

吹灰用空氣壓縮機熱交換銅管破損分析

鄭錦榮、楊豐澤

Failure Analysis of Heat Exchanger Used in Blowing Compressor

J. R. Cheng and F. T. Yang

摘 要

吹灰用空氣壓縮機係作為鍋爐吹灰器之吹灰空氣源，鍋爐吹灰其主要目的是在防止鍋爐內所有爐管外表積灰結渣。吹灰空氣壓縮機中間冷卻器金屬熱交換管，自民國85年加入運轉以來頻頻發生內部銅管嚴重破管情形，冷卻器破管數高達68根，佔108根總管數的63%，斷裂並非集中於某段位置，而是整根管材皆出現裂痕，裂痕為沿管壁圓周延伸斷裂，圓周裂痕成陣列式排列。斷裂沿著管徑圓周方向產生裂痕，各圓周裂痕皆具方向性沿軸心水流方向陣列式平行排列，垂直於主應力方向，銅管主要在水流速方向受到單軸荷重的應力影響，管材斷裂破壞形態為疲勞腐蝕，疲勞腐蝕的成因推測為流體振動、加工時的殘留應力及冷卻水中腐蝕物所引起。

關鍵詞：吹灰用空氣壓縮機、海軍黃銅、疲勞腐蝕

Abstract

The main function of blowing compressor was used in boiler for blowing away fly ash. The heat exchanger was serious blow out during the system starting operation in 1996. The failure heat exchanger was more than 68 tubes, about 63% by total 108 tubes, for uniaxial stress systems; there will be an array of parallel cracks, which are perpendicular to the direction of principal stress. The failure analysis corrosion fatigue continues to be a serious cause of failure. The stress source was attributed to fluid vibration, residual stress of fabrication and corrosive in cooling water.

Keywords: blowing compressor、Inhibited Admiralty、fatigue corrosion cracking

一、前言

1.1 緣由

吹灰用空氣壓縮機係作為鍋爐吹灰器之吹灰空氣源，鍋爐吹灰其主要目的是在防止鍋爐內所有爐管外表積灰結渣。即當鍋爐運轉時，以高壓之空氣吹除附在爐管之積灰，防止結渣同時維持爐管受熱面之清潔以提高主蒸汽及再熱蒸汽之溫度而增加鍋爐效率。電廠五至八號發電機組共裝設六台空氣壓縮機，正常運轉時，每兩部機使用一台，其餘備用，並設置容量85 m³之儲氣槽四座。空氣壓縮機分別由二家公司提供，其中屬於相同公司的兩台空氣壓縮機中間冷卻器金屬熱交換管，自民國85年加入運轉以來頻頻發生內部銅管嚴重破管情形，其餘四台另家公司的空氣壓縮機中間冷卻器金屬熱交換管在相同條件操作下並沒破管報告。

1.2 設備結構

(1) 離心式空氣壓縮機

離心式空氣壓縮機，在每一段之間皆安裝有一中間冷卻器並附有水分離器，以除去空氣在中間段冷卻時所產生的冷凝水。空氣進入機殼係經由一個軸向進口連結設備進入第一段葉輪，因為葉輪之離心力作用而增加壓力並且在葉輪後之升壓室內減低速度，然後此增壓之空氣通過中間冷卻器及氣水分離器後再轉至下一段葉輪。

(2) 冷卻熱交換器

冷卻器由外殼(Shell)及金屬管(Tube)所組成，大小尺寸如圖1及圖2為冷卻器正視，其外殼實際上即為壓縮機的機殼，內徑為25.3 in、外徑為26.0 in。而金屬管材質為海軍黃銅，總管數為108根，分左右各54根含鉬酸鹽冷卻水進入與流出，冷卻器末端管材成U型彎曲迴路，管材總長為111.0 in、管內徑為0.625 in、管壁厚度(最少/平均值)為18 BWG (0.049 in)，管間距為1.5 in，側管外有鋁鰭片(Fin)之裝置，壓縮空氣係流經管外，而管內則有大量冷

卻水以與空氣流動相反之方向流通，以冷卻管外之壓縮空氣，此種設計方式可獲致一較高熱轉換效率。吹灰空壓機之性能設計隨著各階段的熱空氣壓縮功能作用不同，在管內的流體流速、入出口溫度、入出口壓力差等皆有明顯的差異。

二、分析方法及步驟

2.1 管材外觀分析

冷卻器由外至內將鋁鰭片清除，將熱交換銅管依支撐架固定切割為三段，每段管長為35 in，靠近入口端依次標示為H、A、B如圖1所示。以斷裂位置及破損頻率統計分析方法記錄108根熱交換銅管的外管壁斷裂次數及裂痕位置。

2.2 管材成分分析

切割5cm長熱交換器管一段，經由切割機沿中心線剖開，先清除表面氧化層後以鑽頭鑽取1g之管材金屬屑，利用稀硫酸溶解後，以電鍍方式析出純銅，剩餘溶液以ARL FISON'S 3580-B ICP進行金屬元素分析。

2.3 管材斷面及表面分析

分別選取沿中心線剖開壓平的熱交換銅管，先以OLYMPUS光學顯微鏡觀察破管裂縫表面狀況、色澤及裂縫數量及位置，以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察表面微結構及破斷面，再以影像處理重組圓管破斷面。

2.4 管材金相分析

截取管材包含裂縫之橫截面及內管表面各一試樣，以樹脂鑲埋，再經Grit#240、#600及#1200砂紙研磨後以1 μm氧化鋁粉拋光，再以20 ml NH₄OH、20 ml H₂O₂與20 ml H₂O的混合液加做為浸蝕液，將試樣浸蝕1分鐘後以光學顯微鏡觀察材料

金相組織。

三、結果與討論

3.1. 冷卻器破管數量、位置分析

中間冷卻器經拆除外殼及鋁鰓片後，以注入自來水測試，發現破管數高達 68 根，佔 108 根總管數的 63%，每根斷裂管往往有 1 至 3 處斷裂點，破斷位置以圖 1 所示之 A 端最嚴重，在 108 根中 29 根出現 51 次斷裂段，佔總根數的 26.85%，30 根出現 40 次裂痕，約佔總根數的 27.78%。依斷裂位置出現點分析可知，斷裂並非集中於某段位置，而是整根管材皆出現裂痕，裂痕為沿管壁圓周延伸斷裂，彼此圓周裂痕約相互平衡，如圖 3 所示。

任意抽取 A 段的斷裂銅管，如圖 4 的銅管中在 5cm 長度的內管壁中，裂痕出現次數超逾七條，且裂痕皆沿著圓周方向延伸，兩端分別為斷面，同樣裂痕集中出現於其他銅管中。

3.2 管材成分分析

管材經 ICP 連續式 (sequence) 元素定性分析，確定只含 Zn、Cu、Sn、As (微量) 元素，定量分析結果如表 1，證明管材的主要化學組成含錫的海軍黃銅 (Inhibited Admiralty, 商品名為: admiralty metal) 71Cu-28Zn-1Sn，其餘微量添加物及不純物亦在表 1 之規範值以內。

文獻指出⁽¹⁾黃銅添加錫時，可抑制脫鋅腐蝕的傾向，適合耐海水性的熱交換管，添加錫可增加硬度、強度，但含量超出固溶限度以上的話，便變成硬脆。在 Cu-Zn 常溫組織圖中，0-38% Zn 的 α 相範圍，錫的固溶度從約 15% 降為 0.7%，在鋅的飽和固溶體，只有少許固溶度。若再增加 Zn%，呈現 β 相的話， β 相中的錫固溶度反而增高，錫的固溶度增加。在 70/30 黃銅有 1.5-2% Sn，在 60/40 黃銅有 2.5-3% Sn 的固溶度， β 相中含有較多錫，從表 1 中錫含量約在 1% 管材應具有良好的延展性及機械性

質。

3.3 冷卻器破管破斷面分析

圖 5 為橫斷面的掃描式電子顯微鏡 28 張組合分析圖，從圖 6 破斷面顏色較深的 A 區為破裂肇始點，破裂由 A 區起呈放射狀往 C 區另一側延伸，其特徵與脆性斷裂 (Brittle Fracture) 出現大量的河川 (River pattern) 分佈型相同，屬脆性斷裂，在外環之 B 區，即所謂剪唇 (Shear Lip) 區呈酒渦狀 (Dimple Pattern)，屬延性斷裂 (Ductile Fracture)，故 A 區為破裂肇始點區，B 處 (弧狀亮處) 是過負荷之延性破斷區，C 為破裂延伸區。

從圖 4 中可知斷裂沿著管徑圓周方向產生裂痕，各圓周裂痕皆具方向性沿軸心水流方向陣列式平行 (array of parallel crack) 排列，垂直於主應力方向，故可明確證實冷卻器銅管主要在水流速方向受到單軸荷重 (uniaxial loading) 的應力影響，與扭曲及熱應力產生裂痕的方向性不同，三者裂痕產生的排列方向性詳如圖 7⁽²⁾。

3.4 冷卻器破管材質金相組織結構

黃銅管材的龜裂主要的原因為應力的存在，一般而言可以分為疲勞腐蝕龜裂 (fatigue corrosion cracking) 及應力腐蝕龜裂 (stress corrosion cracking) 兩種。當外加的應力週期性的施於材料體，且有腐蝕媒介存在時即可能引起如圖 8 右上圖疲勞腐蝕龜裂，破損位置的金相組織可以明顯看到穿晶破裂的型態，如圖 8 左上圖，而發生的位置通常在冷凝管與管板相鄰位置，若材料在製造或安裝時殘留的應力無法消除則在含水銀、NH₃ 或其衍生物的腐蝕環境下常引起如圖 8 右下圖應力腐蝕龜裂，裂縫傳播會產生許多的分枝，黃銅材料的應力腐蝕龜裂金相組織，其破裂型態一般均屬沿晶破裂⁽³⁾，如圖 8 左下圖，顯示出裂縫係沿著晶界成長，但無明顯的腐蝕生成物堆積或腐蝕痕跡。若是材料產生塑性變形亦有穿晶破裂的型態發生。疲勞腐蝕龜裂所引起的穿

晶破裂不同之處，在於裂縫之成長並非沿著晶界進行，裂縫傳播中會穿過晶粒因此極少出現分枝，但因可能有多處裂縫起始點所以會有許多裂紋平行出現，如圖8 右上圖。

為了明確區別銅管屬何種型態破損，分別從管材的管壁、橫切面、縱切面金相組織結構方向探討管材裂痕產生的原因。圖9 為管材內壁裂縫延伸金相組織圖及裂縫起點、終點放大圖，顯示斷裂沿著管徑圓周方向產生裂痕。圖9 左邊裂縫起始點放大圖，出現疲勞產生的無分枝狀的穿晶裂痕，圖9 右邊裂縫終點放大圖出現的分枝裂痕及另一段裂痕的交錯。

圖10 為A1 管材橫切面裂縫延伸金相組織圖，圖中出現多個孔蝕，裂痕由孔蝕向外管壁或沿著圓周方向延伸，並非只在內管壁表面圓周方向進行裂縫延伸，而是在內管壁多處產生孔蝕及裂痕，藉著裂痕的交層而導致斷裂。

圖11 上圖為海軍黃銅管內管壁金相組織圖。正常金相組織為細緻的方格晶體，雖然Zn 含量高達28%，因添加1% Sn 改善黃銅管高Zn 量脫鋅特性，在圖11 中並無出現脫鋅腐蝕等孔洞現象，證實管材腐蝕應與脫鋅無關。

圖12 為管材橫切面穿晶斷裂金相組織圖，針對圖10 上端孔蝕點放大說明，由12 圖中可說明在圓周橫切面中出現兩個腐蝕孔蝕點，裂縫在此二點間彼此連接，導致斷裂，而其裂痕所經過晶粒多為穿晶斷裂金相組織。

圖13 為管材縱切面穿晶斷裂金相組織圖，由內管壁沿著垂直方向往外管壁延伸，在此金相組織中並無出現管材加工時晶粒的方向性走向。圖14 為管橫切面穿晶破裂金相組織圖，結果與圖12 相似，圖15 為管材橫切面出現沿晶及穿晶破裂金相組織圖。

3.5 破管原因分析

綜合上述四點的分析結果可知，管材斷裂破壞形態為疲勞腐蝕，疲勞腐蝕的影響因素可分為週期

應力 (Cyclic stress) 及環境因素 (Environment) 的雙重影響。

週期應力的來源推測應與流體振動引致疲勞效應，管殼內流體 (shell side fluid) 對管束 (tube bundles) 造成的作用力，取決於材料的物理性質，幾何形狀，支持機構，及操作的情況。流體橫過管束時，流場的現象包括渦漩剝離 (vortex shedding) 引致的振動，紊流擾動 (turbulent fluctuation) 引致的振動及流體彈性振動 (fluid elastic vibration)。

紊流擾動引致的振動⁽⁴⁾，流場若是紊流，圓管附近的紊流擾動，會形成作用在圓管壁的壓力擾動，使圓管的受力有不同方向的變化，導致振動。此類振動，在進口流速提高的情況下，具有危險性。因為對同一圓管束，一般而言擾動能量與流場速度擾動的平方成正比。在低流速的情況下，並不致造成圓管明顯的振幅。渦漩剝離⁽⁵⁾ 引致的振動，其現象為流速在某一特定的範圍，圓管末端的流場呈現的尾流，有渦流交替性的出現在中心線的兩側。由於為週期性變化的流場，故在圓管壁引致週期性的作用力。此作用力的變化為弦波，有特定的頻率假若圓管的自然振動頻率與渦漩剝離的頻率相同，會引致圓管大幅的振動。Vortex shedding 的發生與橫向流速，管束的幾何形狀大小有關。流體彈性振動為流體彈性不穩定造成的振動，考慮一排列圓柱置於一流場中，原為平衡靜止的狀態，若其中的任一個或多個圓柱受到擾動 (perturbation) 產生位移時，由於此位移會排擠周圍的流場，使流體對這圓柱作用力也產生改變。如果流體的作用力對這圓柱產生的能量，超過這圓柱退回原來位置所消耗的能量，那麼這個流體加上圓柱的系統可能會產生不穩定，不會回到原來平衡靜止的狀態，而有可能會不斷地產生振動，在熱交換器內，產生流體彈性不穩定^(4,5,6)。發生在流體的流速超過某一臨界值的時候，造成的振幅與前二種機制造成的振動也相對地較大。流體超過某一臨界值時，振動的振幅有急速增大的趨勢。此不穩定是造成熱交換器內，熱交換

圓管損壞的主要原因。此外管材加工的殘留應力亦為導致應力集中的主因。

四、結論

- (1) 吹灰壓縮機中間冷卻器破管數高達 68 根，佔 108 根總管數的 63%，斷裂並非集中於某段位置，而是整根管材皆出現裂痕，裂痕為沿管壁圓周延伸斷裂，圓周裂痕成陣列式排列。
- (2) 斷裂沿著管徑圓周方向產生裂痕，各圓周裂痕皆具方向性沿軸心水流方向陣列式平行排列，垂直於主應力方向，銅管主要在水流速方向受到單軸荷重的應力影響。
- (3) 管材斷裂破壞形態為疲勞腐蝕，疲勞腐蝕的成因推測為流體振動、加工時的殘留應力及冷卻水中腐蝕物所引起。

五、參考資料

- (1) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie, in Corrosion and Corrosion Control(John Wiley & Sons, 1984)p. 331.
- (2) E. D Verink , in Corrosion Basics (National Association of Corrosion Engineers, 1984)P. 351.
- (3) Howard E, Boyer, Metals Handbook Vol.10, 8 edition (American Society For Metals, 1975)P.214.
- (4) Blevins, R. D., Symposium on Flow Induced Vibration,3(1984)87.
- (5) Chen.S.S., Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, 105(1983)51.
- (6) 游明輝，大型熱交換器內流體引致振動損壞之研究，88年產學合作研究計畫，1999。

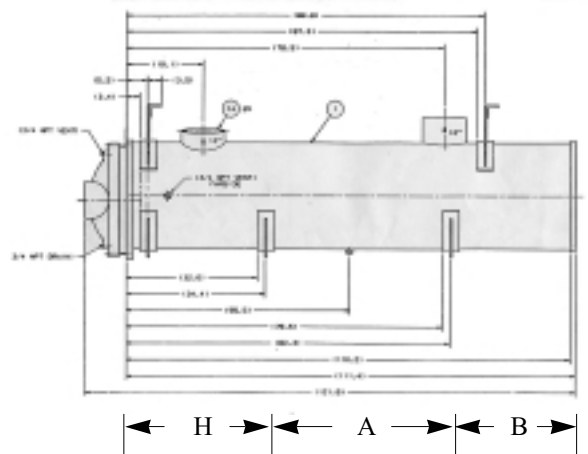


圖 1 冷卻器正視圖

Fig.1: Cooler front view

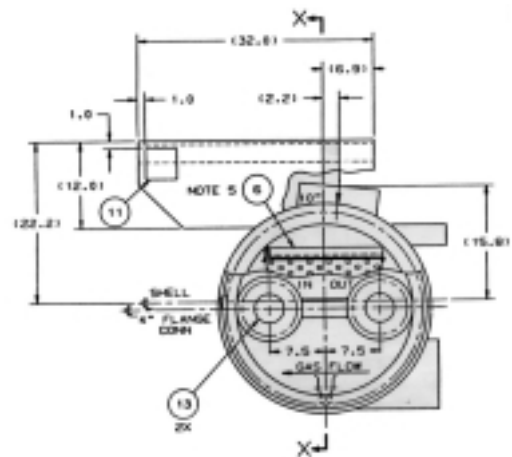


圖 2 冷卻水進入與流出的正視圖

Fig.2: The front view of cooling water flow in and out.

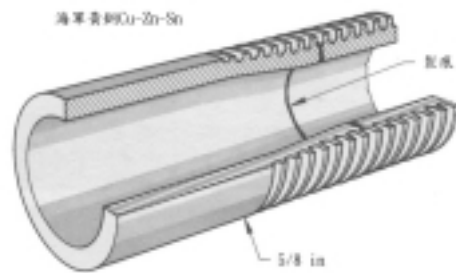


圖 3 沿著管徑圓周方向產生多段裂痕

Fig.3: Multistage slight crack along pipe circumference direction

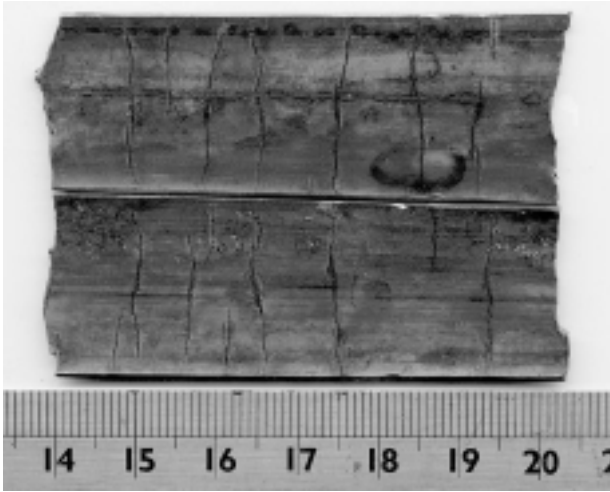


圖 4 熱交換銅管內管剖面圖 (沿中心線剖開壓平的熱交換銅管)

Fig.4: Cross-section of copper pipe heat exchange(cut along central line the heat exchange copper pipe that boils to flatten)



圖 5 管材斷面SEM金相組織圖

Fig.5: SEM Cross-sectional micro- structure of pipe material

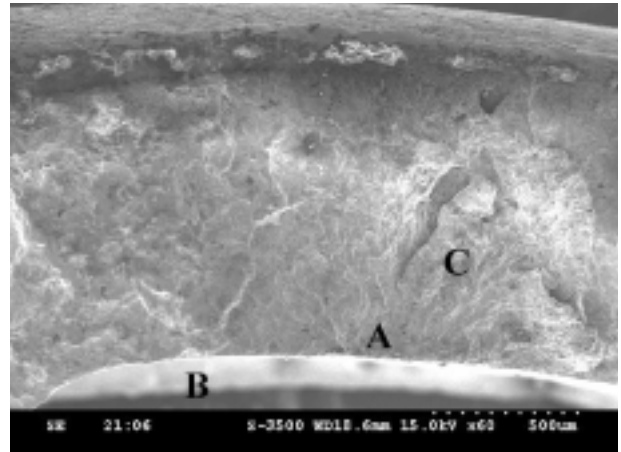


圖 6 管材斷面破裂起點由內側延伸至外側，類似河川分佈，屬脆性斷裂，A區為破裂源，B處(弧狀亮處)是過負荷之延性破斷區，C為破裂延伸區。

Fig.6: Pipe cross section breaks starting point from lean to extend to outside side, similar river distribution, belong to brittleness fracture, A: district is to break source, B: place (arc form bright place) have been the broken ductility of load broken district, C: extends district for breaking.

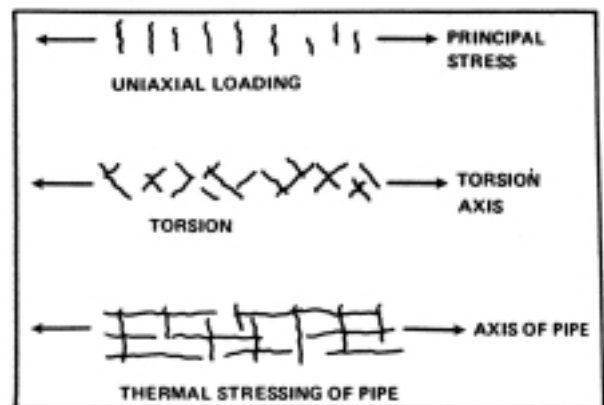


圖 7 三種應力導致管材內壁疲勞裂紋的陣列式排列²⁾

Fig.7: Typical fatigue crack Arrays for various stress systems⁽²⁾

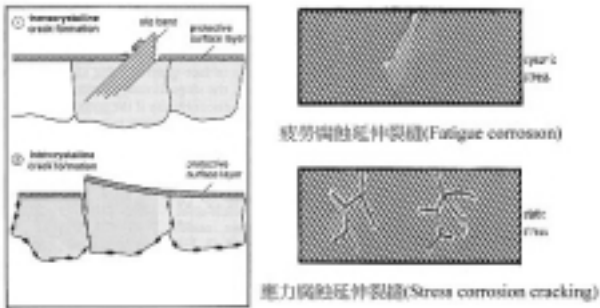


圖 8 經由疲勞腐蝕或應力腐蝕，晶體會出現穿晶與沿晶的金相組織⁽³⁾

Fig.8: The transcrystalline and intercrystalline crack formation by fatigue corrosion or stress crack corrosion.⁽³⁾

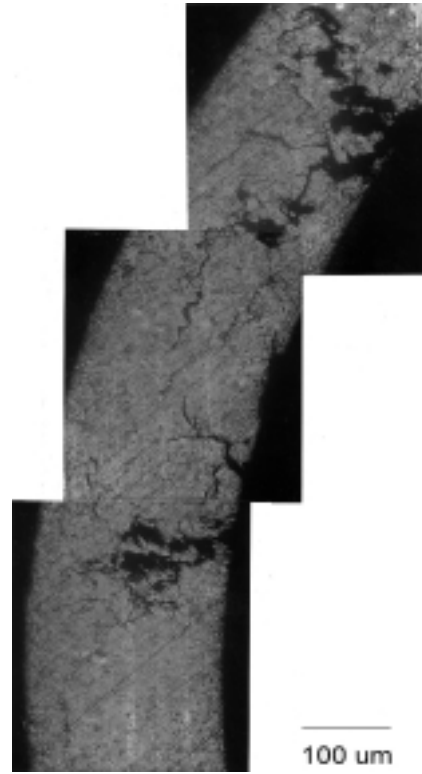


圖 10 管材橫切面裂縫延伸金相組織

Fig.10: The cross sectional micro- structure of pipe cracking

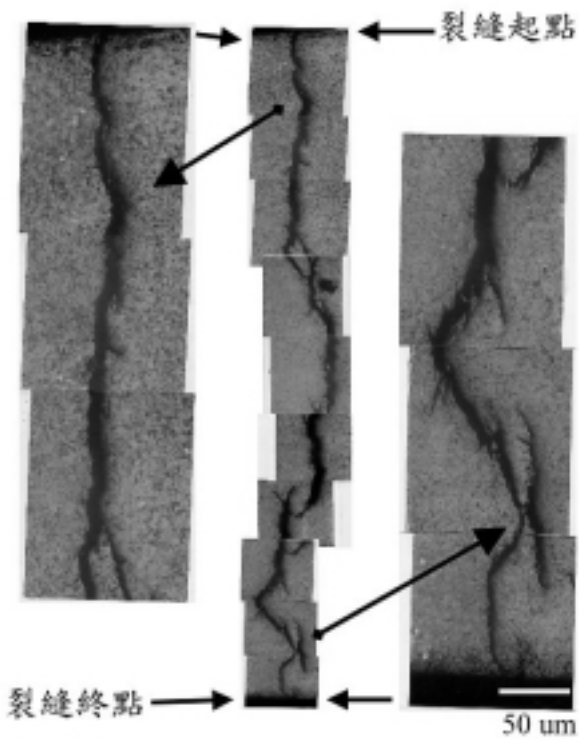


圖 9 管材內壁裂縫延伸金相組織圖及裂縫起點、終點放大圖

Fig.9: The microstructure of internal pipe cracking starting point and terminal point (enlarge picture)

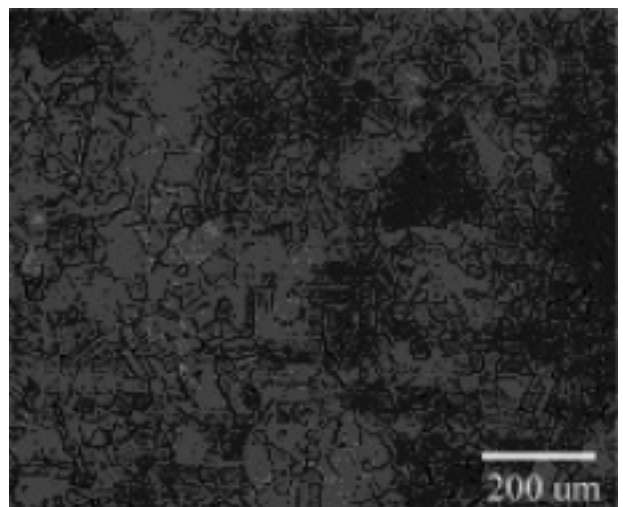


圖 11 管材內管壁金相組織圖

Fig.11: The microstructure of internal pipe

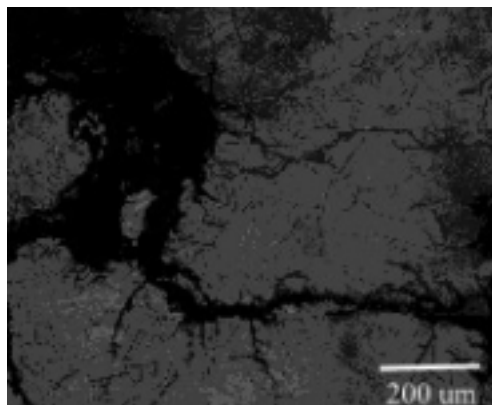


圖 12 管材橫切面穿晶斷裂金相組織
Fig12: The cross section of micro-structure at transgranular cracking pipe

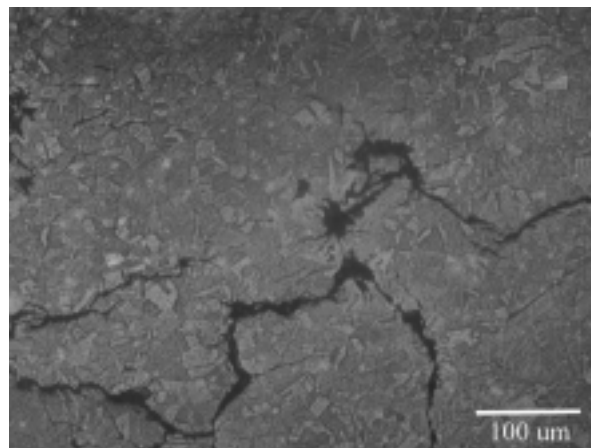


圖 15 管材橫切面沿晶及穿晶破裂金相組織
Fig 15: The cross sectional micro-structure in intergranular and transgranular cracking

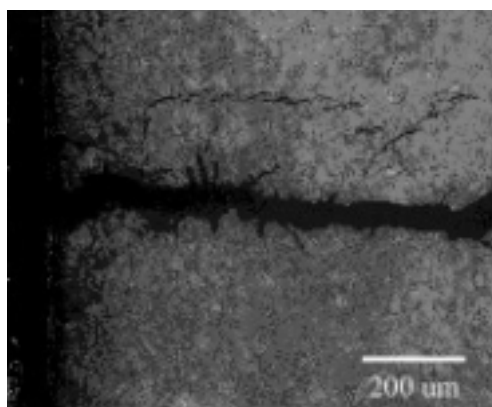


圖 13 管材縱切面穿晶斷裂金相組織
Fig13: The horizontal section of micro-structure at transgranular cracking pipe

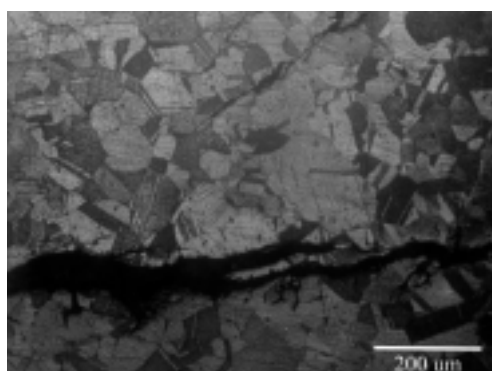


圖 14 管材橫切面穿晶破裂金相組織
Fig14: The horizontal section of micro-structure at transgranular cracking pipe

表 1 銅材熱交換管化學成分分析(WT%)

Table 1: The chemical composition analysis of heat exchanger copper pipe (wt%)

編號	Cu	Zn	Sn	As
1	70.32	27.78	1.08	0.02
2	70.44	28.08	1.13	0.03
平均值	70.38	27.93	1.105	0.025
ASTM B111	70.0-73.0	餘量	0.90-1.20	0.02-0.10