

陰極防蝕電位對鋼材氫脆化影響評估 Evaluation of the Effect of Cathodic Protection Potential on Hydrogen Embrittlement of Steel

陳國銘^{*1}、陳志慶²、吳美惠¹、吳宗峯¹、羅亦旋¹
K. M. Chen^{*1}, D. Chen², M. H. Wu¹, T. F. Wu¹, I. H. Lo¹

中文摘要

離岸鋼構物為防制腐蝕提升設備運轉壽命，目前普遍採用陰極防蝕方式，強度愈高愈可能在陰極保護下可能誘發氫脆現象，反而導致結構物斷裂之風險升高。為協助高強度鋼材之開發與應用於離岸結構物上，乃進行陰極保護下鋼材之氫脆敏感性評估，探討電位對其影響。

本研究以 ASTM G129 為主要試驗參考標準，並以 S690Q 之母材及銲接件為試驗樣品，採用慢速率拉伸應變方法進行測試，試驗後進行數據分析、破斷面觀察與量測，以評估其脆化傾向。經試驗結果顯示陰極保護電位愈負，其斷面收縮率、塑性伸長率等脆性指標有降低趨勢，顯示陰極保護電位對 S690Q 氫脆確實有影響。S690Q 在-0.95V 以上之陰極保護電位其氫脆化傾向小，但在-1.05V 保護電位下，發生氫脆化之風險較高。而銲接試棒斷裂處皆發生在熱影響區，與母材試棒相較，具有較高之氫脆化傾向，研判可能因熱影響區生成氫脆敏感性組織，以及銲接殘留應力等原因所造成，因此銲道可能成為陰極保護下優先破裂之處。

關鍵詞：陰極防蝕、保護電位、氫脆、慢速率拉伸應變。

Abstract

For preventing corrosion and promoting the service life of offshore steel structures, the cathodic protection method is generally applied. However, it had been shown that the higher the steel strength, the more likely the hydrogen brittle phenomenon will be induced under the cathodic protection, leading to a higher risk of structural

收到日期：108年04月22日

修訂日期：108年05月10日

接受日期：108年08月23日

¹ 中鋼公司綠能與系統整合研究發展處產品應用技術組

¹ Green Energy & System Integration R.&D. Dept., China Steel Corp.

² 中鋼公司鋼鐵研究發展處鋼鐵產品發展組

² Iron & Steel R.&D. Dept., China Steel Corp.

*聯絡作者：140475@mail.csc.com.tw

failure. In order to assist the development of high-strength steels and their application to offshore structures, these steels under simulated cathodic protection was evaluated to investigate the effect of the applied cathodic potential on hydrogen embrittlement sensitivity.

With ASTM G129 as the main test reference standard, this study carried out by slow strain rate tensile method and used the base metal and weld metal of S690Q as the test samples. For evaluating their hydrogen embrittlement tendency, data analysis, fracture surface observations and measurement were performed after the test.

The results showed that the more negative the cathodic protection potential, the embrittlement index such as reduction of area ratios and plastic elongation ratios had a more decreasing tendency, it showed that the cathodic protection potential had an effect on S690Q hydrogen embrittlement. As cathodic protection potential was higher than -0.95 V , S690Q had a lower hydrogen embrittlement tendency, but as potential was lower than -1.05 V , the risk of hydrogen embrittlement would be higher. Compared with the base metal specimens, the weld metal showed a higher hydrogen embrittlement tendency and fractures occurred at the heat-affected zones. This phenomena might resulted from hydrogen embrittlement sensitive microstructure and the residual stress of the heat-affected zones generated when welding. The weld metal and HAZ might have a more probability of cracking than base metal under cathodic protection.

Keywords: cathodic protection; protection potential; hydrogen embrittlement; SSRT.

1. 前言

1988 年在阿根廷外海發現五座自升式鑽油平台在定位樁內有嚴重開裂，裂紋延伸到腿弦和定位樁頂板之間的外部銲縫，所有的裂紋都在高強度材料的銲縫熱影響區^[1]，經分析證實原因為氫誘發的應力腐蝕開裂，不是因疲勞所導致的。此一發現讓陰極防蝕誘發氫脆化得到重視。雖然陰極防蝕可降低鋼材腐蝕速率，但亦有許多其他之負面影響，這些負面影響在設計、開發及建置陰極防蝕系統時應加以考慮。DNV-RP-B401^[2]中提到的陰極防蝕負面作用如下，主要牽涉中高強度鋼材：

- (1) 被保護件表面產生氫氧根離子和氫氣，會導致非金屬塗層剝離，其機制牽涉化學溶解和電化學還原過程，可能還有在該介面上的氫壓積累，塗層劣化的這個過程被稱為‘陰極剝離’。
- (2) 導致金屬表面形成原子氫。在鋁基或鋅基犧牲陽極的陰極保護電位範圍內(即 -0.80 至 -1.10V ， Ag/AgCl /海水參考電極)，電位愈負，氫的生成按指數規律增加。氫原子可相互結合形成氫分子，也可被金屬基體吸收，與材質顯微結構相互作用產生高應力引發氫致裂紋(Hydrogen

Induced Stress Cracking, HISC)。

- (3) 根據實際經驗，降伏強度 500MPa 以下的肥粒鐵和肥粒鐵-波來鐵結構鋼被證實與海洋陰極保護系統相容。
- (4) 對於麻田散鐵碳鋼、低合金鋼和不銹鋼，曾經遇到過陰極保護誘導氫致裂紋事故，包括降伏強度大約 700MPa 的材料。一般認為未經回火的麻田散鐵特別易於 HISC。對形成麻田散鐵敏感的材料，銲接隨後宜進行銲後熱處理來減小熱影響區硬度和銲接殘餘應力。熱處理達到 720 MPa 的麻田散鐵螺栓(例如 ASTM A182 材質 B7 和 ASTM A320 材質 L7)已經證明與陰極保護相容。然而還是出現由於熱處理不充分產生的事故。

目前針對高強鋼的陰極保護仍沿用碳鋼的保護準則，即陰極保護電位範圍控制在 -0.85V ~ -1.05V (相對於 Ag/AgCl 參比電極)。在這一保護電位範圍內，高強度鋼由於明顯的氫脆敏感性而可能會產生過保護的問題。在應力的作用下，環境中的氫擴散並富集到正在擴展的裂紋前緣，使該處金屬出現脆化^[3]。國外對於不同等級高強鋼

的保護電位進行了一系列研究，並形成了一些標準、規範，其中 HSE(Health and Safety Executive) 設計準則建議高強度鋼陰極保護電位不能低於 -0.85 V ^[4]；DNV offshore Standard(2000) 建議降伏強度大於 550 MPa 的鋼的保護電位範圍是 $0.75\text{ V} \sim -0.83\text{ V}$ ^[5]。美國海軍實驗室根據調查認為降伏強度大於 700 MPa 鋼的電位負於 -0.95 V 即會引起氫脆^[6]。英國的 C. Batt 的研究認為 700 MPa 的 Welddox700 鋼和 900 MPa 的 Steel900 在天然海水中的最佳保護電位為 -0.77 V ，在滅菌海水中是 -0.79 V ，在該電位下腐蝕速率降至 0.001 mm/a 之下，且不會引起氫脆^[7]。法國的 L. Coudreuse 則認為將保護電位從 -1.05 V 提高到 -0.85 V ，其氫脆影響可以大大降低^[8]。H. Pircher 認為降伏強度大於 800 MPa ，電位負於 -0.80 V 即可引起氫脆^[9]。

由於高強度鋼使用在離岸結構物，提供了優於傳統鋼材的許多優點，特別是在重量要求的情況下。但為防制腐蝕提升設備運轉壽命，目前普遍採用陰極防蝕方式，而高強度鋼在陰極保護下可能誘發氫脆現象，反而導致結構物斷裂之風險升高。離岸結構物高強度鋼為中鋼公司未來發展目標之一，為建立陰極保護下氫脆敏感性之評估技術，乃進行本項研究。

2. 實驗方法

2.1 評估方法

本研究以 ASTM G129 “Standard Practice for Slow Strain Rate Testing to Evaluate the Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking(EAC)”^[10] 為主要試驗參考標準。此標準以材料在測試環境與在控制環境中所測定的相應值之比例，主要有下列幾種來評估材料在特定狀況下之氫脆敏感性：

- (1) 失效時間比。
- (2) 塑性延伸比。

- (3) 面積減少比例。
- (4) 缺口抗拉強度比。
- (5) 平面應變閾值應力強度因子。
- (6) 閾值應力強度因子比。

比值愈接近 1 其氫脆抵抗愈大，愈低的比值通常表示對氫脆的敏感性高。

2.2 試驗樣品

試驗樣品為光滑之母材及銲道試棒，材料為 S690Q，該材料由中鋼自行研發。母材部份取 S690Q 經現場軋製成 50 mm 厚之鋼板，沿軋延方向從距外表面 15 mm 厚度取樣，經加工後製成圓形試棒，gauge 部分長度為 26.4 mm ，直徑為 6.4 mm ，表面並以 grit 800 砂紙研磨，試驗前以脫脂劑與丙酮清洗。銲道試棒之製作方式，先將 50 mm 厚之鋼板，沿軋延方向銲接，銲接方式為手工電弧銲，使用之銲條為中鋼焊材公司的 GL118M，層間溫度約 100°C 、電壓 25 V ，入熱量 15 KJ/cm ，銲接完成後以 RT 進行檢驗是否有缺陷。銲接完成後垂直於銲道，從距外表面 15 mm 厚度取樣，試棒尺寸及加工方式與母材相同。

2.3 試驗設備

慢速率應變拉伸測試使用 Advance Instrument Inc. model SR1 測試設備，試驗時應變率固定為 $1 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ ，數據 40 秒取一筆。外加陰極電位方面使用恆電位儀 廠牌為 Gamry interface 1000，測試樣品接於陰極，參考電極為 Ag/AgCl，對電極為白金片 ($4 \times 4\text{ cm}$)，使用之溶液為 3.5% NaCl。

2.4 試驗方式與數據分析

採用常溫下空氣中拉伸與在 3.5% NaCl 溶液中同時外加不同陰極電位下進行拉伸，以比較其氫脆敏感性。試驗後之數據處理與分析包括拉伸

數據作圖，取得抗拉強度(Tensile Strength, TS)、降伏強度(Yield Strength, YS)、伸長量、應變、塑性伸長率等數據。破斷面以立體顯微鏡量測長軸與短軸直徑以計算斷面收縮率，另外以掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)進行微觀觀察。銲接試棒除了以 SEM 觀察破斷面外，並以光學顯微鏡(Optical Microscope, OM)觀察破斷面之縱向截面，以了解破斷處位於銲道、母材或者熱影響區。

Testing, SSRT)

母材與銲接試棒之空氣中 SSRT 測試主要目的是取得控制環境下的 SSRT 數據，以與測試環境下進行比較。兩者經測試結果如表 1 所示，表 1 中破斷處面積之計算以立體顯微鏡量測破斷處之長軸與短軸，以橢圓形公式計算破斷處最小面積。斷面收縮率以 [(原來截面積-破斷處面積)/原來截面積] x 100%公式計算；塑性伸長率之計算為 [(斷裂時伸長量- YS 伸長量)/斷裂時伸長量] x 100%，其中斷裂時伸長量與 YS 伸長量由拉伸數據與曲線獲得。試驗後之破斷面 SEM 及 OM 觀察圖如圖 1 所示，顯示破斷面呈現延性破裂之 dimple 組織，而銲接試棒拉斷處位於熱影響區。

3. 結果與討論

3.1 母材與銲接試棒在空氣中之慢應變拉伸測試 (Slow Strain Rate

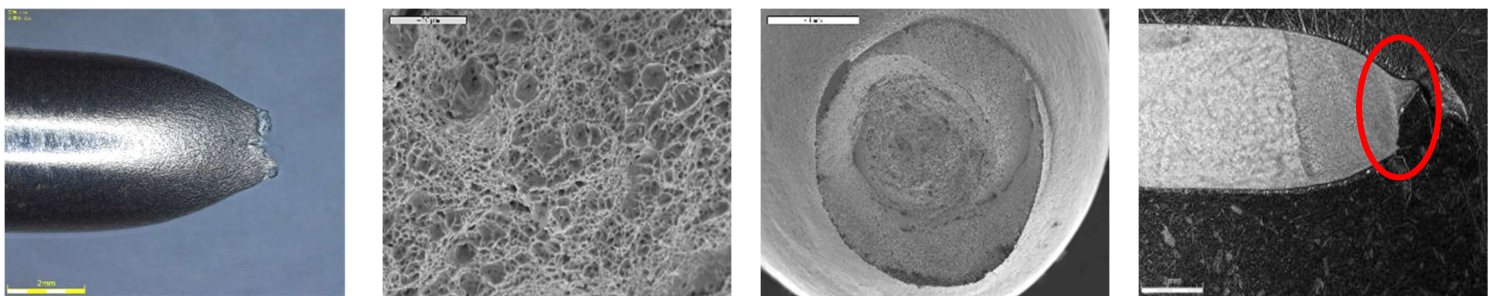
表 1 母材與銲道試棒在空氣中慢速率拉伸試驗結果。

Table 1 The SSRT results of base metal and weld metal specimens tested in the air.

	破斷處面積 (mm ²)	YS (MPa)	TS (MPa)	伸長量 (mm)	Strain (%)	斷面收縮率 (%) ^{*1}	塑性伸長率 (%) ^{*2}
母材	5.1	801.9	844.8	5.2	18.0	71.81	71.33
銲道	5.5	687.1	766.9	3.5	12.1	69.60	65.71

*1 斷面收縮率：[(原來截面積-破斷處面積)/原來截面積] x 100%

*2 塑性伸長率：[(斷裂時伸長量- YS 伸長量)/斷裂時伸長量] x 100%



(a)母材頸縮

(b)母材破斷面 dimple 組織

(c)銲道試棒破斷面 SEM 圖

(d)銲道試棒拉斷處 OM 圖

圖 1 母材與銲道試棒在空氣中試驗後之觀察圖，顯示破斷面呈現延性破裂之 dimple 組織，銲接試棒拉斷處位於熱影響區。

Figure 1 The fracture observations of base metal and weld metal specimens after test by SEM and OM. The fracture surface had a ductile dimple structure, and the weld specimen failed at HAZ.

3.2 不同陰極保護電位下之慢速率拉伸試驗

鋼材應用於海洋環境下通常使用陰極保護方式以防制快速腐蝕，一般受保護之鋼材為陰極，由於氫離子會在陰極析出成氫原子，進入鋼材內部，可能導致材質之氫脆。氫脆化之程度可能會受到陰極保護電位影響。本研究在進行慢速率拉伸試驗時，將試棒外加-0.75V、-0.85V、-0.95V及-1.05V等四種不同電位以模擬鋼材受到之陰極保護電位。

3.2.1 母材在不同外加電位下之慢速率拉伸試驗結果

母材試棒浸於 3.5% NaCl 溶液中，並接於恆電位儀之陰極，陽極為白金電極，陰極與陽極間距離固定為 4cm。在 SSRT 拉伸進行之同時對試棒施加一固定電位。試驗結果如表 2 所示，將四種不同電位下之拉伸曲線彙整如圖 2 所示，電壓愈負，斷層之應變愈小。表 2 之數據顯示外加陰極保護電位愈負破斷處面積愈大、斷面收縮率愈

小，顯示陰極保護電位愈負，對材料之脆性確實會有提升作用，一般拉伸試驗結果破斷處截面面積越大，或伸長率越小，材料之脆性越大。另外由試驗結果可看出外加電位對於材料之 YS 及 TS 影響不大。將不同外加電位下之斷面收縮率、塑性伸長率除以空氣中之試驗結果，結果如表 1 之斷面收縮率比及塑性伸長率比所示，顯示在外加電位愈負，兩者之比值愈小，代表氫脆化可能性愈高。不同外加電位下之破斷面以 SEM 觀察，結果如圖 3 所示，圖 3 中顯示在-0.75V 及-0.85V 破斷面中央有一裂口，文獻中提出^[1]此為軋延鋼板之分層現象，起因於鋼板回火再加熱過程中形成的析出物(化物和氮化物)析出於細長軋製晶粒晶界，使得晶界弱化，在拉伸應力作用下造成此種分層現象。圖 3 中在-0.95V 破斷面尚有相當淺的分層現象，但在-1.05V 時，分層現象已消失，推測此種現象可能因充氫作用，使得晶界普遍弱化，原來之碳化物析出弱化晶界作用逐步消失。由上述母材在不同陰極電位下之慢速率拉伸試驗得知，陰極電位愈負，氫脆化之特徵愈明顯。

表 2 母材試棒在不同電位下 SSRT 試驗結果一覽表。

Table2 The SSRT results of base metal specimens tested in different cathodic potential.

外加電壓 (V)	破斷處面積 (mm ²)	YS(MPa)	TS(MPa)	伸長量 (mm)	Strain (%)	斷面收縮率 (%)	斷面收縮率 比	塑性伸長率 (%)	塑性伸長率 比
-1.05	11.4	801	851	3.9	13.6	41.83	0.58	66.67	0.93
-0.95	9.07	803	838	4.3	14.9	53.77	0.75	67.44	0.95
-0.85	5.71	805	847	4.7	16.4	70.93	0.99	72.34	1.01
-0.75	5.19	787	826	4.5	15.6	73.57	1.02	71.11	1.00

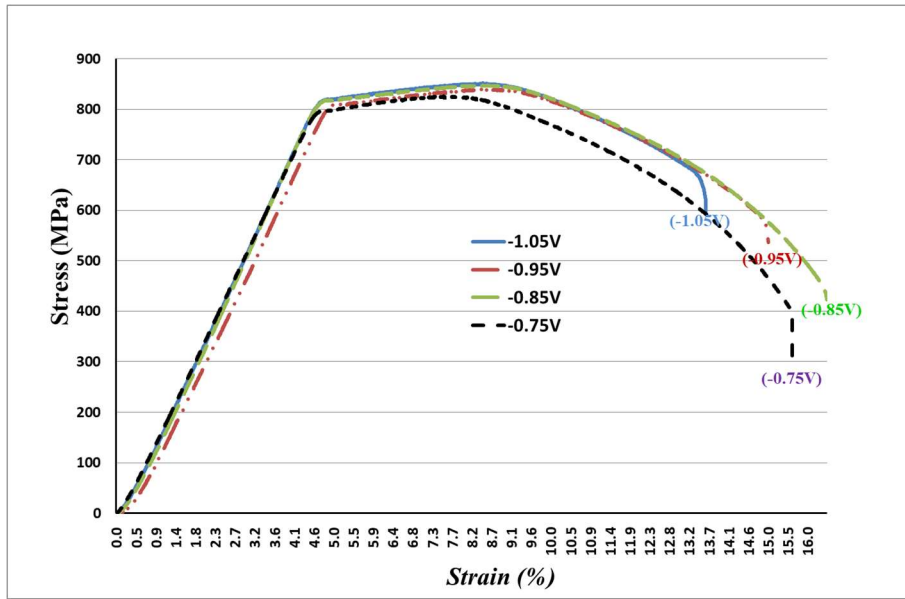
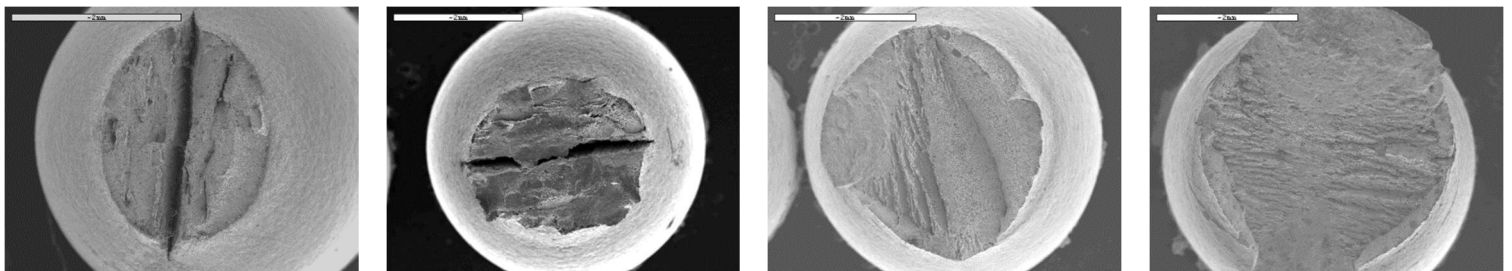


圖 2 母材試棒在不同陰極電位下之 SSRT 應力應變曲線。
Figure 2 The SSRT stress- strain curves of base metal specimens after testing in different cathodic potential.



(a) -0.75V (b) -0.85V (c) -0.95V (d) -1.05V

圖 3 母材試棒在不同陰極電位下破斷面之 SEM 觀察圖，顯示電位愈負，破斷面積愈大，氫脆化特徵愈明顯。-0.75V 及 -0.85V 破斷面中央有裂口，為軋延鋼板之分層現象。
Figure 3 The SEM fracture surface micrographs of base metal specimens after testing in different cathodic potential. It showed that the more negative the more fracture surface area would be. Cracks appeared on the fracture surface at potential -0.75V and -0.85V, this would be the delamination phenomena of the rolled steels.

3.2.2 鐸道在不同外加電位下之慢速率拉伸試驗結果

鐸道試棒亦使用與母材相同方式在不同電位下進行慢速率拉伸試驗。試驗結果如表 3 所示，將四種不同電位下之拉伸曲線彙整如圖 4 所示，顯示電位愈負，斷裂之應變愈小。表 3 之數據顯示除了 -0.75 與 -0.85V 有些異常外，其餘顯示外加電位愈負，破斷處面積愈大、斷面收縮率愈小。

外加電位對於材料之 YS 及 TS 影響亦不大，斷面收縮率比及塑性伸長率比亦顯示外加電位愈負，兩者之比值愈小，代表氫脆化可能性愈高。不同外加電位下之破斷面以 SEM 觀察，結果如圖 5 所示，比較各電位下破斷面之 SEM 觀察圖，電位愈負其微觀特徵沒有像母材試棒那樣呈現脆性之準劈裂現象，局部仍然呈現 dimple 組織。圖 6 為鐸接試棒在不同電位下破斷面之縱向截面 OM 觀察

圖，顯示斷裂皆發生在熱影響區。銲接熱影響導致組織變化，進而影響其破斷特徵。

將母材試棒與銲接試棒之慢速率拉伸試驗結果進行比較，如圖 7 所示，可看到母材試棒之塑性伸長率皆大於銲接試棒。在斷面收縮率方面除了-0.95V 異常外，其他亦都以母材試棒較高，顯示銲接試棒在外加陰極保護電位下其脆化之傾向較母材為高，推測可能是銲道在銲接過程組織發生變化，有較多之析出物，使得吸氫陷阱變多，另外殘留應力存在亦會使銲接試棒較易氫脆化。

上述，文獻中提出^[12]工程上經常使用的氫脆係數 FH 評價在試驗條件下的環境氫脆敏感性。氫脆係數即材料斷面收縮率的相對減損百分率：
 $FH = (\Psi_0 - \Psi) / \Psi_0 \times 100\% \dots\dots\dots Eq.(1)$

式中 FH 為氫脆係數， Ψ_0 空氣中之斷面收縮率， Ψ ：外加電位下之斷面收縮率。根據氫脆係數 FH 值劃分不同的區域範圍：當 $FH > 35\%$ 時為脆斷區，材料肯定會發生氫脆； $25\% \leq FH \leq 35\%$ 時為危險區，材料存在氫脆的潛在危險； $FH < 25\%$ 時為安全區，材料不會發生氫脆。計算上述各試棒之斷面收縮率減損比較，並對電位作圖，結果如圖 8 所示，圖中並標示出 25%及 35%之位置，由圖可知在-1.05V 陰極保護電位下，母材與銲接試棒皆可能發生氫脆現象，且銲道比母材之氫脆敏感性要高，推測可能因銲接熱影響區生成氫脆敏感性組織，以及銲接殘留應力等原因所造成。一般用於離岸之銲接結構物由於體積龐大，不易進行應力消除或高溫回火處理，因此其銲道可能成為陰極保護下優先破裂之處。

表 3 銲道試棒在不同電位下 SSRT 試驗結果一覽表。

Table3 The SSRT results of weld metal specimens tested in different cathodic potential.

外加電壓 (V)	破斷處面積 (mm ²)	YS (Mpa)	TS (Mpa)	伸長量 (mm)	Strain (%)	斷面收縮率 (%)	斷面收縮率 比	塑性伸長率 (%)	塑性伸長率 比
-1.05	12.28	735	806	2.8	9.6	37.4	0.54	57.14	0.87
-0.95	7.73	716	782	3	10.5	60.63	0.87	63.33	0.96
-0.85	6.86	713	776	3.3	11.5	65.06	0.93	66.67	1.01
-0.75	7.75	717	807	3.6	12.5	60.52	0.87	66.67	1.01

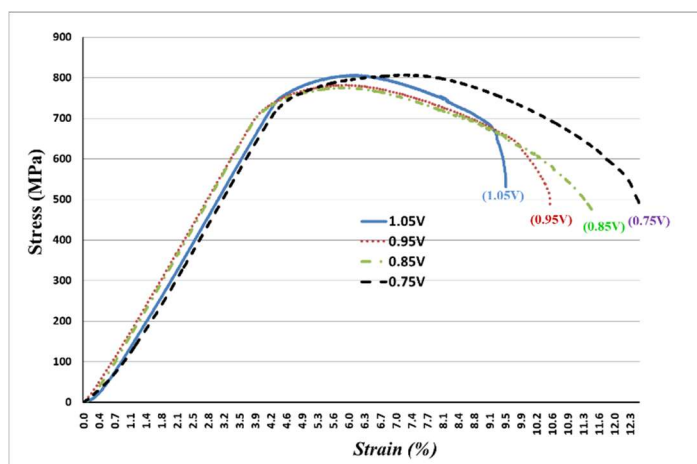
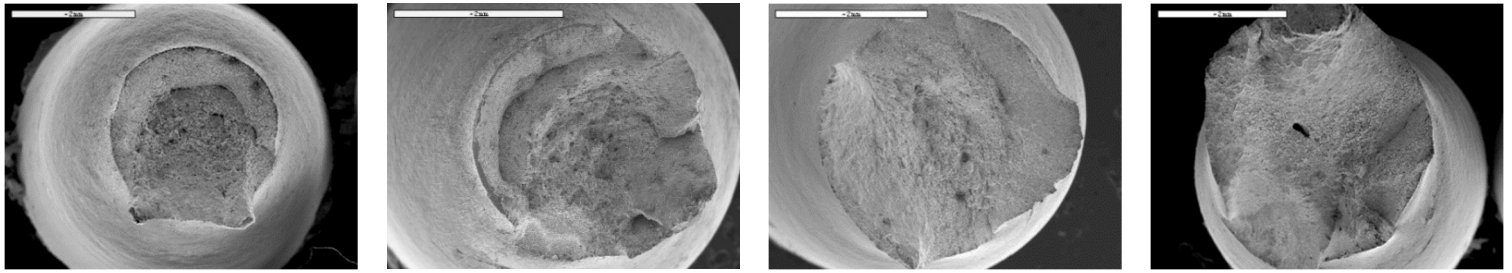


圖 4 銲接試棒在不同陰極電位下之 SSRT 應力應變曲線。

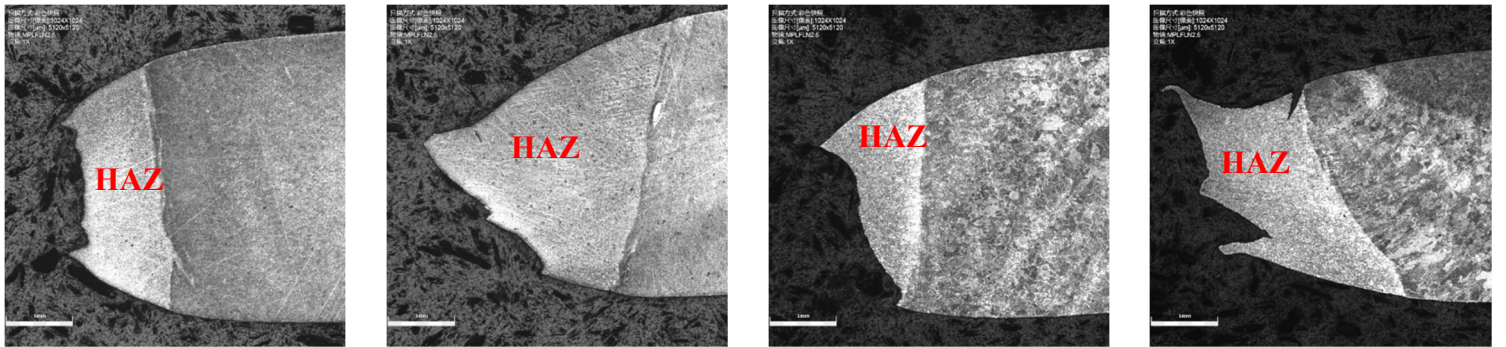
Figure 4 The SSRT stress- strain curves of weld metal specimens after testing in different cathodic potential.



(c)-0.75V (d) -0.85V (b)-0.95V (a)-1.05V

圖 5 銲接試棒在不同陰極電位下破斷面之 SEM 觀察圖。電位愈負，破斷面積愈大，局部仍然呈現 dimple 組織。

Figure 5 The SEM fracture surface micrographs of weld metal specimens after testing in different cathodic potential. It showed that the more negative potential the more fracture surface area would be, but still displayed some dimple microstructure locally.



(a)-0.75V (b)-0.85V (c)-0.95V (d)-1.05V

圖 6 銲接試棒破斷處之縱向截面 OM 觀察圖。

Figure 6 The longitudinal section optical metallographs of fracture positions of weld metal specimens.

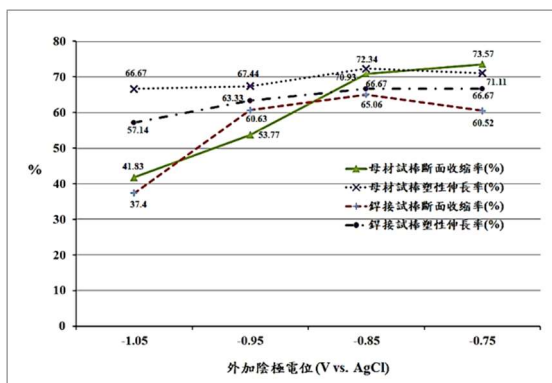


圖 7 母材試棒與銲接試棒不同電位下之斷面收縮率與塑性伸長率數據比較圖。

Figure 7 Reduction in area ratios and plastic elongation ratios of base metal and weld metal specimens varied with the applied cathodic potential.

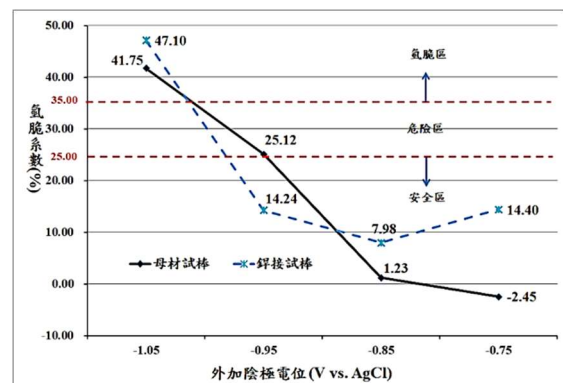


圖 8 母材與銲接試棒在不同電位氫脆係數趨勢圖。

Figure 8 Hydrogen embrittlement coefficient of base metal and weld metal specimens varied with applied cathodic potential.

4. 結論

為評估離岸風機水下基礎之鋼材在陰極保護下氫脆敏感性，在不同保護電位下以慢速率拉伸應變方法測試 S690Q 之母材及銲接件敏感性，經試驗後有以下幾點結論。

- (1) 陰極保護電位愈負，其塑性伸長率、斷面收縮率等脆性指標有降低趨勢，顯示陰極保護電位對 S690Q 氫脆確實有影響。
- (2) 在-1.05V 保護電位下，母材與銲接試棒皆可能發生氫脆現象。
- (3) 銲接試棒斷裂處皆發生在熱影響區。與母材試棒比較，具有較高之氫脆化傾向。研判可能因熱影響區生成氫脆敏感性組織，以及銲接殘留應力等原因所造成。銲道可能成為陰極保護下優先破裂之處。

基於上述試驗結果，對於 S690Q 材質其陰極保護電位之應嚴格控制在-1.05 以下，對於銲道應進行熱處理以消除殘留應力及氫脆敏感性組織。

參考文獻

- [1] Abernethy, K., et al., in Hydrogen Cracking of Legs and Spudcans on Jack-Up Drilling Rigs: A Summary of Results of an Investigation(HSE Books, 1993).
- [2] Veritas, Det Norske. "Cathodic protection design." Recommended Practice DNV-RP-B401 (2010).
- [3] 閻永貴，張海兵，馬力，“海洋環境中高強結構鋼陰極保護準則的研究”， The 6th China Corrosion Conference，中國深圳，2019。
- [4] Barker, J. C., in Data surveys of hydrogen assisted cracking in high strength jack-up steels.

(Health & Safety Executive, 1998).

- [5] J. Billingham, J. V. Sharp, J. Spurrier and P. J. Kilgallon, in Review of the performance of high strength steels used offshore. (Health and Safety Executive 2003).
- [6] Ashworth V and Booker CJL., in Cathodic Protection: Theory and Practice [M]. (New York: John Wiley and Sons Inc., 1986.) p.66-77
- [7] “Cathodic protection requirement for high strength steel in seawater assessed by potentiostatic weight loss measurements”, , Batt, C. L., and M. J. Robinson, British Corrosion Journal, 2002, 37(1), pp. 31-36.
- [8] "Evaluation of hydrogen assisted cracking resistance of high strength jack-up steels.", Coudreuse, L., et al., Marine Structures, 10.2-4 (1997), pp.85-106.
- [9] “Behaviour of high-strength structural steels exposed to seawater [J]”, Pircher H, Drodten P, Kaiser H J, Musgen B., Thyssen Technische Berichte, 14(4)(1990), pp.53-67.
- [10] ASTM G129. "Standard practice for slow strain rate testing to evaluate the susceptibility of metallic materials to environmentally assisted cracking." (2013).
- [11] "Delamination fracture related to tempering in a high-strength low-alloy steel.", Yan, Wei, et al., Metallurgical and materials transactions A, 41.1 (2010), pp.159.
- [12] “陰極保護電位對E550鋼氫脆敏感性的影響”，陳祥曦、張海兵、趙程、許立坤，腐蝕科學與防護技術，第28卷第2期，2016，第144-148頁。