

隨機負荷下鋼鐵在充氫環境中腐蝕疲勞之研究

Corrosion Fatigue of Steels in Hydrogen Charging Environment under Random Loading

計畫編號：NSC 83-0405-E-002-17

執行期限：80/02/01-83/01/31

主 持 人：陳立業 臺灣大學材料科學與工程學研究所教授

協同主持人：單秋成 臺灣大學機械工程學系教授

一、中文摘要

(關鍵詞：氫脆、隨機負荷、疲勞裂縫成長速率)

本研究目的在模擬含疲勞裂縫之鋼鐵構件置於氫脆破壞環境中，承受接近實際應力狀況之不等振幅負荷時破壞之情形。實驗中先製造出隨機訊號，以模擬構件在實際應用時所受到之隨機負荷，並給予電解充氫之環境，探討究其腐蝕疲勞裂縫成長之行爲。在未來研究，將以統計方法評估疲勞壽命，建立一套便利的預估模式，而可不經實驗分析直接估算疲勞壽命。使工程上之構件設計，提供一安全、經濟的方法。

本研究初期，成功地設立一完善的隨機負荷疲勞試驗系統。充氫環境中疲勞裂縫成長速率明顯比空氣中提升不少。同樣在充氫環境中，由於隨機負荷中有較小的振幅，較不能促進裂縫成長，所以在相同的裂縫成長範圍內，隨機負荷之疲勞壽命相較常振幅之疲勞壽命來得長。

英文摘要

(Keywords: random loading, hydrogen embrittlement, corrosion fatigue crack propaga-

tion.)

The objective of this project is to study the corrosion fatigue crack propagation (CFCP) behaviors of AISI 4130 steels under random loading. Electrolytic hydrogen charging environment was used in all tests. In addition to experiment evaluation, a cheap and accurate fatigue system under random loading has been established. In future work, statistical models to provide a potential tool for corrosion fatigue life prediction will be established.

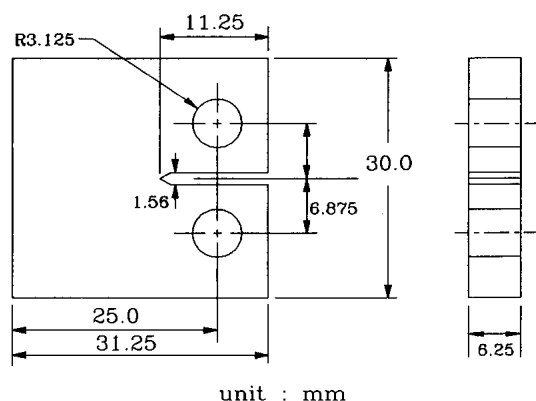
When fatigue-tested in hydrogen charging environment, the FCP rate was accelerated as compared by that tested in air, regardless of types of amplitude. The fatigue life of hydrogen charged specimens tested under random loading was longer than that of specimens tested under a constant amplitude, because of an average lower amplitude appeared in random loading.

二、計畫緣由與目的

在導致結構物破壞或機械系統失效之諸多因素中，金屬疲勞破壞是主要原因之一。尤其構件

表 1 AISI 4130成份分析表

| 元 素 | C | Si | Mn | P | S | Cu | Mo | Ni | Cr | Fe |
|--------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 成 份 (wt%) | 0.29 | 0.2 | 0.41 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.15 | 0.04 | 0.99 | Bal |



圖一 疲勞試片尺寸圖(compact tension type)。

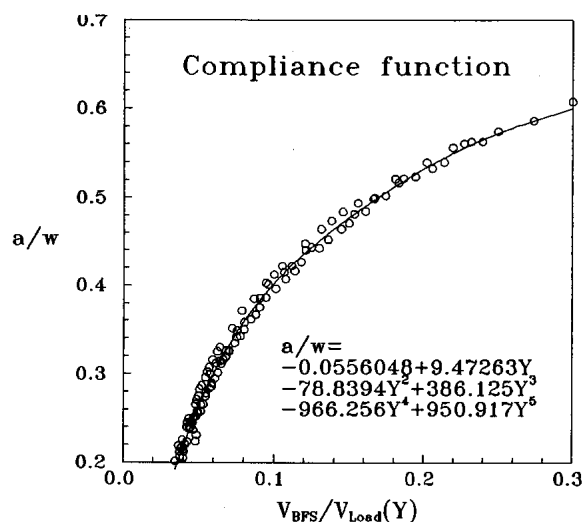
常常暴露在腐蝕環境下，縮短了疲勞壽命更助長了疲勞裂縫的成長，加重了疲勞問題的嚴重性。因此，研究疲勞裂縫成長速率與各變數之間的關係，無論是對於科學研究或工程應用，一直是相當值得探討的題材。在模擬真實情況方面，已有不少研究投入探討金屬在空氣中受隨機負荷之疲勞現象，然而對於構件同時承受隨機負荷和腐蝕環境作用時，其疲勞裂縫成長的行為的研究，仍是付之闕如。

本研究計劃之目的，在於探討AISI 4130鋼其原材組織（肥粒鐵 / 波來鐵帶狀組織，ferrite / pearlite banded structure）在充氫環境下承受隨機負荷時之疲勞行為。實驗中須設立了一隨機負荷疲勞試驗系統進行測試，並以常振幅下疲勞試驗之數據作為依據，在未來研究中，運用統計方法有效地評估疲勞壽命。

三、研究方法及成果

研究方法

3.1 試片製作



圖二 試片背面貼應變規量測裂縫校正所得之關係圖。

本研究中所使用的材料為控制軋延 (Controlled rolling) 後的AISI 4130高強度鋼板，其厚度約32mm。利用X-ray螢光(XRF)分析其化學成分，結果示於表一。原材組織為典型的肥粒鐵及波來鐵排列成層狀的帶狀組織。

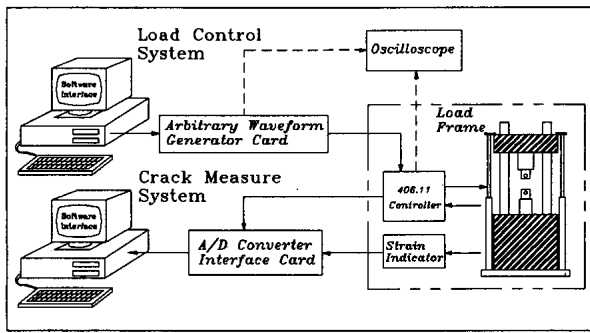
將原材依S-L方向取向，直接加工疲勞試片。本實驗所採用的疲勞試片型態為CT (Compact tension) 型態試片，其尺寸示於圖一。

3.2 裂縫量測系統

本實驗在試片的背面(Back face)貼上應變規 (Strain gage)，利用撓度方式 (Compliance method) 來量測裂縫。隨著裂縫長度的不同，試片的剛性也隨之改變（其校正所得關係式示於圖二）。如此，可在腐蝕溶液中量得裂縫長度。

3.3 隨機負荷試驗系統

本實驗所採用的方法，乃是先行計算隨機荷



圖三 隨機負荷疲勞試驗系統架構示意圖。

重的若干統計量，再利用這些統計量再重新製造出荷重歷史。使用此種方法製造荷重歷史的統計量，大致可分為二種：其一為峰谷值分佈函數，另一為能量密度頻譜函數等。本實驗所採用的乃是峰谷值分佈函數。其方式程如下：

$$p(x) = \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2(1-\beta)}\right] + \frac{x\sqrt{\beta}}{2\sigma^2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sigma} \sqrt{\frac{\beta}{2(1-\beta)}}\right)\right] \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$\beta = \left(\frac{N_0}{M}\right)^2$$

式中 x 為高斯分佈瞬間值 (Gaussian distributed instantaneous values), σ 為標準差, $p(x)$ 為峰谷值機率密度函數, 則是決定函數分佈情形的唯一參數。

隨機荷重的峰谷值即是利用平均荷重加減此隨機變數而得；在本實驗中並不是在實驗當時由電腦立即取隨機變數, 而是在實驗之前先行計算。以此法製造的荷重歷史, 分別儲存在 50 個檔案之中, 每個檔案包含約 3000 個循環週次, 在實驗中隨機抽取一個檔案, 當資料結束時再抽取另一檔案。本實驗中, 製造出一組平均荷重為 2.3KN 的隨機荷重訊號, 其 β 值為 0.9。變數 x 呈 Normal 分佈。

隨機訊號產生後, 再利用任意波型產生介面

卡 (Arbitrary waveform generator interface card) 將訊號傳給疲勞試驗機的控制器, 如此可對試片施以隨機負荷, 完成整個系統的連接。隨機負荷疲勞試驗系統架構示於圖三。

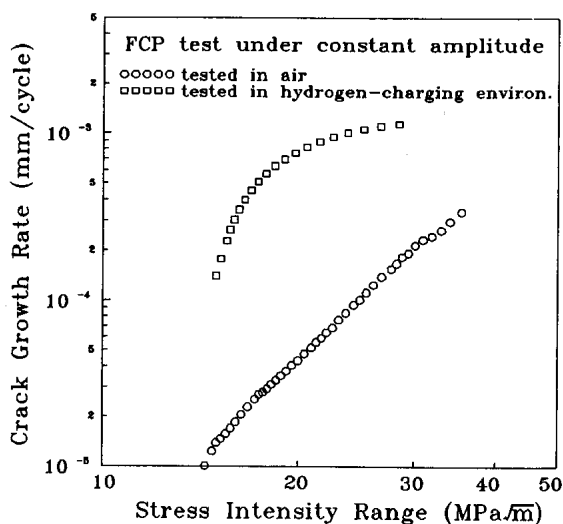
3.4 實驗方法

在空氣中進行疲勞試驗, 主要目的是在完成撓度方式裂縫量測方法, 即找出裂縫長度與剛性變化的關係式。並作為比較腐蝕疲勞行為之參考依據。

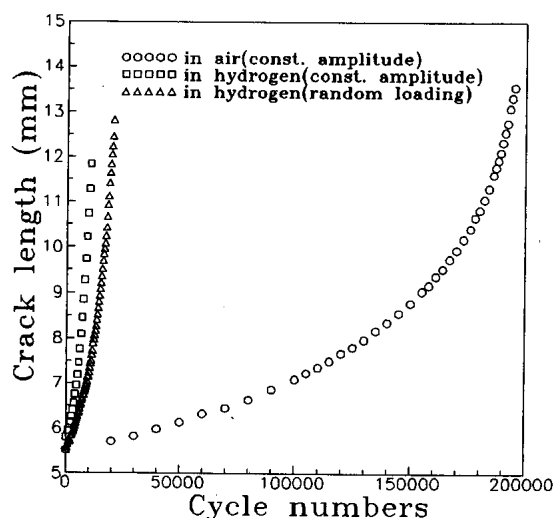
固定負荷振幅 (Constant loading amplitude) 的反覆負荷, 最小負荷與最大負荷比 (R 值) 為 0.1, 負荷之最小值為 0.35kNt., 最大值為 3.5kNt.。動態負荷的波形為 sine 波, 空氣中之疲勞試驗之頻率為 5Hz。量取試片剛性時, 負荷頻率則降至 0.5Hz。疲勞試驗開始之前要經過一段長時間的預裂 (Pre-cracking), 使試片開槽的尖端長出較尖的裂縫, 長度大約 0.5mm。然後在實驗過程中量取伴隨振幅次數之裂縫長度, 再經由數據的轉換得到裂縫生長速率 (da/dN), a 值可以 ΔK 取代, 即得到裂縫生長速率與應力強度因子範圍的關係。

充氫環境下常振幅疲勞實驗之負荷、波形均不改變, 頻率降至 0.5Hz, 使氫脆反應能有充份的時間產生, 使氫脆反應能有充份的時間產生, 使對裂縫生長受到腐蝕的作用。腐蝕疲勞之試驗必須將預裂完成之試片置於腐蝕環境中, 腐蝕環境則是將試驗機之夾具裝置壓克力槽, 盛裝溶液使試片浸泡於溶液中。充氫之方式為陰極充氫, 將試片浸泡於蒸餾水 + 4vol.% H_2SO_4 + 20mg As_2O_3/l 之水溶液中, 連接電源之陰極, 並通以 5mA./cm² 之電流密度。

充氫環境下隨機負荷之疲勞試驗, 仍維持波峰出現頻率為 0.5Hz, 即使得不等振幅為窄頻 (Narrow band) 不等振幅。實驗同常振幅下的疲勞實驗隨著波峰次數量測裂縫長。



圖四 常振幅下疲勞裂縫成長速率與應力強度因子範圍關係圖。



圖五 空氣、充氫環境中疲勞試片之裂縫長度與循環次數之關係圖。

成果

本研究在初期利用介面卡的方式，成功地建立了隨機訊號產生系統。配合疲勞試驗機、電解充氫設備、及撓度方式裂縫竹長度量測系統，組成隨機負荷疲勞測試系統。

利用整個系統完成了在空氣中及電解充氫環境中常振幅下裂縫成長試驗，並進行了充氫環境中隨機負荷下之疲勞裂縫成長試驗。往後第二期計畫的工作中，將以常振幅下疲勞裂縫成長速率之數據，運用統計的方式來找出有效的隨機負荷疲勞壽命的評估模式，期望能在工程應用上提供一便利的方法。

四、結論與討論

本研究的初步結果，包含設備建立和空氣、充氫環境中之常振幅、隨機負荷之疲勞實驗，可歸納出以下幾點：

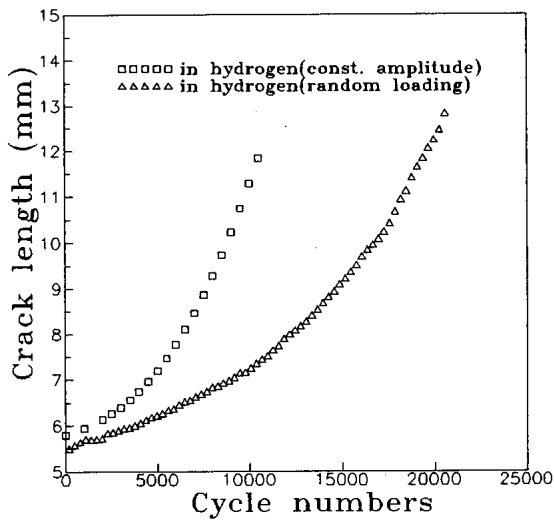
1. 利用介面卡的方式，可設立一經濟的隨機訊號產生系統。
2. AISI 4130鋼之帶狀組織其S-L方向疲勞試片於空氣中之裂縫成長速率分布於 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ mm/cycle之間。若以Paris' law分析，m 值則為

3.83。

3. 於充氫環境下之腐蝕疲勞試驗中可發現，裂縫成長速率高於空氣中之裂縫成長速率甚多（圖四）。
4. 充氫環境中無論示隨機負荷或常振幅疲勞期壽命明顯比在空氣中短少很多，甚至小一個級數（圖五）。
5. 在充氫環境中，由於隨機負荷中有較小的振幅較不能促進裂縫成長，所以在相同的裂縫成長範圍內，隨機負荷之疲勞壽命相較常振幅之疲勞壽命來得長（圖六）。

參考文獻

1. O. Devereux et al., "Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure", pub. by NACE., 1971.
2. J.A. Bannantine., J.J. Comer and J.L. Handrock., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", by Prentice-Hall Inc., 1990.
3. J. Singley, Mechanical Engineering Design, SI ed., 1987.
4. J. Schijve, "Four Lectures on Fatigue Growth", Engineering Fracture Mechanics, 11(1979)167.
5. B. David, "The Practical Use of Fracture Mecha-



圖六 充氫環境中常振幅與隨機負荷疲勞壽命之比較圖。

tics", Kluwer Academic Publishers.

6 G.R. Irwin, "Analysis of Stress and Strain Near the End of the Transversing Plate", Trans. ASME, ser. J. of Applied Mechanics, 42(1957)361.
 7 P.C. Paris, M.P. Gomez and W.E. Anderson, "A Rational Analytic Theory of Fatigue", The Trend in Engineering, 13(1961)9.
 8 W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, 1971, p230.
 9 J.M. Barsom, "Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading in ASTM A514 Grade B Steel", ASTM STP 536, 1973, p77.
 10 H. Kitagawa et al, "Fatigue Crack Propagation in Steels Under Random Loading", Bulletin of JSME, Vol. 21, No. 153,1978.

11 J.N. Yang, "Statistics of Random Loading Relevant to Fatigue", J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100(1974)469.
 12 P. Albrecht and K. Yamada, "Simulation of Service Fatigue Loads for Short-Span Highway Bridge", Service Fatigue Load Monitoring, Simulation and Analysis, 1978, p255.
 13 Y.W. Cheng, "The Fatigue Crack Growth of a Ship Steel in Seawater under Spectrum Loading", Int. J. Fatigue, 7(1985)p95.
 14 Y.W. Cheng, "Fatigue Crack Growth Under Seawave Loading", Int. J. Fatigue, 1988, p101.
 15 H. Alwai and M. Shaban, "Fatigue Crack Growth Under Random Loading", Engineering Fracture Mechanics, 32(1989)845.
 16 J.B. Cahng, "Round-Robin Crack Growth Predictions on Center-Crack Tension Specimens Under Random Spectrum Loading", ASTM STP 748, p3.
 17 C.M. Ward-Close, A.F. Blom and R.O. Ritchie, "Mechanisms Associated with Transient Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading : An Experimental and Numerical Study", Engineering Fracture Mech., 32(1989)p623.
 18 C.M. Hudson, "A Root-Mean-Square Approach for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading", ASTM STP 748, 1981, p41.
 19 J. Schijve, "Prediction Methods for Fatigue Crack Growth in Aircraft Materials", ASTM STP 700, 1980, p3.
 20 Keijz Ogura and Kiyotsugu Ohji, "FEM Analysis of Crack Closure and Effect in Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading", Eng. Fracture Mech., 9(1977)417.