

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫執行報告

塑性之偽歐空間群論與實驗 (2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 89-2211-E-002-109-

執行期間：89年08月01日至90年07月31日

計畫主持人：洪宏基 教授

執行單位：國立台灣大學土木工程學研究所

中華民國九十年八月三十日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

塑性之偽歐空間群論與實驗(2/3)

A study of plasticity by groups on pseudo-Euclidean spaces and experiments

NSC 89-2211-E-002-109

89年8月1日至90年7月31日

洪宏基 教授

蕭雅柏 博士

國立台灣大學土木工程學研究所

一、摘要

本文材料使用鋁合金 7075，作單向對稱等振幅應力循環實驗，發現在軸向對稱等振幅應力循環實驗時，會產生不預期的軸向應變棘齒現象，但進行扭向對稱等振幅實驗，並沒有在軸向所觀察到之不對稱現象。利用一系列實驗釐清此種棘齒行為發生之機制，發現此種棘齒行為之發生主要是因為材料本身因循環硬化所造成之不對稱效應，因此造成不預期的棘齒行為的發生。

在模式參數識別方面，以軸向階段性等振幅循環應變控制實驗的結果，採用多回應力塑性組成律之模式，並導出在此模式的假設前提下，應力應變遲滯圈達到飽和時回應力所應具備的指數函數形式；利用最小二乘法及離散傅立葉變換等數值方法發展出指數函數疊加系統之識別方式，嘗試利用實驗數據識別出在多回應力塑性組成律中材料的參數。

關鍵詞：循環塑性、不對稱、鋁 7075、棘齒現象、最小二乘法、快速傅立葉變換、彈塑性組成律、系統參數識別

Abstract

In this year the project concentrated on some experiment related problems. We found that aluminum alloy 7075 unexpectedly exhibits ratcheting phenomena even in strain-controlled axial cyclic tests. We also proposed a multi-back-stress elastoplastic model, similar to the models of Armstrong-Frederick and Chaboche, and developed a procedure for identifying its parameters, combining experimental techniques, FFT, and least square fitting.

Keywords: cyclic plasticity, asymmetry, Al7075, ratcheting, least square method, FFT, elastoplastic constitutive law, system parameter identification.

二、緣由與目的

雖然循環所造成之棘齒效應，其關係十分複雜，和應變歷史、大循環應力、材料等向性與循環路徑等皆有關係。但在完全退火之常用金屬材料

中，相關文獻皆認為金屬在軸向及扭向具有對稱性，且現有彈塑性組成律亦以常用金屬材料的對稱性為基本表徵，但亦有少數實驗並不完全符合此種假設。本文使用完全退火過之鋁合金 7075，排除不同人工時效之影響；於室溫下進行實驗，排除不同溫度歷時的影響；並將應力加載速率限制在 1~2MPa/sec，排除加載速率的影響；並將應變控制在 2% 內，排除因試棒截面積對真實應力之影響，進行一系列對稱等振幅循環實驗，探討在現有模式中所無法解釋之現象與原因。

在模式參數識別方面，用多材料參數甚至是多降伏面的彈塑組成律，雖然能表現出彈塑實驗時所觀察到的各種現象，但隨著材料參數的增加，同時也造成實驗結果對應於識別材料參數上的困難，使得我們在面對實驗數據與組成律模擬的結果不一致時，無法判斷究竟是組成律本身的錯誤所影響，或僅只是參數決定錯誤所造成。因而在此希望能在材料實驗已知的輸入輸出條件(應力、應變)下，透過一些系統識別的方法來識別出參數，進而確立假設的彈塑性組成律的模式是否正確。

三、研究方法

為進一步澄清對稱應力循環下之棘齒行為，除進行一般文獻上所總結之軸向棘齒路徑與扭向對稱應力振幅循環實驗外，進行軸向對稱應力等振幅實驗，並考慮各種可能因素對應變反應之影響，包括MTS試驗機荷重元(loadcell)之對稱性、應變率效應、拉壓應力造成面積的改變、材料特性的影響、溫度之影響、各種路徑(包括循環圈數、循環少半圈、先拉與先壓)之影響、應力振幅的影響與試棒幾何尺寸之影響。具體之實驗規劃如下：

- (1) 應力振幅之影響
 - (a) 較小振幅 (165MPa)
 - (b) 中等振幅 (185MPa)
 - (c) 較大振幅 (195MPa)
- (2) 先拉與先壓之影響
 - (a) 先拉且振幅165MPa
 - (b) 先壓且振幅165MPa
 - (c) 先拉且振幅185MPa
 - (d) 先拉且振幅185MPa

- (3) 第一階段圈數之影響
 - (a) 0 圈
 - (b) 0.5圈
 - (c) 4.5圈
 - (d) 5 圈
- (4) 試棒幾何尺寸之影響
 - (a) 單軸實心試棒
 - (b) 雙軸空心試棒
- (5) 循環少半圈之影響
 - (a) 中間少半圈(先拉後壓)
 - (b) 中間少半圈(先壓後拉)
- (6) 不同材料之影響
 - (a) 鋁合金7075
 - (b) 316不鏽鋼
- (7) 拉壓面積變化之影響
 - (a) 鋁合金7075
 - (b) 316不鏽鋼

在模式參數識別方面，實驗的路徑為應變控制，分為多個階段的等振幅循環，應變路徑為：靜止10秒 正負0.4%循環 飽和(8圈) 正負0.6%循環 飽和(8圈) 正負0.8%循環 飽和(8圈) 正負0.6%循環 飽和(5圈) 正負0.4%循環 飽和(5圈) 正負0.6%循環 飽和(4圈)。

考慮符合實驗所得的結果的系統模型而採用類似於 Chaboche多回應力的塑性組成律，這是以多個Armstrong-Frederick 模式中的回應力並聯而成的系統，在材料軸向加載實驗的塑性階段中，可將此回應力函數解出為塑性應變的指數形函數疊加；在單軸等振幅循環遲滯圈達到飽和時，降伏面大小為固定的前提下，此降伏後應力的變化即為回應力的變化，故而以單軸等振幅循環飽和的遲滯圈數據資料加以系統識別以期得出在多回應力塑性組成律中材料的參數特性。

其中，指數形函數疊加系統的識別法操作程序如下：

- (1) 得到實驗結果的應力應變資料後先求軸向彈性模數E，將應變減去彈性部分得到對應的塑性應變。
- (2) 取出要分析的某一固定等振幅大小穩定後的應力上升(或下降)段處理，將不等間距的塑性應變值改為等間距，對應的應力值用內插決定。
- (3) 資料平滑化處理後，去除頭尾不要的資料若干資料點並將塑性應變作變數變換使其為從0點開始。
- (4) 離散傅立葉變換，將非線性的指數函數疊加系統變為線性。
- (5) 用加權的最小二乘法求出指數項的參數及常數。
- (6) 用最小二乘法求出常係數項的參數。

四、結論與討論

實驗結果討論：

- (1) 由單向對稱應力循環控制，發現不預期之棘齒

累積行為：在單向循環實驗中，可以由文獻歸納出棘齒累積行為發生在應力循環控制且應力均值不為零時，於應力均值為零時，則無法產生棘齒累積行為，亦即材料具有對稱性。但以上述一系列之實驗驗證，均值為零之單向循環下，對某些材料仍然有可能產生文獻中尚沒有發現之棘齒累積行為。

- (2) 棘齒觸發機制與文獻[12]中所提之棘齒觸發機制並不完全相同：文獻[12]中所提之對稱下之棘齒發生機制必須為應力振幅先小後大，且前一階段之循環造成降伏面之走動，造成下一階段實質降伏面不對稱所引起，且如果沒有前一階段的影響，亦即在應力振幅先大後小之第一階段，並無法觸發棘齒行為的產生。因文獻[12]實驗所使用材料為鋁合金 6061，仍可以看出在軸向等振幅應力循環的過程中，拉應力在每一圈之硬化程度較小，但壓應力隨著圈數增加而硬化較快速的情形。
- (3) 現有彈性組成率並無法模擬此種棘齒累積行為：由彈塑性模式之基本假設可知，不論任何一種模式，皆將常用金屬材料假設為對稱。因此，在軸向對稱應力等振幅循環下，可以得到軸向反映應變均值並不因循環之圈數而增加或減少。因此，既有模式並無法模擬鋁合金 7075 於軸向對稱應力等振幅循環下所產生之棘齒累積效應。
- (4) 棘齒效應之基本路徑：真正決定棘齒行為發生的原因仍是應力均值的影響，如果有此效應存在時，則上述效應將可能被併入棘齒效應內，唯有當把應力均值調成零時，此種不對稱效應才會明顯的顯現出來。
- (5) 不同材料之比較：一方面，因此次應變峰值最高已達 4.28%，比鋁 7075 之應變反應峰值 1.5%，大出許多，故在鋁 7075 實驗中所得之正向棘齒累積效應，不能歸因於拉壓面積不同而造成真實應力之實質不對稱效應。另一方面，使用 316 不鏽鋼所採用之軸向應力 450MPa，比使用鋁 7075 所採用之軸向應力 195MPa，大出許多，在實驗機，伸長計，環境溫度與資料擷取方法皆為相同之情形下，可以排除是因為實驗機荷重元 (loadcell) 不對稱或伸長計誤差所造成之影響，再次印證在鋁 7075 實驗中所得之正向棘齒累積效應純為材料於循環時的不對稱特性，而 316 不鏽鋼並不具有此種特性。
- (6) 拉壓面積對試棒所造成之影響亦為其中之一原因，但並不是主要原因。
- (7) 不同尺寸之試棒影響：使用兩種不同尺寸的試棒，皆可以得到相近的結果，故知實驗所觀察到之棘齒累積行為可以排除是因為試棒本身挫區的影響。再者，兩次實驗使用不同之伸長計，故亦可以排除是因為伸長計懸掛方式所產生之誤差與伸長計本身的誤差之影響。
- (8) 第一階段不同應力路徑之比較：第一階段所循環之圈數雖不同，但並不影響下一階段之棘齒累積趨勢，可知此種棘齒產生的原因並無法歸

因於應變歷史效應。

- (9) 軸向應變應變循環：由文獻以及上述實驗之結果，於單向等振幅拉應變循環下，不會引起棘齒累積行為。
- (10) 應變率效應：常溫下，在低應變率範圍內，應變率效應並不顯著，且在我們已經完成之應力控制試驗中，雖然在材料降伏後，鋁合金的材料特性使得雖給一小應力增量，所得之應變明顯比彈性時增加許多，但其最高應變率仍維持在 $8 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 以下，因此仍然可將實驗視為靜態(擬靜態)試驗，因此，我們可以排除應變率效應對材料所產生不對稱效應之影響。

實驗結論：

- (1) 在均值為零之單向應力循環下，鋁 7075 仍然會產生棘齒累積行為，且棘齒皆有向拉應力方向累積之趨勢。
- (2) 棘齒累積行為並不會隨圈數的增加而安定。
- (3) 應力振幅的大小為決定棘齒累積效應最主要的因素。
- (4) 先拉與先壓 路徑少半圈與改變前一階段之路徑皆不會下一階段之棘齒累積效應造成任何實際之影響。
- (5) 拉力使試斷面面積縮小而壓力使斷面面積增大，造成拉、壓應力的改變不為此種棘齒產生的原因之一。
- (6) 棘齒發生機制：鋁合金 7075 在循環試驗時，拉應力在每一圈之硬化程度較小，壓應力隨著圈數增加而硬化快速，但拉、壓應力之硬化走勢並不相同，當軸向拉應力越大時，此種不對稱現象越容易顯現出來。故在等振幅軸應力循環下，軸向拉應變隨圈數而變小之量較小，但壓應變隨圈數增加，減少之速度較快。因此，在等應力循環下，仍然會造成往拉應力方向偏之棘齒行為。當應力振幅越大時，則此種現象就會越明顯。

在模式參數識別方面：

在分析的過程中，會產生誤差的來源有三，這些問題的處理及改善方式為識別過程中的重點，整理如下：

- (1) 將塑性應變由不等間距線性內插改為等間距所產生的誤差，由處理前後的資料比對，可發現此一誤差並不大，顯然不會超出實驗精度的誤差範圍。
- (2) 在離散傅立葉轉換時高頻的誤差量，已用加權計算的最小二乘法方式改善。
- (3) 在離散傅立葉轉換時，會運用到首尾資料點的導數，在計算時差分求導數所產生的誤差，實際上最嚴重，因為雜訊而造成的錯誤導數值影響甚大，尤其是用到較多指數函數的疊加時用到較高階的導數；適當的將資料平滑化處理可以減小這種誤差，但是太高程度的平滑化處理會使資料失真，引致新的誤差，因此以我們的實驗設備及計算法而言，要求出三階以上的導數幾乎不可能也不準確，故回應力的指數函數疊加，最多只用到三組指數函數，即計算上只用到二階導數，並且

儘量嚐試不同的捨去資料點位置，由觀察識別結果與實驗資料的平均平方誤差的大小，找到最佳的解。

分析結果顯示，我們所發展出的識別法，能夠成功的套用在實際的實驗數值上，找出給定範圍內與實驗結果十分吻合的指數函數疊加形式的函數式並且得到部分材料參數，並證明所用的模型中回應力的形式與實驗現象相當符合。

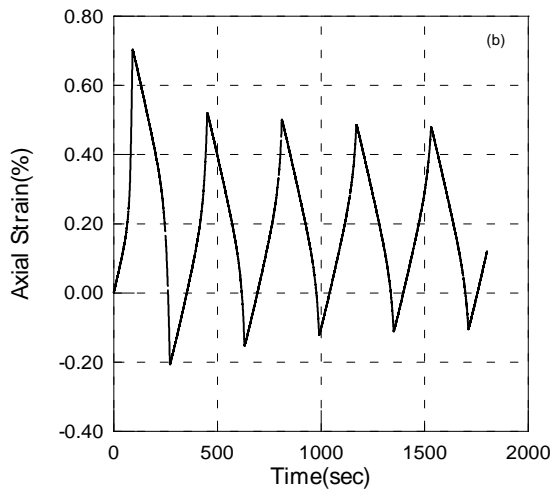
實驗數據中必然存在的雜訊對於能否成功識別的影響很大，雖然能夠經由適當的平滑化處理加以改善，但仍造成我們在擷取不同啟始點及終點的資料分析時的結果有相當大的差異，尚須觀察平均平方誤差的大小以決定結果是否理想，而且這也造成了我們在操作時只能用到三組指數函數的疊加。

五、參考文獻

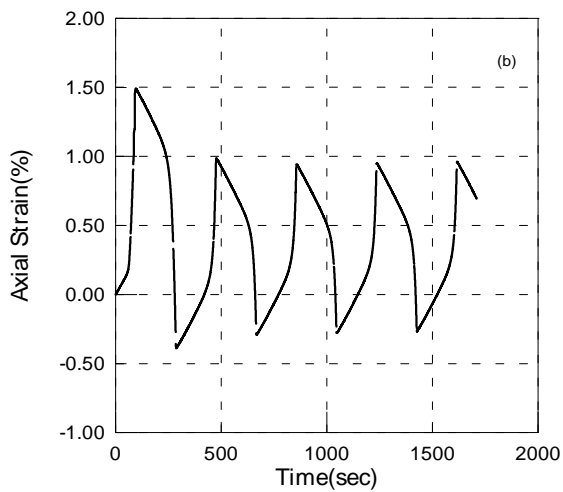
- [1] Chaboche, J. L., and Nouaihas, D., Constitutive modeling of ratchetting effects— Part : experimental facts and properties of the classical models, *J. Eng. Mater. and Tech.*, Vol.111, pp.384-392, 1989.
- [2] Chaboche, J. L., On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects, *Int. J. Plasticity*, Vol.7, pp.661-678, 1991.
- [3] Chaboche, J. L., Modeling of ratchetting: evaluation of various approaches, *Eur. J. Mech., A/Solids*, Vol.13, pp.97-117, 1994.
- [4] Hassan, T., and Kyriakides, S., Ratchetting in cyclic plasticity, Part : uniaxial behavior, *Int. J. Plasticity*, Vol.8, pp.91-116, 1992.
- [5] Hassan, T., Corona, E., and Kyriakdes, S., Ratchetting in cyclic plasticity, Part : multiaxial behavior, *Int. J. Plasticity*, Vol.8, pp.117-146, 1992.
- [6] Haupt, A., and Schinke, B., Experiments on the ratchetting behavior of AISI 316L(N) austenitic steel at room temperature, *J. Eng. Mater. and Tech.*, Vol.118, pp.281-284, 1996.
- [7] McDowell, D. L., Description of nonproportional cyclic ratchetting behavior, *Eur. J. Mech., A/Solids*, Vol.13, pp.593-604, 1994.
- [8] Ohno, N., and Wang, J. D., Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part : formulation and basic features for ratchetting behavior, *Int. J. Plasticity*, Vol.9, pp.375-390, 1993.
- [9] Ohno, N., Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratchetting, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.40, pp.251-261, 1998.
- [10] Yoshida, F., Uniaxial and biaxial creep-ratchetting behavior of SUS304 stainless steel at room temperature, *Int. J. Pres. Ves. & piping.*, Vol.44, pp.207-227, 1990.
- [11] Yoshida, F., A constitutive model of cyclic plasticity, *Int. J. Plasticity*, Vol.16, pp.359-380, 2000.

[12] 蕭雅柏，構造用金屬材料多向循環負載與異向性研究，國立台灣大學土木工程學研究所，博士論文，台北，2000。

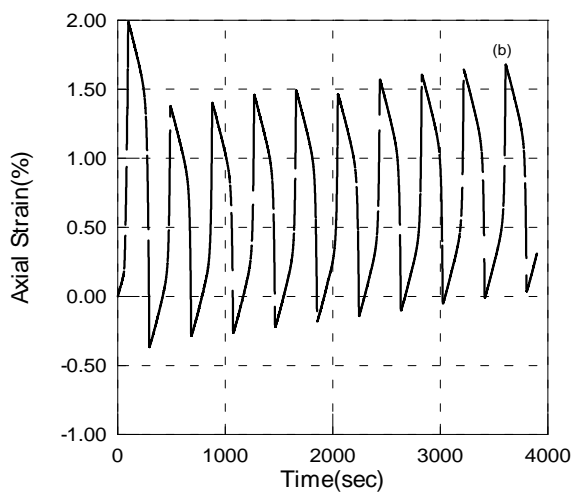
六、圖表



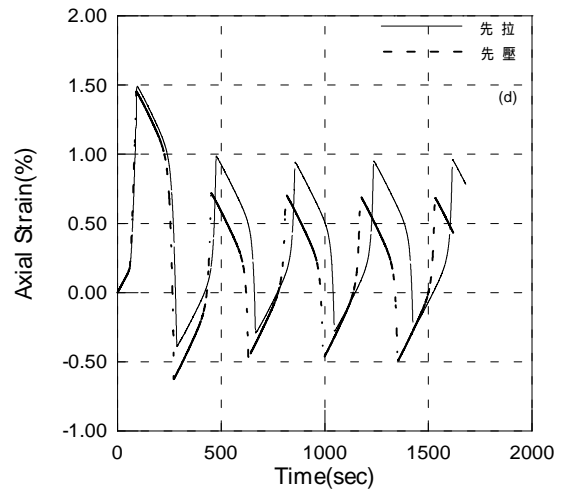
圖一 軸向對稱等振幅應力循環(振幅 165MPa)



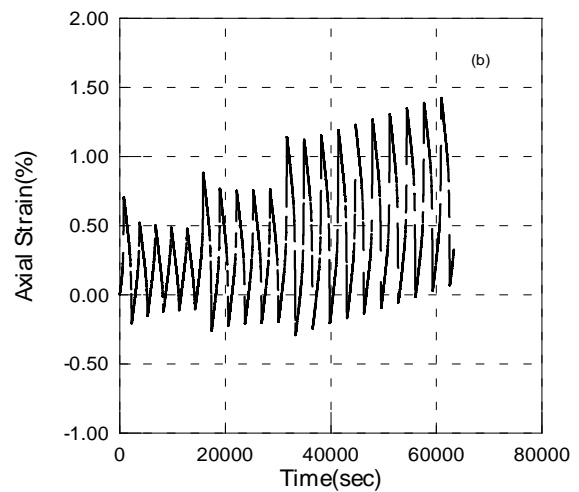
圖二 軸向對稱等振幅應力循環(振幅 185MPa)



圖三 軸向對稱等振幅應力循環(振幅 195MPa)



圖四 軸向對稱等振幅應力循環(先拉與先壓影響)



圖五 軸向對稱等振幅應力循環(三階段循環)

七、計畫成果

學生畢業論文

曹長勇，‘單向對稱應力循環下之不對稱性棘齒行為實驗’，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國九十年六月，台北。

陳勇先，‘軸向循環塑性組成律模式參數識別’，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文，民國九十年六月，台北。