

## 微觀組織和合金成分對 CO<sub>2</sub> 腐蝕行為的影響規律

路民旭<sup>1</sup>、張國安\*<sup>1</sup>、常煒<sup>2</sup>、安文傑<sup>2</sup>

Effect of Microstructure and Composition on CO<sub>2</sub> Corrosion

M. X. Lu<sup>1</sup>, G. A. Zhang\*<sup>1</sup>, W. Chang<sup>2</sup>, W. J. An<sup>2</sup>

### 摘要

對 API-X65、1Cr-X65 和 16Mn 三種材料在四種典型的高溫高壓介質環境和工藝條件中的 CO<sub>2</sub> 腐蝕行為進行了研究，其結果顯示，16Mn 表現出非常優越的耐局部腐蝕能力。在四種狀態中，均未發生局部腐蝕。1Cr-X65 的抗局部腐蝕能力比 API-X65 也有顯著提高，前者的局部腐蝕只在兩種狀態出現，而後者在三種狀態均出現局部腐蝕。局部腐蝕的統計分析顯示，1Cr-X65 的局部腐蝕深度比 API-X65 淺的多。三種材料無論是全面腐蝕還是局部腐蝕，其耐蝕性的排序均是：16Mn > 1Cr-X65 > API-X65。微觀分析顯示，16Mn 的優良抗 CO<sub>2</sub> 腐蝕能力可能來源於 16Mn 中肥粒體的電位相對較負，雪明碳體中的滲碳體電位相對較正，產生微電池效應，導致肥粒體優先溶解而形成腐蝕產物膜與金屬基體介面呈週期性間隔凸起，這種膜/基體介面犬牙交錯的機構對腐蝕產物膜具有“釘錨效應”，導致這種材料腐蝕產物膜與基體具有優良的附著力，從而抗流體剪切的能力比較高，在靜態和動態條件下形成腐蝕產物膜的剪切強度均高於 API-X65。

關鍵字：微觀組織；合金成分；CO<sub>2</sub> 腐蝕；局部腐蝕；剪切強度。

### ABSTRACT

The corrosion behavior of API-X65, 1Cr-X65, 16Mn in four typical CO<sub>2</sub>-containing solutions and conditions were investigated in this paper. Weight loss results indicated that 16Mn exhibited excellent resistance to localized corrosion and no localized corrosion was observed in all the four conditions. The resistance to localized corrosion of 1Cr-X65 obviously was improved compare to API-X65. Statistics for localized corrosion showed that the depth of pit in 1Cr-X65 was much shallower than that of API-X65. The order of the resistance to general and localized corrosion was :16Mn > 1Cr-X65 > API-X65. The excellent resistance to CO<sub>2</sub> corrosion of 16Mn possibly derives from the periodic protuberant boundary formed by the preferential solution of ferrite. The remainder lamellar cementite helps anchor FeCO<sub>3</sub> film to the substrate. This interlocking structure endue 16Mn with excellent resistance to hydrodynamical destroy. The shear intensity of corrosion scales of 16Mn was higher than that of API-X65.

Keywords: Microstructure; Composition; CO<sub>2</sub> corrosion; Localized corrosion; Shear intensity.

1 北京科技大學腐蝕與防護中心 北京100083

Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2 中海石油研究中心，北京，100027

China National Offshore Oil Research Center, Beijing 100027

\* 連絡作者(zga2003@163.com)

## 1. 前言

在油氣田的開採過程中，油氣集輸管道和設備往往由於 $\text{CO}_2$ 腐蝕而導致洩漏和爆破。近年來國內外的事故分析和研究趨勢指出， $\text{CO}_2$ 腐蝕越來越成為油田生產的主要障礙<sup>[1]</sup>。

材料的組織對其抗 $\text{CO}_2$ 腐蝕性能有重要的影響。許多研究者的研究結果指出在溫度低於80時，肥粒體-雪明碳體(鐵素體-珠光體)組織的腐蝕速率和局部腐蝕速率均比麻田散體(馬氏體)組織低<sup>[2,3]</sup>。Daminan<sup>[4]</sup>通過不同的熱處理方法研究了碳鋼的組織對腐蝕產物膜和腐蝕速率的影響，其結果顯示，淬火+回火(QT)試樣的抗腐蝕性能比退火試樣好。碳鋼中的 $\text{Fe}_3\text{C}$ 對腐蝕速率也有重要的影響，早期研究者認為 $\text{Fe}_3\text{C}$ 是腐蝕過程中所形成的腐蝕產物膜成分之一，後來的研究證實腐蝕產物膜中的 $\text{Fe}_3\text{C}$ 並非腐蝕產物，而是碳鋼中的肥粒體相腐蝕後遺留下來並作為腐蝕電池的陰極區加速碳鋼的腐蝕<sup>[5-9]</sup>。Crolet 等<sup>[10]</sup>研究指出 $\text{Fe}_3\text{C}$ 膜通常是片狀、疏鬆多孔、沒有保護性，並引起內部酸化。然而最近有研究者認為碳化物可以強化腐蝕產物膜與基體的附著力<sup>[11-13]</sup>。由此可見，材料的顯微組織和熱處理對 $\text{FeCO}_3$ 膜的生長和穩定性的影響機制還存在分歧，對腐蝕產物膜中 $\text{Fe}_3\text{C}$ 相的作用機理還不清楚。為了瞭解材料組織對 $\text{CO}_2$ 腐蝕的影響，本文選用了不同組織結構的材料(API-X65, 1Cr-X65, 16Mn) 研究了其對 $\text{CO}_2$ 腐蝕行為的影響。

## 2. 實驗方法

本實驗選用了API-X65、1Cr-X65、16Mn 三種材料，其化學成分如表1所示。其中 API-X65、16Mn 為熱軋狀態供貨，API-X65 為針狀變韌體(貝氏體)組織，力學性能均滿足 API 5L 標準對 X65 鋼級力學性能的要求。16Mn 則為典型的帶狀肥粒體-雪明碳體組織。1Cr-X65 經 900 淬火+600 回火熱處理後，其金相組織為回火韌斑體(索氏體)。圖1示出了三種材料的顯微組織，其力學性能如表2所示。

高溫高壓腐蝕試驗在 3 升高溫高壓 FCZ 磁力驅動反應釜中進行。試驗條件和工藝參數為模擬某油氣田的工況條件(如表3所示)，根據 $\text{CO}_2$ 分壓、溫度、流速分為四種狀態。試樣尺寸為外徑 $\Phi 72$  mm、內徑 $\Phi 64$  mm、弦長 35 mm、面寬 11 mm 的 1/6 圓環。試驗前試樣打磨至 800# 砂紙，丙酮除油，去離子水清洗。試驗介質為模擬油田地層水採出液，用去離子水和分析純化學試劑配製而成，其化學組分如表4所示。試驗前腐蝕介質用 99.95% 高純 $\text{CO}_2$ 除氧 4h，然後迅速把試樣安裝在夾具上，關閉所有出口閥門，再用高純 $\text{CO}_2$ 除氧 1h，以除去安裝過程進入的氧。然後升溫、升壓至設定數值，氣體出口用水封。試驗完畢取出試樣，去離子水清洗、吹乾。其中三個平行試樣利用失重法測量試樣的腐蝕速率；腐蝕產物用  $\text{HCl}(1\text{L}, \rho = 1.19\text{g/mL}) + \text{Sb}_2\text{O}_3(20\text{g}) + \text{SnCl}_2(50\text{g})$  溶液去除。

另一平行試樣利用 Cambridge S360 掃描電鏡觀察腐蝕試樣的表面和截面形貌；利用 League 2000 能譜儀分析腐蝕產物的成分；利用 CMT4305 微機電子萬能試驗機測試腐蝕產膜與基體的剪切強度，載入速度為 0.5 mm/min。

## 3. 結果與討論

### 3.1 腐蝕速率測試結果

圖2示出了三種材料在四種狀態下利用失重法所測得腐蝕速率的結果。從圖中可以看出，在狀態1和狀態2條件下，三種材料的腐蝕速率均比較小，而在狀態3、狀態4條件下腐蝕速率比較高，顯示高溫或低流速條件下腐蝕比較輕，在高流速(狀態3)或低溫靜態條件(狀態4)下，腐蝕比較嚴重。在高溫低流速條件下，材料表面容易形成具有保護性 $\text{FeCO}_3$ 膜，而高流速可加速反應物的傳輸過程，而且介質的切向作用力會阻礙腐蝕產物膜的形成或對已形成的保護膜有破壞作用，導致嚴重的局部腐蝕。 $\text{FeCO}_3$ 具有負溫度係數的溶度積，低溫條件下，緻密、保護性的腐蝕產物膜難以形成。從材料方面來看，API-X65 在狀態3的腐蝕速率最大，顯示流速對 API-X65 的影響最大，而對於

1Cr-X65、16Mn，狀態4 的腐蝕速率大於狀態3，表明溫度對其影響更為顯著。三種材料在四種狀態下無論是全面腐蝕還是局部腐蝕，其耐蝕性的排序均是：16Mn > 1Cr-X65 > API-X65。

### 3.2 局部腐蝕統計規律

對於 CO<sub>2</sub> 腐蝕，局部腐蝕比全面腐蝕的危害性更大，API-X65 除了在狀態1 不發生局部腐蝕外，在狀態2、3、4 均發生不同程度的局部腐蝕(點蝕、臺地狀腐蝕)，尤其在高流速(狀態3) 條件下，由於腐蝕產物膜難以形成或流體剪切對腐蝕產物膜的破壞作用比較大，導致 API-X65 局部腐蝕最為嚴重。1Cr-X65 不僅全面腐蝕速率比 API-X65 低，其抵抗局部腐蝕的能力也比 API-X65 高，在狀態1、2 條件下表現為全面腐蝕，沒有出現局部腐蝕現象，腐蝕產物膜完整、緻密；在狀態3、4 條件下主要表現為全面腐蝕，但伴有少量淺的點蝕坑。16Mn 則表現出優良的耐蝕性，不僅均勻腐蝕速率最低，而且具有良好的抗局部腐蝕能力，在四種狀態條件下均為全面腐蝕，腐蝕產物膜完整、緻密，沒有出現局部腐蝕現象。圖3(a)-(e) 示出了 API-X65 和 1Cr-X65 在給定狀態下局部腐蝕的分佈規律。其橫坐標為蝕坑深度範圍，縱坐標為落在該範圍內的蝕坑個數。從圖中可以看出，儘管 API-X65 和 1Cr-X65 都發生局部腐蝕，但 1Cr-X65 的局部腐蝕深度明顯淺的多，且蝕坑數量比較少。其中 API-X65 在狀態3 條件下的蝕坑最多、深度最大。顯示流速的增加大大加速了 API-X65 的局部腐蝕，而對 1Cr-X65 的影響並不是很明顯。

### 3.3 腐蝕產物膜的成分

腐蝕產物膜中合金元素的分佈對腐蝕速率有重要的影響。圖4 示出了 1Cr-X65、16Mn 在狀態3 條件下所形成腐蝕產物膜的截面形貌。從圖中可以看出，兩種材料均形成連續、完整的腐蝕產物膜，而且腐蝕產物膜與基體結合比較好。1Cr-X65 腐蝕產物膜的厚度約為 96.8μm，而 16Mn 腐蝕產物膜的厚度約為 71.6μm。圖4 也列出了 1Cr-X65、

16Mn 腐蝕產物膜內層、中間層和外層的成分分析結果。對於 1Cr-X65 腐蝕產物膜的內層和中間層，Cr 元素的含量分別為 2.94 wt%、3.03 wt%，均高於基體材料 (0.85 wt%)，顯示 Cr 元素在膜的內層和中間層發生一定程度的富集。而腐蝕產物膜外層則不含 Cr，這可能是內層和中間層膜為腐蝕過程中基體的 Fe 溶解而 Cr 保留下來，而外層膜主要是由於隨腐蝕的進行，溶液中的 Fe<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 達到飽和而沉積形成的碳酸複鹽。內層、中間層膜中 Cr 元素的富集形成 Cr 的氧化物或氫氧化物，這些含 Cr 化合物可以阻止腐蝕離子在溶液與金屬表面之間的傳輸過程，從而提高材料的耐蝕性<sup>[14]</sup>。

另外，外層和中間層膜中含有 Ca 元素，而內部不含 Ca 元素。外層膜中的 Ca 通常與 Fe 形成 (Fe,Ca)CO<sub>3</sub> 複鹽<sup>[15]</sup>。Fe<sup>2+</sup> 主要來自於金屬基體的陽極溶解，而 Ca<sup>2+</sup> 主要來自於溶液中 Ca<sup>2+</sup>。Ca<sup>2+</sup> 穿越腐蝕產物膜難度較大，導致其主要出現在腐蝕產物膜的外層和中間層膜。對於 16Mn，Mn 元素在腐蝕產物膜中的含量基本與基體相同。而 Ca 元素的分佈規律與 1Cr-X65 相同。圖5 為三種材料在狀態3 條件下形成腐蝕產物膜的 XRD 顯微結構分析，其腐蝕產物均 FeCO<sub>3</sub>，這可能是因為 XRD 分析為腐蝕產物膜的表層結構，使得內層的含 Cr 化合物未能檢測到。而外層的 Ca 元素主要以取代式存在，並沒有改變 FeCO<sub>3</sub> 結構特徵，因此也未出現 CaCO<sub>3</sub>、CaO 等化合物。

### 3.4 腐蝕產物膜的剪切強度

由三種材料的腐蝕速率比較和腐蝕產物膜、微觀形貌分析可知，16Mn 材料具有優良的抗 CO<sub>2</sub> 局部腐蝕能力。為觀察腐蝕產物膜與基體的介面狀況，圖6 示出了三種材料在狀態3 條件下去除腐蝕產物膜後的表面形貌。由圖中可以看出，API-X65、1Cr-X65 腐蝕後表面比較平整，而 16Mn 的腐蝕產物膜與金屬基體的介面呈週期性的帶狀凸起，與其帶狀肥粒體 - 雪明碳體組織極為相似。形成這種機構的原因可能是 16Mn 中肥粒



體的電位相對較負，雪明碳體中的滲碳體電位相對較正，產生微電池效應導致肥粒體優先溶解所造成的。隨著腐蝕的進行，最終導致腐蝕產物膜與金屬基體形成犬牙交錯的介面形狀。這種膜/基體介面犬牙交錯的機構對腐蝕產物膜具有“釘錨效應”，有利於保護性腐蝕產物膜的形成，而且大大提高膜與基體的附著力，從而抗流體剪切的能力比較大。在流體的沖刷作用，腐蝕產物膜對基體仍具有很好的保護作用。從而大大提高了這種材料的抗  $\text{CO}_2$  局部腐蝕能力。

為了研究腐蝕產物膜與基體的附著力，利用 CMT4305 微機電子萬能試驗機測試了 API-X65 和 16Mn 在狀態3、狀態4 所形成腐蝕產膜的剪切強度。腐蝕後的試樣切割成  $15 \times 8 \times 5 \text{ mm}$  長方體，用 SY-14 改性環氧結構膠膜（粘結強度  $\geq 35.5 \text{ MPa}$ ）將腐蝕試樣粘結在對粘空白試樣上，對粘空白試樣為  $40 \times 8 \times 5 \text{ mm}$  長方體，粘結面積（即腐蝕產物膜面積）為  $120 \text{ mm}^2$ ，177 固化 2h 後安裝在夾具上（圖7），試樣與夾具接觸面塗凡士林以減小摩擦力。在對粘空白試樣一端施加壓力載荷至腐蝕試樣與對粘空白試樣完全分離，載入速度為  $0.5 \text{ mm/min}$ ，記錄最大載荷和載入時間曲線。

表5 和圖8 分別示出了剪切試驗結果和相應的載入曲線。從表和圖可知，16Mn 在兩種狀態所形成的腐蝕產物膜的剪切強度均高於 API-X65，這是由於 16Mn 材料中膜與基體介面犬牙交錯的機構對腐蝕產物膜具有“釘錨效應”，使得腐蝕產物膜能夠承受更高的抗剪切應力，其抵抗剪切應力機制示意於圖9。16Mn 在狀態4 條件下所形成腐蝕產物膜的剪切強度最高（ $27.33 \text{ MPa}$ ），顯示在靜態條件下所形成的腐蝕產物膜與基體具有更高的附著力。圖 10(a)、(b) 示出了 16Mn 在狀態4，狀態3 所形成腐蝕產物膜剪切試驗後的表面形貌，其表面均為高低不平的坑坑窪窪。相比之下，靜態條件下所形成的腐蝕產物膜剪切後的表面比較平整，而動態條件的試樣表面由於腐蝕產物膜剝離後所形成的孔洞更為明顯。API-X65 的腐蝕產物膜與基體的介面則不存在犬牙交錯的機構，其剪切強度較 16Mn 低。在靜態條件下（圖10(c)）所形成的腐蝕產物膜的剪切強

度比動態條件（圖10(d)）的高，而且剪切試驗後試樣表面比較平整。

## 4. 結論

1. 腐蝕失重試驗結果顯示三種材料在四種狀態下無論是全面腐蝕還是局部腐蝕，其耐蝕性的排序均是： $16\text{Mn} > 1\text{Cr-X65} > \text{API-X65}$ 。
2. 1Cr-X65 內層膜中 Cr 元素的富集提高了材料的耐蝕性，1Cr-X65 不僅全面腐蝕速率比 API X65 低，其抵抗局部腐蝕的能力也比 API-X65 高。
3. 16Mn 在四種狀態下均未出現局部腐蝕，其優良的抗局部腐蝕性能與其帶狀肥粒體-雪明碳體組織有關，腐蝕產物膜與金屬基體形成犬牙交錯的介面形狀。這種膜/基體介面犬牙交錯的機構對腐蝕產物膜具有“釘錨效應”，有利於保護性腐蝕產物膜的形成，而且大大提高膜與基體的附著力。剪切試驗結果顯示 16Mn 腐蝕產物膜與基體的剪切強度明顯高於 API-X65。

## 致謝

感謝國家自然科學基金重點項目（50231020）和中海石油研究中心對本研究的經費支持。

## 參考文獻

1. 路民旭、白真權、趙新偉等，腐蝕與防護，第 23 卷第 3 期，2002 年，第 105-113 頁。
2. J. L. Crelet, "Influence of a Layer of Undissolved cementite on the Rate of the  $\text{CO}_2$  Corrosion of Carbon Steel", In: Proceedings of Corrosion/94(C), Paper No. 4, (Houston, TX: NACE, 1994)
3. M. W. Joosten, et al., "In Situ Observation of Localized  $\text{CO}_2$  Corrosion", In: Proceedings of Corrosion/94(C), Paper No. 3, (Houston, TX: NACE, 1994)
4. A. D. Lopez, S. N. Simison, and S. R. De

- Sanchez, *Electrochimica ACTA*, 48 (2003) pp.845-854.
5. S. Al-Hassan, B. Mishra, D. L. Olson, and M. M. Salama, *Corrosion*, 54 (1998) pp. 480-491.
  6. J. K. Heuer and L. F. Stubbings, *Corrosion*, 54 (1998) pp. 566-575.
  7. J. L. Mora-Mendoza and S. Turgoose, *Corros. Sci.*, 44 (2002) pp.1223-1246.
  8. A. Dugstad, H. Hemmer and M. Seiersten. "Effect of Steel Microstructure upon Corrosion Rate and Protective Iron Carbonate Film Formation", In: *Proceedings of Corrosion/00(C)*, paper no. 24, (Orlando FL, TX: NACE, 2000)
  9. S. Netic and L. Lunde, *Corrosion*, 55 (1994) pp.717~727.
  10. J. L. Crolet, N. Thevenot, and S. Netic, *Corrosion*, 54 (1998) pp.194-203.
  11. M. Ueda and H. Takabe, "Effect of Environmental Factor and Microstructure on Morphology of Corrosion Products in CO<sub>2</sub> Environments", In: *Proceedings of Corrosion/99(C)*, paper no. 13, (San Antonio, TX: NACE, 1999)
  12. C. A. Palacios and J. R. Shadley, *Corrosion*, 47 (1991) pp.122-127.
  13. D. A. Lopez, W. H. Schreiner, S. R. de Sanchez, and S. N. Simison, *Appl. Surf. Sci.*, 207 (2003) pp. 69-85.
  14. R. Kirchheim, B. Heine, and H. Fischmeister, *Corros. Sci.*, 29 (1989) pp. 899~918.
  15. T. Murata, E. Sato, and R. Matsushashi, "Factors Controlling Corrosion of Steels in CO<sub>2</sub>-Saturated Environments", In: *Advances in CO<sub>2</sub> Corrosion*, NACE, Houston, TX. 1 (1984) pp. 64~71.
- 收到日期：2004 年 10 月 27 日  
 修訂日期：2005 年 2 月 24 日  
 接受日期：2005 年 3 月 30 日

表1 API-X65、1Cr-X65 和 16Mn 三種材料的化學成分 (wt%)。  
 Table 1 Chemical composition of API-X65, 1Cr-X65 and 16Mn(wt%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	Nb	Fe
API-X65	0.04	0.2	1.5	0.011	0.003		0.02				balance
1Cr-X65	0.08	0.3	0.55	0.014	0.005	0.85	0.18	0.26	0.16	0.02	balance
16Mn	0.16	0.41	1.46	0.019	0.012						balance

表2 API-X65、1Cr-X65 和 16Mn 三種材料的力學性能。  
 Table 2 Mechanical properties of API-X65, 1Cr-X65 and 16Mn.

Materials	$\sigma_{0.5}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta$ (%)
API-X65	510	650	18
1Cr-X65	530	645	20
16Mn		535	25.5

表3 模擬試驗條件和工藝參數。  
 Table 3 Simulating testing conditions and parameters value.

工藝參數	狀態 1	狀態 2	狀態 3	狀態 4
CO <sub>2</sub> 分壓(kPa)	720	461	358	459
溫度(°C)	75.3	57.0	60.1	35.0
流速(m/s)	0.05	0.05	0.76	0
實驗週期	30 天			

表4 油田地層水採出液的成分 (mg/L)。

Table 4 Concentration (mg/L) of formation water drawn out from oil fields.

離子	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	總礦化度
濃度	18872	86	142	27632	1334	1452	111	20047

表5 API-X65、16Mn 腐蝕產物膜的剪切試驗結果。

Table 5 Cutting testing results of the corrosion scales of API-X65、16Mn.

試樣	最大截荷(KN)	面積(mm <sup>2</sup> )	剪切強度(MPa)
16Mn, condition 4	3.28	120	27.33
16Mn, condition 3	2.72	120	22.67
X65, condition 4	2.11	120	17.58
X65, condition 3	1.29	120	10.75

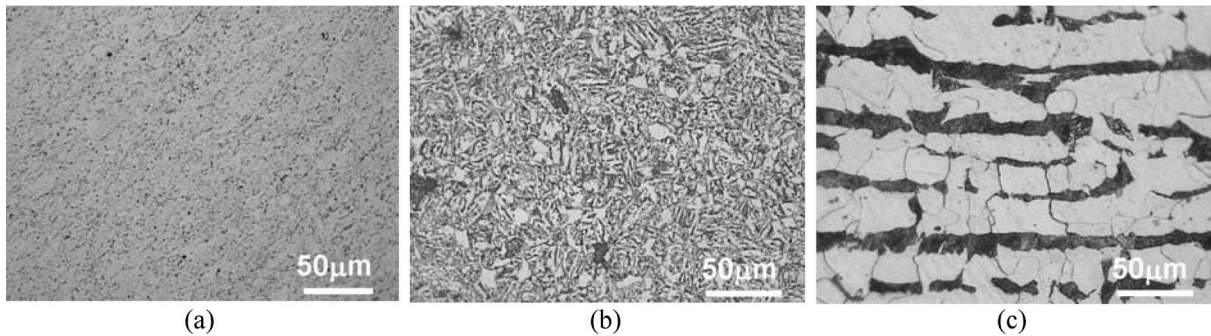


圖1 三種試驗材料的金相組織：(a) API-X65；(b) 1Cr-X65；(c) 16Mn。

Figure 1 Microstructure of the testing materials: (a) API-X65; (b) 1Cr-X65; (c) 16Mn.

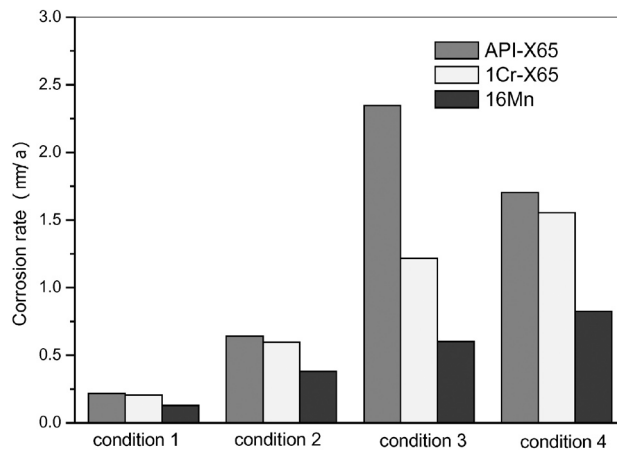


圖2 三種材料在四種狀態下的均勻腐蝕速率比較。

Figure 2 Comparison of general corrosion rate of the materials under four conditions

微觀組織和合金成分對 CO<sub>2</sub> 腐蝕行為的影響規律

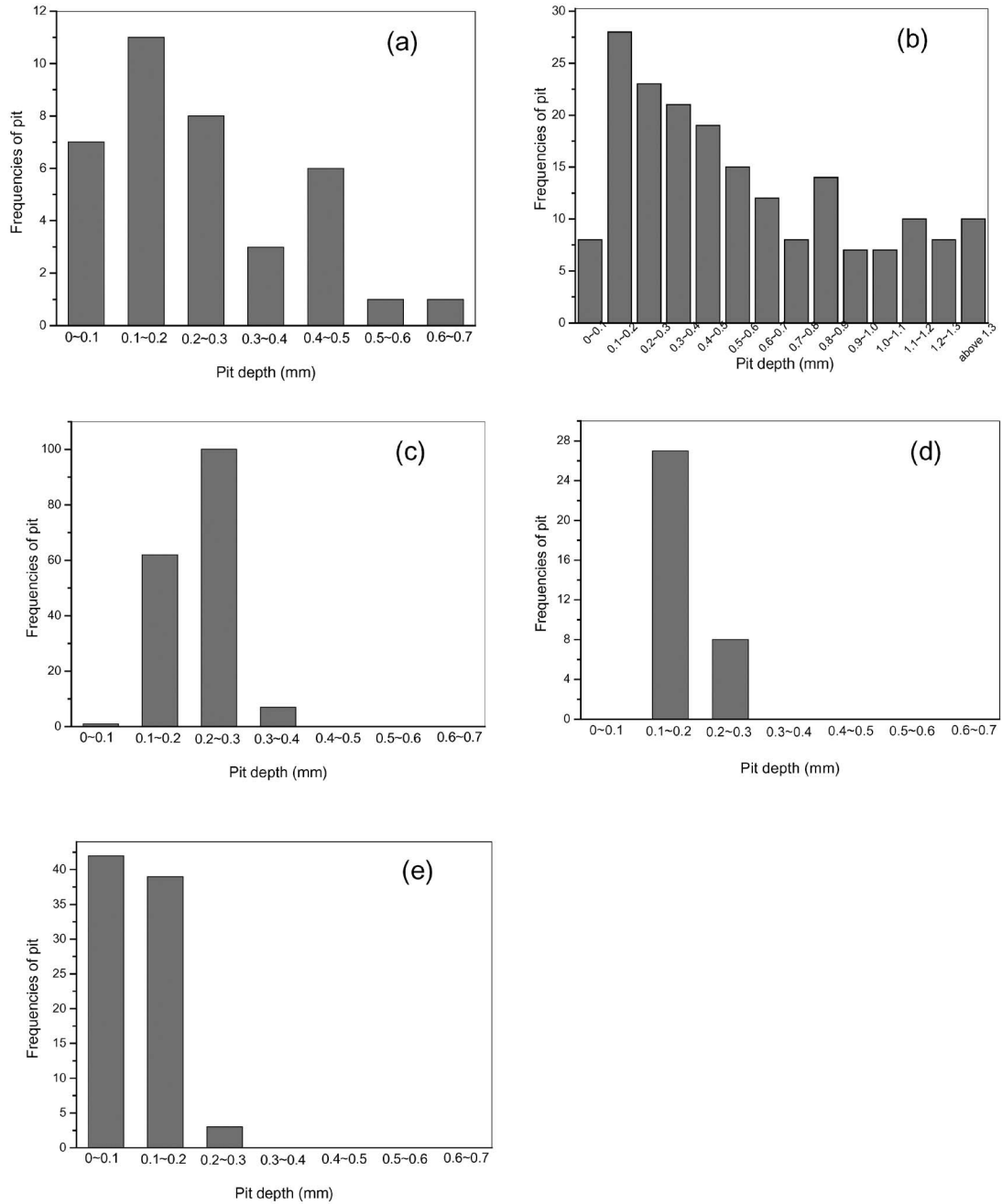


圖3 局 腐蝕深度分佈規律 (a) API-X65 狀態2 (b) API-X65 狀態3 (c) API-X65 狀態4 (d) 1Cr-X65 狀態3 (e) 1Cr-X65 狀態4。

Figure 3 Depth distribution of localized corrosion: (a) API-X65, condition 2, (b) API-X65, condition 3, (c) API-X65, condition 4, (d) 1Cr-X65, condition 3, (e) 1Cr-X65, condition 4.

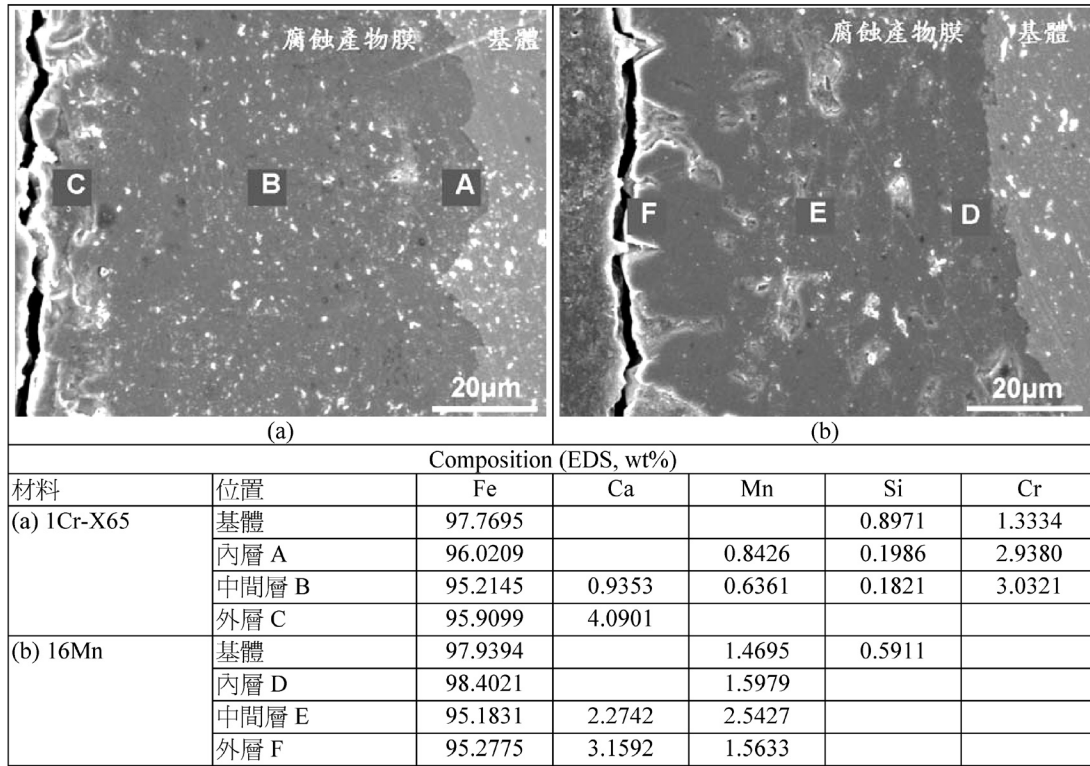


圖4 狀態3 條件下腐蝕產物膜的截面形貌：(a) 1Cr-X65，(b) 16Mn。  
 Figure 4 SEM cross-section images of the corrosion scales formed under condition three: (a) 1Cr-X65, (b) 16Mn.

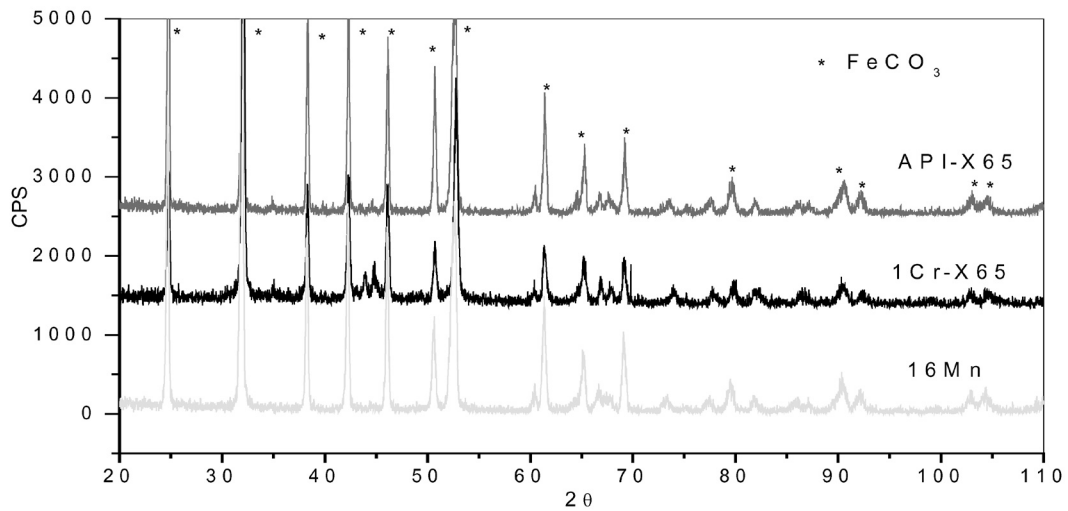


圖5 三種材料在狀態3 條件下腐蝕產物膜的 XRD 繞射圖譜。  
 Figure 5 XRD results of corrosion scales of the three materials testing under condition three.



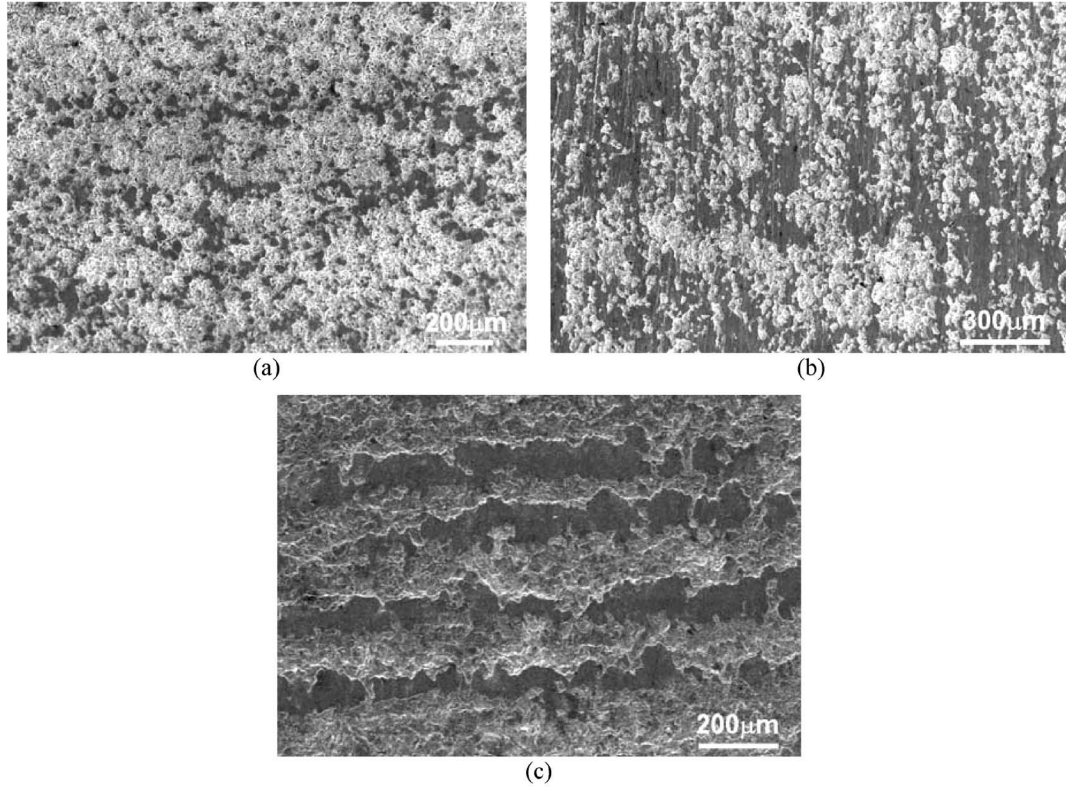


圖6 三種材料在狀態3 條件下去除腐蝕產物膜後的表面形貌對比：(a) API-X65；(b) 1Cr-X65；(c) 16Mn。

Figure 6 SEM surface images of the three materials after the scales eliminated: (a) API-X65, (b) 1Cr-X65, (c) 16Mn.

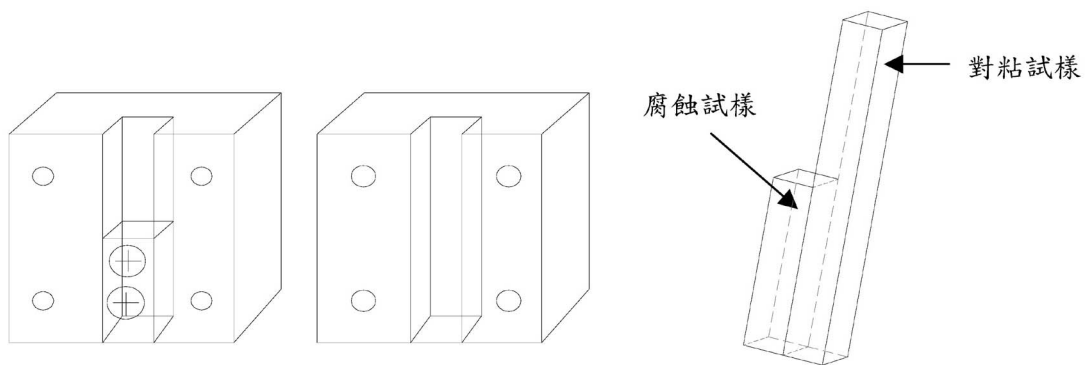


圖7 剪切試驗夾具和試樣示意圖。

Figure 7 Schematic of coupon and module for cutting testing.

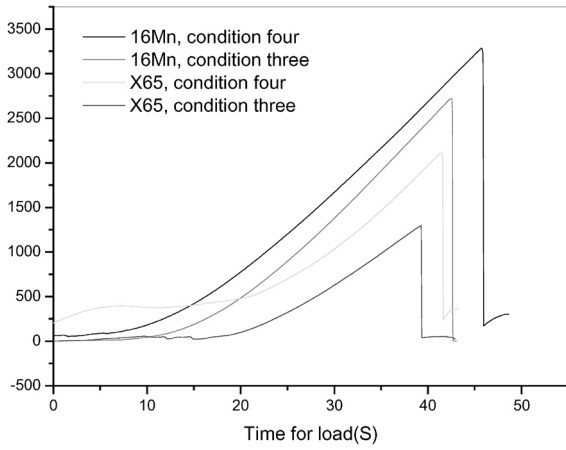


圖8 腐蝕產 剪切試驗 入曲線。  
Figure 8 Load-time curves of cutting testing.

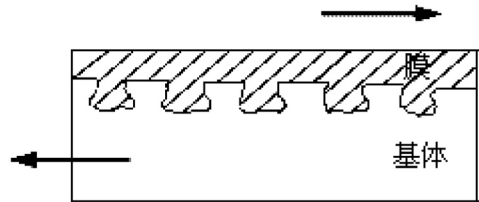


圖9 16Mn 腐蝕產 剪切試驗示  
意圖。  
Figure 9 Schematic of cutting testing  
for the scales of 16Mn.

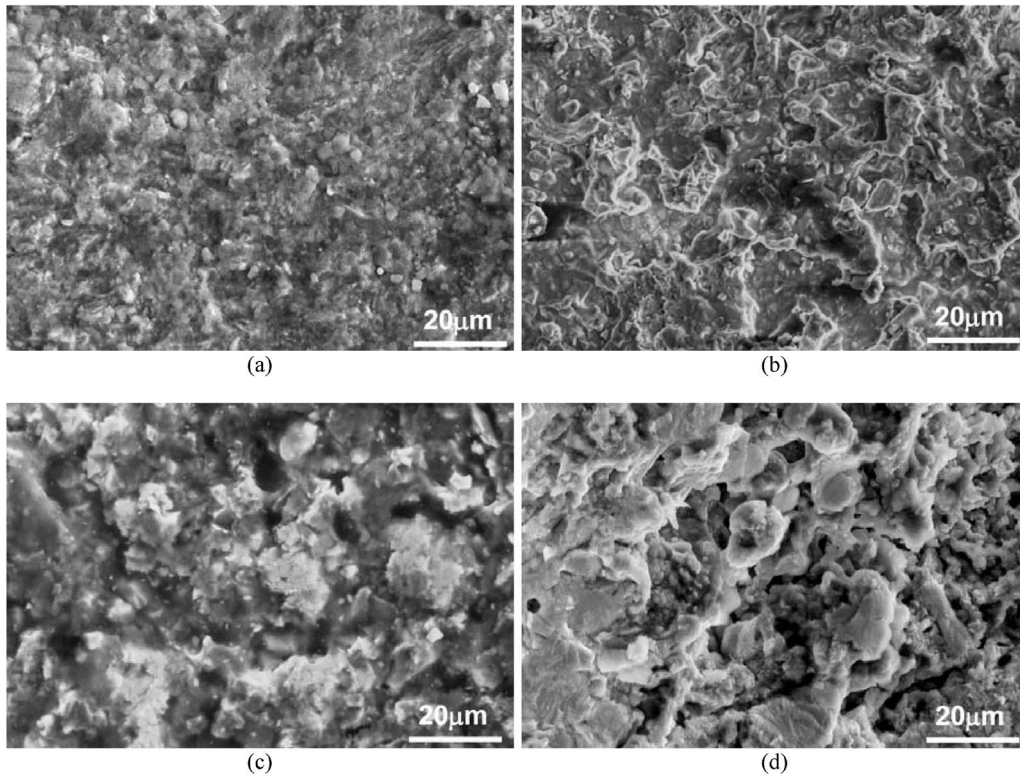


圖10 腐蝕產物膜剪切後的表面形貌：(a) 16Mn 狀態4；(b) 16Mn 狀態3；(c) API-X65 狀態4；(d) API-X65 狀態3。  
Figure 10 SEM surface images of the coupons after cutting testing: (a) 16Mn, condition four; (b) 16Mn, condition three; (c) API-X65, condition four; (d) API-X65, condition three.