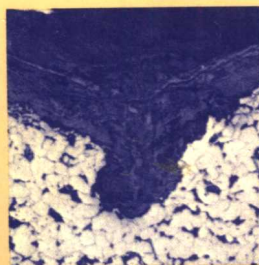
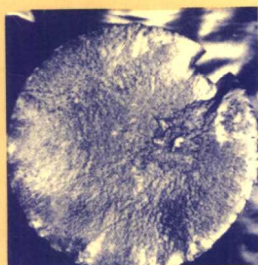
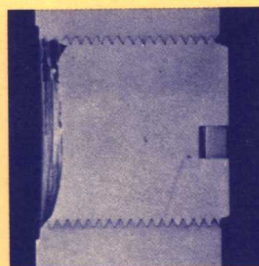
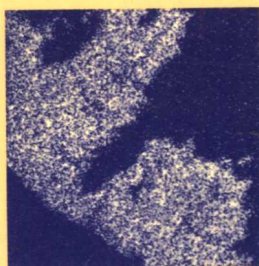
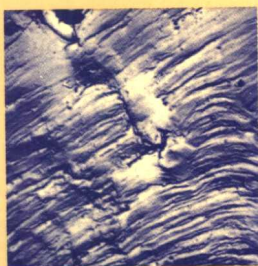


機械機器破損原因及對策

楊義雄・賴子邨 編譯



機械技術出版社 印行



全華科技圖書股份有限公司 經銷

破損事故解析方法

2

2.1 破損事故解析項目及其順序

破損事故發生時，或發現結構物材料之一部分有龜裂存在時，要調查、解析、對策以防止類似事故再度發生。事故調查所必要之項目如表2.1所示。

表 2.1 事故調查必要之項目

-
- | |
|----------------------------|
| (1) 使用材料調查 |
| ① 製造經歷調查：製鋼，壓延，熱處理，加工（形狀）等 |
| ② 分析：X線及化學分析，不純物元素分佈等之調查 |
| ③ 機械性質 |
| 伸張，彎曲，硬度，衝擊，疲勞試驗等 |
| ④ 組織觀察：斷面之顯微鏡組織觀察（目視及顯微鏡） |
| ⑤ 表面性狀（目視及顯微鏡）殘留應力調查 |
| ⑥ 外觀及破面觀察 |
-
- | |
|-----------------|
| (2) 設計及使用條件調查 |
| ① 設計時之前提條件 |
| ② 外力：種類，大小，反覆次數 |
| ③ 使用環境：溫度，氣氛 |
| ④ 其他；補修狀況 |
-
- | |
|------------------------------------|
| (3) 模擬試驗 |
| ① 實驗室內之實驗：疲勞，破壞韌性，FEM（有限要素法）等之應力計算 |
| ② 現場再實驗：應力測定等 |
-
- | |
|-------------|
| (4) 綜合檢討及對策 |
|-------------|
-

1. 使用材料調查

對於破損事故原因之探討或許沒有直接之作用，但是把握材料之基本特性，做為此後力學計算之基礎資料則極為重要。尤其，「材料之製造經歷」、「化學成分」、「組織」、「機械性質」等為必須條件。也許未使用設計圖面所指定之材料，或於製造時或使用後施行熔接修補之情形者亦有，依據表上所列項目逐一調查使用材料就能明白，以防止事故解析時產生錯誤之結論。

此外，零件之破損部，集中於探討其原因，對於破面解析尤其重要。最近電子顯微鏡甚為普遍，尤其由掃描型電子顯微鏡（SEM, Scanning Electron Microscope）觀察結果，對事故原因之探討，破壞力學之手法，加諸於材料之應力、反覆次數或雖然尚未破斷，但其剩餘壽命亦可計算出。

2. 設計與使用條件調查

機器設計時，依據幾個前提條件為基礎而設計。通常設定不會破壞為條件，但實際却發生破壞，因此對於前提條件變成有相當程度之誤算。確定前提條件後，對於實際使用條件之間隙度（gap）加以確認，因此能回饋（feedback）至設計，最重要的是盡可能詳細調查。經歷如此之過程，則實際之破損事故例可成為寶貴之實驗點，可以充分活用。

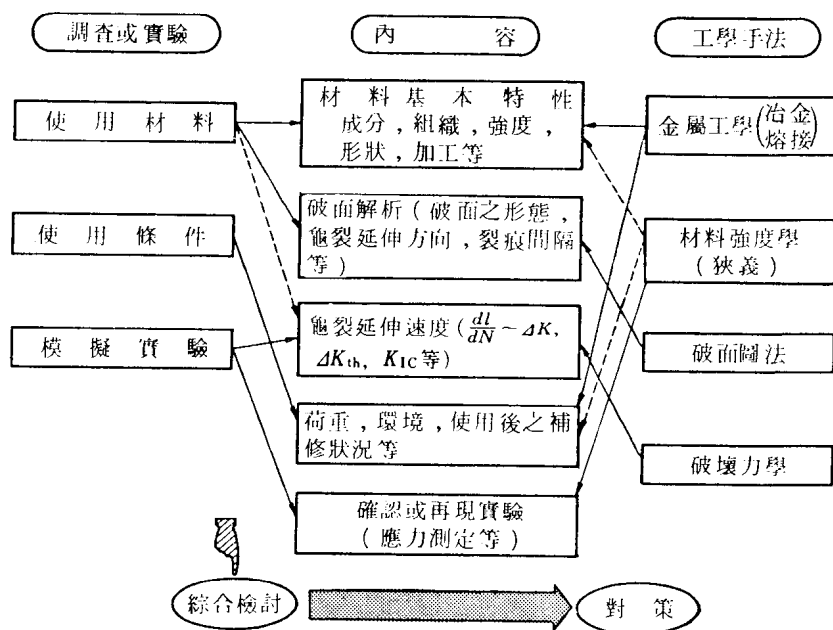


圖 2.1 破損事故解析順序

3. 模擬試驗

僅由上述 1 與 2 之調查結果，往往無法明瞭其真相。在此種情況下，必須以實驗室內之試驗確認，或必須於現場作應力測定等。但是做模擬試驗，需要相當之費用與時間，於緊急情況下是無法做到的。

4. 綜合檢討

根據以上 1～3 之結果作要因分析，以瞭解破損原因。此時，不宜單獨遽下結論，最好召集各專家共同討論後而得結論。瞭解破損原因後，盡可能作定量性評估，以期導出必要之對策。

以上所述，可歸納如圖 2.1。

2.2 實際解析破損事故應注意事項

零件破損依目前之情況，其解析方法之第一步，先以肉眼與放大鏡觀察其外觀及破面，並盡可能詳細記錄下來。不可爲了趕時間而馬上切片，如此可能會將證據消滅掉。應該按照調查之鐵則「先做放大鏡觀察，再做顯微鏡觀察」。要做破面切斷時，常用油漆或油性墨水做記號。預備觀察部分，應注意勿被所做記號遮蓋。破面於顯微鏡下凹凸之情形較想像中更顯著，於其中所附之油漆或油性墨水記號，事後雖可用溶劑清洗，但不易完全去掉。且材料太硬無法以鋸切斷時，可改用切斷砂輪切斷。大型零件，宜先以氧氣切斷。使用放電加工法時，因其冷却媒體之水玻璃會附着於破面，使表面模糊。於非使用放電加工法不可時，此部分應事先做好保護工作。與實驗室所得之試片破面不同，實際材料破面常有銹或其他附着物附着，或經常於破面間發生相互碰磨。附着物之除去方法將於下節說明。破面如互相碰磨，則於破面觀察時無法得到有用情報，所以要避免相互碰磨。除目視之外，以顯微鏡觀察時，必須殘留有破面形態之部分。萬一破面全部受損時，必須依賴破面觀察以外之情形來下結論。

2.3 金屬附着物之除去方法

結構物零件之破損事故解析與實驗室試驗後之解析及定量評估，大多仰賴於破面觀察。尤其實際之材料破面，多少均附有銹或附着物，或破面間有相互之碰磨，此種情況下要做破面觀察，一定要先將表面附着物（大部分爲腐蝕生成物）除去。

雖然如此，但於表面附着物除去處理時，其基本之條件為不能使破面形態、龜裂之大小與形狀等發生變化。盡量於最短時間內將附着物除去，中間過程（材料本身之溶損）要減少，並選擇對破面原來材質無影響之方法。以下，就鋼鐵材料之金屬附着物除去法及其實驗結果分別加以介紹。

2.3.1 附着物除去法之種類

表2.2所示為破面洗淨法之例。可大別為：①機械剝離法，②酸洗法與，③陰極電解法。機械剝離法為按照作穿透電子顯微鏡破面樹脂模之要領，通常以浸於丙酮或醋酸甲基之醋酸纖維素薄膜塗於破面上，將銹粘附於薄膜上而使破面清淨之方法。此法幾乎不會損及破面，但其適用範圍有限。亦即，像 Fe_2O_3 為赤褐色之基鐵與銹之密着性不良，如情況輕微時則無法除去。但如 Fe_3O_4 之基鐵與銹之密着性良好，幾乎可將全部之銹除去。不論何種材料，除銹工作均須反覆進行，且依賴人工作業，需要相當程度之技術，為甚麻煩之方法。

表 2.2 破面洗淨法之例

區 分	方 法
(a)機械剝離法	
(b)酸洗法	• 10% H_2SO_4 水溶液 + Inhibitter (Neolelesschien 1%) • ETA 0.5% 水溶液 • 3% HCl 酒精溶液 + Inhibitter (Inbit 600) • 6 NHCl 酒精溶液 + 2g/l 六亞甲基四胺 • 50% 檸檬酸水溶液 + 50% 檸檬酸胺水溶液 (輕微附着) • 丙酮 + 0.5 ~ 1% 鹽酸 (激烈附着)  浸漬或 超音波洗淨 浸漬 1 ~ 10 分或 超音波洗淨 5 ~ 30 分 浸漬或 超音波洗淨
(c)陰極電解法	• 1% H_2SO_4 水溶液 + Inhibitter (Inbit 600) • NaCl 500g + NaOH 500g + H_2O (全量為 5000 cc)  樣品 15V, 4A/cm² 1~30秒

ETA: Ethylenediaminetetra-acetic Acid Disodium Salt

如前所述，除去附着物時，不能使破面形態，龜裂之大小、形狀發生變化。並且要在最短時間內將銹除去，材料本身之溶損最少，對破面本身材料不會損傷之方法才能使用。如此，則酸洗法較陰極電解法為優。因此，目前以酸洗法處理者最多。根據著者本身之經驗，酸洗法中以採用 10% H_2SO_4 水溶液 + Neolesschien 1% (譯註：此為日本喜多羅工業公司之商品名稱)，以超音波洗淨法，依銹之附着程度，超音波洗淨時間以 5~15 分最適當。液溫為常溫即可，如為縮短時間或銹不易去除時，將液溫加熱至 70~80°C 亦可。尤其此種方法優點較多，因此作業人員常於除銹作業時兼作其他工作，而將處理時間忘記，以致放置過長時間，但對於破面之損傷亦極輕微。

ETA 0.5% 水溶液之除銹效果亦相當好。此法最大之優點為操作簡單，但長時間之浸漬會發生點蝕現象，對破面可能造成溶損，須加注意。日本籍專家長尾氏曾以 ETA 0.1~0.2 重量% 水溶液亦得到相同之效果。對於 Al 黃銅、低合金鋼，延性鑄鐵、沃斯田鐵系不銹鋼、Al 合金鑄件、Ti 耐熱鋼、碳鋼等。以下介紹其概要之結果：

Al 黃銅：30 分鐘可將銹幾乎完全除去，破面無損傷。

低合金鋼：處理 10 分鐘尚有少量銹殘存，但處理 30 分鐘局部發生過度腐蝕之情形。

延性鑄鐵：除銹速度慢，連續 30 分鐘以上，基地之波來鐵相會發生腐蝕現象，出現層狀組織。

沃斯田鐵系不銹鋼：除銹速度遲緩，浸漬 30 分鐘時仍有部分銹殘存，超過 30 分鐘以上之持續除銹，破面損傷情形極輕微。

Al 合金鑄件：除銹速度快，浸漬 10 分鐘幾乎可將全部銹除去，破面無損傷。

純 Ti：除銹速度快，浸漬 10 分鐘幾乎可將全部銹除去，破面無損傷。

耐熱鋼：除銹速度快，浸漬 30 分鐘幾乎可將全部銹除去，破面無損傷。

碳鋼：除銹速度快，但浸漬 30 分鐘以上時，破面損傷顯著。

由以上結果可得結論：即耐蝕性良好材料除銹速度快，破面損傷少。

日本人村田氏等，對於破面之除銹方法使用 Seonma 250 BC (註：此為日本佐佐木化學公司產品名) 50% + 甲醇 50% 溶液作實驗。此乃還原性除銹劑對破面不太會損傷，但除銹效果良好。但是，將生銹之破面進行除銹時，組

織會發生腐蝕，而成腐蝕狀態。無論如何，通常所要調查之破面僅有一個，除銹時須注意勿使損傷。實驗室中所得完全附銹之破面，可解釋為典型之破面。

以下，介紹二、三個有關酸洗法之實驗結果，除銹法使用 10 % H_2SO_4 水溶液 + Neollesschien 1 %，以超音波洗淨法說明推薦之根據。

2.3.2 實驗方法、實驗結果及攷察

1. 酸洗法之比較

除銹方法，有如下四種以供選擇。

- ① 浸漬於弱氨性氨 20 % 水溶液 (80°C)，為石油學會之熱交換器設備試驗用試片及支持器之規格。
- ② 檸檬酸氨 10 % 水溶液常溫電解 (陰極電流密度 1.1 A/dm^2)，同上。
- ③ 5 % H_2SO_4 + 0.5 % Neollesschien 水溶液 (80~90°C) 浸漬。
- ④ 10 % H_2SO_4 + 0.5 % Neollesschien 水溶液 (80~90°C) 浸漬。

胚材試驗係使用材料 WT 80 C， $3.0 \times 10 \times 115 \text{ mm}$ 各五片，▽▽ 加工，完全脫脂後，於上述溶液中分別按 1、3、5、10、20、30 分鐘浸漬，脫脂面以刷子邊刷邊用水洗後，立即以熱風乾燥，並測定此時之減量。腐蝕生成物附着之實際試驗為，以胚材試驗使用之相同形狀試片，WT 80 C，5 片以 4 點支持夾具加荷重 0.6σ ，於 H_2S 500 ppm 溶液中浸漬 7 日，使硫化鐵附着生成後，以與胚材試驗相同之方法除銹處理，測定其減量。結果如圖 2.2~圖 2.5，表面變化如照片 2.1 所示。照片 2.1 為除銹處理之前、後以相同試料表面之比較。弱氨性檸檬酸法胚材較大，完全除銹需要 5~10 分鐘。檸檬酸氨電解法，胚材較小，完全除銹需要 20 分鐘，最大之缺點為試料表面會因電解發生變化，試料之尖出部分先被溶化，表面之凹凸狀消失而趨近平坦，損傷試料表面。

硫酸酸洗法以短時間 (3~5 分鐘) 浸漬即可，胚材非常小，試片表面能完全保存。硫酸 5 % 或 10 % 對此效果幾無變化，由於胚材小，故可長時間浸漬，為極易處理之方法。加入 Neollesschien (抑止劑) 1 % 效果較好。無論如何，③與④之方法將於稍後說明，實驗中忘記試料在作除銹處理，因此作長時間浸漬，對於試料損傷不大，但除銹效果良好。此外，於本實驗中將液溫加

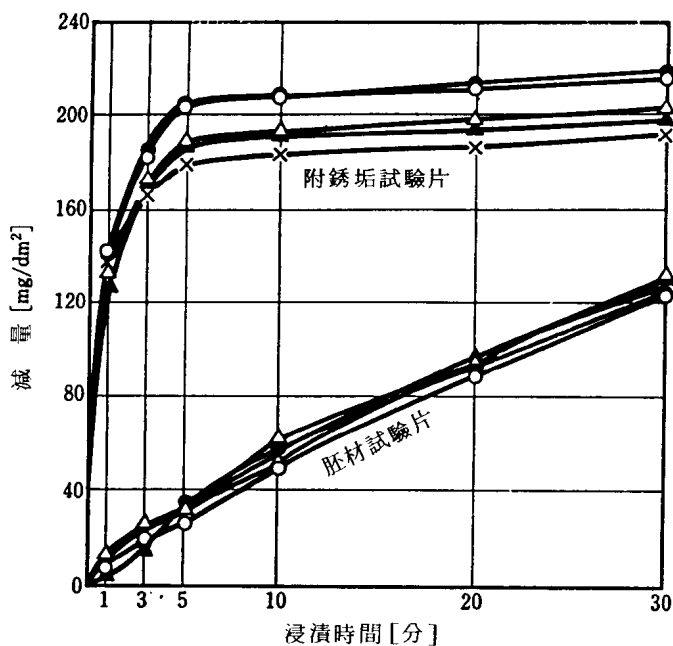


圖 2.2 弱鹼性檸檬酸氨 20% 水溶液 (78 ~ 80 °C) 與溶解減量之關係

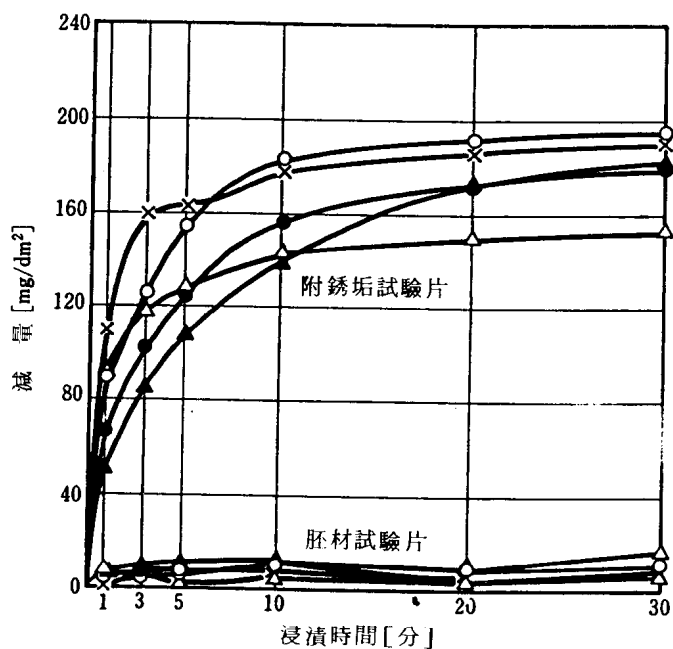
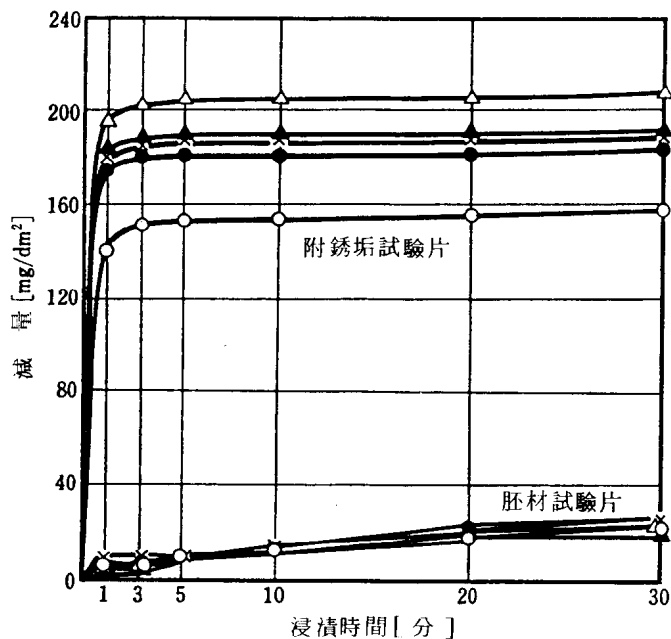
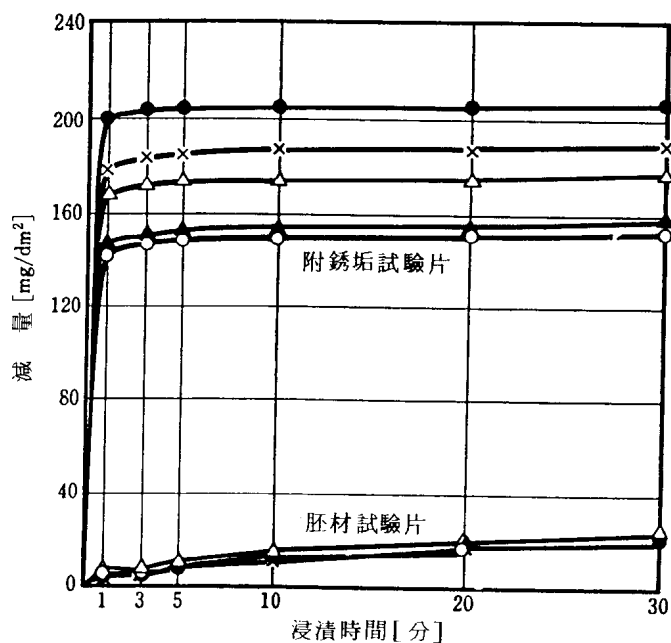


圖 2.3 檸檬酸氨 10% 水溶液電解 (常溫) 與溶解減量之關係

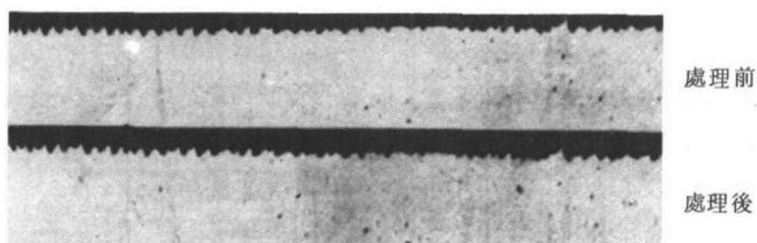


■ 2.4 5% H₂SO₄ + 0.5% Neolesschien 水溶液 (80~90°C) 與溶解減量之關係

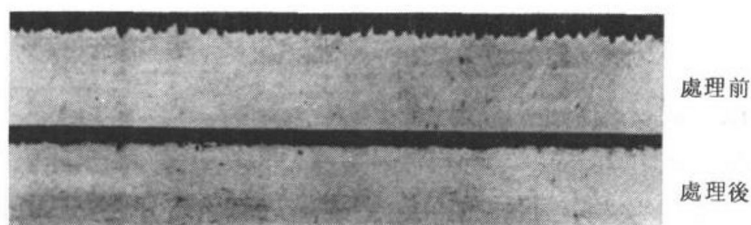


■ 2.5 10% H₂SO₄ + 0.5% Neolesschien 水溶液 (80~90°C) 與溶解減量之關係

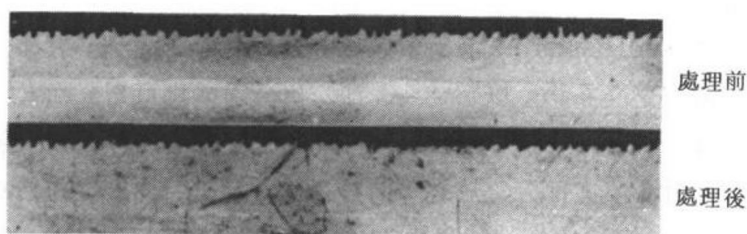
熱至 $80 \sim 90^{\circ}\text{C}$ ，如用超音波洗淨法時，則使用常溫即可。尤其在銹極難剝離之情況下，將液溫加熱至 $80 \sim 90^{\circ}\text{C}$ ，並與超音波洗淨法併用則效果更佳。



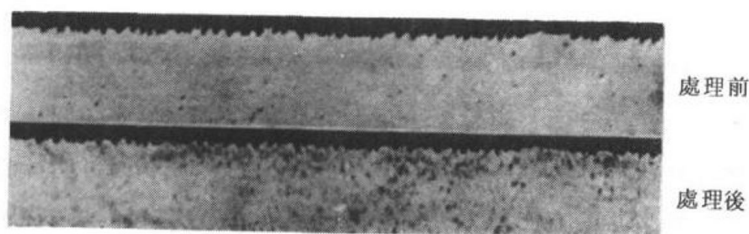
(a) 弱酸性檸檬酸氨 20% 水溶液 ($78 \sim 80^{\circ}\text{C}$)



(b) 檸檬酸氨 10% 水溶液 (常溫電解，陰極電流密度 1.1 A/dm^2)



(c) $5\% \text{H}_2\text{SO}_4 + 0.5\% \text{Neolesschien}$ 水溶液 ($80 \sim 90^{\circ}\text{C}$)



(d) $10\% \text{H}_2\text{SO}_4 + 0.5\% \text{Neolesschien}$ 水溶液 ($80 \sim 90^{\circ}\text{C}$)

照片 2.1 種種除銹法與鋼表面之變化 (處理時間 20 分)

2. 以Neolesschien 酸洗法之 SEM 破面觀察

於 1 中對於 Neolesschien 酸洗法以除銹之方法已有所瞭解，實際對破面不會損傷，且除銹效果良好，有必要作具體之表示，故以下述 SEM 破面觀察為例表示。

(1) 實驗方法

酸洗液：10% 硫酸水 + 1% Neolesschien

溫度：25°C（大致一定），酸洗液中超音波洗淨。

時間：0（酸洗前），10，30 分鐘。

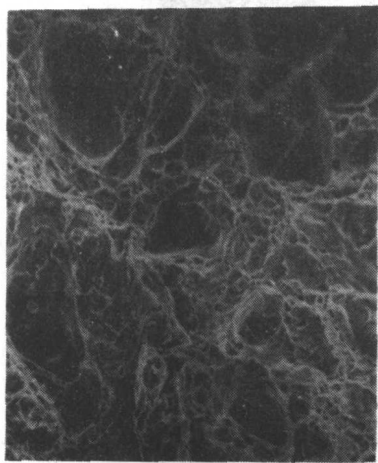
試片破面：延性、脆性與疲勞破面（均於大氣中，實驗室試片），腐蝕疲勞破面（PH13，人工海水 + NaOH，滴下 70 cc/min， $N_f = 2.14 \times 10^6$ 次，300 rpm），材料為碳鋼。

(2) SEM 觀察結果

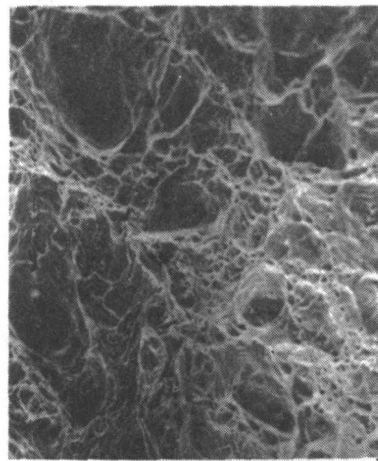
實驗室大氣中之延性、脆性與疲勞破面，其典型之例如照片 2.2～照片 2.5 所示。其目的為表示以破面圖法為基礎之破面照片，實際破面解析時，要將表面之銹除去，證明除銹處理對於破面幾乎沒有損傷。照片 2.2 所示為延性破面。較洗淨前之破面略大之扁鼓面底部可看出有些介在物。但是以 10% 硫酸水 + 1% Neolesschien 溶液中做 10 分鐘超音波洗淨，有部分之介在物可以消除，殘存之介在物，以超音波洗淨 30 分鐘，則可完全除去。對於破面性狀而言，超音波洗淨 30 分鐘後與洗淨前並無變化。照片 2.3 與照片 2.4 為脆性破面。照片 2.3 各部分之放大如照片 2.4 所示。照片 2.3(d) 為(c)以 85°C，30 分鐘洗淨液浸漬之情況。照片 2.3(e) 為(d)以人工海水浸漬 10 天後，再以超音波洗淨 3 分鐘之情形。由這些照片看來，在 10% 硫酸水 + 1% Neolesschien 溶液中施行超音波洗淨，或以溫液浸漬，對於破面幾乎不會發生損傷，但對於有銹附着破面之洗淨，則破面之損傷非常嚴重。

照片 2.5 為疲勞破面。照片 2.6 為照片 2.5 之放大。由各照片看來與上述之情況相同。在照片 2.5 與照片 2.6 中，條痕 (striation) 可明顯看出，此為疲勞特有之形態，其間隔約為 $1\mu\text{m}$ 。此間隔約等於反覆一次龜裂所增長之距離。

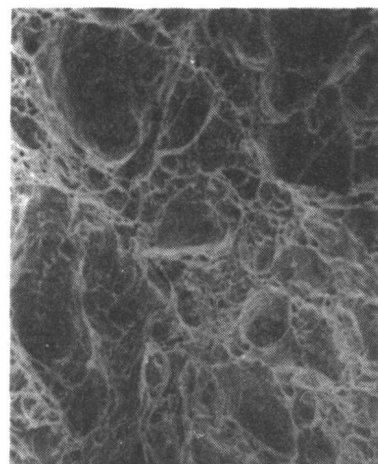
照片 2.7 為反覆應力振幅 $\sigma_a = 20\text{ kg/mm}^2$ 作 $N = 2.14 \times 10^4$ 次，在人工海水 + NaOH 於 pH 13 之溶液，滴下量 70 cc/min，反覆速度 300 rpm 之腐



(a)時間，洗淨前

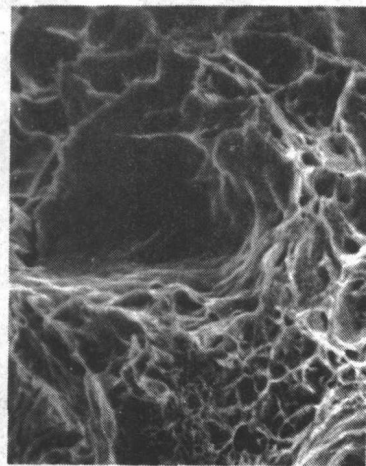


(b) 10 分鐘

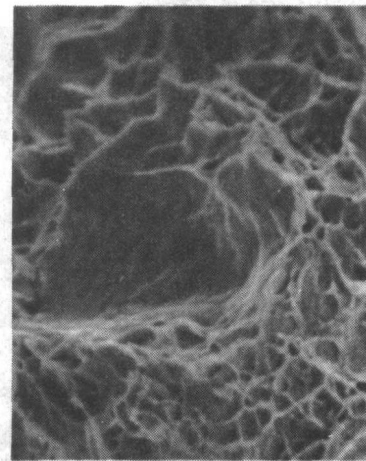


(c) 30 分鐘

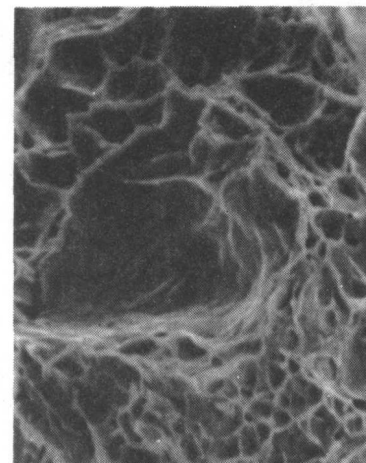
10 μ m



(d)時間，洗淨前



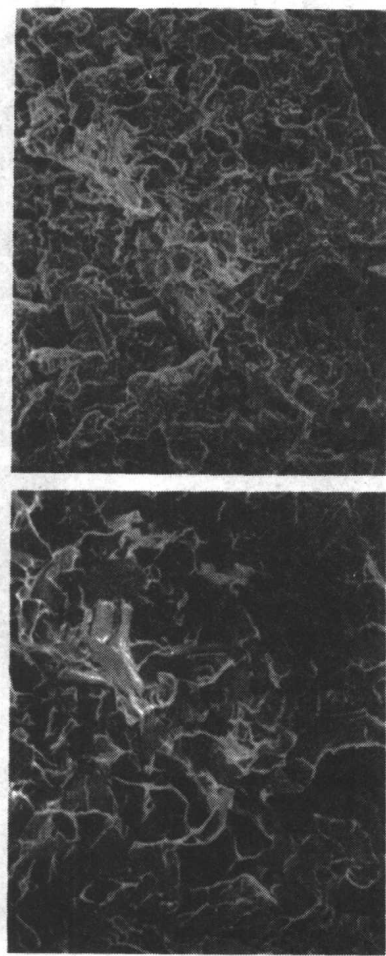
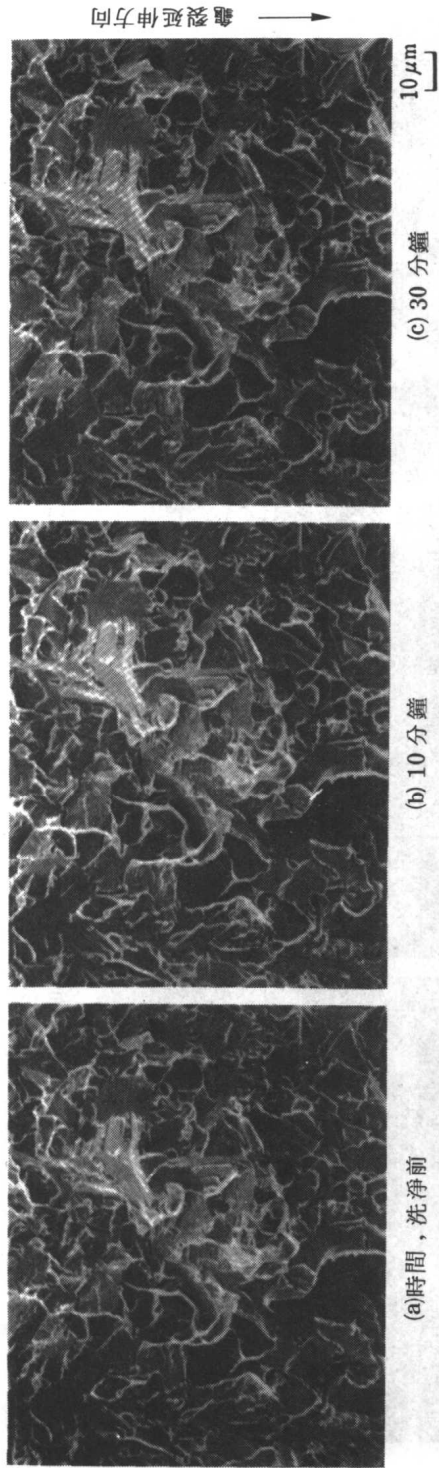
(e) 10 分鐘



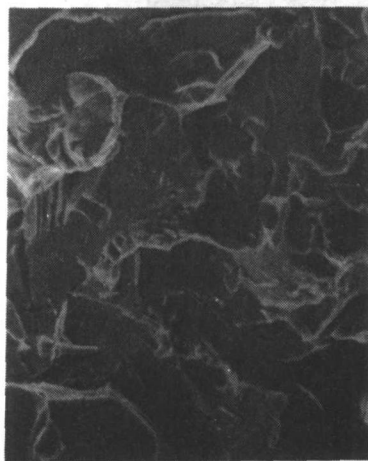
(f) 30 分鐘

10 μ m

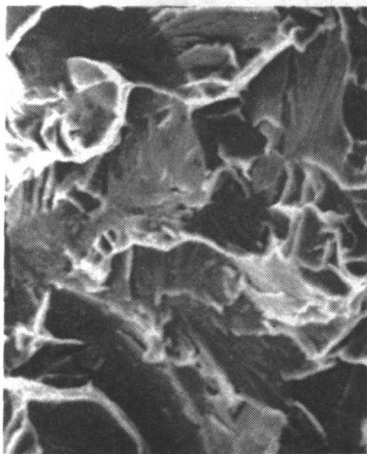
照片 2.2 延性破面，10%硫酸水 + 1% Neollesschien，溫度 25 $^{\circ}$ C，超音波洗淨之時間
(上行之放大為下行，於同一地方所拍攝)



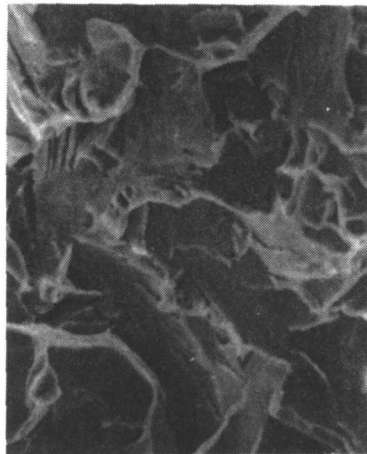
照片 2.3 脆性破面，10%硫酸水 + 1% Neolesschien，溫度 25°C，超音波洗淨
(於同一地方所拍攝)



(a)時間，洗淨前



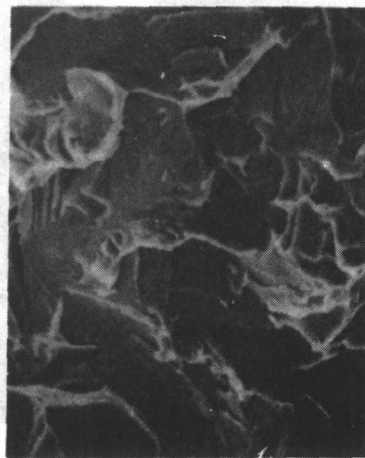
(b)10分鐘



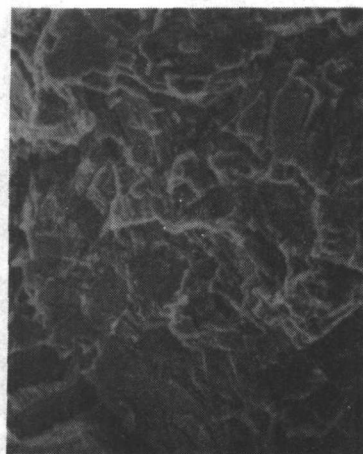
(c)30分鐘

龜裂延伸方向 →

10 μ m

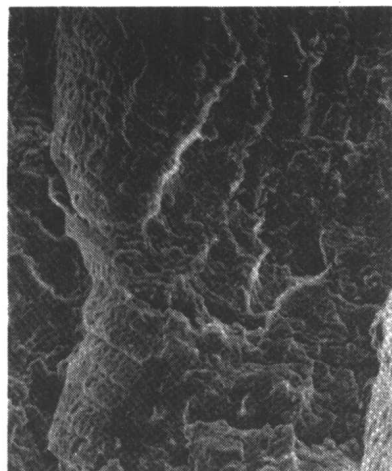


(d)爲(c)再於85°C, 30分鐘浸漬

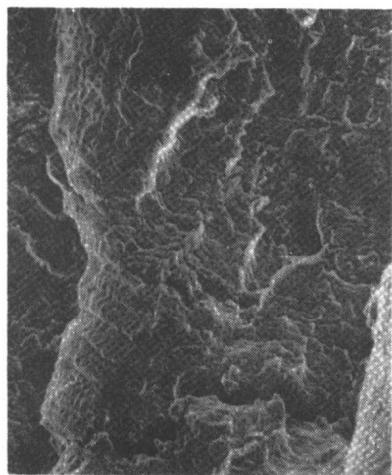


(e)爲(d)以人工海水浸漬10日後，
超音波洗淨3分鐘

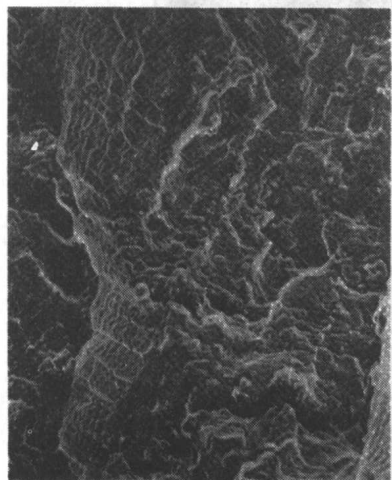
照片 2.4 脆性破面，照片 2.3 之放大（於同一地方拍攝）

10 μ m

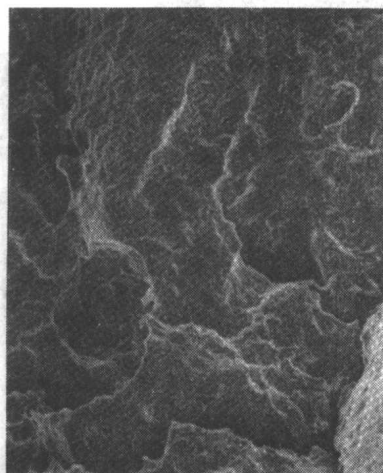
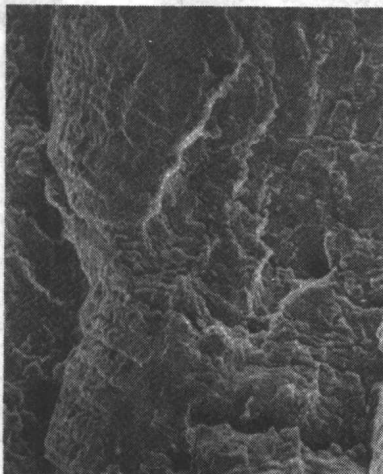
(c) 30 分鐘←龜裂延伸方向



(b) 10 分鐘

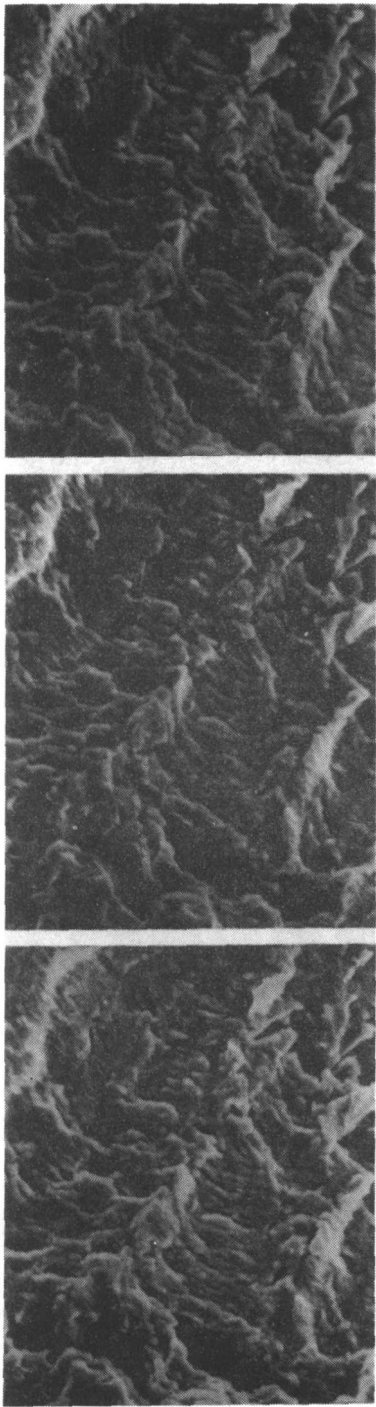


(a) 時間，洗淨前

(e) 爲(d)在人工海水浸漬 10 日後，
超音波洗淨 3 分鐘

(d) 爲(c)再於 85°C，30 分鐘浸漬

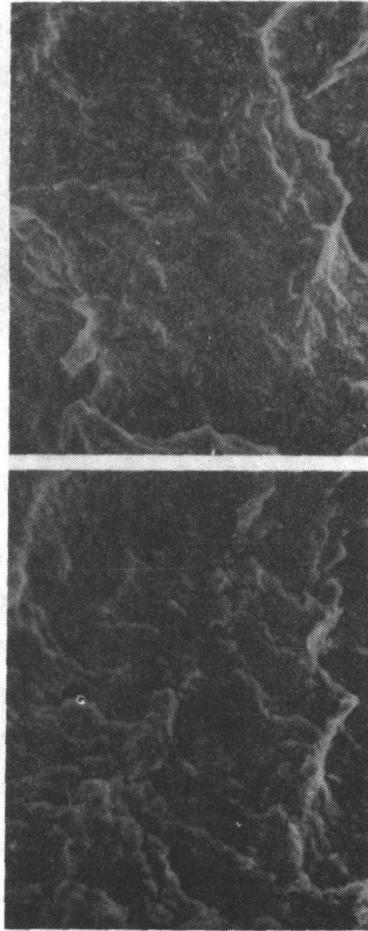
照片 2.5 疲勞破面（於同一地方拍攝）



(a)時間，洗淨前

(b) 10 分鐘

(c) 30 分鐘



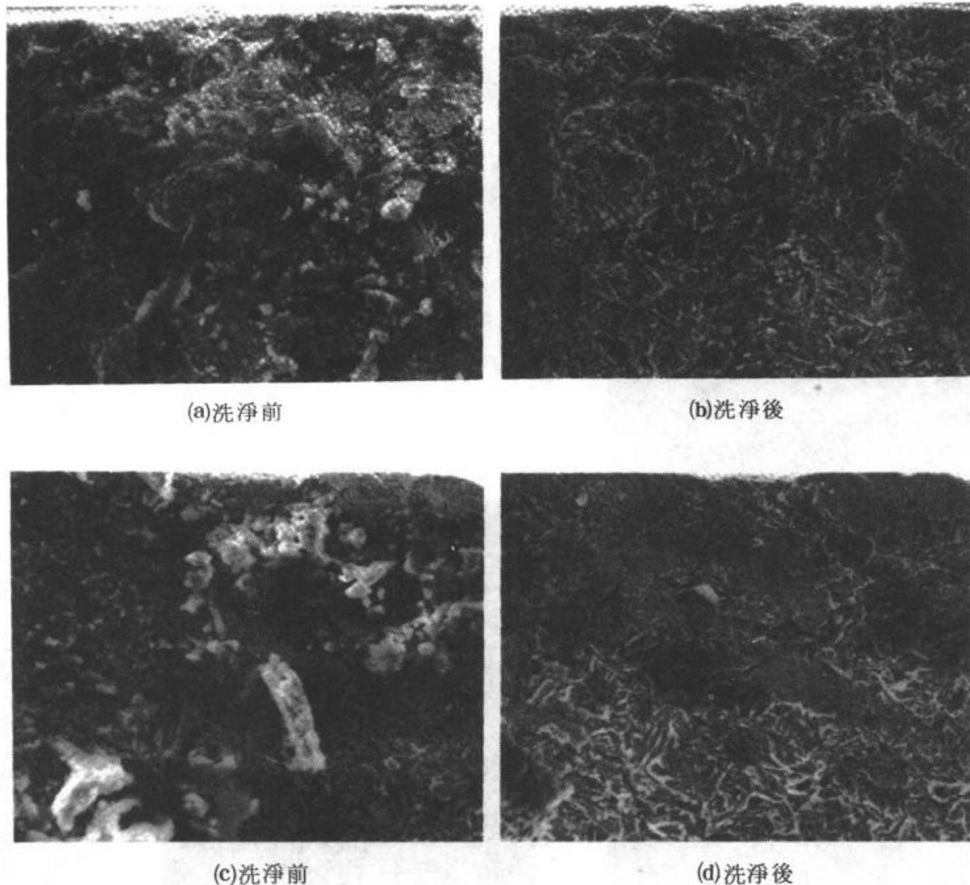
(d)爲(c)再於 85°C, 30 分鐘浸漬

← 龜裂延伸方向 10 μm

(e)爲(d)以人工海水浸漬 10 日後；

超音波洗淨 3 分鐘

照片 2.6 疲勞破面，照片 2.5 之擴大（於同一地方拍攝）



照片 2.7 $\sigma_a = 20 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2.14 \times 10^4$ 次, pH 13 滴下量 70 cc/min , 人工海水 + NaOH, 反覆速度 300 rpm 之腐蝕疲勞破面, 10% 硫酸水 + 1% Neolesschien, 施行溫度 25°C 之超音波洗淨 (30 分鐘)

蝕疲勞破面以 10% 硫酸水 + 1% Neolesschien 溶液作 30 分鐘超音波洗淨時之情況。上部為龜裂起點附近之表面。洗淨前有銹附着，破壞形態幾乎完全無法看出。洗淨後 [照片 2.7 (b) 與 (d)] 銹幾乎完全除去，因此僅憑照片對於破壞形態依然無法完全識別。換言之，於破壞起點附近，由於銹之附着使原來之破面形態引起很大變化。此破面與實驗室所作之疲勞破面，其破壞之起點位置均為事先所預知。因此，疲勞特有之條痕將不被承認，但可斷定為疲勞破面。不論如何，實際材料大部分之情況均為處於腐蝕環境中，觀察其破面時，與實驗室所得典型之破面例不同，因此可知欲正確作破面解析亦有相當之困難。