

耦合多電極陣列於換熱器材質選用之應用 Application of Coupled Multi-electrodes Array Sensor in Materials Selection of Heat Exchangers

陳國銘
K. M. Chen

中文摘要

某廠廢熱回收系統之熱傳管發生腐蝕及穿孔問題，為尋找耐蝕性更佳之材料，擬以線上腐蝕監測方式，在換熱器不同位置安裝腐蝕探針，以比較 SUS441、SUS444、SCR-TEN2、A179 等四種材質在該環境下之腐蝕速率，以做為熱傳管材質未來更新之參考。

由於材質包含不銹鋼，因此本研究經評估後以耦合多電極陣列監測系統(Coupled Multielectrode Array Sensor, CMAS)進行線上腐蝕速率監測。整體研究方法包括腐蝕探針製作、現場安裝及實際腐蝕速率監測、監測數據處理及探針腐蝕狀況觀察分析。

線上監測後各電極表面呈現局部腐蝕孔洞，經觀察後與最大局部腐蝕速率相吻合，局部腐蝕速率高者，其電極表面會出現較為明顯之孔洞。腐蝕因子分析結果顯示，電極表面腐蝕沉積物有大量的 S 元素，並有少量的 Cl 元素，推測其腐蝕現象應為硫酸露點腐蝕與氯離子之孔蝕造成，使得不銹鋼出現較明顯的局部腐蝕現象。SUS 444 由於含 Mo 元素，其在抗孔蝕表現上較 SUS 441 為佳，A179 在除霧器之前耐蝕性差，而 SUS 441 在第一管群出口耐蝕性差，SCR-TEN2 則表現相對較耐蝕，建議可考慮以 SCR-TEN2 做為換熱器材質。其次為使用含 Mo 之肥粒鐵系不銹鋼，較能耐孔蝕。

關鍵詞：腐蝕監測、耦合多電極陣列系統、不銹鋼、局部腐蝕。

Abstract

Corrosion and perforation problems had occurred in the heat transfer tube of a waste heat recovery system in a factory. In order to find the materials with a better corrosion resistance, it is planned to install corrosion

收到日期：111 年 09 月 24 日 修訂日期：111 年 11 月 25 日 接受日期：112 年 01 月 30 日

中鋼公司鋼鐵研究發展處產品應用技術組
Iron & Steel Research & Development Department, China Steel Corp
*聯絡作者：140475@mail.csc.com.tw

probes at different positions of the heat exchanger by means of online corrosion monitoring to compare the corrosion rates of the SUS441, SUS444, SCR-TEN2, A179 four materials in this environment. The result could be used as a reference for future updates of heat transfer tube materials.

Since the material consists of stainless steel, this study was evaluated with a coupled multi-electrode array monitoring system (CMAS). The overall research method includes corrosion probe fabrication, on-site installation and actual corrosion rate monitoring, monitoring data processing, and probe corrosion status observation and analysis.

After online monitoring, local corrosion pits were found on the surface of each electrode, and it was consistent with the maximum local corrosion rate. If the local corrosion rate is higher, more obvious holes will appear on the electrode surface. The results of corrosion factor analysis show that the corrosion deposits on the electrode surface contain a large amount of S element and a small amount of Cl element. It is speculated that the corrosion phenomenon should be caused by the dew point corrosion of sulfuric acid and the pitting corrosion of chloride ions, which makes the stainless steel appear an obvious local corrosion phenomenon. Because SUS 444 contains Mo element, its anti-pitting performance is better than SUS 441. A179 has poor corrosion resistance before the demister, while SUS 441 has poor corrosion resistance at the exit of the first tube group, and SCR-TEN2 has relatively better corrosion resistance. It is recommended to consider SCR-TEN2 as the heat exchanger material. The second is the use of Mo-containing ferrite-based stainless steel, which is more resistant to pitting corrosion.

Keywords: Corrosion Monitoring, CMAS, Stainless Steel, Local Corrosion.

1. 前言

某工廠之高爐熱風爐廢熱回收系統在 2020 年年中進行設備停機及汰換更新部份設備，該廢熱回收系統之熱傳管經拆除後進行觀察，有鱗管積料、腐蝕及穿孔等問題；其接觸之環境氣氛為 BFG(高爐氣)氣體及其燃燒後之煙氣，內容物包含了氫離子、水氣、硫化物等成份。

熱風爐熱交換器主要是利用熱風爐廢氣預熱熱風爐燃燒所需要之燃氣(Blast Furnace Gas, BFG)，提升 BFG 顯熱，以降低 COG(焦爐氣)之使用量。圖 1 為高爐廢熱回收(HRS)設備簡圖^[1]，燃燒後之廢氣經由 HRS (Heat Recovery System)熱交換後再由煙囪排出。圖 2(a)為 HRS 局部之示意圖，熱廢氣由下方通過換熱器，BFG 由上方通過，中間隔開，熱交換管內有流體，經加熱蒸發到上方進行熱交換。其中圖 2(b)粉紅色標示之第四區為整個熱回收設備腐蝕最嚴重之處，圖 3 為第四區 2015 年腐蝕狀況之照片，顯示熱交換管及鱗片上佈滿腐蝕生產物，不但影響

熱交換效率，當腐蝕嚴重而造成燃氣側與廢氣側連通時，有爆炸之潛在危害。為改善此問題，乃啟動高爐廢熱回收(HRS)設備局部 EPC 更新計畫，包括第四區熱交換管更換。原先熱傳管採用 A179 做為基材，為改善其使用壽命及兼顧安全之需求，擬尋求其他更耐蝕之材料以做為更新之參考，因此擬以線上腐蝕監測方式以比較不同材料在該環境下之腐蝕速率。

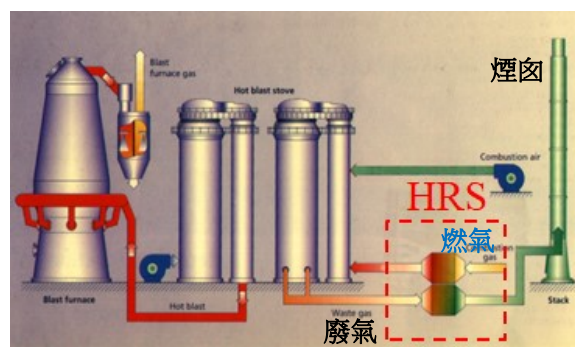


圖 1 高爐廢熱回收系統(HRS)^[1]。
Figure 1 Schematic diagram of Blast Furnace Waste Heat Recovery System (HRS)^[1].

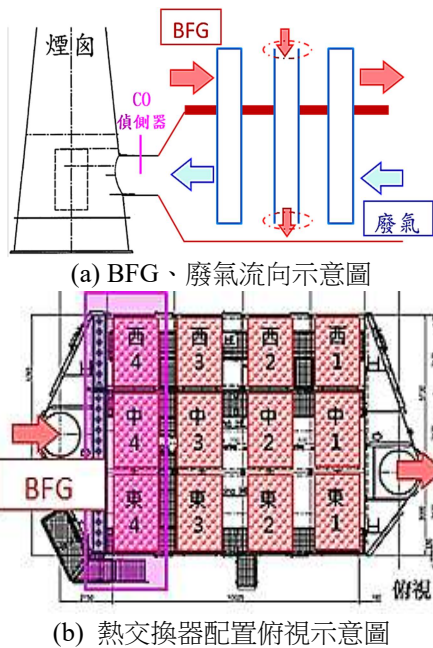


圖 2 熱交換器配置與 BFG、廢氣流向示意圖^[1]。

Figure 2 Schematic diagram of heat exchangers configuration, and the directions of BFG and exhaust gas flow^[1].



圖 3 2015 年熱交換器管腐蝕狀況^[1]。
Figure 3 Corrosion condition of the heat exchanger tubes in 2015^[1].

本研究擬比較材質有 SUS 441、SUS 444、SCR-TEN 2、A179 等四種，其中 SCR-TEN 2 為目前的殼板材質，A179 為目前的熱傳管材質，SUS441 與 SUS444 則為未來的候選材料。

2. 實驗方法

2.1 腐蝕監測技術選定

腐蝕監測技術有許多種不同之方式，並不是所有監測技術皆可適用於所有材料與環境狀況。

在 "NACE International Publication 3T199 Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications"^[2]一文中對於各種監測方法及其限制進行了詳細之描述。目前有許多直接與間接量測技術，但每一種都有其適用狀況。在某些狀況下，有些特定技術可能完全無法使用，某些技術可進行線上即時監測，但有些只能進行離線量測。一般腐蝕檢監測技術分成下列兩大類：直接技術與間接技術。

直接技術為直接量測腐蝕過程受影響之參數，間接技術為量測被環境腐蝕性或腐蝕產物影響或被影響之參數數據。侵入式則為量測時須穿過管壁或容器壁。愈靈敏之監測技術可偵測到腐蝕發生時之相關變化，即時採取修護措施避免重大損害發生，這些技術為即時量測技術。目前一般使用最普遍之技術包括腐蝕試片、電阻探針、LPR 探針及超音波等。

上述監測方式有些僅能監測其平均腐蝕速率，例如電阻法、電感法^[3]、掛片法等，對於腐蝕型態以孔蝕為主之不銹鋼，可能無法進行有效監測，有些只能在水溶液環境下監測，例如線性極化阻抗法^[4]，在選用監測技術時皆須考慮。在本研究中由於預定進行腐蝕速率監測之材料包括不銹鋼，因此在監測技術上選擇可以量測局部腐蝕速率之耦合陣列多電極腐蝕監測系統來進行安裝與量測。

2.2 耦合陣列多電極系統(CMAS)腐蝕監測原理

耦合多電極陣列技術主要是依據 ASTM G217 "Standard Guide for Corrosion Monitoring in Laboratories and Plants with Coupled Multielectrode Array Sensor Method"^[5]方法來實現。該技術可用於連續評估瞬時非均勻腐蝕速率，包括局部腐蝕速率。對於實驗室應用，該技

術可用於研究各種測試條件和抑制劑對非均勻腐蝕的影響，包括孔蝕和間隙腐蝕等。

耦合多電極陣列是具有多個工作電極的系統，通過外部電路電耦合，使得所有電極在相同電位下操作以模擬單件金屬的電化學行為。耦合的多電極陣列已被用於研究金屬在腐蝕過程中的空間和時間電化學行為，其輸出是來自所有電極的可尋址的單獨電流^[6]。

當金屬在腐蝕性環境中經歷非均勻腐蝕，特別是局部腐蝕，如孔蝕或間隙腐蝕時，電子從金屬腐蝕的陽極部位釋放並移動到金屬的陰極部位—腐蝕較少或不腐蝕區域(見圖 4 上半部分)。這種現象是由於金屬表面的微觀結構和環境中的局部變化或金屬表面上的氧化層的發展而發生的。如果金屬被分成多個小塊(或微型電極)，則一些微型電極具有接近陽極的性質，而另一些則具有接近陰極的性質。當這些微型電極通過多通道零電位電流表(Zero-Voltage Ammeter, ZVA)^[5]將每一個連接到公共接頭來耦合時，表現出陽極特性的電極模擬陽極區域，而表現出陰極特性的電極模擬陰極區域。腐蝕性金屬(參見圖 4 的下半部分)，從陽極電極釋放的電子被迫通過耦合接頭流到陰極電極。因此，ZVA 測量腐蝕電極的陽極電流(I_{ex}^a)和較少腐蝕或不腐蝕電極的陰極電流(I_{ex}^c)。來自各個電極的定量局部或非均勻腐蝕速率可以由陽極電流確定。使用 ZVA 測量每個電極電流的原因是 ZVA 不會在測量電極和耦合接頭之間施加電位降，這確保所有電極處於相同的電極電位以便多個電極模擬同一件金屬的行為。

在陽極電極上，腐蝕電流(總溶解電流)， I_{corr} 等於外部流動的陽極電流 I_{ex}^a (見圖 4)和內部流動的陽極電流 I_m^a 的總和。因此：

$$I_{corr} = I_{ex}^a + I_m^a \quad (1)$$

在腐蝕速率的測定方面，CMAS 測得的最大局部腐蝕速率可以從最大陽極電流得出(假設沒有內部電流效應)：

$$CR_{max} = I_{max} EW / (F\rho A) \quad (2)$$

其中：

CR_{max} =計算的最大穿透率(cm/s)，

I_{max} =最大陽極電流，

F =法拉第常數(96485 C / mol)，

A =電極的表面積(cm^2)，

ρ =合金或電極的密度(g/cm^3)，

EW =當量重量(g/mol)。

上式假設最嚴重的電極上之腐蝕在整個表面上是均勻的。因為在典型的 CMAS 探針中一個電極的表面積通常在 1 和 0.03 mm^2 之間，所以通過假設小電極上的均勻腐蝕來預測穿透率或局部腐蝕速率在大多數應用中是符合實際需求的。

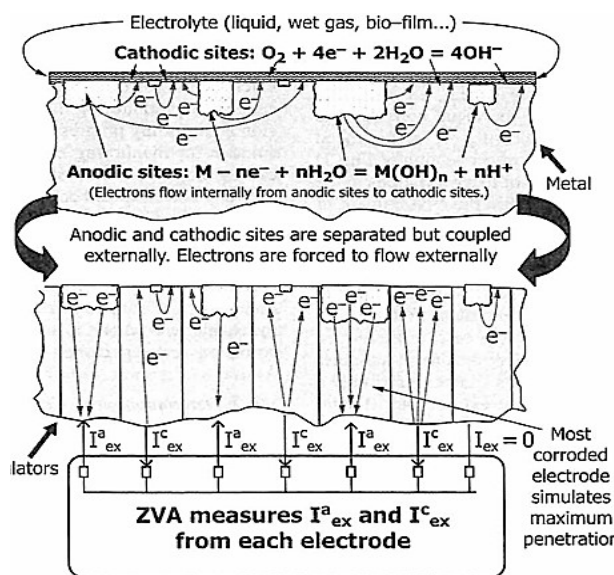


圖 4 CMAS 探針之原理。上部顯示了當發生局部腐蝕時，電子從腐蝕區域流向金屬內腐蝕較少的區域；下部顯示在陽極和陰極區域被分成單個小電極並通過外部電路耦合之後的電子流，該外部電路測量通過每個單獨電極的陽極電流(I_{ex}^a)和陰極電流(I_{ex}^c)^[5]。

Figure 4 Principle of CMAS probe^[5].

2.3 CMAS 電極與探針之製作

由於預定進行腐蝕速率測試之材料非一般制式規格，CMAS 製造商沒有這些材料之電極來製作探針，因此自行請廠商製作電極線。電極線所須之規格為直徑 1 mm，長度約 100 mm，由於線徑相當小，因此請廠商先以線切割方式從樣品割取直徑約 1.4 ~ 1.6 mm 長度 105 mm 之線材，再以無心研磨方式加工成直徑 1 mm 之電極線，所須原始材料樣品其厚度應在 2 mm 以上較合適。圖 5 為 SUS 441 製作完成之電極線外觀。本研究所用四種材料之公稱化學成分如表 1 所示。

製作完成之電極線送交 CMAS 設備廠商製作探針。本次探針預計插入 HRS 內部約 80

cm，因此整體探針總長約 88 cm (如圖 6(a))，外接之訊號線約為 10 m。圖 6(b)為探針接頭用來鎖入預先做好的球閥，並以氣密套圈鎖緊防止洩漏。探針之電極在安裝前先以#320 號砂紙研磨，去除表面氧化物及污染物，探針之電極經研磨後之外觀如圖 6(c) ~ (d)所示。



圖 5 製作完成之 SUS 441 電極線。
Figure 5 The required SUS 441 electrode wire.



(a) 探針外觀，總長 88 cm



(b) 球閥接頭及氣密套圈



(c) A179 電極陣列



(d) SCR-TEN2 電極陣列

圖 6 製作完成之 CMAS 探針及研磨後之電極陣列。

Figure 6 The final assembly of CMAS probes and the electrode array after polishing.

表 1 四種材質之化學成分(%)。

Table 1 Chemical composition of the four materials (%).

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	other
SUS 441	5	1.00	1.00	0.04	0.03	17.5 ~ 19.5	1.0	-	0.03	Ti: 0.1 ~ 0.5; Nb: 0.3 + 9xC ~ 0.9
SUS 444	0.025	1.00	1.00	0.04	0.03	17.5 ~ 19.5	1.0	1.75 ~ 2.5	0.035	(Ti+Nb): [0.2 + 4(C + N)] ~ 0.8
A179	0.06 ~ 0.18	-	0.27 ~ 0.3	0.035	0.035	-	-	-	-	-
SCR-TEN2	0.14	0.15 ~ 0.55	0.9	0.025	0.035	0.5 ~ 1.0	0.5	-	-	Cu: 0.2 ~ 0.5; Ti: < 0.15

2.4 CMAS 現場安裝

CMAS 探針製作完成後，經實驗室測試儀器連續運轉、數據蒐集等功能皆正常後，待熱風爐定修時進行安裝。總共 8 支探針，事先規劃安裝於第四區，其中三支(A1/B1/C1)置於除霧器之前，三支(A2/B2/C2)置於第一管群之出口，可做為受除霧及管群阻擋水氣與污垢後之相同材料對照比較。另外兩支(D1/D2)則共同位於除霧器出口兩不同氣流位置做比較。經現場安裝後，各位置所安裝之探針材質如圖 7 所示，其中 A1 及 A2 為 A179、B1 及 B2 為 SUS 444、C1 及 C2 為 SUS 441、D1 及 D2 為 SCR-TEN2。安裝於現場之監測儀 F-40D 為避免日曬雨淋造成故障，使用不銹鋼製之電氣箱進行保護。

由於 F-40D 監測儀只能接四支探針，8 支探針須要兩台 F-40D，兩台 F-40D 連接之探針分別為第一台接 A1 (A179-1)、B1 (SUS 441-1)、C1 (SUS 444-1)及 D2 (SCR-TEN2-2)；第二台接 A2 (A179-2)、B2 (SUS 441-2)、C1 (SUS 444-2)及 D1 (SCR-TEN2-1)。

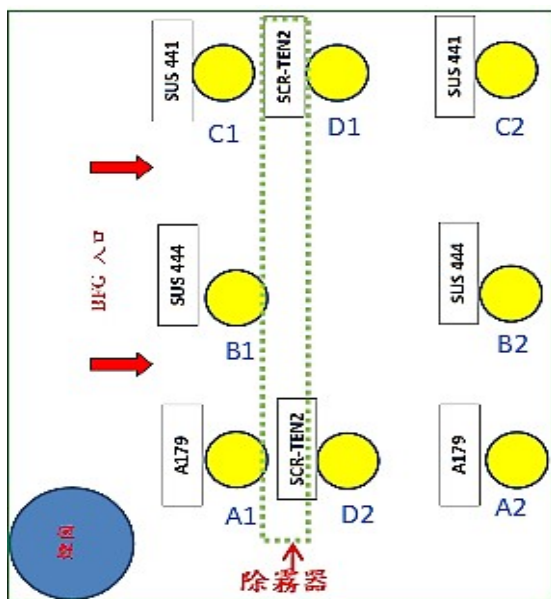


圖 7 各材質 CMAS 探針安裝位置示意圖。
Figure 7 Schematic diagram of the installation positions of various materials CMAS probes.

3. 結果與討論

3.1 監測結果分析

為避免長期監測過程中設備線路發生故障，導致無法取得監測數據，本研究進行兩次數據取樣，除了分段下載數據以防萬一，並藉以了解設備狀況，第一次為 8/29，第二次為 10/21。監測後探針及電極表面狀況如圖 8，可以看到探針插入 HRS 部份表面有沉積及變色狀況，但探針外殼保持完好，各探針大部份電極表面覆蓋一層沉積物須清理後才能看出表面局部腐蝕狀況。

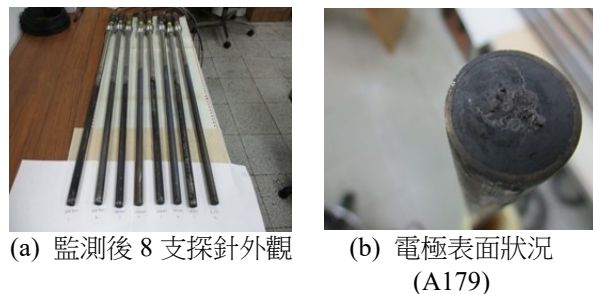


圖 8 監測後探針之外觀及各材質電極表面沉積腐蝕狀況。

Figure 8 Appearance of the probes after monitoring and deposition and corrosion on the electrode surface.

圖 9 為第一台監測儀最大局部腐蝕速率隨時間之變化曲線，所連接之探針位置為 A1 (A179-1)、B1 (SUS 444-1)、C1 (SUS 441-1)及 D2 (SCR-TEN2-2)，各探針編號及顏色如圖上所示，可以看到 A179-1 之局部腐蝕速率最高，SUS 441-1 與 SUS 444-1 互有變化，其中 SUS 441-1 在 8/10 前變化較激烈，研判其可能產生孔蝕現象，在環境中因氣氛或沉積物等引起孔蝕之鈍化與活化，使得測得之最大局部腐蝕電流變化較大。SCR-TEN2-2 其最大局部腐蝕速率最低，變化較平穩，但其所處位置可能與前三支略有不同，其位於除霧器出口，前三支則位於除霧器之前。由監測結果可看出在除霧器之前三支探針中以 A179 材質之腐蝕速率最高，最高峰在前面幾天，可達到 $839 \mu\text{m}/\text{y}$ ，大部皆在 $100 \sim 500 \mu\text{m}/\text{y}$ 之間，因

碳鋼無鈍化之效果，除非腐蝕產物膜很緻密可以阻擋腐蝕因子入侵，否則其腐蝕速率很難下降。最大局部腐蝕速率第二高的為 SUS 441，但其與 SUS 444 相差不大，互有高低，只是 SUS 441 曲線在前半段變化較激烈，而 SUS 444 相對較平緩。圖 9 最後不規則之變化可能是現場在定修前改變氣氛所致。

第二台 F-40D 於 7/7 開始進行腐蝕速率監測。圖 10 為第二台 F-40D 在 7/7 ~ 10/21 期間之最大局部腐蝕速率隨時間變化曲線，可看到 SUS 441 曲線起伏變化最大，其最大局部腐蝕速率約

為 429 $\mu\text{m}/\text{y}$ ，腐蝕活性期變化範圍在 200 ~ 500 $\mu\text{m}/\text{y}$ 之間，腐蝕速率第二大的是 SUS 444，在安裝前一個月內其處於不穩定狀態，上下起伏很大，這些測得之最大局部腐蝕電流有可能不是同一電極，而是變換不定的，但一個月後 SUS 444 變得平穩了。另外 A179 及 SCR-TEN2 兩種材質之曲線則一直都處在低檔平穩狀態，由上述監測結果可看出在此區域不銹鋼耐蝕性反而較碳鋼不好。而 SCR-TEN2 在兩種狀況下其腐蝕速率皆在低檔，表現最好。

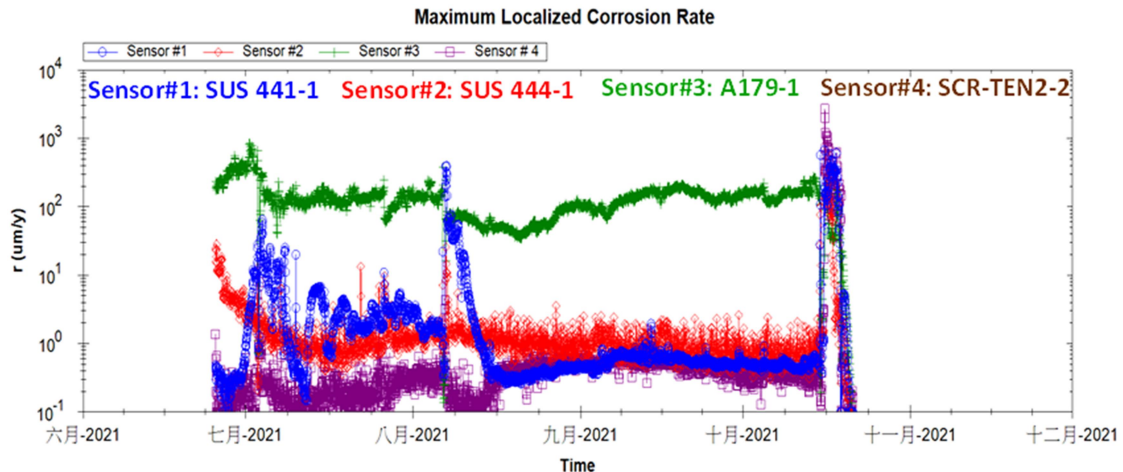


圖 9 第一台 F-40D 監測數據-最大局部腐蝕速率走勢。
Figure 9 Monitoring data of the first F-40D - trend of maximum local corrosion rate.

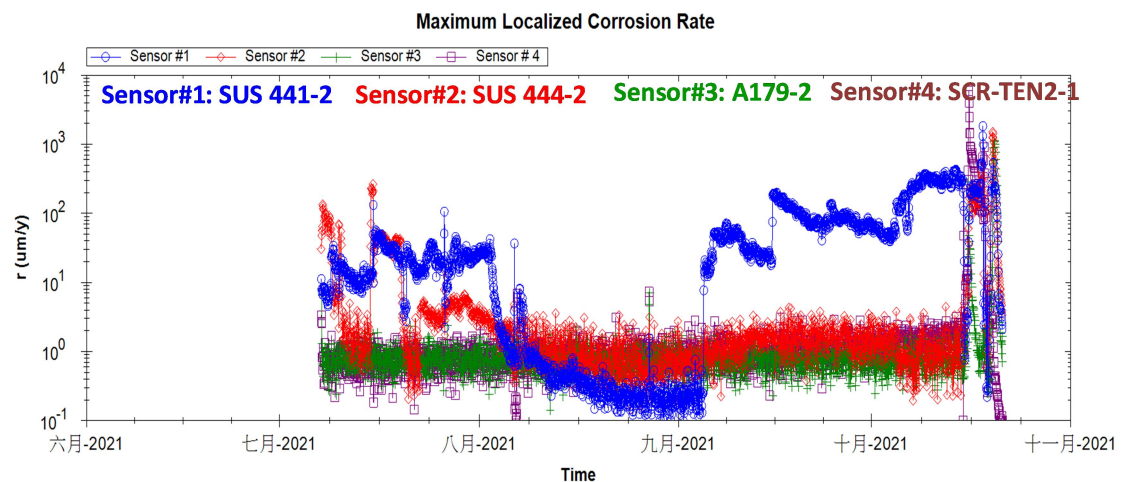


圖 10 第二台 F-40D 監測數據-最大局部腐蝕速率。
Figure 10 Monitoring data of the second F-40D - trend of maximum local corrosion rate.

3.2 電極表面觀察與分析

為觀察電極表面腐蝕狀況，將 8 支探針之電極表面沉積腐蝕物刷除，再以立體顯微鏡進行觀察，結果如圖 11 所示。A179-1 有多個電極表面出現明顯之孔洞，顯示其局部腐蝕相當明顯，此現象與圖 9 所示之最大局部腐蝕速率最高相吻合。A179-2 (A2 位置)表面有銹銹物，但沒有明顯之孔洞產生。SUS 441 不論在 C1 位置或 C2 位置，其電極表面皆可發現大小不等的孔洞，如

圖 11(b)紅色箭頭所示，雖然其大部份電極表面仍保持原來之金屬色，但局部孔蝕產生有可能造成穿孔洩漏。SUS 444 在 B1 及 B2 位置之電極大部份為金屬色，但仍可觀察到局部小孔，如圖 11(c)之紅色箭頭所示，但其孔洞明顯較 SUS 441 小，因此其在腐蝕速率上表現相對較 SUS 441 為佳。SCR-TEN 2 在 D1 及 D2 位置之電極只有水銹顏色，沒有明顯孔洞，表現出最低的局部腐蝕現象。

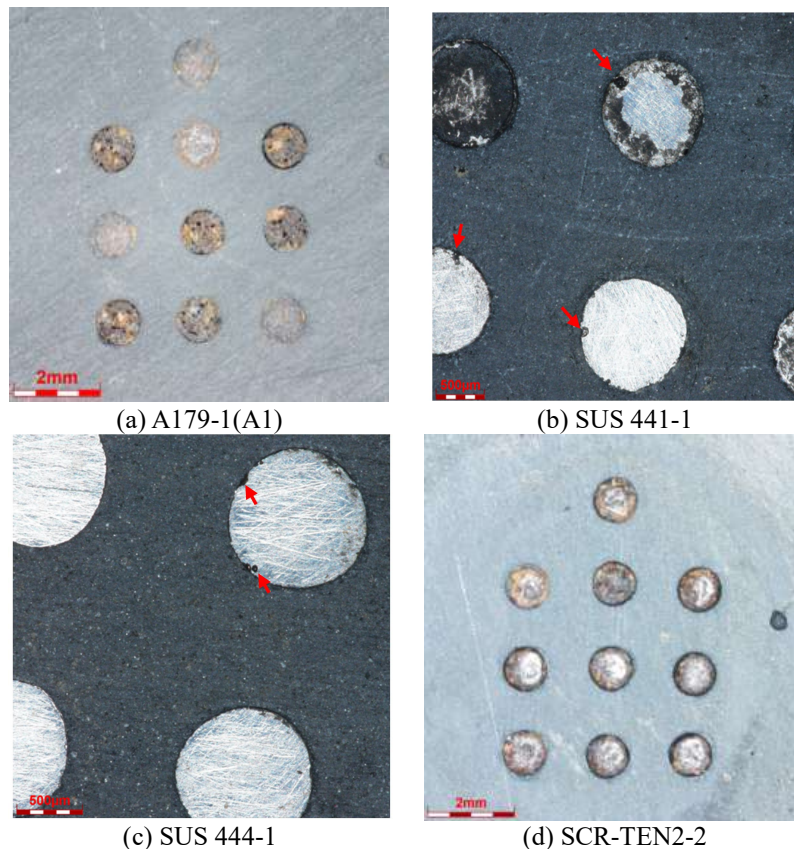


圖 11 監測後之探針電極經清除沉積腐蝕物後之立體顯微鏡觀察圖。

Figure 11 Stereo microscope observation of the probe electrode after the corrosion deposit has been removed.

由上述對最大局部腐蝕速率及電極表面之觀察可發現，基本上兩者是相吻合的，有很高的局部腐蝕速率者，其電極表面會出現較明顯孔洞。

為了解腐蝕因子，因此取 A179-1 探針之電極表面腐蝕沉積物粉末進行分析，其結果如圖 12 所示，分析結果顯示含有大量的 S 元素，並有少量的 Cl 元素，推測其腐蝕現象應為硫酸露

點腐蝕、硫化氫腐蝕及氯離子之孔蝕，由於含有氯離子使得不銹鋼出現較明顯的局部腐蝕現象。

另外對電極表面經清洗後的 8 支探針以 SEM/EDS 進行觀察分析，圖 13 為 SUS 441 之 SEM 圖，可看到局部電極狀況，對電極表面之蝕孔進行局部 EDS 分析，顯示表面有明顯的硫、氯存在，表明電極之腐蝕是在這些硫、氯元

素共同作用下所造成。由於有些探針所處位置不一樣，所接觸環境之溫度、水分及腐蝕因子不同，因此在腐蝕表現上有所區別。

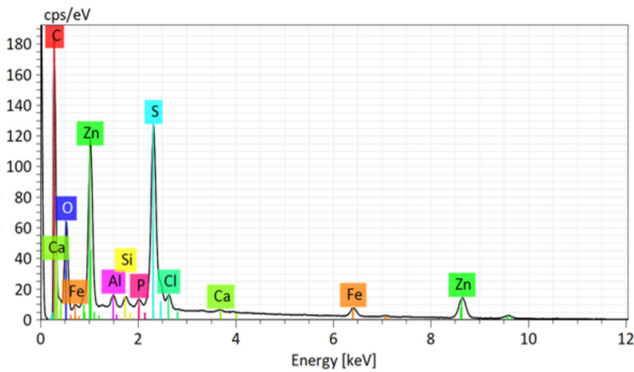
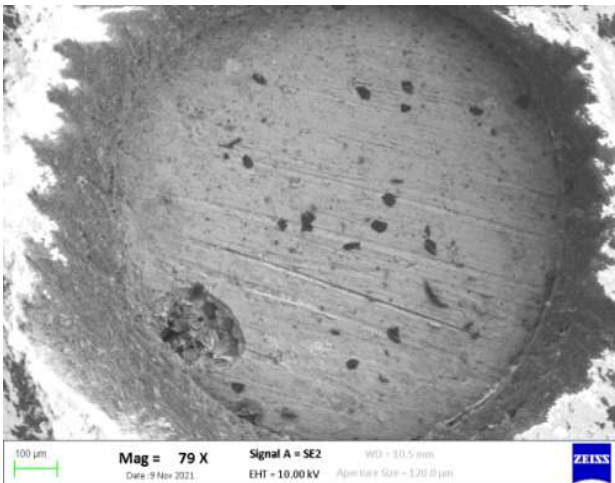
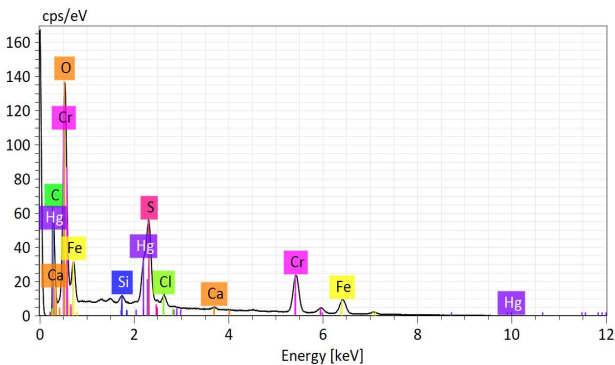


圖 12 探針 A179-1 電極表面腐蝕沉積物之 SEM/EDS 分析。

Figure 12 SEM/EDS analysis of corrosion deposits on the electrode surface of probe A179-1.



(a) 電極表面與蝕孔



(b) 蝕孔處 EDS 分析結果

圖 13 SUS 441-2 探針之電極表面 SEM/EDS 分析觀察圖。

Figure 13 SEM/EDS analysis and observation of the electrode surface of the SUS 441-2 probe.

4. 結論

經在熱風爐廢熱回收系統不同位置裝設 A179、SUS 441、SUS 444 四種不同材質之探針進行腐蝕速率監測結果，有以下幾點結論：

- (1) 在除霧器之前裝設之 A179、SUS 441 及 SUS 444 三種材質之最大局部腐蝕速率以 A179 最高，可達到 839 $\mu\text{m}/\text{y}$ ，一般皆在 100 ~ 500 $\mu\text{m}/\text{y}$ 之間，第二高為 SUS 441 裝設初期變化較激烈，短時期達到 300 ~ 400 $\mu\text{m}/\text{y}$ ，SUS 444 較為平穩，一般都在 30 $\mu\text{m}/\text{y}$ 以下。因此在除霧器前以 SUS 444 耐蝕性最好，SUS 441 其次，A179 最差。
- (2) 在除霧器之後裝設 2 支皆為 SCR-TEN2，其腐蝕速率皆很低，有可能是該位置之環境侵蝕性低，另一種可能是此材質為耐硫酸露點腐蝕鋼，而熱風爐廢氣中含有較高之硫氧化物，會造成硫酸露點腐蝕現象，而 SCR-TEN2 在抵抗硫酸露點腐蝕方面較佳。
- (3) 在第一管群出口裝設之 A179、SUS 441 及 SUS 444 三種材質，SUS 441 表現出最大局部腐蝕速率，最高約 429 $\mu\text{m}/\text{y}$ 。
- (4) 監測後各電極表面所呈現之局部腐蝕孔洞，經觀察後與最大局部腐蝕速率相吻合，局部腐蝕速率高者，其電極表面會出現較為明顯之孔洞。
- (5) 腐蝕因子分析結果顯示，電極表面腐蝕沉積物有大量的 S 元素，並有少量的 Cl 元素，推測其腐蝕現象應為硫酸露點腐蝕或者硫化氫腐蝕及氯離子之孔蝕，由於含有氯離子使得不銹鋼出現較明顯的局部腐蝕現象，SUS 444 由於含 Mo 元素，其在抗孔蝕表現上較 SUS 441 為佳。
- (6) 由本研究之監測結果顯示，A179 材料在除霧器之前耐蝕性差，而 SUS 441 在後端之第一管群出口耐蝕性差，SCR-TEN2 表現相對

較耐蝕，建議可考慮以此做為換熱器材質，但此材料可能不易取得無縫管。其次為使用含 Mo 之肥粒鐵系不銹鋼 SUS 444，較能耐孔蝕。

參考文獻

- [1] 黃國華，「高爐一場設備 EPC 規劃及效益說明」，內部報告。
- [2] “Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications”, NACE International Publication 3T199, Item No. 24203, 1999.
- [3] 鄧彪，鄭麗群，萬澤貴，「線上腐蝕監控技術在煉油裝置的應用」，第六屆海峽兩岸材料腐蝕與防護研討會論文集，論文編號：CN054，2008。
- [4] 「腐蝕監測技術現狀及發展趨勢」，周玉波，邵麗豔，李言濤，侯保榮，於志剛，海洋科學，第 29 卷第 7 期，第 77-80 頁，2005。
- [5] ASTM G217: Standard Guide for Corrosion Monitoring in Laboratories and Plants with Coupled Multielectrode Array Sensor Method, 2016.
- [6] “Coupled multielectrode array systems and sensors for real-time corrosion monitoring - a review”, N. Sridhar and L. Yang, CORROSION, 2006.