

鋼結構之非破壞檢測技術簡介

彭朋畿

中龍鋼鐵股份有限公司 課長

摘要

鋼結構建築物由於耐震效果佳，故已廣為工程業界所接受，並大量生產與製造。但由於鋼結構施工品質是耐震良窳之重要因素，因此有關鋼板進料檢驗及銲道品質檢驗等，已越來越受工程業界所重視。

非破壞檢測技術由於不須破壞結構件，即能了解品質之特性，所以目前已有相關鋼結構之法規，說明鋼板與銲道之檢測方法及相關允收基準。本文將介紹鋼結構較常見之四種非破壞檢測方法，包括放射線檢測法、超音波檢測法、磁粒檢測法及液滲檢測法，以提供施工人員之參考。

一、前言

目前非破壞檢測在財團法人台灣非破壞檢測協會共授證七種非破壞檢測方法，包括放射線檢測法(RT)、超音波檢測法(UT)、磁粒檢測法(MT)、液滲檢測法(PT)、目視檢測法(VT)、渦電流檢測法(ET)及洩漏檢測法(LT)。本文將介紹鋼結構較常見之四種非破壞檢測方法，包括放射線檢測法、超音波檢測法、磁粒檢測法及液滲檢測法，以提供業界參考。並藉由工程人員之了解，以提升鋼結構施工品質管理之參考。另執行上述四種非破壞檢測方法前，需先執行目視檢測，並核對相關合約與圖面(如圖一所示)，已確認施工廠商是否照圖施工。例如檢測人員利用鉚道規，測量填角鉚之腳長(如圖二所示)。

近年工程界已廣泛利用各種儀器和技術執行非破壞檢測工作，所謂非破壞檢測(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。目前非破壞檢測之應用範圍甚廣，從小構件(如螺絲零件)至房屋、橋梁、港口、輪船、飛機、石化設備及發電設備等，都可執行非破壞檢測。因此若能善加利用非破壞檢測各項技術，將可有效消弭工件存在瑕疵所造成之風險，並提高結構體本身之安全。



圖一 鋼結構鉚道之目視檢測



圖二 鐸道規測量鐸道腳長

二、放射線檢測法

目前放射線檢測法主要應用於工程界之鋼結構及管線鐸道內部品質檢測，一般鐸道內部瑕疵包括氣孔、夾渣、裂縫、鐸蝕、熔合不良及熔入不足等〔1〕。例如氣孔為鐸接中較常見之鐸接瑕疵，其產生原因可能為鐸條被覆鐸藥脫落、鐸條潮濕、保護氣體壓力不足等因素。其他如裂縫或熔合不良在鐸道中均屬於較嚴重之瑕疵，若能事先經由檢測而剷修改善，將可增加結構安全及使用性能。

2-1 放射線檢測法之種類

放射線檢測法依射源之種類可分為兩種，分別為 X 射線及伽瑪(γ)射線。X 射線是由高速電子流撞擊物質陽極靶而產生，陽極靶之材料原子序愈高，產生之 X 光效應愈好。其能量依管電壓大小而定，亦即由正極靶與負極燈絲間的電壓差而定，若 X 射線能量愈高則代表其穿透能力愈強〔2,3〕。

伽瑪射線是由不穩定同位素之衰變所產生的高能量電磁波，這些同位素可以是天然的(如鐳、鈾等會產生自發性之衰變)，也可以是人造的，而每種同位素具有不同之光譜。目前工程界放射線檢測法較常使用之同位素為 Ir-192 (銱 Iridium - 192)、Co-60 (鈷 Cobalt - 60)及鈉-137 (鈉 Cesium - 137)等三種伽瑪射線裝備〔4〕。下列為伽瑪射線用於現地檢測之優點(如圖三所示檢測鐸工鐸道試片):

- (1) 伽瑪射線能量較一般 X 射線能量高，所以較易穿透混凝土結構物。
- (2) 伽瑪射線射源體積小，易置放於任何複雜結構位置處。
- (3) 伽瑪射線之射線強度均勻，因此可針對不同位置全方位同時執行檢測。
- (4) 伽瑪射線無需電力系統，因此檢測成本低、操作簡便，所以較適合現地執行檢測。



圖三 伽瑪射線檢測銲工銲道試片

2-2 強度、距離及時間

在放射線檢測法中，若能量確定不變，則決定所需曝光量之因素有：X 射線管內之毫安培電流(或產生 γ 射線之射源強度)、時間(照相曝露時間)及距離(射源至底片之距離)等〔5〕。以上三個因素中任一因素的變動量，均可藉由下列公式計算得之。另放射性物質會隨時間衰變而減少，若經一定時間剩下原來強度之壹半，其所需之時間稱為半衰期。因此在實際施照時，可適當調整強度、時間及距離等參數，並以得到清晰之底片成像為檢測原則。

(1) 強度與距離的關係

一定曝光量所需強度(M)與射源至底片之間的距離(D)平方成正比，如下式所示：

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (2-1)$$

其中

M_1, M_2 : 射源照射之強度。

D_1, D_2 : 射源至底片之間的距離。

(2) 時間與距離之關係

一定曝光量所需曝光時間(T)與射源至底片之距離(D)平方成正比，如下式所示：

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (2-2)$$

其中

T_1, T_2 : 射源照射之曝光時間。

D_1, D_2 : 射源至底片之間的距離。

(3) 強度與時間之關係

一定曝光量所需之強度(M)與曝光時間(T)成反比，如下式所示：

$$M_1 \times T_1 = M_2 \times T_2 = C \quad (2-3)$$

其中

M_1, M_2 : 射源照射之強度。

T_1, T_2 : 射源照射之曝光時間。

2-3 放射線與物質之作用

放射線與物質作用後，主要會有三種作用，包括光電效應(Photoelectric Effect)、康普頓效應(Compton Effect)及成對發生(Pair Production) [5]。

(1)光電效應

當射線撞擊物質後，將使物質之原子游離出電子，同時射線能量完全傳給電子，射線本身即消失掉，此即為光電效應，射線能量在 10KeV-500KeV 間最容易產生光電效應。而本論文使用 γ 射線和 X 射線，當其穿透試件時，其將使底片外之增感屏產生電子，以利底片增加感光及成像效果。

(2)康普頓效應

當射線撞擊物質後，將使物質之原子游離出電子，同時射線能量將衰減及改變方向(散射)，此即為康普頓效應，射線能量在 100KeV-10MeV 間最容易產生光電效應。而本論文使用 γ 射線和 X 射線，當其穿透試件時，亦將使底片外之增感屏產生電子，以利底片增加感光及成像效果。但其射線之散射作用，將增加人員檢測之輻射傷害，因此須適當之防護，以利人員之執行。

(3)成對發生效應

當射線撞擊物質後，將使物質產生負電子及正電子，同時射線能量本身消失，此即為成對發生。當射線能量大於 1.02MeV 才會產生成對發生效應，本論文使用 γ 射線之射源為 Ir-192，其能量約為 500KeV，故較不會產生成對發生效應。

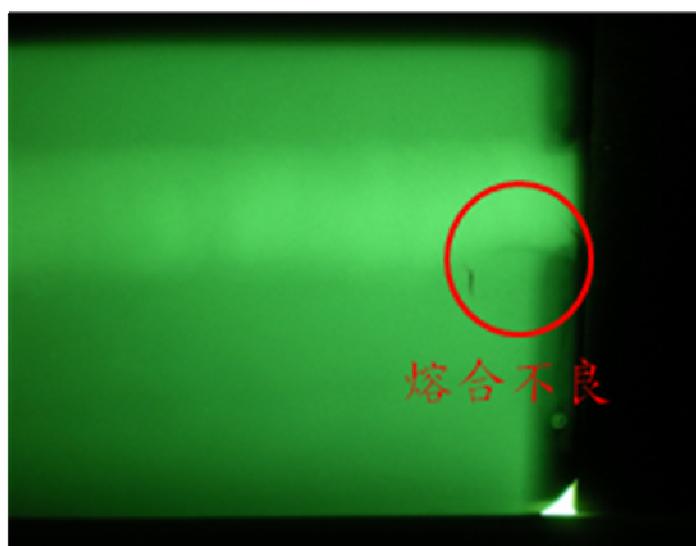
2-4 底片黑度

一般工業用放射線檢測需藉底片，顯示檢測工件內部之品質狀況(如圖四所示鐸道熔合不良)。當射線撞擊底片銀化物粒子時，粒子之結構將產生變化，並經由底片顯影之作用後，感光乳劑內之銀化合物即可析出金屬銀粒子，並產生黑色影像之記錄。

依據放射線檢測原理，當射線穿透過檢測工件，由於檢測工件內部結構之不同，使到達底片之射線強度不同，並得到一不同黑度(d)所形成之底片影像。其中黑度是指底片之黑暗程度，其定義為入射於底片之光線強度為 I_0 ，透射過底片之光線強度為 I_t ，以 I_0/I_t 取 10 為底的對數值稱之為黑度，如下式所示 [2, 3]:

$$d = \log(I_0 / I_t) \quad (2-4)$$

放射線檢測法通常會規定黑度範圍，因為假如黑度太小(即底片太白)，則底片對比不佳，而若黑度太大(即底片太黑)則判片燈將無法清楚顯像。美國機械工程師學會在法規(ASME Code)中有明確之規定，當單片判讀時，X 光黑度規定須在 1.8~4.0、 γ 射線須在 2.0~4.0。而當雙片判讀時則(X 或 γ 射線)每張黑度規定須在 1.3 以上，且合起來須在 2.6~4.0 [6, 7]。



圖四 鐳道熔合不良

2-5 幾何模糊度

底片影像的幾何模糊度是由於射線源的尺寸有一定的大小，而並非只有一點(例如 X 射線之焦點為 1-5mm， γ 射線則依同位素的種類而有所不同)。由於幾何形狀因素及射源並非一點之關係，檢測工件在底片上會呈現半陰影之地區，而半陰影地區之寬度稱為幾何模糊度。依據相似三角形之關係，幾何模糊度(Geometric Unsharpness, U_g) 如下式所示 [2, 3]：

$$\frac{U_g}{F} = \frac{D_2}{D_1} \quad (2-5)$$

其中

F：射源尺寸(本論文之射源使用 Ir-192，射源尺寸為 3.3mm* 3.3mm)。

D₂：檢測試體至底片距離。

D₁：射源至檢測試體之距離。

最佳底片影像之幾何模糊度是當射源尺寸最小、射源至檢測工件距離增加和檢測工件至底片距離愈短時，但一般法規(如美國機械工程師學會 ASME 等)對於幾何模糊度有嚴格之要求，期能確實判讀檢測工件之缺陷大小，並作為底片品質是否合格之依據。依法規(ASME Code)之要求規定幾何模糊度，例如當工件厚度在 2 吋以下時，幾何模糊度應小於 0.02 吋，以準確評估瑕疵尺寸。

三、超音波檢測法

3-1 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其為超音波 (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。其產生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發出超音波，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，且會有或多或少的衰減。當傳至介面時，超音波可能會反射或折射，因此藉由分析反射或透射所呈現之訊號，可間接檢測出材料瑕疵及其位置所在 [8]。

3-2 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的壓電式探頭，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。雖然浸液式探頭在檢測時，由於不會與受檢物直接接觸，而不需加裝耐磨層，但為防止壓電晶體薄片受損或發生漏電危險，通常會以防水透鏡來取代耐磨層。且防水透鏡具有聚焦功能，可提高探頭之檢測靈敏度〔9〕。

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。一般單晶直束探頭主要檢測鋼版品質(如圖五所示)，斜束探頭主要檢測銲道品質(如圖六所示)。若檢測之工件較薄，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〔10〕。



圖五 直束探頭檢測鋼版



圖六 斜束探頭檢測銲道

3-3 超音波之反射與折射

超音波為應力波之一種，因此需藉由介質才能傳遞，然而不同之介質其音阻抗亦不同（音阻抗為波速 V 與材料密度之乘積）。在不同的物質中，音阻抗與物質之密度成正比。所以當超音波經過兩種不同介質時，入射波形成部分反射波及部分折射波之狀態，而超音波的傳遞受衰減、反射及折射的影響，其能量將愈來愈弱。且入射角 (α) 與折射角 (β) 其關係遵循 Snell's Law [8]：

$$\sin\alpha/\sin\beta = V_1/V_2 \quad (3-1)$$

假設有兩種材料相接，其音阻抗分別為 Z_1 及 Z_2 。當超音波音壓 P_e ，由材料甲垂直入射於介面時，反射波之波式與入射波相同但方向相反，其音壓為 P_r 。而傳送入材料乙之折射波之波式和方向均與入射波相同，音壓為 P_d (如圖 2-1 所示)。其音壓間之關係如下 [8]：

$$P_r/P_e = R \quad (3-2)$$

$$P_d/P_e = D \quad (3-3)$$

其中 R 及 D 為音壓之反射係數與透過係數，其與音阻抗(Z)間之關係如下〔4〕：

$$R = Z_2 - Z_1 / Z_2 + Z_1 \quad (3-4)$$

$$D = 2Z_2 / Z_2 + Z_1 \quad (3-5)$$

3-4 超音波檢測之分類方法

超音波檢測法一般可依訊號之分析方式、發射方式及顯示方式來分類，而本文之訊號分析方式採用脈波回波法，超音波探頭髮射方式使用直束法，超音波儀器顯示方式使用 A 掃描 (A - Scan)，其分類方式如下所示〔10〕。

(1)依訊號分析方式：

可分為脈波回波法 (Pulse Echo Method) 和透射法 (Transmission Method)。脈波回波法是分析超音波之反射訊號，通常只要一個探頭兼做發射與接收，且只需一個接觸面即可。而透射法是分析透射超音波之訊號，因此需要二個探頭及二個接觸面。

(2)依訊號發射方式：

可分為直束法 (Straight Beam Method or Normal Incidence Method) 和斜束法 (Angle Beam Method or Oblique Incidence Method)。直束法是將超音波垂直傳入試件，而斜束法是將一定角度之超音波傳入試件，通常較常採用之角度有 45°、60° 及 70° 等。

(3)依訊號顯示方式：

可分為 A 掃描 (A - Scan)、B 掃描 (B - Scan)、和 C 掃描 (C - Scan)。A 掃描是探頭在試件表面某一點，所接收訊號能量與傳送時間做定量顯示。B 掃描是探頭在試件表面某一線，將訊號傳送時間做一定量顯示。C 掃描是探頭在

試件表面一面積範圍，所接收訊號能量做定量顯示。

四、磁粒檢測法

4-1 基本原理

磁粒檢測主要原理是利用磁漏現象，其將磁粒(粉)施用於經過磁化工件之表面，以檢測該工件表面或次表面的瑕疵〔11〕。由於須將工件適當地磁化方能實施，因此磁粒檢測只適用於鐵磁性材料的工件(如碳鋼等)，同時其方法操作簡便且後清理容易，所以廣泛應用於鋼結構銲道表面，可檢測如銲道裂縫或銲蝕等缺陷。

磁粒檢測之原理為當工件表面上有瑕疵，則瑕疵處之截面積減少，而受磁化工件之磁力線會尋求最低磁阻路徑，故磁力線將自行扭曲變形。同時多餘磁力線，受排擠而跳出工件表面形成磁漏現象，此磁漏現象將導致成對磁極的形成吸引磁粒。因此檢測員可檢視磁粒之聚集做出適當評估，此即為磁粒檢測之基本原理。如圖七所示使用磁軛設備磁化銲道，並利用八卦規塊測試靈敏度。



圖七 磁軛設備磁化銲道

4-2 磁化方式

磁粒檢測法之儀器設備主要有三項，包括磁性介質、磁化設備及黑光燈(螢光磁粉時使用)。通常鋼結構銲道檢測主要使用磁軛設備上磁，同時須交叉兩次(90度)，以確保完整檢測。而磁粒檢測之分類主要有下列幾種：

(1) 磁性介質

磁性介質種類分為乾式和濕式磁粒(磁粉)。其中乾式磁粒通常以噴散方式施加於試件表面。濕式磁粒通常是磁粒懸浮液(俗稱磁浴)，以噴灑或塗刷等方式施加於試件表面。

(2) 磁性電流

磁性電流種類可分為交流、直流和半波直流。直流磁化由於不易調整電壓，故較少使用。交流磁化由於集膚效應，電流集中表面，故特別適合檢測工件表面瑕疵。半波直流磁化由於穿透力較強且脈動效果好，故亦適合檢測次表面之瑕疵。

(3) 磁化方向

磁化方向可分為縱向和周向磁場。縱向磁化是使電流通過線圈或磁軛等，產生磁場，方向與線圈軸向平行，此即為縱向磁化。周向磁化是使電流通過磁棒流經試件本身或試件中心導體等，產生磁場方向與電流方向垂直，此即為周向磁化。

(4) 流程順序

依施加磁粒和磁化的先後順序可分為連續法和剩磁法。連續法是磁化電流和磁粒同時施加或連續施加，此法適合檢測保磁性低的材料(如低碳鋼等)。剩磁法是磁化電流停止後才施加磁粒，此法適合檢測保磁性高的材料(如高碳鋼等)。

4-3 檢測流程

磁粒檢測法之只適用於鐵、鈷、鎳及其合金之鐵磁性材料，同時可檢測表面及次表面瑕疵，但物件表面不得有髒物、油汙、纖維或鬆脫之銹皮，否則會影響檢驗結果。鋼結構鐸道磁粒檢測通常分為四個主要步驟：

- (1)前清理：檢驗前，鐸道表面需充分清潔乾淨。
- (2)磁軛磁化：使用磁軛設備，對鐸道施加適當方向和強度的磁場(須交叉 90 度檢測)。
- (3)施加磁粒：將磁粒均勻散佈於鐸道表面上。
- (4)判讀：觀察磁粒分佈情況，並予以判別及評估(依法規接受基準)。

五、液滲檢測法

5-1 基本原理

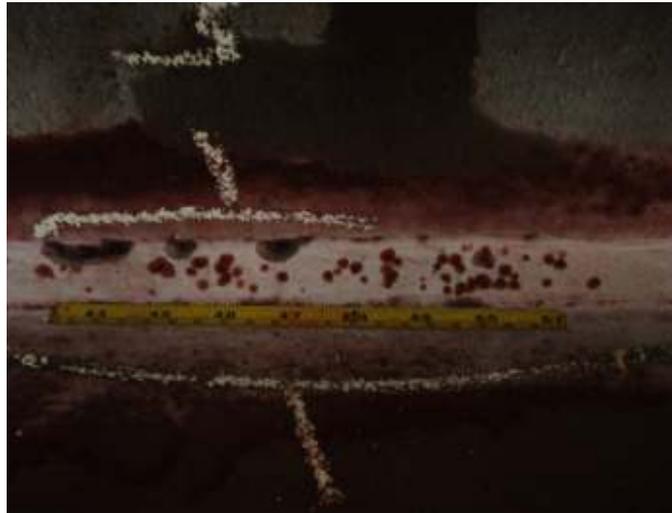
液滲檢測法主要利用毛細現象之原理執行檢測，檢測過程中利用兩次毛細現象，分別是滲透時及顯像時之毛細現象 [12]。其中滲透原理是利用滲透劑滲透到工件表面開口間斷中，並藉毛細作用使滲透材料進入工件間斷內。當滲透完成後，須將工件表面清除乾淨再施加顯像劑觀察(如圖八所示)。顯像劑為細小粉末，當施加在工件表面後會形成類似海棉組織的薄層覆蓋在工件表面上，此時在工件表面各處都有細小毛細作用產生，使間斷中殘留之滲透液藉毛細作用從間斷中吸出，同時在顯像劑上擴散放大，並觀察間斷顯示與瑕疵評估。



圖八 施加顯像劑

5-2 檢測方式

液滲檢測法依液滲材料之形式可分為兩種，分別為色比式及螢光式。若再依滲透液之清除方式可分為六種，分別為螢光水洗式、螢光後乳化式、螢光溶劑清除式、色比水洗式、色比後乳化式、色比溶劑清除式等。而液滲檢測法之儀器設備主要有三項，包括滲透液、清除劑及顯像劑。由於設備簡便，因此廣泛應用於鋼結構銲道表面檢測。同時針對表面缺陷如氣孔(如圖九所示)、銲蝕及裂縫等，顯像效果非常顯著。但本方法僅能針對非多孔性材料，同時表面清潔要求度最高(注重前清理程序)。



圖九 鐸道氣孔

六、結論

非破壞檢測之應用時機大致分為兩類，第一類為新建工程品質之檢驗：有關新建工程，非破壞檢測將扮演品質把關之角色，相關非破壞檢測之執行將可確認承製廠商是否依照合約及圖面規定施工。第二類為使用新老劣化結構設備之評估檢驗：由於檢測技術之不斷發展及劣化經驗之持續累積，非破壞檢測將可針對使用中之設備執行檢驗，以利未來殘餘壽命之評估。

鋼結構檢測應屬第一類新建工程品質之檢驗，例如新建鋼結構大樓之樑柱對接鐸道，應執行相關超音波檢測及液滲檢測，以確保鐸道品質。並使結構應力有效傳遞，以提升整體結構之安全。

七、參考文獻

1. 黃純夫，非破壞檢測概論，核能研究所，桃園 (1980)。
2. 鄭銘文、紀隆盛，放射線檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，台北 (1992)。

3. 鄭銘文、紀隆盛，放射線檢測法(中級)，中華民國非破壞檢測協會 (1988)。
4. 黃評，射線照相檢測法，核能研究所，桃園 (1977)。
5. 財團法人中華民國輻射防護協會，游離輻射防護彙萃，財團法人中華民國輻射防護協會，新竹 (2005)。
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, “ ASME Sec.V Nondestructive Examination,” American Society of Mechanical Engineers (1998).
7. AWS Structural Welding Committee, “ Structural Welding Code-Steel, “ American Welding Society (1990).
8. 金崇勳，機械材料，復文書局，台南(1995)。
9. 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)。
10. 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)。
11. 陳春長，磁粒檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會(1986)。
12. 錢宗廣，液滲檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會(1986)。