

利用射頻濺鍍聚四氟乙烯薄膜應用於氫氣專用不鏽鋼管件 銲道抗腐蝕之研究

黃俊杰¹ 卓昀劭^{1*} 張坤賢¹ 楊秉燁¹ 陳皇諺² 陳鐘賢³ 張慈芬³

¹大葉大學電機工程學系

²大葉大學材料科學與工程學系

^{1,2}515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

³金屬工業研究發展中心

³ 407273 台中市西屯區工業區三十七路 25 號

*ysc@mail.dyu.edu.tw

摘要

氫氣搭配鋼瓶、燃料管路可提供各種形式的應用使氫氣迅速補充用途廣泛，輸送氫氣過程中會使用到的管件或閥件或是管線和組件中的銲接處，可能會因不同環境產生酸鹼環境加速輸送管件及設備腐蝕之產生，如：海中的氯化鎂、酸雨的硫、土壤中碳酸鹽等，而造成管路組件的破壞。因此，本研究利用標準鹽霧試驗與鹽霧混合硝酸分別針對氫能專用的不鏽鋼管件銲道進行不同時間（0-72 小時）環境測試，其中鹽霧測試 72 小時等於模擬陸上放置 3 年海岸放置 1 年。管件銲道 316L 之 NaCl 與 HNO₃ 的環境中測試，在不鏽鋼銲件的表面出現的缺陷皆會加速銲件的腐蝕速度，如刻痕、凹痕、粗糙點等，由於，不鏽鋼的銲接處會在經歷熱處理的過程產生過度氧化反應，經由鹽霧試驗將加速氧化，腐蝕面積由 14.74 % 提升到 22.9 %，大幅超過平板不鏽鋼 1.9% 的腐蝕狀況，HNO₃ 實驗，腐蝕面積由 7.2% 提升到 39.8%，原因是 HNO₃ 會先腐蝕黑色氧化層；接著開始腐不鏽鋼，約 24 小時產生紅鏽造成不鏽鋼永久性損傷與孔隙腐蝕，此為造成氫致開裂的原因之一研究發現，利用濺鍍聚四氟乙烯可以有效阻隔不鏽鋼與水氣接觸，抗腐蝕效果經由腐蝕電化學分析獲得證實。

關鍵詞：氫能應用管件，不鏽鋼，銲道，鹽霧試驗，聚四氟乙烯

On Enhancing Corrosion Resistance of Stainless Steel Pipe Fittings and Welds for Hydrogen Applications through Radiofrequency Sputtering of Polytetrafluoroethylene Films

JUNG-JIE HUANG¹, YUN-SHAO CHO^{1*}, KUN-HSIEN CHANG¹, PING-YEH YANG¹, HUANG-YAN CHEN²,

CHUNG-HSIEN CHEN¹ and TZU-FEN CHANG¹

¹Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

²Department of Materials Science and Engineering, Da-Yeh University



³Metal Industries Research & Development Centre

^{1,2}No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 515006, Taiwan, R. O. C.

³No. 25, 37th Road, Industrial Park, Taichung 407273, Taiwan, R. O. C.

*ysc@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

Hydrogen can be conveniently replenished when hydrogen coupled cylinders and fuel piping are in use. However, during hydrogen transportation, the components such as fittings, valves, piping, and welds can be susceptible to corrosion due to different environmental factors. These factors include magnesium chloride in marine environments, sulfur in acid rain, and carbonates in soil. As a result, the corrosion damage inflicted on the piping components is accelerated. To address this issue, our study conducts environmental tests on stainless steel pipe fittings specifically designed for hydrogen energy applications. These tests involve subjecting the fittings to varying time durations, from zero to 72 hours, using the standard salt spray test and a combination of salt spray and nitric acid. It is worth noting that the 72-hour salt spray test is equivalent to three years in an onshore setting or one year in a coastal environment. Also, we conduct NaCl and HNO₃ environmental tests on the welded joints of the stainless steel pipe fittings, utilizing 316L. Within these environments, the surface of the stainless steel weldments exhibits various defects such as scratches, dents, and rough spots. These defects significantly accelerate the corrosion rate of the weldments. Additionally, the welding process of stainless steel leads to the formation of an excessive oxidized layer. Through the salt spray test, we observe that the corrosion area of this oxidized layer increases from 14.74 to 22.9, surpassing the corrosion rate of flat stainless steel by 1.9%. Furthermore, when HNO₃ is introduced in the experiment, the corrosion area escalates from 7.2% to 39.8%. The increased corrosion shows that HNO₃ is capable of first corroding the black oxide layer and subsequently initiating corrosion on the stainless steel beneath the oxide layer. As a result, red rust forms after approximately 24 hours, causing permanent damage and porosity in the stainless steel. This phenomenon is one of the causes of hydrogen-induced cracking. Our research findings reveal that the application of sputtering polytetrafluoroethylene (PTFE) coating effectively prevents moisture contact with stainless steel, thereby providing corrosion resistance. This conclusion is fully supported by corrosion electrochemical analysis.

Key Words: hydrogen energy application pipe fittings, stainless steel, weld bead, salt spray test, polytetrafluoroethylene

一、介紹

氫氣來源豐富，可由再生能源如風能、太陽能、水力或核電製氫，亦可利用傳統化工業的裂解、重組等副產氫氣，氫氣由於氣體的特性，搭配鋼瓶、燃料管路可提供各種形式的應用使氫氣迅速補充用途廣泛，輸送氫氣過程中會使用到的管件或閥件或是管線和組件中的銲接處，可能會因不同環境如海中的氯化鎂 [1, 11]、酸雨的硫 [16, 19]、土壤中碳酸鹽 [3, 9, 12]等，產生酸鹼環境，並且遭遇高低溫落差加速輸送管件及設備腐蝕之產生 [2, 13]，而造成管路組件的破

壞，氫能應用組件長時間接觸水氣與氧氣將使表面形成腐蝕，氫腐蝕 (hydrogen attack) 是指在高溫、高壓的氫氣環境中，氫原子在設備表面或滲入鋼內部與不穩定的碳化物發生反應生成甲烷，使鋼脫碳，造成氫致開裂 (Hydrogen induced cracking, HIC) [4-6]，隨著腐蝕時間增加將對產品特性造成嚴重影響。針對目前對於氫能應用組件，氫能應用組件常用材料為不鏽鋼，其中 316 不鏽鋼 [17-18]、2205 雙相不鏽鋼為主 [7]，在含氯化物的環境中抗點蝕及裂縫腐蝕的性能佳，於高低溫落差加速不鏽鋼腐蝕，此外高強度鋼



利用射頻濺鍍聚四氟乙烯薄膜應用於氫氣專用不鏽鋼管件銲道抗腐蝕之研究

脆性過高，管路拉伸應力表面缺陷都會增加氫氣滲入，為了有效抑制氫氣在儲氫罐或輸送管道中的擴散，有以下方式：

(1) 使不鏽鋼與氫氣的阻隔，利用塗層保護，如環氧樹脂或電鍍鎳、錫等 [15] 複合填料的疏水性可防止腐蝕介質的進一步滲透；(2) 材料本身利用退火增加波來鐵比例 [14]；(3) 保持材料的完整性，穩定材料環境溫度 [8]、(4) 銲接過程需要增加助銲劑減少銲接處的損傷等 [10]，由此可知，目前對於氫能應用材料抗腐蝕研究是氫能研究的重點之一，原因在於目前的抗腐蝕方式以塗層類來說，因為氫氣在儲存和運輸過程中的惡劣腐蝕或潮濕條件也會導致金屬儲罐和管道上的塗層失效，從而導致氫氣使用的危險和高風險，因此緻密塗層與具備疏水效果是重點，本研究將針對氫能應用不鏽鋼與管件銲道進行標準鹽霧測試及耐酸性測試，並且利用射頻濺鍍聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 薄膜應用於氫能儲運之管件銲道的抗腐蝕技術，PTFE 材料具備了抗腐蝕、耐酸鹼和超疏水的特性作為抗腐蝕塗層有其優勢，目前半導體製程採用特殊氣體管路中，氫氣管路常採用 316 L 不鏽鋼管內採用 PTFE 管形成雙套管，氫氣通常以船運形式到港口，儲氫相關材料會放置於海岸邊，本研究分析運輸氫氣專用不鏽鋼材料銲接前後的對於鹽霧測試的差異並鍍膜 PTFE 對不鏽鋼抗腐蝕的可行性進行評估。

二、實驗方法

本研究針對氫能應用不鏽鋼包含平板材料與管件銲道進行鹽霧實驗並模擬接觸酸性物質後的材料特性，所採用不鏽鋼 316L 材料之成份比例 (%) 為 C (0.009)、Si (0.25)、Mn (0.21)、P (0.022)、S (0.001)、Ni (14.70)、Cr (16.7)、Mo (2.3)、O (0.001)，光學顯微鏡觀察腐蝕位置、利用 ImageJ 影像分析軟體判斷腐蝕面積，最後利用濺鍍聚四氟乙烯薄膜，利用電化學腐蝕法分析腐蝕狀況。

(一) 鹽霧試驗

鹽霧試驗裝置的組成包含噴霧室、試驗用含鹽液貯槽、試片支架、噴霧液取樣容器、噴霧具備溫度調節設備、鹽水補給桶、壓縮空氣之供給設備及空氣飽和器等。

本論文將針對氫能應用零組件進行鹽霧標準測試以及實際可能遭遇酸鹼溶液之腐蝕相關問題分析，本實驗訂定標準是依據美國材料標準協會制 ASTM B-117 規範，採用 5% 的鹽水溶液的 pH 值範圍在 6.5-7.2，霧化成霧，加熱櫃

表 1. 實驗參數表

Parameter	Value
Power (W)	200
Pressure (mTorr)	20
Ar ₂ (sccm)	30
Temperature (°C)	120
Thickness (nm)	150

保持在 35°C 測試，測試時間為 2 hr、24 hr、48 hr、72 hr，其中標準 72 小時鹽霧測試 (NSS) 等於 360 海岸天數。擬酸性鹽霧則添加 HNO₃ 溶液濃度 68 % 至 5% 鹽溶液中，調整其 pH 值至 4 進行測試。

(二) 濺鍍製程

本研究經由實驗室標準清洗流程後，將試片放入大氣電漿設備進行前處理，使基板具備親水特性，此步驟能有效的提升薄膜均勻性，後接著利用射頻濺鍍進行進行材料聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE)，實驗參數如表 1，經由先期研究本數據水接觸角為 115°，具備良好的疏水效果，厚度 150 nm 沉積速率為 5 nm/sec，濺鍍結束後進行表面形貌與腐蝕分析。

三、結果與討論

圖 1 (a) 為不同時間進行鹽霧測試之 316L 表面形貌腐蝕位置，316L 於不同時間 2hr、24hr、48hr、72 hr 之鹽霧測試過程中，採用光學顯微鏡 500 倍進行分析，經過鹽霧測試 24 hr 腐蝕狀況開始產生，72 hr 最為明顯，原因在於不鏽鋼於高鹽高濕環境的作用下，容易引起的破壞或變質，氯離子容易穿透金屬表面的氧化層和防護層與內部金屬發生電化學反應引起的。此外，氯離子也容易被吸附在金屬表面的孔隙、裂縫排擠並取代氧化層中的氧，將會使氧化物置換成氯化物，使原本鈍化態表面開始活化加速腐蝕，故鹽霧環境的氯化物的鹽濃度，會使腐蝕速度提高。圖 1 (b) 為不同時間進行鹽霧測試之 316L 表面形貌腐蝕面積率，未處理為 0.03%，腐蝕 2 hr 提升至 0.2%，接著 24 hr、48 hr、72 hr 微幅增加，腐蝕面積分別為 0.9%、1.61%、1.97%，不鏽鋼在氯離子環境下的腐蝕包含應力腐蝕、孔蝕、晶間腐蝕等。

圖 2 (a) 為不同時間進行鹽霧混 HNO₃ 測試之 316L 表面形貌腐蝕位置，同樣採用光學顯微鏡 500 倍進行分析，經過鹽霧混 HNO₃ 測試 2 hr 腐蝕就開始產生腐蝕，72 hr 最為明顯，pH 值達 3 腐蝕面積增加。圖 2 (b) 為不同時間進行鹽霧混 HNO₃ 測試之 316L 腐蝕面積率，未處理為 0.06%，



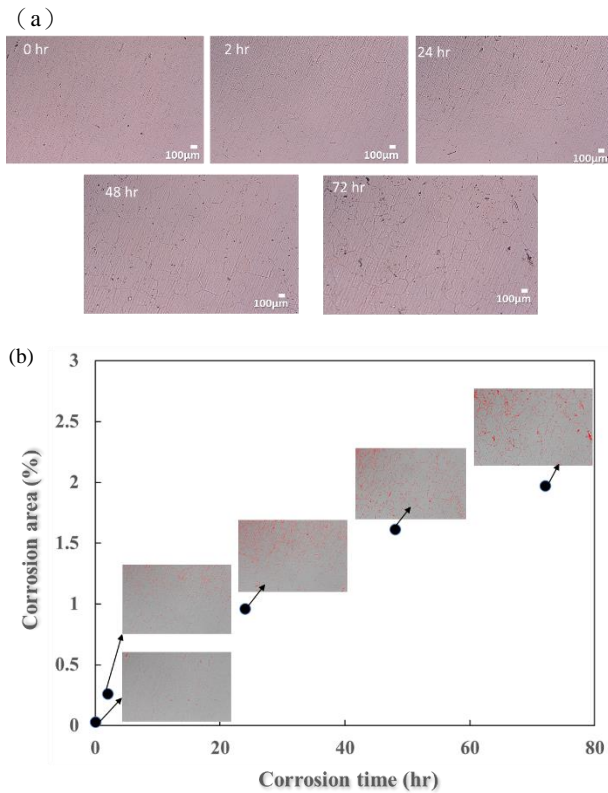


圖 1. 316L 進行不同時間鹽霧測試之表面形貌
(a) 腐蝕位置、(b) 腐蝕面積率比較圖

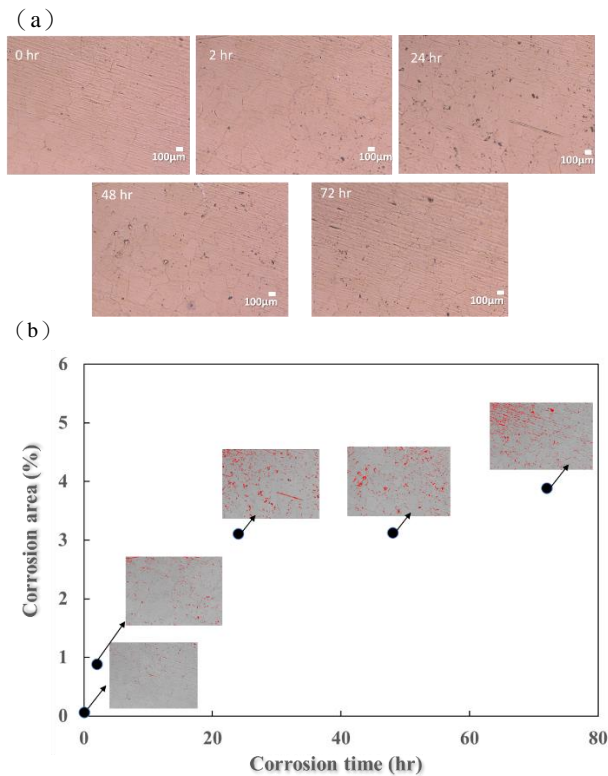


圖 2. 316L 進行不同時間鹽霧混 HNO₃ 測試之表面形貌
(a) 腐蝕位置、(b) 腐蝕面積率比較圖

腐蝕 2 hr 提升至 0.8 %，接著 24 hr、48 hr、72 hr 微幅增加，腐蝕面積分別為 3.11 %、3.13 %、3.89 %，腐蝕速度趨於平緩，因鹽霧 72 小時等於陸上環境 3 年海上環境 1 年，腐蝕影響有限。

圖 3 (a) 為氫能應用管件銲道經由不同時間進行鹽霧測試之 316L 表面形貌腐蝕位置，採用光學顯微鏡 500 倍進行分析，經過鹽霧測試 24 hr 後腐蝕狀況產生，銲道的腐蝕狀況明顯，316L 銲道於不同時間 2hr、24hr、48hr、72hr 之鹽霧測試過程中，表面黑化狀況明顯，推測銲道處容易造成腐蝕。圖 3 (b) 為氫能應用管件銲道經由不同時間進行鹽霧測試之 316L 腐蝕面積測試，未處理 10.27%，腐蝕 2 hr 提升至 14.88 %，接著 24 hr、48 hr、74 hr 微幅增加，腐蝕面積分別為 14.88 %、18.33 %、22.9 %，鹽霧將加速銲道腐蝕面積黑化造成過度氧化層。原因在不鏽鋼進行銲接過程中，銲件的表面會出現缺陷如刻痕、凹痕、都會加速腐蝕速度，一般不鏽鋼中的鉻可以讓表面形成鈍化膜具備耐腐蝕作用。但是銲接處不鏽鋼使用熱加工，會因為化學反應產生過度氧化層，經由鹽霧試驗後，試片腐蝕狀況更加嚴重，此現象將從加工物的表面慢慢地受到腐蝕，幾乎達到深處為止，

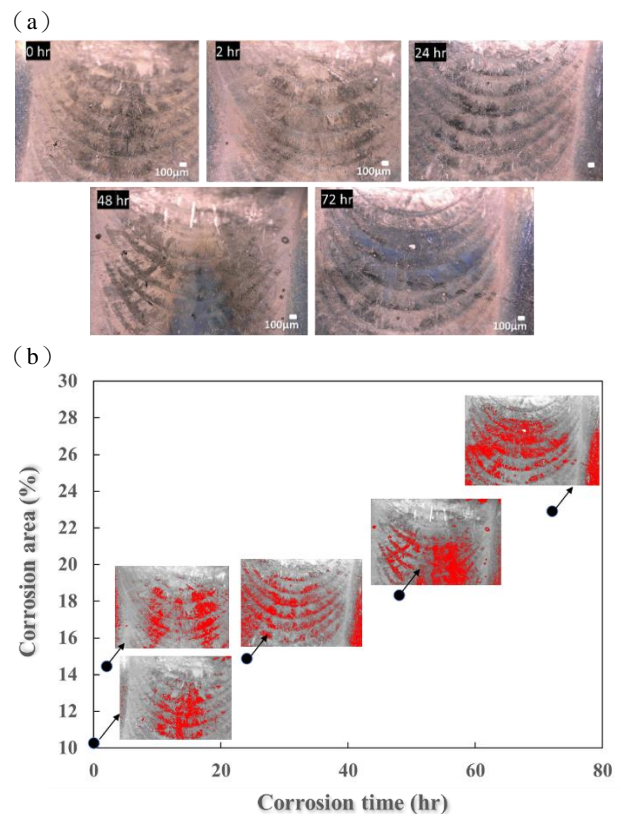


圖 3. 316L 管件銲道進行不同時間鹽霧測試之 316L 銲道腐蝕，(a) 表面形貌與 (b) 腐蝕面積率



利用射頻濺鍍聚四氟乙烯薄膜應用於氫氣專用不鏽鋼管件銲道抗腐蝕之研究

致造成耐久性明顯的下降，因此這些間隙腐蝕將是造成氫致開裂的主要原因之一。

圖 4 (a) 為 316L 管件銲道進行不同時間鹽霧混 HNO_3 測試之表面形貌腐蝕位置， HNO_3 會先腐蝕黑色氧化層，接著開始腐蝕氧化層下的不鏽鋼產生紅鏽，使材料強度永久損傷。圖 4 (b) 316L 管件銲道進行不同時間鹽霧混 HNO_3 測試之腐蝕面積，未處理 4.15%，腐蝕 2 hr 提升至 7.2%，接著 24 hr、48 hr、72 hr 微幅增加，腐蝕面積分別為 21.1%、32.02%、39.8% 腐蝕狀況明顯，接著進行腐蝕面積率的比較如圖 5。

圖 5 (a) 為平板 SUS 316L 之 NaCl 與 HNO_3 腐蝕比較，鹽霧試驗 2-72 小時，腐蝕面積率由僅 0.6% 提升至 1.9%，加入 HNO_3 腐蝕狀況由 0.8% 提升至 3.89%，若將同樣實驗條件應用到管件銲道如圖 5 (b) 管件銲道 316L 之 NaCl 與 HNO_3 的環境中測試，在不鏽鋼銲件的表面出現如下缺陷如刻痕、凹痕、粗糙點皆會加速銲件的腐蝕速度，銲接處不鏽鋼利用熱加工，會因化學反應而產生過度氧化層，經由鹽霧試驗將加速氧化，腐蝕面積由 14.74% 提升到 22.9%，大幅超過平板 1.9% 的腐蝕狀況，接著加入 HNO_3 ，腐蝕面積由 7.2% 提升到 39.8%，原因是 HNO_3 會先腐蝕黑色氧化層，接著開始腐蝕氧化層下的不鏽鋼。

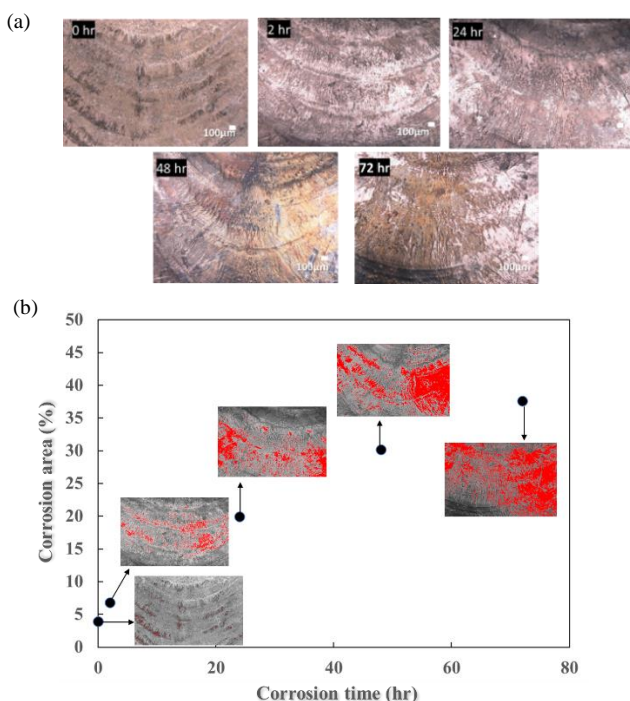


圖 4. 316L 管件銲道進行不同時間鹽霧混 HNO_3 測試之 316L 銲道腐蝕，(a) 表面形貌與 (b) 腐蝕面積率

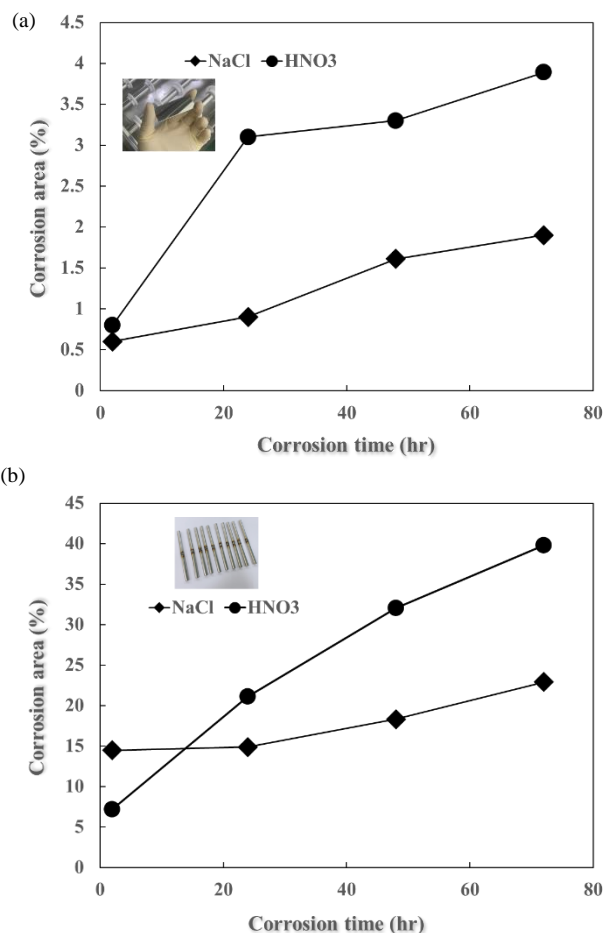


圖 5. (a) 平板 316L 與 (b) 管件銲道 316L 之腐蝕面積率比較

圖 6 為 316L 不同時間鹽霧測試後採用掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 分析圖放大倍率 10,000 倍，可以觀察出 316L 經由不同時間鹽霧測試，2 hr 開始表面形貌會逐漸產生隙縫與孔洞，這些隙縫會使氫吸附，引起的氫致裂紋的產生和擴展 [11]。

圖 7 為 316L 不同時間鹽霧混 HNO_3 測試後之 SEM 分析圖與圖 6 類似隨著鹽霧時間表面形貌將產生更多的隙縫，並且於 48 小時開始，表面形貌逐漸產生隙縫，並從均勻腐蝕逐漸形成晶界腐蝕，隙縫增加加速反應。

圖 8 為 PTFE/SUS316L 與 SUS316L 進行 72 hr 鹽霧混 HNO_3 測試之 SEM 圖，PTFE 主要採用濺鍍設備進行鍍膜，PTFE 水接觸角 115 度具備疏水特性，薄膜厚度為 150 nm，覆蓋於 316L 表面，經由觀察鹽霧 72 hr 後 PTFE/SUS316L 表面形貌完好無損，未鍍膜之 SUS316L 已產生孔洞，因此如果可以有效阻隔 SUS316L 與水氣、空氣接觸，就可以避



免基板因為腐蝕產生間隙腐蝕問題，接著進行腐蝕電化學分析。

圖 9 為 PTFE/SUS316L 與 SUS316L 進行 72 hr 鹽霧混 HNO₃ 測試後腐蝕電化學分析圖與 SUS316L 相比，PTFE/SUS316L 樣品的曲線向上和向左移動。每條塔菲爾曲線主要由兩個組成線，並且線在其線性區域中的延伸將導致交叉點，對應於腐蝕電壓 (V_{corr}) 和腐蝕電流 (I_{corr})。高 V_{corr} 和低 I_{corr} 代表更好耐腐蝕性能。未塗層的 316L 顯著向下移動，樣品顯示 V_{corr} 下降耐腐蝕性降低，因此 PTFE/SUS316L 確實具備抗腐蝕應用的可行性，並且與圖 8 之 316L 進行不同時間鹽霧混 HNO₃ 測試之 SEM 圖相同，因此只要能隔絕不鏽鋼表面與水氣接觸可以提高材料的抗腐蝕性質。

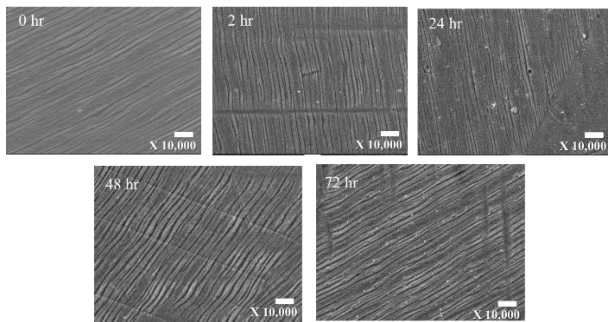


圖 6. 316L 進行不同時間鹽霧測試之 SEM 圖

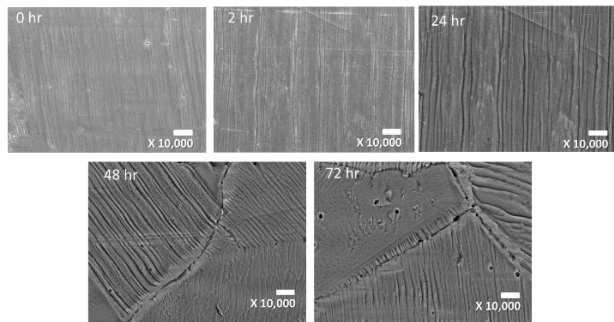


圖 7. 316L 進行不同時間鹽霧混 HNO₃ 測試之 SEM 圖

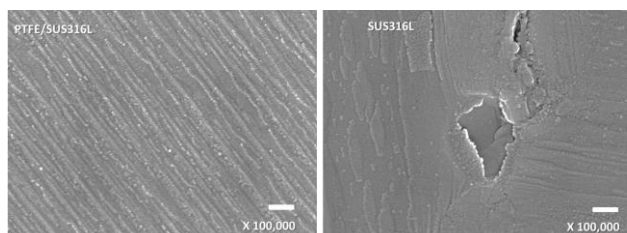


圖 8. PTFE/SUS316L 與 SUS316L 進行 72hr 鹽霧混 HNO₃ 測試之 SEM 圖

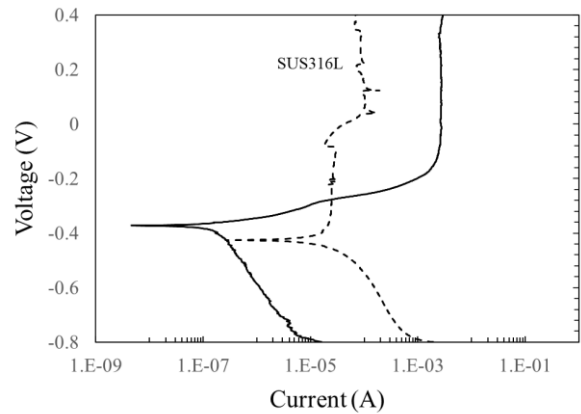


圖 9. PTFE/SUS316L 與 SUS316L 進行 72 hr 鹽霧混 HNO₃ 測試後腐蝕電化學分析圖

四、結論

本研究建立了標準鹽霧試驗與鹽霧混合硝酸之酸性鹽霧實驗，分別針對氫能專用的不鏽鋼平板與不鏽鋼管件鉸道進行(0-72 小時)的實驗測試，研究結果得知，平板 SUS 316L 具有一定程度耐 NaCl 與 HNO₃ 腐蝕性，鹽霧試驗 2-72 小時，腐蝕面積率由僅 0.6 % 提升至 1.9 %，加入 HNO₃ 後腐蝕狀況由 0.8 % 提升至 3.89 %，因鹽霧 72 小時等於陸上環境 3 年、海上環境 1 年，但腐蝕狀況影響有限。不鏽鋼鉸件的表面利用熱加工，會因化學反應而產生過度氧化層，經由鹽霧試驗將加速氧化，腐蝕面積由 14.74 提升到 22.9，大幅超過平板 1.9% 的腐蝕狀況，接著加入 HNO₃ 實驗，腐蝕面積由 7.2% 提升到 39.8%，原因是 HNO₃ 會先腐蝕黑色氧化層，接著開始腐蝕氧化層下的不鏽鋼後約 24 小時產生紅鏽，並使不鏽鋼永久性損傷與孔隙，此為造成氫致開裂的原因之一，因此可以針對容易腐蝕的位置如鉸道處經過酸洗後，進行 PTFE 鍍膜，可以有效形成保護層。

誌謝

本文承國科會產學合作計畫大氣電漿前處理結合濺鍍抗菌材料應用於織襪技術開發，111-2622-E-212-005-與金屬工業研究發展中心產學合作計畫氫能應用組件耐候度之材料特性資料庫建立與抗腐蝕技術可行性評估，補助完成，在此表達十分感謝之意。

參考文獻

1. Cho, D. M., J. S. Park, S. G. Hong and S. J. Kim (2023)



- Corrosion behaviors according to the welding process of superduplex stainless steel welded tubes: Gas tungsten arc welding vs. Laser beam welding. *Corrosion Science*, 216, 111108.
- Dai, J., H. Feng, H. B. Li, Z. H. Jiang, H. Li, S. C. Zhang, P. Zhou and T. Zhang (2020) Nitrogen significantly enhances corrosion resistance of 316L stainless steel in thiosulfate-chloride solution. *Corrosion Science*, 174, 108792.
 - Guan, L., Z. Ye, J. Zhong, Y. Li and Y. Zhang (2022) Enhancement of corrosion resistance of 304L stainless steel treated by massive laser shock peening. *Optics and Laser Technology*, 154, 108319.
 - He, P., D. Suo, W. Wu, L. Yin, W. Dai, B. Shang, Y. Liu, Y. Sun, Y. Jiang and J. Li (2023) Effects of hydrogen on the crevice corrosion behaviors of duplex stainless steel 2205. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 101-110.
 - Li, G., M. Du, J. Wang, G. Huang and L. Ma (2023) Effect of hydrogen on pitting corrosion of 2205 duplex stainless steel under alternating dry/wet marine environment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(47), 17983-17994.
 - Liu, Y., X. Zhong, Z. Wang, K. Campbell, L. Zhou, X. Yuan, J. Yu, L. Li and J. Hu (2023) Improved corrosion resistance of super austenite stainless steel by B-induced nucleation of Laves phase. *Corrosion Science*, 213, 110987.
 - Mousavi Anijdan, S. H., M. Sabzi, N. Park and U. Lee (2022) Sour corrosion performance and sensitivity to hydrogen induced cracking in the X70 pipeline steel: Effect of microstructural variation and pearlite percentage. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 199, 104759.
 - Meda, U. S., N. Bhat, A. Pandey, K. N. Subramanya and M. A. Lourdu Antony Raj (2023) Challenges associated with hydrogen storage systems due to the hydrogen embrittlement of high strength steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(47) · 17894-17913.
 - Pan, G., J. Li, G. Zhang, Y. Zhan and Y. Liu (2023) Binder-integrated Bi/BiOI/TiO₂ as an anti-chloride corrosion coating for enhanced photocathodic protection of 304 stainless steel in simulated seawater. *Journal of Alloys and Compounds*, 938, 168469.
 - Park, J., T. T. Nguyen, H. M. Heo and U. B. Baek (2023) Hydrogen-related with the change in mechanical properties and deformation behavior of 316 L austenite stainless steel. *Materials Characterization*, 197, 112666.
 - Rezaei, S. D., S. Shannigrahi and S. Ramakrishna (2017) A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, 159, 26-51.
 - Talha, M., Q. Wang, M. Xu, Y. Ma, Z. Li and Y. Lin (2021) Improved corrosion protective performance of hybrid silane coatings reinforced with nano ZnO on 316 L stainless steel. *Colloid and Interface Science Communications*, 42, 100411.
 - Wang, L., Y. Wu, S. Yu, Y. Liu, B. Shi, E. Hu and H. Hei (2022) Investigation of hydrophobic and anti-corrosive behavior of Cr-DLC film on stainless steel bipolar plate. *Diamond and Related Materials*, 129, 109352.
 - Wu, S. D., W. Y. Cheng, Jason H. C. Yang, C. H. Yang and S. Y. Liao (2016) The corrosion protection study on inner surface from welding of aluminum alloy 7075-T6 hydrogen storage bottle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 570-596.
 - Yuan, S., Y. Sun, C. S. Yang, Y. Zhang, C. Cong, Y. Yuan, D. Lin, L. Pei, Y. Zhu and H. Y. Wang (2022) A novel dual-functional epoxy-based composite coating with exceptional anti-corrosion and enhanced hydrogen gas barrier properties. *Chemical Engineering Journal*, 449, 137876.
 - Yang, C., X. Jiang, W. Zhang and X. Wang (2022) Enhancing stress corrosion cracking resistance of machined surface via surface mechanical grinding treatment for AISI 316 L stainless steel. *Materials Characterization*, 194, 112493.
 - Yu, H. L. Q. X. Wu, J. Wang, L. Q. Liu, B. Zheng, C. Zhang Y. G. Shen, C. L. Hung, B. Zhou and J. R. Jia (2023) Finite element modeling of hydrogen atom diffusion and distribution at corrosion defect on aged pipelines transporting hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(36), 13566-13577.
 - Yuan, S., Y. Sun, C. Cong, Y. Liu, D. Lin, L. Pei, Y. Zhu and H. Wang (2023) A bi-layer orientated and functionalized graphene-based composite coating with unique hydrogen gas barrier and long-term anti-corrosion



-
- performance. *Carbon*, 205, 54-68.
19. Zhu, M., F. He, Y. Yuan, S. Guo and G. Wei (2021) A comparative study on the corrosion behavior of CoCrNi medium-entropy alloy and 316L stainless steel in simulated marine environment. *Intermetallics*, 139, 107370.
- 收件：112.07.14 修正：112.08.11 接受：112.09.14

