

**應**力腐蝕開裂是一種局部化腐蝕類型，其特點為散播十分快速的細裂紋，導致組件和潛在的關聯結構故障。抵消應力腐蝕開裂效應最重要的考慮因素之一是選擇適當的扣件合金。

## 了解扣件應用脆化問題— 應力腐蝕開裂 (SCC)

文/ Daniel H. Herring

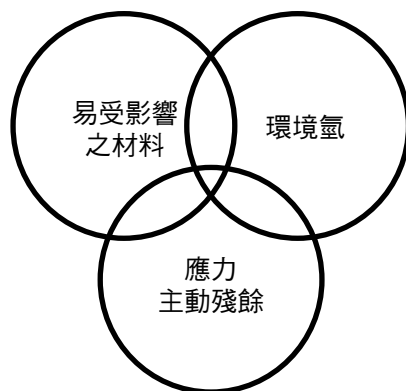
扣件很容易受到各種形式的脆化，包括：

- 環境導致的開裂
- 應力腐蝕開裂
- 氫脆化
- 腐蝕疲勞
- 液體金屬脆化

這些形式中，應力腐蝕開裂 (SCC, stress corrosion cracking) 通常被認為是最複雜的。應力腐蝕開裂是一種故障機制，由環境、易受影響之材料和拉伸應力等原因造成 (圖1)。

應力腐蝕開裂現象受到許多因素影響，例如應力水平、合金成分、微結構、腐蝕種類濃度、表面處理、微環境表面效應、溫度、電子化學電位等。進一步的複雜徵狀是萌生和擴展階段，及在某些情況下，觀察到裂縫開始在腐蝕坑的基底出現。

圖1 應力腐蝕開裂影響因素



應力腐蝕開裂包括以下形式：

- 硫化物應力開裂
- 氯化物誘導 SCC
- 鹼誘導 SCC
- 氫誘導 SCC

圖1顯示所有三種可以誘導應力腐蝕開裂條件的合併影響。在本質上，開裂可以是穿晶式或晶間式。在一個腐蝕性環境中，應力必須在拉伸應力超過一個通常低於材料屈服應力的最低值 (即閾值) 的形式。溫度是一個影響開裂的重要環境因素。點蝕通常也與應力腐蝕開裂現象有關。此外，在無嚴重變形或明顯成分惡化的情況下，也可能出現災難性故障。

## 機制

提出的應力腐蝕開裂機制包括以下：

- **主動路徑**：在裂紋尖端的局部優先腐蝕 (溶解)，沿著一條易受影響路徑，而大部分材料留在比較被動的狀態。與被動狀態相比，當一合金在其主動狀態時，金屬溶解的速率可以提高幾個數量級。
- **氫脆化**：據推測，在高應力區，有害的氫濃度與裂紋尖端或其他缺口有關，會導致局部脆化。
- **脆膜誘導裂口**：在被裂紋尖端的韌性鈍化阻斷之前，薄膜表面開始的裂縫可能散播 (超過一微小距離) 進入比較韌性材料的下層。如果在腐蝕過程的影響下，脆薄膜在鈍化的裂紋尖端再形成，這樣的過程會一再重複。

## 抵消應力腐蝕開裂的影響

結合良好設計、正確選擇抗SCC材料、環境管理、維護和檢查，可有效控制腐蝕。其要考慮的應力因素包括：

- **操作條件**
  - 應用 (拉伸) 應力
- **熱誘導因素**
  - 溫度梯度
  - 差熱力 (膨脹與收縮)
- **腐蝕產物的聚積**
  - 體積依賴性



## ○ 組裝問題

- 不良配接（公差問題）
- 轉緊／扭矩
- 壓合和縮合
- 扣件干擾
- 接合

## ○ 製造過程的殘餘應力

- 接合（焊接、釐焊、低溫焊）
- 鍛造或鑄造
- 表面處理（電鍍、機械清潔等）
- 熱處理（如淬火、相變）
- 成型和形塑
- 加工
- 切割和剪切

**抵消應力腐蝕開裂效應最重要的考慮因素之一是選擇適當的扣件合金。**選擇一個具有足夠強度和良好

（一般）耐腐蝕性的扣件相對簡單。不過，在達成一個耐腐蝕的扣件材料，瞭解在應用中起作用的應力腐蝕開裂問題的特殊類型，是重要的一步。在某些環境中，因為一般性腐蝕明顯可見，及藉由適當的預防性維護，可看出一般性腐蝕和在必要時更換扣件，可能需選擇可抵抗一般性腐蝕的材料。另一方面，應力腐蝕開裂經常在沒有警示情況下發生，很少是在之前就明顯可見，而當它發生時，可能會出現災難性故障。

其他方法包括去除腐蝕環境或改變生產過程或設計，以減少腐蝕（拉伸應力）。結合良好設計，小心挑選耐應力腐蝕等級材料（如不銹鋼）和有效管理，包括維修和檢查，都可有效控制腐蝕。為防止SCC發生和盡量減少發生時的後果，可採取以下具體步驟：

1. 在組件設計和製造過程中，考慮SCC的可能性
2. 選擇適當的材料等級
3. 維持環境的化學平衡
4. 確保（有機或無機）污染最小化之可能性
5. 保持適當的環境條件（如空氣品質）
6. 定期檢查組件，早期發現腐蝕和SCC跡象

## 例子

在許多應用中，使用奧氏304和316不銹鋼材料製成的扣件（如ASTM A193 B8級）可以提供良好的一般性耐腐蝕性能。但是，如果環境中含有氯化物、氟化物或其他鹵素，這些都可以作為氯化SCC的催化劑。舉例來說，在海洋環境中，碳鋼容易受到腐蝕，所以不銹鋼扣件看起來是一個合乎邏輯的選擇。然而，在海洋或其他含有氯化物的環境中，合金鋼扣件是首選。為了減少它們對一般性腐蝕的易受影響性，合金鋼扣件，像B7級，通常會提供某種類型的保護塗層，如鋅或鎘電鍍。但不幸的是，這可能導致另一種形式的環境應力開裂，此稱為液體金屬脆化（LME, liquid metal embrittlement）；或一相關的故障型式，稱作固體金屬誘導脆化（SMIE, solid metal induced embrittlement），因此適時警覺是必須的。

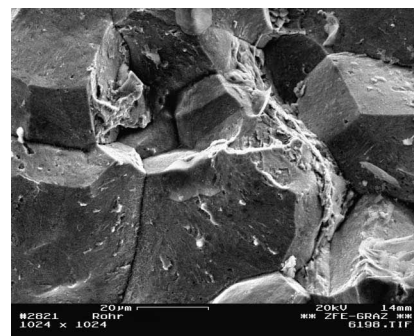
## 應力腐蝕開裂的徵狀

應力腐蝕開裂是一種局部化腐蝕類型，其特點為散播十分快速的細裂紋（圖2），導致組件和潛在的關聯結構故障。

圖2<sup>[1]</sup> 應力腐蝕開裂故障的典型外觀



(a)

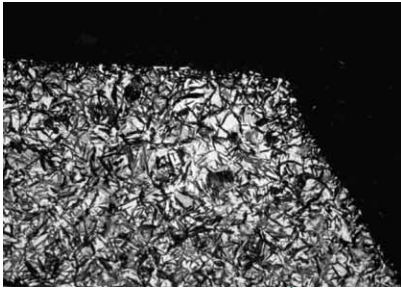


(b) 高錳不銹鋼緊固件

## 其他扣件故障機制

扣件故障並不限於必須由扣件製造商處理的疲勞、氫脆化、應力腐蝕開裂和超載。其他故障機制包括：殘餘奧氏體的轉換（圖3）、夾雜物（圖4）和成型／鍛造缺陷，例如不良的晶粒流（圖5）。

圖3<sup>[3]</sup> 殘餘奧氏體



(白色區域為殘餘奧氏體)

圖4<sup>[4]</sup> 典型的鋼中夾雜物

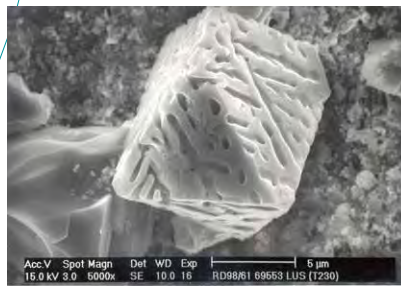
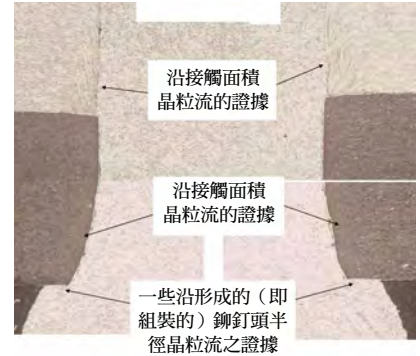


圖5 鉚釘呈現不良的晶粒流和過早故障



## 進一步資訊

ASTM STP 1487 (「扣件的結構完整性，包括環境和應力腐蝕開裂的影響」第三卷) 中包含了11份同行評審的論文，提供關於結構完整性的資訊，包括環境和應力腐蝕開裂之影響。其中四大部分內容涵蓋：

- 1. 疲勞和裂紋擴展實驗技術** — 三篇論文，包括認證海軍扣件材料的扣件結構性因素測試的發展；對航太應用的裂紋擴展行為試驗；與熱處理前後冷軋螺紋對多重預緊力條件高強度粗螺紋螺栓的抗疲勞性的影響。
- 2. 設計/環境效應** — 二篇論文，研究轉緊速度與摩擦和夾緊負荷之間的關係；可以改善應力腐蝕開裂 (SCC) 抵抗力，以改善設計品質的最佳螺紋軋製過程。
- 3. 疲勞和裂紋擴展分析技術** — 三篇論文，描述對扣件疲勞和裂紋擴展評估的當前分析技術；一個採用有限元分析產生的應力場之數值裂紋擴展模型；和強度高、細紋螺栓對多重預緊力條件之抵抗力。
- 4. 設計考量** — 三篇論文，側重在綜合、非線性三維 (3-D) 有限元素模型，以模擬對鉚接結構的位移控制；一個最先進的疲勞裂紋擴展分析技術，各行業用以評估結構損壞耐受性評估；螺栓螺紋內材料的應力狀態與關於每一個影響螺栓連接的結構完整性參數。

## 總結

仔細考慮上述因素，以及花時間了解扣件將如何用於服務和用在何處，都可以在大多數扣件應用上，減少應力腐蝕開裂。

## 參考文獻：

1. Corrosion Doctors ([corrosion-doctors.org](http://corrosion-doctors.org))
2. Spence, Thomas, Selecting the Right Fastener, Materials Newsletter, Flowserve ([www.flowserve.com](http://www.flowserve.com)).
3. Herring, D. H., A Discussion of Retained Austenite, Industrial Heating, March 2005.
4. Herring, D. H., Steel Cleanliness: Inclusions in Steel, Industrial Heating, August 2009.
5. Reilly, Peter, Swimming in the Dangerous Waters of Stress Corrosion. Roof Consultant ([www.roofconsultant.co.uk](http://www.roofconsultant.co.uk))
6. Fastenal ([www.fastenal.com](http://www.fastenal.com))
7. [www.corrosion-club.com](http://www.corrosion-club.com)
8. ASTM International ([www.astm.org](http://www.astm.org))

## 作者簡介

Daniel H. Herring 為 HERRING GROUP, Inc. 公司總經理