

加氫水化學與鉑覆膜對敏化304不銹鋼之應力腐蝕龜裂之影響

李國台*、葉宗洸**、蔡春鴻*

The Influence of Hydrogen Water Chemistry and Platinum-coating on Stress Corrosion Cracking of Sensitized Type 304 Stainless Steels

K. L. Lee, T. K. Yeh, and C. H. Tsai

摘要

沸水式反應器 (Boiling Water Reactor, BWR) 的結構組件中應用很多不銹鋼材料，其主因在於不銹鋼通常具備良好的抗蝕能力；但在多年運轉後，不少反應器的壓力槽內部組件依然出現沿晶應力腐蝕龜裂 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC) 的問題。近年來，加氫水化學 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) 搭配貴重金屬化學添加 (Noble Metal Chemical addition, NMCA) 覆膜處理技術，逐漸被廣泛用以解決不銹鋼於 BWR 環境中的 IGSCC 問題。理論上，從水的再結合反應預測，在加氫水化學環境下當水中氫氧莫爾比 (M_{H_2O}) 大於 2 時，組件材料表面的電化學腐蝕電位 (Electrochemical Corrosion Potential, ECP) 值會被降低，不過受到貴重金屬催化作用的影響，即使 M_{H_2O} 小於 2 仍然有 ECP 下降的效果。本研究在不同 M_{H_2O} 的水化學環境中，進行不同披覆條件試片的慢應變速率拉伸 (Slow Strain Rate Tensile, SSRT) 試驗，並同時監測 ECP 值的連續變化。實驗結果顯示，貴重金屬催化作用導致 ECP 下降的效果必須在高溶氫水化學環境較為明顯，無論有無貴重金屬覆膜的試片在 HWC 環境均無 IGSCC 發生。

關鍵詞：加氫水化學、貴重金屬化學添加、沿晶應力腐蝕龜裂、電化學腐蝕電位、慢應變速率拉伸

Abstract

The reactor internal structural components in boiling water reactors (BWRs) are composed of stainless steel (SS) materials due to their good corrosion resistant properties. However, vessel internal cracking (VIC) problems due to intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) were still found. Two technologies, hydrogen water chemistry (HWC) and noble metal chemical addition (NMCA), have been proposed to mitigate VIC problems. In theory, the

* 國立清華大學工程與系統科學系

Department of Engineering and system science, National Tsing Hua University

** 清華大學原子科學技術發展中心

Nuclear Science and Technology Development Center, National Tsing Hua University

electrochemical corrosion potential (ECP) on surface of component material is reduced when the molar ratio of hydrogen to oxygen (M_{H_2O}) in H_2O recombination reactions is greater than 2. It was also found that even ECP would be reduced with the catalysis of noble metals when M_{H_2O} is smaller than 2. In this study, the specimens of different coating condition were tested in the water chemistry of various M_{H_2O} by slow strain rate tensile (SSRT) and continuous monitoring of ECP. The result came out that ECP reduction was more profound under the condition of higher dissolved hydrogen. In HWC environment, no IGSCC occurred regardless of specimens with or without noble metal coating.

Key words : hydrogen water chemistry, noble metal chemical addition, intergranular stress corrosion cracking, electrochemical corrosion potential, slow strain rate tensile

一、前言

目前全世界核能電廠防蝕技術的發展除了採用新的結構材料及相關技術外，另一重點是改善現役電廠材料老化劣化的問題。而在沸水式電廠 (Boiling Water Reactor, BWR) 中改善爐水水化學的加氫水化學 (Hydrogen Water Chemistry, HWC) 技術算是一項較為有效的方式，所以國外有許多的核能電廠均予以採用^{(1)~(8)}。爐水受到輻射分解 (Radiolysis) 反應產生過氧化氫，過氧化氫很容易分解成氧和水，反應持續進行會使得爐水形成具有氧化性的水環境，這將是形成 IGSCC 的環境成因。為了降低溶氧，利用在爐水中注入的氫氣來與氧或過氧化氫結合形成水，如此能夠抑制氧化劑的濃度，降低爐水的氧化性。此外，在電化學反應上，氫會在材料表面上進行氧化反應而保護材料，並使電化學腐蝕電位 (Electrochemical Corrosion Potential, ECP) 得以下降⁽⁹⁾。不過由於爐心內有些組件無法受到 HWC 所提供的防蝕保護，而添加較多的氫又會造成工作人員輻射劑量的提昇⁽⁵⁾。因此出現貴重金屬披覆處理 (Noble Metal Treatment, NMT) 技術的發展以彌補 HWC 的缺點^{(10)~(14)}。NMT 技術的應用除降低注氫量的需求外，更可因此避免輻射劑量增加的副作用，其基本原理是透過貴重金屬的催化作用加速氫的氧化反應，以提供爐水中氧和過氧化氫的還原反應中所需的電子，而使金屬具備更好的抗蝕能力。但是有研究指出⁽¹⁵⁾，倘若爐水

中未加氫或加氫量不夠時，例如一般水化學 (Normal Water Chemistry, NWC) 的情況下，NMT 技術反而有可能出現加速金屬氧化的負面效果。

在水再結合反應中理論的氫氧計量比 (Stoichiometric Ratio) 的理想值是 M_{H_2O} 等於 2，但由於貴重金屬對於氫的氧化反應催化較強烈， M_{H_2O} 不需要達到 2 就可對 ECP 值有明顯的下降效果，這將可以減低電廠實施 HWC 時的注氫量，至於 M_{H_2O} 能夠低到多少，貴重金屬還有保護的效果，乃是大家很關注的重點。

為了驗證前述的論點，我們設計一系列的慢應變速率拉伸 (Slow Strain Rate Tensile, SSRT) 試驗與 ECP 的量測實驗，用以檢視實施貴重金屬化學添加 (Noble Metal Chemical Addition, NMCA) 覆膜處理 304 不銹鋼於不同水化學環境中的腐蝕行為與指標。

二、實驗

SSRT 試驗和 ECP 的量測是使用狗骨頭型的板狀 304 不銹鋼試片，如圖 1。進行實驗之前試片在充滿氫氣的爐內施以溫度 650°C 約 24 小時的熱敏化處理。在熱敏化處理後進行機械拋光以去除表面的氧化層，拋光好的試片浸泡在 288 °C，200 ppb 溶氧的循環水中進行 360 小時的預氧化膜生成處理。本文中的所有試片條件共分為三種系列，其中兩系列貴

重金屬（鉑）覆膜處理過程是使用濃度100 ppb 的 $\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$ 溶液在溫度 150 °C 分別靜置 12 小時 (NMCA-12 系列) 和 24 小時 (NMCA-24 系列)，另一系列是不進行覆膜處理，單純用預氧化膜生成處理試片 (Prefilm 系列) 來做對照。

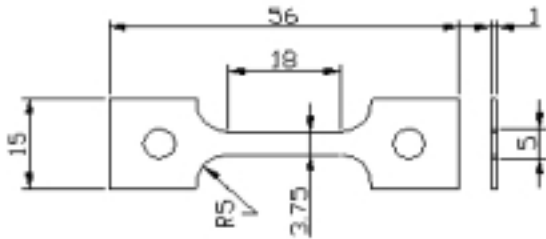


圖 1. 拉伸試片尺寸 (單位: mm)。

Figure 1. Sample size of tensile test

SSRT 試驗是在一模擬 BWR 高溫高壓環境下 (無輻射源) 的動態循環水迴路中，以 $3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 的定應變速率來進行測試，試片置於迴路中的壓力釜，溫度和壓力條件分別是 288 °C 和 8.3 MPa。實驗進行的水化學環境分為三種，其一是室溫下水中溶氧濃度 300 ppb 的條件，另外二種則是相同的溶氧濃度配合溶氫濃度 10 ppb 和 50 ppb 的條件，關於水化學環境穩定的控制是將所需氣體先在一空間槽內混合，接著通過氣泡石注入水中以產生細密的氣泡來增加氣體溶解量，水中溶氫溶氧濃度是藉由氫氣、氧氣、氮氣的氣體流量控制器來調整。此外，在室溫下水質的導電度和流量分別約為 $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 和 20 mL/min。

ECP 的量測是在另一相同的高溫高壓水迴路系統進行，並採用含飽和 KCl 電解液的 Ag/AgCl 參考電極量得不同溶氫和溶氧濃度水環境下不同覆膜處理條件試片的電位值。最後對於試片破斷面的分析和沿晶應力腐蝕龜裂 (Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC) 分布比率是在掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 下觀察。另外，每個試片的最大應力值和拉伸比率也會在本報告中討論。

三、結果與討論

3.1 SSRT 試驗

表 1 和表 2 為在不同條件下最大應力值、總伸長率、IGSCC 比率和穿晶應力腐蝕龜裂 (Transgranular Stress Corrosion Cracking, TGSCC) 比率的試驗數據。表 1 的數據取自於 300 ppb 的溶氧未加氫的環境，接受測試的試片分別是一片預氧化膜試片以及兩片鉑覆膜 24 小時試片，鉑覆膜 12 小時試片在此環境並沒有進行試驗；而表 2 的數據取自於溶氧 300 ppb 和溶氫 50 ppb 的環境，三種 (Prefilm、NMCA-12、NMCA-24) 系列的試片都有進行試驗。

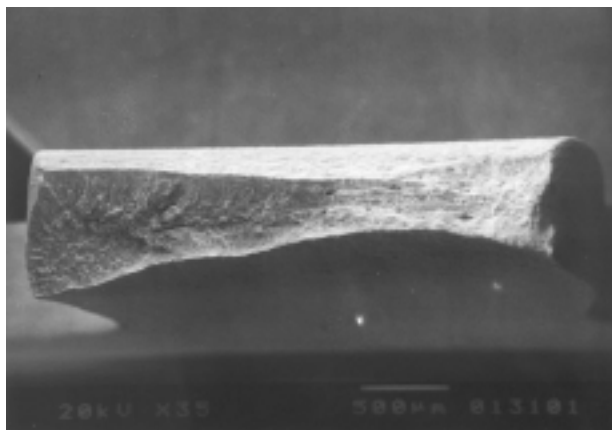
表 1. 溶氧濃度 300 ppb 不同覆膜試片的 SSRT 結果
Table 1. The SSRT results of different coating specimens at 300 ppb $[\text{O}_2]_{\text{dis}}$

試片	最大拉伸應力 (MPa)	拉伸比率 (%)	IGSCC 比率 (%)	TGSCC 比率 (%)
Prefilm	109	20.6	9.8	15.9
NMCA-24 (1)	107	15.6	30.5	7.1
NMCA-24 (2)	147	20.0	27.4	6.5

表 2. 溶氧濃度 300 ppb 和溶氫濃度 10 ppb 不同覆膜試片的 SSRT 數據。

Table 2. The SSRT results of different coating specimens at 300 ppb $[\text{O}_2]_{\text{dis}}$ and 10 ppb $[\text{H}_2]_{\text{dis}}$

試片	最大拉伸應力 (MPa)	拉伸比率 (%)	IGSCC 比率 (%)	TGSCC 比率 (%)
Prefilm (1)	170	39	0	17
Prefilm (2)	174	39	0	0
NMCA-12 (1)	136	33	0	2
NMCA-12 (2)	162	22	0	10
NMCA-24 (1)	153	39	0	12
NMCA-24 (2)	179	39	0	2



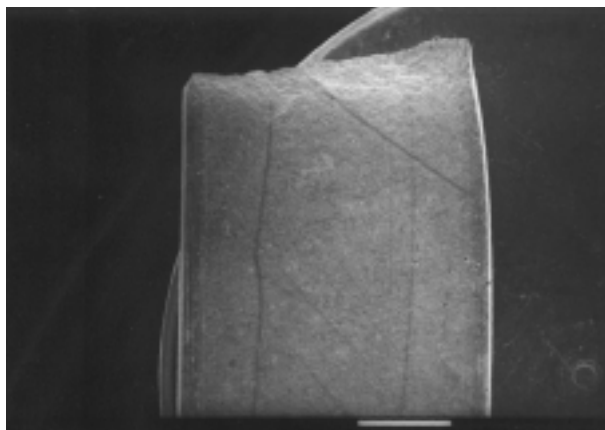
Prefilm 試片



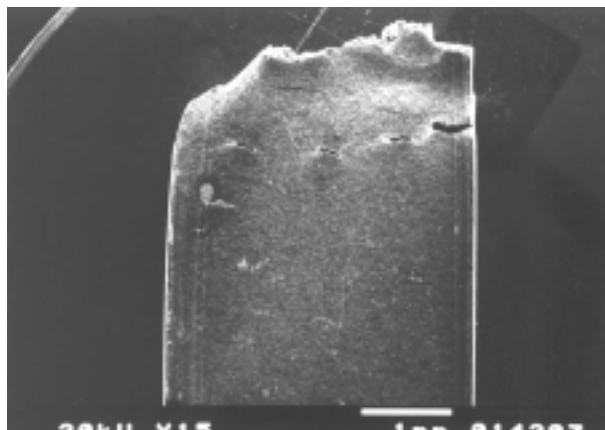
NMCA-24 (1) 試片

圖 2. 水中溶氧濃度 300 ppb 下預氧化膜和鉑覆膜試片進行 SSRT 試驗後之破斷面 SEM 影像。

Figure 2. Fractured surface of the prefilm and platinum treated specimens after the SSRT tests under 300 ppb $[O_2]_{dis}$



Prefilm 試片



NMCA-24 (1) 試片

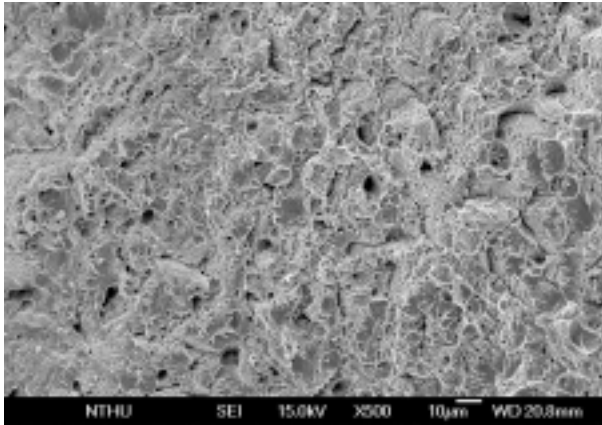
圖 3. 水中溶氧濃度 300 ppb 下預氧化膜和鉑覆膜試片進行 SSRT 試驗後的側面 SEM 影像圖片。

Figure 3. Side surface of the prefilm and platinum treated specimens after the SSRT tests under 300 ppb $[O_2]_{dis}$

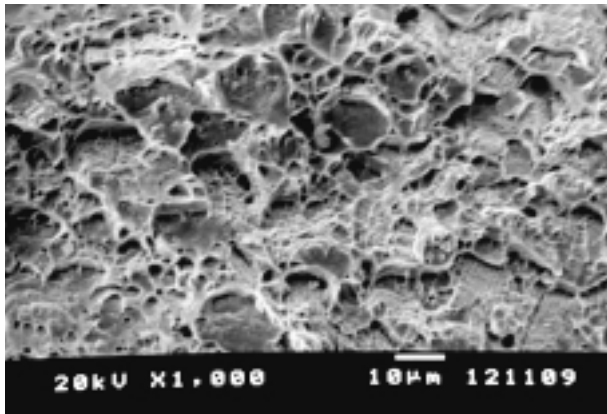
首先在溶氧 300 ppb 未加氫的環境中，預氧化膜試片及鉑覆膜 NMCA-24 (1) 試片的最大拉伸應力值差別不大，但 NMCA-24 (2) 試片最大應力值則異常的較高。在總伸長率方面，NMCA-24 (1) 試片是低於預氧化膜試片的伸長率，不過 NMCA-24 (2) 試片反而和氧化膜試片的伸長率差不多。

從表 1 的 IGSCC 比率上來看，NMCA-24 (1) 和

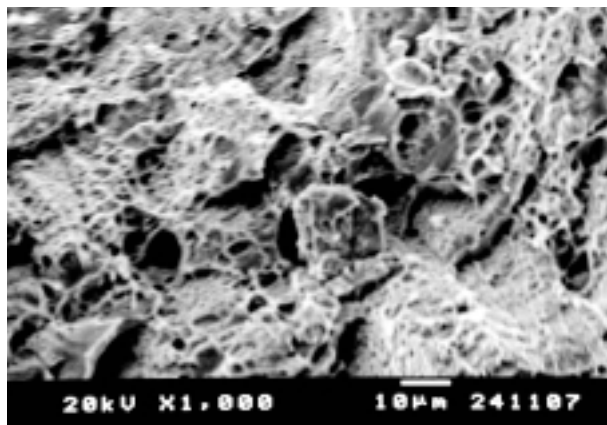
NMCA-24 (2) 的試片有很接近的比率（分別為 30.5 % 和 27.4 %），這比率遠高於預氧化膜試片的 9.8 %，圖 2 是試片 Prefilm 和 NMCA-24 (1) 的斷面圖，可以看出有鉑覆膜處理試片上的 IGSCC 的確比預氧化膜試片明顯很多，值得注意的是，預氧化膜試片的斷面僅有單一斷裂起始的跡象，但鉑覆膜處理試片卻有多重斷裂起始的痕跡。除此之外，圖 3 中



Prefilm 試片



NMCA-12 (1) 試片



NMCA-24 (1) 試片

圖 4. 三種不同披覆試片在溶氧濃度300 ppb 和溶氫濃度10 ppb 水質下SSRT 試驗的斷面。

Figure 4. Fracture surfaces of three kinds of coating specimens after the SSRT tests under 300 ppb $[O_2]_{dis}$ and 10 ppb $[H_2]_{dis}$.

表 3 溶氧濃度300 ppb 和溶氫濃度 50 ppb 不同覆膜試片的SSRT 結果。

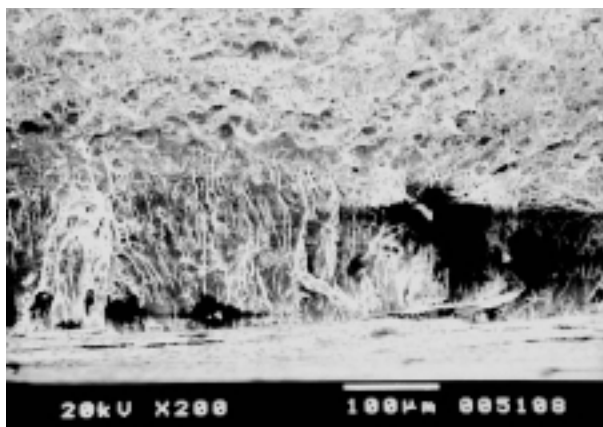
Table 3. The SSRT results of different coating specimens at 300 ppb $[O_2]_{dis}$ and 50 ppb $[H_2]_{dis}$.

試片	最大拉伸應力 (MPa)	拉伸比率 (%)	IGSCC 比率 (%)	TGSCC 比率 (%)
Prefilm	162	27.8	0	27
NMCA-12	213	50.0	0	0
NMCA-24	221	47.2	0	0

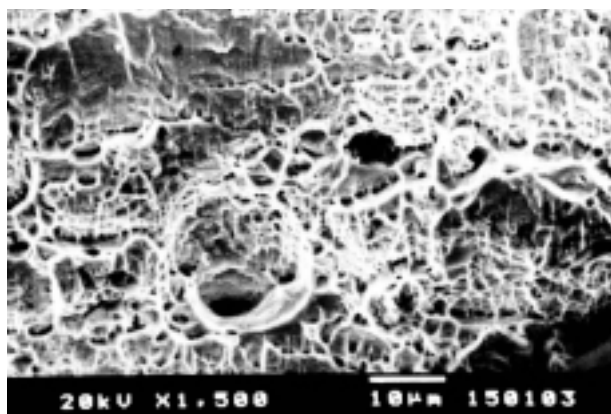
Prefilm 和 NMCA-24 (1) 試片的破斷側面圖顯示，鉑覆膜處理試片在接近破斷面的表面位置出現大量的二次裂痕。

表2 為水化學條件溶氧300 ppb 和溶氫10 ppb (M_{H_2O} 小於1) 的 SSRT 數據。在最大應力值方面，NMCA-12 試片的兩次試驗平均略低比 NMCA-24 的試片略低，伸長率則是 NMCA-24 試片的 39 % 高於 NMCA-12 試片的 33 % 和 22 %。另外在預氧化膜兩片試片的數據來看，兩試片的最大應力值是 170 MPa 和 174 MPa，伸長率皆是 39 %，在這兩項機械性質數據上看來，兩次 Prefilm 試片的 SSRT 測試結果蠻接近的。斷面照片如圖4。雖然是在低溶氫量的 HWC 水中，四個試片均未有 IGSCC 的發現，但在 Prefilm (1)、NMCA-12 (2) 和 NMCA-24 (1) 斷面周圍出現較多的 TGSCC，比率約為 10~17 %，Prefilm (2)、NMCA-12 (1) 及 NMCA-24 (2) 三試片的 TGSCC 比率是非常少。

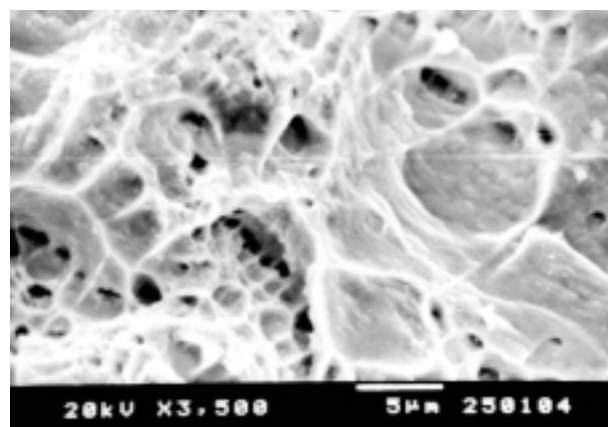
此組 HWC 水環境的 M_{H_2O} 小於 0.5，由 SSRT 的結果顯示，兩組 Prefilm 和 NMCA-24 試片的最大拉伸應力值和伸長率都很接近，推測可能在此低溶氫的水化學環境中，水中溶氫含量不足以提供貴重金屬催化反應所需，以致 NMCA-24 試片機械性質數據沒有高於 Prefilm 試片，雖是如此，不過三種試片



Prefilm 試片



NMCA-12



NMCA-24

圖 5. 三種不同披覆試片在溶氧濃度300 ppb 和溶氫濃度50 ppb 水質下SSRT 試驗的斷面 Fracture 5. Surfaces of three kinds of coating specimens after the SSRT tests under 300 ppb $[O_2]_{dis}$ and 50 ppb $[H_2]_{dis}$

上仍然沒有發現IGSCC。推測造成沒有發生IGSCC的原因，可能是受到實驗流量低的影響，這在稍後3.3 會重新討論。

表3 為水化學條件溶氧濃度300 ppb 和溶氫濃度50 ppb (M_{H_2O} 大於2) 的SSRT 數據，以及圖5 分別是三種試片斷面的SEM 影像。此條件水環境算是高 M_{H_2O} 的HWC 水環境，IGSCC 會受到抑制。貴重金屬披覆的NMCA-12 和NMCA-24 兩種試片，由最大應力值方面來觀察，NMCA-12 試片是213 MPa，NMCA-24 試片為221 MPa，兩試片的最大應力強度相差無幾，在伸長率上的結果上也是相同，NMCA-12 和NMCA-24 試片各是50 %和48 %。另外未披覆貴重金屬的預氧化膜Prefilm 試片，最大應力值和伸長率是162 MPa 和28 %。

在SCC 的觀察上，由於溶氫量非常的高，三試片都沒有IGSCC 的比率，圖5 上見到三試片斷面上皆佈滿延性網狀的渦穴，並無任何IGSCC 的跡象。不過TGSCC 方面，Prefilm 試片斷面靠近周圍的區域發現有27 %高比率的TGSCC，貴重金屬披覆的NMCA-12 和NMCA-24 試片則並沒有TGSCC。

此組HWC 水環境 M_{H_2O} 是大於2 以上，表示有足量的氫可經由貴重金屬催化其氧化反應，藉以保護金屬不發生腐蝕。由SSRT 的結果可以見到NMCA-12 和NMCA-24 試片的最大應力值和伸長率頗為接近，比Prefilm 試片的機械性質數據結果較高，另外在三個試片都沒有出現IGSCC，不過Prefilm 試片有不少比例的TGSCC 存在，推測應是造成其機械性質數據較低的主因。顯示除了水中溶氫的存在的確可以抑制IGSCC 的發生，貴重金屬披覆可使試片的機械性質數據提昇，也增強其腐蝕抗性。

3.2 ECP 量測

本實驗是在兩種不同的水環境下對於Prefilm、NMCA-12、NMCA-24 三種系列的試片分別進行ECP 的量測，其一是於未加氫環境中改變溶氧濃度(200 ppb 到1500 ppb)，另一則是添加50 ppb 溶氫

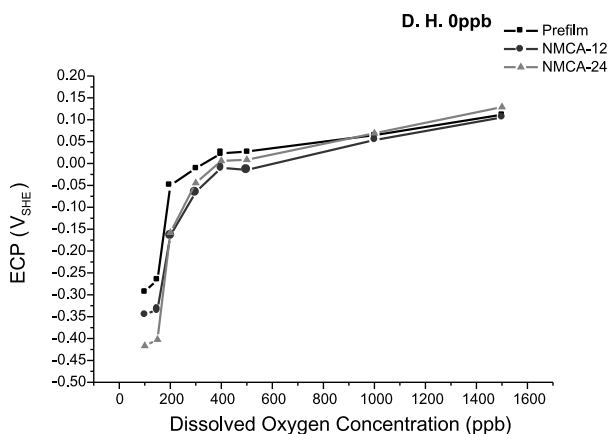


圖 6. 在288 °C水中三種不同覆膜試片之不同溶氧濃度下的ECP曲線圖。

Figure 6. ECP Variations as a function of dissolved oxygen concentration for the three different specimens in 288 °C water.

以及前述的溶氧濃度變化。在進行以下結果的討論之前，我們必須提醒讀者，當ECP值降到-230 mV_{SHE} (E_{crit})或是更低以下時，一般均認為在BWR環境中熱敏化304不銹鋼材料的IGSCC可以獲得抑制。

圖6是未加氫且溶氧濃度在200 ppb到1500 ppb變化的ECP數據。三種不同的試片在所有溶氧濃度下的ECP值最低都高於-230 mV_{SHE}以上，NMCA-12試片在溶氧濃度200 ppb時的最低ECP值為-165 mV_{SHE}，NMCA-24試片在溶氧濃度1500 ppb時的最高ECP值為129 mV_{SHE}，預氧化膜試片在200 ppb至500 ppb溶氧濃度下都是保持三試片中的最高值，鉑覆膜與未覆膜試片於溶氧濃度200和300 ppb差異最大。對應前述SSRT表1的結果，在300 ppb時的溶氧下，三個試片都應有IGSCC的可能，可是ECP比較高的預氧化膜試片IGSCC比率反而低於NMCA-24試片，其原因推論是鉑覆膜處理後在溶氧濃度300 ppb下進行SSRT試驗會引發試片表面上易於產生

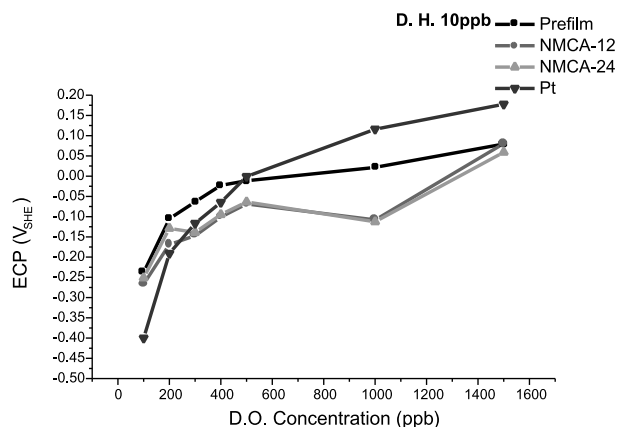


圖 7. 三種披覆試片與Pt在溶氫濃度10 ppb與溶氧濃度變化下ECP量測曲線。

Figure 7. ECP Variations as a function of dissolved oxygen concentration for the three different specimens in 288 °C water with a fixed dissolved hydrogen level of 10 ppb.

IGSCC的起始 (initiation)，進而成為許多二次裂口 (見圖3)。另外，預氧化膜試片具有較高的ECP和許多二次裂口的生成可能與氧化膜有所關聯，在其他研究(13~14)中曾被觀察到，氧化膜類似貴重金屬的催化性會催化氧的還原反應，預氧化的304不銹鋼表面上有很多隨處可見的尖晶石狀氧化物(富含亞鐵離子)，這樣的氧化物能夠很有效地增益氧的還原反應，有時這樣的效應甚至大於貴重金屬的催化。在較高溶氧濃度1000至1500 ppb之間的環境，三種試片的ECP幾乎相同。

圖7是固定水中溶氫10 ppb濃度和變化溶氧100 ppb至1500 ppb的ECP量測，此時開始加入一純Pt試片作為比較。首先觀察在較高溶氧濃度下，當溶氧1500 ppb時，純Pt試片的ECP值較其他試片高出100 mV_{SHE}左右，接下來隨著溶氧濃度的降低，所有試片的ECP值也隨之下降，到了溶氧濃度500 ppb以下，純Pt試片的ECP值相較其他試片開始有明顯的下降幅度，Prefilm試片的ECP值相較於NMCA試

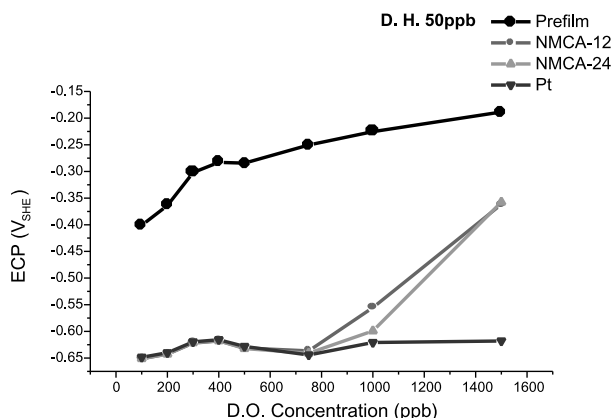


圖 8. 在 288 °C 水中固定溶氫濃度 50ppb 對於三種不同覆膜與純鉑試片之不同溶氧濃度下的 ECP 曲線圖。

Figure 8. ECP Variations as a function of dissolved oxygen concentration for the three different specimens in 288 °C water with a fixed dissolved hydrogen level of 50 ppb.

片一直高出 100 mV_{SHE} 的程度，直到溶氧濃度 200 ppb 時，Pt 試片 ECP 值已經低於其他的試片，而此時 Prefilm 與 NMCA 試片的 ECP 差距已經很小，最後到了溶氧 100 ppb 濃度時，純 Pt 試片降到最低 -400 mV_{SHE} 的 ECP 值，其他三試片的 ECP 值則在 -250 mV_{SHE} 左右，只比 E_{crit} 的 -230 mV_{SHE} 稍低一點。在高溶氧 500 ppb 至 1000 ppb 濃度來看，由於 M_{H₂O} 屬於偏低的區域，純 Pt 試片的 ECP 值較高於其他試片數百 mV 的程度，主要原因為貴重金屬的催化效應在低氫的水環境，若是沒有足夠的氫來提供電子供給氧的還原，將導致金屬成為電子的來源，反而加速金屬的氧化，有經過預氧化膜 (Prefilm) 處理的試片可以減少金屬直接接觸氧而發生氧化反應的機率，其 ECP 也較低，但 Prefilm 試片的 ECP 值不應較 NMCA 試片高才是。當 M_{H₂O} 漸漸增加時，有貴重金屬披覆試片的 ECP 值皆比單純 Prefilm 試片的值還要低，主要是因為有足量的氫可以參予 Pt 的催化反應，氫的氧化產生的電子足夠提供氧還原所需，藉

此得以保護金屬不被腐蝕。

圖 8 為相同的溶氧變化與 50 ppb 溶氫條件下三試片的 ECP 數據。相對於圖 5 的 ECP 值，我們發現三個試片的 ECP 均已下降，尤其是鉑覆膜的兩試片更為顯著。預氧化膜試片的 ECP 變化是在 200 ppb 溶氧的 -400 mV_{SHE} 到 1500 ppb 的 -190 mV_{SHE} 之間，和未加氫環境相較之下，整體平均下降 250 mV。鉑覆膜兩種試片的 ECP 值都降至 -600 mV_{SHE} 以下，兩試片 ECP 的差距也非常的小。在鉑覆膜與未覆膜試片比較而言，有鉑覆膜處理試片其 ECP 在 200 ppb 至 1000 ppb 之間的溶氧濃度變化下，都下降了 250 mV 以上之多。值得注意的是此測試環境的 M_{H₂O} 並未大於 2。即使在溶氧濃度 1500 ppb，M_{H₂O} 小於 1 的環境下，鉑覆膜試片仍比預氧化膜試片低 170 mV。另外圖 8 有多一純鉑試片以做為比較，在各種溶氧濃度與固定溶氫濃度 50 ppb 下，純鉑試片一直維持 -600 mV_{SHE} 以下的 ECP 值。

這部分的 ECP 實驗可以驗證到貴重金屬 (例如：鉑) 能有效的催化氫的氧化反應，並使得鉑覆膜處理試片 ECP 明顯下降，甚至在 M_{H₂O} 小於 1 大於 0.5 時，此效應仍然存在。若是 M_{H₂O} 遠小於 1 (例如：溶氧濃度 1500 ppb 和溶氫濃度 50 ppb) 時 ECP 仍會下降，但效果較 M_{H₂O} 大於 1 更不顯著。此外由結果發現鉑的催化性對於氫的氧化反應會要比氧的還原反應還來得強烈，即使 M_{H₂O} 小於 1 的情況下，鉑覆膜試片的 ECP 還是可以比預氧化膜試片的 ECP 為低。

3.3 低流量對於本實驗的影響

在先前溶氧濃度 300 ppb 和溶氫濃度 10 ppb 的 SSRT 結果討論中提到，推測造成沒有發生 IGSCC 的原因，可能是受到實驗流速低的影響，國外 Y.J. Kim 在相似的 HWC 固定溶氧 200 ppb(16)，NMCA 披覆鉑貴重金屬的 304 不銹鋼試片進行高溫下的 ECP 量測，水流量條件 150 cc/min，和本實驗的固定溶氫 50 ppb 變化溶氧濃度條件的 ECP 量測比較，

水流量 15~20 cc/min，兩者若不考慮其他的變因，Prefilm、NMCA 與純 Pt 三種試片在低流速溶氧 200 ppb 下分別比高流速的 ECP 值低 300、150 與 100 mV_{SHE}。低流量下的水環境下，使得氫能附著在試片表面進行催化反應的時間延遲更久，導致 ECP 值下降的幅度增加，前面固定溶氫 10 ppb 改變溶氧變化的 ECP 量測值中顯示，溶氧 200 ~ 400 ppb 範圍的 ECP 值比 E_{crit} 高出少許的幅度，若流量更增大後，ECP 值勢必將會提昇更高，推測溶氧濃度 300 ppb 和溶氫濃度 10 ppb 覆膜試片的 SSRT 試驗結果，應該會發生 IGSCC。

四、結論

1. 利用靜態 NMCA 披覆技術，在預氧化膜的 304 不銹鋼試片上，鉑金屬可成功附著氧化層表面之上。
2. 低溶氧不加氫的環境下，鉑覆膜的催化反應反而會使得 IGSCC 侵蝕較為嚴重。
3. 慢應變拉伸試驗中，即使沒有鉑披覆的試片，加氫水化學環境下並沒有發現 IGSCC 產生，由此可見 HWC 能夠有效抑制 IGSCC。
4. 固定溶氫濃度改變 M_{H₂O} 的比例所量測到的 ECP 值發現，若是水中沒有足量的氫濃度存在，將會使得鉑催化反應無法發揮作用，其 ECP 值和預氧化膜試片差別不大。
5. 在有足夠溶氫的水環境中，鉑覆膜 304 不銹鋼試片的 ECP 值與純鉑試片無異，表示只需要少量的鉑披覆，就可達到良好的保護效果。

參考文獻

- (1) R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, January, (1986) p.26.
- (2) R.W. Weeks, "Stress Corrosion Cracking in BWR and PWR Piping," Proc. Intl. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Plant - Water Reactors, NACE, Myrtle Beach, South Carolina, Aug. 22-25, (1983) p.69.
- (3) R. L. Cowan, "The Mitigation of IGSCC of BWR Internals with Hydrogen Water Chemistry," Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, BNES, Bournemouth, England, Oct. 13-17, 1996, p.196.
- (4) J. C. Danko, "Recent Observations of Cracking in Large Diameter BWR Piping," Proc. Intl. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Plant - Water Reactors, NACE, Myrtle Beach, South Carolina, Aug. 22-25, 1983, p.209.
- (5) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Intergranular Stress Corrosion of Core Shrouds in Boiling Water Reactors, NRC Generic Letter 94-03, July 25, 1994.
- (6) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Jet Pump Hold-Down Beam Failure, NRC Information Notice 93-101, December 19, 1993.
- (7) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Cracking of Lower Region of the Core Shroud in Boiling Water Reactors, NRC Information Notice 94-42, June 7, 1994.
- (8) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Reactor Vessel Top Guide and Core Plate Cracking, NRC Information Notice 95-17, March 10, 1995.
- (9) C. C. Lin, "Hydrogen Water Chemistry Technology in BWRS", Proc. of the 1998 JAIF Water Chemistry Conference, JAIF, Kashiwazaki, Japan, Oct.11-16, 1998, p.211.
- (10) S. Hettiarachchi et al., "The Concept of Noble Metal Chemical Addition Technology for IGSCC Mitigation of Structural Materials," Proc. 7th International Symposium on Environmental Degradation of Material in Nuclear Power

Systems - Water Reactors, NACE, Breckenridge, Colorado, Aug.6-10,1995,p.735.

- (11) Y. J. Kim, L. W. Niedrach, M. E. Indig, P. L. Andresen, "The Application of Noble Metals in Light Water Reactors", JOM, April, (1992) p.14.
- (12) P. L. Andresen, "Mitigation of Stress Corrosion Cracking by Underwater Thermal Spray of Noble Metals", CORROSION/95, paper no. 412, Houston, TX, NACE International, (1995).
- (13) Y. J. Kim, L. W. Niedrach, P. L. Andresen, "Corrosion Potential Behavior of Noble Metal Modified Alloys in High Temperature Water", CORROSION/95, paper no.99. Houston, TX, NACE International, (1995).
- (14) S. Hettiarachchi, G. P. Wozadlo, "A Novel Approach for Noble Metal Deposition on Surface for IGSCC Mitigation of Boiling Water Reactor Internals", CORROSION/95, paper no. 413, Houston, TX, NACE International, (1995).
- (15) T. K. Yeh et al., "The Effect of Catalytic Coatings on IGSCC Mitigation for Boiling Water Reactors Operated Under Hydrogen Water Chemistry," Proceedings of the 8th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, Amelia Island, Florida, August 10-14, 1997, American Nuclear Society, p.559.
- (16) Y. J. Kim, "Effect of Noble Metal Addition on Electrochemical Polarization Behavior of Hydrogen Oxidation and Oxygen Reduction on Type 304 Stainless Steel in High-Temperature Water", Corrosion, May, (1999) p.456.