

科技部補助產學合作研究計畫成果精簡報告

大型動力鍋爐過熱器SA 213 T91 合金鋼管之冷作彎管製程開發

計畫類別：技術及知識應用型
計畫編號：MOST 105-2622-E-040-004-CC3
執行期間：105年06月01日至106年05月31日
執行單位：中山醫學大學職業安全衛生學系暨碩士班

計畫主持人：莊正利

計畫參與人員：大專生-兼任助理：謝宗彧
大專生-兼任助理：林德平

處理方式：
公開方式：立即公開

中華民國 106 年 08 月 22 日

中文摘要：為符合蒸汽高溫、高壓之要求與提高過熱器爐管之高溫強度與耐高溫潛變等性質，添加鉻(9 wt% Cr)與鉬(1 wt% Mo)元素於管材中而成高溫性質優異之SA213-T91合金鋼管，該合金鋼管為目前超臨界鍋爐過熱器爐管之最佳選擇材料之一。添加合金元素雖可大幅提升合金鋼管之高溫機械性質與硬度，但高硬度之T91合金鋼管於冷作彎管製程中，因塑性變形產生差排之累積與殘留應力之提升，過高之差排密度與殘留應力，易導致裂縫等缺陷出現於合金鋼管之彎管區域，對鍋爐壓力件之品質與可靠度造成嚴重影響。本研究擬將合金鋼管分成四組不同處理狀態之試片，分別為未經應力釋放處理且經噴珠處理(A試片)、未經應力釋放且未經噴珠處理(B試片)、經應力釋放處理且經噴珠處理(C試片)與經應力釋放且未經噴珠處理(D試片)，對市售管徑2英吋SA213-T91合金鋼管於加熱溫度750°C持溫1小時，施以應力釋放處理，降低合金鋼管之殘留應力與差排密度，期望提高合金鋼管之延性，應力釋放後進行管材之拉伸試驗與微結構觀察，用以佐證合金鋼材應力釋放之成效。備齊上述四種處理狀態試片後，以量產型CNC彎管機進行四種試片之冷作彎管實驗，合金鋼管經彎管試驗後，除以目視檢查彎管表面型態外，以滲透試驗檢測彎管表面是否出現裂縫等缺陷；以光學顯微鏡、掃描式電子顯微鏡觀察塑性應變區顯微結構之變化；鋸切彎管斷面量測彎管區之橢圓化程度與彎管產生之減薄率；以超高壓爆破試驗檢測彎管之耐壓極限，並觀察破裂區域與耐壓極限是否合乎超臨界鍋爐過熱器爐管迴路之設計需求。比較上述試片彎管後之差異，並由機械性質、幾何尺寸、材料微觀結構之觀察與測試結果，評估是否合乎ASME code之要求。

由實驗結果顯示SA213-T91管材經750°C持溫1小時後，其延伸率由12%提升至23%，降伏強度由663 MPa下降至517 MPa，合金鋼管表面硬度值由239 HV下降至228 HV，且合金鋼管之微結構經高溫應力釋放處理後，組成未改變且微結構組織呈現粗大化，顯示T91合金鋼管經高溫應力釋放處理後，可降低原始管材之降伏強度、硬度值並提升其延伸率，可有效降低合金鋼管之殘留應力，提升合金鋼管之延性。將上述四種管材經量產化彎管機進行彎管後，其減薄率、橢圓率均符合相關規範之要求；由表面滲透試驗結果並未發現冷彎處出現裂痕等缺陷；經水壓爆破試驗後，彎管之耐壓程度遠大於合金鋼管之設計承壓能力。綜整上述試驗結果，發現高溫應力釋放製程可有效降低合金鋼管之殘留應力，提升鋼管之延伸率，免除合金鋼管冷作彎管製程中因殘留應力過大所引致之缺陷，此一實驗結果亦可將合金鋼管之延伸率定為冷作彎管之重要製程管制指標。

本實驗驗證高溫應力釋放處理確實可降低合金鋼管之鋼性，提升其延性，符合冷作彎管所需之機械性質，此一研究結果亦可應用於同種鋼材冷作相關加工製程之應用。

中文關鍵詞：SA 213-T91、冷作彎管製程、超臨界鍋爐。

英文摘要：The ASME SA-213 T91 is an advanced ferritic steel, which was widely used in the superheater panels of ultra-supercritical steam boilers due to its high temperature strength, heat-resistant property and excellent heat conductivity. The hardness also increased with adding Cr in

SA 213-T91 tubes and the quality of the cold bending would be deteriorated due to the tubes with exceeding hardness. The dislocation density and residual stress arose significantly when the tubes subjected to severe plastic deformation, and the crack would be formed at bending zone to degrade the quality of cold bending. The stress relief was conducted to reduce the dislocation density and residual stress for the T91 alloy tubes before cold bending. To examine the effects of stress relief on T91 tubes, cold bending experiments were carried out using a CNC bender. After T91 alloy tubes bended, the penetration test, the optical microscope and scanning electron microscope were used to verify the quality. All the experimental results are compared to the specification that stated in the ASME code.

As T91 alloy tubes subjected to stress relief at 750 °C for 1hr, the yielding stress, tensile stress and hardness were reduced and the elongation was increased from 12 % to 23 %. All mechanical properties of the T91 tubes have satisfied the specifications that stated in the ASME code for T91 tubes subjected tempering treatment. A ductile fracture mode can be found on the fracture morphology for T91 alloy tubes treated with stress relief. Neither cracks nor defects were found on the elbows that they were fabricated by cold bending for the T91 tubes subjected to tempering treatment. The hydrostatics test also proved that bending tubes successfully sustained the minimum requirement of fluid pressure stated in the ASME code. An excellent cold bending performance of T91 tubes can be achieved for the tubes they were treated with the stress relief annealing.

英文關鍵詞：SA213-T91, cold bending process, ultra-supercritical boiler.

大型動力鍋爐過熱器 SA 213-T91 合金鋼管之冷作彎管製程開發

主持人:莊正利*

計畫參與人員: 謝宗彧、林得平

中山醫學大學 職業安全衛生學系

*luke@csmu.edu.tw

科技部計劃編號: MOST- 105-2622-E-040 -004 -CC3

中文摘要

提高大型動力鍋爐之蒸汽產出量與提高蒸汽流體之壓力、溫度已成動力鍋爐之主要發展趨勢，然而提高蒸汽之壓力與溫度易造成發電鍋爐過熱器爐管之熱負荷，為符合蒸汽高溫、高壓之要求與提高過熱器爐管之高溫強度與耐高溫潛變等性質，添加鉻(9 wt% Cr)與鉬(1 wt% Mo)元素於管材中而成高溫性質優異之 SA213-T91 合金鋼管，該合金鋼管為目前超臨界鍋爐過熱器爐管之最佳選擇材料之一，添加合金元素雖可大幅提升合金鋼管之高溫機械性質與硬度，但高硬度之 T91 合金鋼管於冷作彎管製程中，因塑性變形產生差排之累積與殘留應力之提升，過高之差排密度與殘留應力，易導致裂縫等缺陷出現於合金鋼管之彎管區域，對鍋爐壓力件之品質與可靠度造成嚴重影響。本研究擬對市售管徑 2 英吋 SA213-T91 合金鋼管於加熱溫度 750°C 持溫 1 小時，施以應力釋放處理，降低合金鋼管之殘留應力與差排密度，期望合金鋼管之延性，應力釋放後進行管材之拉伸試驗與微結構觀察，用以佐證合金鋼材應力釋放之成效。備齊上述四種處理狀態試片後，以量產型 CNC 彎管機進行四種試片之冷作彎管實驗，合金鋼管經彎管試驗後，除以目視檢查彎管表面型態外，以滲透試驗、學顯微鏡、掃描式電子顯微鏡與幾何形狀之量測評估冷彎製程之品質，並以超高壓爆破試驗檢測彎管之耐壓極限，檢視其耐壓極限是否合乎超臨界鍋爐過熱器爐管迴路之設計需求。微觀結構之觀察與測試結果，評估是否合乎 ASME code 之要求。由實驗結果顯示 SA213-T91 管材經 750 °C 持溫 1 小時後，其延伸率由 12 % 提升至 23 %，降伏強度由 663 MPa 下降至 517 MPa，合金鋼管表面硬度值由 239 HV 下降至 228 HV，且合金鋼管之微結構經高溫應力釋放處理後，組成未改變且微結構組織粗大化，顯示 T91 合金鋼管經應力釋放後，可降低原始管材之降伏強度、硬度值並提升其延伸率，有效降低合金鋼管之殘留應力，提升其之延性。經應力釋放後管材其減薄率、橢圓率均符合相關規範之要求；表面滲透試驗結果並未發現冷彎處出現裂痕等缺陷；超高水壓爆破試驗後，驗證冷彎管之耐壓程度遠大於合金鋼管之設計承壓能力。依實驗結果亦可將合金鋼管之延伸率設定為冷彎之重要製程管制指標。

關鍵字：SA 213-T91、冷作彎管製程、超臨界鍋爐。

Abstract

A power plant with high efficiency and low impact on environment is expected. Increasing temperature and pressure of the steam become an effective way to improve the efficiency. However, a high thermal stress would be existed on the tubes for the pressure and temperature of the steam was increased, and then the service life and reliability of superheater would degrade significantly. ASME SA-213 T91 is advanced ferritic steel, which was widely used in the pressure parts of the superheater due to its high temperature strength, heat-resistant property and excellent heat conductivity. The hardness also increased with adding Cr in T91 tubes and the quality of the cold bending could be deteriorated due to the tubes with exceeding hardness. The stress relief was conducted to reduce the dislocation density and residual stress for the T91 tubes before cold bending. To examine the effects of stress relief on T91 tubes, cold bending experiments were carried out using a CNC bender. After cold bending, the penetration test, optical microscope and scanning electron microscope were conducted to verify the bending performance. All the experimental results are compared to the specification that stated in the ASME code. As T91 tubes subjected to stress relief at 750 °C for 1 hr, the yielding stress, tensile stress and hardness were reduced and the elongation was increased from 12 % to 23 %. All mechanical properties of the T91 tubes have satisfied the specifications stated in the ASME code for T91 tubes subjected tempering treatment. A ductile fracture mode can be found on the fracture morphology for T91 tubes treated with stress relief. Neither cracks nor defects were found on the elbows that they were fabricated by cold bending for the T91 tubes subjected to tempering treatment. The hardness on the cold bending tubes was lower for T91 tubes subjected to tempering treatment than those without tempering treatment, indicating the residual stress on the bending tubes is smaller than those without subjecting to tempering. Both minimum thickness and ovalisation of bending tubes were complied with the specific that stated in ASME code. The hydrostatics test also proved that bending tubes successfully sustained the minimum requirement of fluid pressure stated in the ASME code. An excellent cold bending performance of T91 tubes can be achieved for the tubes they were treated with the stress relief. This process also can be applied to the cold work of 9 Cr-1Mo materials.

keyword: SA213-T91, cold bending, ultra-supercritical boiler.

1.前言

鍋爐爐管製造廠商為滿足大型動力鍋爐過熱器爐管對高溫強度、高溫抗潛變能力與高溫穩定性之需求，添加鉻(9 wt% Cr)與鉬(1 wt% Mo)元素於爐管材料中，用以提高爐管材料之高溫強度、抗潛變能力、低熱膨脹係數與高熱傳導性[1-3]等，該材料數年前取得美國機械工程師協會標準(ASME code)之認證，正式給予材料編號為 SA213-T91 合金鋼材，此一肥粒鐵系鋼材(ferritic steel)亦通過認證可使用於核子反應爐之材料[4]。管材添加合金元素後，確實可提高過熱器合金管材之高溫機械性質，然而添加合金元素後，亦提升合金管材之硬度，當合金管材於鍋爐壓力件預製過程中，因高硬度合金管材於冷作彎管製程易產生差排(dislocation)之累積，差排累積程度與合金管材之塑性變形量成正比，然而鍋爐過熱器爐管為提高爐管迴路(loop)在燃氣通道空間之受熱面積，進而提高鍋爐之熱效率，盡可能高爐管之排列數目，故通常採過熱器爐管之彎曲比(bending ratio)等於爐管直徑，此一設計模式之彎管變形量最高，故冷作彎管後，易於冷作彎管製程中造成大量差排累積，迅速提高塑性變形區域之差排密度，導致合金管材經冷作彎管後之殘留應力大幅提昇，過高之差排密度或殘留應力易造成合金管材產生裂縫(crack)等缺陷，對鍋爐壓力組件之品質或使用壽命造成不良影響，故 SA213-T91 合金管材對冷作彎管製程形成嚴重挑戰。

Allen 等人[5]研究指出提升蒸汽壓力與溫度為增進發電效率之有效方法，若僅將蒸汽溫度由 580°C 提升至 600°C，鍋爐之熱效率(thermal efficiency)可由 38% 提升至 42%，目前超臨界鍋爐過熱器之操作溫度均超過 600°C[6]，承載過熱蒸汽之合金鋼管須具備優異之耐高溫特性，SA213-T91 合金管材為目前應用於超臨界鍋爐過熱器爐管材料之一，該管材為肥粒鐵系之合金材料[7]，其主要之合金成分為鉻(Cr)、鉬(Mo)與少量之鈦(V)、鈮(Nb)等元素，添加鉻元素之目的為提升合金管材之抗氧化性，因鉻元素氧化形成 Cr_2O_3 ，該氧化物之緻密性佳，可形成良好之自我鈍化層(self passivate layer)，以避免氧原子持續穿越氧化層進入合金管材而與鐵原子產生氧化作用或避免鐵原子向外擴散接觸合金管內流體之氧原子而持續發生氧化反應，鉻元素之添加可避免合金管材氧化腐蝕(corrosion)，有效提高合金管材之使用壽命。Zhong 等人[8]曾提出 T91 合金管材內部與流體接觸產生氧化腐蝕之失效機制(failure mechanism)，鍋爐合金管材鐵原子之氧化層(Fe_2O_3 , Fe_3O_4)質地疏鬆且含大量空孔，無法形成自我鈍化之保護層，故合金管材因氧化腐蝕失效之主要原因為無法抑制鐵原子之快速氧化，若於合金管材添加鉻元素後，鉻元素氧化後可形成良好之自我鈍化保護層，有效降低或減緩鐵原子之氧化速率，提高鍋爐壓力管材之使用壽命；添加 1wt%鉬可提升合金管材沃斯田鐵化溫度(austenization temperature)與固溶強化(solid solution strengthen) [9]，T91 合金鋼材之主要強化機制

包括析出強化(precipitation strengthen) 與散佈強化(dispersion strengthen)[10]，當 T91 合金管材施以正常化(normalization)處理時，合金管材經空氣冷卻可得高差排密度(dislocation density)之麻田散鐵(martensite)組織與過飽和之金屬固溶體，經回火(tempering)處理後，可析出金屬顆粒(MX particle)與金屬碳化物($M_{23}C_6$)而達成析出強化之目的，其中 MX 係指金屬之碳化物或氮化物，常見為雪明碳鐵(Fe_3C)、碳化鉻(Cr_3C)、氮化鈦(VN)與氮化鈮(NbN)或碳化鈮(NbC)[11]，細小顆粒析出物均勻散佈於基地而達成散佈強化之目的，且析出物可阻止差排之擴散移動，甚至於析出物附近形成差排環，有效阻止高溫下晶界之滑移，可提升 T91 合金管材之抗高溫潛變能力。Gupta 等人[12]以穿透式電子顯微鏡觀察 T91 合金材料之微觀結構，經正常化與回火處理後，差排擴散所形成之次晶粒晶界(subgrain boundary)，回火處理後之主要微結構組織為板狀回火麻田散鐵，晶界處出現金屬碳化物或氮化物之析出物顆粒，並可見因回火處理而形成之差排晶胞(dislocation cell)。

與其他合金材料相較，T91 合金材料之強化機制相對複雜，其主要強化機制包含固溶強化、析出強化與散佈強化，若依 ASME 之相關規範[13]指出 T91 合金材料之最低降伏強度(yielding strength)為 415 MPa、伸長率(elongation)為 20%與最高容許硬度為 265 HV，若材料經加工或銲接則需進行加工或銲接後之熱處理，以降低其殘留應力，通常回火溫度為 680°C-750°C，時間約為 30 分鐘至 2 小時。Hamzah 等人[14]探討熱處理對 T91 合金管材顯微結構與硬度之影響，銲道若未經銲後熱處理，其微結構組成為初大化之麻田散鐵且未見析出物，硬度值偏高(375 HV)；若經銲後熱處理(750°C, 2hrs)，其主要微結構為回火之麻田散鐵與析出物，硬度約為 214 HV，顯示適當之熱處理可降低材料之硬度，符合相關規範之要求，該篇文獻使用扁平測試(flattening test)進行 T91 合金管材經不同熱處理條件後之延性(ductility)試驗，其結果顯示經正常化與回火處理後，管材試片呈現向內彎曲且未出現裂痕，而試片未經回火處理，管材則無法出現向內彎曲且出現裂痕之缺陷，此一實驗結果說明 T91 合金管材經加工或銲接後，應施以適當之回火處理，降低材料中之殘留應力，提高材料之延性。

本研究擬對 T91 合金鋼管冷作彎管作業前，先行釋放合金管材之殘留應力，以確保 T91 合金鋼管於冷作彎管製程之品質，就相關文獻[14]研究結果可知 T91 合金鋼管出廠之硬度值約為 233 HV，經回火處理(750°C, 2 hrs)後，其硬度值可下降至 195 HV，主要微結構組成仍為回火麻田散鐵與顆粒較大之析出物，就硬度值下降趨勢而言，回火處理應可有效降低合金鋼管之殘留應力，避免冷作彎管製程出現裂縫之缺陷，但回火處理後亦可能降低合金鋼管之降伏強度，故進行殘留應力釋放處理時，仍需考慮對合金管材降伏強度與抗拉強度之影響，合金鋼管經應力釋放處理

後，其降伏強度仍需高於 ASME code 載明 415 MPa 之要求。

2. 研究方法

本本研究擬以回火 (tempering) 處理進行 SA213-T91 合金管材殘留應力之釋放，期望降低合金鋼管之差排密度、殘留應力與硬度值，進而提高 T91 合金鋼管冷作彎管製之穩定性與品質。T91 合金鋼管因添加合金元素 (9wt% Cr, 1wt% Mo) 提高其高溫機械性質、高熱傳導性、高抗氧化腐蝕能力與低熱膨脹係數性等，但添加合金元素易造成合金鋼管殘留應力、差排密度與硬度之升高，導致該合金鋼管於冷作彎管後，常於彎管表面出現裂縫等缺陷，故該合金鋼管無法適用冷作彎管之生產製程，就目前國外生產該合金鋼管壓力件之廠商，大部分採用熱作彎管製程與鍛造製程，熱作彎管與鍛造製程雖可避免 T91 合金鋼管於彎管後出現裂縫之缺陷，但熱彎與鍛造製程之操作性遠較冷作彎管製程複雜，且熱作彎管製程無法獨立完成合金鋼管之彎管作業，合金鋼管因熱漲冷縮而無法精準控制其彎管尺寸，故仍需藉由冷作彎管製程之輔助，方可完成合金鋼管之彎管作業，相較下熱作彎管與鍛造製程之製造成本均遠高於冷作彎管製程。彎管製程為大型發電鍋爐壓力件製作之重要生產技術，良好之彎管製程可大幅降低過熱器人力組裝與銲接之負荷，不僅可降低壓力件之製造成本，更可提高壓力組件之品質，故發展 T91 新式合金鋼管之冷作彎管製程技術，確實有其必要性。

固定合金鋼管之回火處理溫度為 750°C，改變其持溫時間從 30 分鐘至 120 分鐘，且為比較 T91 合金鋼管經不同處理過程後，冷作彎管製程之穩定性與彎管品質，擬將 T91 合金鋼管分為四組不同之處理狀態，如表一所示，並比較其冷作彎管後之差異，分別為合金鋼管出廠性質 (未施以應力釋放處理) 且未經噴珠作業 (A 試片)、合金鋼管出廠性質且經噴珠處理 (B 試片)、合金鋼管經回火處理且經噴珠作業 (C 試片)、合金鋼管經回火處理且未經噴珠處理 (D 試片) 與合金鋼管經正常化處理 (E 試片)。

表一、T91 合金鋼管試片之處理條件。

試片編號	試片處理條件
A	未噴珠作業、未回火處理
B	經噴珠作業、未回火處理
C	經噴珠作業、經回火處理
D	未噴珠作業、經回火處理
E	正常化處理

T91 合金鋼管經應力釋放處理後，其抗拉強度與降伏強度亦隨之而下降，以拉伸試驗檢測應力釋放後合金鋼管之抗拉強度、降伏強度與伸長率是否合乎

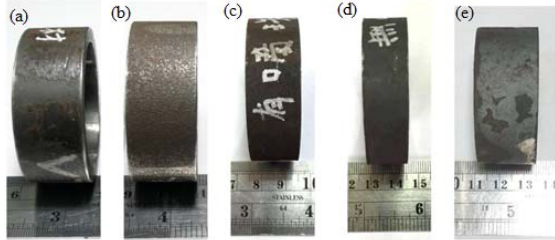
ASME code 之最低要求，並製作應力釋放後合金鋼管之金相試片，以光學顯微鏡檢視回火麻田散鐵晶粒尺寸之變化；以微小維克式硬度機檢測應力釋放處理前後管材應度之變化，綜整此一實驗結果可用於評估回火處理對 T91 合金管材應力釋放之成效。備齊 T91 合金鋼管相關試片之處理後，擬以合作廠商之量產型 CNC 彎管機進行上列四種經不同處理過程合金鋼管之冷作彎管實驗，以量產型設備進行冷作彎管實驗，合金鋼管經冷作彎管後，以超高水壓進行合金鋼管冷作彎管後之耐壓性，以銲接方式將彎管一端口徑密封，另一端入口處銲上超高水壓試驗入水口接頭，加壓至冷作彎管爆裂，記錄爆裂前所能承受之壓力，並分析其爆裂位置，若爆破之水壓低於鍋爐流體之設計壓力且爆裂未出現於彎管之塑性變形區，則該冷作彎管判定不合格，須修正合金鋼管之材料性質或冷作彎管製程；反之，若冷作彎管之爆裂處出現於非塑性變形之直管或爆破壓力遠大於鍋爐流體之設計壓力，則該彎管品質與冷作彎管製程符合相關規範之要求。經冷作彎管後之彎管材料均需進行微小維克式硬度試驗，其目的係以硬度反映因塑性變形所產生之殘留應力與差排密度，該結果可供冷作彎管彎後進行應力釋放所需之參考依據；以滲透試驗檢測彎管表面是否出現裂縫等缺陷，此一非破壞性檢測技術之目的在於協助目視檢測經冷作彎管後之完整度，此一結果可驗證冷作彎管製程之穩定性與彎管品質；將彎管之塑性變形區、直管區 (未產生塑性變形區) 與前兩者之介面區，以鋸切方式 (給予適當冷卻液，避免鋸切溫度過高，造成微觀結構之變化) 於各區取下試片，將試片鑲埋、研磨、拋光與蝕刻 (etch) 後，以光學顯微鏡 (OM) 察該三區試片微結構組織之晶粒大小與形狀之變化，並檢查是否存在裂縫或空洞之缺陷；以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 或穿透式電子顯微鏡 (TEM) 觀察塑性變形區之析出物與其散佈狀況，並比較塑性變形區差排密度之變化，且差排密度於析出物周圍是否明顯增加，此一觀察結果有助於建立 T91 合金鋼管冷作彎管製程之學術機理與其機制。

3. 結果與討論

3-1. SA213-T91 合金鋼管經不同熱處理程序

合金鋼管試驗分為五種參數，分別為 SA213-T91 原合金管材，試片編號 A，如圖一(a)所示；SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理，試片編號為 B，如圖一(b)所示；SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理且經應力釋放處理，試片編號 C，如圖一(c)所示；SA213-T91 合金鋼管未噴珠且經應力釋放處理，試片編號 D，如圖一(d)所示；SA213-T91 合金鋼管經正常化處理，如圖一(e)所示。由外觀形態圖可清楚發現原始合金鋼管材料表面含有黑皮層，推測該黑皮層為熱抽管材表面氧化物所致，而合金鋼管表面經噴珠處理後，表面黑皮可被噴珠移除而得到潔淨表面，該噴珠處理除清潔表面外亦可於合金鋼管表面形成壓縮應力 (compressive stress)，可提

高合金鋼管之高溫抗潛變性；經應力釋放處理後之試片表面出現黑皮層，該黑皮層為應力釋放處理時，鋼材表面所形成之氧化層；經正常化處理後之試片因其受熱溫度較高，故其黑皮層較厚而產生剝離現象。SA213-T91 合金鋼管經不同應力釋放程序後，擬進行微結構觀察、硬度試驗與拉伸試驗，用以評估各種處理程序對應力釋放的功效。

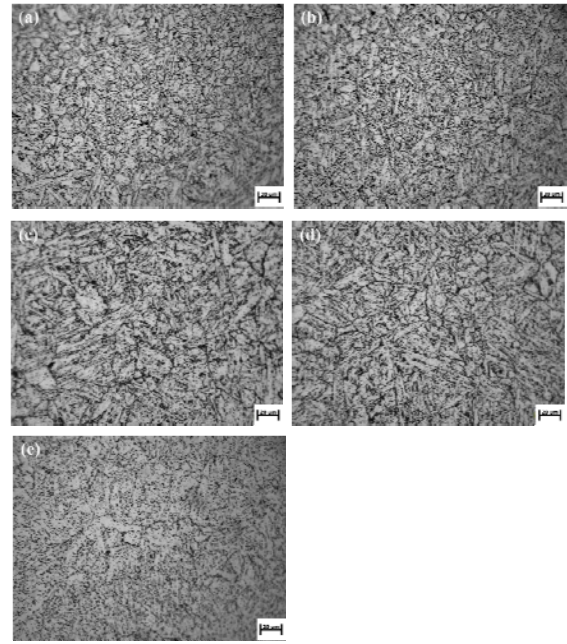


圖一、SA213-T91 合金鋼管經不同處理程序後之表面外觀圖，(a) SA213-T91 原合金管材，(b) SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理，(c) SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理且經應力釋放，(d) SA213-T91 合金鋼管未噴珠且經應力釋放處理，(e) SA213-T91 合金鋼管經正常化處理。

3-1-1、SA213-T91 合金鋼管微結構分析

SA213-T91 管材微結構之組成為針狀之麻田散鐵與板狀之殘留沃斯田鐵，如圖二(a)所示；經噴珠且無應力釋放處理之微觀結構與 SA213-T91 原管材並無明顯差異，如圖二(b)所示；經噴珠且經應力釋放程序之合金鋼管其微觀結構與原管材相較，晶粒較原管材晶粒粗大，如圖二(c)所示；未經噴珠程序且經應力釋放處理之微結構與 SA213-T91 原管材比較，其晶粒尺寸較原管材粗大，如圖二(d)所示，該晶粒粗大化原因應為合金鋼材受熱且持溫一段時間，提供足夠熱能(thermal energy)與時間供微結構晶界產生擴散移動，並合併周遭尺寸較小之晶粒，造成晶粒之粗大化，且依 Hall-petch 理論[24]，較粗大的晶粒可使材料之應力值下降，故 SA213-T91 合金鋼管經應力釋放熱處理後，應可有效降低其合金鋼管內部之殘留應力；而經正常化處理之合金鋼管微結構晶粒均較原始管材與經應力釋放處理後合金鋼管之微結構晶粒粗大，推論其原因為正常化之加熱溫度較應力釋放溫度為高，故其微結構晶粒粗大化之現象較為明顯，且組織應為沃斯田鐵，如圖二(e)所示。

表二所示為 SA213-T91 合金鋼管經不同處理程序後，其晶粒參照美國材料測試協會(ASTM)規範所得之晶粒尺寸號數與其對等之晶粒直徑，由表中可發現經應力釋放或正常化程序後，合金鋼管微結構之晶粒尺寸由未經應力釋放處理之 10.12 μm 提升至正常化處理後晶粒尺寸為 12.8 μm ，應力釋放後合金鋼管之晶粒尺寸均大於未經應力釋放或正常化程序之管材，此一結果可說明 SA213-T91 合金鋼管經應力釋放或正常化處理，使晶粒粗大化，此晶粒尺寸之初大化亦可能造成合金鋼管抗拉強大與降伏強度之下降，延伸率之提升，此一部份之影響由拉伸試驗之結果進行驗證。



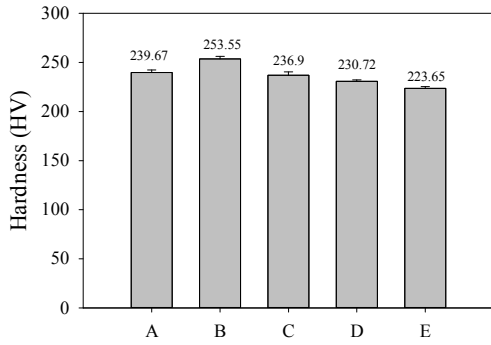
圖二、SA213-T91 合金鋼管經不同處理程序後之微結構圖，(a) SA213-T91 原合金管材，(b) SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理，(c) SA213-T91 合金鋼管經噴珠處理且經應力釋放，(d) SA213-T91 合金鋼管未噴珠且經應力釋放處理，(e) SA213-T91 合金鋼管經正常化處理。

表二、T91 合金鋼管經不同處理程序後，晶粒尺寸之變化。

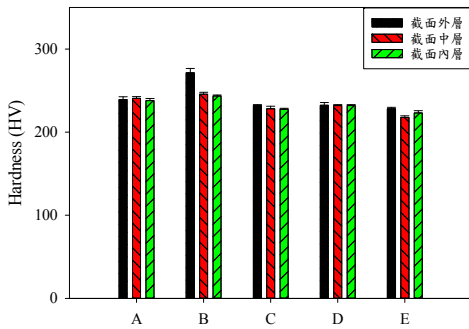
項次 試片編號	ASTM 晶粒號數	對應晶粒尺寸(μm)
A	10.3	10.12
B	10.3	10.12
C	9.8	12.4
D	9.7	12.46
E	9.6	12.8

3-1-2、SA213-T91 合金鋼管硬度試驗

SA213-T91 合金鋼管與經過不同應力釋放處理之管材硬度試驗分為表面硬度試驗及橫截面硬度試驗，以微小維氏硬度機進行 SA213-T91 合金鋼管之硬度試驗，使用荷重為 200g，加壓時間 10 秒，每一數值其測四點，並求取平均值與標準差，用以判斷量測數據之準確性。合金鋼管表面硬度之測試結果如圖三所示，合金鋼管經正常化處理(E 試片)之硬度最低，其原因為正常化處理之加熱溫度較回火處理為高，可提供合金管較高熱能，合金鋼材之表面硬度因而較低，推論其應力釋放較為完整。反之，合金鋼管表面經噴珠處理者，其硬度值較高，鋼珠於合金鋼材表面產生高速之碰撞，於表面產生微量之塑性變形，故因其應變硬化(strain hardening)而其硬度值最高，而經應力釋放處之試片其硬度值略為下降，配合圖二所示合金管材經不同處理後之顯微結構，可說明應力釋放處理有助於合金鋼管殘留應力之釋放。



圖三、合金鋼管經不同處理後之表面硬度。



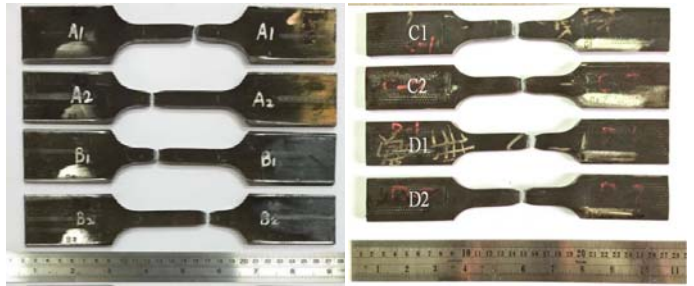
圖四、合金鋼管經不同處理後，表層、中層與內層之硬度。

SA213-T91 合金鋼管經不同應力釋放處理後，量測管材外層、中層與內層之硬度，如圖四所示之量測結果，可清楚發現未經應力釋放且經噴珠處理試片(試片 B)之表層硬度最高，而其中層與內層之硬度則與未經回火處理之金屬管材(試片 A)相似，而經應力釋放及正常化處理之合金鋼管其外層、中層與內層之硬度差異不大，顯示合金鋼管厚度對回火處理與正常化處理之影響不大，且經正常化與應力釋放處理後，合金鋼管之硬度值均下降。綜整上述硬度試驗結果得知，經回火或正常化之應力釋放程序後，可使合金管材之殘留應力釋放，進而降低合金管材之硬度，但進行表面珠擊處理則提高合金管材表面之硬度，故 SA213-T91 合金管材施作冷作彎管前，建議先行應力釋放處理且不應施做表面珠擊，以避免提高合金鋼管之表面硬度。

3-1-3、SA213-T91 合金鋼管拉伸試驗

為驗證 SA213-T91 合金鋼管經不同應力釋放回火處理後，抗拉強度、降伏強度與延伸率之變化，依美國材料測試協會(ASTM)之規範製作拉伸試片，並以拉伸試驗評估各種應力釋放熱處理條件之效應，拉伸試驗後之破斷試片之巨觀表面形態，如圖五所示，各應力釋放處理條件下之抗拉強度、降伏強度與延伸率如表三所示，由表中可發現合金鋼管經應力釋放處理後(試片 C、D)，抗拉強度與降伏強度均隨之下降，其數值分別約為 690 MPa、520 MPa，但其延伸率提升至約 22%，相較於美國機械工程師協會(ASME)對 SA213-T91 合金鋼管抗拉強度與降伏強度之最低要求分別為 585 MPa 與 465MPa，其抗拉強度與降伏強度均

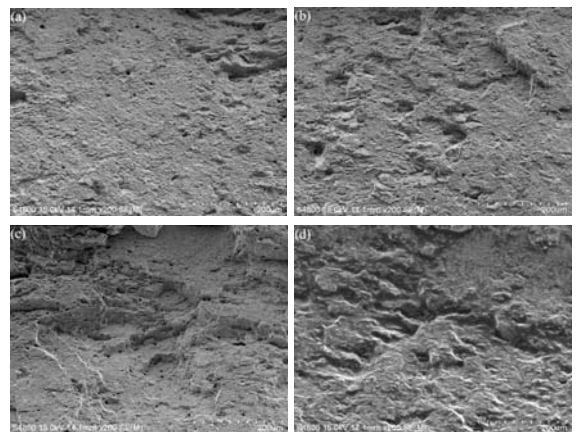
大於 ASME 規範之要求且延伸率由未處理之 16% 上升至 22%，此一實驗結果顯示 SA213-T91 合金鋼管經應力釋放處理後之機械強度均符合相關規範之要求，且延伸率上升，亦即此一應力釋放條件可釋放合金鋼管於成型過程中之殘留應力，有效降低合金鋼管內部之差排密度(dislocation density)，若對比前述之微結構觀察結果與硬度之測試結果，均符合 SA213-T91 合金鋼管之剛性下降、延性提升之需求，對後續合金鋼管之冷彎製程應有正面的助益。



圖五、不同處理條件下，合金鋼管經拉伸試驗後之斷裂外觀圖。

表三、不同處理條件下，合金鋼管拉伸試驗結果。

項次 試片	抗拉強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	延伸率 (%)
A-1	758	663	12
A-2	770	675	16
B-1	723	619	19
B-2	730	618	17
C-1	714	550	22
C-2	686	519	23
D-1	685	509	22
D-2	681	517	22



圖六、SA213-T91 合金鋼管拉伸試驗之破斷面，(a)原合金管材，(b)合金鋼管經噴珠處理，(c) 合金鋼管經噴珠與應力釋放處理，(d) 合金鋼管未噴珠且經應力釋放處理。

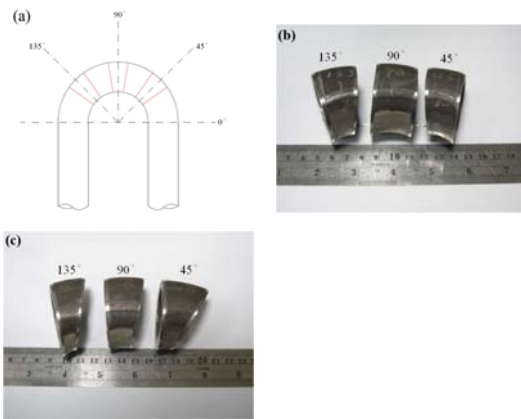
為進一步驗證各項應力釋放製程對合金管材之影響，將拉伸試驗後之斷面以 SEM 觀察其破斷面。未進行應力釋放之原始管材(試片 A)與經噴珠處理且未經應力釋放處理之管材(試片 B)，其拉伸試驗後之斷面大

部分出現脆性之劈裂面，較少出現延性破裂之凹窩 (dimple) 狀組織，分別如圖六(a)與(b)所示，此一破斷面之觀察結果與拉伸試驗之測試結果相符，經應力釋放處理之 SA213-T91 合金鋼管，其拉伸試驗後破斷面出現較多之凹窩狀組織，如圖六(c)與(d)所示，顯示其斷

裂模式主要為延性破裂，故其延伸率可達 20% 以上，此一實驗結果再次驗證 SA213-T91 合金鋼管經加熱 750°C，持溫 1 小時之應力釋放回火處理，確實可降低合金鋼管之殘留應力，提升其延性，推論應有助於提升 SA213-T91 合金鋼管冷彎製程之良率。

3-2、SA213-T91 合金鋼管彎管後試驗

合金鋼管經不同處理後，為量測其彎管後之幾何形狀，擬將冷彎後之管件進行不同角度之裁切，並於裁切之後，量測彎管後之最大外徑、最小外徑與成型後之最小厚度，用以計算在各角度之橢圓率與減薄率。圖七(a)所示為合金鋼管冷彎後之試片裁切示意圖，圖七(b)、(c)分別為試片編號 A、D 試片之試片截切實體圖。



圖七、SA213-T91 合金鋼管冷彎後試片，(a) 冷彎試片之截切示意圖，(b) 原始合金管材，(c) 經應力釋放處理合金管材。

3-2-1、SA213-T91 合金鋼管冷彎後之橢圓率

鋼管橢圓率之計算公式如(1)式，且本實驗之 SA213-T91 鋼管之公稱外徑為 50.8 mm，若彎管後之最大外徑與最小外徑之差異越大，顯示彎管後截面長軸與短軸之差異越大，亦即彎管成型後之橢圓率越大，依合作廠商內部之規範，鋼管冷彎後之橢圓率需低於 15%。

$$\text{橢圓率}(\mu\%) = \frac{\text{實測最大外徑} - \text{實測最小外徑}}{\text{公稱外徑}} \times 100\% \dots\dots (1)$$

表四所示為試片 A、D 之橢圓率量測結果，表中所示之 R、L 分別為裁切位置之右側與左側。由表四之量測結果發現上述 A、D 試片於 45°、90°、135° 處之橢圓率均低於 15%，合乎業界規範之要求。此外，經應力釋放處理合金鋼管(試片 D)之橢圓率於各角度均小於原始合金鋼管(試片 A)，此一實驗結果推論經回火

處理之合金鋼管具較佳之延性，故於冷彎製程中，金屬材料之流動性較均勻，冷彎後彎管之最大外徑與最小外徑之差異較小，故其彎管截面之橢圓率較佳，此一實驗結果亦顯示經回火處理之合金鋼管，其冷彎後之橢圓率較佳。

表四、SA213-T91 合金鋼管冷彎後橢圓率之量測結果

試片	最大外徑 (mm)	最小外徑 (mm)	橢圓率 (%)
A-45°R	50.3	46.4	7.68
A-45°L	50	43.8	12.20
A-90°R	50.06	45.54	8.90
A-90°L	49.96	48.16	3.54
A-135°R	50.42	44.66	11.34
A-135°L	51.42	46.46	9.76
D-45°R	49.76	48.14	3.19
D-45°L	50.58	48.6	3.90
D-90°R	50.32	48.3	3.98
D-90°L	50.24	48.7	3.03
D-135°R	51.14	49.66	2.91
D-135°L	50.72	50.5	0.43

(R 為裁切位置右側、L 為裁切位置左側)

3-2-2、SA213-T91 合金鋼管冷彎後之減薄率

為確保 SA213-T91 合金鋼管經彎管成型後，其最小厚度仍維持一定厚度，可承受蒸汽於高溫、高壓下之作用，故需計算合金鋼管經冷彎管後之減薄率，其計算公式如(2)所示。

$$\text{減薄率}(\%) = \frac{\text{公稱厚度} - \text{成型後最小厚度}}{\text{公稱厚度}} \times 100\% \dots\dots (2)$$

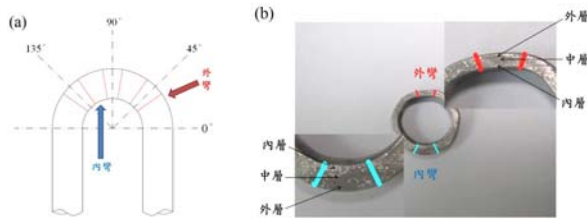
表五所示為試片 A、D 於冷彎成型後，彎管各角度之減薄率。A 試片之公稱厚度為 4.55 mm；D 試片之公稱厚度為 6.13 mm，依合作廠商之品質規範為減薄率需小於 18%。表中之減薄率均合於該規範之要求，驗證合金鋼管經應力釋放後，冷彎管之減薄率仍符合品質要求，且由表中可清楚發現未經應力釋放之減薄率軍遠大於經應力釋放處理後之冷彎管，此一實驗結果推論經應力釋放之合金鋼管其組成較均勻且延性較佳，故厚度之最大減薄率相對較低。

表五、SA213-T91 合金鋼管經冷彎管後之減薄率。

試片	成型後最小厚度 (mm)	減薄率 (%)
A-45°	4.14	9.01
A-90°	4.08	10.32
A-135°	4.16	8.57
D-45°	5.86	4.40
D-90°	5.96	2.77
D-135°	5.92	3.43

3-2-3、SA213-T91 合金鋼管冷彎後硬度試驗

圖八(a)所示為 SA213-T91 合金鋼管經冷作彎管後，取其硬度試片之示意圖；圖八(b)為冷作彎管後截取試片之實體圖，並依標示位置，以微小維克氏硬度機量測合金鋼管經冷作彎管後之硬度。



圖八、SA213-T91 合金鋼管冷作彎管後硬度測試之示意圖 (a)與實體圖(b)。

表六、SA213-T91 合金鋼管經冷作彎管後之硬度試驗。

試片		硬度(HV)	
		A	D
45° 外彎	外層	279.9	290.5
	中層	298.8	274.8
	內層	307.6	262.7
90° 外彎	外層	301.7	274.8
	中層	296	287.8
	內層	296	282.5
135° 外彎	外層	274.8	265
	中層	296	274.8
	內層	307.6	277.3
45° 內彎	外層	290.5	274.5
	中層	279.9	262.7
	內層	272.3	249.1
90° 內彎	外層	296	285.1
	中層	307.6	272.3
	內層	293.2	267.4
135° 內彎	外層	316.7	279.9
	中層	313.6	282.5
	內層	307.6	282.5
平均		296.4	274.8

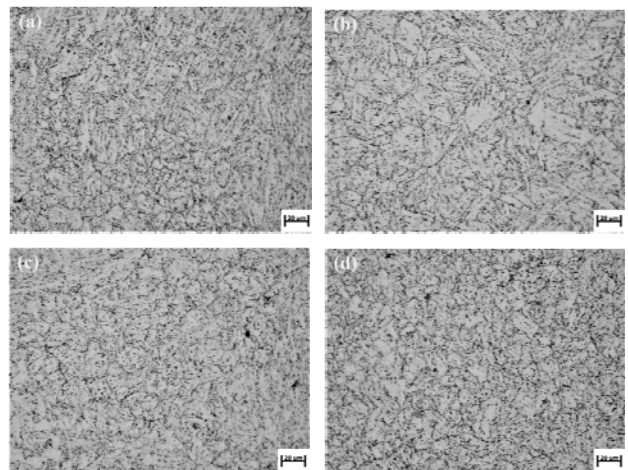
表六所示為合金鋼管經應力釋放與未經應力釋放處理後，該二種冷作彎管試片之硬度值，由表中數值可以清楚發現 SA213-T91 合金鋼管經冷彎後，其硬度均大幅提升，其原因應為冷作彎管區域產生大量塑性變形，合金鋼管因塑性變形，累積大量差排密度，且產生應變硬化效應，故其硬度值大幅上升，兩種不同處理程序之 SA213-T91 合金鋼管經冷彎後，以原始合金鋼管(試片 A)之平均硬度值較高(296.4 HV)，而經應力釋放處理之合金鋼管(試片 D)之平均硬度值為最低

(274.8 HV)，具較佳延性與較低之差排密度(殘留應力)，故於塑性加工之冷作彎管製程中，其硬度值最低，反觀未經應力釋放處理之合金鋼管則因殘留應力較高，故經冷作彎管之塑性加工時，易累積較高差排密度與殘留應力，故易於彎管成品表面出現裂縫等缺陷。

由合金鋼管冷作彎管後硬度試驗之結果得知應力釋放處理可有效降低合金鋼管彎管後之硬度值，配合目前實驗之冷作彎管作業數量達數千彎管，其成品仍未出現裂縫等缺陷，顯示 SA213-T91 合金鋼管經應力釋放處理確實可減少彎管作業缺陷之產生，有助於提升 SA213-T91 合金鋼管之良率。

3-2-4、SA213-T91 合金鋼管冷彎後微結構分析

由前述 SA213-T91 合金鋼管冷作彎管後之示意圖，如圖八(a)所示，在不同角度(45°、90°、135°)取出樣品進行顯微結構之分析，期望藉由顯微結構之觀察，分析微結構晶粒尺寸之變化與其組成相之分析。圖九所示為 SA213-T91 合金鋼管原始材料與應力釋放處理後，合金鋼管經冷作彎管後，於45°處取下試片之顯微結構圖，由圖中可以發現其主要組成針狀麻田散鐵與殘留之沃斯田鐵，但相較圖九(a)與(b)可發現經應力釋放處理之合金鋼管於冷作彎管後，其針狀之麻田散鐵較為粗大，此一觀察結果亦可驗證前述之硬度測試結果，經應力釋放處理合金鋼管冷作彎管後之硬度較低，顯示彎管後之殘留應力與差排密度之累積量較未進行應力釋放之合金鋼管彎管後低，再次證明彎管前之應力釋放程序有助提升合金鋼管之延伸率與成型性，於冷作彎管作業中，較不易產生表面裂縫等缺陷。圖九(c)與(d)為合金鋼管於外彎試片之顯微結構，其組成與內彎試片相似，經歷尺寸之變異與內彎試片相近。冷彎管於90°、135°試片之顯微結構與晶粒尺寸變化趨勢與前述冷彎試片於45°相似，故僅詳列於完整報告中，此處精簡報告不再贅述。



圖九、SA213-T91 合金鋼管冷作彎管後之微結構圖。(a)A-45° 內彎,(b)D-45° 內彎,(c)A-45° 外彎,(d)D-45° 外彎。

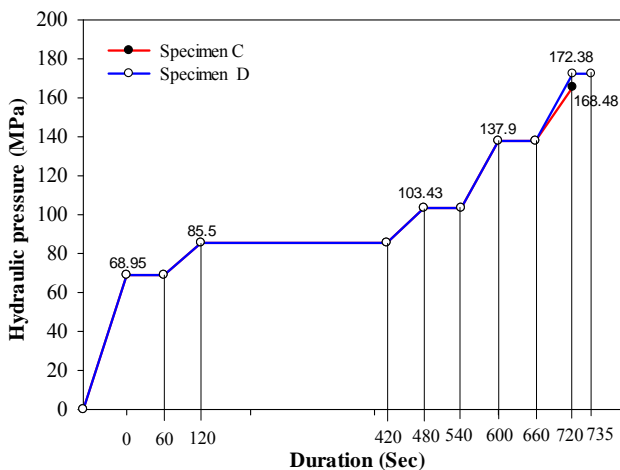
3-2-5、SA213-T91 合金鋼管冷彎後之水壓爆破試驗

為檢測 SA213-T91 合金鋼管冷彎後之耐壓能力，將 SA213-T91 合金鋼管經噴珠及應力釋放處理(C 試片)與 SA213-T91 無噴珠且經應力釋放處理(D 試片)之冷彎管成型後，於一端以端蓋焊封，另一端則焊接高壓接頭之承接高壓管路，以利後續之水壓試驗，其外觀如圖十所示。



圖十、SA213-T91 合金鋼管經冷彎後之水壓爆破試驗前外觀圖。(a) 經噴珠與應力釋放處理。(b) 僅經應力釋放處理。

圖十一所示為合金鋼管冷彎後，水壓測試時壓力與時間之關係圖，高壓水注入彎管前需將彎管中空氣排空後，再進行加壓，故升壓至 68.95 MPa 後，方為水壓測試之開始時間，而由圓管應力分析可計算 SA213-T91 合金鋼管降伏強度與水壓試驗壓力之關係，本實驗之合金鋼管直徑為 2 英寸(50.8 mm)，厚度為 4.2 mm，故其內徑為 20.8 mm，經計算得知其降伏強度之耐水壓壓力約為 84 MPa，故將水壓設定為 85.5 MPa 持壓 5 分鐘，觀察彎管外觀在高壓下，是否產生明顯形變(deformation)，隨後將水壓持續提升，並持壓 1 分鐘，觀察彎管壓力是否因破裂洩漏而壓力下降，若彎管仍可保持壓力，則持續加壓。對噴珠及應力釋放處理之冷彎管件(C 試片)，其耐壓能力為 165.48 MPa，而經應力釋放且未進行噴珠之彎頭(D 試片)，其耐壓能力可達 172.38(MPa)，顯然經應力釋放處理之合金鋼管彎頭之耐壓能力均遠高於 SA213-T91 合金鋼管之耐壓能力，此一試驗結果再次驗證應力釋放處理可提高冷彎製程之良率，且冷彎管之性能均遠高於業界相關規範之要求。



圖十一、SA213-T91 合金鋼管冷彎後水壓爆破試驗。

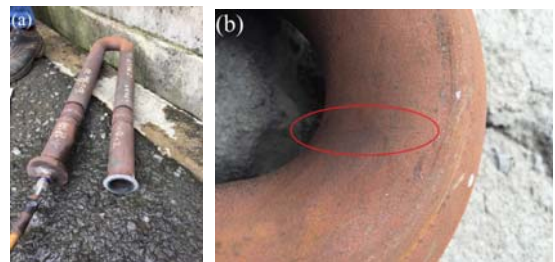
圖十二所示為 SA213-T91 合金鋼管表面噴珠且應力釋放處理之冷彎管(C 試片)經水壓試驗後之破裂處，彎管出現外擴之變形且彎管其出現兩個破裂處，分別為直管部分與彎頭部分，如圖十二(a)所示，就其

破裂順序為直管破裂後，如圖十二(b)所示，彎頭由地面彈起，再彈落至地面造成彎管部分之脆性破裂，如圖十二(c)所示，水壓測試前冷彎管未經正常化處理，故冷彎後因大量變形致使應變硬化，經地面彈起落下過程，導致冷彎管於彎曲部份發生破裂，但其耐壓程度遠超過 ASME 規範所訂之 118 MPa。



圖十二、SA213-T91 經噴珠且應力釋放處理管材冷彎管之水壓爆破試驗後外觀圖，(a)試驗後整體外觀圖，(b)直管部位破裂圖，(c)彎管部位破裂圖。

SA213-T91 合金鋼管無噴珠且經應力釋放處理(D 試片)之冷彎管經水壓測試後，其破裂發生於彎管之封閉側，推測其主要破裂原因為密封板與彎管之填角焊接融熔不全所致，如圖十三(a)所示，但其耐壓程度已超過 ASME 規範所訂之 118 MPa，而彎管內側出現裂痕如，如圖十三(b)所示，該裂痕應為端板破裂時，彎管向外變形所致，以試驗後彎管與未試驗彎管相較，可知試驗後彎管具外擴形變之情況，如圖十四所示，故推斷彎管內側之裂痕因外擴形變所產生，若依 ASME 規範對彎管進行正常化處理，應可避免裂痕之產生。



圖十三、應力釋放處理後 SA213-T91 合金鋼管冷彎管經水壓爆破試驗後之外觀圖，(a)試驗後整體外觀圖，(b)試驗後彎管部位裂縫。



圖十四、SA213-T91 合金鋼管應力釋放處理後，經水壓爆破試驗冷彎管與未經水壓試驗管材之比較圖。

由水壓試驗結果得知，SA213-T91 合金鋼管經噴珠且應力釋放(C 試片)、SA213-T91 合金鋼管無噴珠且應力釋放處理(D 試片)兩種管材於冷作彎管之水壓試驗皆符合 ASME 規範中所列之最低容許壓力，故推斷 SA213-T91 合金鋼管經噴珠且應力釋放(C 試片)與 SA213-T91 合金鋼管無噴珠且應力釋放處理(D 試片)彎管均可通過水壓試驗之耐壓測試。

4. 結論

綜整實驗結果得知 SA213-T91 合金鋼管經應力釋放處理後，合金鋼管硬度下降，延伸率上升，顯微結構之晶粒尺寸較為粗大，顯示應力釋放處理可降低合金鋼管之殘留應力，並由後續之冷作彎管製程驗證，該彎管可順利完成且彎管數量達三千餘件，經表面滲透試驗檢測，仍未於彎管表面發現裂縫等缺陷，此一實驗結果驗證以應力釋放處理降低合金鋼管之殘留應力，有助於提升 SA213-T91 合金鋼管之冷作彎管成形性，降低彎管裂縫之產生。適度提升回火處理之持溫時間，雖降低合金鋼管之抗拉強度與降伏強度，但其延伸率可有效降低，依本實驗結果，建議回火時間設定於 1 小時，其應力釋放效果較為顯著，但若其回火持溫時間延長至 2 小時，其應力釋放效果較 1 小時雖有提升，但其提升效果有限，故建議回火應力釋放之條件為加熱溫度 750 °C、持溫時間 1 小時。

SA213-T91 冷作彎管後經水壓測試，確認彎管之耐壓能力遠大於美國機械工程師協會相關規範之最低要求，且高於未經應力釋放之彎管。基於實驗結果建議 SA213-T91 合金鋼管進行冷作彎管前，先行施作應力釋放處理，或將合金鋼管之延伸率設定高於 20%，合金鋼管於冷作彎管製程中裂縫缺陷之產生率應可有效防止或降低。

5. 計畫自評

依申請計畫之查核重點，檢視本研究業已完成各項查核項目，對 SA213-T91 合金鋼管冷彎製程技術已充分掌握，藉回火處理進行市售合金鋼管之應力釋放，降低合金鋼管於抽製過程中之殘留應力，有效提高合金鋼管之延伸率，進一步以冷彎製程技術進行大型動力發電鍋爐過熱器爐管之彎製，除降低合作廠商面臨之技術瓶頸外，並由廠商以生產生式冷彎機進行製程技術之驗證，生產完整一套鍋爐過熱器之冷彎管(數量約 3000 個)均未發現裂縫等缺陷，故此一開發製程技術可運用於實際量產作業。

經由實驗相關分析與檢測結果，市售 SA213-T91 合金鋼管經適度回火處理後，合金鋼管之延伸率提高，有效提升合金鋼管之延性，雖抗拉強度、降伏強度與硬度均下降，但其值仍遠高於美國機械工程師學會規範之最低值，由合金鋼管之微結構觀察得知經應力釋放鋼管之晶粒尺寸粗大化，但其主要組成相仍為麻田散鐵與殘留沃斯田鐵，推論其強度下降，延性提

升之主要因為回火處理提供合金鋼管中差排擴散所需之熱能與時間，有效降低合金鋼管於抽製或擠製過程所累積之插排密度，提升延性後，有助於後續合金鋼管冷彎製程良率之提升。合金鋼管冷彎後進行各項品質之檢驗，包括幾何尺寸之量測、微觀結構觀察、彎管表面之非破壞性檢測與水壓測試等，各項實驗結果均顯示之晶回夥由自行開發之低速乾燥機合金鋼管經應力釋放後，其冷彎管之品質均優於未進行應力釋放處理之冷彎管，驗證回火處理之應力釋放確實可提升 SA213-T91 合金鋼管之冷彎成型性，相關學術探討與機制擬於機械年會中發表，並取得合作廠商同意後，撰寫期刊投稿論文。

本研究參與人員除兩位學士班學生兼任助理外，合作廠商相關技術人員共五人參與本計畫之執行，除了解回火應力釋放處理相關機制與後續冷彎管金相試片製作、光學顯微鏡與電子顯微鏡觀察分析，於計畫中體驗以各項檢測技術與微觀分析提供冷彎製程參數之修正，此一製程開發技術已應用於實際生產製程，除完成計畫之預期目標外，亦達成相關人員培訓之目的。

6. 參考文獻

1. B.Q. Ning, Q.Z. Shi, Z.S. Yan, J.C. Fu, Y.C. Liu, L.J. Bie, *J. Nucl. Mater.* 393, 2009, 54.
2. R. Viswanathan, W. Bakker, *J. Mater. Eng. Perform.* 10, 2001, 81.
3. G. Gupta, G.S. Was, *Metall. Mater. Trans. A*, 39, 2008, 150.
4. C. Liu, D. Zhang, Y. Liu, Q. Wang, Z. Yan, *Nuclear Engineering and Design*, 241, 2011, 2411–2415.
5. A. Allen, J. Oakey, B. Scarlin, *Energy Technol.* 5, 1998, 1825–1839.
6. F. Abe, C. Opim, *Solid State Mater. Sci.*, 8, 2004, 305–311.
7. C. Keller, M.M. Marguliesb, Z. Hadjem-Hamoucheb, I. Guillot, *Materials Science and Engineering A*, 527, 2010, 6758–6764.
8. X. Zhong, X. Wu, E. H. Han, *J. of Supercritical Fluids*, 72, 2012, 68–77.
9. F. Abe, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 9, 2008, 1–15.
10. Y. Z. Shen, S. H. Kim, C. H. Han, H. D. Cho, W. S. Ryu, *Journal of Nuclear Materials*, 384, 2009, 48–55.
11. A. Zeman, L. Debarberis, J. Kořik, V. Slugeň, E. Keilova, *J. Nucl. Mater.* 362, 2007, 259–267.
12. G. Gupta, G. S. Was, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 39A, 2007, 150–164.
13. ASME boiler & pressure vessel code, Section I.
14. M.Z. Hamzah, M.L. Ibrahim, Q.H. Chye, B. Ahmad, J.I. Inayat-Hussain, J. Purbolaksano, *Engineering Failure Analysis*, 26, 2012, 349–354.1.

105年度專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：莊正利			計畫編號：105-2622-E-040-004-CC3				
計畫名稱：大型動力鍋爐過熱器SA 213 T91 合金鋼管之冷作彎管製程開發							
成果項目			量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)		
國內	學術性論文	期刊論文		0	篇	投稿至2017機械年會發表。	
		研討會論文		1			
		專書		0	本		
		專書論文		0	章		
		技術報告		1	篇		完整結案報告與精簡結案報告。
		其他		0	篇		
	智慧財產權及成果	專利權	發明專利	申請中	0	件	
				已獲得	0		
			新型/設計專利		0		
		商標權		0			
		營業秘密		0			
		積體電路電路布局權		0			
		著作權		0			
		品種權		0			
		其他		0			
	技術移轉	件數		0	件		
		收入		0	千元		
	國外	學術性論文	期刊論文		0	篇	
			研討會論文		0		
			專書		0	本	
專書論文			0	章			
技術報告			0	篇			
其他			0	篇			
智慧財產權及成果		專利權	發明專利	申請中	0	件	
				已獲得	0		
			新型/設計專利		0		
		商標權		0			
		營業秘密		0			
		積體電路電路布局權		0			
		著作權		0			
		品種權		0			
		其他		0			

	技術移轉	件數	0	件	
		收入	0	千元	
參與計畫人力	本國籍	大專生	0	人次	均已畢業。
		碩士生	0		
		博士生	0		
		博士後研究員	0		
		專任助理	0		
	非本國籍	大專生	2		
		碩士生	0		
		博士生	0		
		博士後研究員	0		
		專任助理	0		
其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)					

本產學合作計畫研發成果及績效達成情形自評表

成果項目		本產學合作計畫預估研究成果及績效指標 (作為本計畫後續管考之參據)	計畫達成情形
技術移轉		預計技轉授權 1 項	完成技轉授權 1 項
專利	國內	預估 0 件	提出申請 0 件，獲得 0 件
	國外	預估 0 件	提出申請 0 件，獲得 0 件
人才培育		博士 0 人，畢業任職於業界 0 人	博士 0 人，畢業任職於業界 0 人
		碩士 0 人，畢業任職於業界 0 人	碩士 0 人，畢業任職於業界 0 人
		其他 2 人，畢業任職於業界 2 人	其他 2 人，畢業任職於業界 2 人
論文著作	國內	期刊論文 0 件	發表期刊論文 0 件
		研討會論文 1 件	發表研討會論文 1 件
		SCI論文 0 件	發表SCI論文 0 件
		專書 0 件	完成專書 0 件
		技術報告 1 件	完成技術報告 1 件
	國外	期刊論文 0 件	發表期刊論文 0 件
		學術論文 0 件	發表學術論文 0 件
		研討會論文 0 件	發表研討會論文 0 件
		SCI/SSCI論文 0 件	發表SCI/SSCI論文 0 件
		專書 0 件	完成專書 0 件
		技術報告 0 件	完成技術報告 0 件
其他協助產業發展之具體績效		新公司或衍生公司 0 家	設立新公司或衍生公司(名稱)：
計畫產出成果簡述： 請以文字敘述計畫非量化產出之技術應用具體效益。 (限600字以內)		本研究已成功以回火方式降低SA213-T91合金鋼管之殘留應力，使合作廠商以原有設備進行大型動力發電鍋爐過熱器爐管壓力件之製作，且經實際量產(冷彎數目達3000餘件)驗證，並未出現裂縫等缺陷，且經水壓試驗得知冷彎管之水壓破裂強度遠高於美國機械工程師協會規範之最低值，顯見此一技術可解決合作廠商之技術瓶頸。過往廠商為避免壓力件之缺陷，均向國外訂購T91熱彎成品，後續以銲接方式製作過熱器壓力件，不僅價格貴，亦無法掌控主要關鍵技術，經由本計畫之研發結果，可提高合作廠商製程之自主能力，並大幅降低外購T91熱彎成品之成本。基於本研究之實驗結果，亦協助合作廠商訂定應力釋放之相關參數，並設定合金鋼管冷彎前，拉伸試驗所得之延伸率需大於20%。此一製程技術目前雖使用於大型發電鍋爐壓力件之冷彎製程，對相同塑性變形之T91合金鋼材冷作製程，本研究結果亦可降低剛才之殘留應力，提高冷作製程之成形能力。	
請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估		<input checked="" type="checkbox"/> 達成目標 <input type="checkbox"/> 未達成目標 (請說明，以100字為限) <input type="checkbox"/> 實驗失敗 <input type="checkbox"/> 因故實驗中斷	

	<input type="checkbox"/> 其他原因 說明：
本研究具有政策應用參考價值	<input checked="" type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 是，建議提供機關 （勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關）
本研究具影響公共利益之重大發現	<input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 是 說明：（以150字為限） 1. 應力釋放處理降低市售SA213-T91合金鋼管之殘留應力，提高其延性。 2. 經應力釋放處理後，合金鋼管以合作廠商支現有冷彎製程成功製作大型動力發電鍋爐過熱器之壓力管件。 3. 冷彎製作之壓力管件經表面滲透非破壞檢驗、水壓試驗與相關幾何形狀之量測，均符合相關品質規範之要求。