

# 起重機旋轉盤螺栓及壓力容器 胴體之音洩檢測基本技術建立

Inspection Technology for Acoustic Emission of Cranes Bolt and Pressure Vessels



起重機旋轉盤螺栓及壓力容器胴體之音洩檢測基本技術建立 ILOSH104-S309

勞動部勞動及職業安全衛生研究所

勞動部勞動及職業安全衛生研究所



INSTITUTE OF LABOR, OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, MINISTRY OF LABOR

地址：新北市汐止區橫科路407巷99號  
電話：(02) 26607600  
傳真：(02) 26607732  
網址：<http://www.ilosh.gov.tw>



起重機旋轉盤螺栓及壓力容器胴體之音  
洩檢測基本技術建立

**Inspection Technology for Acoustic  
Emission of Cranes Bolt and Pressure  
Vessels**

起重機旋轉盤螺栓及壓力容器胴體之音  
洩檢測基本技術建立

**Inspection Technology for Acoustic  
Emission of Cranes Bolt and Pressure  
Vessels**

研究主持人：劉國青、黃啟貞

計畫主辦單位：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

研究期間：中華民國 104 年 7 月 1 日至 104 年 12 月 31 日

**\* 本研究報告公開予各單位參考 \*  
惟不代表勞動部政策立場**

勞動部勞動及職業安全衛生研究所  
中華民國 105 年 3 月

## 摘 要

鋼結構如起重機螺栓及石化廠壓力容器與儲槽，一旦結構本體遭受人為或環境等因素而造成損傷，將影響結構強度發生腐蝕、裂紋或洩漏等現象。為因應壓力容器與儲槽的停機開槽檢測風險，及起重機吊桿及螺栓的組裝困難，引用國外音洩非破壞檢測技術，具以實務檢測案例以建立檢測程序。

本計畫以蒐集音洩檢測螺栓、壓力容器胴體及儲槽胴壁之技術標準規範及文獻探討為基礎，以音洩技術檢測壓力容器與儲槽強度，另以超音波非破壞驗證檢測結果，同時也完成了高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗，最後藉由實驗結果與文獻分析，分別對壓力容器及儲槽建立了二份音洩檢測程序指引，包含費利西蒂效應在音洩檢測上，可作為判斷缺陷的分析方法及螺栓裂紋採用比較方式檢測。

目前國內壓力容器與常壓儲槽定期檢查，採用局部性非破壞檢測技術，如目視檢測、液滲檢測、磁粒檢測與超音波檢測等，研究參考 ASTM E569-2002 結構受負載時之音洩檢測，可以達到較全面性的結構本體檢測，以確保檢測後實質安全性的提升。

關鍵詞：音洩、壓力容器、儲槽、起重設備

## **Abstract**

Structural strength of steel structures such as crane bolts and petrochemical plant pressure vessels and storage tanks is usually jeopardized once the structure suffers environmental and human factors such as corrosion, cracking or leakage damage. In response to the risks of pressure and the opening of shutdown vessel and storage tanks, as well as the difficult in assembling crane boom and bolts, we cited foreign acoustic emission non-destructive inspection technology and examined inspection cases to establish inspection procedures.

We collected acoustic emission inspection technologies for crane bolts, pressure vessels and storage tanks from international and national standards and literature, and used acoustic emission inspection technology to inspect pressure vessels and tanks within laboratory settings and onsite facilities. We also conducted felicity effect of welding and steel material. From the experimental data and literature analysis, we completed a guideline for pressure vessel and tank inspection procedures.

At present, periodic inspections of pressure vessels and tanks in Taiwan adopt local non-destructive inspection technology such as visual inspection, liquid penetrant inspection, magnetic particle inspection, and ultrasonic inspection. This study referred to ASTM E569-2002 standards for acoustic emission monitoring of structures in controlled stimulation, reaching more comprehensive structural body testing to ensure safety after inspection.

Keywords: Acoustic emission, Pressure vessel, Tank, Crane

# 目錄

摘 要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	ix
第一章 計畫概述.....	1
第一節 前言.....	1
第二節 目的.....	3
第三節 工作項目.....	3
第四節 音洩設備.....	3
第二章 音洩檢測文獻蒐集與探討.....	6
第一節 前言.....	6
第二節 探討鋼結構裂紋缺陷折損強度計算與音洩檢測螺栓.....	7
第三節 壓力容器胴體之技術標準規範及評鑑方法.....	12
第四節 儲槽胴壁之技術標準規範及評鑑方法.....	21
第三章 應用音洩檢測壓力容器胴體.....	24
第一節 壓力容器與音洩檢測.....	24
第二節 氣體鋼瓶音洩檢測.....	28
第三節 氣體鋼瓶其他非破壞性檢測.....	31
第四章 應用音洩檢測儲槽.....	35
第一節 儲槽與音洩檢測.....	35
第二節 儲槽音洩檢測.....	36
第五章 高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗.....	52
第一節 凱瑟效應與費利西蒂效應.....	52
第二節 高強度鋼材及銲接試片準備.....	54
第三節 高強度鋼材及費利西蒂銲接試片音洩實驗.....	57
第六章 音洩案例應用與其他非破壞檢測技術驗證.....	76
第一節 現地直徑 10 米儲槽音洩檢測.....	76

第二節 儲槽開放檢測-磁通漏檢測與超音波測厚驗證 .....	80
第七章 壓力容器音洩檢測程序建議指引 .....	82
第一節 總則 .....	82
第二節 名詞定義 .....	83
第三節 安全規定 .....	86
第四節 人員要求 .....	86
第五節 音洩檢測裝備 .....	86
第六節 檢測程序 .....	89
第七節 訊號分析與檢測報告 .....	92
第八章 儲槽音洩檢測程序建議指引 .....	97
第一節 總則 .....	97
第二節 名詞定義 .....	97
第三節 人員要求 .....	100
第四節 音洩檢測裝備 .....	101
第五節 檢測程序 .....	102
第六節 訊號分析與檢測報告 .....	106
第九章 結論與建議 .....	110
第一節 結論 .....	110
第二節 建議 .....	111
誌謝 .....	112
參考文獻 .....	113

# 圖目錄

圖 1 起重設備事故照片 .....	2
圖 2 壓力容器與儲槽 .....	2
圖 3 音洩設備 Vallen AMSY-6.....	4
圖 4 音洩傳感器 VS150-M .....	4
圖 5 音洩多功能前置放大器 .....	5
圖 6 螺栓音洩檢測 .....	11
圖 7 螺栓超音波檢測 .....	12
圖 8 新作壓力容器試壓時程 .....	13
圖 9 操作中壓力容器試壓時程 .....	14
圖 10 JIS Z 2342:2002 壓力容器音洩檢測評估流程圖.....	14
圖 11 音洩檢測原理示意圖 .....	15
圖 12 E1419 所適用的氣體裝載容器類型.....	16
圖 13 球槽音洩檢測範例 .....	19
圖 14 新製儲槽試壓程序 .....	23
圖 15 操作中儲槽試壓程序 .....	23
圖 16 儲槽音洩檢測與開槽驗證案例 .....	23
圖 17 氣體鋼瓶 A 鋼瓶外腐蝕與 B 鋼瓶內腐蝕照片 .....	28
圖 18 氣體鋼瓶音洩實驗架設 .....	30
圖 19 氣體鋼瓶音洩傳感器架設位置圖 .....	30
圖 20 持續填充氣體加壓過程 .....	31
圖 21 氣體鋼瓶音洩檢測結果 .....	31
圖 22 氣體鋼瓶相位陣列超音波瓶身壁厚 B 掃描架設.....	32
圖 23 相位陣列超音波電子式掃描示意圖 .....	32
圖 24 氣體鋼瓶相位陣列超音波瓶身壁厚 B 掃描結果.....	32
圖 25 氣體鋼瓶 B 相位陣列超音波瓶身內部腐蝕點 1(下半部).....	33
圖 26 氣體鋼瓶 B 相位陣列超音波瓶身內部腐蝕點 2(近底部).....	33
圖 27 氣體鋼瓶 A，光學雷射 3D 掃描外腐蝕 .....	34
圖 28 氣體鋼瓶 A，光學雷射 3D 掃描外腐蝕成像 .....	34

圖 29 音洩技術應用於儲槽檢測 .....	35
圖 30 音洩實驗儲槽 .....	37
圖 31 鋼板蘭姆波頻散曲線圖 .....	38
圖 32 鋼板蘭姆波訊號波傳理論解 .....	38
圖 33 水/鋼板蘭姆波頻散曲線圖 .....	39
圖 34 水/鋼板蘭姆波訊號波傳理論解 .....	39
圖 35 實驗一傳感器架設 .....	40
圖 36 實驗一，5 次斷芯訊號記錄 .....	40
圖 37 實驗一，傳感器 1(上圖)與 2(下圖)接收訊號 .....	41
圖 38 實驗二傳感器架設 .....	42
圖 39 實驗二，5 次斷芯訊號記錄 .....	42
圖 40 實驗二，傳感器 1(上圖)與 2(下圖)接收訊號 .....	43
圖 41 實驗三傳感器架設 .....	44
圖 42 實驗三，5 次斷芯訊號記錄 .....	44
圖 43 實驗三，傳感器 1(上圖,壁板)與 2(下圖,底板)接收訊號 .....	45
圖 44 實驗四傳感器架設 .....	46
圖 45 實驗四，灌水入儲槽 .....	46
圖 46 實驗四，5 次斷芯訊號記錄 .....	46
圖 47 實驗四，傳感器 1(上圖,壁板)與 2(下圖,底板)接收訊號 .....	47
圖 48 實驗四傳感器 1(上圖,壁板)與實驗三傳感器 1(下圖,壁板)接收訊號 .....	47
圖 49 實驗五傳感器架設 .....	48
圖 50 實驗五，5 次斷芯訊號記錄 .....	48
圖 51 實驗五，斷芯點音洩訊號定位圖 .....	49
圖 52 實驗五，傳感器 1、2 與 4 接收訊號 .....	49
圖 53 實驗六，將水排空，傳感器架設同實驗五 .....	50
圖 54 實驗六，5 次斷芯訊號記錄 .....	50
圖 55 實驗六，斷芯點音洩訊號定位圖 .....	51
圖 56 實驗六，傳感器 1、2 與 4 接收訊號 .....	51
圖 57 凱瑟效應與費利西蒂效應 .....	53
圖 58 費利西蒂比值計算示意圖 .....	53

圖 59 壓力容器常用高強度鋼 SM490 拉伸曲線與音洩訊號特徵 .....	54
圖 60 費利西蒂效應實驗試片，P1 母材、P2 縱向銲接、P3 橫向銲接.....	55
圖 61 費利西蒂效應實驗試片：銲道 RT 檢測 .....	55
圖 62 縱向銲道試片 P2 銲道 RT 檢測：多處滲透不足 .....	56
圖 63 橫向銲道試片 P3 銲道 RT 檢測：局部滲透不足 .....	56
圖 64 高強度鋼 SM490 母材試片與碳鋼 S400 母材試片準備 .....	57
圖 65 材料拉伸試驗機操作情形 .....	60
圖 66 拉伸試驗與音洩訊號量測架設 .....	61
圖 67 費利西蒂效應試驗動態負載設計行程 .....	61
圖 68 母材試片 P1 拉伸試驗與音洩訊號量測 .....	62
圖 69 縱向銲接試片 P2 拉伸試驗與音洩訊號量測 .....	62
圖 70 橫向銲接試片 P3 拉伸試驗與音洩訊號量測 .....	63
圖 71 傳感器斷芯試驗：靈敏度校正 .....	63
圖 72 傳感器斷芯試驗：波速校正 .....	64
圖 73 傳感器訊號頻譜分析 .....	64
圖 74 母材試片 P1 負載與音洩訊號振幅相關圖 .....	65
圖 75 縱向銲接試片 P2 負載與音洩訊號振幅相關圖 .....	65
圖 76 橫向銲接試片 P3 負載與音洩訊號振幅相關圖 .....	66
圖 77 高強度鋼試片靜態拉伸試驗架設與試片斷裂 .....	66
圖 78 試片 SM490 與 S400 拉伸試驗結果：負載與時間關係圖 .....	67
圖 79 SM490 試片拉伸試驗結果：負載、音洩訊號記數累計與時間關係圖 .....	67
圖 80 S400 試片拉伸試驗結果：負載、音洩訊號記數累計與時間關係圖 .....	67
圖 81 母材 SM490-1 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	68
圖 82 母材 SM490-1：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	68
圖 83 母材 SM400-1 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	69
圖 84 母材 SM400-1：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	69
圖 85 母材 SM490-2 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	70
圖 86 母材 SM490-2：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	70
圖 87 母材 SM490-3 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	71
圖 88 母材 SM490-3：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	71

圖 89 母材 SM490-4 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	72
圖 90 母材 SM490-4：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	72
圖 91 母材 SM400-2 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	73
圖 92 母材 SM400-2：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	73
圖 93 母材 SM400-3 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	74
圖 94 母材 SM400-3：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	74
圖 95 母材 SM400-4 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖 .....	75
圖 96 母材 SM400-4：強訊號與低訊號振幅值分佈圖 .....	75
圖 97 直徑 10.66m 儲槽 .....	77
圖 98 現地儲槽音洩實驗量測 .....	77
圖 99 現地儲槽音洩實驗原始量測二維聲源定位圖 .....	78
圖 100 現地儲槽音洩實驗原始量測訊號振幅與時間,事件與時間相關圖 .....	78
圖 101 雜訊濾除後二維聲源定位圖 .....	79
圖 102 雜訊濾除後訊號振幅與時間,事件與時間相關圖 .....	79
圖 103 儲槽開放後以磁通漏檢測與超音波測厚驗證底板狀況 .....	81
圖 104 超音波底板測厚分佈圖 .....	81
圖 105 聲源定位下撞擊訊號中 PDT、HDT 和 HLT 示意圖.....	85
圖 106 聲源為斷芯時的撞擊訊號與時間相關的音洩參數 .....	86
圖 107 球型壓力容器音洩傳感器佈陣 .....	90
圖 108 新製壓力容器音洩測試加壓程序 .....	91
圖 109 操作中壓力容器音洩測試加壓程序 .....	92
圖 110 聲源定位下撞擊訊號中 PDT、HDT 和 HLT 示意圖.....	100
圖 111 聲源為斷芯時的撞擊訊號與時間相關的音洩參數 .....	100
圖 112 音洩檢測系統與傳感器安裝 .....	104
圖 113 12 顆傳感器佈陣於直徑 50 公尺儲槽之範例 .....	104

## 表目錄

表 1 兩次加壓循環聲發射定位源的活性等級劃分 .....	20
表 2 一次加壓循環聲發射定位源的活性等級劃分 .....	20
表 3 聲發射定位源的強度等級劃分 .....	20
表 4 Q345R 鋼採用幅度參數進行聲發射定位源的強度等級劃分 .....	21
表 5 高、低能量訊號振幅值整理表 .....	59
表 6 兩次加壓程序音洩定位源的活性等級分級表 .....	94
表 7 音洩訊號定位源的強度分級表 .....	94
表 8 高強度鋼 S490 採用振幅參數進行音洩訊號定位源的強度分級表 .....	95
表 9 音洩定位源的綜合等級分級 .....	95
表 10 儲槽底板檢測傳感器使用數量 .....	103
表 11 儲槽內容物音速表 .....	105
表 12 儲槽底板基於時差定位分析的音洩聲源分級 .....	107
表 13 儲槽底板基於區域定位分析的音洩聲源分級 .....	108
表 14 音洩聲源活性對腐蝕狀況分析及維修優先順序 .....	108



# 第一章 計畫概述

## 第一節 前言

大至大型建設工程小至居家環境整理，起重設備皆扮演著相當重要的角色，安全的使用起重設備方能在無工安事故的發生下完成每一項工程或工作。調查國內、外起重機發生的災害事故可發現，人為失誤、機具設備安全性、起重機具組裝過程、電氣系統與天氣的考驗都是造成起重設備發生事故之原因。起重機伸臂受損後強度降低使其墜落造成人員死傷事故，基座螺栓未定期檢查，使螺栓受力後鬆脫，進而造成起重設備翻覆倒塌，如圖 1 所示，因此先進非破壞性檢測技術的導入實為相當重要。

針對壓力容器如圖 2，在使用過程中可能會引起爆炸等危險，當發生爆炸後，容器內的物質可能會膨脹，這不但對設備本身造成破損，也極有可能引起較大的衝擊波危害到現場操作人員，倘若壓力容器內存放易燃、易爆或有毒氣體，則發生洩漏或爆炸時所產生的危害便會造成更大的工安事故。為了避免這類問題的發生，定期的檢測工作、有效的檢測技術運用才能確保壓力容器在使用上的安全性。

另外，國內大型儲槽分佈於許多石化園區內，對於圖 2 中大型儲槽之檢測通常是利用停止生產、清空儲槽內容物、清潔、搭架以超音波測厚、磁粒、液滲、真空測漏與磁漏底板腐蝕檢測技術進行開槽檢測，以目前方式，要完成儲槽整體檢修至少開槽二個月以上，耗時長且造成停產時間也較長，若缺少備用儲槽，更需要一套有效的線上和快速檢測技術來提供新的檢測方式。大量的儲槽使用業者，大多採以隨機抽檢方式來開放檢測，若抽檢儲槽並無發現嚴重瑕疵，則將造成不必要的檢測與開槽成本；若未抽檢儲槽具有洩漏的高風險性，未能按期進行檢測可能使得這些儲槽使用超過 20 年，大大增加洩漏等工安事故。

音洩檢測技術在國際間已被大量地使用於壓力容器與儲槽的定期檢測上，可有效地降低壓力容器操作之風險與儲槽長期使用下之風險，然而在國內音洩檢測技術並未能被有效地利用在這些設備之定期檢測工作上，可能原因為音洩檢測技術在國內並未技術紮根、設備較為昂貴、無法規可依據。因此，音洩技術應用在壓力容器與儲槽胴體檢測的提升，更需要國內研究單位元的投入，促使音洩檢測能更有效性，協助國內壓力容器或儲槽使用單位能更有效且更省成本的管控設備使用安全性。

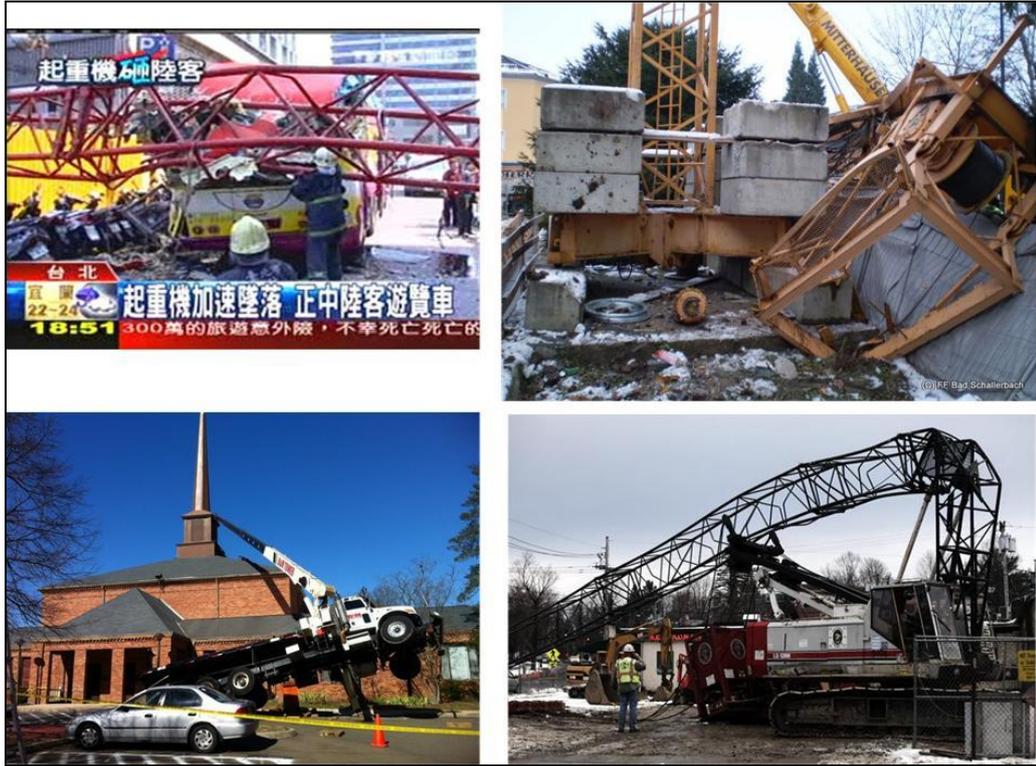


圖 1 起重設備事故照片



圖 2 壓力容器與儲槽

## 第二節 目的

本研究目的的主要為二，其一為針對起重設備與螺栓檢測則進行相關文獻之蒐集與回顧，提供未來有意進行起重設備檢測相關研究之參考；其二為參考國外之音洩檢測上相關之法規與技術文件，再依壓力容器、儲槽音洩實驗結果以及費利西蒂效應試驗結果的考慮，著手進行建立一份壓力容器與儲槽音洩檢測程序之指引。

## 第三節 工作項目

工作項目分為以下幾項：

- 一、 期初報告內容：文獻蒐集、探討鋼結構裂紋缺陷折損強度計算、文獻蒐集音洩檢測螺栓、壓力容器胴體及儲槽胴壁之技術標準規範及評鑑方法
- 二、 期中報告內容第一項：應用音洩檢測壓力容器胴體。
- 三、 期中報告內容第二項：應用音洩檢測儲槽胴體。
- 四、 期中報告內容第三項：高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗。
- 五、 期末報告內容第一項：案例應用其他非破壞檢測技術驗證音洩檢測結果。
- 六、 期末報告內容第二項：建立壓力容器音洩檢測程序指引。
- 七、 期末報告內容第三項：建立儲槽音洩檢測程序指引。

## 第四節 音洩設備

Vallen AMSY-6 系統包括整個音洩檢測所需組成，如下圖 3。此系統專門為使用者定製，包括傳感器，前置放大器，訊號擷取卡，系統主機，PC 機及軟體。Vallen 可以提供系統的所有組成，AMSY-6 型超高速、全數位、全波形、強抗干擾音洩訊號蒐集分析系統是由德國 Vallen 公司在 2007 年開發的全數位多通道音洩儀器 AMSY-6 型的基礎之上，根據多年數位電路的設計和製造經驗，採用世界最先進的雙核可程序設計數位技術（軟硬體相結合的），設計並製造的性能優越的音洩儀器。

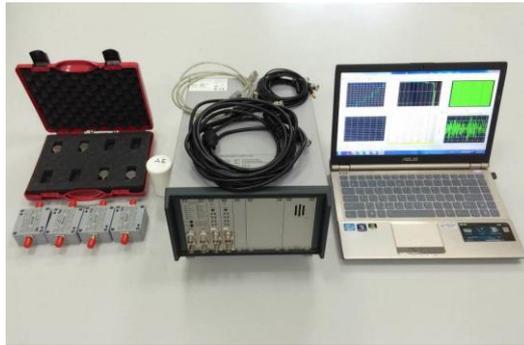


圖 3 音洩設備 Vallen AMSY-6

## 一、傳感器：

傳感器是音洩系統中的重要部分，傳感器選用或設計不合理則可使接收到的訊號與希望接收到的訊號大大不同，直接影響到檢測數據之分析。在音洩檢測中，大多使用的為共振式傳感器與寬頻傳感器，在工程應用上，對於金屬材料與其元件通常使用中心頻率為 150 kHz 的共振式傳感器，來測量音洩訊號及其 count 數、振幅、上升時間、持續時間與能量等音洩參數。以 Vallen 系統常用的傳感器如下：

- (一) VS150-M 中心頻率 150kHz，多用途傳感器。
- (二) VS150-RIC 中心頻率 150kHz，內置前置放大器，用於壓力容器/整體檢測。
- (三) VS375-RIC 中心頻率 375kHz，內置前置放大器，用於噪音環境下的裂紋檢測。
- (四) VS30-SIC 低頻傳感器，頻率為：25-80kHz，內置前置放大器，用於儲槽底板檢測。

大多數內置前置放大器的傳感器都具有標定脈衝通過的功能。這項功能大大縮短了檢驗傳感器耦合狀況，電纜線和前置放大器連接狀況的時間。本研究實驗採用 VS150-M 多用途傳感器，如下圖 4



圖 4 音洩傳感器 VS150-M

## 二、前置放大器

Vallen 提供多種高性能的可與 AMSY-6 系統匹配的前置放大器。多種選擇可滿足不同的檢測需求。前置放大器電阻為  $50\Omega$ 。

- (一) AEP4, AEP4H 多功能前置放大器，頻帶範圍為 3-2000KHz( AEP4: 20-2000KHz )，適用於多種檢測需要。每個前置放大器都具有堅固的外殼，並且可以通過標定脈衝，用於檢測傳感器的耦合狀況以及進行聲速測試。
- (二) AEP3 放大器可以通過軟體調節放大倍數，放大範圍為 34-49dB。前置放大器中帶有插拔式頻帶濾波器模組，可對採集到的訊號進行前置濾波。AEP3 有 2 種輸入口，一種是常規 BNC 介面，另一種為 BNO 介面。本研究實驗採用 AEP4H 多功能前置放大器，如下圖 5。



圖 5 音洩多功能前置放大器

## 三、訊號擷取卡

獨立雙通道音洩訊號擷取卡 ASIP-2 是數位音洩系統生產 20 多年的結晶產品。由 ASIP-2 組成的音洩系統，即使在通道數很多的情況下也非常便攜。ASIP-2 的特性如下所述：

- (一) 高解析度：40MHz 取樣速率，18bit
- (二) 高靈敏度：在採集資料時系統噪音低
- (三) 更多波形採集：可達到 1GB/通道
- (四) 堅固的面板：堅固的前面面板 BNC 介面可快速簡單的實現電纜連線
- (五) 即時指示：前面面板 LED 燈指示，是否有撞擊訊號，前置放大器電纜連線是否正常，音洩訊號可聽，以及幅度飽和狀態。
- (六) 先進的濾波器理念：可通過窄帶觸發寬頻瞬態記錄；500 個帶通濾波器及凹槽濾波器可選。

## 第二章 音洩檢測文獻蒐集與探討

### 第一節 前言

起重機及壓力容器為我國法律明文規定之危險性機械，為各行各業廣泛使用輔助機械，但由於使用頻率高，常因使用時人為的疏失、環境及管理不安全等因素，造成吊掛物體飛落、人員墜落、起重機吊桿斷裂及壓力容器胴體破裂等重大工安災害。本研究主要依相關起重機及壓力容器職災案例，進行操作中缺陷檢測技術開發研究，以避免類似案例再次發生。為改善目前傳統起重機、壓力容器與儲槽僅利用目視檢測、磁粒檢測、液滲檢測、真空測漏與超音波檢測等傳統檢查方法進行局部抽測，本研究計畫乃針對先進非破壞動態檢測技術，建立動態連續且全面性檢測方法，以提升檢查後設備使用上實質安全性。首先，第二章內容乃針對(1)探討鋼結構裂紋缺陷折損強度計算及音洩檢測螺栓進行文獻蒐集與整理，以建立起重設備結構體與螺栓等元件在進行非破壞檢測後其適用性評估之相關資料；再者，針對(2)壓力容器胴體之檢測技術標準規範及評鑑方法與(3)儲槽胴壁之檢測技術標準規範及評鑑方法等議題進行文獻蒐集與整理，以作為建立檢測程序書指引之參考資料。

在 2010 年 Carlos[1]指出 ASTM E07.04 音洩小組委員會負責制定音洩檢測技術相關檔，發展、維持與標準化音洩檢測方法、術語、實行和指引，會內目前有 50 個成員。ASTM E07.04 隸屬於 ASTM E07 非破壞性檢測，這個組織全世界超過 450 個會員致力於發展和撰寫全世界一致通用的非破壞性檢測標準，包括射線檢測、數位射線檢測、液滲檢測、超音波檢測、電磁檢測、洩漏檢測、非破壞性檢測代理機構、新興的非破壞性檢測方法與音洩。所有由 E07 委員會發表的非破壞性檢測標準檔都刊登在非破壞性檢測書刊 Volume03.03。目前 AE 有 24 項 ASTM 標準，且有 3 個以上正在進行研擬，標準會有四種不同形式，試驗方法(Test Method)、標準實施(Standard Practice)、指引(Guide)、術語(Terminology)。Tscheliesnig[2]則指出在歐洲標準組織的努力下，音洩檢測技術 EN 標準區分為基本技術標準 9 項和產品相依標準 3 項，目前歐洲音洩標準尚未能將音洩結果分級化，未來需要更多現場檢測資料的回饋與制定標準小組的努力，方能將音洩檢測技術更容易被現場單位應用於設備之完整性評估。

## 第二節 探討鋼結構裂紋缺陷折損強度計算與音洩檢測螺栓

### 一、 *API 579: Fitness-for-Service, American Petroleum Institute (2000) [3]*

本文內容是一項針對煉油和化工業壓力容器的適用性評估文件，適用性評估被定義為表現出一個使用中元件包含一個缺陷或損壞的結構其完整性的能力，內容目的是補充和擴充 API510(壓力容器),API570(管線)和 API653(儲槽)的要求，以確保(1)在舊設備繼續使用操作下，工廠內作業人員與社會大眾的安全，(2)提供技術可靠的適用性評估程序，確保不同供應商可提供一致性的壽命評估，(3)幫助現有設備維護和運轉並維護老舊工廠的可用性。

### 二、 *BS 7910:2013, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures (including Amendment 1), 2014 [4]*

BS 7910 引導以破壞力學原理的方法來評估金屬結構體存在瑕疵時之適用性評估，這樣的評估也被視為工程臨界評估(Engineering Critical Assessment, ECA)或受損容許限度，金屬結構體內發現之瑕疵允許以 BS7910 之適用性評估程序來達到一致性和客觀性的評估。

### 三、 *P. Darcis, D. Santarosa, N. Recho and T. Lassen, “A Fracture Mechanics for the Crack Growth in Welded Joints with Reference BS 7910, ” ECF15, Stockholm (SE) 2004 [5]*

本文針對銲接接頭的疲勞過程進行探討與建立模型，提出破壞力學模型來描述整個疲勞的過程，利用量測填角銲上之裂紋成長來校正理論模型，主要目的在建構一個與 Eurocode 3 中的 S-N 逼近法和 BS7910 中破壞力學一致的統一方法。文中強調如何選用裂紋成長參數來得到可靠的裂紋成長路徑以及預測的疲勞週期。

### 四、 *E. Smith, “Kr-Lr failure assessment diagrams as applied to a flaw in the vicinity of a stress concentration : the large Lr regime”, Pressure Vessels and Piping, vol 75, 1998 [6]*

本文針對瑕疵出現在應力集中處時的模擬模型分析時，發現在失效評估曲線上瑕疵的幾何參數具有相當的敏感性，研究結果發現使用評估方法 R6 時，這樣的瑕疵評估應基於使用的選項 3 而不是選項 1 或 2。

五、 ***F. M. Burdekin, "The fracture behavior of a welded tubular joint-an ESIS TC1-3 round robin on failure assessment methods Part III-UK BSI7910 methodology. " Engineering Fracture Mechanics, vol.69, pp.1119-1127, 2002 [7]***

本文針對離岸結構的管狀接頭在 BS7910 瑕疵評估程序的基本原理進行介紹說明，基於一系列的研究結果，在管狀接頭模型上進行了極限強度計算和預期的撕裂性能。

六、 ***JIS B8265 Construction of pressure vessel –General principles, 2003 [8]***

本文件內容描述設計壓力容器時所用的通用法則。

七、 ***JIS B8266 Alternative standard for construction of pressure vessels, 2003 [9]***

本文描述以分析為基礎之設計作為設計壓力容器結構的一項替代方法。

八、 ***T. L. Anderson and D.A. Osage, "API 579 : a comprehensive fitness-for-service guide", Pressure Vessels and Piping, vol 77, pp.953-963, 2000 [10]***

本文介紹了最近公佈的美國石油學會（API）推薦規程 API 579，其中涵蓋了壓力容器適用性評估，石化等行業的概況。雖然 API 579 涵蓋了廣泛的缺陷和損傷機制，包括局部金屬損失，點蝕，起泡，銲接錯位和火災損失，本文重點是裂紋狀缺陷的評估。根據 API 579 步驟，用於評估裂縫採用了失效評定圖（FAD）的方法非常類似於在其他檔，比如英國能源 R6 方法與 BS 7910 方法。該 API 檔包含 k 解決方案，其中包括一些專門為 API 579 中產生的檔初始版本的新情況進行了廣泛的綱要，API 已經為 Lr 的 FAD 過程中計算所採用現有的參考壓力的解決方案。然而，在未來的版本，API 計畫基於基準應力更合理的定義值替換這些解決方案。這些修改後的參考應力的解決方案將結合銲接失配的影響。除了 k 的附錄和參考壓力的解決方案，API 579 附錄包括提供指導評估斷裂韌性和銲接殘留應力分佈。在接下來的幾年內，這些附錄將隨著技術的進步得到加強。

九、 ***T. L. Anderson, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd Edition, Taylor and Francis [11]***

這是一本涵蓋破壞力學應用面與基本原理的教科書。

十、 ***Jung-Suk Lee et al., "Weld crack assessments in API X65 pipeline : failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties", Materials Science and Engineering A vol 373, pp.122-130, 2004 [12]***

針對瑕疵評估方法，如何將準確的材料性質帶入失效評估圖一直是個問題，尤其對於天然氣管線上銲接接頭的結構。本文針對 API X65 天然氣管線的研究中，將拉伸特性、破斷韌性等母材和銲接熱影響區的材料特性帶入考慮，並且研究三種不同階段材料特性對瑕疵評估之影響。更特別的是，綜合微拉伸試驗和裂紋尖端開口位移試驗可以建立一個更精確的銲道熱影響區之裂紋模型評估，這樣的評估可較現行的評估規範結果更精確地反映出熱影響區的材料特性。

十一、 ***Takuyo KAIDA, "Fitness-For-Service Assessment for Pressure Equipment in Chemical Plants, "Sumitomo Chemical Co., 2009 [13]***

適用性評估是針對已含有瑕疵存在的操作中設備元件的定量評估結構完整性。而適用性評估也因為規範越來越國際化、使用上更為普遍，本文針對 API 與 ASME 適用性評估標準內容進一步說明與解釋，在局部金屬損失類型的瑕疵評估過程，其實驗和數據驗證分析的結果。

十二、 ***Hideo Kobayashi et al., "Development of a flaw evaluation handbook of the high pressure institute of Japan", Pressure Vessels and Piping, vol.77, pp.929-936, 2000 [14]***

本文介紹的手冊是由日本高壓研究所編輯，這是針對日本核能電廠元件的適用性評估手冊。包含了破壞力學基本原理、瑕疵評估程序還有材料性質，手冊主要架構將總結於本文。

十三、***Hideo Kobayashi et al., "Overview of JSME flaw evaluation code for nuclear power plant", Pressure Vessels and Piping, vol.77, pp.937-944, January [15]***

日本機械工程師學會(JSME)已經發展一法規是針對核電廠元件瑕疵適用性評估，該法規描述針對壓力容器與管線進行線上檢測時所發現瑕疵之適用性評估方法，本文則對其流程、評估方法基本理論與接受基準與 ASME SEC XI 所述內容進行比較說明。

十四、***Monitoring Screws under Tensile Load Using Acoustic Emission Analysis, IEEE 1996 [16]***

本文主旨在研究受負載下螺栓的聲學特性來發展一套螺栓連結線上監測系統。以液壓拉伸試驗機作為研究中螺栓負載的施加，在負載施加過程，聲音訊號利用音洩檢測技術來進行記錄與分析，在降伏點時音洩訊號發生率將提高而在塑性變形時則會發現音洩訊號變弱，由於本研究中音洩訊號頻率範圍為 590kHz~1010kHz，因此可以在音洩訊號中分辨出負載時螺栓發生突發性錯位行為或者摩擦行為。

十五、***Plastic region bolt tightening controlled by Acoustic Emission Monitoring, 2005 [17]***

在很多應用領域，螺栓鬆弛和疲勞損傷都是個相當頭痛的問題，在汽車工業裡，塑性區域緊固方法是一項防止螺栓鬆弛和疲勞的公認好技術，本研究利用扭矩扳手和拉伸試驗機進行兩種不同的高強度螺栓試驗，研究結果發現可以藉由音洩檢測技術來控制塑性區域的緊縮。

十六、***Acoustic Emission of Bolt-Bearing Testing on Structural Composite Lumbers, 2013 [18]***

本研究針對結構複合木材(SCL)的螺栓-軸承全孔試驗其音洩訊號特性量測。結構複合木材包括單層板木材(LVL)與定向刨花板材(OSL)。試驗過程以音洩檢測技術記錄不同狀況下之訊號計數率(Count Rates)。第一區為低計數率，第二區為變化性較大且漸增的計數率，第三區則為高計數率區。針對此二種結構複合木材，此三區域的分佈並不相同，當結構複合木材受到螺栓的壓應力負載時，音洩訊號特性也會呈現不同的分佈，因此，音洩訊號的特徵的差異可以反應出結構複

合木材受到螺栓負載的情況。

### 十七、*Applicability of acoustic emissions to monitoring the mechanical integrity of bolted structures in low speed rotating machinery: case study, NDT&E International, 2002 [19]*

低轉速轉動設備在使用中要達到監控設備完整性有一定的困難性。振動分析屬於較成功的監控技術，但仍無法測量低於 300rpm 轉速下的轉動基頻。通常，低轉速轉動設備其尺寸較巨大，因此當機械發生瑕疵所產生的振動往往是非常低的且難以檢測得到，本文介紹了以音洩檢測應用在低轉速轉動設備的機械完整性損傷上，如圖 6 所示，及早發現初始瑕疵的個案研究，音洩訊號來源為轉動設備元件之間交互作用下的損傷、螺栓螺紋凹陷區相對移動以及螺栓柄在孔隙內移動所發出的聲響。

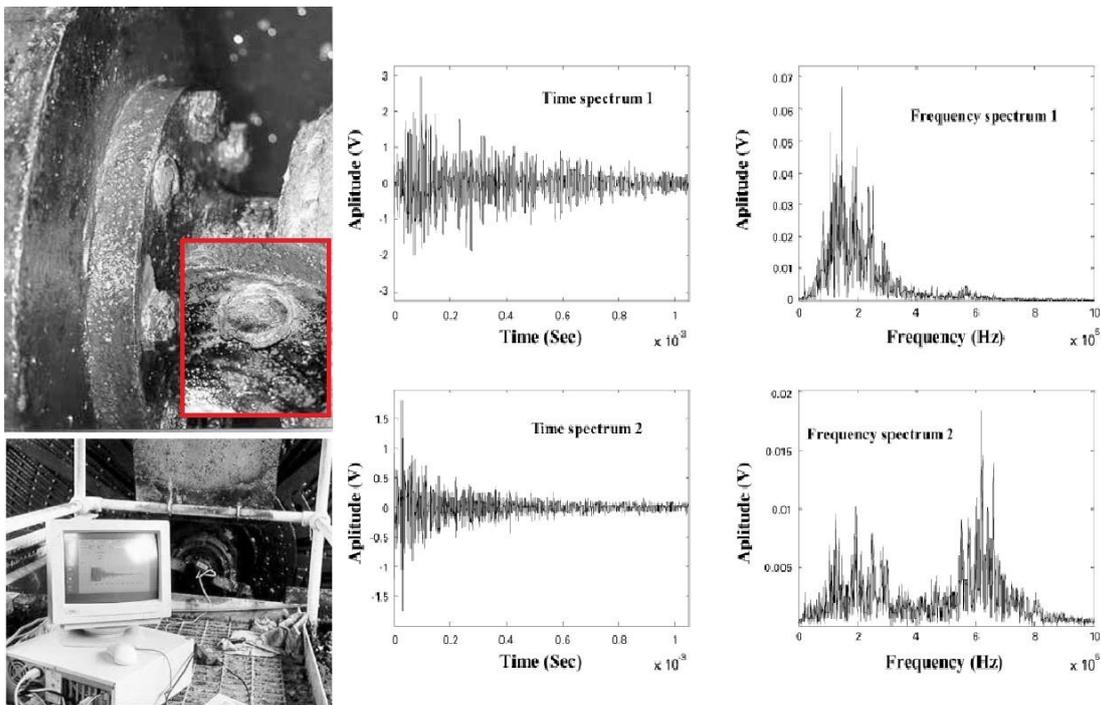


圖 6 螺栓音洩檢測

螺栓檢測除了上述以音洩傳感器進行檢測外，國內較常使用的為超音波檢測，如圖 7 為台灣金屬公司實際案例，以超音波傳感器直接以耦合劑接觸螺栓正面，當螺栓內部有裂紋產生時，底面回波之前便會產生裂紋之回波訊號。

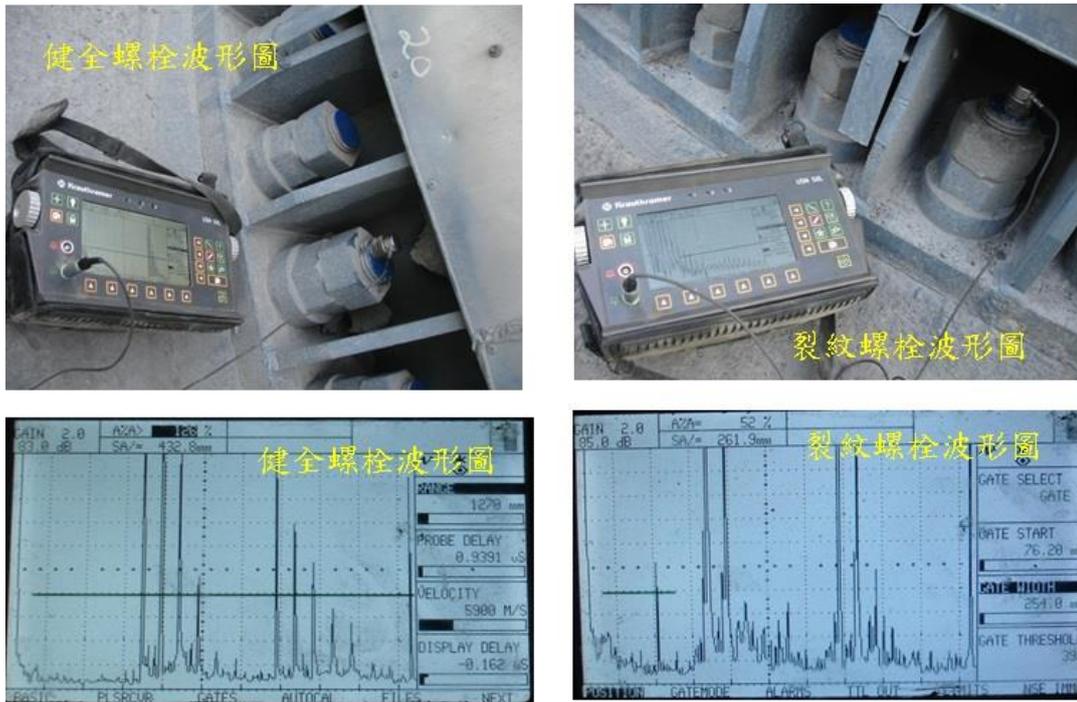


圖 7 螺栓超音波檢測

### 第三節 壓力容器胴體之技術標準規範及評鑑方法

壓力容器在使用過程中可能會引起爆炸等危險，當發生爆炸後，容器內的物質可能會膨脹，這不但對設備本身造成破損，也極有可能引起較大的衝擊波危害到現場操作人員，倘若壓力容器內存放易燃、易爆或有毒氣體，則發生洩漏或爆炸時所產生的危害便會造成更大的工安事故。為了避免這類問題的發生，定期的檢測工作、有效的檢測技術運用才能確保壓力容器在使用上的安全性。根據標準 API 510 Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration [20]規定，壓力容器應進行定期檢測以確保壓力容器繼續使用的完整性，於標準中也列出了壓力容器可能發生的多種劣化機制、檢測規劃應具備項目、與非破壞檢測技術的選擇，其中一項音洩檢測是一種不開放胴體下之線上檢測技術，當符合下列敘述則可使用線上檢測技術替代內部檢測，(1)壓力容器尺寸或構造使得檢測人員難以進入施作內部檢測時，(2)當容器內腐蝕率小於 0.125mm/年，(3)容器剩餘壽命超過 10 年，(4) 利用相同或類似檢測技術在五年內確實建立了內部介質腐蝕特性，(5)在外部檢測時未發現異常現象，(6)鋼製容器胴體操作溫度不超過該材料引起潛變之溫度下限，(7)壓力容器未遭受內容物所造成的環境引劣或氫損傷，(8)容器未具有非整體黏合之內襯。以下，將針對使用音洩法在壓力容器線上檢測之技術標準及評鑑方法進行文獻回顧。

一、ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec V Article 12, Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing, 2010 [21]

本規範章節主要描述金屬壓力容器在壓力試驗時音洩檢測的施作方法。當需依照本規範進行音洩檢測時，應考慮人員資格、證書要求、檢測要求和範圍、接受與評估基準、檢測報告項目要求與檢測內容記錄和保存等要求項目。以下為幾項要點敘述：T-1220.1 音洩檢測主要目的是定位和監測容器壁板、銲道和附屬元件因為不連續性(discontinuities)引起的音洩訊號；T-1220.2 由音洩訊號引起的所有相關顯示(relevant indications)應該由其他非破壞性檢測來進一步評估；T-1321 音洩監測目的是偵測、定位和描述音洩聲源，並解釋音洩訊號對評鑑壓力容器胴體完整性的重要性；在 T-1221~T-1224 則針對容器加壓注意事項、噪音降低、使用傳感器的頻率與佈陣方式、音洩聲源定位方法分別說明；T-1225 為攥寫檢測程序時所要求共 13 項；T-1244 則分別舉例新製壓力容器與操作中壓力容器之音洩檢測程序，加壓前背景雜音監控時間為 15 分鐘，如果背景雜音超過評估位準，則應消除噪音源或停止檢測；新製壓力容器試壓應從 50%~100% 試驗壓力，每次持壓 10 分鐘，最後一次 100% 試壓保持時間最少 30 分鐘，如下圖 8 所示，操作中壓力容器試壓應從 90%~110% 最大操作壓力，每次持壓 10 分鐘，最後一次 110% 試壓保持時間最少 30 分鐘，如下圖 9 所示。

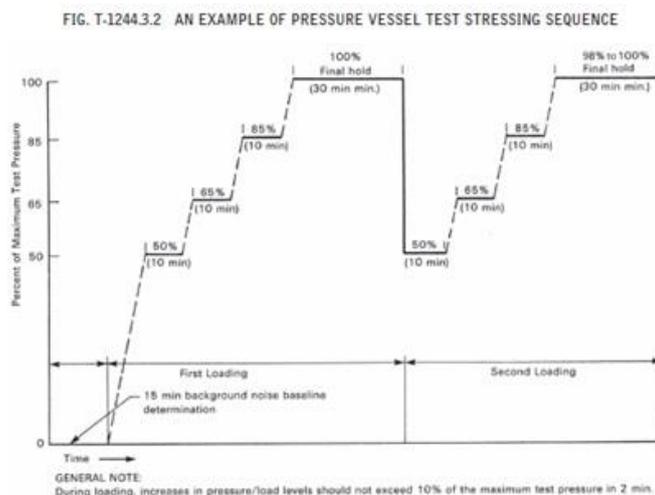


圖 8 新作壓力容器試壓時程

FIG. T-1244.3.3 AN EXAMPLE OF IN-SERVICE, PRESSURE VESSEL, TEST LOADING SEQUENCE

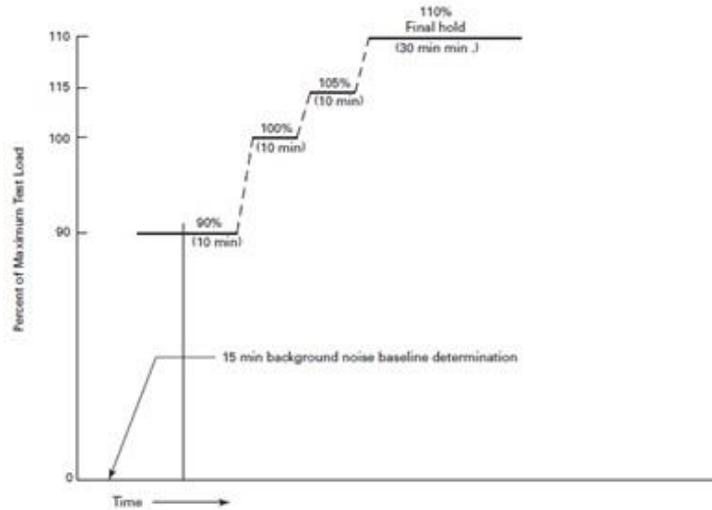


圖 9 操作中壓力容器試壓時程

## 二、JIS Z 2342:2002, Method for Acoustic Emission Testing of Pressure Vessels during Pressure Tests and Classification of Test Results [22]

本規範章節主要描述金屬壓力容器在壓力試驗時音洩檢測的施作方法與量化評估方法。根據經驗法則提供音洩檢測結果量化分級方法，作為壓力容器結構完整性評估。本規範除了基本音洩檢測程序外，如人員、設備、傳感器、負載施加程序，還進一步分析叢集(cluster)音洩訊號所代表的類型與嚴重等級，綜合評估叢集音洩訊號之屬性後，可將壓力容器檢測結果區分為危險級、警示級、危險以下等級、加強注意等級、正常等 5 級，如下圖 10，對於音洩檢測在壓力容器之檢測結果上可提供給使用者更多的完整性評估資訊。

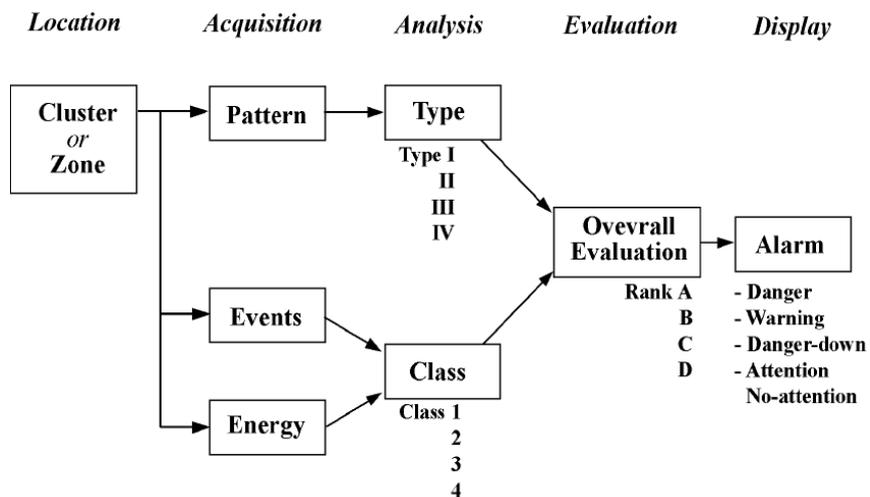


圖 10 JIS Z 2342:2002 壓力容器音洩檢測評估流程圖

### 三、 EN 14584:2013, Examination of Metallic Equipment during Proof Testing - Planar Location of AE Sources [23]

為了降低壓力容器在進行氣壓測試時造成嚴重災害之機率，本標準提供業主與檢測機構應用音洩進行檢測金屬設備之準則。

### 四、 EN 13554:2013, Non-destructive Testing - Acoustic Emission – General Principles [24]

本標準規定了對應力作用下的結構、元件及不同材料音洩檢測的一般原則，有關具體產品、設備、材料音洩檢測標準或者書面工作指引書的制定，本標準也提供了指南。下圖 11 說明音洩檢測基本原理，材料中局部能量快速釋放所產生的彈性波現象即為音洩訊號，利用合適的傳感器可接收到這些彈性波，經適當處理與分析後，可將音洩訊號聲源定性和定位。

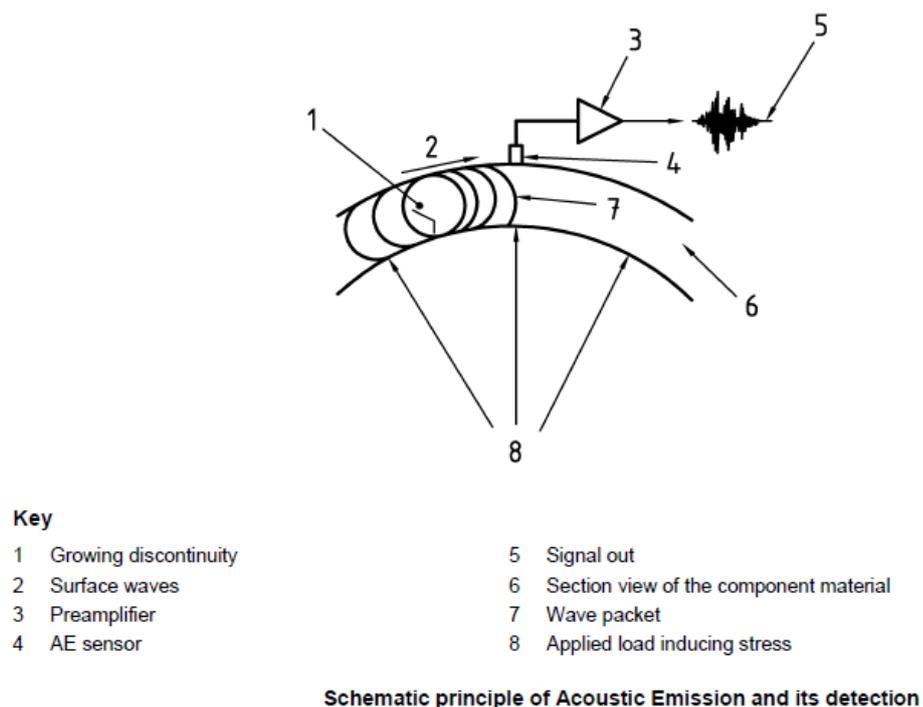


圖 11 音洩檢測原理示意圖

本標準也描述了音洩檢測的特點、限制性、應用的檢測時機、檢測對象、檢測系統、檢測程序與音洩訊號分析、評鑑(Evaluation)與分級(Grading)，其中針對評鑑與分級應藉由書面協議或合約來規定。

可接受的聲源評鑑準則應考慮多方面的影響因素，例如：(1)音洩聲源隨著負載變化的活躍性(2)持壓時的活躍性(3)突發型音洩訊號與所施加負載之間的相互關係

(4)活躍性聲源的頻率特徵(5)聲源在空間分佈上的聚集性(6)結構特徵與聲源的相對特徵。

對於已辨別出的音洩聲源，其分級方法及隨後覆檢要求也應明定在檢測作業程序中，等級劃分可分為(1)不相關顯示(2)需進行其他非破壞性檢測技術覆檢之顯示(3)臨界活躍性(critically active)，音洩聲源分級制度可由更具體的產品音洩檢測方法標準或最終由音洩檢測高級檢測師來確定。

### 五、 *ASTM E1139, Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries [25]*

本標準描述應用音洩技術連續監測金屬設備在操作中之檢測。包括對象如壓力容器、管線或其他元件的壓力邊界，複合材料所構成的壓力元件並不包含在內。

### 六、 *ASTM E1419, Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission [26]*

本標準描述應用音洩法針對裝載工業用氣體所使用之無縫壓力容器或管線進行檢測，如下圖 12，需加壓至大於日常使用壓力，可用氣體或液體作為加壓媒介，音洩檢測被使用為偵測與定位音洩聲源，必須使用其他非破壞性檢測方法來評鑑音洩聲源的重要性。基於安全考量，運輸用容器需進行定期檢測，音洩檢測已被確認可替代傳統水壓測試，最大測試壓力為平日填充壓力 1.1 倍

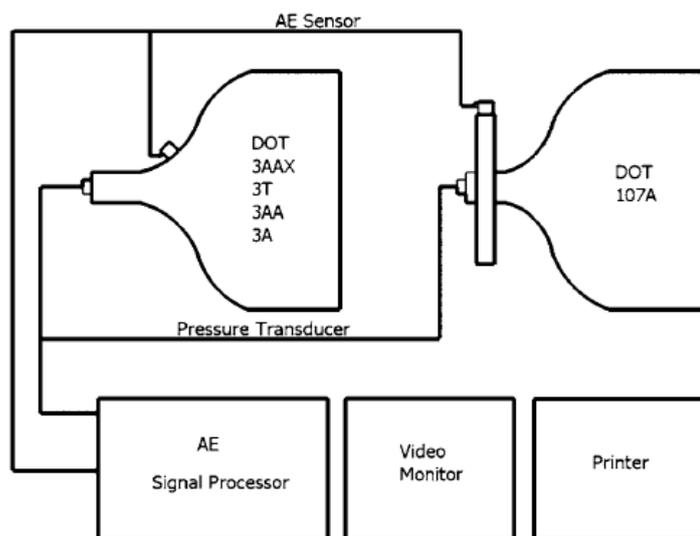


圖 12 E1419 所適用的氣體裝載容器類型

七、***ASTM E569, Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation [27]***

本標準描述應用音洩技術監測結構之檢測。如壓力容器、管線等以通過機械或加熱方式來提高結構內部壓力或溫度應力，以使用音洩技術來監測結構體。

八、***ASTM E650, Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors [28]***

本標準描述在應用音洩檢測技術時，針對不同應用範圍時，如何固定壓電式音洩傳感器來達到最佳的檢測成效。

九、***ASTM E750, Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation [29]***

針對音洩檢測時所用之系統，本標準描述多種系統特性量測方式來確保音洩系統之使用特性。

十、***ASTM E976, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensors Response [30]***

當音洩系統的使用者需要驗證音洩傳感器之響應時，本標準描述實際方法來量測不同狀況下音洩傳感器之響應，例如斷芯試驗(Pencil-Lead Break)也於本標準中描述試驗過程。

十一、***ASTM E1106, Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors[31]***

本標準描述位在美國華盛頓 NIST 的『主要音洩傳感器校正系統』。

十二、***ASTM E1781, Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors [32]***

本標準描述『次要的音洩傳感器校正標準』，與 E1106 標準相平行，提供給傳感器開發商與使用者所用，E1781 與 E1106 等二標準皆被認可為世界性傳感器校正標準。

十三、***ASTM E1211, Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors [33]***

本標準描述音洩檢測方法來量測與定位來自於壓力容器在穩定狀態下氣體

或液體之洩漏聲源。

十四、***ASTM E1932, Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small parts [34]***

本標準針對小型元件音洩檢測在前置作業、施作、分析與報告等描述了一步接續一步的指引。

十五、***ASTM E2075, Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod [35]***

本標準描述一套方法可以使用壓克力棒來量測驗證音洩傳感器的一致性。

十六、***ASTM E2374, Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification [36]***

本標準描述一套方法可以在施作音洩檢測前、施作中或者施作後進行系統性能之驗證。

十七、***Nondestructive Testing Handbook, 3rd Edition: Volume 6, Acoustic Emission Testing, “Chapter 8 Acoustic Emission Testing of Pressure Vessels, Pipes and Tanks-Part 1” [37]***

本文章內容敘述音洩檢測應用於球槽此類型之壓力容器，針對操作中使用中的球槽作介紹，如圖 13 所示，當然音洩檢測也可以應用於新製、整修過的球槽進行檢測，唯獨不同的是接受基準與加壓過程。利用音洩檢測球槽可將由瑕疵所引發之異常音洩訊號定位出來，至於瑕疵的種類、實際尺寸與方向性則需藉由其他非破壞性檢測進一步明確定義。

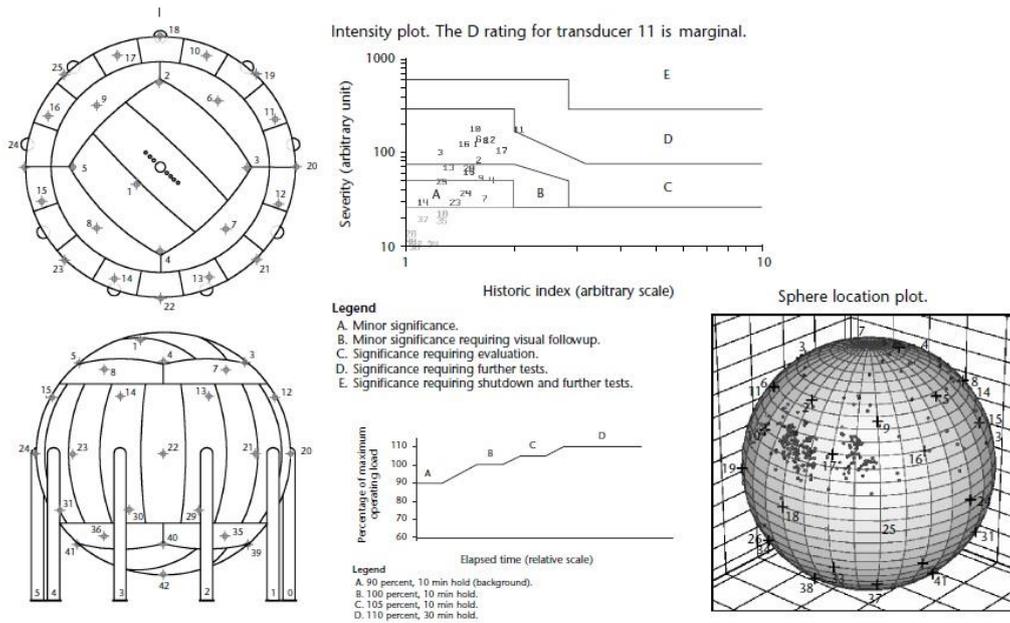


圖 13 球槽音洩檢測範例

## 十八、Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels 2008 [38]

針對大型球槽要完成全部球體與緝道的檢測工作將耗費許多人力與時間，音洩檢測在本文中利用已完成多年的 MONPAC 系統，在 ASME 相關標準與法規上，成功地完成數個球槽的音洩檢測達到球槽全檢，並以音洩檢測結果指出該進一步施作其他非破壞性檢測作業的位置，達到有效性且降低成本之檢測。

## 十九、NB/T 47013.9-2012, 壓力容器無損檢測第九部分: 音洩檢測 [39]

本標準規定了金屬材料壓力容器的音洩檢測方法和結果分級與評估。適用於線上使用金屬壓力容器活躍性瑕疵的音洩檢測與監測，不適用在洩漏點的音洩檢測與監測。其中針對加壓程序、檢測結果評鑑與分級、定位聲源強度分級都有詳加敘述。

音洩定位源的等級根據音洩定位源的活躍性和強度來綜合評鑑，評鑑方法是先確定音洩定位源的活躍性等級和強度等級，然後再確定音洩定位源的綜合等級。以傳感器陣列中最大傳感器間距的 10% 長度為邊長或直徑劃定出正方形或圓形評估區域，落在同一評估區域的音洩定位源事件則認定為同一聲源區域的音洩定位源事件。

如果音洩定位源區的事件數隨著升壓或持壓呈現連續增加時，則該區域的音洩定位源具有強活性。如果音洩定位源區的事件數隨升壓或持壓呈現間斷出現

時，則按下表 1 與表 2 進行分級。

表 1 兩次加壓循環聲發射定位源的活性等級劃分

活性等級	第一次加壓循環		第二次加壓循環	
	升壓	保壓	升壓	保壓
弱活性	*			
弱活性		*		
弱活性			*	
弱活性				*
中活性	*	*		
中活性	*		*	*
中活性	*	*	*	
中活性	*			*
強活性		*		*
強活性	*	*	*	
強活性	*	*		*
強活性	*		*	*
強活性		*	*	*
超強活性	*	*	*	*

注 1: \*表示加壓或保壓階段有聲發射定位源; 空白表示加壓或保壓階段無聲發射定位源。  
 注 2: 停止加壓後 1min 內的信號記入升壓信號, 1min 後的信號為保壓信號。  
 注 3: 如果同一升壓或保壓階段源區內聲發射事件數較多時, 可根據實際情況將該源的活性等級適當提高。

表 2 一次加壓循環聲發射定位源的活性等級劃分

活性等級	升壓	保壓
中活性	*	
強活性		*
超強活性	*	*

注 1: \*表示加壓或保壓階段有聲發射定位源; 空白表示加壓或保壓階段無聲發射定位源。  
 注 2: 停止加壓後 1min 內的信號記入升壓信號, 1min 後的信號為保壓信號。  
 注 3: 如果同一升壓或保壓階段源區內聲發射事件數較多時, 可根據實際情況將該源的活性等級適當提高。

音洩定位源的強度可用能量、振幅或計數等參數來表示，音洩定位源強度計算取音洩定位源區中前 5 最大的能量、振幅或計數參數的平均值，振幅參數應根據衰減量測結果加以修正，音洩定位源強度分級依照表 3 中的 a, b 值應由試驗來確定，表 4 為 Q345R 鋼使用振幅參數劃分音定位源強度之推薦值。

表 3 聲發射定位源的強度等級劃分

強度等級	聲發射定位源強度 $Q$
低強度	$Q < a$
中強度	$a \leq Q \leq b$
高強度	$Q > b$

表 4 Q345R 鋼採用幅度參數進行聲發射定位源的強度等級劃分

強度等級	幅度 $Q$ , dB
低強度	$Q < 60\text{dB}$
中強度	$60\text{dB} \leq Q \leq 80\text{dB}$
高強度	$Q > 80\text{dB}$

注：表 4 中的数据是经衰减修正后的数据。传感器输出  $1\mu\text{V}$  为  $0\text{dB}$ 。

## 第四節 儲槽胴壁之技術標準規範及評鑑方法

大型立式儲槽具有容積大、分佈集中、可儲存易燃、易爆或有毒內容物等特性，引起儲槽事故的主要因為腐蝕和洩漏，尤其以儲槽底板的腐蝕和洩漏最難被控制。儲槽的洩漏嚴重者會汙染環境，也存在著爆炸和引發火災的危險性，根據標準 API 653 [40]規定，儲槽應進行定期檢測以確保儲槽繼續使用的完整性，但該標準針對檢測方法並未加以限制，目前國際上針對儲槽底板檢測大多以開放儲槽時利用磁漏檢測，或者不開放儲槽時以音洩進行檢測。以下，將針對使用音洩法在不開放下儲槽檢測之技術標準及評鑑方法進行文獻回顧。

### 一、*API Standard 653, 2009, Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction* [40]

為了確保儲槽槽壁與底板不會發生洩漏與破損，該標準提出三種型式的週期性檢測，(1)平日例行性檢測，簡單地以目視檢測方式檢查儲槽外觀與結構是否有滲漏、變形、沉陷現象、腐蝕、油漆塗層、附屬元件與儲槽基座異常等現象；(2)不開放下檢測，依照 API653 附錄 C 所列的檢查表項目，進行檢測；(3)內部開放下檢測，首先儲槽必須先停工、排空內部、清洗內部、去除表面防腐層，再進行內部檢測。依據其相關規定，在不知道儲槽腐蝕速率下，該儲槽至少每 5 年進行一次外部檢測，並且對槽壁每五年進行一次超音波測厚，若已經知道儲槽腐蝕速率，則檢測週期可視情況而定，但最久不超過 15 年，儲槽底板檢測週期一般也不能超過 20 年。

## 二、*EN 15856:2010 Nondestructive Testing – Acoustic Emission – General Principles of AE Testing for the Detection of Corrosion within Metallic Surrounding Filled with Liquid [41]*

此歐洲標準描述了音洩檢測應用於在金屬儲槽內充滿液體時，偵測正在發生的腐蝕行為，檢測範圍包含儲槽底板、壁板或浮頂式儲槽的屋頂，只要與儲槽內容物接觸的金屬面都包含在內。腐蝕行為產生的音洩訊號可能藉由液體或結構體傳遞到傳感器，當要接收由液體傳遞之音洩訊號，傳感器使用頻率範圍為 20kHz~80kHz，若要接收由金屬結構傳遞之音洩訊號則傳感器使用頻率範圍為 100kHz~300kHz。在標準內也提到由於音洩定位是藉由訊號時間差來定位，當檢測對象為儲槽底板時，應使用 2 排傳感器，每排至少 6 顆傳感器來進行訊號接收，針對底板腐蝕檢測定位誤差為儲槽直徑 10% 以內，若是針對浮動式之儲槽頂板檢測，則誤差為儲槽直徑 15% 以內，若為儲槽壁板檢測時，則誤差為二傳感器間距 15% 以內。

另外，針對儲槽音洩檢測之工作指引書，標準內也列出所需攥寫項目，以確保檢測工作的執行。傳感器安裝位置也建議二顆之間不可超過 15 公尺，第一排傳感器約在儲槽底板上方 1 公尺處，第二排傳感器則需低於內容物液面 1 公尺，傳感器安裝也須遠離壁板上之銲道 200 mm 以上距離，音洩訊號擷取時間則必須高於 1 小時，且於收集音洩訊號時需盡量控制背景雜音所產生的雜訊或者紀錄噪音發生之時間點，方能擷取到有效的音洩訊號。

## 三、*ASTM E1930-97, Standard Test Method for Examination of Liquid-Filled Atmospheric and Low-Pressure Metal Storage Tanks Using Acoustic Emission [42]*

本標準測試方法針對新製地面上儲槽與操作中儲槽提供一份檢測指引。此測試方法主要用來檢測受壓後母材、銲道與脆化內襯所存在瑕疵之音洩訊號，包括母材內的裂紋、腐蝕、應力腐蝕裂、脫層、脆化與點蝕，銲道內的熔合不良、滲透不足、氣孔、介在物與夾渣。檢測範圍包括在傳感器所分佈圍成之範圍內，因此若要檢測底板，則須在底板架設傳感器以接收底板腐蝕音洩訊號。在此測試方法中也明定出施加負載與注入內容物高度之時程表，音洩訊號須在注入內容物高度超過 10% 方能開始收集訊號，新製儲槽與操作中儲槽負載時程表分別如下圖 14 與圖 15。此測試方法所施加的負載壓力需大於平日儲槽使用壓力，否則瑕疵難以在音洩檢測過程中

釋放出音洩訊號，當有效的音洩檢測結果顯示出局部音洩訊號異常區，則應搭配其他可定量性之非破壞檢測技術來評估這些異常音洩訊號顯示區之嚴重性。

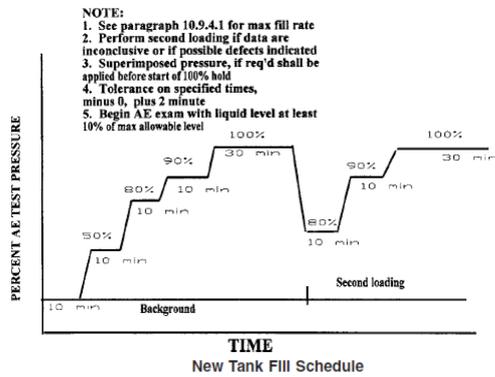


圖 14 新製儲槽試壓程序

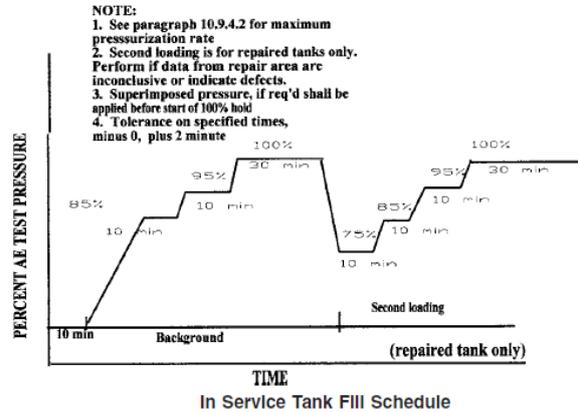


圖 15 操作中儲槽試壓程序

#### 四、音洩技術於地上油槽底板腐蝕檢測之應用 [43]

本文獻利用音洩技術應用於地上油槽不開放檢查，作為油槽底板腐蝕狀況之評估方法，配合數個不同直徑油槽之現場檢測結果與開槽後結果相互驗證，如圖 16，音洩油槽檢測技術確實能在定性上分辨反應出油槽底板腐蝕嚴重狀況，對於嚴重腐蝕狀況分佈之預測有相當程度的可靠性，但針對洩漏點則可能因為檢測當下，洩漏點可能遭汙泥阻塞使得該洩漏點並非屬於活躍性聲源，使得洩漏點定位預測上存在著不確定性。

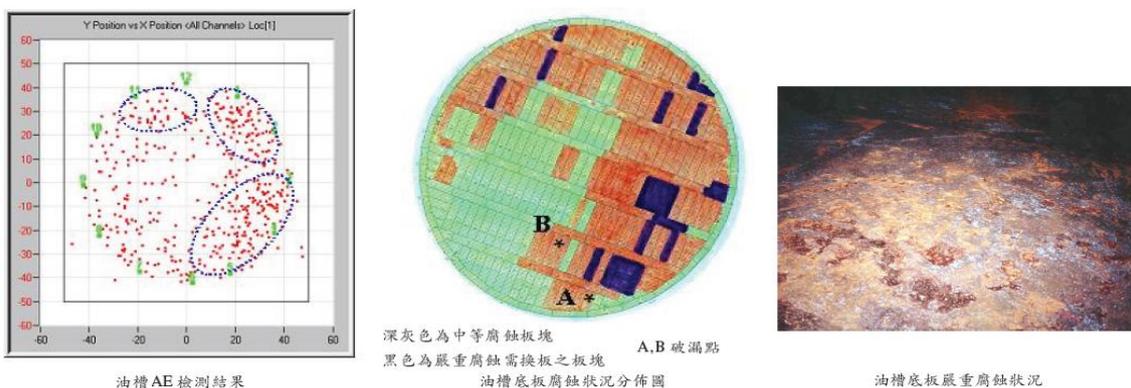


圖 16 儲槽音洩檢測與開槽驗證案例

## 第三章 應用音洩檢測壓力容器胴體

### 第一節 壓力容器與音洩檢測

壓力容器在使用過程中可能會引起爆炸等危險，當發生爆炸後，容器內的物質可能會膨脹，這不但對設備本身造成破損，也極有可能引起較大的衝擊波危害到現場操作人員，倘若壓力容器內存放易燃、易爆或有毒氣體，則發生洩漏或爆炸時所產生的危害便會造成更大的工安事故。為了避免這類問題的發生，定期的檢測工作、有效的檢測技術運用才能確保壓力容器在使用上的安全性。根據標準 **API 510 Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration** 規定，壓力容器應進行定期檢測以確保壓力容器繼續使用的完整性，於標準中也列出了壓力容器可能發生的多種劣化機制、檢測規劃應具備項目、與非破壞檢測技術的選擇，其中一項音洩檢測是一種不開放胴體下之線上檢測技術，當符合下列敘述則可使用線上檢測技術替代內部檢測，(1)壓力容器尺寸或構造使得檢測人員難以進入施作內部檢測時，(2)當容器內腐蝕率小於 0.125mm/年，(3)容器剩餘壽命超過 10 年，(4) 利用相同或類似檢測技術在五年內確實建立了內部介質腐蝕特性，(5)在外部檢測時未發現異常現象，(6)鋼製容器胴體操作溫度不超過該材料引起潛變之溫度下限，(7)壓力容器未遭受內容物所造成的環境引劣或氫損傷，(8)容器未具有非整體黏合之內襯。以下，將針對使用音洩法在壓力容器線上檢測之技術標準及評鑑方法進行文獻回顧。

在 **ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec V Article 12** 中主要描述金屬壓力容器在壓力試驗時音洩檢測的施作方法。當需依照本規範進行音洩檢測時，應考慮人員資格、證書要求、檢測要求和範圍、接受與評估基準、檢測報告項目要求與檢測內容記錄和保存等要求項目。其中，新製壓力容器與操作中壓力容器之音洩檢測程序，加壓前背景雜音監控時間為 15 分鐘，如果背景雜音超過評估位準，則應消除噪音源或停止檢測；新製壓力容器試壓應從 50%~100% 試驗壓力，每次持壓 10 分鐘，最後一次 100% 試壓保持時間最少 30 分鐘；操作中壓力容器試壓應從 90%~110% 最大操作壓力，每次持壓 10 分鐘，最後一次 110% 試壓保持時間最少 30 分鐘。在日本規範 **JIS Z 2342:2002** 主要描述金屬壓力容器在壓力試驗時音洩檢測的施作方法與量化評估方法。根據經驗法則提供音洩檢測結果量化分級方法，作為壓力容器結構完整性評估。本規範除了基本音洩檢測程序外，如人員、設備、傳感器、負載施加程序，還進一步分析叢集(cluster)音洩訊號所代表的類型與嚴重等級，綜合評估叢集音洩訊號之屬性後，可將壓力容器檢測結果區分為危險級、警示級、危險以下

等級、加強注意等級、正常等 5 級，對於音洩檢測在壓力容器之檢測結果上可提供給使用者更多的完整性評估資訊。

在歐洲規範 EN 14584:2013 中，為了降低壓力容器在進行氣壓測試時造成嚴重災害之機率，本標準提供業主與檢測機構應用音洩進行檢測金屬設備之準則。在 EN 13554:2013 規定了對應力作用下的結構、元件及不同材料音洩檢測的一般原則，有關具體產品、設備、材料音洩檢測標準或者書面工作指引書的制定，本標準也提供了指南。EN 13554 也描述了音洩檢測的特點、限制性、應用的檢測時機、檢測對象、檢測系統、檢測程序與音洩訊號分析、評鑑(Evaluation)與分級(Grading)，其中針對評鑑與分級應藉由書面協議或合約來規定。可接受的聲源評鑑準則應考慮多方面的影響因素，例如：(1)音洩聲源隨著負載變化的活躍性(2)持壓時的活躍性(3)突發型音洩訊號與所施加負載之間的相互關係(4)活躍性聲源的頻率特徵(5)聲源在空間分佈上的聚集性(6)結構特徵與聲源的相對特徵。對於已辨別出的音洩聲源，其分級方法及隨後覆檢要求也應明定在檢測作業程序中，等級劃分可分為(1)不相關顯示(2)需進行其他非破壞性檢測技術覆檢之顯示(3)臨界活躍性(critically active)，音洩聲源分級制度可由更具體的產品音洩檢測方法標準或最終由音洩檢測高級檢測師來確定。

在美國規範 ASTM E1139 描述了應用音洩技術連續監測金屬設備在操作中之檢測。包括對象如壓力容器、管線或其他元件的壓力邊界，複合材料所構成的壓力元件並不包含在內。在 ASTM E1419 則描述應用音洩法針對裝載工業用氣體所使用之無縫壓力容器或管線進行檢測，檢測過程中需加壓至大於日常使用壓力，可用氣體或液體作為加壓媒介，音洩檢測被使用為偵測與定位音洩聲源，必須使用其他非破壞性檢測方法來評鑑音洩聲源的重要性。基於安全考量，運輸用容器需進行定期檢測，音洩檢測已被確認可替代傳統水壓測試，最大測試壓力為平日填充壓力 1.1 倍。

針對大型球槽要完成全部球體與鉚道的檢測工作將耗費許多人力與時間，音洩檢測在本文中利用已完成多年的 MONPAC 系統，在 ASME 相關標準與法規上，成功地完成數個球槽的音洩檢測達到球槽全檢，並以音洩檢測結果指出該進一步施作其他非破壞性檢測作業的位置，達到有效性且降低成本之檢測。

大陸規範『壓力容器無損檢測第九部分:音洩檢測』規定了金屬材料壓力容器的音洩檢測方法和結果分級與評估。適用於線上使用金屬壓力容器活躍性瑕疵的音洩檢測與監測，不適用在洩漏點的音洩檢測與監測。其中針對加壓程序、檢測結果評鑑與分級、定位聲源強度分級都有詳加敘述。音洩定位源的等級根據音洩定位源的活躍性和強度來綜合評鑑，

評鑑方法是先確定音洩定位源的活躍性等級和強度等級，然後再確定音洩定位源的綜合等級。以傳感器陣列中最大傳感器間距的 10% 長度為邊長或直徑劃定出正方形或圓形評估區域，落在同一評估區域的音洩定位源事件則認定為同一聲源區域的音洩定位源事件。如果音洩定位源區的事件數隨著升壓或持壓呈現連續增加時，則該區域的音洩定位源具有強活性。

壓力容器在石油、化工、鋼鐵、造紙等工業被廣泛地使用，而且與人們日常生活息息相關。壓力容器是具有爆炸危險的壓力容器，它承受著高溫、低溫、易燃、易爆、劇毒或腐蝕內容物，一旦發生爆炸或洩漏往往會伴隨著火災、中毒等災難性事故，造成環境汙染，更給社會大眾生活直接帶來危害與不安定感。有鑑於此，國內外對於壓力容器的設計、製造和使用均有嚴格的規定與要求。20 世紀 60 年代，Green 等人首先開始了音洩技術在非破壞性檢測方面的應用，Dunegan 首次將音洩技術應用於壓力容器檢測方面之研究；70 年代，Dunegan 等人成功地開發多通道音洩檢測系統，使得音洩檢測技術得以在化工容器、核容器與銲接過程序控制方面進行初步應用，發展至今，在國外音洩檢測技術應用在壓力容器非破壞性檢測已相當成熟。

音洩針對壓力容器之非破壞性檢測可分為新製造的驗證試驗、使用中壓力容器之定期檢測以及使用過程操作中線上檢測，但其共同特點都是需要容器加壓情況下進行動態檢測。

#### 一、音洩技術針對壓力容器檢測之優點如下[44]：

- (一) 音洩是一種動態檢測方式，所偵測到的能量來自於待測物本身所發出，而非像超音波檢測一樣，需由檢測設備發出能量。
- (二) 音洩檢測對線性瑕疵較為靈敏，能偵測到在加載條件下這些瑕疵的活躍程度，穩定之瑕疵並不會產生音洩訊號。
- (三) 在一次檢測過程中，音洩檢測可提供整體性檢測和評估整座壓力容器中具活躍性瑕疵的狀態。
- (四) 對於壓力容器的定期檢測，音洩檢測可以縮短檢測時所需之停機時間或者可不停機狀況下進行操作中檢測。
- (五) 對於壓力容器的壓力試驗，音洩檢測技術可以預防由未知瑕疵所引起災難性失效和限制壓力容器的最高工作壓力。

## 二、壓力容器音洩發射源種類如下：

### (一) 裂紋：

壓力容器焊道上表面裂紋及內部深埋裂紋的尖端發生塑性形變和擴展時將產生音洩訊號。

### (二) 銲接瑕疵：

由於銲接過程工法不當，焊道內即可能出現各種銲接瑕疵，壓力容器焊道內存在的氣孔、夾渣、熔合不良、滲透不足等瑕疵的開裂與擴展及非金屬介在物的斷裂均可產生音洩訊號。

### (三) 機械摩擦：

在現場壓力容器試壓過程中，容器胴體會產生相對應的應變，以至於整個結構因摩擦產生大量音洩訊號，這是十分常見的現象，容器外部施工架的碰撞、內部搭板、外部保溫及平臺支撐架等構件均可產生此類型之音洩訊號。機械摩擦產生的音洩訊號定位源散佈在較大的範圍，且由於機械摩擦音洩機制與整體金屬材料因塑性變形產生的音洩訊號機制不同，故並無法滿足凱瑟效應(Kaiser's Effect)，即在降壓後第二次升壓過程中仍產生大量之音洩訊號。

### (四) 銲接殘留應力釋放：

對於新製作壓力容器，首次加壓容易出現此類型訊號，對於使用中壓力容器若有焊道修補處也容易產生此類型音洩訊號，另外壓力容器的裙部、支撐部位和插管等處之焊道部位易產生銲接殘留應力和應力集中，在升壓過程中應力會重新分佈進而產生大量之音洩訊號。

### (五) 洩漏：

在氣壓或水壓試驗過程中，容器上接管、法蘭、人孔以及瑕疵貫穿部位的洩漏可產生大量之音洩訊號，由於洩漏之音洩訊號為連續型，難以採用時間差定位法進行定位，但是對於多通道音洩設備而言，探頭越接近洩漏源，收到的訊號也會更多，訊號振幅與能量等音洩參數也會較大，因此可藉由觀察音洩訊號撞擊數(Hit)、振幅與能量等參數之分佈圖來確定洩漏源之區域。

### (六) 氧化物剝離：

長時間使用下的壓力容器，若使用材質為鋼，則在內外部皆容易發生氧化，若壓力容器內容物具腐蝕性時或外部環境潮溼、海風等因素皆可產生較嚴重之腐蝕，在首次加壓過程中，隨著應力增加，容器胴體必然產生相對應的應變，但容

器表面上之氧化物並無法隨之產生相同的應變，使得在加壓與持壓過程中氧化物會發生破裂與剝離，這些氧化物的破裂與剝離過程亦會產生大量音洩訊號。

#### (七) 電子雜訊：

由於目前音洩設備所採用之元件抗干擾能力較強，電子雜訊往往不是來自於外部環境，而是來自於自身系統內部，包括探頭、訊號線、前置放大器、訊號電路板等，由於來自不同通道的電子雜訊是互不相關，因此不會產生定位源。

## 第二節 氣體鋼瓶音洩檢測

氣體鋼瓶於使用後，尤其是內部填充二氧化碳氣體之鋼瓶特別容易有內部腐蝕現象發生，鋼瓶所處環境若潮濕或具有腐蝕性環境時則容易使鋼瓶外部發生腐蝕現象，如下圖 17。當鋼瓶胴體產生腐蝕坑時，胴體壁厚局部損失將使得鋼瓶局部強度下降，若重新填充新的氣體時，可填充壓力有可能因為腐蝕的存在而下降。一般而言，氣體鋼瓶之安全性測試僅採用水壓試驗，量測體積膨脹率是否合格便完成了鋼瓶使用之安全測試。



圖 17 氣體鋼瓶 A 鋼瓶外腐蝕與 B 鋼瓶內腐蝕照片

國外目前針對氣體鋼瓶之檢測已有法規可採用音洩檢測技術來取代水壓試驗，其程序簡介如下：

根據 ASTM E 1419-09, Standard Practice for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission，此為音洩檢測裝載工業用氣的無縫壓力容器之檢測標準。本檢測方法需加壓至大於日常使用壓力，可用氣體或液體作為加壓媒介，音洩檢測被使用為偵測與定位音洩聲源，同時須使用其他非破壞性檢測方式來評鑑音洩聲源之嚴重性。

音洩傳感器固定在容器上，當容器被加壓超過平日填充壓力時進行監測音洩訊號，訊

號處理器利用音洩脈衝訊號到達時間來進行音源定位，當音洩訊號振幅超過預設門檻值時，便會被記錄下來並進行定位，這樣的定位點需要進一步以其他非破壞檢測方式，如超音波測厚來覆驗是否為嚴重瑕疵訊號，若覆驗結果顯示容器發生嚴重瑕疵，亦即瑕疵深度超過使用極限時，則必須停止使用該容器。基於安全考量，運輸用容器需進行定期檢測，音洩檢測已被確認可替代傳統水壓試驗，若容器已進行過水壓試驗者，一年期間不應使用音洩檢測。

音洩檢測加壓過程，加壓速率應在使容器變形與施加負載保持平衡，音洩聲源主要時由於瑕疵成長和所產生之二次聲源，最大測試壓力為平日填充壓力之 1.1 倍，過多的背景雜音會使音洩訊號失真，如果背景雜音過大且不能被去除時，則不應使用音洩檢測法。

音洩檢測氣體鋼瓶步驟：

- 一、用目視檢測針對壓力容器可見的外表面，在檢測報告中記錄目視檢測結果。
- 二、隔離開測試中容器，避免使之與其他容器和硬體設備相接觸，當容器無法完全隔離時，在檢測報告中也應記錄可能的外部聲源。
- 三、連接加壓軟管和壓力計並消除連接處可能的洩漏情形。
- 四、傳感器必須安裝在同一角度位置，且安裝在容器的每一端，已使得音洩檢測系統能夠確保盡可能多的同軸音洩聲源。
- 五、調整訊號處理器設置。
- 六、在每一個傳感器處進行一次系統性能檢查，驗證訊號峰值振幅大於規定於表 X1.2 的值。在加壓之前先驗證沒有高於訊號處理器設定門檻值的背景雜訊。
- 七、開始加壓，加壓速率應低於傳感器無法偵測到流體流動所發出之雜訊。
- 八、監測並觀察音洩訊號事件在不同軸向位置出現之機率(Event v.s Location)，如果觀察到異常訊號應停止加壓並進行異常事件調查。
- 九、監測過程中會儲存大量訊號資料，當加壓壓力到達正常填充壓力之 1.1 倍時，則停止檢測。
- 十、在每一傳感器處再次進行一次系統性能檢查。
- 十一、藉由把超量的氣體排出使容器壓力到達平日正常填充壓力。
- 十二、應對原始音洩訊號進行濾波，排除非結構所產生的音洩訊號(比如電子噪音)。
- 十三、再次檢視檢測數據，分析音洩事件定位圖。
- 十四、由檢測數據分析來確認是否需要以其他非破壞檢測方法進行覆驗。

本次氣體鋼瓶實驗架設如下圖 18，利用 Vallen 音洩設備安裝二組傳感器於鋼瓶上，該氣體鋼瓶長 1070 mm，傳感器分別安裝於瓶底上方 100 mm 處與 950 mm 處，標示如圖 19 所示，待鋼瓶開始填充氣體時監測是否有音洩訊號的產生，直到壓力錶到達填充壓力 140 kgf/cm<sup>2</sup> 後停止訊號蒐集。訊號蒐集時間紀錄了由空瓶開始、氣體灌入、填充過程與排氣階段，歷時約 55 分鐘，在圖 20 中，其中填充過程時間約為 33 分鐘，本次結果並無蒐集到超過設定門檻值 32dB 之訊號，圖 21 中一開始蒐集到幾組超過 80dB 之訊號乃為氣體灌入時之聲響，在後半段有更多組超過 80dB 之訊號乃為排氣時所產生之音洩訊號，這些訊號並不列入分析判讀考慮。



圖 18 氣體鋼瓶音洩實驗架設



圖 19 氣體鋼瓶音洩傳感器架設位置圖

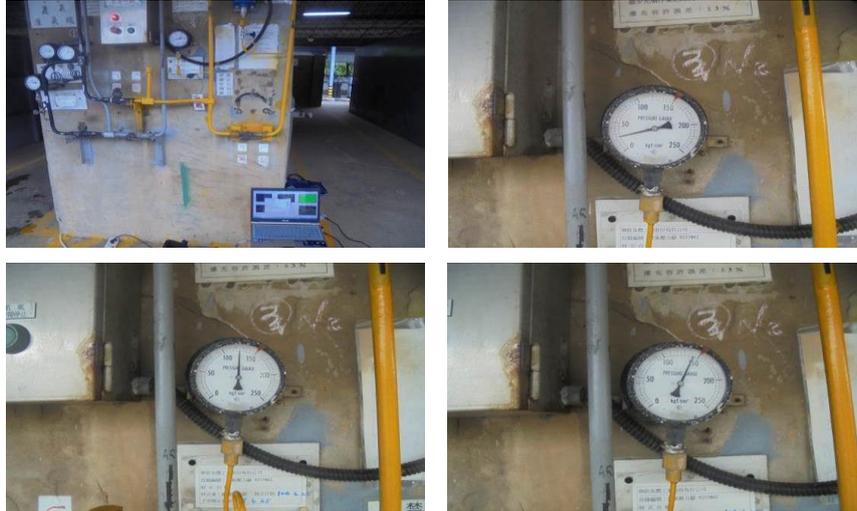


圖 20 持續填充氣體加壓過程

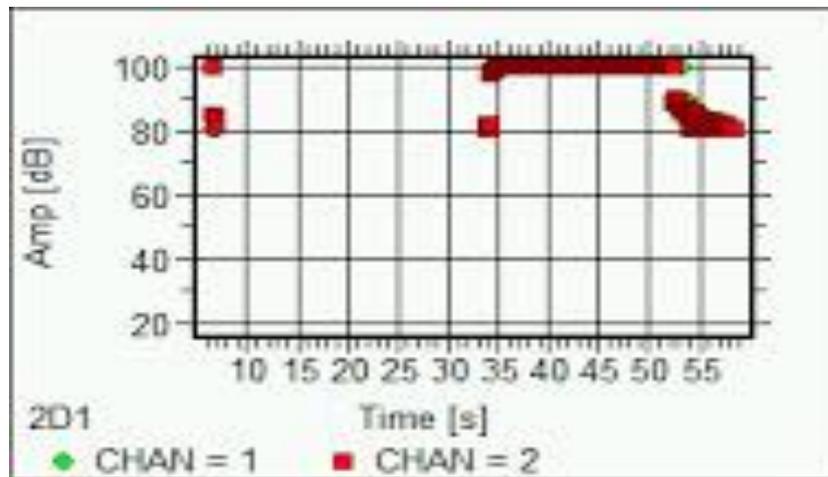


圖 21 氣體鋼瓶音洩檢測結果

### 第三節 氣體鋼瓶其他非破壞性檢測

針對圖 19 中氣體鋼瓶，由於在音洩檢測結果中並未發現任何異常訊號，為了驗證此結果，乃以相位陣列超音波進行覆驗，如圖 22 所示，將傳感器來回掃描氣體鋼瓶胴體，檢測胴體是否有存在內部腐蝕。相位陣列式(Phased Array)超音波(PAUT)技術之主要功能為在一多晶體傳感器，以電腦來控制激發(振幅和遲延)各個小晶片。合成壓電傳感器的激發可經由軟體來調制音束的參數:如角度、聚焦距離和聚焦其尺寸等產生聚焦的超音波音束，其迴掃的聚焦射束能偵測到遠離射束軸之分散且錯向之鏡面裂紋的反射。本次採用相位陣列超音波中的電子式掃描來達成壓力容器胴體內部腐蝕描繪，利用具有相同的聚焦法則和遲延時間之一組壓電晶片多重發訊跨越掃描，掃描時是以一定的角度和沿著相位陣列傳感器的長度方向(音圈)執行，如圖 23 所示，此類似傳統超音波傳感器之柵欄式掃描(Raster

Scan)可用來進行胴體內部腐蝕繪圖。



圖 22 氣體鋼瓶相位陣列超音波瓶身壁厚 B 掃描架設

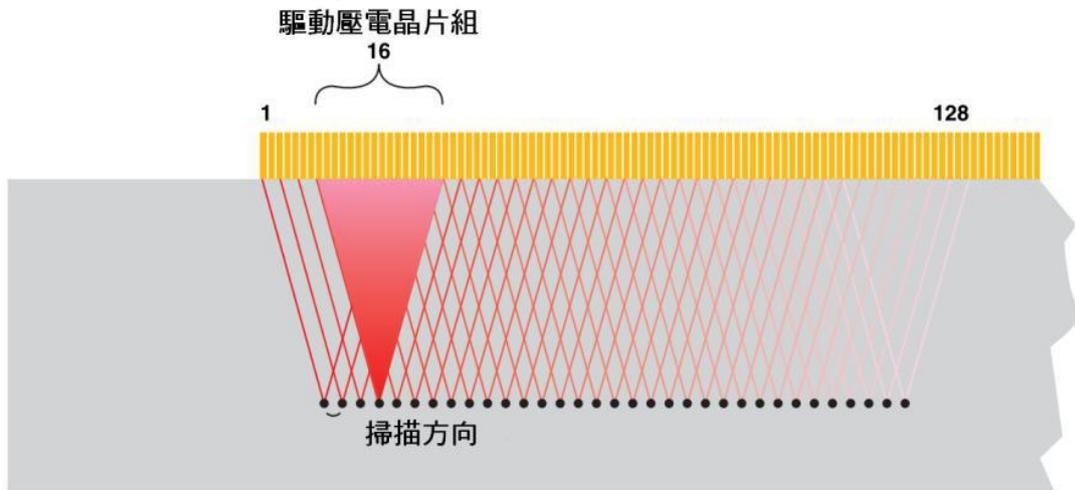


圖 23 相位陣列超音波電子式掃描示意圖

針對圖 22 中氣體鋼瓶，以相位陣列超音波進行覆驗結果如圖 24 所示，以傳感器掃描此實驗用氣體鋼瓶整體，每處皆顯示正常底面回波，壁厚平均量測皆為 7.3~7.5 mm，並未發現胴體內部有腐蝕現象。本次覆驗結果與音洩檢測結果相符合。

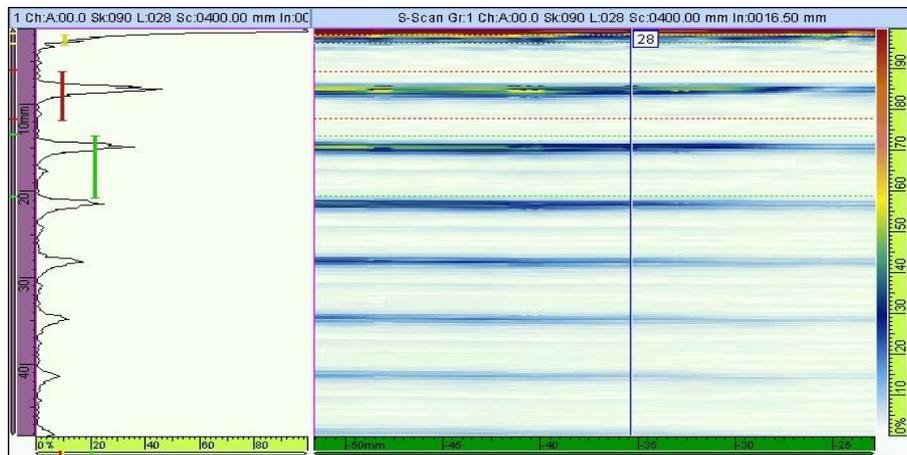


圖 24 氣體鋼瓶相位陣列超音波瓶身壁厚 B 掃描結果

針對圖 17 中二組氣體鋼瓶，由於圖 17 左其外部腐蝕較為嚴重，圖 17 右其內部以內視鏡觀察有明顯內腐蝕現象，基於安全考量，因此並未能進行音洩檢測實驗，在此乃嘗試以相位陣列超音波進行圖 17 中 B 鋼瓶內腐蝕之檢測，以傳感器掃描此實驗用氣體鋼瓶整體，結果如圖 25 與圖 26 所示，有兩處顯示腐蝕底面回波，壁厚平均量測分別為 6.7~7.0 mm 與 6.3~6.6 mm，此 B 鋼瓶由相位陣列超音波檢測結果確實有內部腐蝕存在，但屬於輕度腐蝕現象。

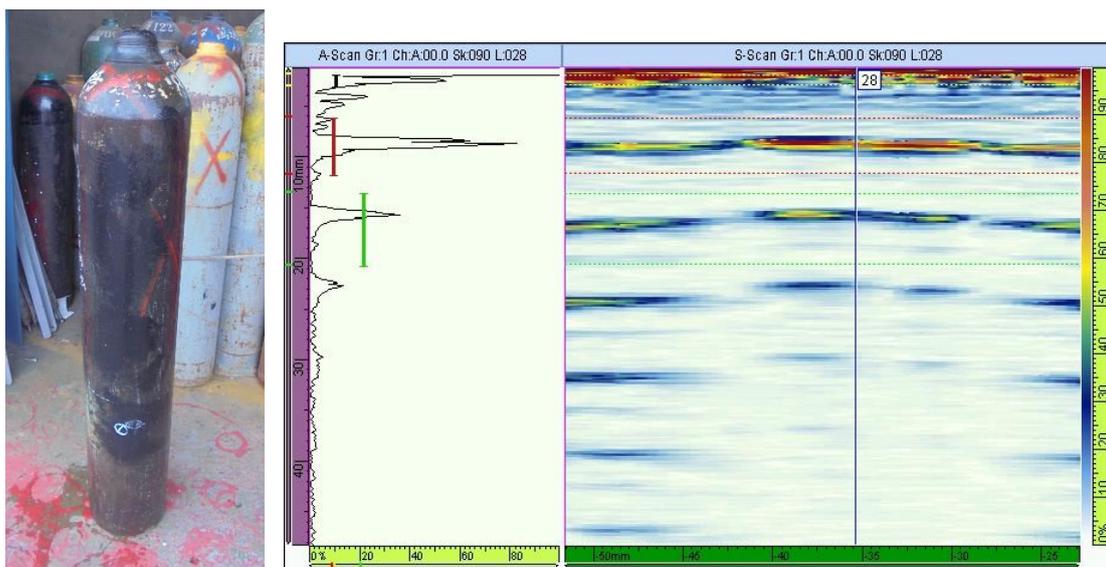


圖 25 氣體鋼瓶 B 相位陣列超音波瓶身內部腐蝕點 1(下半部)

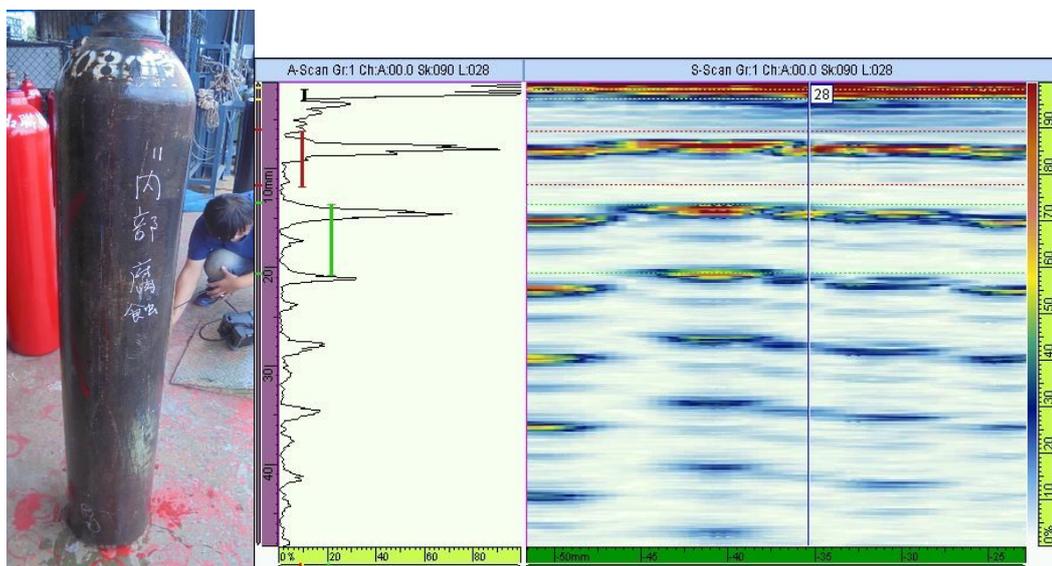


圖 26 氣體鋼瓶 B 相位陣列超音波瓶身內部腐蝕點 2(近底部)

針對圖 17 中二組氣體鋼瓶，由於圖 17 左其外部腐蝕較為嚴重，基於安全考量，因此並未能進行音洩檢測實驗，在此乃嘗試以光學 3D 雷射掃描進行圖 17 中 A 鋼瓶外腐蝕

之檢測，如圖 27 所示，將反射貼片貼滿鋼瓶並以雷射光源掃描此實驗用氣體鋼瓶整體，結果如圖 28 所示，腐蝕成像結果顯示瓶身底部腐蝕較為嚴重，最深腐蝕坑為 1.8 mm 其餘區域平均腐蝕 1 mm，由於當瓶身外部均勻腐蝕時較難以用點蝕儀精準量測到實際腐蝕深度，若採用 3D 雷射掃描則可準確量測腐蝕深度，在評估是否停用該氣體鋼瓶時，準確量測腐蝕深度將是一項重要指標。



圖 27 氣體鋼瓶 A，光學雷射 3D 掃描外腐蝕

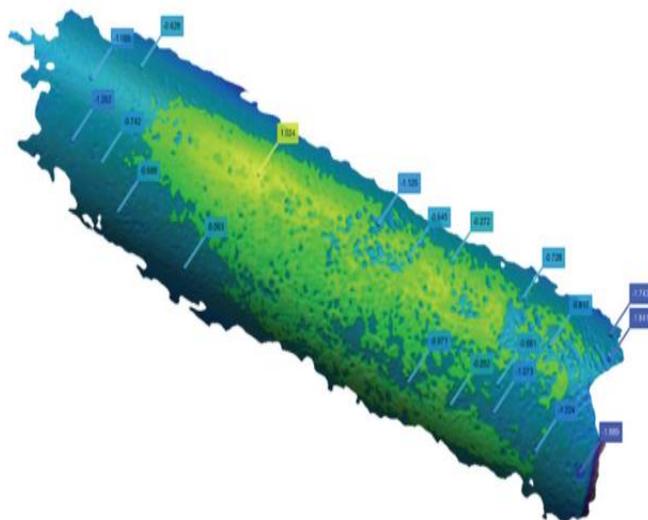


圖 28 氣體鋼瓶 A，光學雷射 3D 掃描外腐蝕成像

## 第四章 應用音洩檢測儲槽

### 第一節 儲槽與音洩檢測

國內大型儲槽分佈於許多石化園區內，對於大型儲槽之檢測通常是利用停止生產、清空儲槽內容物、清潔、搭架以超音波測厚、磁粒、液滲、真空測漏與磁漏底板腐蝕檢測技術進行開槽檢測，以目前方式，要完成儲槽整體檢修至少開槽二個月以上，耗時長且造成停產時間也較長，若缺少備用儲槽，更需要一套有效的線上和快速檢測技術來提供新的檢測方式。大量的儲槽使用者，大多採以隨機抽檢方式來開放檢測，若抽檢儲槽並無發現嚴重瑕疵，則將造成不必要的檢測與開槽成本；若未抽檢儲槽具有洩漏的高風險性，未能按期進行檢測可能使得這些儲槽使用超過 20 年，大大增加洩漏等工安事故。因此，音洩技術應用在儲槽胴體檢測的提升，更需要國內研究單位元的投入，促使音洩檢測能更具有效性，協助國內儲槽使用單位能更有效且更省成本的管控儲槽使用安全性。

儲槽在使用中，底板遭受環境的直接腐蝕過程可產生音洩訊號，另外，儲槽液位由低到高發生變化或是在高液位持壓時，底板上腐蝕或腐蝕生成物發生剝離或破裂等現象，也會產生彈性波通過儲槽內容物或者底板傳播至儲槽壁板表面，如圖 29，在壁板表面由音洩傳感器將這些機械振盪轉化成電訊號，經放大、處理和記錄，最後藉由這些訊號進行定位與參數分析，以評估儲槽底板腐蝕程度等級。

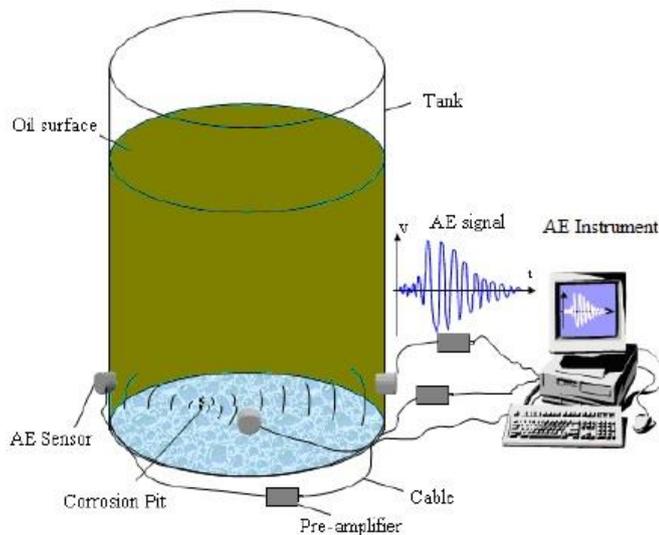


圖 29 音洩技術應用於儲槽檢測

在歐洲規範 EN 15856:2010 中描述了音洩檢測應用於在金屬儲槽內充滿液體時，偵測正在發生的腐蝕行為，檢測範圍包含儲槽底板、壁板或浮頂式儲槽的屋頂，只要與儲槽內

容物接觸的金屬面都包含在內。腐蝕行為產生的音洩訊號可能藉由液體或結構體傳遞到傳感器，當要接收由液體傳遞之音洩訊號，傳感器使用頻率範圍為 20kHz~80kHz，若要接收由金屬結構傳遞之音洩訊號則傳感器使用頻率範圍為 100kHz~300kHz。在標準內也提到由於音洩定位是藉由訊號時間差來定位，當檢測對象為儲槽底板時，應使用 2 排傳感器，每排至少 6 顆傳感器來進行訊號接收，針對底板腐蝕檢測定位誤差為儲槽直徑 10% 以內，若是針對浮動式之儲槽頂板檢測，則誤差為儲槽直徑 15% 以內，若為儲槽壁板檢測時，則誤差為二傳感器間距 15% 以內。

另外，針對儲槽音洩檢測之工作指引書，標準內也列出所需攥寫項目，以確保檢測工作的執行。傳感器安裝位置也建議二顆之間不可超過 15 公尺，第一排傳感器約在儲槽底板上方 1 公尺處，第二排傳感器則需低於內容物液面 1 公尺，傳感器安裝也須遠離壁板上之銲道 200 mm 以上距離，音洩訊號擷取時間則必須高於 1 小時，且於收集音洩訊號時需盡量控制背景雜音所產生的雜訊或者紀錄噪音發生之時間點，方能擷取到有效的音洩訊號。

在美國規範 ASTM E1930-97 中，此標準測試方法針對新製地面上儲槽與操作中儲槽提供一份檢測指引。此測試方法主要用來檢測受壓後母材、銲道與脆化內襯所存在瑕疵之音洩訊號，包括母材內的裂紋、腐蝕、應力腐蝕裂、脫層、脆化與點蝕，銲道內的熔合不良、滲透不足、氣孔、介在物與夾渣。檢測範圍包括在傳感器所分佈圍成之範圍內，因此若要檢測底板，則須在底板架設傳感器以接收底板腐蝕音洩訊號。在此測試方法中也明定出施加負載與注入內容物高度之時程表，音洩訊號須在注入內容物高度超過 10% 方能開始收集訊號。此測試方法所施加的負載壓力需大於平日儲槽使用壓力，否則瑕疵難以在音洩檢測過程中釋放出音洩訊號，當有效的音洩檢測結果顯示出局部音洩訊號異常區，則應搭配其他可定量性之非破壞檢測技術來評估這些異常音洩訊號顯示區之嚴重性。

## 第二節 儲槽音洩檢測

利用音洩檢測儲槽時，主要目的為鑑別儲槽底板腐蝕嚴重程度，針對音洩訊號活性較高者定位出一個範圍，使後續追蹤檢查工作能更加有效地找出儲槽底板嚴重的部位，而音洩訊號在儲槽內可能由金屬板進行傳遞也可能由槽內容物路徑進行傳遞，本次實驗乃進行驗證音洩訊號傳遞路徑。實驗用儲存槽照片如圖 30 所示，其中儲存槽直徑為 600 mm、高為 800 mm 和厚度為 2 mm。本次實驗共有六種，皆以斷芯來產生訊號，斷芯試驗採用  $\phi$  0.3 mm、硬度為 2H 的鉛筆折斷作為聲源，鉛芯伸出長度約為 2.5mm，且與待測物表面夾角為

30°，距離傳感器 100 mm 處折斷。實驗一為校正傳感器 1 與 2 之靈敏度，利用傳感器 1 與傳感器 2 量測相同距離時之音洩訊號；實驗二為量測斷芯訊號在儲槽底板之波傳訊號，利用傳感器 1 與傳感器 2 量測不同位置時之音洩訊號；實驗三為量測斷芯訊號在儲槽底板與傳至壁板等兩路徑之波傳訊號差異；實驗四與實驗三架設相同，但儲槽內加入 6 成滿的水，探討儲槽內有內容物時與空桶之差異；實驗五，儲槽內加入 6 成滿的水，將四組傳感器沿儲槽壁板周向等間距安裝，定位斷芯訊號之位置所在；實驗六，將儲槽內 6 成滿的水完全卸載，四組傳感器沿儲槽壁板周向等間距安裝，探討在空桶狀況下，定位斷芯訊號之位置所在。



圖 30 音洩實驗儲槽

為了瞭解儲槽胴體上瑕疵產生之音洩訊號之波傳行為，乃先計算出蘭姆波在碳鋼平板上之頻散曲線圖，此曲線圖說明瞭在不同頻率-板厚積( $fd$ )下將會產生之波傳模態與各模態之波傳速度，如下圖 31 中所示，在未裝填任何液體的情況下，灰色框框區域為相對應之頻率-板厚積範圍，可能產生波速較快的  $S_0$  對稱模態與波速較慢的  $A_0$  非對稱模態，圖 32 為理論預測接收點距離激發點 200 mm 與 400 mm 時之波傳訊號。見理論訊號圖可見  $A_0$  模態頻散性較高，波傳一段距離後便會慢慢衰減掉，波包寬度也將慢慢變大。在裝填水至儲槽內時，如圖 33 灰色框框區域為其相對應之頻率-板厚積範圍，可能產生波速較快的  $S_0$  對稱模態、波速較慢的  $A_0$  非對稱模態以及接近水中聲速的 Scholte 模態，圖 34 為理論預測接收點距離激發點 200 mm 與 400 mm 時之波傳訊號。見理論訊號圖可見  $A_0$  模態與 Scholte 模態頻散性較高，波傳一段距離後便衰減掉，波包寬度也變得更寬。Scholte 模態將在儲槽底板與水的介面處傳遞並洩漏能量至水裡面，進而產生在水裡傳遞之音波，此音

波在水中的傳遞衰減較小於蘭姆波在鋼材裡傳遞之衰減，因此，在儲槽胴體/底板腐蝕音洩檢測上，大多接收與分析在液體中傳遞之音洩訊號。

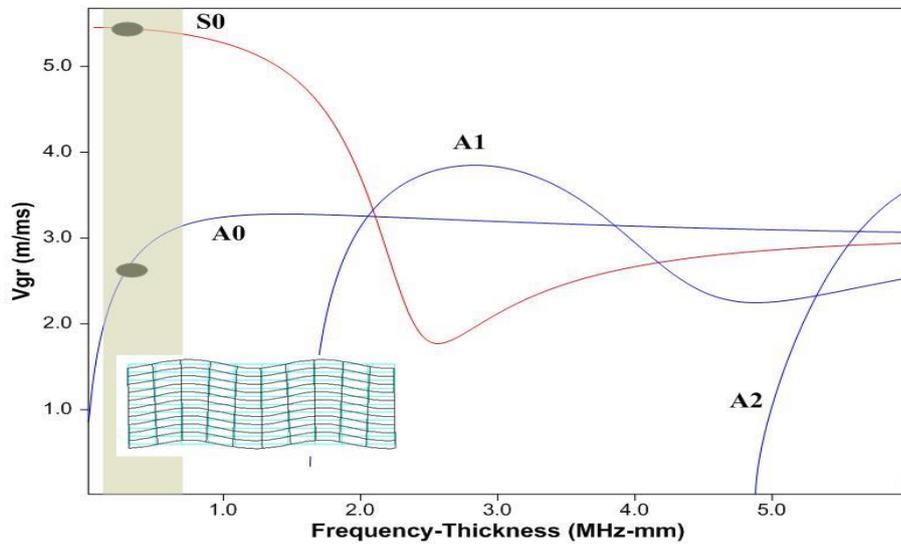


圖 31 鋼板蘭姆波頻散曲線圖

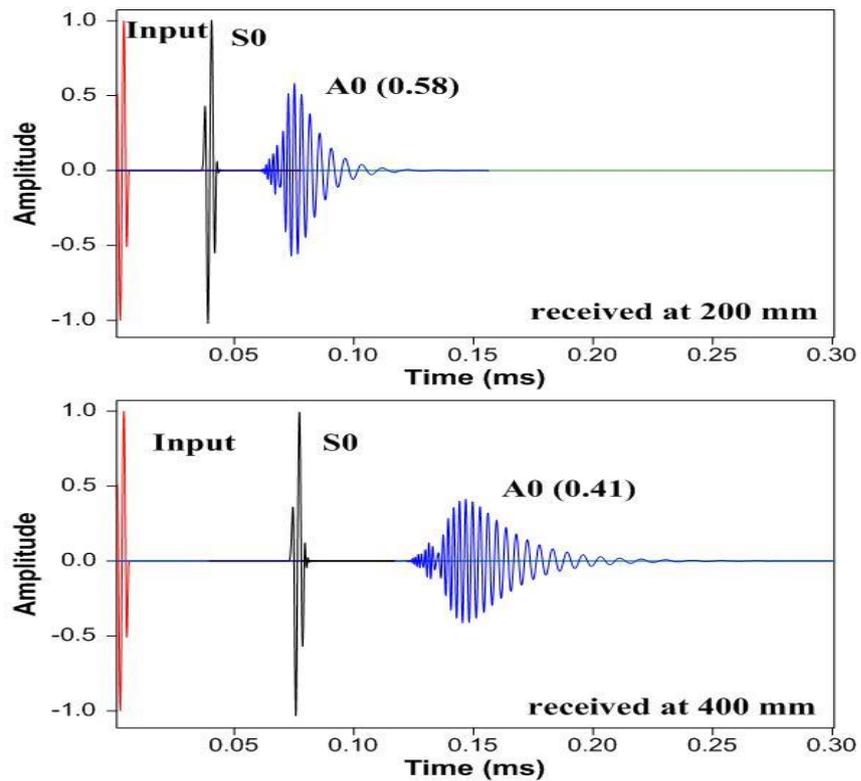


圖 32 鋼板蘭姆波訊號波傳理論解

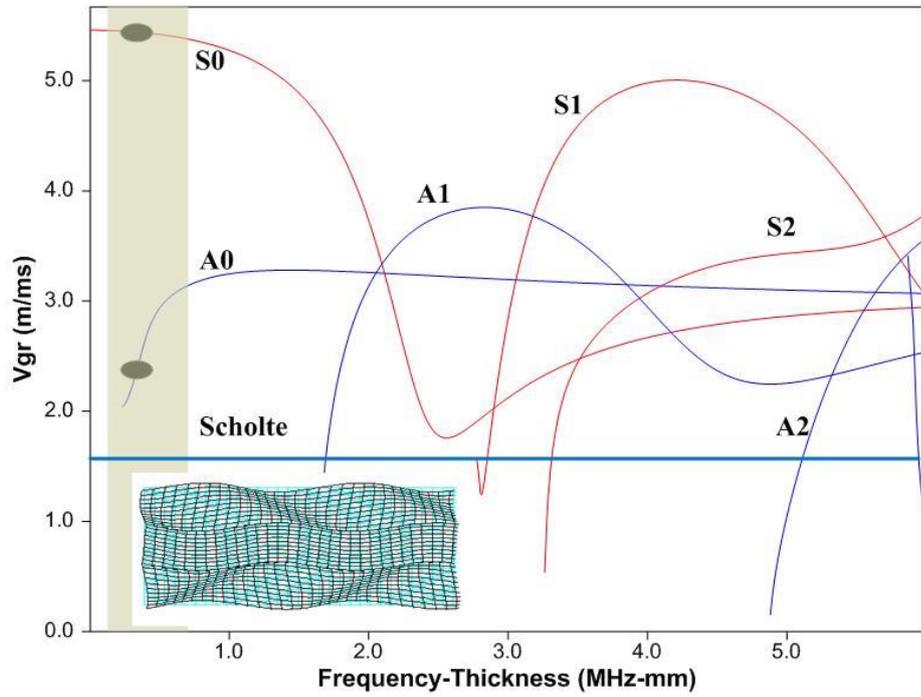


圖 33 水/鋼板蘭姆波頻散曲線圖

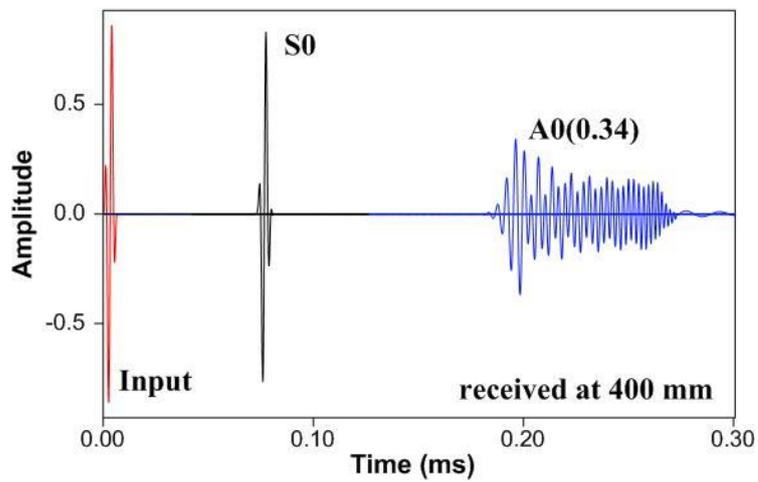
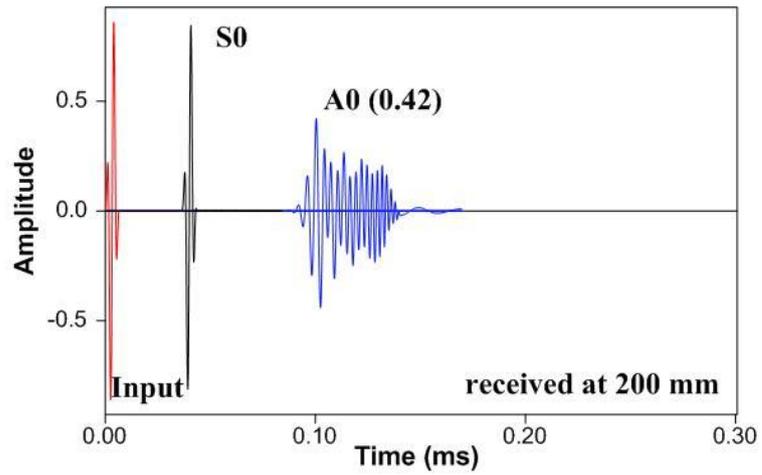


圖 34 水/鋼板蘭姆波訊號波傳理論解

## 一、實驗一：

為了校正傳感器 1 與 2 之靈敏度，斷芯點選在傳感器 1 與傳感器 2 之間，相距二傳感器位置皆距離 100 mm，如圖 35 所示，共採取 5 次斷芯動作，實驗一結果如圖 36 畫面中左下角小圖顯示二組傳感器在不同時間點接收訊號之振幅皆為 96~98 dB 之間，圖 36 畫面中右上角小圖顯示二組傳感器皆有接收到音洩訊號，放大圖 36 畫面中右下角音洩訊號時域訊號圖於圖 37 中，圖 37 中顯示傳感器所接收到之時域訊號圖也相差不大，因此乃以此二組傳感器繼續進行實驗二~六。

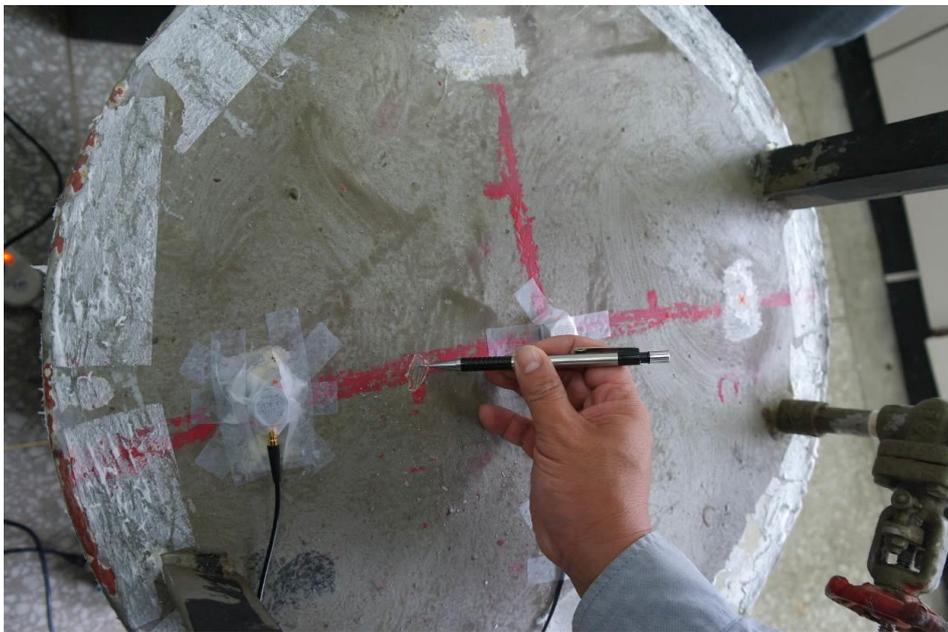


圖 35 實驗一傳感器架設

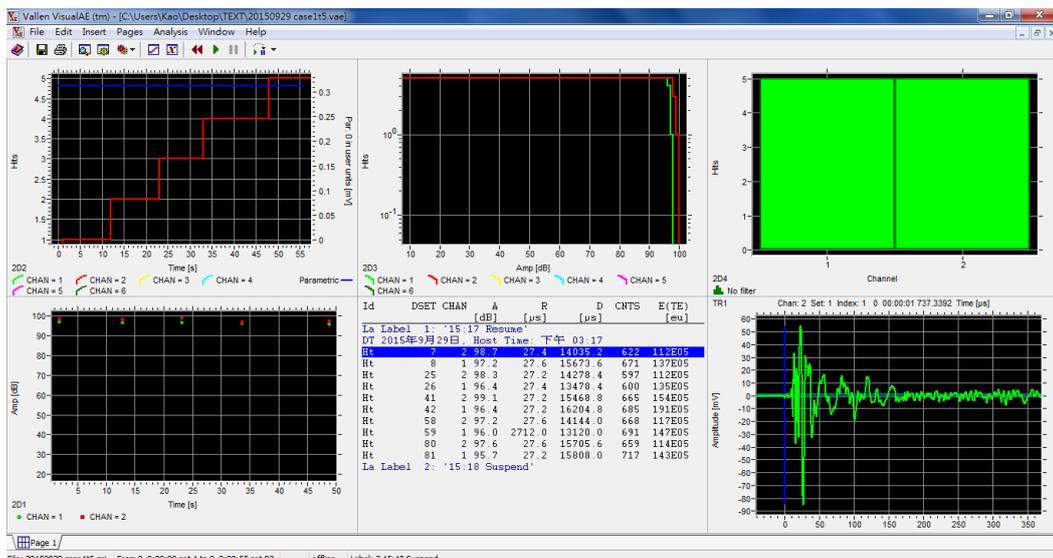


圖 36 實驗一，5 次斷芯訊號記錄

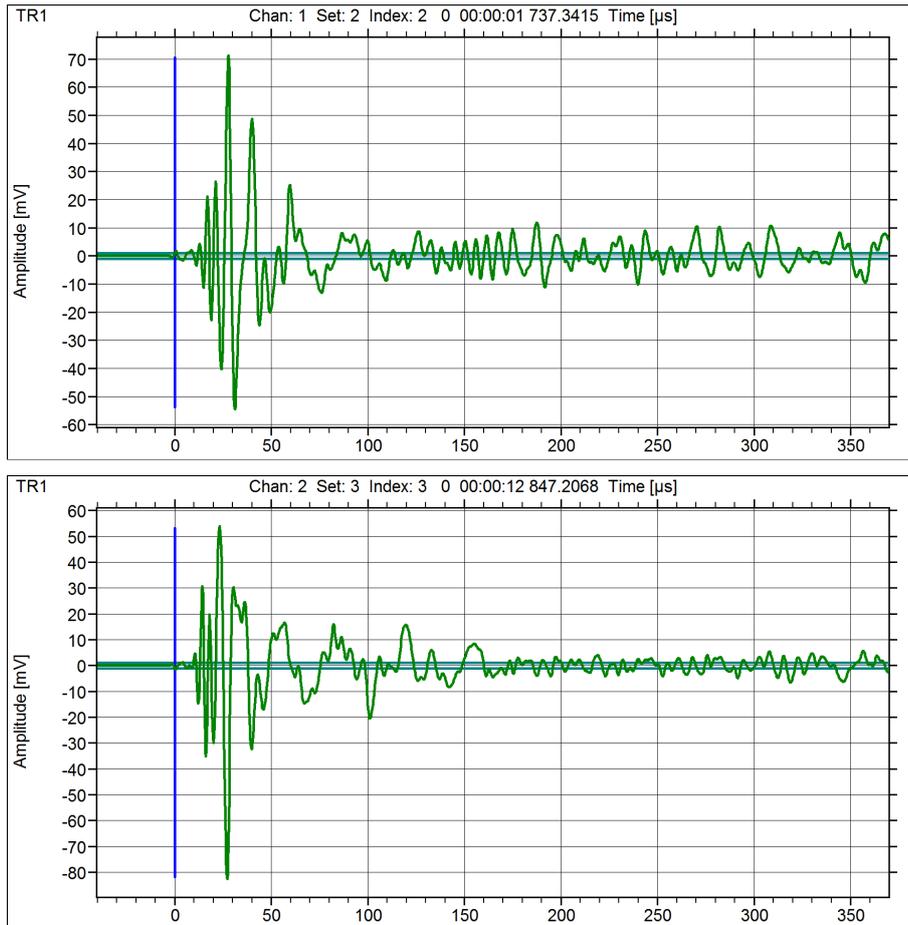


圖 37 實驗一，傳感器 1(上圖)與 2(下圖)接收訊號

## 二、實驗二：

為量測斷芯訊號在儲槽底板之波傳，利用傳感器 1 與傳感器 2 量測不同位置時之音洩訊號，斷芯點選在距離傳感器 1 為 200 mm、距離傳感器 2 為 400 mm，如圖 38 所示，共採取 5 次斷芯動作，實驗二結果如圖 39 畫面中顯示二組傳感器接收振幅差依序為 3.4 dB, 3.8 dB, 3 dB, 3.4 dB 與 3 dB，且圖 40 中顯示傳感器 2 所接收到之時域訊號較傳感器 1 延後出現，分析傳感器 1 與 2 在不同位置下接收同樣音洩聲源之訊號時間差可計算出音洩訊號在金屬板上傳遞之波速與傳遞時衰減程度。由 5 次實驗結果計算波速依序為 3795 m/s, 3764 m/s, 3787 m/s, 3752 m/s 與 3739 m/s，因此，實驗二結果顯示斷芯訊號在此底板上傳遞時衰減平均值為 16.6 dB/m，傳遞波速平均為 3767 m/s，應為非對稱平板蘭姆波 A0 之波速。



圖 38 實驗二傳感器架設

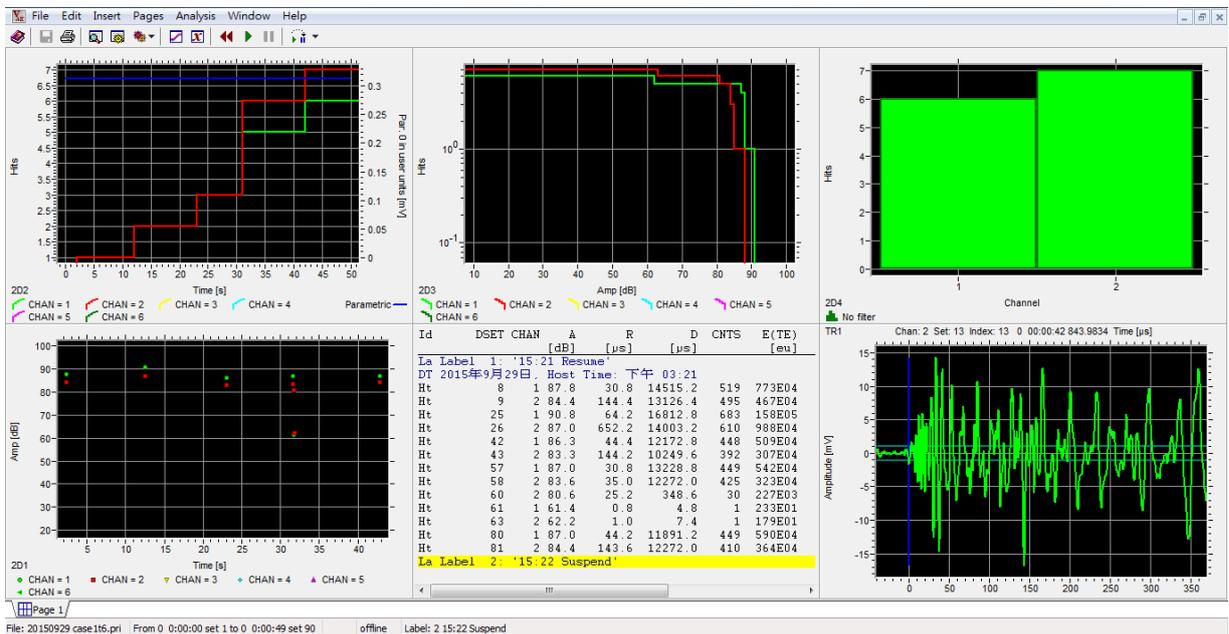


圖 39 實驗二，5 次斷芯訊號記錄

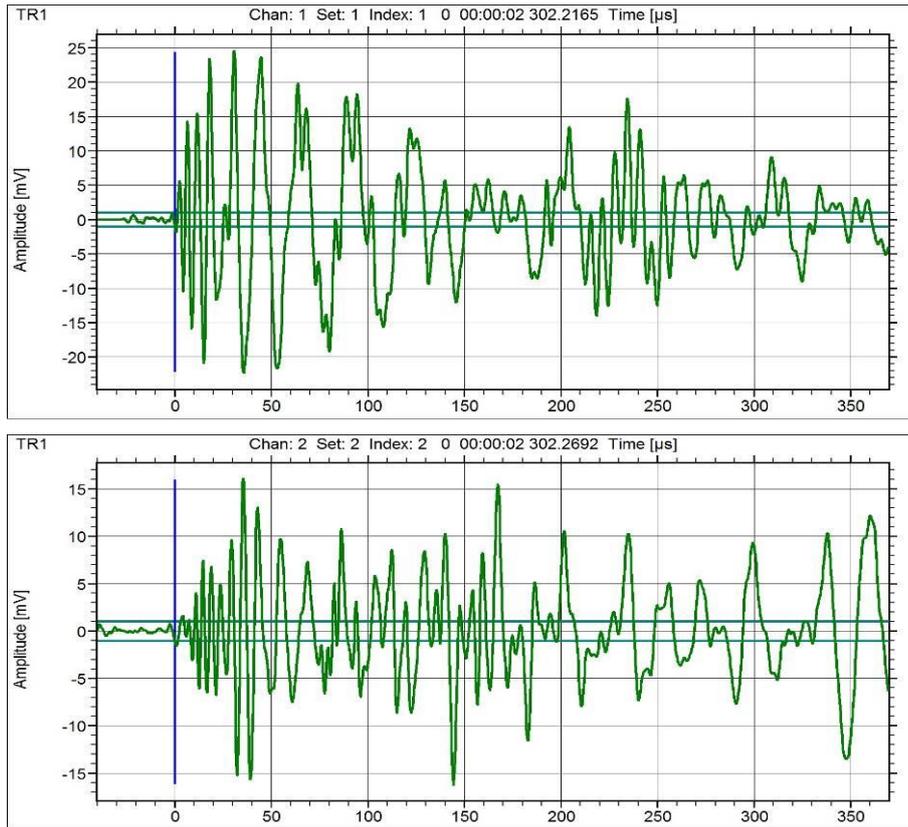


圖 40 實驗二，傳感器 1(上圖)與 2(下圖)接收訊號

### 三、實驗三：

為量測斷芯訊號在儲槽底板與傳至壁板等兩路徑之波傳訊號差異，斷芯點選在距離傳感器 1 與 2 皆為 400 mm，傳感器 1 安裝於壁板上，傳感器 2 則安裝於底板，如圖 41 所示，共採取 5 次斷芯動作，實驗三結果如圖 42 畫面中顯示二組傳感器接收振幅差依序為 4.9 dB, 3.4 dB, 4.2 dB, 4.5 dB 與 3.8 dB，二組傳感器所接收到之時域訊號圖與訊號頻譜圖於圖 43 中可見，圖 43 中顯示傳感器 1 所接收到之時域訊號波包較傳感器 2 之波包數來得少，且傳感器 1 所接受到之訊號頻譜以高於 100kHz 之訊號較為明顯，觀察此實驗結果，可由傳感器 2 之時域訊號圖看出，在底板傳遞時有主要的 A0 模態伴隨著少量的 S0 模態傳遞，而由傳感器 1 之時域訊號圖，在傳經底板與壁板轉折處時 S0 模態波式轉換至 A0 模態，而原先的 A0 模態也在少量的損失下傳遞至壁板，最後被傳感器 1 所接收，在這樣小型儲槽之底板，就算經過轉折角，蘭姆波仍可有效地進行傳遞。



圖 41 實驗三傳感器架設

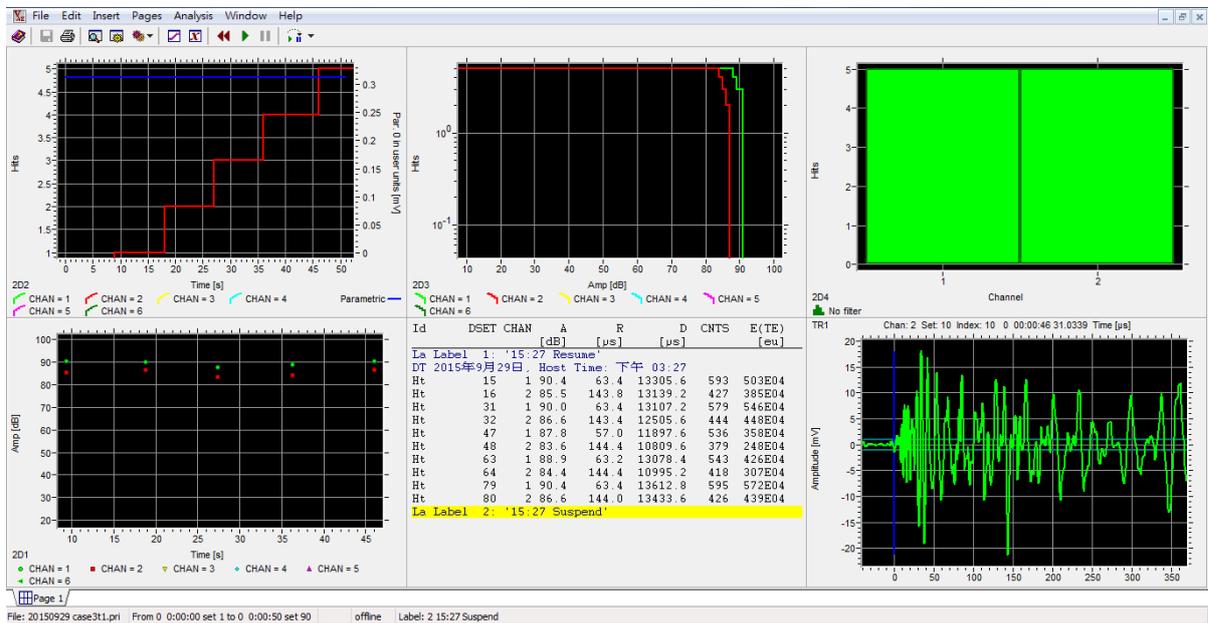


圖 42 實驗三，5 次斷芯訊號記錄

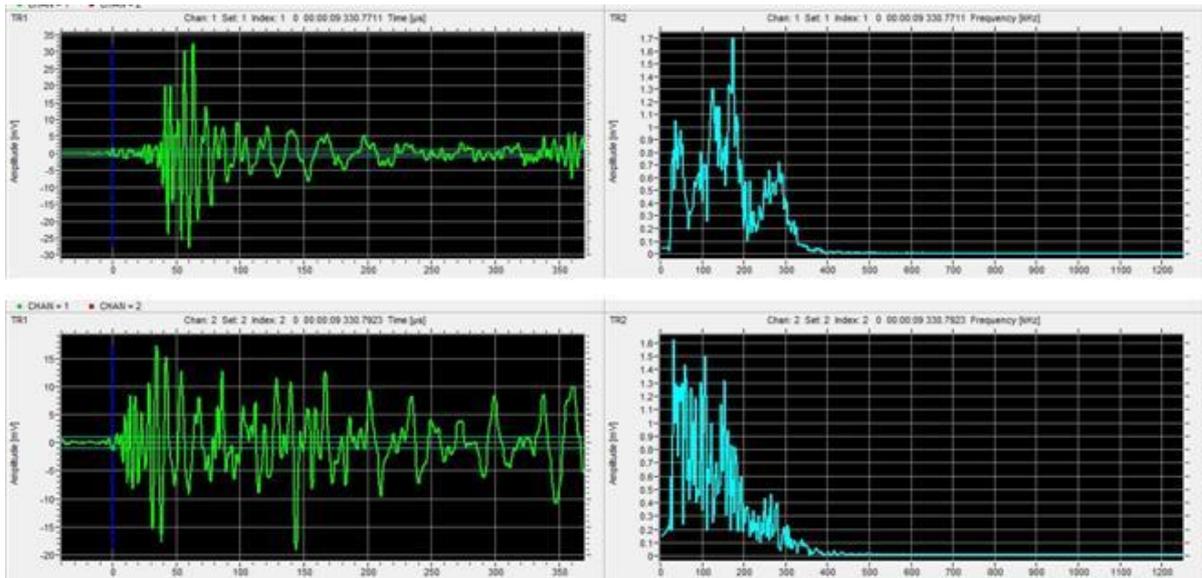


圖 43 實驗三，傳感器 1(上圖,壁板)與 2(下圖,底板)接收訊號

#### 四、實驗四：

與實驗三架設相同，但儲槽內加入 6 成滿的水，探討儲槽內有內容物時與空桶之差異，斷芯點選在距離傳感器 1 與 2 皆為 400 mm，傳感器 1 安裝於壁板上，傳感器 2 則安裝於底板，如圖 44 與圖 45 所示，共採取 5 次斷芯動作，實驗四結果如圖 46 畫面中顯示二組傳感器接收振幅差依序為 -3.8 dB, -4.0 dB, -7.5 dB, -9.4 dB 與 -5.7 dB，且圖 47 中顯示傳感器 1 所接收到之時域訊號波包較傳感器 2 之波包數來得少，觀察此實驗結果，可由傳感器 2 之時域訊號圖看出，在底板傳遞之蘭姆波因為水的加入而使得訊號大為衰減，而由傳感器 1 之時域訊號圖，觀察到底板傳遞之蘭姆波會有洩漏波發生於液體與固體之邊界，直接產生一道壓力波傳遞於水路，可直接到達壁板上之傳感器 1，最後被傳感器 1 所接收，進一步比較圖 48 中傳感器 1 在實驗三與實驗四之量測結果，有水的存在時訊號振幅僅剩 65~71 dB，沒有水的存在時，訊號振幅則有 87~90dB。因此，當儲槽內有液體存在時，平板傳遞之蘭姆波會產生洩漏波，使得在金屬上傳遞之能量大幅下降，洩漏波在水中會以壓力波方式傳遞至壁板傳感器，因此波速的輸入應以液體中傳遞之壓力波波速為主。



圖 44 實驗四傳感器架設



圖 45 實驗四，灌水入儲槽

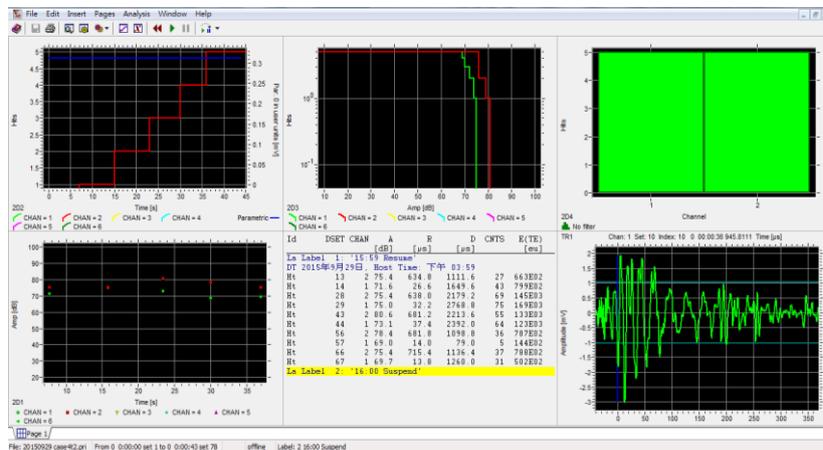


圖 46 實驗四，5 次斷芯訊號記錄

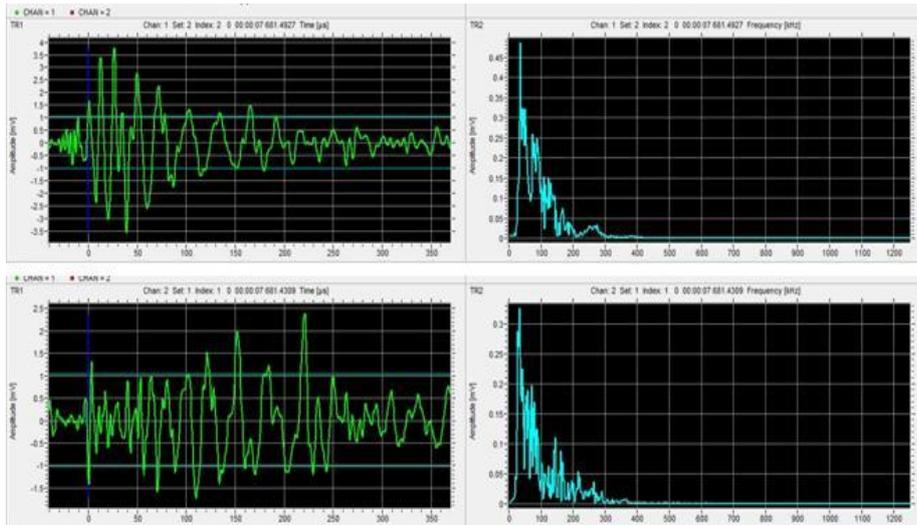


圖 47 實驗四，傳感器 1(上圖,壁板)與 2(下圖,底板)接收訊號

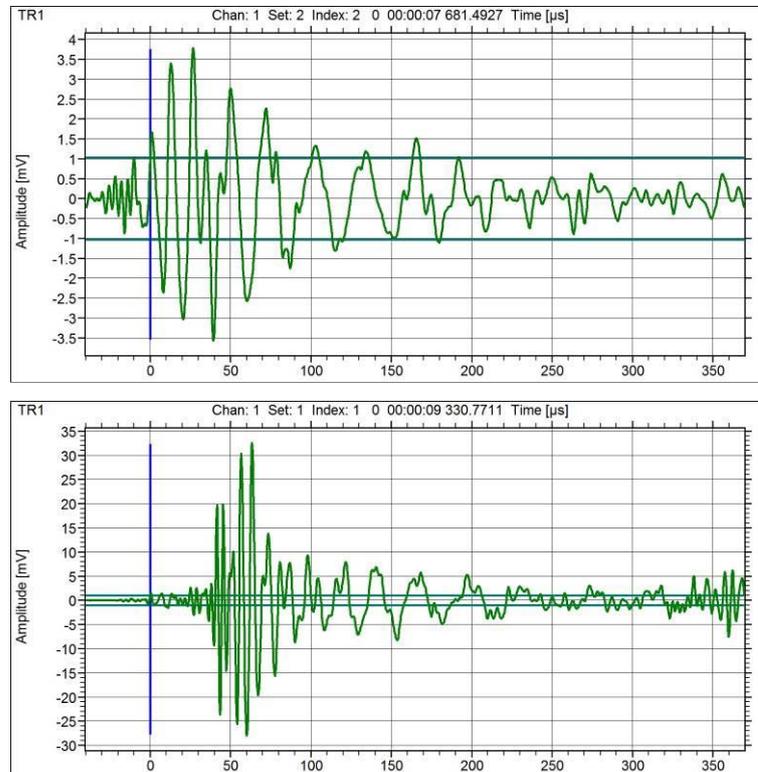


圖 48 實驗四傳感器 1(上圖,壁板)與實驗三傳感器 1(下圖,壁板)接收訊號

## 五、實驗五：

儲槽內加入 6 成滿的水，將四組傳感器沿儲槽壁板周向等間距(500 mm)安裝，定位斷芯訊號之位置所在，如圖 49 所示，共採取 5 次斷芯動作，斷芯點實際距離傳感器 1 之水準距離 X 為 115 mm，垂直距離 Z 為 150 mm，直線距離為 189 mm。實驗五結果如圖 50 畫面中顯示，考慮實驗四結果，定位設定波速採用縱波在水裡之波速 1500 m/s，可取得斷芯點定位圖 51，該定位圖顯示斷芯點

音洩訊號出現在靠近傳感器 1 之位置，5 組斷芯點音洩訊號位置(X,Y)分別為(208,24.7)、(210,23.6)、(211,27.3)、(209,25.0)與(219,5.1)，該定位點皆是由圖 52 中傳感器 1,2 與 4 所接收訊號共同定位而成，在此 X 位置定位結果 208~219mm 較接近直線距離 189mm，因此若要使得訊號 X 定位能與實際斷芯點 X 位置更接近，應將傳感器安裝位置向下移靠近底板處。



圖 49 實驗五傳感器架設

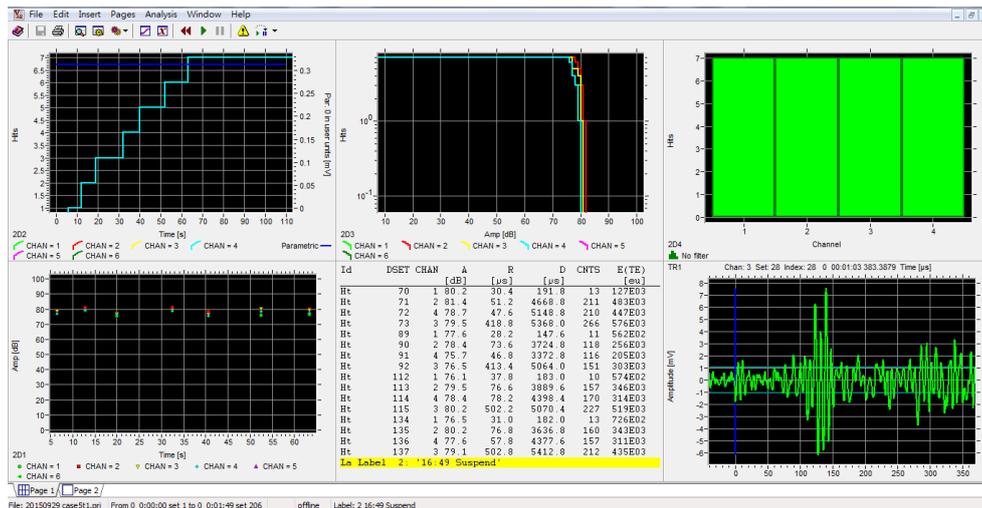


圖 50 實驗五，5 次斷芯訊號記錄

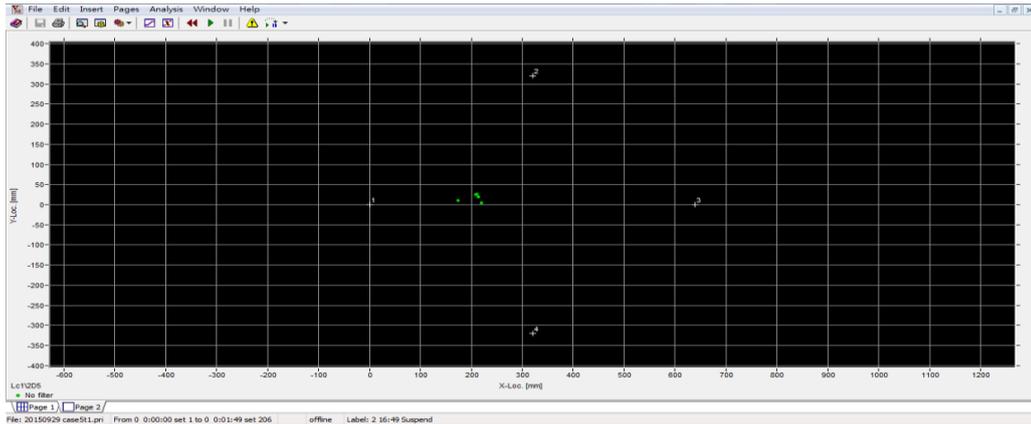


圖 51 實驗五，斷芯點音洩訊號定位圖

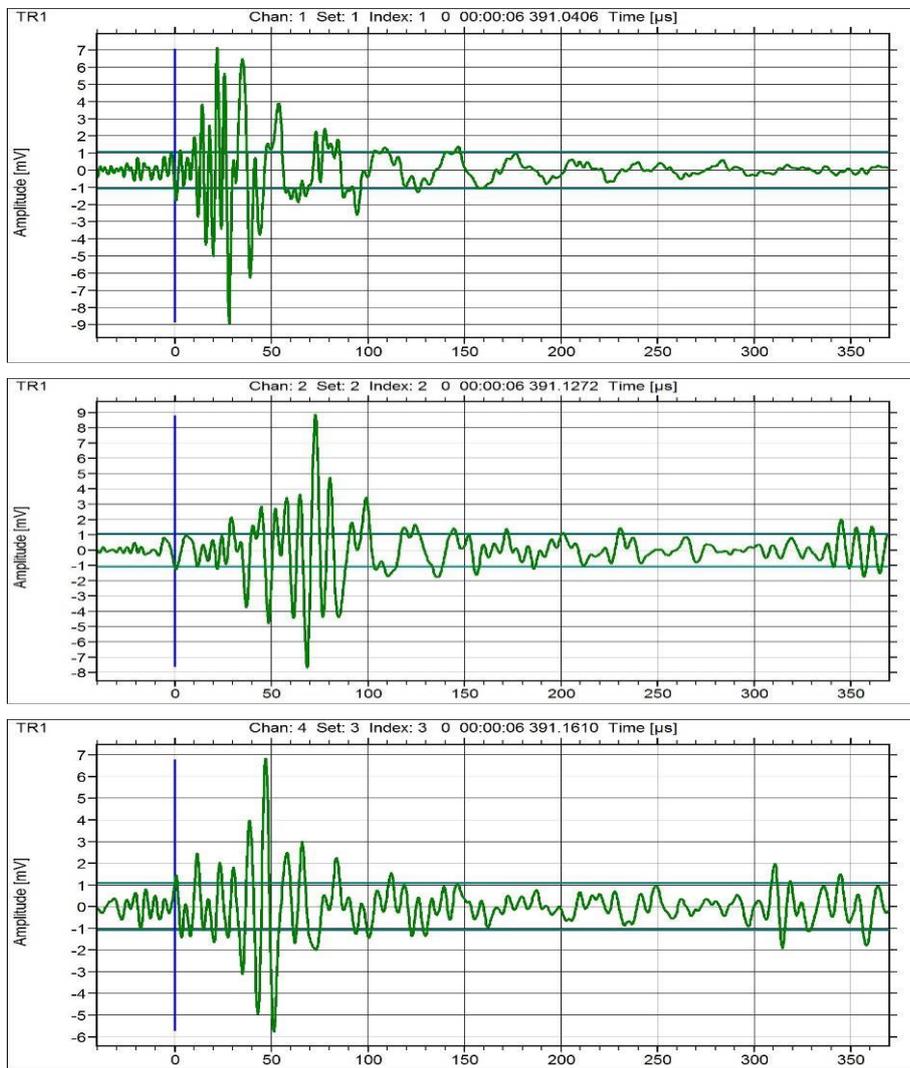


圖 52 實驗五，傳感器 1、2 與 4 接收訊號

## 六、實驗六：

將儲槽的水排空，將四組傳感器沿儲槽壁板周向等間距(500 mm)安裝，定斷芯訊號之位置所在，如圖 53 所示，共採取 5 次斷芯動作，斷芯點實際距離

傳感器 1 之水準距離 X 為 115 mm，垂直距離 Z 為 150 mm，直線距離為 189 mm。實驗六結果如圖 54 畫面中顯示，考慮實驗三結果，定位設定波速採用蘭姆波之波速 3750 m/s，可取得斷芯點定位圖 55，該定位圖顯示斷芯點音洩訊號出現在靠近傳感器 1 之位置，5 組斷芯點音洩訊號(X,Y)位置分別為(105,8.5)、(137,5.9)、(99,8.8.1)、(102,13.6)與(99.9,8.5)，該定位點皆是由圖 56 中傳感器 1,2 與 4 所接收訊號共同定位而成。



圖 53 實驗六，將水排空，傳感器架設同實驗五

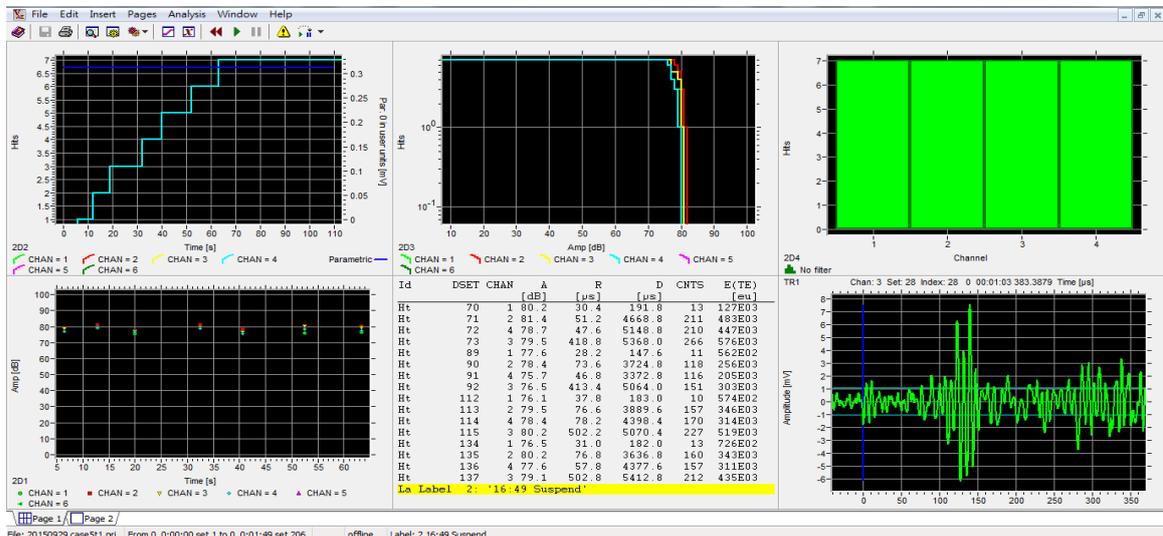


圖 54 實驗六，5 次斷芯訊號記錄

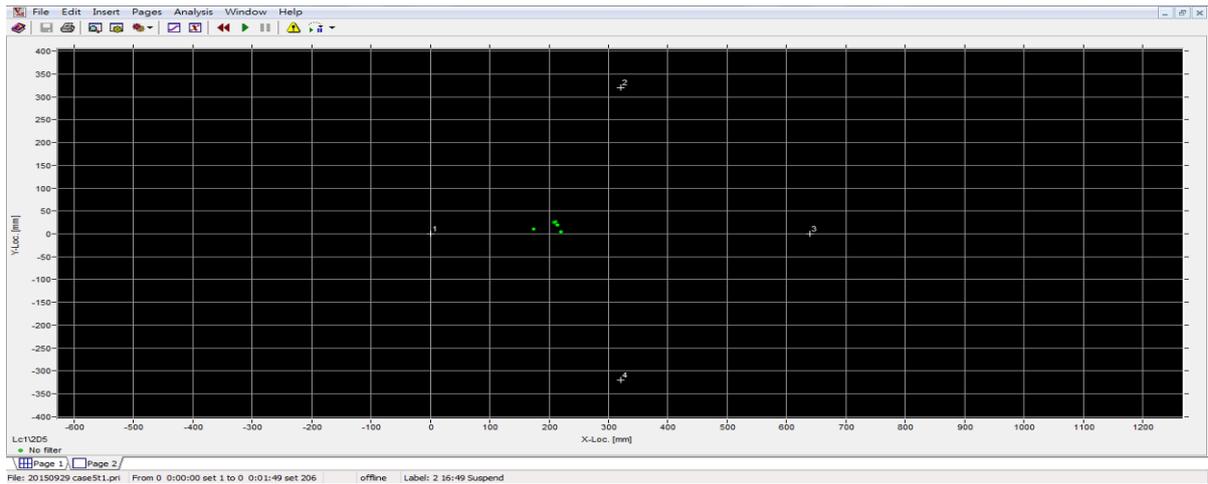


圖 55 實驗六，斷芯點音洩訊號定位圖

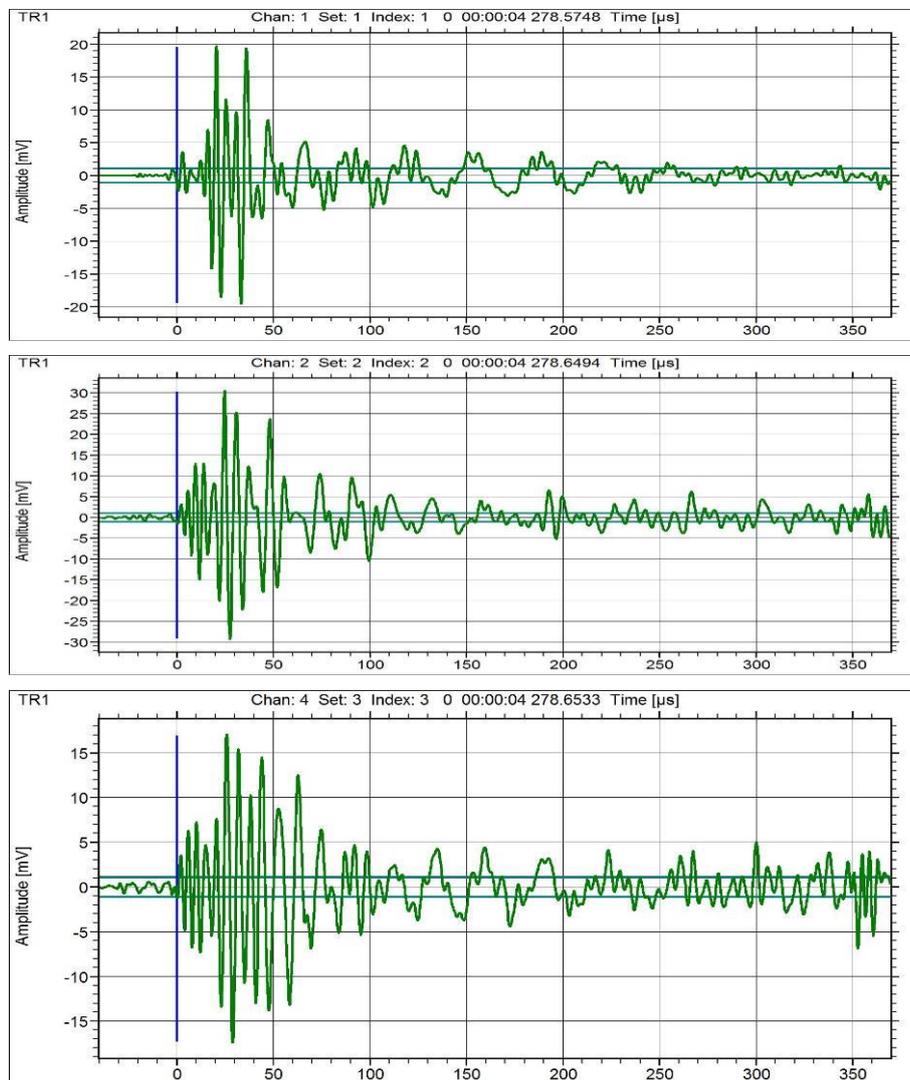


圖 56 實驗六，傳感器 1、2 與 4 接收訊號

## 第五章 高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗

### 第一節 凱瑟效應與費利西蒂效應

材料承受負載歷史對重複加載的音洩特性有著相當重要的影響，重複加載到達原先所加最大負載之前不產生明顯的音洩訊號，這種音洩不可逆現象稱為凱瑟效應(Kaiser effect)。Kaiser 觀察到銅、鋅、鋁、鉛、錫、黃銅、鑄鐵和鋼等多數金屬材料與岩石在形變過程中都會產生音洩現象，且都可觀察到明顯的凱瑟效應，但是重複加載前，如產生新的裂紋或其他可逆音洩機制，則將違反凱瑟效應。凱瑟效應在音洩檢測技術中有著重要用途，包括(1)使用中構件產生新的裂紋的定期過載音洩檢測，(2)岩石本體所受最大應力的評定，(3)疲勞裂紋起始與開裂之音洩檢測，(4)加載過程中常見的可逆性摩擦雜訊的鑑別。

材料重複加載時，重複加載到達原先所加最大負載之前即產生明顯之音洩訊號現象稱為費利西蒂效應，也可以稱為反凱瑟效應，如圖 57 所示，重複加載時的音洩訊號起始負載( $P_{AE}$ )與原先所加最大負載( $P_{max}$ )之比值，稱為費利西蒂比。以費利西蒂比作為一種定量參數，可清楚地反應出材料中原先所受損傷或結構瑕疵的嚴重程度，已成為瑕疵嚴重性的重要評判依據。費利西蒂比大於 1 時表示凱瑟效應成立，如圖 58 中該加載行程中之費利西蒂比值 FR 為 1.37，若比值小於 1 時則表示不成立，在一些複合材料構件中，將費利西蒂比小於 0.95 作為音洩訊號源超標之依據。

製作壓力容器中常見材料高強度鋼 SM490，當材料受到反覆加載作用下，當負載力低於降伏點應力時，音洩訊號的產生都遵守凱瑟效應，當負載力接近降伏點應力時，費利西蒂效應將使得音洩訊號在低於前次負載時便會產生，如圖 59 所示，過了上、下降伏點後音洩訊號將隨著應變率的增加而下降，隨著應變繼續增加，將會持續產生能量不高的音洩訊號，此區域為材料加工硬化區，最終當材料發生斷裂也會伴隨產生高能量的音洩訊號，為突發型訊號。

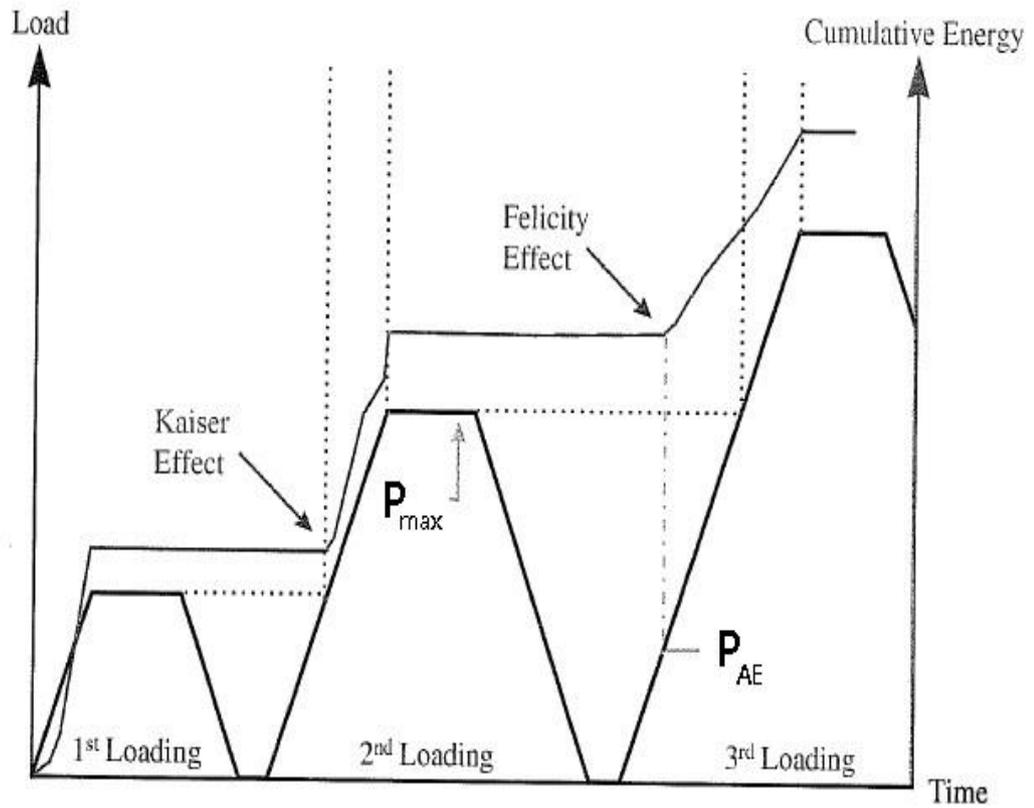


圖 57 凱瑟效應與費利西蒂效應

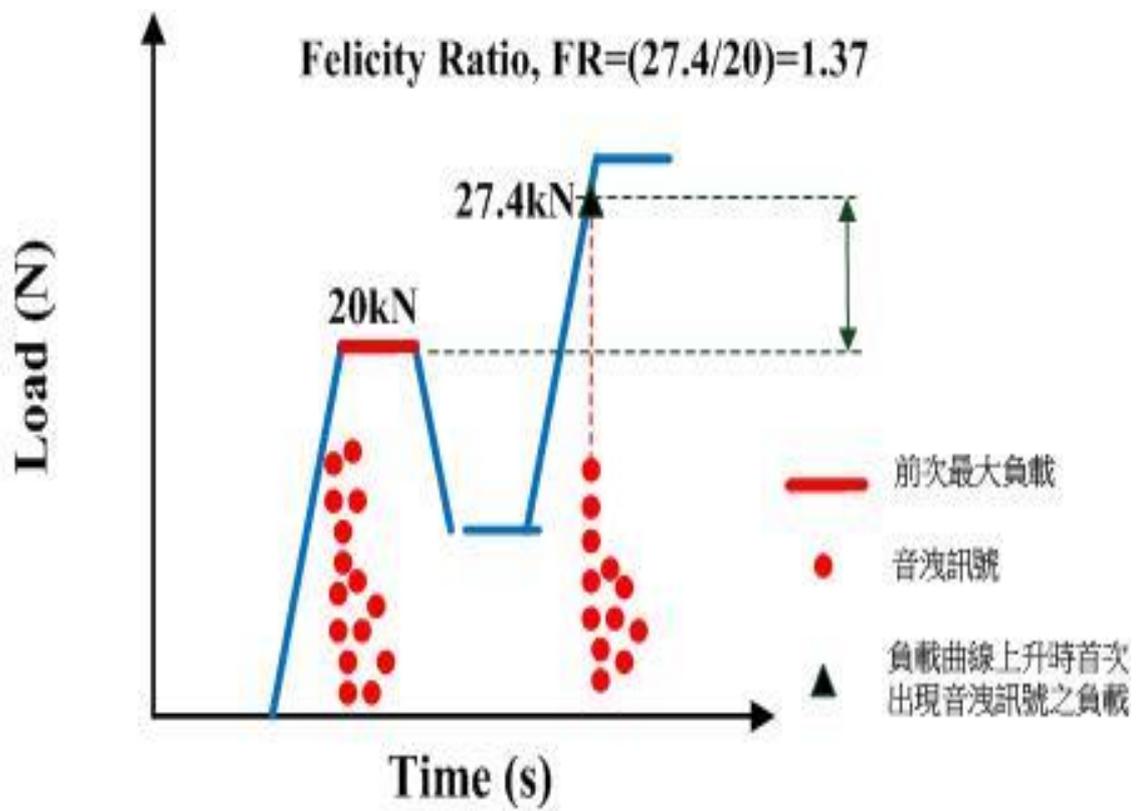


圖 58 費利西蒂比值計算示意圖

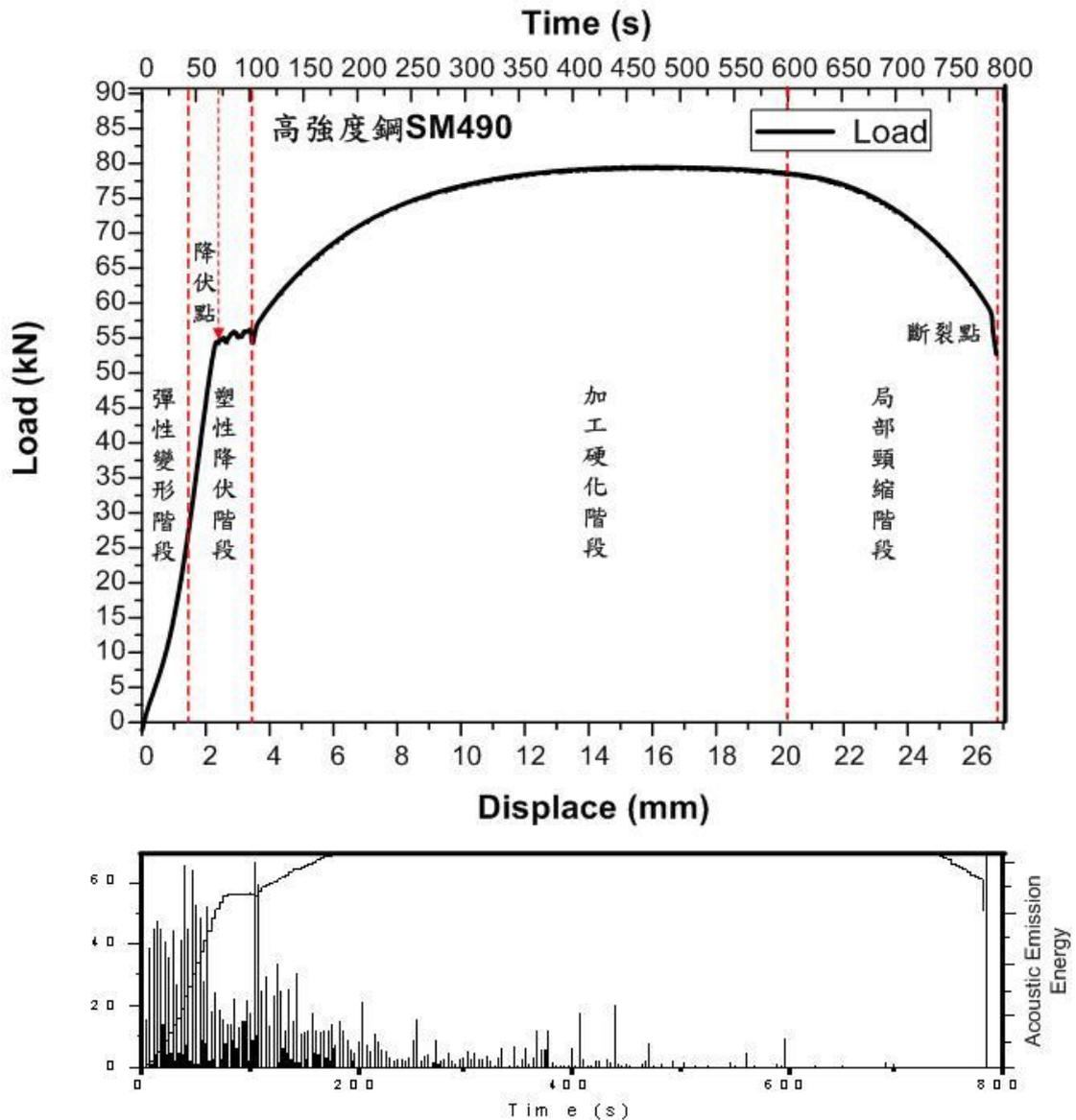


圖 59 壓力容器常用高強度鋼 SM490 拉伸曲線與音洩訊號特徵

## 第二節 高強度鋼材及銲接試片準備

為了瞭解音洩原理中費利西蒂效應在往復作用的負載應力下，能否有助於受測設備之評估，乃準備了三組試片分別為 P1 母材試片、P2 縱向銲接試片與 P3 橫向銲接試片，如圖 60 所示，試片準備過程中，在進行拉伸試驗之前乃以 X 光射線照相進行銲道 RT 檢測，以瞭解縱向銲道與橫向銲道內部是否有瑕疵的存在，圖 61 為 X 光之射源設備，RT 結果乃以底片方式呈現，由圖 62 中可見試片 P2 具有嚴重的銲接滲透不足瑕疵顯示，由圖 63 中可見試片 P3 具有局部的銲接滲透不足瑕疵顯示。

再者，為了瞭解壓力容器常用材料鋼材其音洩訊號之特性，乃選用材質高強度鋼

SM490A 作為實驗試片，採用試片厚度為 10 mm 因此其降伏點為 325 N/mm<sup>2</sup>，4 組試片；為了進一步比較，也選用材質 S400 碳鋼製作相同尺寸與形狀的 4 組試片，用以比較與進一步了解不同強度材料其音洩訊號特性之不同，如圖 64，針對此兩種材料試片，在材料試驗機上乃進行靜態拉伸試驗，直到試片斷裂為止，其目的在於了解此兩種壓力容器與起重設備常用之鋼材，分別在彈性區與塑性變形區時強度高音洩訊號之平均振幅 dB 值與強度低音洩訊號之平均振幅 dB 值。



圖 60 費利西蒂效應實驗試片，P1 母材、P2 縱向銲接、P3 橫向銲接



圖 61 費利西蒂效應實驗試片：銲道 RT 檢測

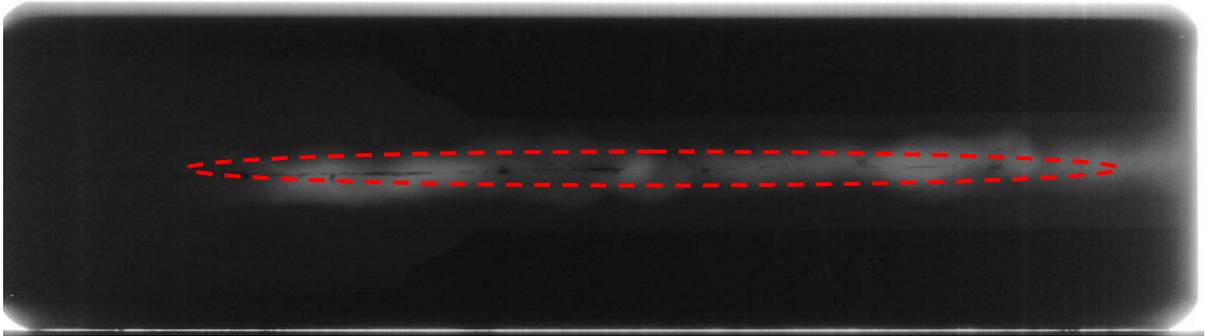


圖 62 縱向銲道試片 P2 銲道 RT 檢測：多處滲透不足

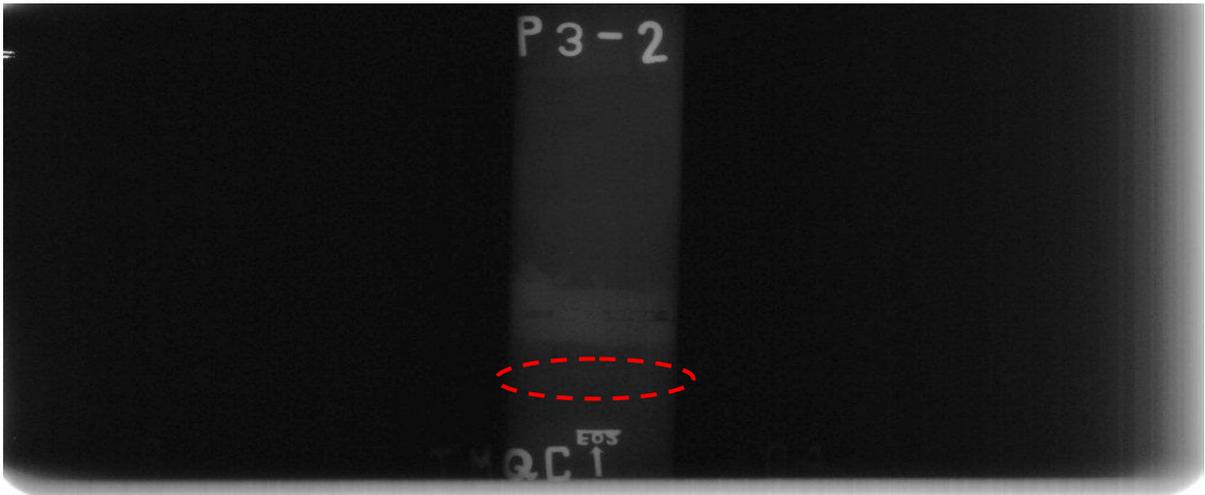
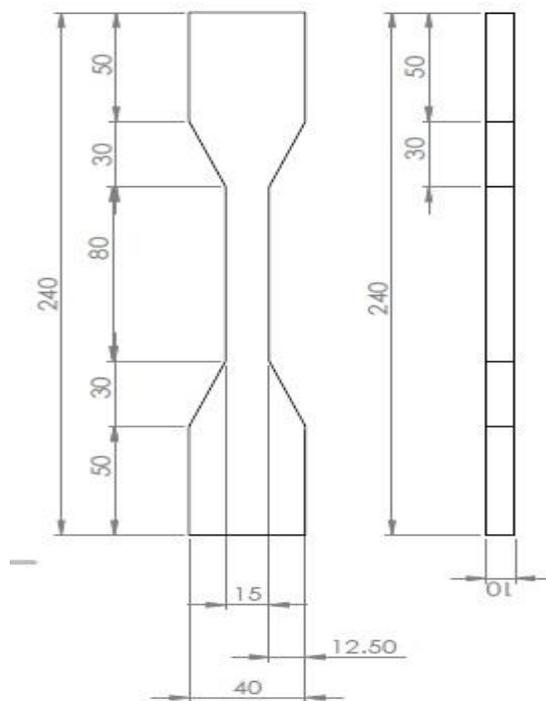


圖 63 橫向銲道試片 P3 銲道 RT 檢測：局部滲透不足





碳鋼S400靜態拉力試驗試片

高強度鋼SM490靜態拉力試驗試片

圖 64 高強度鋼 SM490 母材試片與碳鋼 S400 母材試片準備

### 第三節 高強度鋼材及費利西蒂銲接試片音洩實驗

費利西蒂效應實驗架設與設定：費利西蒂實驗架設如圖 65，乃將實驗試片架設於材料試驗機 MTS810 上，再將音洩檢測之二顆傳感器分別安裝於試片兩端，利用圖 66 中音洩檢測系統收集材料試驗機在拉伸過程中各組試片所產生之音洩訊號。針對費利西蒂試片 P1,P2 與 P3，拉伸程序乃進行動態拉伸如圖 67 中所示之負載行程，拉伸速率 20kN/60s、維持負載時間為 60 秒，分別在負載作用力為 20kN、30kN、40kN、50kN、60kN 與 70kN 時維持 60 秒，音洩訊號振幅門檻值設定為 72dB，目的乃為了瞭解母材試片與銲接試片在步階性負載作用時，不同時間點下費利西蒂比值(Felicity Ratio, FR)之變化圖，圖 68~圖 70 分別為費利西蒂實驗試片 P1,P2 與 P3 架設於材料試驗機上之照片，照片中可見音洩檢測用二顆傳感器之間距為 180 mm，負責收集拉伸過程中試片產生之音洩訊號。

高強度鋼靜態拉伸實驗架設與設定：針對高強度鋼 SM490 與一般碳鋼 S400 之試片進行靜態拉伸試驗，試片編號 490-1 與 400-1 拉伸速率設定為 1mm/min，直到試片斷裂為止，試片編號 490-2~490-4 與 400-2~400-4 拉伸速率設定為 2mm/min，直到試片斷裂為止，再進行拉伸實驗之前，傳感器乃以磁性座固定於試片上，兩傳感器間距為 100 mm，以斷芯試驗進行傳感器靈敏度校正以及音洩訊號在試片上傳遞之音速量測，斷芯試驗採用  $\phi$  0.3 mm、硬度為 2H 的鉛筆折斷作為聲源，鉛芯伸出長度約為 2.5mm，且與待測物表面夾角為

30°，距離傳感器 100 mm 處折斷。音洩訊號振幅門檻值設定為 35dB，當鉛筆芯在試片上一處斷裂時便會產生機械波進而產生音洩訊號，本次靈敏度校正斷芯位置載兩傳感器中央進行，如圖 71 所示，未校正前兩組傳感器耦合狀況使得兩傳感器靈敏度差異超過 3dB，校正後如圖 71 中二紅框顯示振幅值分別為 95 與 96dB，靈敏度已校正使得差異低於 3dB；量測音洩訊號在試片上傳遞之波速是為了能在兩傳感器間進行音洩聲源定位，如圖 72 為線性定位之示意圖，在已知斷芯點與兩傳感器之間距值，在兩傳感器接收到斷芯訊號後分析訊號時間差異後，當設定不同波速下，定位點也會偏移，直到定位點與實際斷芯位置相近時，便可測定到正確的波速，本次音洩訊號在試片上傳遞之波速為 5300m/s，進一步將接收訊號進行時域與頻率域之轉換，如圖 73 為傳感器 1 與 2 之頻譜分析，主要能量集中於 100kHz~200kHz 之間，此頻率範圍適用於壓力容器裂紋檢測上。

費利西蒂實驗結果：當材料試驗機進行步階式負載時，由圖 74~圖 76 可觀察到試片 P1、P2 與 P3 在負載上升過程分別在不同時間點上產生音洩訊號，在此六個行程中維持負載作用力為 20kN、30kN、40kN、50kN、60kN 與 70kN，試片受力截面積為 3cm<sup>2</sup>，圖 74~圖 76 縱軸紅色數字表示為相對應力值。在圖 74 中可見母材試片在此六個行程中費利西蒂比 FR 分別為 1.37、1.13、1.08、1.04、0.96；在圖 75 中可見縱向銲接試片在此六個行程中費利西蒂比 FR 分別為 1.25、1.16、0.92、0.85；在圖 76 中可見橫向銲接試片在此六個行程中費利西蒂比 FR 分別為 1.25、1.33、1.05、0.9、0.87。比較此三試片為同樣材質，P1 為母材試片、P2 為具嚴重滲透不足瑕疵之縱向銲接試片、P3 為局部滲透不足瑕疵之橫向銲接試片，經由往復式步階改變的負載作用下，音洩檢測結果顯示，在此六行程中，P2 試片在 40kN 轉 50kN 時 FR 便低於 0.95，P3 則是在 50kN 轉 60kN 時 FR 低於 0.95，P1 試片在此六行程中 FR 值並未低於 0.95，由此可見，當使用設備平時若固定遭遇往復式之負載時，如起重設備，費利西蒂效應在音洩檢測上可作為判斷是否有活性缺陷存在設備胴體或銲道上之分析方法。

靜態拉伸試驗實驗結果：當材料試驗機進行靜態拉伸時，拉伸速率設定為 1mm/min，直到試片斷裂為止，如圖 77 為斷裂點照片。靜態拉伸實驗高強度鋼 SM490 與碳鋼 S400 負載與時間關係圖如圖 78 所示，二種材料試片尺寸相同，最大負載分別為 80 kN 與 66.7kN 而降伏點負載值分別為 55kN 與 47kN，兩材料試片拉伸至斷裂時間相近。

實驗過程中二組傳感器接收拉伸過程中可能會發生之音洩訊號，將音洩訊號累加記數與負載歷程圖相比較，如圖 79 與圖 80，分別為 SM490 鋼材與 S400 鋼材之實驗結果。於圖 79 中，鋼材 SM490 訊號記數累加與負載圖相比較，A 點可觀察到發生費利西蒂效應，

也就是負載並未較前段負載高，但仍可見音洩訊號記數持續累加成長；B 點為達到最大負載值後，負載開始下降，音洩訊號也並未繼續增加一直到 C 點時，試片發生斷裂使得音洩訊號記數急遽累加；於圖 80 中，鋼材 SM400 訊號記數累加與負載圖相比較，D 點可觀察到發生費利西蒂效應，也就是負載並未較前段負載高，但仍可見音洩訊號記數持續累加成長；E 點為達到最大負載值後，負載開始下降，音洩訊號也並未繼續增加一直到 F 點時，試片發生斷裂使得音洩訊號記數急遽累加。比較圖 79 與圖 80 中的 A 點與 D 點，若要觀察高強度鋼 SM490 與碳鋼 S400 之音洩費利西蒂效應，SM490 在拉伸實驗過程中會較早發生。

高強度鋼SM490-1試片在拉伸實驗中，拉伸速率為1mm/1min，其負載時間曲線與音洩訊號振幅、能量關係圖，如圖 81所示，分析圖 81中能量分佈圖可見有高能量之音洩訊號在時間60s~125s之間出現，而在200s~250s之音洩訊號能量則較低，見圖 82中放大區間分佈圖，分別取這高能量區間與低能量區間音洩訊號振幅前5高者之振幅dB值，並記錄於表 5中，其平均值分別為高能量訊號振幅值為85.8dB與低能量訊號振幅值為77.6dB。碳鋼 S400-1試片其實驗拉伸速率也為1mm/1min，其負載時間曲線與音洩訊號振幅、能量關係圖，如圖 83與圖 84，其平均值分別為高能量訊號振幅值為86.6dB與低能量訊號振幅值為69dB。

將拉伸速率提高為2mm/min，實驗試片高強度鋼SM490與碳鋼S400分別進行各三組試片之音洩訊號擷取，圖 85~圖 96為各組試片之負載時間曲線與音洩訊號振幅、能量關係圖，前五大振幅值同時記錄於表 5，表中多組實驗下所得資料，將高能量與低能量訊號振幅值求得平均值，高強度SM490之高能量訊號振幅為86.1dB，低能量訊號振幅為74.3dB，碳鋼S400之高能量訊號振幅則略低一點為86.1dB，低能量訊號振幅為72dB，由本章節研究結果所示，此材料試驗所得之振幅值可做為檢測程序書中高強度鋼SM490與碳鋼S400音洩訊號強度之分級，採保守設定，建議音洩訊號若低於70dB者屬於低強度音洩訊號，介於70dB~85dB者為中強度訊號，大於85dB者則為高強度訊號。

表 5 高、低能量訊號振幅值整理表

試片 編號	高能量訊號振幅值(前五大) 單位：dB							低能量訊號振幅值(前五大) 單位：dB						
	分析期 間(s)	1st	2nd	3rd	4th	5th	avg	分析期間 (s)	1st	2nd	3rd	4th	5th	avg
490-1	60~125	95	86	86	81	81	85.8	200~250	80	79	77	77	75	77.6
490-2	20~70	88	85	83	81	81	83.6	70~100	77	75	74	72	71	73.8
490-3	35~55	89	86	86	85	84	86	70~100	71	70	72	70	69	70.4
490-4	100~400	94	93	89	85	84	89	70~100	77	77	76	75	73	75.6
	SM490鋼高能量訊號振幅平均值						86.1	SM490低能量訊號振幅平均值						74.3
400-1	55~130	91	91	87	83	81	86.6	130~190	73	69	68	68	67	69
400-2	30~60	92	85	84	83	82	85.2	70~100	82	74	71	70	70	73.4
400-3	30~60	87	86	83	83	83	84.4	70~100	78	76	76	74	74	75.6
400-4	20~75	93	87	83	83	82	85.6	70~100	73	73	68	68	68	70
	S400鋼高能量訊號振幅平均值						85.4	S400鋼低能量訊號振幅平均值						72



圖 65 材料拉伸試驗機操作情形

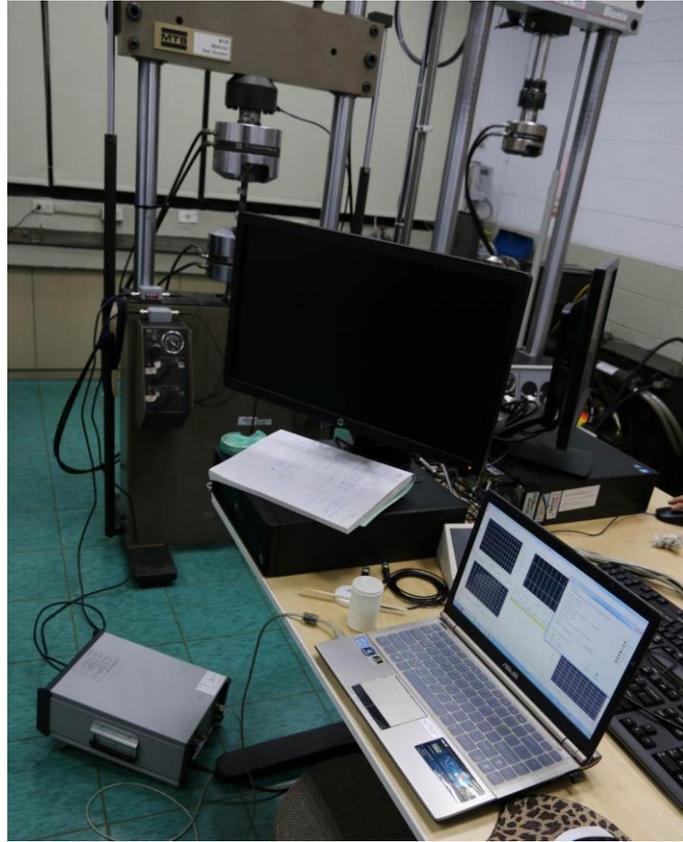


圖 66 拉伸試驗與音洩訊號量測架設

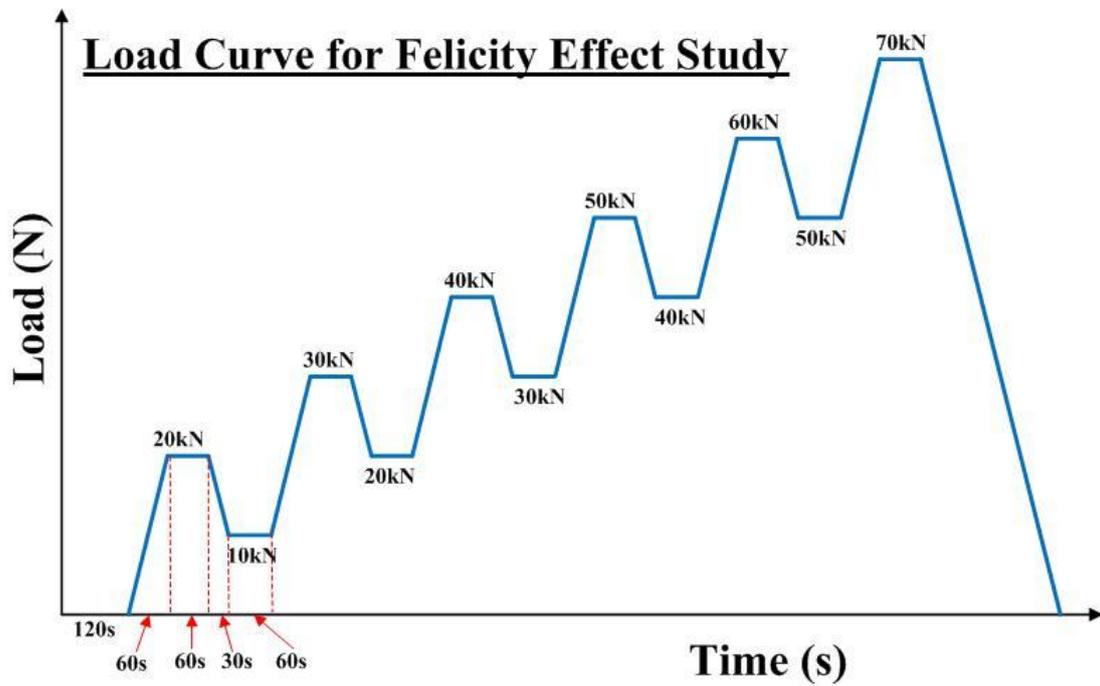


圖 67 費利西蒂效應試驗動態負載設計行程

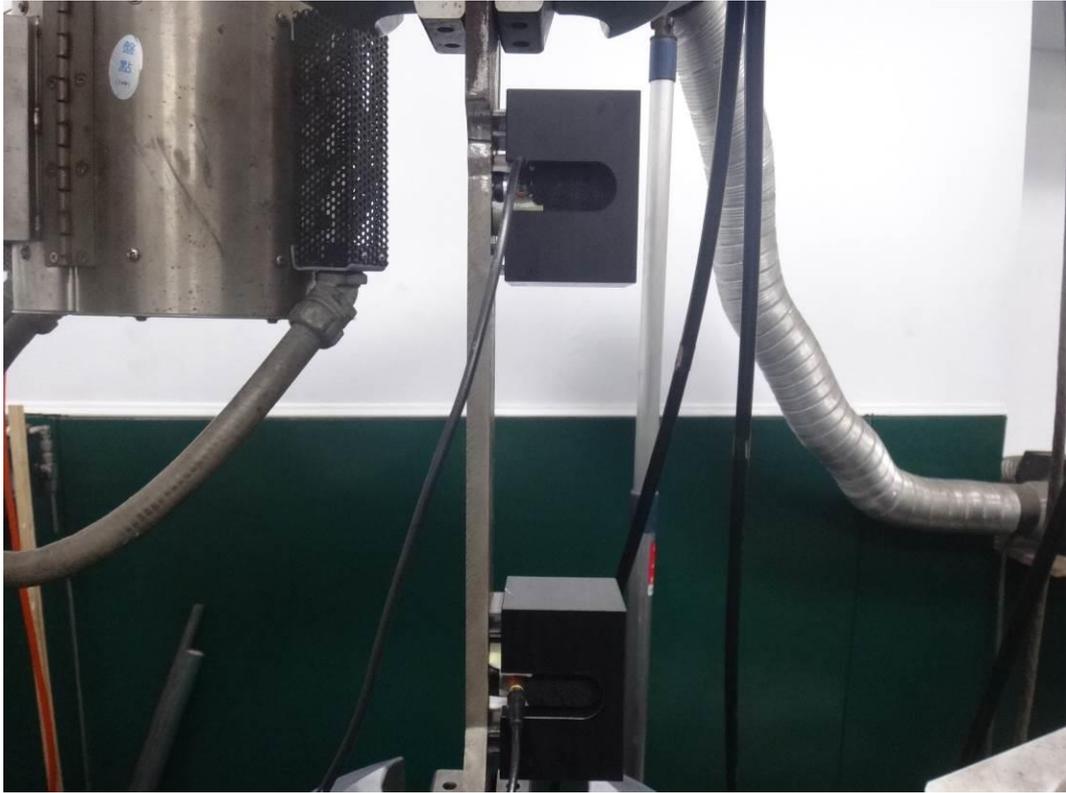


圖 68 母材試片 P1 拉伸試驗與音洩訊號量測



圖 69 縱向銲接試片 P2 拉伸試驗與音洩訊號量測

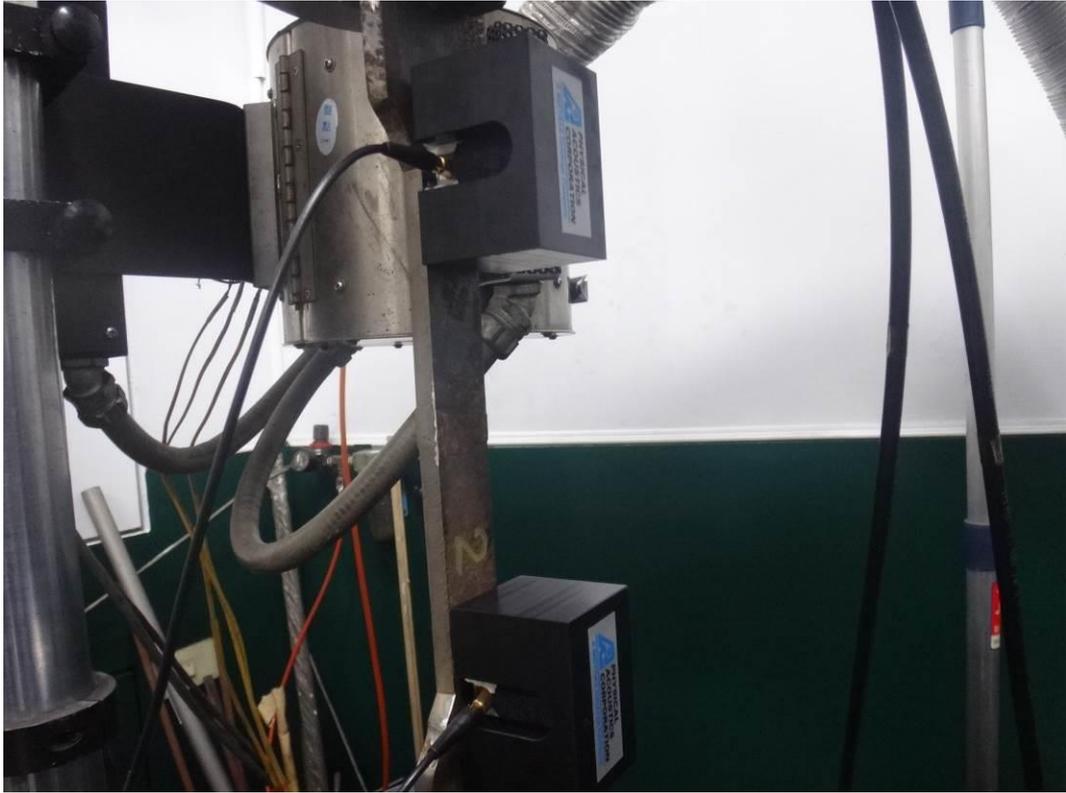


圖 70 橫向銲接試片 P3 拉伸試驗與音洩訊號量測



以磁座固定傳感器



兩傳感器間距100mm



斷芯試驗

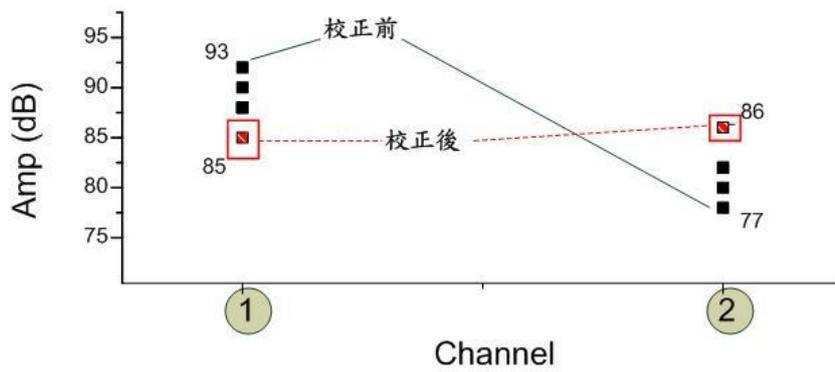


圖 71 傳感器斷芯試驗：靈敏度校正

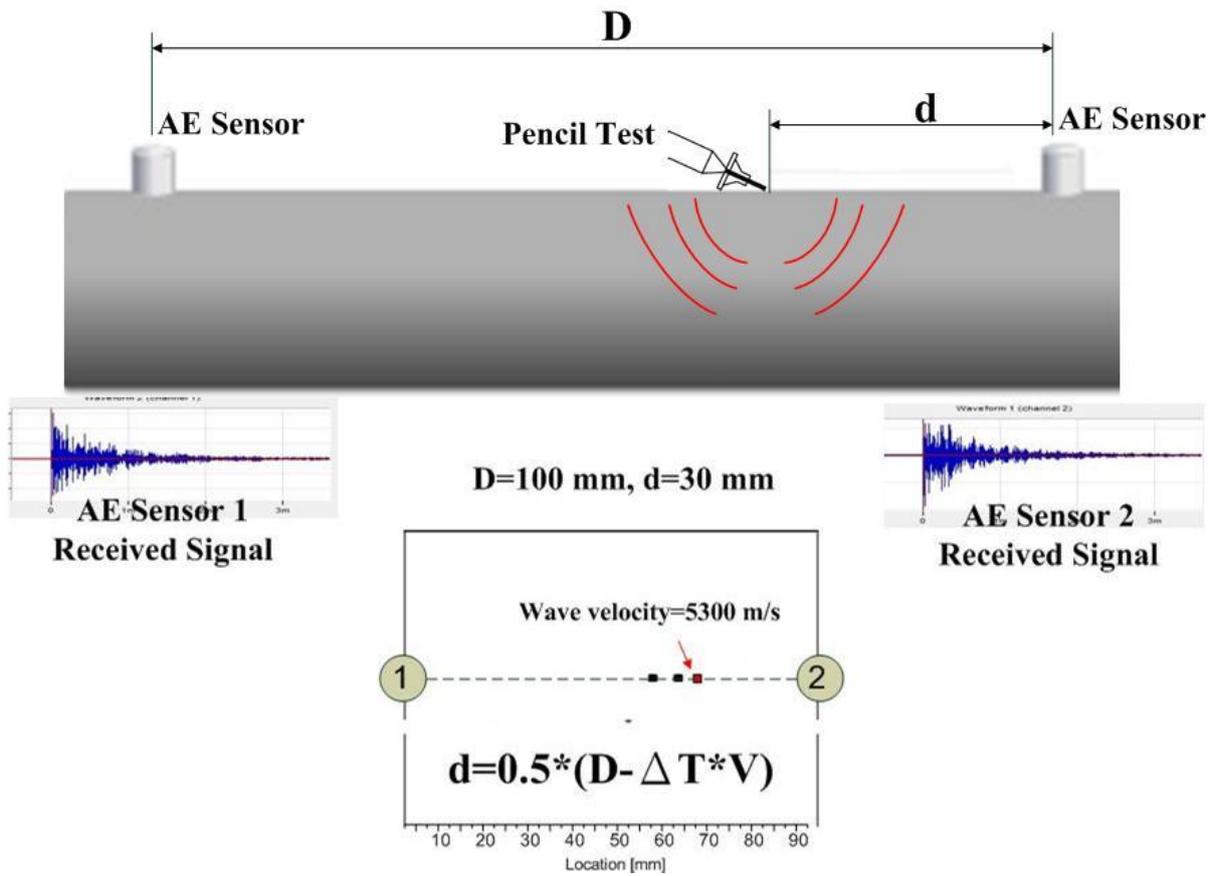


圖 72 傳感器斷芯試驗：波速校正

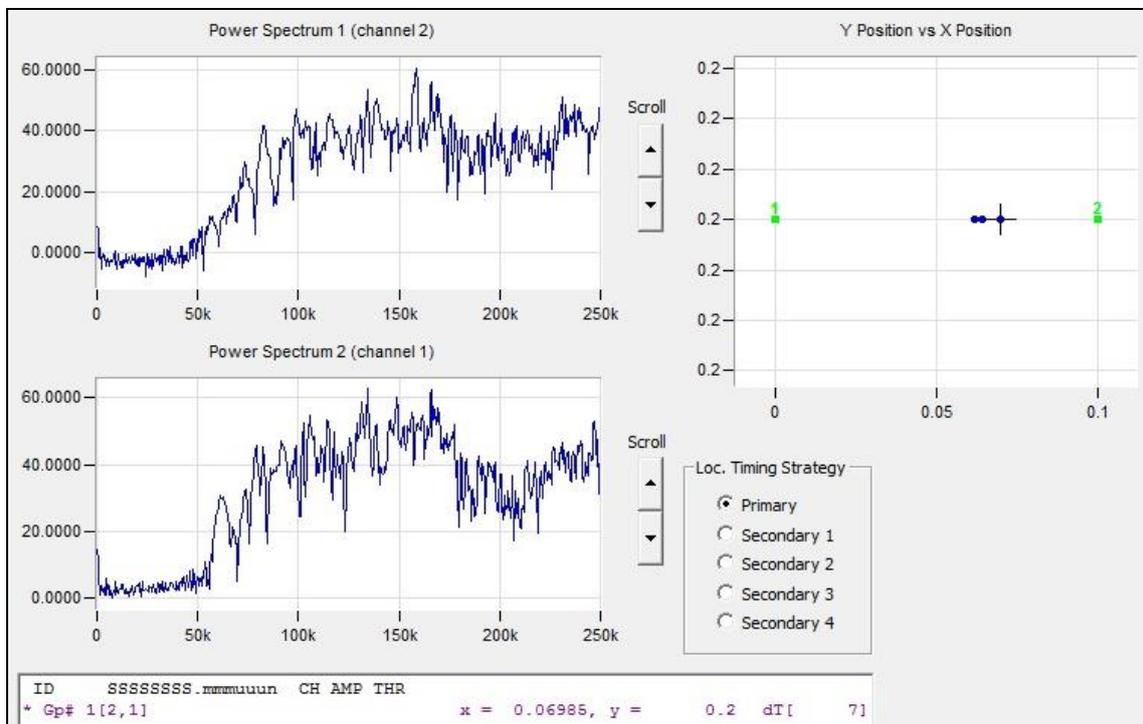


圖 73 傳感器訊號頻譜分析

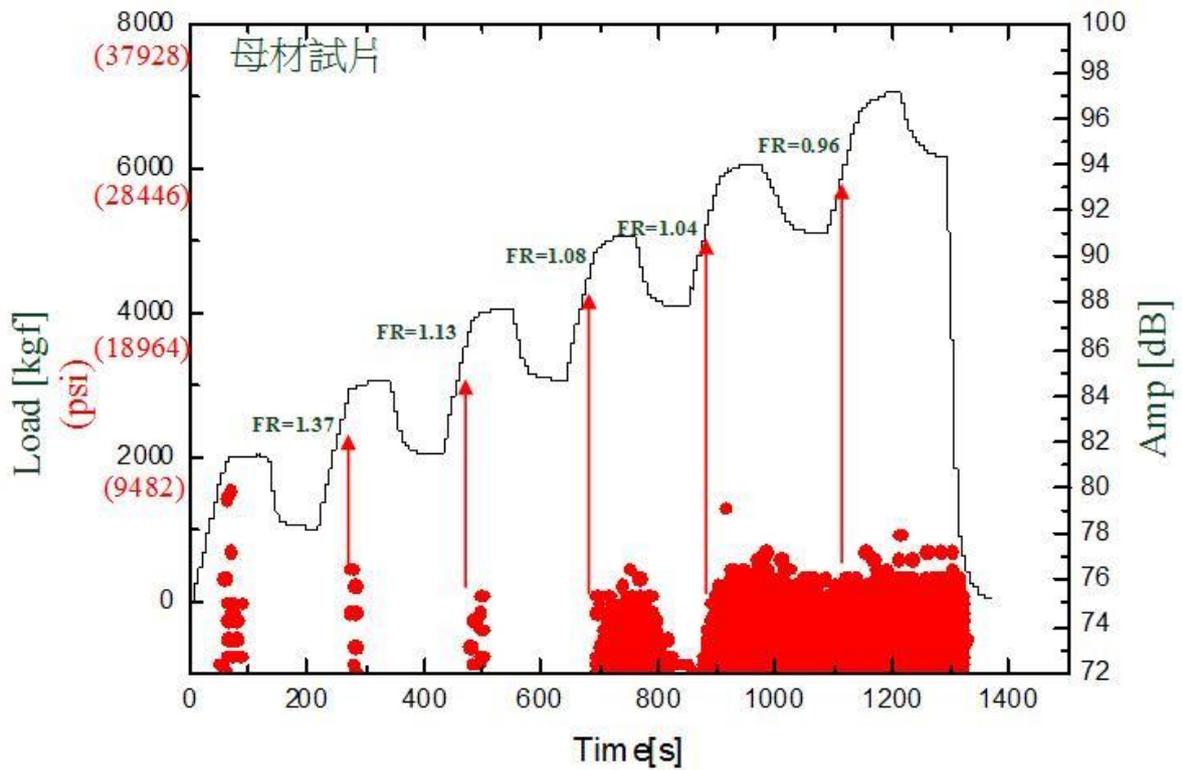


圖 74 母材試片 P1 負載與音洩訊號振幅相關圖

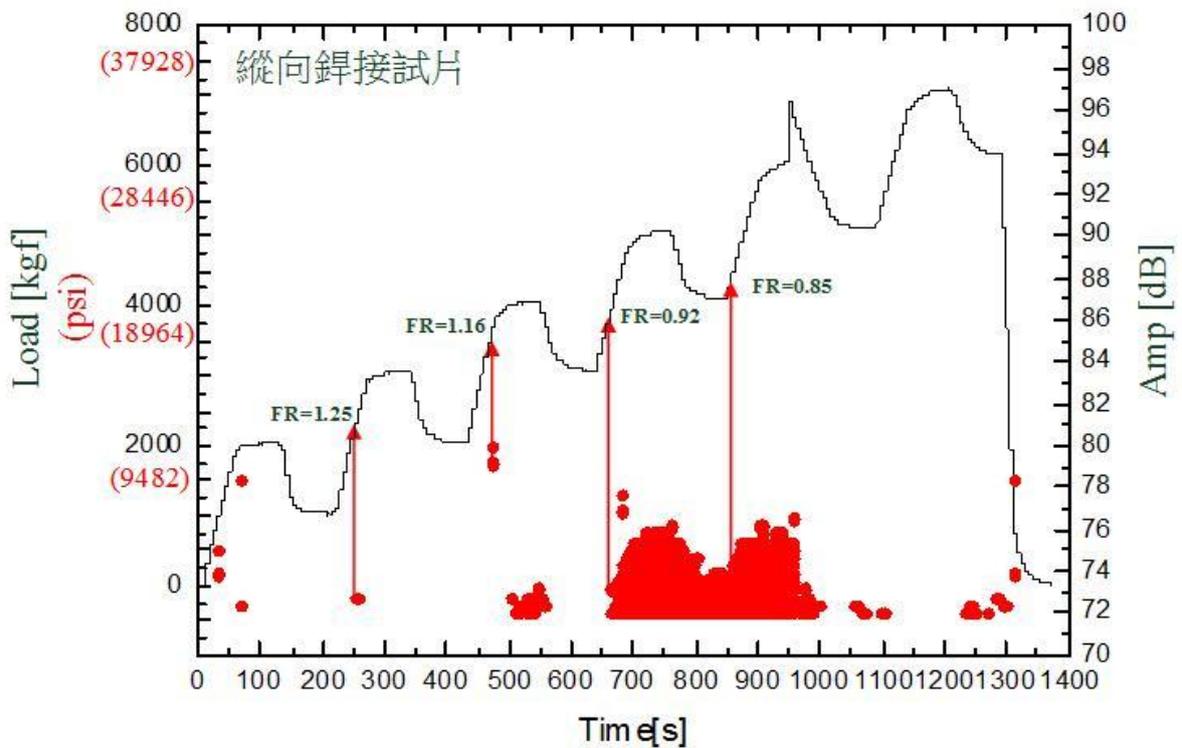


圖 75 縱向銲接試片 P2 負載與音洩訊號振幅相關圖

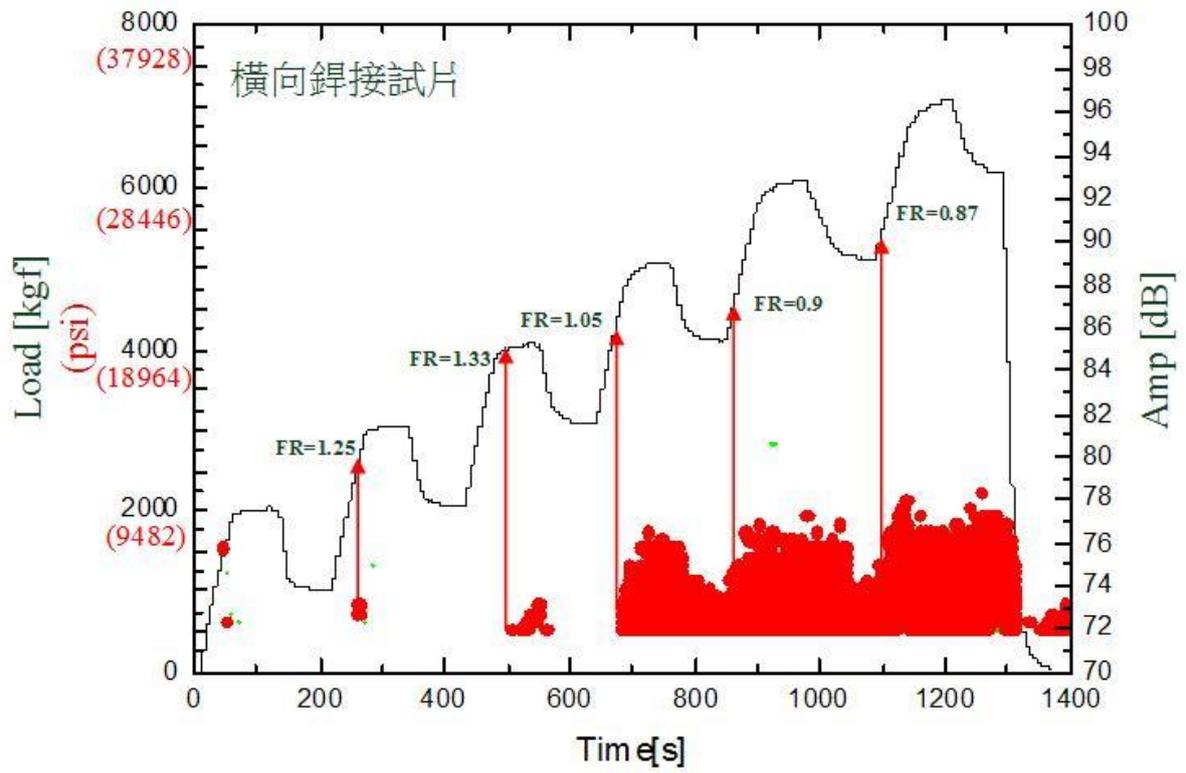


圖 76 橫向銲接試片 P3 負載與音洩訊號振幅相關圖



圖 77 高強度鋼試片靜態拉伸試驗架設與試片斷裂

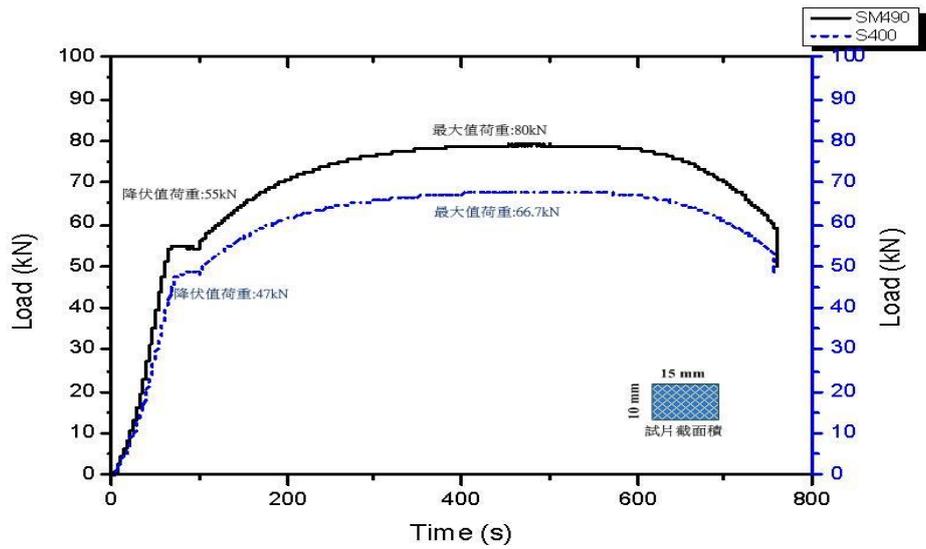


圖 78 試片 SM490 與 S400 拉伸試驗結果：負載與時間關係圖

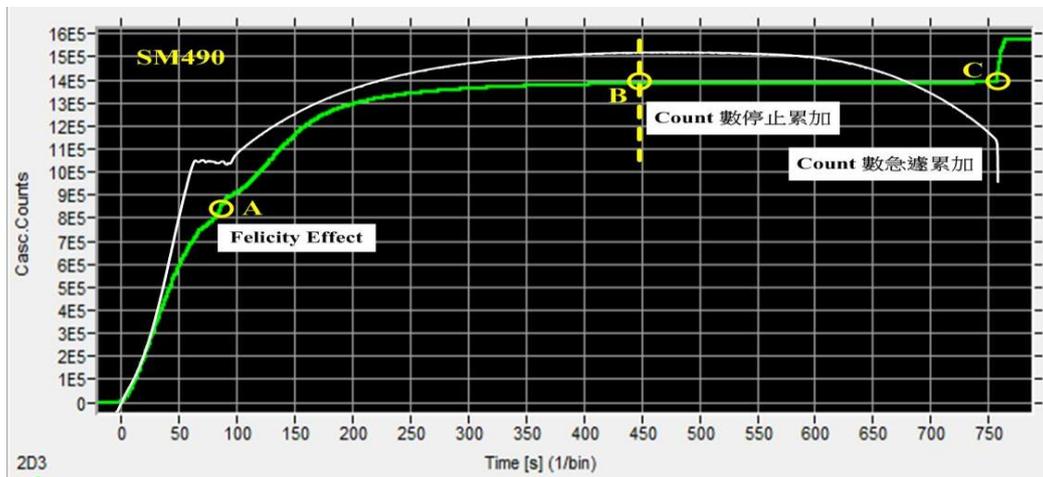


圖 79 SM490 試片拉伸試驗結果：負載、音洩訊號記數累計與時間關係圖

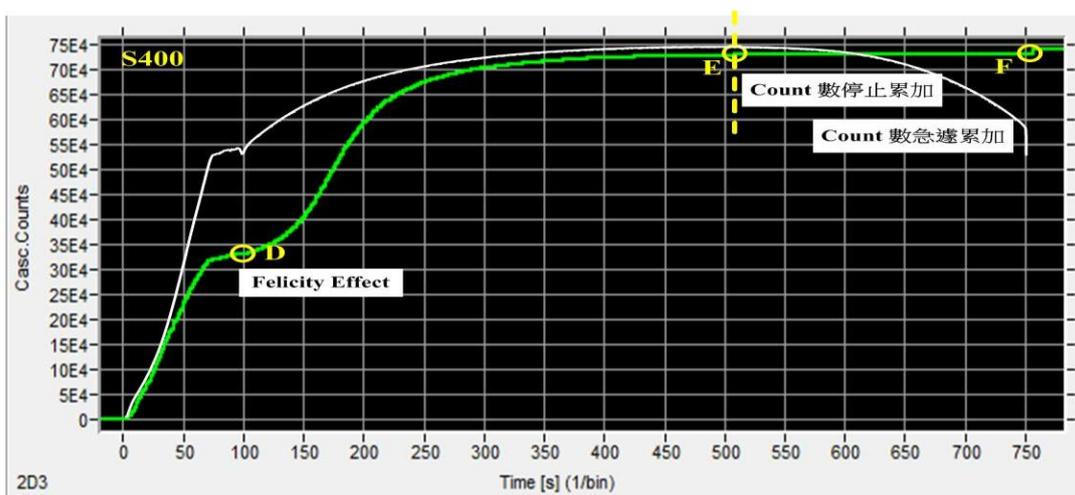


圖 80 S400 試片拉伸試驗結果：負載、音洩訊號記數累計與時間關係圖

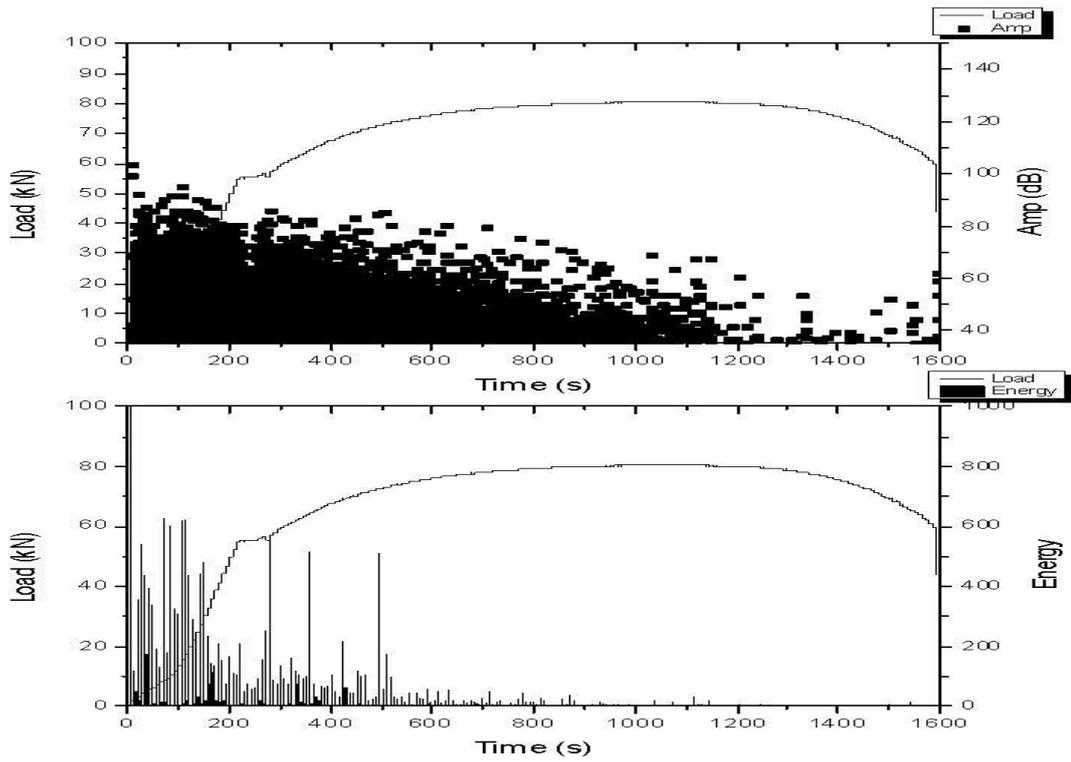


圖 81 母材 SM490-1 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

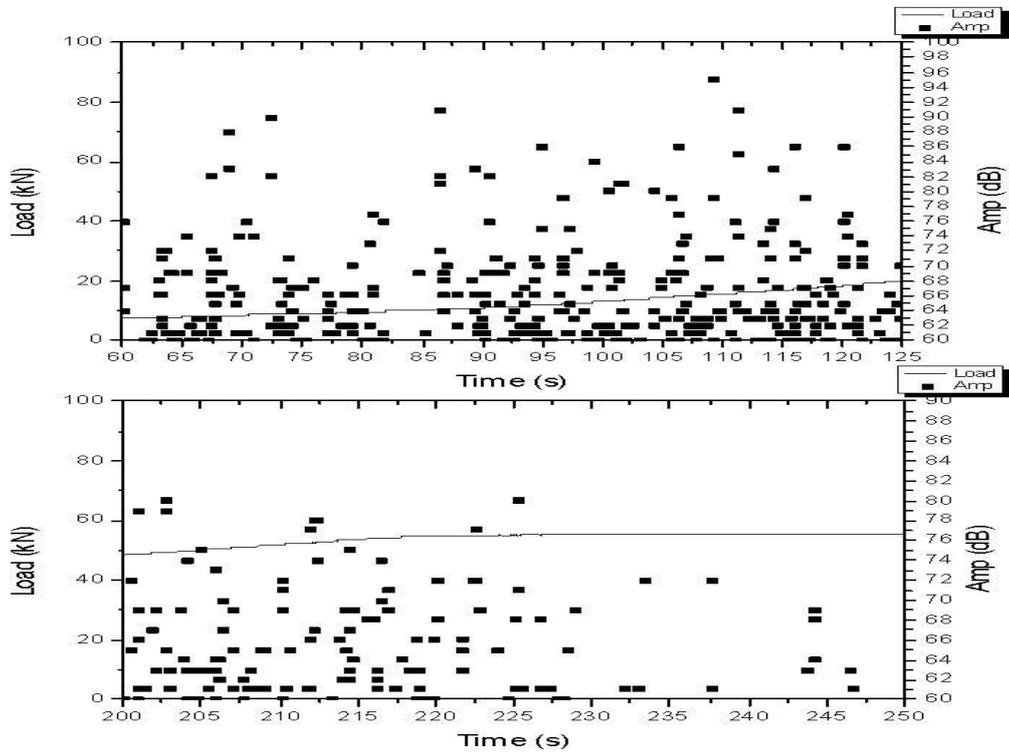


圖 82 母材 SM490-1：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

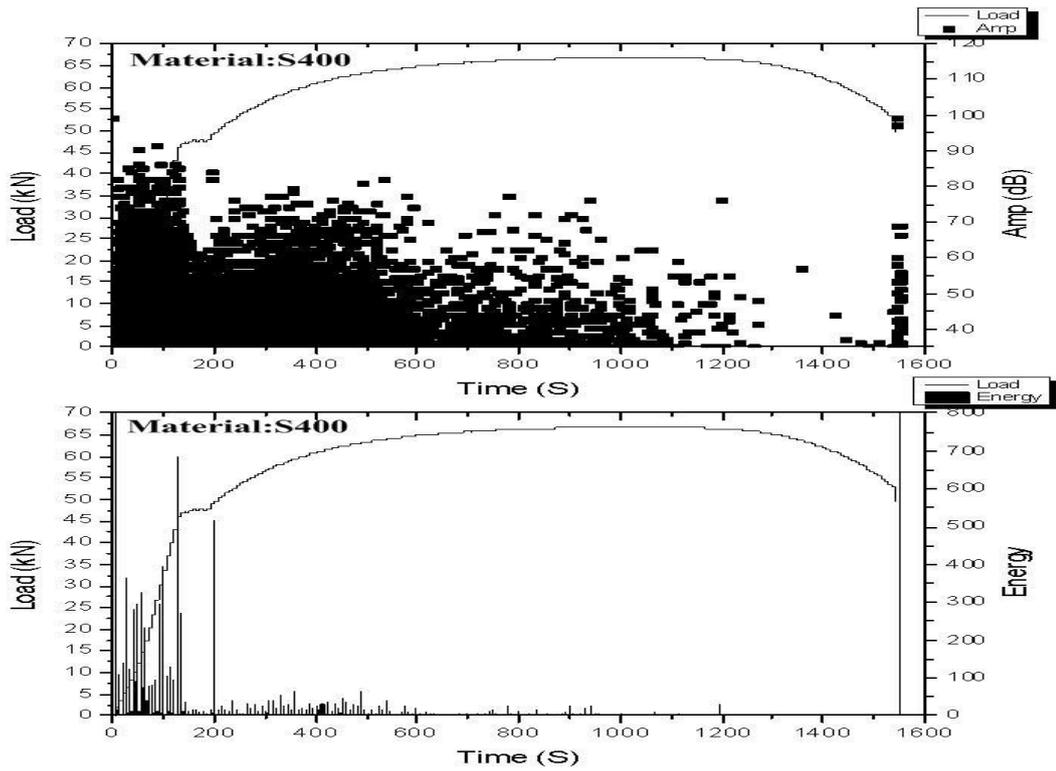


圖 83 母材 SM400-1 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

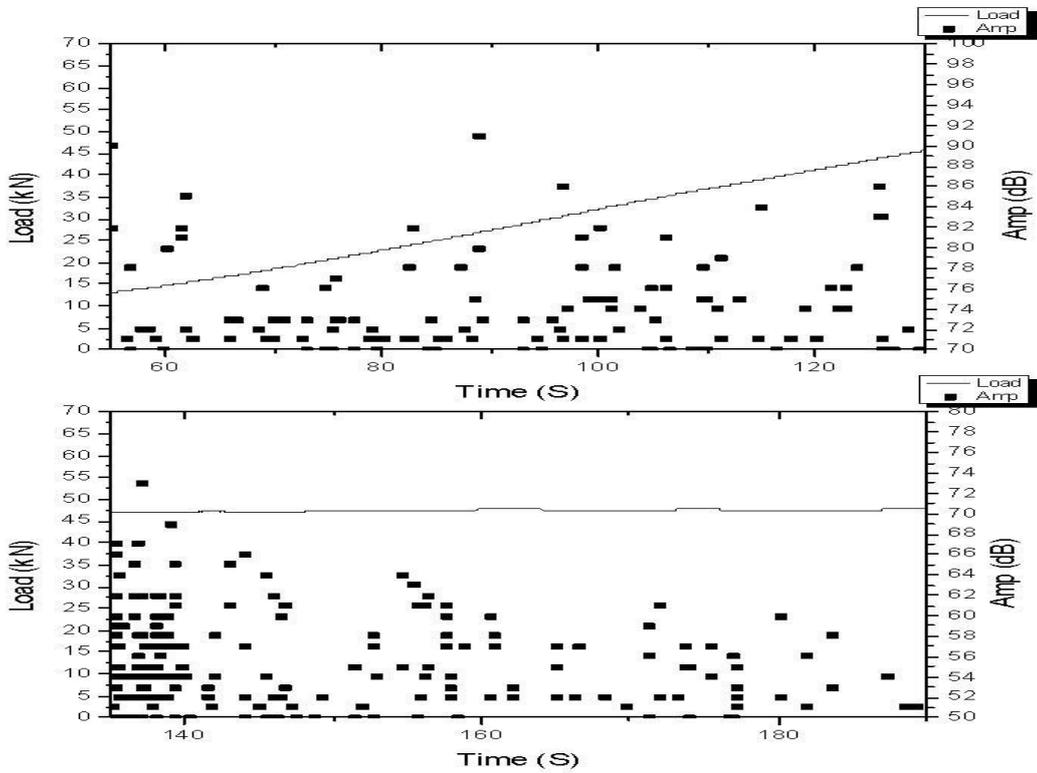


圖 84 母材 SM400-1：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

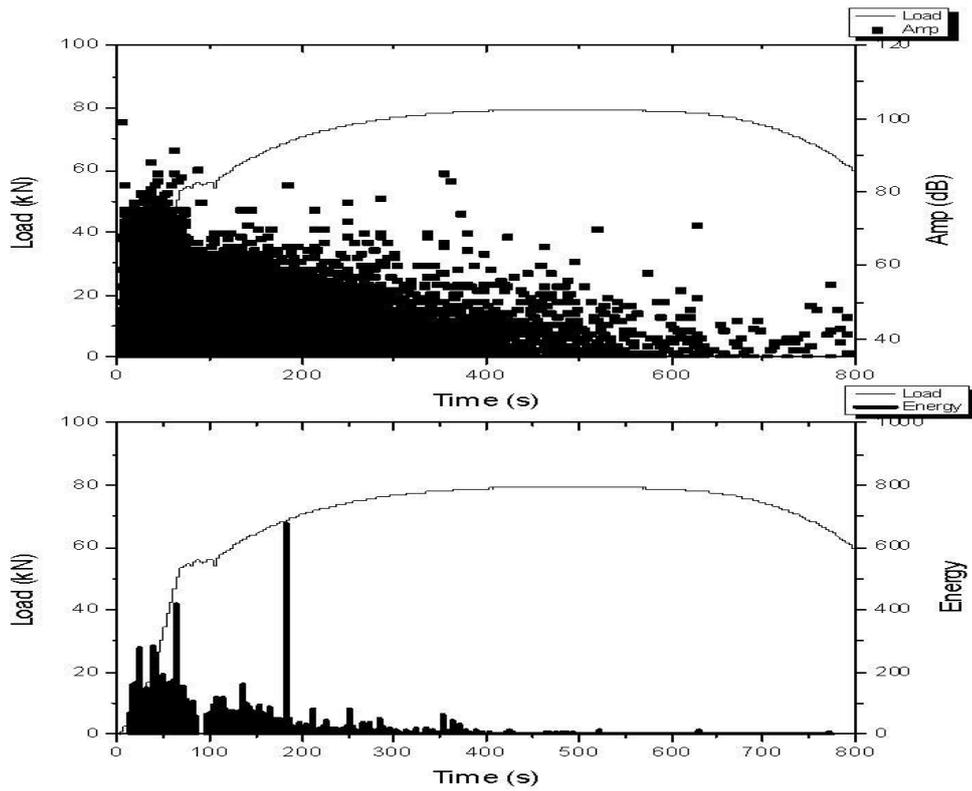


圖 85 母材 SM490-2 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

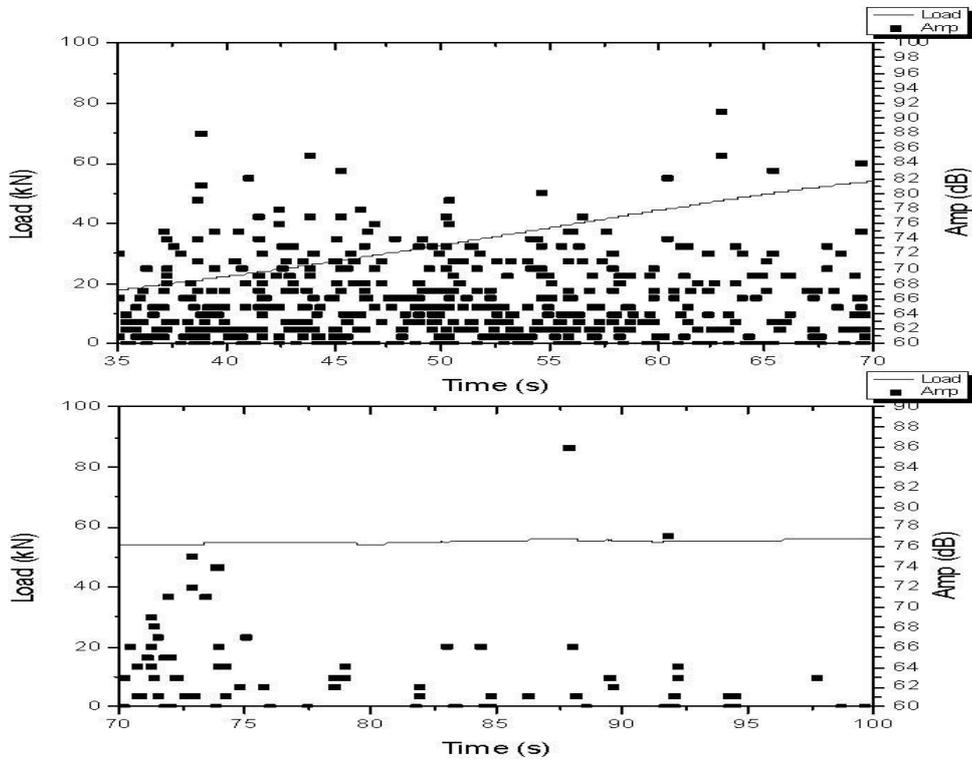


圖 86 母材 SM490-2：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

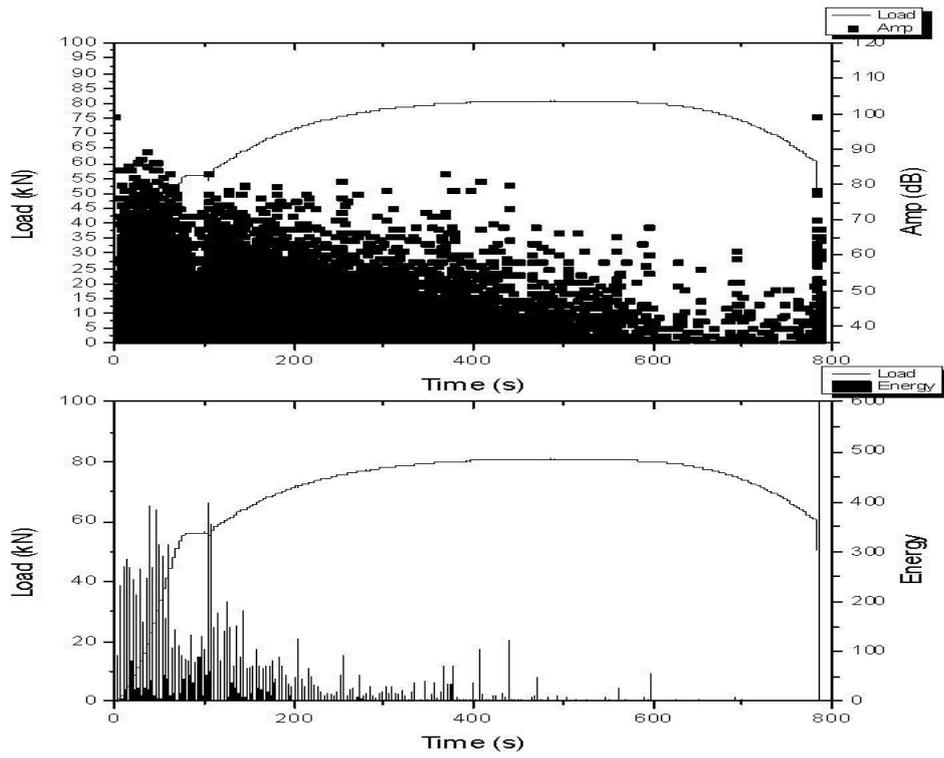


圖 87 母材 SM490-3 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

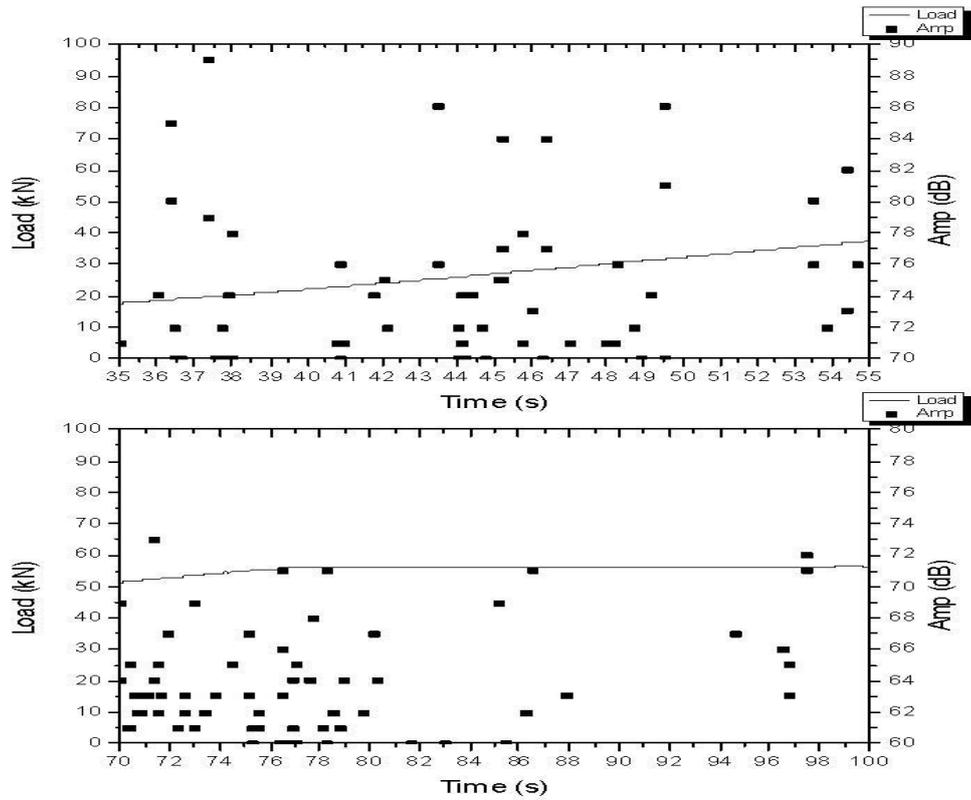


圖 88 母材 SM490-3：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

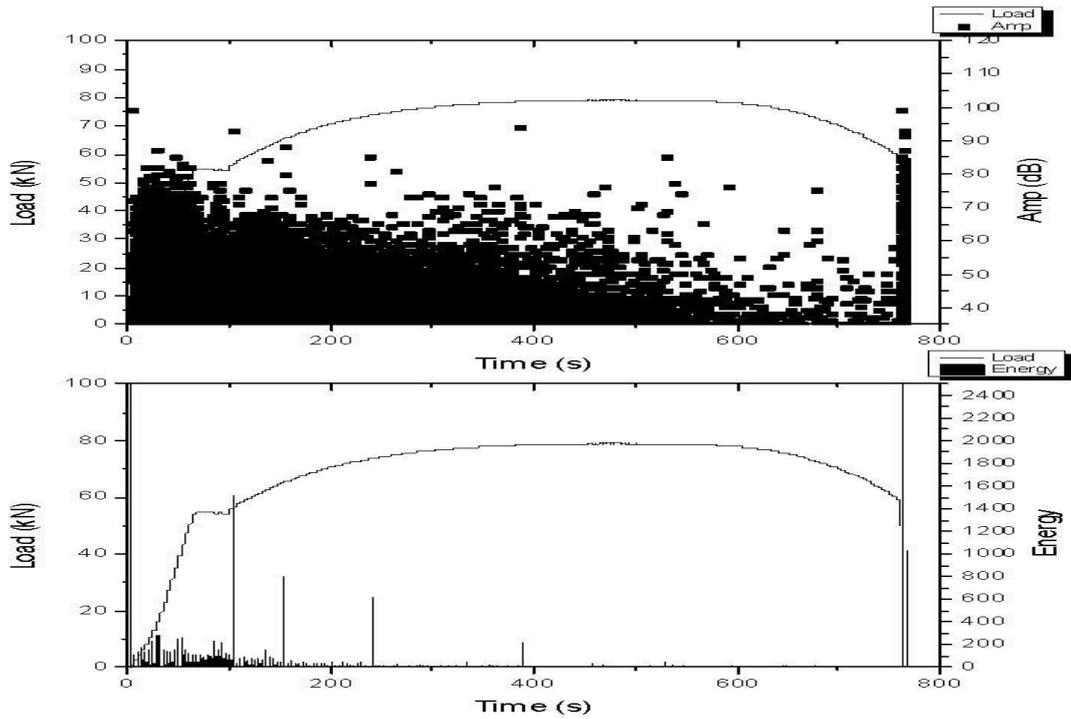


圖 89 母材 SM490-4 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

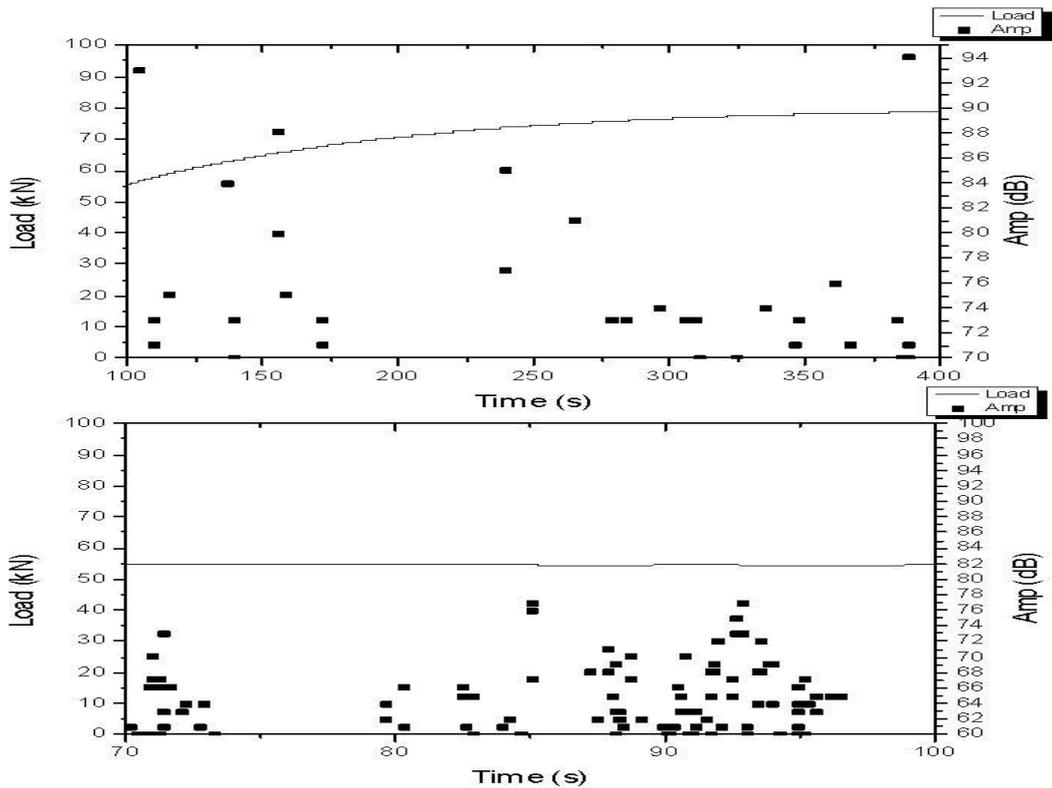


圖 90 母材 SM490-4：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

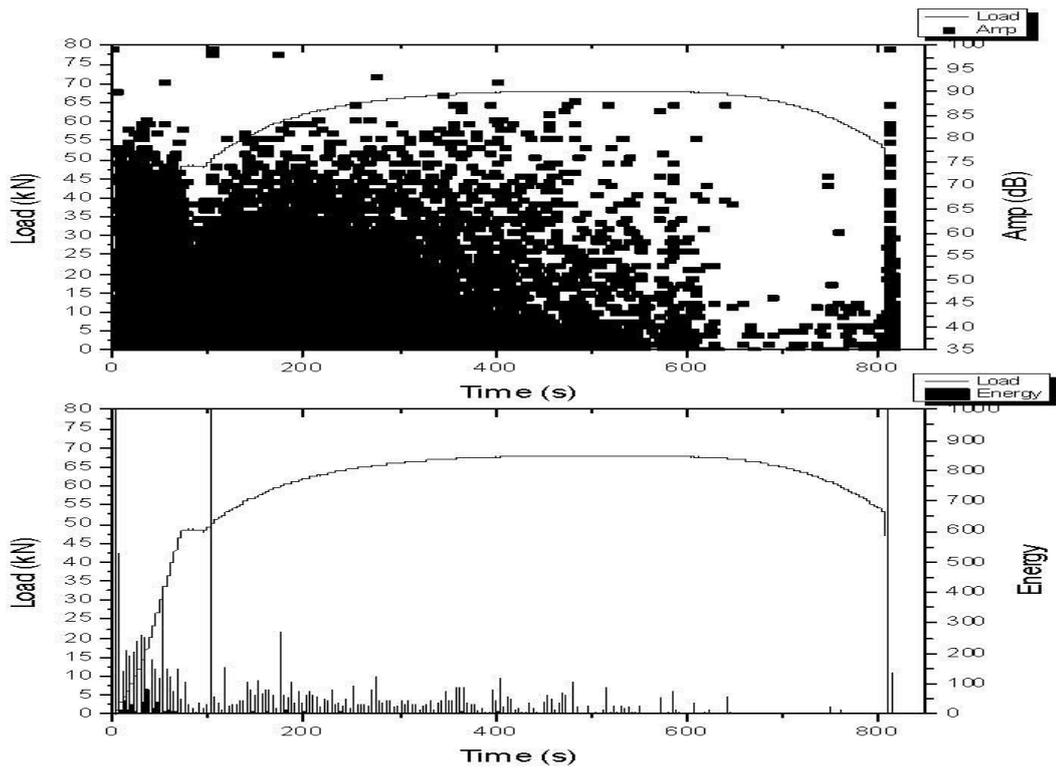


圖 91 母材 SM400-2 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

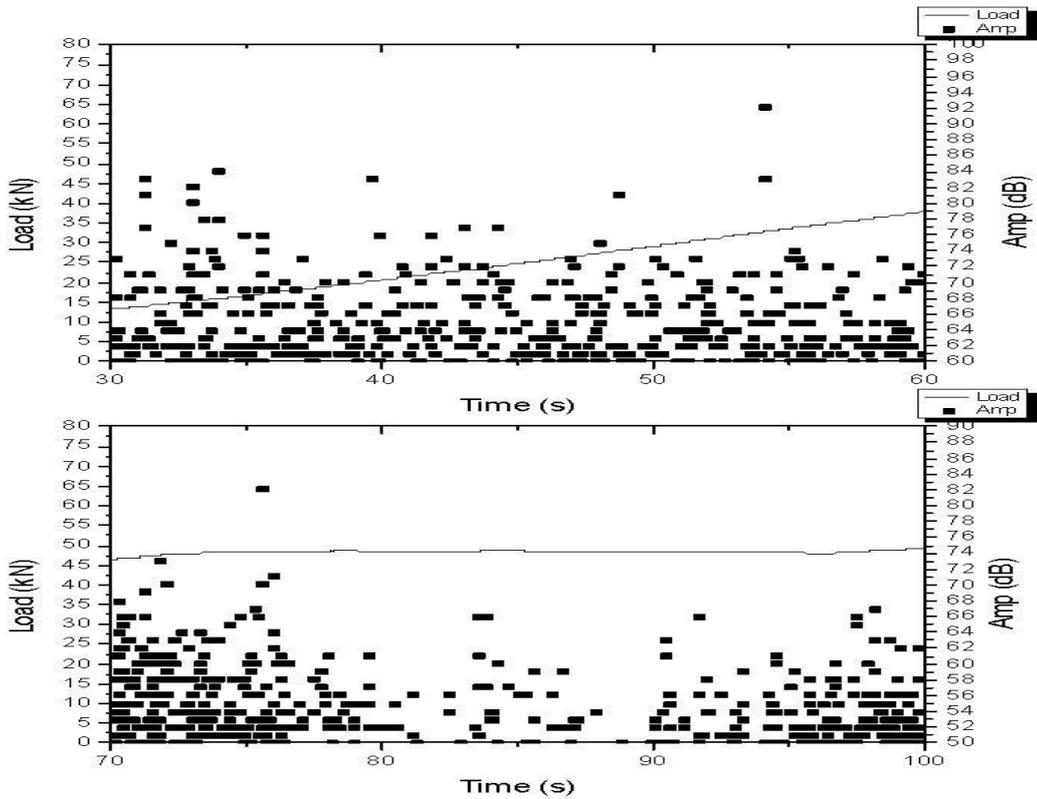


圖 92 母材 SM400-2：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

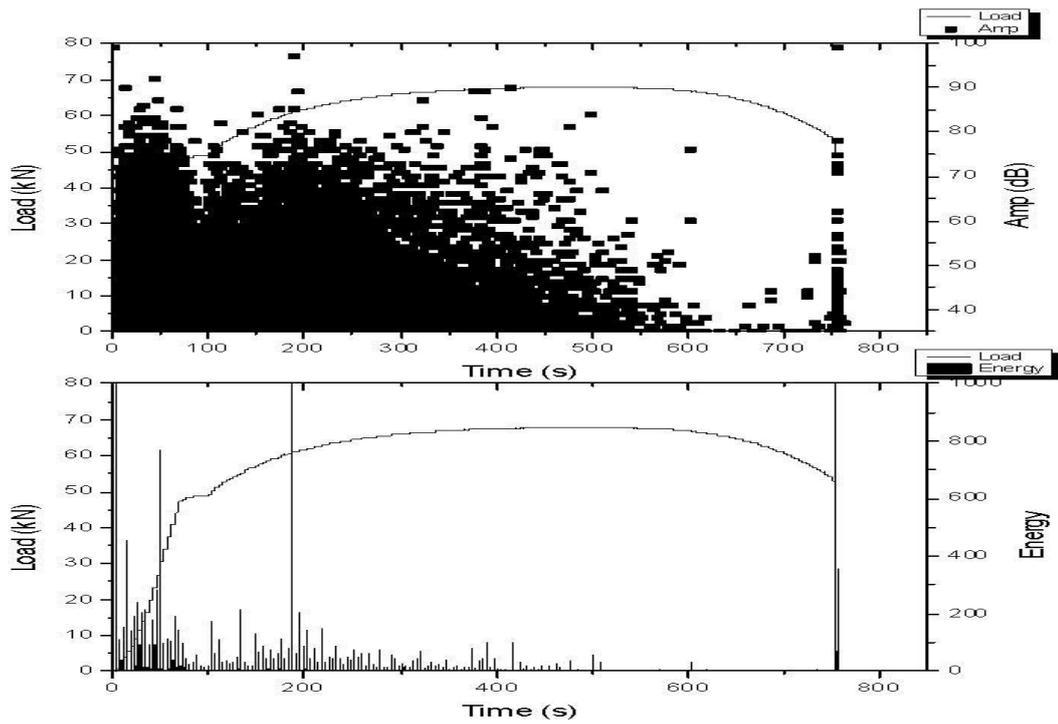


圖 93 母材 SM400-3 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

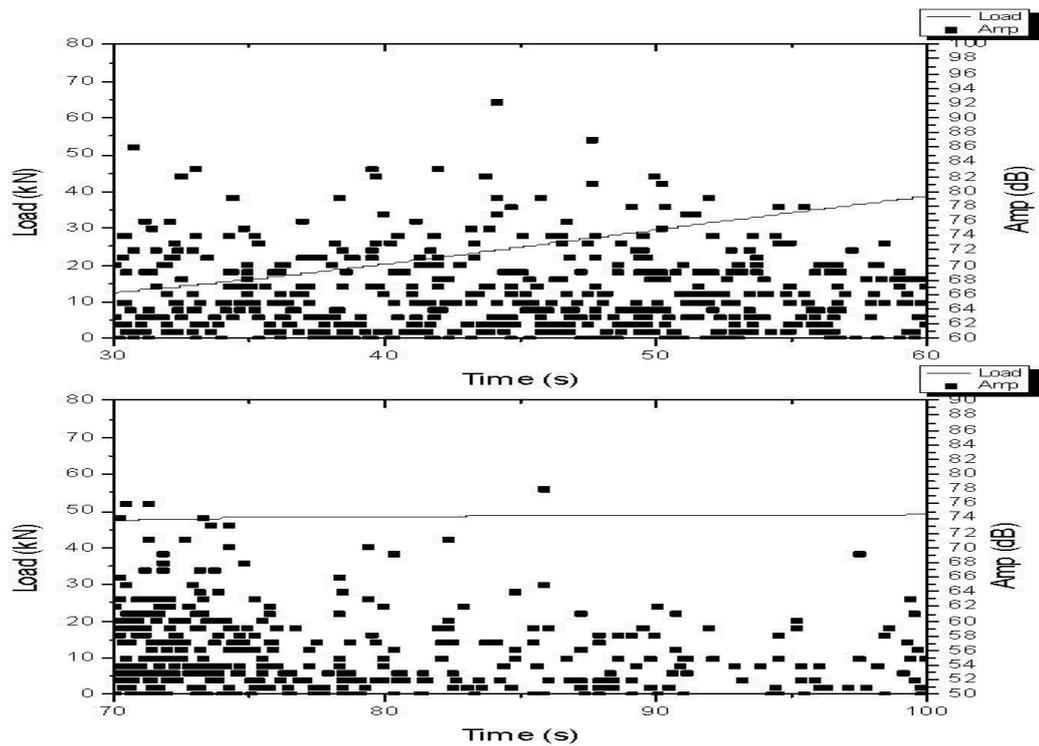


圖 94 母材 SM400-3：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

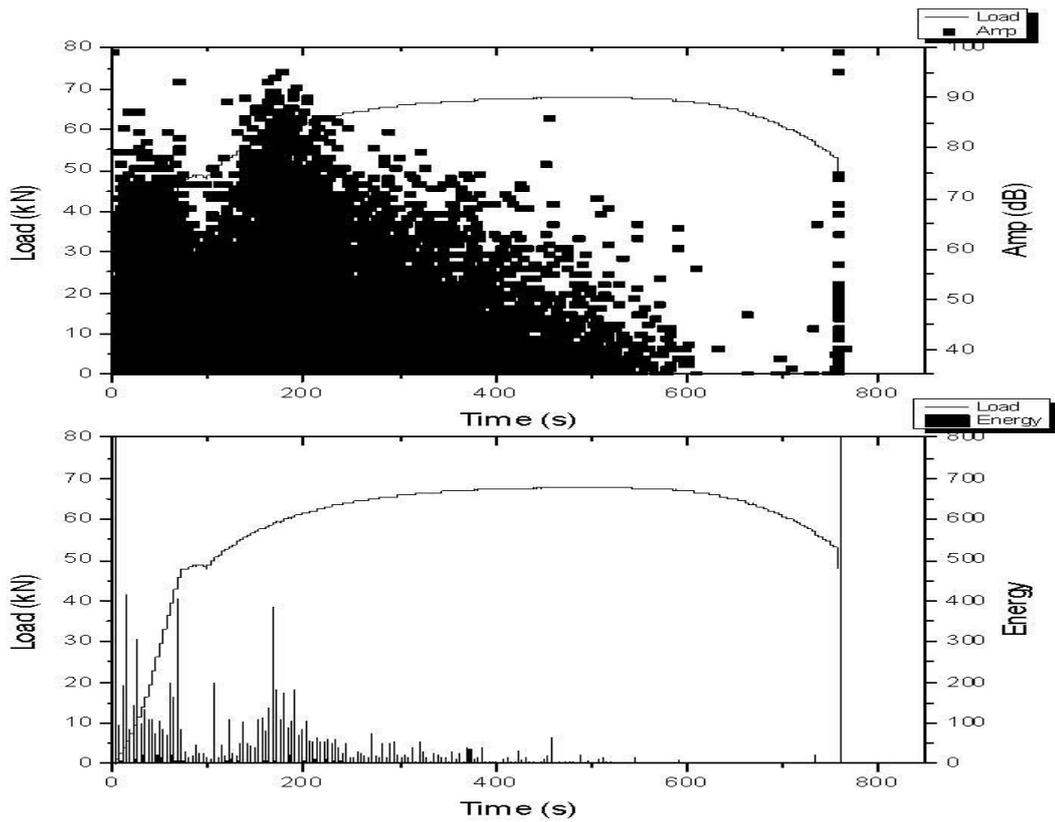


圖 95 母材 SM400-4 試片負載時間曲線與音洩訊號關係圖

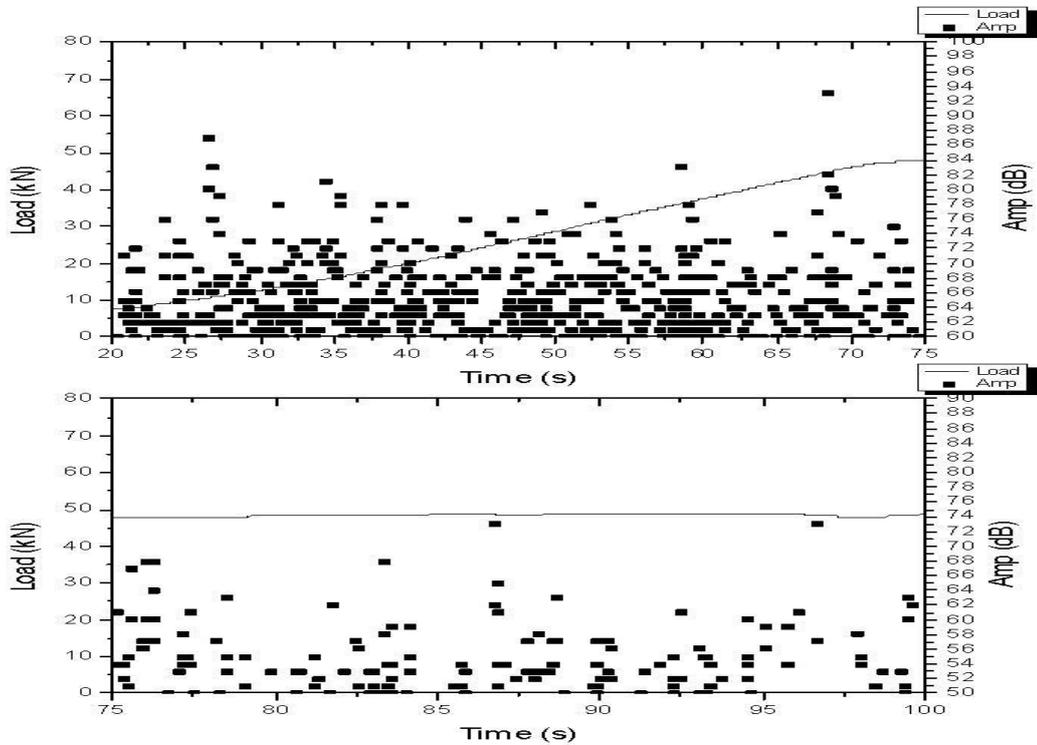


圖 96 母材 SM400-4：強訊號與低訊號振幅值分佈圖

## 第六章 音洩案例應用與其他非破壞檢測技術驗證

本章內容乃針對某石化業者提供之現地儲槽進行音洩訊號擷取與分析，依據單位時間內的事件數及訊號振幅得到儲槽底板腐蝕狀況，並進一步開槽入內以磁通漏與超音波測厚等非破壞檢測技術進行複驗。經比對此實驗結果，音洩、磁通漏與底板超音波測厚皆顯示儲槽底板厚度正常，比對結果相當符合，驗證了音洩檢測技術應用於儲槽底板腐蝕檢測之可靠度。

### 第一節 現地直徑 10 米儲槽音洩檢測

本實驗音洩設備採用 Physical Acoustic Corporation 簡稱 PAC 公司數位化系統主機，採用共振頻率為 30kHz 之傳感器，安裝傳感器上、下兩排，每排各 6 顆傳感器，上排傳感器用以過濾由儲槽頂板方向傳來的雜訊，下排傳感器則做為底板腐蝕檢測所用。進行音洩檢測前需先準備儲槽相關資料，檢測對象為直徑 10.66 公尺之錐頂式儲槽，原先內容物已排空改填充水作為音洩實驗中之負載來源，容量 1000 公秉，儲槽高度為 12.2 公尺，填充水位為 10 公尺高，儲槽底板構造圖如圖 97 所示，西側與東北側分別有兩個人孔可供開槽進行內部檢測，音洩檢測實驗在儲槽填充水後靜置 24 小時後才安排進行訊號擷取。

現地儲槽音洩實驗架設如圖 98 所示，下排傳感器架設高度為距離底板 1.0 公尺，上排傳感器則架在距離底板 1.5 公尺高，共使用 12 顆傳感器，於槽壁上刮除油漆，面積為一個探頭大小及吸附裝置所能放置的區域，並進行傳感器編號作業，傳感器與槽壁表面間使用耦合劑且以磁性固定器將傳感器固定於壁板上，使音洩訊號能有效地被傳感器所接收。將訊號線連接傳感器與音洩系統主機，利用 0.5mm 之 2H 鉛筆在每一顆傳感器旁 20mm 處進行斷芯試驗，藉以確認各個傳感器在安裝後是否能有效將音洩訊號回傳，各傳感器間的靈敏度差異為 3dB 內。再以掌上型音洩測漏儀針對與儲槽相通之管線、閥門與法蘭等進行洩漏訊號偵測，確保無其他元件之洩漏訊號產生。

在完成設定音洩檢測參數後，本次實驗收集儲槽底板音洩訊號約一小時，音洩檢測結果如圖 99 為現地儲槽音洩實驗原始量測二維聲源定位圖，圖 100 為音洩訊號振幅與時間、事件與時間參數相關圖，圖 99 中顯示在儲槽底板中間部位分佈一群較密集的音洩訊號事件，而在圖 100 中發現這些事件都由訊號振幅 60dB~75dB 之雜訊規律性的出現並被所有傳感器接收，在考慮將雜訊濾除後，音洩結果如圖 101 與圖 102 所示，儲槽底板中間不再有一群密集的音洩訊號事件，且散佈在二維平面圖上之定位點也大幅減少，訊號強度則

都低於 55 dB，訊號活性較弱，因此綜合評判該儲槽底板音洩檢測結果為正常。

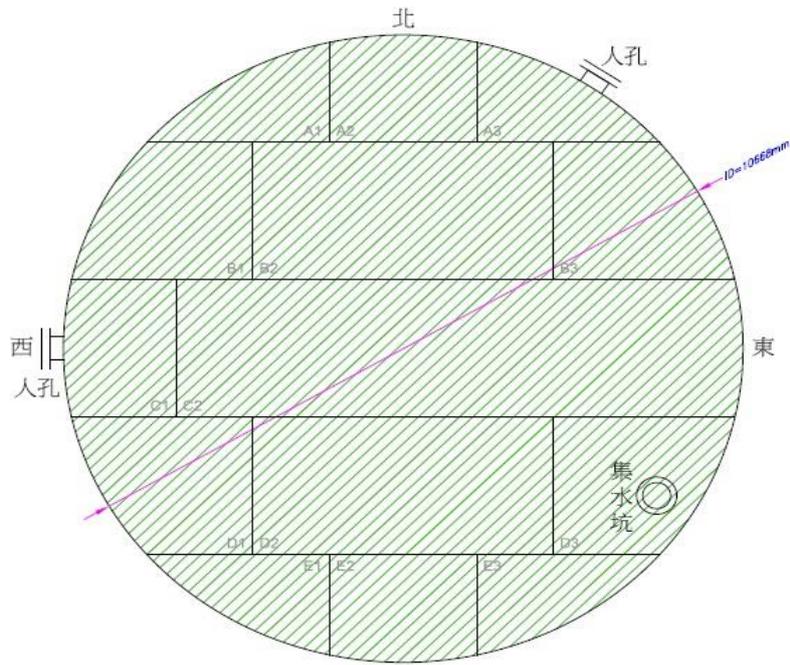


圖 97 直徑 10.66m 儲槽



圖 98 現地儲槽音洩實驗量測

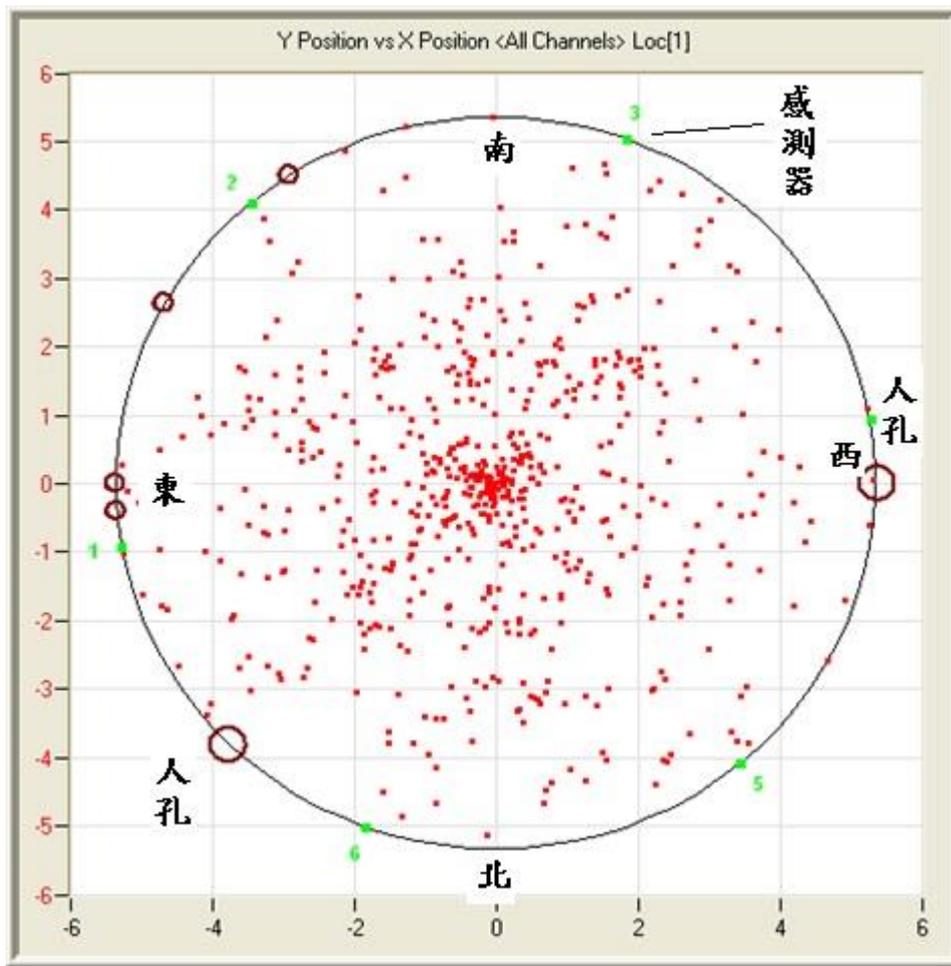


圖 99 現地儲槽音洩實驗原始量測二維聲源定位圖

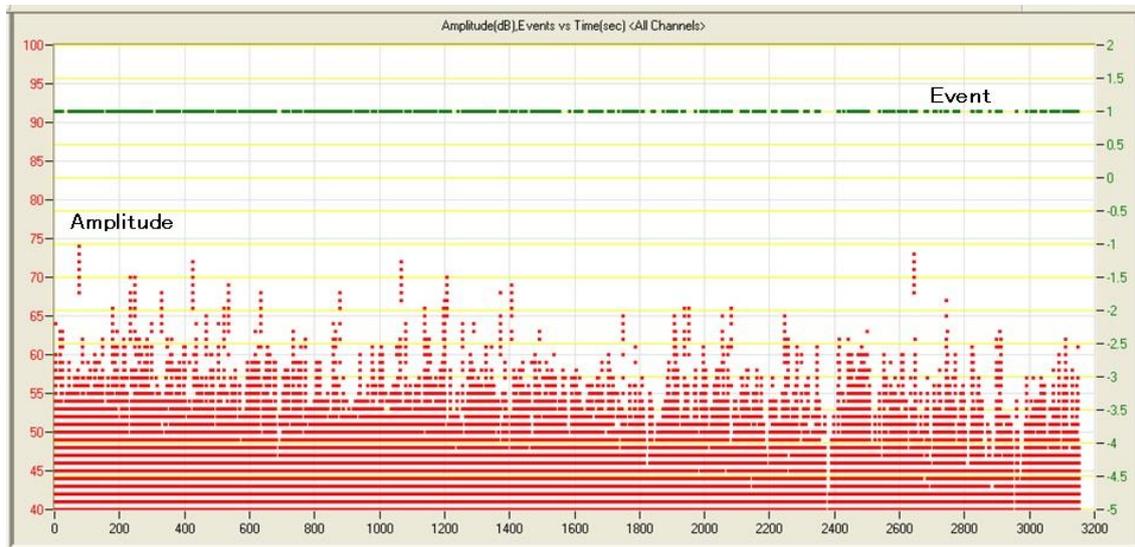


圖 100 現地儲槽音洩實驗原始量測訊號振幅與時間,事件與時間相關圖

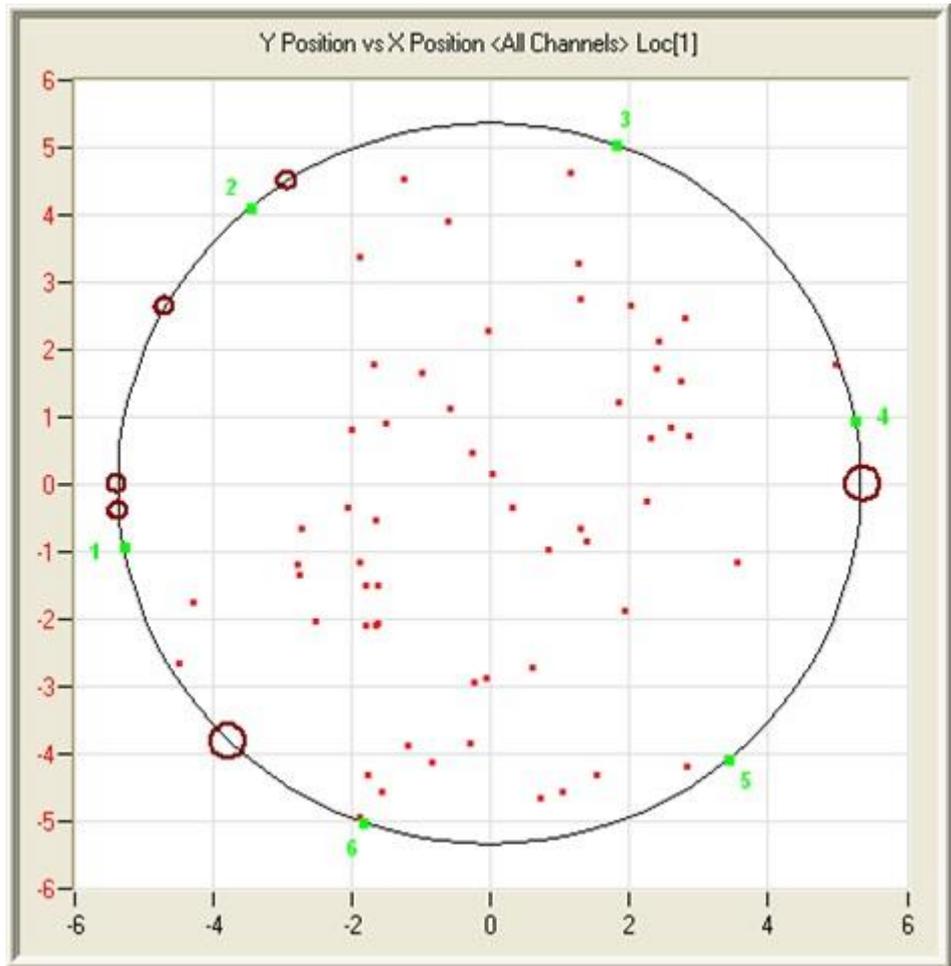


圖 101 雜訊濾除後二維聲源定位圖

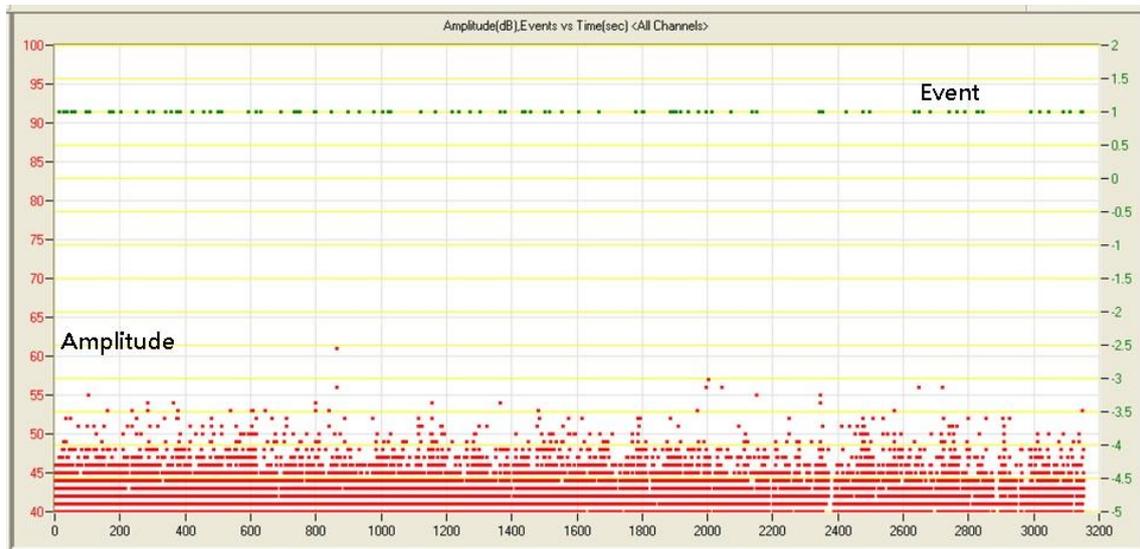


圖 102 雜訊濾除後訊號振幅與時間,事件與時間相關圖

## 第二節 儲槽開放檢測-磁通漏檢測與超音波測厚驗證

在音洩檢測完畢後便著手安排開槽，並以磁通漏檢測技術與超音波測厚來進行底板腐蝕狀況之評估。如圖 103 所示，磁通漏檢測施作前需先進行系統校正，由於儲槽底板設計厚度為 8mm，乃以一長 1300mm、寬 400mm、厚度 8mm 之鋼板其上具有 20%,40%,60%與 80%壁厚損失之圓孔作為系統訊號校正比對用，儲槽開放進行底板磁通漏檢測時乃依據 API 653 規範檢測程序進行約 89m<sup>2</sup> 範圍之掃描，如圖 103 檢測員在儲槽內進行掃描，當底板腐蝕減薄 20%以上磁通漏設備便會自動停止，於本次全面底板掃描時並未發現腐蝕深度超過 20%者，底板磁通漏檢測結果正常。

同時，也利用超音波測厚方式進行底板厚度抽檢，每塊板依面積大小抽檢 4~9 點不等，測厚結果分佈圖如圖 104 所示，也可以清楚瞭解目前底板腐蝕狀況並不明顯，壁厚最低 7.8 mm，因此超音波檢測結果也顯示該儲槽底板狀況正常。

一般國外經驗來說，儲槽底板音洩檢測結果可分為 5 等級，若評鑑為第 I,II 等級的儲槽，底板腐蝕狀況較為正常，其準確率可達 95%，將本次現地直徑 10 公尺儲槽音洩檢測結果與開槽後以磁通漏檢測與超音波測厚等非破壞檢測結果相比較，結果也相當吻合，音洩訊號並無群集定位點發生，且訊號振幅皆低於 55dB 屬於弱活性之音洩訊號，磁通漏檢測設備在掃描儲槽底板過程中也未發現腐蝕深度大於 20%之腐蝕區，超音波測厚分佈圖更清楚地顯示本儲槽底板厚度仍介於 7.8mm~8.0mm，相當正常，該儲槽恢復後並未進行任何底板修補。



## 第七章 壓力容器音洩檢測程序建議指引

### 第一節 總則

#### 一、適用範圍：

本檢測程序建議指引適用於在不開槽情況下，對金屬材料壓力容器活性瑕疵之音洩聲源相關顯示之判讀及評估之音洩檢測。

#### 二、適用時機：

本指引所建議之檢測程序步驟適用於在不開槽或配合氣壓測試情況下進行檢測，檢測時應在無大風、無雨的氣候條件下進行。

#### 三、參考文獻：

- (一) ASME SECTION V-2010 Article 12 Acoustic Emission Examination of Metallic Vessel During Pressure Testing
- (二) ASNT Nondestructive Testing Handbook Third Edition, Volume 6 Acoustic Emission
- (三) E543 Specification for Agencies Performing Nondestructive Testing
- (四) E650 Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors
- (五) E976 Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
- (六) E1316 Terminology for Nondestructive Examinations
- (七) E2374 Guide for Acoustic Emission System Performance Verification
- (八) E569 Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation
- (九) Recommended Practice ASNT SNT-TC-1A for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel
- (十) ANSI/ASNT CP-189 Standard for Qualification and Certification of NDT Personnel

## 第二節 名詞定義

### 一、音洩(acoustic emission, AE)：

材料變形產生的彈性波，且快速釋放能量所造成的聲源。

### 二、活性缺陷(active defect)：

因外部負載作用下而產生瞬態彈性波釋放的缺陷。

### 三、傳感器(sensor)：

接收音洩波動並轉換為電壓值的壓電元件。

### 四、通道(channel)：

單一個音洩傳感器連接至處理、轉換和量測系統的路徑。

### 五、音洩活躍度(AE activity)：

測試過程中，音洩訊號隨著負載或時間增加所產生的變化程度。

### 六、撞擊(hit)：

訊號振幅超越門檻值到定義撞擊鎖定時間為單一撞擊訊號。

### 七、事件(event)：

材料的變形或是機械震盪所造成音洩訊號發生的來源。

### 八、能量(energy)：

訊號包絡線以下及低限值以上所涵蓋的面積。

### 九、定位(location)：

事件發生的所在位置。

### 十、波峰定義時間(Peak Definition Time, PDT)：

藉由定義一固定的時間區間，在這時間區間內找出起始時間到單一撞擊訊號的最大振幅時間的時間區間，如圖 7.1 可以見到適當的設置 PDT，可以避免當 Hit2 的峰值大於 Hit1 時而定義出錯誤的時間區間。

### 十一、撞擊定義時間 (Hit Definition Time, HDT) :

設置單一撞擊訊號最長的拖曳時間，如圖 7.1 所示，可以避免 Hit1 和 Hit2 當成一次撞擊訊號。

### 十二、撞擊後鎖定時間 (Hit Lockout Time, HLT) :

如圖 105 所示，此時假設 Hit2 為 Hit1 的反射訊號時，這只能稱為一次音洩事件，為避免造成將反射訊號當成另一事件發生而設定的時間區間。

### 十三、門檻值 (Threshold) :

如圖 106 所示，定義為當振幅高於設定的門檻值時才視為有效訊號，並比高於門檻值的時間做為訊號的起始時間；在進行音洩檢測前，可藉由過濾背景雜訊來設定門檻值。

### 十四、振幅 (Amplitude, AMP) :

單次撞擊訊號的最大電壓值，即撞擊訊號的最大波峰值。

### 十五、平均頻率 (Average Frequency, A-FRQ) :

定義單次撞擊訊號下，利用計數和時間區間來計算，即撞擊訊號的頻率。

### 十六、絕對能量 (Absolute Energy) :

單次撞擊訊號下包絡線面積。

### 十七、平均電壓 (Average Signal Level, ASL) :

單次撞擊的平均振幅，單位為 dB，即算術平均數。

### 十八、計數 (Count) :

單次撞擊訊號中超過門檻值的數量。

### 十九、波峰前計數 (Count to Peak) :

單次撞擊中到最大峰值前的訊號振盪數量。

### 二十、持續時間 (Duration) :

單次撞擊中大於門檻值到低於門檻值的時間。

### 二十一、初始頻率 (Initiation Frequency, I-FRQ) :

計算單次撞擊訊號中，到最大振幅前的平均頻率，即上升時間的頻率。

二十二、 上升時間 (Rise Time) :

單次撞擊中到最大振幅前的時間。

二十三、 回響頻率 (Reverberation Frequency, R-FRQ) :

計算單次撞擊訊號中，最大振幅後到振幅低於門檻值，即鈴流(Ring Down) 訊號頻率，

二十四、 波峰後計數 (Ring Down Count) :

最大振幅到單次撞擊結束的計數數量。

二十五、 均方根 (Root Mean Square, RMS) :

訊號的均方根。

二十六、 精準度 (Accuracy) :

是每一次獨立的測量之間，其平均值與已知的數據真值之間的差距。

二十七、 最高操作壓力 (Maximum Operating Pressure) :

壓力容器在操作過程中，近六個月內操作過程中使用過的最大壓力。

上述音洩參數在檢測中常用來判定聲源訊號的種類，評估不同聲源產生的訊號特徵來區分聲源的類型、缺陷嚴重性及定位區域的可信度。常見的訊號區分為突發與連續訊號，其中與時間相關的參數通常被用於突發訊號的判定，而與振幅、能量相關的參數則用於連續訊號的判定，例如；腐蝕與裂痕生長就被歸類於突發訊號，而洩漏或背景雜訊則歸類於連續訊號，依照訊號特性去選擇相對應的參數去進行分析與評估。

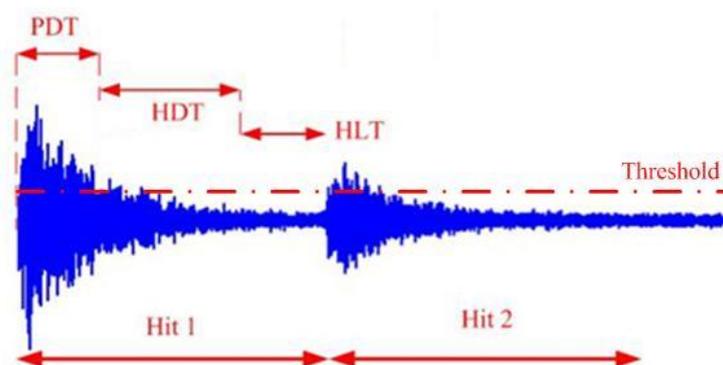


圖 105 聲源定位下撞擊訊號中 PDT、HDT 和 HLT 示意圖

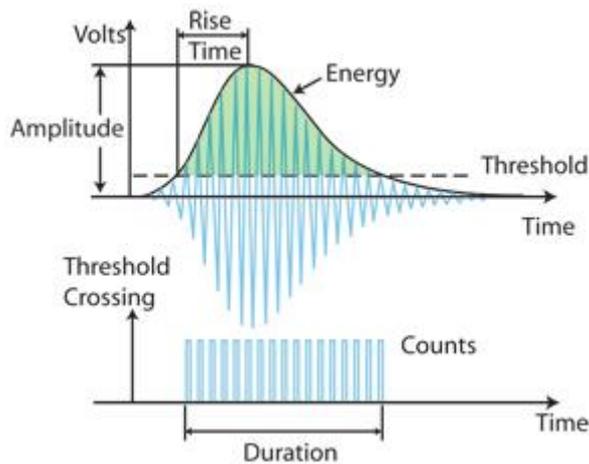


圖 106 聲源為斷芯時的撞擊訊號與時間相關的音洩參數

### 第三節 安全規定

#### 一、現場安全要求：

檢測時待測設備的壁溫比其材料脆性溫度至少高 30°C；進行線上檢測時應避免安全閥過早或突然開啟所引起的危險後果。

#### 二、人員安全要求：

檢測人員應根據檢測地點的要求穿戴防護工作服與配戴相關的防護設備；在進行氣壓測試時應制定特別的安全措施程序。

### 第四節 人員要求

- 一、執行音洩檢測之人員需具備音洩專業教育訓練之受訓證明。
- 二、執行音洩安裝與傳感器佈陣人員須具 UT 檢測初級檢測員(Level I)資格。
- 三、檢測人員應具有台灣非破壞檢測協會 UT 中級訓練，需做過壓力容器音洩檢測作業且須具備傳感器校驗能力。

### 第五節 音洩檢測裝備

音洩檢測系統應包括傳感器、前置放大器、音洩儀主機、顯示和儲存裝置。

#### 一、傳感器、放大器與訊號線：

傳感器的共振頻率範圍推薦在 100kHz~400kHz 之間，當選用寬帶傳感器（100kHz~1MHz）或高頻帶傳感器（>400kHz）時，應考慮靈敏度降低的因素，以

確保高頻帶範圍內有足夠的接收靈敏度。前置放大器短路雜訊有效值電壓不大於 16.9dB (7 $\mu$ V)。在工作頻率和溫度範圍內，前置放大器的頻率響應變化不超過 3dB。前置放大器的頻率響應應與傳感器的頻率響應相匹配，其增益應與系統主機的增益設置相匹配，通常為 40dB 或 34dB。如果前置放大器採用差分電路其共模雜訊應不低於 40dB。傳感器到前置放大器之間的訊號電纜及前置放大器到系統主機之間的訊號電纜應能遮罩電磁噪音干擾，訊號電纜的衰減損失應小於 1dB/30m，訊號電纜長度不宜超過 150m，如果採用更長的電纜線，則需安裝訊號轉發器，以盡量減小訊號的衰減。

## 二、音洩儀基本特性要求：

### (一) 音洩儀主機：

應有覆蓋檢驗區域的足夠通道數，應至少能實時顯示和存儲音洩訊號的參數(包括到達時間、門檻、幅度、振鈴技術、能量、上升時間、持續時間、撞擊數)，宜具有接收和記錄壓力、溫度等外部電訊號的功能。

### (二) 採樣頻率：

各個通道的獨立採樣頻率應不低於傳感器響應頻率中心點頻率 10 倍。

### (三) 門檻精準度：

應控制在 $\pm 1$ dB 的範圍內。

### (四) 音洩訊號精準度：

音洩訊號技術測量的精準度應在 $\pm 5\%$ 範圍內。

### (五) 短時處理能力：

以訊號撞擊開始算起 10s 之內，音洩系統應對每個通道具有採集、處理、記錄和顯示不少於每秒 20 個音洩撞擊訊號的短時處理能力；當連續監測時，音洩系統對每個通道在採集、處理、紀錄和顯示過程中應具有處理不少於每秒 10 個音洩撞擊訊號的能力。當出現大量數據以致發生堵塞情況，系統應能發出警報訊號。

### (六) 峰值幅度：

測量值的精準度應在 $\pm 2$ dB 範圍內，同時要滿足訊號不失真的動態範圍不低於 65dB。

### (七) 能量精準度：

能量測量值的精準度應在 $\pm 5$ dB 範圍內。

(八) 時差定位：

音洩檢測系統之時差定位，每個通道的上升時間、持續時間和到達時間的解析度應不大於 0.25um，精準度應在±1us 範圍內，各通道之間的誤差應不大於平均值±3us。

(九) 電壓精準度：

系統測量外接參數電壓值的精準度應不低於 2%。

(十) 音洩訊號收集軟體：

應能實即時顯示音洩訊號參數、音洩訊號參數之間和參數隨壓力或時間的關係圖，以及音洩定位源的線定位和平面定位圖，即時顯示的延遲時間應不超過 5 秒。

(十一) 耦合劑：

耦合劑應能在試驗期間內保持良好的聲耦合效果。應根據設備壁溫選用無氣泡、黏度適宜的耦合劑。可選用真空脂、凡士林及黃油。檢測奧斯田鐵不銹鋼、鈦和鎳合金時，耦合劑中氯化物、氟離子含量和硫含量應合乎相關法規和標準的要求。

(十二) 濾波器：

放置在前置放大器和系統主機處理器內的濾波器的頻率響應應與傳感器的頻率響應相匹配。

(十三) 檢測與分析軟體：

音洩檢測軟體應為結合音洩訊號與外部參數訊號擷取、濾波、特徵擷取、訊號處理、波形顯示與音洩訊號座標自動定位的視窗軟體。音洩分析軟體應能重播原始音洩檢測數據，並能根據重新設定的條件對音洩檢測數據進行濾波、定位、聯結和識別等分析處理。

(十四) 壓力指示裝置：

檢測時受測壓力容器上應有壓力指示裝置，並在有效校準期限內，其最大顯示範圍應在最高試驗壓力的 1.5 倍~3 倍範圍

## 第六節 檢測程序

### 一、前置作業：

- (一) 查檢待測壓力容器既往歷史記錄資料，包括建造、操作異常記錄、歷次檢測報告、維修與改造等文件資料。
- (二) 檢視現場所有可能出現的噪音源，如施工架的摩擦、內部或外部元件的移動、電磁干擾、機械振動和流體流動等，應盡可能排除上述噪音源。
- (三) 依據現場情況確定檢測條件，建立音洩檢測人員與氣壓試驗控制人員之聯絡方式。
- (四) 檢測前，應先進行壓力容器外部狀況之目視檢測，並拍照記錄。
- (五) 依據壓力容器幾何尺寸以及檢測目的，確定安裝傳感器數量與佈陣。
- (六) 依據音洩檢測目的與壓力容器實際條件，規畫加壓程序。

### 二、傳感器安裝與佈陣

- (一) 檢測壓力容器所用之傳感器數量可依據衰減曲線來決定。當採用衰減曲線決定傳感器數量時，衰減曲線分佈可決定二顆傳感器之最大間距，依此間距與壓力容器相關尺寸來決定佈陣傳感器數量，如無特殊要求，相鄰傳感器之間距應盡量靠近。
- (二) 衰減曲線之建立：

衰減曲線測量應選擇遠離人孔和連接管等結構不連續的部位，使用斷芯模擬聲源進行量測，如果已有檢測條件相同的衰減曲線圖，可不再進行衰減特性量測，但衰減曲線圖應附於檢測報告中。
- (三) 傳感器安裝位置下之胴體表面需將油漆去除，傳感器安裝時也需使用耦合劑確保壁板表面與傳感器耦合良好，再藉由磁性固定裝置將傳感器固定。
- (四) 若壓力容器外部具有保溫材料則安裝傳感器位置需將部分包覆材料去除，並將胴體表面清潔乾淨後再進行傳感器之安裝。
- (五) 傳感器安裝完成後，可將風速計與音洩系統連結，使風速計的記錄與音洩量測時間點同步。

### 三、傳感器安裝校準

- (一) 傳感器安裝後需藉由斷芯方式模擬音洩訊號源，校準各傳感器安裝後之耦合狀況、靈敏度與音洩訊號沿壓力容器胴體壁板之衰減特性。斷芯試驗需距傳感器 15~20mm 處進行，訊號門檻值可設定為 60dB，每一傳感器需進行 3 次有效性斷芯試驗，每次斷芯訊號振幅不能低於 75dB，每一通道三次斷芯訊號振幅平均值與所有通道平均值的偏差應不大於 3dB。
- (二) 若斷芯試驗結果未通過者，需重新檢查傳感器之安裝，訊號線連接狀況及音洩系統各通道自身的特性。
- (三) 傳感器斷芯校準記錄應附於檢測報告中。

### 四、檢測參數與圖形設置

- (一) 依據衰減曲線圖與壓力容器幾何尺寸，由音洩檢測系統自動生成傳感器座標值或將量測得到的傳感器座標值輸入檢測系統中。
- (二) 壓力容器音洩檢測定位時需輸入音速值，該音速值可由實際量測求得，設定該音速值後以斷芯作為音洩訊號模擬聲源，定位結果與理論位置的偏差應不超過該傳感器陣列中最大傳感器間距的 5%。
- (三) 傳感器安裝位置依照不同型式壓力容器將有不同佈陣方式，若為球型壓力容器，換能器佈陣示意圖如圖 107 所示，二顆傳感器之間間距須由衰減曲線決定，立式與臥式壓力容器佈陣方式可參考 ASME SECTION V 第 12 章附錄 A，壓力管線與氣體鋼瓶佈陣方式可參考 NB/T 47013.9-2012 附錄 B。

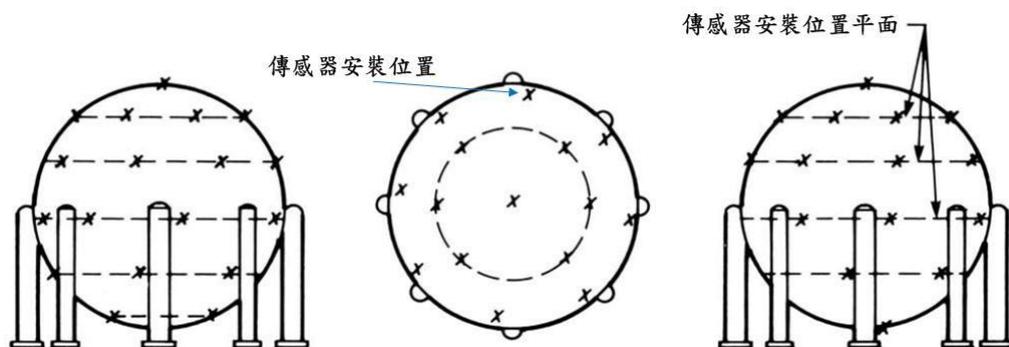


圖 107 球型壓力容器音洩傳感器佈陣

## 五、背景雜音檢查

- (一) 在正式收集壓力容器音洩訊號前，需使用手提式音洩檢測設備針對壓力容器外部各連接部位進行噪音源檢測，如管線振動、閥門洩漏、鄰近大型、重載之交通工具經過等。
- (二) 針對新製的壓力容器和停工下壓力容器在進行音洩檢測時，背景雜音量測時間應不少於 5 分鐘，若為操作中檢測的壓力容器背景雜音量測時間應不少於 15 分鐘，在排除主要噪音源之後，需檢查背景雜音值以決定各通道最終進行檢測時之訊號振幅門檻值。
- (三) 在可能的狀況下應盡量保持所有通道都使用相同的門檻值。

## 六、加壓程序

- (一) 應依據受測壓力容器相關法規、標準和合約內容的要求來決定音洩檢測最高試驗壓力和加壓程序。升壓速度不應大於 0.5MPa/min，持壓時間應不少於 10 分鐘，如果在持壓期間出現持續的音洩訊號且數量較多時，可適當延長持壓時間直到音洩訊號收斂為止。
- (二) 針對新製壓力容器進行音洩檢測，一般在進行耐壓試驗時同時進行，試驗壓力為耐壓試驗壓力。如圖 108 為新製壓力容器的加壓程序。音洩檢測應在達到壓力容器設計壓力的 50% 前開始進行，並至少在壓力分別到達設計壓力  $P_D$  和最高試驗壓力  $P_{T1}$  時進行持壓，之後降壓至設計壓力  $P_D$  後再進行第二次加壓至最高試驗壓力的 97%  $P_{T2}$ 。

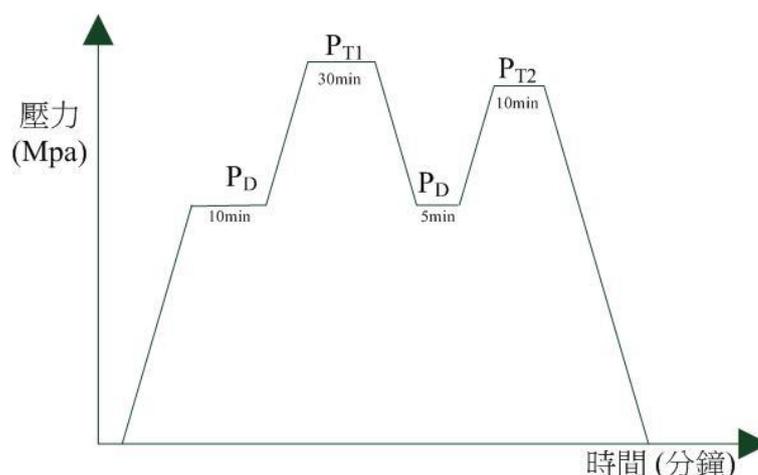


圖 108 新製壓力容器音洩測試加壓程序

(三) 針對操作中壓力容器進行音洩檢測，一般試驗壓力不小於最高操作壓力的 1.1 倍。當操作條件限制音洩檢測所要求的試驗壓力時，其試驗壓力也應不低於最高操作壓力，並在檢測前一個月將操作壓力至少降低 15%，以滿足檢測時的加壓程序需求。如圖 109 為操作中壓力容器的加壓程序。音洩檢測應在達到壓力容器最高工作壓力的 50% 前開始進行，並至少在壓力分別到達最高操作壓力  $P_W$  和最高試驗壓力  $P_{T1}$  時進行持壓，之後降壓至最高操作壓力  $P_W$  後再進行第二次加壓至最高試驗壓力的 97%  $P_{T2}$ 。

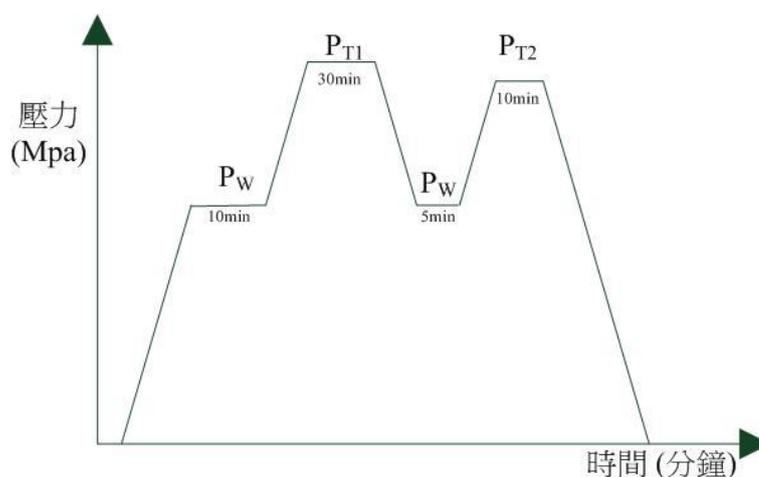


圖 109 操作中壓力容器音洩測試加壓程序

## 七、正式檢測過程

- (一) 設定好音洩檢測參數後並適當調整各通道檢測門檻值，便開始進行檢測。
- (二) 檢測過程所需時間依加壓程序而定。
- (三) 檢測過程可外接一台電腦對音洩檢測系統進行操作、控制、監測。但所有的數據應即時存入檢測系統中。
- (四) 檢測過程中應注意並記錄特殊事件或氣候的變化。

## 第七節 訊號分析與檢測報告

### 一、訊號分析處理

- (一) 壓力容器音洩檢測訊號定位若採用時差定位時，應收集有音洩訊號到達時間之數據，若採用區域定位時，應收集有音洩訊號到達各傳感器的順序。
- (二) 檢測時應觀察音洩訊號撞擊數和定位源隨壓力或時間的變化趨勢，對於音洩源集中出現的部位，應查看是否有外部干擾因素，如存在，應停止加壓並盡量排除干

擾因素。若音洩訊號撞擊數隨壓力或時間的增加而呈現快速增加時，應及時停止加壓，在未查明音洩訊號撞擊數急速增加的原因時，禁止繼續加壓。

- (三) 雜訊主要來自於加壓過程中介質的注入、加壓速率過高、外部機械振動、內部元件或施工架的移動、洩漏、電磁干擾、風、雨等干擾，檢測過程中如遇到過強的雜訊干擾，應停止加壓並暫停檢測作業，待排除噪音干擾後再進行檢測。
- (四) 從檢測數據中標示出檢測過程中出現的雜訊數據，並利用軟體濾波或數據圖形顯示分析的方法，從檢測數據中分離出音洩非相關訊號，依據檢測數據確定音洩相關訊號定位源位置，以上檢測分析資訊應在檢測記錄中註明。

## 二、壓力容器狀態分析評估

- (一) 針對壓力容器進行音洩檢測，音洩定位源的等級根據音洩定位源的活性與強度來綜合評估，評估方法是先確定音洩訊號定位源的活性等級和強度等級，然後再進行綜合評估。

- (二) 活性分級：

以傳感器陣列中最大傳感器間距的 10% 長度為邊長或直徑劃定出正方形或圓形分析區域，落在同一分析區域的音洩定位源事件視為同一區域的音洩定位源事件。若音洩定位源區的事件數隨著加壓或是持壓呈現快速增加時，則認為該部位的音洩定位源具有超強活性；若音洩定位源區的事件數隨著加壓或是持壓呈現連續增加時，則認為該部位的音洩定位源具有強活性；若音洩定位源區的事件數隨著加壓或是持壓呈現間斷增加時，則依照表 6 進行分級。

- (三) 強度分級：

音洩定位源的強度可用能量、振幅或記數參數來表示。音洩定位源的強度計算取音洩定位源區中前 5 個最大的能量、振幅或記數參數的平均值，振幅參數應根據衰減測量結果加以修正，音洩定位源的強度分級參考表 7 進行，表 7 中的 a,b 值應由材料試驗來決定。表 8 是高強度鋼 S490 採用振幅參數區分音洩定位源強度的推薦值。

表 6 兩次加壓程序音洩定位源的活性等級分級表

活性等級	第一次加壓循環		第二次加壓循環	
	加壓	持壓	加壓	持壓
弱活性	x	--	--	--
弱活性	--	x	--	--
弱活性	--	--	x	--
弱活性	--	--	--	x
中活性	x	x	--	--
中活性	--	--	x	X
中活性	x	--	x	--
中活性	--	x	X	--
中活性	x	--	--	x
強活性	--	x	--	x
強活性	x	x	x	--
強活性	x	x	--	x
強活性	x	--	x	x
強活性	--	x	x	x
超強活性	x	x	x	x

備註 1：x 表示加壓或持壓期間有音洩訊號定位源；--表示加壓或持壓期間無音洩訊號定位源。

備註 2：停止加壓 1 分鐘內的訊號記入加壓訊號，1 分鐘後的訊號記入持壓訊號。

表 7 音洩訊號定位源的強度分級表

強度等級	音洩定位源強度 Q
低強度	$Q < a$
中強度	$a \leq Q \leq b$
高強度	$Q > b$

表 8 高強度鋼 S490 採用振幅參數進行音洩訊號定位源的強度分級表

強度等級	振幅 Q, dB
低強度	$Q < 70\text{dB}$
中強度	$70\text{dB} \leq Q \leq 85\text{dB}$
高強度	$Q > 85\text{dB}$

備註：表 7.3 中數據為根據本研究第五章實驗結果而定，傳感器輸出  $1 \mu\text{V}$  為 0dB

(四) 音洩定位源的綜合分級依照下表 9 進行，其中綜合分級為 I 級者不需要進行覆驗；綜合分級為 II 級者可根據壓力容器使用狀況和音洩定位源區域的實際結構來決定是否進行覆驗；綜合分級為 III 級或 IV 級者需要進行其他覆驗，覆驗乃以其他非破壞性檢測技術來進行表面或內部缺陷檢測。

表 9 音洩定位源的綜合等級分級

強度等級	活性等級			
	超強活性	強活性	中活性	弱活性
高強度	IV	IV	III	II
中強度	IV	III	II	I
低強度	III	III	II	I

### 三、檢測報告

(一) 檢測報告至少須包括以下內容

1. 壓力容器名稱、編號、製造廠商、安裝廠商
2. 設計壓力、溫度、內容物、最高操作壓力、材料牌號、設計儲槽壁厚尺寸和幾何尺寸
3. 所使用的檢測設備
4. 壓力容器使用歷史記錄
5. 檢測程序及步驟
6. 檢測時氣候狀況描述
7. 各通道傳感器校準結果
8. 檢測時所採用的門檻值、增益等設定值
9. 背景雜訊設定值

10. 傳感器布陣示意圖及音洩聲源位置示意圖
  11. 加壓程序圖
  12. 檢測結果分析、音洩聲源綜合等級劃分結果
  13. 結論與建議
  14. 檢測日期、檢測人員名單、檢測師簽名
  15. 報告附錄中可包含附加數據及分析處理結果
- (二) 壓力容器檢測報告中應包含二維或三維音洩定位圖，圖中顯示重要結構相對位置、傳感器位置與編號、壓力容器圖形方向以及壓力容器狀態評估等級。

## 第八章 儲槽音洩檢測程序建議指引

### 第一節 總則

#### 一、適用範圍：

本檢測程序建議指引適用於在不開槽情況下，對直徑為 1.0m~115m 常壓儲槽底板腐蝕之音洩檢測。

#### 二、適用時機：

本指引所建議之檢測程序步驟適用於在不開槽情況下進行檢測，但檢測時要求儲槽內容物在靜止狀態下，與儲槽直接相連的泵浦、電機系統等均應處於關閉狀態，檢測時也應在無大風、無雨的氣候條件下進行。

#### 三、參考文獻：

- (一) JB/T 10764-2007 常壓金屬儲罐聲發射檢測及評價方法
- (二) E543 Specification for Agencies Performing Nondestructive Testing
- (三) E650 Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors
- (四) E976 Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
- (五) E1316 Terminology for Nondestructive Examinations
- (六) E2374 Guide for Acoustic Emission System Performance Verification
- (七) Recommended Practice ASNT SNT-TC-1A for Qualification and Certification of Nondestructive Testing Personnel
- (八) ANSI/ASNT CP-189 Standard for Qualification and Certification of NDT Personnel

### 第二節 名詞定義

#### 一、音洩(acoustic emission, AE)：

材料變形產生的彈性波，且快速釋放能量所造成的聲源。

#### 二、活性缺陷(active defect)：

因外部負載作用下而產生瞬態彈性波釋放的缺陷。

#### 三、傳感器(sensor)：

接收音洩波動並轉換為電壓值的壓電元件。

#### 四、 通道(channel)：

單一個音洩傳感器連接至處理、轉換和量測系統的路徑。

#### 五、 音洩活躍度(AE activity)：

測試過程中，音洩訊號隨著負載或時間增加所產生的變化程度。

#### 六、 撞擊(hit)：

訊號振幅超越門檻值到定義撞擊鎖定時間為單一撞擊訊號。

#### 七、 事件(event)：

材料的變形或是機械震盪所造成音洩訊號發生的來源。

#### 八、 能量(energy)：

訊號包絡線以下及低限值以上所涵蓋的面積。

#### 九、 定位(location)：

事件發生的所在位置。

#### 十、 波峰定義時間 (Peak Definition Time, PDT)：

藉由定義一固定的時間區間，在這時間區間內找出起始時間到單一撞擊訊號的最大振幅時間的時間區間，如圖 8.1 可以見到適當的設置 PDT，可以避免當 Hit2 的峰值大於 Hit1 時而定義出錯誤的時間區間。

#### 十一、 撞擊定義時間 (Hit Definition Time, HDT)：

設置單一撞擊訊號最長的拖曳時間，如圖 8.1 所示，可以避免 Hit1 和 Hit2 當成一次撞擊訊號。

#### 十二、 撞擊後鎖定時間 (Hit Lockout Time, HLT)：

如圖 110 所示，此時假設 Hit2 為 Hit1 的反射訊號時，這只能稱為一次音洩事件，為避免造成將反射訊號當成另一事件發生而設定的時間區間。

#### 十三、 門檻值 (Threshold)：

如圖 111 所示，定義為當振幅高於設定的門檻值時才視為有效訊號，並比高於門檻值的時間做為訊號的起始時間；在進行音洩檢測前，可藉由過濾背景雜訊來設定門檻值。

#### 十四、 振幅 (Amplitude, AMP)：

單次撞擊訊號的最大電壓值，即撞擊訊號的最大波峰值。

**十五、平均頻率 (Average Frequency, A-FRQ) :**

定義單次撞擊訊號下，利用計數和時間區間來計算，即撞擊訊號的頻率。

**十六、絕對能量 (Absolute Energy) :**

單次撞擊訊號下包絡線面積。

**十七、平均電壓 (Average Signal Level, ASL) :**

單次撞擊的平均振幅，單位為 dB，即算術平均數。

**十八、計數 (Count) :**

單次撞擊訊號中超過門檻值的數量。

**十九、波峰前計數 (Count to Peak) :**

單次撞擊中到最大峰值前的訊號振盪數量。

**二十、持續時間 (Duration) :**

單次撞擊中大於門檻值到低於門檻值的時間。

**二十一、初始頻率 (Initiation Frequency, I-FRQ) :**

計算單次撞擊訊號中，到最大振幅前的平均頻率，即上升時間的頻率。

**二十二、上升時間 (Rise Time) :**

單次撞擊中到最大振幅前的時間。

**二十三、回響頻率 (Reverberation Frequency, R-FRQ) :**

計算單次撞擊訊號中，最大振幅後到振幅低於門檻值，即鈴流(Ring Down) 訊號頻率。

**二十四、波峰後計數 (Ring Down Count) :**

最大振幅到單次撞擊結束的計數數量。

**二十五、均方根 (Root Mean Square, RMS) :**

訊號的均方根。

**二十六、精準度 (Accuracy) :**

是每一次獨立的測量之間，其平均值與已知的數據真值之間的差距。

**二十七、最高操作壓力 (Maximum Operating Pressure) :**

壓力容器在操作過程中，近六個月內操作過程中使用過的最大壓力。

上述音洩參數在檢測中常用來判定聲源訊號的種類，評估不同聲源產生的訊號特徵

來區分聲源的類型、缺陷嚴重性及定位區域的可信度。常見的訊號區分為突發與連續訊號，其中與時間相關的參數通常被用於突發訊號的判定，而與振幅、能量相關的參數則用於連續訊號的判定，例如；腐蝕與裂痕生長就被歸類於突發訊號，而洩漏或背景雜訊則歸類於連續訊號，依照訊號特性去選擇相對應的參數去進行分析與評估。

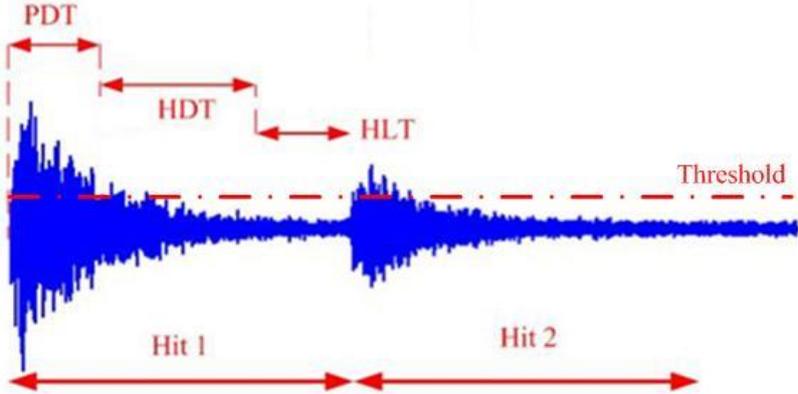


圖 110 聲源定位下撞擊訊號中 PDT、HDT 和 HLT 示意圖

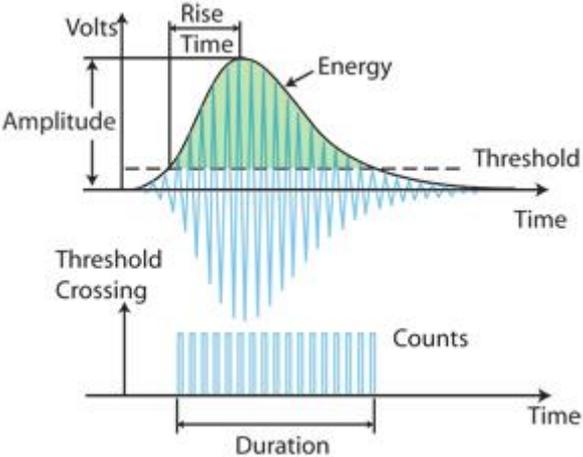


圖 111 聲源為斷芯時的撞擊訊號與時間相關的音洩參數

### 第三節 人員要求

- 一、執行音洩檢測之人員需具備音洩專業教育訓練之受訓證明。
- 二、執行檢測與記錄人員須具音洩檢測初級檢測員(Level I)資格。
- 三、檢測人員應具有 API 653 認識及資格，應接受過非破壞檢測相關認證機構 UT 中級訓練，需做過儲槽底板音洩檢測作業且須具備傳感器校驗能力。

## 第四節 音洩檢測裝備

音洩檢測系統應包括傳感器、前置放大器、系統主機、顯示和儲存裝置。

### 一、傳感器、放大器與訊號線：

傳感器的共振頻率範圍推薦在 100kHz~400kHz 之間，當選用寬帶傳感器（100kHz~1MHz）或高頻帶傳感器（>400kHz）時，應考慮靈敏度降低的因素，以確保高頻帶範圍內有足夠的接收靈敏度。前置放大器短路雜訊有效值電壓不大於 16.9dB (7 $\mu$ V)。在工作頻率和溫度範圍內，前置放大器的頻率響應變化不超過 3dB。前置放大器的頻率響應應與傳感器的頻率響應相匹配，其增益應與系統主機的增益設置相匹配，通常為 40dB 或 34dB。如果前置放大器採用差分電路其共模雜訊應不低於 40dB。傳感器到前置放大器之間的訊號電纜及前置放大器到系統主機之間的訊號電纜應能遮罩電磁噪音干擾，訊號電纜的衰減損失應小於 1dB/30m，訊號電纜長度不宜超過 150m，如果採用更長的電纜線，則需安裝訊號轉發器，以盡量減小訊號的衰減。

### 二、音洩檢測系統基本特性要求：

(一) 音洩系統主機應有覆蓋檢驗區域的足夠通道數，應至少能實時顯示和存儲音洩訊號的參數(包括到達時間、門檻、幅度、振鈴技術、能量、上升時間、持續時間、撞擊數)，宜具有接收和記錄壓力、溫度等外部電訊號的功能。

(二) 採樣頻率：

各個通道的獨立採樣頻率應不低於傳感器響應頻率中心點頻率 10 倍。

(三) 門檻精準度應控制在 $\pm 1$ dB 的範圍內。

(四) 音洩訊號技術測量的精準度應在 $\pm 5\%$ 範圍內。

(五) 短時處理能力：

以訊號撞擊開始算起 10s 之內，音洩系統應對每個通道具有採集、處理、紀錄和顯示不少於每秒 20 個音洩撞擊訊號的短時處理能力；當連續監測時，音洩系統對每個通道在採集、處理、紀錄和顯示過程中應具有處理不少於每秒 10 個音洩撞擊訊號的能力。當出現大量數據以致發生堵塞情況，系統應能發出警報訊號。

(六) 峰值幅度測量值的精準度應在 $\pm 2$ dB 範圍內，同時要滿足訊號不失真的動態範圍

不低於 65dB。

(七) 能量測量值的精準度應在 $\pm 5\text{dB}$  範圍內。

(八) 時差定位音洩檢測系統，每個通道的上升時間、持續時間和到達時間的解析度應不大於  $0.25\mu\text{m}$ ，精準度應在 $\pm 1\mu\text{s}$  範圍內，各通道之間的誤差應不大於平均值  $\pm 3\mu\text{s}$ 。

(九) 電壓精準度：系統測量外接參數電壓值的精準度應不低於 2%。

(十) 音洩訊號收集軟體：

(十一) 應能實即時顯示音洩訊號參數、音洩訊號參數之間和參數隨壓力或時間的關係圖，以及音洩定位源的線定位和平面定位圖，即時顯示的延遲時間應不超過 5 秒。

### 三、耦合劑：

耦合劑應能在試驗期間內保持良好的聲耦合效果。應根據設備壁溫選用無氣泡、黏度適宜的耦合劑。可選用真空脂、凡士林及黃油。檢測奧斯田鐵不銹鋼、鈦和鎳合金時，耦合劑中氯化物、氟離子含量和硫含量應合乎相關法規和標準的要求。

### 四、濾波器：

放置在前置放大器和系統主機處理器內的濾波器的頻率響應應與傳感器的頻率響應相匹配。

### 五、檢測與分析軟體：

音洩檢測軟體應為結合音洩訊號與外部參數訊號擷取、濾波、特徵擷取、訊號處理、波形顯示與音洩訊號座標自動定位的視窗軟體。音洩分析軟體應能重播原始音洩檢測數據，並能根據重新設定的條件對音洩檢測數據進行濾波、定位、聯結和識別等分析處理。

## 第五節 檢測程序

### 一、前置作業：

(一) 在檢測計畫完成後，應提前通知儲槽使用單位在檢測前一天應將內容物注入至正常操作液面的 65%~100%。特殊情況下，液面應不低於 3.5 公尺，並關閉進出口注入孔、加熱器、攪拌器等，使內容物液面至少靜止 12 小時。

(二) 到達現場後應先檢視儲槽與其周邊設備、現場環境等狀況，注意並記錄現場環境的電磁干擾情形、天氣狀況以及周邊設備啟動、關閉與運行之時間點。

(三) 強烈陣風如風速大於 8m/s 時，環境溫度變化過大，強烈陽光照射下等環境氣候條件皆不利於檢測之執行，宜選擇其他時間點再進行檢測。

(四) 檢測前，應先進行儲槽外部狀況之目視檢測，並拍照記錄。

## 二、傳感器安裝與佈陣

(一) 檢測儲槽所用之傳感器數量可依據衰減曲線或儲槽直徑來決定。當採用衰減曲線決定傳感器數量時，衰減曲線分佈可決定二顆傳感器之最大間距，依此間距與儲槽周長來決定佈陣傳感器數量；當採用儲槽直徑來決定傳感器數量時，可依據表 10，針對儲槽底板腐蝕檢測，應設置二排相同數量之傳感器。

表 10 儲槽底板檢測傳感器使用數量

儲槽直徑(m)	傳感器數量
12.5 以下	3x2
12.5~25.0	6x2
25.0~37.5	9x2
37.5~50.0	12x2
50.0~62.5	15x2
62.5~75.0	18x2
75.0~87.5	24x2
87.5~100	28x2
100~115	32x2

(二) 針對小型儲槽(直徑 15 公尺以下)，下排傳感器安裝高度為距離儲槽底板 0.5 公尺；中型儲槽(直徑 15 公尺~50 公尺)安裝高度為 0.75 公尺；大型儲槽(直徑大於 50 公尺)下排傳感器安裝高度應為 1.0 公尺。上排傳感器應安裝於下排傳感器上方 1.5~3.0 公尺處。

(三) 傳感器安裝位置下之儲槽壁板表面需將油漆去除，傳感器安裝時也需使用耦合劑確保壁板表面與傳感器耦合良好，再藉由磁性固定裝置將傳感器固定，如圖 112 所示。



圖 112 音洩檢測系統與傳感器安裝

(四) 傳感器座標原點為底板圓心，傳感器編號由小到大順時鐘排序，傳感器等間距安裝的情況下，根據儲槽的直徑各換能器之座標位置可由音洩軟體自動產生，如下圖 113 所示，安裝後應使用蠟筆或粉筆在傳感器安裝處附近進行編號標示。

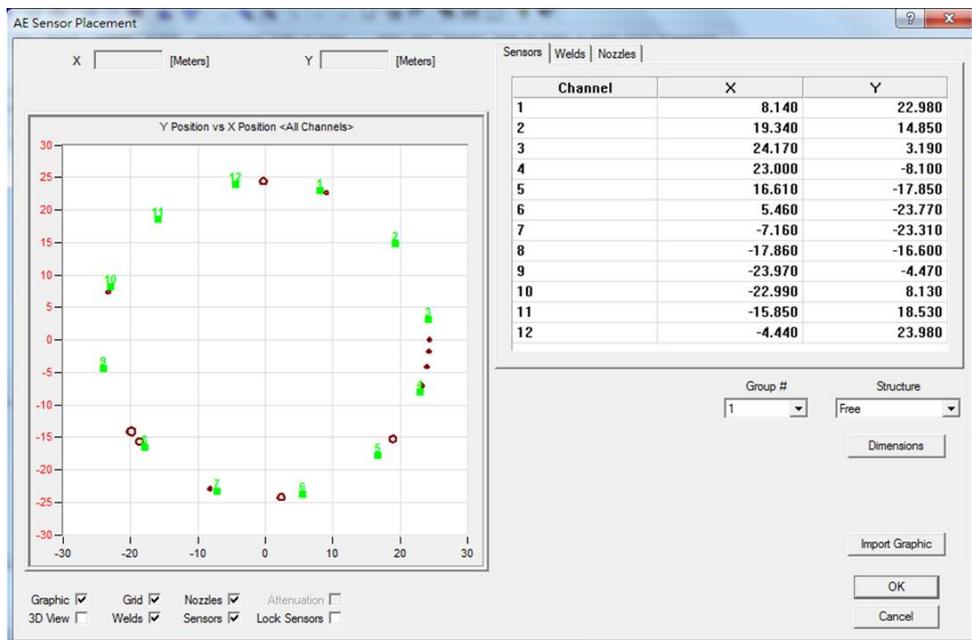


圖 113 12 顆傳感器佈陣於直徑 50 公尺儲槽之範例

- (五) 若儲槽外部具有保溫材料則安裝傳感器位置需將部分包覆材料去除，並將儲槽壁板表面清潔乾淨後再進行傳感器之安裝。
- (六) 傳感器安裝完成後，可將風速計與音洩系統連結，使風速計的記錄與音洩量測時間點同步。

### 三、傳感器安裝校準

- (一) 傳感器安裝後需藉由斷芯方式模擬音洩訊號源，校準各傳感器安裝後之耦合狀況、靈敏度與音洩訊號沿儲槽壁板之衰減特性。斷芯試驗需距傳感器 15~20mm 處進行，訊號門檻值可設定為 60dB，每一傳感器需進行 3 次有效性斷芯試驗，每次斷芯訊號振幅不能低於 75dB，每一通道三次斷芯訊號振幅平均值與所有通道平均值的偏差應不大於 3dB。
- (二) 若斷芯試驗結果未通過者，需重新檢查傳感器之安裝，訊號線連接狀況及音洩系統各通道自身的特性。
- (三) 傳感器斷芯校準記錄應附於檢測報告中。

### 四、檢測參數與圖形設置

- (一) 由音洩檢測系統自動生成傳感器座標值或將量測得到的傳感器座標值輸入檢測系統中。
- (二) 儲槽音洩檢測定位時需輸入音速值，該音速值可由實際量測求得，也可查下表 11 超音波在不同內容傳遞之音速表，查表並輸入。

表 11 儲槽內容物音速表

液體名稱(英)	液體名稱(中)	velocity(m/s)	溫度(°C)
Acetate(butyl)	醋酸鹽(丁基)	1270	26
Acetate(ethyl)	醋酸鹽(乙基)	1180	20
Acetate(methyl)	醋酸鹽(甲基)	1150	25
Acetate(propyl)	醋酸鹽(丙(烷)基)	1180	260
Acetone	丙酮	1190	20
Alcohol(butyl)	丁醇	1270	20
Alcohol(ethyl)	乙醇	1180	20
Alcohol(propyl(i))	異丙醇	1170	20
Alcohol(propyl(n))	-	1220	20
Benzene	苯	1330	20
Castor oil	【藥】蓖麻油	1540	N/A

Fuel oil(diesel)	燃料油(柴油)	1250	N/A
Linalool	芳樟醇	1400	32
Linseed oil	亞麻籽油	1770	32
Motor oil	機油	1740	N/A
Paraffin oil	煤油	1420	34
Petroleum	石油	1290	34
Transfer oil	轉化油	1390	N/A
Water	水	1480	20
Water heavy	重水	1400	25
Sea	海水	1540	

(三) 每一通道需設定帶通濾波器，範圍為 20~100kHz。

## 五、背景雜音檢查

- (一) 在正式收集儲槽音洩訊號前，需使用手提式音洩檢測設備針對儲槽外部各連接部位進行噪音源檢測，如管線振動、閥門洩漏、鄰近大型、重載之交通工具經過等。
- (二) 在排除主要噪音源之後，需檢查背景雜音值以決定各通道最終進行檢測時之訊號振幅門檻值。
- (三) 在可能的狀況下應盡量保持所有通道都使用相同的門檻值。

## 六、正式檢測過程

- (一) 設定好音洩檢測參數後並適當調整各通道檢測門檻值，便開始進行檢測。
- (二) 檢測過程至少需要 2 小時，如果檢測過程中因某些因素而中斷訊號擷取，則檢測時間也應該相對應的延長。
- (三) 檢測過程可外接一台電腦對音洩檢測系統進行操作、控制、監測。但所有的數據應即時存入檢測系統中。
- (四) 檢測過程中應注意並記錄特殊事件或氣候的變化。

## 第六節 訊號分析與檢測報告

### 一、訊號分析處理

- (一) 儲槽腐蝕檢測中的有效訊號源來自於腐蝕過程、腐蝕氣泡、腐蝕雜質剝落等。該等訊號都具有突發脈衝的特徵。

- (二) 雜訊主要來自於鬆動元件、油泵、加熱器、攪拌器等的啟動、停止或運轉，電纜及接頭的噪音，儲槽周邊設備的運轉狀態，現場檢測的電磁干擾和天氣變化等。
- (三) 收集分析音洩訊號與雜訊，雜訊濾波是藉由對音洩參數如振幅、能量、上升時間、持續時間等進行數字邏輯濾波或刪除某段時間的雜訊，檢測期間受到特殊氣候條件及環境影響的數據段。

## 二、儲槽底板狀態分析評估

- (一) 針對儲槽底板腐蝕進行音洩檢測，其檢測結果分別採用音洩聲源時差定位分析與分級方法以及採用音洩聲源區域定位分析與分級方法，若評估結果應從嚴評估，取兩種分級方法結果較大者作為最終音洩聲源分級。
- (二) 針對儲槽底板以不大於直徑 10% 的長度設計正方形或圓形的分析區域，對分析區域內定位相對較集中的所有定位叢集進行局部放大分析並計算出單位小時出現的定位事件數  $E$ 。依據儲槽底板的時差定位分析，對每個分析區域有效音洩聲源級別依照表 12 進行分級。

表 12 儲槽底板基於時差定位分析的音洩聲源分級

聲源級別	分析區域每小時出現的定位事件數 $E$	分析區域的腐蝕狀態評估
I	$E \leq C$	無局部腐蝕現象
II	$C < E \leq 10C$	存在輕微局部腐蝕現象
III	$10C < E \leq 100C$	存在明顯局部腐蝕現象
IV	$100C < E \leq 1000C$	存在較嚴重局部腐蝕現象
V	$E > 1000C$	存在嚴重局部腐蝕現象
備註：表中 $C$ 值以採用相同的檢測設備與設定檢測參數，對相同規格和操作條件相同的儲槽進行一定數量的檢測實驗和開槽驗證實驗取得。		

- (三) 針對儲槽底板進行區域分析定位分級時，計算出各獨立通道有效檢測時間每小時出現的撞擊數  $H$ 。依據儲槽底板的區域定位分析，對每個通道的音洩聲源級別依照表 13 進行分級。

表 13 儲槽底板基於區域定位分析的音洩聲源分級

聲源級別	每個通道每小時出現的撞擊數 H	分析區域的腐蝕狀態評估
I	$H \leq K$	無局部腐蝕現象
II	$K < H \leq 10 K$	存在輕微局部腐蝕現象
III	$10 K < H \leq 100 K$	存在明顯局部腐蝕現象
IV	$100 K < H \leq 1000 K$	存在較嚴重局部腐蝕現象
V	$H > 1000 K$	存在嚴重局部腐蝕現象
備註：表中 K 值以採用相同的檢測設備與設定檢測參數，對相同規格和操作條件相同的儲槽進行一定數量的檢測實驗和開槽驗證實驗取得。		

(四) 依據儲槽底板腐蝕狀態分級結果依照表 14 制定受測儲槽維修計畫。

表 14 音洩聲源活性對腐蝕狀況分析及維修優先順序

聲源級別	腐蝕狀態分級	維修/處理方法
I	正常	無需維修，可於 4-5 年後進行開槽檢測
II	輕度活性腐蝕	近期無需立即維修，可於 2-3 年後進行開槽檢測
III	中度活性腐蝕	若狀況許可，應考慮維修或 1-2 年後進行開槽檢測
IV	高活性腐蝕	維修計畫中度優先考慮
V	極高活性腐蝕	維修計畫中最優先考慮

### 三、檢測報告

(一) 檢測報告至少須包括以下內容

1. 儲槽名稱、編號、製造廠商、安裝廠商
2. 設計壓力、溫度、內容物、最高操作壓力、材料牌號、設計儲槽壁厚尺寸和幾何尺寸
3. 所使用的檢測設備
4. 儲槽使用歷史記錄
5. 檢測程序及步驟
6. 檢測時氣候狀況描述
7. 各通道傳感器校準結果
8. 檢測時所採用的門檻值、增益等設定值
9. 背景雜訊設定值

10. 傳感器布陣示意圖及音洩聲源位置示意圖
  11. 檢測結果分析、音洩聲源綜合等級劃分結果
  12. 結論與建議
  13. 檢測日期、檢測人員名單、檢測師簽名
  14. 報告附錄中可包含附加數據及分析處理結果
- (二) 儲槽檢測報告中應包含二維或三維音洩定位圖，圖中顯示重要結構相對位置、傳感器位置與編號、儲槽圖形方向以及儲槽狀態評估等級。

## 第九章 結論與建議

### 第一節 結論

在計畫時程內本計畫已經完成音洩檢測技術文獻蒐集整理，並進一步以實驗方式探討壓力容器之音洩檢測實驗、儲槽之音洩檢測實驗及高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗，最後經由國外文獻及本次實驗結果參照制訂了壓力容器音洩檢測指引及儲槽音洩檢測指引作為國內未來基於音洩的檢測發展作為依據。

針對壓力容器之音洩檢測實驗乃將音洩檢測技術應用於氣體鋼瓶上，氣體鋼瓶體積不大，可採用二組傳感器進行訊號接收與分析，本文也探討以相位陣列超音波掃描鋼瓶內部腐蝕之檢測模式，以 3D 雷射掃描定量分析鋼瓶外部腐蝕分佈樣貌，為氣體鋼瓶的定期檢測提供了 3 種檢測新技術。

儲槽音洩實驗結果顯示了當儲槽內部為空桶時，音洩訊號乃在金屬板上進行傳遞且衰減超過 10dB/m，當今屬內部注入內容物如水時，底板所產生之音洩訊號將可藉由水路進行傳遞，因此在進行儲槽音洩檢測程序之建立時應將內容物傳遞波速納入考慮，且不同尺寸的儲槽也應考慮傳感器安裝位置距離底板之高度，儲槽直徑尺寸越小傳感器安裝高度應越接近底板，如此音洩訊號定位範圍方能更為準確。

高強度鋼材及銲接之費利西蒂效應試驗結果，費利西蒂三組銲接試片，在 6 段步階式反覆負載力作用下，沒有瑕疵的母材試片在 6 段負載行程中費利西蒂比值皆高於 0.95，然而具有局部瑕疵的橫向銲接試片則在第 5 段行程時費利西蒂比值為 0.9，而縱向銲接試片從射線照相結果可見有大範圍的滲透不足現象，在此 6 段行程負載下，在第 4 段行程費利西蒂比值便下降為 0.92，由此可見，當使用設備平時若固定遭遇往復式之負載時，如起重設備，費利西蒂效應在音洩檢測上可作為判斷是否有活性缺陷存在設備胴體或銲道上之分析方法。

以高強度鋼 SM490 與碳鋼 S400 其靜態拉伸實驗結果，將音洩訊號能量與訊號振幅分布與負載曲線進行比較，在拉伸過程中也發現在彈性變形區音洩訊號主要為凱瑟效應，但在靠近或超過降伏點時便會發生費利西蒂效應，本研究結果也顯示出高能量與低能量音洩訊號之分布時間點以及其相對應之振幅值，針對壓力容器常用的這二種材料，若以音洩進行檢測，依本研究結果數據建議若音洩訊號振幅低於 70dB 者可視為低強度訊號，介於 70dB~85dB 者可視為中強度訊號，若振幅大於 85dB 者則視為高強度音洩訊號，配合音洩訊號活性的評定可進一步規劃受測壓力容器之維修計畫。

藉由實驗結果與文獻查考，本計畫最後分別對壓力容器及儲槽分別建立了二份音洩檢測程序指引。國內目前尚未有關音洩檢測有相關的檢測程序指引，然而對於壓力容器及儲槽業主來說，音洩檢測所帶動的不停爐檢測願景是多年來以來的長期期盼。本計畫所擬定的音洩檢測程序指引雖未經大規模測試或驗證，然而，對於國內方興未艾的壓力容器與儲槽音洩檢測推廣是一個重要的里程碑。

## 第二節 建議

本研究內容針對費利西蒂效應在銲接試片中費利西蒂比值運用於瑕疵定性分析以有初步研究成果，未來可針對音洩檢測技術應用於起重設備之非破壞檢測上，製作與進行多數量銲接試片之費利西蒂實驗，以進一步探討音洩檢測在瑕疵定量分析之可行性，也應針對含瑕疵結構物製作實驗試片，以完整地探討費利西蒂效應在起重設備遭遇反覆性負載時所發生之現象以及音洩檢測之應用；在壓力容器音洩檢測上，可針對目前市面上已有之音洩檢測商業分析軟體 **MONPAC** 等進行國內實用化之瞭解研究。

## 誌謝

本研究計畫參與人員除本所劉助理研究員國青、呂助理研究員紹豪外，另包括台灣金屬材料品管有限公司黃總經理啟貞、李經理秉鴻，與台北科技大學楊教授哲化，謹此敬表謝忱。

## 參考文獻

- [1] M.F. Carlos : *E07.04-Overview of Current and Developing ASTM Acoustic Emission Standards*, J. Acoustic Emission, 28, pp. 229-233, 2010.
- [2] P. Tscheliesnig : *The European Standardisation in the Field of Acoustic Emission Testing*, European NDT Days in Prague 07, pp.277-283, 2007.
- [3] API 579: Fitness-for-Service, American Petroleum Institute (2009)
- [4] BS 7910:2013 : Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures (including Amendment 1), 2014.
- [5] P. Darcis, D. Santarosa, N. Recho and T. Lassen : *A Fracture Mechanics Approach For The Crack Growth In Welded Joints With Reference To Bs 7910, ECF15, Stockholm (SE) 2004.*
- [6] E. Smith : *Kr-Lr failure assessment diagrams as applied to a flaw in the vicinity of a stress concentration : the large Lr regime*, Pressure Vessels and Piping, vol 75, 1998.
- [7] F. M. Burdekin : *The fracture behavior of a welded tubular joint-an ESIS TC1-3 round robin on failure assessment methods Part III-UK BSI7910 methodology*. Engineering Fracture Mechanics, vol.69, pp.1119-1127, 2002.
- [8] JIS B8265 Construction of pressure vessel –General principles, 2003.
- [9] JIS B8266 Alternative standard for construction of pressure vessels, 2003.
- [10] T. L. Anderson and D.A. Osage : *API 579 : a comprehensive fitness-for-service guide*, Pressure Vessels and Piping, vol 77, pp.953-963, 2000.
- [11] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3<sup>rd</sup> Edition*, Taylor and Francis,
- [12] Jung-Suk Lee et al. : *Weld crack assessments in API X65 pipeline : failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties*, Materials Science and Engineering A vol 373,pp.122-130,2004.
- [13] Takuyo KAIDA : *Fitness-For-Service Assessment for Pressure Equipment in Chemical Plants*, Sumitomo Chemical Co., 2009.
- [14] Hideo Kobayashi et al. : *Development of a flaw evaluation handbook of the high pressure institute of Japan*, Pressure Vessels and Piping, vol.77,pp.929-936, 2000.
- [15] Hideo Kobayashi et al. : *Overview of JSME flaw evaluation code for nuclear power plant*, Pressure Vessels and Piping, vol.77,pp.937-944,January
- [16] Hankel, Volker and W. Thelen : *Monitoring Screws Under Tensile Load Using Acoustic*

- Emission Analysis, IEEE Trans. Instr. And Meas., vol. 45(2), pp. 547-550, 1996.
- [17] T. Onishi, Y. Mizatani and M. Mayuzumi : Plastic region bolt tightening controlled by Acoustic Emission Monitoring, J. Acous. Emm., vol. 24, pp. 285-291,2005.
- [18] Y. Du, J. Zhang, and S. Shi : Acoustic Emission of Bolt-Bearing Testing on Structural Composite Lumbers, Wood and Fiber Science, 2014.
- [19] D. Mba : Applicability of acoustic emissions to monitoring the mechanical integrity of bolted structures in low speed rotating machinery: case study, NDT&E Inter., vol. 34(5), pp. 293-300, 2002.
- [20] Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration, API 510, 9<sup>th</sup> Edition, June 2006.
- [21] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec V Article 12, Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing, 2010.
- [22] JIS Z 2342:2002, Method for Acoustic Emission Testing of Pressure Vessels during Pressure Tests and Classification of Test Results.
- [23] EN 14584:2002, Examination of Metallic Equipment during Proof Testing - Planar Location of AE Sources.
- [24] EN 13554:2013, Non-destructive Testing - Acoustic Emission – General Principles.
- [25] ASTM E1139, Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries
- [26] ASTM E1419, Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission
- [27] ASTM E569, Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation
- [28] ASTM E650, Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors
- [29] ASTM E750, Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation
- [30] ASTM E976, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensors Response
- [31] ASTM E1106, Standard Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors
- [32] ASTM E1781, Standard Practice for Secondary Calibration of Acoustic Emission Sensors
- [33] ASTM E1211, Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface-Mounted Acoustic Emission Sensors
- [34] ASTM E1932, Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small parts.
- [35] ASTM E2075, Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response

Using an Acrylic Rod.

- [36] ASTM E2374, Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification.
- [37] Nondestructive Testing Handbook, 3<sup>rd</sup> Edition: Volume 6, Acoustic Emission Testing, “Chapter 8 Acoustic Emission Testing of Pressure Vessels, Pipes and Tanks-Part 1”.
- [38] A.S. Anastasopoulos, D.A. Kourousis, P.T. Cole : *Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels*, TINDT, Iran, 2008.
- [39] NB/T 47013.9-2012, 壓力容器無損檢測第九部分:音洩檢測。
- [40] API 653 Tank Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction.
- [41] EN 15856 Nondestructive Testing – Acoustic Emission – General Principles of AE Testing for the Detection of Corrosion within Metallic Surrounding Filled with Liquid.
- [42] ASTM E1930-97, Standard Test Method for Examination of Liquid-Filled Atmospheric and Low-Pressure Metal Storage Tanks Using Acoustic Emission.
- [43] 翁文宏:音洩技術於地上油槽底板腐蝕檢測之應用,石油季刊,第 42 卷第 1 期第 73~81 頁,中華民國九十五年。
- [44] 沈功田:音洩檢測技術及應用,科學出版社

國家圖書館出版品預行編目資料

起重機旋轉盤螺栓及壓力容器胴體之音洩檢測基本技術建立  
劉國青、黃啟貞著. -- 1 版. --

新北市：勞動部勞研所，民 105.04  
面；公分

ISBN 978-986-04-8483-0(平裝)

1.職業災害 2.勞工安全

555.56

104005882

起重機旋轉盤螺栓及壓力容器胴體之音洩檢測基本技術建立

著（編、譯）者：劉國青、黃啟貞

出版機關：勞動部勞動及職業安全衛生研究所

22143 新北市汐止區橫科路 407 巷 99 號

電話：02-26607600 <http://www.iosh.gov.tw/>

出版年月：中華民國 105 年 3 月

版（刷）次：1 版 1 刷

定價：200 元

展售處：

五南文化廣場

台中市區中山路 6 號

電話：04-22260330

國家書店松江門市

臺北市松江路 209 號 1 樓

電話:02-25180207

- 本書同時登載於本所網站之「出版中心」，網址為：  
<http://www.ilosh.gov.tw/wSite/np?ctNode=273&mp=11>
- 授權部分引用及教學目的使用之公開播放與口述，並請注意需註明資料來源；有關重製、公開傳輸、全文引用、編輯改作、具有營利目的公開播放行為需取得本所同意或書面授權。

GPN: 1010500983

ISBN: 978-986-04-8483-0