

壓力容器管嘴之銲接殘留應力分析驗證

郭泰良¹, 范政文¹, 咎世蓉¹, 葉育魁²

1. 工業技術研究院 材料與化工研究所
2. 士盟科技股份有限公司

摘要

壓力容器管嘴的銲道為該結構中容易發現疲勞裂紋、應力腐蝕裂紋之部位，主要原因就是來自於銲接製程中所殘留的應力與運轉過程中各式載重所造成的應力，疊加後因產生較高的平均應力或應力負載而使得裂紋更容易初始形成以及後續成長。銲接殘留應力的量值大小與沿著壁厚方向的分佈行為，對於裂紋的成長速度與是否繼續成長扮演著重要角色，因此若能提升對於銲接殘留應力的了解程度，針對管嘴銲道發現裂紋時所進行的安全評估就能得到更貼近真實的評估結果。本論文即使用ABAQUS銲接模組(ABAQUS Welding Interface)針對某壓力容器管嘴的實驗模型進行銲接殘留應力分析並和文獻計算結果進行比較，同時亦討論ABAQUS銲接模組在執行銲接殘留應力分析時所帶來的便利性。

關鍵字：壓力容器、銲接殘留應力、ABAQUS 銲接模組

ABSTRACT

The fatigue crack and stress corrosion crack can be identified from the structure of nozzle welds within pressure vessel. With superposition from the residual stress during fabrication and varies of loads from the operation, initiation of the crack and crack growth can also be the major contributing factor under higher uniform distribution load or stress load. The crack growing speed or continuity, the quantified value of residual stress and its distribution along wall thickness plays an important role; therefore, improving the level of understating to the residual stress, the performance of safety assessment to the nozzle weld crack can be relatively reflecting its true condition. The ABQUS Welding Interface was applied to the pressure vessel nozzle experimental model and compared with results from numbers of references. The facilitation of the analyzing process was also discussed.

Keywords: pressure vessel, welding residual stress, ABAQUS Welding Interface

一、緒論

壓力容器管嘴的銲道為該結構中容易發現疲勞裂紋、應力腐蝕裂紋之部位，主要原因是銲接殘留應力造成管嘴總承受應力或是平均應力的提高，因而使得裂紋更容易初始形成以及後續成長。銲接殘留應力分析結果的好壞將直接影響裂紋成長分析結果的精準性。美國 Wolf Creek 電廠調壓槽釋壓管嘴(Pressurizer Relief Nozzle)異質銲道上所發現的環向裂紋為非常著名之案例，若使用經驗公式[1]所建議的銲接殘留應力來保守地執行裂紋成長分析，發現大約在未來1~2.5年會有洩漏之現象發生；然而，若使

用有限元素分析執行較詳細的殘留應力與裂紋成長分析，發現大約在未來4.4年才會洩漏現象發生，此結果說明了對於銲接殘留應力的掌握程度將為裂紋成長分析結果造成影響[2]。

美國機械工程師學會鍋爐與壓力容器規範(ASME Boiler and Pressure Vessel Code)[3]中，以破裂力學為基礎之安全評估標準與方法已完整呈現於第XI章(以下簡稱ASME Sec. XI)，內容說明了裂紋尺寸的可接受標準和執行安全評估時所需考慮之事項，對於殘留應力僅提及需使用“適當的殘留應力分佈數據”，卻未進一步說明該如何獲得此數據。文獻[4,5]顯示，不同的分

析人員常因所蒐集到的銲接參數資料完整性不一或分析觀點的不同而得到差異明顯的銲接殘留應力分析結果。為了消弭不一致性，國外已有許多機關單位進行多年期的殘留應力分析、驗證計畫，如美國核管制單位(NRC)所執行的一項 4-phase 計畫[5]，該計畫 phase 2a、2b 工作項目建立了壓水式核電廠調壓槽調節管嘴(Pressurizer Surge Nozzle)的實驗模型(mockup)，並邀集諸多國外先進單位參與異質銲道殘留應力有限元素分析之 International Round Robin，並與量測結果進行驗證。NUREG-2162[5]所使用的殘留應力量測方法包含 Deep Hole Drilling (DHD) 及 Incremental Deep Hole Drilling (IDHD) 兩種方法。量測結果將提供給 International Round Robin 參與成員進行分析驗證，參與成員包含了美國 8 個、歐洲 2 個、日本 2 個及澳洲 1 個共 13 個組織，詳列如圖 1。本文即針對 NUREG-2162[5]所提的管嘴 mockup，使用 ABAQUS Welding Interface (AWI) 進行銲接殘留應力分析，並和該文獻中各個 International Round Robin 參與成員的分析結果、實驗量測結果進行比較，探討 AWI 在分析的適用性以及分析時所帶來的便利性。

二、分析問題與方法說明

本節針對 NUREG-2162[5]的 phase 2a 分析內容稍作介紹，並使用 AWI 針對 phase 2a 所提的管嘴 mockup 進行銲接殘留應力計算，再與報告分析及量測結果進行比較，以說明本論文所用之分析方式可取得合理的分析成果。最後，本論文將使用 phase 2a 模型及殘留應力分析結果進行疲勞裂紋成長分析。

2.1 NUREG-2162 phase 2a 管嘴 mockup 製造步驟簡介

NUREG-2162[5] phase 2a 管嘴 mockup 的幾何形狀如圖 2 所示，mockup 製造步驟及各部位材質組成整理如下：

- i. 母材進行隔離層堆銲(Buttering): 母材材質為 SA-105 碳鋼; Buttering 由 137 個銲塊組成，材質為 Alloy 82
- ii. 隔離層堆銲後熱處理(PWHT)與機械加工切削: PWHT 條件為 600~650 °C for 3 hours
- iii. 異質銲道(DMW)填銲及根部挖除: 由 40

個銲塊組成，材質為 Alloy82，填銲完成後 DMW 根部進行挖除

- iv. 填補銲道(Fill-in weld) 填銲: 由 27 個銲塊組成，材質為 Alloy82，填銲於 DMW 根部挖除區域

- v. 不銹鋼銲道(SSW) 填銲: 由 28 個銲塊組成，材質為 TP 308 Stainless Steel

各銲道所使用的銲接參數於表 1。有鑑於 Buttering 後將會使用 PWHT 進行殘留應力消除，理論上管嘴此時的銲接殘留應力應近似於零，因此為了節省分析資源及檢視單純由異質銲道填銲過程所造成的殘留應力，本論文省略步驟 i、ii 的分析過程。此外，針對切削挖除之製程行為，本論文使用 ABAQUS 內建的 Model Change 程序將欲挖除之部位的相關元素進行移除(Deactivate)。

2.2 有限元素分析模型

本論文所建立的 NUREG-2162 phase 2a 管嘴 mockup 銲接殘留應力分析有限元素模型如圖 3 所示，各銲道部位局部放大如圖 4 所示，詳細的幾何尺寸及材質資訊請參閱 [5]之說明。進行銲接殘留應力計算時，本論文採用熱傳-應力順序耦合的分析方式(sequential thermal-stress analysis)，即先執行暫態熱傳分析，求得銲接過程中的組件溫度分布結果後，再將此結果施加於模型進行穩態的應力分析以求得銲接過程中組件的殘留應力分佈結果。以下分別就熱傳分析、應力分析的重要考量進行說明：

熱傳分析

因管嘴 mockup 幾何上的軸對稱特性，本論文使用 ABAQUS 之線性熱傳元素 DCAX4 進行二維軸對稱熱傳分析，因使用二維軸對稱分析假設而無須考慮銲接熱源在管嘴圓周方向之移動問題，僅需考量在徑向上不同位置的填銲熱源施加。所施加的熱源量值大小需使得整個銲塊及其周圍材料熔融線範圍(約 0.0787 inch (2 mm)處)的溫度至少達到材質的熔點溫度(在此設定為 2240 °F)，以模擬真實銲接時銲塊與周圍材料的熔透行為，此為 NUREG-2162 對於熱傳分析所特別要求的事項。此外，每道銲塊的層間溫度設定如表 1 所述，執行熱傳分析時須留意銲塊邊界的溫度是否冷卻達到層間溫度，以真實模擬製程條件。熱傳邊界條件為假設所有與空氣接觸之邊界為自然對流條件，自然對流係數設定為 8.5×10^{-6}

Btu/in²·°F、牆溫為室溫 70 °F。

應力分析

本論文使用 ABAQUS 之線性實體元素 CAX4 進行二維軸對稱應力分析。為反應管嘴 mockup 製造時並無特別的固定拘束，應力分析之邊界拘束條件採用在低合金鋼管嘴邊界施以最少的位移拘束條件(即單點固定防止分析時發生剛體位移之情形，如圖 3 虛線圈選處)，並將熱傳分析所得之溫度分布結果當成體積力施加於模型上以進行應力分析。同時假設鉚塊元素於填鉚長出時處於無應力狀態，即假設鉚塊之初始溫度(T_i)等於參考溫度(T_{ref})。本論文假設無金相變化-熱應力的耦合情形。所有材料的塑性硬化模型皆使用等向硬化(isotropic hardening)，此硬化模型假設材料在加載、卸載過程中降伏面可擴張或縮小，藉此可將材料達到退火溫度(annealing temperature，在此設定為 2240 °F)時塑性應變歸零的行為納入考量，如此得以更真實地模擬鉚接過程中的材料行為。

2.3 ABAQUS Welding Interface (AWI) 設定簡介

對應前述之熱傳分析及應力分析內容，在此說明有關的 AWI 設定方式如下：

- AWI 使用直接給定鉚塊溫度(Temperature Prescribed)來模擬鉚接熱源的施加。
- 針對前述之“熱源量值大小需使得整個鉚塊及其周圍材料熔融線範圍(約 0.0787 inch 處)的溫度至少達到材質的熔點溫度”，在 AWI 只要透過如圖 5 所示之視窗給定鉚塊初始溫度(Weld material initial melt temperature，即前述之 T_i)，以及給定熔融線範圍(Sensor depth)即可完成設定。AWI 求解時，會透過外掛之 Fortran subroutine 自動偵測在熔融線範圍內的材料溫度是否達到如圖 6 所設定之熔融線溫度(Sensor depth temperature)，若達到，則終止熱源施加程序相關的求解步驟。
- 針對前述之“鉚塊邊界的溫度是否冷卻達到層間溫度”，在 AWI 只要透過如圖 7 所示之視窗給定層間溫度(Interpass temperature)，求解時 AWI 會透過外掛之 Fortran

subroutine 自動偵測鉚塊邊界的溫度是否達到層間溫度設定值，若達到，則終止冷卻程序相關的求解步驟。

- 完成 AWI 需要的所有設定輸入後，AWI 將自動生成所有熱傳分析及應力分析的求解步驟(Steps，如圖 8)。

藉由上述說明，可察 AWI 藉由外掛的 Fortran subroutine 來控制熱源施加及管嘴冷卻相關的求解步驟，使得鉚塊的升溫、降溫行為能符合實際的製程條件並維持一致，如此可使得分析者無須以試誤方式來達成相關條件，大幅增進前處理的準備時間。同時因外掛的 Fortran subroutine 可自動終止熱源施加、組件冷卻的相關求解步驟，亦可增進求解效率。此外，本案例的熱傳分析及應力分析皆有 369 Steps，每個 Step 皆須進行相關的求解設定，若是人工進行輸入設定將曠日廢時，然而因 AWI 可自動生成所有分析所需的 Steps，因此將可節省非常可觀的前處理時間。

三、分析結果

3.1 NUREG-2162 phase 2a 管嘴異質鉚道殘留應力分析結果

依據第二節說明的分析問題與方法，本論文使用 AWI 分析所得的 NUREG-2162 phase 2a 管嘴 mockup 鉚接殘留應力分佈結果如圖 9a、圖 9b 所示，前者為軸向(Axial)殘留應力而後者為環向(Hoop)殘留應力，此為不銹鋼鉚道完成後(即 2.1 節所述之步驟 v)之分析結果。可察軸向殘留應力在靠近異質鉚道內、外表面處呈現張應力狀態，而在壁厚中間區域附近呈現壓應力狀態。

環向殘留應力亦呈現類似的分布結果，但在內表面的張應力量值較小、在壁厚中間區域的壓應力量值也較小。管嘴由內表面至外表面沿鉚道中線(紅色箭頭方向)的軸向及環向鉚接殘留應力分析結果分別如圖 10a、圖 10b 所示(因比較目的，將應力量值轉換為公制單位 MPa)。圖中實心及空心圓點為使用 IDHD 方法的鉚接殘留應力量測結果，紅色實線為本論文分析結果，綠色虛線則為所有 International Round Robin 參與者分析結果的平均值。由圖 10a、圖 10b 的結果看來，本研究所得的 phase 2a mockup 管嘴鉚接殘留應力分析結果無論在趨勢、量

值皆與 NUREG-2162 所刊載的量測結果及 International Round Robin 分析結果十分相似，少部分(如 $x/t=0.3\sim 0.5$ 間)的殘留應力分析結果稍有差距。

3.2 不銹鋼銲道完成前、後的異質銲道殘留應力結果變化

此外，NUREG-2162[5]的分析結果顯示不銹鋼銲道完成後對於異質銲道的軸向和環向銲接殘留應力皆會產生線性彎矩(linear bending)應力，此應力使得異質銲道內表面呈現張應力狀態的的軸向及環向殘留應力量值皆會減小(如圖 11)。

依據本論文分析結果，將不銹鋼銲道完成後(SSW 後)的沿圖 9 中紅色箭頭路徑之殘留應力減去不銹鋼銲道完成前(SSW 前)的殘留應力，所得結果如圖 12a、圖 12b 所示，可察本論文分析結果所預測之應力改變的趨勢及量值皆與 NUREG-2162 所述非常一致。藉由此番討論，可再次說明本研究分析結果的合理性。

四、結論與未來展望

本論文藉由使用 ABAQUS Welding Interface (AWI)針對 NUREG-2162 phase 2a 管嘴 mockup 進行殘留應力分析驗證，分析結果顯示 AWI 可提供合理、準確的殘留應力分析結果，除了在殘留應力的量值、趨勢上與文獻分析結果相近，且可充分反應出不銹鋼銲道完成前、後的異質銲道殘留應力改變行為。此外，如本論文 2.3 節所述，使用 AWI 僅須透過簡單的輸入設定，即可達成銲接模擬時對於熱源施加、組件冷卻須妥善控制的要求，並可大幅促進前處理準備以及分析求解之效率。

五、參考文獻

- [1] ASME Sec. XI Task Group for Piping Flaw Evaluation, "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping", J. Press. Vessel Technol., Vol. 108 (1986), p.352-366.
- [2] "NRC Wolf Creek Flaw Evaluation", dated November 30, 2006. NRC ADAMS Accession No. ML063560346.
- [3] ASME Section XI, 2010 Edition, Appendix A and Appendix G.
- [4] EUR 22510 EN, "Assessment of Dissimilar Metal Weld Integrity: Final Report of the NESC-III Project", European

Commission Joint Research Centre, 2006.
 [5] Weld Residual Stress Finite Element Analysis Validation: Part 1 – Data Development Effort (NUREG-2162), US Nuclear Regulatory Research, 2014.

六、誌謝

本論文感謝台灣電力公司研發計畫之經費支持，計畫編號 TPC-054-040-000201。

七、表格

表 1 NUREG-2162 phase 2a mockup 各銲道的銲接參數[5]

銲道名稱 銲接參數	異質 銲道 (DMW)	填補 銲道 (Fill-in weld)	不銹鋼銲 道 (SSW)
銲接電流 (Current) [unit: A]	220-285	200	90-147
銲接電流 (Voltage) [unit: V]	10.7-11.2	15.5	9.2-26
熱源走速 (Travel speed) [unit: mm/s]	2.54	2.54	1.27
層間溫度 (Interpass Temperature) [unit: °F]	500	200	200

八、圖片

- ANSTO (Australia)
 - AREVA (USA and EU)
 - Battelle (USA)
 - Dominion Engineering (USA)
 - ESI Group (USA)
 - EMC² (USA)
 - Inspecta Technology (EU)
 - Institute of Nuclear Safety System (Japan)
 - Osaka University (Japan)
 - Rolls Royce (UK)
 - Structural Integrity Associates (USA)
 - U. S Nuclear Regulatory Commission (USA)
 - Westinghouse Electric Company (USA)
- 

圖 1 NUREG-2162 phase 2a 分析驗證的 International Round Robin 參與成員[5]

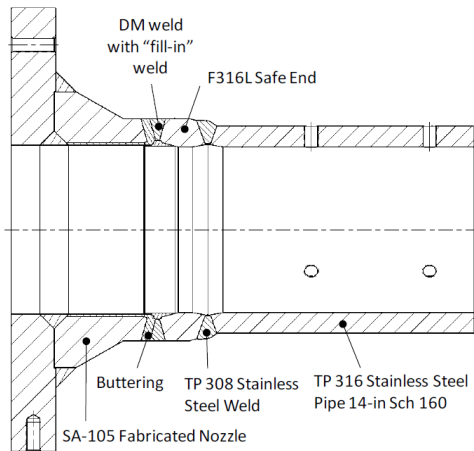


圖 2 phase 2a mockup in NUREG-2162[5]



圖 3 phase 2a mockup 管嘴有限元素模型

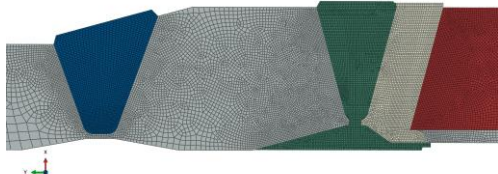


圖 4 phase 2a mockup 銲道部位

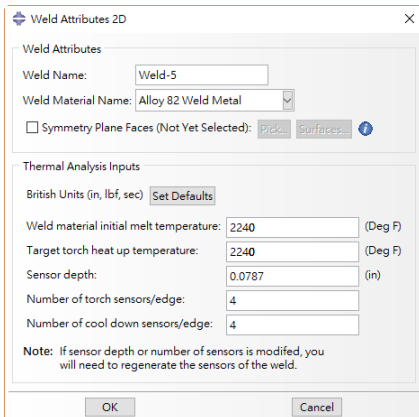


圖 5 AWI 的銲塊初始溫度及熔融線範圍設定視窗

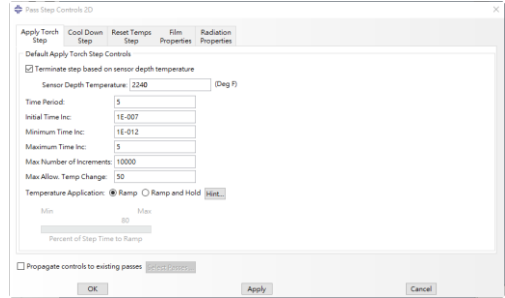


圖 6 AWI 的熔融線溫度設定視窗

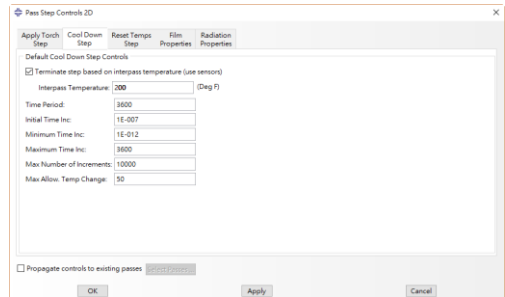


圖 7 AWI 的銲塊層間溫度設定視窗

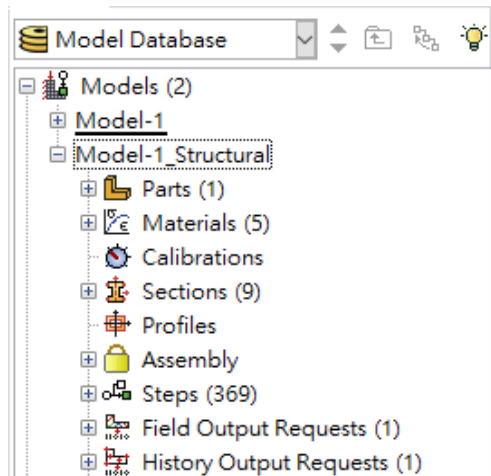


圖 8 AWI 自動生成熱傳分析(Model-1)及應力分析(Model-1_Structural)的求解步驟

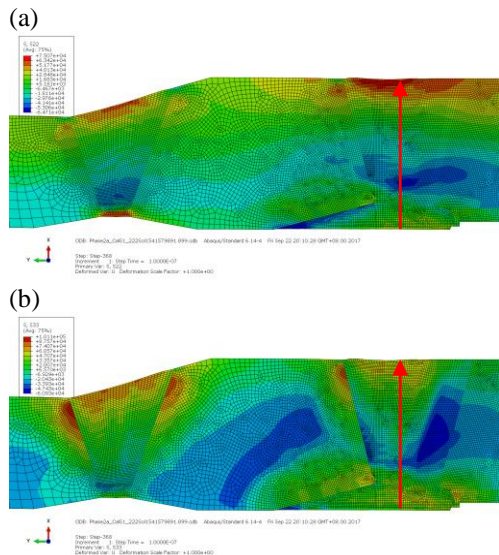


圖 9 使用 AWI 分析得到之銲接殘留應力分佈結果: (a)軸向應力、(b)環向應力

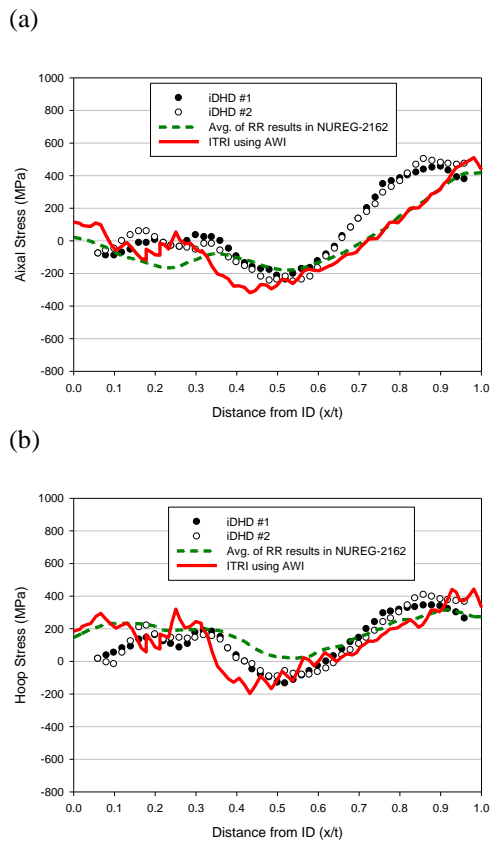


圖 10 phase 2a mockup 異質銲道之殘留應力分佈結果比較: (a)軸向應力、(b)環向應力

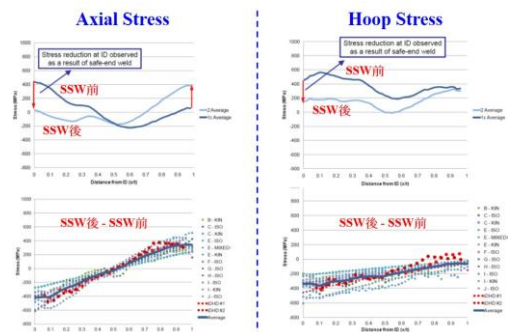


圖 11 NUREG-2162 phase 2a 分析所得之不銹鋼銲道完成前、後的異質銲道殘留應力變化趨勢[5]

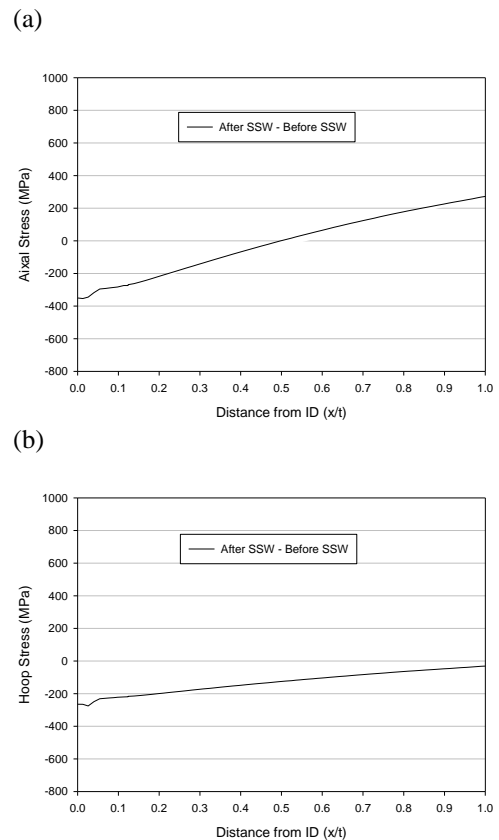


圖 12 使用 AWI 分析得到之不銹鋼銲道完成前、後的異質銲道殘留應力變化趨勢: (a) 軸向應力、(b)環向應力