

大型碳鋼管件焊接缺陷分析之探討 The Welding Defect Analysis of Large Carbon Steel Tubes

賴建霖^{*1}、羅亦旋¹、吳宗峯¹

Chien-Lin Lai^{*1}, I-Hsuang Lo¹, Tsung-Feng Wu¹

中文摘要

國內某工廠進行大型碳鋼管件之銲接組裝過程中，因工件幾何形狀複雜，使銲接施工不易，銲後以超音波探傷檢測，顯示有明顯缺陷，本研究以銲件金相觀察、硬度量測與彎曲試驗，分析銲件缺陷型態及可能之缺陷肇因。研究顯示，缺陷主要分布於打底銲道的根部、打底銲道層與層間以及熔融線上，為夾渣與熔融線熔合不良所導致，而銲道內部各層銲道間之接合狀況則無其他裂紋發生。硬度量測顯示銲件之母材、熱影響區與銲道皆無異常高的數據，經彎曲測試後，則無任何裂紋產生，顯示整體銲道內部接合狀況良好。因工件幾何形狀複雜導致打底銲道缺陷與熔合不良的狀況，應可透過優化銲接作業程序、銲接人員技術檢定及現場作業管理進行改善。

關鍵詞：碳鋼、管件、銲接。

Abstract

To weld and assemble large carbon steel pipe is hard due to the complex geometry of the workpiece in a domestic factory. Therefore, Ultrasonic testing was utilized and the results showed the obvious defects after welding. In this study, metallographic observation, hardness measurement and bending test were applied to analyze the type and possible causes of welding defects. Results show that the defects are mainly distributed in the bottom of the root weld bead, between the bottom bead layers, and on the fusion line, while the layers between the inner weld bead have no cracks occurred. These defects were caused by the slag and poor fusion on the fusion line. The hardness measurement shows that the base metal, heat-affected zone and weld metal of the weldment have no abnormally high value. After the bending test, no cracks have occurred, indicating that the condition of overall inner weld beads is good. The defects of root weld bead and poor fusion due to the complex geometry of the

收到日期：108 年 10 月 22 日

修訂日期：109 年 05 月 01 日

接受日期：109 年 08 月 05 日

¹ 中國鋼鐵股份有限公司綠能與系統整合研究發展處

¹ Green Energy & System Integration Research & Development Department, China Steel Corporation

*聯絡作者：185124@mail.csc.com.tw

workpiece could be improved by optimizing welding procedures, welder's technical verification and on-site operation management.

Keywords: Carbon steel; Tube; welding.

1. 前言

碳鋼依照碳含量分為低、中、高碳鋼，材料組織與機械特性可依照應用需求，進行材料選用與加工處理等，其中銲接加工常用以接合碳鋼材料，製作各種形狀複雜之產品與結構件等等，應用相當廣泛。碳含量對材料銲接性有顯著的影響，文獻指出銲接材料之碳當量 (Carbon equivalent value, 簡稱 CEV) 低於 0.4% 時，鋼材淬硬傾向低，銲接性良好，不須預熱，而介於 0.4~0.6% 時，則淬硬傾向高，銲前須進行預熱處理^[1-4]。除材料本身特性外，材料厚度、對接形態以及銲接參數 (如熱輸入量、銲接速度、層間溫度、銲條選擇等)，亦對銲接成敗與否有直接的影響^[5,6]。此次分析之大型碳鋼管件屬低碳鋼 (CEV=0.35%)，在有預熱的狀態下，銲後仍有缺陷產生，本研究即針對此銲接缺陷進行破損分析，釐清可能之缺陷肇因。

2. 實驗方法

本研究進行破損分析之材料為含碳量約 0.13wt% 之大型碳鋼銲接管件，材料成份如表 1 所示。大型管件巨觀如圖 1 所示 (管壁厚度約 40mm)，採 10°C 預熱之多道次銲接接合，其中打底以金屬芯包藥銲接 (Metal-Cored Arc Welding, MCAW)，其餘銲道則以包藥銲線電弧銲 (Flux-Cored Arc Welding, FCAW) 進行接合。銲接後以超音波非破壞檢測 (Ultrasonic Testing, UT) 方式確認銲件有無缺陷並定位缺陷位置，並裁切試片進行顯微組織與缺陷分析。以光學顯微鏡 (Olympus Lext OLS4100) 與電子顯微鏡 (ZEISS Sigma 300VP) 觀察銲道組織與缺陷位置之析出物成份。銲道組織硬度量測以 Struers Duramin 100 硬度機分別針對母材、熱影響區與銲道熔融區進行分析。此外，

將銲道試片鋸切後，以彎曲試驗評估銲道整體完整性與耐用性。

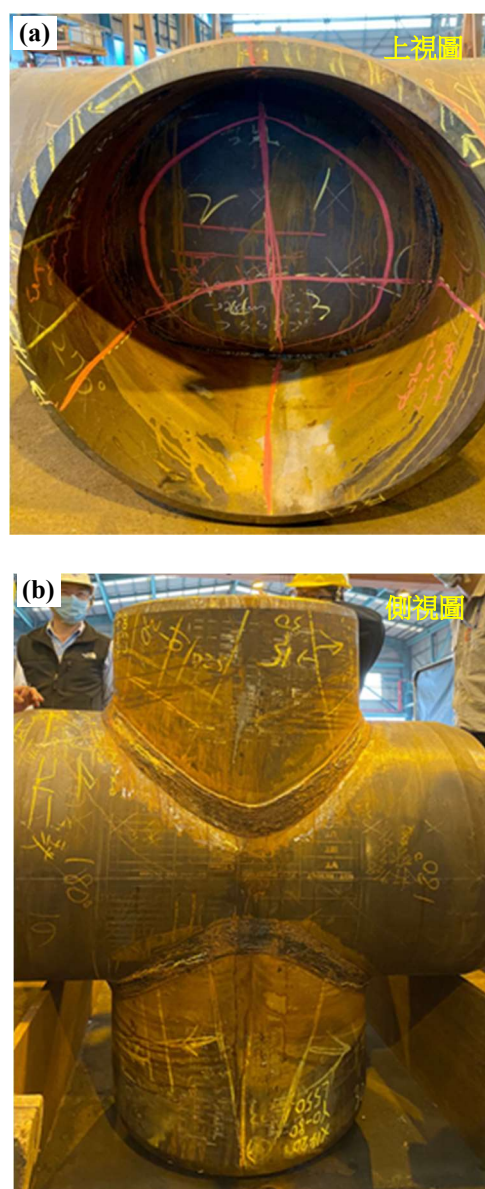


圖 1 大型碳鋼管件銲件巨觀照片: (a) 上視圖; (b) 側視圖。

Figure 1 Macroscopic pictures of large carbon steel tube weldment: (a) Top view; (b) Side view.

表 1 碳鋼管件成份表。

Table1 Chemical composition of carbon steel tube.

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb	Ti
含量 (wt%)	0.13	0.31	1.31	0.012	0.002	0.01	0.02	0.002	0.005	0.026	0.014

3. 實驗結果與討論

3.1 組織觀察與硬度分析

此次分析的碳鋼管件銲道組織如圖 2 所示，銲道熔融區主要為不同形態之肥粒鐵 (圖 2(a))，包含晶界上的魏德曼肥粒鐵 (Widmanstätten Ferrite, WF) 與晶粒內部之針狀肥粒鐵 (Acicular Ferrite, AF)。熱影響區的形貌則因受熱，部份肥粒鐵形貌改變為等軸狀，如圖 2(b)所示，隨著離銲道近與遠分為粗晶與細晶熱影響區，形貌相似。

硬度方面，取管件厚度 1/4、1/2 及 3/4 處，進行母材 (Base metal, BM)、熱影響區 (Heat affected Zone, HAZ) 及熔融區 (Weld Metal, WM) 之硬度量測。量測結果如圖 3 所示，Line1 至 Line3 各區之硬度平均值分別為 HV 207 (BM) HV 211 (HAZ) 及 HV 236 (WM)，顯示 WM 平均硬度最高，但整體硬度值落於 HV 177~HV 280 之間，無異常高的數據。

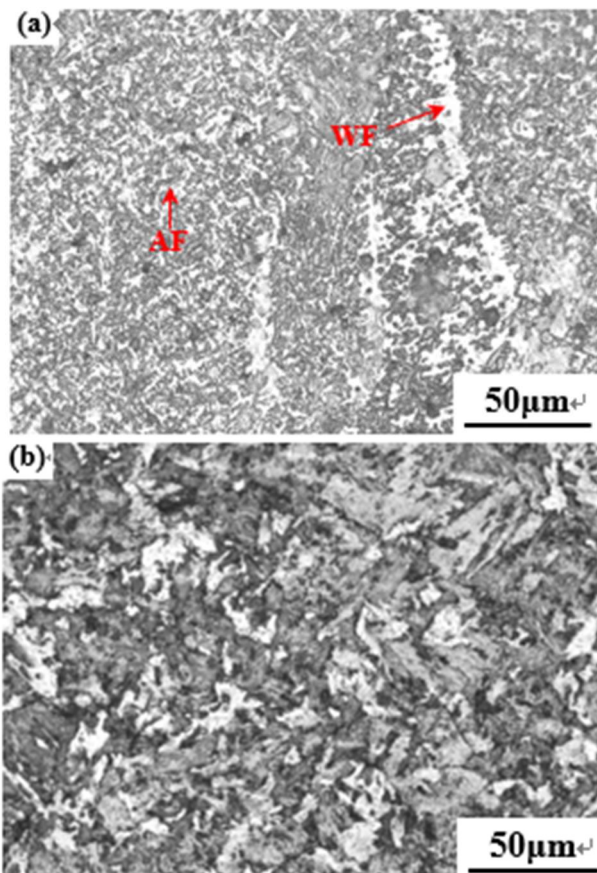


圖 2 碳鋼管件銲道顯微組織照片：(a) 銲道熔融區；(b) 熱影響區。

Figure 2 Microstructure of carbon steel tube weldment: (a) Fusion zone; (b) Heat affected zone.

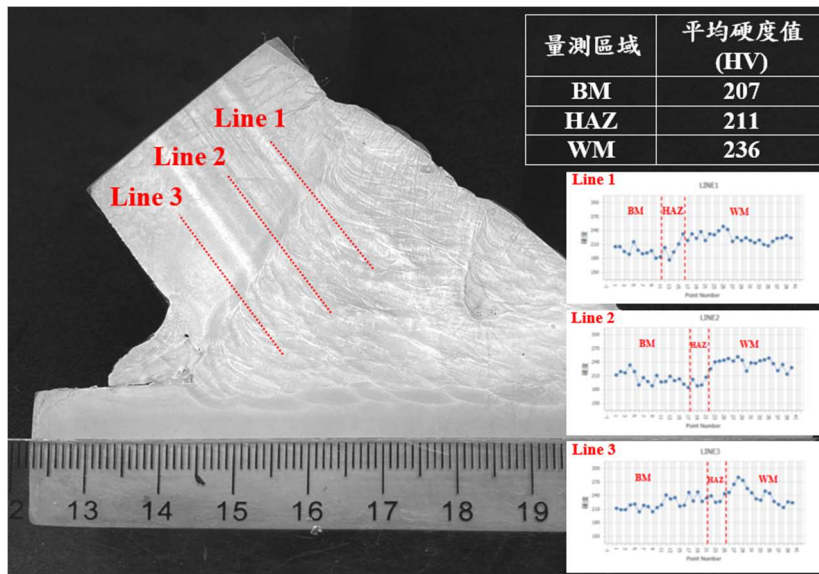


圖 3 碳鋼管件銲道硬度分析結果。
Figure 3 Hardness measurement results of the carbon steel tube weldment

3.2 銲道缺陷

大型碳鋼管件經多道次銲接後，超音波探傷檢測結果顯示有明顯回波，即銲道內部有大範圍之缺陷分佈，分析結果如圖 4 所示。定位缺陷位置後，將銲接管件鋸切下進行組織與缺陷觀察，截面巨觀如圖 5 所示，目視即可看出部分缺陷。光學顯微鏡可觀察到缺陷分佈在銲道根部，如圖 5(a) 中標示區域 I 與 II 的位置 (其中區域 I 為鏟修後再銲的銲道根部)。另外熔融線的位置亦有熔

融不良的情形，如圖 5(a) 中區域 III 的位置。熔融線上部分缺陷以超音波非破檢測不易檢測，且缺陷中多有夾雜物存在，如圖 5(b)~(d)所示。缺陷中的夾雜物經 SEM 觀察，形貌與成分分析位置如圖 6 所示。分析結果如表 2 (分析點為圖 5(d) 中標示 A 處之夾雜物)，顯示夾雜物為有含 Si 的氧化物 (俗稱夾渣) 以及銲接前未磨除乾淨之碳鋼表面氧化銹皮。

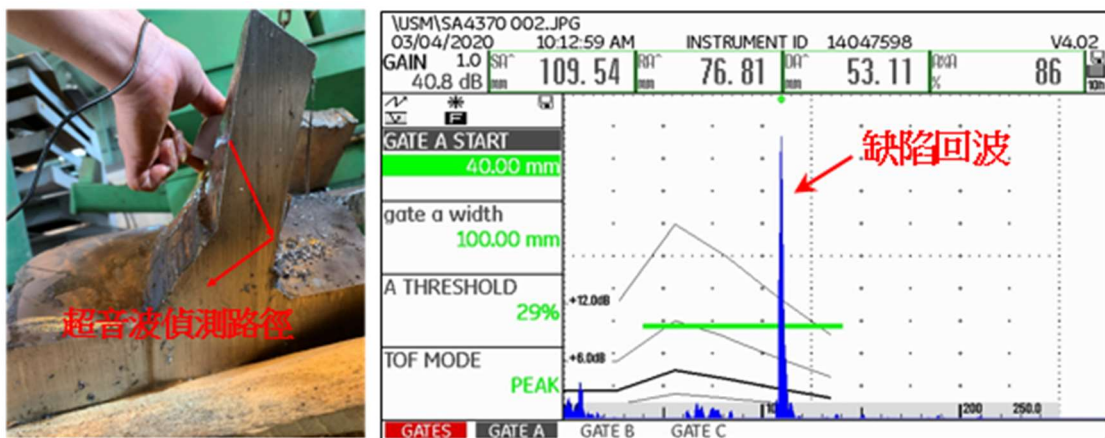


圖 4 超音波檢測結果。
Figure 4 Inspection result of ultrasonic test.

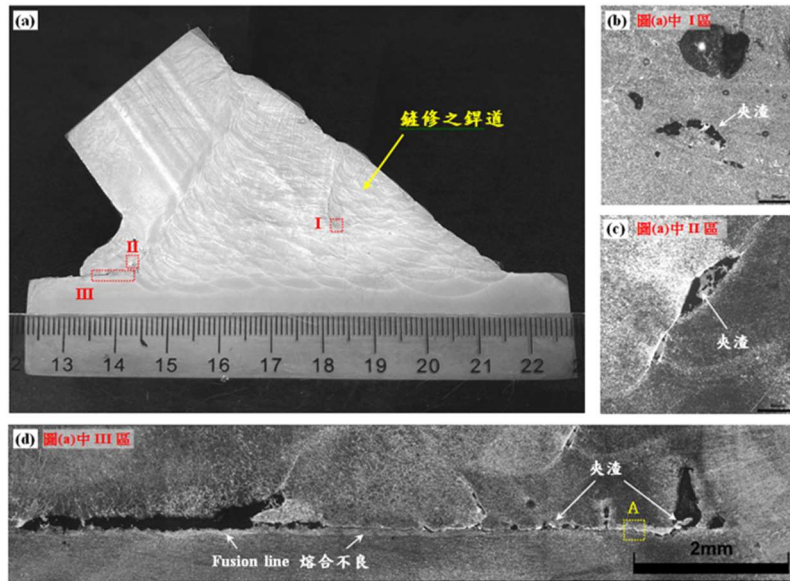


圖 5 碳鋼銲接管件截面巨觀照片：(a) 截面巨觀照片；(b)(c) 缺陷中夾渣照片；(d) 熔融線熔合不良區域照片。

Figure 5 Cross section pictures of carbon steel tube weldment: (a) Macroscopic picture; (b)(c) Pictures of slag in the defect; (d) picture of poor fusion region.

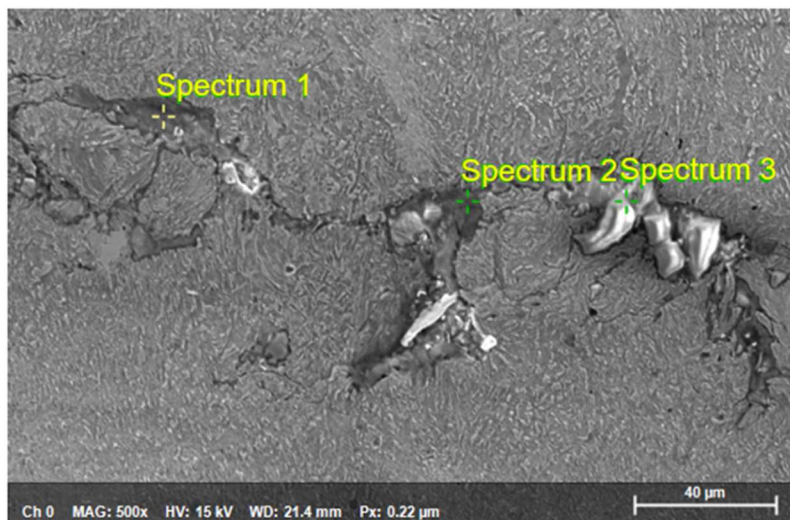


圖 6 缺陷中夾雜物 SEM 影像。

Figure 6 SEM image of inclusions in defect.

表 2 夾雜物 EDS 分析結果。

Table2 EDS analysis result of inclusions.

Spectrum	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	備註
Spectrum 1	24.63	36.71	0.23	0.13	4.62	0.37	0.23	0.37	---	0.31	32.39	銹皮
Spectrum 2	29.34	26.84	0.14	0.12	8.80	0.51	0.18	0.45	---	0.41	33.21	銹皮
Spectrum 3	28.51	34.35	0.62	0.22	0.49	9.81	---	---	1.72	19.55	4.72	夾渣

3.3 銲件彎曲試驗

除了上述觀察到的打底銲道之根部缺陷外，顯微鏡觀察銲道內部各層銲道間之接合狀況十分良好，銲道中亦無夾渣與其他裂紋發生，此應係因相較於打底銲道之施工角度狹窄，外層銲道較

易施工有關。為確認整體銲道內部接合狀況，取試片進行彎曲試驗，測試結果如圖 7 所示，經大幅度彎曲後，銲件無任何裂紋產生，顯示整體銲道接合狀況良好，具優異材料韌性，與金相觀察結果相符。

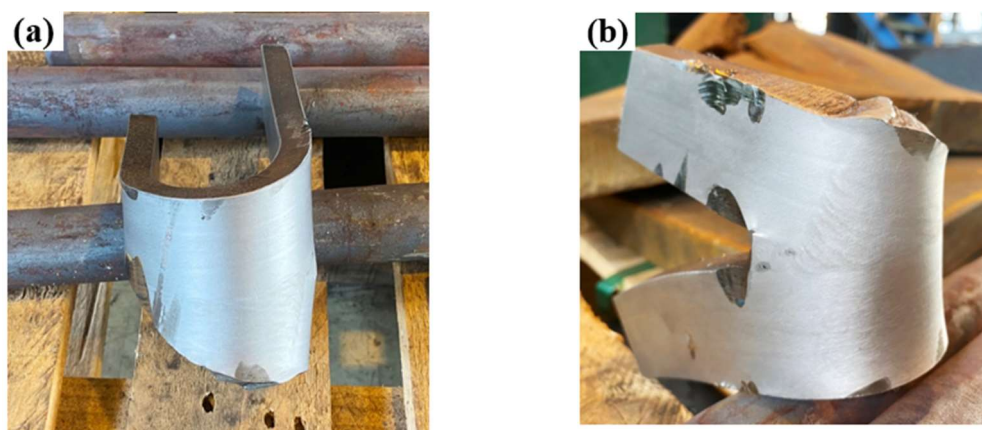


圖 7 銲件彎曲試驗結果照片：(a) 正面照片；(b) 側面照片。
Figure 7 Pictures of weldment after bending test: (a) Front view; (b) Side view.

4. 結果討論

由實驗結果可知現場超音波檢測到之缺陷為夾渣與熔融線熔合不良，非一般銲接常見因銲接過程高溫階段熔池凝固時發生偏析造成的熱裂紋，以及於低溫階段或延遲發生之冷裂紋。造成夾渣與熔融線熔合不良可能的原因可能為下列幾點：

- I. 銲接施作角度狹窄：以圖 1(a) 為例，在管件內圈 10~2 點鐘與 4~8 點鐘方位打底時，銲接角度狹窄，使施工難度提升，缺陷率提高，導致打底銲道發生明顯熔合不良現象。鏟修之銲道根部亦因角度狹窄問題，發生介面缺陷與夾渣。
- II. 銲接功率不足：銲接功率太低易使銲道凝固速率較快，銲渣未排出即凝固，形成夾渣缺陷，甚至無法熔融欲接合之金屬。
- III. 銲接施作方式不恰當：銲接行進方式分為前進法與後退法，此次銲接製程使用包藥銲線，原廠建議以後退法取代現行之前進法施工，避免銲渣殘留。

- IV. 預熱溫度不足：一般而言，預熱可防止冷裂發生，降低銲接殘留應力，若未採取適當的預熱處理，將提升銲接缺陷率。
- V. 銲接前表面清潔不佳：由夾雜物分析觀察到富含 Fe 與 O (圖 6 之 spectrum 1 & 2) 之組織可知銲接前可能因施工角度狹窄，研磨作業不易，導致表面清潔不足而殘留銹皮，影響銲接接合狀況。

5. 結論

本研究針對大型碳鋼管件銲接進行缺陷分析研究，分析結果係因管件之接合角度造成銲接角度狹窄，使施工不易，造成打底銲道有夾渣與熔融線熔合不良。另外，銲接前置作業，如工件研磨、預熱、工件定位、夾治具製作等，對銲接成果亦影響甚巨。因此，針對此案大型碳鋼管件銲接之缺陷分析，整體內部銲道之整體性與耐用性良好，而打底銲道根部之缺陷則可透過銲接作業程

序、銲接人員技術檢定 (銲接師傅技術要求較高) 及現場作業管理等方面之改善優化，減少此類銲接缺陷發生。

參考文獻

- [1] EN 1011-2: Welding Recommendations for welding of metallic materials - Part 2: Arc welding of ferritic steels, British Standards Institution, 2001.
- [2] BS5135-1984: Process or arc welding of carbon and carbon manganese steels, British Standards Institution, 1984.
- [3] AWS D1.1-2010 Annex I: Guideline on alternative methods for determining preheat, American Welding Society Inc, 2010.
- [4] "A guide to the selection and welding of low alloy structural steel", Dearden J and O'Neill H, Transactions of the Institute of Welding, Vol.3, 1940, pp203-214.
- [5] " Study of welding velocity and pulse frequency on microstructure and mechanical properties of pulsed gas metal arc welded high strength low alloy steel", Mirzaei, M., Arabi Jeshvaghani, R., Yazdipour, A., Zangeneh-Madar, K., Materials & Design, Vol. 51, 2010, pp709-713.
- [6] "Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction-stir-welded aluminum", Sakthivel, T., Sengar, G.S., Mukhopadhyay, J., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 43, No. 5-6, 2009, pp468-473.