

非破壞檢測技術應用於鋼結構銲接品質之管理

彭朋畿，姬俊宇，程彥嘉

中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 NDT高級檢測師

摘要

鋼結構銲接工程應用範圍非常廣泛，其中針對銲接品質之非破壞檢測，已為工程業界普遍接受之品管方式之一，並有相關規範予以判讀及允收。本文提供一般鋼結構工程銲接品質發生之四大異常原因，並建議銲接品質之九項管理措施與四種常用之非破壞檢測方法，以利相關鋼結構工程檢測技術之推廣。

一、前言

非破壞檢測技術(NDT)扮演鋼結構銲接品質把關之角色，相關非破壞檢測之執行可確認承製廠商是否依照合約及圖面規定施工。一般使用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)及液滲檢測法 (PT)等，同時可準確發現工程品質之異常。本文探討工程品質異常與銲接缺陷發生之原因，並提出適當非破壞檢測技術之應用，最後建議工程品質管理措施，以有效提高鋼結構工程之品質。

二、鋼結構銲接品質異常原因分析

經統計一般鋼結構工程銲接品質異常原因有四項，包括未依圖面施工、施工品質不良、母材規格異常及其他因素等，相關案例如下所示：

(一) 未依圖面施工：

本銲道實施 UT 檢測 (檢測位置為鋼結構翼板與腹板交接處)，原設計圖面為全滲透銲接 (雙邊開槽與加銲腳長)，但現場 UT 檢測發現為填角銲接，顯示承製廠商並未依照圖面施工，異常位置如圖 1 所示，相關缺陷鏟修後複驗合格。

(二) 施工品質不良

本銲道實施 UT 檢測 (工件為管線銲接)，檢測結果發現銲道熔合不良 (IF)之缺陷，顯示承製廠商銲接施工品質不良 (如圖 2、3 所示)，相關缺陷鏟修後複驗合格。

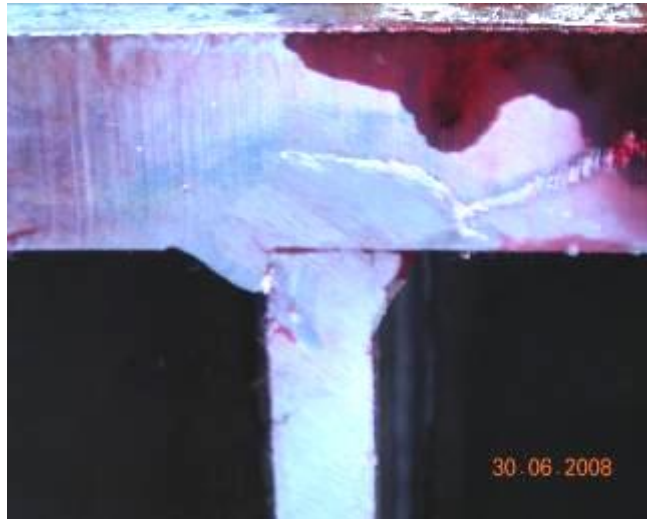


圖 1 填角銲接(PT 檢測)



圖 2 UT 檢測



圖 3 銲道熔合不良之缺陷 (PT 檢測)

(三) 母材規格不符

本案例為管線對接工程，原始設計母材應為無縫鋼管(無銲接製程)，但 NDT 檢測發現承製廠商所提供之管線為有縫鋼管(如圖 4 所示)，顯示承製廠商未確實執行進料品質檢驗 (承製廠商應自行確認原料為無縫鋼管)，本工程全數依合約改換為無縫鋼管。



圖 4 有縫管 (RT 檢測)

(四) 其他因素

本管線銲道依合約要求承製廠商應提供之 NDT 自檢報告合格，但現場抽驗發現銲道內部多處瑕疵，顯示承製廠商未確實執行品質 NDT 檢驗 (如圖 5 所示)，相關缺陷鏟修後複驗合格。

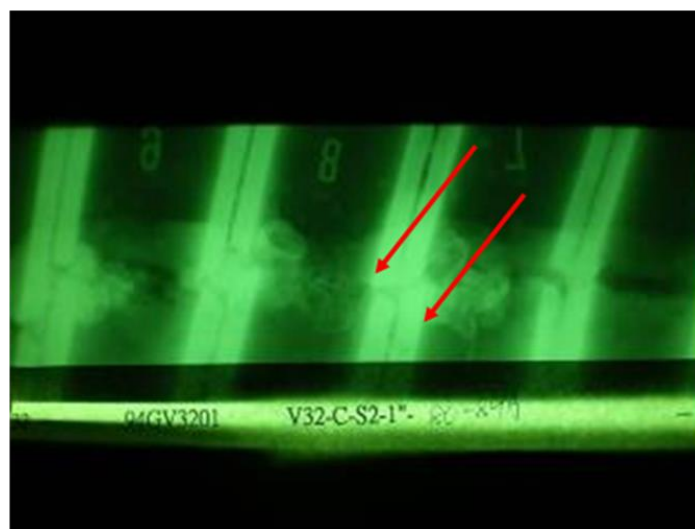


圖 5 銲道內部多處瑕疵 (RT 檢測)

三、銲道瑕疵或缺陷

鋼結構已廣泛應用於各工程產業上，如大樓、廠房、橋樑、管線或設備等，其中銲接品質攸關鋼結構整體功能是否符合原設計之要求，因此良好之銲接品質更顯重要。

(一) 銲道常見瑕疵

銲接品質除執行相關物化性試驗外，亦會執行適當之非破壞檢測，以了解銲道是否有瑕疵或缺陷。瑕疵是指在某一均勻的事物中的任一間斷，若超過規範或合約即為缺陷。

一般銲接瑕疵包括裂縫(cracks)、熔合不良(incomplete fusion)、滲透不足(incomplete penetration)、銲渣(slag)、夾渣(inclusions)、氣孔(porosity)、銲蝕(undercut)、銲道未填滿(underfill)、重疊(overlap)、銲道凸出(convexity)等。相關常見銲接瑕疵如圖 6 所示

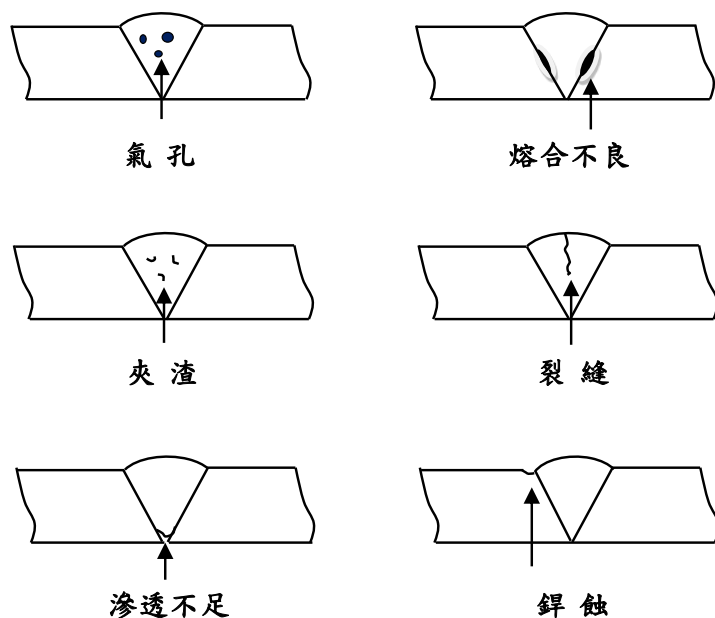


圖 6 常見銲接瑕疵

(二) 瑕疵發生原因

瑕疵發生原因與相關銲接管理直接相關，因此除了解瑕疵發生原因外，更應針對可能之因素予以消弭，以降低發生瑕疵之機率。如銲接氣孔產生原因主要為銲接區存在污染物或濕氣，這些污染物或濕氣可能來自母材、銲條及保護氣體等。銲接時污染物或濕氣被逐漸溶解與冷卻，上述過程氣體會逐漸被排出，同時先在熔融金屬內移動再往大氣排出，若熔融金屬之凝固速度比氣泡移動或排出速度快時，氣泡就會殘留在凝固金屬內

形成氣孔瑕疵。因此相關銲條之乾燥、保護氣體之充分與銲前銲道之清潔等因素，均會導致銲接氣孔之產生。另夾渣發生之原因多為多道銲接時，未將前一層之銲渣清除乾淨或銲接過程中銲渣與鐵水相互熔在一起，故當熔池凝固時，熔渣來不及浮出表面，即造成夾渣之瑕疵 [1]，一般瑕疵發生之原因整理如表 1 所示。

由上可知，相關單位應落實相關銲接程序之管理，同時使用適當之 NDT 檢測技術，方能正確檢出瑕疵，如一般銲道表面瑕疵可使用 PT 或 MT 檢測，內部瑕疵可使用 UT 或 RT 檢測。

表 1 一般瑕疵發生之原因

瑕疵分類	瑕疵發生之原因
氣孔	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流過大 2. 電弧過長 3. 銲條乾燥不良 4. 銲前銲道內污染物、濕氣及清潔不良 5. 保護氣體不足
夾渣	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流過大 2. 銲層間之清除不清潔 3. 銲接過程中銲渣與鐵水相互熔在一起 4. 開槽面切割不良 5. 銲條大小不適合
滲透不足	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流太小 2. 間隙太大或太小
熔合不良	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流過小 2. 銲道內有雜物 3. 堆焊層次順序不良 4. 銲條大小不適合 5. 銲接速度不均勻
裂縫	<ol style="list-style-type: none"> 1. 銲道急速冷卻 2. 銲材不當 3. 工作方法不良 4. 內應力太強
銲蝕	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電流太大 2. 電弧過長 3. 運棒速度太快 4. 銲條運棒角度不良

(三) 鐸道瑕疵接受基準

鐸道瑕疵接受基準須依循合約或規範，以利鐸接品質之認定。常見鐸道規範如中華民國 CNS、美國 AWS 或日本 JIS，本文以美國鋼結構協會 AWS D1.1 為例 [2]，如液滲檢測法之鐸道接受標準，其明確規定不允許任何裂縫、熔合不良與鐸道未填滿等瑕疵 (如表 2 所示)，但氣孔、鐸蝕與腳長(或喉深)不足則有相關之容許範圍。

表 2 鐸道接受基準

項次	接受基準	承受靜態力 (非管結構)	承受動態力 (非管結構)	管結構承受 動靜態力
1	裂縫(Crack) 任何裂縫都不合格，不論其尺寸或發生部位。	X	X	X
2	熔合不良(Incomplete Fusion) 鐸道之相鄰鐸層間，以及鐸道金屬與母材間須完全熔合。	X	X	X
3	鐸道未填滿(Underfill) 除有效鐸道長度外，所有鐸道須填滿至少與母材齊高，且不得低於母材。	X	X	X

四、非破壞檢測技術應用

一般執行 NDT 檢測方法前，建議應確實執行目視檢測，包括圖面核對、外觀檢查及選用正確 NDT 檢測方法等。本文簡介四種常用之工程鐸接 NDT 檢測方法，如下所示：

(一) 放射線檢測法

放射線檢測法是利用具有穿透能力之射線，穿透檢測工件，並達於底片或螢幕等介質，以生成影像之記錄[3]。工業放射線檢測法主要應用於鋼結構及管線鐸道內部品質之檢測(如圖 7 及圖 8 所示)，一般放射線檢測法依射源之種類可分為兩種，分別為 X 射線及 γ 射線。X 射線是由高速電子流撞擊物質陽極靶而產生，而 γ 射線是由不穩定同位素之衰變所產生的高能量電磁波，目前工程界放射線檢測法較常使用之同位素為 Ir-192、Co-60 及銻-137 等三種 γ 射線裝備 [4]。放射線與物質作用後，主要有三種作用，包括光電效應(Photoelectric Effect)、康普頓效應(Compton Effect)及成對發生(Pair Production)。

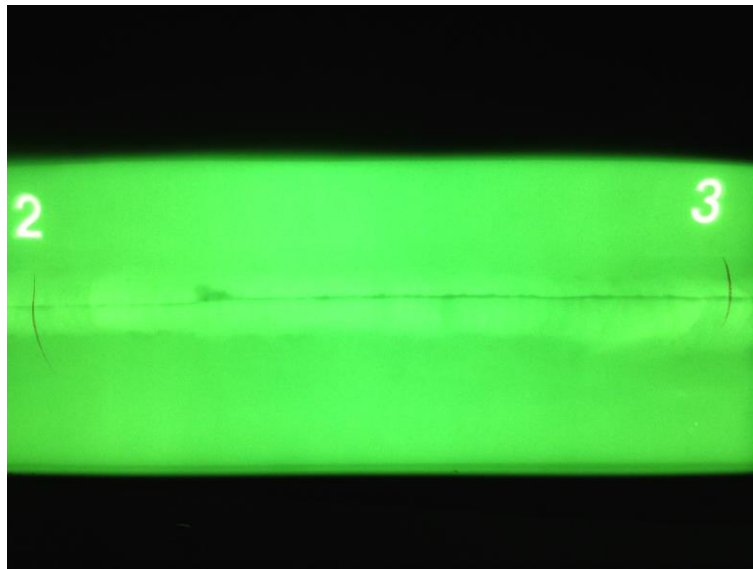


圖 7 RT 檢測滲透不足之瑕疵

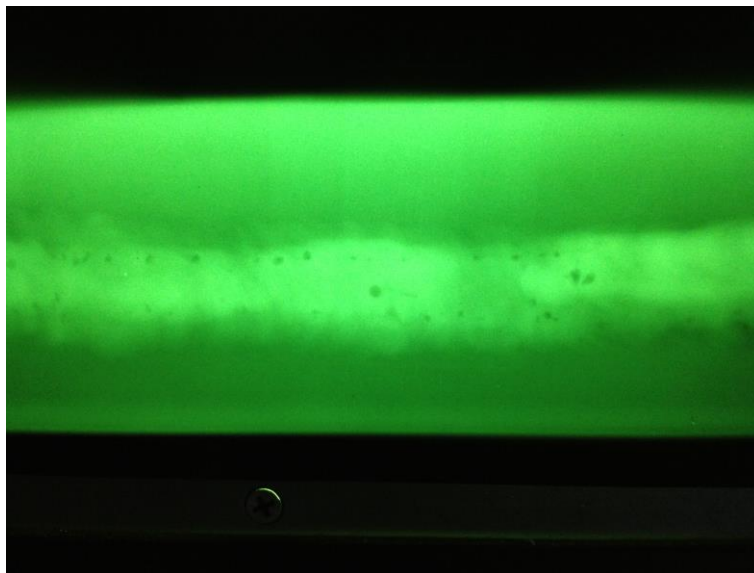


圖 8 RT 檢測氣孔之瑕疵

(二) 超音波檢測法

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 [5]。

超音波音束影響的範圍稱為音場，超音波音束本身隨壓電晶片的距離而改變，其音壓並非均勻性的變化。音場分為兩個區域，包括近場與遠場。一般近場受到壓電晶片相互干涉較為明顯，音壓變化較為複雜。而遠場為近場之後的區域，其音壓變化較均勻 [5]。

超音波依信號檢出方式較常使用脈波回波法，其利用探頭接收到瑕疵回波或強度減弱甚至消失的背面回波（如圖 1 及圖 2 所示），以作為檢測判讀之依據。當探頭接收到瑕疵回波時，可利用信號出現時間換算為音束路徑長度，進而計算出瑕疵所在位置。若需檢測與檢測面垂直之瑕疵時，則利用兩個分開的探頭分別執行發射及接收（如圖 3 所示），此亦稱為投捕法，一般可用於檢測軌道銲接之平面狀瑕疵 [6]。

（三）磁粒檢測法

磁粒檢測主要原理是利用磁漏現象，其將磁粒（粉）施加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。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而自行扭曲變形。若作用之磁場強度夠強，便產生部分磁力線受排擠跳出工件表面，形成磁漏現象 [7]。此磁漏現象將導致成對磁極的形成而吸引磁粒，因此檢測人員可檢視磁粒聚集現象而做出適當之評估。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），同時其方法因操作簡便且後清理容易，所以廣泛應用於鋼結構銲道表面之檢測 [8]，可檢測如銲道裂縫或銲蝕等缺陷（如圖 9 所示）。

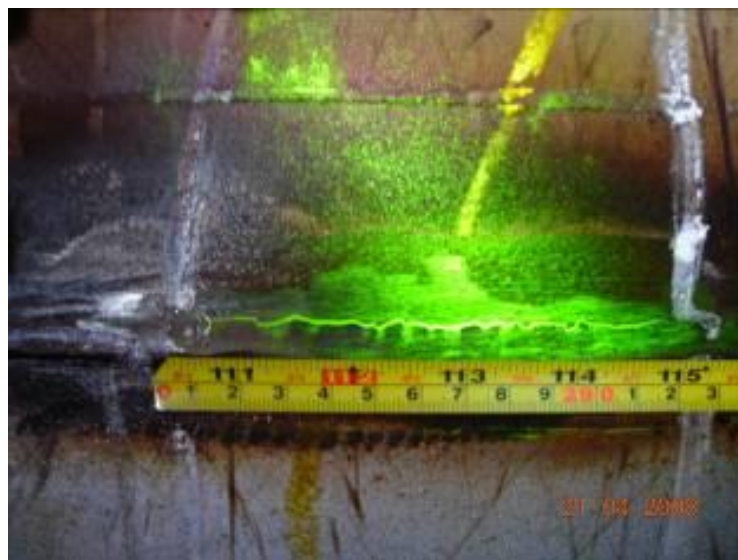


圖 9 MT 檢測裂縫之瑕疵

(四) 液滲檢測法

液滲檢測法主要利用兩次毛細現象之原理執行檢測 [9]，當滲透液施加於工件表面時，表面間斷相當於一端封閉之毛細管，滲透液藉由毛細作用逐漸滲入工件表面間斷內，當滲透完成後，將工件表面多餘滲透液清除乾淨，再施加顯像劑於被檢區，以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孔洞產生，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，此時便可進行間斷顯示觀察與瑕疵評估 (如圖 10 所示)。

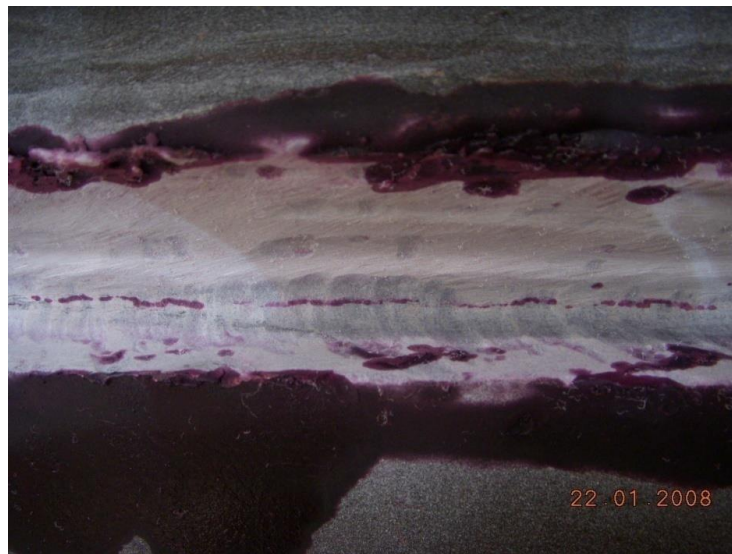


圖 10 PT 檢測裂縫之瑕疵

五、工程品質管理措施

有效與適當之管理措施，可有效提高鋼結構銲接之品質。相關管制措施可包括人員、程序、制度與標準等項目，本文建議九項鋼結構工程品質管理措施，以提供相關工程人員執行銲接品質之管理。

(一) 召開施工前協調會議

工程管理單位針對重要設備應於施工前召開施工前協調會議，並邀請承攬廠商及 NDT 檢驗單位共同依合約討論檢驗標準及抽驗機制 (必要時工程合約制訂前，亦可邀請 NDT 檢驗單位共同擬訂)。同時請承攬廠商確實依照圖面施工，NDT 檢驗單位應依照圖面執行檢驗 (如銲接型式與缺陷接受標準等)。

(二) 提送合格焊工名冊

所有焊工建議應通過符合程序之焊工考試，並提供有效焊接認證等相關證明，方可進行相關焊接組裝之工作。工程管理單位亦可對於承攬廠商提供之合格焊工名冊進行焊工考試（如採抽測機制等），以利現場焊接品質之管理（後續不合格率較高之焊工亦須加強管理）。

(三) 提送焊接程序標準

承攬廠商執行重要設備焊接前應先提送合格之焊接程序與相關標準，包括 WPS (Welding Procedure Specification) 及 PQR (Procedure Qualification Record)。工程管理單位之監工應隨時依 WPS 查核焊接程序等相關參數，如電壓、電流及焊材等，以降低焊接不合格率之發生。標準化程序之執行，可有效降低不合格率之發生。

(四) 預製廠品質管理

工程管理單位針對重要設備除現場安裝組立之構件須執行抽驗外，亦應從預製廠即派人執行相關品質管理，包括進料檢驗、尺寸查核及預製廠焊接檢驗等，以避免現場安裝若發現不符合情況，造成現場修改不易及影響工期等狀況。另 NDT 檢驗單位應可協助相關母材規格及預製焊接檢驗之確認等，可有效協助預製廠之品管機制。

(五) 廠商確實自檢

工程管理單位應要求承攬廠商針對重要設備確實自檢及現場查核，並查核有關承攬廠商之 NDT 自檢人員資格及檢驗程序等。另承攬廠商自檢完成後，NDT 檢驗單位應協助抽驗，相關自檢之落實將可降低抽驗比例及檢驗之成本。

(六) 重要設備須抽驗

工程管理單位針對重要設備或組件應須檢驗，以避免未來設備因焊接缺陷而失效，甚至造成停機或工安之損失。

(七) 注意修補程序

工程管理單位針對重要設備不合格之部位應注意修補程序，如預熱、後熱處理及焊材等管制工作，適當及正確的修補程序方可確認設備修補後之完整。

(八) 不合格追蹤管制

對於品質不合格之組件，工程管理單位應確實管控，如建立檢驗追蹤管制表等，以確保修補後之品質合格，並應保留相關紀錄及報告資料。

(九) 工程品管教育訓練與落實證照制度

工程管理單位可辦理相關工程品管訓練課程，同時建議應考取相關專業技術證照，包括非破壞檢測師、銲接檢驗師及品管工程師等，以培養相關品管人力。

六、結論

本文提供一般鋼結構銲接品質異常之原因分析，並建議適當品質管理措施，其中非破壞檢測技術可輔助確認銲接品質之良窳，故若能於鋼結構工程之銲接前、中及後執行相關檢驗，預期應可有效提高銲接品質。非破壞檢測方法之互相搭配是提高檢測準確度之趨勢，因此建議檢測者在執行檢測時，可搭配不同之非破壞技術，針對檢測結果較嚴重或較重要之部位進行再確認之工作，以達到有效檢測之目的。

七、參考文獻

1. 台灣銲接協會委員會，銲接檢驗師資格檢定基礎課程，台灣銲接協會，2010年。
2. AWS D1 Committee, "Structural Welding Code-Steel", American Welding Society (2008).
3. 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，1992年。
4. 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年。
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年。
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年。
7. 金崇勳，機械材料，復文書局，台南，1995年。
8. 陳春長，磁粒檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，1986年。
9. 錢宗廣，液滲檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，1986年。