

## 凹痕圓管在循環彎曲負載下行為與損壞之研究

李國龍<sup>1\*</sup> 吳政昌<sup>2</sup> 潘文峰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 私立遠東科技大學創新設計與創業管理系  
<sup>2,3</sup> 國立成功大學工程科學系

### 摘 要

本文主要是研究不同深度凹痕圓管在循環彎曲負載下的行為及損壞，而所使用的圓管材料為 6061-T6 鋁合金管，凹痕深度包含有：0.0、0.3、0.6、0.9 及 1.2 mm。從實驗的彎矩-曲度曲線中顯示，在對稱循環彎曲時，沒有凹痕的圓管呈現對稱且穩定的迴圈，而有凹痕的圓管則因不同深度凹痕兩側接觸的關係，呈現不同程度不對稱但穩定的迴圈。其次，由實驗的橢圓化-曲度曲線中發現，在對稱循環彎曲時，沒有凹痕的圓管呈現對稱且棘齒狀增加的變化，而有凹痕的圓管因凹痕兩側接觸的程度不同呈現不對稱且棘齒狀增加的變化。而且凹痕深度越深，橢圓化-曲度曲線就越不對稱。當橢圓化值增加到某一臨界值時，圓管便會發生皺曲或破裂。此外，由實驗的雙對數座標控制曲度-循環至損壞圈數曲線中發現，五種凹痕深度可對應出五條不平行的直線。最後，本文提出理論模式來描述控制曲度-循環至損壞圈數的關係。在與實驗結果比較後發現，理論能夠合理描述實驗結果。

**關鍵詞：**凹痕圓管，不同凹痕深度，循環彎曲，彎矩，曲度，橢圓化，循環至損壞圈數

## Response and Failure of Dented Circular Tubes Subjected to Cyclic Bending

Kuo-Long Lee<sup>1\*</sup>, Cheng-Chang Wu<sup>2</sup>, Wen-Fung Pan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Innovative Design and Entrepreneurship Management, Far East University  
<sup>2,3</sup> Department of Engineering Science, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

In this paper, the response and failure of dented circular tubes with different dent depths under cyclic bending were investigated. The material used was 6061-T6 aluminum alloy and the dent depths considered included: 0.0, 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 mm. From the experimental moment-curvature relationship, the curve becomes symmetrical and steady loop for tubes without a dent. Due to the contact of the two sides for different dent depths, the curves show different degrees of unsymmetry but steady loops for dented tubes. Next, from the experimental ovalization-curvature curve, the ovalization of the tube cross-section increases in a symmetrical and ratcheting manner for tubes without a dent. However, due to the contact of the two sides for different dent depths, the ovalizations show different degrees of unsymmetrical, ratcheting and increasing manner for dented tubes. A higher dent depth leads to a more unsymmetrical ovalization-curvature curve. The tube buckles or fractures when the ovalization of the tube cross-section reaches a critical amount. In addition, it is shown from the experimental controlled curvature-number of cycles required to failure relationship in a log-log scale

that five nonparallel straight lines correspond to five different dent depths. Finally, a theoretical formulation was proposed in this paper to simulate the relationship between the controlled curvature and the number of cycles required to failure. By comparing the theoretical analysis with the experimental data, it is shown that the theoretical formulation can properly simulate the experimental results.

**Keywords:** dented circular tubes, different dent depths, cyclic bending, moment, curvature, ovalization, number of cycles required to failure

---

文稿收件日期 105.1.28;文稿修正後接受日期 105.4.26; \*通訊作者  
Manuscript received January 28, 2016; revised April 26, 2016; \* Corresponding author

## 一、前言

圓管承受循環彎曲負載的載重型態常見於一般的結構物。例如：海中的輸油管線及海上鑽油平台的支柱必須承受海流及海浪循環的衝擊、地震頻繁的建築物必須承受地震時的循環搖晃、發電廠和核電廠熱交換器圓管必須承受熱交換時冷水對管壁的循環衝擊等。當圓管承受循環彎曲負載時圓形管面會呈現橢圓化(ovalization)的現象，橢圓化的量會隨著循環次數增加而增加，而當橢圓化量到達某臨界值時，圓管即發生皺曲損壞或甚至破裂的現象。圓管皺曲或破裂損壞除了無法正常輸送物料外，外漏的物料可能對環境造成嚴重的汙染。此外，圓管元件的皺曲損壞或破裂會嚴重影響到整體結構安全性，一旦發生大型公共工程的故事時，對整個國家或個人造成難以估計的損失，故針對圓管進行研究並了解其特性是有其必要性的。

早期，Kyriakides 教授和他的研究群便針對各種不同材料的圓管(6061-T6 鋁合金管、1018 鋼管、304 不銹鋼管、1020 鋼管、鎳鈦管)在無外壓或有外壓、單調或循環彎曲負載下進行許多的實驗及理論研究[1-13]。在國內自 1998 年起，潘教授(Prof. W.F. Pan)和他的同僚及學生也針對各種不同的圓管材料，進行循環彎曲負載的實驗及理論研究。他們研究的圓管材料有：304 不銹鋼管、316L 不銹鋼管及鈦合金管。而研究的圓管的相關行為有：對稱彈塑性循環彎曲負載至皺曲的研究、黏塑性循環彎曲負載至皺曲的研究、不同外徑/壁厚比圓管循環彎曲負載至皺曲的研究、不同的平均曲度循環彎曲負載至皺曲的研究、純彎曲潛變負載至皺曲的研究及不同的平均彎矩循環彎曲負載至皺曲的研究[14-20]。

從 2010 年開始，潘教授、同僚及學生就針對尖銳凹槽圓管的行為，進行相關的實驗及理論分析，而所研究的相關行為有：尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載下橢圓化變化分布的研究[21]，尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載下力學行為及皺曲損壞的研究[22]，不同外徑/壁厚比尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載下行為的研究[23]、尖銳凹槽圓管在循環彎曲負載黏塑性行為的研究[24]及尖銳凹槽圓管在純彎曲潛變及鬆弛負載下行為的研究[25]。然而，上述所研究的尖銳凹槽皆為是環繞圓管圓周一圈的

尖銳凹槽，稱為環圓周尖銳凹槽(circumferential sharp notch)。但若尖銳凹槽的型態是局部尖銳凹槽(local sharp notch)時，則該局部尖銳凹槽圓管承受循環彎曲負載時的行為必定和環圓周尖銳凹槽圓管的行為有很大的差異。除了凹槽深度是一個影響因素之外，凹槽的方向也是一個重要的影響因素。針對局部尖銳凹槽的圓管，他們所研究的相關行為有：不同深度局部尖銳凹槽 SUS304 不銹鋼圓管在對稱曲度控制循環彎曲負載下力學行為及皺曲損壞的研究[26]，不同方向局部尖銳凹槽圓管在對稱曲度控制循環彎曲負載下行為影響的研究[27]。

圓管在運送、架設或使用的過程中，由於外在的物體的碰撞或摩擦，會造成圓管產生不同程度的凹痕。而當有凹痕的圓管承受循環彎曲負載時，圓管所顯現的行為和光滑、環圓周尖銳凹槽或局部尖銳凹槽圓管承受循環彎曲負載所呈現的行為必定大不相同。因此，本文提出實驗及理論研究不同深度凹痕圓管在循環彎曲負載下的行為及損壞。

## 二、實驗設備、試件及步驟

### 2.1 彎管實驗機

本實驗的彎管實驗機(圖 1)係利用兩個鏈輪對稱性地置設於一支承座上，在兩鏈輪上則掛設有鏈條，油壓缸及力檢出器串連形成的恆等長封閉迴路，且兩個鏈輪盤面上各設有四個對稱的滾輪，而滾子必須經過精密加工，使得上下滾子所形成的空間可供實心桿平順的滑動於其中，且達到最小的空隙。當油壓缸循環往復運動時，實心桿跟著旋轉而帶著中央部分的圓管進行彎曲負載。扣鏈齒輪上的對稱滾子對圓管的施力，形成四點純彎曲負載的狀態。為達成正反彎曲的循環動作，當圓管在架設於實驗機上時，上下油壓缸活塞的初始位置均必須各設定為伸出一半的長度，以便架設圓管。而當施予正向彎曲時，下油壓缸活塞回縮上油壓缸活塞伸長，施予反向彎曲時，則上油壓缸活塞回縮下油壓缸活塞伸長。為確保實驗為純彎曲負載，實心桿在滾輪中必須要很平滑的移動，以確定圓管在軸向方向可任意移動，也就是圓管軸向方向施力為零。詳細彎管實驗機的介绍可參閱參考文獻[1、14]。

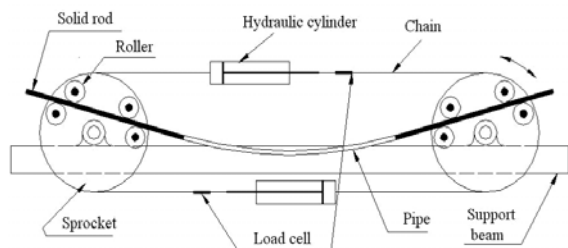


圖 1. 彎管實驗機之示意圖。

## 2.2 曲度-橢圓化量測器

Pan et al. [14]設計一種圓管”曲度-橢圓化量測器”(如圖 2 所示)，該裝置可緊密夾合的安裝於圓管的長距的中間，並能同時及準確的量測圓管在彎曲負載時，圓管所產生的曲度及橢圓化的變化。當量測器安置於圓管的中央，該檢測器的彈簧便壓迫使上下磁性塊夾緊管徑的上下兩端。當圓管承受彎曲負載管徑發生變化時，上磁性塊與磁性檢測器的距離發生變動，由磁場所產生的變化，磁性檢測器即可檢測出管徑橢圓化的變化量。同時，該裝置的兩側傾角器分別以夾具固定於圓管上，每個側傾角器分別以桿件與中央部分的管徑橢圓化檢測器相連接。為避免桿件因彎曲而變形，桿件與管徑橢圓化檢測器相連接處以可上下移動的環管為接頭。位於正上方的實心桿面上有導引移動的軌道，以避免彎曲的方向改變。當圓管承受彎曲或循環彎曲負載時，兩傾角器將會量測到角度的變化，再經由簡單的數學運算，便可求得圓管的曲度量。

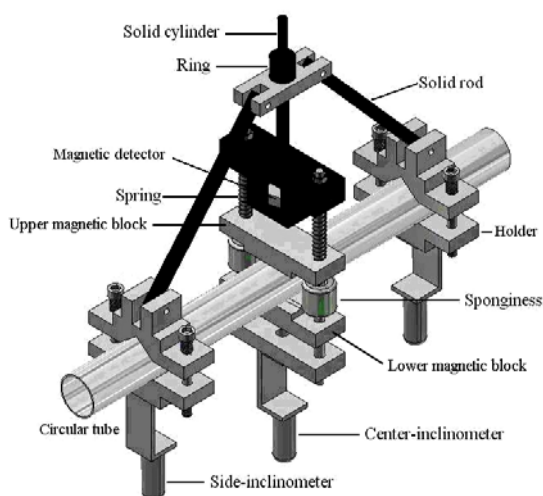


圖 2. 曲度-橢圓化量測器之示意圖。

## 2.3 實驗試件與實驗步驟

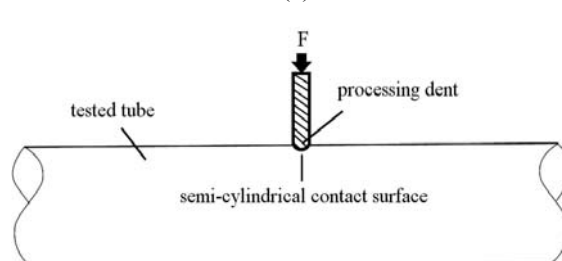
本研究的實驗試件為外徑( $D_o$ ) 30.0 mm、壁厚( $t$ ) 0.5 mm 的 6061-T6 鋁合金圓管。表 1 為 6061-T6 鋁合金的化學元素組成表，而它的降伏應力( $\sigma_0$ ) = 166 MPa、極限應力( $\sigma_u$ ) = 258 MPa 及伸長百分比 = 23%。所研究的凹痕深度( $a$ )有: 0.0、0.3、0.6、0.9 及 1.2 mm，其中  $a = 0.0$  mm 代表光滑表面。圖 3 為凹痕 6061-T6 鋁合金圓管的加工照片及示意圖。其中半圓柱表面模具以壓力  $F$  對測試圓管進行加工以製作所需的凹痕深度。圖 4 為 1.2 mm 凹痕深度 6061-T6 鋁合金管的示意圖，而圖 5 為不同凹痕深度 6061-T6 鋁合金管的照片。

表 1. 6061-T6 鋁合金之化學元素組成表。

Chemical Composition	Al	Mg	Si	Cu	Ti	Fe
Proportion (%)	97.40	0.916	0.733	0.293	0.268	0.256
Chemical Composition	Mn	Zn	Cr	Ni	Pb	Sn
Proportion (%)	0.132	0.0983	0.0682	0.0056	0.005	<0.001



(a)



(b)

圖 3. 凹痕 6061-T6 鋁合金圓管加工之(a)照片及(b)示意圖。

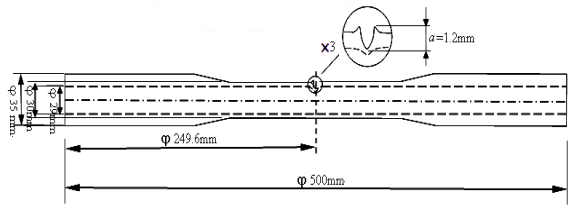


圖 4. 1.2 mm 凹痕深度 6061-T6 鋁合金管之示意圖。



圖 5. 不同凹痕深度 6061-T6 鋁合金管之照片。

### 三、結果與討論

#### 3.1 循環彎曲負載下之力學行為

圖 6(a)-(e) 分別顯示實驗凹痕深度  $a = 0.0、0.3、0.6、0.9$  及  $1.2$  mm 的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下的彎矩( $M/M_0$ )與曲度( $\kappa/\kappa_0$ )關係圖，其中處理無因次的  $M_0$  為  $\sigma_0 D_o^2 t$ ，而  $\kappa_0$  為  $t/D_o^2$ ，而控制曲度  $\kappa/\kappa_0$  為  $\pm 0.71$ 。實驗結果顯示，由第一圈從最大正曲度卸載至最大負曲度的過程中發現，有凹痕的圓管的彎矩值會在過程中先增加後趨緩最後減少，此現象是因為在加工時壓痕處兩側會產生突起，且凹痕位置處在正上方，當圓管往上彎曲(反向彎曲)時，凹痕兩側突起物會接觸，凹痕處會向下擠壓，所需的彎矩會因此變小，但經過數個循環圈數後，彎矩-曲度的關係仍會呈現穩定的迴圈。當  $a = 0.3$  mm 時，上述的現象並不太明顯，但  $a > 0.3$  mm 時，該現象卻非常明顯。由於凹痕係微小且局部，所以深度對彎矩-曲度的關係並沒有太大的影響(圖 6(c)-(e))。

圖 7(a)-(e) 分別顯示實驗凹痕深度  $a = 0.0、0.3、0.6、0.9$  及  $1.2$  mm 的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下的橢圓化( $\Delta D_o/D_o$ )與曲度( $\kappa/\kappa_0$ )關係圖，而控制曲度  $\kappa/\kappa_0$  仍為  $\pm 0.71$ 。由圖中顯示， $\Delta D_o/D_o - \kappa/\kappa_0$  關係不論在彈性或塑性變形時皆呈現非線性的分布。至於不同凹痕深度的橢圓化與曲度曲線發現，凹痕深度為

0 mm 時，橢圓化呈現對稱棘齒狀的成長方式，如圖 7(a)所示。而當凹痕深度越深(圖 7(b)-(e))，曲線的趨勢會漸漸偏向左高右低，這是因為實驗曲度往負方向增加時，凹痕受到擠壓，橢圓化量會因此而增大，所以導致  $\Delta D_o/D_o - \kappa/\kappa_0$  的關係呈現不對稱。凹痕深度越深時， $\Delta D_o/D_o - \kappa/\kappa_0$  關係的不對稱就越嚴重，橢圓化量也越大。

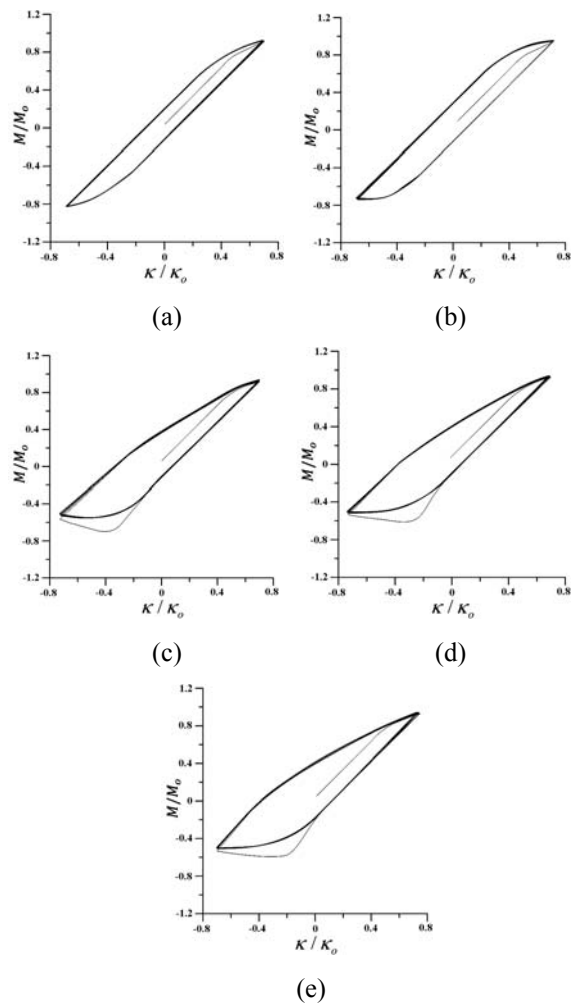
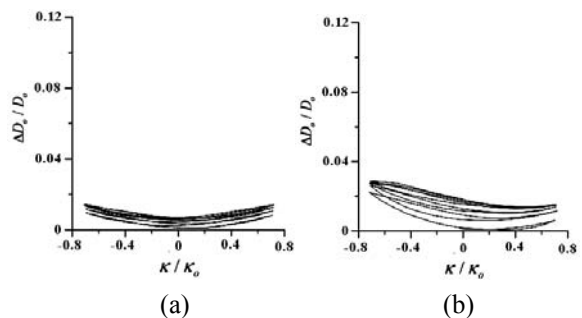


圖 6. 實驗凹痕深度  $a =$  (a) 0.0、(b) 0.3、(c) 0.6、(d) 0.9 及 1.2 mm 的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下彎矩( $M/M_0$ )-曲度( $\kappa/\kappa_0$ )之關係圖。



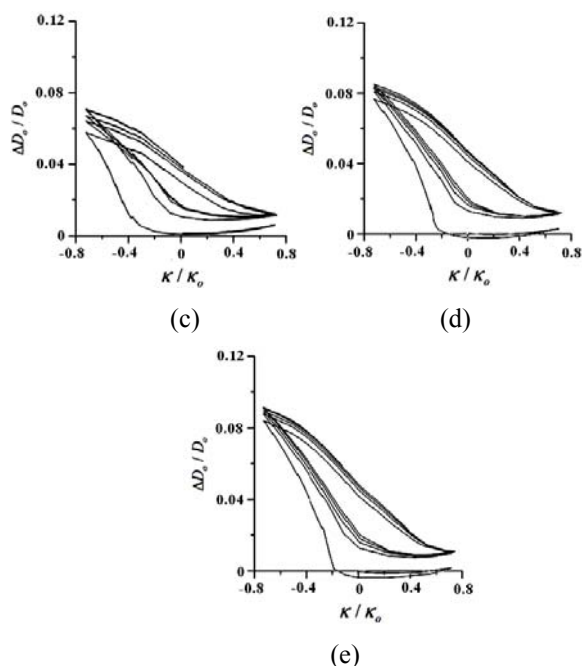


圖 7. 實驗凹痕深度  $a =$  (a) 0.0、(b) 0.3、(c) 0.6、(d) 0.9 及 1.2 mm 的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下橢圓化( $\Delta D_0/D_0$ )與曲度( $\kappa/\kappa_0$ )之關係圖。

### 3.2 循環彎曲負載下之損壞行為

圖 8 為實驗不同凹痕深度的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下的控制曲度( $\kappa_c/\kappa_0$ )與循環至損壞圈數( $N_f$ )關係，其中  $\kappa_c/\kappa_0$  控制在  $\pm 0.29 \sim \pm 0.94 \text{ m}^{-1}$  之間，五種不同的凹痕深度，對應出五條不同的曲線。圖中顯示，在相同的控制曲度下，凹痕深度相同者，彎曲曲度越大，循環至損壞的圈數就越少。若將圖 8 的實驗數據以雙對數座標表示可得圖 9，圖中的五條直線係以最小平方近似而得。圖中顯示，五種不同凹痕深度可對應出五條直線，但彼此的斜率與截距都不相同。

Kyriakides and Shaw [2] 對 6061-T6 鋁合金管與 1018 鋼管，做不同曲度控制循環彎曲至損壞的實驗。根據實驗結果，他們提出對於  $\kappa_c/\kappa_0$  及  $N_f$  的關係方程為：

$$\kappa_c/\kappa_0 = C(N_f)^{-\alpha} \quad (1a)$$

或

$$\log \kappa_c/\kappa_0 = \log C - \alpha \log N_f \quad (1b)$$

其中， $C$  為  $N_f = 1$  時所對應的控制曲度， $\alpha$  為  $\kappa_c/\kappa_0$  與  $N_f$  雙對數座標關係中的直線斜率值。根據圖 9 的實驗數據，對不同的  $alt$  時的  $C$  及

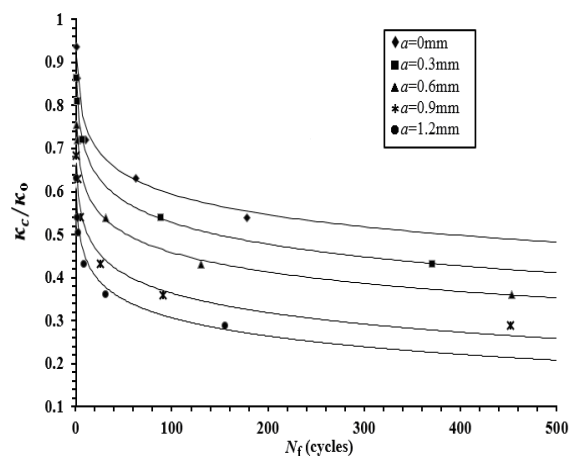


圖 8. 實驗不同凹痕深度的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下控制曲度( $\kappa_c/\kappa_0$ )與循環至損壞圈數( $N_f$ )之關係圖。

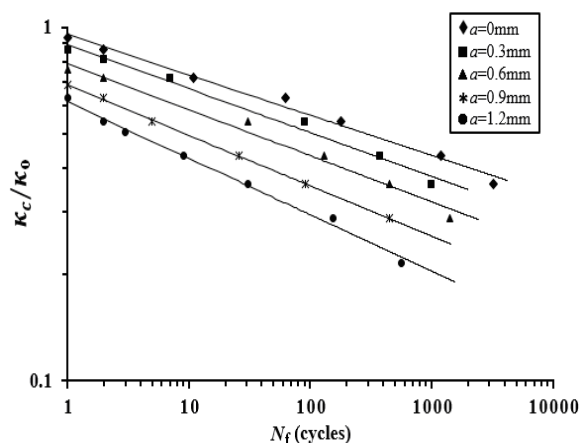


圖 9. 實驗不同凹痕深度的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下控制曲度( $\kappa_c/\kappa_0$ )與循環至損壞圈數( $N_f$ )雙對數座標之關係圖。

表 2. 根據圖 9 所求得不同  $alt$  之  $C$  及  $\alpha$  值。

$alt$	0.0	0.6	1.2	1.8	2.4
$C$	0.994	0.864	0.756	0.684	0.630
$\alpha$	0.106	0.118	0.133	0.142	0.164

$\alpha$  由方程式(1b)可求得如表 2 所示。若將  $alt$  與  $\ln C$  的數值標示於 x-y 的座標時，該實驗數值以最小平方可近似成為一條直線如圖 10 所示。若將  $alt$  與  $\ln \alpha$  的數值標示於 x-y 的座標時，該實驗數值以最小平方可近似成為一條直線如圖 11 所示。所以  $C$  及  $\alpha$  的經驗形式 (empirical formulation) 分別可提出為：

$$\ln C = \ln C_0 - \beta \left( \frac{a}{t} \right) \quad (2)$$

及

$$\ln \alpha = \ln \alpha_0 - \gamma \left( \frac{a}{t} \right) \quad (3)$$

其中  $C_0$ 、 $\beta$ 、 $\alpha_0$  及  $\gamma$  為材料參數。根據圖 10 及 11 的直線  $C_0$ 、 $\beta$ 、 $\alpha_0$  及  $\gamma$  分別可求得為 0.94、0.17、0.11 及 -0.18。圖 12 為實驗與理論模擬不同凹痕深度的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下的控制曲度 ( $\kappa_c/\kappa_0$ ) 與循環至損壞圈數 ( $N_f$ ) 雙對數座標關係。

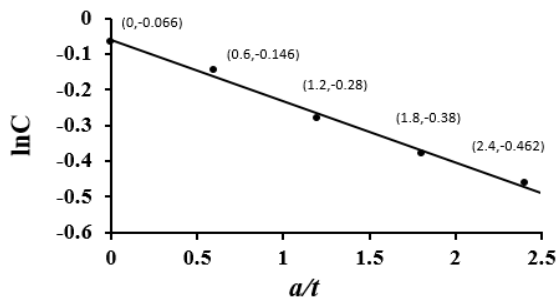


圖 10.  $\ln C$  與  $a/t$  之關係圖。

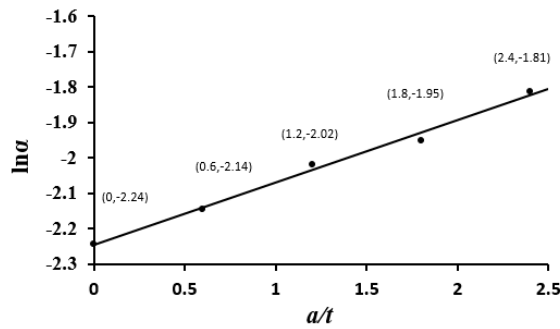


圖 11.  $\ln \alpha$  與  $a/t$  之關係圖。

#### 四、結論

本文係探討凹痕深度為 0.0、0.3、0.6、0.9 及 1.2 mm 的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載的行為與損壞。根據實驗測試與理論分析的結果，大致可歸納成以下的結論：

- (1) 無凹痕 6061-T6 鋁合金管承受循環彎曲負載時， $M/M_0 - \kappa/\kappa_0$  曲線顯示循環硬化的現象，最後  $M/M_0 - \kappa/\kappa_0$  迴圈會趨於一穩定的狀態。而有凹痕 6061-T6 鋁合金管承受循環彎曲負載時，在卸載的過程中，由於凹痕兩側的接觸，會造成彎矩值先增加後趨

緩最後減少，但經過數個循環圈數後， $M/M_0 - \kappa/\kappa_0$  曲線也會呈現一穩定的迴圈。

- (2) 無凹痕 6061-T6 鋁合金管承受循環彎曲負載時， $\Delta D_0/D_0 - \kappa/\kappa_0$  曲線呈現對稱棘齒狀的成長趨勢變化。而有凹痕 6061-T6 鋁合金管承受循環彎曲負載時， $\Delta D_0/D_0 - \kappa/\kappa_0$  曲線呈現不對稱棘齒狀的成長趨勢變化。凹痕深度越深， $\Delta D_0/D_0 - \kappa/\kappa_0$  曲線就越不對稱，且橢圓化成長速度也越快。
- (3) 由實驗不同凹痕深度 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下  $\kappa_c/\kappa_0 - N_f$  關係中顯示，凹痕深度越深，則達到損壞時所需循環圈數就越少。若將上述關係以雙對數座標來表示可發現，五種不同凹痕深度的  $\kappa_c/\kappa_0 - N_f$  關係呈現五條不平行的直線。本計畫以方程式(1)、(2)及(3)來描述  $\kappa_c/\kappa_0 - N_f$  關係，結果顯示理論和實驗結果相當契合

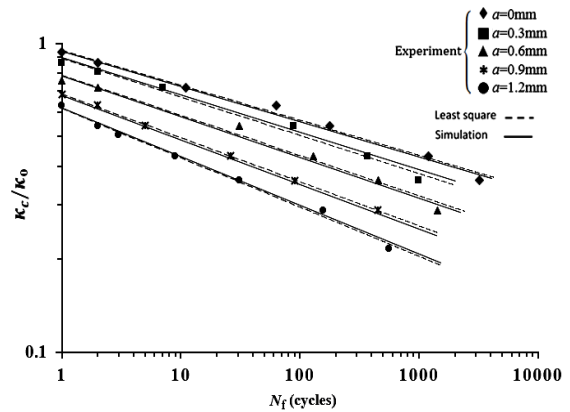


圖 12 實驗與理論模擬不同凹痕深度的 6061-T6 鋁合金管在循環彎曲負載下控制曲度 ( $\kappa_c/\kappa_0$ ) 與循環至損壞圈數 ( $N_f$ ) 雙對數座標之關係圖。

#### 符號說明

- |          |          |
|----------|----------|
| $a$      | 凹痕深度     |
| $C$      | 材料參數     |
| $C_0$    | 材料參數     |
| $D_0$    | 圓管外直徑    |
| $M$      | 彎矩量      |
| $M_0$    | 無因次化的彎矩量 |
| $N_f$    | 循環至損壞圈數  |
| $t$      | 圓管壁厚     |
| $\alpha$ | 材料參數     |

$\alpha_0$	材料參數
$\beta$	材料參數
$\Delta D_0$	圓管外直徑變化量
$\gamma$	材料參數
$\kappa$	曲度量
$\kappa_0$	無因次化的曲度量
$\kappa_c$	控制曲度
$\sigma_0$	降伏應力
$\sigma_u$	極限應力。

### 參考文獻

- [1] Shaw, P. K. and Kyriakides, S., "Inelastic Analysis of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *Int J. Solids Struct.*, Vol. 21, No. 11, pp.1073-1100, 1985.
- [2] Kyriakides, S. and Shaw, P. K., "Inelastic Buckling of Tubes under Cyclic Loads," *ASME J. Pres. Ves. Tech.*, Vol. 109, No. 2, pp. 169-178, 1987.
- [3] Corona, E. and Kyriakides, S., "On the Collapse of Inelastic Tubes under Combined Bending and Pressure," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 24, No. 5, pp. 505-535, 1988.
- [4] Corona, E. and Kyriakides, S., "An Experimental Investigation Degradation and Buckling of Circular Tubes under Cyclic Bending and External Pressure," *Thin-Walled Struct.*, Vol. 12, No. 3, pp. 229-263, 1991.
- [5] Kyriakides, S. and Ju, G.T., "Bifurcation and Localization Instabilities in Cylindrical Shells under Bending," - I. Experiments. *Int. J. Solids and Struct.*, Vol. 29, No. 9, pp. 1117-1142, 1992.
- [6] Corona, E. and Vaze, S., "Buckling of Elastic-plastic Square Tubes under Bending," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 38, No. 7, pp. 753-775, 1996.
- [7] Corona, E. and Kyriakides, S., "Asymmetric Collapse Modes of Pipes under Combined Bending and Pressure," *J. Eng. Mech.*, Vol. 126, No. 12, pp. 1232-1239, 2000.
- [8] Corona, E., Lee, L. H. and Kyriakides, S., "Yield Anisotropic Effects on Buckling of Circular Tubes under Bending," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 43, No. 22, pp. 7099-7118, 2006.
- [9] Kyriakides, S., Ok, A., and Corona, E., "Localization and Propagation of Curvature under Pure Bending in Steel Tubes with Lüders Bands," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 45, No. 10, pp. 3074 -3087, 2008.
- [10] Limam, A., Lee, L. H., Corana, E. and Kyriakides, S., "Inelastic Wrinkling and Collapse of Tubes under Combined Bending and Internal Pressure," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 52, No. 5, pp. 637-647, 2010.
- [11] Hallai, J. F. and Kyriakides, S., "On the Effect of Lüders Bands on the Bending of Steel Tubes," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 48, No. 24, pp. 3275-3284, 2011.
- [12] Limam, A., Lee, L. H. and Kyriakides, S., "On the Collapse of Dented Tubes under Combined Bending and Internal Pressure," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 55, No. 1, pp. 1-12, 2012.
- [13] Bechle, N. J. and Kyriakides, S., "Localization of NiTi Tubes under Bending," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 51, No. 5, pp. 967-980, 2014.
- [14] Pan, W. F., Wang, T. R. and Hsu, C. M., "A Curvature-Ovalization Measurement Apparatus for Circular Tubes under Cyclic Bending," *Exp. Mech.*, Vol. 38, No. 2, pp. 99-102, 1998.
- [15] Pan, W. F. and Her, Y. S., "Viscoplastic Collapse of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 120, No. 4, pp. 287-290, 1998.
- [16] Lee, K. L., Pan, W. F. and Kuo, J. N., "The Influence of the Diameter-to-thickness Ratio on the Stability of Circular Tubes under Cyclic Bending," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 38, No. 14, pp. 2401-2413, 2001.
- [17] Pan, W. F. and Lee, K. L., "The Effect of Mean Curvature on the Response and Collapse of Thin-Walled Tubes under Cyclic Bending," *JSME Int. J. (Japan Society of Mechanical Engineers), Series A*, Vol. 45, No. 2, pp. 309-318, 2002.
- [18] Lee, K. L. and Chang, K. H., "Endochronic Simulation for Viscoplastic Collapse of Long, Thick-walled Tubes Subjected to External Pressure and Axial Tension,"



- Struct. Eng. Mech. – an Int. J. , Vol. 18, No. 5, pp. 627-644, 2004.
- [19] Chang, K. H., Pan, W. F. and Lee, K. L., “Mean Moment Effect of Thin-walled Tubes under Cyclic Bending,” Struct. Eng. Mech. – an Int. J., Vol. 28, No. 5, pp. 495-514, 2008.
- [20] Chang, K. H. and Pan, W. F., “Buckling Life Estimation of Circular Tubes under Cyclic Bending,” Int. J. Solids Struct., Vol. 46, No. 2, pp. 254-270, 2009.
- [21] Lee, K. L., Hung, C. Y. and Pan, W. F., “Variation of Ovalization for Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” J. Mech., Vol. 26, No. 3, pp. 403-411, 2010.
- [22] Lee, K. L., “Mechanical Behavior and Buckling Failure of Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” Struct. Eng. Mech., Vol. 34, No. 3, pp. 367 -376, 2010.
- [23] Lee, K. L., Hsu, C. M. and Pan, W. F., “The Influence of Diameter-to-thickness ratios on the Response and Collapse of Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” J. Mech., Vol. 28, No. 3, pp. 461-468, 2012.
- [24] Lee, K. L., Hsu, C. M. and Pan, W. F., “Viscoplastic Collapse of Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” Acta Mech. Solida Sinica, Vol. 22, No. 6, pp. 629-641, 2013.
- [25] Lee, K. L., Hsu, C. M. and Pan, W. F., “Response of Sharp-notched Circular Tubes under Bending Creep and Relaxation,” Mech. Eng. J., Vol. 1, No. 2, pp. 1-14, 2014.
- [26] Lee, K. L. Meng, C. H. and Pan, W. F., “The Influence of Notch Depth on the Response of Local Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” J. Appl. Math. Phy., Vol. 2, No. 6, pp. 335-341, 2014.
- [27] Lee, K. L. Chang, K. H. and Pan, W. F., “Experimental and Theoretical Evaluations of the Effect of Notch Directions on the Stability of Local Sharp-notched Circular Tubes under Cyclic Bending,” submitted to Int. J. Appl. Mech., 2016.

