," Boeing Vertrol Co., Philadelphia, USA, 1976.
- [30] R. G. Harker and J. L. Sandy, "Rolling element bearing monitoring and diagnostics techniques," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 111, pp. 251-256, 1989.
- [31] R. M. Jones, "Enveloping for bearing analysis," *Sound and Vibration*, vol. 30, pp. 10-15, 1996.
- [32] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 96, pp. 69-82, 1984.
- [33] T. A. Harris, "Rolling bearing analysis," John Wiley and Sons, 2001.
- [34] J. J. Broderick, R. F. Burchill, and H. L. Clark, "Design and fabrication of prototype system for early warning of impending bearing failure," NASA, United States. *CR-123717*, 1972, Available:
- [35] H. J. Silverstone, "Expansion about an arbitrary point of three-dimensional functions involving spherical harmonics by the Fourier transform convolution theorem," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 47, pp. 537-540, 1967.
- [36] M. J. Dowling, "Application of non-stationary analysis to machinery monitoring," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal*

Processing, Minneapolis, USA, 27-30 April,1993, vol. 1, pp. 59-62

[37] C. K. Chui, "An introduction to wavelets," Elsevier, 2016.

[38] Z. K. Peng and F. L. Chu, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 199-221, 2004.

[39] P. W. Tse, Y. H. Peng, and R. Yam, "Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis—their effectiveness and flexibilities," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 123, pp. 303-310, 2001.

[40] S. Gade and K. Gram-Hansen, "Non-stationary signal analysis using wavelet transform, short-time Fourier transform and Wigner-Ville distribution": Brüel & Kjær Technical Review No.2, 1996.

[41] J. D. Wu, C. W. Huang, and R. Huang, "An application of a recursive Kalman filtering algorithm in rotating machinery fault diagnosis," *NDT & E International*, vol. 37, pp. 411-419, 2004.

[42] F. J. Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, pp. 1057-1059, 1977.

[43] N. Tandon and B. C. Nakra, "The application of the sound-intensity technique to defect detection in rolling-element bearings," *Applied Acoustics*, vol. 29, pp. 207-217, 1990.

[44] J. G. Ramsay and M. I. Huber, "The techniques of modern structural geology," Academic Press, 1987.

[45] P. C. Azevedo and R. Jordan, "Noise sources identification on a large stamping press," *Proceedings of the COBEM: 18 th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, Brazil, 6-11 November,2005

- [46] K. Kondo, "Precision shearing method," United States Patent US3724305, Apr. 3, 1973.
- [47] X. Y. Juan, "Study on the Operating Parameters of Fine Gear Blanking Process," Thesis from National Taipei University of Technology, 2008.
- [48] A. M. Goijaerts, L. E. Govaert, and F. P. T. Baaijens, "Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, pp. 312-323, 2001.
- [49] N. Weller, "Acceleration enveloping—higher sensitivity, earlier detection," *Orbit*, pp. 10-19, 2004.
- [50] "SiSonic Design Guide ", SPU0409HD5H-PB datasheet, Knowles Acoustics, Aug. 22 2011
- [51] J. S. Jang, "Audio Signal Processing and Recognition", (in Chinese) available at the links for on-line courses at the author's homepage at <http://www.cs.nthu.edu.tw/~jang>. [Online]. Available.
- [52] M. S. Chavan, R. Agarwala, and M. Uplane, "Interference reduction in ECG using digital FIR filters based on Rectangular window," *WSEAS Transactions on Signal Processing*, vol. 4, pp. 340-349, 2008.
- [53] J. O. Smith, "Spectral audio signal processing," W3K Publishing, 2011.

自述

姓名：王君敏 (Chun-Min, Wang)

生日：1993/4/23

性別：女

電子信箱：m043020036@student.nsysu.edu.tw

學歷：

國立中山大學 機械與機電工程研究所 碩士 2015/9~2017/6

國立中山大學 機械與機電工程學系 學士 2011/9~2014/6

發表著作：

國內研討會

1. **Chun-Min Wang**, Wei-Hsing Yen , Che-hsin Lin, “Detecting the Status of Precision Stamping by Condenser Microphone,” *Conference on Precision Machinery and Manufacturing Technology(PMMT 2016)*, Kenting, Pingtung, 20-22 May, 2016

國際研討會

1. **Chun-Min Wang**, Yu-Ting Lin, Che-Hsin Lin, “Detecting the Status of Micro-stamping by A Condenser Microphone,” *World Congress on Micro and Nano Manufacturing(WCMNM 2017)*, Kaohsiung, Taiwan, 27-30 March,2017
2. **Chun-Min Wang**, Yu-Ting Lin, Che-Hsin Lin, ”Monitoring of Micro-stamping procedures utilizing MEMS Microphones under Acoustic Vibration Transduction,” *The 12th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems(NEMS 2017)*, Los Angeles, USA, 9-12 April, 2017