



執行期間：2001 年 08 月 01 日至 2002 年 07 月 31 日

計畫參與人員：鍾禮全

☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

中 華 民 國 91 年 10 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

超塑性 Ti-6Al-4V 板材的失穩分析及破壞判準

The Instability Analysis and Fracture Criterion

for Superplastic Ti-6Al-4V sheets

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-170

執行期限：2001 年 08 月 01 日至 2002 年 07 月 31 日

計畫主持人：鄭榮和 國立台灣大學機械工程學系

共同主持人：

計畫參與人員：鍾禮全 國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫主旨為分析超塑性板材在成形過程中，失穩現象的發生及不穩定塑性流局部集中的過程，並依此提出超塑性成形的破壞判準。在實際應用上，超塑性吹製成形製程須考慮兩項因素：一是縮短成形時間而提高生產效率；另一則是使成品的板厚分佈得更均勻或達到所需的要求。由於超塑性成形是屬於慢速成形的製程，因此提高生產效率是刻不容緩的，通常目標是希望能在最短的時間內完成加工，同時又能維持產品所需的品質。本研究所發展的破壞判準與對失穩程度的量化指標以及相關的成果可應用於設計兼顧生產效率及產品品質的超塑性成形製程。

關鍵詞：超塑性成形、失穩、穩定判準、應變集中、不穩定塑性流、有限元素模型、破壞判準、Ti-6Al-4V 板。

Abstract

This research project is aiming at analyzing the instability phenomenon and the localization process of unstable plastic flow during superplastic sheet forming, and thus proposing a fracture criterion for superplastic forming. Two factors are considered in practical SPF, one of which is to shorten forming time thus improving productivity, and the other is to obtain a more uniform distribution of thickness. Since SPF is a slow forming process, there is a strong incentive to increase the efficiency of production. The goal is to form the workpiece in the shortest time while maintaining the required quality. By means of the fracture criterion, instability measure and analysis method developed in this study, superplastic forming processes that achieve both high productivity and quality can be designed.

Keywords: superplastic forming, instability, stability criterion, strain concentration, unstable plastic flow, finite element model, fracture criterion, Ti-6Al-4V sheets.

二、前言

「超塑性」(superplasticity)是指某些材料在特定的顯微組織及成形條件下，可以呈現出異常高塑性的特性，經常以 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 表示其變形行為。

超塑性材料在成形過程中發生破壞的原因，是由於不穩定塑性流以及內部空孔的成核、成長與結合同影響所造成的[1]。Zhou 等人[2]假設成形過程中 m 是定值，建立了一套破壞模式圖，可以空孔成長率及應變率敏感指數來預測超塑性破壞模式。Hart[3]對單軸拉伸發展了一套穩定判準，應用在具有應變硬化及應變率硬化特性的材料。Ding 等人[4]採用 Hart 穩定判準，以「基於微觀的本構方程式」，針對 Ti-6Al-4V 板材求得平面應變下之「變應變率路徑」，以該路徑進行超塑性吹製可使變形保持在穩定的狀態。Ding 等人[5]將 Hart 穩定判準推廣到薄板受雙軸拉伸的狀態。

本研究以 Ti-6Al-4V 板材為研究對象，配合超塑性破壞吹製實驗及有限元素分析模擬，以「局部流集中因子」[7]定量分析其在 900°C 定壓吹製下，不穩定塑性流集中的過程，並提出破壞判準。應用此一分析方法，將可深入了解超塑性變形的破壞機制，有效估計各成形條件下材料的成形極限，進而設計出兼顧生產效率及產品品質的超塑性成形製程。

三、局部流集中因子

超塑性變形過程中一旦發生了不穩定現象，塑性流局部集中的過程將控制材料發生破壞前可繼續變形的量。塑性流局部集中的程度越大，則材料越接近成形極限。定義塑性流局部集中程度的指標，稱之為「局部流集中因子」(Flow Localization Factor, FLF)。對於 $\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 的材料，在雙軸拉伸狀態下，局部流集中因子 ξ 可表為

$$\xi = \begin{cases} \frac{1-\alpha\gamma}{m} - 1 & \text{if } 1-\alpha\gamma - m > 0 \\ 0 & \text{if } 1-\alpha\gamma - m \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\gamma = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right), m = \frac{\dot{\varepsilon}}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right), a = f \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) \quad (2)$$

在等雙軸拉伸下， $\rho=1$ ， $a=2$ ，則式(1)為

$$\xi = \begin{cases} \frac{1-2\gamma}{m} - 1 & \text{if } 1-2\gamma-m > 0 \\ 0 & \text{if } 1-2\gamma-m \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

藉由控制「後均勻變形」的過程，將可限制後續的塑性流局部集中。

四、應變集中現象之分析

4.1 定壓超塑性破壞吹製實驗

「局部流集中因子」可做為應變集中的指標，而該參數與成形極限的關係，需要以實驗來進行探討。本研究設計了超塑性破壞吹製實驗，將 2.0mm 厚的 Ti-6Al-4V 板材在 900°C 下，以定壓吹製成圓錐形，直到鈦板發生破壞為止。同時配合有限元素法加以分析模擬，計算破壞發生時，破壞點的局部流集中因子。材料性質採用較符合實際情況的 $\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ 做為本構方程式，其中 m 、 n 均為應變率之函數。由於圓錐形之頂點是變形量最大之處，因此破壞發生於該處。模具分為上、下模，如圖 1 所示。

破壞發生之點，亦即圓錐形吹製品之頂點為等雙軸狀態， $\rho=1$ 。圖 2 表示等壓吹製下吹製品頂點的局部流集中因子對成形時間之關係，由此圖可知，成形壓力越小則穩定成形的時間越長。扣除穩定成形部份 ($\xi=0$)，局部流集中因子對成形時間的曲線大致可分為三部分：I. 局部流形成初期；II. 應變穩定集中階段；III. 應變加速集中階段。第二階段佔了大部份的成形時間，而破壞必在第三階段發生。詳細說明敘述於[7]。

4.2 非定壓超塑性破壞吹製實驗

本節將進行非定壓破壞吹製實驗，並配合有限元素法加以分析模擬，計算破壞發生時破壞點的局部流集中因子。

本研究設計了三種壓力路徑進行破壞吹製實驗，分別為定應變率路徑、階梯降壓路徑、以及階梯升壓路徑，壓力對時間關係圖示於圖 3。定應變率路徑乃控制吹製品最高點之應變率為定值 ($3.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$)；階梯降壓路徑起初保持定壓 2.94MPa，之後降至定壓 1.96MPa；而階梯升壓路徑則先保持定壓 1.96MPa，之後升至定壓 2.94MPa。

各壓力路徑下的破壞時間列於表 1，而分析模擬所得吹製品頂點的局部流集中因子對成形時間關係圖則示於圖 4，定壓 1.96 及 2.94 MPa 之局部流集中因子曲線亦附於圖中做為比較。

由圖 4 可明顯看出，以定應變率路徑吹製的局部流集中因子曲線，並無三階段的現象；而對於階梯降壓或階梯升壓吹製，在壓力突降或突升的階

段，局部流集中因子亦突降或突升，意味著塑性流集中的程度有突然的變化，更無法以三階段的現象加以描述。此乃因局部流集中因子代表的是「瞬間」的局部塑性流集中程度，而非整個成形過程所造成(或累積)的集中量。因此，我們使用「累積集中」這個參數來描述超塑性材料在變壓吹製下，其塑性流集中的現象。

4.3 累積集中

為了描述變壓吹製下，整個成形過程中超塑性材料的塑性流集中量，本研究以「累積」的概念定義了「累積集中」(Accumulated Localization, AL)。在成形時刻 $t=t^*$ 時，累積集中 AL 定義為

$$AL = \int_{t=t_0}^{t^*} \xi(t) dt = \int_{t=t_0}^{t^*} \xi(t) dt \quad (4)$$

其中 t_0 為變形進入不穩定狀態的時間。累積集中的意義即為圖 5 所示陰影部份的面積。

五、平均局部流集中因子與破壞判準

5.1 破壞判準

將定壓及非定壓實驗之累積集中值同時表示於圖 6，可發現破壞點分佈在一過原點且斜率為 0.3162 的直線上。此斜率代表「累積集中」除以「不穩定成形時間」之值。因此定義「平均局部流集中因子」(Mean Flow Localization Factor, MFLF)為

$$MFLF = \frac{AL}{t^* - t_0} = \left(\frac{1}{t^* - t_0} \right) \int_{t=t_0}^{t^*} \xi(t) dt \quad (5)$$

則本研究提出之破壞判準為：超塑性材料成形過程在不穩定塑性流主導的情形下，當平均局部流集中因子達到某一臨界值時，材料即發生破壞。對於本研究使用之 Ti-6Al-4V 板材在溫度 900°C 下，該臨界值為 0.3162。

5.2 破壞判準之驗證

為了驗證破壞判準，本研究採用 10mm 厚的 Ti-6Al-4V 板材進行定壓之超塑性破壞吹製。所使用之模具同圖 1，實驗步驟與 4.1 節所述相同，成形溫度仍為 900°C，成形壓力分別為 1.47、1.96 及 2.45MPa。實驗完成後紀錄材料發生破壞時間，如表 2 所示，並執行有限分析，模擬至破壞時間，同時計算此時破壞點之累積集中值。三個成形壓力下，圖 7 表示破壞點之累積集中對不穩定成形時間關係。以一通過原點的直線對破壞點進行曲線配湊 (curve fitting)，可得一斜率為 0.2883 之直線，與上一小節所提之值 0.3162 之誤差為 -8.82%，為一可接受之誤差範圍。

六、結論

本研究針對超塑性變形的應變集中現象進行理論探討，並以超塑性破壞吹製實驗，配合有限元素模擬，了解超塑性破壞行為與應變集中之間的關

係。由於超塑性成形是屬於慢速成形的製程，因此提高生產效率是刻不容緩的，通常目標是希望能在最短的時間內完成加工，同時又能維持產品所需的品質。為了達成此目標，新的加工參數控制法是相當值得發展的，然而究竟要如何控制，才能使生產時間縮到最短又不致影響產品的品質，或造成成形過程中破壞的發生，則需要有效的判準加以評估設計。本研究所提不穩定塑性流集中現象的定量分析及破壞判準，將有助於此一方面的研究探討，是未來繼續探討的方向。

綜合本文之分析與作證，可歸納成下列幾點：

1. 提出局部流集中因子，定量描述不穩定塑性流的集中現象。
2. 等壓吹製下，不穩定塑性流集中的現象可分為局部流形成初期、應變穩定集中階段與應變加速集中等三個階段，第二階段佔了大部分的成形時間，而破壞必發生在第三階段。
3. 提出「累積集中」，可有效的表示整個成形過程中，材料某處所累積的塑性流集中量。
4. 超塑性材料成形過程在不穩定塑性流主導的情形下，當平均局部流集中因子達到某一臨界值時，材料即發生破壞。對於本研究所使用之 Ti-6Al-4V 板材在溫度 900°C 下，該臨界值為 0.3162。
5. 本研究所提定量分析不穩定塑性流的方法，可應用於發展兼顧生產效率與產品品質之超塑性成形製程。

參考文獻

- [1] J. Pilling and N. Ridley, Superplasticity in Crystalline Solids, Institute of Metals, pp. 102-158 (1989).
- [2] D.-J. Zhou, J. Lian and M. Suery, "Numerical study of superplastic deformation with superimposed pressure for cavity sensitive materials," *Materials Science and Technology*, Vol. 4, pp. 348-353, (1988).
- [3] E. W. Hart, "Theory of the Tensile Test," *Acta Metallurgica*, Vol. 15, pp. 351-355 (1967).
- [4] X. D. Ding, H. M. Zbib, C. H. Hamilton and A. E. Bayoumi, "On the Optimization of Superplastic Blow-Forming Processes," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 4, No. 4, pp. 474-485 (1995).
- [5] X. D. Ding, H. M. Zbib, C. H. Hamilton and A. E. Bayoumi, "On the Stability of Biaxial Stretching With Application to the Optimization of Superplastic Blow-Forming," *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 119, pp. 26-31 (1997).

- [6] Du Zhixiao, Li Miaoquan, Liu Mabao and Wu Shichun, "Forming Limit During Superplastic Deformation of Sheet Metals," *Applied Mathematics and Mechanics* (English Ed.), Vol. 17, No. 2, pp. 133-138 (1996).
- [7] L. C. Chung, and J. H. Cheng, "The Analysis of Instability and Strain Concentration During Superplastic Deformation," Submitted to *Materials Science and Engineering A*.
- [8] C. H. Johnson, C. H. Hamilton, H. M. Zbib and S. K. Richter, "Designing Optimized Deformation Paths for Superplastic Ti-6Al-4V," *Advances in Superplasticity and Superplastic Forming*; N. Chandra et al., Ed., The Minerals, Metals and Materials Society, pp. 3-15 (1993).

表1 非定壓路徑吹製 2mm 厚 Ti-6Al-4V 板材之實驗結果

成形壓力路徑	定應變率 $3 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$	階梯降壓	階梯升壓
破壞時間(sec)	465	858	838

表2 定壓路徑吹製 1mm 厚 Ti-6Al-4V 板材之實驗結果

成形壓力[MPa]	1.47	1.96	2.45
破壞時間[sec]	480	275	170

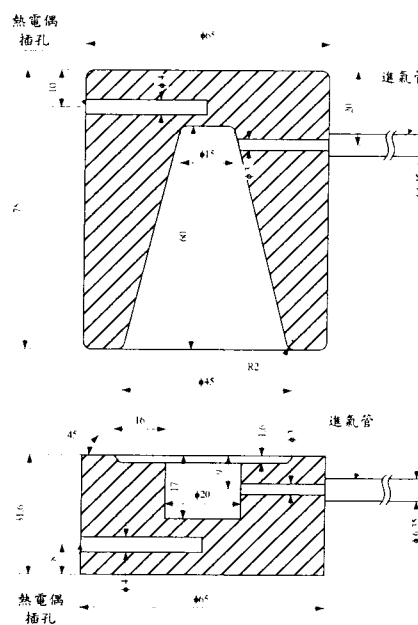


圖1 超塑性吹製模具設計圖

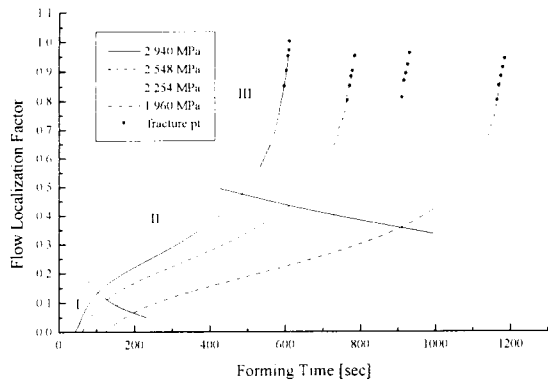
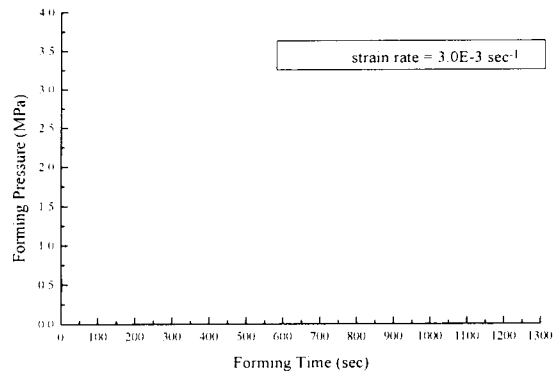
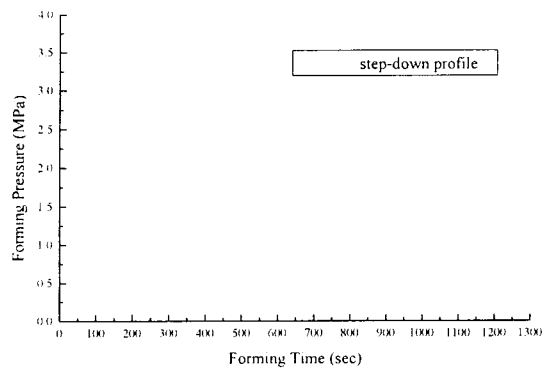


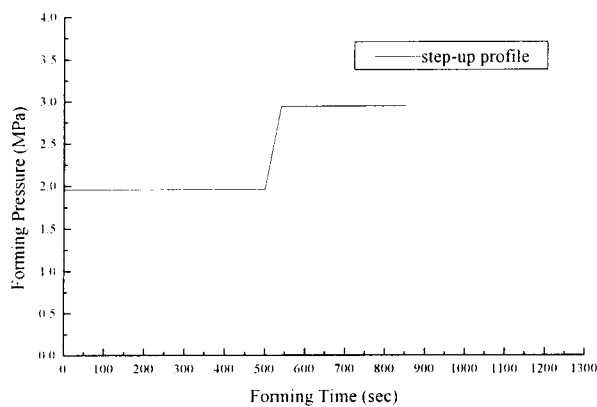
圖 2 等壓吹製下破壞點的局部流集中因子對成形時間關係圖



(a)



(b)



(c)

圖 3 成形壓力路徑 (a) 定應變率, (b) 階梯降壓, (c) 階梯升壓

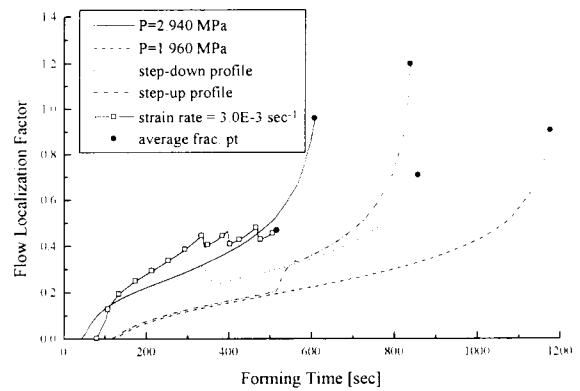


圖 4 吹製品頂點的局部流集中因子對成形時間關係圖

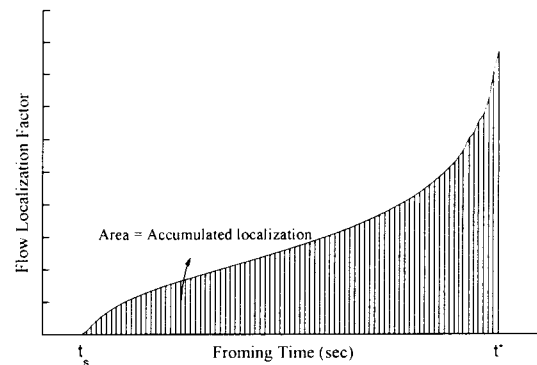


圖 5 累積集中示意圖

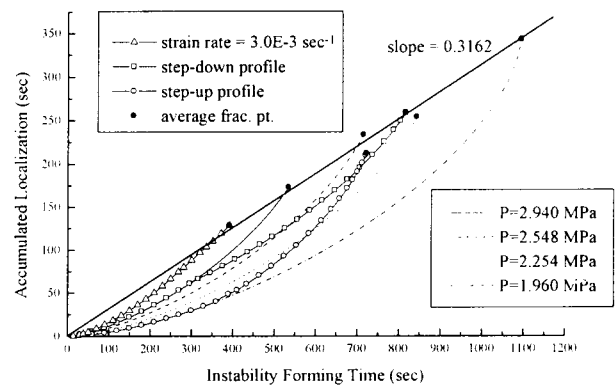


圖 6 累積集中

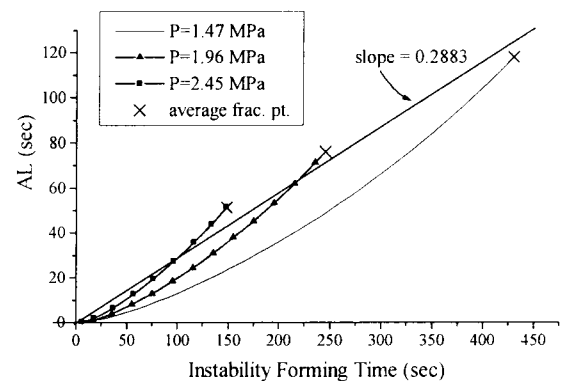


圖 7 累積集中對不穩定成形時間關係圖(板材厚度=0.1mm)