

# 國立交通大學

## 工學院產業安全與防災學程

### 碩 士 論 文

鍋爐水牆管噴焊可行性評估  
Evaluation on Thermal Spraying  
Applications of Boiler Tubes

研 究 生：黃 汶 軒

指導教授：傅 武 雄 教授

中華民國 101 年 7 月

# 鍋爐水牆管噴焊可行性評估

## Evaluation on Thermal Spraying Applications of Boiler Tubes

研 究 生：黃汶軒

Student : Wen-hsuan Huang

指導教授：傅 武 雄

Advisor : Wu-Shung Fu

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩 士 論 文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Industrial Safety and Risk  
Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Industrial Safety and Risk Management

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 101 年 7 月

# 鍋爐水牆管噴焊可行性評估

## Evaluation on Thermal Spraying Applications of Boiler Tubes

學生：黃汶軒

指導教授：傅武雄博士

國立交通大學工學院產業安全與防災學程

### 摘 要

國內某燃煤電廠之鍋爐水牆管於 2007 年 4 月歲修檢查時發現管壁厚度已不足，但是因為未達全檢週期，所以採用焊補的方式加以維護，不過此截焊補過的水牆管卻於 2008 年 7 月時發生破管的情形，從該破損爐管經斷面之觀察、硬度量測、及顯微鏡金相分析結果顯示；水牆管的破管原因是肇因於此管發生應力腐蝕破裂，應力可能源於焊補的殘留應力，所以最初在焊補之起焊端或是止焊端的內管壁產生了一些小裂縫，待這些小裂縫受到管內水壓、焊補的殘留應力以及腐蝕因子的綜合作用而繼續成長之後，裂縫最後產生了串聯而貫通管壁，於是管內高壓水噴出產生了高壓水柱，進而造成後續的其他破孔發生；

本文希望透過相關的測試與分析來釐清破管的發生原因，並利用高速火焰的熔射加工方式，將 WC/Co 噴覆在鍋爐水牆管表面，

並實際進行現場實況測試，三年後比較噴覆層厚度，作為日後評估鍋爐爐管全面噴焊可行性。



# Evaluation on Thermal Spraying Applications of Boiler Tubes

Student : Wen-hsuan Huang

Advisor : Wu-Shung Fu

Degree Program of Industrial Safety and Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

During the annual inspection in April 2007, one coal-fired power plant in Taiwan discovered that the thickness of the boiler's tube wall was under the borderline. Because it was not the time yet for an overall inspection, this problem was handled by welding. Later on in July 2008, this welded waterwall tube ruptured. The section of the broken tube was examined by observing the cross-section of the broken tube, testing the rigidity, and performing a microscopic metallographic analysis. The results suggested that this matter may be stress and corrosion induced rupture, and the stress here may be the residual stress from welding. It was suggested that some cracks were formed at the internal wall of the starting or stopping end of welding. Once these cracks



received water pressure inside the tube, the residual stress from welding and corrosion factors acted together and grew bigger. At the end, cracks were formed throughout the tube wall, causing the high pressure water inside the tube to spout and create more rupture.

The objective of this study is to clarify causes for tube rupture using relevant tests and analyses. High velocity oxy fuel will be used to coat the surface of the wall of broiler tubes with WC/Co. This treatment will be followed by onsite testing. Three years later, the thickness of the sprayed surface will be compared for assessing the feasibility of giving broiler tubes comprehensive welding in the future.

## 誌謝

一個多年的願望，”取得碩士學位”，隨著畢業論文的完成，終於要達成了。雖然在這段學習期間，付出許多的時間與精力，更犧牲了與家人同處的時間，但終將獲得成果。而且未經努力所獲得的果實，是不會甜美的，也不會珍惜。所以，這個遲來近二十年的碩士學歷，對我而言，更加的彌足珍貴。

能夠順利完成研究所學程，要感謝的人很多，而其中最要感謝的就是傅教授武雄先生，教授對我的論文指導，不止是在論文的方向，也讓我知道我的論文研究，應該如何應用於工作中，更對原本的工作有著更深一層了解。讓我對於工作更有自信，這無疑是進研究所最大的收穫。

感謝我的太太瑞珠，在我工作尚稱順利時，對我的忠告，提醒我要有危機意識，學歷將會是影響我下一個十年重要的關鍵因素，感謝太太對我的提醒，更感謝，在我上研究所這段期間，對家庭的照顧以及對我的支持與鼓勵。也謝謝詩程，詩峰，我兩兒子的體諒，因為在假日時，當大部分家庭都是全家出遊，而他們卻只能留在家裡，因為我必需要上課，及利用假日準備課業資料，感謝家人的體諒與支持。

感謝公司當時的時空背景，讓我有必需要再進修的動力。感謝張森木協理、陳元隆經理鼓勵我到交大進修；研究所遇到的好同學國華、雙喜、有得，感謝他們在學業上的指導與協助，讓我的課業能一切順利且有很大的收穫。好同學也會是一輩子的好朋友，感謝同學間的互相幫助。

最後，很慶幸，時間並沒有淡化我對於研究所的熱忱，以及到研究所進修的渴望，也感謝所有幫助過我的人。天時，地利，人合，只要不放棄，願望一定會達成的。

## 目錄

	頁次
中文摘要	iii
英文摘要	v
誌謝	vii
目錄	viii
表目錄	ix
圖目錄	x
第一章、緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究範圍	2
1.4 文獻回顧	3
第二章、研究內容與方法	10
2.1 測試內容與結果	10
第三章、原理	25
3.1 熔射技術原理	25
3.2 熔射技術簡介	25
3.3 噴砂原理及材料	27
3.4 熔射製程程序介紹	30
第四章、實際熔射結果	37
第五章、結論	49
參考文獻	52



## 表目錄

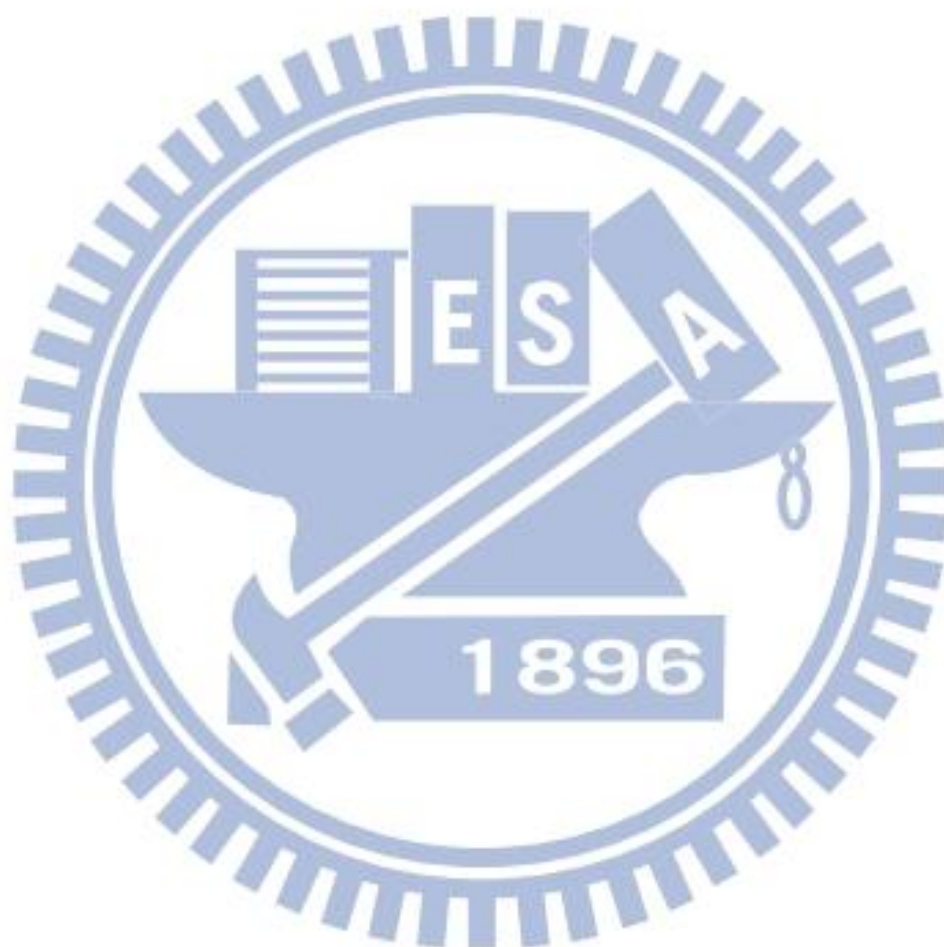
表 1	母材與焊補各點硬度量測比較-----	14
表 2	各式熔射特性比較表-----	33
表 3	棕剛玉粒度及規格-----	33
表 4	棕剛玉化學成分(按重量百分比)-----	34
表 5	棕剛玉粒度尺寸-----	34
表 6	東側(E)第一點量側尺寸比較表-----	38
表 7	東側(E)第二點量側尺寸比較表-----	38
表 8	南側(S)第一點量側尺寸比較表-----	39
表 9	南側(S)第二點量側尺寸比較表 ...-----	39
表 10	西側(W)第一點量側尺寸比較表-----	40
表 11	西側(W)第二點量側尺寸比較表-----	40
表 12	北側(N)第一點量側尺寸比較表-----	41
表 13	北側(N)第二點量側尺寸比較表-----	41
表 14	鍋爐爐管檢測標準-----	42
表 15	鍋爐爐管短吹灰器位置-----	51

## 圖目錄

圖 1	爐管斷面母材與焊補硬度量測位置-----	14
圖 2	水牆管試體的外觀 -----	15
圖 3	水牆管發生破管的先後順序示意圖-----	15
圖 4	將水牆管試體做切割以利做進一步觀察-----	16
圖 5	最初之破孔位置剛好在焊補痕跡的一緣，該位置可能是起焊 端或是止焊端-----	16
圖 6	將最初之破孔位置做切割以利做進一步觀察-----	17
圖 7	破孔斷面起始分析圖 -----	17
圖 8	將試體再細切製成金相分析用試片-----	18
圖 9	金相試片，利用光學金相顯微鏡分別針對圖中所標示之位置觀 察其顯微組織 -----	18
圖 10	破孔起始位置之局部放大圖-----	19
圖 11	母材之顯微組織-----	19
圖 12	起始破孔旁之顯微組織 -----	20
圖 13	破孔起始位置之顯微組織-----	20
圖 14	圖 13 的進一步放大圖 -----	21
圖 15	起始破孔 1 靠近外管面處之顯微組織 -----	21
圖 16	起始破孔 1 旁之破孔 2 位置之顯微組織 -----	22

圖 17 起始破孔旁之顯微組織	-----22
圖 18 圖 17 中小裂縫的局部放大圖	-----23
圖 19 圖 18 中裂縫的更進一步放大圖	-----23
圖 20 起始破孔旁顯微組織	-----24
圖 21 起始破孔旁顯微組織	-----24
圖 22 熔射的分類	-----35
圖 23 熔射塗層示意圖	-----35
圖 24 典型熔射熱量比較表	-----36
圖 25 典型熔射熱量與速度比較表	-----36
圖 26 鍋爐水牆管熔射位置	-----43
圖 27 熔射管壁之剖面圖 45 °/90 °/135 ° 表示檢測點之檢測位置	-----43
圖 28 為熔射管壁檢測點之檢測位置	-----44
圖 29 東側 (E) 第一點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----44
圖 30 東側 (E) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----45
圖 31 南側 (S) 第一點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----45
圖 32 南側 (S) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----46
圖 33 西側 (W) 第一點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----46
圖 34 西側 (W) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----47

圖 35 北側(W)第一點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----47
圖 36 北側(W)第二點鍋爐水牆管厚度比較圖	-----48
圖 37 爐管 Coating 剝落照片	-----51





## 第一章 緒論

### 1.1 前言

工業製程中鍋爐大量用於石化業、紡織業等。其功能是用來產生高壓蒸汽之重要設備，水管式鍋爐以水牆管構件諸如：水牆管、過熱器、再熱器及主蒸汽管等水牆管的功能是吸收燃煤的熱做發電使用，煤碳因產區及礦源不同灰份有極大差異，目前較佳成份約 13~17%，煤碳燃燒後產生飛灰會附著在鍋爐水牆管、過熱器、再熱器及主蒸汽管等，嚴重降低鍋爐吸收效率，鍋爐爐管都會經由吹灰器使用過熱蒸汽來做吹灰的動作，此時鍋爐爐水牆管的外管壁多少都會受到吹灰蒸汽的凝結水的切割作用而減薄。飛灰也會隨著引風機的氣流流動切割爐管，一般電廠都會於每年歲修機時對各部位的爐管做一般性的外觀檢察，並且每二年會請合格的檢驗公司在此時做全面性的非破壞性檢測，若發現管壁厚度已減薄至規定值以下，則會加以切換。

### 1.2 研究動機與目的

發電鍋爐的主要構件，諸如水牆管、過熱器、再熱器及主蒸汽管等這些爐管長期處於高溫、高壓以及腐蝕之環境中導致爐管厚度變薄。成為支配鍋爐壽命的主因[1]。如果鍋爐爐管在無預警的情況下發生破裂，輕則造成能源的流失及營運效率降低，重則可能釀成鍋爐的損壞立即會影響運轉作業，甚至危害到廠區整體人員及設備的安全。如果鍋爐之用途為發電，則可能直接中斷全區供電系統，以致造成國家社會的巨大損失。

目前汽電工場依據『危險性機械設備安全規則』規劃兩年期間內停爐實施鍋爐內部檢查及進行歲修。為探究爐管實際損壞情形，以往均須仰賴切管抽樣及爐管垢塵化學分析，方能了解破管之後破壞機制，此乃破壞性的檢測評估方法。然而切管抽樣點常受到環境取樣作業，且切管不能太多，以致提供判斷資料不夠完整，為解決此費時費力檢測方式，惟有以非破壞行檢測技術才能符合現在需求。[1]

### 1.3 研究範圍

鍋爐吹灰器型式分成短吹及長吹灰，短吹灰器用於水牆管部份，長吹灰器用於過熱器或再熱器，目前避免蒸汽吹蝕均有加保護套，但水牆管在操作安全及熱效率考慮下一般無法加上護套，所以在不改變爐管機械強度之前提下歐美日本等先進國家，已發展幾項諸如更換材質、堆焊及熔射等方案來提昇機件耐蝕性與延長使用壽命。其中換材質因牽涉鍋爐設計、機械強度、製造技術及成本等因素，並不被廣泛使用。而熔射屬於表面改質處理技術，於原使用材質表面被覆耐蝕材料，不影響原有管件之機械強度與熱傳效率，可達成省成本、延長壽命的目的。[2]

#### 1.4 文獻回顧

依 ASME Metal Handbook ,Vol 11, 9th ed，將鍋爐管件破損原因分別為過熱破壞、材質脆化、腐蝕或氧化、疲勞、沖蝕、應力腐蝕等，各別簡述如下[3]：

##### 1.4.1 過熱破壞 (Ruptures caused by overheating) [4]

對管件而言，過熱所造成的破壞，可能只需要幾分鐘，有的卻要數年時間的發展。由過熱所造成破

管，通常是沿軸向破壞，且在破壞之前，有顯著的塑性變形；破裂口通常像魚嘴（Fishmouth）的外形，因唇的厚薄不同分為『厚唇』的破壞及『薄唇』的破壞。

#### 1.4.1.1 厚唇破壞 (Thick-lip rupture)

鍋爐之管件，在比材料預定的使用溫度稍高的過熱條件下，長時間的使用之後，因應力而破壞者稱之。此破壞之表面是粗糙的（粒界破壞），且通常有厚氧化層[4]，在破壞口附近一般稍有或無隆突（Swelling），同時，破壞口管壁厚度的減少量通常也只有一點點，破壞處縱切面在低倍率下可看到許多徑向的小裂痕存在；高倍率下可看清楚粒界破壞的裂痕。金相觀察時，由於碳鋼或低合金鋼的管件受長時間的過熱（此溫度一般 AC1 以下，稍比材料之使用溫度略高），波來鐵會分解成肥粒鐵及球狀雪明碳鐵，而使材料變弱，如此變弱之材料，若再繼續遭受過熱的溫度，則將沿晶界產生空孔（Void），最後造成粒界破壞。

#### 1.4.1.2 薄唇破壞 (Thin-lip rupture)



發生在 650~870 °C 間的高溫，通常是穿晶拉裂 (Trans granular Tensile fracture)，這些拉裂，係管件的溫度在短時間內急遽的上升到材料預定溫度以上，而造成破壞。在破裂口附近受到急遽的過熱區域，通常會有相當的隆突；又若破管時，有高壓蒸汽噴出的話，則管件在破裂處也會造成彎曲現象。由急劇加熱所造成的破壞，在破裂口附近的管壁有明顯的變薄現象，壁薄如刀鋒，在隆突附近也會變薄。金相組織觀察時，若于破壞時之溫度在 Ac1 及 Ac3 之間，則因蒸汽或水噴出，使破裂口附近之沃斯田鐵淬火而成變韌鐵或波來鐵。

#### 1.4.2 材質脆化之破壞 (Ruptures caused by embrittlement)

[5]

##### 1.4.2.1 氫脆化 (Hydrogen damage)

在蒸汽動力系統內，氫對鋼料會造成脆性。在中、低溫的加熱範圍下，由氫脆化所造成之裂痕跡與應力腐蝕者相同，只不過破壞後氫脆化者沒有或較少有裂痕分枝 (Crack branching) 存在。在高溫的範圍內尤

其在蒸汽發生器及高壓管路內，氫脆化的特徵是在晶粒間產生不連續的裂痕，同時有脫碳現象存在。這種不連續裂痕產生的原因為氫分子在粒間析出。因破壞處整塊脆裂掉，所以又稱『窗口破壞』（Window fracture）。

#### 1.4.2.2 石墨化 (Graphitization)

在中溫的範圍長時間的加熱下，低碳鋼或合金鋼會產生組織上的變化，波來鐵會分解成石墨及肥粒鐵，使材質脆化。特別是受力件其析出之石墨在粒間處形成石墨帶時，該受力件極易脆裂。在 AC1 以下長時間保溫後，波來鐵會分解，其分解產物有二：550 °C 以下，波來鐵較量易分解成石墨及肥粒鐵；550 °C 以上，波來鐵較量易分解成粒狀雪明碳鐵及肥粒鐵。

#### 1.4.3 腐蝕或氧化破壞 (Failures caused by corrosion or scaling) [6]

##### 1.4.3.1 水側腐蝕 (Water-side corrosion)

最常發生的水側腐蝕現象是孔蝕 (Pitting corrosion) 及孔隙腐蝕 (Crevice corrosion)。

孔隙的起因是因為水中污物高度集中於某些局部區域，造成局部陽極而產生局部穿孔腐蝕的現象，因為僅局部極小區域為陽極，其餘大部份面積為陰極，因而孔蝕會造成為快速穿孔破壞。

孔隙處或沈積處 (Desposit) 的水中含氧量較少而形成陽極，其他大部份區域水中含氧量多而成為陰極，陽極處承受快速腐蝕而形成孔隙腐蝕。除了上述腐蝕現象外，水中 PH 值控制不適當會生成內側蝕垢 (Corrosion scale)，內側重蝕垢增厚時，則鍋爐管導熱不良會發生過熱損壞 (Overheating failure)，因此電廠必須適當控制水中 PH 值，並且須定期清除內側蝕垢。

#### 1.4.3.2 火側腐蝕 (Fire-side corrosion)

燃煤或燃油所燒剩的灰燼均會積存於鍋爐管外側，稱為火側灰燼，這些灰燼會嚴重防礙熱傳效率，並且會改變管壁溫度。燃煤會產生煤灰 (Coal ash)

約 13-20 %；燃油所產生油灰則少得很多約 0.2 %。雖然油產生油灰 (Oil-ash) 0.2 %，但是腐蝕及積垢卻十分嚴重。燃油所含雜質為 V、Na 及 S，會形成多種化合物，具嚴重腐蝕性，積灰內部靠近爐管外壁會有一層液相 (Liquid-phase) 生成，液相會溶解具有保護性的氧化垢，極迅速將管壁消耗腐蝕掉，此為熱腐蝕。燃煤鍋爐的液相物為  $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$  及  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$  的混合物，其熔點為  $555^\circ\text{C}$ ；燃油鍋爐約為 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{SO}_4$  的混合物，其熔點為  $540^\circ\text{C}$ 。

#### 1.4.3.3 疲勞破壞 (Failure by fatigue) [7]

疲勞破壞起源於某種凹痕 (Notch) 受拉應力之作用而生裂痕。雖然機件之平均斷面應力小於降伏應力，然凹痕底部起應力集中而局部生大應力，因此受覆變應力 (Repeated stress) 作用後凹痕底部可生局部裂痕。局部裂痕起生後，繼續受覆變應力作用使裂痕延伸，已斷裂之面積漸次擴展，所剩能承受負荷之截面積漸漸縮小，因此所剩截面承受之應力愈來愈



大，當此應力大於該材料之抗拉強度時，所剩截面無法承受外加負荷導致瞬間破裂。

#### 1.4.3.4 沖蝕破壞 (Failures caused by erosion)

大量的固體或液體小顆粒，急速衝擊爐管表面所引起的腐蝕稱為沖蝕。固體粒子的沖蝕為磨耗沖蝕；吹灰蒸汽內含小水滴之沖蝕稱為渦穴沖蝕。



## 第二章 研究方法與內容[8]

以破損外觀及破孔特徵作觀察，觀察破孔狀況與起始原因；利用洛氏硬度試驗分析母材及焊接位置硬度（如圖 1 所示）。利用金相分析觀察水牆管起始破孔處的細部特徵與顯微鏡組織，以其找出破孔的原因。

### 2.1 測試內容與結果：

#### 2.1.1 破損外觀觀察與說明：

觀察水牆管送樣試體的外觀，水牆管有焊補過的痕跡（如圖 2 所示）。在送樣試體上已存在多個大小不一的破孔，編號 4 號之爐管有一個破孔，編號 5 號之爐管有三個破孔（如圖 3 所示）。從各個破孔的位置與破損外觀來判斷，水牆管發生破管的可能先後順序如圖 3 之示意圖，爐管先出現一破孔 1，噴出的高壓水柱再將緊鄰的旁邊沖蝕出一破孔 2，然後破孔 2 噴出的高壓水柱再將旁邊的爐管沖蝕出一破孔 3，接著破孔 3 噴出的高壓水柱再將原來的爐管沖蝕出一破孔 4。

#### 2.1.2 破孔特徵與破損形態之觀察與說明

為了方便觀察水牆管破孔特徵與破損形態，於是先將水牆管做切割以利做進一步觀察（切割位置如圖 4 所示）。用肉眼觀察切下之水牆管內壁，可看出最初之破孔位置剛好在焊補痕跡的一緣，該位置應為起焊端或是止焊端（如圖 5 所示）。

為了更進一步觀察水牆管起始破孔的內部特徵與起始原因，於是再將起始破孔處做細部切割以利做進一步觀察（切割位置如圖 6 所示）。觀察起始破孔處的切開面，可看出破孔起始處有焊料突出，顯示出該處確實有焊補過，而且焊補已焊透管壁。另外起始破孔之孔洞內部呈現不規則形狀，因此研判此處原本就存在一些小孔洞或小縫隙，時間久後，這些管內的缺陷因水壓作用或是腐蝕作用產生串聯而貫通管壁，於是管內高壓水噴出產生了高壓水柱，進而造成後續的其他破孔發生。（如圖 7 所示）。

### 2.1.3 金相分析：

為了更進一步觀察水牆管起始破孔處的細部特徵與顯微組織，以期找出發生破孔的起始原因，於是再將起始破孔處做細部切割，並製成金相分析用試片以利做進一步觀察（切割位置如圖 8 所示）。製成之金相試片再利用光學金相顯微鏡觀察，觀察位置

見圖9之示意圖。觀察結果顯示起始破孔之孔洞內部呈現不規則形狀，而在破孔旁也有小裂縫發生（如圖10所示）。

金相分析之結果顯示此水牆管母材屬於碳鋼之退火組織（如圖11所示）。而起始破孔旁之組織為麻田散鐵，屬於焊道的正常組織，表示此起始破孔處確實屬於焊補部位（如圖12所示）。雖然破孔起始位置之顯微組織是屬於麻田散鐵組織，但是在孔緣處似乎已非純麻田散鐵組織（如圖13、14、15所示），顯示此處應該是在焊補的起焊端或是止焊端。另外觀察起始破孔1旁之破孔2位置之顯微組織，結果顯示此處是屬於母材組織（如圖16所示），表示此處已不屬於焊補位置。

在起始破孔旁可看到有一些小裂縫發生，這些小裂縫正好位於焊道旁，裂縫起始於內管壁（如圖17所示），從裂縫的型態來研判，這些裂縫可能屬於應力腐蝕破裂（SCC）。在小裂縫的內部可看到有疑似銅粉滲入其中（如圖18所示），經過X-ray能量散佈光譜儀（EDS）確認該褐色物質確實為銅。在裂縫的內部除了可看到有銅粉滲入其中，同時也可看到有腐蝕生成物存在，推測裂縫的成長可能與銅粉的存在而發生異種金屬間的加凡尼腐蝕作用有關（如圖19所示）。在起始破孔旁（即圖10中所標示之觀察位置）也



可發現有一些銅粉沉積在內管壁，甚至有一些銅已滲入管子內部（如圖20、21所示）。

#### 2.1.4 硬度測試：

利用洛氏硬度試驗機（Rockwell hardness tester）測試水牆管試體截面的硬度，測試位置含母材位置與焊補位置，測試位置示意圖如下，測試結果顯示水牆管母材本身的硬度符合STB410S的硬度要求(JIS G3461)，不過焊補位置的硬度比母材高出許多。（如表1）



表1：母材與焊補各點硬度量測比較

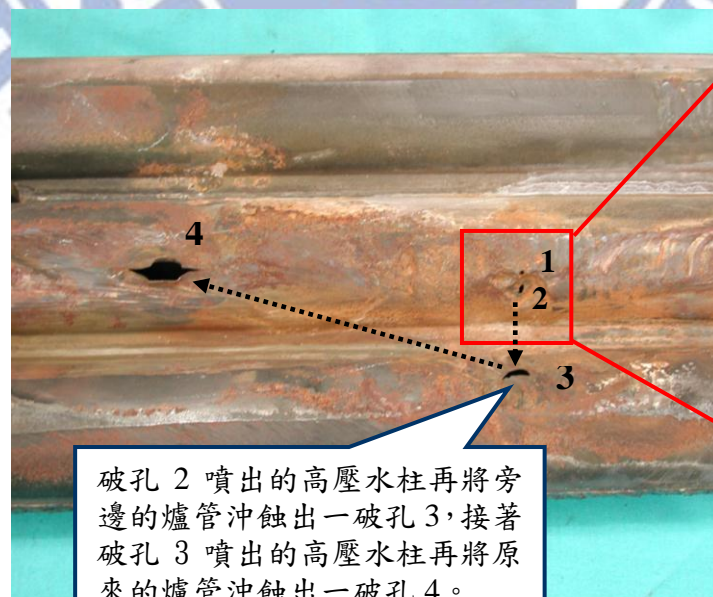
測試點	1	2	3	4	5	平均值
母材位置	77.2	76.8	77.2	78.3	78.6	HRB 77.6
焊補位置	92.2	92.1	91.2	89.9	89.4	HRB 91.0
STB410S的硬度要求(JIS G3461)					HRB 79以下	



圖 1：爐管斷面母材與焊補硬度量測位置。



圖 2：水牆管試體的外觀。



爐管先出現一破孔 1，噴出的高壓水柱再將緊鄰的旁邊沖蝕出一破孔 2。

破裂起始點放大圖





圖 4：將水牆管試體做切割以利做進一步觀察。



圖 5：最初之破孔位置剛好在焊補痕跡的一緣，該位置可能是起焊端或是止焊端。





圖 6：將最初之破孔位置做切割以利做進一步觀察。

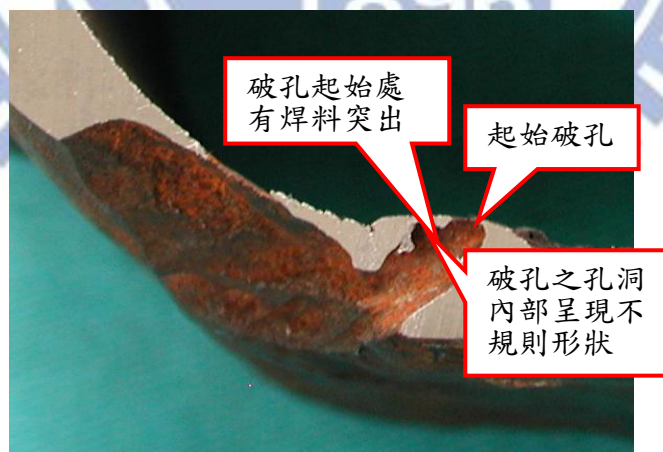


圖 7：破孔斷面起始分析圖。



圖 8：將試體再細切製成金相分析用試片。

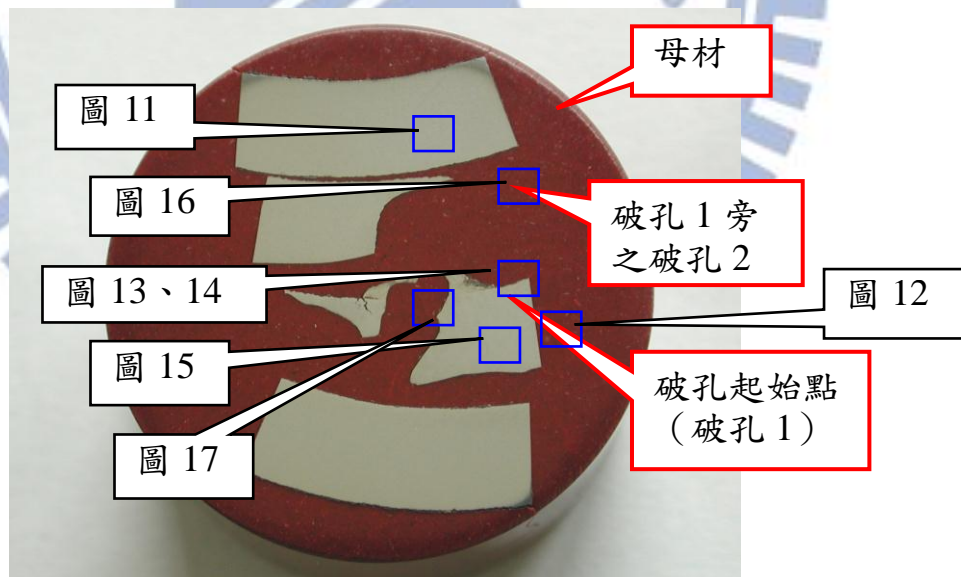


圖 9：此為製成欲觀察之金相試片，利用光學金相顯微鏡分別針對圖中所標示之位置觀察其顯微組織。

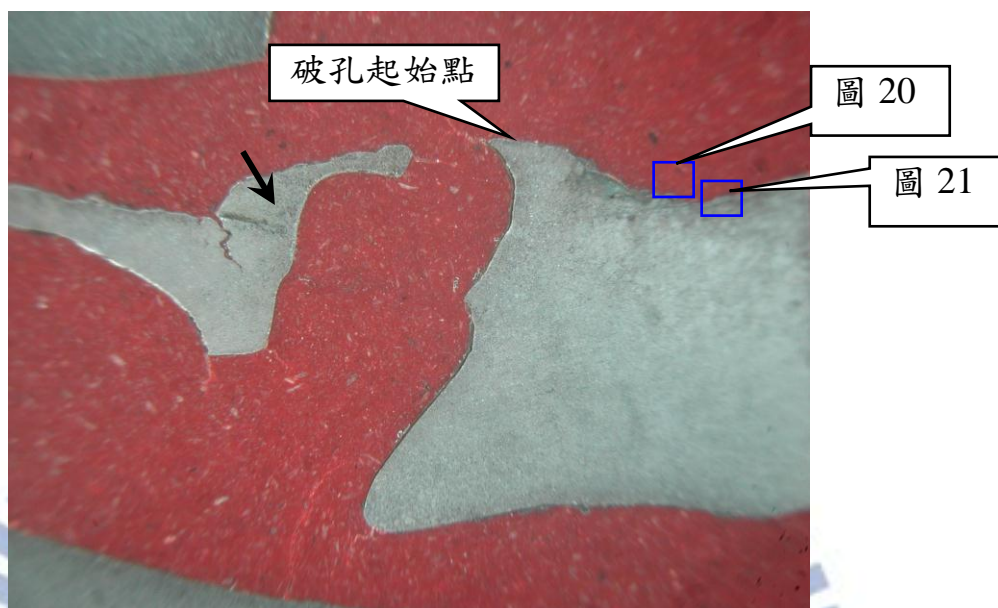


圖 10：此為破孔起始位置之局部放大圖，可清楚看出起始破孔之孔洞內部呈現不規則形狀，而在破孔旁也有小裂縫發生（圖中箭頭所指處）。

另外在圖上標示圖 20 與圖 21 的位置也利用光學金相顯微鏡放大觀察其表面狀況。

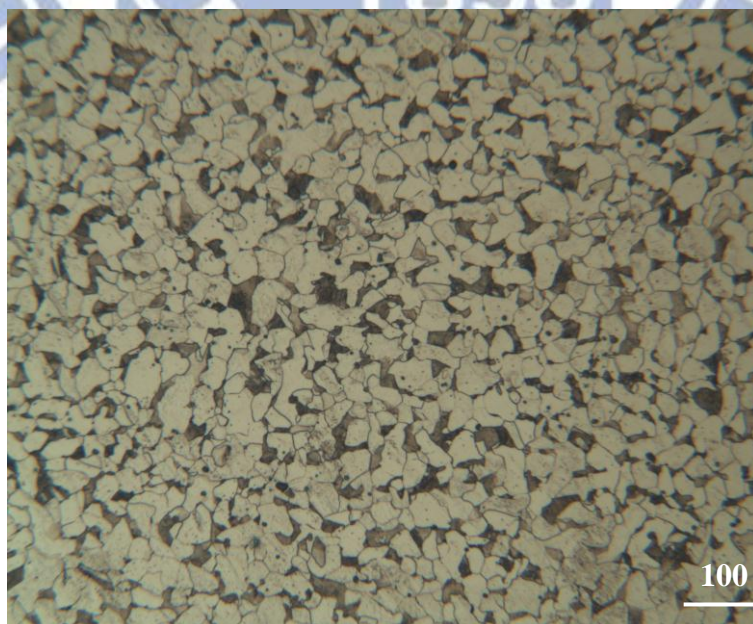


圖 11：此為母材之顯微組織，屬於碳鋼之退火組織，圖中黑色處為波來鐵，白色處為肥粒鐵。



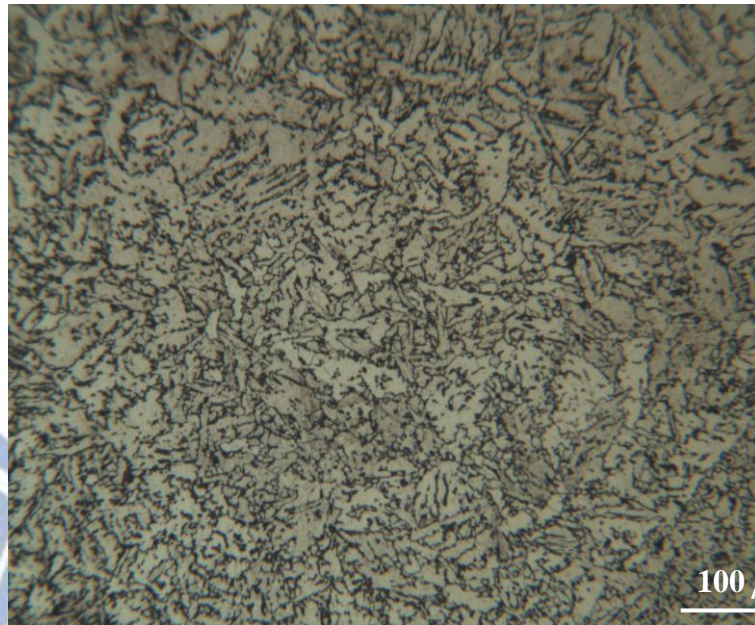


圖 12：此為起始破孔旁之顯微組織，為麻田散鐵，屬於焊道的正常組織，表示此處確實屬於焊補部位。

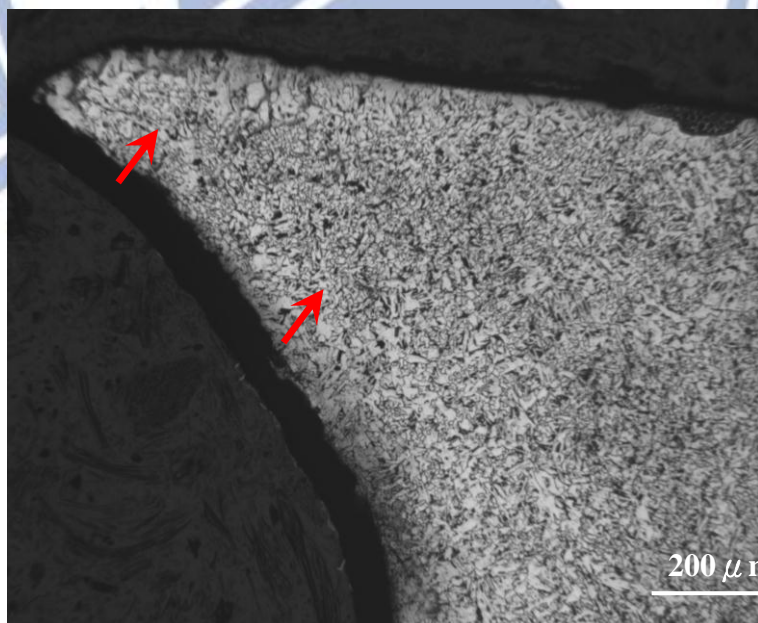


圖 13：此為破孔起始位置之顯微組織，基本上是屬於麻田散鐵組織，但是在孔緣處（箭頭所指處）似乎已非純麻田散鐵組織，顯示此處應該是在焊補的起焊端或是止焊端。



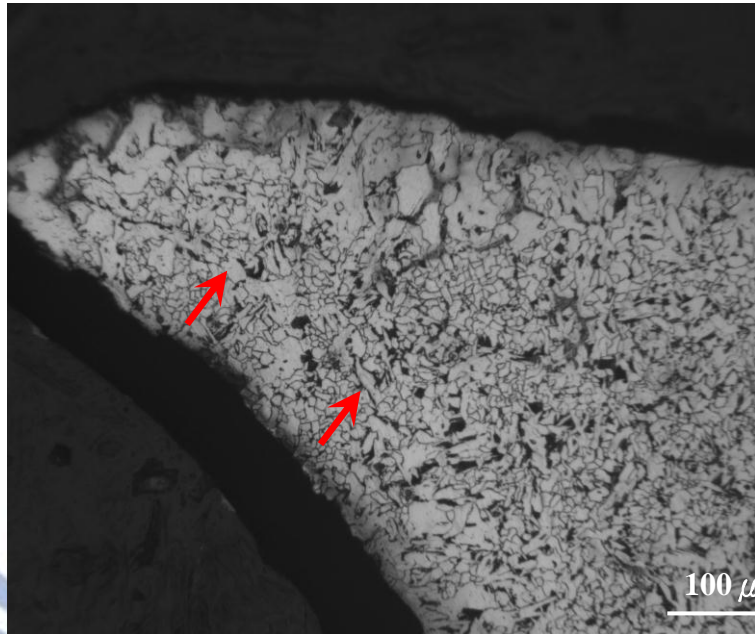


圖 14：此為圖 13 的進一步放大圖，可更清楚看出在孔緣處（箭頭所指處）已非純麻田散鐵組織。

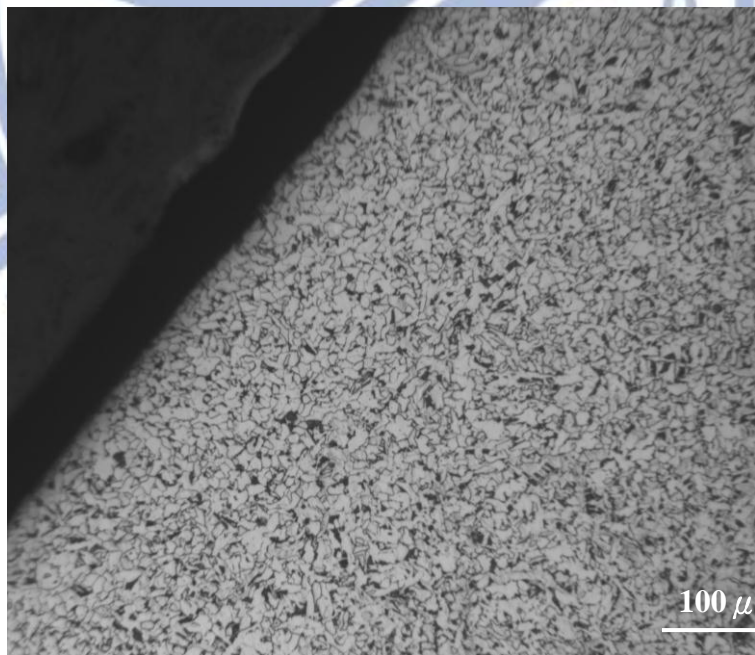


圖 15：此為起始破孔 1 靠近外管面處之顯微組織，可看出此處也不屬於純麻田散鐵組織。

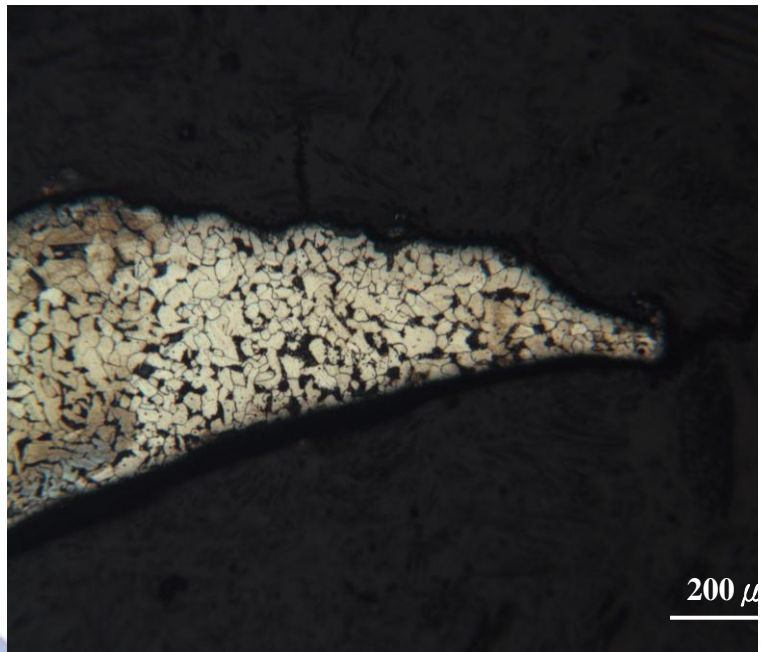


圖 16：此為起始破孔 1 旁之破孔 2 位置之顯微組織，基本上是屬於母材組織，表示此處已不屬於焊補位置。

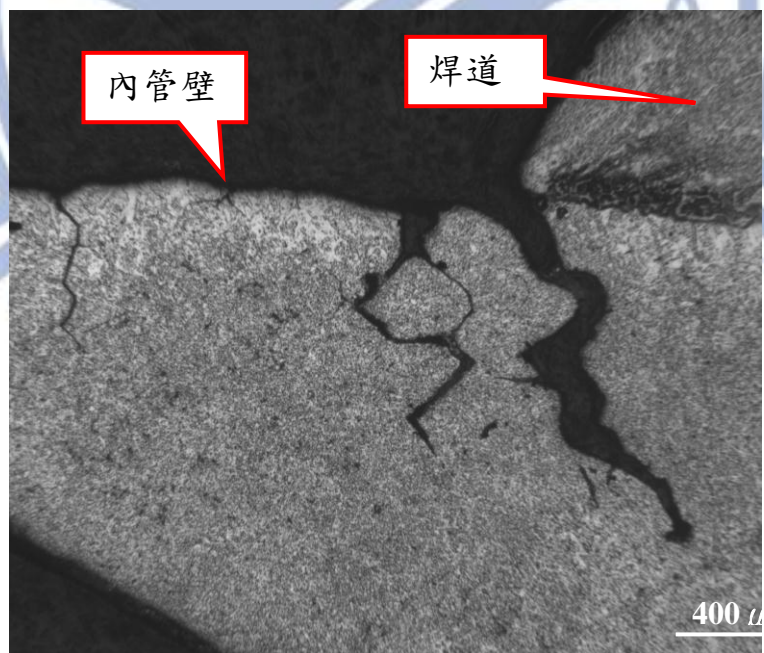


圖 17：在起始破孔旁有一些小裂縫發生，這些小裂縫正好位於焊道旁，裂縫起始於內管壁，從裂縫的型態來研判，這些裂縫發生的原因可能源於應力腐蝕破裂（放大 50 倍）。



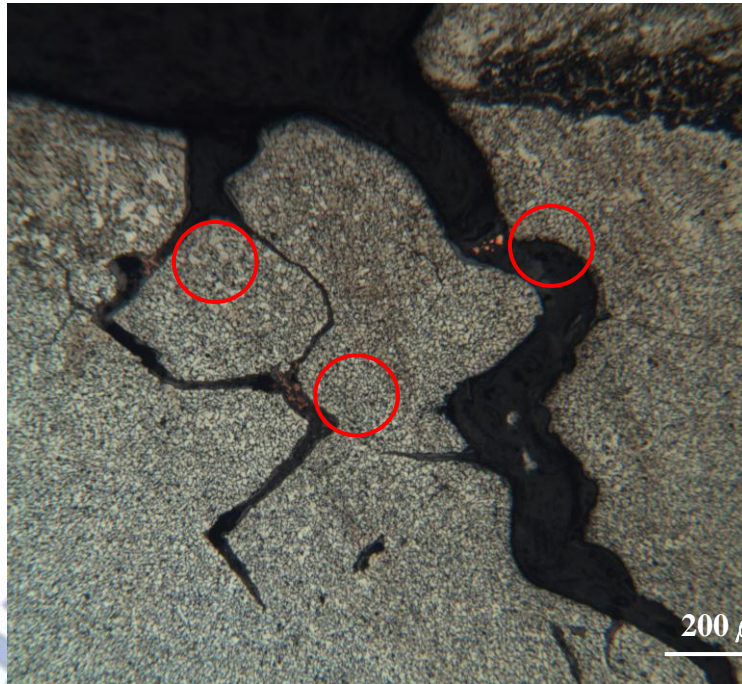


圖18：此為圖17中小裂縫的局部放大圖，在小裂縫的內部可看到有疑似銅粉滲入其中（圖中圈示位置內褐色物質），經過X-ray能量散佈光譜儀（EDS）確認該褐色物質確實為銅（放大100倍）。

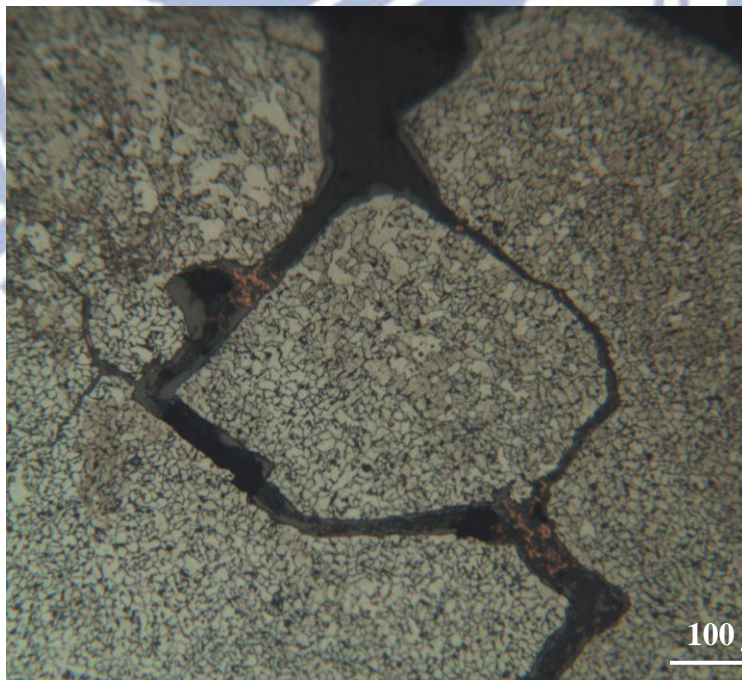


圖19：此為圖18中裂縫的更進一步放大圖，在裂縫的內部除了可看到有銅粉滲入其中，同時也可看到有腐蝕生成物存在，推測裂縫的成長可能與銅粉的存在而發生異種金屬間的加凡尼腐蝕作用有關(放大200倍)。

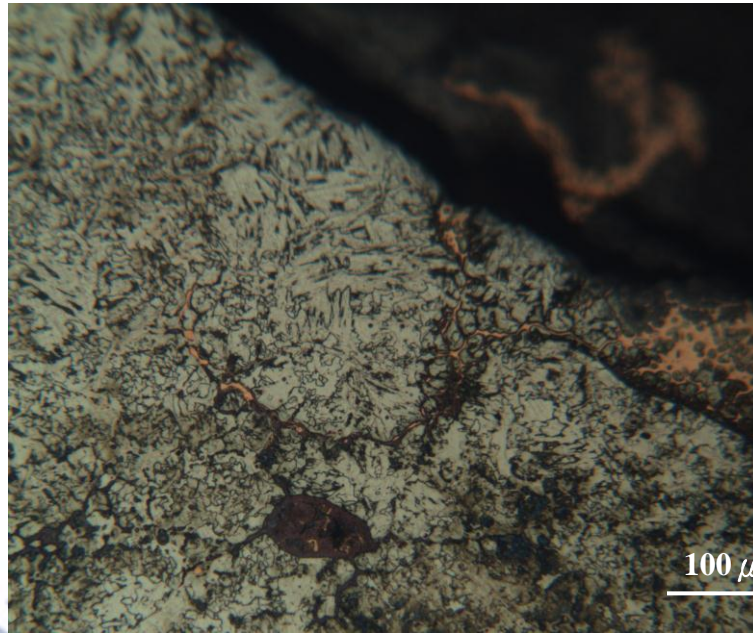


圖20：在起始破孔旁（即圖10中所標示之觀察位置）可發現有一些銅粉（圖中金黃色者）沉積在內管壁，甚至有一些銅已滲入管子內部，顯然因銅的存在而發生了異種金屬間的加凡尼腐蝕效應（放大200倍）。

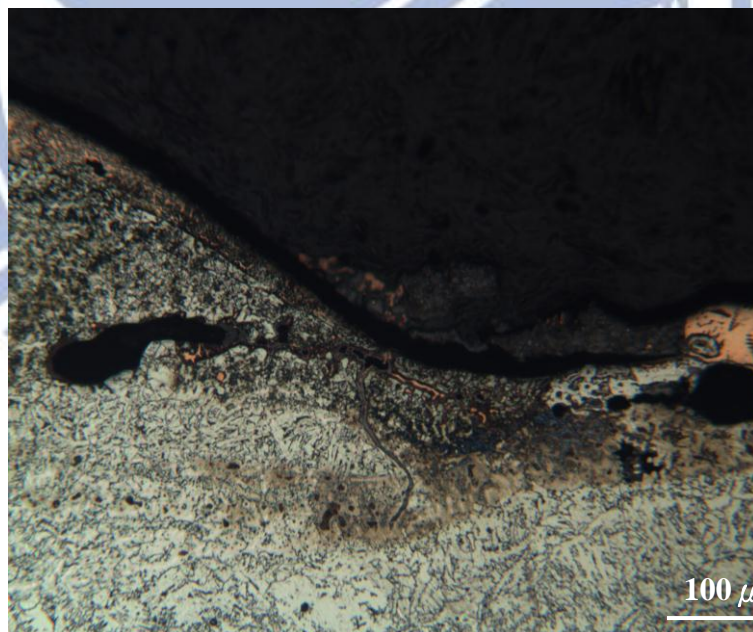


圖21：此圖亦為起始破孔旁（即圖10中所標示之觀察位置）所觀察到的結果，同樣可發現有一些銅粉（圖中金黃色者）沉積在內管壁，甚至有一些銅已滲入管子內部造成腐蝕，顯然因銅的存在而發生了異種金屬間的加凡尼腐蝕效應（放大200倍）。



### 第三章:原理

#### 3.1 熔射技術原理[9]

熱熔射技術發展至今已有相當長的歷史，在 1917 年由 Schoop 和 Guenther 噴塗鋅的塗層用來抗腐蝕，之後漸漸的應用到材料表面強化。在 50 年代，隨著航空業的蓬勃發展，對於大面積及快速表面改質的需求量大增，絕熱抗高溫塗層因此盛行，為因應不同的塗層材料，Poorman 等人於 1955 年發表爆震熔射（Detonation Gun，簡稱為 D-Gun™），使得熔射溫度提高了許多，可使用的材料因此更加廣泛。1973 年 Muehlberger 發明了真空電漿熔射，除了大大的提升熔射溫度外，還增加了鍵結強度及減少孔隙度，在往後的十年間，熱熔射技術廣泛的應用在工業界，1980 年 BrowningEngineering 公司發表了高速火焰熔射技術（High Velocity Oxygen Fuel，簡稱為 HVOF），所噴覆塗層具有極高的鍵結強度及低於 1% 的孔隙度，開啟了新的材料應用。利用熱熔射技術噴塗之碳化物塗層有著極高的硬度，尤其是 WC/Co 塗層有極佳的表現，一般而言，噴塗 WC/Co 塗層的方法有電漿熔射（PlasmaSpray）、爆震熔射及 HVOF。

#### 3.2 熔射技術簡介

歐美等先進國家的機械材料工程師針對上述課題，已發展幾項諸如更換材質、堆焊及熔射等方案來提昇機件耐蝕能力與延長使用壽命。其中更換材質因牽涉鍋爐設計、機械強度、加工製造技術及成本等因素考量，並不被廣泛使用。而熔射屬於表面改質處理技術，於原使用材質表面被覆耐蝕材料，不影響原有管件之機械強度與熱傳效率，而可達成省成本、延長壽命的目的。

傳統的爐管防蝕被覆方法：HVOF 熱噴塗、Inconel 625 堆焊、高周波爐管等；高周波爐管加工常用於垃圾焚化爐，因垃圾焚化時易產生酸氣對爐管產生嚴重腐蝕，所以目前台灣焚化爐大部份採用此工法施工；汽電工場及發電廠採用 HVOF 熱噴塗；Inconel 625 堆焊則較少使用。[10]

熔射技術(Thermal Spraying)是利用火焰，電弧或電漿等能源將粉末或線狀料熔融並將其噴塗在基材表面，凝固形成熔射塗層(Sprayed Coating)的一種表面技術（如圖 22 說明）[11]。

熔射技術領域中有火焰熔射、電弧熔射、電漿熔射、及高速火焰熔射等不同的方法，如表 2 所示。可被用來作熔射塗層的材料種類有金屬、合金、陶瓷、瓷金及塑膠等[11]。

增加一厚膜塗層（圖 23 熔射塗層示意圖），目的用以保護基材不受到外界環境的侵蝕，也可以用以修復缺損的零件，將磨耗腐蝕等原因所造成工件尺寸的差異，加以噴覆塗層再經機械加工後恢復原尺寸，延長工件使用壽命，熔射塗層因為其優異的特性，廣泛的在各個領域中被使用，它可以使用多樣化的材料，陶瓷、金屬、瓷金材料、高分子材料以及複合材料等，依照工件使用環境不同，設計所噴覆材料跟製程設備選用，熔射製程和焊接製程有許多相似之處，熔射製程可以選用的材料選項遠大於焊接，鍵結力比較如是一般噴塗方式，其鍵結力遠小於焊接，如選用自融合金塗層並進行高溫擴散後，其鍵結力將近於焊接之鍵結力，且並不侷限在何種材料上，幾乎所以固體材料都可以進行熔射，在焊接製程中工件會因高溫扭曲變形，材料微結構改變等問題，熔射製程皆無此現象，也因此熔射製程可以使用在各種不同環境地點，表二為各項典型熔射製程可使用材料、溫度、孔隙度等特性。為了可以知道每種熔射設備特性，可以看到圖 24、25 典型熔射熱量、速度比較表，這可以讓你於製程中選擇所需要的設備與材料，唯有材料與設備互相匹配，才可以製造出符合需求的塗層[12]。

### 3.3 噴砂原理及材料



### 3.3.1 噴砂原理

噴砂(珠擊法)是針對素材表面進行的一種破壞性的加工方式，利用細小的研磨砂材顆粒對素材表面衝擊，讓表面產生像顆粒化般的凹陷使之形成霧面或侵蝕面，而達到除金鏽、去毛刺、去氧化層、應力處理、摩擦系數調整、精密度調整、高附著力、美化、霧化、消光等，提升素材表面的光潔度，其用途運用廣泛。

### 3.3.2 材料選擇

噴砂砂材有金鋼砂，碳化矽，氧化鋁，玻璃珠，不銹鋼珠，銅珠，鋁珠，陶瓷珠，鋼珠，鋼礫，樹脂砂，塑膠砂，核桃粒，鋸砂等。

一般熔射所選用噴砂砂材，需選用材質硬度較高，且形狀為多角形，並且有蛻角的砂材。常用噴砂材料製程選用材料有氧化鋁、碳化矽、二氧化矽。一般鍋爐爐管熔射製程所選用的砂材為氧化鋁。棕剛玉為氧化鋁砂材之一種，是目前熔射製程使用常用砂材之一，其硬度和使用破碎率適中，並且可以循環使用，外觀呈現棕色。棕剛玉是以鋁鈣土、焦炭(無煙煤)為主要原料，在3500KVA 冶煉爐內經高溫冶煉而成，主要化學成份屬  $Al_2O_3$ ， $TiO_2$  還含有少量的  $SiO_2$  和  $Fe_2O_3$  等，顯微硬度 HV1800-2200，



韌性比 SiC 高，用它製成的磨具，適於磨削抗張較高的金屬，如各種通用鋼材、可鍛鑄鐵、硬青銅等，也可製造高級耐火材料。

（棕剛玉粒度、規格、成份、尺寸如表格 3、4、5）

白剛玉亦為氧化鋁砂材之一種，其硬度較棕剛玉高，雜質含量較棕鋼玉低，外觀呈現白色，是良好的噴砂粗化用砂材，但是價格比較高。白剛玉是以鋁氧粉為原料，在電弧爐內經高溫冶煉而成。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量一般高於 98%，硬度高於棕剛玉、韌性低於棕剛玉，有較好的切削性能。用它制成的磨具，適於磨削 淬火的合金鋼、高速鋼、高碳鋼等。細粒度磨粉還可用作精密鑄造。

### 3.3.3 噴砂控制參數：

本體馬達轉速、輪盤轉速、風壓力、研掃距離、研掃時間、研磨材(粒徑/材質)、噴嘴設計、噴射角度 ... 等。

### 3.3.4 噴砂零配件：

噴砂手套、噴砂布套、濾布管、各式噴槍組合、電磁閥、腳踏開關、各式噴砂槍、噴嘴、噴氣嘴、鋁座、高壓管、噴砂管、噴砂頭套、防塵防水日光燈座、不沾手處理劑、噴砂膠膜、簡易式噴砂箱、簡易加壓式噴砂機。

### 3.4 熔射製程程序介紹

鍋爐水牆管熔射程序[12][13]:

(1). 施工前爐管表面檢查：檢查表面所附之 Spat(焊渣)、積灰等

異物，以噴砂去除之。如噴砂無法去除之不整齊焊接 Bead

(焊道不整)，而影響熔射作業者，應作表面修整作業。

(2). 噴砂：採用 4~6 kg/cm<sup>2</sup> 之乾燥壓縮空氣。噴砂材料為一

般熔射所選用噴砂砂材，需選用材質硬度較高，且形狀為多角

形，並且有蛻角的砂材。常用噴砂材料製程選用材料有氧化

鋁、碳化矽、二氧化矽。一般鍋爐爐管熔射製程所選用的砂材

為氧化鋁。

棕剛玉為氧化鋁砂材之一種，是目前熔射製程使用常使用砂材

之一，其硬度和使用破碎率適中，並且可以循環使用，外觀呈

現棕色。

棕剛玉是以鋁鈣土、焦炭(無煙煤)為主要原料，在 3500KVA 冶

煉爐內經高溫冶煉而成，主要化學成份屬  $Al_2O_3$ ， $TiO_2$  還含有少

量的  $SiO_2$  和  $Fe_2O_3$  等，顯微硬度 HV1800-2200，韌性比 SiC 高，

用它製成的磨具，適於磨削抗張較高的金屬，如各種通用鋼材、

可鍛鑄鐵、硬青銅等，也可製造高級耐火材料。

(3). 噴砂後表面狀況檢查：

噴砂後表面狀況（粗度）確認，依照作業標準片比較

第二次噴砂表面清潔度須達到 SIS SA 2.5 等級。

噴砂除銹等級：

噴砂除鏽等級一般共分為 4 級，分別為 Sa 1，Sa 2，Sa 2-1/2，Sa 3 等共 4 級。

Sa 1：僅將金屬表面之片狀鐵鏽去除，仍保留金屬之碳化層（俗稱黑皮），處理後仍可看到鐵鏽之顏色。

Sa 2：將表面之鐵鏽及碳化層部分去除，表面仍可看到碳化層，但幾乎已將鐵鏽之顏色去除。

Sa 2-1/2：將表面知碳化層大部分去除，表面已不見鐵鏽。

Sa 3：將碳化層及鐵鏽完全去除，施工後之表面應為完全之金屬原色。

(4) 空氣清掃：所有母材表面附著之殘砂，以乾燥壓縮空氣清除。

(5) 預熱處理

預熱處理的目的，主要是將底材表面的水氣烘乾，提高塗層和底材間鍵結。預熱的方法，一般使用熔射槍。預熱溫度為 100-150 °C 左右，持溫時間為 60 秒，通常可以去除附著在基材表面的水氣，預熱處理後必須馬上進行熔射噴射施工，而且越快越好。

(6) 火燄熔射：

國內水牆管熔射披覆材料為 NI16CR3B4SI3CU-WC，熔射施工時熔射角度 90 度為目標（45 度之內）。熔射中爐管溫度需保持 250 度以下（接觸式溫度計），溫度超出時需待冷卻後，再繼續熔射施工。噴砂完成後 4 HR 內，必須進行第一層熔射。熔射中之膜厚，以電磁膜厚計管理之。一般鍋爐爐管熱熔射厚度約 300~350  $\mu\text{m}$ ，因為厚度較薄使用維克式硬度實驗機量測，轉換成洛氏硬度約 HRC 60；工地現場熔射時，需抽風設備，爐內保持負壓及防止火災發生。



表 2：各式熔射特性比較表

熔射製程	素材	溫度 (°C)	孔隙率 (%)	結 合 強 度 (psi)
電漿熔射	金屬合金 陶瓷 瓷金	10000   80000	>5	5000   100000
電弧熔射	金屬合金	3000	>5	2000   5000
粉末火燄熔射	金屬合金 陶瓷 瓷金	2800   3000	>5	1000   7000
H. V. O. F	金屬合金 陶瓷 瓷金	2000   3000	>5	7000   12000

表 3 棕剛玉粒度及規格

粒度號	規格	特點
#8 #10 #12 #16 #24 #30 #36 #46 #60 #70 #80 #100 #120 #150 #180 #220 #240 #280 #320……	形狀：菱形 顏色：棕色 堆積密度：1.68-1.95 g/cm <sup>3</sup> 莫式硬度：9 典型成份 (%)：Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ：96.00% TiO <sub>2</sub> ：>=2.6 % SiO <sub>2</sub> ：0.89 % CaO：0.25% MgO：0.15% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ：0.11 %	1. 具有硬度適中、韌性高、抗破碎能力、抗氧化、抗腐蝕、成本低、適應性強。 2. 廣範應用於鋼鐵的粗磨、重磨、和其他適合加工碳素鋼、一般合金鋼以及可鍛抗張強度較高的金屬前處理等。(1850°C 以上)

表 4 棕剛玉化學成分（按重量百分比）

粒度號	16 - 30	36-60	70-90	100 - 120	150-180	220
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94.5 - 97.0			93.5 min		92.5 min
TiO <sub>2</sub>	1.5 - 3.8			1.5 - 3.8		1.5 - 3.8
磁性物	<0.0380	<0.0280	<0.0230	<0.0230	<0.0170	<0.0170

表 5 棕剛玉粒度尺寸

粒度號	微米	粒度號	微米
16	1400 ~ 1180	54	355 ~ 300
20	1180 ~ 1000	60	300 ~ 250
22	1000 ~ 850	70	250 ~ 212
24	850 ~ 710	80	212 ~ 180
30	710 ~ 600	90	180 ~ 150
36	600 ~ 500	100	150 ~ 125
40	500 ~ 425	120	125 ~ 106
46	425 ~ 355	150	106 ~ 75

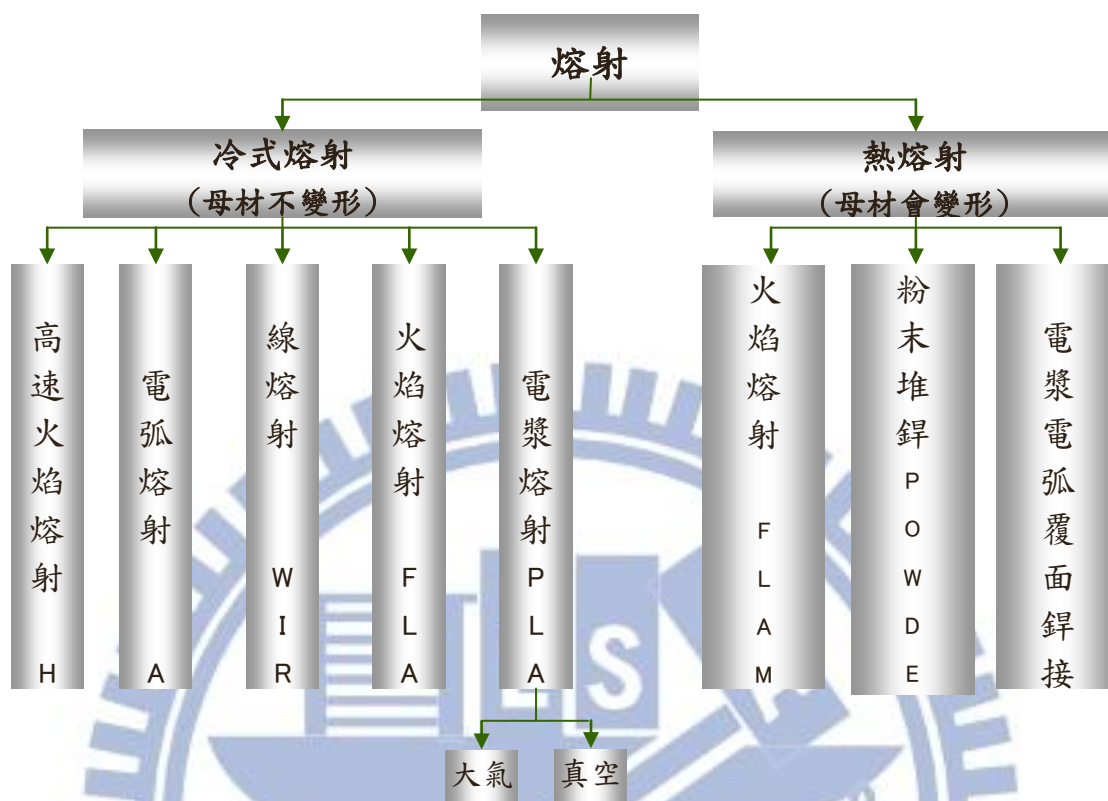


圖22：熔射的分類[14]

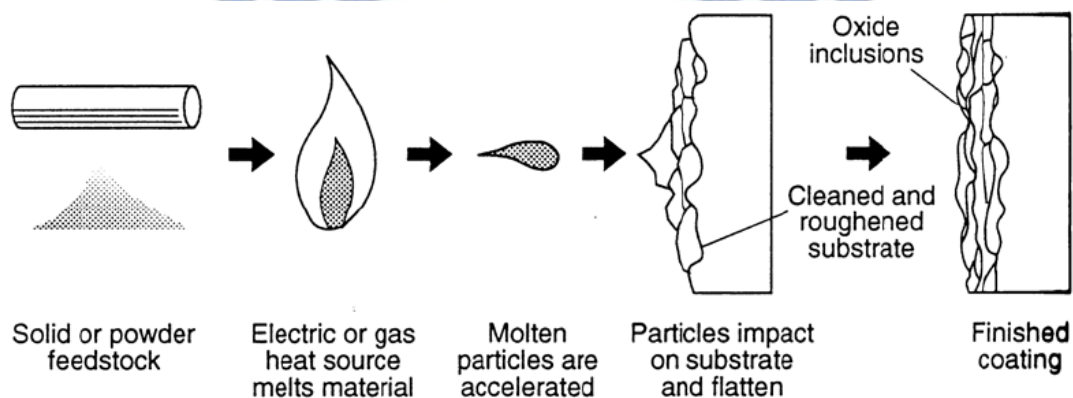


圖23：熔射塗層示意圖

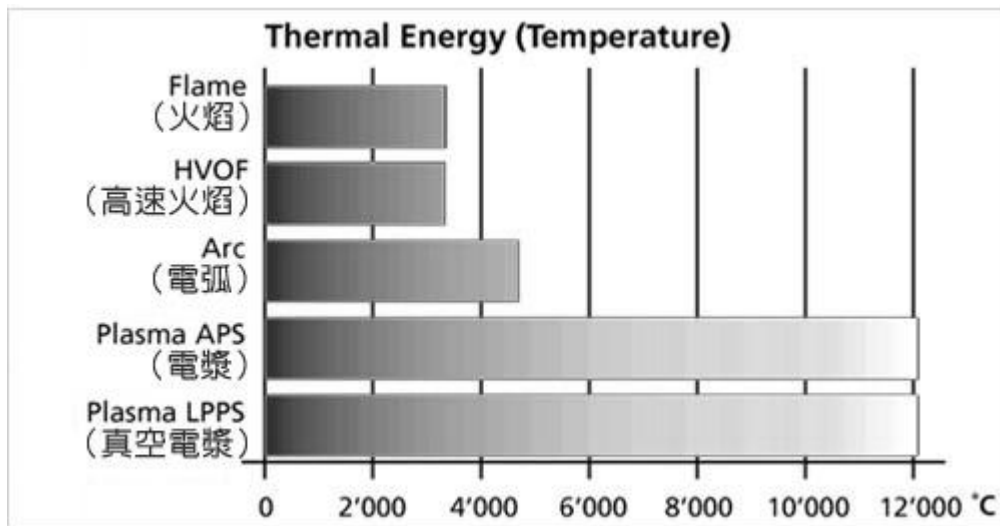


圖 24 典型熔射熱量比較表[15]

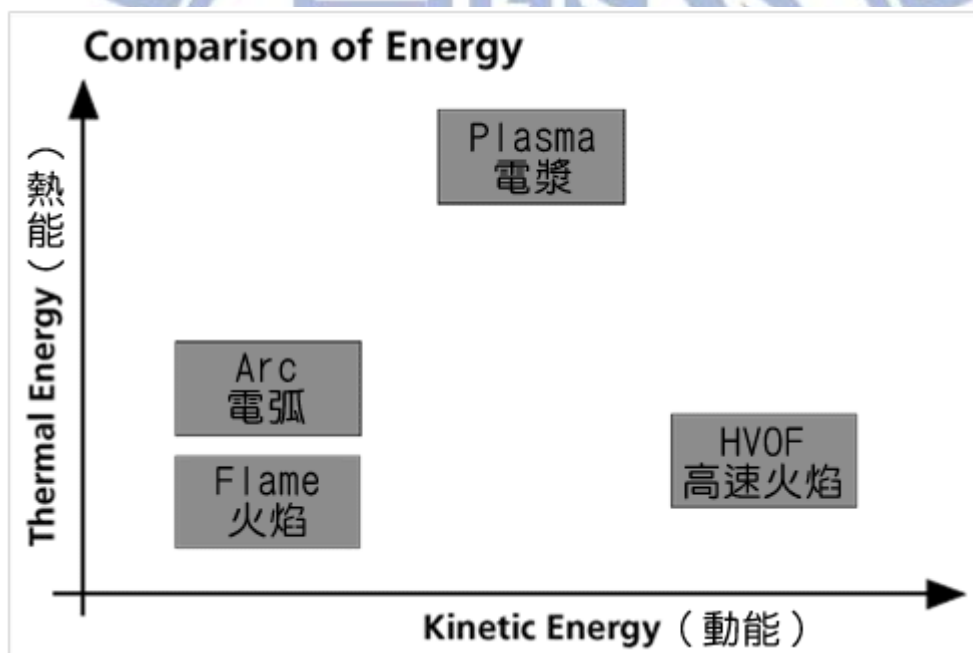


圖 25 典型熔射熱量與速度比較表[15]



#### 第四章 實際熔射結果[16]

國內某石化汽電工場鍋爐 350t/h，鍋爐內部長 20m、寬 20m、高度約 40m，四周分佈水牆管，一般爐管會損壞部份均為短吹灰管附近，因吹灰蒸汽品質不佳及耐火泥脫落，易造成管線外面吹蝕，鍋爐管一般操作壓力 125 kg/cm<sup>2</sup>、溫度 538 °C，管線太薄時無法承受此壓力時則會瞬間破管，鍋爐壓力無法維持則必須立即停車影響公司損失甚巨。相關鍋爐各位置管件材質、厚度及預估破管厚度如表 14。

避免每年更換大量鍋爐管，所以計劃於 2007 年在鍋爐東、西、南、北側進行熔射加工（熔射位置如圖 26），熔射後 45°、90°、135° 表示檢測點之檢測位置（如圖 27）；為熔射管壁檢測點之檢測位置，總長為 1M，每 300mm 檢測 1 點檢測 2 點（如圖 28）；2010 年度歲修進行原熔射部份東、西、南、北厚度量測（如表 6、7、8、9、10、11、12）及相對曲線比較（如圖 29、30、31、32、33、34、35、36）；本場水牆管尺寸 63.5mm\*5.5mm(t)。

表 6：東側（E）第一點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
管號	45°	90°	135°	45°	90°	135°
8	194	309	321	57	66	56
9	369	311	320	74	66	56
77	453	325	314	59	50	52
78	205	498	409	78	80	69
80	262	374	372	129	130	112
83	268	380	450	116	110	108
84	220	372	484	110	113	135

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 7 東側（E）第二點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
管號	45°	90°	135°	45°	90°	135°
8	156	249	406	100	150	157
9	136	238	415	96	157	152
77	388	272	303	103	106	100
78	360	332	304	158	168	165
80	204	231	254	165	150	145
83	319	319	343	140	136	126
84	239	328	305	150	146	142

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 8 南側 (S) 第一點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
8	406	530	338	56	55	63
9	468	606	536	116	117	105
150	608	447	507	59	50	52
157	373	393	581	136	144	150
158	512	488	406	126	132	142
159	449	422	378	50	68	58
160	354	407	378	45	50	69
161	434	405	345	59	53	63
162	419	430	498	55	67	62
163	441	331	293	59	56	66
164	386	387	281	50	57	55

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 9 南 (S) 第二點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
8	305	379	361	189	194	201
9	303	326	297	126	112	111
150	445	364	507	253	265	270
157	349	552	569	206	195	189
158	358	415	365	201	187	190
159	358	399	282	270	278	265
160	286	389	311	289	335	256
161	439	358	305	52	59	55
162	208	442	530	125	111	103
163	227	340	424	110	103	109
164	298	283	189	133	134	136

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$



表 10 西側 (W) 第一點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
6	402	295	353	133	143	126
8	333	330	401	89	97	110
9	293	318	326	46	39	49
70	252	140	138	46	50	53
82	437	275	253	102	106	98

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 11 西側 (W) 第二點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
6	324	284	278	156	164	166
8	255	382	233	226	214	210
9	249	410	336	145	150	165
70	215	101	105	106	75	69
82	393	168	216	95	99	96

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 12 北側 (N) 第一點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
7	159	393	394	54	40	39
8	264	396	239	236	242	255
9	384	332	198	125	114	111
70	518	215	350	285	327	330
157	596	366	256	126	133	128
160	468	284	333	98	101	120
161	511	355	288	105	102	120
164	504	402	280	44	32	36

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 13 北側 (N) 第二點量測尺寸比較表

	2007	2007	2007	2010	2010	2010
	45°	90°	135°	45°	90°	135°
7	144	296	184	123	126	116
8	328	244	286	102	101	98
9	320	280	264	256	279	263
70	380	223	295	136	142	152
157	564	285	307	198	219	205
160	392	327	255	152	143	136
161	310	362	312	146	143	136
164	396	456	245	77	85	98

爐管噴焊厚度單位： $\mu\text{m}$

表 14 鍋爐爐管檢測標準表

編號	1	3	4	6	7	8	13	14	17	19	21	23	24	
位置	水牆管	對流道後牆(1)	對流道後牆(2)	板狀S/H(2)	板狀S/H(3)	主S/H(1)	主S/H(6)	主S/H(7)	主S/H(10)	二次S/H(1-1)	二次S/H(2-1)	節熱器	人孔3(集管器)	
材質	STB410S	STBA13S	STB410S	STBA24	STBA24	STB510S	STBA13S	STBA13S	STBA24	STBA24	STBA24	STB410S	STPT49	
管外徑(mm)	63.5	45.0	45.0	50.8	50.8	57.0	57.0	50.8	50.8	50.8	57.0	57.0	241.8	
管厚度(mm)	5.5	4.0	4.0	5.1	7.0	4.0	5.0	4.5	8.7	9.2	13.2	5.0	32.0	
壓力(kg/cm <sup>2</sup> )	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	
溫度(°C)	370	356	356	503	544	360	437	454	558	530	581	300	300	
材料容許強度	10.0	10.5	10.5	8.1	5.2	11.8	10.0	9.8	4.6	6.2	3.1	10.5	12.3	
最小厚度(mm)	4.75	3.23	3.23	4.56	6.66	3.69	4.26	3.87	7.38	5.74	11.39	4.09	15.11	
爆管厚度(mm)	1.49	1.01	1.01	1.40	2.02	1.18	1.33	1.21	2.24	1.75	3.54	1.29	4.44	
測厚 管制 值	\$:T(mm)<	4.75	3.23	3.23	4.56	6.66	3.69	4.26	3.87	7.38	5.74	11.39	15.11	追蹤
	\$\$:T(mm)<	3.34	2.27	2.27	3.21	4.71	2.60	3.00	2.72	5.23	4.05	8.20	10.09	追蹤或切管
	\$\$\$T(mm)<	2.17	1.48	1.48	2.07	3.02	1.70	1.95	1.76	3.36	2.60	5.31	6.61	切管
衰減 管制 值	!: a>	0.8												追蹤
	!!: a>	1												追蹤或切管
	!!!: a>	1.2												切管







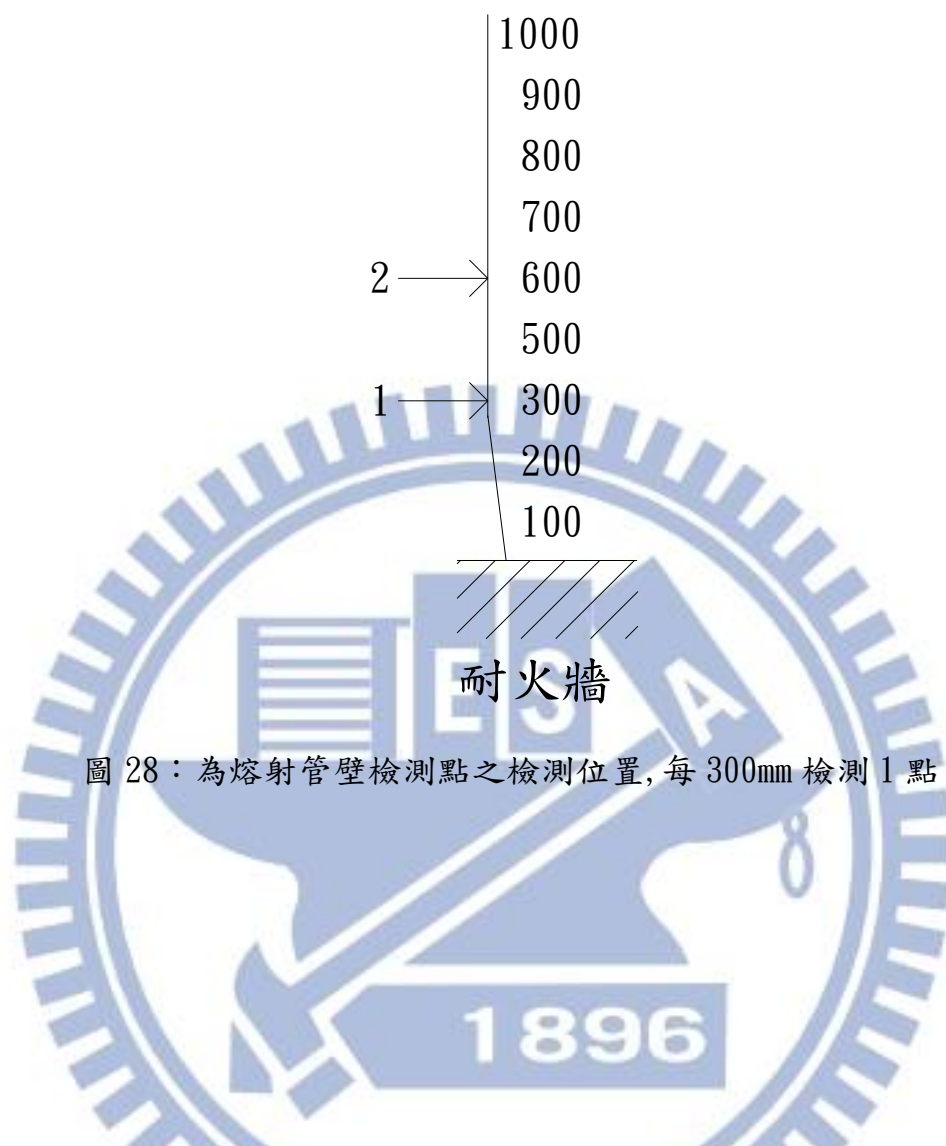


圖 28：為熔射管壁檢測點之檢測位置, 每 300mm 檢測 1 點

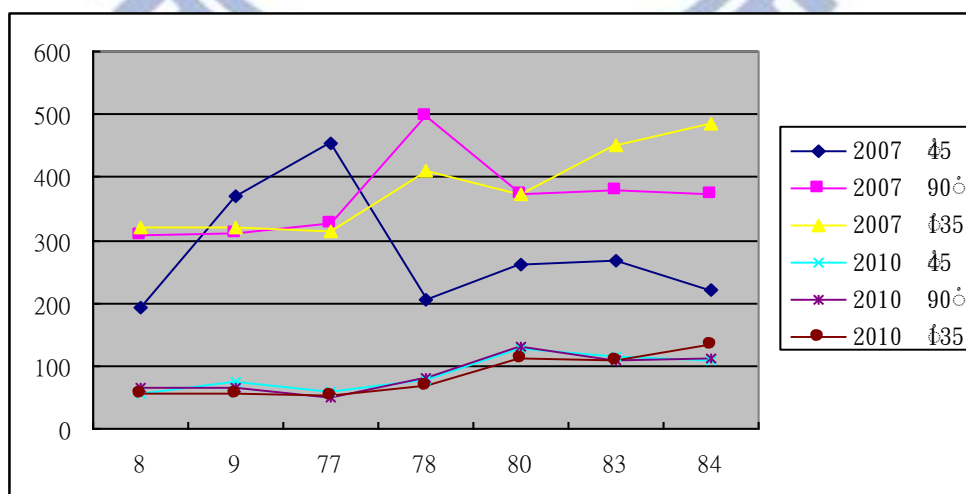


圖 29：東側（E）第一點鍋爐水牆管厚度比較圖

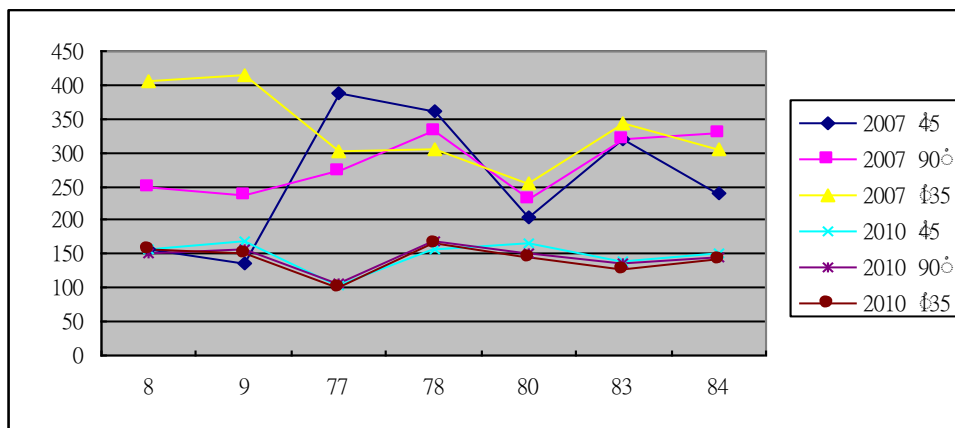


圖 30：東側（E）第二點鍋爐水牆管厚度比較圖

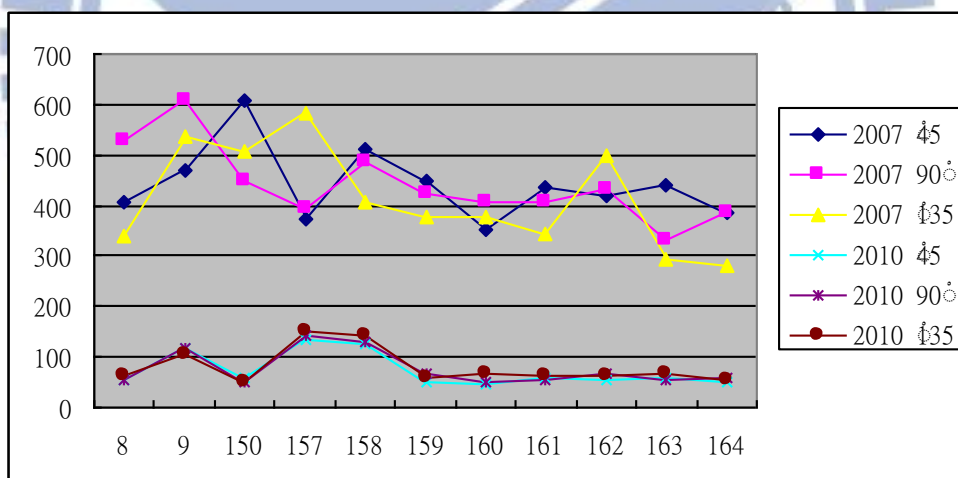


圖 31：南側（S）第一點鍋爐水牆管厚度比較圖



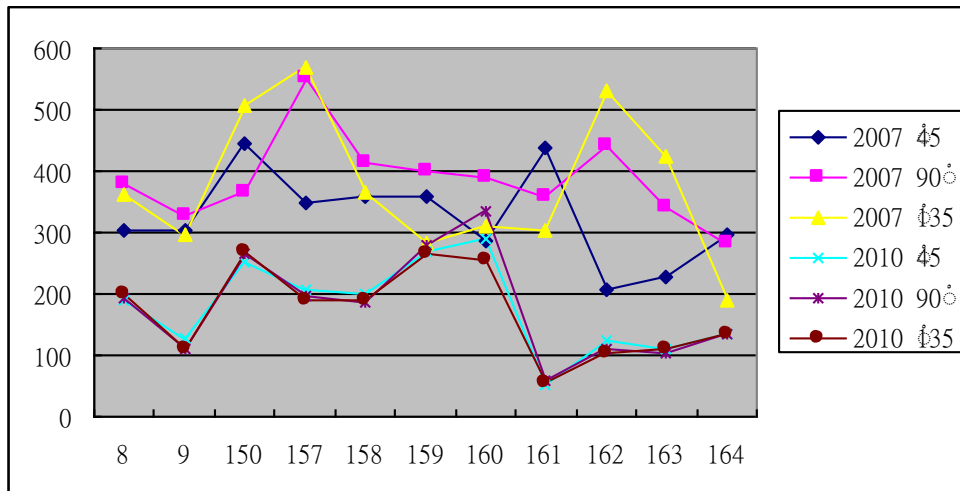


圖 32 南側 (S) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖

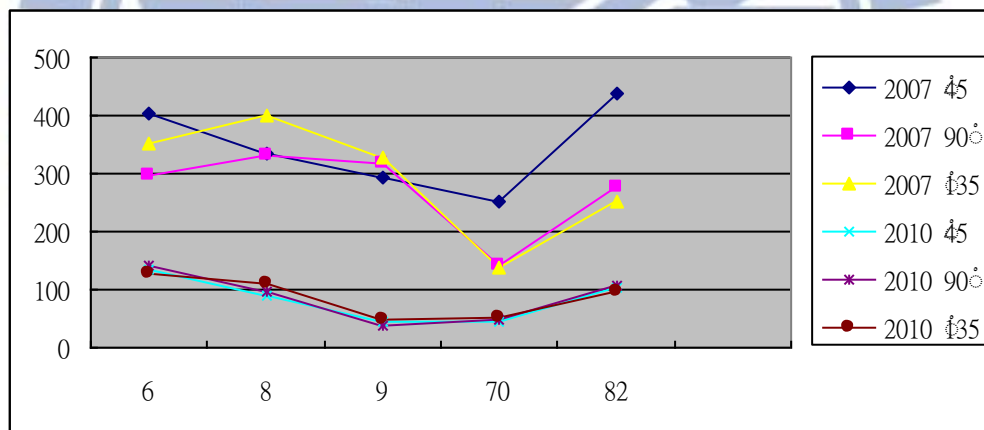


圖 33 西側 (W) 第一點鍋爐水牆管厚度比較圖

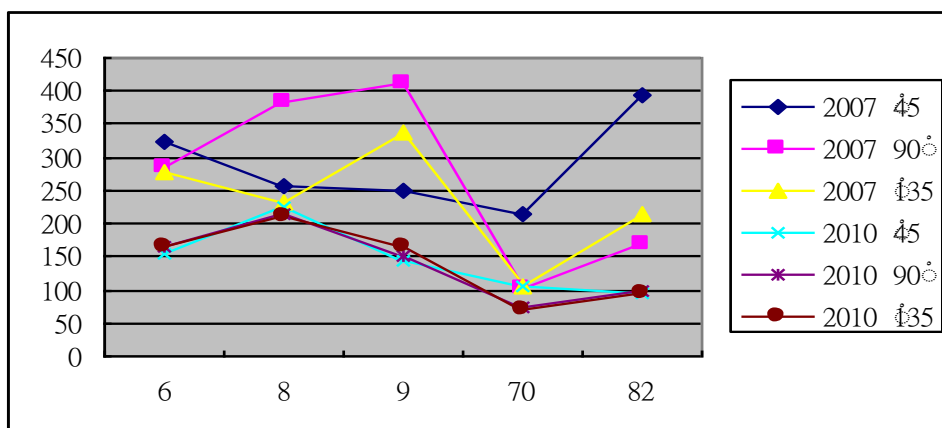


圖 34 西側 (W) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖

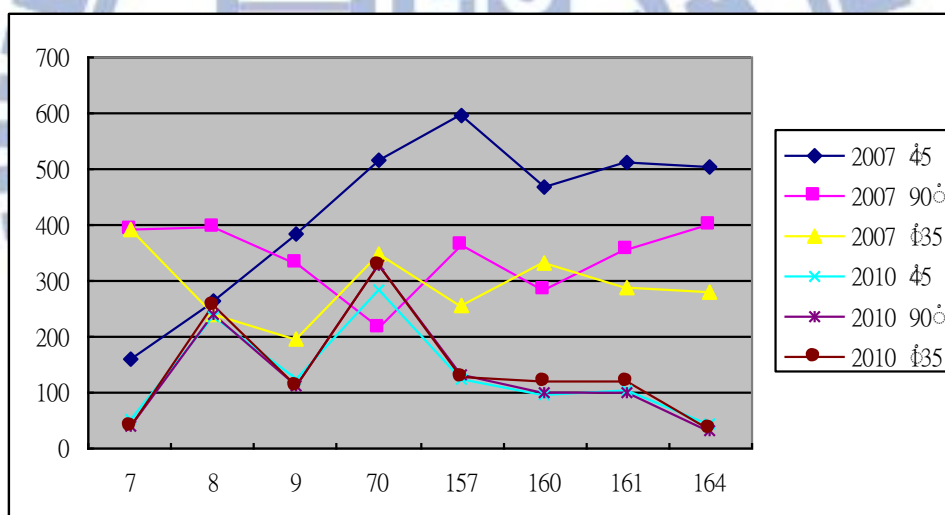


圖 35 北側 (W) 第一點鍋爐水牆管厚度比較圖

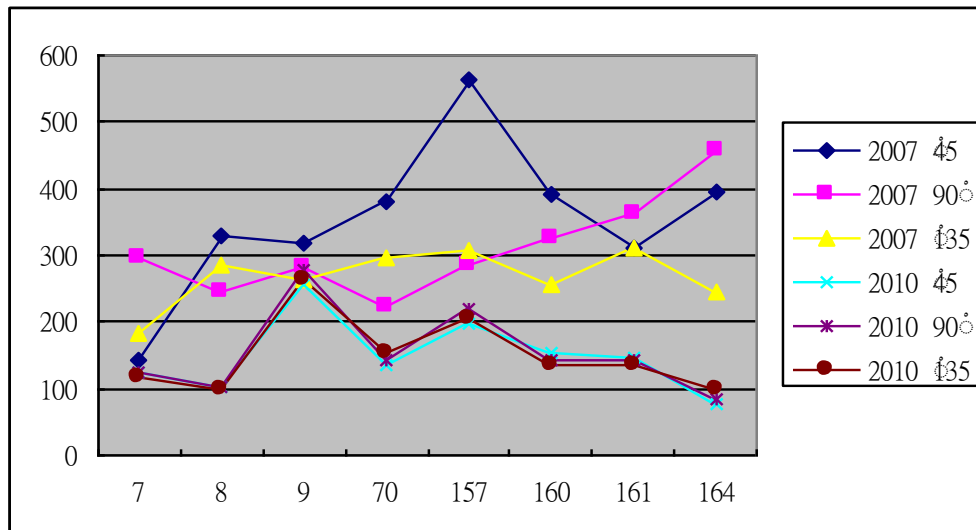


圖 36 北側 (W) 第二點鍋爐水牆管厚度比較圖



## 第五章、結論

目前國內汽電廠鍋爐爐管熱熔加工相當普遍，又分成廠外、現場施工；如吹灰器附近管排全部更換，需將鍋爐爐管及鰭片製作完成後，送熱熔廠商施工品質較完整；如果現場直接施工考慮機具及空間問題品質較差。

鍋爐爐管熱熔厚度約 300~350  $\mu\text{m}$ ，但隨著飛灰流速及吹灰蒸汽品質爐管減薄狀況不同，一般依實際狀況約 3-4 年熱熔乙次；在維修時程管理、避免換管及不影響原有管件之機械強度與熱傳效率，鍋爐爐管熱熔加工是可行的，唯披覆材料較脆容易脫落（如圖 37），這是熱熔缺點歲修時必須列入檢查項目。

鍋爐爐管噴焊視面積而定、噴焊面積 10M<sup>2</sup> 以上每 M<sup>2</sup> 約 50,000 元，數量較少時因使用人工及機具相同所以價格一般以倍數計算。

短吹灰管四週可能吹蝕部份以吹灰器上下約 650MM、左右各約 700 MM（含 10 支水牆管及連接鰭片），如附表 15。

每支吹灰器欲噴焊面積約 2 M<sup>2</sup>，噴焊施工人員每次配合人員約 7-8 人，8HR 可完成 10 M<sup>2</sup>，，施工前置作業約 8 HR，施工完成拆卸機具時間 4 HR。鍋爐切換管含舊管及鰭片切除、導



角、新管預置及導角，新管 TIG 焊接、RT 檢測、試片判讀、爐管間鰭片焊接、約 6 HR(含爐保溫拆除及安裝)鍋爐試水壓 8HR，假設吹灰器 SB4 需更換 10 支水牆管，則必須增加 68 HR 施工時間、費用約 20 萬元，改成噴焊加工增加 20HR，費用約 10 萬元；可提前兩天開車。

容量費率： $153(\text{非夏月}) \times 30000\text{KW} \times 2/30 = 306,000$  元

能量費率： $2 \text{ 元/KW} \times 30000 \times 48 \text{ HR} = 2,880,000$  元

經濟效益：約 3,186,000 元



表 15 鍋爐爐管短吹灰器位置

管號	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
																					5.3	5.7					
																		5.6		4.9	5.1	5.3					
							5.3		5.5									5.2		4.5	4.5	4.3					
						4.9		5.1	5.3	5.6								5.1	5.5	3.9	4.1	4.1					
			5.3	5.3	5.3	4.1	5.3	4.4	4.7	5.3							5.4	5.0	5.3	3.7	4.0	3.9		5.3	5.3		
		5.2	5.1	4.9	5.1	3.5	5.2	3.4	4.2	4.5	5.5	5.7	5.8			5.8	5.4	4.9	5.1	3.6	3.8	3.7	5.4	5.1	5.2	5.4	5.6
		5.1	4.9	5.2	5.1	4.0	4.4	3.5	4.0	4.5	5.6	5.3	5.9			5.4	5.4	4.9	5.1	3.9	4.0	4.0	5.4	5.2	5.3	5.4	5.6
		5.0	4.7	5.1	5.2	4.3	4.7	4.3	4.4	5.3	5.5		5.8	5.8	5.4	5.8	5.1	5.3	4.0	4.1	4.0	5.3	5.1	5.3	5.4	5.6	
		4.9	4.5	5.1	5.3	4.6	4.6	4.9	5.7	5.5	5.2		5.8	5.7	5.8	5.7	5.8	5.5	5.4	4.0	4.0	3.9	5.4	5.3	5.6	5.3	5.5
		4.7	4.7	5.1	5.2	4.4	5.0	4.9	5.6	5.7	5.5		5.8	5.7	5.8	5.7	5.8	5.3	5.6	4.2	4.3	4.3	5.4	5.2	5.3	5.4	5.4
				5.0	5.2	3.8	5.0	4.7	5.6	5.8	5.5		5.3	5.8	5.7	5.3	5.6	5.4	5.5	4.0	4.4	4.7	5.5	5.4	5.4	5.3	5.5
				5.3	5.2	4.5	4.6	4.9	5.7	5.6	5.7	5.0	5.7		5.7	5.3	5.6	5.4	5.5	4.3	4.4	4.6	5.4	5.4	5.3	5.4	5.5
		4.0			5.3	5.2	4.6	4.9	5.4	5.7	5.5	5.7	5.2			5.2	5.7	5.5	5.5	4.3	4.1	4.5	5.3	5.5	5.3	5.5	
		4.0			5.5		5.0	5.1					5.3			5.1				4.7	4.5	4.7				5.2	
		4.0				5.3														5.7	5.4	5.2					
		4.0	3.9																								



圖 37 爐管 Coating 剝落照片[17]

## 參考文獻

- [1]. 蘇順次，2006，鍋爐破管事故探討與維護策略之研究，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生，碩士論文、P1。
- [2]. 鍾佳璋，2009，台灣漢泰科技股份有限公司，簡報資料，P3。
- [3]. 蔡耀慶，2000，鍋爐爐管破損分析，國立台灣大學材料科學與工程學系，碩士論文。
- [4]. ASM Metals Handbook, vol. 11, 9<sup>th</sup>ed, " Failure Analysis and prevention" , USA, 1986, P. 603-612
- [5]. Ditto , p. 612-614
- [6]. Ditto , p. 614-621
- [7]. Ditto , p. 621-623
- [8]. 2008 ，中石化汽電工場鍋爐水牆管破管分析報告。
- [9]. 鍾佳璋，2009，台灣漢泰科技股份有限公司資料，P4。
- [10]. 2009. 日本第一高周波熱處理，簡報資料，P34。
- [11]. 鍾佳璋，2009，台灣漢泰科技股份有限公司資料，P6。
- [12]. 蕭威典，2006，全華科技股份有限公司，熔射覆膜技術，Chapter3 3-1~3-5。
- [13]. 蕭威典，2006，全華科技股份有限公司，熔射覆膜技術，Chapter3 3-1~3-5。

[14]吳中立，2006，以電漿熔射法製備漸進塗層之熱疲勞研究，逢

甲大學機械工程所，p15。

[15].” Standard test method for adhesion or cohesive strength of flame sprayed coating” ,American National Standard ASTM:C633-79.

[16]. 黃琮浩，2007/2010，台灣漢泰科技股份有限公司，檢測資料，P1-P5。

[17]. 黃琮浩，2008，台灣漢泰科技股份有限公司，照片資料，P12-P13。

