

## FRP 壓力容器音洩量測之規範探討

鍾愛

化學工程系

### 摘要

音洩量測(Acoustic Emission)是一種非傳統性的非破壞檢測方法(Nondestructive Test)，探討複合材料(Fiberglass Reinforced Plastic、FRP)壓力容器在使用中對缺陷、裂縫方向位置、與分佈之承受檢測規範。由於其具有偵測正在活動中之缺陷及塑性變形的能力，故在非破壞檢測諸方法中頗具發展的潛力。本研究擬整理一些相關測試規範之測試方法、名詞定義、適用範圍、參數設定、資格限定、測試前準備、音洩探頭選用與安裝、測試設備功能檢查、測試程序(Examination procedure)、測試結果引述解說、測試報告內容等。音洩量測標準在國際上陸陸續續在公布中，本文選擇其中一種代表性規範作介紹，如高壓容器、高壓燃料桶(耐壓接近 10,000psig)等;經由規範詳細介紹，可以提供音洩量測詳細規範要求，經由詳細規範的引述，亦可展現音洩量測的精華，將可對音洩量測技術的引進與推廣提供充足資訊。

### 壹、緒論

#### 一、研究動機

壓力容器是工業界的重要設備，在石油工業、造船工業、火力、水力、核能發電工程、航空工程、海陸工程、海陸探油工程、工業建築工程等，都有舉足輕重的地位。眾所週知，壓力容器常要用來儲存高壓氣體、或具腐蝕性流體，並且受到應力作用，使得容器產生腐蝕、變形、裂縫、脫層、管壁薄化、疲勞及老化等缺陷。這些缺陷會降低容器之強度，甚至造成破裂而導致重大損害及人員傷亡，因此若能準確評估壓力容器中缺陷的特性，當有助於確保整個系統的完整性，以避免重大災害及損失。

音洩量測為動態量測，由於涉及參數眾多，造成量則不易，有些人量測得到足夠資訊，有的人量測不到簡單結果，經過 80 年代與 90 年代的研究發展，某些特定結構物的音洩量測技術獲得穩定的結果，2000 開始陸續有一些測試標準公布，如 ASTM E1067、ASTM E1118、ASTM E650、ASTM E1932、ASTM E1419、ASTM E1888、ASTM E2191 等<sup>[1-7]</sup>。

近年來壓力容器應用領域的不斷擴大，應用環境也越來越苛刻。一些按照常規強度理論設計的壓力容器<sup>[8]</sup>，會在使用期間，甚至在試壓期間，發生突發性的破壞。為何會在沒有超過強度條件的情況下發生斷裂破壞，經歷很長時間的探索。隨著破裂力學的發展逐漸認識到，主要是由於作為設計依據的常規強度理論將材料一律視為理想的均勻連續體(無缺陷)，然事實上，材料在冶鍊、焊接過程中存在缺陷，大量性的災難事故，正式由於缺陷在一定外部條件下的迅速擴展而造成的。因此，常規強度準則並不能完全保證

壓力容器的安全使用，應如何來檢測這些缺陷？這些缺陷的存在對壓力容器的失效方式有何影響？怎樣評定缺陷的危害性？怎樣評定缺陷的容許存在範圍？這些是保證壓力容器安全運行必須考慮的項目。

## 二、研究目的

- (一) 以 ASTM E2191 代表性規範說明高壓力容器如高壓氣瓶(耐壓接近 10,000psig)進行音洩量測之儀器裝置與作法。
- (二) 引進與推廣音洩量測技術，並提供充足資訊，以有效防止非預期之事故、故障，提高工廠運轉率；提供有效評估複材結構安全性方法，以確保與提高設備之信賴性與安全性，降低事故與災害發生。

## 貳、文獻探討

有關壓力容器之非破壞檢驗(nondestructive test)方法甚多<sup>[9-12]</sup>，諸如目視檢測(VT)、液滲檢測(PT)、磁粒檢測(MT)、超音波檢測(UT)、射線檢測(RT)、渦電流檢測(ET)及音洩檢測(AE)等幾種。「非破壞檢測」名詞是相對於「破壞試驗」而來的，破壞試驗如拉力試驗、彎曲試驗、壓力試驗、疲勞破壞極限試驗、顯微鏡金相組織試驗及成分分析試驗等，對材料強度與結構組織的特性之認定較為明確，且具有定值性的意義，在提供加工處理或運作使用中材料強度等變化的分析上，均有相當重要的參考價值；但破壞試驗僅能以抽樣方式實施，不便執行大量或在生產線上，進行立即的百分之百總量檢測，無法滿足品質保證與全面品管的要求目標。甚至對於精密昂貴的高科技產品也較不宜採用破壞試驗，所以，非破壞檢測技術遂逐漸成為揭開材料奧秘的主流方法。非破壞檢測乃是利用物理(或機械)方法，在不破壞材料的情況下，檢測出結構物是否出現缺陷，或探測材料物理或機械性質的檢測技術。從產品的製造使用、保養及維修等過程，都需有一定的監測檢驗程序，以確保各項設備和零件的正常運作。近年來，非破壞檢測已成為壓力容器檢測上最為重要的一個環節，因其在產品製造過程中，可應用於品保檢驗，尤其是重要而需全面檢測的零件；在產品使用中的維修保養過程，可利用其不破壞物件的特性，做為判斷產品堪用性的檢測。

音洩量測技術，是一種動態非破壞檢測技術，涉及音洩量測源、波的傳播、聲電轉換、信號處理、數據顯示與紀錄、解釋與評定等基本概念，基本原理如圖 1 所示。

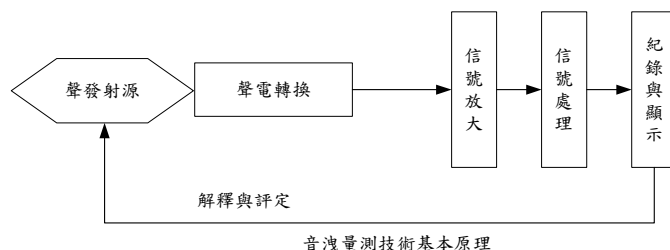


圖 1 音洩量測技術基本原理

音洩量測波的頻率範圍很寬，從次聲頻、聲頻直到超聲頻，可包括數 kHz 到數 MHz；其幅度從微觀的位錯轉動到大規模宏觀斷裂在很大的範圍內變化，按傳感器的輸出可包括數  $\mu V$  到數百  $mV$ ，不過多數為止能用高靈敏傳感器才能探測到的微弱振動。用最靈敏的傳感器，可探測到約為  $10^{-11} mm$  表面振動。

音洩量測源發出的彈性波，經介質傳播到達被檢體表面，引起表面的機械振動。音洩量測傳感器將表面的瞬態位移轉換成電信號。音洩量測信號在經放大、處理後，其波形和特性參數被紀錄與顯示。最後，經數據的分析與解釋，評定出音洩量測源的特性。

音洩量測檢測的主要目標是：(1)確定音洩量測源的部位；(2)鑑別音洩量測源的類型；(3)確定音洩量測聲生的時間和載荷；(4)評定音洩量測源的重要性；(5)評估整體壓力容器結構安全性。一般而言，對超過標準音洩量測源，要用其他非破壞檢測方法進行局部復檢，來精確確定缺陷的性質與大小。

### (一) 音洩量測技術的特點

與其他非破壞檢測相比，音洩量測技術具有兩個基本差別：(1)檢測動態缺陷，如缺陷擴展，而不是檢測靜態缺陷；(2)缺陷的信息直接來自缺陷本身，而不是靠外部輸入掃描缺陷。這種差別導致該技術具有以下優點和侷限性。

#### 1. 優點

- (1) 可檢測對結構安全更為有害的活動性缺陷。能提供缺陷在應力作用下的動態信息，適於評價缺陷對結構的實際有害程度。
- (2) 對大型構件，可提供整體或大範圍的快速檢測。由於不必進行繁雜的掃描操作，而只要佈置好足夠數量的傳感器，經一次加載或試驗過程，就可確定缺陷的部位，從而省工、省時、易於提高檢測效率。
- (3) 可提供缺陷隨載荷、時間、溫度等外部變量而變化的即時或連續信息，因而適用於運行過程在線上監控及早期破壞預測。
- (4) 由於對被檢件的接近要求不高，而適於其他方法難以或不能接近環境下的檢測，如高低溫、核輻射、易燃、易爆及劇毒等環境。
- (5) 於由對構件的幾何形狀不敏感，而適於檢測其他方法受到限制的形狀複雜的構件。

#### 2. 侷限性

- (1) 音洩量測特性對材料甚為敏感，又易受到機電噪音的干擾，因而對數據的正確解釋要有更為豐富的數據庫和現場檢測經驗。
- (2) 音洩量測檢測，需要適當的加載程序且一般僅有一或二次加載檢測的機會。多數情況下，可利用現成的加載條件，但有時還需要特殊準備。
- (3) 音洩量測檢測所發現缺陷的定性定量，有時需依賴於其他非破壞檢測方法。

由於上述特點，現階段音洩量測技術主要用於：(1)其他方法難以或不能適用的環境與對象；(2)重要構件的綜合評價；(3)與安全性和經濟性關係重大的對象。因此，音洩量測技術能夠提供傳統的 NDT 方法所不及，是一種新的補充手段，但仍有些音洩訊息尚未充分了解，仍有繼續開發的空間。

## (二) 影響音洩量測特性的因素

音洩量測來自材料的變形與斷裂機制，因而所有影響變形與斷裂機制的因素均構成影響音洩量測特性的因素，主要包括：

1. 材料，包括成分、組織、結構，例如進屬材料中的晶格類型、晶粒尺寸、夾雜、缺陷，複合材料中的基材、增強劑、界面、纖維方向、脫層殘餘應力等。
2. 試件，包括尺寸與形狀。
3. 應力，包括應力狀態、應變率、受載歷史。
4. 環境，包括溫度、腐蝕介質。

這些因素對合理選擇檢測條件、正確解釋檢測結果，均為需要考慮的基本問題。

因此，非破壞檢測和傳統破壞性檢測的不同之處，乃在於非破壞檢測著重於預防性檢測，以及缺陷檢測為主，以便能事先將缺陷組件予以修復或更換，而有效降低設備操作的失事率。而不同材料特性與形狀會影響非破壞檢測的準確性和靈敏度，故各檢測方法在使用上，也會有若干不同的限制條件。所謂非破壞檢測乃是利用物理或機械方法，在不破壞結構物的情況下，檢測出材料是否出現缺陷，或探測材料之物理或機械性質的檢測技術，大部份包含以下共同元件：(1)探測能量及探測介質形式；(2)偵測變異的裝置；(3)指示變異的裝置；(4)觀察及／或記錄其指示的裝置。上述的非破壞檢驗技術中除音洩量測(AE)外，多半僅能進行局部檢驗，因此對需整體設備的全域檢驗不但費時耗工，更容易產生量測時人為之誤差。

本研究擬以音洩量測非破壞檢驗方法，探討複合材料(FRP)壓力容器在使用中對缺陷、位置、與分佈之檢測規範。音洩檢測其實是一種非傳統性的非破壞檢測方法，由於其具有偵測正在活動中之缺陷及塑性變形的能力，故在非破壞檢測諸方法中頗具發展的潛力。基本上，音洩是材料內部能量快速釋放，而產生暫態應力波的一種現象。它是一種自發的現象，像是樹枝折斷、骨骼斷裂及岩石破裂等情況均會產生音洩。今日的音洩技術是起源於德國的 Joseph Kaiser (1950)，而音洩技術成為一種重要的非破壞檢測方法則是在 1960 年代以後才形成的趨勢。由於音洩訊號在狀況發生時會立即產生，故極適用於即時或連續監測之工作上。並且該訊號形式與訊號源的機制息息相關，因此可用以評估一些關鍵參數，如裂紋大小等。與傳統之非破壞檢測方法相比較，此法主要的優點是其不須預先知道裂縫確切的位置即可進行檢測。同時，由於壓力容器設備最常見的缺陷大多是由螺栓孔焊接缺陷或應力腐蝕等起始的裂紋，而偵測上這類缺陷的難度非常高，且要求也很嚴格，但對預防材料疲勞及裂紋成長會造成工安事故上卻非常重要。故針對使

用中壓力容器之關鍵性零件進行音洩偵測，將是頗具前景的技術發展領域。

### 參、研究方法

複合材料為非均質性材料，細觀損傷理論及破裂演化過程極其複雜<sup>[13]</sup>，給複合材料性能研究工作帶來很大的難度。幾十年來，大批學者在這方面做了許多理論性研究工作。Bailey等分析了對稱鋪設層板在單項拉深負載作用下內部基體裂紋間距和軸項剛度的關係<sup>[14]</sup>；Laws等人通過自相容方法和經典層合板理論，導出任意鋪層層板和細觀損傷的關係式<sup>[15]</sup>；Rosen提出鏈式模型，利用統計方法研究層板強度和纖維斷裂的關係<sup>[16]</sup>；還有許多研究者提出了另外一些理論和方法，研究基體斷裂演化、界面失效、分層及各種損傷模式相互作用對材料性能的影響<sup>[17-22]</sup>。儘管研究理論、模型和方法眾多，但多數是對一些理想化損傷模式下的材料剛度、強度等性能進行分析論證。這些研究結論涉及的材料參數較多，既不易被實驗驗證，更不易被工程應用。因此，目前工程上仍多採用金屬材料結構檢測方法檢驗複合材料結構強度，但金屬材料與複合材料在損傷破壞過程存有相當的差異性，若複合材料在設定壓力下通過水壓實驗測試，仍無法代表該項設備可滿足工作壓力需求，一者是因水壓檢驗對複合材料結構造成大量內部損傷，另者是因檢驗壓力過高影響複合材料優良性能的發揮。

音洩(AE)是自然普遍存在的一種物理現象，指物體由於局部應變能快速釋放而發出彈性波的過程。利用機電轉換接收儀器和電腦運算，將釋出彈性波進行接收、紀錄、處理和分析技術即為音洩量測技術，此為近年來迅速發展起來的一種動態損傷檢測技術，廣泛應用於航空、核能、冶金、石化、地質、建築和醫學等領域。利用音洩量測技術，可以接收到來自複合材料負載過櫃程中的纖維斷裂、基體斷裂、界面剝離和分層等主要破壞訊息，這些微觀破裂訊號不同，發射的音洩訊號議會不同。在國內外文獻中，學者們嘗試運用各種方法來接收複合材料微觀損傷信號、分析信號的數值參數特徵。其中，採用音洩事件幅值、延時、能量和上升斜率來表徵不同損傷模式，採用事件技術過程曲線、幅值分布研究損傷理論特性，這些方法和結論對深入研究複合材料微觀損傷過程及監控複合材料結構承載可靠性提供了有效途徑，亦是近年複合材料檢測研究的熱門課題之一。

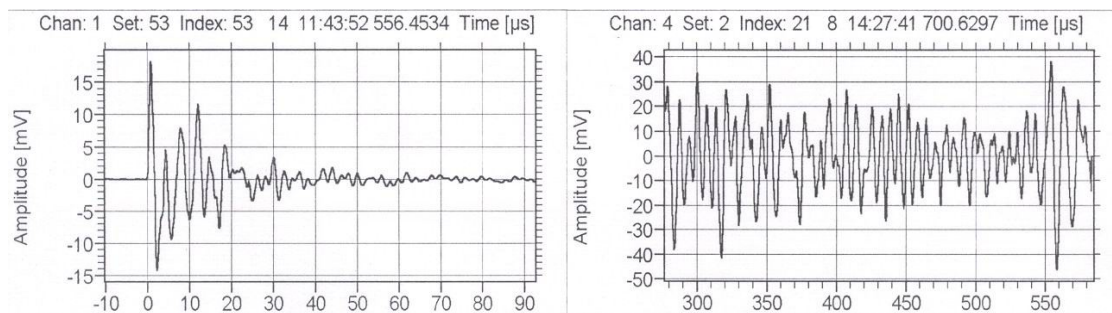


圖 2. 複合材料音洩訊號

複合材料微觀損傷的音洩特徵是突發型的，形成時域上可分離的斷續訊號，如圖 2 所示。

複合材料的破壞和金屬材料明顯不同。金屬結構材料通常從單個裂縫萌生、擴展和失穩發展到最後失效。複合材料破壞是從區域內細裂紋列溫文的累積開始的，而不是單個缺陷的擴展過程。隨著負載的變化，複合材料內部不斷發生纖維斷裂，基體開裂、界面分離和分層破壞，這些損傷類型相互作用，相互影響，產生十分豐富的音洩訊號。利用各種複合材料事件研究不同損傷類型的音洩訊號特徵是一個有效的途徑，具體過程是對事件進行加載，利用傳至於物體表面的傳感器接收材料內部損傷信息，傳感器將接收到的波形轉換成電信號，再經信號放大器處理放大，濾波器濾除背景噪音後由計算機處理行程各種音洩信號參數，如圖 3 所示。

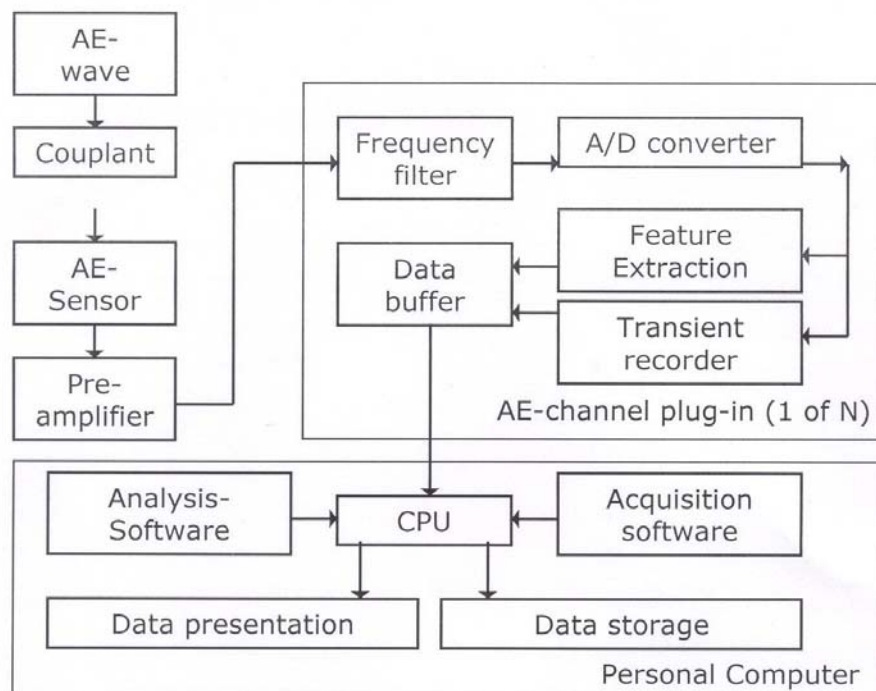


圖 3 音洩量測(AE)檢測流程圖

本文選擇其中一種複合材料壓力容器表性規範(ASTM E2191)作一介紹，其適用於 10,000psi(689 Bar)以下常見能源與運輸儲存槽如 FRP 高壓氣瓶等，經由此種 ASTM 規範詳細介紹，可以提供音洩量測詳細規範要求，經由詳細規範的引述，亦可展現音洩量測的精華，將可對音洩量測技術的引進與推廣提供充足資訊。

## 1. 範圍

- 1.1. 本標準規定了複合材料(Fiberglass Reinforced Plastic, Composite pressure vessels)壓力容器在壓力試驗時的音洩量測檢測及結果評價方法，如車輛裝載的天然氣儲存槽。
- 1.2. 本標準適用於複合材料(FRP)壓力容器在內含壓力(internal pressure)為 10000psi(689

Bar)壓力下、內含容積小於  $2.5\text{ft}^3(0.07\text{m}^3)$  下進行的音洩量測。

- 1.3. 本標準適用壓力容器的測試溫度為  $70^\circ\text{F}(21^\circ\text{C})$  以上。
- 1.4. 本標準採用英制單位表示，括號內為 SI 制單位。

## 2. 引用標準

下列標準所包含的條文，透過在本標準中引用而構成為本標準的條文。在標準出版時，所示版本均為有效。所有標準都會被修訂，使用本標準的各方應探討使用下列標準最新版本的可能性。

- 2.1. E543 無損檢測之測試(nondestructive test)
- 2.2. E976 音洩探頭反應之再現性規範
- 2.3. ANSI/AGA/NGV2 高壓天然氣車輛(NGV)之燃料儲槽的美國國家標準

## 3. 定義

本標準採用下列定義。

### 3.1 凱塞效應(Kaiser Effect)

材料的受載歷史，對重複加載音洩量測特性有重要影響。重複載荷到達原先所加最大載荷以前不發生明顯音洩量測，這種音洩量測不可逆性質稱為凱塞效應。多數金屬材料中，可觀察到明顯的凱塞效應。但是重複加載前，如產生新裂紋或其他可逆音洩量測機制，則凱塞效應會消失。

凱塞效應在音洩量測技術中有著重要用途，包括：(1)在役構件新生裂紋的定期過載音洩量測檢測；(2)岩體等原先所受最大應力的推定；(3)疲勞裂紋起始與擴展音洩量測檢測；(4)通過預載措施消除加載銷孔的噪音干擾；(5)加載過程中常見的可逆性摩擦噪音的鑑別。

### 3.2 費利西蒂效應和費力西蒂比(Felicity Effect and Felicity ratio)

材料重複加載時，重複載荷到達原先所加最大載荷前發生明顯音洩量測的現象稱為費利西蒂效應，也可認為是反凱塞效應。重複加載時的音洩量測起始載荷( $P_{AE}$ )對原先所加最大載荷( $P_{max}$ )之比( $P_{AE}/P_{max}$ )，稱為費利西蒂比。

費利西蒂比做唯一種定量參數，較好地反應材料中原先所受損傷或結構缺陷的嚴重程度，已成為缺陷嚴重性的重要評定判據。費利西蒂比等於 1 表示凱塞效應成立，而小於 1 則表示不成立。在一些複合材料構件中，費利西蒂比小於 0.95 常作為音洩量測超標的重要判據。

### 3.3 活度 activity

音洩量測源的事件數隨著加壓過程或時間變化的程度。

### 3.4 強度 intensity

音洩量測源的事件所釋放的平均彈性能。

### 3.5 音洩量測撞擊數 AE Hits

音洩量測發射信號超過預置閾置的次數。

### 3.6 事件持續時間

一個 AE 事件所經歷的時間叫事件持續時間。事件持續時間的長短反應了音洩量測事件規模的大小。

### 3.7 上升時間

震盪曲線與門檻值的第一個交點到最大幅值得所經歷的時間稱為 AE 信號的上升時間。上升時間的大小反應了 AE 事件的突發程度。

## 4. 設備

4.1 音洩量測之標準裝置如圖 4 所示，各項標準規格如附錄 A1。

4.2 以耦合劑接合音洩探頭與壓力容器表之面。

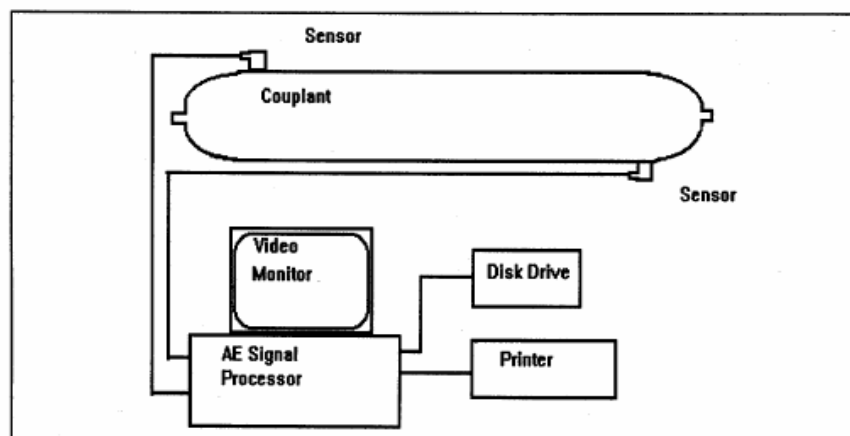


FIG. 1 Essential Features of the Apparatus

圖 4 音洩量測之標準裝置

4.3 探頭須以彈性繃帶、黏著膠帶或機械方法固定。

4.4 小型容器(可以二個音洩探頭測試 100% 容器表面)的探頭位置，為置於容器上下間隔



180°之兩側。

4.5 大型容器(無法以二個音洩探頭測試 100%容器表面)的探頭位置，為置於容器壁作測量，探頭之間隔距離由訊號衰減特性決定之。

## 5. 檢測程式

### 5.1 資料審查

資料審查應包括下列內容：

- 產品合格証、質量證明書、竣工圖。
- 營運記錄，開泊車記錄，有關營運參數，介質成份，載荷變化情況，以及營運中出現的異常情況等資料。
- 檢驗資料、歷次檢驗報告和記錄。
- 有關修理和改造的文件。

### 5.2 技術準備

檢測開始前，應作好以下準備工作：

- 現場勘察，找出所有可能出現的噪聲源，如電磁干擾、振動、摩擦和流體流動等。應對這些噪聲源設法予以排除，若未能移除時需詳細記載於測試報告。
- 檢測容器外部表面，觀察細節可參考檢測報告(CGA 手冊 C-6.4)
- 聯接管路，排除因連接產生的洩露。
- 調整訊號處理器。
- 確定加壓程式，容器加壓程序可分為快速填充及慢速填充二種(參考附錄 A2 及 A3)。
- 確定監視器功能，數據以 AE 活性對時間或壓力坐圖呈現。如有不正常反應應即刻停止加壓並調查原因。
- 儲存所有數據，當壓力到達 AE 測試壓力值時即停止測試。
- 建立音洩量測檢測人員和加載人員的聯絡模式。
- 確定換能器陣列。
- 換能器應直接耦合在容器或管道的表面或與容器或管道構成整體的波導杆上，並保證聲耦合良好。

### 5.3 校準

#### 5.3.1 類比源

用類比源校準檢測靈敏度。類比源應能重復發出彈性波。可以採用音洩量測信號發生器作為類比源；也可以採用  $\Phi 0.3\text{mm}$ ，硬度為 2H 的鉛筆芯折斷信號作為類

比源。鉛芯伸出長度約為 3.0mm，與容器或管道表面夾角為 30°左右。其對應幅度值應取三次以上附平均值。

### 5.3.2 處理器校準

檢測應對信號處理器進行校準，檢查每個通道是否正常。

### 5.3.3 通道靈敏度校準

在檢測開始之前和結束之後應進行通道靈敏度的校準。要求對每一個通道進行類比源音洩量測幅度值附應校準。類比源距換能器 100mm 內，每個通道附應的幅度值與所有通道的平均幅度值之差要求不大於 4dB。

### 5.3.4 衰減測量

應進行與音洩量測檢測條件相同的衰減特性測量。如果已有檢測條件相同的衰減特性數據，可不再進行衰減特性測量，但要求把該衰減特性數據移植到本次檢驗報告中。

### 5.3.5 定位校準

在被檢測區域陣列的任何部位，音洩量測類比源產生的信號至少能被該時差定位陣列收到，並得到唯一定位結果，區域定位時至少能被該區域換能器接收到。

### 5.3.6 音洩量測源部位校準

需進一步確認的音洩量測源都應透過校準來確定音洩量測源部位。校準方法是在容器或管道器壁上某位置發射一個類比源，若得到的定位顯示與檢測到的音洩量測源部位顯示一致，則該類比源的位置為檢測到的音洩量測源部位的位置。

## 5.4 檢測

5.4.1 檢測時應觀察音洩量測撞擊數隨載荷或時間的變化趨勢，音洩量測撞擊數隨載荷或時間的增加呈快速增加時，應及時停止加載，在未查出音洩量測撞擊數增加的原因時，禁止繼續加壓。

5.4.2 檢測中如遇到強噪聲干擾時，應暫停檢測，排除強噪聲干擾後再進行檢測。

### 5.4.3 加壓程式

5.4.3.1 應根據有關規範與用戶協商確定最高試驗壓力和加壓程式。升壓速度一般不應大於 200psi/min。保壓時間一般應不小於 10min。

5.4.3.2 新製造壓力容器或壓力管道和在役壓力容器或壓力管道檢測，一般應進行兩次加壓循環過程，第二次加壓循環最高試驗壓力  $PT_0$  應不超過第一次加壓循環的最高試驗壓力  $PT$ ，建議  $PT_0$  為  $97\%PT$ 。

5.4.3.3 在役壓力容器或壓力管道檢測，一般試驗壓力不小於最大操作壓力的 1.1 倍；當工藝條件限制音洩量測檢測所要求的試驗壓力時，其試驗壓力也應不低於最大操作壓力，並在檢測前一個月將最大操作壓力至少降低 15%，以滿足檢測時的加壓循環需要。應儘可能進行兩次加壓循環。

#### 5.4.4 背景噪聲

5.4.4.1 加載檢測前，應進行背景噪聲的測量，建議檢測背景噪聲的時間不少於 15min。如果背景噪聲大於所設定的閾值時，應設法消除背景噪聲的干擾或中止檢測。

5.4.4.2 加壓過程中，應注意下列元素對檢測結果的影響：

- 介質注入容器或管道；
- 加載速率過高；
- 機械振動；
- 電磁干擾；
- 天氣情況，如風、雨的干擾；
- 洩漏。

#### 5.5 檢測記錄

5.5.1 檢測記錄的主要內容按 6 列出的內容進行。

5.5.2 檢測記錄和音洩量測數據應至少保存 7 年。

5.5.3 檢測時如遇不可排除元素的噪聲干擾，如風、雨和洩漏等，應如實記錄，並在檢測報告中註明。

### 6. 報告

6.1 每次測試結果均需紀錄於下來，記錄資料應包括下列內容：

6.1.1 壓力容器與載運車輛之編號及持有人。

6.1.2 測試日期及地點。

6.1.3 前次測試日期及前次測試之最大壓力值。

6.1.4 紀錄所有印製在容器上的資訊。

6.1.5 一般填充壓力及額定壓力。

6.1.6 加壓介質。

6.1.7 初始壓力值。

- 6.1.8 測試者簽名。
- 6.1.9 繪圖表示容器之相對位置及音洩探頭位置。
- 6.1.10 前測試與後測試之結果。
- 6.1.11 目視結果。
- 6.1.12 AE 測試結果。

## 附錄 A

### A1. 測試設備規格

#### A1.1 換能器

換能器的諧振頻率推薦在 20~1200kHz 範圍內，其靈敏度不小於-77dB[相對於 1V/( $\mu$ bar)]。應能屏蔽無線電波或電磁噪聲干擾。換能器在檢測帶寬和使用溫度範圍靈敏度變化應不大於 3dB。換能器與被檢容器表面之間應保持電絕緣。

#### A1.2 信號線

換能器到前置放大器之間的信號電纜長度應不超過 6 ft，且能夠屏蔽電磁干擾。

#### A1.3 信號電纜

信號電纜應能屏蔽電磁噪聲干擾。信號電纜衰減損失應小於 3dB。信號電纜長度建議不超過 150m。

#### A1.4 耦合劑

耦合劑應能在試驗期間內保持良好的聲耦合效果。應根據容器壁溫選用無氣泡、黏度適宜的耦合劑。可選用真空脂/凡士林及黃油。

#### A1.5 前置放大器

前置放大器短路噪聲有效值電壓不大於 7 $\mu$ V rms。在工作頻率和在工作溫度範圍內，前置放大器的頻率附應變化不超過  $\pm$ 1dB。

#### A1.6 濾波器

放置在前置放大器和處理器內的濾波器的頻率附應須與換能器的頻率附應一致。

#### A1.7 主放大器

主放大器的增益應是線性的。在 40~100°F 溫度範圍內其線性變化應控制在  $\pm$ 2dB 之內。

## A1.8 處理器

A1.8.1 處理器是一些信號處理電路。能夠對來自諸換能器的信號進行采集、處理，並能輸出每個通道的計數、幅度及到達時間等參數。

A1.8.2 儀器的閾值精度應控制在 $\pm 2\text{dB}$  範圍內。

A1.8.3 處理器內的計數電路對越過閾值的聲發射信號計數測量值的精度應控制在 $\pm 5\%$  範圍。

A1.8.4 處理器內的幅度測量電路測量峰值幅度值的精度為 $\pm 2\text{dB}$ 。

A1.8.5 處理器內的能量測量電路測量信號能量值的精度為 $\pm 10\%$  energy counts。

## A2. 快速填充壓力程序

A2.1 快速填充壓力的速率為  $200\text{psi}/\text{min}$  ( $14\text{bar}/\text{min}$ )，可能產生流動噪音。

A2.2 加壓程序中的持壓時間不易產生流動噪音，此時需持續監測並記錄所有數據。

A2.3 開始時的持壓時間所測得的數據作為背景噪音之基準值(如圖 A2.1-a 所示)，最後數據分析時需扣除背景噪音值。

A2.4 中間每一階段之持續時間皆為 2min( 圖 A2.1-b,c,d)。

A2.5 最後持壓時間為 10min(圖 A2.1-e)。

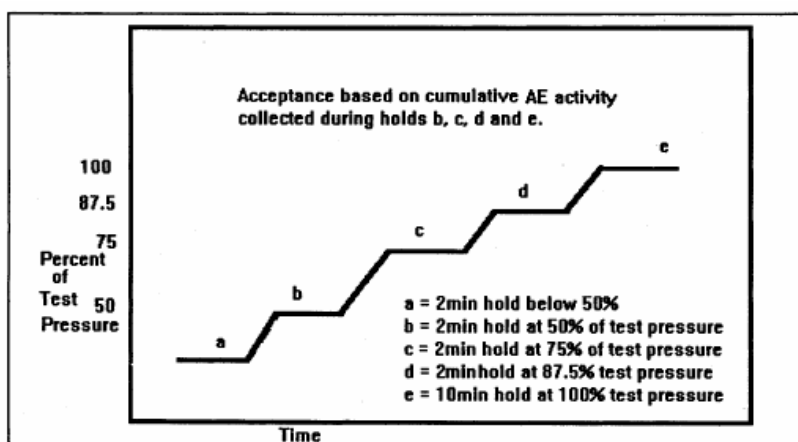


FIG. A2.1

## A3. 慢速填充壓力程序

A3.1 慢速填充壓力程序所產生的噪音較低。

A3.2 開始時的持壓時間所測得的數據作為背景噪音之基準值(如圖 A3.1-a 所示)，最後數據分析時需扣除背景噪音值。

A3.3 中間每一階段之持續時間皆為 2min( 圖 A3.1-b)。

A2.5 最後持壓時間為 10min(圖 A3.1-c)。

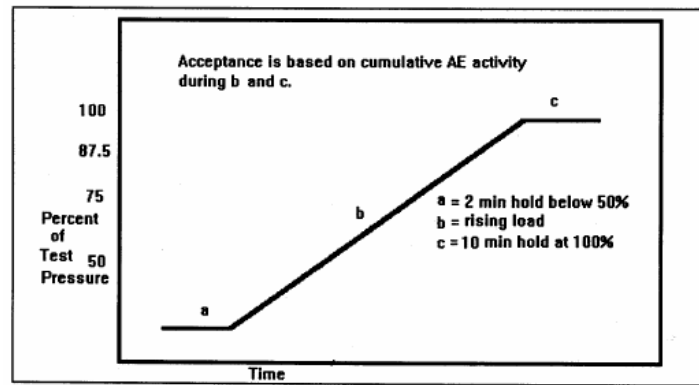


FIG. A3.1

## 肆、結果與討論

表一 音洩測量裝置、特性與設定條件

|   |   |
|---|---|
| Sensor Resonance  | 150kHz $\pm$ 50kHz                                |
| Sensor Sensitivity  | -77db ref. 1V/ $\mu$ bar at 150 kHz               |
| Sensor Placement  | On Composite overwrap                             |
| Couplant  | Silicone grease or hot-melt glue                  |
| Preamplifier Gain   | 40 dB(x100) (nominal)                             |
| Preamplifier Filter   | 100 to 200 kHz bandpass minimum                   |
| Power/Signal Cable Length   | <500 ft (150 m)                                   |
| Signal Processor Threshold  | 40 dB(0 dB=1 $\mu$ V at the preamplifier input)   |
| Signal Processor Filter   | 100 to 300 kHz bandpass                           |
| Dead Time   | 1 ms  |
| Hit Definition Time   | 400 $\mu$ s                                       |
| Hit Lockout Time  | > 200 $\mu$ s                                     |
| Background Noise  | <27 dB( 0dB= 1 $\mu$ V at the preamplifier input) |
| System Performance Check<br>Using Lead Break<br>(0.3mm ,2H.> 4 in. from sensor)<br>see Guide E976 | >70 dB(0dB= 1 $\mu$ V at the preamplifier input)  |

本規範以計數(counts)為例說明計數作為參考合格標準時，音洩量測之儀器裝置及作法：

1. 合格標準計數(counts)之資料庫可參考 NGV2-2 燃料儲存容器數據。
2. 測試壓力為容器使用壓力之 110 % (一般為填充壓力之 110%)。
3. 測試前容器內的壓力需在 1000psi(69bar)以下維持 8h。
4. 檢測所有可能引起洩漏的裂縫。
5. 以“AE 計數”為主的合格標準可參考術語 E 1316。
6. 合格標準：

- 6.1 如果計數(counts)測定值門檻(threshold)大於 10,000 即符合標準。
  - 6.2 如果計數測定值門檻介於 10,000 至 50,000 之間，需重作一次音洩量測。若重測值高於 10,000 以上，檢測操作需持續追蹤 1 年。
  - 6.3 如果計數測定值門檻大於 50,000 時需立刻重作一次，如重作後仍高於 50,000 時須停止使用該壓力容器。
7. 上述之合格標準適用於快速與慢速加壓程序。
  8. 音洩測量裝置、特性與設定條件如表一所示。
  9. 從事音洩量測的檢測人員資格須遵照 ANSI/ASNT-CP-189 要求。

## 伍、結論

複合材料高壓氣體壓力容器已被廣泛應用於運送與儲存液體或高壓氣體，在長期負載作用及環境影響下，使設備構件產生疲勞老化或部位劣化等問題，導致對整體結構安全產生相當大的影響。因高壓氣體壓力容器為集中處理、儲存高能量物質故具有極高危險性，而其內容物外洩時更易導致二次災害，例如處理、儲存高壓氣體石化工業的塔槽、儲槽、液化石油氣槽車、反應爐，因有些高壓氣體具有可燃性、劇毒性或是有高爆炸範圍等特性，一旦發生事故，其所引起災害造成之危害甚大。俗稱的「材料劣化」不一定有很明確的定義，特別是在現代化、多樣化的化學工廠，高壓氣體設備之材料劣化程度，受到該設備製程的作業條件、環境（溫度、濕度、壓力）及所處理物質的影響。

國內的高壓氣體設備檢查已經超過 20 年，直到最近現行此類壓力容器之檢查仍然在單機檢查階段，此類的檢查幾乎是做內部檢查，受檢的事業單位幾乎需要花三個月時間去準備，接受檢查機構之定期檢查，因為在這段期間，必須停止運轉中的設備，待期內部壓力下降，吹淨與冷卻後，檢查人員方能進入設備內部檢查，很花費人力與大筆的費用。通常，設備檢查方法為將工廠設備停止後進行檢查，可以大致區分為所謂的停機檢查(Shut down inspection ; SDI )，與工廠運轉中之檢查，即所謂的不停爐(或稱為不停機檢查，On stream inspection; OSI)兩種，而音洩量測為 OSI 法中常見方法之一；，因此，為保障勞工安全及保障社會民眾生命財產安全，本研究乃針對高壓氣體 FRP 壓力容器音洩量測之規範作詳細探討，以 ASTM E2191 代表性規範說明高壓容器如高壓氣瓶(耐壓接近 10,000psig)進行音洩量測之儀器裝置與作法，本研究經由整理一些相關測試規範之測試方法、名詞定義、適用範圍、參數設定、資格限定、測試前準備、音洩探頭選用與安裝、測試設備功能檢查、測試程序、測試結果引述解說、測試報告內含等其中包含測試前準備、測試方法與程序，及測試後結果及如何評估、音洩量測報告必備內容項目、規範中文化、測試指引(Guide line)等，使初學者與工程師量測有所依循與學習階梯。經由本研究詳細介紹，此不僅提供複合材料壓力容器音洩量測詳細規範要求，亦可展現音洩量測的精華，將可對音洩量測技術的引進與推廣提供充足資訊，有效防止非預期之事故、故障，提高工廠運轉率；減少大修期間之延長，減少設備備品庫存量以降低保養費用；以確保與提高設備之信賴性與安全性，降低事故與災害發生。

## 參考資料

- 1.ASTM E1067、Standard Practice for Acoustic Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin(FRP) Tanks/Vessels，2001。
- 2.ASTM E1118，Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe(RTRP)，2005
- 3.ASTM E650，“Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors”，2002。
- 4.ASTM E1932，“Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small parts”，2002。
- 5.ASTM E1419，“Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission”，2002。
- 6.ASTM E1888，“Standard Test Method for Acoustic Emission of Examination of Pressurized Containers Made of Fiberglass Reinforced Plastic with Balsa Wood Cores”，2002。
- 7.ASTM E2191，“Standard test method for Examination of Gas-Filled Filament- wound Composite Pressure Vessel Using Acoustic Emission”,2002。
- 8.魏新利、吳金星，“壓力容器現代設計與安全技術”，化學工業出版社，2004。
- 9.王文鈺，“管路缺陷之大區域振波非破壞檢測技術”，國立中山大學碩士論文，2000。
- 10.陳永增、鄧惠源，「非破壞檢測」，全華科技圖書公司，1999。
- 11.D. E. Bray and D. McBride, “Nondestructive Testing Techniques,” John Wiley & Sons, Inc., 1992。
- 12.傅健康、傅健生，“非破壞檢驗技術於航太工業之應用探討“，空軍學術月刊，2001。
- 13.王震鳴等，“複合材料及其結構的力學、設計、應用和評價”，第二冊，哈爾濱工業大學出版社，1998。
- 14.Bailey J E, Curtis P T, Parvizi A. R. Soc. Lond.366A, p599~623,1979。
- 15.Laws N, Dvorak G J, Hejazi M, Mech. Of Materials , p123~137,1983。
- 16.Rosen B W,“Mechanics of composite strengthening in fiber composite materials”. American Society for Metals, p37,1965。
- 17.Highsmith A L, Reifsinder K L, “Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates damage in composite materials”. ASTM SPT 775, American Society for Testing and Materials,p103~117,1982。
- 18.Herakovich C T, et al. “Damage in composite laminates effects of transverse cracks”. Mechanics of Materials. ,p91~107,1988。
- 19.Lim S G, Hong C S. “Prediction of transverse cracking and stiffness reduction in cross-ply laminated composites”. J. of Composite Materials,p695~713, 1989。
- 20.Zhu H, Achenbach J D. “Radical matrix cracking and interphase failure in transversely loaded fiber composites. Mechanics of Materials”,p347~356,1991。
- 21.李蘭、趙建華，“玻璃纖維複合材料中不同破壞類型的音洩訊號特徵”，複合材料學報，p33~39，1986。
- 22.袁震明，任榮震，“碳纖維複合材料破壞過程的音洩訊號特徵”全國第四屆音洩量測學術研討會論文集，p215~219，1989。