

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

腐蝕對2024鋁合金之機械性質影響

The Effects On Mechanical Properties of  
2024 Aluminum Alloy Due To Corrosion



林毓書

Lin, Yu-Shu

指導教授：單秋成 博士

Advisor: Shin, Chow-Shing Ph.D.

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

# 國立臺灣大學碩士學位論文 口試委員會審定書

腐蝕對2024鋁合金之機械性質影響  
The Effects On Mechanical Properties of  
2024 Aluminum Alloy Due to Corrosion

本論文係林毓書君（ R97522521 ）在國立臺灣大學機械工程學所完成之碩士學位論文，於民國99年07月06日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員： 單秋成 單秋成 (指導教授)  
黃庭彬 黃庭彬  
莊禮彰 莊禮彰

系主任、所長：張所鎰 張所鎰

## 誌謝

承蒙恩師 單秋成教授的悉心指導，使我在台大機械所兩年的求學期間能夠順利成長，完成碩士學位。感謝飛安會 莊禮彰博士的指導，使我在參與飛安會計畫「提升我國飛航事故調查能量計畫(計畫編號: NSC97-3114-9-707-001-Y)」以及「強化我國飛航安全事故調查能量及建置亞洲地區飛航安全網計畫(計畫編號: NSC-98-3114-Y-707-001)」的期間學習到如何針對事故案例進行調查，並將僅有的所學能有所貢獻。感謝聖約翰科技大學 黃庭彬教授的指導，獲得了許多專業知識以及實驗態度。感謝機械工廠 陳朝琴師傅、黃金潭師傅與 廖慶彰師傅協助實驗試片加工，實驗才能夠順利進行。感謝聖約翰科技大學 后希庭先生協助我們拍攝 SEM 照片，使這本論文得以豐富。感謝學長林士瑋在我入學期間對於微型疲勞試驗機的指導，使我順利承接關於微型疲勞試片的相關研究。感謝博士班學長啟瑞、秉昆、柏廉以及碩士班學長佳翰、正程、昭沅、仕偉，感謝你們的指導才能使我們順利銜接實驗室的所有實驗；同窗品捷、祥恩、淙宇、彥憲，有你們的陪伴，使我這兩年研究所時光不會感到孤單；還有學弟圖智、勁甫、昱豪、偉翔，為實驗室增添了許多歡樂。最後感謝我的家人還有所有朋友對我的關心以及支持，使我能夠順利完成碩士學位。

## 摘要

鋁合金 2024-T3 為目前廣泛使用的航太材料，優點為高強度、質輕，但具有低抗蝕性；本文乃以行政院飛航安全委員會調查之「機腹蒙皮 77 公分裂紋事故」為案例研究，探討「腐蝕」對於飛機蒙皮材料 2024-T3 鋁合金之材料機械性質的影響。實驗分別針對腐蝕的破壞機制：靜態腐蝕、應力腐蝕以及腐蝕疲勞進行實驗。在靜態腐蝕實驗中，會將蒙皮材料製作成標準拉伸試片，並透過設定不同的環境參數，將試片浸泡於各腐蝕環境參數中，而後對試片進行拉伸實驗求取其相對應的應力應變曲線，檢視腐蝕是否會對試片造成機械性質的改變，並探討各環境因素對蒙皮材料的強度影響程度。在應力腐蝕實驗中，由前述的環境因素加上固定的張應力，探討施加應力對於腐蝕破壞的影響。腐蝕疲勞的部份中，則是將蒙皮製做成標準疲勞試片以及微型疲勞試片，透過觀察裂縫生長，比較蒙皮在空氣中以及腐蝕環境中之裂縫生長速率的差異性，並比較標準疲勞試片與微型疲勞試片所反映出的數據結果之異同，以研究微型疲勞試驗機用於疲勞測試的可行性。



關鍵詞：鋁合金 2024-T3、應力腐蝕、腐蝕疲勞、疲勞裂縫生長、微型疲勞試片。



# Abstract

2024-T3 Aluminum alloy is a widely-used material in aerospace, for its high strength and low density, but with a low-corrosive resistance. This study tries to find out the effects on mechanical properties of 2024-T3 Aluminum alloy due to corrosion, which is based on an accident “CI 7552-77cm crack accident” investigated by Aviation Safety Council (ASC). This experiment is separated into three parts: static corrosion, stress corrosion cracking and corrosion fatigue. In static corrosion, we prepare tensile specimens which are exposed to different corrosive environments, then construct the relative stress-strain curve after tensile test to check whether the tensile strength changes due to corrosion, and discuss how it has changed for different environment factors. In stress corrosion cracking, we introduce the “tensile stress” factor in addition to the previous corrosive environments, discuss the effects on mechanical properties under corrosive environments when the tensile stress is added. In corrosion fatigue, we prepare standard CT specimens and miniature fatigue specimens, then through observing the crack grows, compare the difference in crack growth rate between non-corrosive environments and corrosive environments, and compare the results between CT specimens and miniature specimens, as well, for checking the usage and practicability of miniature fatigue specimen testing.

Keywords: 2024-T3 Aluminum, Stress Corrosion Cracking, Corrosion Fatigue, fatigue crack growth, miniature fatigue specimens.

# 目錄

口試委員審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract.....	iv
目錄 .....	v
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	x
第一章 緒論 .....	1
1.1 前言 .....	1
1.2 飛航事故簡介 .....	1
1.3 研究目的 .....	3
第二章 文獻回顧 .....	9
2.1 腐蝕破壞機制 .....	9
2.1.1 孔蝕 (Pitting) .....	9
2.1.2 應力腐蝕 (Stress Corrosion Cracking) .....	10
2.1.3 腐蝕疲勞 (Corrosion Fatigue) .....	10
2.2 疲勞破壞文獻回顧 .....	11
2.2.1 應力強度因子 .....	11
2.2.2 Paris' Law .....	12
2.2.3 裂縫封閉效應 .....	13
2.2.4 Elber 修正式 .....	14
2.2.5 量測裂縫封閉 .....	14
2.3 縮小試片尺寸的技術 .....	15
第三章 實驗方法與程序 .....	21
3.1 靜態腐蝕實驗 .....	21
3.1.1 標準拉伸試片 .....	21
3.1.2 靜態腐蝕環境參數設定 .....	21
3.1.3 靜態腐蝕實驗設備與流程 .....	22
3.2 應力腐蝕實驗 .....	23
3.2.1 應力腐蝕試片與夾具 .....	24
3.2.2 應力腐蝕環境參數設定 .....	24
3.2.3 應力腐蝕實驗設備與流程 .....	24
3.3 CT 試片腐蝕疲勞實驗 .....	25
3.3.1 疲勞 CT 試片 .....	25
3.3.2 CT 疲勞試片 K 值估算 .....	26
3.3.3 CT 試片腐蝕疲勞環境參數設定 .....	26

3.3.4 CT 試片腐蝕疲勞實驗設備與流程 .....	27
3.4 微型試片腐蝕疲勞實驗 .....	29
3.4.1 微型試片 .....	29
3.4.2 微型疲勞試片 K 值估算 .....	29
3.4.3 微型試片腐蝕疲勞實驗設備與流程 .....	30
3.5 腐蝕試片 SEM 斷面觀察 .....	31
第四章 實驗結果與討論 .....	48
4.1 靜態腐蝕實驗結果討論 .....	48
4.1.1 氯離子濃度影響 .....	48
4.1.2 酸鹼度影響 .....	49
4.1.3 溫度影響 .....	49
4.1.4 時間影響 .....	49
4.1.5 靜態腐蝕實驗結論 .....	50
4.1.6 靜態腐蝕拉伸試片破斷處表面觀察 .....	50
4.2 應力腐蝕實驗結果討論 .....	51
4.2.1 應力腐蝕拉伸結果討論 .....	51
4.2.2 應力腐蝕拉伸試片破斷處表面觀察 .....	52
4.3 CT 試片腐蝕疲勞實驗結果討論 .....	52
4.3.1 CT 試片腐蝕疲勞氯離子濃度對裂縫生長速率影響 .....	53
4.3.2 CT 試片腐蝕疲勞酸鹼度對裂縫生長速率影響 .....	53
4.4 微型試片腐蝕疲勞實驗結果討論 .....	54
4.4.1 微型試片腐蝕疲勞氯離子濃度對裂縫生長速率影響 .....	55
4.4.2 微型試片腐蝕疲勞酸鹼度對裂縫生長速率影響 .....	55
4.5 腐蝕試片 SEM 斷面觀察結果 .....	56
4.6 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞實驗結果比較 .....	57
第五章 結論 .....	91
參考文獻 .....	94
附錄 A 靜態腐蝕各參數試片實驗結果 .....	98
附錄 B 靜態腐蝕各參數實驗數據表格 .....	118

## 圖目錄

圖 1.1 機腹蒙皮 77 公分裂紋[1] .....	5
圖 1.2 機腹蒙皮裂紋位置圖[1] .....	5
圖 1.3 廢水槽出口管路滲漏位置[1] .....	6
圖 1.4 廢水槽漏水情形[1] .....	6
圖 1.5 廢水槽位置以及損害分布圖[1] .....	7
圖 1.6 蒙皮破損處巨觀照[1] .....	7
圖 1.7 蒙皮斷面 SEM 觀察[1] .....	8
圖 2.1 孔蝕形成圖[2] .....	17
圖 2.2 陽極溶解[12] .....	17
圖 2.3 氫脆現象[12] .....	18
圖 2.4 裂縫在空氣與腐蝕環境生長機制圖[15] .....	18
圖 2.5 裂縫尖端應力場示意圖[18] .....	19
圖 2.6 疲勞裂縫生長速率對應力強度因子幅關係圖[19] .....	19
圖 2.7 裂縫封閉機制之示意圖[22] .....	20
圖 3.1 事故班機之蒙皮照片 .....	35
圖 3.2 CNS 中國國家標準規定之拉伸試片尺寸[41] .....	35
圖 3.3 標準拉伸試片加工完成圖 .....	36
圖 3.4 以 pH 計量測腐蝕液酸鹼度 .....	36
圖 3.5 拉伸試片保持一定之間隔 .....	37
圖 3.6 MTS 810 拉伸測試機 .....	37
圖 3.7 應力腐蝕實驗測試夾具 .....	38
圖 3.8 應力腐蝕試片表面黏貼應變計 .....	38
圖 3.9 應變計防水黏土黏貼於腐蝕試片上 .....	39
圖 3.10 應力腐蝕測試 .....	39
圖 3.11 疲勞 CT 試片尺寸[42] .....	40
圖 3.12 在標準 CT 試片背面黏貼應變計 .....	40
圖 3.13 腐蝕疲勞實驗設計示意圖[8] .....	41
圖 3.14 腐蝕疲勞試片安裝於試驗機 .....	41
圖 3.15 裂縫封閉補償圖形 .....	42
圖 3.16 微型疲勞試片尺寸 .....	42
圖 3.17 試片單邊裂縫示意圖[43] .....	43
圖 3.18 試片單邊裂縫實驗之 ASTM 試片[44] .....	43
圖 3.19 圓環裂縫之圓柱試片[45] .....	44
圖 3.20 微型疲勞試驗機 .....	44
圖 3.21 微型疲勞實驗設備 .....	45
圖 3.22 微型疲勞試驗機閉迴路控制方塊圖 .....	45

圖 3.23 在微型試片裂縫尖端附近架設位移計 .....	46
圖 3.24 微型疲勞試驗機改裝圖 .....	46
圖 3.25 掃描式電子顯微鏡 .....	47
圖 4.1 pH7 RT 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	61
圖 4.2 pH3 RT 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	61
圖 4.3 pH7 5°C 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	62
圖 4.4 pH3 5°C 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	62
圖 4.5 RT 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	63
圖 4.6 RT 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	63
圖 4.7 RT 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	64
圖 4.8 5°C 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	64
圖 4.9 5°C 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	65
圖 4.10 5°C 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	65
圖 4.11 pH7 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	66
圖 4.12 pH7 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	66
圖 4.13 pH7 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	67
圖 4.14 pH3 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	67
圖 4.15 pH3 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	68
圖 4.16 pH3 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線 .....	68
圖 4.17 pH7 RT 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	69
圖 4.18 pH7 RT 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	69
圖 4.19 pH7 RT 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	70
圖 4.20 pH3 RT 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	70
圖 4.21 pH3 RT 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	71
圖 4.22 pH3 RT 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	71
圖 4.23 pH7 5°C 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	72
圖 4.24 pH7 5°C 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	72
圖 4.25 pH7 5°C 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	73
圖 4.26 pH3 5°C 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	73
圖 4.27 pH3 5°C 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	74
圖 4.28 pH3 5°C 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線 .....	74
圖 4.29 靜態腐蝕試片破斷處表面	
(a)未腐蝕 (b) pH7 RT 20% 五個月 (c) pH3 RT 20% 五個月	
(d) pH7 5°C 20% 五個月 (e) pH3 5°C 20% 五個月 .....	75
圖 4.30 靜態腐蝕試片破斷處表面	
(a) pH3 RT 20% 一個月 (b) pH3 RT 20% 三個月	
(c) pH3 RT 20% 五個月 (d)蒙皮裂紋事故破損處[1] .....	76
圖 4.31 pH3、3.5%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據 .....	77

圖 4.32 pH3、20%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據.....	77
圖 4.33 pH7、20%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據.....	78
圖 4.34 pH3、20%NaCl、RT、三個月、應力腐蝕實驗數據.....	78
圖 4.35 pH7、20%NaCl、RT、三個月、應力腐蝕實驗數據.....	79
圖 4.36 靜態腐蝕試片與應力腐蝕試片破斷處表面比較	
(a)靜態腐蝕 pH7 RT 20% 一個月 (b)應力腐蝕 pH7 RT 20% 一個月	
(c)靜態腐蝕 pH7 RT 20% 三個月 (d)應力腐蝕 pH7 RT 20% 三個月	
(e)靜態腐蝕 pH3 RT 20% 三個月 (f)應力腐蝕 pH3 RT 20% 三個月 .....	80
圖 4.37 標準 CT 試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K$ 關係圖 .....	81
圖 4.38 標準 CT 試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	81
圖 4.39 標準 CT 試片裂縫封閉程度圖 .....	82
圖 4.40 微型試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K$ 關係圖 .....	82
圖 4.41 微型試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	83
圖 4.42 微型試片裂縫封閉程度圖 .....	83
圖 4.43 未腐蝕拉伸試片斷面 SEM 照 .....	84
圖 4.44 靜態腐蝕 pH7 20%NaCl 拉伸試片斷面 SEM 照 .....	84
圖 4.45 應力腐蝕 pH7 20%NaCl 拉伸試片斷面 SEM 照 .....	85
圖 4.46 腐蝕疲勞在空氣中測試之 CT 疲勞試片斷面 SEM 照 .....	85
圖 4.47 腐蝕疲勞 pH7 20%NaCl CT 疲勞試片斷面 SEM 照 .....	86
圖 4.48 腐蝕疲勞在空氣中測試之微型疲勞試片斷面 SEM 照 .....	86
圖 4.49 腐蝕疲勞 pH7 20%NaCl 微型疲勞試片斷面 SEM 照 .....	87
圖 4.50 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K$ 關係圖 .....	87
圖 4.51 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	88
圖 4.52 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞未腐蝕 da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	88
圖 4.53 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH7 20%NaCl da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	89
圖 4.54 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH3 20%NaCl da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 .....	89
圖 4.55 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH7 3.5%NaCl da/dN- $\Delta K_{eff}$ 關係圖 ....	90

## 表目錄

表 1.1 清潔劑檢驗結果[1] .....	4
表 1.2 漂白水檢驗結果[1] .....	4
表 3.1 靜態腐蝕實驗參數表 .....	33
表 3.2 應力腐蝕實驗參數表 .....	34
表 3.3 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞實驗參數表 .....	34



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

生活在交通便利的時代，「飛行器」的發明，使得人們對於飛翔並不再只是夢想，而能夠穿梭於天空，大大縮短了往返兩地交通所需的時間。然而，對於許多機械構件，往往因為某些因素諸如氣候環境、組裝上的良窳以及操作因素等，常造成機械構件的破壞；尤其是當飛機的結構破壞，其造成的後果往往是難以估計的。因此，對於飛航事故的調查即被認為是非常重要的課題，如能找出事故肇因，並找出預防之道，如此方能對未來可能再發生的錯誤做防範。

「腐蝕」是日常生活中常見的破壞方式，易發生於金屬材料，如鐵器生鏽、酸蝕等。腐蝕會導致構件的材料性質退化，輕則造成生活上的不便，重則引起生活環境污染，甚或威脅生命安全。因此在機械工程中，預防腐蝕的工作亦是重要的指標。

行政院飛航安全委員會為了提升我國飛航事故調查能量，提出「提升我國飛航事故調查能量計畫」以及「強化我國飛航安全事故調查能量及建置亞洲地區飛航安全網計畫」，本人有幸參與，擔任材料分析模組研究助理。本文的主旨即是由行政院飛航安全委員會提供的一起「機腹蒙皮 77 公分裂紋事故」，透過建立不同腐蝕參數，探討「腐蝕」對於飛機蒙皮材料 2024-T3 鋁合金之材料機械性質的影響。

## 1.2 飛航事故簡介

西元 2007 年 9 月 20 日，某航空公司之波音 737-800 型客機由台灣桃園國際機場起飛，於日本佐賀機場落地後，地面機械員執行機外 360 度航機檢查時，發現機腹蒙皮有一道長約 77 公分之裂痕，如圖 1.1[1]。發現蒙皮裂紋的位置位於後機艙第 46 段處，於機身縱桁 S-27L 外側位置，介於機身 BS 839.2 至 BS 869.7 之間，



詳圖如圖 1.2[1]。該貫穿式裂紋之斷面兩側蒙皮分離，開口最寬為 1 公分，且機身內部的隔熱棉與防水墊外露。

行政院飛航安全委員會（後簡稱飛安會）事故報告[1]中針對該起事故進行詳細調查，發現在機艙中的廢水槽出口管路發生了滲漏的情形，圖 1.3[1]的紅圈處指出了廢水槽出口的損害位置，而圖 1.4[1]則為廢水滲漏導致下方隔熱棉下的蒙皮結構遭受損害。滲漏處之廢水淤積於蒙皮結構處，導致飛機自 BS 727J 至 BS 967 處蒙皮遭受輕重不一之損傷痕跡，詳圖 1.5[1]。

飛安會將受腐蝕區域蒙皮送交國防部軍備局中山科學研究院航空研究所結構工程組（以下簡稱中科院）進行相關檢驗以確定裂紋肇因，由圖 1.6[1]之蒙皮破損處巨觀觀察，其斷裂面凹凸不平，符合腐蝕破壞的特徵。由掃描式電子顯微鏡 SEM 觀察斷裂面，發現在蒙皮內表面呈現沿晶破裂，而蒙皮外表面則出現凹渦(Dimple)的強制破壞痕跡，如圖 1.7[1]。而由腐蝕生成物檢驗中使用 EDS 及化學層析儀試驗，發現造成腐蝕的主因是氯離子以及醋酸根離子。

該波音 737-800 型客機廁所共四間，如廁後之廢液經管路排放至廢水槽中，且廢水槽之管壁會定期清潔，時機為航機地面停留時間內，執行清潔時使用碎冰塊及清潔劑，濃度 5%~10%醋酸溶液為替代品，並會使用 5%漂白水進行管路消毒。因此，滲漏之廢液主要來源可能為人類代謝排放之尿液以及清潔用之清潔劑等。因人體尿液內之氯離子濃度並不固定，因此無法做定量分析。飛安會委請工研院進行檢驗，針對氯離子及酸鹼度檢驗結果如表 1.1 [1]及表 1.2 [1]，其中樣本 A 代表 10%醋酸溶液，樣本 B 代表稀釋醋酸之地下水溶液。中科院對此蒙皮裂紋事故的報告結論如下：

1. 腐蝕為造成蒙皮裂紋的主要機制，其型態屬於剝離腐蝕。腐蝕由無鍍鋁層的內側蒙皮表面開始，逐漸往蒙皮外側擴展，最後因有效截面積不足，無法承受外載力量而出現過載破壞裂紋。
2. 由蒙皮腐蝕粉末所淬取的溶液中，發現主要為醋酸根離子及氯離子。此兩者

中，又以氯離子造成的腐蝕危害最大，為主要關鍵。

3. 離子層析結果發現，飛安會檢送的廢水系統清洗液與由蒙皮腐蝕粉末所淬取的溶液，兩者陰離子成分相同。[1]

### 1.3 研究目的

根據飛安會的事故報告指出，造成此波音 737-800 客機的 77 公分裂紋事故的主因是由腐蝕造成，且主要原因是氯離子以及醋酸根離子。飛安會在本次的計畫內容中，期望材料分析模組針對此事故進行實驗，分別針對腐蝕的破壞機制：靜態腐蝕、應力腐蝕以及腐蝕疲勞進行實驗，檢視腐蝕對於蒙皮材料 2024-T3 鋁合金的影響。在靜態腐蝕實驗中，會將蒙皮材料製作成標準拉伸試片，並透過設定不同的環境參數，將試片浸泡於各腐蝕環境參數中，而後對試片進行拉伸實驗求取其相對應的應力應變曲線，檢視腐蝕是否會對試片造成機械性質的改變，探討各環境因素對蒙皮材料的強度影響程度。在應力腐蝕實驗中，由前述的環境因素加上固定的張應力，探討施加應力對於腐蝕破壞的影響。腐蝕疲勞的部份中，則是將蒙皮製做成標準疲勞試片以及微型疲勞試片，透過觀察裂縫生長，比較蒙皮在空氣中以及腐蝕環境中之裂縫生長速率的差異性，並比較標準疲勞試片與微型疲勞試片所反映出的數據結果之差異性。

表 1.1 清潔劑檢驗結果[1]

試驗項目	試驗方法	樣本 A	樣本 B	冰醋酸
pH 酸鹼值	pH meter	2.18	7.05	N/A
Cl <sup>-</sup> ppm	自動電位滴定儀	12.7	14.9	<1
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> ppm	離子層析儀 <sup>7</sup>	7.5	50.6	11.3

表 1.2 漂白水檢驗結果[1]

試驗項目	試驗方法	結果
總氯 w%	ASTM D2022 <sup>8</sup>	3.5±0.1
有效氯 (ClO <sub>2</sub> )w%	ASTM D2022	2.4±0.1

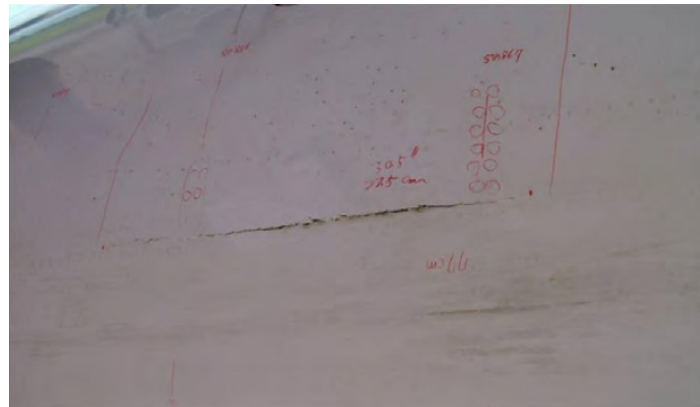


圖 1.1 機腹蒙皮 77 公分裂紋[1]

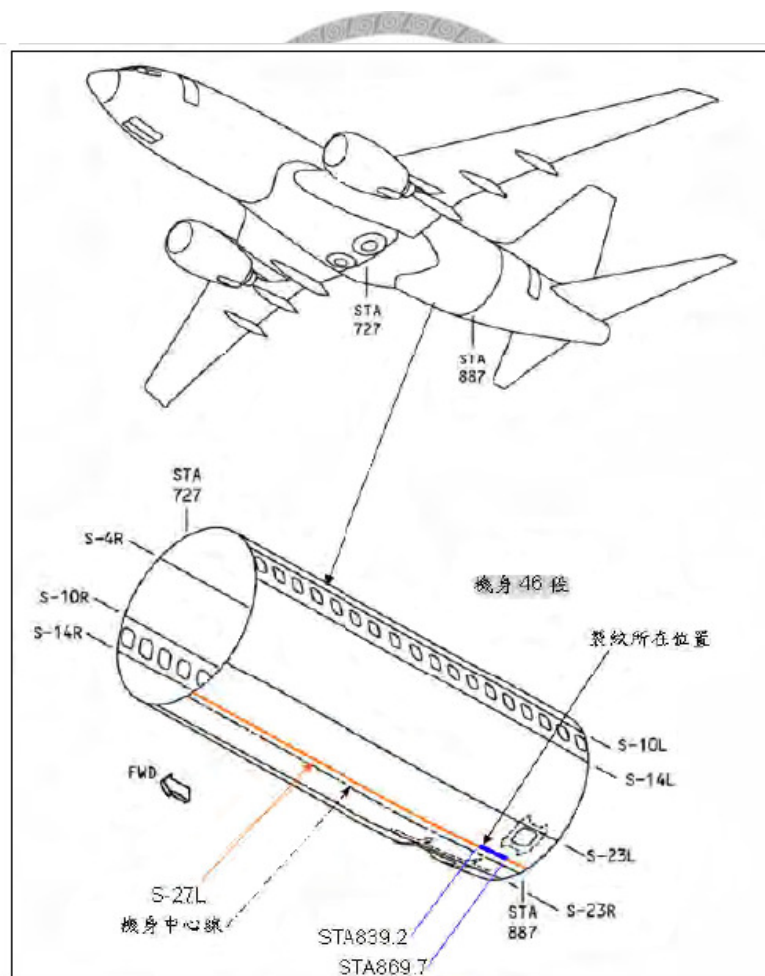


圖 1.2 機腹蒙皮裂紋位置圖[1]

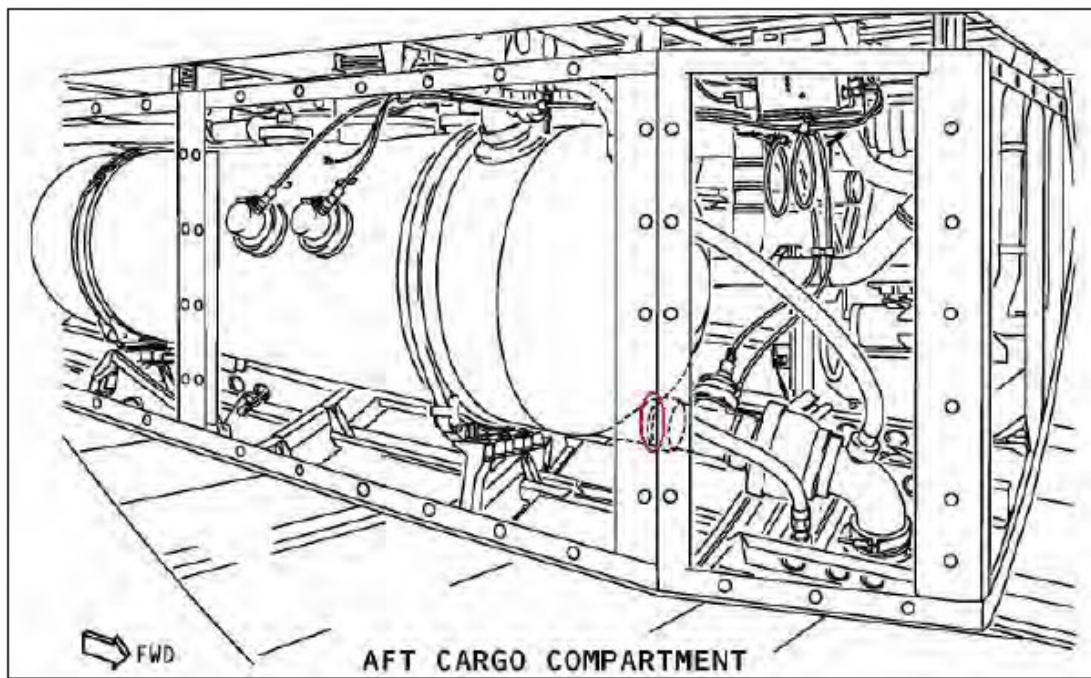


圖 1.3 廢水槽出口管路滲漏位置[1]



圖 1.4 廢水槽漏水情形[1]

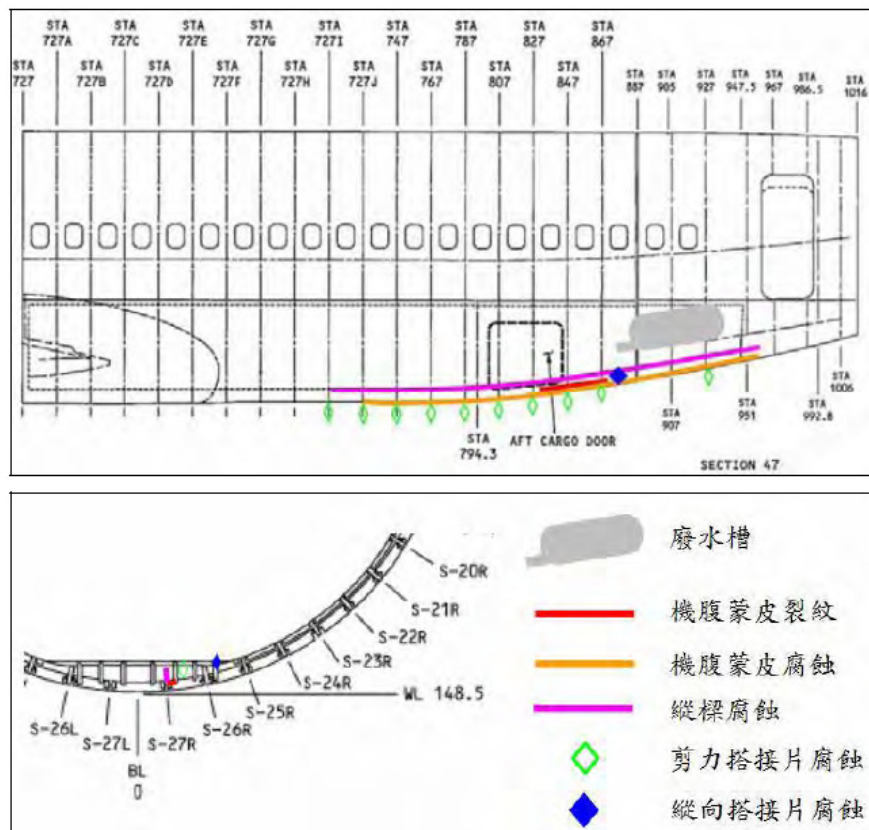


圖 1.5 廢水槽位置以及損害分布圖[1]



圖 1.6 蒙皮破損處巨觀照[1]



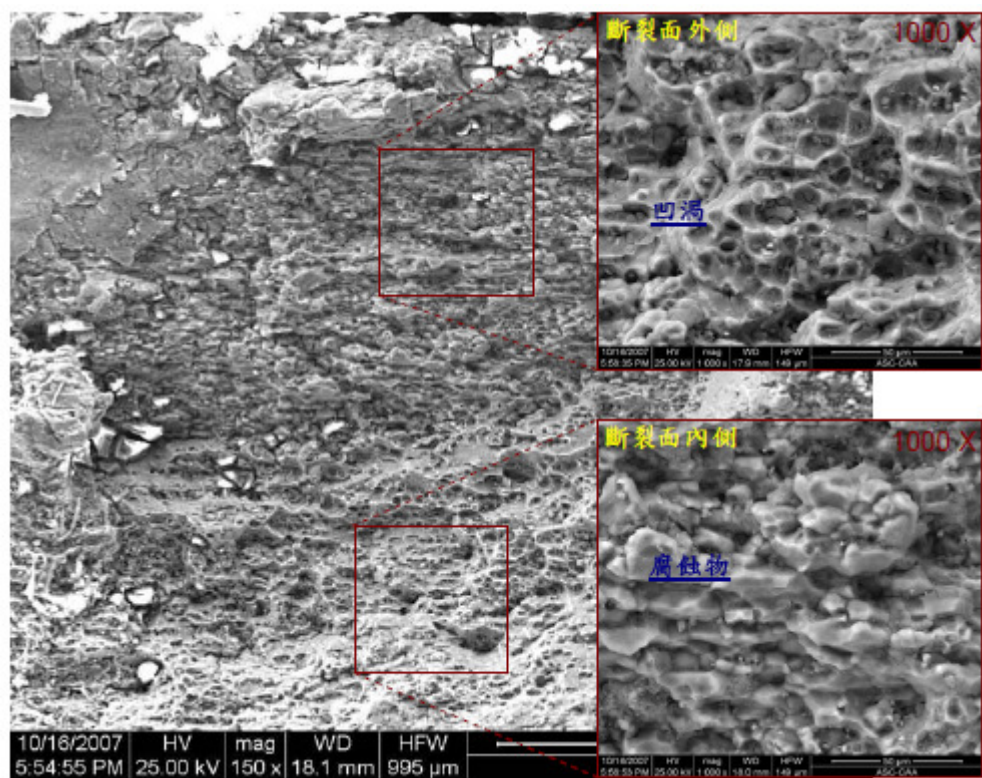


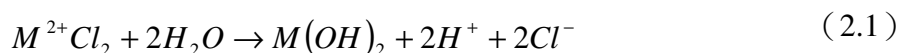
圖 1.7 蒙皮斷面 SEM 觀察[1]

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 腐蝕破壞機制

#### 2.1.1 孔蝕 (Pitting)

孔蝕[2-4]主要反應在構件與腐蝕液接觸的表面，因腐蝕作用在表面產生深淺不一的蝕孔，進一步產生應力集中或是裂縫的起始，進而降低構件的疲勞壽命[5-7]。孔蝕是一種局部腐蝕，只發生在具鈍化性金屬，其中鈍化性金屬指的是如鋁或不銹鋼等金屬，在其與空氣接觸後金屬表面會形成一薄膜，稱之為鈍化膜，使金屬母材與外界的介質隔離，阻止金屬被進一步腐蝕。由文獻中指出，促進孔蝕最主要的因素是氯離子，因為氯離子很容易穿透鈍化膜，或阻止鈍化膜的形成。孔蝕是一種獨特的陽極反應，腐蝕初始在金屬表面的凹處形成據點後，開始進行孔蝕行為。所謂的凹處，可能是表面的缺陷或是金屬表面氯離子容易穿透的弱點。在凹處因為液體對流不暢，缺少氧氣，而凹處外圍氧氣充足，富含氧氣，二者遂形成濃差電池，金屬凹處為陽極，外圍腐蝕液為陰極。當電池反應開始進行，帶負電的氯離子會被金屬表面凹處帶正電的金屬離子吸引，而氯離子對金屬有水解的作用，所以會使金屬離子脫離金屬表面，如此會加速陽極反應速率，而失去鈍化作用，成為活性的腐蝕反應。圖 2.1[2]為一二價金屬的孔蝕形成圖。水解反應式如 (2.1) 式：



腐蝕液中含有氫離子的成分，會造成構件表面酸化，且氫離子會促進氯離子活性，進而加速金屬的腐蝕速率，使金屬表面的缺陷逐漸被腐蝕為深孔。孔蝕大部分發生在靜止或流速緩慢的環境中，因為流速太快，腐蝕據點不容易聚集氯離子和氯離子，腐蝕也就不會繼續惡化成孔穴。[8]



### 2.1.2 應力腐蝕 (Stress Corrosion Cracking)

應力腐蝕[9-11]為構件在腐蝕環境以及固定張應力的環境下所形成的腐蝕破壞，也稱作靜態疲勞。文獻中指出，應力腐蝕的破壞主要包含下列兩種機制：陽極溶解(anodic dissolution) [12,13]與氫脆化(hydrogen embrittlement) [12,13]。陽極溶解的破壞形式首先由於張應力的施加使得晶界產生滑移，導致金屬表面的鈍化膜破裂，在鈍化膜破裂處因流體對流不暢，形成濃差電池，在金屬裂縫尖端因為應力集中產生塑性區，因此相對於金屬外圍將優先反應，導致裂縫尖端金屬陽極溶解。裂縫尖端新裸露出的金屬會再次形成鈍化膜，使腐蝕速率減緩，但當鈍化膜因晶界滑移而再度產生破裂，則陽極溶解反應持續進行，使裂縫成長，如圖 2.2[12]。氫脆化係指構件在含氫介質中長期使用時，材料由於吸氫或氫滲而造成的機械性能退化。當構件表面或裂縫尖端與腐蝕液接觸時，腐蝕液中的氫離子會吸附在金屬表面，當構件因受力使金屬裂縫產生塑性變形，氫離子即會藉由擴散或者差排移動滲入金屬內部。進入金屬內部的氫離子會降低金屬的鍵結，或使裂縫尖端區域的塑性變形區脆化，降低材料韌性，使構件更容易發生斷裂，如圖 2.3[12]。此兩種破壞機制會使金屬裂縫產生沿晶破壞，致使裂縫生長而發生斷裂破壞。

### 2.1.3 腐蝕疲勞 (Corrosion Fatigue)

腐蝕疲勞[14]為構件在腐蝕環境與循環負載共同作用下形成的破壞機制。疲勞破壞包括三個階段，分別是裂縫初始、裂縫成長以及快速斷裂，文獻中指出金屬在腐蝕環境下會因為孔蝕或是疲勞滑移機構致使裂縫起始，而裂縫一旦形成，在裂縫尖端會發生陽極溶解與氫脆化，導致裂縫生長速率加快，降低構件的疲勞壽命。

Miller and Akid[15]曾探討短裂縫在空氣中及在腐蝕環境中的疲勞裂縫成長性質，如圖 2.4[15]。當金屬表面因為孔蝕或應力集中產生微小裂縫時，裂縫會進入

第一階段破裂模式。此階段的裂縫成長主要受剪力主導，裂縫受到單一晶粒的拘束而導致成長速率十分緩慢。裂縫進入第二階段破裂模式之前，會先進入一過渡區域，此時的小裂縫很容易受金屬本身微結構上之障礙物（例如晶界）所阻礙，使裂縫成長速率更為緩慢，甚至停止成長。接著進入第二階段破裂模式後，裂縫尖端受許多晶粒所圍繞，裂縫成長主要受張應力所主導，裂縫成長的速率會逐漸加快，直到最後材料產生破壞。一般而言，在腐蝕環境下金屬材料的疲勞壽命比在空氣中還短，而腐蝕環境能協助短裂縫克服在微結構上所遭遇的障礙物[15]，加速裂縫成長，使疲勞壽命降低。Akid and Murtaza[16]指出腐蝕疲勞提供了一個化學的驅動力—應變誘導溶解(strain assisted dissolution)，使原先在空氣中已停止成長之裂縫，受循環應力及腐蝕環境交互作用下，裂縫重新成長。此外，應力比、應力強度因子振幅、頻率與溫度也都會影響腐蝕疲勞壽命[8]。

## 2.2 疲勞破壞文獻回顧

### 2.2.1 應力強度因子

早期對於疲勞性質的研究，主要是建立出材料的 S-N 曲線來估算材料的疲勞壽命，但對於構件已存在缺陷或裂紋的情形下則變的不再適用。Paris and Erdogan [17]提出應力強度因子來描述一具裂縫的構件其裂縫生長行為。由線彈性破壞力學理論，若在一具有裂縫的構件之裂縫尖端定義一極座標，以裂縫尖端作為座標原點，則在裂縫尖端附近的應力場可以用（2.2）式表示，如圖 2.5[18]：

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \text{higher order terms} \quad (2.2)$$

上式中  $\sigma_{ij}$  為裂縫尖端附近的應力場，K 為應力強度因子， $f_{ij}(\theta)$  為與幾何形狀相關的方程式。 $\sigma_{ij}$  與  $\sqrt{r}$  成反比，所以當考慮  $r$  趨近於 0，即考慮裂縫尖端的應力時，裂縫尖端的應力會趨近於無限大。因該點存在應力之奇異性，因此在相較之

下，(2.2) 式中的高次項可以忽略，故可改寫成 (2.3) 式：

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.3)$$

由 (2.3) 式，對不同負載形式與幾何結構，可將應力強度因子分成三型，I 型（張開型）、II 型（滑移形）、III 型（撕開型），如下式：

$$\text{張開型：} K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy} \Big|_{\theta=0} \quad (2.4)$$

$$\text{滑移型：} K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} \Big|_{\theta=0} \quad (2.5)$$

$$\text{撕裂型：} K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xz} \Big|_{\theta=0} \quad (2.6)$$

由線彈性破壞力學理論，只要構件具有相同的應力強度因子，在裂縫尖端附近即有相同的應力場，與構件受負載形式及構件幾何關係無關。

### 2.2.2 Paris' Law

當一具裂縫的構件遭受循環負載，會發生裂縫生長，最終導致破壞。裂縫的生長包括三個階段，分別是裂縫初始、裂縫成長以及快速斷裂。在第一階段裂縫初始，存在著應力強度因子幅的低限，若是負載低於此應力強度因子幅，則裂縫不會生長。當負載高於此低限，裂縫開始生長，進入第二階段後開始穩定生長。在裂縫生長階段，Paris 透過應力強度因子幅  $\Delta K$  描述裂縫生長，建立出裂縫生長速率  $da/dN$  與應力強度因子幅  $\Delta K$  的關係式，如下式所示：

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.7)$$

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (2.8)$$

上式中， $a$  是裂縫長度， $N$  是循環周數， $C$  與  $m$  是材料常數， $K_{\max}$  為負載最大值所計算出的最大應力強度因子， $K_{\min}$  則為負載最小值所計算出的最小應力強度因子。由此可知裂縫生長速率  $da/dN$  與應力強度因子幅  $\Delta K$  為指數函數關係，因此

以裂縫生長速率與應力強度因子幅作圖，將座標軸設定為指數座標，可得到一線性關係，則材料常數  $m$  為斜率，如圖 2.6[19]。前述提及，應力強度因子與負載與幾何形狀有關，所以當裂縫持續生長，應力強度因子幅會持續增加，直到應力強度因子達到該構件材料的斷裂韌性 ( $K_C$ )，則裂縫生長會進入第三階段，發生快速的斷裂破壞。

### 2.2.3 裂縫封閉效應

由線彈性破壞力學理論，當裂縫受到張應力循環負載，裂縫的兩破裂面將完全張開，除非將外力負載完全卸除，否則兩裂縫面完全不會閉合。但 Elber[20,21] 發現，當裂縫由最大負載卸載至最低負載的過程中，兩裂縫面會提早接觸，而由最低負載加載至最大負載時，負載須達到一定的開啟應力，裂縫才會開啟，此現象即稱為裂縫封閉。1984 年，Suresh and Ritchie [22] 對裂縫封閉制定機制，從各方面觀點歸納出數種用來解釋裂縫封閉的機制，如圖 2.7 所示[22]。

由力學的觀點，(2.3) 式中當  $r$  趨近於 0，裂縫尖端之張應力將趨近於無限大，然真實情況無法出現無限大的應力，所以在裂縫尖端會產生塑性變形，在塑性區會產生殘留壓應力。當裂縫生長至塑性區，殘留壓應力會隨之釋放，使裂縫表面膨脹凸出，如此在外力卸載至低應力負載時，裂縫將提早接觸，便產生裂縫封閉現象。由微結構的觀點來看，兩裂縫表面因為不規則開裂使得裂縫表面粗糙會造成封閉現象，一般來說，裂縫面晶粒愈大，造成的裂縫封閉會愈明顯；另外裂縫表面的相變態亦會造成封閉現象，如鋼鐵材料中殘留沃斯田鐵，因為受力的關係使之轉換為麻田散鐵，導致體積發生變化，在裂縫尖端產生殘留壓應力而發生裂縫封閉。由環境觀點來看，裂縫面會因新裸露出來的金屬發生氧化，使新生成的氧化物造成裂縫的提早關閉；而當構件在黏滯流體如機油的環境下操作，黏滯流體會佔滿裂縫尖端，並在尖端產生力作用，此黏滯作用力會抵消部份負載，使裂縫提早閉合。Chun et al.[23] 指出，裂縫生長過程中，在低應力強度因子幅的階段

受裂縫封閉的影響很大，尤其在低頻的情形下，而當裂縫生長至一定階段，進入高應力強度因子幅區段時，裂縫封閉現象將不再明顯，裂縫生長主要由外力主導。

#### 2.2.4 Elber 修正式

由於有裂縫封閉現象，因此在 Paris' law 中的應力強度因子幅並不會完全作用在裂縫尖端，而是只有在裂縫封閉前的有效應力讓裂縫生長，因此 Elber 利用應力有效因子幅的概念，將 Paris' law 加以修正，重新描述裂縫生長機制，如下式所示：

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2.9)$$

$$\frac{da}{dN} = C_e (U \Delta K)^{m_e} = C_e (\Delta K_{eff})^{m_e} \quad (2.10)$$

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (2.11)$$

上式中， $K_{op}$  為裂縫張開時的應力強度因子， $U$  為應力強度有效比， $C_e$ 、 $m_e$  為材料常數。使用應力強度有效比描述裂縫生長行為能夠除去因塑性區或裂縫尖端氧化等環境因素造成的裂縫閉合，使疲勞測試能夠不受外在環境或操作條件的影響，更真實的反應出裂縫的生長趨勢。

#### 2.2.5 量測裂縫封閉

量測裂縫封閉可使用兩種方法，其一為直接量測，其二是間接量測。直接量測是利用工具直接觀察裂縫封閉之時機，如使用掃描式電子顯微鏡 (SEM Scanning electron microscope) 掃描裂縫表面 [24]，或使用光干涉法 (Optical interference) [25] 以及複製膜法 (acetate replication) [26]。而間接量測則是藉由量測裂縫封閉前後某些對應物理量的改變，來判斷裂縫封閉的程度，包括使用超音波法 (Ultrasonics signal) [27]、直流電位法 (DC potential drop) [28] 以及撓度法 (Compliance change) [21]。

本實驗所使用的是撓度法，其最早是由 Elber 提出並建議用來量測裂縫封閉的

方法，亦是目前最為廣泛使用的方法之一，利用試片在裂縫封閉前後所表現出的撓度差異量測裂縫封閉。當試片受到最大負載時，裂縫會呈現完全張開的狀態，而當負載慢慢卸除而裂縫尚未封閉前，試片反應出的剛性保持一定，但當負載低於應力封閉點以下，裂縫開始封閉，當裂縫封閉程度增加，視同裂縫長度隨之減少；而當裂縫長度減少，相對的試片表現出的剛性將隨之增強，直到裂縫完全封閉後即不再改變。因此藉由試片裂縫封閉前後所表現出的剛性變化，可以量得裂縫的應力強度有效比。

## 2.3 縮小試片尺寸的技術

在日常生活中，有許多機械構件使用在具高度危險性的環境，如核電廠或化學工廠內的高溫、高輻射等環境，一旦發生構件損壞，則後果將無法想像。因此，對於這些構件，判讀其剩餘材料性質以及壽命，是安全評估極重要的一環。

要取得該構件的材料性質，則需施行一連串的材料檢測，然而對於某些構件而言，材料的取得並不是如此容易，所以針對特定情形的材料檢測，已經開啟許多縮小試片尺寸技術的研究，亦即直接由構件上取下少量材料製作成試片，以此進行材料機械性質測試。目前研究縮小尺寸試片的相關研究以各國之核能研究部門為主，針對縮小試片測試技術也舉行了數次研討會[29-31]。

目前縮小尺寸試片測試技術可以分為兩大類，一為傳統相關測試改採用縮小尺寸的試片，並開發縮小尺寸試片所對應的試驗機及試驗方法改良；另外一類為透過非傳統的方法獲取拉伸、斷裂韌性等機械性質。下列是已經研究出針對微小尺寸試片的測試方法：

1. CVN 衝擊測試衝擊能量值[32]。
2. 用 Charpy 法以小試片測試斷裂韌性[33]。
3. 利用縮小尺寸的平板拉伸試片取得拉伸性質[34]。
4. 利用 four-point bending 的 TEM disk size 求取拉伸性質[35]。

5. 用 Ball indentation 測試導出材料的流變曲線及降伏強度 [36]。
6. Punching 測試推導出降伏強度、材料流變性質、斷裂韌性與轉脆溫度[37]。
7. 利用 TEM disk size 試片做往復彎曲[38]或是往復拉伸[39]得到疲勞性質。

上述關於微型試片的疲勞性質，絕大部份都是求出材料的 S-N 曲線或是  $\epsilon$ -N 曲線，對於疲勞裂縫延伸的研究，主要還是依靠傳統的 CT 試片來求得裂縫生長速率。林賢易[19]在研究微型平板試片中設計出微型疲勞試驗機，後經由林士瑋[40]加以改良與實驗，得出了數種材料的微型試片裂縫生長速率與傳統 CT 試片數據做比較，並在實驗數據上有一定程度的吻合，使得微型試片疲勞裂縫延伸有了初步的研究結果。本文將接續林賢易與林士瑋，持續進行微型試片疲勞研究。



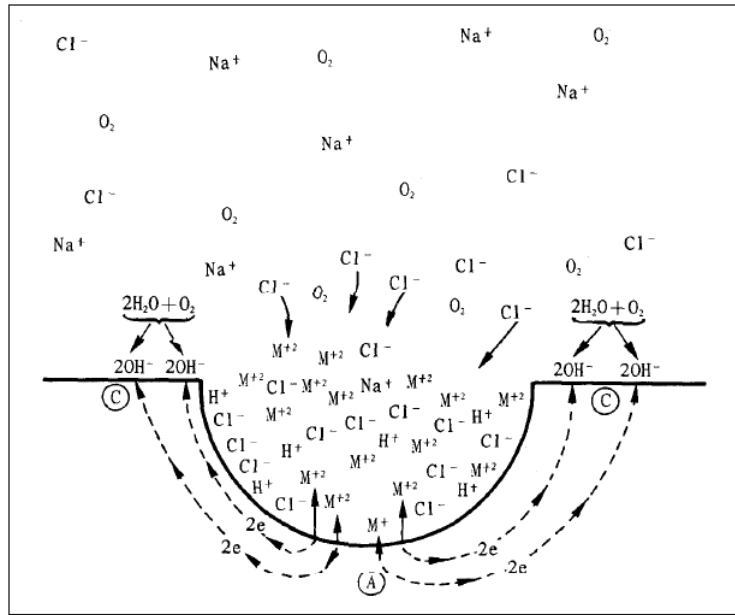


圖 2.1 孔蝕形成圖[2]

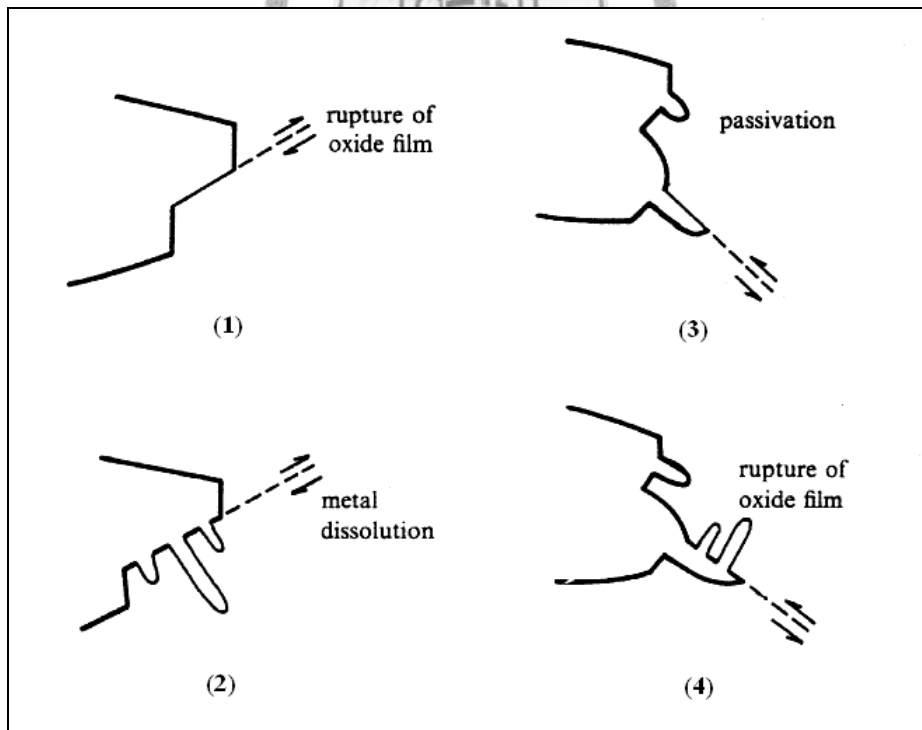


圖 2.2 陽極溶解[12]



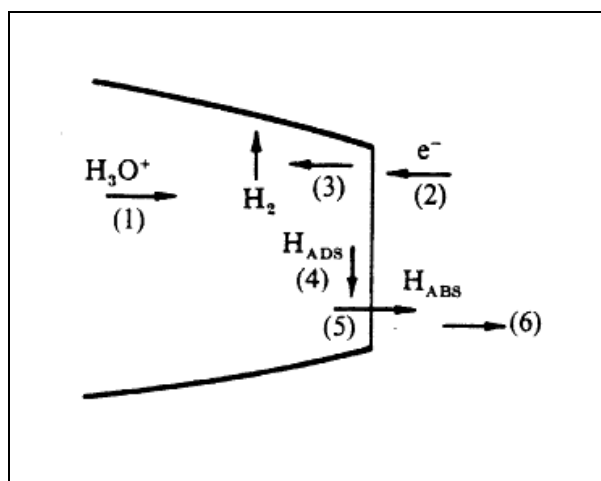


圖 2.3 氫脆現象[12]

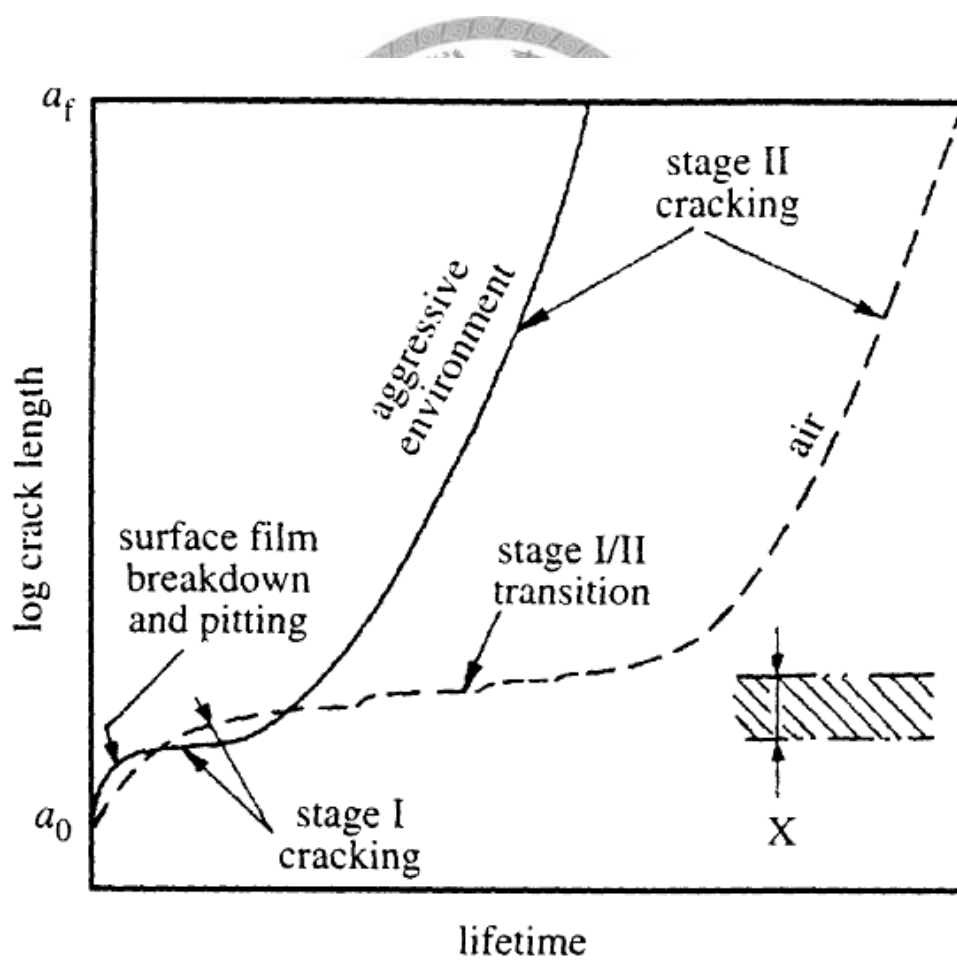


圖 2.4 裂縫在空氣與腐蝕環境生長機制圖[15]

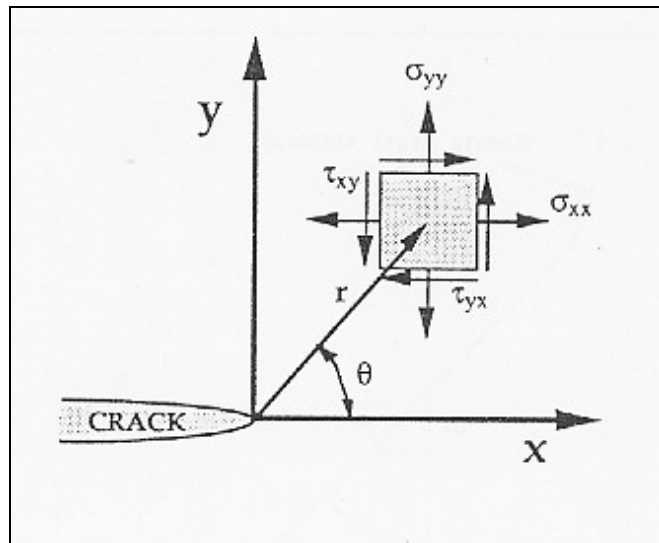
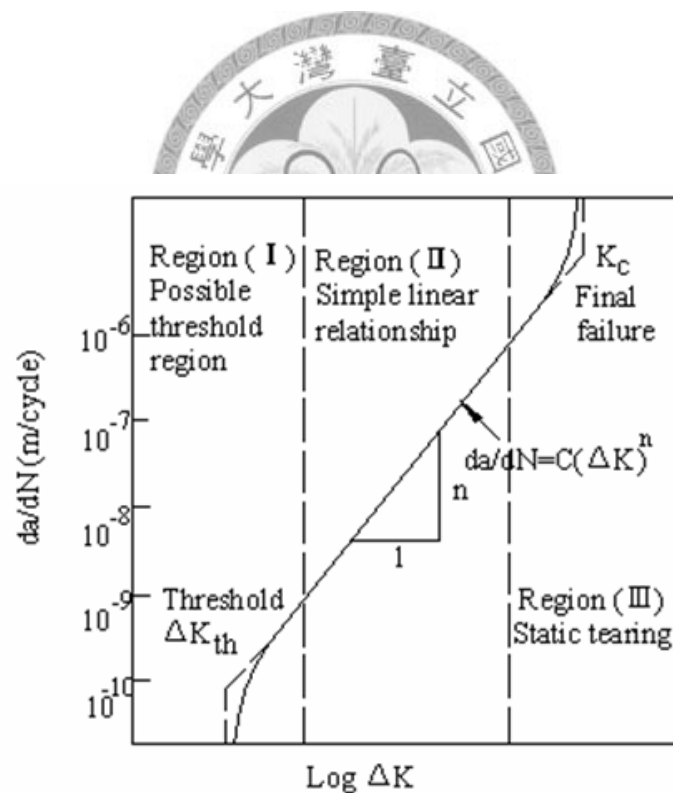


圖 2.5 裂縫尖端應力場示意圖[18]



Relation of the stress intensity factor  $\Delta K$  and crack growth rate  $da/dN$

圖 2.6 疲勞裂縫生長速率對應力強度因子幅關係圖[19]

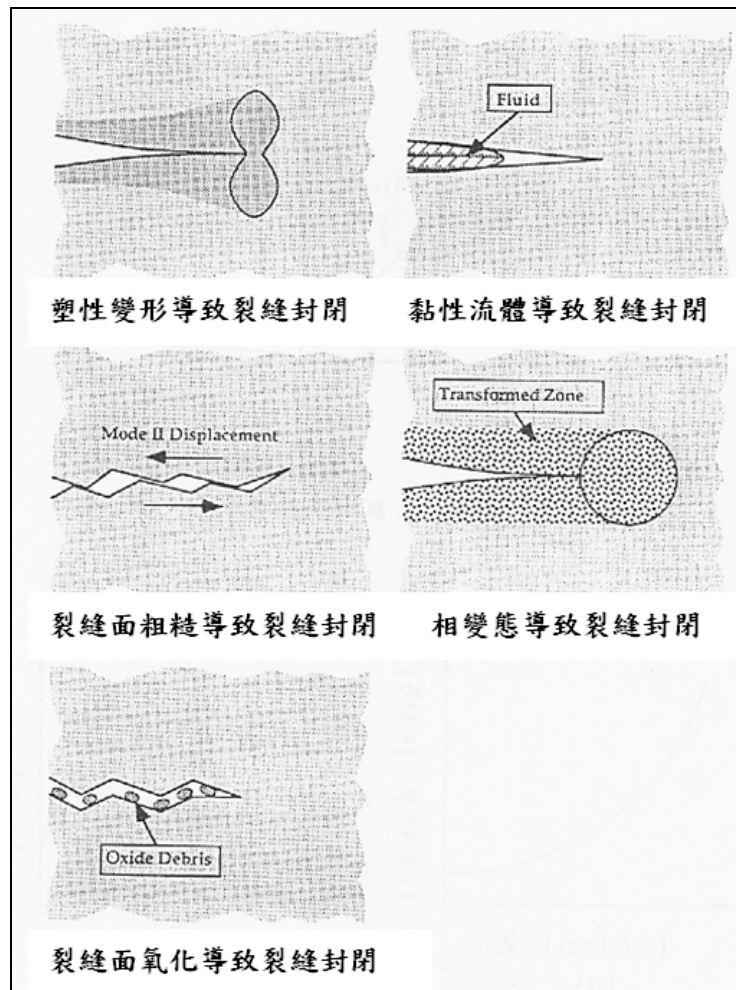


圖 2.7 裂縫封閉機制之示意圖[22]

## 第三章 實驗方法與程序

### 3.1 靜態腐蝕實驗

#### 3.1.1 標準拉伸試片

在靜態腐蝕的實驗中，實驗設定是欲將蒙皮材料 2024-T3 鋁合金製作成標準拉伸試片，並將試片浸泡於各腐蝕環境參數中，而後對試片進行拉伸實驗求取其相對應的應力應變曲線，檢視腐蝕是否會對試片造成機械性質的改變。蒙皮材料為事故班機直接更換下來的蒙皮，如圖 3.1 所示。實驗共取得四片蒙皮，所取得的蒙皮均為事故班機未遭受腐蝕的區域，分布在機身縱衍 S-23L 至 S-26L 間，尺寸約為 70 公分× 80 公分。根據調查報告描述，蒙皮依所處位置及功能，其蒙皮外表面會有保護，且鍍鋁層會有不同外形與厚度的需求。因該波音 737-800 客機當初實行蒙皮組裝時，有部分構件發生干涉，因此在組裝時，有將蒙皮內表面做蝕洗的動作，造成蒙皮的厚度分布不均，且蒙皮鍍鋁層亦被移除，僅剩下 2024-T3 母材部分；而蒙皮的最外層則有塗佈防蝕漆保護。

試片尺寸參考中國國家標準 CNS 2112 G 2014—金屬材料拉伸試驗試片[41]。其標準規定在 3mm 以下的平板試片，採用 13B 號試片尺寸，即厚度保持原材料厚度，試片平行部長約 60mm，寬度為 12.5mm，詳細尺寸參考圖 3.2。在試片裁切方向的部分，事故之裂紋生長方向為平行於飛行器軸向方向，但是因為標準拉伸試片之幾何長度限制，若試片裁切方向為蒙皮之徑向，則會造成試片加工上的困難，因此試片裁切方向為沿著蒙皮的軸向方向進行加工，以統一進行比較。試片完成後將中央平行部的防蝕漆磨除，以浸泡腐蝕液。試片表面統一以砂紙磨至 800 號，並在平行部畫上 50mm 的標註長度（gage length）。完成加工之試片照片如圖 3.3。

#### 3.1.2 靜態腐蝕環境參數設定

事故檢測報告中指出，腐蝕是由無鍍鋁層內側蒙皮表面開始，逐漸往蒙皮外側擴展，最後因有效截面積不足，無法承受外載力量而出現過載破壞裂紋。因此，如何由破壞案例重建出腐蝕環境參數，便是極為重要的部份。由事故調查報告中所提及的參數，在本實驗中選定腐蝕環境的參數有下列四項：濃度、酸鹼度、溫度、時間。各環境參數詳述如下。

濃度部分表示的是氯離子濃度，本實驗以氯化鈉水解提供所需的氯離子。飛安會報告指出，氯離子為上述機腹蒙皮裂紋案例造成腐蝕的主因，因此設置了三個對照組，分別是海水濃度的 3.5%、以及加速測試的 10%與 20%，此處濃度為重量百分濃度。酸鹼度部分設置兩個對照組，分別是 pH3 與 pH7 之水溶液，其中 pH3 水溶液之酸性環境由醋酸提供，模擬飛安會檢測報告中的清洗廢水槽所使用之冰醋酸。溫度部份設置兩個參數，分別是室溫與 5°C，分別模擬飛機地面停機時之廁所清潔環境以及航機飛行於高空中之相對低溫環境。因低溫環境無法實行至完全與航機飛行時之零下 40°C 相符，實驗成本將提高，因此以冰箱內之低溫環境作為區別。時間部份因計畫之時間限制，時間參數設定為一個月、三個月、五個月。

### 3.1.3 靜態腐蝕實驗設備與流程

為了比較出腐蝕對於蒙皮材料 2024-T3 鋁合金的機械性質影響，在浸泡腐蝕液前將先取出 5 片試片進行拉伸實驗，並以此數據作為標準值，以比較出腐蝕前後的差異。前述針對本實驗所設定的環境參數，將先調配各相對應之濃度與酸鹼度的腐蝕液。氯離子濃度以重量百分濃度計算，各自調製成 3.5%、10%與 20%。調製完成後的腐蝕液視為中性，因溶液內不含有氫離子。酸性環境另再以純醋酸滴定至 pH 3，酸鹼度之測值由 pH 計測量，如圖 3.4。圖 3.5 是將試片表面間做好間隔以讓腐蝕液能夠均勻作用，方法為在試片間綁上橡皮筋，使每片試片都能夠接觸到腐蝕液；後將試片放入容器中浸泡腐蝕液，並以溫度參數分別將各個容器放置於常溫以及置入冰箱中，待時間參數到期時將試片取出作拉伸實驗。實驗期

間每三天更換一次腐蝕液以確保腐蝕液的活性。

由前述的環境參數部份做排列組合，可以得到 36 組對照組，以不同的環境參數浸泡試片，每個環境參數將實驗 5 片試片。為了實驗流程方便，將相同溶液條件、不同時間的參數合併浸泡於同一容器，共分別浸泡於 12 瓶容器中，各容器參數如表 3.1。

時間參數到期後，將試片取出並稍做清洗，並畫上依中國國家標準 CNS 2112 G 2014—金屬材料拉伸試驗試片[41]上所規定的 50mm 標註長度，以求取斷裂應變。拉伸時另需紀錄每片試片的編號以及其寬度、厚度等幾何參數，以推得應力值。浸泡過腐蝕液的試片實驗數據將與未腐蝕試片實驗做比較，比較兩者在機械性質的改變。

拉伸測試使用的機台是 MTS-810 動態油壓試驗機，如圖 3.6，機台的硬體設備包括了上油壓夾頭、下油壓夾頭、油壓機、LVDT 位移感測器、荷重元以及控制器等。測試時由油壓機提供拉伸的動力，荷重元負責紀錄試片受力，而 LVDT 位移感測器所紀錄的行程即為試片的伸長量，從試片變形行為的變化，可以掌握其拉伸強度與斷裂應變。

拉伸實驗進行時，首先會在標準試片上畫上一段 50mm 的標註長度，並紀錄各試片的編號以及厚度、寬度與夾持長度後，開始進行拉伸實驗。拉伸過程採用位移控制，拉伸速率定為 5mm/min，即下油壓夾頭每分鐘向下移動 5mm 的距離，而荷重元會記錄拉伸過程的力量，位移計則是紀錄拉伸過程所走的行程。拉伸實驗結束後的數據處理，首先將荷重元擷取到的力量值除以試片的厚度以及寬度，即可得到應力值；而將 LVDT 位移感測器所擷取到的位移值除以夾持長度，即可得到 MTS 所記錄的應變值。另外當拉伸測試結束後，將斷裂的試片斷面拼起量測原先標註長度的改變量，再除以 50mm 即可得到標註長度的斷裂應變。

## 3.2 應力腐蝕實驗

### 3.2.1 應力腐蝕試片與夾具

在應力腐蝕的實驗中，實驗設定是欲將蒙皮材料 2024-T3 鋁合金製作成標準拉伸試片，並將試片浸泡於設定之腐蝕環境參數中，並加上固定張應力作用，而後對試片進行拉伸實驗求取其相對應的應力應變曲線，檢視應力腐蝕對試片所造成機械性質的改變。試片裁切方向同靜態腐蝕試片，即斷裂方向垂直於飛機軸向方向。

在應力腐蝕實驗中，由於需要施加固定的張應力，因此需要設計出能夠在試片上施加並維持負載之方法。針對此實驗，筆者設計出一試片夾具，能夠有效對試片施加所需之張應力，並能在實驗時間內維持負載。夾具詳圖如圖 3.7，分為上下夾具，上夾具與下夾具分別有兩片組成，在試片夾持處以押花刀銑出鋸齒狀刻痕以咬合試片，上下夾具間以螺栓與螺帽固定位移，以施加變形量的方式施加負載。應力腐蝕的試片尺寸在拉伸測試部位同上述之標準拉伸試片，只有在上下夾持部各多出 50mm 供 MTS-810 動態油壓試驗機施加負載夾持用，且試片表面處理程序亦同上述過程。此夾具在飛安會計畫期間內一共製作出四套，每套夾具一次可以夾持一片試片。

### 3.2.2 應力腐蝕環境參數設定

應力腐蝕實驗與靜態腐蝕之差異為多了固定張應力的作用，因此在環境參數的設定上，是以靜態腐蝕的環境參數再加上拉應力參數。因為夾具數量為四組，因此在飛安會科發計畫時程內所能完成的試片數目有限，因此選定幾組較具比較性的靜態腐蝕參數再加上張應力作用，張應力選定為 40% 與 80% 的鋁合金 2024-T3 降伏強度，其中鋁合金 2024-T3 之降伏強度由實驗得知，約為 300MPa。詳細的實驗對照組如表 3.2。

### 3.2.3 應力腐蝕實驗設備與流程

應力腐蝕試片在表面以砂紙處理過後，會先在試片表面黏貼應變計，透過監控應變計的應變值以確認在實驗時間內施加的張應力是否能夠維持。應變計型號為 KFG-5-120-C1-11，安裝完成如圖 3.8。由於試片需浸入腐蝕液中，因此應變計必須做好防水措施，否則會造成電路短路的問題。防水工作主要以應變計防水黏土 AK-22 與應變計防水膠 Hamatite-Y 提供防水的保護，由應變計防水黏土與應變計防水膠上的使用說明，應變計防水黏土與防水膠具有優異的防水性以及耐蝕性，且由於其低強度的關係，以致在試片感受應變量的實驗期間，無須付出多餘的負載，因此能有效降低實驗誤差。

防水工作首先以應變計防水黏土 AK-22 覆蓋在應變計周圍，接著再以應變計防水膠 Hamatite-Y 塗佈在黏土與試片間，達到完全防水的作用；應變計黏土覆蓋於試片上如圖 3.9。完成防水黏土與防水膠的安裝後，再以塑膠容器黏貼於試片上，以盛裝腐蝕液。接著將試片安裝上應力腐蝕夾具，上下夾具分別以螺絲鎖緊，並在兩夾具間置入螺栓與螺帽，以提供變形量。當夾具都安裝完成後，將試片與上下夾具架上 MTS-810 動態油壓試驗機，以試驗機先施加至張應力參數所需的力量後，再將應力腐蝕夾具間的螺絲轉緊，當試片自 MTS-810 上卸下後，試片自身即會感受到相應的張應力，如圖 3.10；卸下後再將腐蝕液倒入塑膠容器內，每間隔三天更換一次腐蝕液。實驗期間內以應變計讀值以確認所施加的力量是否能夠維持；由實驗期間的觀察，當張應力施加一個月後，其應變計讀值所減少的應變值約為原來施加之應變值的 2%，因此可以判定施加的張應力在實驗期間能夠有效維持。待時間參數到期後，將試片取下，由 MTS-810 動態油壓試驗機進行拉伸，拉伸速率設定為 5mm/min，並將數據與靜態腐蝕的結果作比較。

### 3.3 CT 試片腐蝕疲勞實驗

#### 3.3.1 疲勞 CT 試片

在腐蝕疲勞實驗中，實驗設定是將飛機蒙皮材料 2024-T3 鋁合金加工成標準



疲勞 CT 試片，以等振幅負載做疲勞裂縫生長實驗，建立出應力強度因子幅與裂縫生長速率的關係，並建立數組環境參數對照組，比較在未腐蝕(空氣)情形下與腐蝕環境之裂縫生長速率的關係。蒙皮材料由飛安會提供，試片尺寸參照 ASTM E647[42]的規範，如圖 3.11。試片厚度保持原材料厚度，裂縫生長方向與此次蒙皮裂紋事故的 77 公分裂紋方向相同，即裂縫生長方向平行於蒙皮軸向方向。試片加工完成後，以砂紙將蒙皮表層之防蝕漆除去，腐蝕面以砂紙磨至 800 號，而在裂縫觀察面則以砂紙磨至 2000 號以利裂縫觀察。

### 3.3.2 CT 疲勞試片 K 值估算

標準疲勞 CT 試片的應力強度因子幅估算參照 ASTM E647[42]的規範，如(3.1)式：

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2+\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.866 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3.1)$$

上式中， $\Delta P$  是負載的差值，即輸入的弦波之最大負載減最小負載的值， $B$  是試片厚度， $W$  是試片寬度， $\alpha$  是裂縫長度  $a$  除以試片寬度  $W$ ，即  $a/W$  的比值。

### 3.3.3 CT 試片腐蝕疲勞環境參數設定

在腐蝕疲勞實驗中，腐蝕環境設定參數有氯離子濃度與酸鹼度，氯離子濃度設定為 3.5%與 20%，酸鹼度設定為 pH 3 與 pH 7，在探討酸鹼度對腐蝕疲勞影響的對照組中，實驗將固定氯離子濃度為 20%，比較酸鹼度變化對試片裂縫生長速率的影響；而在探討氯離子濃度對腐蝕疲勞影響的對照組中，將酸鹼度為 pH 7，比較氯離子濃度變化對試片裂縫生長速率的影響，實驗參數表如表 3.3。氯離子濃度以重量百分濃度計算，各自調成 3.5%與 20%。調製完成後的腐蝕液視為中性，因溶液內不含有氫離子。因此酸性環境以純醋酸滴定至 pH 3，以模擬廢水槽滲漏之腐蝕液。

### 3.3.4 CT 試片腐蝕疲勞實驗設備與流程

在標準試片疲勞測試中，會將標準疲勞試片在腐蝕環境中進行疲勞試驗，並與未遭受腐蝕之空氣環境的試片做比較。實驗中，量測裂縫封閉的方法是在試片背面黏貼應變計，如圖3.12，在量測時擷取負載與應變計的應變值進行作圖，以判斷裂縫封閉程度，應變計型號是KFG-1N-120-C1-11N30C2。而在腐蝕疲勞試片中，需將試片暴露在腐蝕液環境中進行疲勞試驗，實驗方法參考范萬昌[8]對於Custom 450不銹鋼進行之腐蝕疲勞實驗流程，在試片兩表面黏貼壓克力材料製成的腐蝕液容器，並以小水管將兩容器連接，並以抽水馬達讓腐蝕液在腐蝕槽內循環，設計圖如圖3.13[8]，圖3.14則表示2024-T3蒙皮試片腐蝕容器加工完成並架設於MTS-810動態油壓試驗機之情形。選用壓克力材料的目的是因為壓克力的透明性及抗蝕性，可以觀察到試片裂縫生長且不會被腐蝕液腐蝕。實驗用的抽水馬達流速約為1c.c/sec。

疲勞實驗以 MTS-810 動態油壓試驗機進行等振幅循環負載，實驗施加的負載應力比  $R$  固定為 0.1，負載頻率為 5Hz。實驗開始先將鋁合金疲勞試片架上 MTS-810 動態油壓試驗機，並將應變計先行校正歸零；MTS-810 動態油壓試驗機負載之電壓值以及應變計之應變電壓值的擷取是使用 LabVIEW 程式作電壓訊號的擷取。實驗分為兩個步驟，首先是裂縫預裂過程，期間以  $\Delta K$  控制，以蒙皮材料 2024-T3 鋁合金之應力強度因子幅低限為預裂的標準，在預裂過程以此低限讓裂縫進行預裂，以避免因負載過大造成的塑性區增加。待試片之裂縫延伸超過 2.25mm 後，再以等振幅負載進行裂縫生長實驗，隨著裂縫長度增加， $\Delta K$  值會隨之增加。在試片裂縫延伸過程以游移式顯微鏡觀察裂縫生長，當裂縫每生長一定長度時紀錄負載循環週數，並擷取 MTS-810 動態油壓試驗機的力量電壓值以及應變計之應變電壓值，經由 LabVIEW 程式處理過後可得裂縫封閉之應力強度有效比。

量測裂縫封閉的處理流程是先將 LabVIEW 所擷取之  $P$ 、 $\delta$  訊號同步讓數位濾波器運算，除去高頻雜訊，再切割出  $P$ ~ $\delta$  循環，進行訊號補償法運算，最後顯示

裂縫封閉補償圖形，如圖 3.15 所示[40]。

$$U = \frac{K_{\max} - K_{op}}{K_{\max} - K_{\min}} = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (3.2)$$

其中，U 為應力有效強度比， $K_{op}$  為裂縫完全張開的應力強度因子， $\Delta K_{eff}$  為有效應力強度因子幅。

由於 LabVIEW 程式擷取速度影響，在使用程式來擷取時，需先將實驗頻率降低至 1Hz 並且配合程式設定取得不失真的波形。程式包括以下幾個步驟[40]：

1. 同步擷取負載值與應變值，再通過數位低通濾波來處理。數位濾波模式採取 Butterworth 式濾波器，數位濾波器的參數設定包括濾波形式、取點速率  $f_s$ 、截斷頻率  $f_c$ 、次數  $n$ 。濾波形式有低通濾波 (lowpass)、高通濾波 (highpass)、帶通濾波 (bandpass)，因量測時拉伸頻率通常小於 1Hz，所以採用低通濾波形式，將高頻的雜訊濾除。
2. 以矩陣運算方式，找出經濾波後  $P \sim \delta$  訊號第一個最大值處，訂為第一個循環起始點，並配合單一循環擷取點數，定義每一個循環起始點與循環編號。
3. 依照訊號補償法，先取出欲量測的某一循環，此循環是從最大負載開始卸載至最小負載，再加載至最大負載，定義此循環為 (3.3) 式。

$$\delta = \delta(P) \quad (3.3)$$

取裂縫完全張開時， $P \sim \delta$  訊號成線性關係區段資料，進行線性擬合 (linear fit)，並延伸至整個循環，得到 (3.4) 式。

$$\delta' = \alpha P \quad (3.4)$$

再由上述兩式相減得 (3.5) 式。

$$\delta'' = \delta(P) - \alpha P \quad (3.5)$$

由 (3.5) 式所繪出的裂縫封閉補償圖形可以得到撓度轉折位置，程式也會讀

出應力有效強度比。紀錄應力強度有效比後可以在數據處理時得出有效之應力強度因子幅  $\Delta K_{eff}$ 。

實驗結束後之數據處理首先將所觀察到的裂縫長度、負載週數、應力強度有效比做整理，並經過 LabVIEW 的七點多項式曲線擬合（Seven Point Curve Fitting）程式，可得到較為平滑的裂縫生長速率對應力強度因子幅的關係圖。

### 3.4 微型試片腐蝕疲勞實驗

#### 3.4.1 微型試片

微型疲勞試片由事故班機之蒙皮 2024-T3 鋁合金製作，尺寸上則沿用林賢易 [19] 與林士瑋 [40] 所定義的微型疲勞試片的尺寸，試片為平板試片，長度為 20mm，寬度為 6mm，厚度為 0.5mm，如圖 3.16。試片切割使用 WEDM 線切割加工機，其加工原理是利用在銅導線兩端施加高直流電壓，並將通電導線靠近被加工物，當兩者距離很小時，會產生放電現象，藉由金屬融熔進行加工。因為此加工法無額外之機械加工力作用輸入，因此試片將不會有因為機械加工而產生的殘留應力。裂縫生長方向與此次蒙皮裂紋事故的 77 公分裂紋方向相同，即裂縫生長方向平行於蒙皮軸向方向。加工好之試片以線鋸切割出起始裂縫，並以砂紙將蒙皮表層之防蝕漆除去，腐蝕面以磨至砂紙 800 號，而在裂縫觀察面則以砂紙磨至 2000 號以利裂縫觀察。

#### 3.4.2 微型疲勞試片 K 值估算

微型疲勞試片為單邊裂縫（Single-Edge Crack，SEC），如圖 3.17[43]所示，其中  $a$  為裂縫長度， $\sigma_0$  為試片承受的應力， $W$  為試片寬度。在此受力與幾何情形下的應力強度因子幅估算應如（3.6）式[43]：

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{WB} \sqrt{\pi a} (1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 21.71\alpha^3 + 30.38\alpha^4) \quad (3.6)$$

上式中， $\Delta P$  是負載的差值，即輸入的弦波之最大負載減最小負載的值， $B$  是試片厚度， $W$  是試片寬度， $\alpha$  是裂縫長度  $a$  除以試片寬度  $W$ ，即  $a/W$  的比值。

但上述之公式乃是由實驗所做出之曲線擬合方程式，其實驗之邊界條件為插銷固定，且假設其固定端為無摩擦力的情形，如圖 3.18[44]。但微型疲勞試驗機的邊界固定條件為兩端夾緊，因此在此情形下則為考慮兩端插銷之摩擦力為無限大的情況，所以如果實驗的應力強度因子幅由 (3.6) 式推估，會造成疲勞裂縫生長圖形的裂縫生長速率變緩。根據文獻[45]指出，兩端固定的單邊裂縫平板試片，其邊界條件相似於一具環狀裂縫的圓柱，如圖 3.19[45]，而符合微型疲勞試驗機的應力強度因子幅估算應如 (3.7) 式[45]：

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{WB} \sqrt{\pi a} \left( \frac{1}{(1-\alpha)^{3/2}} \right) (1.122 - 1.302\alpha + 0.988\alpha^2 - 0.308\alpha^3) \quad (3.7)$$

上式中， $\Delta P$  是負載的差值，即輸入的弦波之最大負載減最小負載的值， $B$  是試片厚度， $W$  是試片寬度， $\alpha$  是裂縫長度  $a$  除以試片寬度  $W$ ，即  $a/W$  的比值。由上式，則能夠更正確的反應出微型試片所輸入的應力強度因子幅。

### 3.4.3 微型試片腐蝕疲勞實驗設備與流程

在微型試片腐蝕疲勞實驗中所使用的機台為微型疲勞試驗機，由林士瑋[40]設計完成，如圖 3.20。機台之硬體設備包括上下基座、壓電致動器（型號：APA500L）、上下夾具以及荷重元（型號：LUR-A-2KN-SA1），實驗時將微型試片安裝於夾具上，並將負載訊號輸入壓電致動器產生微小位移，試片與荷重元即會感受到相對應的循環負載，以此進行疲勞實驗。

在微型疲勞試驗機的訊號控制方面，主要有訊號產生器（Function Generator）、MTS 406 控制器、電壓放大器（Voltage Amplifier，型號：LE 150/100）以及示波器（Digital Storage Oscilloscope，型號：Tektronic 2216），如圖 3.21。首先將試片所需之負載由訊號產生器以弦波電壓形式發出，輸入 MTS 406 控制器為命令訊

號，控制訊號會經由 406 控制器的伺服閥輸出電流訊號，接著經過自製電路板將此電流訊號轉換為電壓訊號並濾波將高頻雜訊移除，所得之電壓訊號經過電壓放大器將電壓放大後輸入壓電致動器，壓電致動器產生位移由荷重元感受負載後將訊號回傳回 406 控制器，比較訊號產生器的命令訊號與荷重元感測到的回授訊號，以此完成一閉迴路控制，如圖 3.22。

在微型疲勞試片的裂縫封閉量測方面，所使用的方法是在裂縫尖端附近使用位移計進行量測，在量測時擷取負載與應變計的應變值進行作圖，以判斷裂縫封閉程度，如圖 3.23。

在腐蝕疲勞中，需將試片暴露在腐蝕液環境中，因此筆者將微型疲勞試驗機做小部份改裝，將原型之壓電致動器與上下夾具相對位置互換，將夾具置於底部，並在下基座上安裝腐蝕容器，在實驗時便可直接將試片浸泡於腐蝕液當中進行疲勞實驗，改裝後如圖 3.24。腐蝕環境參數設定同 CT 腐蝕疲勞試驗，實驗進行時將試片安裝於夾具，並透過上述步驟輸入負載訊號，藉由游移式顯微鏡觀察裂縫生長並紀錄相對應的循環週數，後經過 LabVIEW 的七點多項式曲線擬合(Seven Point Curve Fitting)程式，可得到較為平滑的裂縫生長速率對應力強度因子幅的關係圖，最後將所得的圖形與 CT 腐蝕疲勞試驗做比較。

### 3.5 腐蝕試片 SEM 斷面觀察

當上述實驗進行完成後，則會針對各種腐蝕機制以掃描式電子顯微鏡 SEM (Scanning Electron Microscope) 進行斷面觀察。掃描式電子顯微鏡型號為 JSM-5610，如圖 3.25。首先將各腐蝕試片斷面以慢速切割機切下適當大小，並以丙酮、酒精、純水依序將試片破斷面表面清洗乾淨，而後根據上述三種破壞機制：靜態腐蝕、應力腐蝕以及腐蝕疲勞實驗分別做破斷面觀察。在靜態腐蝕與應力腐蝕部份，會準備未腐蝕以及靜態腐蝕中性常溫環境 pH7、氯離子濃度 20%、以及應力腐蝕中性常溫 pH7、氯離子濃度 20%的試片；而腐蝕疲勞則會分別對標準試

片與微型試片各準備兩組做對照，分別是空氣環境以及中性常溫 pH7、氯離子濃度 20%之腐蝕環境，以確認腐蝕所造成的破壞並驗證破壞形式。



表 3.1 靜態腐蝕實驗參數表

容器編號	環境參數
1	pH7、3.5%NaCl、RT
2	pH7、10%NaCl、RT
3	pH7、20%NaCl、RT
4	pH3、3.5%NaCl、RT
5	pH3、10%NaCl、RT
6	pH3、20%NaCl、RT
7	pH7、3.5%NaCl、5°C
8	pH7、10%NaCl、5°C
9	pH7、20%NaCl、5°C
10	pH3、3.5%NaCl、5°C
11	pH3、10%NaCl、5°C
12	pH3、20%NaCl、5°C



表 3.2 應力腐蝕實驗參數表

編號	環境參數	張應力
1	pH3、3.5%NaCl、RT、一個月	80% $\sigma_y$
2	pH3、20%NaCl、RT、一個月	80% $\sigma_y$
3	pH3、20%NaCl、RT、一個月	40% $\sigma_y$
4	pH7、20%NaCl、RT、一個月	80% $\sigma_y$
5	pH7、20%NaCl、RT、一個月	40% $\sigma_y$
6	pH3、20%NaCl、RT、三個月	80% $\sigma_y$
7	pH7、20%NaCl、RT、三個月	80% $\sigma_y$

表 3.3 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞實驗參數表

編號	環境參數
1	空氣環境
2	pH7、3.5%NaCl
3	pH7、20%NaCl
4	pH3、20%NaCl



圖 3.1 事故班機之蒙皮照片

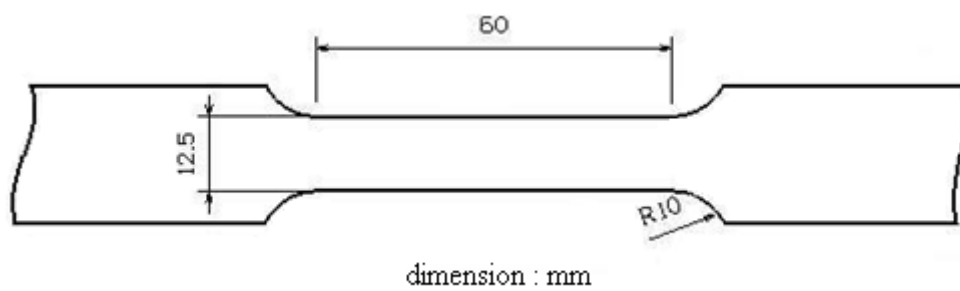


圖 3.2 CNS 中國國家標準規定之拉伸試片尺寸[41]

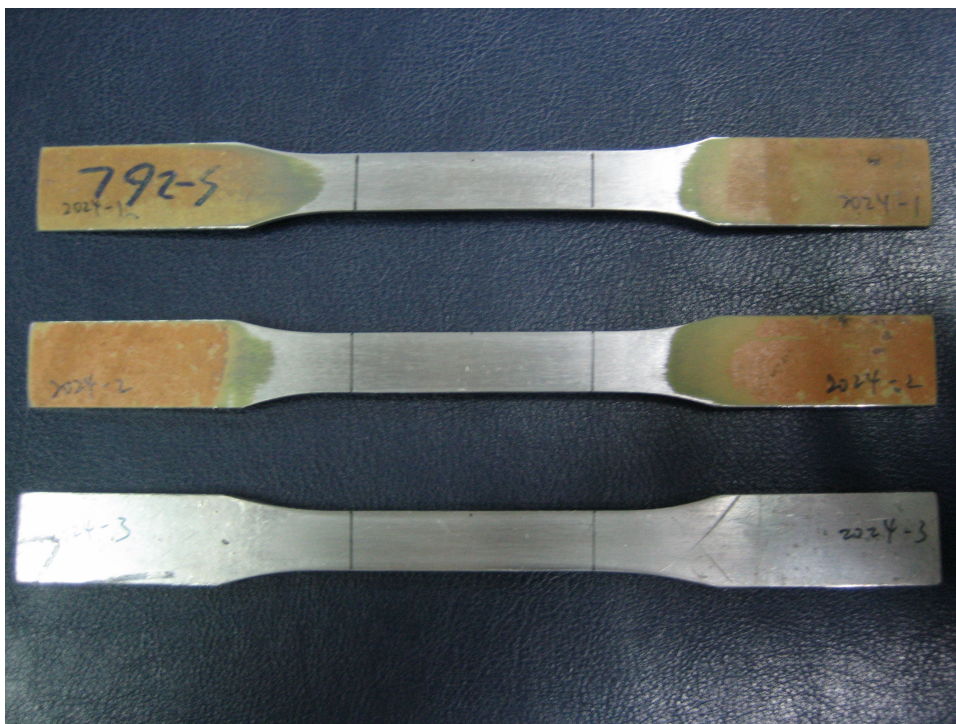


圖 3.3 標準拉伸試片加工完成圖



圖 3.4 以 pH 計量測腐蝕液酸鹼度





圖 3.5 拉伸試片保持一定之間隔

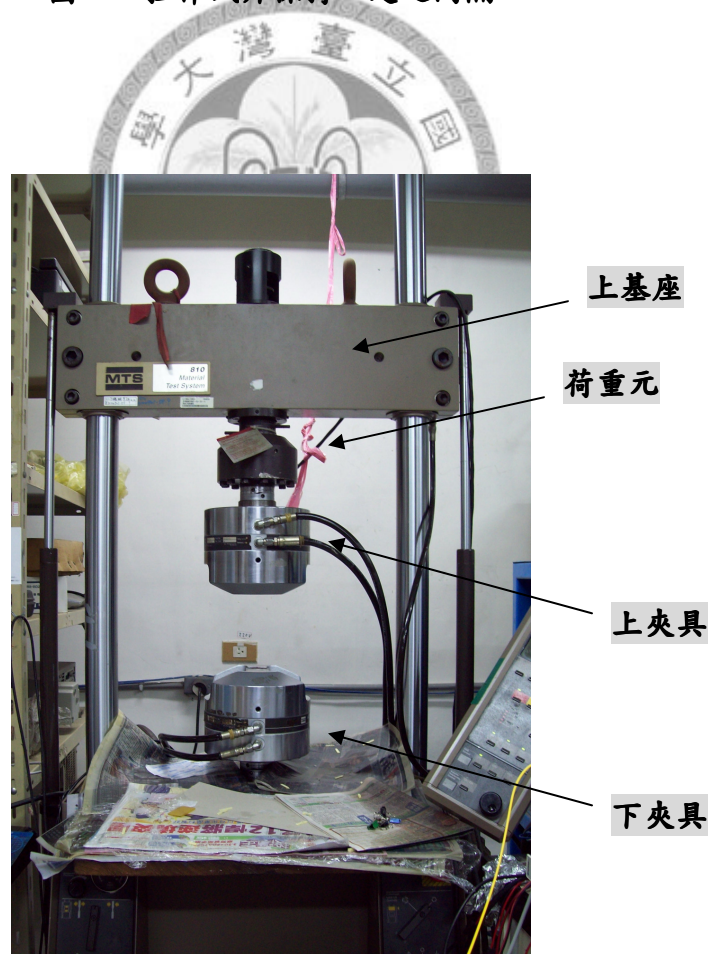


圖 3.6 MTS 810 拉伸測試機

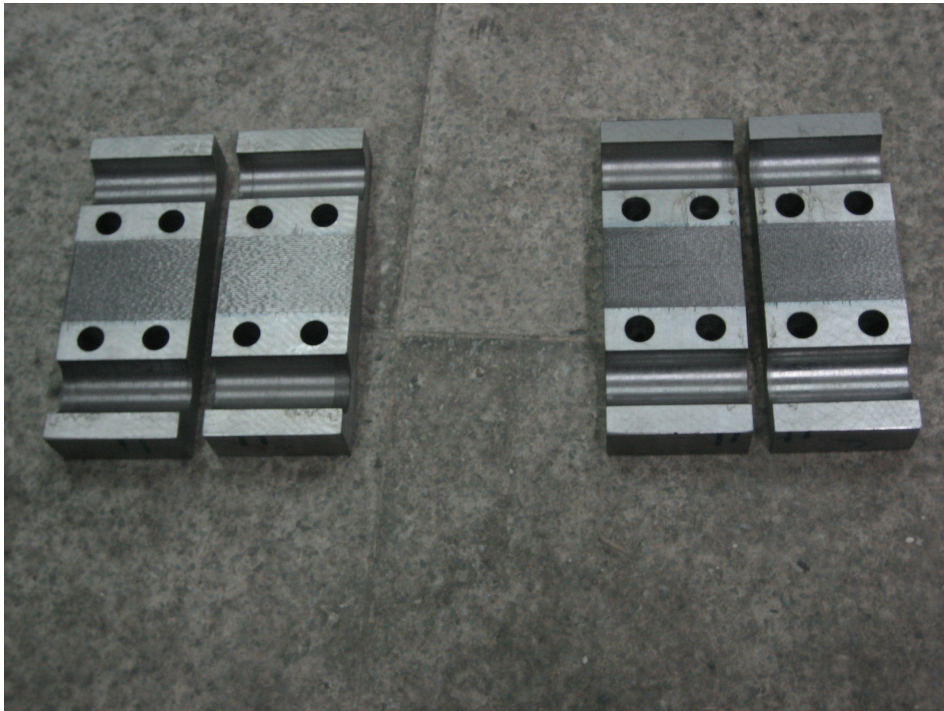


圖 3.7 應力腐蝕實驗測試夾具



圖 3.8 應力腐蝕試片表面黏貼應變計



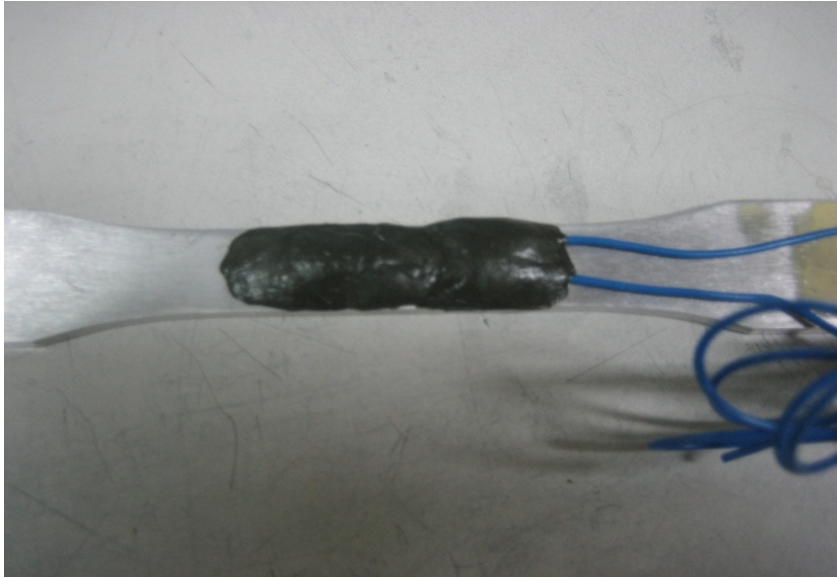


圖 3.9 應變計防水黏土黏貼於腐蝕試片上

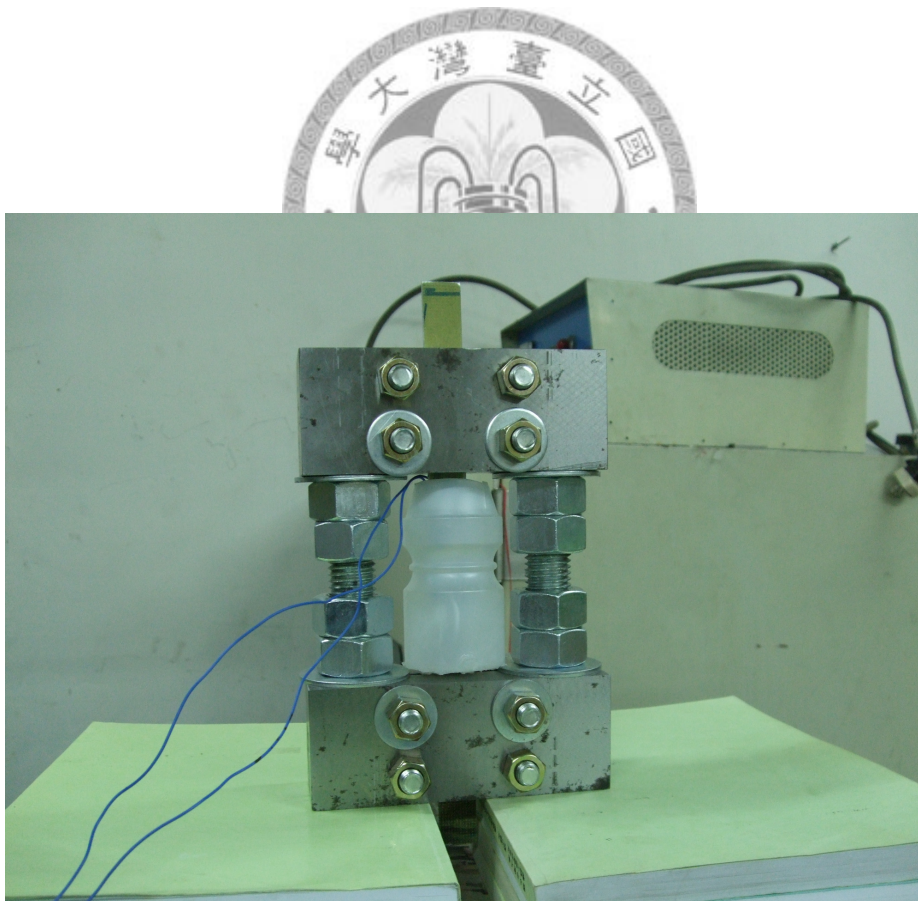


圖 3.10 應力腐蝕測試

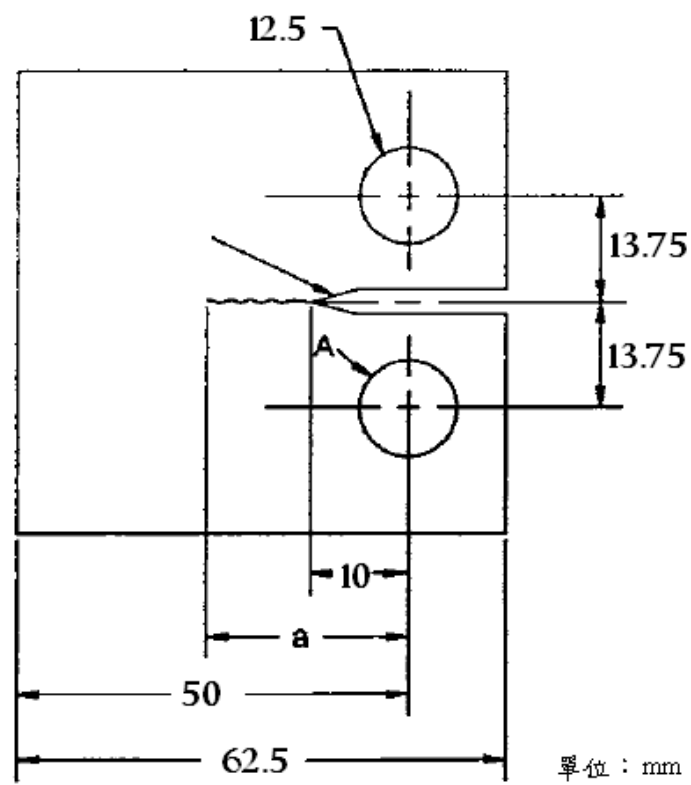


圖 3.11 疲勞 CT 試片尺寸[42]

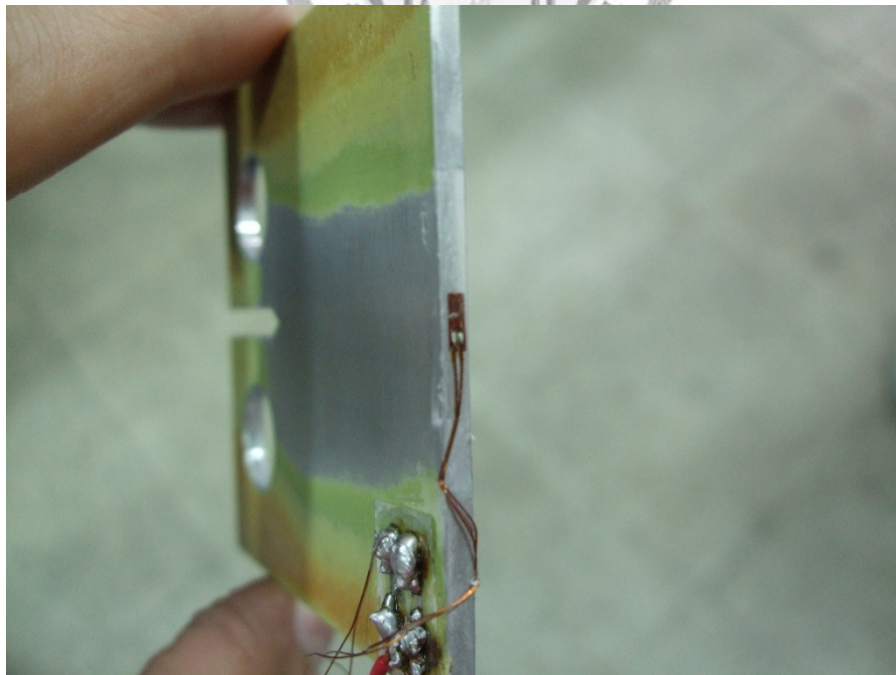


圖 3.12 在標準 CT 試片背面黏貼應變計

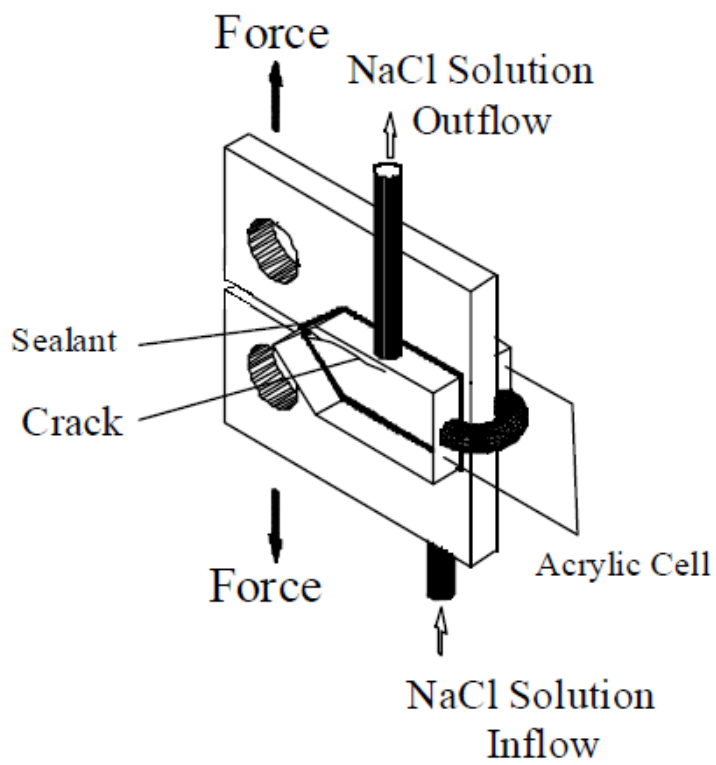


圖 3.13 腐蝕疲勞實驗設計示意圖[8]

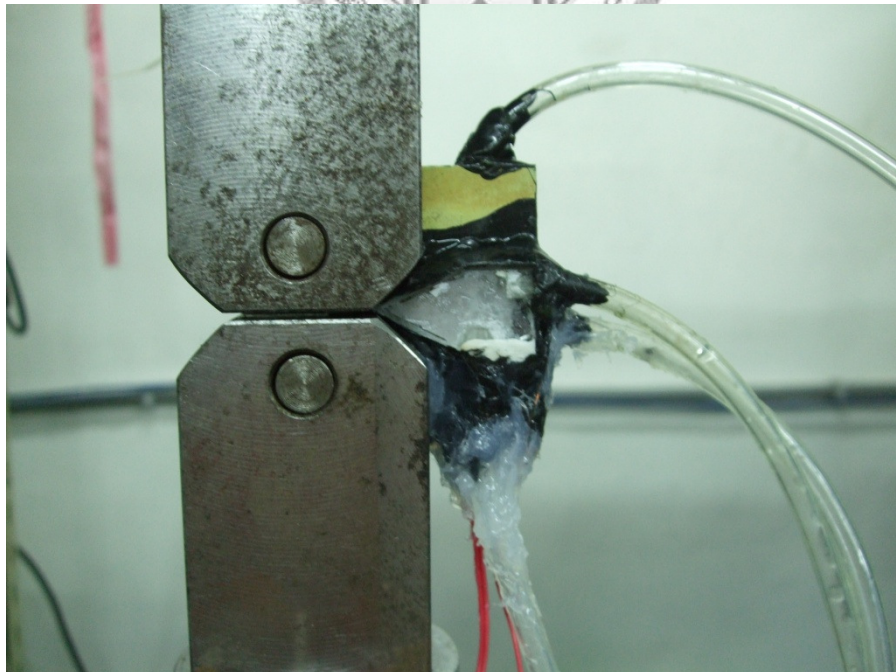


圖 3.14 腐蝕疲勞試片安裝於試驗機





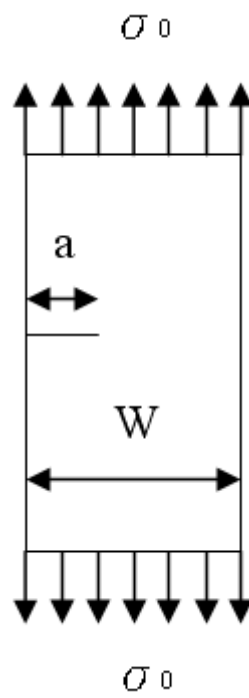


圖 3.17 試片單邊裂縫示意圖[43]

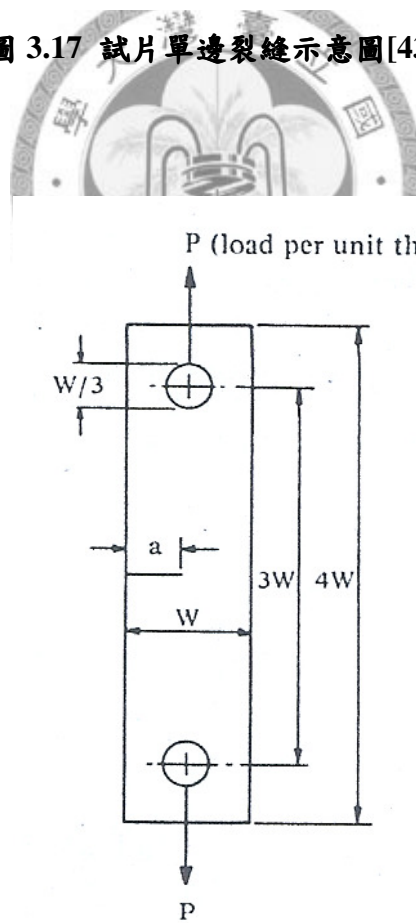


圖 3.18 試片單邊裂縫實驗之 ASTM 試片[44]

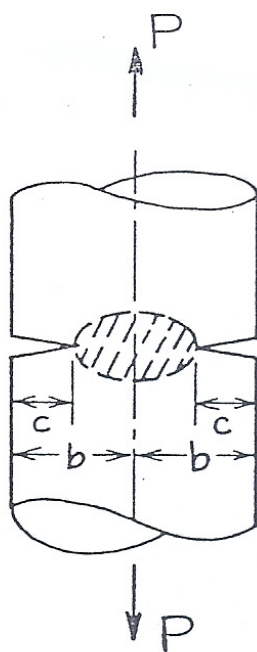


圖 3.19 圓環裂縫之圓柱試片[45]

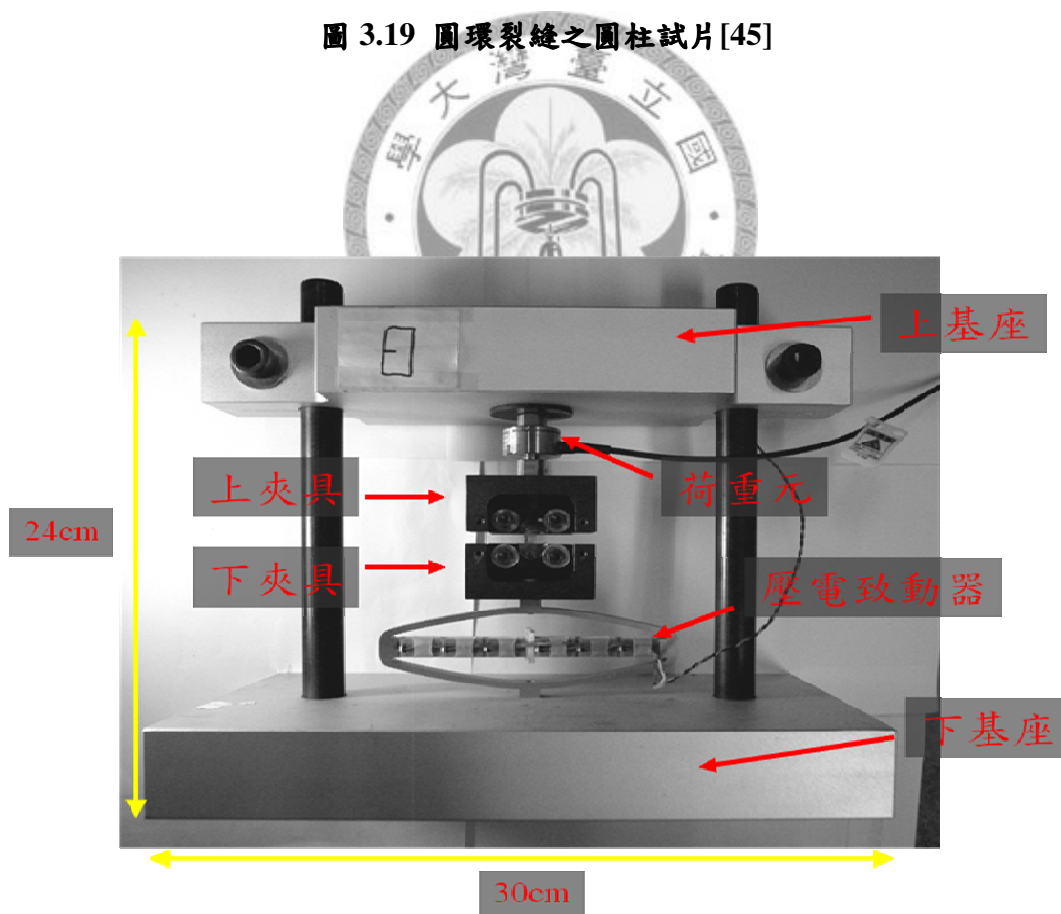


圖 3.20 微型疲勞試驗機

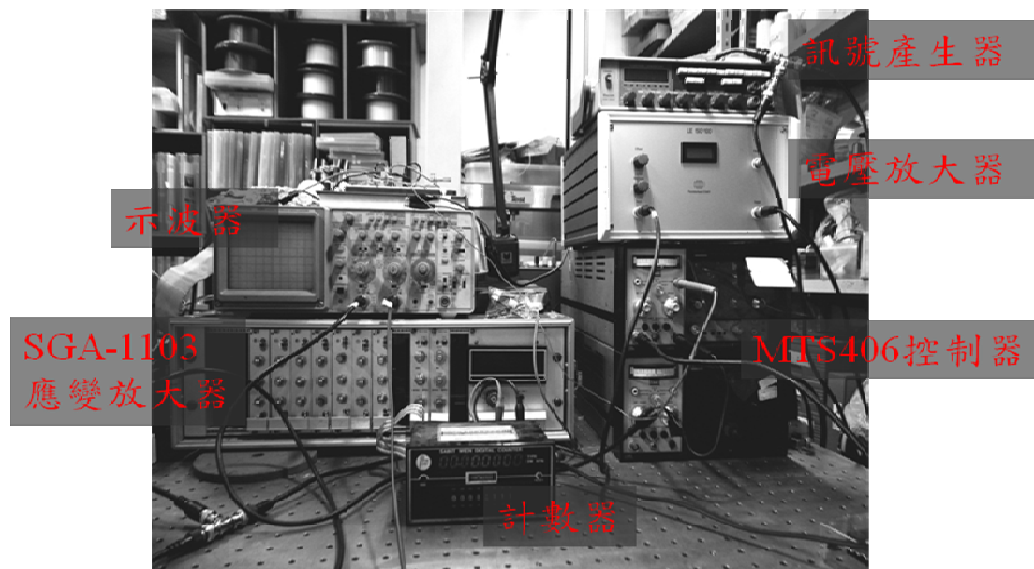


圖 3.21 微型疲勞實驗設備

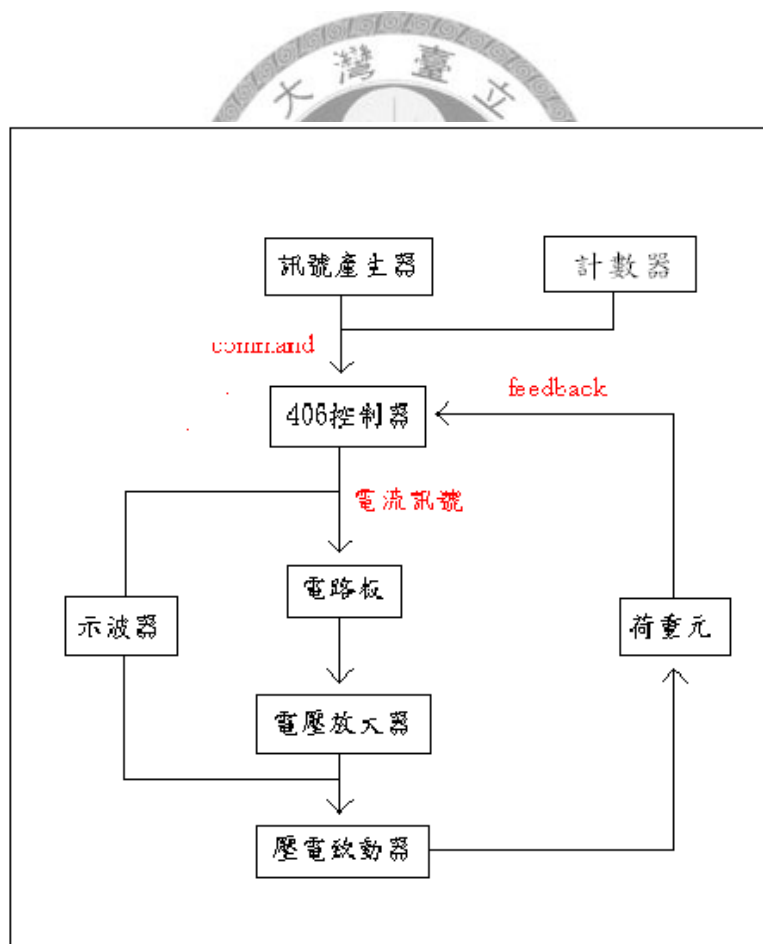


圖 3.22 微型疲勞試驗機閉迴路控制方塊圖

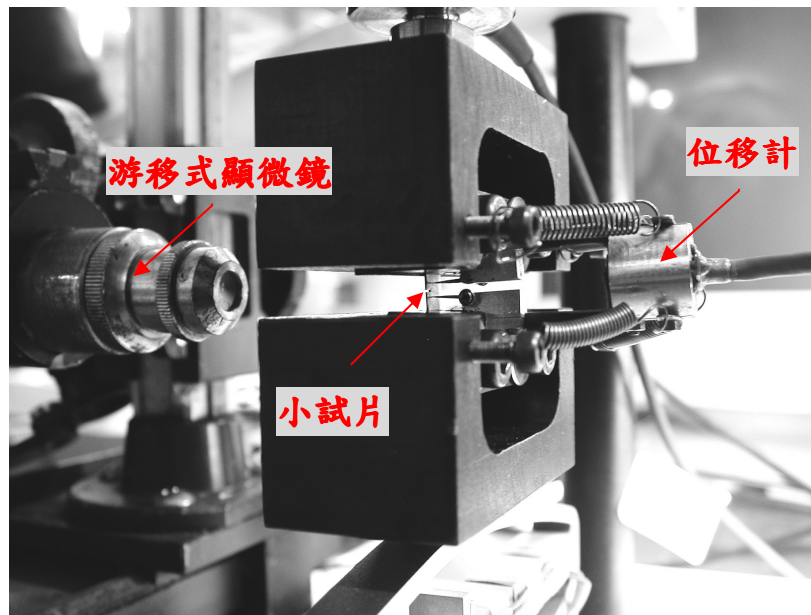


圖 3.23 在微型試片裂縫尖端附近架設位移計



圖 3.24 微型疲勞試驗機改裝圖

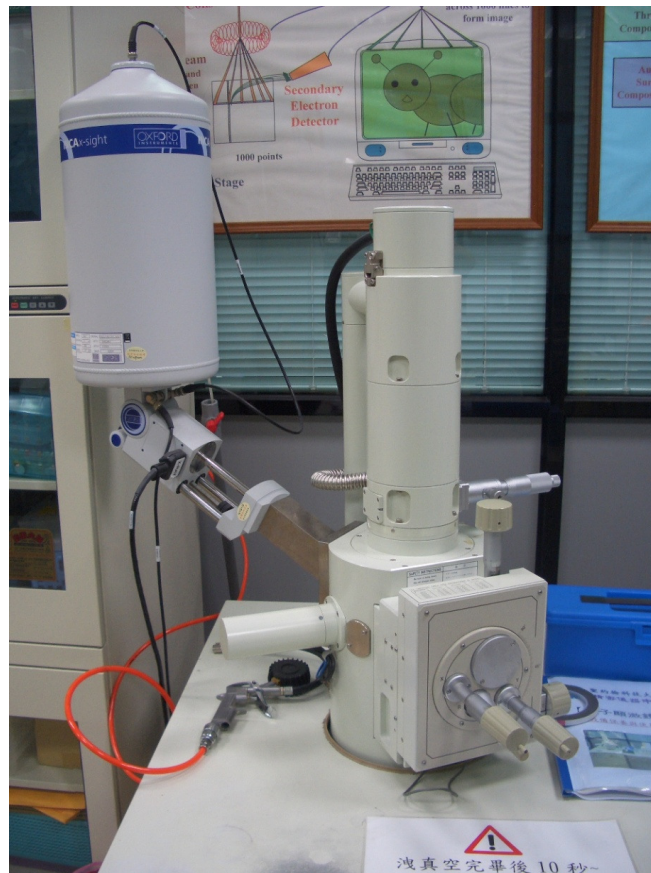


圖 3.25 掃瞄式電子顯微鏡



## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 靜態腐蝕實驗結果討論

在靜態腐蝕實驗的腐蝕環境參數包含未腐蝕數據共 37 組，每組有 5 片實驗數據，先將各組參數之實驗圖形與數據附於附錄 A 以及附錄 B。由附錄 A 中可發現，在中性環境的試片數據其再現性良好，而酸性環境下的離散性較大，尤其是在酸性常溫環境下尤其明顯。由第二章文獻回顧的部份可以得知，當試片表面出現蝕孔，會造成試片拉伸時發生應力集中，使試片更容易斷裂；而應力集中現象與試片的幾何形狀有關，因此可以推知試片厚度在腐蝕試片中對拉伸數據會有影響，當腐蝕情況越劇烈，其影響越大。後面將會把上述各組實驗數據的 5 組數據以內差法做平均，方法為取定單位間隔  $\Delta strain$ ，以內差法求得 5 組曲線在該  $\Delta strain$  所對應的應力值，取平均成一條平均曲線，並針對不同的環境參數探討各個參數對試片所造成的影響。在氯離子濃度、酸鹼度、溫度參數中，實驗數據將以腐蝕五個月後之曲線平均做比較，而時間參數則將相同環境條件，腐蝕一個月、三個月以及五個月疊合做討論。

#### 4.1.1 氯離子濃度影響

欲探討氯離子濃度參數對靜態腐蝕試驗的影響，茲將溫度與酸鹼度固定，以單一參數改變來觀察氯離子的影響性。首先將時間參數固定為 5 個月，且分別將參數固定為中性常溫、酸性常溫、中性低溫以及酸性低溫四組，並將未腐蝕之數據疊合至圖形，如圖 4.1 至圖 4.4。由圖中可以發現，在中性常溫、低溫以及酸性低溫環境下，試片平均曲線均非常重合，而在酸性常溫下的趨勢也非常接近，而上述也提及造成酸性環境離散度較大的關係與試片幾何形狀有關；事故報告中指出氯離子濃度為造成腐蝕的一大因素，但由實驗可以看出氯離子濃度的改變對靜態腐蝕拉伸曲線的影響並不明顯，其所影響到的可能僅是試片表面蝕孔的數目。

#### 4.1.2 酸鹼度影響

欲探討酸鹼度參數對拉伸試驗的影響，茲將溫度與氯離子濃度固定，以單一參數改變來觀察氯離子的影響性。首先將時間參數固定為 5 個月，且分別將參數固定為氯離子濃度 3.5%、常溫；氯離子濃度 10%、常溫；氯離子濃度 20%、低溫；氯離子濃度 3.5%、低溫；氯離子濃度 10%、低溫，以及氯離子濃度 20%、低溫等六組，如圖 4.5 至圖 4.10。圖中可以觀察到在常溫酸性環境下的拉伸曲線在極限強度及斷裂應變均明顯低於常溫中性環境；而在低溫的環境下，酸性與中性環境下的曲線差異不大，但酸性條件下的拉伸曲線均略低於中性環境。因此可以推論，酸性環境對拉伸強度以及斷裂應變的影響較中性環境明顯，且可由前述文獻回顧中証實，氯離子會增加氯離子活性，加速腐蝕發生。

#### 4.1.3 溫度影響

欲探討酸鹼度參數對拉伸試驗的影響，茲將氯離子濃度與酸鹼度固定，以單一參數改變來觀察氯離子的影響性。首先將時間參數固定為 5 個月，且分別將參數固定為氯離子濃度 3.5%、中性；氯離子濃度 10%、中性；氯離子濃度 20%、酸性；氯離子濃度 3.5%、酸性；氯離子濃度 10%、酸性，以及氯離子濃度 20%、酸性等六組，如圖 4.11 至圖 4.16。圖中可以觀察到在中性環境下，溫度對試片強度的影響極小，然而在酸性環境下，常溫的拉伸曲線明顯低於低溫環境。因此推論當溫度較高，腐蝕速度相對增快，尤其是在酸性環境下尤其明顯。

#### 4.1.4 時間影響

探討時間參數對拉伸試驗的影響則將前述 12 組參數組合列出，如圖 4.17 至圖 4.28。圖中可以觀察到在酸性常溫環境中極限強度隨著腐蝕時間增加而降低，斷裂應變亦有下降的趨勢。反觀在中性常溫以及低溫環境中，曲線均無明顯改變，因此可以推論出，在常溫以及酸性的環境下，試片腐蝕最為劇烈，且隨時間增長，



腐蝕會持續進行，導致材料機械性質降低。

#### 4.1.5 靜態腐蝕實驗結論

由上述各討論可以得知，氯離子濃度的改變對蒙皮拉伸試片的強度影響很小，而酸鹼度與溫度為交互影響的環境參數，當試片處於酸性常溫環境，其腐蝕速率明顯比其他環境參數還要快，且試片的拉伸曲線之強度以及斷裂應變皆有明顯降低，而隨著腐蝕時間的增加，酸性常溫環境下的試片之強度與斷裂應變亦隨之降低。

#### 4.1.6 靜態腐蝕拉伸試片破斷處表面觀察

靜態腐蝕拉伸實驗完成後，亦可由其試片破斷處表面巨觀觀察，探討其機械性質表現。由上述氯離子濃度參數對實驗影響的討論中，得出氯離子濃度改變對試片的機械性質影響不大，因此在試片表面破斷處觀察將固定氯離子濃度參數為20%。圖 4.29 (a)為未腐蝕的破斷處表面照片，拉伸方向為水平於圖面方向。由照片可以觀察出，在破斷處有頸縮(necking)的現象，且破斷面平整。在試片經過五個月的腐蝕時間後觀察，圖 4.29 (b)為常溫中性環境，可以看出試片表面出現了些微的腐蝕痕跡，但破斷面仍平整，此處可以映證在平均曲線的強度並無明顯改變。圖 4.29 (c)為常溫酸性環境，由試片表面很明顯可以看到腐蝕痕跡，出現了微裂痕以及蝕孔，且破斷面呈現不規則狀，由此處可以說明試片有應力集中的現象，導致表面出現微裂痕導致裂縫串連，並使斷裂應變降低；而常溫酸性環境的腐蝕最為劇烈，也與前述的結論吻合。圖 4.29 (d)為低溫中性環境，表面有些微腐蝕痕跡，但破斷處仍有頸縮現象產生，表示試片受力均勻，無局部應力集中。圖 4.29 (e)為低溫酸性環境，表面同樣有腐蝕痕跡，破斷面也呈現不規則狀，但因其表面蝕孔較少，因此試片強度下降幅度並不如常溫酸性環境來的劇烈。

圖 4.30 為酸性常溫的各時間參數腐蝕破斷處表面照片。由圖中可以發現，試

片表面的腐蝕痕跡隨時間增加而越加劇烈，裂紋分佈範圍亦增廣，且由飛安會調查報告中的蒙皮破斷處表面照片可以發現，其蒙皮之腐蝕與斷裂痕跡與實驗之腐蝕試片相似，因此可以證實中科院對此事故所做的結論正確，即飛機因腐蝕造成有效截面積不足而導致過載破壞。

## 4.2 應力腐蝕實驗結果討論

### 4.2.1 應力腐蝕拉伸結果討論

應力腐蝕試片目前完成八片數據，分別是 pH3、氯離子濃度 3.5%、室溫、80% $\sigma_y$ 、腐蝕時間一個月——一片；pH3、氯離子濃度 20%、室溫、80% $\sigma_y$ 、腐蝕時間一個月——兩片；pH3、氯離子濃度 20%、室溫、40% $\sigma_y$ 、腐蝕時間一個月——一片；pH7、氯離子濃度 20%、室溫、80% $\sigma_y$ 、腐蝕時間一個月——一片；pH7、氯離子濃度 20%、室溫、40% $\sigma_y$ 、腐蝕時間一個月——一片；pH3、氯離子濃度 20%、室溫、80% $\sigma_y$ 、腐蝕時間三個月——一片以及 pH7、氯離子濃度 20%、室溫、80% $\sigma_y$ 、腐蝕時間三個月——一片。將目前完成的試片與靜態腐蝕的試片平均數據結果做疊合，結果分別如圖 4.31 至圖 4.35 所示。圖中可以看出，當試片多加了張應力參數，成為應力腐蝕的狀態下，其所呈現的斷裂應變皆明顯比沒有施加張應力的情形下低了許多，其中特別值得注意的是酸性環境、氯離子濃度 20%、室溫、80%降伏強度、腐蝕三個月的實驗數據，因為該片試片的厚度特別大，約是其他試片的兩倍，因此由結果上來看雖然在強度上並沒有如靜態腐蝕般下降，因為試片整體應力集中效應較不顯著，所以強度降低幅度並不大，但其斷裂應變卻比相同環境的靜態腐蝕試片來的低了許多，而由於斷裂應變變短，導致其所能承受的極限應力也隨之稍微降低，因此推測在應力腐蝕實驗下，腐蝕的機制並不只是表面的孔蝕，而是加入了氫脆現象與陽極溶解等應力腐蝕機制，導致試片的斷裂應變較靜態腐蝕的結果更顯降低。

#### 4.2.2 應力腐蝕拉伸試片破斷處表面觀察

當應力腐蝕拉伸試片實驗完成後，可由應力腐蝕拉伸試片與靜態腐蝕拉伸試片之破斷處表面巨觀觀察並比較，探討其機械性質表現。圖 4.36 為應力腐蝕拉伸試片與靜態腐蝕拉伸試片之破斷處表面照，在此選定幾組參數做觀察比較，分別是 pH7、氯離子濃度 20%、腐蝕一個月；pH7、氯離子濃度 20%、腐蝕三個月以及 pH3、氯離子濃度 20%、腐蝕三個月。上述三組參數皆取未施加張應力的靜態腐蝕試片與施加 80% 降伏強度的應力腐蝕試片做比較，由圖 4.36 中可以看出，當試片施加了張應力後，試片表面的腐蝕痕跡皆有加劇的趨勢，且試片表面的裂紋數量都相對增加，推測是因為應力腐蝕機制如氫脆以及陽極溶解等，造成試片更趨向脆性破壞，由此可以映證應力腐蝕實驗斷裂應變下降的原因。

#### 4.3 CT 試片腐蝕疲勞實驗結果討論

標準試片腐蝕疲勞之裂縫生長速率與  $\Delta K$  的關係如圖 4.37 所示，而考慮裂縫封閉將圖形修正為裂縫生長速率與  $\Delta K_{eff}$  關係則如圖 4.38 所示。圖 4.39 為 CT 試片在各環境條件下的裂縫封閉情形；CT 試片的裂縫封閉情形為在低  $\Delta K$  區中，會有裂縫封閉現象，當裂縫持續生長， $\Delta K$  持續增加時，裂縫封閉情形則越不明顯，當裂縫生長至一定程度，因為 CT 試片的受力關係，裂縫將完全張開，不再有閉合效應；而試片在腐蝕環境中的裂縫封閉程度較空氣(未腐蝕)環境明顯。由圖 4.37 可以看出在不考慮裂縫封閉的情況下，試片在空氣環境的裂縫生長速率與在腐蝕環境下的生長速率差距並不大；當考慮裂縫封閉時，如圖 4.38，則可以看出在低  $\Delta K_{eff}$  區間內，在腐蝕環境下的試片其裂縫生長速率明顯高於空氣環境，然而到了高  $\Delta K_{eff}$  區內，不論在腐蝕環境或在空氣環境，裂縫生長速率都趨近於一致，甚至會出現交叉的情形。

文獻中指出，在空氣環境的裂縫封閉效應主要是由試片裂縫尖端的塑性區所造成的裂縫封閉，而在腐蝕環境中則可能因為腐蝕產物而造成更大的裂縫封閉效

應 [46]。因此當考量裂縫封閉效應後，在圖 4.38 中可以明顯看出在低  $\Delta K_{eff}$  區間內，腐蝕環境下的試片其裂縫生長速率明顯高於空氣環境；而在高  $\Delta K_{eff}$  區間內，因為裂縫生長快速，使得腐蝕作用的時間減少，腐蝕裂縫生長速率而主要是受到純機械疲勞機制主導，以致到了高  $\Delta K_{eff}$  區間內裂縫生長速率會趨近於一致，甚至有交叉的情形。

#### 4.3.1 CT 試片腐蝕疲勞氯離子濃度對裂縫生長速率影響

欲比較氯離子濃度對標準試片裂縫生長速率的影響，可以由圖 4.38 中，pH 值固定為 7，氯離子濃度分別為 3.5%與 20%的圖形做比較。由圖中可以發現，標準試片在氯離子濃度較高的腐蝕環境中，裂縫生長速率較快一些，但整體差異並不大。文獻中[47]指出，氯離子濃度會影響裂縫生長速率，氯離子濃度越高，試片的裂縫生長速率越快，但整體差異有限，此與實驗結果相符。

#### 4.3.2 CT 試片腐蝕疲勞酸鹼度對裂縫生長速率影響

欲比較酸鹼度對標準試片裂縫生長速率的影響，可以由圖 4.38 中氯離子濃度 20%，pH 值分別為 7 以及 3 的圖形做比較。一般認為降低酸鹼度會對構件的使用壽命造成影響，然而圖中可以看出在酸性環境中，試片的裂縫生長速率與中性環境下的裂縫生長速率差異不大。文獻中指出，造成酸性環境裂縫生長速率與中性環境差異不大的原因為裂縫尖端酸化[48]：當試片在腐蝕環境進行裂縫生長行為時，在腐蝕液中的裂縫尖端為一封閉的閉塞區，因為對流受到阻礙而形成「閉塞電池腐蝕」，此時不論裂縫尖端外圍腐蝕液之酸鹼度為何，在裂縫尖端均有酸化的情形，由此可推估，腐蝕液的酸鹼度並不會對裂縫生長速率造成太大的差異，因為裂縫尖端酸關係，使得兩者曲線差異不大，而一般認為酸性會造成構件的疲勞壽命降低，主要是反映在裂縫初始，即第一階段，因為酸性環境會促進氯離子活性，使試片表面孔蝕行為更加劇烈，因此在裂縫初始階段會加快反應，而到了

裂縫生長階段時，酸性環境對裂縫延伸並不會造成太大的影響。

#### 4.4 微型試片腐蝕疲勞實驗結果討論

微型試片腐蝕疲勞之裂縫生長速率與 $\Delta K$ 的關係如圖 4.40 所示，而考慮裂縫封閉將圖形修正為裂縫生長速率與 $\Delta K_{\text{eff}}$ 關係則如圖 4.41 所示。圖 4.42 為微型疲勞試片在各環境條件下的裂縫封閉情形。微型試片裂縫封閉在低 $\Delta K$ 區開始即有封閉現象，然而隨著裂縫生長，到了高 $\Delta K$ 區中，微型試片仍然有裂縫封閉現象。而觀察微型試片的裂縫生長速率對 $\Delta K$ 的圖形亦可發現，裂縫生長速率在中段有稍微變緩的情形，也就是圖形斜率變緩，而到了後期高 $\Delta K$ 後斜率才又有回復的趨勢。

上述兩個現象可以由試片負載降低，試片受力由高應力段降低為低應力段所產生的現象解釋。因為微形疲勞試驗機是使用位移控制模式，將控制電壓輸入壓電致動器產生位移，因此當裂縫持續生長至一定長度時，試片所剩餘之截面積不足，導致荷重元以及試片所感受到的負載會逐漸降低。文獻[49]中指出，當外加應力由高應力段降為低應力段，裂縫成長速率會降低，因為在初始高應力段中，試片裂縫尖端有殘留較大的塑性區，當外力變小時，殘留塑性區仍提供較大的裂縫封閉應力，即其裂縫尖端的殘留塑性區半徑仍是在高應力區段所擁有的半徑大小，使負載對試片的影響較大，導致有效驅動力降低，因此裂縫生長速率會短暫降低，直到裂縫延伸超過原有之高應力段裂縫所產生的塑性區，裂縫生長速率才會回升至低應力段理論的裂縫生長速率。由上述可以說明，由於試片感受到的負載下降，導致微型試片裂縫生長至後期時殘留壓應力會導致裂縫封閉現象，而較大的殘留塑性區則會造成微型試片在負載下降時生長速率變緩的原因。

在圖 4.40 中，可以看出微型試片在空氣環境中的裂縫生長速率略低於腐蝕環境，然而當考慮裂縫封閉，將圖形修正為圖 4.41 後，則可以更明顯的觀察出試片在腐蝕環境的裂縫生長速率在低 $\Delta K$ 區間高於空氣環境，而到了高 $\Delta K$ 區間，在

腐蝕環境的生長速率會趨近於空氣環境，此現象與上述說明相同，因為試片在低 $\Delta K$ 區間內生長速率較緩慢，裂縫受腐蝕影響時間較充足，因此生長速率會加速；然而當裂縫持續延伸，到了高 $\Delta K$ 區間內，裂縫生長速率加快，裂縫受到腐蝕影響較小，裂縫生長速率主要受到純機械效應主導，因此到了高 $\Delta K$ 區間內，腐蝕環境與空氣環境的試片裂縫生長速率會較為趨近，甚至有交叉的現象。而由圖形可以看出，當不考慮裂縫封閉時，圖 4.40 中段的趨緩現象經過裂縫封閉修正成圖 4.41 後，趨緩現象已不再明顯，因為考慮裂縫封閉後可以將環境因素完全消除，而更真實反應出裂縫生長速率。

#### 4.4.1 微型試片腐蝕疲勞氯離子濃度對裂縫生長速率影響

欲比較氯離子濃度對微型疲勞裂縫生長速率的影響，可以由圖 4.41 中 pH 值為 7，氯離子濃度分別為 3.5% 以及 20% 的圖形做比較。圖中可以看出，氯離子濃度 20% 的腐蝕環境中，裂縫生長速率高於氯離子濃度 3.5% 的腐蝕環境，而空氣環境的裂縫生長速率則最低，但其差異並不大。文獻中[47]指出，氯離子濃度會影響裂縫生長速率，但差異有限，此與實驗結果相符。

#### 4.4.2 微型試片腐蝕疲勞酸鹼度對裂縫生長速率影響

欲比較酸鹼度對微型疲勞裂縫生長速率的影響，可以由圖 4.41 中氯離子濃度 20%，pH 值分別為 7 以及 3 的圖形做比較。圖中可以看出在酸性環境中，試片的裂縫生長速率與中性環境下的裂縫生長速率差異不大。上述提及，當試片在腐蝕環境進行裂縫生長行為時，在腐蝕液中的裂縫尖端為一封閉的閉塞區，因為對流受到阻礙而形成「閉塞電池腐蝕」，此時不論裂縫尖端外圍腐蝕液之酸鹼度為何，在裂縫尖端均有酸化的情形[48]，由此可推估，腐蝕液的酸鹼度並不會對裂縫生長速率造成太大的差異，因為裂縫尖端酸關係，使得兩者曲線差異不大，而一般認為酸性會造成構件的疲勞壽命降低，主要是反應在裂縫初始，即裂縫生長第一階

段，因為酸性環境會促進氯離子活性，使孔蝕行為更加劇烈，因此在裂縫初始階段會加快反應，而到了裂縫生長階段時，酸性環境對裂縫延伸並不會造成太大的影響。

## 4.5 腐蝕試片 SEM 斷面觀察結果

當實驗結束後，將各腐蝕條件的試片以掃描式電子顯微鏡 SEM (Scanning Electron Microscope) 進行斷面觀察。未腐蝕拉伸試片斷面如圖 4.43，靜態腐蝕 pH7、氯離子濃度 20%，腐蝕時間一個月之拉伸試片如圖 4.44。由圖 4.43 與圖 4.44 可以發現，靜態腐蝕拉伸試片與未腐蝕試片的斷面照之破壞形式皆相同，都屬於延性破壞特徵，由斷面皆可以觀察到大小不一的延性凹渦(dimple)，且試片斷面都沒有觀察到有腐蝕的痕跡；由文獻回顧，靜態腐蝕是屬於金屬表面的孔蝕行為，因此腐蝕僅會在試片表面產生蝕孔，進而產生局部應力集中使試片發生斷裂，因此在靜態腐蝕 pH7、氯離子濃度 20%，腐蝕時間為一個月的試片破斷面仍然是屬於延性破壞。

圖 4.45 為應力腐蝕的拉伸試片斷面照，腐蝕環境同樣為 pH7、氯離子濃度 20%，腐蝕時間為一個月。由圖中可以發現到其破斷面佈滿了延性凹渦，因為應力腐蝕試片為拉伸破壞，所以整個破斷面會符合延性的破壞特徵，但並沒有找到特別明顯的腐蝕痕跡，估計是腐蝕時間短，並沒有找到類似劈裂狀的脆性破斷痕跡。

圖 4.46 為腐蝕疲勞實驗空氣環境之 CT 試片斷面照，而圖 4.47 則為腐蝕疲勞實驗 pH7、氯離子濃度 20% CT 試片斷面照。在未腐蝕 CT 試片斷面照中，可以觀察到很明顯的疲勞紋(fatigue striation)，或稱作海灘紋的輻射狀紋路，起始點在圖面下方，也就是裂縫起始位置，當疲勞裂縫進行生長，裂縫生長方向由圖面下方往上延伸，試片會發生晶界滑移而產生疲勞紋，由裂縫尖端開始生長並向裂縫延伸方向擴散，每一條疲勞紋即是一次循環負載週期，且在圖 4.46 也可以觀察到凹渦，可以解釋裂縫在生長階段會在局部發生材料延性破壞。在圖 4.47 的 pH7、氯

離子濃度 20%腐蝕環境斷面照中，仍然可以清楚的觀察到疲勞條紋，但與空氣環境試片不同的是，在腐蝕環境中的試片其疲勞條紋上可以觀察到有許多小圓點狀的腐蝕痕跡，且整體的試片斷面並沒有觀察到明顯的凹渦，而是有許多樹枝狀的龜裂痕跡，呈現脆性破壞特徵，此與空氣環境試片的延性破壞有根本上的差異，因此可以解釋為何 CT 試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率高於空氣環境。

圖 4.48 為腐蝕疲勞實驗空氣環境之微型試片斷面照，而圖 4.49 則為腐蝕疲勞實驗 pH7、氯離子濃度 20%微型試片斷面照。由圖 4.48 中，同樣可以觀察在空氣環境的微型試片斷面上有清楚的疲勞紋以及凹渦的破壞特徵，說明此為延性破壞機制。然而圖 4.49 中可以觀察到微型試片在腐蝕環境仍有疲勞紋，但疲勞紋上有許多小圓點的腐蝕痕跡，且試片上面亦可以觀察到龜裂的脆性破壞特徵，此與微型試片在未腐蝕環境中的破壞特徵相異，由此可以說明為何微型試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率高於空氣環境。

## 4.6 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞實驗結果比較

欲比較標準 CT 試片與微型試片疲勞的差異，首先分別將所求得的數據裂縫生長速率對  $\Delta K$  的圖形以及考慮裂縫封閉的修正數據裂縫生長速率對  $\Delta K_{eff}$  的圖形做疊合，而後做比較。CT 試片與微型試片之  $da/dN$ - $\Delta K$  圖形如圖 4.50，由圖中可以發現，CT 試片的裂縫生長速率略高於微型試片，且 CT 試片的斜率趨近於一定值，但微型試片的圖形中間卻有一段斜率較緩的情況；而在高  $\Delta K$  區間中，CT 試片腐蝕疲勞的數據會趨近於一致，但微型試片到了高  $\Delta K$  區後，會出現試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率略高於空氣環境的情形。

在  $da/dN$ - $\Delta K$  的圖形中，CT 試片的裂縫生長速率略高於微型試片的原因可能與塑性區對試片影響範圍有關。由破壞力學，當試片處於平面應變狀態，在裂縫尖端的塑性區半徑公式如 (4.1) 式：



$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4.1)$$

由上式可以看出，不論試片的幾何形狀與受力關係，當試片裂縫尖端具有相同的應力強度因子 K，在裂縫尖端將具有塑性區半徑。考慮標準 CT 試片與微型試片在相同的  $\Delta K$ ，其裂縫尖端的塑性區半徑皆相同，但此塑性區半徑對微型試片的影響相對較巨大，因為標準 CT 試片的裂縫延伸長度有 40mm，但微型試片僅不到 6mm，因此在不考慮裂縫封閉的情況下，微型試片的裂縫生長速率會較標準 CT 試片來的緩。

在微型試片的圖形中間有一段斜率較緩方面，上述曾提及，標準試片 CT 試片疲勞所使用的控制模式是力量控制模式，但微型試片疲勞乃是使用位移控制模式，因此在 CT 試片中，試片感受到的負載皆是等振幅循環負載，負載的力量值並沒有降低；然而在微型試片疲勞卻會出現當疲勞裂縫生長至一定長度後，因試片截面積不足導致負載降低的情形。此負載降低前在初始高應力段中，試片裂縫尖端有殘留較大的塑性區，而當外力變小時，殘留塑性區仍提供較大的裂縫封閉應力，因此有效驅動力降低，裂縫因而有封閉情形導致裂縫生長速率較低，而標準試片沒有負載降低的情形，因此相對的到了裂縫延伸後期裂縫可以完全開啟，不會產生封閉現象，因此裂縫生長速率較快。

在高  $\Delta K$  區中，CT 試片腐蝕疲勞的數據會趨近於一致，而微型試片到了高  $\Delta K$  區後，會出現試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率略高於未腐蝕環境，造成此些微差異的原因可能為 CT 試片與微型試片受力方式不同所致。在文獻回顧中有提及腐蝕疲勞的破壞機制為陽極溶解與氫脆化，其中氫脆化係指構件在含氫介質中長期使用時，材料由於吸氫或氫滲而造成的機械性能退化，當構件表面或裂縫尖端與腐蝕液接觸，腐蝕液中的氫離子會吸附在金屬表面，當構件因受力使金屬裂縫產生塑性變形，氫離子即會藉由擴散或者差排移動滲入金屬內部。進入金屬內部的氫離子會降低金屬的鍵結，或使裂縫尖端區域的塑性變形區脆化，降低材料韌性，

使構件更容易發生斷裂。而在 CT 試片腐蝕疲勞中，CT 試片的受力方式是在裂縫開口處施加一張開應力的單點受力，因此在試片裂縫尖端延伸處後方並不會感受到相對應的張應力，因此推測當裂縫尚未延伸到後方時，裂縫尖端延伸處後方並不會發生氫脆現象；反之，微型試片的受力方式為均佈張應力，因此在試片後方延伸處亦會感受到張應力，因此在裂縫尚未延伸到試片末端前，其已然先行發生氫脆化，因此微型試片在腐蝕環境中到了裂縫生長末期的生長速率會比未腐蝕的微型試片高。

當 CT 試片與微型疲勞試片考慮裂縫封閉，將圖形修正疊合為圖 4.51，則可以很明顯看出，兩種試片的裂縫生長速率圖形再現性良好，圖形斜率也趨近於一致，因為考慮裂縫封閉情形可以將試片的厚度、受力關係與塑性區半徑等幾何環境因素消除，因此裂縫生長速率會趨近於一致。而將不同環境因素分開考慮，則有空氣環境，中性、氯離子濃度 20%，酸性、氯離子濃度 20%，中性、氯離子濃度 3.5% 四種情形，其分別將標準試片與微型試片疊合比較，如圖 4.52 至圖 4.55，可以觀察到各環境的裂縫生長速率圖形疊合情況亦非常吻合，裂縫生長速率皆趨近於一致。

至於腐蝕環境對於裂縫生長速率影響方面，由上述討論皆可得出結論，即不論是標準 CT 試片腐蝕疲勞亦或是微型試片腐蝕疲勞，其所得到的數據結果皆是氯離子濃度對裂縫生長速率有影響，氯離子濃度 20% 的試片裂縫生長較 3.5% 的試片快，而未腐蝕的試片生長速率則最慢，但差異並沒有很大；至於酸鹼度環境因素的影響，在標準試片與微型試片中的結果皆為影響不大，此原因為當疲勞裂縫在腐蝕液環境中生長，在腐蝕液中的裂縫尖端為一封閉的閉塞區，因為對流受到阻礙而形成「閉塞電池腐蝕」，此時不論裂縫尖端外圍腐蝕液之酸鹼度為何，在裂縫尖端均有酸化的情形，因此酸鹼度對於裂縫生長的影響不大。

在 SEM 試片斷面觀察的結果，試片在標準試片與微型試片在空氣環境中，皆可觀察到明顯的疲勞條紋，且條紋周圍存在著相同的凹窩之延性破壞特徵；而在

中性、氯離子濃度 20%的腐蝕環境下，標準試片與微型試片亦皆能觀察到疲勞條紋，但在條紋上皆有許多小圓點的腐蝕跡，且條紋周圍均可看到龜裂痕跡的脆性破壞特徵，因此在 SEM 試片斷面觀察中，標準試片與微型試片所表現出來的破壞特徵俱相同。

綜合以上討論結果，可以發現微型試片通過考慮裂縫封閉的修正圖形後，裂縫生長速率之線性度良好，圖形的斜率也與標準 CT 試片一致，且在腐蝕的表現上以及試片斷面 SEM 照片觀察之結果均與標準試片的結果相同，但在測試材料的準備上可以大大的節省待測材料的數量，即一片標準試片的材料可以製作近百片的微型試片，且因為微型試驗機使用壓電致動器，因此在預裂階段可以施加更高頻的負載頻率，在實驗時間上亦可節省許多，因此微型試片在疲勞測試上有一定程度的實用價值。



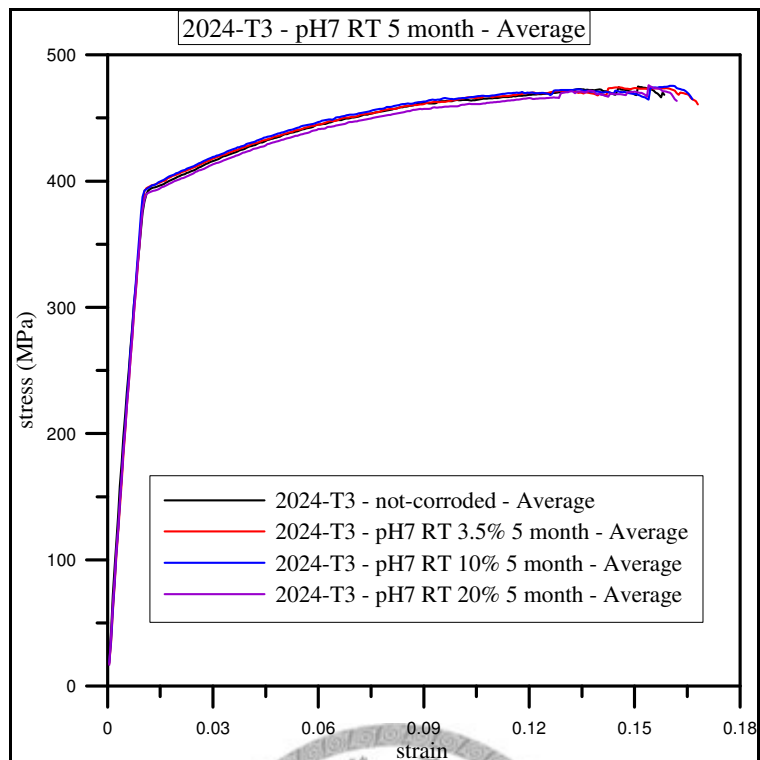


圖 4.1 pH7 RT 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

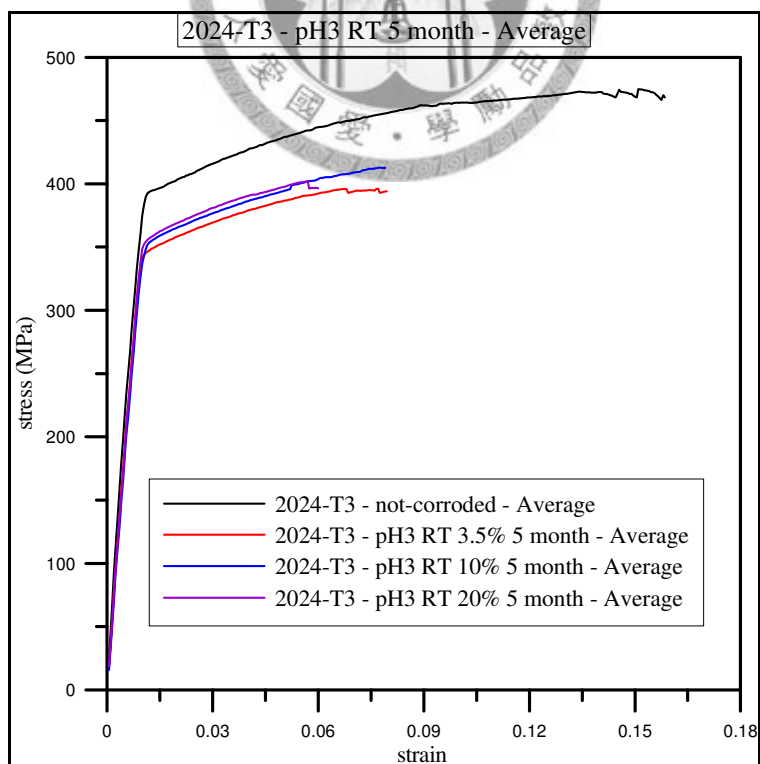


圖 4.2 pH3 RT 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

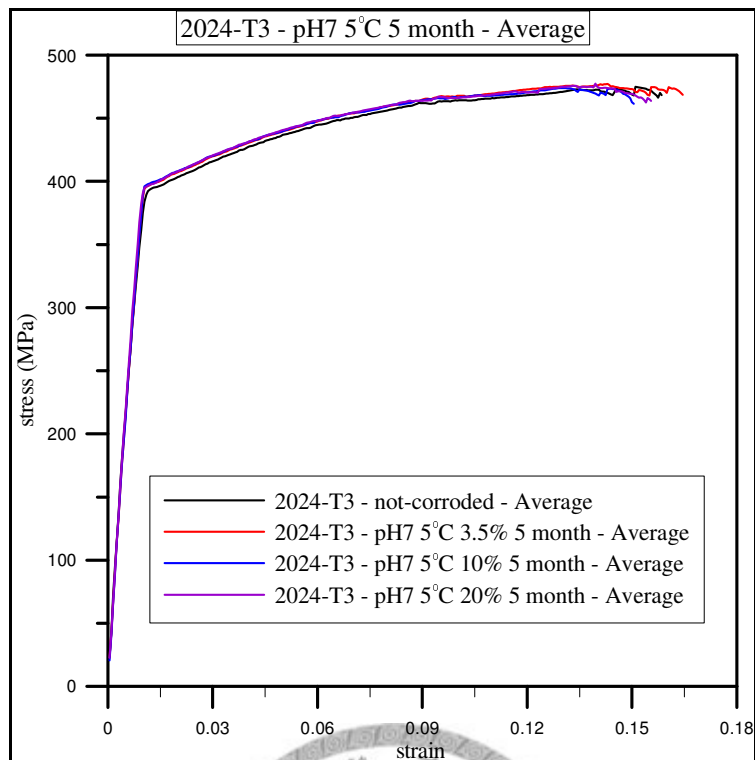


圖 4.3 pH7 5°C 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

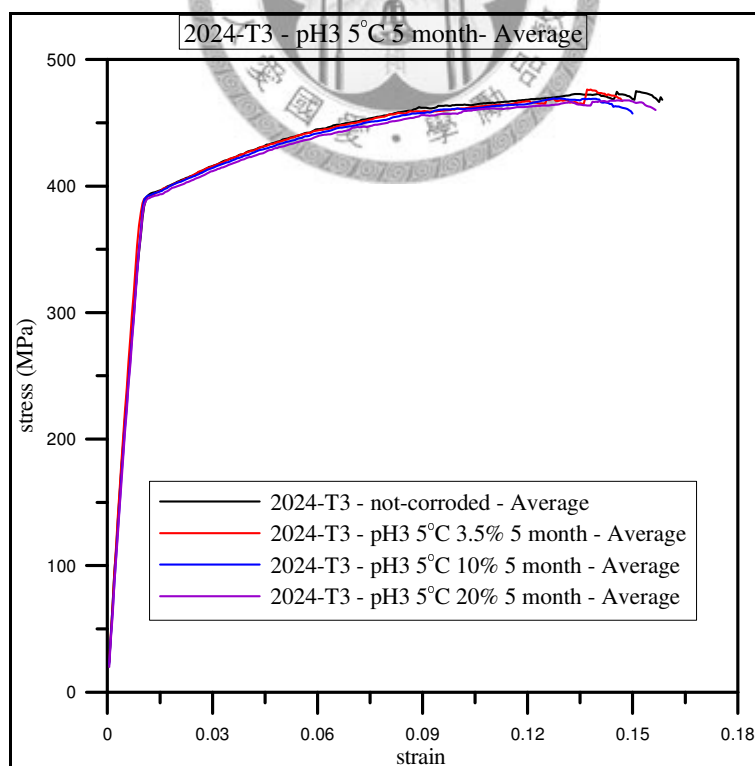


圖 4.4 pH3 5°C 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

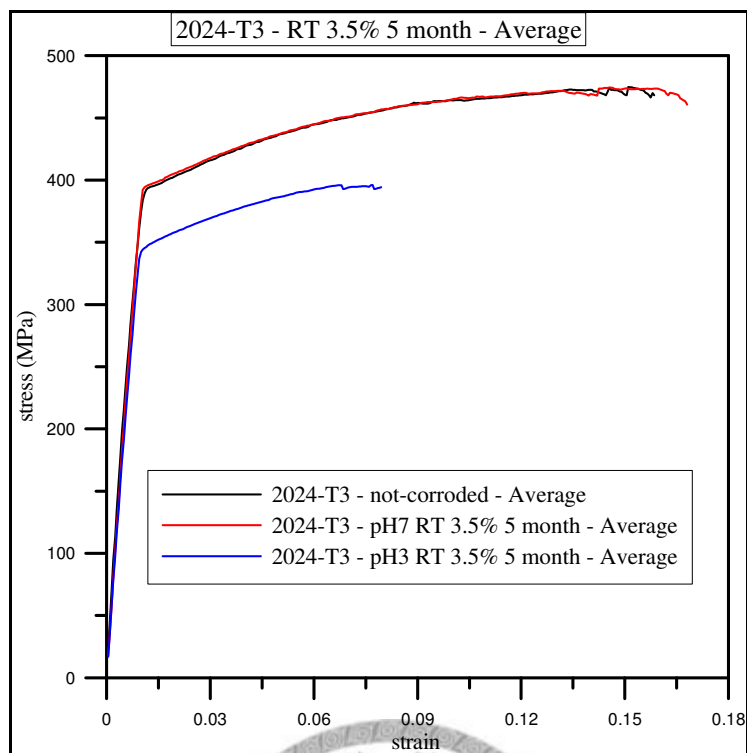


圖 4.5 RT 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

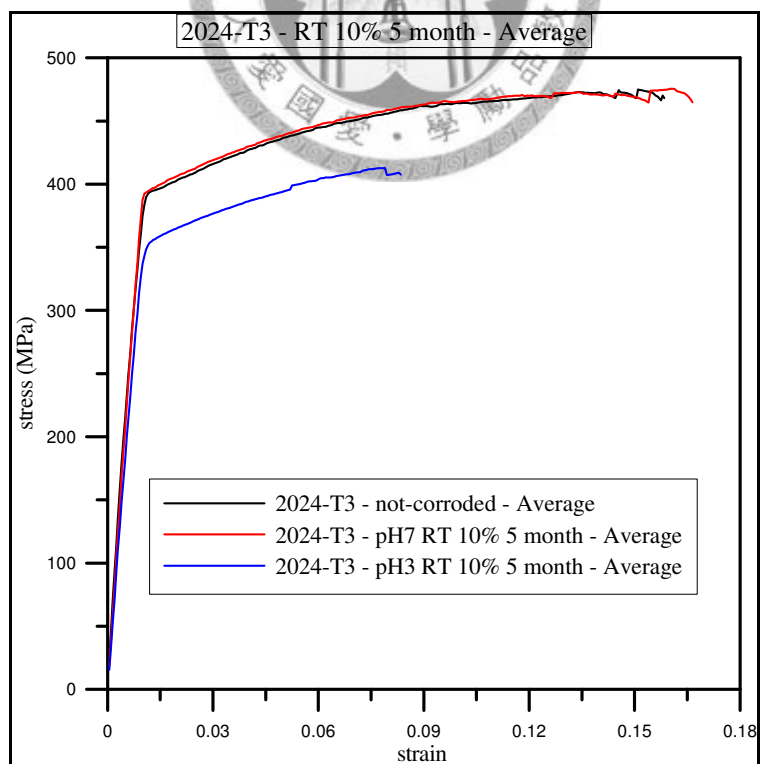


圖 4.6 RT 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

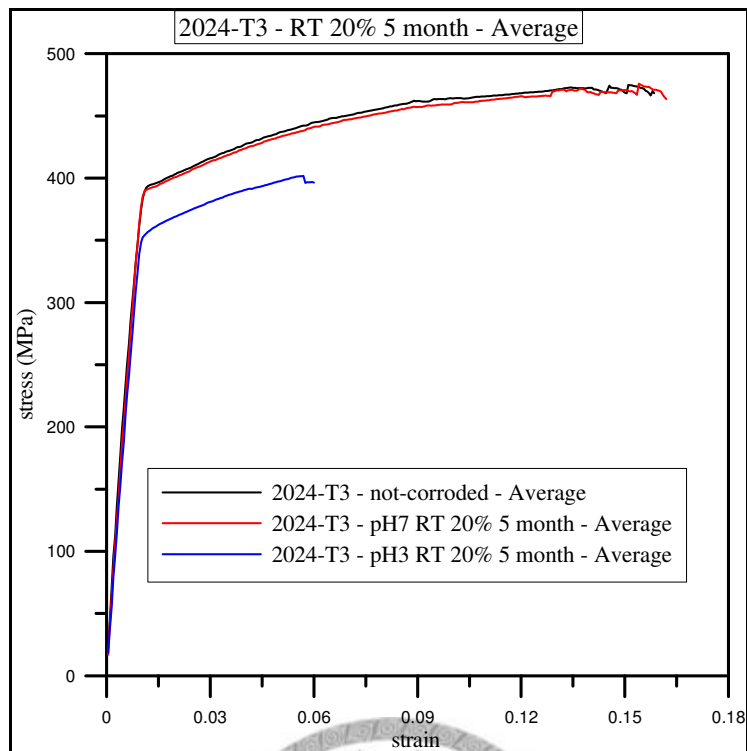


圖 4.7 RT 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

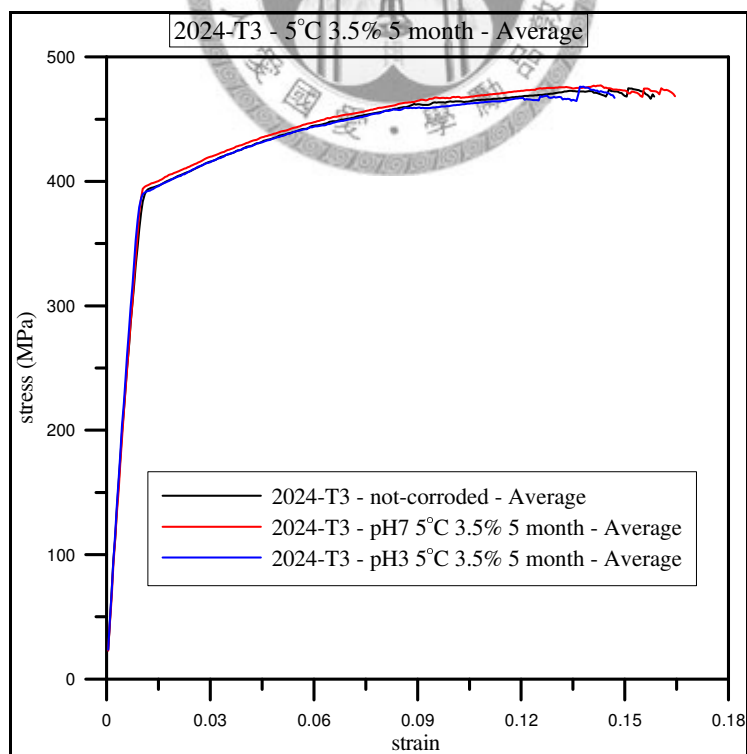


圖 4.8 5°C 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

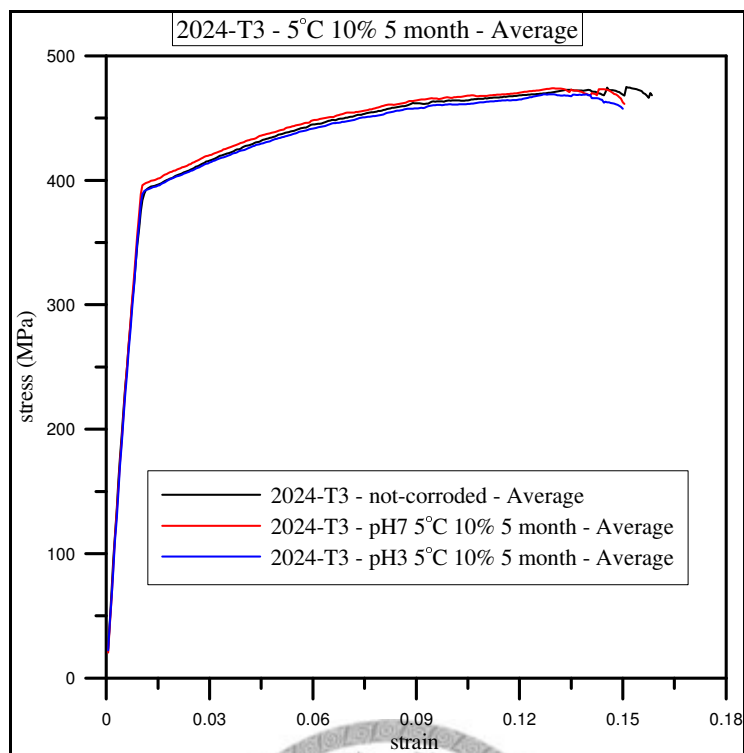


圖 4.9 5°C 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

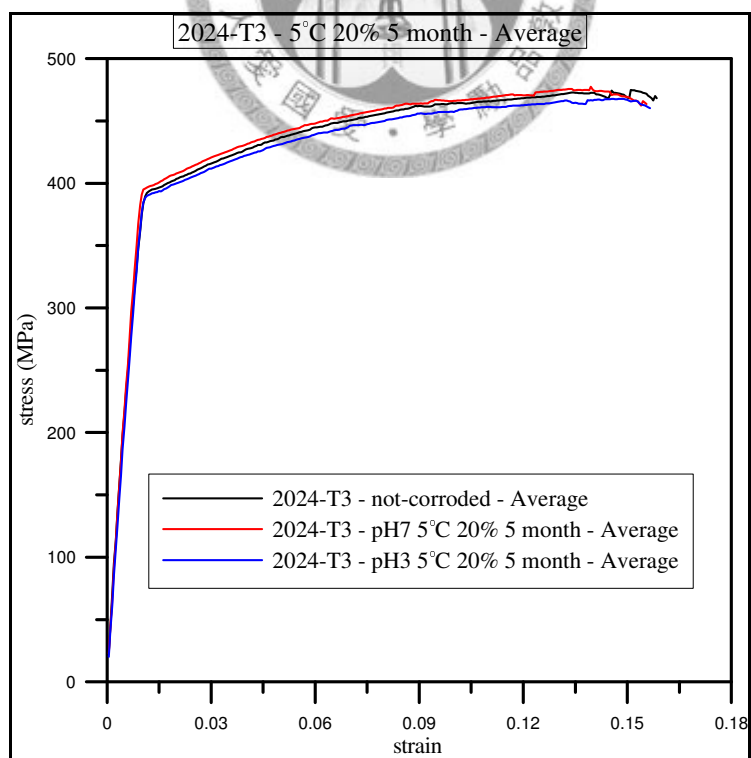


圖 4.10 5°C 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線



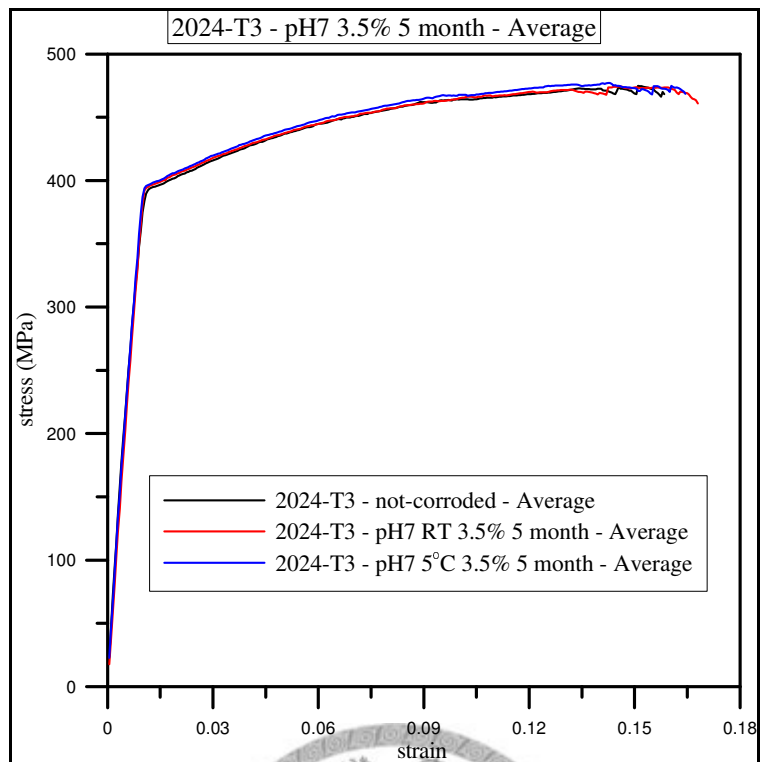


圖 4.11 pH7 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

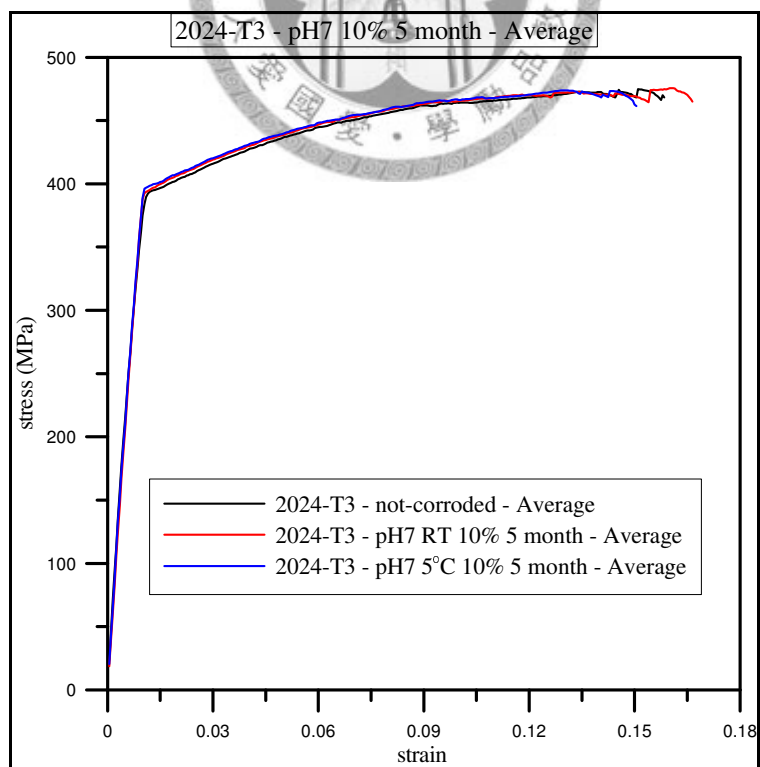


圖 4.12 pH7 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

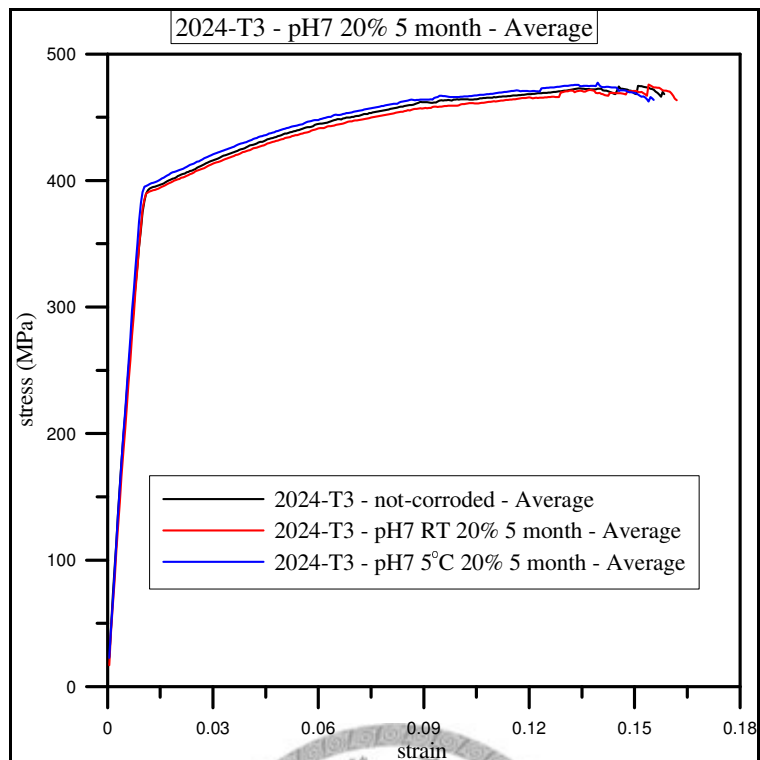


圖 4.13 pH7 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

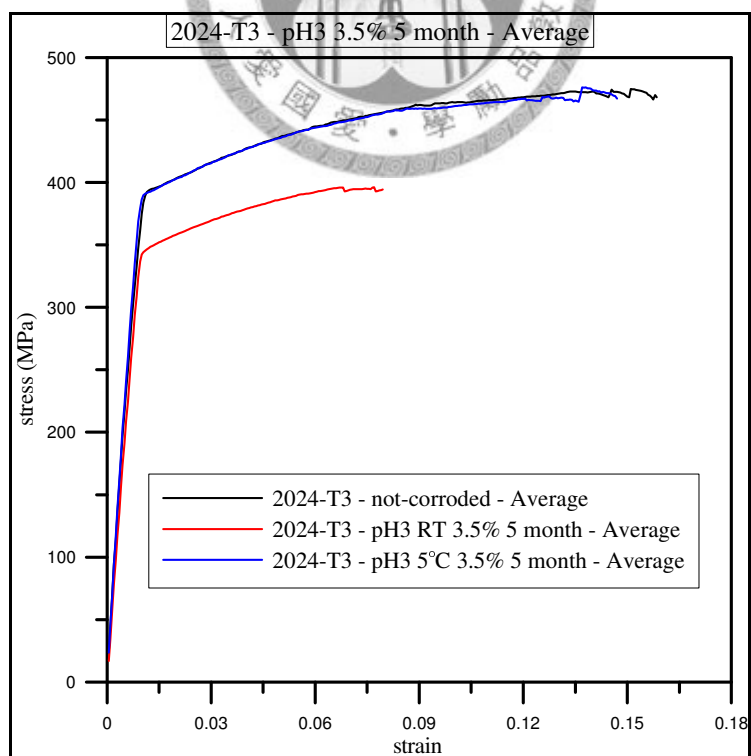


圖 4.14 pH3 3.5% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

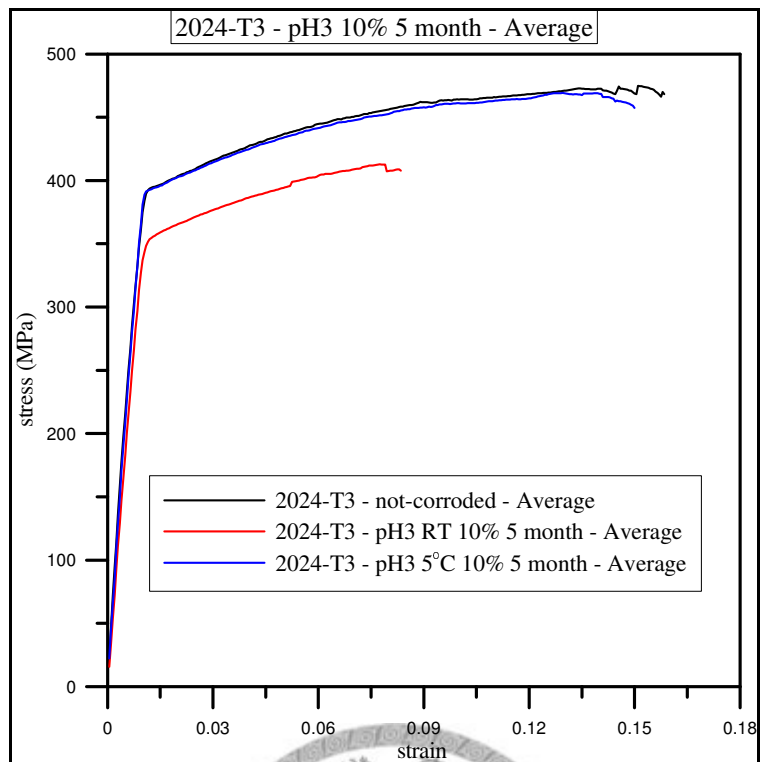


圖 4.15 pH3 10% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

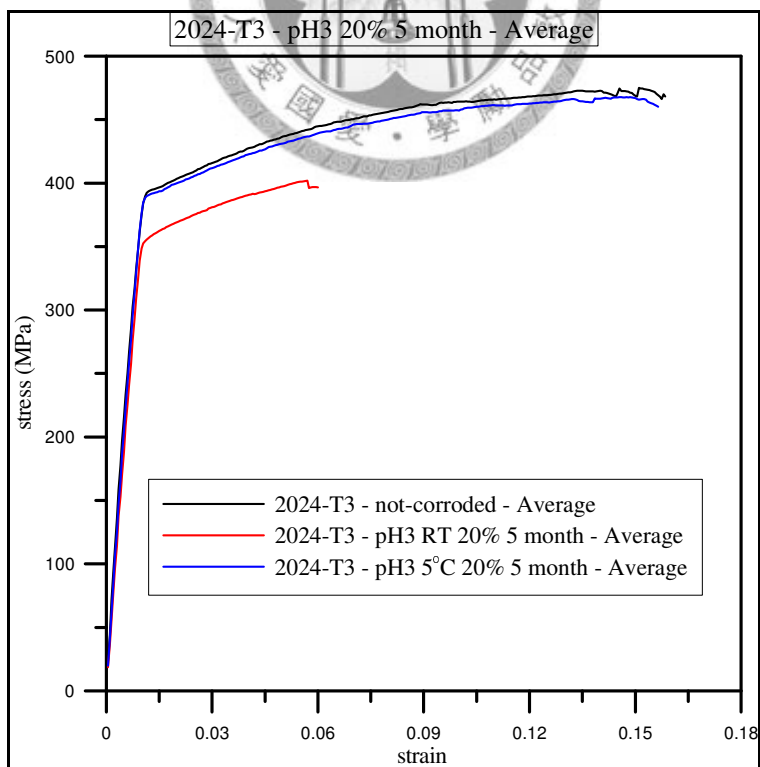


圖 4.16 pH3 20% 靜態腐蝕五個月實驗平均曲線

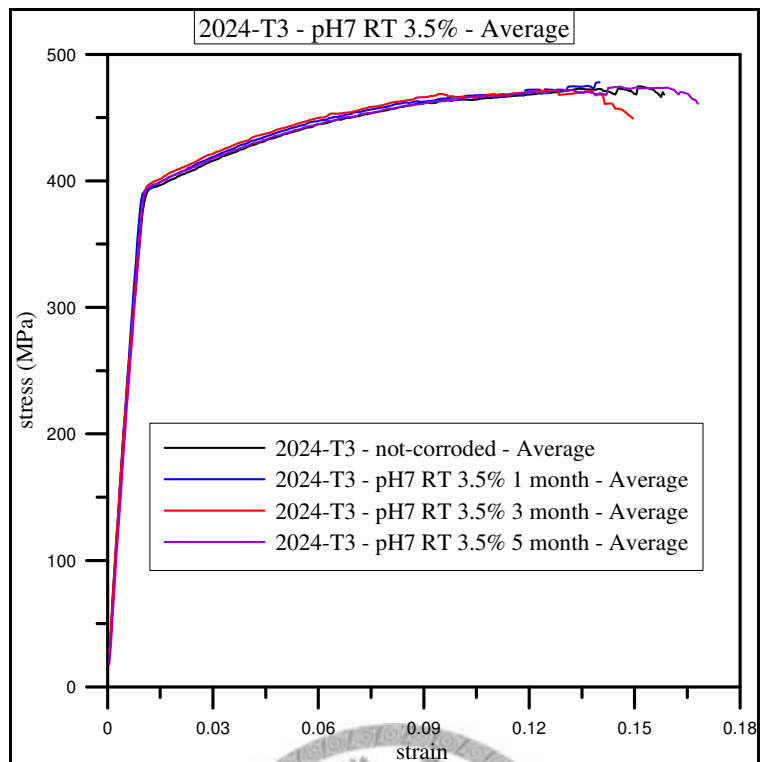


圖 4.17 pH7 RT 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線

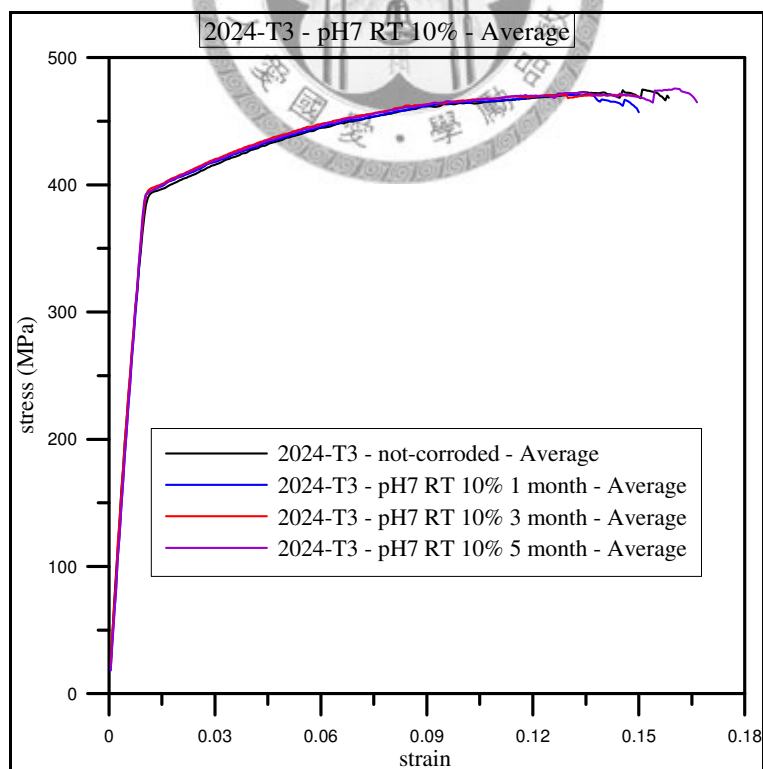


圖 4.18 pH7 RT 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線

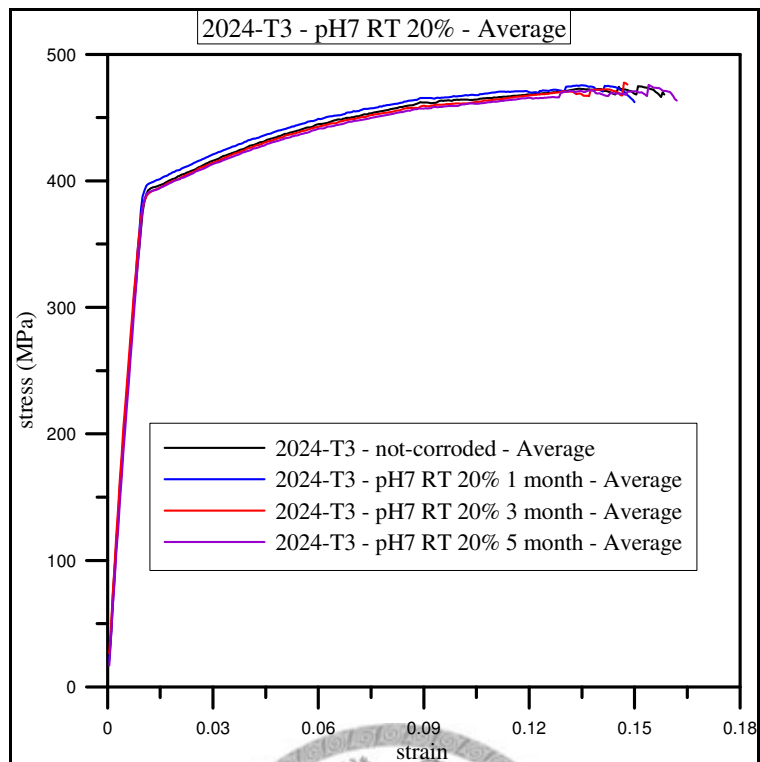


圖 4.19 pH7 RT 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線

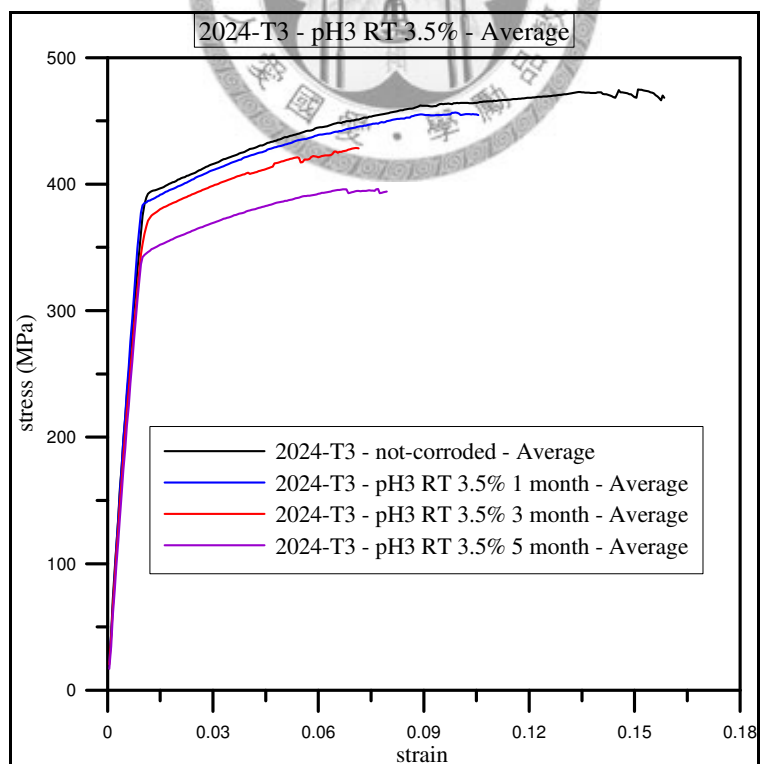


圖 4.20 pH3 RT 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線

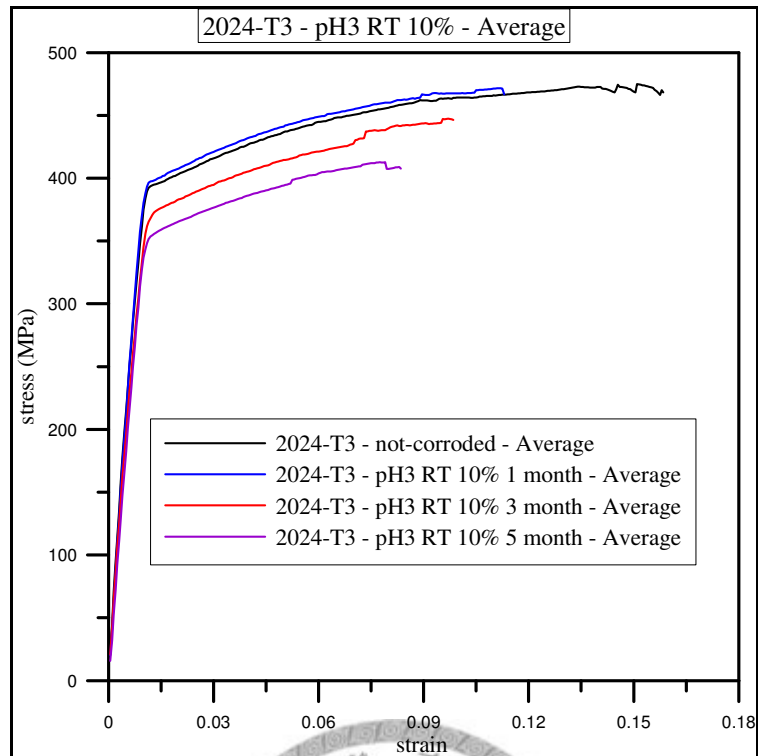


圖 4.21 pH3 RT 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線

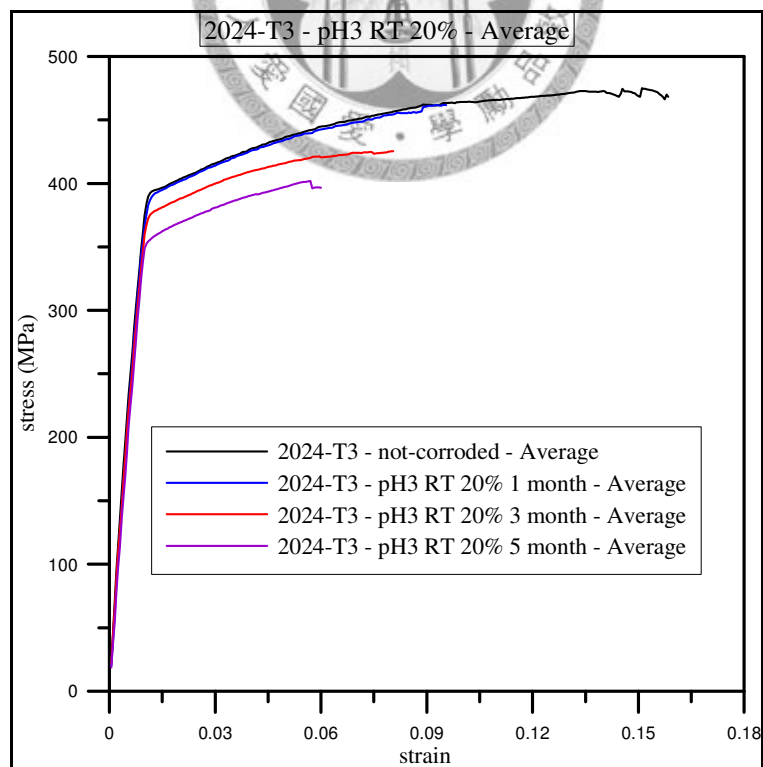


圖 4.22 pH3 RT 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線

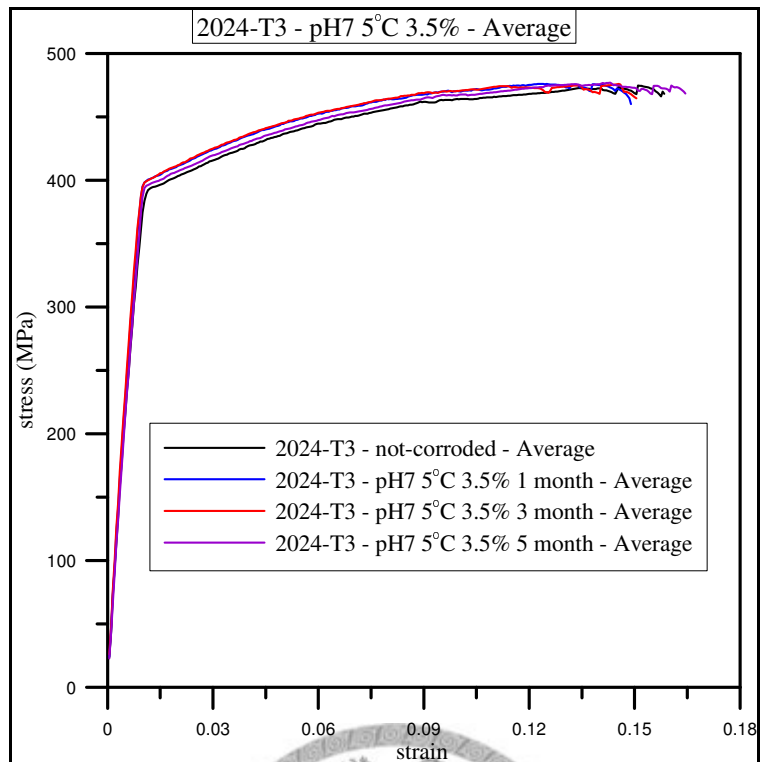


圖 4.23 pH7 5°C 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線

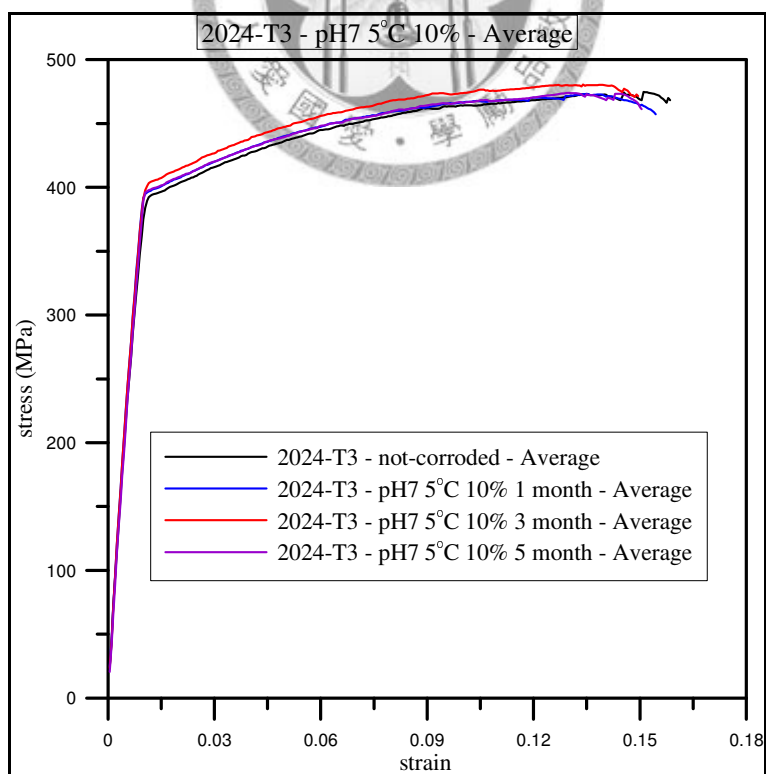


圖 4.24 pH7 5°C 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線

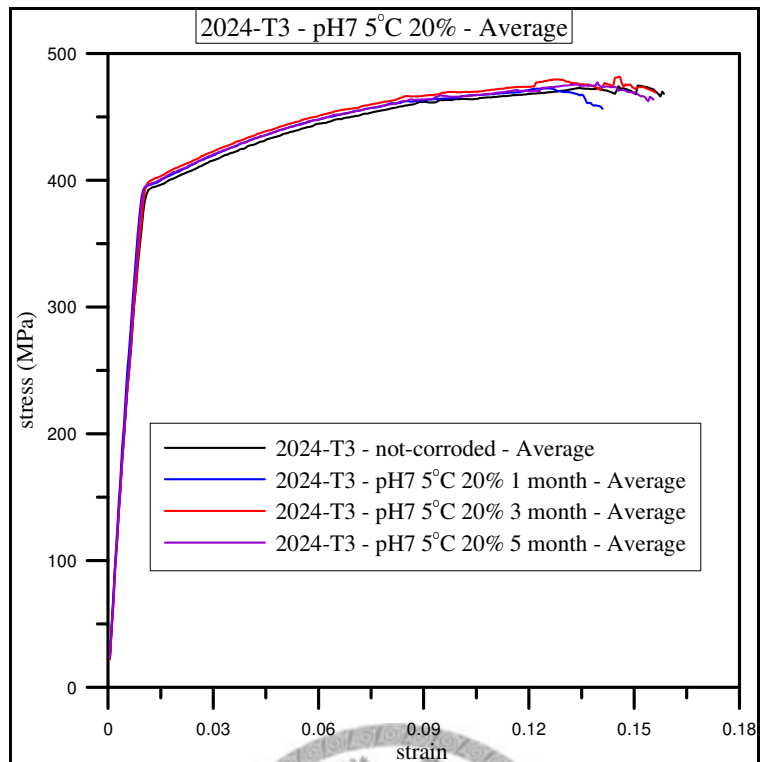


圖 4.25 pH7 5°C 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線

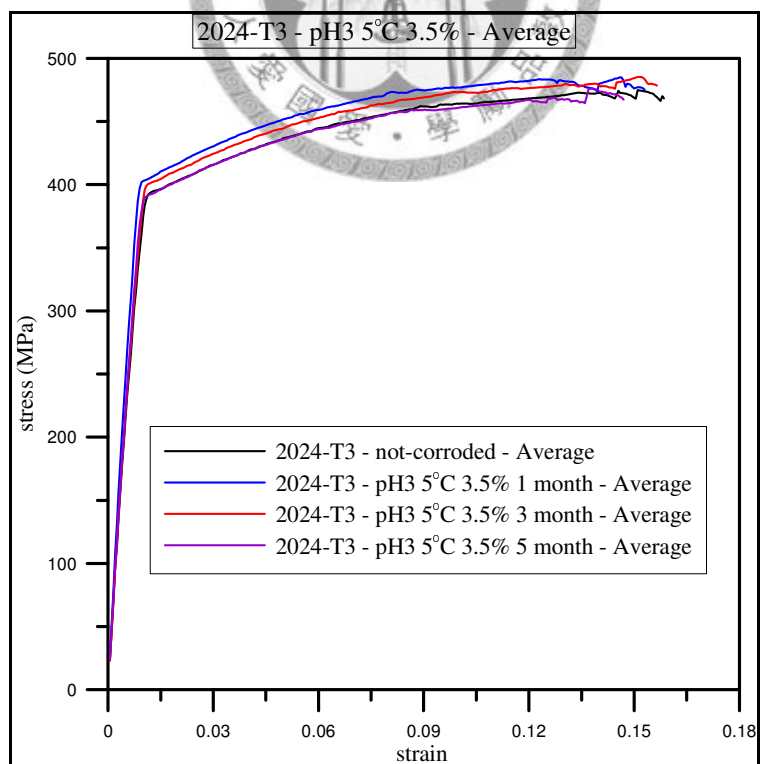


圖 4.26 pH3 5°C 3.5% 靜態腐蝕實驗平均曲線



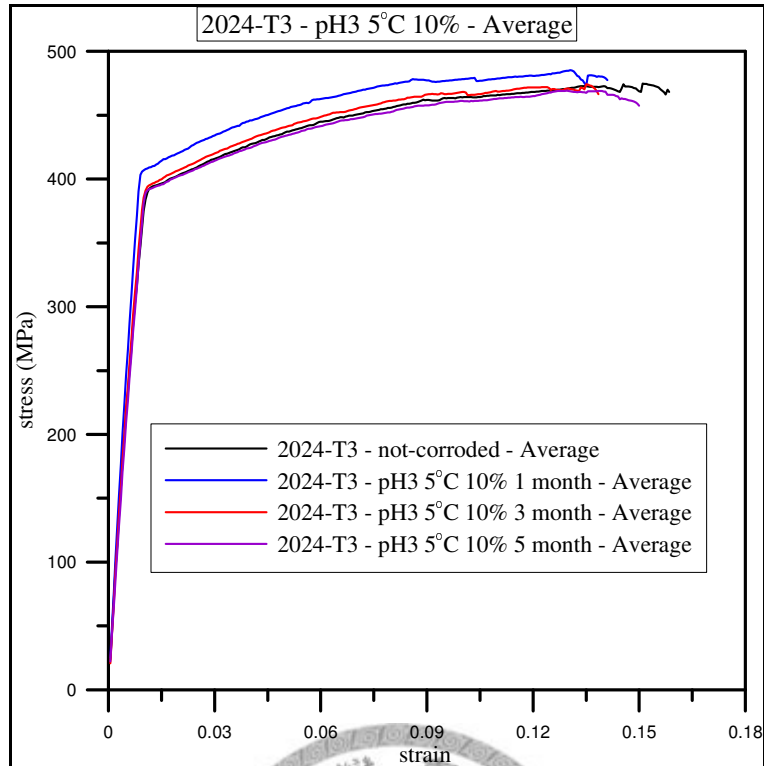


圖 4.27 pH3 5°C 10% 靜態腐蝕實驗平均曲線

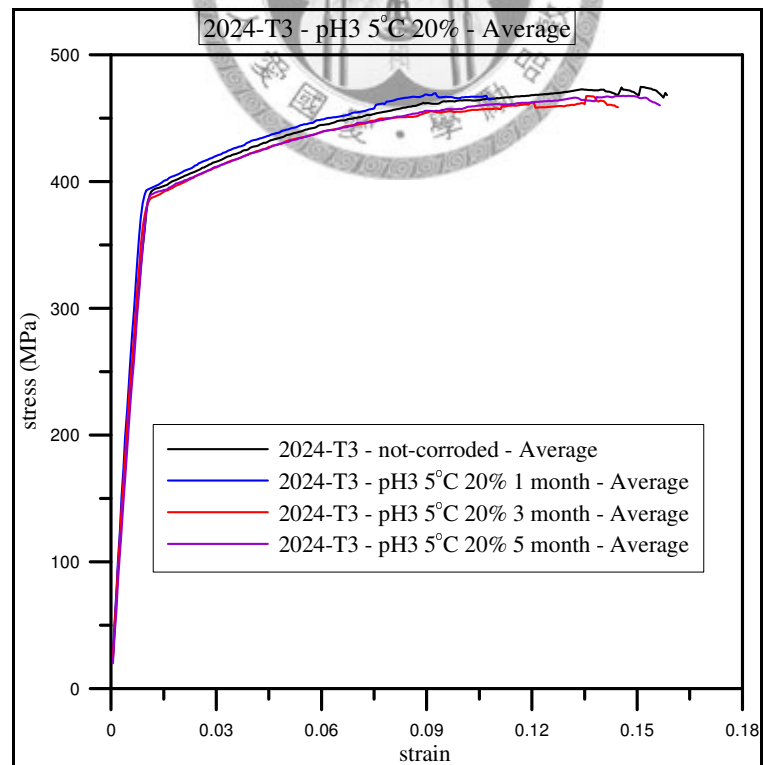
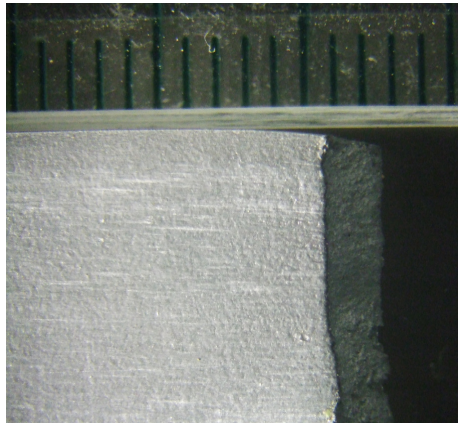
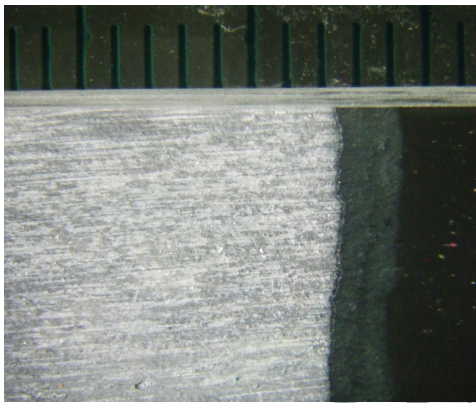


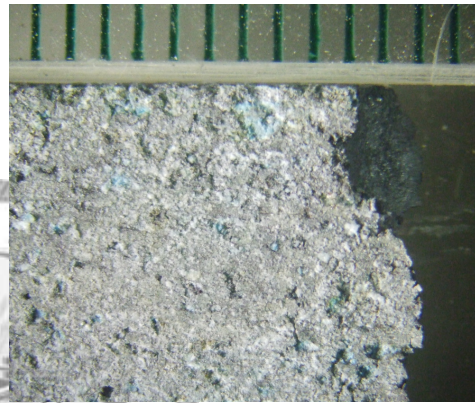
圖 4.28 pH3 5°C 20% 靜態腐蝕實驗平均曲線



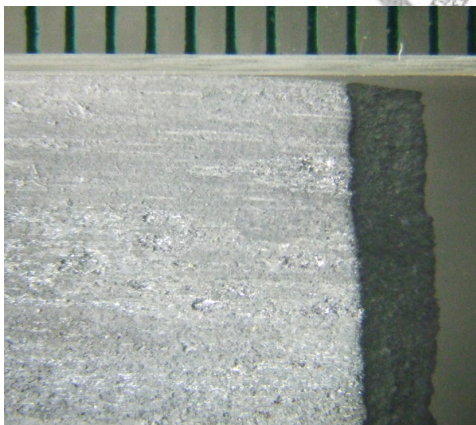
(a)



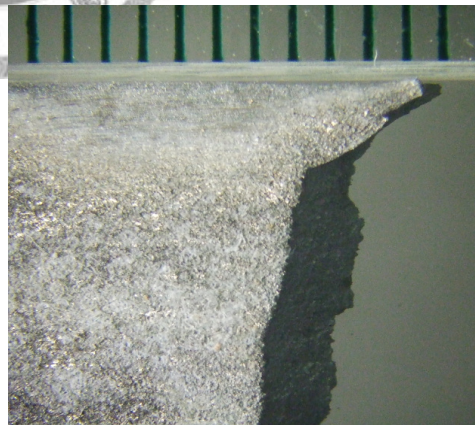
(b)



(c)



(d)

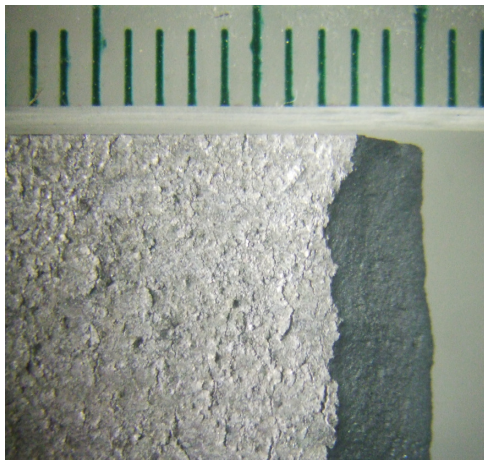


(e)

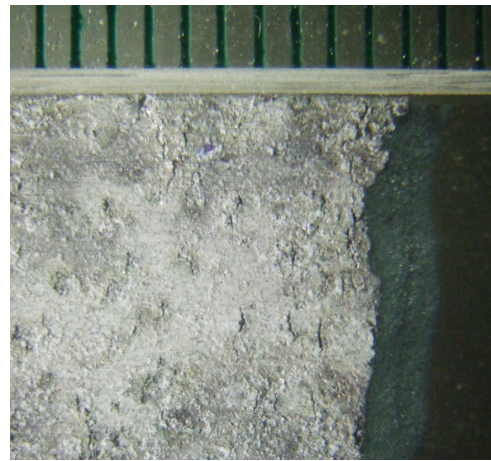
圖 4.29 靜態腐蝕試片破斷處表面

(a)未腐蝕 (b) pH7 RT 20% 五個月 (c) pH3 RT 20% 五個月

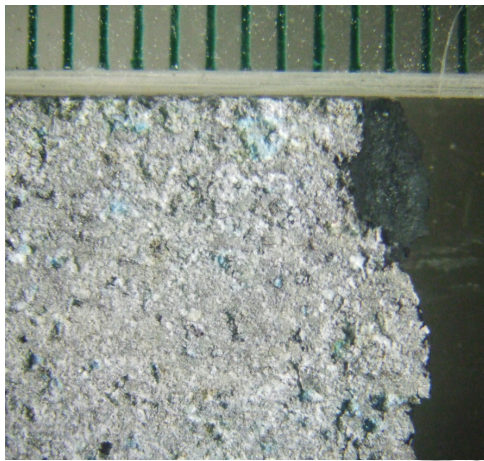
(d) pH7 5°C 20% 五個月 (e) pH3 5°C 20% 五個月



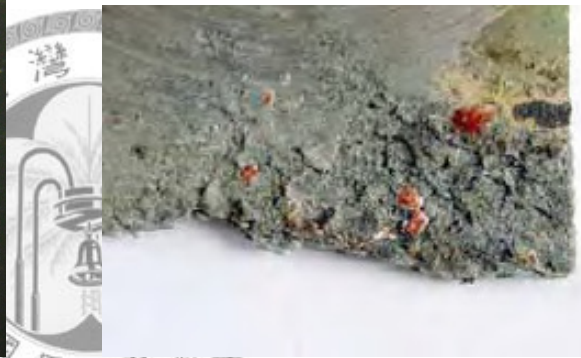
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4.30 靜態腐蝕試片破斷處表面

(a) pH3 RT 20% 一個月 (b) pH3 RT 20% 三個月

(c) pH3 RT 20% 五個月 (d) 蒙皮裂紋事故破損處[1]

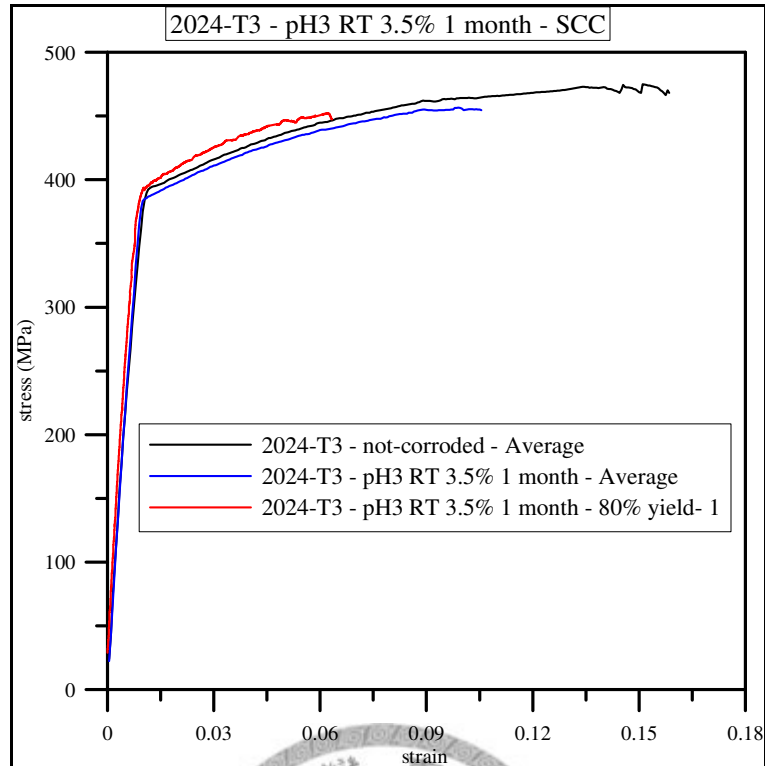


圖 4.31 pH3、3.5%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據

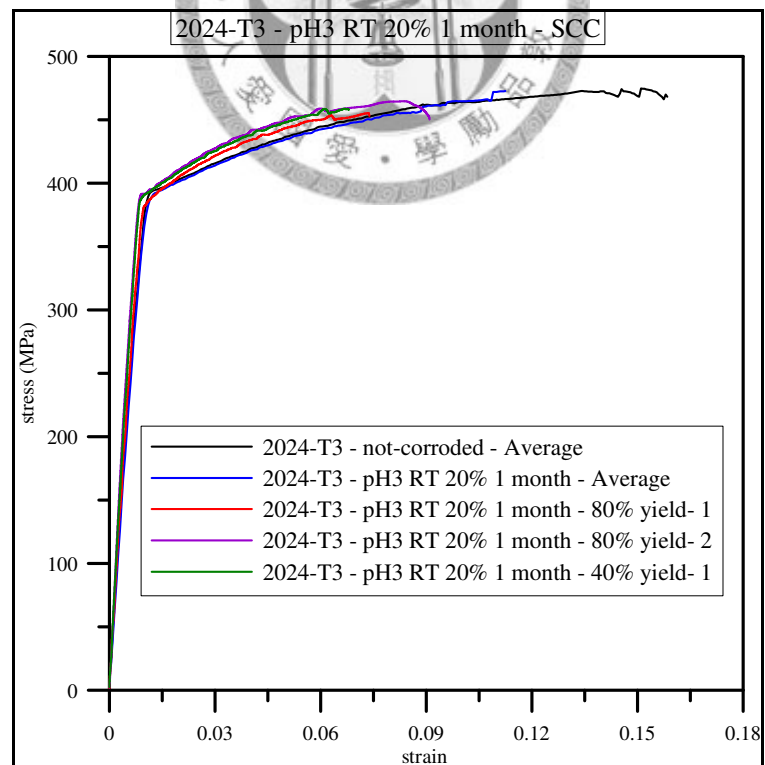


圖 4.32 pH3、20%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據



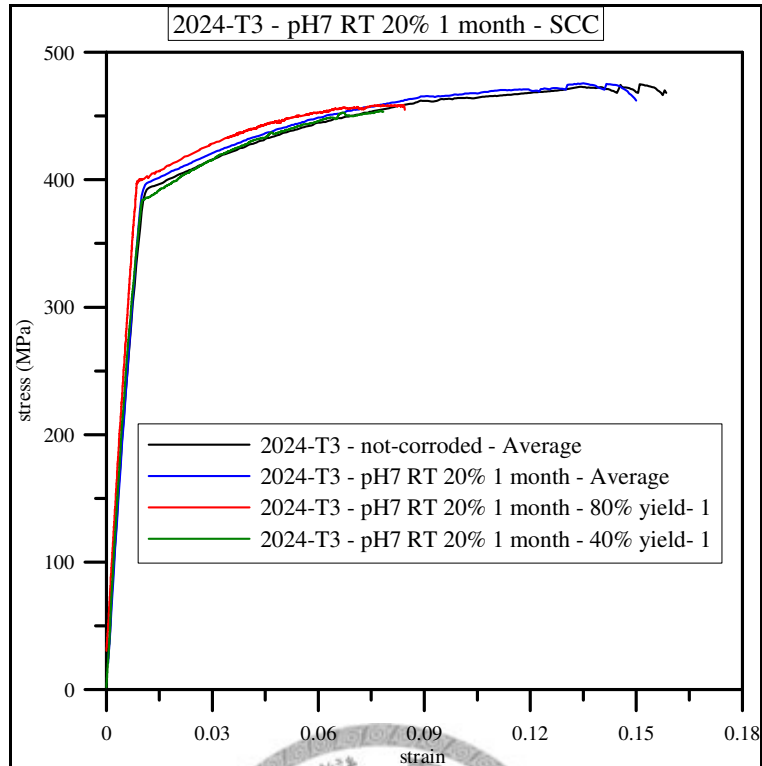


圖 4.33 pH7、20%NaCl、RT、一個月、應力腐蝕實驗數據

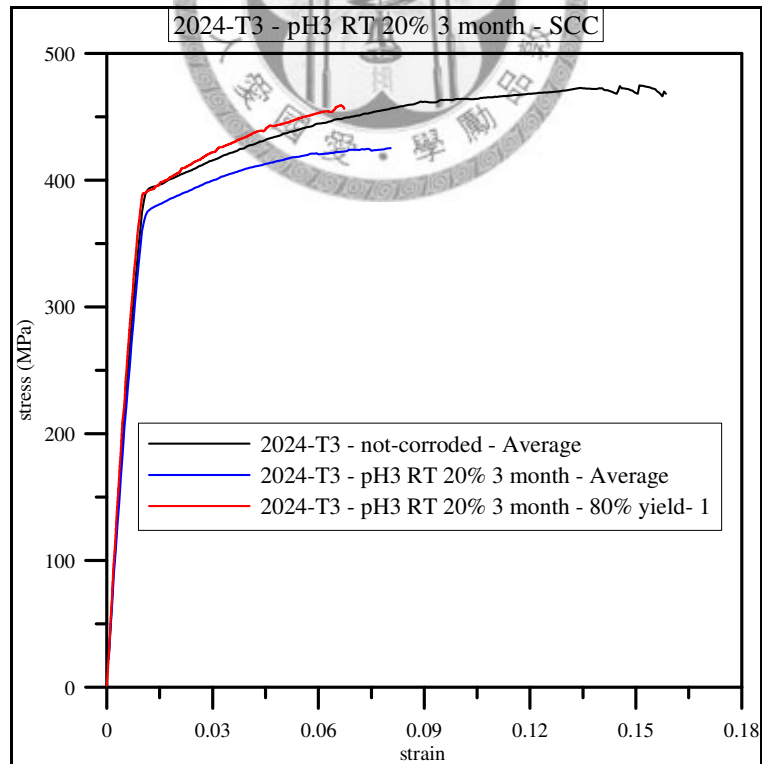


圖 4.34 pH3、20%NaCl、RT、三個月、應力腐蝕實驗數據

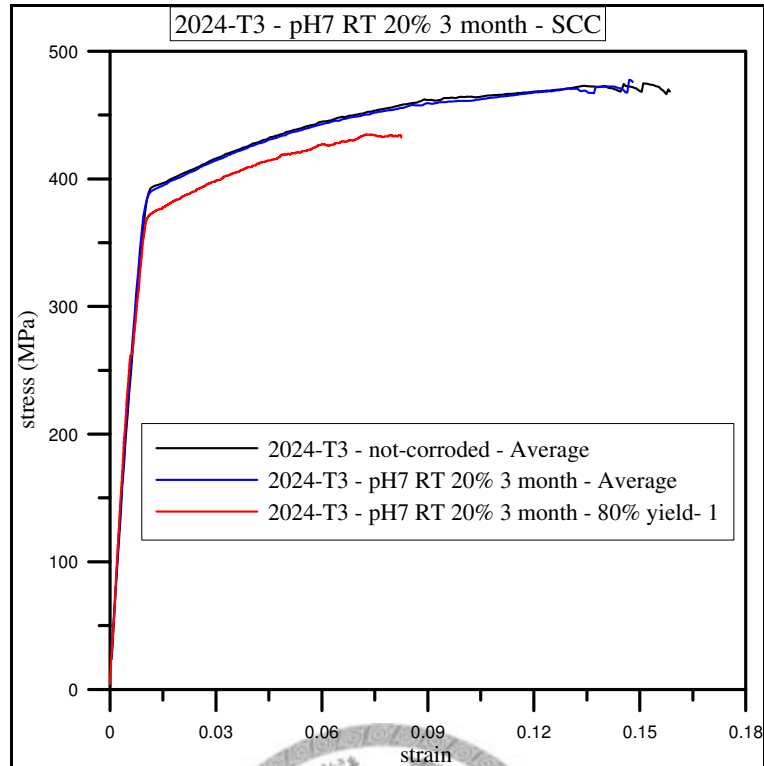
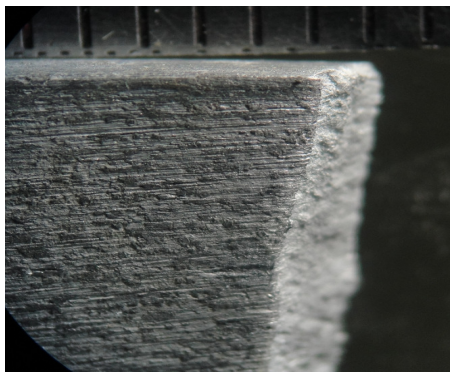
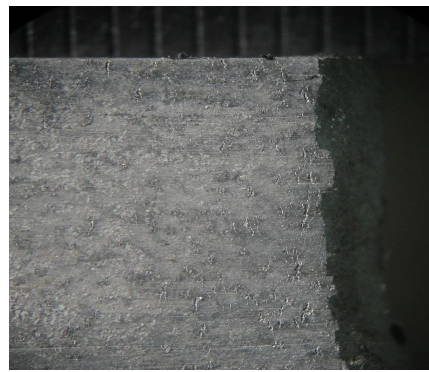


圖 4.35 pH7、20%NaCl、RT、三個月、應力腐蝕實驗數據

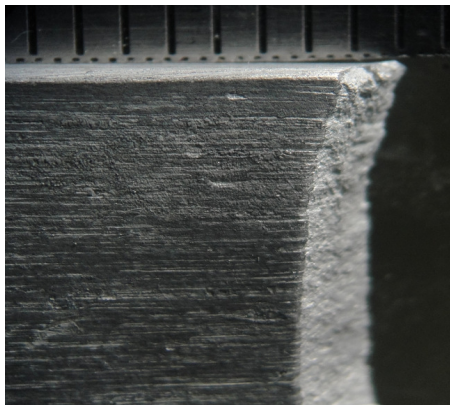




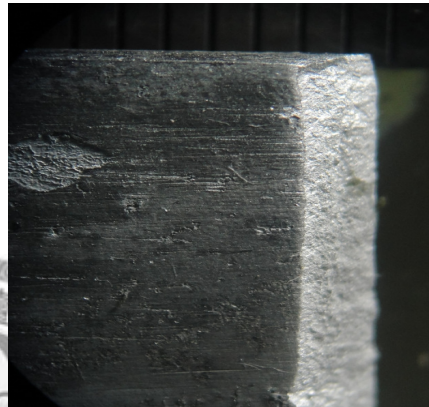
(a)



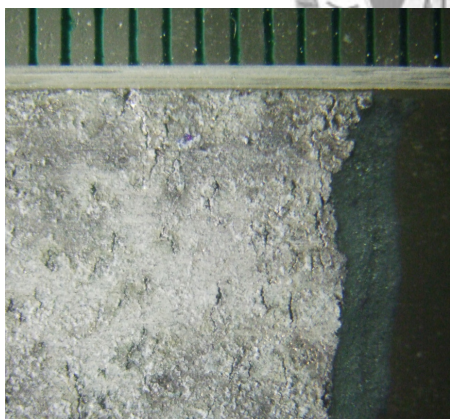
(b)



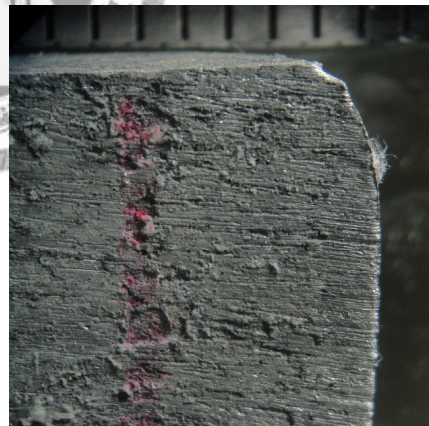
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4.36 靜態腐蝕試片與應力腐蝕試片破斷處表面比較

(a) 靜態腐蝕 pH7 RT 20% 一個月 (b) 應力腐蝕 pH7 RT 20% 一個月

(c) 靜態腐蝕 pH7 RT 20% 三個月 (d) 應力腐蝕 pH7 RT 20% 三個月

(e) 靜態腐蝕 pH3 RT 20% 三個月 (f) 應力腐蝕 pH3 RT 20% 三個月

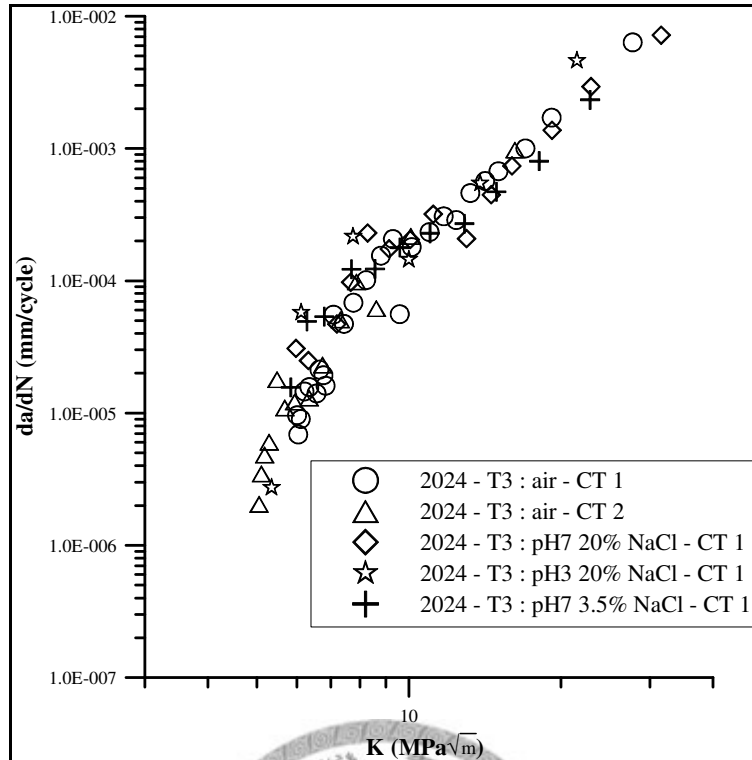


圖 4.37 標準 CT 試片腐蝕疲勞  $da/dN$ - $\Delta K$  關係圖

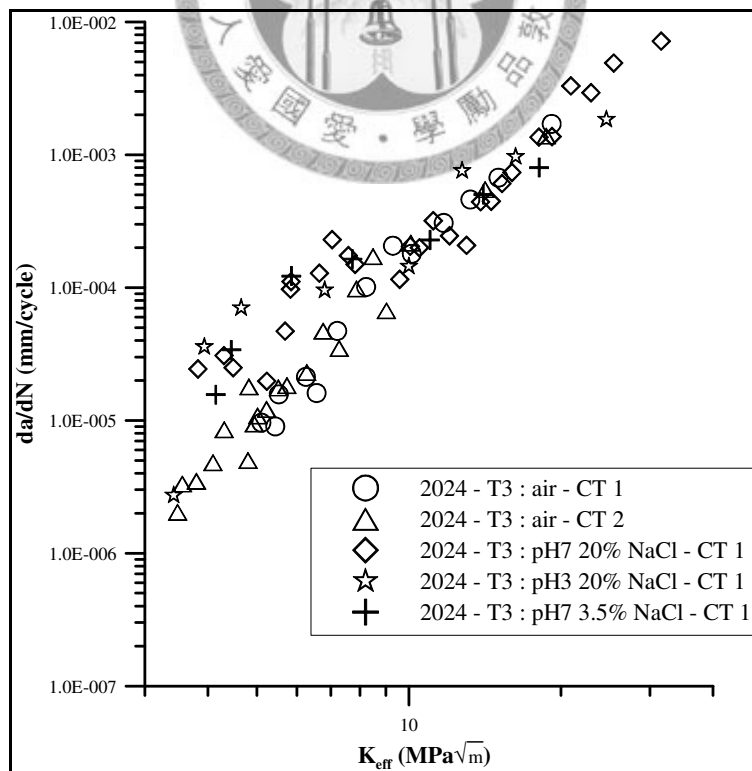


圖 4.38 標準 CT 試片腐蝕疲勞  $da/dN$ - $\Delta K_{\text{eff}}$  關係圖



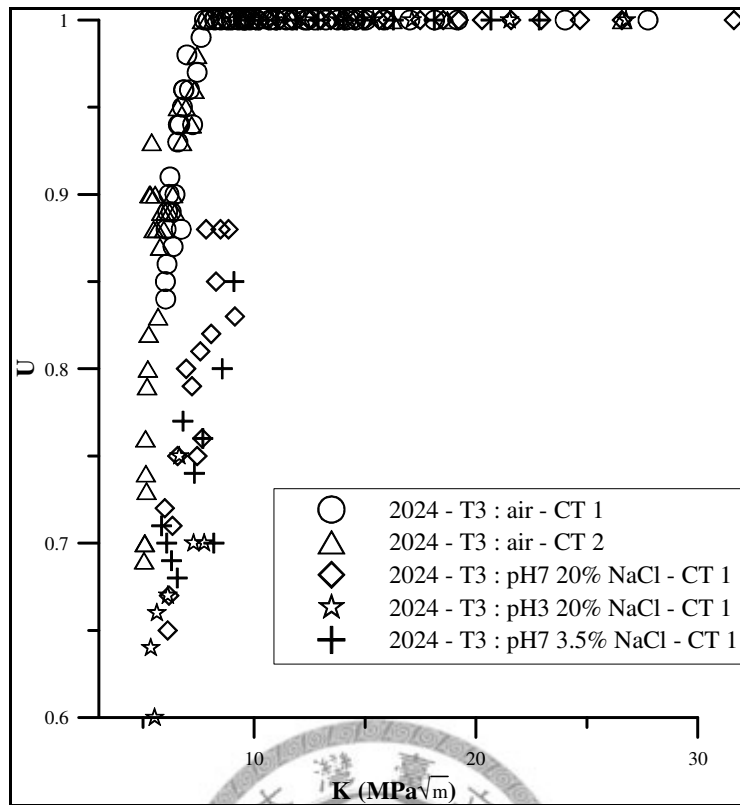


圖 4.39 標準 CT 試片裂縫封閉程度圖

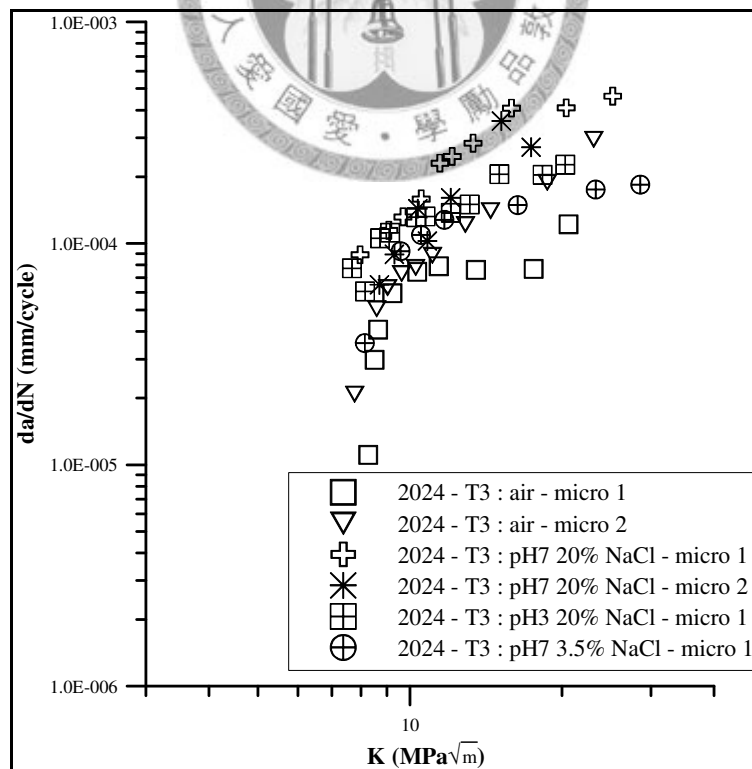


圖 4.40 微型試片腐蝕疲勞 da/dN- $\Delta K$  關係圖

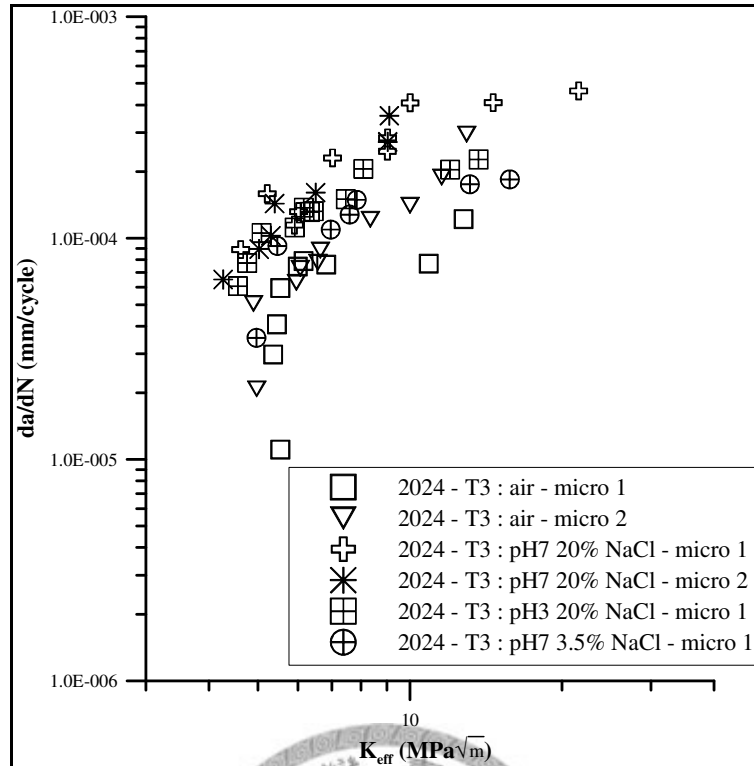


圖 4.41 微型試片腐蝕疲勞  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖

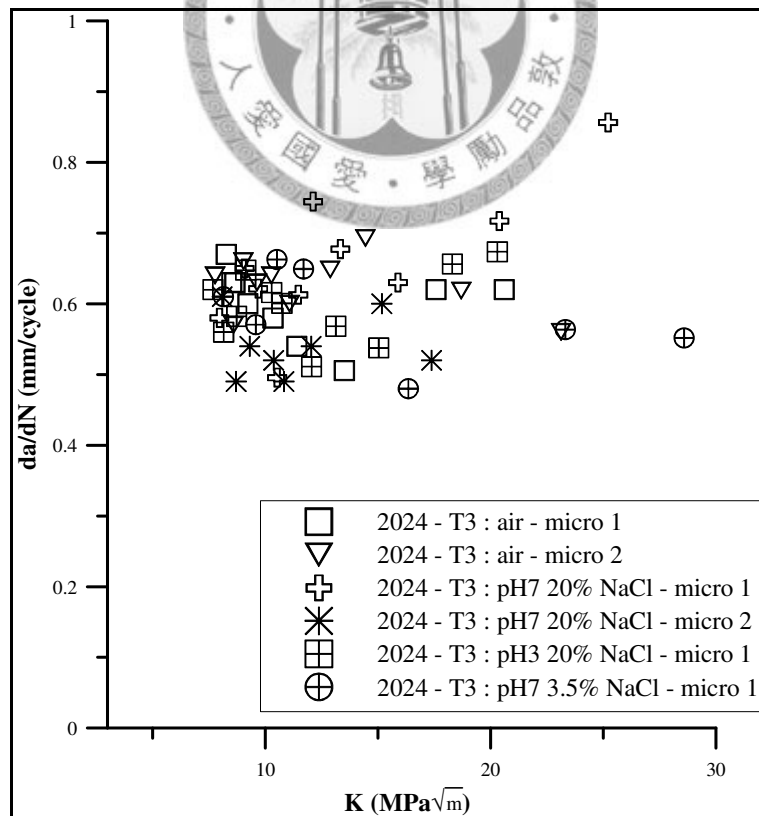


圖 4.42 微型試片裂縫封閉程度圖

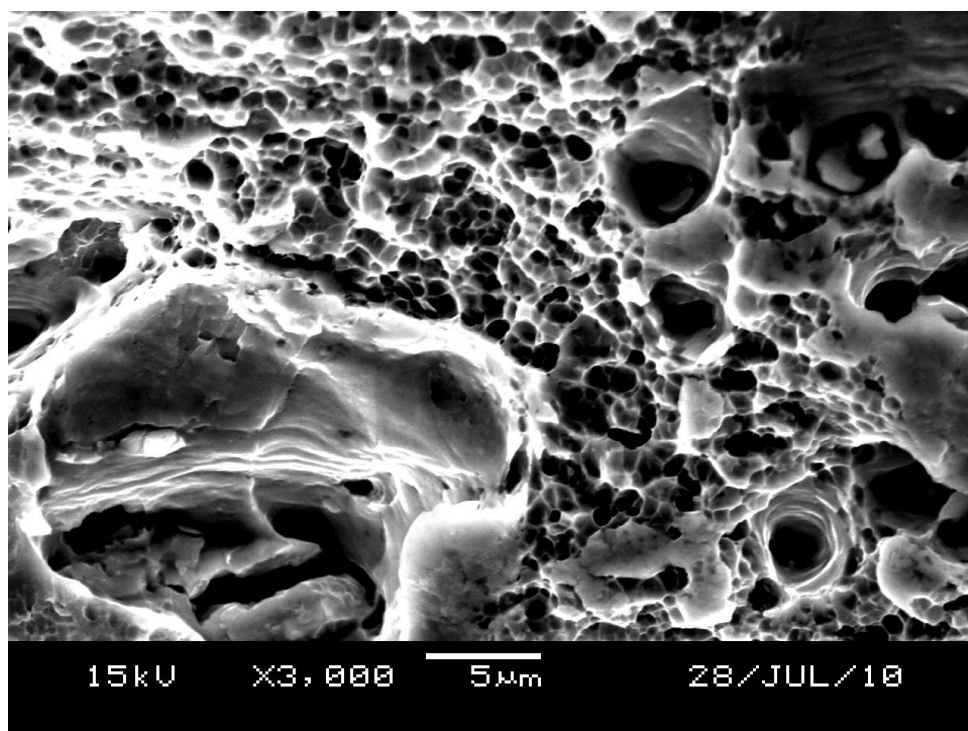


圖 4.43 未腐蝕拉伸試片斷面 SEM 照

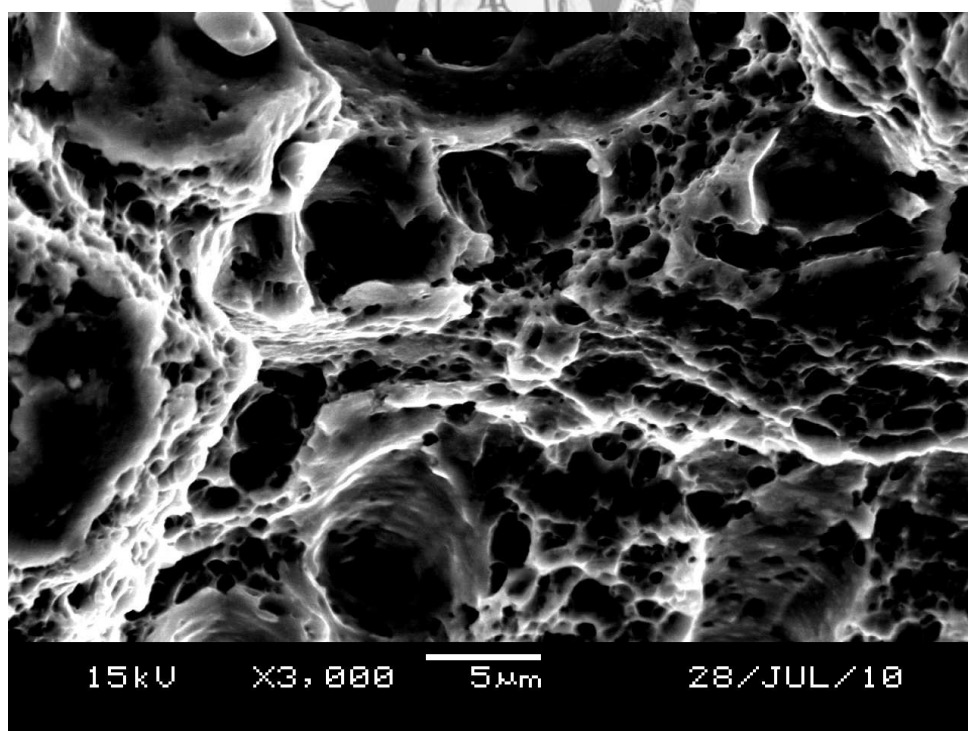


圖 4.44 靜態腐蝕 pH7 20%NaCl 拉伸試片斷面 SEM 照

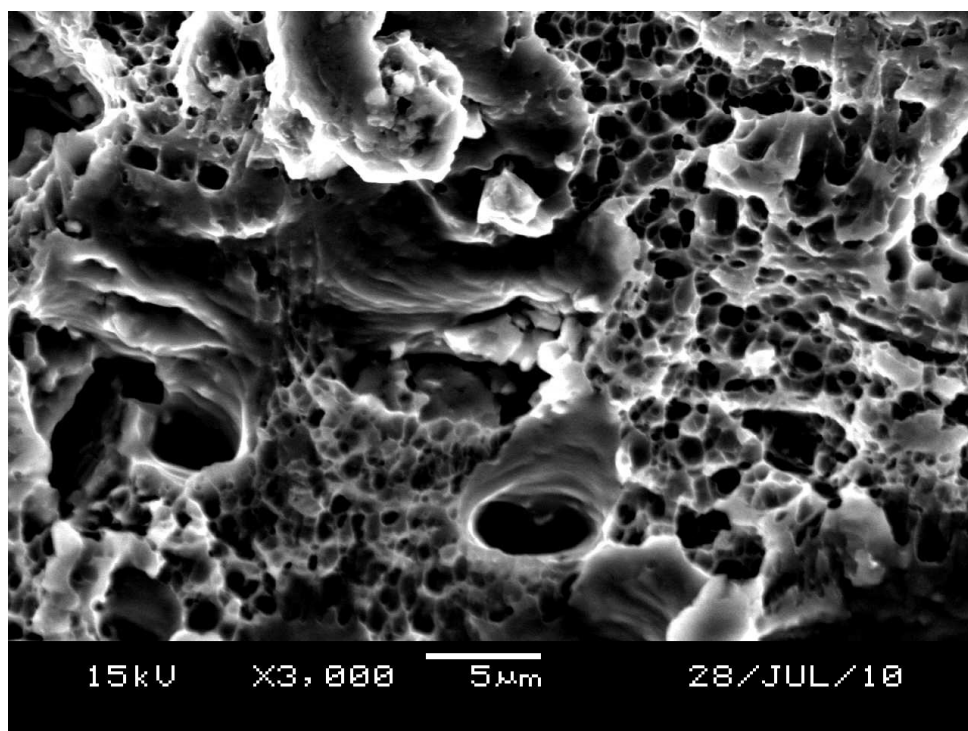


圖 4.45 應力腐蝕 pH7 20%NaCl 拉伸試片斷面 SEM 照

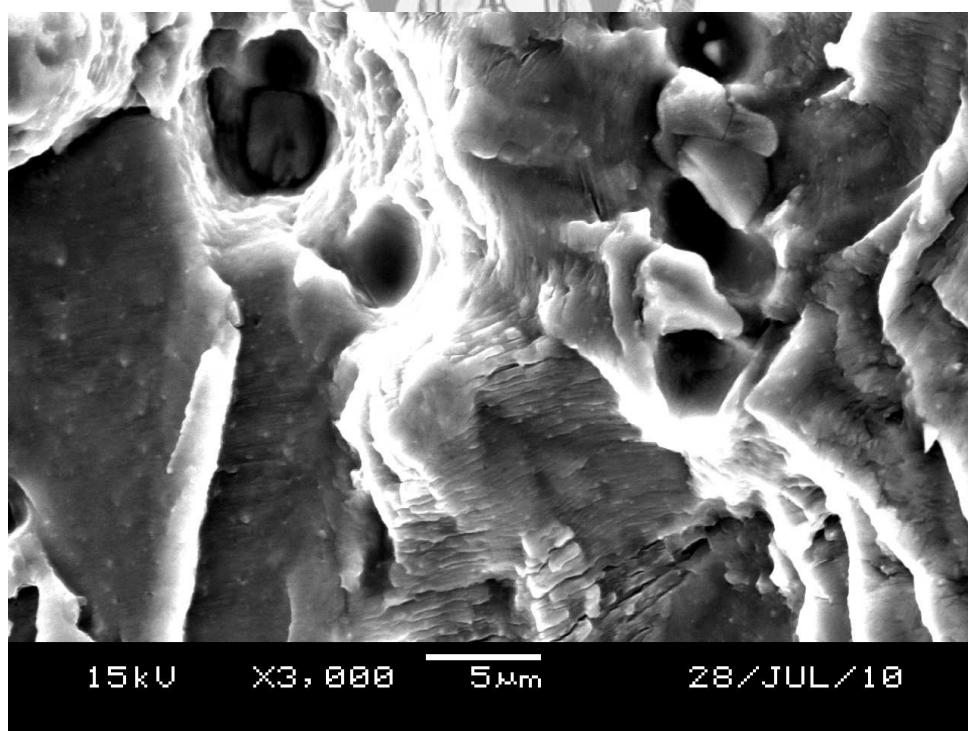


圖 4.46 腐蝕疲勞在空氣中測試之 CT 疲勞試片斷面 SEM 照

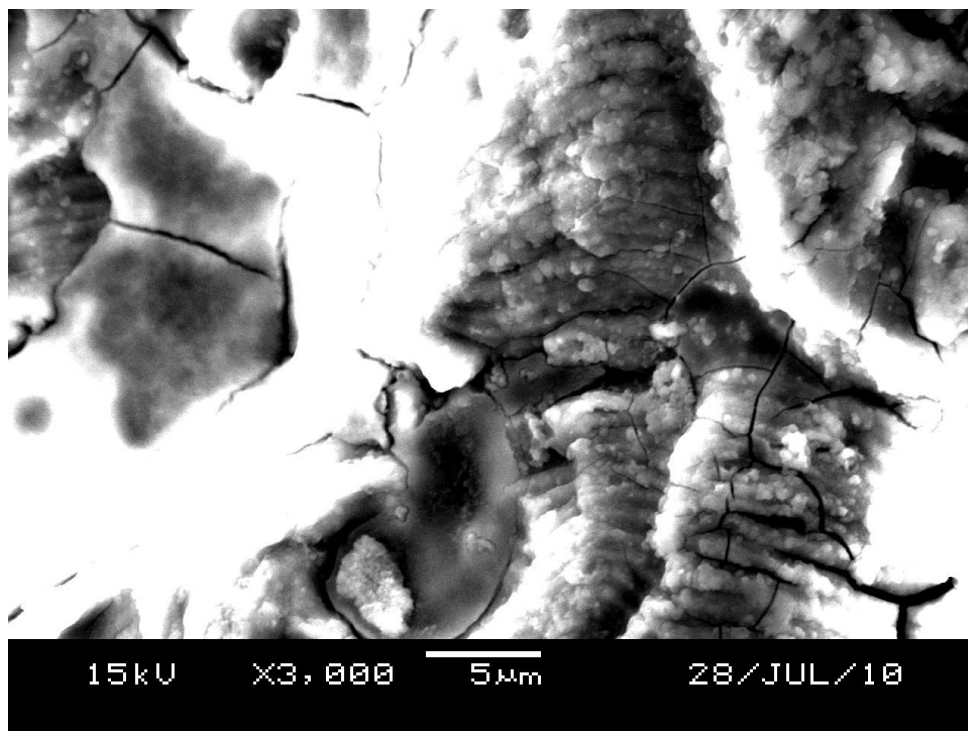


圖 4.47 腐蝕疲勞 pH7 20%NaCl CT 疲勞試片斷面 SEM 照

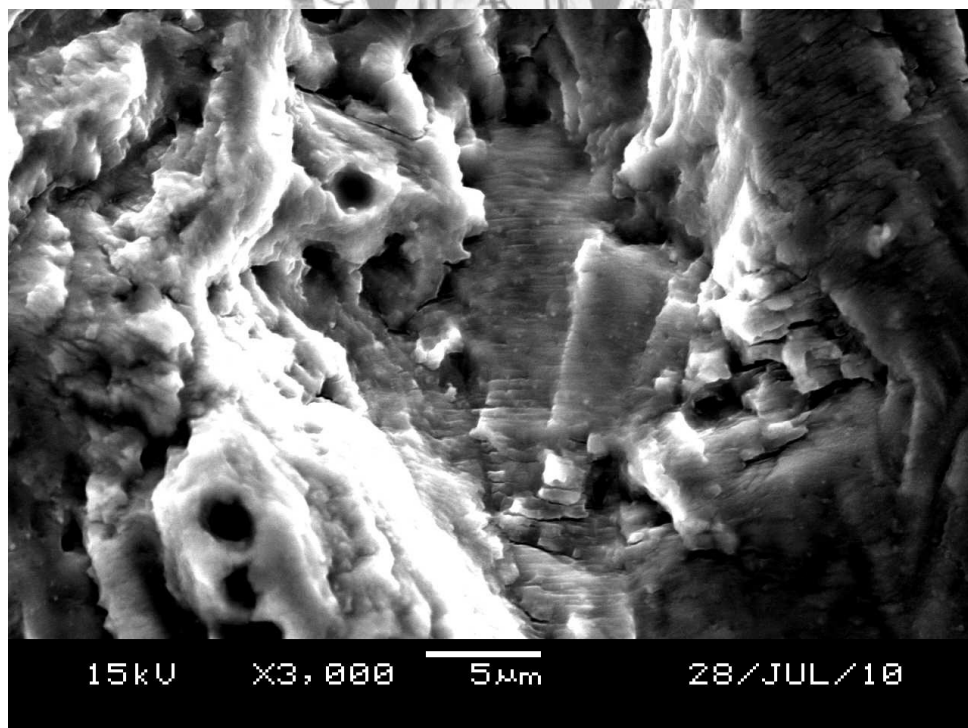


圖 4.48 腐蝕疲勞在空氣中測試之微型疲勞試片斷面 SEM 照

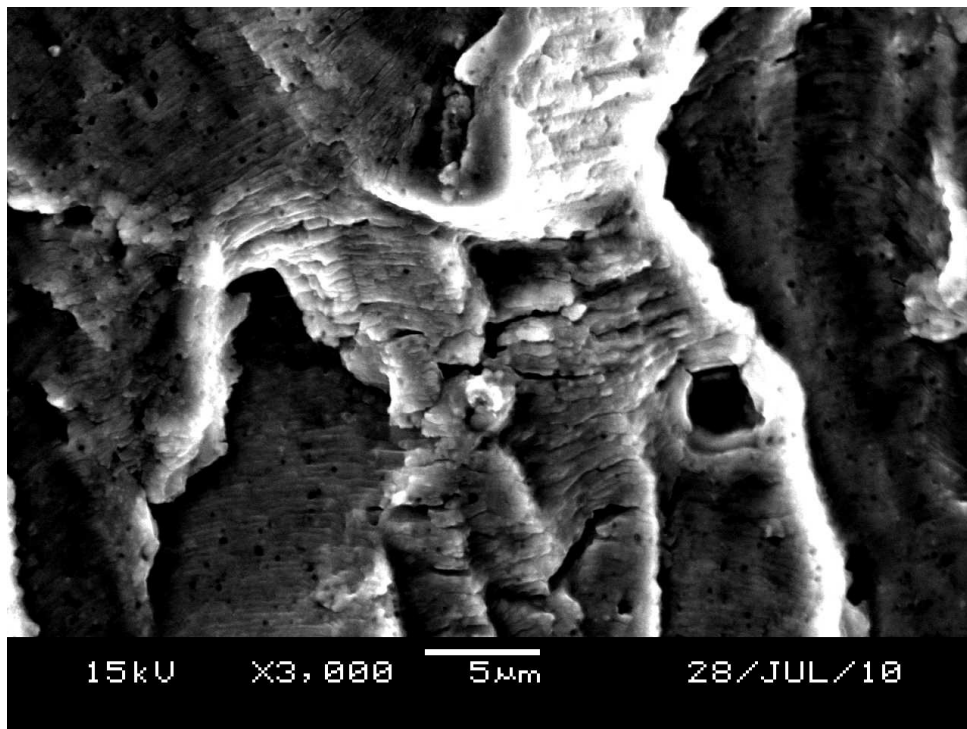


圖 4.49 腐蝕疲勞 pH7 20%NaCl 微型疲勞試片斷面 SEM 照

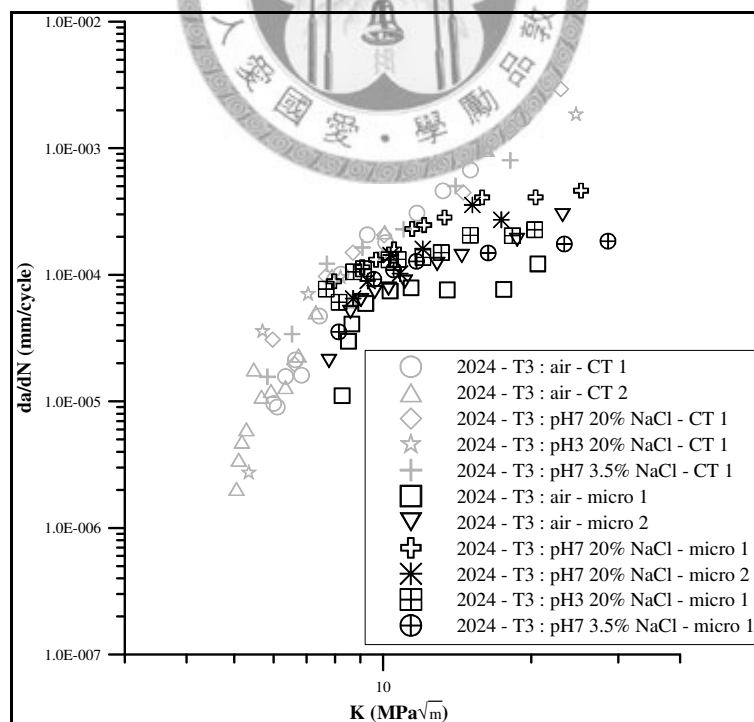


圖 4.50 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞  $da/dN$ - $\Delta K$  關係圖

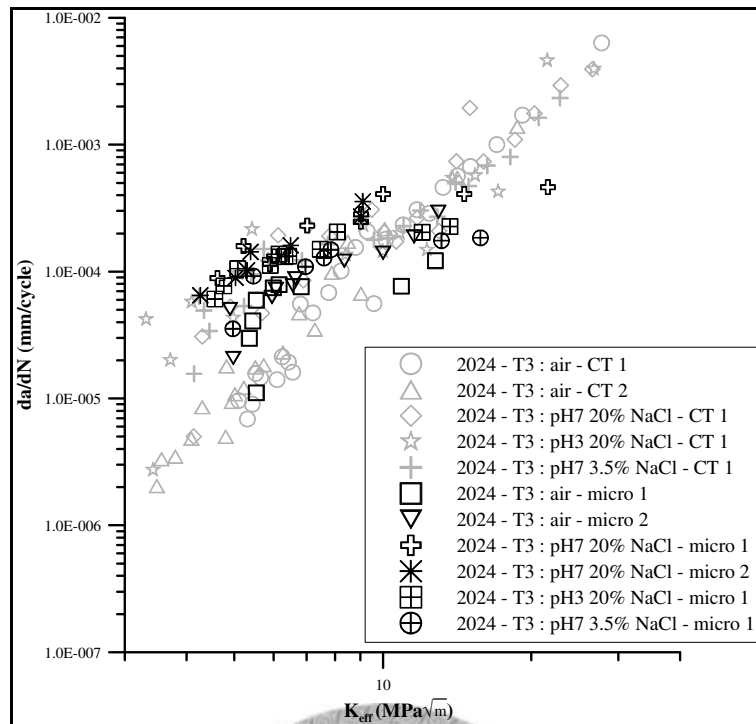


圖 4.51 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖

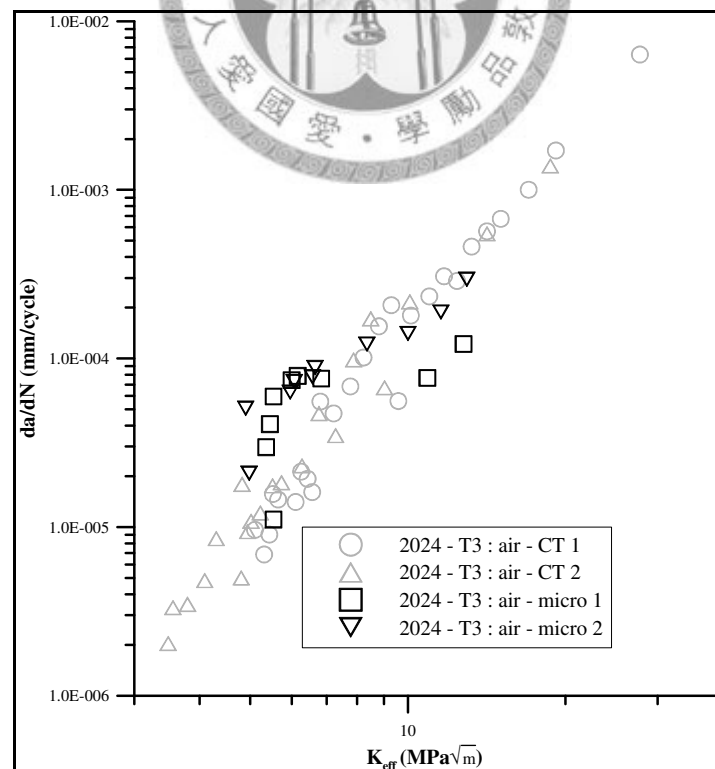


圖 4.52 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞未腐蝕  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖

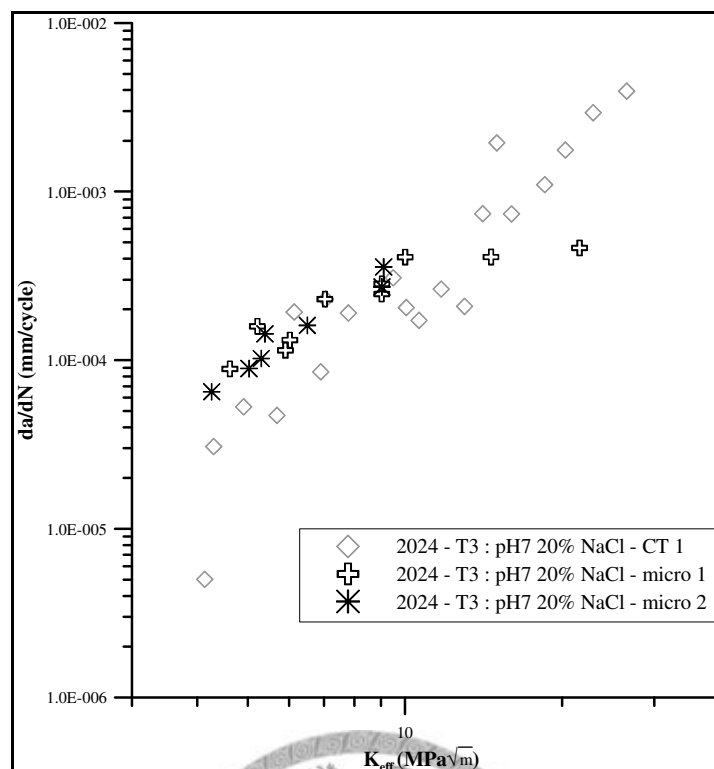


圖 4.53 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH7 20% NaCl  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖

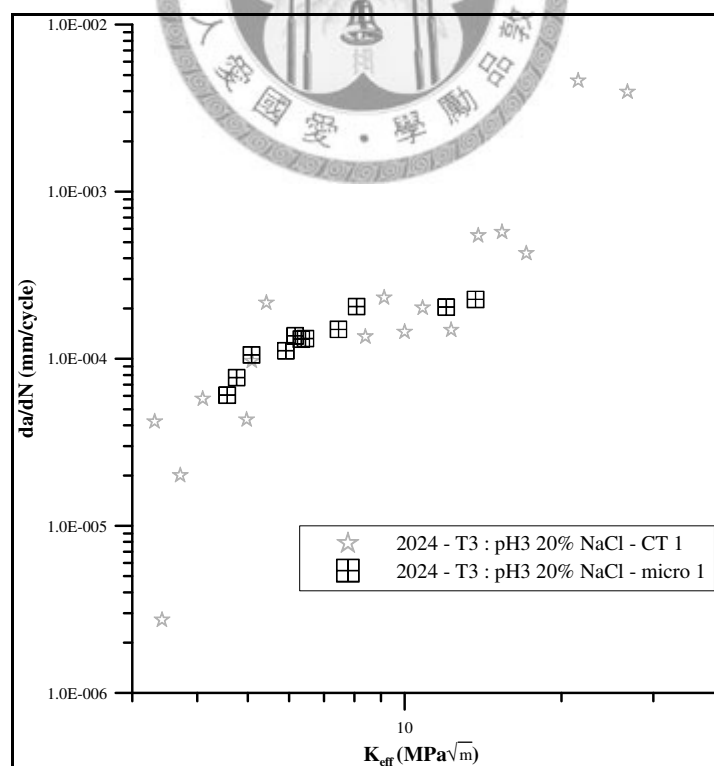


圖 4.54 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH3 20% NaCl  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖



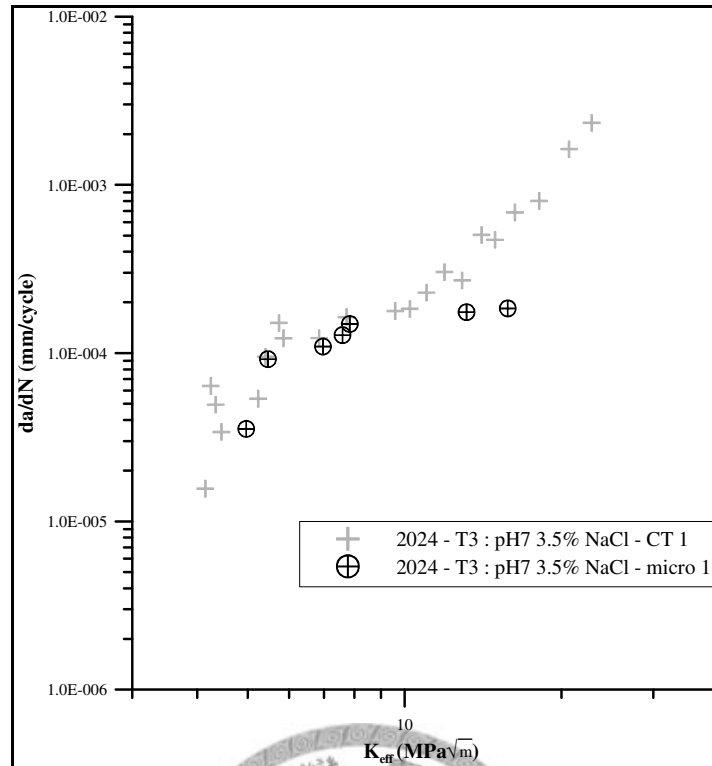


圖 4.55 標準 CT 試片與微型試片腐蝕疲勞 pH7 3.5% NaCl  $da/dN$ - $\Delta K_{eff}$  關係圖



## 第五章 結論

1. 在靜態腐蝕的部份，蒙皮材料 2024-T3 鋁合金標準拉伸試片在腐蝕環境下的拉伸強度以及斷裂應變皆有下降的趨勢；氯離子濃度在靜態腐蝕下對試片強度的影響較小，而酸鹼度對拉伸強度有極大程度的影響，試片在酸性環境下的拉伸強度明顯低於中性環境，主要原因為氫離子會促進氯離子活性，加快腐蝕的速率，導致表面的孔蝕反應更加劇烈。溫度對拉伸強度亦有影響，低溫環境下腐蝕作用不顯著，而在常溫環境下腐蝕進行較快。而隨著腐蝕時間越長，試片的拉伸強度以及斷裂應變下降的幅度越顯著。
2. 在靜態腐蝕拉伸試片破斷處表面觀察部份，試片在未腐蝕以及中性環境的環境下，試片斷面保持平整，但酸性腐蝕環境下的試片斷面則呈現不規則狀，試片表面也可明顯觀察到或深或淺的蝕孔痕跡，由此可以驗證在酸性常溫環境下的腐蝕活動最劇烈，而當腐蝕時間越長，蝕孔有越來越深的趨勢；與飛安會提供的事實照片可以發現，實驗的試片斷面與蒙皮裂紋事故的斷面相似，可以間接驗證飛安會針對此事故調查的結論正確。
3. 在應力腐蝕實驗中，可以發現試片的斷裂應變與靜態腐蝕的斷裂應變相比又減少了許多，且不論施加的應力是 40%或是 80%的降伏強度，斷裂應變皆有改變的情形，因此可以推測在施加張應力後，對於蒙皮試片的腐蝕並不只是純粹的表面孔蝕，而是參雜了應力腐蝕的條件，以致斷裂應變又再降低。而由應力腐蝕試片破斷處表面照亦可發現當試片施加張應力後，試片表面的腐蝕痕跡明顯增加，因此可以驗證斷裂應變降低的原因為腐蝕作用加劇有關。
4. 在標準試片腐蝕疲勞中，將所得數據以裂縫生長速率對  $\Delta K$  的圖形表示，並依裂縫封閉程度將圖形修正為裂縫生長速率對  $\Delta K_{eff}$  的圖形。由圖可以觀察到在低  $\Delta K_{eff}$  區間內，試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率明顯高於空氣環境，因為在此區間內裂縫生長速率緩慢，因此裂縫尖端較易受腐蝕反應，而氯離子濃度對裂縫生長速率皆有些微影響，但整體影響不大；酸鹼度則因為有裂縫尖端酸

化的關係，所以對疲勞裂縫生長的影响也不明顯。到了高  $\Delta K_{eff}$  區間，因為裂縫生長快速，腐蝕對裂縫延伸的影响較少，裂縫生長速率受純機械效應影响，所以無論是腐蝕環境或是空氣環境下，高  $\Delta K_{eff}$  區間內的裂縫生長速率趨於一致。

5. 微型試片腐蝕疲勞中，將所得數據以裂縫生長速率對  $\Delta K$  的圖形表示，並依裂縫封閉程度將圖形修正為裂縫生長速率對  $\Delta K_{eff}$  的圖形。在圖中可以觀察到，試片在腐蝕環境下的裂縫生長速率皆高於空氣環境，而氯離子濃度與酸鹼度對裂縫生長速率皆有影响，但差異並不大，其所討論出來的結果與標準試片腐蝕疲勞中皆相同。
6. 由 SEM 斷裂面照片中可以觀察到未腐蝕拉伸試片與靜態腐蝕 pH7、氯離子濃度 20%、應力腐蝕 pH7、氯離子濃度 20% 的試片斷面皆為延性破壞模式，整個破斷面佈滿延性凹渦；標準 CT 試片在空氣環境的疲勞實驗其斷面 SEM 照可以發現明顯的疲勞紋，且可以觀察到部份具有凹渦的延性破壞模式；而 CT 試片在腐蝕環境 pH7、氯離子濃度 20% 的腐蝕疲勞實驗之試片斷面，亦可觀察到疲勞紋，但在疲勞紋上可以發現小圓點狀的腐蝕痕跡，且整體的試片斷面並沒有觀察到明顯的凹渦，而是有許多樹枝狀的龜裂痕跡，呈現脆性破壞特徵，此與空氣環境之試片的延性破壞有根本上的差異，因此可以解釋為何 CT 試片在腐蝕環境中的裂縫生長速率高於空氣環境；而微型試片所觀察到的結果與標準 CT 試片相同。
7. 將標準試片所得的數據與微型疲勞試片所得的數據疊合，可以發現在裂縫生長速率對  $\Delta K$  的圖形中 CT 試片的裂縫生長速率略高於微型試片，但當考慮裂縫封閉影响，將圖形修正為裂縫生長速率對  $\Delta K_{eff}$  的圖形後，裂縫生長速率的線性度良好，圖形的斜率也修正為一致，且將各腐蝕環境的裂縫生長速率圖形分開討論，可以看出 CT 試片與微型試片的裂縫生長速率疊合情形亦非常良好。
8. 微型疲勞試片尺寸小，可以有效節省製作材料，且由於其使用壓電致動器的緣

故，因此在預裂的操作頻率得以提高，有效縮短實驗時間，且當考慮裂縫封閉下，所得的數據與標準試片結果有非常大程度的符合，因此微型疲勞試驗機確實能在疲勞實驗中有極高的實用性；且對於腐蝕疲勞的研究中，所討論出來的結果與標準疲勞試片所得結果皆符合，因此可以得知，在腐蝕疲勞的測試中，微型平板試片疲勞試驗機亦能有效實際應用。



## 參考文獻

- [1] 行政院飛航安全委員會航空器飛航事故事實資料報告，“XX 航空公司 CI7552 班機 737-800 機型 國籍標誌及登記號碼 B-16805 落地後檢查發現機腹 77 公分裂紋事故”，ASC-AFR-08-07-001, 2007,  
<http://www.asc.gov.tw/downloadfile/CI7552FactualReport.pdf>
- [2] 柯賢文,“腐蝕及其防制”, 全華科技出版社, 台北, 1995, pp. 127–135.
- [3] 左景伊,“應力腐蝕破裂”, 西安交通大學出版社, 陝西西安, pp. 1–9, 1985.
- [4] Z. Szklarska-Smialowska, “Pitting Corrosion of Aluminum,” Corrosion Science 41, pp. 1743–1767, 1999.
- [5] D.W. Hoepfner, “Fatigue Mechanisms,” American Society for Testing and Materials (ASTM), Vol. 675, Philadelphia, PA, p. 841, 1979.
- [6] S.I. Rokhlin, J.Y. Kim, H. Nagy, B. Zoofan, “Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Crack Initiation and Fatigue Life,” Engineering Fracture Mechanics Vol. 2, pp. 425–444, 1999.
- [7] S. Ishihara, S. Saka, Z.Y. Nan, T. Goshima, S. Sunada, “Prediction of Corrosion Fatigue Lives of Aluminum Alloy on The Basis of Corrosion Pit Growth Law,” Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures Vol. 29, pp. 472–480, 2006.
- [8] 范萬昌,“不同環境下之 Custom 450 不銹鋼腐蝕疲勞性質研究,” 國立中央大學機械工程研究所碩士論文, 2000.
- [9] T.D. Burleigh, “The Postulated Mechanisms for Stress Corrosion Cracking of Aluminum Alloys,” Corrosion Science, pp. 89–98, 1991.
- [10] N.J.H. Holroyd, “EICM Proceedings,” pp. 311–345, 1990.
- [11] H. Vogt, M.O. Speidel, “Stress Corrosion Cracking of Two Aluminum Alloys” Corrosion Science Vol. 40, pp. 251–270 , 1998.
- [12] F. P. Ford and M. Silverman, “Mechanistic Aspects of Environment-Controlled Crack Propagation in Steel/Aqueous Environment System,” Report No.HTGE-451-8-12, General Electric Company, Schenectady, New York, 1979.
- [13] K. N. Krishnan, “Mechanism of Corrosion Fatigue in Super Duplex Stainless Steel in 3.5 Percent NaCl Solution,” International Journal of Fracture, Vol. 88, pp. 205–213, 1997.
- [14] W. Schuotz, “A history of fatigue,” Engineering Fracture Mechanics Vol. 54, No. 2, pp. 263–300, 1996.
- [15] K. J. Miller and R. Akid, “The Application of Microstructural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States,” Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 452, pp. 1411–1432, 1996.
- [16] R. Akid and G. Murtaza, “Environment Assisted Short Crack Growth Behaviour of

- a High Strength Steel,” ESIS 13, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 193–207, 1992.
- [17] P. C. Paris and F. Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws,” *Journal of Basic Engineering*, Vol. 85, pp. 528–534, 1960.
- [18] 蔡賜慶, “疲勞裂縫填充修補之評估模式探討,” 碩士論文, 台灣大學機械工程研究所, 2000.
- [19] 林賢易, “微型疲勞試驗機,” 碩士論文, 台灣大學機械工程研究所, 2006.
- [20] W. Elber, “Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.2, pp.37–45, 1970.
- [21] W. Elber, “The Significance of Fatigue Crack Growth,” ASTM STP486, American Society for Testing and Material, Philadelphia, pp.230–241, 1971.
- [22] S. Suresh and R. O. Ritchie, “Propagation of Short Crack,” *International Metals Reviews*, Vol. 29, pp. 445–476, 1984.
- [23] Y. G. Chun, S. I. Pyun, and S. M. Lee, “The Influence of Loading Frequency on the Fatigue Crack Propagation Behaviour of Al- Zn-Mg Alloy at Low Cyclic Stress Intensity Level in 3.5 wt% NaCl Solution,” *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 10, pp. 1439–1442, 1991.
- [24] D. L. Davidson, “Fatigue Crack Tip Displacement Observations,” *Journal of Material Science*, Vol. 14, No. 1, pp.231–233, 1979.
- [25] G. Nicoletto, “Plastic Zone About Fatigue Cracks in Metals,” *International Journal of Fatigue*, No. 2, pp.107–115, 1989.
- [26] H. Sehitoglu, “Crack Opening and Closure in Fatigue,” *Engineering Fracture Mechanics*, ” Vol. 21, No. 2, pp.329–339, 1985.
- [27] O. Buck, C. L. Marcus, “Plasticity Effects in Crack Propagation,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp.32–34, 1973.
- [28] P. E. Irving, J. L. Robinson, C. J. Beevers, “Fatigue Crack Closure in Titanium and Titanium Alloy,” *International Journal of Fracture*, Vol. 9, pp.105–108, 1983.
- [29] W.R. Corwin and G.E. Lucas, “The Use of Small-scale Specimen for Testing Irradiated Material,” ASTM STP888, American Society for Testing and Material, Albuquerque, 1983.
- [30] W.R. Corwin, F.M. Haggag, W.L. Server, Eds, “Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plate Life Extension,” ASTM STP1204, American Society for Testing and Material, New Orleans, 1993.
- [31] W.R. Corwin, S.T. Rosinski, and E.V. Walle, Eds. “Small Specimen Test Technique,” ASTM STP1229, American Society for Testing and Material, New Orleans, 1997.
- [32] J.F. Kalthoff and M. Gregor, “Instrumented Impact Testing of Subsize Charpy V-notch Specimens,” *Small Specimen Test Techniques*, ASTM STP 1329, American

- Society for Testing and Material, pp.98–109, 1998.
- [33] D.J. Alexander, “Fracture Toughness Measurements with Subsize Disk Compact Specimens,” *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, American Society for Testing and Material, pp.130–142, 1993.
- [34] T.S. Yun, J.S. Kim, S.H. Chi, and J.H. Hong, “Effect of Specimen Thickness on The Tensile Deformation Properties of SA508 C1.3 Reactor Pressure Vessel Steel,” *Small Specimen Test Techniques*, ASTM STP 1329, American Society for Testing and Material, pp.575–587, 1998.
- [35] S. Nunomura, T. Nishijima, Y. Higo, and A. Hishinuma, “Evaluation of Tensile Properties Using a TEM Disk-size Specimen,” *Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP1204, American Society for Testing and Material, pp.256–266, 1993.
- [36] F.M. Haggag, W.L. Server, G.E. Lucas, G.E. Odette, and J.W. Sheckherd, “The Use of Miniaturized Tests to Predict Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Deformed Steel Plates,” *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol1, No.1, pp.62–69, 1990.
- [37] T. Misawa, T. Adaci, M. Saito, and Y. Hamaguchi, “Small Punch Tests for Evaluating Ductile-brittle Transition Behavior of Irradiated Ferritic Steels,” *Journal of Nuclear Material*, Vol.150, pp.1619–1622, 1989.
- [38] G.R. Rao and B.A. Chin, “Development of a Miniature Disk Bending Fatigue Specimen,” *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, American Society for Testing and Material, pp.267–274, 1993.
- [39] S. Nunomura, S. Noguchi, Y. Okamura, S. Kumai, and S. Jitsukawa, “Two Micro Fatigue Test Methods for Irradiated Materials,” *Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal annealing and Plant Life Extension*, ASTM STP 1204, American Society for Testing and Material, pp.275–288, 1993.
- [40] 林士瑋, “利用微型平板試片探討疲勞性質,” 碩士論文, 台灣大學機械工程研究所, 2008.
- [41] 中國國家標準 CNS 2112 G 2014—金屬材料拉伸試驗試片.
- [42] “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates,” ASTM E647-95a, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 562–598, 1998.
- [43] J.W. Dally, W.F. Riley, “Experimental Stress Analysis,” Third Edition, pp.97–100, 1999.
- [44] L.P. Pook, “The Effect of Friction on Pin Jointed Single Edge Notch Fracture Toughness Test Specimens,” *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 4,

- pp.295–297, 1968.
- [45] Harris, “Stress Intensity Factors for Hollow Circumferentially Notched Round Bars, ” Journal of Basic Engineering, pp.49–54, 1967.
- [46] S. Suresh and R. O. Ritchie, “On the Influence of Environment on the Load Ratio Dependence of Fatigue Thresholds in Pressure Vessel Steel,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, pp. 785–800, 1983.
- [47] K. Komai and K. Minoshima, “Dynamic and Cyclic Stress Corrosion Cracking Resistance of Metals,” Edited by K. Iida and A. J. McEvily, Elsevier Applied Science, New York, pp. 373–389, 1986.
- [48] C. T. Fujii and J. A. Smith, “Environmental Influences on the Aqueous Fatigue Crack Growth Rates of HY-130 Steel,” ASTM STP 801, Edited by T. W. Crooker and B. N. Leis, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 390–402, 1983.
- [49] 徐森煌, “304 不鏽鋼疲勞裂縫之減速現象,” 碩士論文, 台灣大學機械工程研究所, 1991.

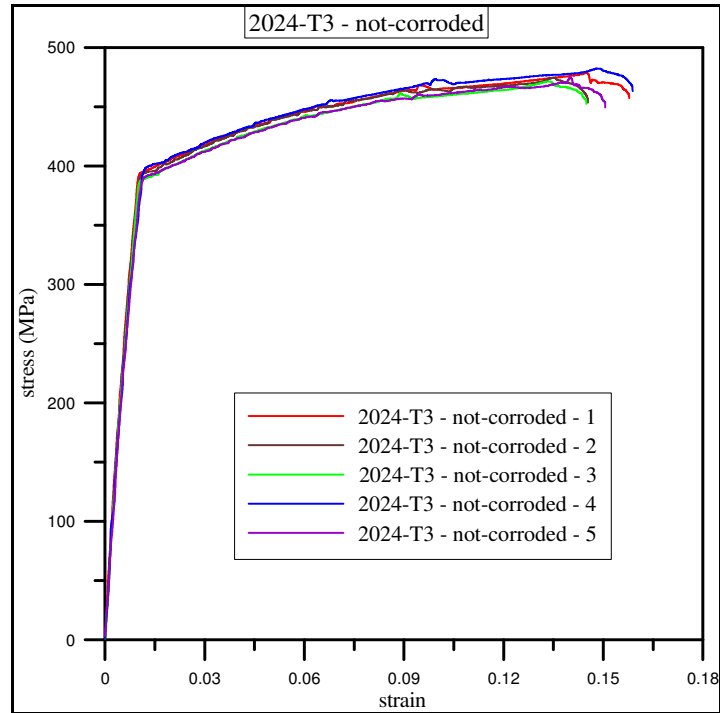




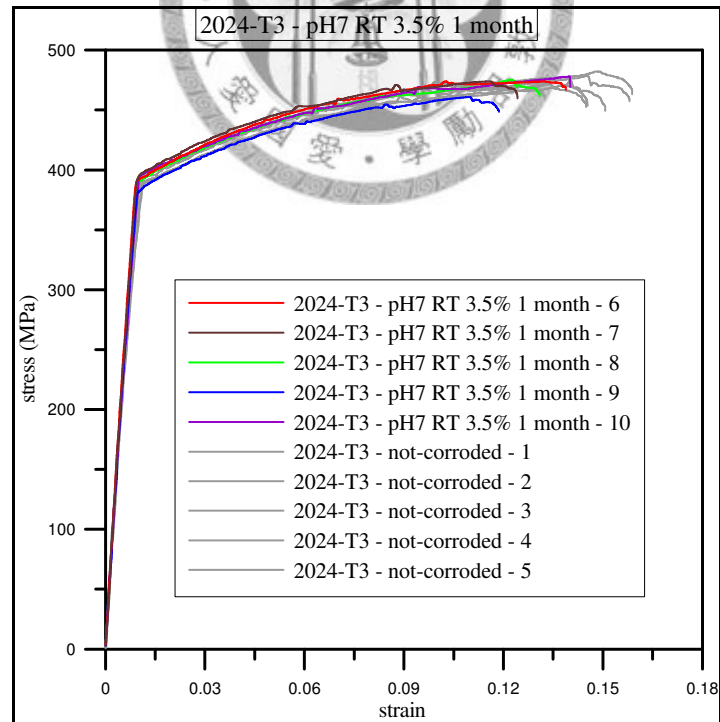
## 附錄 A

### 靜態腐蝕拉伸數據附圖

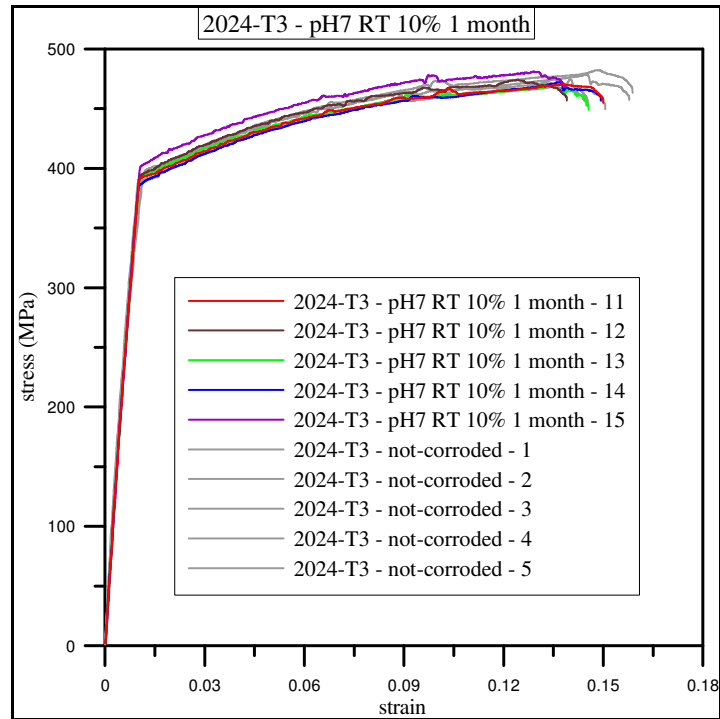




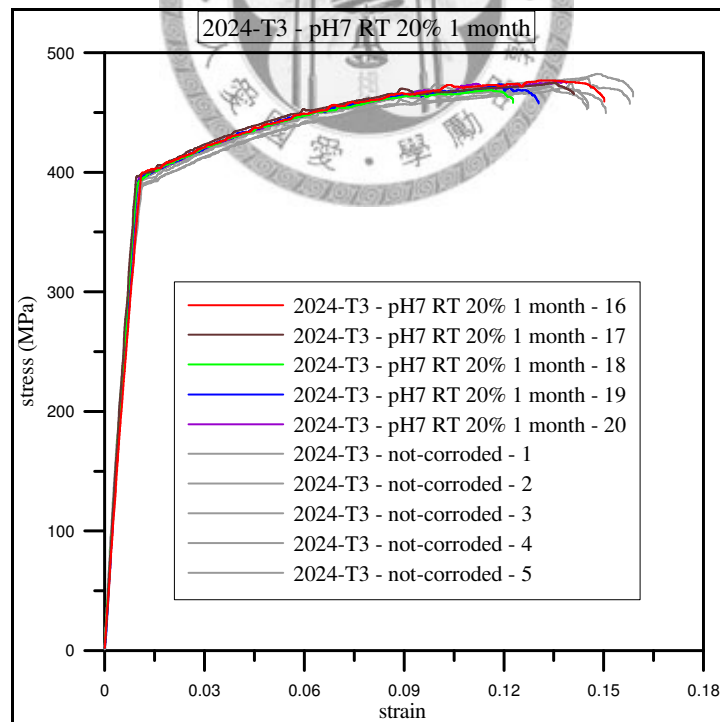
附錄 A.1 未腐蝕實驗曲線



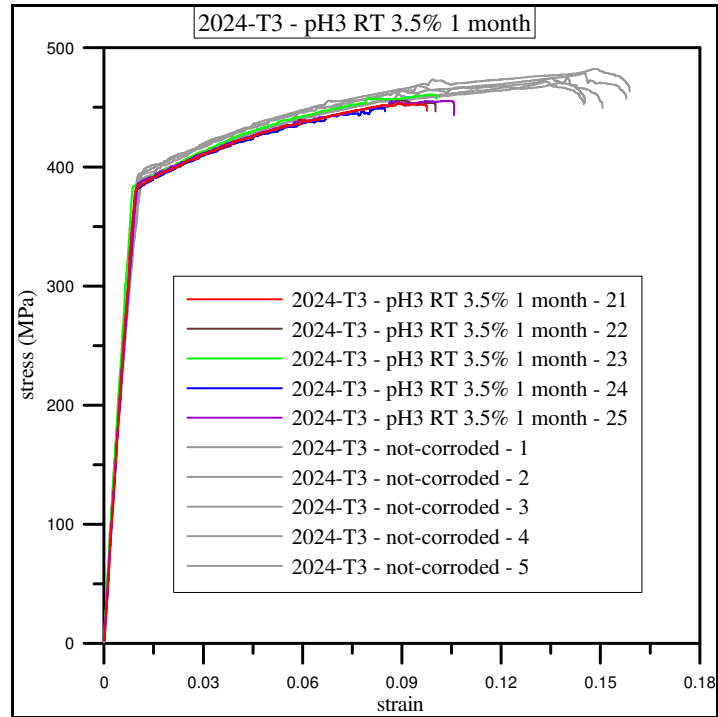
附錄 A.2 pH7 RT 3.5% 腐蝕一個月實驗曲線



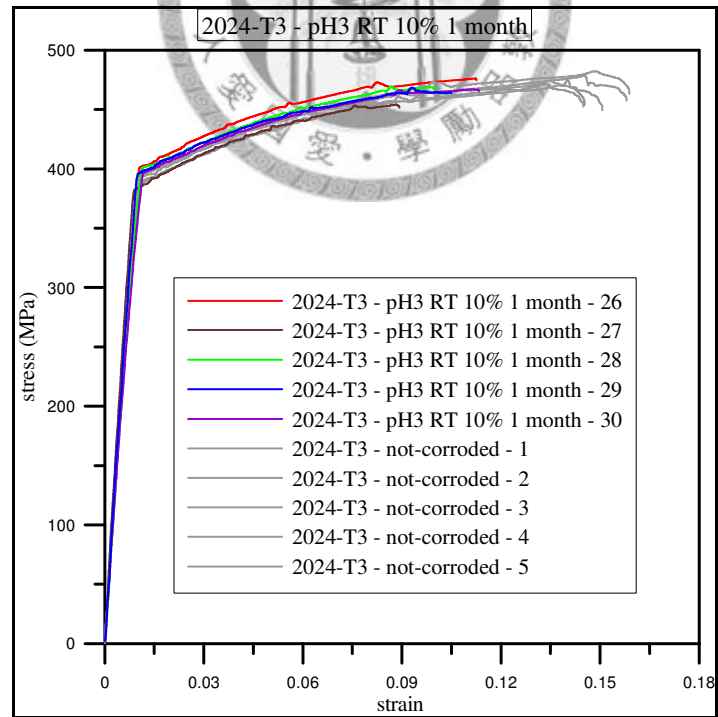
附錄 A.3 pH7 RT 10% 腐蝕一個月實驗曲線



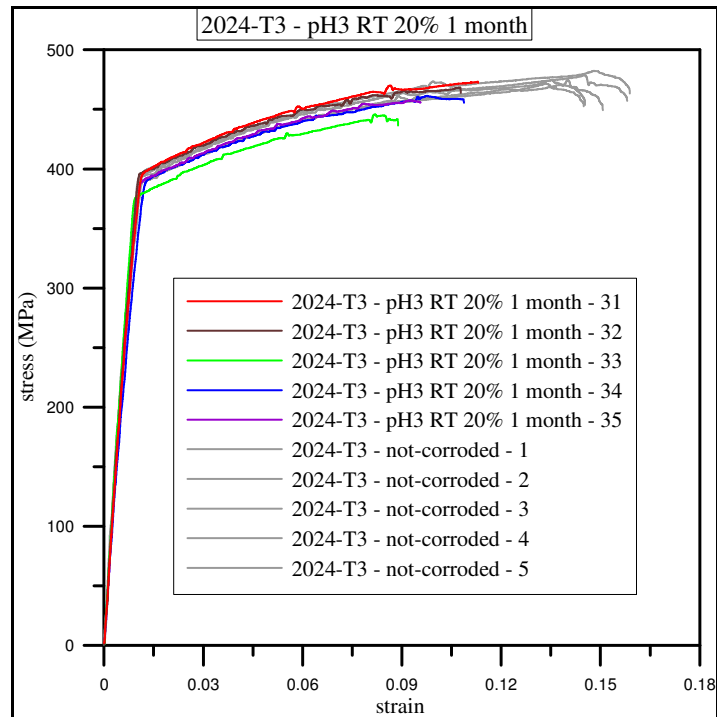
附錄 A.4 pH7 RT 20% 腐蝕一個月實驗曲線



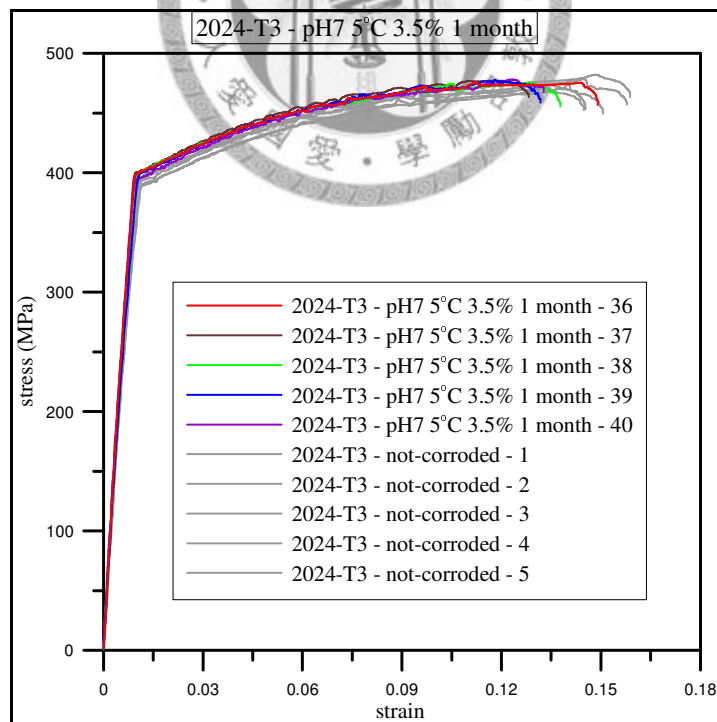
附錄 A.5 pH3 RT 3.5% 腐蝕一個月實驗曲線



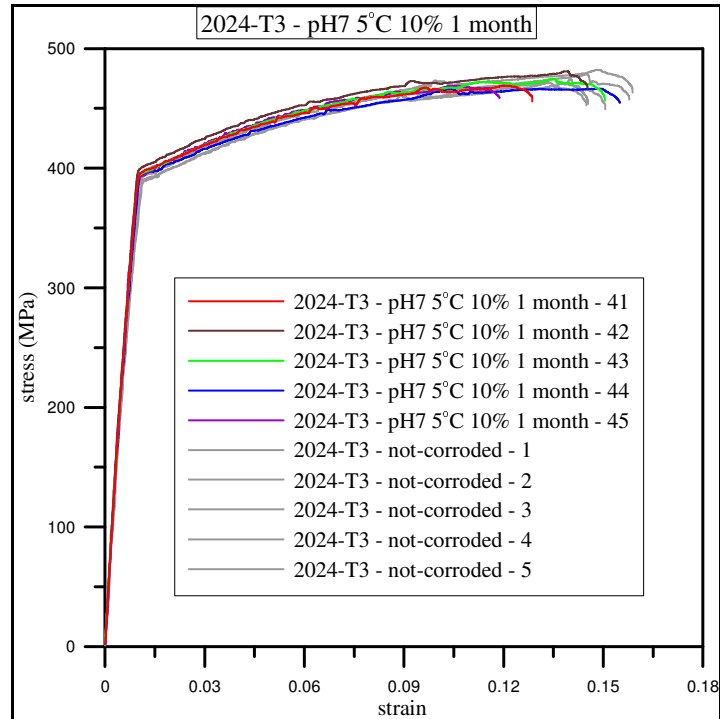
附錄 A.6 pH3 RT 10% 腐蝕一個月實驗曲線



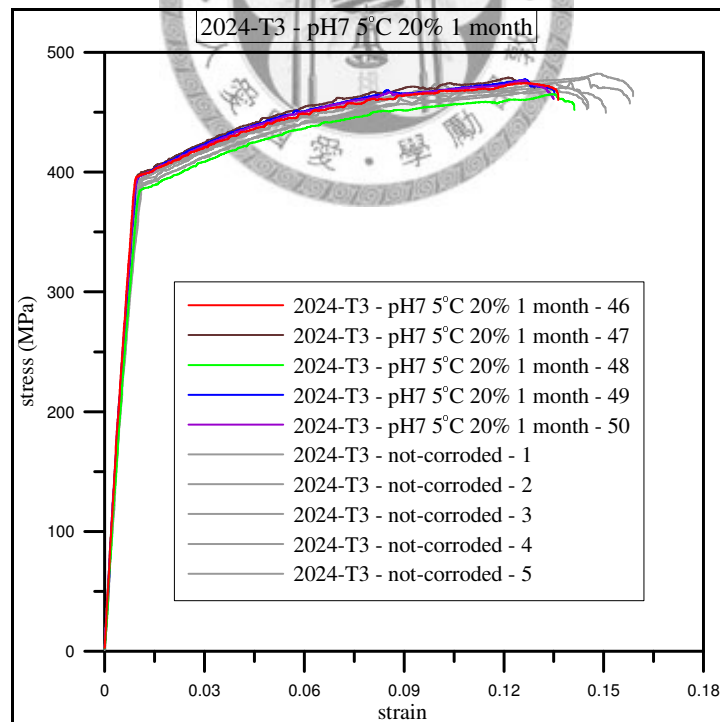
附錄 A.7 pH3 RT 20% 腐蝕一個月實驗曲線



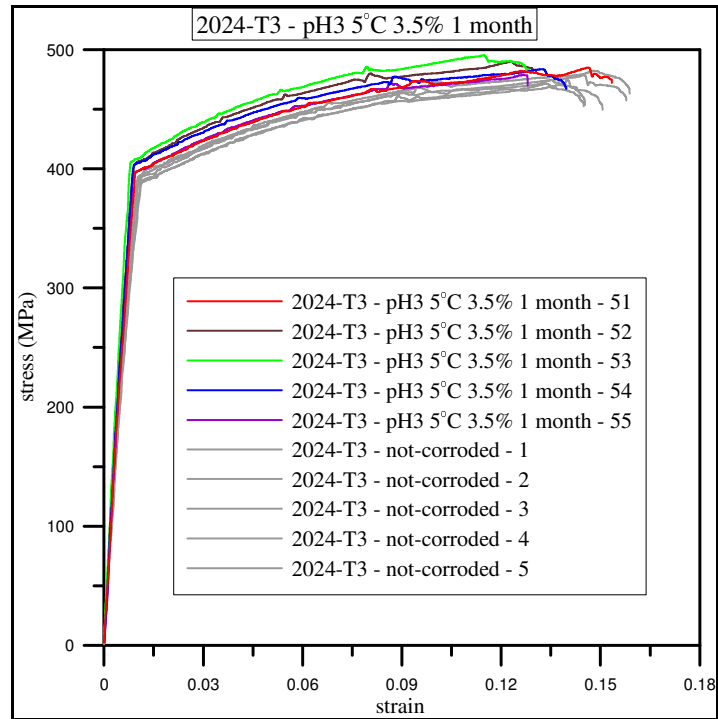
附錄 A.8 pH7 5°C 3.5% 腐蝕一個月實驗曲線



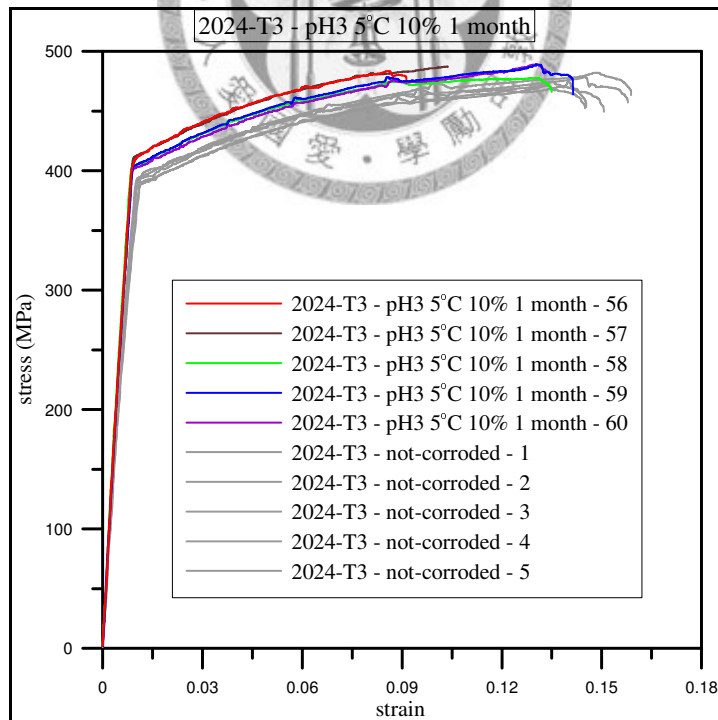
附錄 A.9 pH7 5°C 10% 腐蝕一個月實驗曲線



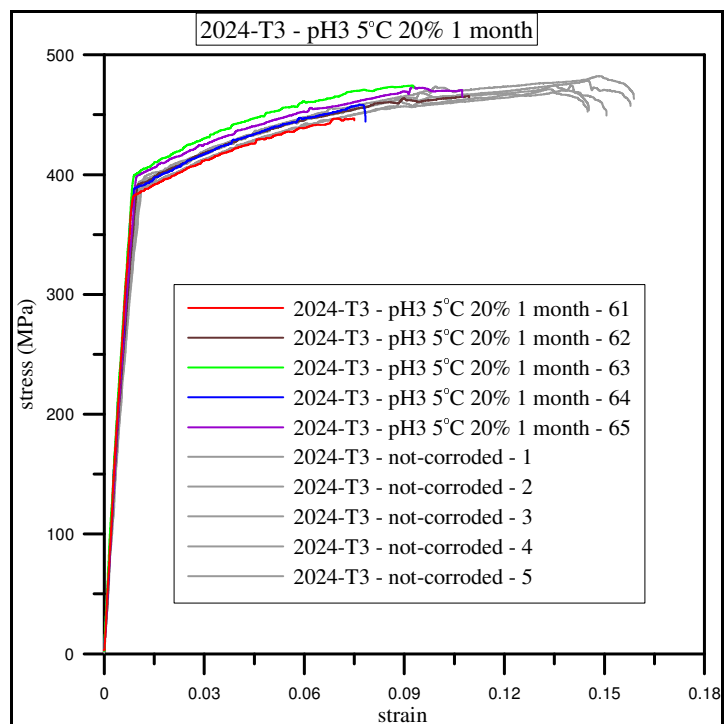
附錄 A.10 pH7 5°C 20% 腐蝕一個月實驗曲線



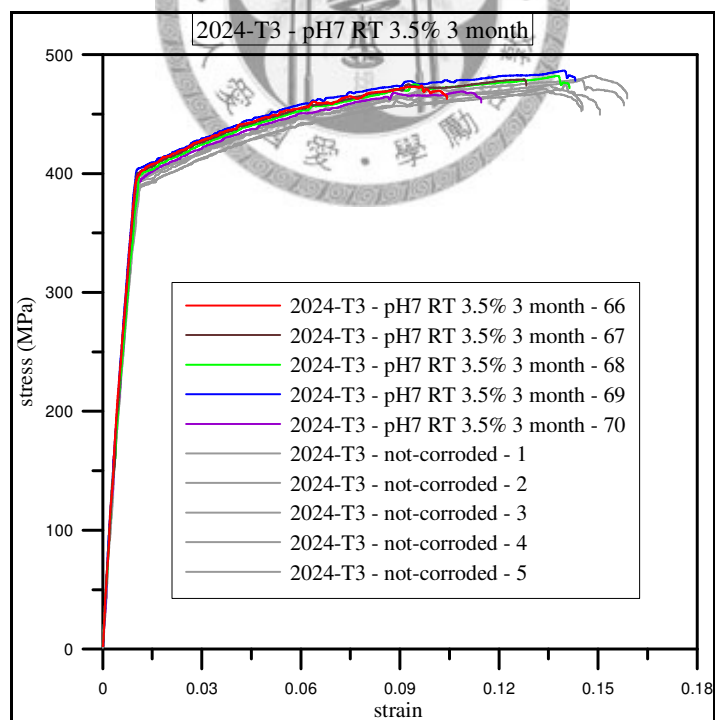
附錄 A.11 pH3 5°C 3.5% 腐蝕一個月實驗曲線



附錄 A.12 pH3 5°C 10% 腐蝕一個月實驗曲線

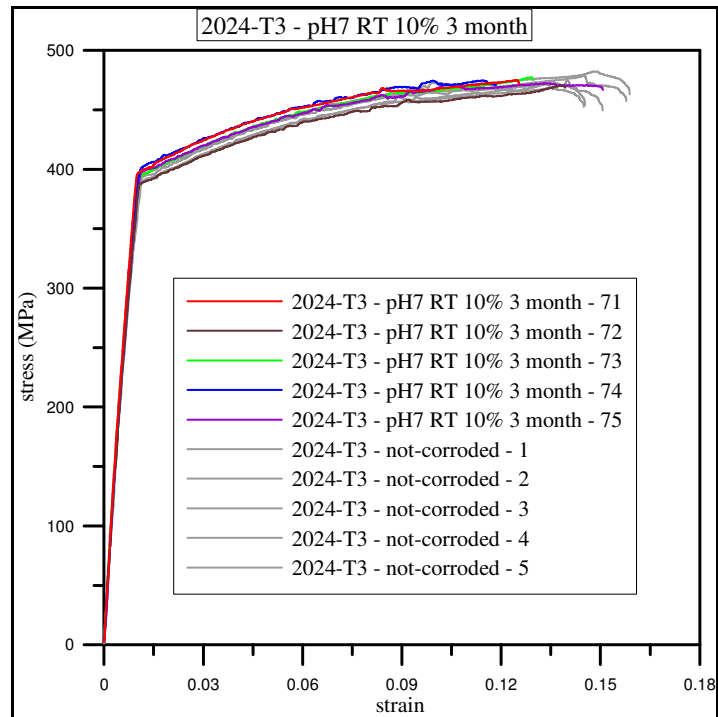


附錄 A.13 pH3 5°C 20% 腐蝕一個月實驗曲線

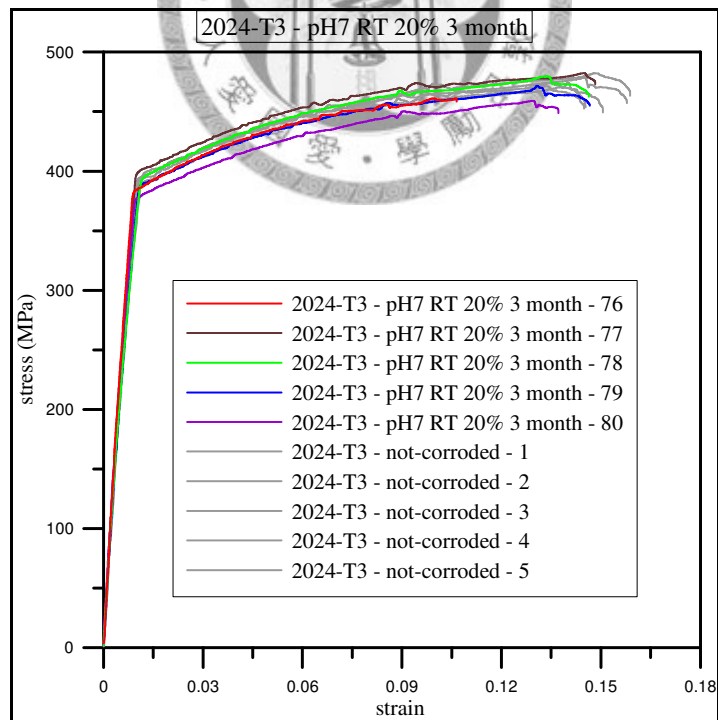


附錄 A.14 pH7 RT 3.5% 腐蝕三個月實驗曲線

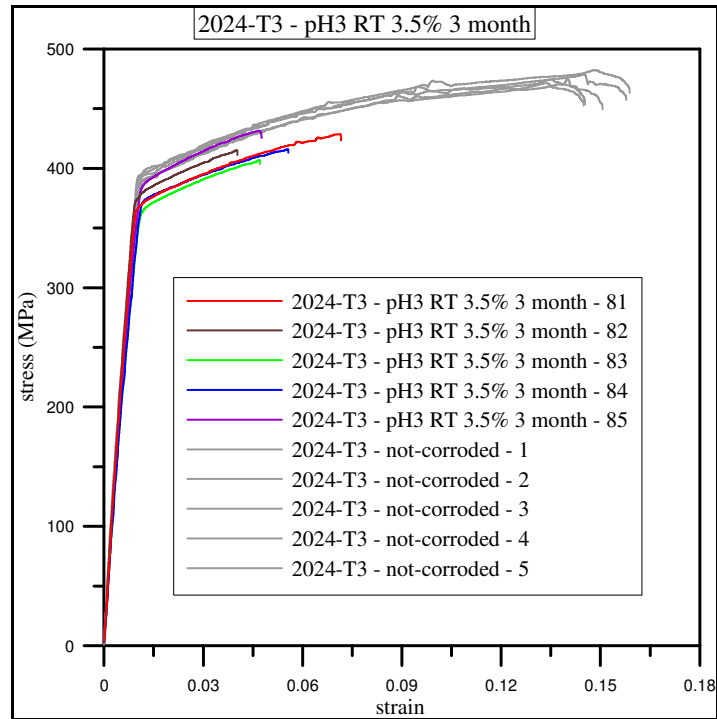




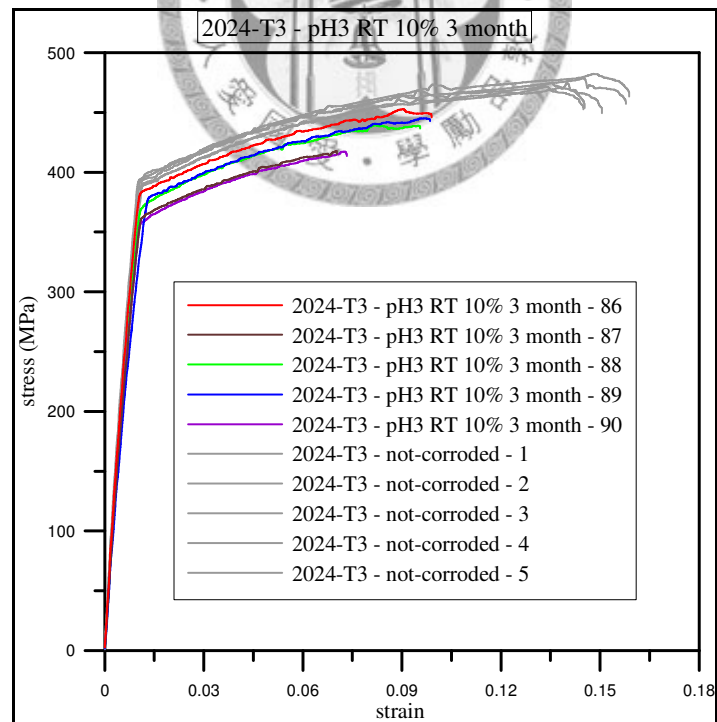
附錄 A.15 pH7 RT 10% 腐蝕三個月實驗曲線



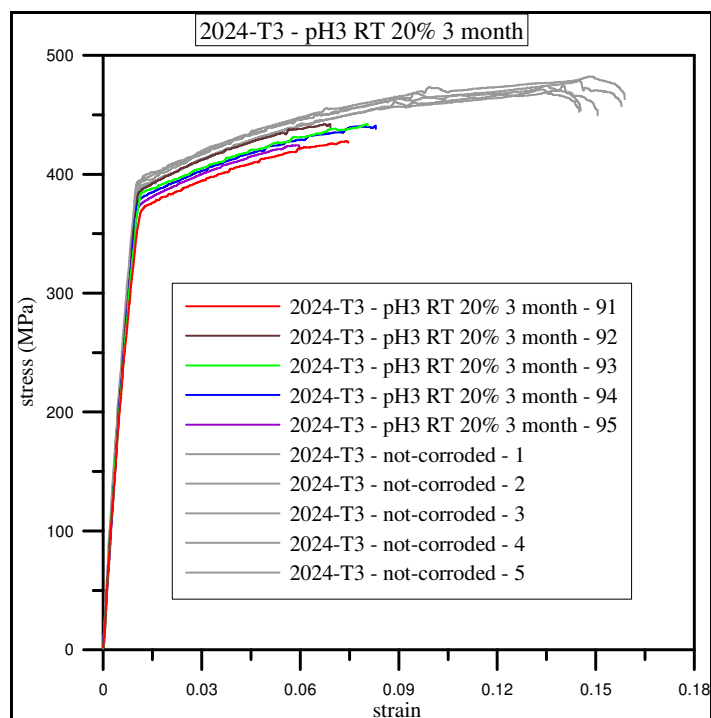
附錄 A.16 pH7 RT 20% 腐蝕三個月實驗曲線



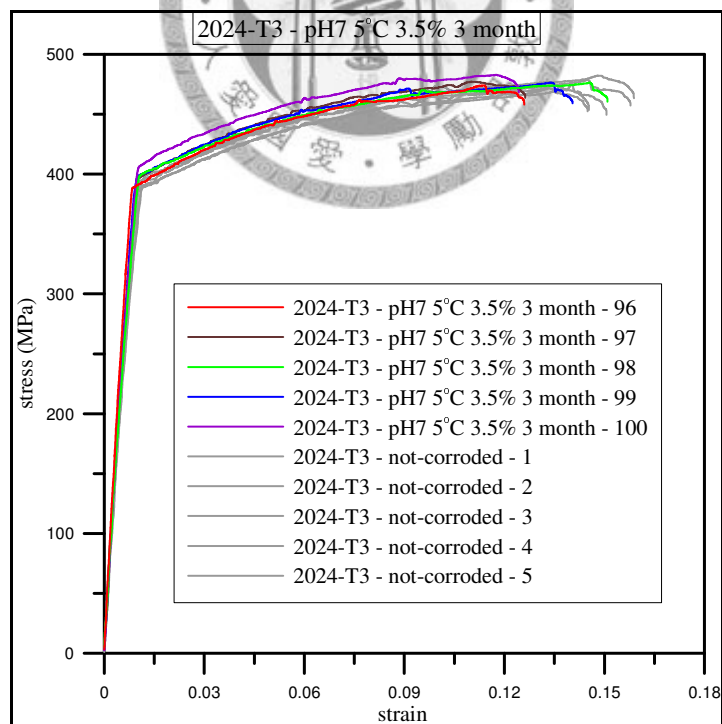
附錄 A.17 pH3 RT 3.5% 腐蝕三個月實驗曲線



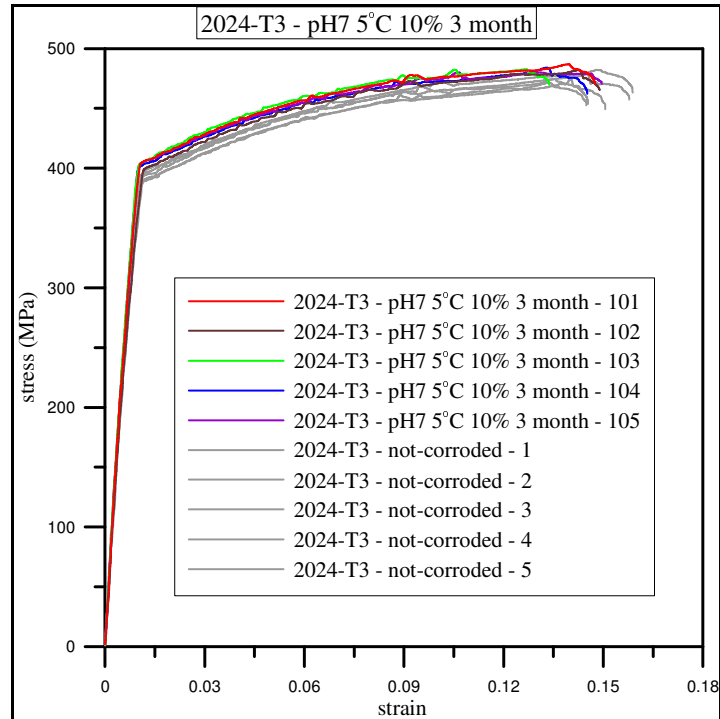
附錄 A.18 pH3 RT 10% 腐蝕三個月實驗曲線



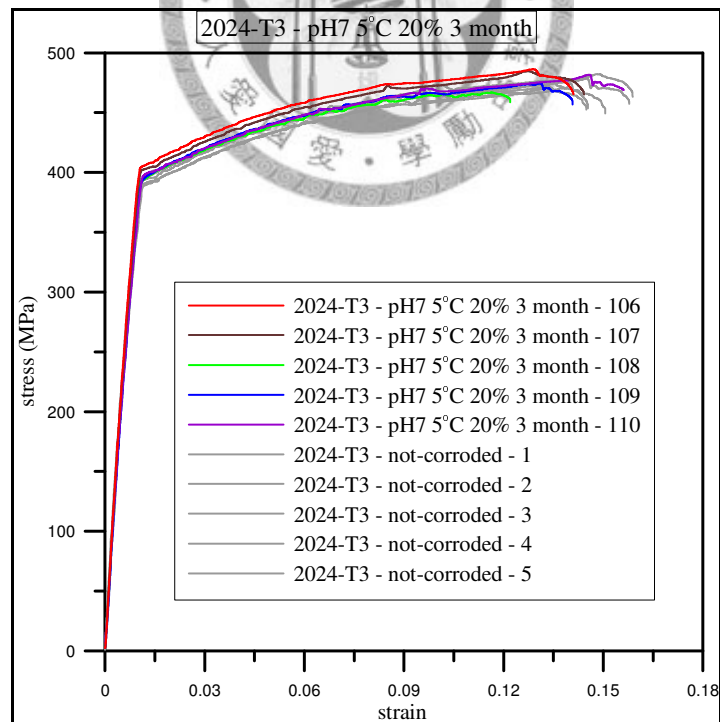
附錄 A.19 pH3 RT 20% 腐蝕三個月實驗曲線



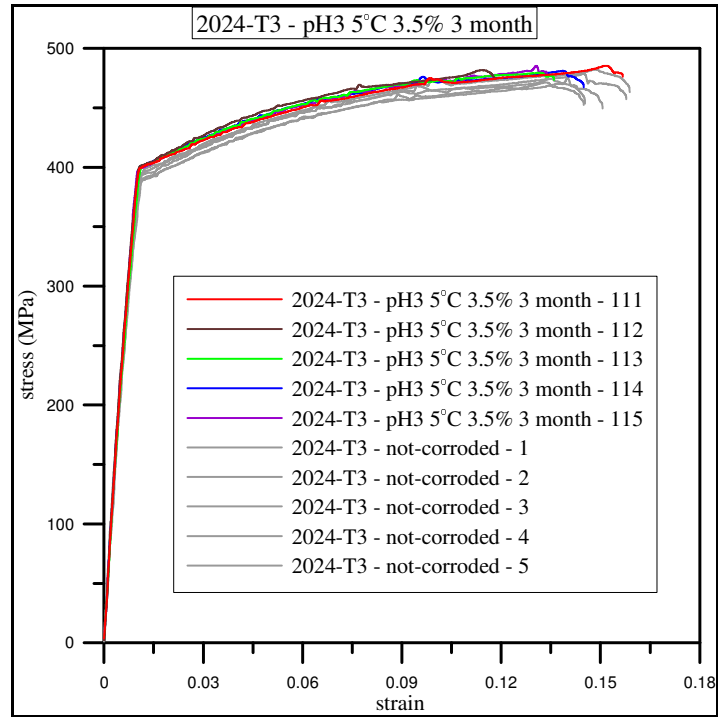
附錄 A.20 pH7 5°C 3.5% 腐蝕三個月實驗曲線



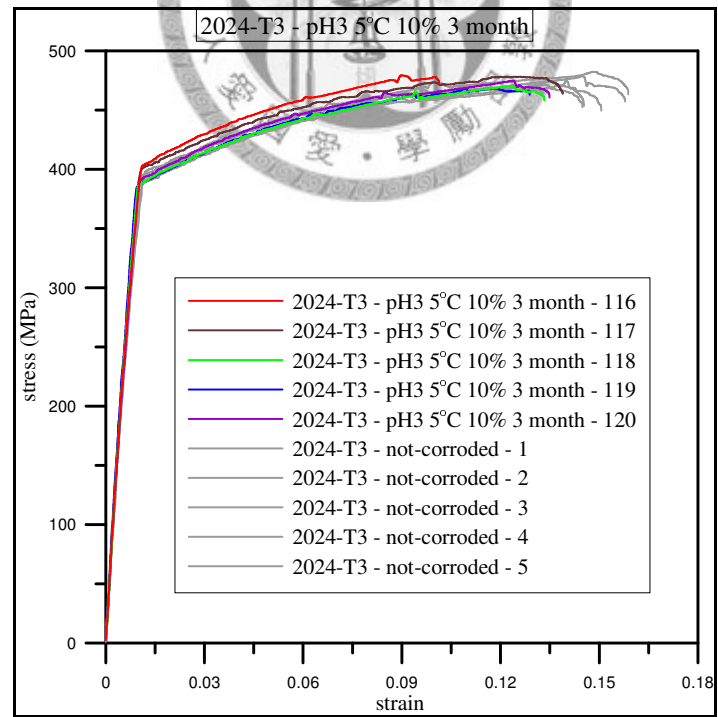
附錄 A.21 pH7 5°C 10% 腐蝕三個月實驗曲線



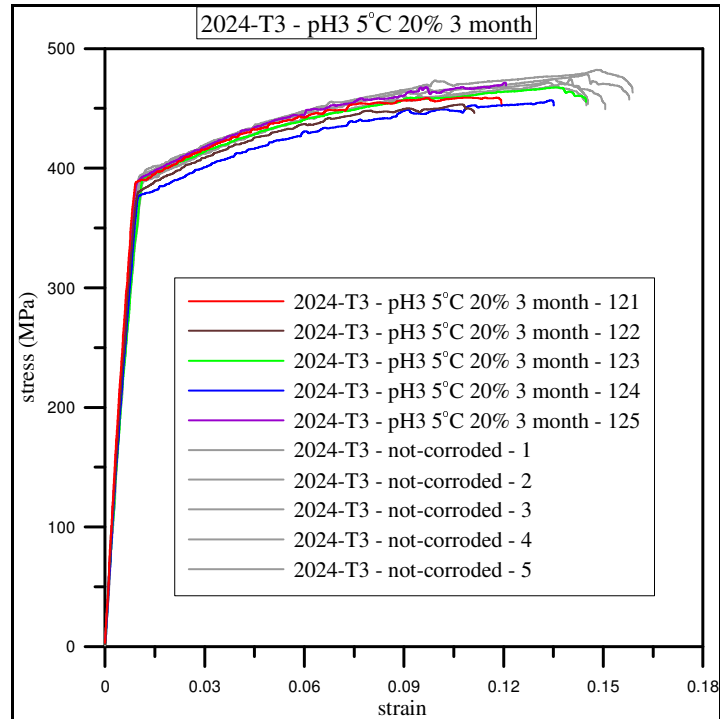
附錄 A.22 pH7 5°C 20% 腐蝕三個月實驗曲線



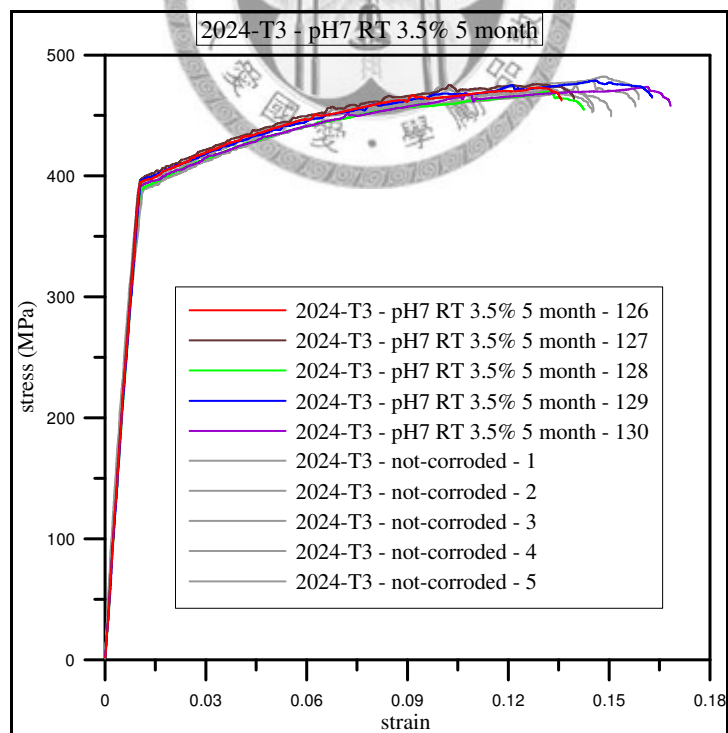
附錄 A.23 pH3 5°C 3.5% 腐蝕三個月實驗曲線



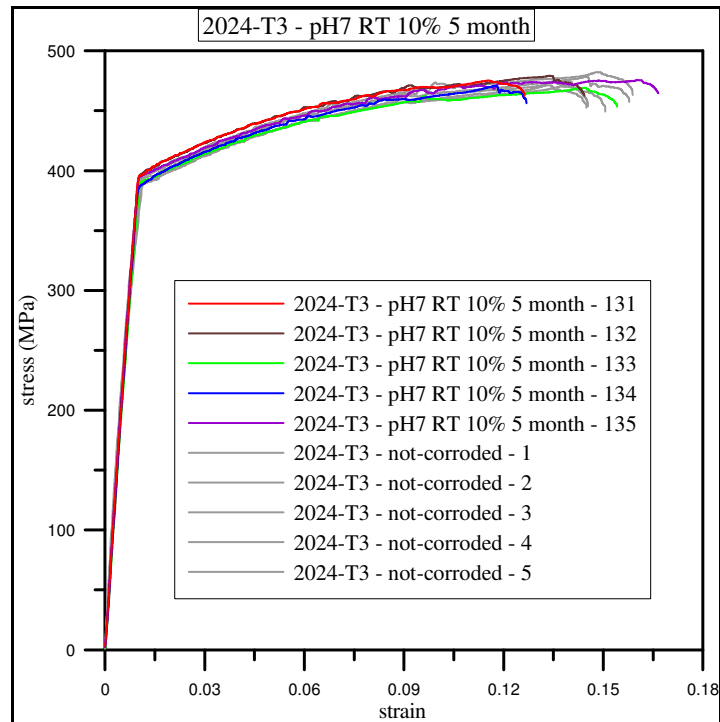
附錄 A.24 pH3 5°C 10% 腐蝕三個月實驗曲線



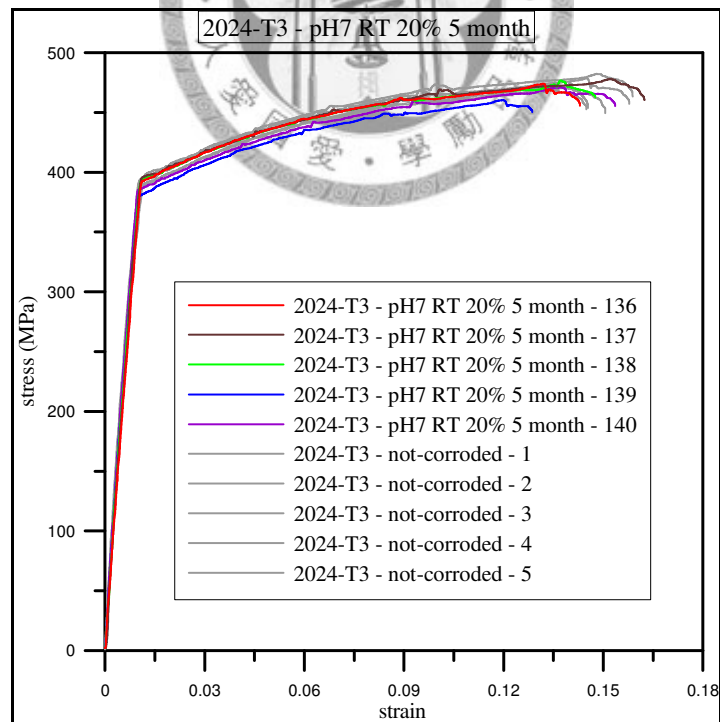
附錄 A.25 pH3 5°C 20% 腐蝕三個月實驗曲線



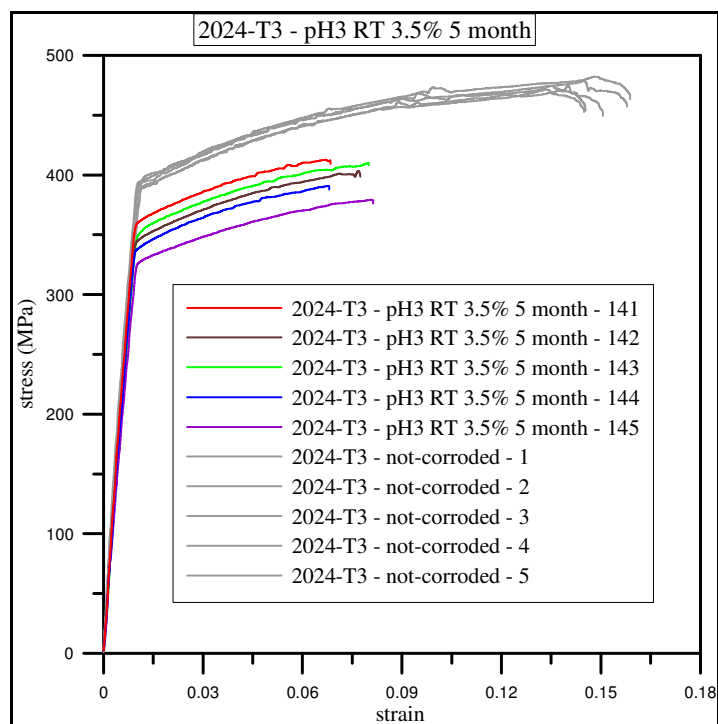
附錄 A.26 pH7 RT 3.5% 腐蝕五個月實驗曲線



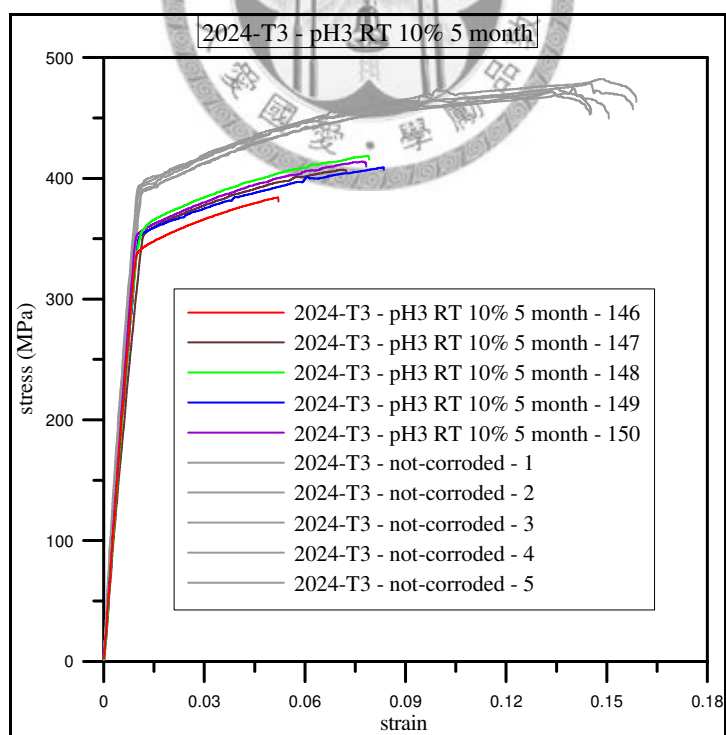
附錄 A.27 pH7 RT 10% 腐蝕五個月實驗曲線



附錄 A.28 pH7 RT 20% 腐蝕五個月實驗曲線

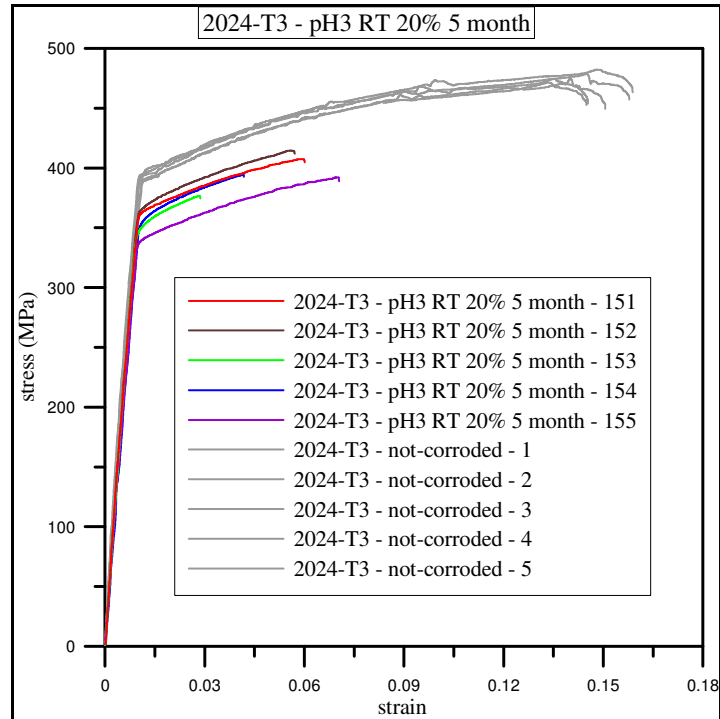


附錄 A.29 pH3 RT 3.5% 腐蝕五個月實驗曲線

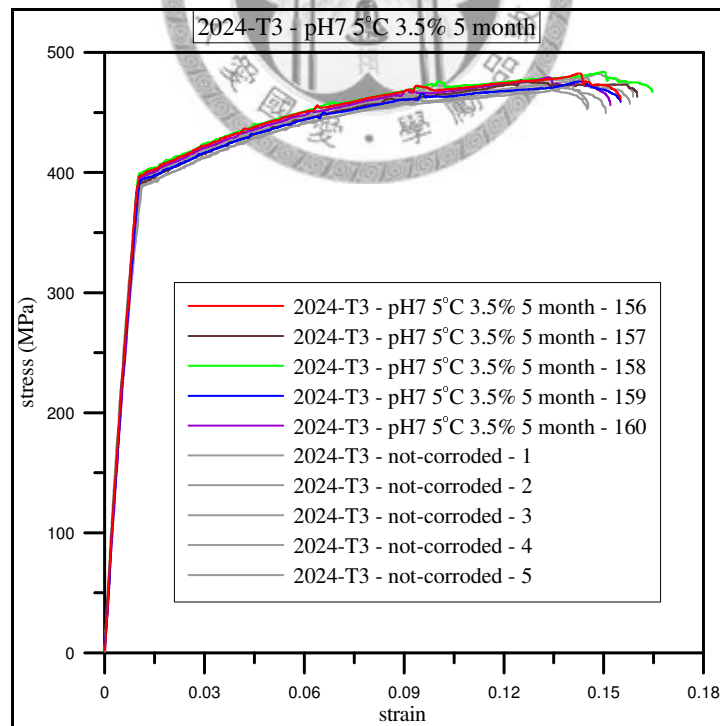


附錄 A.30 pH3 RT 10% 腐蝕五個月實驗曲線

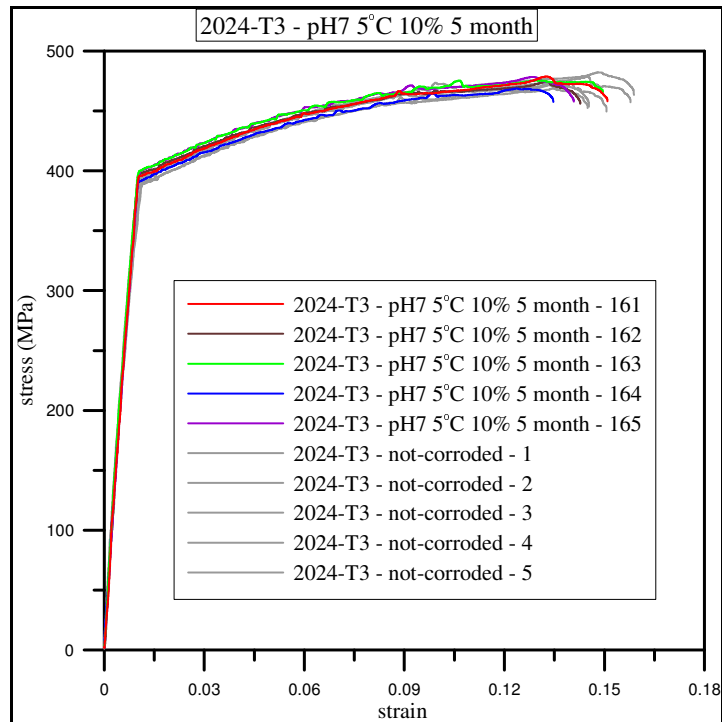




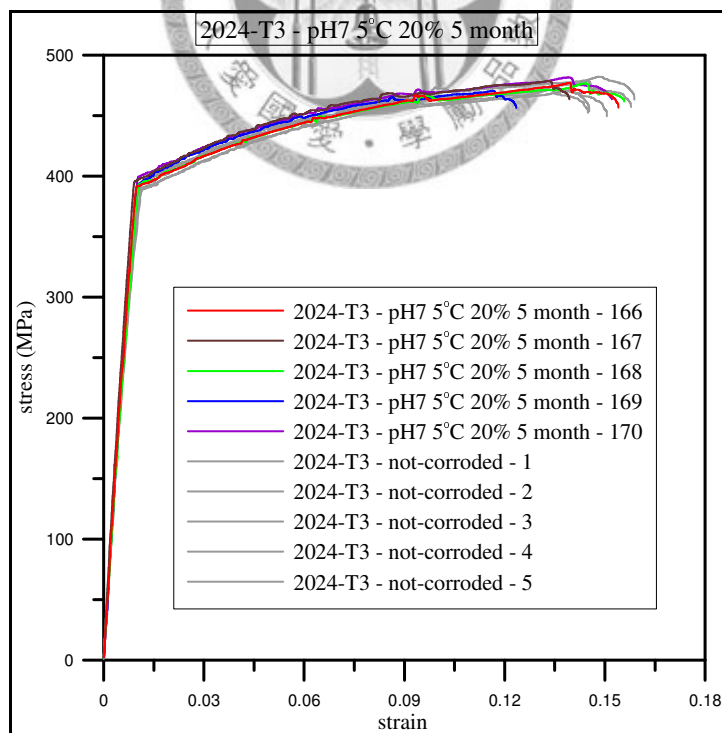
附錄 A.31 pH3 RT 20% 腐蝕五個月實驗曲線



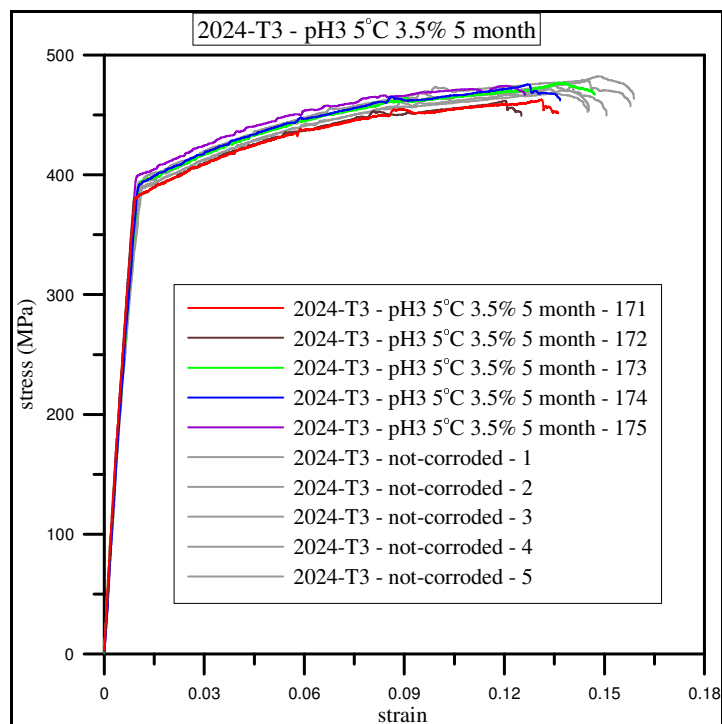
附錄 A.32 pH7 5°C 3.5% 腐蝕五個月實驗曲線



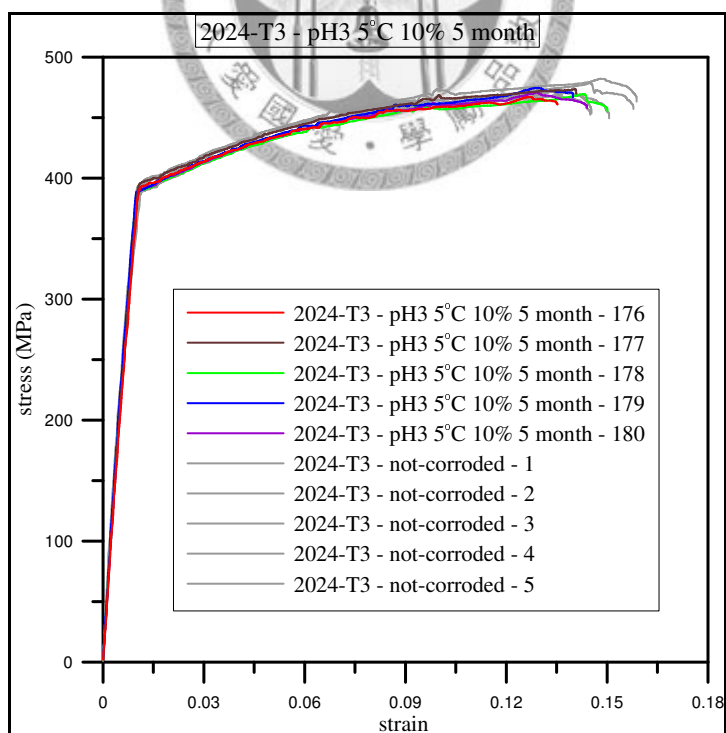
附錄 A.33 pH7 5°C 10% 腐蝕五個月實驗曲線



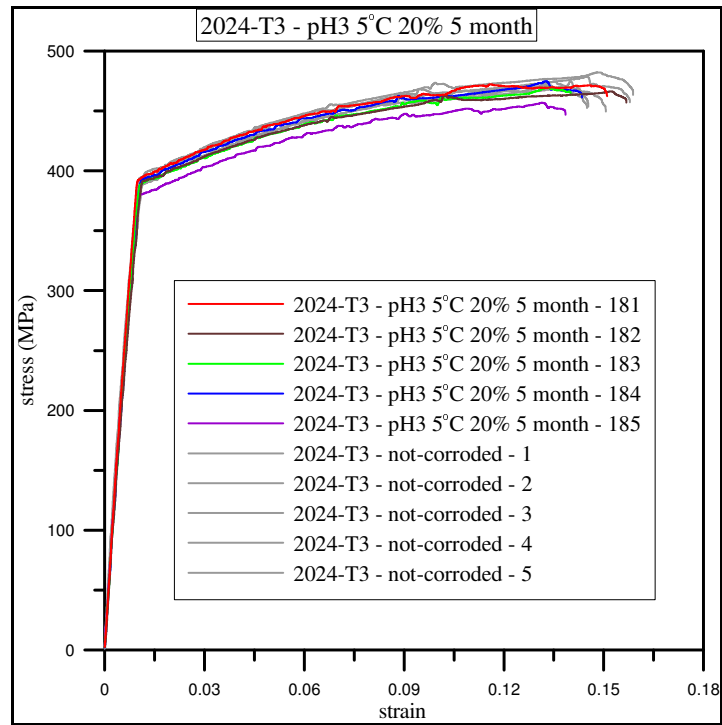
附錄 A.34 pH7 5°C 20% 腐蝕五個月實驗曲線



附錄 A.35 pH3 5°C 3.5% 腐蝕五個月實驗曲線



附錄 A.36 pH3 5°C 10% 腐蝕五個月實驗曲線



附錄 A.37 pH3 5°C 20% 腐蝕五個月實驗曲線



## 附錄 B

### 靜態腐蝕各參數實驗數據表格



附錄 B.1 未腐蝕實驗數據

未腐蝕 編號	1	2	3	4	5	平均
厚度(t)	2.09	2.3	2.31	2.57	2.29	2.31
極限強度(MPa)	478.6	474.6	471.4	482.2	470.8	475.5
斷裂應變(MTS)	0.16	0.15	0.145	0.16	0.15	0.153
斷裂應變(gage L)	0.18	0.18	0.175	0.15	0.18	0.173

附錄 B.2 pH7 RT 3.5% 腐蝕一個月實驗數據

pH7 RT 3.5% 腐蝕一個月 編號	6	7	8	9	10	平均
厚度(t)	1.61	2.05	1.81	1.85	1.61	1.79
極限強度(MPa)	473.8	473.7	475.4	460.8	478.1	472.4
斷裂應變(MTS)	0.14	0.124	0.131	0.12	0.14	0.131
斷裂應變(gage L)	0.184	0.17	0.145	0.158	0.146	0.16

**附錄 B.3 pH7 RT 10% 腐蝕一個月實驗數據**

pH7 RT 10%						
腐蝕一個月 編號	11	12	13	14	15	平均
厚度(t)	2.1	2	2.02	1.82	2.21	2.03
極限強度(MPa)	470.1	473.8	470.9	472.1	481.1	473.6
斷裂應變(MTS)	0.15	0.14	0.146	0.15	0.14	0.145
斷裂應變(gage L)	0.163	0.16	0.162	0.16	0.16	0.161

**附錄 B.4 pH7 RT 20% 腐蝕一個月實驗數據**

pH7 RT 20%						
腐蝕一個月 編號	16	17	18	19	20	平均
厚度(t)	2.31	2.25	2	2.08	2.09	2.15
極限強度(MPa)	476.5	474.7	468.7	473.6	475.8	473.9
斷裂應變(MTS)	0.15	0.14	0.12	0.13	0.14	0.136
斷裂應變(gage L)	0.161	0.161	0.148	0.15	0.146	0.153

**附錄 B.5 pH3 RT 3.5% 腐蝕一個月實驗數據**

pH3 RT 3.5%						
腐蝕一個月 編號	21	22	23	24	25	平均
厚度(t)	1.77	2.04	1.59	1.56	1.59	1.71
極限強度(MPa)	453.2	455.5	460.6	449.4	454.9	454.7
斷裂應變(MTS)	0.098	0.1	0.1	0.085	0.11	0.099
斷裂應變(gage L)	0.12	0.127	0.13	0.11	0.12	0.121

**附錄 B.6 pH3 RT 10% 腐蝕一個月實驗數據**

pH3 RT 10%						
腐蝕一個月 編號	26	27	28	29	30	平均
厚度(t)	3.25	1.85	3.27	1.98	3.24	2.72
極限強度(MPa)	476.3	453.4	468	468.4	467.1	466.64
斷裂應變(MTS)	0.113	0.087	0.1	0.105	0.11	0.103
斷裂應變(gage L)	0.145	0.12	0.11	0.124	0.13	0.126



**附錄 B.7 pH3 RT 20% 腐蝕一個月實驗數據**

pH3 RT 20%						
腐蝕一個月 編號	31	32	33	34	35	平均
厚度(t)	2.47	2.23	1.63	2.06	2.26	2.13
極限強度(MPa)	473.2	468.3	444.8	461.3	457.6	461.1
斷裂應變(MTS)	0.11	0.11	0.09	0.11	0.096	0.103
斷裂應變(gage L)	0.115	0.12	0.1	0.112	0.11	0.11

**附錄 B.8 pH7 5°C 3.5% 腐蝕一個月實驗數據**

pH7 5°C 3.5%						
腐蝕一個月 編號	36	37	38	39	40	平均
厚度(t)	2.01	2.27	2.01	2.28	2.1	2.13
極限強度(MPa)	475.7	477.3	475.4	476.8	478.2	476.68
斷裂應變(MTS)	0.15	0.13	0.138	0.132	0.133	0.137
斷裂應變(gage L)	0.187	0.17	0.16	0.178	0.18	0.175

附錄 B.9 pH7 5°C 10% 腐蝕一個月實驗數據

pH7 5°C 10%						
腐蝕一個月 編號	41	42	43	44	45	平均
厚度(t)	2.27	2.04	2.06	2.27	2.29	2.19
極限強度(MPa)	468.3	480.9	474.6	466.4	468.9	471.8
斷裂應變(MTS)	0.13	0.145	0.15	0.155	0.12	0.14
斷裂應變(gage L)	0.15	0.164	0.18	0.178	0.16	0.166

附錄 B.10 pH7 5°C 20% 腐蝕一個月實驗數據

pH7 5°C 20%						
腐蝕一個月 編號	46	47	48	49	50	平均
厚度(t)	2.01	2.3	2.37	2.27	2.32	2.25
極限強度(MPa)	474.2	478.7	464.9	477.4	476.4	474.3
斷裂應變(MTS)	0.136	0.13	0.14	0.135	0.135	0.135
斷裂應變(gage L)	0.16	0.16	0.162	0.168	0.165	0.163

附錄 B.11 pH3 5°C 3.5% 腐蝕一個月實驗數據

pH3 5°C 3.5%						
腐蝕一個月 編號	51	52	53	54	55	平均
厚度(t)	1.83	2.23	1.71	1.99	2.05	1.96
極限強度(MPa)	482.1	490.1	494.5	483.7	478.5	485.8
斷裂應變(MTS)	0.154	0.13	0.13	0.14	0.13	0.137
斷裂應變(gage L)	0.17	0.189	0.18	0.19	0.178	0.18

附錄 B.12 pH3 5°C 10% 腐蝕一個月實驗數據

pH3 5°C 10%						
腐蝕一個月 編號	56	57	58	59	60	平均
厚度(t)	1.98	2.03	1.99	2.25	1.56	1.96
極限強度(MPa)	480.4	487.4	477.7	487.1	489.2	484.4
斷裂應變(MTS)	0.09	0.1	0.135	0.14	0.133	0.12
斷裂應變(gage L)	0.12	0.133	0.167	0.173	0.158	0.15

附錄 B.13 pH3 5°C 20% 腐蝕一個月實驗數據

pH3 5°C 20%						
腐蝕一個月 編號	61	62	63	64	65	平均
厚度(t)	1.64	2.32	2.01	1.8	1.97	1.95
極限強度(MPa)	446.9	465.5	474.5	458.4	473.5	463.8
斷裂應變(MTS)	0.075	0.11	0.09	0.08	0.11	0.09
斷裂應變(gage L)	0.09	0.124	0.12	0.094	0.12	0.11

附錄 B.14 pH7 RT 3.5% 腐蝕三個月實驗數據

pH7 RT 3.5%						
腐蝕三個月 編號	66	67	68	69	70	平均
厚度(t)	1.99	2.01	2.28	1.97	2.04	2.06
極限強度(MPa)	474	479.3	482.1	486.7	468.1	478
斷裂應變(MTS)	0.1	0.128	0.14	0.14	0.115	0.125
斷裂應變(gage L)	0.13	0.16	0.17	0.176	0.146	0.156

**附錄 B.15 pH7 RT 10% 腐蝕三個月實驗數據**

pH7 RT 10%						
腐蝕三個月 編號	71	72	73	74	75	平均
厚度(t)	1.98	2.13	2.11	2.02	2.26	2.1
極限強度(MPa)	474.9	470.3	477.1	474.8	472.2	473.9
斷裂應變(MTS)	0.13	0.14	0.13	0.12	0.15	0.134
斷裂應變(gage L)	0.176	0.169	0.16	0.137	0.17	0.162

**附錄 B.16 pH7 RT 20% 腐蝕三個月實驗數據**

pH7 RT 20%						
腐蝕三個月 編號	76	77	78	79	80	平均
厚度(t)	1.64	2.03	2.57	2.3	1.87	2.08
極限強度(MPa)	461.2	481.4	479.5	471.7	459	470.76
斷裂應變(MTS)	0.11	0.15	0.146	0.147	0.137	0.138
斷裂應變(gage L)	0.14	0.16	0.166	0.175	0.166	0.161

附錄 B.17 pH3 RT 3.5% 腐蝕三個月實驗數據

pH3 RT 3.5%						
腐蝕三個月 編號	81	82	83	84	85	平均
厚度(t)	1.55	1.98	2.06	2.02	2.19	1.96
極限強度(MPa)	428.6	415.3	406.7	416.1	431.6	419.7
斷裂應變(MTS)	0.07	0.04	0.05	0.056	0.05	0.053
斷裂應變(gage L)	0.07	0.06	0.066	0.078	0.06	0.067

附錄 B.18 pH3 RT 10% 腐蝕三個月實驗數據

pH3 RT 10%						
腐蝕三個月 編號	86	87	88	89	90	平均
厚度(t)	2.27	2.31	2.29	3.3	2.11	2.46
極限強度(MPa)	452.8	417.7	439.4	445.2	417.3	434.5
斷裂應變(MTS)	0.099	0.07	0.096	0.099	0.073	0.087
斷裂應變(gage L)	0.1	0.075	0.11	0.087	0.086	0.092

附錄 B.19 pH3 RT 20% 腐蝕三個月實驗數據

pH3 RT 20%						
腐蝕三個月 編號	91	92	93	94	95	平均
厚度(t)	2.32	2.05	2.02	2.06	2.11	2.11
極限強度(MPa)	427.8	442.2	442.1	440.8	424.4	435.5
斷裂應變(MTS)	0.075	0.069	0.08	0.083	0.06	0.073
斷裂應變(gage L)	0.066	0.062	0.065	0.07	0.06	0.065

附錄 B.20 pH7 5°C 3.5% 腐蝕三個月實驗數據

pH7 5°C 3.5%						
腐蝕三個月 編號	96	97	98	99	100	平均
厚度(t)	1.65	2.06	2.02	2.01	1.95	1.94
極限強度(MPa)	474.1	477.2	476.3	476.3	482.8	477.3
斷裂應變(MTS)	0.13	0.13	0.15	0.14	0.12	0.134
斷裂應變(gage L)	0.16	0.16	0.17	0.185	0.16	0.167

**附錄 B.21 pH7 5°C 10% 腐蝕三個月實驗數據**

pH7 5°C 10%						
腐蝕三個月 編號	101	102	103	104	105	平均
厚度(t)	2.26	2.57	2.2	1.99	2	2.2
極限強度(MPa)	487	482.4	482.6	484	480.2	483.2
斷裂應變(MTS)	0.15	0.15	0.13	0.145	0.15	0.145
斷裂應變(gage L)	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.168

**附錄 B.22 pH7 5°C 20% 腐蝕三個月實驗數據**

pH7 5°C 20%						
腐蝕三個月 編號	106	107	108	109	110	平均
厚度(t)	2.17	2.26	2	2.09	2.3	2.16
極限強度(MPa)	486.4	484.8	466.9	474.1	481.8	478.8
斷裂應變(MTS)	0.14	0.145	0.12	0.141	0.16	0.14
斷裂應變(gage L)	0.17	0.17	0.15	0.172	0.16	0.164



附錄 B.23 pH3 5°C 3.5% 腐蝕三個月實驗數據

pH3 5°C 3.5%						
腐蝕三個月 編號	111	112	113	114	115	平均
厚度(t)	2.07	2.28	2.24	1.98	1.78	2.07
極限強度(MPa)	485.3	481.8	479.5	481.1	485.2	482.6
斷裂應變(MTS)	0.16	0.12	0.14	0.145	0.13	0.139
斷裂應變(gage L)	0.16	0.144	0.16	0.16	0.15	0.155

附錄 B.24 pH3 5°C 10% 腐蝕三個月實驗數據

pH3 5°C 10%						
腐蝕三個月 編號	116	117	118	119	120	平均
厚度(t)	2.22	1.98	1.83	1.61	1.65	1.86
極限強度(MPa)	479.3	478.1	470	468.1	474.7	474
斷裂應變(MTS)	0.1	0.14	0.13	0.13	0.135	0.127
斷裂應變(gage L)	0.12	0.16	0.12	0.14	0.16	0.14

**附錄 B.25 pH3 5°C 20% 腐蝕三個月實驗數據**

pH3 5°C 20%						
腐蝕三個月 編號	121	122	123	124	125	平均
厚度(t)	2.01	2.08	2.23	1.84	1.62	1.96
極限強度(MPa)	459	453.4	467.5	456.8	471.5	461.6
斷裂應變(MTS)	0.12	0.11	0.145	0.135	0.12	0.126
斷裂應變(gage L)	0.147	0.14	0.14	0.13	0.134	0.138

**附錄 B.26 pH7 RT 3.5% 腐蝕五個月實驗數據**

pH7 RT 3.5%						
腐蝕五個月 編號	126	127	128	129	130	平均
厚度(t)	2.27	2.04	2.09	2.07	2.05	2.1
極限強度(MPa)	473.2	476	469.8	478.9	473.3	474.3
斷裂應變(MTS)	0.136	0.14	0.142	0.163	0.168	0.15
斷裂應變(gage L)	0.154	0.142	0.164	0.162	0.171	0.159

附錄 B.27 pH7 RT 10% 腐蝕五個月實驗數據

pH7 RT 10%						
腐蝕五個月 編號	131	132	133	134	135	平均
厚度(t)	2	2.28	2.27	1.58	2.08	2.04
極限強度(MPa)	475.2	479.3	469.2	470.8	475.7	474.1
斷裂應變(MTS)	0.126	0.144	0.154	0.127	0.167	0.144
斷裂應變(gage L)	0.152	0.164	0.157	0.143	0.16	0.155

附錄 B.28 pH7 RT 20% 腐蝕五個月實驗數據

pH7 RT 20%						
腐蝕五個月 編號	136	137	138	139	140	平均
厚度(t)	2.27	2.29	2.28	1.64	1.61	2.02
極限強度(MPa)	474	477.9	476.8	460.2	466.1	471
斷裂應變(MTS)	0.143	0.162	0.148	0.129	0.154	0.147
斷裂應變(gage L)	0.166	0.169	0.163	0.159	0.168	0.165

附錄 B.29 pH3 RT 3.5% 腐蝕五個月實驗數據

pH3 RT 3.5%						
腐蝕五個月 編號	141	142	143	144	145	平均
厚度(t)	2.04	1.9	2.05	2.09	2.18	2.05
極限強度(MPa)	412.7	401.1	410	390.7	379.2	398.7
斷裂應變(MTS)	0.068	0.077	0.08	0.068	0.081	0.075
斷裂應變(gage L)	0.075	0.076	0.083	0.088	0.079	0.08

附錄 B.30 pH3 RT 10% 腐蝕五個月實驗數據

pH3 RT 10%						
腐蝕五個月 編號	146	147	148	149	150	平均
厚度(t)	1.96	3.24	2.49	2.33	1.58	2.32
極限強度(MPa)	384.2	406.7	418.6	409.1	413.8	406.5
斷裂應變(MTS)	0.052	0.072	0.08	0.083	0.078	0.073
斷裂應變(gage L)	0.054	0.072	0.078	0.08	0.079	0.073

附錄 B.31 pH3 RT 20% 腐蝕五個月實驗數據

pH3 RT 20%						
腐蝕五個月 編號	151	152	153	154	155	平均
厚度(t)	2.08	2.09	1.98	2.49	1.97	2.12
極限強度(MPa)	407.5	414.6	376.7	394.3	392.1	397
斷裂應變(MTS)	0.06	0.057	0.03	0.042	0.07	0.052
斷裂應變(gage L)	0.066	0.062	0.043	0.06	0.067	0.06

附錄 B.32 pH7 5°C 3.5% 腐蝕五個月實驗數據

pH7 5°C 3.5%						
腐蝕五個月 編號	156	157	158	159	160	平均
厚度(t)	2.33	1.61	2.27	2.32	2.29	2.16
極限強度(MPa)	482.6	476.8	483.8	475.9	479.3	479.7
斷裂應變(MTS)	0.155	0.16	0.165	0.155	0.152	0.157
斷裂應變(gage L)	0.16	0.173	0.184	0.171	0.179	0.173

**附錄 B.33 pH7 5°C 10% 腐蝕五個月實驗數據**

pH7 5°C 10%						
腐蝕五個月 編號	161	162	163	164	165	平均
厚度(t)	2.31	2.23	2.02	2.06	2.24	2.17
極限強度(MPa)	478.8	474.4	475.5	468.7	478.3	475.1
斷裂應變(MTS)	0.15	0.143	0.15	0.135	0.14	0.144
斷裂應變(gage L)	0.164	0.161	0.171	0.153	0.165	0.163

**附錄 B.34 pH7 5°C 20% 腐蝕五個月實驗數據**

pH7 5°C 20%						
腐蝕五個月 編號	166	167	168	169	170	平均
厚度(t)	2.09	2.02	2.32	1.99	2.23	2.13
極限強度(MPa)	477.1	478.7	476.7	470.1	481.7	476.8
斷裂應變(MTS)	0.154	0.139	0.156	0.123	0.152	0.145
斷裂應變(gage L)	0.177	0.176	0.174	0.167	0.18	0.175

附錄 B.35 pH3 5°C 3.5% 腐蝕五個月實驗數據

pH3 5°C 3.5%						
腐蝕五個月 編號	171	172	173	174	175	平均
厚度(t)	2.08	2.09	2.61	2.56	2.23	2.31
極限強度(MPa)	462.8	461.7	477	475.5	474.3	470.3
斷裂應變(MTS)	0.136	0.125	0.147	0.137	0.126	0.134
斷裂應變(gage L)	0.148	0.152	0.156	0.16	0.145	0.152

附錄 B.36 pH3 5°C 10% 腐蝕五個月實驗數據

pH3 5°C 10%						
腐蝕五個月 編號	176	177	178	179	180	平均
厚度(t)	2.26	2.02	2.09	1.61	2.29	2.05
極限強度(MPa)	467.2	473.5	469.5	474.6	470.8	471.1
斷裂應變(MTS)	0.135	0.14	0.15	0.14	0.144	0.142
斷裂應變(gage L)	0.133	0.138	0.161	0.142	0.15	0.145

**附錄 B.37 pH3 5°C 20% 腐蝕五個月實驗數據**

pH3 5°C 20%						
腐蝕五個月 編號	181	182	183	184	185	平均
厚度(t)	2.03	2.25	2.07	2.29	2.09	2.15
極限強度(MPa)	472.2	466.2	469.5	474.8	456.8	467.9
斷裂應變(MTS)	0.151	0.157	0.14	0.143	0.138	0.146
斷裂應變(gage L)	0.177	0.161	0.114	0.152	0.152	0.151

