

論文

音洩線上檢測技術於壓力容器腐蝕研究

劉國青¹ 劉天一² 沈志陽¹

¹ 勞動部勞動及職業安全衛生研究所

² 國立台北科技大學機電科技研究所

摘要

現階段壓力容器安全檢查，多以停機檢查為主。停機檢查常需停機數月，耗費大量人力與費用。研究目標為利用音洩檢測技術，開發線上監視檢測數據，並智慧判讀是否腐蝕缺陷，亦即壓力容器不停機檢查系統。

音洩檢測技術具有快速、早期破壞預測、不受複雜形狀影響、可在惡劣環境下檢測等優點。由音洩檢測數據特徵設定為類神經模糊系統的輸入層，腐蝕缺陷為系統的輸出層，兩者之間的關係，使用尤克里汀距離量測法以及連續前進尋根法進行最佳特徵選擇，後續使用相位陣列式超音波進行檢查驗證。此系統具有可靠度和安全性，可以減少停機檢查、增加效率、降低成本。

關鍵字：壓力容器、音洩、相位陣列超音波

民國 103 年 9 月 16 日投稿，民國 104 年 3 月 10 日修改，民國 105 年 3 月 16 日接受。

通訊作者：沈志陽，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，

電子郵件信箱：slemdnk9@mail.ilosh.gov.tw。

前言

壓力容器及高壓氣體特定設備等危險性設備所具有的高溫、高壓、高儲存量特性，及鑑於處置不當而發生的重大災難事件，促使各國政府對於危險性設備訂定嚴格的安全標準，並透過勞動檢查機構的檢查手段，以確保其安全性能。這是普世的安全規範，中外皆然[1,2]。

因此政府遂在危險性機械設備安全檢查規則中，增列針對連續性生產之鍋爐及第一種壓力容器，可每兩年開放內部檢查一次之規定（危險性機械設備安全檢查規則第84、108條）[5]，而高壓氣體特定設備則針對不同材料之設備，訂定3~15年不等之開放內部檢查週期規定（危險性機械設備安全檢查規則第132條）；另針對第一種壓力容器及高壓氣體特定設備實施內部檢查有困難者，雇主可提出替代檢查方案，報請檢查機構核可後實施替代檢查（危險性機械設備安全檢查規則第109、133條）。隨著壓力容器使用年限逐年增加，其損壞頻率相對提高，如何提高運轉之安全性，並同時兼顧可靠度和產能效益下，可朝向發展線上即時腐蝕缺陷檢測和故障診斷系統。

文獻案例

1. 壓力容器職業災害案例概述

歷史性原因，鍋爐、壓力容器的安全性能始終依靠監管機構來保證。美國各州通用的鍋爐、壓力容器標準使用ASME鍋爐與壓力容器規範，ASME規範包含了控制鍋爐與壓力容器在設計、製造、檢查等方面安全標準。此外中國大陸也於1999年頒布並實施「壓力容器安全技術監察規程」，於2004年頒布並實施「壓力容器定期檢驗規則」，2004年12月頒布「在用

含缺陷壓力容器安全評定」，規範壓力容器安全評定的技術方法，提高了壓力容器的安全性和經濟性。

但是壓力容器職業災害仍然發生。案例2006年12月28日在美國賓夕法尼亞州一位焊接工人在維修壓力容器後，要確保焊縫不漏氣，在加壓的時候後發生爆炸[3]。另外1984年7月23日在美國芝加哥的一座煉油廠發生爆炸，造成17人死亡，爆炸的原因為腐蝕產生裂縫[4]。

2. 腐蝕種類介紹

腐蝕是壓力容器在使用過程中最容易產生的一種缺陷，由腐蝕性介質引起的均勻腐蝕和局部腐蝕、應力腐蝕、疲勞腐蝕、氫脆腐蝕等。均勻腐蝕比較均勻地產生於部件表面的各個部位，它比較均勻地減薄部件的壁厚，降低部件的承載能力，可以在設計中增加壁厚或採用耐腐蝕性材料進行防範；局部腐蝕產生在部件的局部區域，不容易預期發生地點。

孔蝕是一種局部性的腐蝕，會生成小孔而貫穿構件，屬於化學電池或濃淡電池式侵蝕，有時兩者合併發生；除一般鋼鐵外，孔蝕也常發生在不鏽鋼、鎳合金、銅、鋁及其合金上。

3. 音洩及其他非破壞檢測

非破壞檢測法包括音洩、超音波、射線、磁粒檢測等，射線檢測法的基本原理就是以具有穿透能力的射線（如x射線、 γ 射線等）穿透試件，在底片或螢幕生成影像紀錄，然後研判影像以了解試件品質。磁粒檢測的原理為係藉由磁力在物件內分佈的情形吸引表面磁粒形成顯示，能迅速、有效地檢驗物件表面及次表面的瑕疵。

目前被廣泛使用壓力容器的線上監測及檢測技術為音洩技術，在材料中局部區域源

快速釋放能量產生瞬態彈性波的現象稱為音洩 (Acoustic Emission, AE)，也稱為聲發射。材料在腐蝕/應力作用下的變形與裂紋擴展，是結構失效的重要機制，這種直接與變形和斷裂機制有關的音洩，亦稱為聲發射源[6,7]。音洩是一種常見的物理現象，各種材料聲發射信號的頻率範圍很寬，從幾Hz的次聲頻、20Hz~20KHz的聲頻到數MHz的超聲頻；聲發射信號幅度的變化範圍也很大。如果聲發射釋放的應變能足夠大，就可產生人耳聽得見的聲音。大多數材料變形和斷裂時有音洩發生，但許多材料的聲發射信號強度很弱，人耳不能直接聽見，需要藉助靈敏的電子儀器才能檢測出來。用儀器探測、記錄、分析聲發射信號和利用聲發射信號推斷聲發射源的技術稱為音洩技術，人們將音洩發射儀器形象地稱為材料的聽診器。

音洩檢測的原理[6,8]如圖1所示，從聲發射源發射的彈性波最終傳播到達材料的表面，引起可以用聲發射感測器探測的表面位移，這些探測器將材料的機械振動轉換為電信號，然後再被放大、處理和記錄。固體材料中腐蝕/應力的變化產生音洩信號，在材料加工、處理和使用過程中有很多因素能引起內應力的變化，如位錯運動、孿生、裂紋萌生與擴展、斷裂、無擴散型相變、磁疇壁運動、熱脹冷縮、外加負荷的變化等等。人們根據觀察到的音洩信號進行分析與推斷以瞭解材料產生音洩的機制。

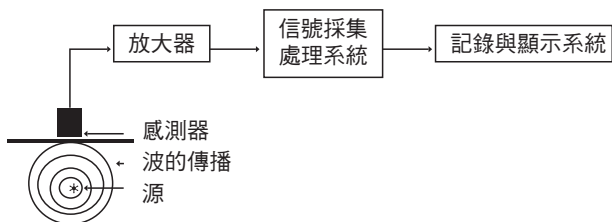


圖1 音洩檢測原理方框圖[8]

4. 音洩檢測技術優劣分析

音洩檢測方法在許多方面不同於其他常規非破壞檢測方法，其優點主要表現為：音洩是一種動態檢驗方法，音洩探測到的能量來自被測試物體本身，而不是像超音波或射線探傷方法一樣由非破壞檢測儀器提供；音洩檢測方法對線性缺陷較為敏感，它能探測到在外加結構應力下這些缺陷的活動情況，穩定的缺陷不產生音洩信號；音洩檢驗能夠整體探測和判斷整個結構中腐蝕/缺陷的狀態；可提供腐蝕缺陷隨載荷、時間、溫度等外變數而變化的即時或連續資訊，因而適用於工業過程線上監控及早期或臨近破壞預報；由於對被檢件的接近要求不高，而適用於其他方法難於或不能接近環境下的檢測，如高低溫、核輻射、易燃、易爆及極毒等環境；對於在役壓力容器的定期檢驗，音洩檢驗方法可以縮短檢驗的停產時間或者不需要停產。對於壓力容器的耐壓試驗，音洩檢驗方法可以預防由未知不連續缺陷引起系統的災難性失效和限定系統的最高工作壓力；由於對構件的幾何形狀不敏感，而適用於檢測其他方法受到限制的形狀複雜的構件。音洩檢測是一種動態檢測方法，而且探測的是機械波，因此具有如下的限制：音洩特性對材料甚為敏感，又易受到機電雜訊的干擾，因而，對資料的正確解釋要有更為豐富的資料庫和現場檢測經驗；音洩檢測，一般需要適當的載入程式。多數情況下，可利用現成的載入條件，但有時還需要特作準備；音洩檢測目前只能給出聲發射源的部位、活性和強度，不能給出聲發射源內缺陷的性質和大小，仍需依賴於其他無損檢測方法進行複驗。表1列出了音洩檢測方法和其他常規無損檢測方法的特點對比。

表1 音洩和其他常規檢測特點對比

音洩檢測方法	其他常規無損檢測方法
缺陷的增長/活動	缺陷的存在
與作用應力有關	與缺陷的形狀有關
對材料的敏感性較高	對材料的敏感性較差
對幾何形狀的敏感性較差	對幾何形狀的敏感性較高

實驗量測

1. 壓力容器音洩實驗之步驟與儀器

壓力容器音洩檢測的步驟一般包括[9-11]：對被檢容器進行資料審查、現場勘查、檢驗方法的制定、音洩探頭的安裝、音洩儀器的工作參數調整與校正、音洩監測和信號擷取、擷取資料的分析和檢驗報告的編制。

實驗採用高速音洩系統規格：德國Vallen AMSY-6聲發射儀、連接/USB2.0、聲發射傳感器VS150-M中心頻率150KHz、聲發射前置放大器AEP4H頻帶範圍為20-2000KHz、獨立雙通道聲發射採集卡ASIP-2音洩感測器的覆蓋率是基於波的傳播衰減，通常佈置於金屬壓力容器的感測器間距約為1-6公尺。

2. 壓力容器音洩技術線上檢測實驗

使用45L之壓力容器進行水壓實驗，為加速腐蝕，使用氯化鐵溶液，其濃度為2.2g/L，水壓壓力為5kg/cm²，壓力容器之材料為超音波衰減極為嚴重的304不鏽鋼。使用音洩傳感器做監測，其訊號由放大器加以放大，然後輸入訊號分析儀器。音洩實驗設定之門檻值為40dB，靈敏度適當。頻率區間為95KHz-850KHz，取樣頻率為10MHz，因此成功地避免波形扭曲。頻率區間為高頻，因此有效地避免被四週環境噪音干擾。

實驗使用兩台相同壓力容器皆進行腐蝕實

驗，先行水壓試驗量測音洩訊號，洩壓後再分別在相同地方鑽5mm大小的圓錐形孔洞，以模擬危害性極大的孔蝕(pitting corrosion)，再以相同的水壓試驗等條件重複進行實驗。有缺陷5mm大小之孔洞的壓力容器之傳感器所量測之時域及頻域訊號如圖2所示。仔細觀察以上的實驗數據，有無孔蝕之時域波形明顯不同。無孔蝕時祇有一次波動如圖3，而很明顯地，有孔蝕時不斷地波動，明確指出有音洩釋放。

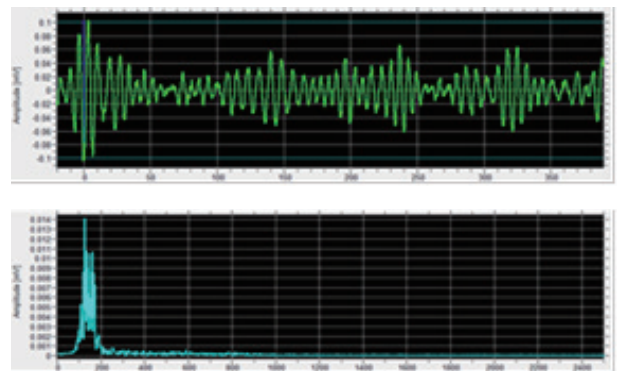


圖2 缺陷容器水壓實驗之音洩時域圖（上）、頻域圖（下）

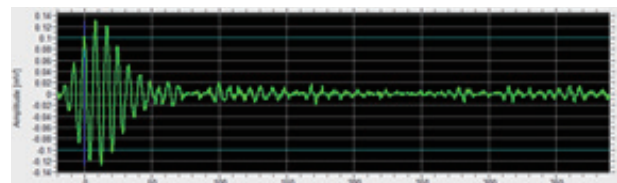


圖3 無缺陷容器水壓實驗之音洩時域圖

3. 利用類神經模糊系統開發新型壓力容器的在線診斷技術

(1) 特徵提取和選擇(Feature Extraction and Selection)[12,13]

特徵提取是基於對實驗結果之觀察以及參考研究者以往使用音洩量測之經驗。在本研究計畫中，提取之特徵為：音洩幅度(Peak Amplitude)、音洩計數(AE Count)、音洩能量(AE Energy)。

特徵選擇是極其重要的，它是用於挑選

所提取的特徵中具有「最高靈敏度」之一個或一組特徵。所謂「最高靈敏度」是指具有極大之訊號與雜音比(Signal to Noise Ratio)。在本計畫中預定使用尤克里汀距離量測法(Euclidean Distance Measure)以及連續前進尋根法(Sequential Forward Search Algorithm, SFS)，如此一來，特徵選擇可以有效地得到最佳解答，因而，音洩量測可以最迅速、最可靠地判斷壓力容器是否真有有腐蝕缺陷。

在訓練類神經模糊系統時，所需最小數量的數據如下式所述：

$$N=2(d+1) \dots\dots\dots (1)$$

在上式中，N是所需最小數量的數據，d是特徵的數量。使用最小數量的特徵針對壓力容器在線上缺陷的即時檢測和故障診斷是最有效、最迅速、最經濟的。使用尤克里汀距離量測法的公式如下

所述：

$$J=\text{trace}(S_w - 1 S_b) \dots\dots\dots (2)$$

在上式中 S_w 是同一類型分佈矩陣(within class scatter matrix)而 S_b 是不同類型分佈矩陣(between class scatter matrix)。 S_w 量測在同一類型中數據羣的分佈，而 S_b 量測不同類型數據羣之間在d維數據空間的尤克里汀距離。很明顯的，J代表訊號與雜音比。

使用連續前進尋根法以決定最佳之d個特徵之運算法則(algorithm)如下：從量測向量(measurement vector)之D個特徵中，使用尤克里汀距離量測法以選擇一個可以使J極大化之特徵，此一特徵稱為X1。下一步，將所剩下的(D-1)個特徵與X1配對同時計算每一對之J。然後，選擇使J極大化之一對特徵。將以上步驟一直繼續下去，直到選取d個特徵為止。使用連

續前進尋根法可以極有效地決定最佳之d個特徵。原則上，使用的特徵越少越好。

使用上述方法代入實驗數據，其特徵選擇的結果如下：單一最好的特徵為音洩能量；兩種最好的特徵為音洩幅度及音洩能量，如表2所示。

表2 特徵選擇的結果

特徵數目	特徵名稱
1	音洩能量
2	音洩幅度，音洩能量
3	音洩幅度，音洩計數，音洩能量

(2) 類神經模糊系統(Neuro-Fuzzy System)[12-13]

類神經模糊系統已成功地應用於機械及製程之安全檢查，它是類神經網路(artificial neural networks)和模糊邏輯(fuzzy logic)的複合系統(hybrid system)，因此，它綜合兩者之優點。它具有類神經網路之優良系統結構，也和類神經網路一樣，可以有效地運用實驗數據加以訓練後成功地投入實際應用。它也具有模糊邏輯之模糊推理(fuzzy reasoning)與模糊數學(fuzzy mathematics)之能力。更有進者，它具有普遍化的能力(capability of generalization)。因此，它能有效地完成傳統上無法解決的困難問題。

類神經模糊系統包括輸入層、輸出層、會員函數層(membership function layer)、以及模糊規則層(fuzzy rule layer)。即使輸入(input)和輸出(output)之間的關係為非線性，甚至沒有理論分析的關係，類神經模糊系統仍然可以建構對此系統之輸入和輸出之間的關係。最常用的通用鐘形類神經模糊系統ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems)函數如下式所述：

$$M_i^j = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \dots\dots\dots (3)$$

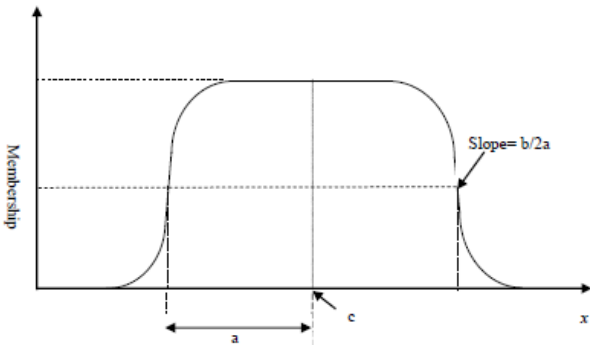


圖4 通用鐘形會員函數[12]

如圖4參數a控制鐘形會員函數的寬度，參數c調整此函數的中心點，而參數b決定其轉折點的斜率。Mij表示第i個輸入的第j個會員函數而x為輸入之特徵。

使用容器1的音洩量測數據訓練不同結構之ANFIS，訓練200循環(epoch)後使用ANFIS推算出容器1（無缺陷及有缺陷）和容器2（無缺陷及有缺陷）訊號中有多少百分比指出有孔蝕缺陷，使用的特徵從1到3，其結果列於表3至表5。

表3 ANFIS-1特徵（音洩能量） 單位%

輸入x MF	容器1	容器1 缺陷	增加值	容器2	容器2 缺陷	增加值
1x2	34	57	23	50	84	33
1x3	36	66	29	61	94	32

表4 ANFIS-2特徵（音洩幅度、音洩能量） 單位%

輸入x MF	容器1	容器1 缺陷	增加值	容器2	容器2 缺陷	增加值
2x(2x2)	20	55	35	59	98	38
2x(2x3)	22	63	41	69	98	28
2x(3x2)	15	55	40	59	98	38
2x(3x3)	21	63	42	67	95	28

表5 ANFIS-3特徵（音洩幅度、音洩計數、音洩能量） 單位%

輸入x MF	容器1	容器1 缺陷	增加值	容器2	容器2 缺陷	增加值
3x(2x2x2)	19	60	40	59	98	38
3x(2x2x3)	22	65	43	71	95	24
3x(2x3x2)	14	59	45	56	95	39
3x(2x3x3)	80	93	13	98	98	0.1
3x(3x2x2)	15	59	44	63	100	36
3x(3x2x3)	19	65	45	68	100	31
3x(3x3x3)	19	67	48	63	97	33

比較後結果以3x(2x3x2)ANFIS較好，訓練3x(2x3x2)ANFIS完成後之推算，容器1（無缺陷）訊號中有14.67%指出有孔蝕缺陷，容器1（有缺陷）訊號中有59.67%指出有孔蝕缺陷，增加值為45%。容器2（無缺陷）訊號中有56.54%指出有孔蝕缺陷，容器2（有缺陷）訊號中有95.83%指出有孔蝕缺陷，增加值為39.29%。圖5為訓練好的3x(2x3x2)ANFIS推算容器1的訊號中有多少百分比指出有孔蝕缺陷；圖6為訓練好的ANFIS推算容器2的訊號中有多少百分比指出有孔蝕缺陷；圖7為3x(2x3x2)ANFIS之結構。

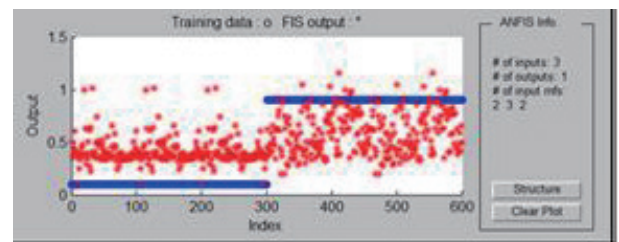


圖5 3x(2x3x2) ANFIS推算容器1孔蝕缺陷

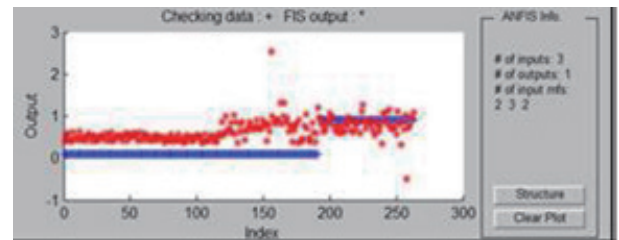


圖6 3x(2x3x2) ANFIS推算容器2孔蝕缺陷

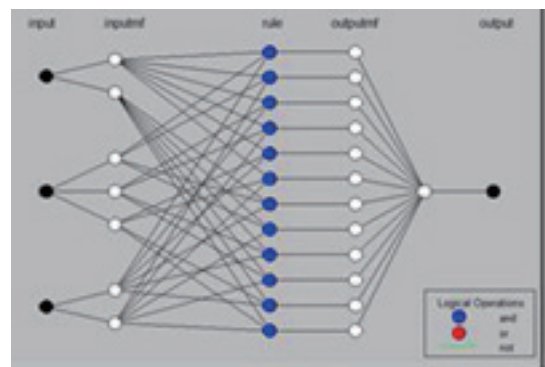


圖7 3x(2x3x2) ANFIS結構

4. 相位陣列式超音波驗證

音洩與相位陣列式超音波皆為有效的非破壞檢測技術。音洩技術具有快速檢測、早期破壞預測、複雜形狀檢測、不能接近之惡劣環境下的檢測等優點，可最迅速、最可靠地判斷壓力容器是否真有腐蝕缺陷，而使用相位陣列式超音波進行檢查可以最精確地將音洩技術在線上的檢測定性定量。本系統因使用感測器融合，具有極高的可靠度和安全性，可以減少、消除停機檢查，增加效率，降低成本。

利用相位陣列式超音波掃描壓力容器，可以最精確地將音洩技術在線上的檢測定性定量。利用音洩系統所定位出訊號發出撞擊數最多的位置，利用陣列式超音波掃描，音洩各感測器所接收到的撞擊數，音洩系統所定位出的3D圖。利用扇形掃描無訊號之圖案為壓力容器鋼壁扇形掃描之訊號，因為效果不佳，最後改用脈衝回波的形式得到較佳的訊號如圖8。因為錐形槽會使超音波訊號發散，故無訊號處即為缺陷處；根據掃描結果可以判斷出缺陷大小為5mm。

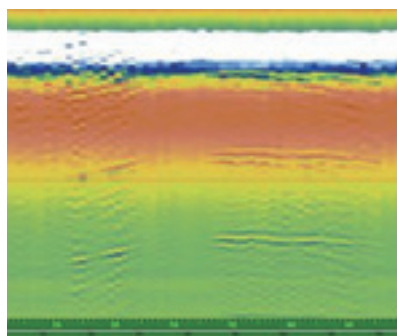


圖8 壓力容器缺陷處之訊號

結論

音洩幅度(Peak Amplitude)、音洩計數(AE Count)、音洩能量(AE Energy)都是在線上檢測

腐蝕缺陷之重要指標，將此特徵輸入類神經模糊系統ANFIS，如果訊號中指出有孔蝕缺陷的百分比大幅增加（例如增加超過20%），則明確指出有孔蝕發生。另外利用相位陣列式超音波可以定性定量檢測腐蝕缺陷。

誌謝

本研究承蒙勞動部勞動及職業安全衛生研究所計畫編號IOSH102-S322之經費補助支持，謹此敬表謝忱。

參考文獻

- [1] 行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所。石化廠製程設備實施系統化安全技術研究；2008。
- [2] 工業安全科技：從高科技產房工安事故探討火災爆炸預防；2007/06。
- [3] Chang H, Hana EH, Wang JQ, Kea W. NDT&E International 39 (2006)8-12.
- [4] Analysis of the Catastrophic Rupture of a Pressure Vessel, Tom Siewert. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/sp958-lide/350-352.pdf>
- [5] 危險性機械設備安全檢查規則。中華民國 103年6月27日勞動部勞職授字第 10302007254號令修正發布。
- [6] 馬恒儒等編審委員：聲發射檢測，國防科技工業無損檢測人員資格鑒定與認證培訓教材2004年（頁數16-20）。機械工業出版社。
- [7] 電子技術應用。聲發射的概念；2009。
- [8] 電子技術應用。聲發射檢測的基本原理；2009。
- [9] 壓力容器安全工程。壓力容器聲發射檢測方法；2010。
- [10] Catty J. Acoustic Emission Testing - Defining

- a New Standard of Acoustic Emission Testing for Pressure Vessels: Part 2. *Journal of Acoustic Emission* 2010; 28: 11-31.
- [11] Catty J. Acoustic Emission Testing - Defining a New Standard of Acoustic Emission Testing for Pressure Vessels: Part 1. *Journal of Acoustic Emission* 2009; 27: 299-313
- [12] Liu G, Liu TI, Gao Z. On-Line Detection and Measurements of Drill Wear for Safe Drilling of Stainless Steel Parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013; DOI: 10.1007/s00170-013-4892-2.
- [13] Liu TI, Lee J, Liu G, Wu Z. Monitoring and Diagnosis of Tapping Process for Product Quality and Automated Manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013; 64: 1169-75.

Research Articles

On-line Monitoring and Diagnosis of Pressure Vessels

Kuo-Ching Liu¹ Tien-I Liu² Chih-Yang Sheng¹

¹ Institute of Labor, Occupational Safety and Health, Ministry of Labor

² Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National Taipei University of Technology

Abstract

The current safety inspection of pressure vessels is the shutdown inspection (SDI). This method is time consuming, labor-intensive, and extremely expensive. Furthermore, the objective of this project is to develop an intelligent on-line real time corrosion defect inspection and diagnostic system, which is on stream inspection (OSI).

Acoustic emission (AE) technique will be used for on-line real time data acquisition. This technique has the merits of quick inspection, early alarm, and inspection in the harsh environments. Feature extraction of the experimental data is input layer of the neuro-fuzzy system, the corrosion defect of pressure vessels is output layer. The relationship of between the both sides make optimization form Euclidean Distance Measure (EDM) and Sequential Forward Search Algorithm (SFSA), with phase array ultrasonic system for inspection. Finally, the developed intelligent on-line real time system has very high reliability and safety. This OSI system can reduce SDI, increase efficiency and reduce cost.

Keywords: Pressure vessels, Acoustic emission, Phased array ultrasonic

Accepted 16 March , 2016

Correspondence to: Chih-Yang Sheng, Institute of Labor, Occupational Safety and Health, Ministry of Labor, No.99, Lane 407, Hengke Rd., Sijhih District, New Taipei City 22143, Taiwan(R.O.C.), Email address: slemdnk9@mail.ilosh.gov.tw