

相位陣列式超音波應用於鐸道之檢測

彭朋畿¹，姬俊宇²

¹ 中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 課長 (國立中央大學 工學博士)

² 中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 工程師

摘要

目前工程業界已廣泛利用各種儀器和技術執行非破壞檢測工作，其較常用於鐸道之非破壞檢測技術包括目視檢測法(VT)、液滲檢測法(PT)、磁粒檢測法(MT)、超音波檢測法(UT)及放射線檢測法(RT)，其中超音波檢測法是最常用於檢測鐸道內部品質之方法。

本文介紹目前超音波檢測法中較新型之相位陣列式超音波檢測技術(PAUT)，由於其具多樣視維種類與掃瞄角度，故可提供較佳之檢測效率。同時即時影像化之分析能力，使工程人員更易於瞭解相關檢測訊號資訊，因此目前已逐漸廣泛應用於各式鐸道之非破壞檢測。

1、前言

非破壞檢測(nondestructive testing, NDT)是指在不破壞檢測工件內部構件安全及不影響使用性能的前提下，利用聲、光、熱、電、磁和射線等方法，測定有關檢測工件性能方面的物理量，並進而藉由這些關係來推定其內在或潛在的缺陷，以達到更安全或更可靠的程度。

相位陣列式(Phased Array)超音波技術係從醫學領域逐步轉移至工業範疇[1]，隨著壓電複合材料技術、微加工、微電子及電腦計算能力之不斷進展，各式複雜的相位陣列式超音波探頭製作遂趨於成熟[2, 3]。目前已有部分法規認可相位陣列式超音波檢測，因此本文參酌現行檢測規範內容，進行相位陣列式超音波檢測銲道試驗，並與傳統超音波進行比較。本試驗證明相位陣列式超音波可較準確評估銲道瑕疵尺寸和性質，同時提供鋼結構與管線銲道檢測之實例，以供現場檢測人員及工程業界參考。

2、原理

2.1 超音波之產生

人耳可聽見之音波範圍約在 16Hz 至 20KHz，若頻率高於此範圍則稱為超音波(Ultrasonic)。超音波檢測法是利用音波振動導入材料內部，以檢測表面或內部缺陷之非破壞檢測方法。一般金屬超音波檢測之頻率範圍由 1MHz 至 25MHz，其中以 1MHz 至 5MHz 最常使用。其原理主要是將壓電材料所製造之探頭，應用壓電效應達成能量轉換以產生超音波，並經由耦合劑傳入工件。在工件內超音波的傳遞速率需視材料而定，當傳至不同介面時，超音波會有反射或折射現象，因此藉由分析反射或透射所呈現的訊號，可檢測出材料瑕疵及其性質 [4-7]。

2.2 超音波之探頭

超音波探頭主要是由壓電薄片、背面填料、導線及耐磨層組成。壓電薄片經極化後，具有壓電特性，其兩面鍍上金屬膜，接上導線以便電壓分佈於表面。背面填料用金屬粉末(如銀、鋁等)和膠調成，並吸收超音波適當能量，使其脈波具有適當鑑別力。由於超音波檢測所採用之壓電式探頭是依據其本身的機械振動來產生訊號，故須與受測物表面維持良好的接觸。為預防壓電晶體薄片磨損或破裂，因此一般都會在壓電晶體的前緣黏貼塑膠耐磨層，或在探頭與受測物間塗抹耦合劑，甚至直接使用浸泡於水中的浸液式探頭等，來保護探頭免於受損。

超音波探頭依其特性或使用之場合不同，可區分為不同之種類，如直束探頭、斜束探頭及浸液式探頭等。本試驗除使用一般單晶直束探頭執行檢測外，並考量現場補強鋼板厚度若較薄，可另選用雙晶（直束）探頭以克服一般探頭由於起始脈波有相當之寬度，而易遮掩較薄物件背面回波之情形。雙晶探頭有兩片相鄰之壓電薄片，一片作超音波發射，另一片作接收。由於其起始脈波可能完全沒有或很小，因此可相對提高背面回波之鑑別力。

2.3 相位陣列式超音波原理

相位陣列式超音波與傳統超音波(UT)單一晶片檢測法，其最主要差異為相位陣列法使用多晶片，並以不同激發與接收之延遲時間，依據豪更斯原理(Huygen's Principle)產生不同波前(wave front)行進波式，因此音束可利用電子式操縱、掃描與聚焦。由其多角度掃描特性，故對於各類型缺陷性質皆有某一適當角度能與方向性成垂直，以獲得最佳反射信號與檢出能力。

相位陣列式超音波技術檢測速度較傳統超音波檢測快，波束操控可將缺陷檢出能力達到最佳化，因此對於因現場工作環境或幾何形狀限制之檢測構件，波束操控特型為一明顯有效解決之方法。同時由於相位陣列式超音波可電子式聚焦波束，故對於可能存在缺陷之位置能更有效檢出。

近年相位陣列式超音波檢測技術已廣為流行，其相較於傳統超音波檢測具備以下優點[8]：

(1) 檢測速度快：

相位陣列式超音波檢測技術對於銲道或腐蝕構件，其線性掃描能力可增加檢測之速度。

(2) 呈像能力佳：

相位陣列式超音波檢測技術具備 S-scan、E-scan、2-D 及 3-D 呈像方式，可提供更佳缺陷評估之判斷資訊。

(3) 方式較彈性：

相位陣列式超音波檢測技術對於各不同構件之缺陷類型，可進行多樣性掃描，以增加評估能力。

(4) 資料儲存佳：

相位陣列式超音波檢測技術可將相關檢測資訊，以全部或個別檔案存取與顯

示，可提供較佳缺陷判釋資訊，更有助於資料保存與查詢。

(5) 訊號再現性佳：

相位陣列式超音波檢測技術經試驗證明，對於相同設定與檢測程序下，較傳統超音波檢測更具重覆性之結果。

2.4 相位陣列式超音波之掃描型式

相位陣列法利用晶片陣列排置方式，分別各自獨立激發與控制時間偏移，使用者可自行設計激發延遲時間，以獲得各式音波特性。同時亦可經由檢測角度、焦距距離及掃描型式等資料設定，並由系統自行運算結果。

相位陣列式超音波技術中，各晶片時間延遲值，係取決於探頭晶片驅動尺寸、音波型式、折射角度及聚焦深度，其電腦控制波束之掃描型式主要有下列三種：

(1) 電子式掃描(Electronic Scanning)：

E-scan 藉由動作元件產生固定角度波束，並沿探頭長度方向進行掃描，其相當於傳統超音波檢測移動掃描一段距離。

(2) 動態深度聚焦(Dynamic Depth Focusing)：

相位陣列式超音波技術以不同聚焦深度進行掃描，實際檢測時係傳送單一焦距脈波，於接收時再針對聚焦法決定深度，並進行重新聚焦。

(3) 扇形掃描(Sectorial Scanning)：

S-scan 針對特定聚焦深度產生音束，並掃描一扇形角度範圍。其範圍之起始與終止視探頭設計、楔形塊與波式而定。

3、 檢測試驗

3.1 試驗方式

本文參考美國銲接協會鋼結構銲接規範(AWS D1.1)內容[9]，針對銲接試件進行相位陣列式超音波檢測試驗，並與傳統超音波進行評估與比較。另亦列舉鋼結構銲道與設備管線檢測實例，以說明該技術現場應用情形。

3.2 試驗試件

本文銲接試件共二組，其為板件對接銲道(butt weld)試件，材質皆為碳鋼，尺寸分別為 $300^L \times 250^W \times 19^T$ mm(試件 A)和 $375^L \times 100^W \times 28^T$ mm(試件 B)。其銲道內部情形可由

射線檢測(RT)底片為熔合不良(IF)之缺陷。

3.3 試驗設備

本研究分別採用 GE 之 Phasor XS 及 USN 60 超音波檢測儀(如圖 1 所示),其中 Phasor XS 為相位陣列式超音波檢測系統,激發器供給電壓為 $\pm 25\sim\pm 75$ V,脈波重複頻率 15~7680 Hz,脈波寬度在 $\frac{1}{2}$ 週期為 20~500 ns,接收器頻寬為 0.5~10 MHz;另檢測探頭規格說明如表 1 所示。



圖 1 超音波檢測儀

表 1 探頭規格說明

	陣列式超音波檢測		傳統超音波檢測
型式	單晶		單晶
頻率(MHz)	2	4	2
折射角(度)	以 70° 評估		70
晶體尺寸(mm)	8×9		20×20
晶片數量	8	16	1
晶片間距(mm)	1	0.5	-

4、試驗結果與討論

4.1 檢測設定

利用相位陣列式 UT 與傳統 UT 進行銲接試件檢測,耦合介質為機油,先以 IIW TPYE

1 規塊執行儀器校正與設定，視檢測射束路程分別以基本感度+14 Db (試件 A)和+19 dB (試件 B)為掃描靈敏度。

4.2 評估公式

由鉸道兩側進行掃描(如圖 2 所示)，有瑕疵回波出現時，移動探頭使達最高回波後，再調整儀器將其降(升)至比較波高，最後將所得數據參考 AWS D1.1 之瑕疵評估值(d)公式計算[9]：

$$d = \text{瑕疵位準值(a)} - \text{比較位準值(b)} - \text{衰減因素值(c)}$$

其中 $c = (\text{至瑕疵射束路程(mm)} \div 25.4 - 1) \times 2$ ，所得 d 值再依靜態結構物接收基準進行瑕疵分類之評估。



圖 2 鉸接試件檢測(相位陣列式 UT)

4.3 檢測結果

由試件 A、B 試驗結果顯示 PAUT 與傳統 UT 皆能準確檢出缺陷尺寸與位置，然於掃描方式不同時，顯示兩技術差異值有明顯誤差，其中以直射法所得瑕疵評估值(d)差異較為明顯，而一次反射法之結果極為接近，最大 d 值差異僅 2.5 dB。

造成直射法較大誤差之可能原因為探頭型式與尺寸規格，於進行直射法掃描評估時，因試件鉸道幾何形狀突出，且傳統 UT 探頭前緣較 PAUT 探頭為長，致使探頭無法橫越鉸道部位，超音波能量未能全面覆蓋缺陷，使探頭所接收非完整之反應訊號，反觀 PAUT 探頭尺寸相對較小，可較貼近鉸道邊緣。

於一次反射法檢測時，掃描路徑則不受鐸道幾何形狀之影響，使傳統和相位陣列 UT 探頭所激發與接收之訊號較能反應實際缺陷特徵，因此所得兩技術檢測結果相似。另以探頭頻率 4 MHz 進行相同掃描試驗，除因頻率不同而與 2 MHz 所得個別瑕疵評估值(d)略有不同外，該頻率 PAUT 與傳統 UT 所得誤差趨勢與 2 MHz 情況相似。

4.4 放射線檢測法驗證

以放射線檢測法對兩試件進行檢測，由成像底片判釋，試件 A 鐸道內部距端邊 40 mm 和 60 mm 處有二個瑕疵缺陷(如圖 3 所示)，分別為熔合不良(IF)和滲透不足(IP)。而試件 B 則有二道平行施鐸方向之熔合不良缺陷。

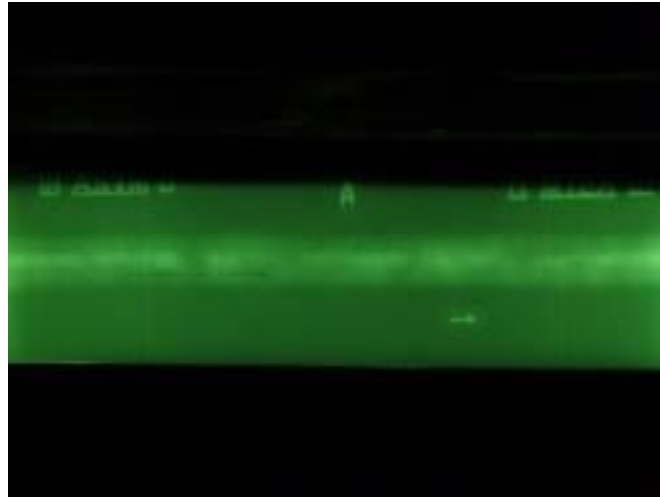


圖 3 底片顯示鐸道內部缺陷

經與超音波檢測結果比較，顯示相位陣列式 UT 之多視維顯像技術，可清楚呈現瑕疵缺陷分布情形，並可準確量測、分析其型態與性質。同時其所顯示不同角度之音波訊號，對於具方向性瑕疵之檢測可靠度有明顯優勢。

4.5 現場檢測

針對現場鋼結構接頭鐸道進行超音波檢測(如圖 4 所示)，首先以傳統超音波檢出鐸道內部有鐸接缺陷，再以相位陣列式超音波進行確認，其可於螢幕上獲得明顯缺陷訊號。現場檢測發現相位陣列式 UT 可同時呈現各種不同角度，以降低可能信號之遺漏，並間接提高檢測可靠度。



圖 4 現場鋼結構銲道超音波檢測

4.2 管線設備之銲道檢測

另以 8"管徑之管件進行對接銲道超音波檢測(如圖 5 所示)，由 PAUT 檢測顯示於有一銲道內部瑕疵(如圖 6 所示)，輔以傳統 UT 驗證，其檢測結果相符合。顯示 PAUT 與傳統 UT 均具準確檢出之能力，但 PAUT 檢測效率較佳。



圖 5 管件銲道超音波檢測

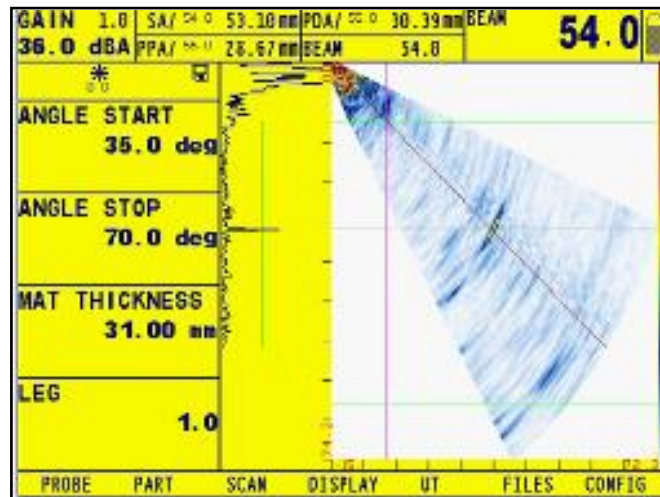


圖 6 相位陣列式 UT 之螢幕畫面

5 結論

- (1) 本文利用相位陣列式超音波技術檢測鋁道試件，檢測結果顯示針對缺陷特性評估時，其具備相當可靠度及準確性。另輔以放射線檢測法驗證，顯示 PAUT 具良好缺陷檢出與分析之能力。
- (2) 相位陣列式超音波可顯像多視維檢測訊息，以利檢測者由畫面瞭解瑕疵位置與特性，同時更容易想像超音波於工件內傳遞及回饋之影像。另由於 PAUT 可快速激發不同角度之音波，故可大幅提高掃描靈敏度及降低掃描感度。
- (3) 相位陣列式技術可提高超音波音束之分析能力，並逐漸取代傳統超音波使用多探頭檢測之需求。其多式樣之掃描型式與角度功能，相較傳統往返式多道之掃描，預估可大量縮減訊號擷取之檢測時間，並更易應用於幾何形狀複雜之工件。

6 參考文獻

- (1) Gebhardt, W., F. Bonitz, and H. Woll, "Defect Reconstruction and Classification by Phased Arrays", *Materials Evaluation*, Vol. 40(1982).
- (2) Hosseine, S., S. O. Harrold, and J. M. Reeves, "Resolutions Studies on an Electronically Focused Ultrasonic Array", *British Journal of Non-Destructive Testing*, Vol. 27 (1985).
- (3) McNab, A., and I. Stumpf, "Monolithic Phased Array for the Transmission of Ultrasound in NDT Ultrasonics", *Ultrasonics*, Vol. 24 (1984).
- (4) 金崇勳，機械材料，復文書局，台南(1995)。

- (5) 吳學文、黃啟貞、陳必貫、葉競榮，超音波檢測法（初級），中華民國非破壞檢測協會(1988)。
- (6) 葉競榮、徐鴻發，超音波檢測法（中級），中華民國非破壞檢測協會(1990)。
- (7) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, ASME Sec. V Nondestructive Examination, American Society of Mechanical Engineers(1998).
- (8) R/ D Tech, “Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications-R/ D Tech Guideline”, published by R/D Tech Inc.(2004).
- (9) AWS D1.1 2008, “Structural Welding Code-Steel”, American Welding Society(2008).