

SA533B壓力槽鋼材水媒環境效應低週疲勞行為研究

葉基榮*、黃俊雄、黃俊源、許曉弘、宋游楠崑、郭榮卿

The Low-Cycle Fatigue Behavior of SA533B Reactor Pressure Vessel Steel under High Temperature and High Pressure Water Environments

J. J. Yeh*, J. S. Huang, J. Y. Huang, H. H. Hsu, N. K. Sungyu, R. C. Kuo

摘 要

SA533B 低合金鋼係核能電廠反應爐壓力槽之構造鋼材。本報告主要探討於 10 MPa 高壓循環流動水媒中壓力槽鋼材低週疲勞行為受水媒溫度、應變振幅及水中溶氧量等不同因素之影響情形。測試結果顯示，於飽和溶氧水媒中，水媒溫度 (150°C-300°C) 對疲勞壽命影響之效應相當顯著，疲勞壽命差異大；然於除氧水媒中，疲勞壽命相近，溫度效應不明顯。另隨著應變振幅之增加，鋼材低週疲勞壽命週期數明顯降低。水媒中溶氧量之多寡對鋼材低週疲勞壽命具有決定性的影響，降低溶氧量可抑低水媒環境中鋼材之疲勞劣化。比較空氣與水媒中之低週疲勞測試結果，明顯可見水媒環境效應對鋼材疲勞劣化之影響程度。腐蝕與疲勞協同作用的結果顯著降低水媒中鋼材疲勞壽命，鋼材在飽和溶氧水媒中之疲勞壽命最短；然隨著溶氧降低至 1 ppb 左右，鋼材疲勞壽命漸趨近於空氣中測試者。X-光繞射 (XRD) 分析板狀試片表面腐蝕生成物結果發現，水媒中溶氧量多寡與水媒溫度兩者顯著影響腐蝕產物組成，外觀顏色變異情形亦深受該兩因素影響。腐蝕生成物之成分與顏色變化是環境效應的一種指標，有助於了解 SA533B 壓力槽鋼材在高溫高壓水媒中之低週疲勞行為。

關鍵詞：SA533B 壓力槽鋼材；水媒溫度；應變振幅；水中溶氧量；低週疲勞。

ABSTRACT

SA533B low-alloy steel is the material mainly used for the reactor pressure vessels (RPVS) of nuclear power plants. This report is focused on the effects of temperature, strain amplitude and dissolved oxygen content in feed water on the low-cycle fatigue (LCF) behavior of SA533B RPV steel in circulating water environments at a pressure of 10 MPa. A significant effect of

temperature on fatigue life was observed with the specimens tested in a water environment saturated with oxygen. The fatigue life was varied with temperatures between 150°C and 300°C. But little or no dependence of fatigue life on temperature was noted with the water environment with an oxygen content of 213 ppb. The fatigue lives of the specimens tested at different temperatures are not much different. The fatigue life significantly decreased with increasing strain amplitude. The low-cycle fatigue life of the RPV steel is also deeply affected by the dissolved oxygen content in feed water. The degradation of SA533B steel in water environment could be effectively mitigated by lowering the dissolved oxygen content. The steel specimens have the longest fatigue life when tested in air, but, in contrast, they were observed to have the shortest one when tested in water environment with saturated oxygen. The fatigue life in water environment increased to approach that in air when the dissolved oxygen content was down to about 1 ppb. It implies the fatigue-corrosion interaction plays a significant role in determining the fatigue life of SA533B steel. The results of x-ray diffraction (XRD) analysis show the change of constituents of corrosion products is strongly affected by both temperature and dissolved oxygen content of water environment. Furthermore, the same factors also affect the variations of appearance colors of corrosion products. The change of constituents and colors of corrosion products could act as an indication of the environmental effects, which is instrumental in understanding the low-cycle fatigue behavior of SA533B steel in high temperature and high pressure water environments.

Keywords: SA533B reactor pressure vessel steel; Temperature in water environment; Strain amplitude; Dissolved oxygen content in water; Low-cycle fatigue.

1. 前言

輕水式核反應器壓力槽提供爐心組件、控制棒等構件之結構支撐，是爐心與圍阻體間之屏障，用以阻隔輻射分裂產物外洩，為決定核電廠運轉安全及壽限之關鍵性組件。壓力槽鋼材最重要的劣化機構^[1]為疲勞傷害與照射脆化。近年來，許多壓力槽鋼材疲勞研究結果顯示^[2-10]，於適當冷卻水含氧量、運轉溫度、鋼材含硫量與非金屬夾雜物及施加應變速率與應變振幅大小等組合條件下，鋼材於冷卻水環境中之疲勞強度與壽限較之空氣中者明顯劣化。因此，瞭解高壓高溫水媒的環境促進破裂機制與預防作為，為確保壓力槽完整性之重要課題。本研究報告係針對水媒溫度、應變振幅與水中溶氧量等因素對 SA533B 壓力槽鋼材低週疲勞行為的影響情形進行研究，另觀察腐蝕生成物之顏色與分析其成分變化，期能對腐蝕疲勞破裂機制的瞭解及防治措施成效的提升有所助益。

2. 實驗方法

2.1 實驗材料與測試環境

Spark Emission Spectrometry 及碳硫分析儀分析 SA533B 壓力槽鋼材組成成分，如表 1 所示。鋼材樣品經研磨、拋光及 Nital (5% 硝酸, 95% 乙醇) 溶液浸蝕 (Etching) 20 秒後所得金相顯微組織，如圖 1。除硫化物形狀外，鋼材三方向面顯微組織之差異性並不顯著，為回火麻田散鐵組織。水媒測試環境為 10 MPa 之高壓流動水，其溫度視需求分別控制在 150°C、245°C 或 300°C 等不同溫度，水流量 10 l/hr，水中未添加化學物質，導電度 (Conductivity) 維持在 0.15 μ S/cm 左右，進水溶氧量分別為飽和 (7~8 ppm) 及 213 ppb 與 1 ppb 等三種，後兩者係水中通氮除氧之結果。水中飽和溶氧量為溫度之函數，於 26°C 時為 7.99 ppm；35°C 時則為 7.04 ppm^[11]。

2.2 拉伸測試

拉伸試驗係為取得 SA533B 壓力槽鋼材於室溫、150°C、245°C 及 300°C 等不同溫度之基本機械性質。本實驗使用 10 噸之 MTS 810 油壓試驗機測試，採位移控制進行，應變速率 (Strain Rate) 約為 $4 \times 10^{-3}/s$ ；室溫拉伸延伸率以 50% 行程之應變規式延伸計 (Strain-gage Type Extensometer) 量測，其標距長為 25 mm。150°C、245°C 及 300°C 拉伸延伸率則以電容式延伸計量測之，其標距長亦為 25 mm，行程為 22%。

2.3 低週疲勞測試

根據 ASTM E606^[12] 規範設計 SA533B 壓力槽鋼材低週疲勞圓棒試片，其尺寸如圖 2。試片加工成型後，依次以 #240 至 #2000 水砂紙研磨標距部位，再以 $1 \mu m$ 、 $0.3 \mu m$ Al_2O_3 粉末拋光，直至於 50 倍光學顯微鏡下無橫向刮痕為止。標距長 16 mm，其兩側之凸緣係專為安裝量測試片變形量之 LVDT 延伸計而設計。因兩凸緣相隔 40 mm 遠大於標距長，故另以實驗校正其值，測得之校正曲線如圖 3 所示，縱軸 Strain Gage(%) 代表試片標距長之實際應變值。

藉 10 噸之 Instron 8862 電動式動態拉伸試驗機與 Toshin 水媒系統測試 SA533B 壓力槽鋼材於 10 MPa 壓力水媒中之低週疲勞特性。測試水溫分別為 150°C、245°C 及 300°C。以三角波形進行應變控制 (Strain Control)，應變由 LVDT 延伸計量測之。應變速率 (Strain Rate) 為 $4 \times 10^{-3}/s$ ，應變均值 (Mean) 為 0%，應變振幅分別為 0.2%、0.4% 及 0.7% 等三種。當疲勞試驗進行至 5×10^5 週次試片仍未斷裂，即視為不會斷，停止測試。

2.4 腐蝕生成物之觀察分析

為了觀察腐蝕生成物與 X- 光繞射分析方便起見，另準備板狀方形試片，經研磨拋光後與低週疲勞圓棒試片一齊置於測試系統中，同時遭受水媒環

境的腐蝕作用，於低週疲勞測試結束後，取出觀察分析。利用 Siemens D-5000 X- 光繞射儀量測分析比較 SA533B 壓力槽鋼材在不同進水溶氧量及溫度水媒中產生的腐蝕生成物之成分與結構相之差異情況。水媒中測試後腐蝕生成物外觀顏色變化情形經仔細觀察拍照，並與僅曝露於空氣中者互作比較，期有助於劣化受損分析。

3. 結果與討論

3.1 一般拉伸測試

圖 4 顯示 SA533B 壓力槽鋼材試片受單軸向拉伸測試，應變速率控制為 $4 \times 10^{-3}/s$ 所獲得之室溫、150°C、245°C 及 300°C 之拉伸應力-應變曲線。壓力槽鋼材之拉伸機械性質隨著溫度之變化而產生高低起伏變化；室溫與 300°C 兩者之伸長率與最大抗拉強度兩項皆較 150°C 與 245°C 者大，尤以 150°C 情況之伸長率最差。降伏強度於室溫時最大，隨著溫度之上升而下降，245°C 者最低，300°C 為次低。最大抗拉強度 (σ_{uts}) 及降伏強度 (σ_{ys}) 兩者與溫度均非線性關係，但 (σ_{uts}/σ_{ys}) 之比值與溫度則呈漸增之趨勢，300°C 者具有最高值，測試結果如表 2。

3.2 低週疲勞測試

SA533B 壓力槽鋼材水媒環境中之低週疲勞行為，依溫度效應、水媒中除氧效應及腐蝕生成物觀察分析結果分別探討如下：

3.2.1 水媒溫度效應

在空氣及飽和溶氧水媒中，SA533B 壓力槽鋼材應變振幅為 0.4% 之低週疲勞壽命週期數 (N_f) 受溫度變化影響之情形，如圖 5。飽和溶氧水媒環境中低週疲勞壽命週期數的溫度效應非常顯著，245°C 的壽命最長，其週期數幾為 300°C 者的 3.5 倍左右，而 150°C 與 300°C 兩者之壽命亦有倍數之差。空氣中，鋼材低週疲勞壽命週期數對溫度具有相同依存趨勢，如圖上所示，245°C 之壽命仍是最長，

300°C者最短，然壽命之差異較小。Chopra 與 Shack^[9] 研究 A333-Gr 6 鋼材之腐蝕疲勞行為，亦有類似的測試結果。探究 245°C 飽和溶氧水媒中鋼材壽命最長的可能原因，除基於空氣中 245°C 已顯現較佳外，推測於 245°C 形成之腐蝕生成物可能具有較佳保護作用所致。

上述飽和溶氧水媒環境經通氮氣除氧後，鋼材低週疲勞壽命的溫度依存性完全改觀，如圖 6 所示 SA533B 壓力槽鋼材在溶氧 213 ppb 水媒中之低週疲勞壽命週期數受溫度與應變振幅影響之情形。在此種除氧水媒環境中，低週疲勞壽命週期數的溫度效應已不明顯，此現象不僅發生於應變振幅為 0.4% 之情況，亦存在於 0.2% 應變振幅的測試結果。在 Chopra 與 Shack^[9] 低合金鋼材研究中也有類似的推估與測試結果。其結果顯示，若進一步將應變速率從目前的快速情況降低 100 倍，即 $4 \times 10^{-5}/s$ ，溫度對疲勞壽命呈現不同效應，壽命長短與溫度形成反比關係；150°C 者壽命最長，300°C 者最短，明顯不同於目前飽和溶氧及除氧水媒環境中的測試結果。從圖中亦可觀察到在除氧水媒環境中，因對溫度的變化已不再敏感，故應變振幅大小為疲勞壽命之決定因素。探討除氧水媒環境中溫度效應不再顯著的原因，推測在各不同溫度下試片外表皆已形成緻密良好的腐蝕物層，阻絕試片於快應變速率測試期間再度受水媒環境的侵蝕，因此 300°C 的測試並未有高溫較嚴重的腐蝕劣化現象，疲勞壽命因而大幅增長，與 150°C 及 245°C 測試結果幾近相同。

圖 7 與圖 8 分別代表飽和溶氧與 213 ppb 溶氧水媒中不同溫度條件下鋼材低週疲勞週期數與對應之最大應力關係圖。從圖 7 可見疲勞測試初期最大應力對疲勞週期數之依存性隨溫度之不同而有明顯差異；300°C 呈現週期強化^[13] 現象，但鋼材疲勞壽命最短；150°C 為週期軟化；而 245°C 並無明顯軟化或強化現象，其壽命卻最長。故水媒中材料測試初期之軟化或強化現象與疲勞壽命間並無必然的對應關係，而是取決於水媒中其它環境因素。此項結果亦適用於除氧水媒中，如圖 8 所示，雖 150°C 與 245°C 兩者皆呈現明顯的軟化，而 300°C 仍有輕微

強化，但三種不同溫度條件測試下，疲勞壽命卻接近一致，驗證水媒中壽命與材料軟化或強化無關，完全由水媒環境中溶氧及溫度等因素所主宰。圖 8 亦顯示各溫度之最大應力值皆遠高於圖 7 之對應值，充分顯現除氧抑制腐蝕致使材料強度增強之效益。

3.2.2 水媒中除氧效應

圖 9 顯示 SA533B 壓力槽鋼材在 300°C、10 MPa 含不同溶氧量水媒中低週疲勞壽命週期數 (N_f) 與空氣中測試值。首先，比較飽和溶氧水媒與空氣中測試之結果，明顯可見前者於任一應變振幅作用下之疲勞壽命皆遠小於後者，顯現相當顯著之水媒環境劣化效應，係腐蝕與疲勞交互作用導致其壽命減短。水媒中之壽命約僅為室溫空氣中者之五分之一至六分之一而已。

當進水溶氧量由飽和值經通氮除氧降至 213 ppb 左右時，有效地提高疲勞壽命週期數至約四倍左右。溶氧量下降，腐蝕與疲勞交互作用對應降低。當溶氧量進一步降低至 1 ppb 時，低週疲勞壽命週期數再度提升，於兩不同應變振幅狀況下，皆已提高至與室溫空氣中者一致。由上述可知降低進水溶氧量，相當程度抑制腐蝕作用，減輕與疲勞交互作用之效應，疲勞壽命週期數因而得以增長。除氧效應顯著與否，端視水媒中最後殘留的溶氧量多寡而定，隨著溶氧量之降低，疲勞壽命週期數漸增。當溶氧值為 1 ppb 左右時，除氧效應已達極限，300°C 水媒中測試之疲勞壽命與室溫空氣中測試者已無差異，效益顯著。

3.2.3 腐蝕生成物觀察分析

表 3 總結 SA533B 壓力槽鋼材在不同溫度及溶氧水媒中之腐蝕生成物成分及顏色變化。於溶氧 1 ppb 及 213 ppb 等除氧水媒中，除 150°C 外，皆僅觀察到鐵黑色之腐蝕生成物，X- 光繞射量測及成分鑑定分析確認其為磁鐵礦 (Magnetite)，成分為 Fe_3O_4 ，如圖 11 所示。圖上的數條直線係磁鐵礦標準角度的比對線，用以識別繞射峰確實與其吻合，線條長度代表相對強度高低。另圖上標有 "Matrix" 之波峰，

代表來自腐蝕生成物下面之 SA533B 鋼材基材信號，基材四個波峰出現的角度位置量測值顯示於圖 10，其繞射角度值 (2θ) 分別約為 44.60°，51.33°，57.03° 及 64.98°。

溫度 150°C 溶氧 213 ppb 水媒中之腐蝕生成物較特別，經 X- 光繞射量測及成分鑑定分析確認其含有纖鐵礦 (Lepidocrocite)，成分為 γ -FeO(OH)，及部分磁鐵礦，如圖 12 所示。進一步觀察腐蝕生成物試片後發現鐵黑色之磁鐵礦潛藏於裡層，而淺橙色的表層為纖鐵礦。

鋼材於不同溫度飽和溶氧水媒中之腐蝕生成物皆為赤褐色，X- 光繞射量測及成分鑑定分辨其皆含赤鐵礦 (Hematite, α -Fe₂O₃)，及異構物磁赤鐵礦 (Maghemite, γ -Fe₂O₃)。但兩者之組成比例隨溫度之不同而有若干變化，於 300°C 時，赤鐵礦為主要腐蝕生成物，磁赤鐵礦居次；150°C 與 300°C 之情形類似。然 245°C 之情況不同，磁赤鐵礦不再是次要角色。由圖 13 X- 光繞射量測波峰之相對強度變化研判，其含量最少與赤鐵礦等量，甚至超過一些。推測這項腐蝕生成物組成變化有益鋼材於 245°C 飽和溶氧水媒中疲勞壽命，故其壽命較 150°C 與 300°C 者長。

SA533B 壓力槽鋼材在不同溫度空氣中之顏色不同，於室溫空氣中呈現銀灰白色；在 245°C 空氣中放置 75 小時氧化成紫羅蘭色，如圖 14 所示。壓力槽鋼材於水媒中之外觀顏色因腐蝕生成物之不同呈明顯變化，但迥異於空氣中者。磁鐵礦為鐵黑色，纖鐵礦為淺澄色，而赤鐵礦與磁赤鐵礦則為赤褐色，如圖 15 所示。壓力槽鋼材外觀顏色的多變，導因於腐蝕生成物成分之差異，直接反映環境的影響，為環境效應的一種指標，有助於了解鋼材在高溫高壓水媒中低週疲勞行為。

4. 結論

1. 水媒溫度效應測試結果顯示，飽和溶氧水媒中疲勞壽命的溫度效應顯著，不同溫度的疲勞壽命差異大；然於除氧水媒中溫度效應不明顯。

2. SA533B 壓力槽鋼材水媒中低週疲勞壽命與測試初期材料之軟化或強化現象間並無必然的對應關係，而是取決於水媒環境中溶氧及溫度等因素。
3. 飽和溶氧水媒中低週疲勞壽命最短，但於 300°C、1 ppb 低溶氧量水媒中之疲勞壽命與室溫空氣中測試者已無差異。
4. 飽和溶氧水媒中腐蝕生成物為赤褐色的赤鐵礦與磁赤鐵礦兩種異構物，組成比例隨溫度之不同而有若干變化。除氧水媒中腐蝕生成物是鐵黑色的磁鐵礦，然鋼材於溫度 150°C 溶氧 213 ppb 水媒中之腐蝕生成物不同，磁鐵礦位於裡層而表層是淺橙色的纖鐵礦。

參考文獻

1. V. N. Shah, et al., in: *Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components* (Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherland, 1993) Chapter 3 and 18, p.642.
2. M. Higuchi and K. Iida, *Nucl. Eng. Des.*, 129 (1991) pp.293-306.
3. W. A. Van Der Sluys, "Evaluation of the Available Data on the Effect of the Environment on the Low Cycle Fatigue Properties in Light Water Reactor Environments", in *Proc. 6th Intl. Symp. on Environmental Degradation of Matertials in Nuclear Power Systems - Water Reactors*, R. E. Gold and E. P. Simonen, eds., The Metallurgical Society, Warrendale, PA (1993) pp. 1-4.
4. O. K. Chopra and W. J. Shack, "Effects of LWR Environments on Fatigue Life of Carbon and Low-Alloy Steels", in *Fatigue and Crack Growth: Environmental Effects, Modeling Studies, and Design Considerations*, S. Yukawa, ed., American Society of Mechanical Engineers, New York (1995) PVP Vol. 306, pp. 95-109.
5. M. Higuchi, K. Iida, and Y. Asada, "Effects of

- Strain Rate Change on Fatigue Life of Carbon Steel in High-Temperature Water", in *Fatigue and Crack Growth: Environmental Effects, Modeling Studies, and Design Considerations*, S. Yukawa, ed., American Society of Mechanical Engineers, New York, 1995, PVP Vol. 306, pp. 111-116 ; also in *Proc. of Symp. on Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1997) ASTM STP 1298.
6. H. Kanasaki, M. Hayashi, K. Iida, and Y. Asada, "Effects of Temperature Change on Fatigue Life of Carbon Steel in High Temperature Water", in *Fatigue and Crack Growth: Environmental Effects, Modeling Studies, and Design Considerations*, S. Yukawa, ed., American Society of Mechanical Engineers, New York (1995) PVP Vol. 306, pp. 117-122.
 7. G. Nakao, H. Kanasaki, M. Higuchi, K. Iida, and Y. Asada, "Effects of Temperature and Dissolved Oxygen Content on Fatigue Life of Carbon and Low-Alloy Steels in LWR Water Environment", in *Fatigue and Crack Growth : Environmental Effects, Modeling Studies, and Design Considerations*", S. Yukawa, ed., American Society of Mechanical Engineers, New York (1995) PVP Vol. 306, pp.123-128.
 8. O. K. Chopra and W. J. Shack, "Evaluation of Effect of LWR Coolant Environments on Fatigue Life of Carbon and Low-alloy Steels", in *Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth*, W.A. Van Der Sluys, R. S. Piascik, and R. Eawierucha, eds., American Society for Testing and Materials , Philadelphia (1997) ASTM STP 1298, pp.247-266.
 9. O. K. Chopra and W. J. Shack, in: *Effects of LWR Coolant Environment on Fatigues Design Curves of Carbon and Low-Alloy Steels* (NUREG/CR-6583, 1998) pp. 47-49.
 10. O. K. Chopra and W.J. Shack, *Nucl. Eng. Des.*, 184 (1998) 49.
 11. *Instruction Manual for Dissolved Oxygen Meter Model DO-32A* (DKK-TOA Corporation) p. 7.
 12. "Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing" ASTM E606-80 (1997) pp. 629-641.
 13. S. S. Manson and M. Hirschberg, "in *Fatigue —an Interdisciplinary Approach*", ed. by J. J. Burke, N.L. Reed and V. Weiss, Syracuse University Press (1964) p. 133.

收到日期：2004年7月31日

修訂日期：2004年11月18日

接受日期：2005年1月17日

SA533B 壓力槽鋼材水媒環境效應低週疲勞行為研究

表1. SA533B 壓力槽鋼材成分分析結果 (wt%)。

Table 1 Chemical compositions of the SA533B reactor pressure vessel steel (wt%).

碳	矽	錳	磷	硫	鎳	鉬	鋁	氮	鐵
0.19	0.22	1.27	0.015	0.016	0.60	0.49	0.035	0.005	其餘

表2. SA533B 壓力槽鋼材在空氣中四不同溫度之拉伸測試結果。

Table 2 Tensile results for SA533B steel at four temperatures in air.

Mechanical Properties Temperature	Ultimate Strength, σ_{uts} (MPa)	Yield Strength, σ_{ys} (MPa)	Total Elongation, TE (%)	Uniform Elongation, UE (%)	$\sigma_{uts} / \sigma_{ys}$
25°C	714.6 ± 4.6	640.0 ± 10.0	28.9 ± 0.1	9.7 ± 0.5	1.12
150°C	690.0	618.0	19.6	7.9	1.12
245°C	688.0	568.0	22.56	9.37	1.21
300°C	740.0 ± 3.0	584.0 ± 4.0	28.7 ± 1.0	11.4 ± 0.2	1.27

表3. SA533BY2 壓力槽鋼材在不同溶氧及溫度之 10 MPa 壓力水媒中之腐蝕生成物成分及顏色。

Table 3 The constituents and colors of corrosion products of the SA533BY2 steel tested in the 10 MPa water environments with different contents of oxygen at different temperatures.

進水溶氧	DO= 7~8 ppm (飽和溶氧)			DO= 213 ppb			DO= 1 ppb
水溫	300°C	245°C	150°C	300°C	245°C	150°C	300°C
腐蝕生成物	赤鐵礦 (Hematite, α -Fe ₂ O ₃) 為主，磁赤鐵礦 (Maghemite, γ -Fe ₂ O ₃) 為次要腐蝕生成物	赤鐵礦與磁赤鐵礦之混合物，後者之 X-Ray 繞射 Peaks 強度較 300°C 及 150°C 者增強許多	類似 300°C 者，磁赤鐵礦之 X-Ray 繞射 Peaks 強度亦較弱	磁鐵礦 (Magnetite), Fe ₃ O ₄	磁鐵礦 (Magnetite), Fe ₃ O ₄	纖鐵礦 (Lepidocrocite), γ -FeO(OH) 及部分磁鐵礦(裡層)	磁鐵礦 (Magnetite), Fe ₃ O ₄
顏色	赤褐色	赤褐色	赤褐色	鐵黑色	鐵黑色	淺澄色	鐵黑色
附註欄	原材料在室溫空氣中呈現銀灰白色 300°C 空氣中加熱 3 小時呈現天藍色 245°C 空氣中加熱 75 小時呈現紫羅藍色						

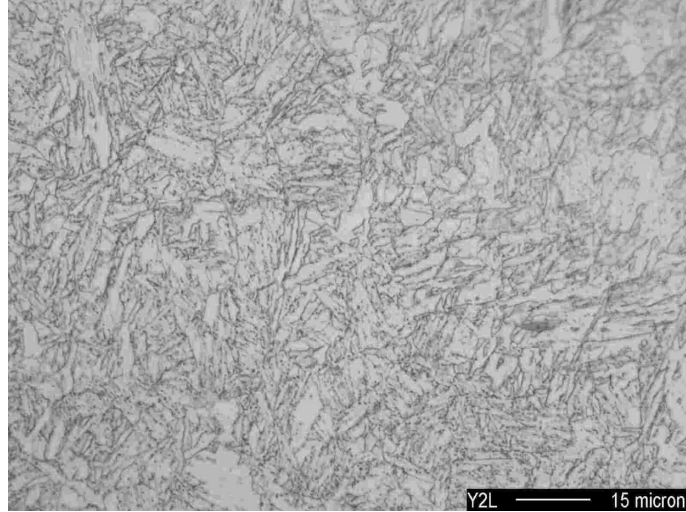
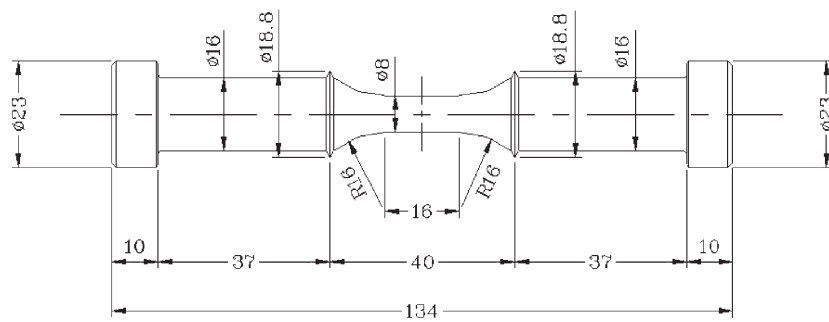


圖 1. SA533B 壓力槽鋼材光學金相顯微組織 (滾壓向)。
Figure 1 Optical micrograph of SA533B reactor pressure vessel steel (rolling direction).



Unit: mm
Scale: 1:1

圖 2. 水媒中低週疲勞圓棒試片尺寸圖。
Figure 2 Round bar specimen for low-cycle fatigue test in water environments.

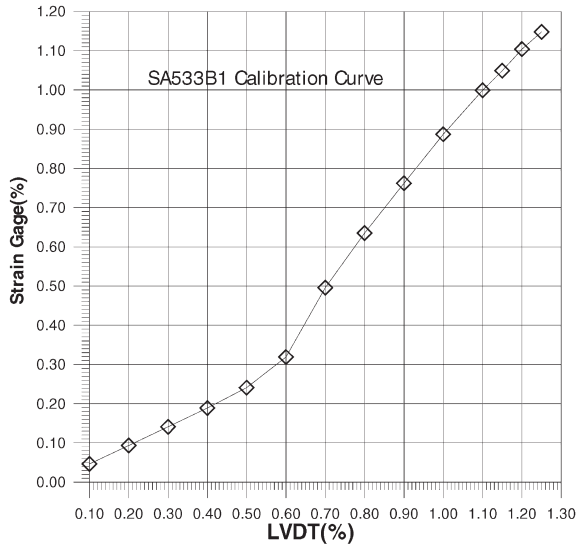


圖 3. SA533B 壓力槽鋼材低週疲勞圓棒試片之LVDT 校正曲線。
Figure 3 LVDT calibration curve for SA533B steel round bar specimen subjected to low-cycle fatigue test.

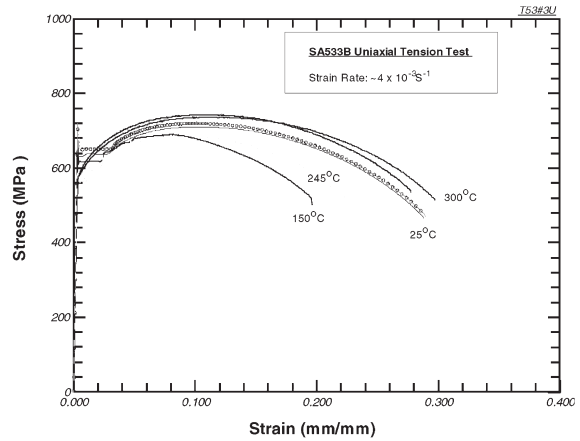


圖 4. SA533B 壓力槽鋼材在空氣中四不同溫度之拉伸應力 - 應變曲線。
Figure 4 Tensile stress-strain curves for SA533B steel at four temperatures in air.

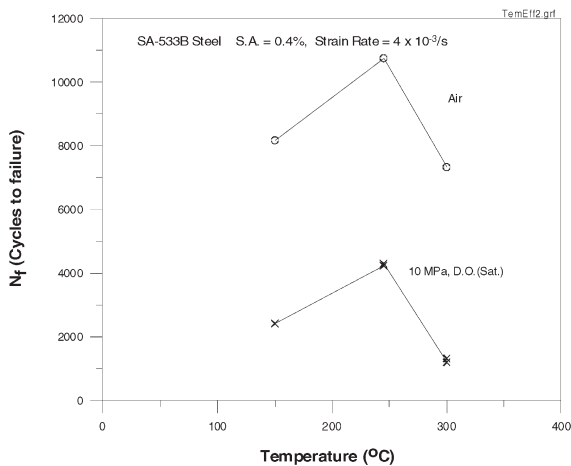


圖 5. SA533B 壓力槽鋼材在空氣中及壓力 10 MPa 飽和溶氧水媒中應變振幅為 0.4% 時之低週疲勞壽命週期數 (N_f) 受溫度變化影響之情形。
Figure 5 The effect of temperature on the low-cycle fatigue life (N_f) of SA533B specimens tested in air and in the 10 MPa water environment with saturated oxygen under a strain amplitude of 0.4%.

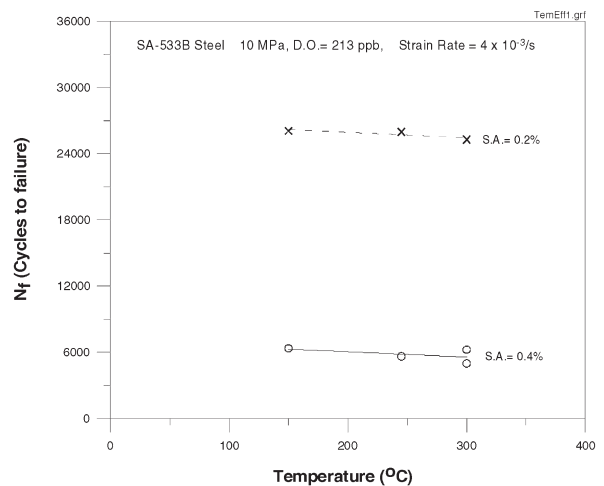


圖 6. SA533B 壓力槽鋼材在壓力 10 MPa 溶氧 213 ppb 水媒中低週疲勞壽命週期數 (N_f) 受溫度與應變振幅變化影響之情形。
Figure 6 The effect of temperature on the low-cycle fatigue life (N_f) of SA533B specimens tested in the 10 MPa water environment with an oxygen content of 213 ppb under the strain amplitudes of 0.2% and 0.4%.

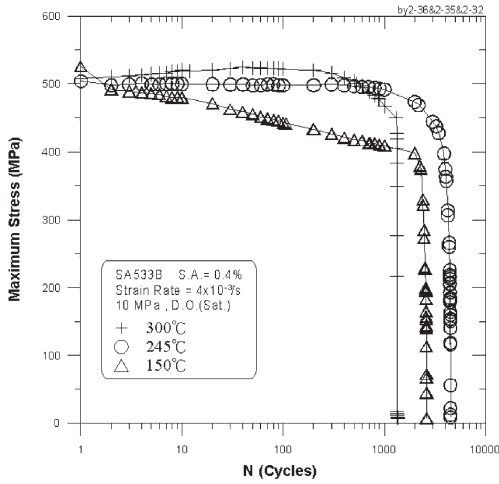


圖 7. SA533B 壓力槽鋼材在壓力 10 MPa 之飽和溶氧水媒中不同溫度條件下低週疲勞週期數與對應之最大應力關係圖。
Figure 7 The dependence of maximum stress on low fatigue cycle of SA533B specimens tested in the 10 MPa water environment with saturated oxygen at different temperatures.

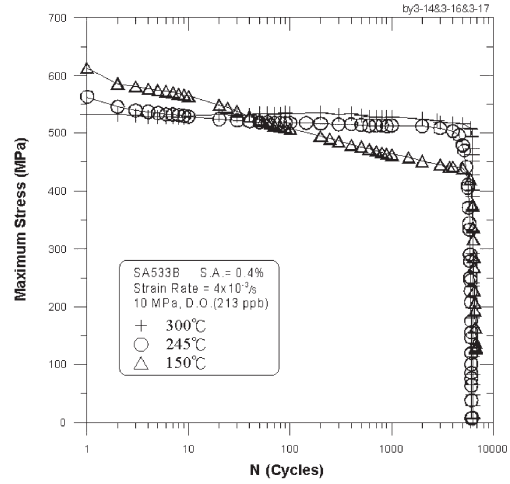


圖 8. SA533B 壓力槽鋼材在壓力 10 MPa 溶氧 213 ppb 水媒中不同溫度條件下低週疲勞週期數與對應之最大應力關係圖。
Figure 8 The dependence of maximum stress on low fatigue cycle of SA533B specimens tested in 10 MPa water environment with an oxygen content of 213 ppb at different temperatures.

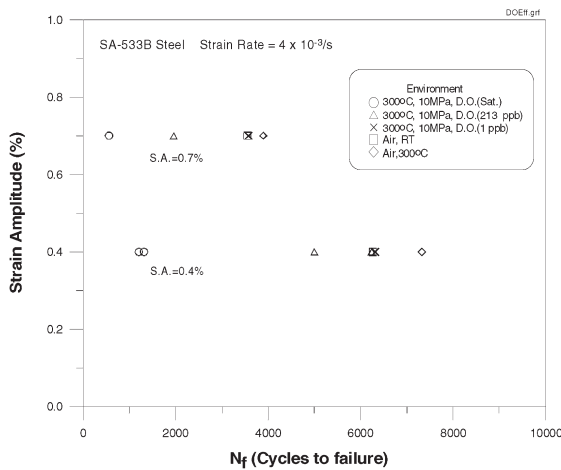


圖 9. SA533B 壓力槽鋼材在溫度 300°C 壓力 10 MPa 不同溶氧量水媒中低週疲勞壽命週期數 (N_f) 與空氣中測試值之比較。
Figure 9 A comparison of low-cycle fatigue life (N_f) for SA533B steel tested in air and in the water environments with different contents of oxygen.

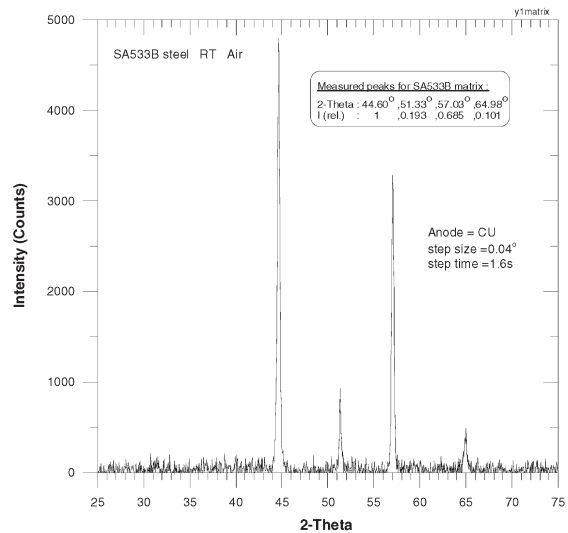


圖 10. SA533B 壓力槽鋼材原材料之 X-光繞射圖。
Figure 10 X-ray diffraction pattern for as-received SA533B steel.

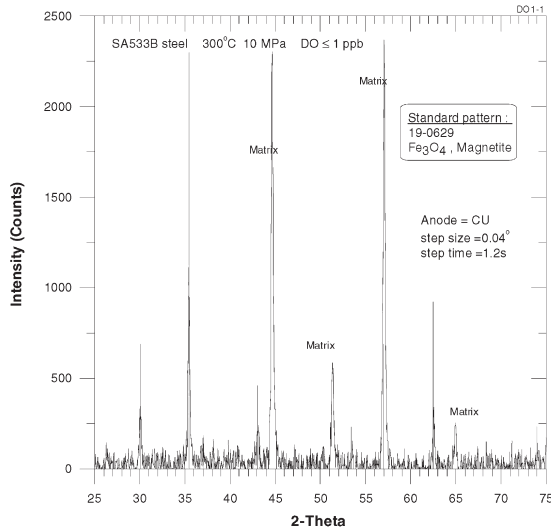


圖 11. SA533B 壓力槽鋼材在 300°C、10 MPa 溶氧約 1 ppb 水媒中腐蝕生成物之 X- 光繞射圖。

Figure 11 X-ray diffraction pattern for the corrosion product of SA533B specimen tested in 300°C、10 MPa water environment with an oxygen content of 1 ppb.

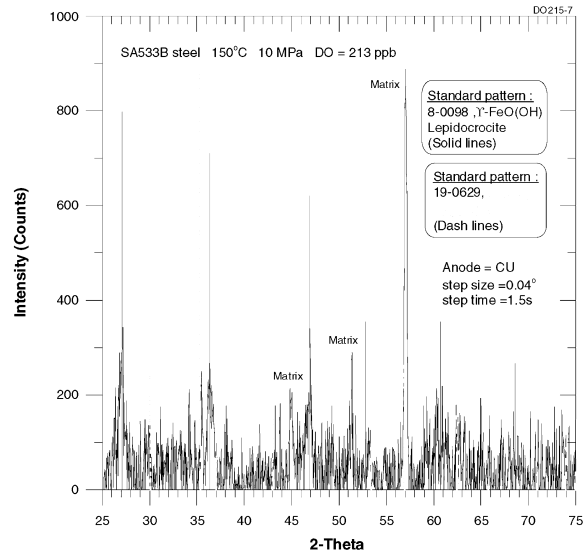


圖 12. SA533B 壓力槽鋼材在 150°C、10 MPa 溶氧約 213 ppb 水媒中腐蝕生成物之 X- 光繞射圖。

Figure 12 X-ray diffraction pattern for the corrosion products of SA533B specimen tested in 150°C、10 MPa water environment with an oxygen content of 213 ppb.

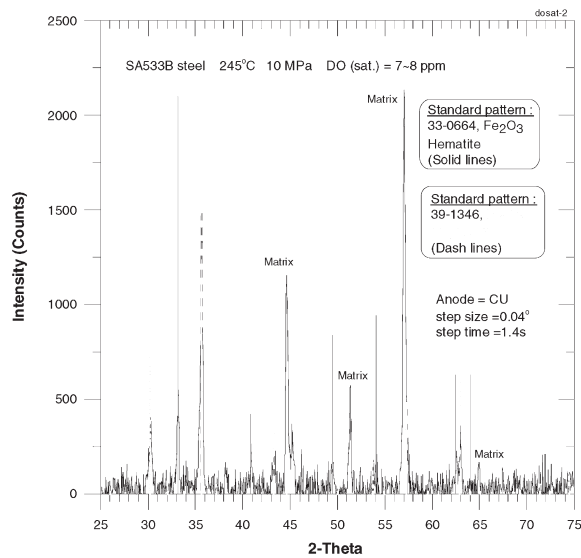


圖 13. SA533B 壓力槽鋼材在 245°C、10 MPa 飽和溶氧水媒中腐蝕生成物之 X- 光繞射圖。

Figure 13 X-ray diffraction pattern for the corrosion products of SA533B specimen tested in 245°C、10 MPa water environment with saturated oxygen.



圖 14. SA533B壓力槽鋼材空氣中之顏色: (a)在室溫空氣中呈現銀灰白色, (b)在245°C空氣中放置75小時呈現紫羅蘭色。

Figure 14 The colors of SA533B steel in air : (a) in silver- gray in air at room temperature ,(b) in violet after exposing to air at 245°C for 75 hrs.

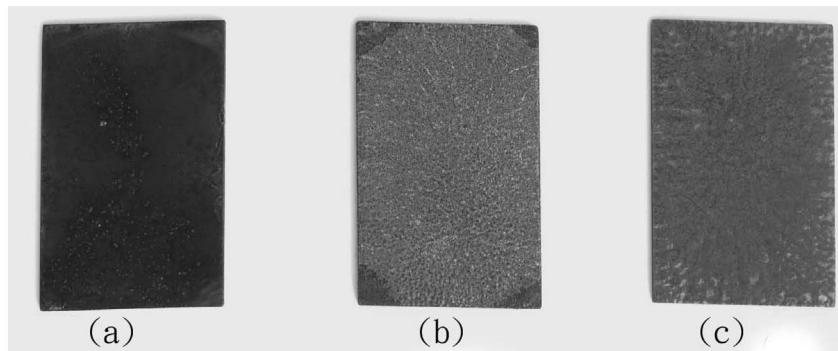


圖 15. SA533BY2壓力槽鋼材在不同溶氧及溫度之 10 MPa壓力水媒中之主要腐蝕生成物: (a) 磁鐵礦(鐵黑色), (b) 纖鐵礦(淺澄色), (c) 赤鐵礦與磁赤鐵礦(赤褐色)。

Figure 15 The major corrosion products of the SA533BY2 steel tested in the 10 MPa water environments with different contents of oxygen at different temperatures: (a) Magnetite, Fe_3O_4 (black), (b) Lepidocrocite, γ -FeO(OH) (light orange), (c) Hematite (α - Fe_2O_3) and Maghemite (γ - Fe_2O_3), (reddish brown).