

反應器壓力槽腹帶區與延伸腹帶區壓力溫度運轉限度建立

沈祐宇, 周雄偉

行政院原子能委員會核能研究所

摘要

本研究主要依據 ASME B&PV Code, Sec. XI - Appendix G 以及美國橡樹嶺國家實驗室 (ORNL) 之方法, 建立核能電廠反應器壓力槽腹帶區與延伸腹帶區的壓力-溫度限值並加以討論。

內容首先說明建立腹帶區與延伸腹帶區壓力-溫度限值的流程; 以壓水式反應器壓力槽作為探討對象, 建立其腹帶區壓力-溫度限值; 接著說明製作延伸腹帶區壓力-溫度限值前, 所需進行之有限元素分析, 並介紹有限元素模型中所需使用的參數資料, 其中包含幾何模型、材料、邊界條件以及負載型式等等, 之後建立延伸腹帶區壓力-溫度限值。最後討論延伸腹帶區在不同 RT_{NDT} 值下, 其壓力-溫度限值與腹帶區的壓力-溫度限值之間主導壓力-溫度限值的關係。

關鍵字: 壓力-溫度限值、延伸腹帶區、應力強度因子

ABSTRACT

The main purpose of the research is to compute and discuss the P-T Curves for both beltline and extended beltline regions of the reactor pressure vessel according to the methods of ASME B&PV Code, Sec. XI - Appendix G and the ORNL's report.

The content first introduces the methods to compute the P-T Curves for both beltline and extended beltline regions of reactor pressure vessel. Regarding the P-T Curves for the extended beltline regions, it is necessary to calculate the stress distributions using finite element analysis. The parameters input for the finite element models are described, including the geometries, material properties, boundary conditions, loading conditions and so on. Finally, the relations between the P-T Curves derived from the beltline and extended beltline regions on various RT_{NDT} are discussed.

Keywords: P-T Curve, Extended Beltline, Stress Intensity

一、緒論

製作反應器壓力槽 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 的壓力-溫度限值 (P-T Curve) 的目的, 主要是確保反應器運轉時的結構完整性, 避免脆性破裂的情形發生。P-T Curve 的建立須滿足法規 10 CFR 50, Appendix G [1] 中對於反應器爐壁材料破斷韌性的相關要求。由於反應器壓力槽腹帶區殼壁與反應器中燃料束相鄰, 故此區域所承受之中子照射通量較其餘位置高出許多, 對該區域材料脆化程度影響較大。因此核電廠最初在建立運轉時所必須遵守之壓力-溫度限值 (P-T limit), 即針對腹帶區條件來做設計。

美國核管會 (United States Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC) 於 2014

年提出考量腹帶區外結構可能造成的影響 [2], 此區域稱為延伸腹帶區。此延伸腹帶區域組件 (如管嘴) 由於距離反應器壓力槽腹帶區較遠, 因此輻射照射通量較低, 該處材料脆化程度相對腹帶區的影響較不嚴重, 但因屬幾何不連續處, 形狀複雜, 所造成的應力集中現象較顯著, 將會放大不連續處的應力, 進而產生較大之應力強度因子 (Stress intensity factor)。因此, 額外考量延伸腹帶區所建立之 P-T limit 曲線, 將視為不可忽視的因素; 故早期核電廠僅以腹帶區為主所設計之反應器壓力-溫度限值 P-T limit 曲線, 可能產生不夠保守的情況。因此, 對於考慮延伸腹帶區之 P-T limit 曲線而言, 此議題在國際間已成為重要的議題。

二、壓力-溫度限值(P-T Curve) 建立程序

壓力溫度操作曲線主要是依據破壞力學中第一種破壞模式(Mode I)的應力強度因子(K_I)必須小於材料的容許應力強度因子(K_{IC})的觀念而產生。

$$\Sigma K_I < K_{IC} \quad (2-1)$$

2.1 腹帶區壓力-溫度限值建立程序

針對反應器壓力槽不同之操作條件， ΣK_I 項所包含之種類及其所對應的安全因數並不相同；另外， K_{IC} 項雖為材料之基本性質，但此值會隨材料溫度及受中子照射程度不同而改變。

在不同操作條件下，反應器爐壁可能之應力有兩大類，即反應器操作壓力所引起之應力，以及爐壁溫差所引起之熱應力，可簡單的表示為：

$$K_I = \alpha(K_{Im} + K_{Ib}) + K_{It} \quad (2-2)$$

式中 K_{Im} 為對應於薄膜應力(Membrane Stress)之應力強度因子， K_{Ib} 為對應於彎曲應力的應力強度因子， K_{It} 為熱應力之應力強度因子。在計算反應器壓力槽壓力溫度限值時，可簡化為僅有壓力槽之內壓力所引起的一次薄膜應力(primary membrane stress)，並忽略彎曲應力[3]。 α 為安全因子，當反應器壓力槽考慮在升溫與降溫的條件時[4] α 為 2，可表示為：

$$K_I = 2 \times K_{Im}(\text{pressure}) + K_{It}(\text{thermal}) < K_{IC} \quad (2-3)$$

依據 2007 年版 ASME B&PV Sec. XI Appendix G [5]，假設反應器壓力槽存在 1/4 壁厚裂紋，(2-3)式中 K_{Im} 由 RPV 內壓所造成，其計算方式如下：

$$K_{Im} = M_m \times (PR_i) / t \quad (2-4)$$

式(2-4)中 M_m 之係數可由查表獲得， P 為 RPV 內壓， R_i 為 RPV 內徑， t 為 RPV 腹帶區壁厚。

熱應力造成之 K_{It} ，則亦考慮 2007 年版 ASME B&PV Sec. XI Appendix G 提供之

計算方式：

$$K_{It} = 0.953 \times 10^{-3} \times CR \times t^{2.5} \quad (2-5)$$

$$K_{It} = 0.953 \times 10^{-3} \times HU \times t^{2.5} \quad (2-6)$$

其中 CR 與 HU 分別對應降溫與升溫速率 ($^{\circ}\text{F/hr}$)。

依據 2007 年版 ASME B&PV Sec. XI Appendix G， K_{IC} ($\text{Ksi}\sqrt{\text{in}}$)與溫度以及材料 RT_{NDT} 之關係如下式：

$$K_{IC} = 33.2 + 20.734 \exp[0.02(T - RT_{NDT})] \quad (2-7)$$

上式中 T 為爐壁材料溫度； RT_{NDT} 為材料無延性轉變參考溫度(Reference Temperature of Nil Ductility Transition)。

由上述之過程，整理式(2-3)至式(2-7)，可發現變數為 K_{IC} 中存在溫度 T ，與 K_{Im} 中存在壓力 P ，故可求得壓力與溫度兩者之間的關係。然而上述過程中所求出之溫度 T ，為假設裂縫尖端之溫度，故需再透過以下熱傳計算轉換為爐水溫度[3]：

$$T_{inner} = T(x) - \frac{Gx^2}{2} \left(\frac{\rho s}{\kappa} \right) + \frac{Gxtpx}{\kappa} \quad (2-8)$$

其中 T_{inner} 為爐水溫度， G 為昇(降)溫速率， x 為爐壁任意點與內表面距離， ρ 為密度， s 為比熱， κ 為熱傳導係數。

2.2 延伸腹帶區管嘴壓力-溫度限值建立程序

針對延伸腹帶區的部分，依據美國橡樹嶺國家實驗室 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL) 2010 年的報告[6]中所提出的方式計算應力強度因子(K_I)，內容中稱之為放大因子法 (Magnification Factor Method)，為一種利用邊界積分法(Boundary Integral Equation, BIE)和影響方程(Influence Function, IF)以及線性疊加的方式進行線彈性應力強度因子計算的方法[7,8]，該方法透過未含裂縫之管嘴所受負載後之應力分佈，以三階曲線方程式進行擬合表示如下：

$$\sigma = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 \quad (2-9)$$

各階應力曲線，如圖 1 所示；式中 x 為管嘴轉角處沿著 45 度方向上的距離轉角處的位置，如圖 2 所示；接著將(2-9)式所得之三階曲線方程式各階係數，透過以下(2-10)式計算出距轉角處厚度四分之一位置承受該負載下的應力強度因子：

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left[0.706A_0 + 0.537 \left(\frac{2a}{\pi} \right) A_1 + 0.448 \left(\frac{a^2}{2} \right) A_2 + 0.393 \left(\frac{4a^3}{3\pi} \right) A_3 \right] \quad (2-10)$$

式中 a 為管嘴轉角處沿著 45 度方向上厚度四分之一的數值。

由於此方式以線性疊加的方式進行應力強度因子的計算，因此適用於各種不同類型之負載條件下所得之應力分佈結果，例如結構內部壓力應力分析、熱傳導應力分析、以及多重應力分析等等的情況。最後透過(2-10)式所得之應力強度因子，依照(2-3)式與(2-7)式以及(2-8)式即可建立延伸腹帶區壓力-溫度限值。

三、壓水式反應器壓力槽腹帶區與延伸腹帶區管嘴壓力-溫度限值

參照報告[6]，針對美國壓水式電廠，同樣僅考慮反應器遭遇降溫暫態下的應力強度因子進行計算，針對爐心遭遇降溫暫態下對於壓力-溫度限值的影響做討論，且採用降溫率為 100°F/hr 的情況進行分析。

3.1 腹帶區壓力-溫度限值的建立

建立壓力-溫度限值所需之幾何材料性質如表 1。此壓水式反應器壓力槽於 36 EFY 時腹帶區降溫之壓力-溫度限值，繪製如圖 3 所示。由圖可以了解在固定溫度下壓力操作範圍要在曲線之下，以避免壓力過大造成結構產生破壞，在固定壓力下溫度操作範圍要在曲線右側，以避免材料因操作溫度較低而降低材料本身的強度，因此壓力、溫度的操作範圍要在曲線右下方以符合 ASME B&PV Code, Sec. XI - Appendix G 的要求。

3.2 延伸腹帶區管嘴 壓力-溫度限值的建立

在建立延伸腹帶的壓力-溫度限值前必須進行有限元素分析，以獲得沿著管嘴轉角處 45 度方向上的應力分佈情況，最後再依照(2-3)式與(2-7)式以及(2-8)式建立延伸腹帶區壓力-溫度限值。

3.2.1 有限元素模型的幾何與材料性質

管嘴結構的部分分成入口端管嘴與出口端管嘴，其幾何模型如圖 4 和圖 5 所示，兩者幾何最大差別在於入口端管嘴內壁轉角處呈現連續的平滑幾何形狀，出口端管嘴內壁則為凸起的不連續幾何形狀，整體結構可以分成反應器壓力槽 (RPV)、管嘴 (Nozzle)、管嘴焊道 (Safe End) 以及披覆層 (Clad) 四個部分。材料性質則參考美國機械工程師學會規章第二部 (ASME Sec. II) 之材料規範查得，包含隨著溫度變化之 Young's modulus、Thermal Expansion、Thermal Conductivity 等等。

3.2.2 內壓應力分析

為建立(2-3)式中 K_{Im} 項方程式，參考[6]之方式，採用有限元素方法，進行內壓應力分析，入口端管嘴與出口端管嘴於分析中所採用的負載與邊界條件相似，以入口端為例如圖 6，其中邊界條件的部分，於斷面處分別施加三個方向截面所對應之對稱邊界條件；負載的部分於整體結構內壁施加內壓；於反應器壓力槽上方截面及管嘴焊道端截面，施加吹洩壓力 (Blow-off pressure)，其數值可藉由(3-1)式計算出，由於此分析過程皆在材料的線彈性範圍內，故僅需以單位壓力進行分析，即可以線性關係求出結構於不同大小的壓力條件中所對應之應力值。

$$P_{\text{blow-off}} = \frac{PD_i^2}{D_o^2 - D_i^2} \quad (3-1)$$

其中 P 為內壓， D_o 為反應器壓力槽或管嘴外徑， D_i 為反應器壓力槽或管嘴內徑。

3.2.3 降溫熱暫態分析

為建立(2-5)式中 K_{IT} 項方程式，進行降溫熱暫態分析，邊界條件的部分如圖 7 所示，於斷面處同樣施加三個方向截面所對應

之對稱邊界條件，整體結構物初始溫度為 550°F，並給與結構內壁溫度隨著時間的變化；溫度歷時如圖 8 所示，其降溫速率為 100°F/hr。

3.2.4 入口端管嘴的壓力-溫度限值

由前述內壓應力分析，圖 9 為入口端管嘴在單位壓力下應力強度的結果，由圖可以觀察出應力強度最大值發生在管嘴轉角處，其最大值为 28.35psi。依照圖 10 取轉角 45 度沿紅色直線路徑上環向應力值，其結果如圖 11 中藍色曲線，可以觀察出環向應力沿著路徑位置向外，數值逐漸降低；圖中紅色虛線為透過曲線擬合後的結果，其方程式各項係數整理如表 2，將各項係數代入(2-10)式可將 K_{lm} 表示成 P 的函數 $K_{lm}(P)=50.49P$ 。透過降溫熱暫態分析，取轉角 45 度距內壁 1/4 厚度位置的最大主應力歷時，如圖 12，圖中最大值發生於第 128 分鐘，取當時刻轉角 45 度沿圖 10 紅色直線路徑上環向應力值並同樣進行曲線擬合，擬合後的結果為圖 13，其方程式各項係數整理如表 3，接著將各項係數代入(2-10)式可得到 $K_{lt}=20.66$ ；最終透過(2-3)式並保守假設延伸腹帶區管嘴處 RT_{NDT} 與腹帶區相同情況下，所繪製的壓力-溫度限值如圖 14 所示，由圖可以看出在相同 RT_{NDT} 值的條件下，壓力-溫度限值主要以延伸腹帶區的結果曲線作為主導。

3.2.5 出口端管嘴的壓力-溫度限值

出口端管嘴的壓力-溫度限值建立過程與前一節過程相同，圖 15 為出口端管嘴在單位壓力下應力強度的結果，由圖可以觀察出應力強度最大值發生在管嘴轉角處，其最大值为 27.97 psi，比入口端結果小。依照圖 16 取轉角 45 度沿紅色直線路徑上環向應力值，並進行曲線擬合後的結果如圖 17，其方程式各項係數為表 4，將係數代入(2-10)式可獲得 $K_{lm}(P)=51.04P$ 。透過降溫熱暫態分析，取轉角 45 度距內壁 1/4 厚度位置的最大主應力歷時，如圖 18，圖中最大值發生於第 120 分鐘，取當時刻轉角 45 度沿圖 16 紅色直線路徑上環向應力值並同樣進行曲線擬合，擬合後的結果為圖 19，其方程式各項係數整理如表 5，接著將各項係數代入(2-10)式可得到 $K_{lt}=13.07$ ；最終同樣透過

(2-3)式並保守假設延伸腹帶區管嘴處 RT_{NDT} 與腹帶區相同情況下，所繪製的壓力-溫度限值如圖 20 所示，壓力-溫度限值同樣主要以延伸腹帶區的結果曲線作為主導。

四、腹帶區與延伸腹帶區管嘴壓力-溫度限值的討論

依據實際情況，管嘴距離反應器壓力槽腹帶區較遠，其受中子照射後之中子累積通量較腹帶區來得低，因此假設延伸腹帶區與腹帶區有相同 RT_{NDT} 值，過於保守；在此討論延伸腹帶區在實際評估之 RT_{NDT} 值下，其壓力-溫度限值與腹帶區的壓力-溫度限值之間主導的關係。

依據[9]內容中所評估之延伸腹帶區入、出口端管嘴與腹帶區 RT_{NDT} 值建立壓力-溫度限值並互相比較，其結果如圖 21，由圖中的結果可以看出，在低於 27°F 之低溫操作條件下，延伸腹帶區出口端管嘴的部分主導壓力-溫度限值，在高於 27°F 之操作溫度下則以腹帶區為主導；但依照一般正常操作下，操作溫度皆大於室溫(70°F)的情況下，整體操作時壓力-溫度限值仍主要以腹帶區的結果曲線作為主導。

五、結論

本研究主要針對美國核管會於 2014 年所提出延伸腹帶區相關議題，依據 ASME B&PV Sec. XI Appendix G，建立反應器壓力槽腹帶區與延伸腹帶區降溫狀態下壓力-溫度限值。

在過於保守假設管嘴處 RT_{NDT} 值與腹帶區相同的情況下，壓力-溫度限值主要以延伸腹帶區的壓力-溫度曲線作為主導。當採用實際情況下，評估過之延伸腹帶區 RT_{NDT} 值後，可以發現壓力-溫度限值仍主要以腹帶區的結果曲線作為主導。

六、參考文獻

- [1] Fracture Toughness Requirements, Appendix G to Part 50 of Title 10 of the Code of Federal Regulations (10CFR50), 2005.
- [2] Information on Licensing Applications For Fracture Toughness Requirements For Ferritic Reactor Coolant Pressure Boundary Components, NRC

Regulatory Issue Summary,2014.

- [3] “ASME 規範對反應器壁脆裂行為評估之探討”，翁炯立，核能月刊，1998
- [4] “ Pressure-Temperature Limits”，US-NRC, NUREG 0800, Standard Review Plan, 5.3.2, 1981.
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix G, 2007.
- [6] “ Stress and Fracture Mechanics Analyses of Boiling Water Reactor and Pressurized Water Reactor Pressure Vessel Nozzles (ORNL/TM-2010/246)”，S. Yin, B.R., Bass, G.L. Stevens, Oak Ridge National Laboratory, 2010.
- [7] “Suggested Improvement to Appendix G of ASME Section XI Code”，H. S. Mehta, T. J. Griesbach, and G. L. Stevens, 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2008-61624, July 27-31, 2008, Chicago, IL, USA.
- [8] “ Fracture Mechanics Analysis of JAERI Model Pressure Vessel Test”，S. A. Delvin and P. C. Riccardella, ASME Paper No. 78-PVP-91, 1978 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, June 25-30, 1978, Montreal, Quebec, Canada.
- [9] “反應爐壓力槽延伸腹帶區輻射脆化評估”，台灣電力股份有限公司，2013

七、表格

腹帶區內徑 (in)	壁厚 (in)	密度 (lbm/in ³)
78.5	7.875	0.282
比熱 (Btu/(lb -°F))	熱傳導係數 (Btu/(lb-°F))	
0.113	1.95	

表 1 壓水式反應器壓力槽 腹帶區幾何與材料性質。

方程式: $A_3X^3 + A_2X^2 + A_1X + A_0$	
$A_3=-0.00113$	$A_2=0.2502$
$A_1=-3.1715$	$A_0=26.8158$

表 2 入口端內壓分析環向應力擬合方程式各項係數。

方程式: $A_3X^3 + A_2X^2 + A_1X + A_0$	
$A_3=-0.0358$	$A_2=0.9480$
$A_1=-8.4852$	$A_0=19.5432$

表 3 入口端降溫暫態分析環向應力擬合方程式各項係數。

方程式: $A_3X^3 + A_2X^2 + A_1X + A_0$	
$A_3=-0.0068$	$A_2=0.2189$
$A_1=-2.8576$	$A_0=25.3795$

表 4 出口端內壓分析環向應力擬合方程式各項係數。

方程式: $A_3X^3 + A_2X^2 + A_1X + A_0$	
$A_3=-0.0099$	$A_2= 0.2667$
$A_1= -3.0881$	$A_0=9.9323$

表 5 出口端降溫暫態分析環向應力擬合方程式各項係數。

八、圖片

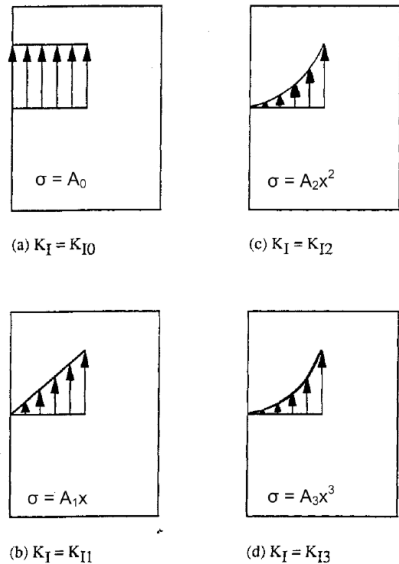


圖 1 曲線擬合下各階應力曲線。

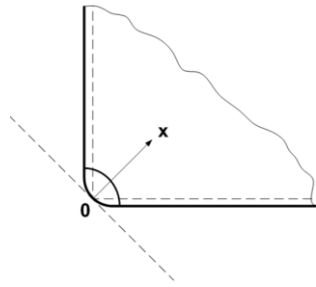


圖 2 延伸腹帶區管嘴轉角處 x 位置示意圖。

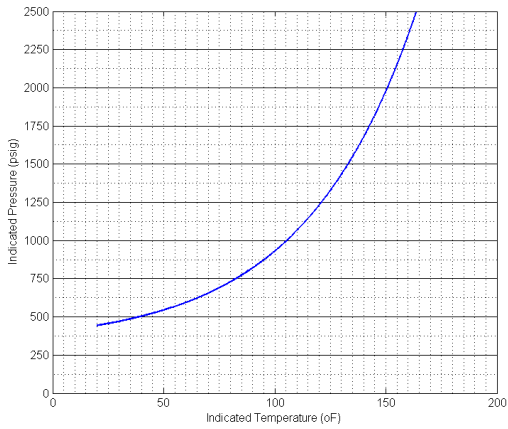


圖 3 腹帶區壓力-溫度曲線。

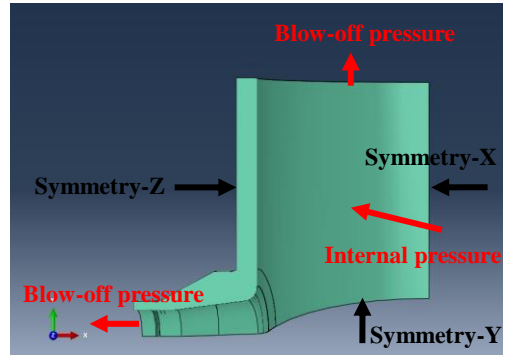


圖 6 管嘴內壓分析負載與邊界條件。

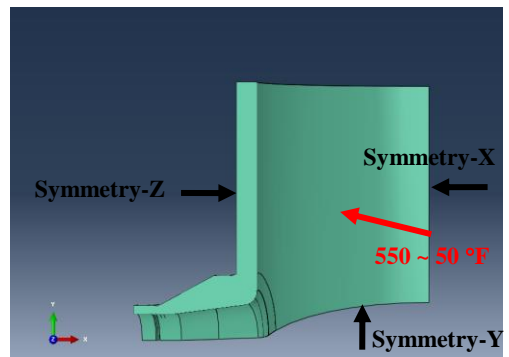


圖 7 管嘴熱暫態分析邊界條件。

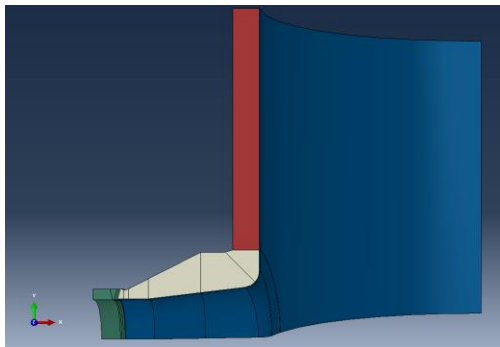


圖 4 入口端管嘴幾何模型。

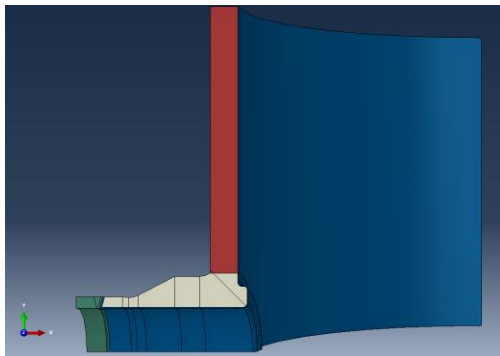


圖 5 出口端管嘴幾何模型。

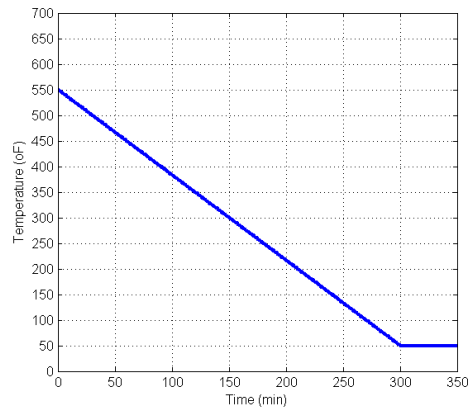


圖 8 熱暫態分析內壁溫度歷時。

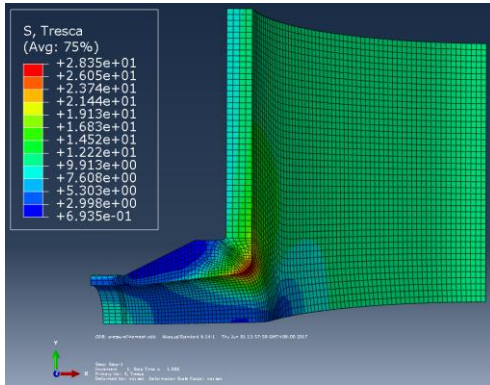


圖 9 入口端管嘴內壓分析-應力強度。

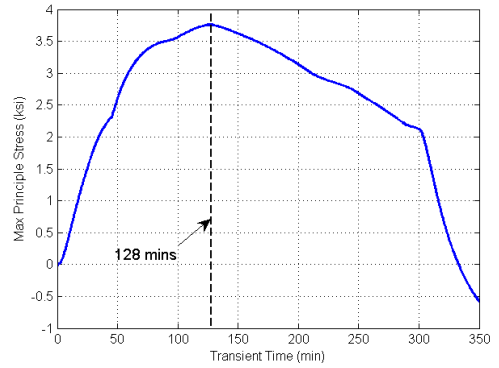


圖 12 入口端管嘴降溫熱暫態分析最大主應力歷時。

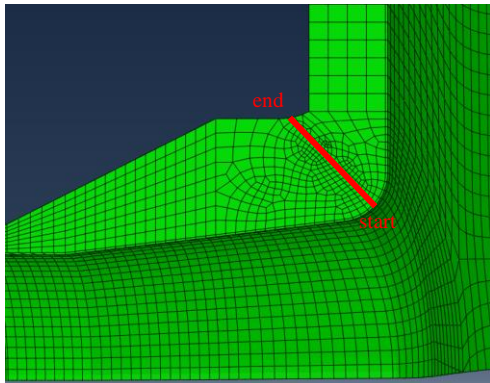


圖 10 入口端管嘴沿 45 度角選取環向應力的路徑。

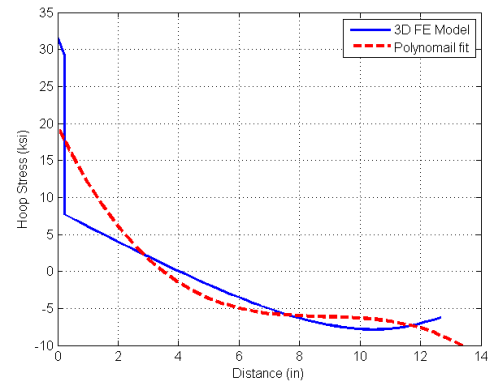


圖 13 入口端管嘴降溫熱暫態分析環向應力與曲線擬合結果。

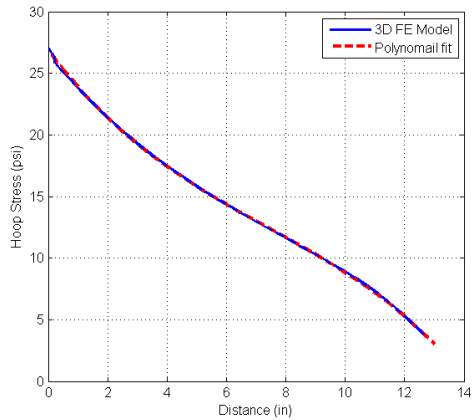


圖 11 入口端管嘴內壓分析環向應力與曲線擬合結果。

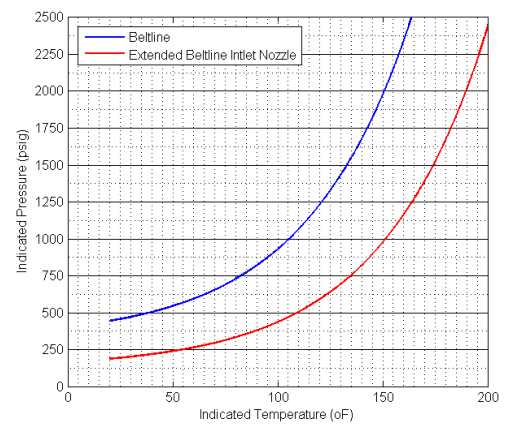


圖 14 入口端管嘴與腹帶區壓力-溫度曲線。

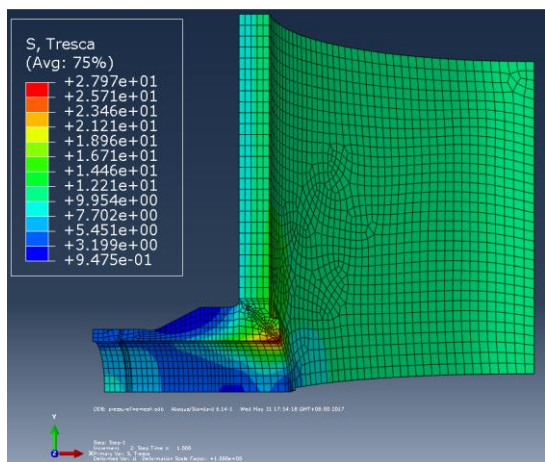


圖 15 出口端管嘴內壓分析-應力強度。

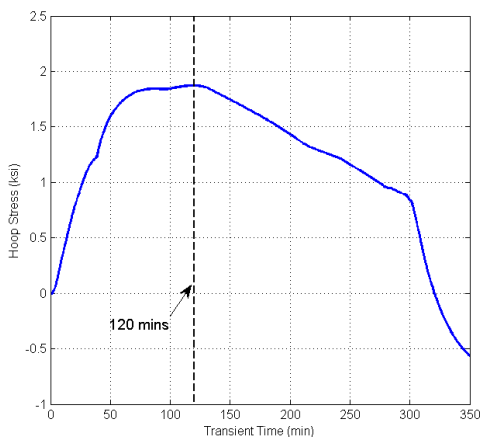


圖 18 出口端管嘴降溫熱暫態分析最大主應力歷時。

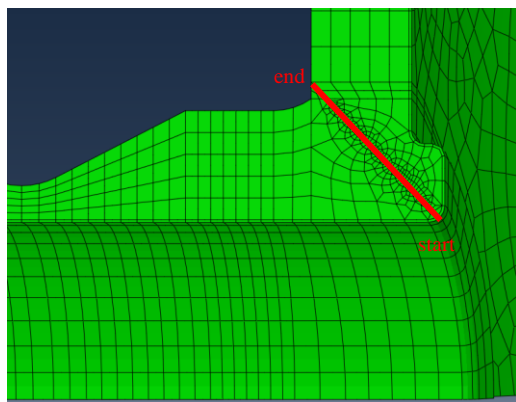


圖 16 出口端管嘴沿 45 度角選取環向應力的路徑。

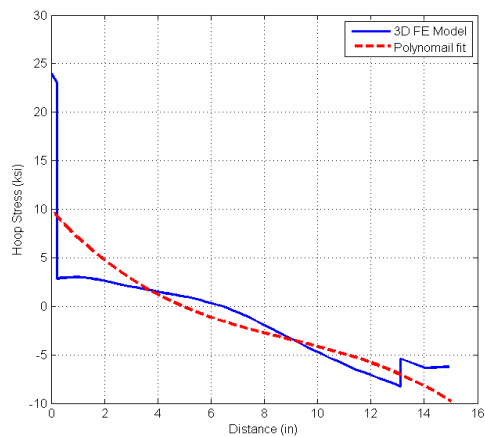


圖 19 出口端管嘴降溫熱暫態分析環向應力與曲線擬合結果。

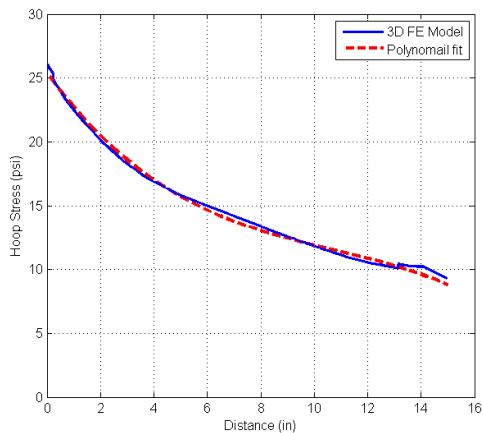


圖 17 出口端管嘴內壓分析環向應力與曲線擬合結果。

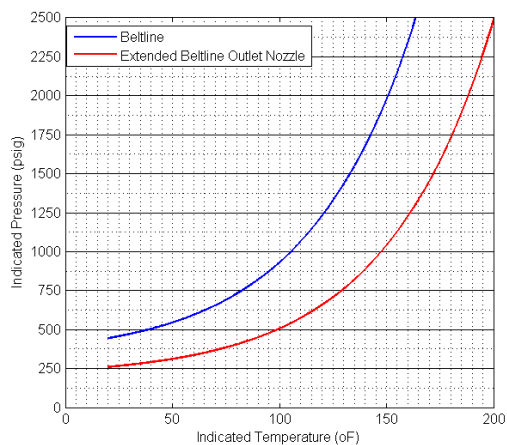


圖 20 出口端管嘴與腹帶區壓力-溫度曲線。

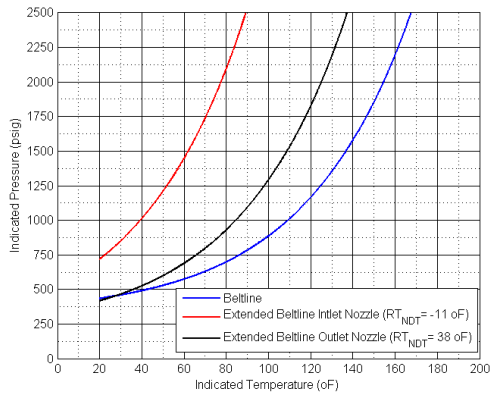


圖 21 延伸腹帶區入、出口端管嘴與腹帶區
壓力-溫度曲線。