

## HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度對油氣田中 CO<sub>2</sub> 腐蝕的影響

張國安\*、路民旭、吳蔭順

### Effect of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> Concentration on CO<sub>2</sub> Corrosion in Oil and Gas Fields

G. A. Zhang\*, M. X. Lu, Y. S. Wu

#### 摘要

利用動電位掃描和失重法研究了 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度對油氣田中 CO<sub>2</sub> 腐蝕的影響。高溫高壓腐蝕試驗的研究結果表明，隨著介質中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增加，材料的腐蝕速率下降，介質的 pH 值增大。腐蝕產物膜的 SEM、EDS、XRD 分析表明，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較低時，腐蝕產物主要為 FeCO<sub>3</sub> 晶體，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較高時，腐蝕產物主要為 Ca、Mg 的化合物，形成 Ca(Fe,Mg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 複鹽。在高 pH 值下，Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 比 Fe<sup>2+</sup> 更容易沉澱出來。動電位極化曲線表明，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度低於 0.042 M 時，隨著 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增大，溶液 pH 升高，H<sup>+</sup> 的還原速率下降，陰極電流密度下降；當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度達到 0.126 M 時，溶液中的 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的直接還原占主導地位，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增大加速陰極過程。對於陽極過程，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度低於 0.042 M，主要為活化過程，而且隨 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增大，陽極溶解的電流密度下降；HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度增大到 0.126 M 時，陽極過程出現明顯的活化-鈍化行為。

關鍵詞：油氣田；CO<sub>2</sub> 腐蝕；HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度；極化曲線。

#### ABSTRACT

The effect of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration on CO<sub>2</sub> corrosion were investigated by polarization measurement of potentiodynamic scans and weight loss method in this paper. Under high pressure and high temperature, the corrosion rate of steel X65 decreased with the increase of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration while pH increased. SEM, EDS, XRD results of the corrosion scales indicated that a typical FeCO<sub>3</sub> crystallite was found at low HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration but Ca(Fe,Mg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> at high HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> precipitated prior to Fe<sup>2+</sup> at high pH value. Potentiodynamic polarization curves showed that the cathodic current density decreased with increase of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration at low HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration. When HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration reached 0.126 M, increasing HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration promoted cathodic reactions. Anodic behavior was an active process at low HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration and the anodic current density decreased with the increase of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration. An evident active-passive behavior exhibited in anodic process at 0.126 M HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Keywords: Oil and gas fields; CO<sub>2</sub> corrosion; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration; Polarization curves.

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

\* 連絡作者(zga2003@163.com)

## 1. 前言

油氣田中  $\text{CO}_2$  腐蝕往往引起管道和設備的腐蝕失效，給油氣田造成重大的經濟損失和災難性事故。因腐蝕所造成的原油洩漏會破壞水資源、破壞生態環境並造成資源浪費。 $\text{CO}_2$  腐蝕已成為困擾石油工業發展的一個極為突出的問題<sup>[1-3]</sup>。隨著油氣田開發進入中後期，深層高壓  $\text{CO}_2$  油氣田的開發，油氣中的  $\text{CO}_2$  含量和含水率上升，以及回注  $\text{CO}_2$  強化採油工藝 (EOR) 的廣泛應用， $\text{CO}_2$  腐蝕問題更趨嚴重<sup>[4]</sup>。

油氣井中地層水通常含有不同濃度的鹽溶液，其中  $\text{HCO}_3^-$  濃度對管道的  $\text{CO}_2$  腐蝕有較大的影響。 $\text{HCO}_3^-$  的存在一方面提高介質的 pH 值，降低  $\text{H}^+$  的陰極還原過程和腐蝕產物膜 ( $\text{FeCO}_3$ ) 的溶解度，從而降低腐蝕速率。另一方面， $\text{HCO}_3^-$  可以直接參與陰極還原反應，加速金屬的陽極溶解。關於  $\text{HCO}_3^-$  對  $\text{CO}_2$  腐蝕的影響還存在較多的爭議，Videm<sup>[5]</sup> 認為  $\text{HCO}_3^-$  可增大介質的 pH 值，降低  $\text{FeCO}_3$  的溶解度，從而降低碳鋼的腐蝕速率，碳鋼在適當的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  濃度和電位範圍內可產生一種緻密的鈍化膜，但這種鈍化膜的破壞會導致點蝕。Jasinski<sup>[6]</sup> 的研究則表明儘管  $\text{HCO}_3^-$  增大了溶液的 pH 值，但碳鋼的腐蝕速率變化不大。許立銘等<sup>[7]</sup> 的研究結果表明：當溫度較低 (29 °C) 且  $\text{HCO}_3^-$  離子濃度低時，碳鋼的腐蝕速率因陰極過程受阻而減小；而當濃度高時，腐蝕速度反而會增加。在較高溫度 (59 °C)  $\text{HCO}_3^-$  離子濃度低時， $\text{HCO}_3^-$  離子濃度增加對碳鋼腐蝕有一定的抑制作用，而濃度高時會促進碳鋼的腐蝕。為了澄清介質中  $\text{HCO}_3^-$  對碳鋼腐蝕的影響程度，本文應用動電位掃描和失重法研究了油氣田中地層水  $\text{HCO}_3^-$  離子濃度對碳鋼的  $\text{CO}_2$  腐蝕行為影響。

## 2. 實驗方法

實驗材料為 X65 管線鋼，其化學成分 (wt%) 為 C : 0.04 % , Si : 0.2 % , Mn : 1.5 % , P : 0.011 % , S : 0.003 % , Mo : 0.02 % , Fe : 餘量。高

溫高壓腐蝕試驗在 10 升高溫高壓 FCZ 磁力驅動反應釜中進行。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 圓環試樣。試驗前將試樣打磨至 800# 砂紙，丙酮除油，去離子水清洗。試驗介質為模擬某油田地層水采出液，用去離子水和分析純化學試劑配製而成，其組分如表 1 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  $\phi 72$  mm 的圓柱狀夾具上，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 (65 °C, 0.3 MPa)，氣體出口用水封，試驗週期為 6 天。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  $\text{HCl}$  (1L,  $\rho = 1.19\text{g/mL}$ ) +  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  (20g) +  $\text{SnCl}_2$  (50g) 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形貌；利用 League 2000 能譜儀分析腐蝕產物的成分；利用日本理學 (Rigaku) 公司的 Dmax-RB X 射線衍射儀對腐蝕產物膜進行物相定性分析，其工作條件為：40kV, 150 mA, Cu 靶。

電化學實驗是在恒溫水浴中進行，測試裝置由 Solartron 公司的 SI1280 型電化學測試系統和 1 升容積的玻璃電解池組成，採用三電極體系，工作電極為試樣，輔助電極為鉑電極，參比電極選用飽和甘汞電極。試樣為  $\phi 15$  mm  $\times$  5 mm 的圓片，試樣暴露的工作面積為 1.77  $\text{cm}^2$ ，打磨至 800# 砂紙，去離子水清洗，吹乾，丙酮除油，去離子水清洗。測試前介質溶液通入 99.95% 高純  $\text{CO}_2$  除氧 4h。然後安裝好打磨、清洗後的試樣，並繼續通  $\text{CO}_2$  1h，出氣口用水封。動電位極化曲線測試電位範圍：- 800 mV ~ 1000 mV vs.  $E_{\text{corr}}$ ，掃描速度為 20 mV/min，測試溫度為 65 °C， $\text{CO}_2$  分壓為 0.1 MPa。

## 3. 結果與討論

### 3.1 高溫高壓下 $\text{HCO}_3^-$ 濃度對腐蝕速率的影響

如上所述，對於介質中  $\text{HCO}_3^-$  濃度的影響還

存在一定的爭議，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的存在一方面提高介質的 pH 值，降低 H<sup>+</sup> 的陰極還原過程和腐蝕產物膜 (FeCO<sub>3</sub>) 的溶解度。另一方面，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 可以直接參與陰極還原反應，加速金屬的陽極溶解。圖1 示出了在 CO<sub>2</sub> 分壓為 0.3 MPa，溫度為 65 °C，靜態和流速為 0.5 m/s 條件下，溶液中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度對腐蝕失重和計算 pH 的影響。從圖中可以看出，隨著溶液中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增加，材料的腐蝕速率下降，溶液的 pH 值上升。在低的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，隨著 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度增大，試樣的腐蝕失重下降比較快；當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較高時，隨著 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度增大，試樣的腐蝕失重下降比較慢，這可能是在低的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，溶液的 pH 比較低，陰極反應以 H<sup>+</sup> 的還原為主。隨著 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的增大，溶液的 pH 迅速增大(從圖中可以看到)，降低 H<sup>+</sup> 的還原過程，從而大大降低腐蝕速率。當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較高時，溶液的 pH 比較高，陰極還原過程以 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的直接還原為主導，H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的直接還原部分地彌補了 pH 值升高而引起的腐蝕速率下降，因而總的腐蝕速率下降減慢。Nesic 的研究表明，當溶液中 pH<4 時，陰極反應主要以 H<sup>+</sup> 還原為主，pH 的增大使 H<sup>+</sup> 濃度減小，降低 H<sup>+</sup> 的還原速度，腐蝕速率下降。當 pH 值介於 4~6 之間時，溶液中的 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 還原逐漸上升為主導地位<sup>[8]</sup>。

同時從圖中也可以看出，在低的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，動態條件下的腐蝕速率明顯大於靜態條件，而在高的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，兩者的腐蝕速率相差不大。這是因為低的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，陰極過程以 H<sup>+</sup> 還原為主，流動狀態可加速 H<sup>+</sup> 的擴散過程，從而增大陰極過程，而且此時所形成的 FeCO<sub>3</sub> 比較疏鬆，在流體的沖刷作用下容易破壞而失去保護作用，因而流速的影響比較大。在高的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度時，陰極過程以 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的還原為主，而且所形成的腐蝕產物膜比較緻密、完整，受流體的破壞作用較小，因而動態與靜態條件下腐蝕速率相差較小。

腐蝕產物膜的 SEM 和 EDS 分析表明，在靜態條件下，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較低時，腐蝕產物主

要為 FeCO<sub>3</sub> 晶體，晶體堆垛比較緻密(圖2a)。當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較高時，腐蝕產物主要為 Ca、Mg 的化合物，晶體形貌變得模糊，晶粒比較細小、緻密(圖2b)，對基體具有更好的保護性，這表明在高 pH 值下，Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 比 Fe<sup>2+</sup> 更容易沉積出來。而在動態條件(0.5 m/s)下，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較低時，腐蝕產物也主要為 FeCO<sub>3</sub> 晶體，並觀察到腐蝕產物膜在流體的沖刷作用下產生破壞(圖2c)。當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度比較高時，其表面形貌與靜態條件下的差別不大(圖2d)，主要也是 Ca、Mg 的化合物，其中 Ca 的含量高達 62.08wt%(表2)。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度為 0.0047M 時，靜態條件下腐蝕產膜的厚度約為 104μm，而動態條件下只有 19μm，而且部位腐蝕產物膜已脫落。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度為 0.126M 時，靜態條件下腐蝕產膜的厚度約為 34μm，動態條件下則只有 10μm。可見在動態條件下，由於流體的沖刷作用阻礙了腐蝕產物膜的形成。

圖3 和圖4 分別示出了動態條件(0.5 m/s)下 X65 鋼在 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度為 0.0047 M 和 0.126 M 介質中所形成腐蝕產物膜的 EDS 和 XRD 衍射圖。從圖中可以看出，當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度為 0.0047 M 時，腐蝕產物膜主要為 FeCO<sub>3</sub>；當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度增大至 0.126 M 時，腐蝕產物膜中除了未溶解的 Fe 外，出現 Ca(Fe,Mg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的衍射峰，這表明在高 pH 值溶液中 Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 與 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 共沉積出來，在腐蝕產物膜中以碳酸複鹽的形式存在。Ca、Fe、Mg 的碳酸鹽均為方解石族，它們可以相互取代，形成不同配比的碳酸複鹽<sup>[9]</sup>。這種碳酸複鹽晶體更加細小，緻密，能經受流體的沖刷作用，對基體具有更好的保護性。

### 3.2 動電位極化曲線測試結果

圖5 為利用動電位掃描測定 X65 鋼在 CO<sub>2</sub> 分壓為 0.1MPa，溫度為 65 °C，靜態條件下不同 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度模擬地層水介質中的極化曲線。碳鋼在含 CO<sub>2</sub> 水溶液中，其陰極過程可能包含 (1)-(4) 反應<sup>[10]</sup>。當 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度低於 0.042M 時，溶液 pH 值比較低，陰極過程以 H<sup>+</sup> 還原為主，隨著 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

濃度增大，陰極電流密度下降，表明  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大使得溶液 pH 升高， $\text{H}^+$  的還原速率下降；當  $\text{HCO}_3^-$  濃度達到 0.126 M 時，陰極電流密度上升，這是由於溶液中的  $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的直接還原占主導地位， $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大加速陰極過程。對於陽極過程， $\text{HCO}_3^-$  濃度低於 0.042M 時，主要為活化過程，而且隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大，陽極溶解的電流密度下降； $\text{HCO}_3^-$  濃度增大到 0.126M 時，陽極過程出現明顯的鈍化區，表明在高 pH 下試樣表面容易形成腐蝕產物膜，這種腐蝕產物膜抑制了陽極過程。

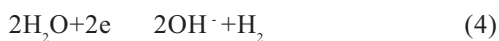
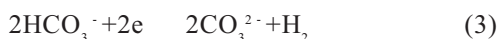
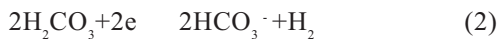


表3 列出了採用高斯—牛頓法對極化曲線的弱極化區資料進行擬合，得到電化學參數  $E_{\text{corr}}$ 、 $I_{\text{corr}}$ 、 $\beta_a$ 、 $\beta_c$  和在飽和  $\text{CO}_2$  腐蝕介質中所測量的 pH 值。自腐蝕電位  $E_{\text{corr}}$  隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度增大而下降，這是由於  $\text{HCO}_3^-$  濃度低於 0.042M 時， $\text{HCO}_3^-$  濃度增大抑制陰極過程。當  $\text{HCO}_3^-$  濃度達到 0.126 M 時，在活化區內陽極電流增大，其  $E_{\text{corr}}$  下降。 $\text{HCO}_3^-$  濃度低於 0.042 M 時， $I_{\text{corr}}$  隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大而減小， $\text{HCO}_3^-$  濃度大於 0.042M 時， $I_{\text{corr}}$  隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大而增大，其變化規律與  $\text{HCO}_3^-$  濃度對陰極過程的影響相同。然而，這與高溫高壓腐蝕試驗測得的結果有所不同。在高溫高壓條件下，試樣表面均形成  $\text{FeCO}_3$  腐蝕產物膜， $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大使得溶液的 pH 上升，試樣表面更容易形成緻密、完整的腐蝕產物膜，同時腐蝕產物膜在高 pH 值溶液中其溶解度下降，因而對基體具有更好的保護性。而在常壓電化學測試過程中，具有保護性的腐蝕產物膜難以形成，當  $\text{HCO}_3^-$  濃度的低於 0.042 M 時， $\text{HCO}_3^-$  濃度增大抑制陰極過程，因而其腐蝕速率下降。當  $\text{HCO}_3^-$  濃度的大於 0.042 M 時，隨著溶液中的  $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的直接還原占主導地位，其陰極過程加快，腐蝕速率反而增大。由此可

見，由於高溫高壓  $\text{CO}_2$  腐蝕受腐蝕產物膜的影響， $\text{HCO}_3^-$  濃度對其腐蝕速率的影響規律與常壓條件下不盡相同。溶液中 pH 值隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大而增大，而且增大的幅度下降，這與高溫高壓計算的 pH 一致，只是高溫高壓中 pH 值更低，這與高  $\text{CO}_2$  分壓下其溶解度更大有關。

## 4. 結論

1. 高溫高壓腐蝕試驗結果表明試樣的腐蝕速率隨溶液中  $\text{HCO}_3^-$  濃度增大而下降，下降的趨勢減緩，溶液中 pH 增大。當  $\text{HCO}_3^-$  濃度比較低時，腐蝕產物主要為  $\text{FeCO}_3$  晶體，晶體堆垛比較緻密。當  $\text{HCO}_3^-$  濃度比較高時，腐蝕產物主要為  $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$  的複鹽，晶體形貌變得模糊，晶粒比較細小、緻密，對基體具有更好的保護性，在高 pH 值下， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  比  $\text{Fe}^{2+}$  更容易沉積出來。
2. 動電位極化曲線表明，當  $\text{HCO}_3^-$  濃度低於 0.042 M 時，溶液的 pH 值比較低，陰極過程以  $\text{H}^+$  還原為主，隨著  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大，溶液 pH 升高， $\text{H}^+$  的還原速率下降，陰極電流密度下降；當  $\text{HCO}_3^-$  濃度達到 0.126 M 時，溶液中的  $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{HCO}_3^-$  的直接還原占主導地位， $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大加速陰極過程。對於陽極過程， $\text{HCO}_3^-$  濃度低於 0.042 M，主要為活化過程，而且隨  $\text{HCO}_3^-$  濃度的增大，陽極溶解的電流密度下降； $\text{HCO}_3^-$  濃度增大到 0.126 M 時，陽極過程出現明顯的活化 - 鈍化行為。

## 致謝

感謝國家自然科學基金重點專案 (50231020) 對本研究的經費支持。

## 參考文獻

1. M. B. Kermani and A Morshed, Corrosion, 59 (2003) pp.659~683.



2. K. Videm and J. Kvarekval, Corrosion, 51 (1995) pp.260~269.
  3. T. Hong, Y H Sun, and W P Jepson, Corros. Sci., 44 (2002) pp.101~112.
  4. 鄭家燊, 斷塊油氣田, 第 3 卷第 1 期, 1996 年, 第 62~65 頁。
  5. K. Videm and A M Koren, Corrosion, 49 (1993) pp.746~754.
  6. R. Jasinski, Corrosion, 43 (1987) pp.214~218.
  7. 許立銘、董澤華、範漢香, 天然氣工業, 第 16 卷第 4 期, 1996 年, 第 57~60 頁。
  8. S. Nestic, J. Postlethwaite, and S. Olsen, Corrosion, 52 (1996) pp.280~294.
  9. 潘兆禮主編, in: “結晶學及礦物學(下冊)”, 地質出版社 (北京, 1994) pp.247~256.
  10. G. I. Ogundele and W. E. White, Corrosion, 42 (1986) pp.71~78.
- 收到日期: 2004 年 10 月 27 日  
 修訂日期: 2005 年 2 月 28 日  
 接受日期: 2005 年 3 月 30 日

表1 油田中地層水採出液的成分 (mg/L)。

Table 1 Concentration (mg/L) of formation water drawn out from oil fields.

離子 濃度	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
	2568	78	64	3580	48	863	153	7354

表2 動態條件 (0.5 m/s) 下 X65 鋼在不同 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度的 CO<sub>2</sub> 水溶液中腐蝕產物膜的 EDS 能譜分析結果。

Table 2 EDS analytical results of corrosion scales of steel X65 after testing in CO<sub>2</sub>-containing aqueous solution with different concentration of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> under dynamic condition (0.5m/s).

[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	Content of the elements (wt%)						
	Fe	Ca	Cl	S	Mg	Na	Mn
0.0047 M	93.79	0.84	1.02	1.93	—	—	2.42
0.126 M	18.72	62.08	5.53	0.45	5.94	7.27	—

表3 電化學參數擬合結果。

Table 3 Fitting results of the electrochemical parameters.

[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	E <sub>corr</sub> (mV vs. SCE)	I <sub>corr</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	β <sub>a</sub> (mV)	β <sub>c</sub> (mV)	pH (飽和CO <sub>2</sub> )
0	-713.68	11.21×10 <sup>-2</sup>	37.83	121.52	4.5
0.0047 M	-720.12	8.04×10 <sup>-2</sup>	43.38	99.05	5.5
0.0141 M	-755.83	4.97×10 <sup>-2</sup>	38.97	82.20	6.2
0.042 M	-774.84	2.05×10 <sup>-2</sup>	34.78	125.22	6.7
0.126 M	-787.54	4.51×10 <sup>-2</sup>	38.14	86.49	7.0

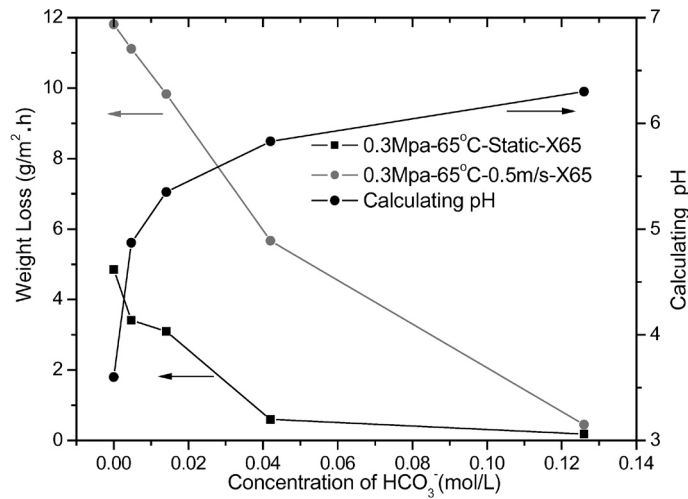


圖1  $\text{HCO}_3^-$  濃度對 X65 鋼腐蝕失重的影響 ( $\text{CO}_2$  分壓：0.3 MPa，溫度：65 °C，流速：0 or 0.5 m/s，試驗週期：6 days)。  
 Figure 1 Effect of the concentration of  $\text{HCO}_3^-$  on weight loss for steel X65 ( $\text{CO}_2$  partial pressure: 0.3MPa, Temperature: 65 °C, Flow rate: 0 or 0.5 m/s, Exposed time: 6 days)

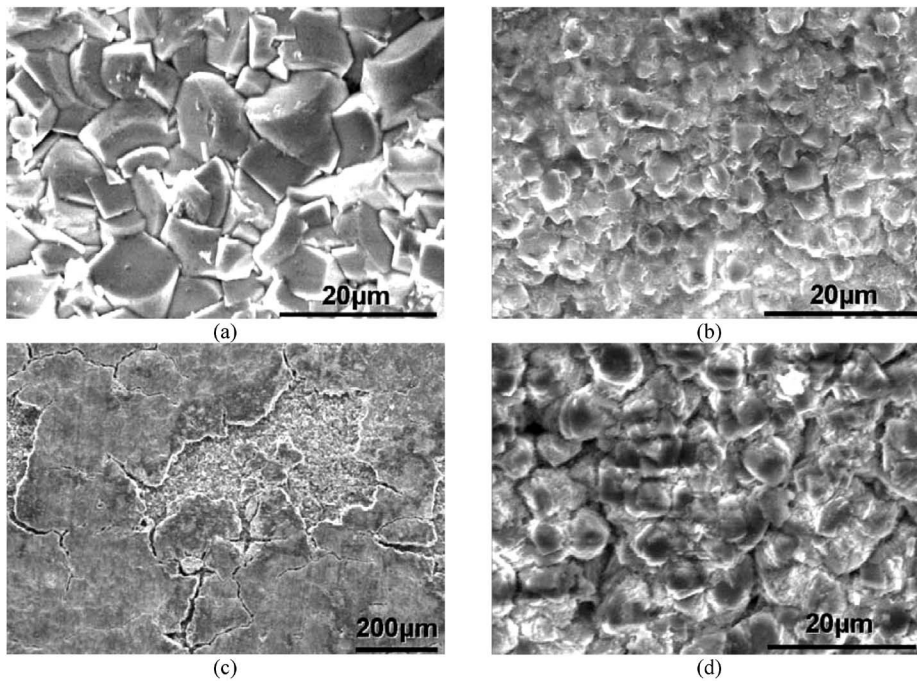


圖2 X65 鋼在不同  $\text{HCO}_3^-$  濃度  $\text{CO}_2$  水溶液中腐蝕產物膜的 SEM 表面形貌：(a) 0.0047 M，0 m/s；(b) 0.126 M，0 m/s；(c) 0.0047 M，0.5 m/s；(d) 0.126 M，0.5 m/s。  
 Figure 2 SEM surface images of corrosion scales of steel X65 after testing in  $\text{CO}_2$ -containing aqueous solution with different concentration of  $\text{HCO}_3^-$ ：(a) 0.0047 M，0 m/s；(b) 0.126 M，0 m/s；(c) 0.0047 M，0.5 m/s；(d) 0.126 M，0.5 m/s.

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度對油氣田中 CO<sub>2</sub> 腐蝕的影響

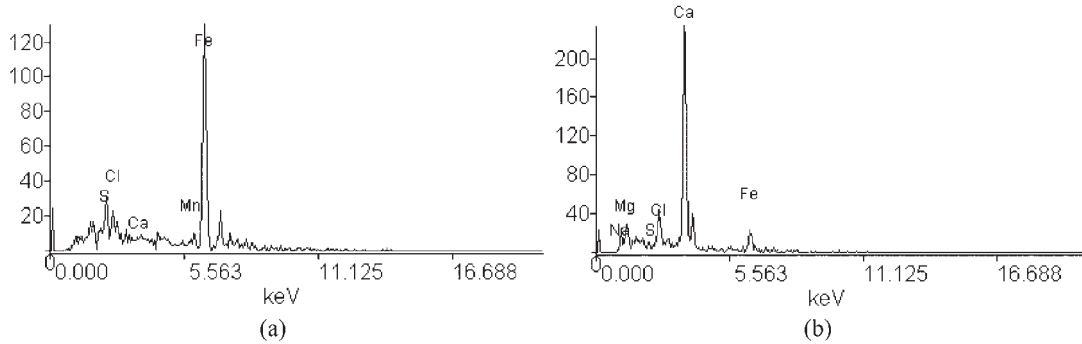


圖3 動態條件 (0.5 m/s) 下 X65 鋼在不同 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度 CO<sub>2</sub> 水溶液中腐蝕產生的 EDS 能譜圖 (a) 0.0047 M (b) 0.126 M。

Figure 3 EDS spectra for corrosion scales of steel X65 after testing in CO<sub>2</sub>-containing aqueous solution with different concentration of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> under dynamic condition (0.5 m/s): (a) 0.0047 M, (b) 0.126 M.

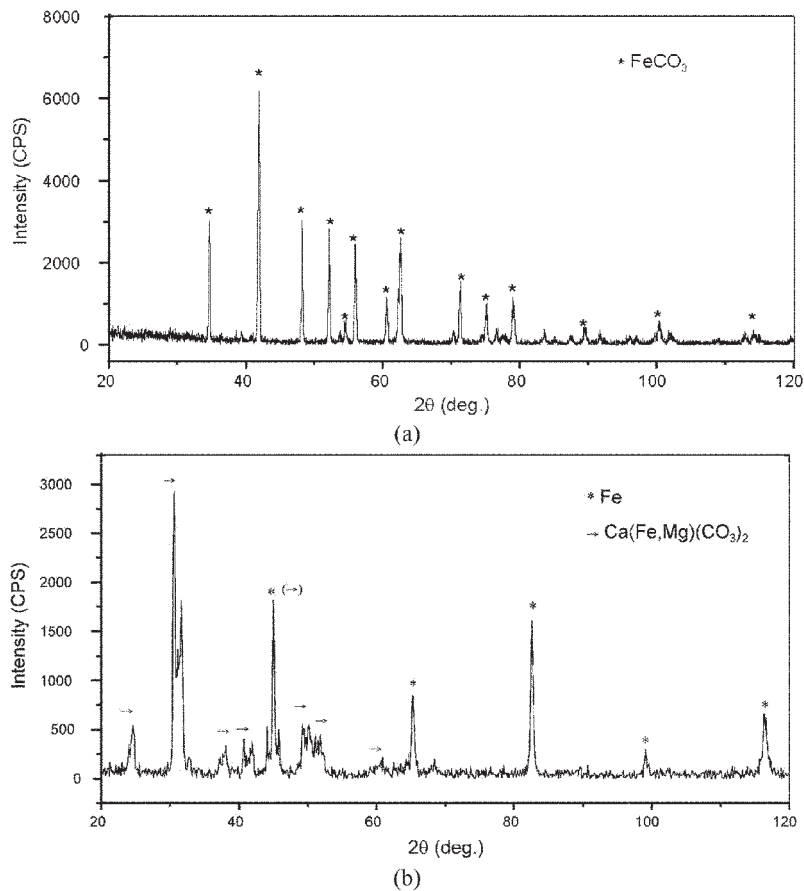


圖4 動態條件 (0.5 m/s) 下 X65 鋼在不同 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度 CO<sub>2</sub> 水溶液中腐蝕產物膜的 XRD 衍射圖：(a) 0.0047 M，(b) 0.126 M。

Figure 4 XRD pattern of corrosion scales of steel X65 after testing in CO<sub>2</sub>-containing aqueous solution with different concentration of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> under dynamic condition (0.5 m/s): (a) 0.0047 M, (b) 0.126 M.

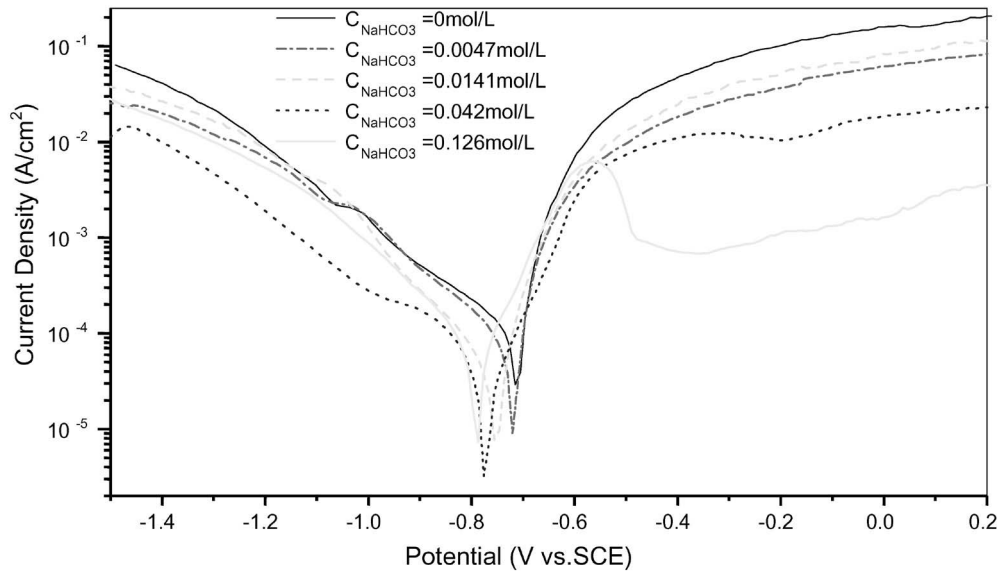


圖5 X65 鋼在不同 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 濃度 CO<sub>2</sub> 水溶液中的極化曲線。  
Figure 5 Polarization curves of steel X65 in CO<sub>2</sub>-containing aqueous solution with different concentration of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.