

鍛造工件破壞準則之分析

Analysis of the Fracture Criterion for Forged Products

計畫編號：NSC-87-2212-E-002-043

執行期間：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：陳復國 台灣大學機械系副教授

一、中文摘要：(關鍵詞：壓縮試驗、冷鍛、破壞準則、有限元素法)

本計畫的主題在於探討鍛造材料經塑性變形至某一特定程度而不發生破裂的能力，並利用現有的破壞準則公式，推導出以應變為函數的表示式，且由實驗獲得破壞時的應變，可得一判斷破壞的常數值，再用實驗驗證模擬情況的可靠性。本研究成果可幫助設計者迅速地檢驗斷成的合理性，而不是直接訴諸於實際的試打。

因為鍛粗實驗時，試片的變形模式受接觸面摩擦力的影響很大，因此，在利用電腦模擬實驗過程時需先確定摩擦係數。因模擬分析可假設為完全粗糙的接觸條件，如此即可去除摩擦的不確定性因素。本計畫採用已經商業化的有限元素分析軟體 DEFORM，利用該軟體來模擬預測鍛件是否會有破損的原因。設計者可在設計模具與鍛打程序時，以簡單實驗配合電腦模擬結果，提供材料成形過程中破裂極限的預測，並訂定一破壞準則加以規範。

二、英文摘要

Key words: forging, compression test, fracture criterion, finite element method.

In a forging process, the forged part is subjected to a very complex deformation resulting in a great amount of stress state. Consequently, fracture may occur in the forged part before the filling of material in the die cavity, or the forged part may become very susceptible to fracture in the subsequent use.

In the present study, a fracture criterion for the forged part is developed based on the strain state of the part during the forging process. The fracture criterion is validated by cylinder compression tests, and the critical values for selected steels are determined.

The finite element method is also applied to calculate the stress and strain distribution of the forged part. The finite element method provides a useful information in the determination of the critical strain state and proves itself being an effective tool in the analysis of a metal forming process.

二、計畫緣由與目的：

傳統的鍛造製程設計，經常是利用近似實驗或由基本假設分析，以及昂貴的試誤法所得的經驗累積，然後

將其統合成鍛造設計手冊，而在使用上則仿造手冊上的記錄去從事生產製造。

但是近幾年來，由於工業發展的需求，鍛造加工的成品已逐漸趨向於複雜幾何形狀及採用成形性困難的高強度材料。在複雜多變化的鍛造製程中，材料破裂及缺陷的發生已是無法避免的；正因如此，傳統的鍛造以及試誤法已經無法應付市場需求。欲提高成品品質並節省製造成本，則必須採用合理的鍛造製程設計，充分利用材料特性，並能有效的控制製程參數。

有限元素分析 (finite element analysis) 不但可獲得許多實驗時無法量測的數據，且對成形的細節和過程參數都可以探索和追溯，有助於詳細的觀察整個成形的過程，獲得比較清楚和深入的瞭解，從而引導實驗時觀察和量測的焦點，使設計者能設計出較佳的模具和鍛造程序。這對產品品質的改良，減少因實際開模、試模次數而耗費的成本與提高產品的競爭力等，都有莫大的助益，且使廠商更敢於開發新的產品。

鍛造製程中可能發生的缺陷種類很多，本計畫主要針對胚料是否會發生破裂行為進行探討，並且討論直接影響金屬在鍛造過程中變形能力因素。分析時，藉由簡單形狀之鍛粗 (upsetting) 試驗及有限元素分析模擬，並從中引進破裂準則，以定量的方法來解釋材料的破裂原因，如此，由模擬鍛粗過程至破裂發生的計算，可由破壞準則得知。配合所得之破壞準則的解釋可以預測鍛造過程中是否可能會發生破裂，最後以實驗加以驗

證其可靠性。

三、研究方法：

(一) 研究方法

鍛造加工是人類最早使用的成形技術，而且在成品形狀的複雜程度上，以及能應用之加工材料的種類，鍛造加工所適用的範圍均非常的廣泛。本計畫中所採用的破壞準則是利用由 Cockcroft 及 Latham 於 1968 年所提出的最大張應變能量破壞標準。材料的破壞是由於內部某點單位體積張應變能量到達或超過某一臨界值而壞，並且由公式配合試片的簡單試驗如鍛粗，即可求出材料在破裂時所累積的單位體積張應變能量。由於有限元素法軟體 DEFORM 在後處理檔可得知 Damage 的分佈情形，而破裂壓縮量可以很容易的由實驗之施力與位移曲線得出。因此，在本計畫中利用實驗試片來求取材料的臨界破裂壓縮量。可求得破裂壓縮量做為材料常數，而以求得的破裂壓縮量，來作為破壞準則的驗證。將先前求得材料臨界破裂壓縮量 (D) 當作判斷材料破裂與否的常數，並可對不同摩擦係數下進行分析。而先前所推導出的應變函數如下：

$$D = \int_0^{\bar{e}_f} \frac{S_1}{S} d\bar{e} = \frac{1}{\sqrt{3}} (1 + 2a) \frac{1}{\sqrt{a^2 + a + 1}} \int_0^{\bar{e}_f} d\bar{e} \\ = \frac{1}{\sqrt{3}} (1 + 2a) \Delta e_z$$

因模擬鍛粗採用的形式為軸對稱的圓柱體，而在整個鍛粗過程，試片的上下情況相同，因此採用 1/2 之截面積進行軸對稱的二維平面分析 (圖 1)。在網格的疏密分佈方面，在靠近

試片右上方採用較密的網格，其理由是這種網格分割，比較能夠精確的模擬出試片端面的翻摺（fold over）現象，試片在靠近中心位置的區域應變量很小，甚至在與衝模接觸的附近地方，會形成一個幾乎不會流動的區域，稱為死金屬區（dead zone），故在這些區域用以較疏的網格模擬即可。

（二）研究成果

在本計畫鍛粗實驗的過程中，當試片達到一定程度時，其赤道線處之自由表面將產生 45 度之裂紋。對 $\phi 6 \times 8$ （mm）的試片而言，可以由實驗實驗所得所得之負荷—位移曲線看出破裂時之壓縮量，因在表面產生裂紋時，其負荷—位移曲線會有明顯的下降的趨勢，而實驗兩種材料分別為 Al 7075 及 Al 6061 的材料，7075 的材質則有明顯的裂痕產生（圖 2 及圖 3），反之，6061 材質的成形性較好，並沒有發生破裂的情況。而摩擦條件亦是一個考量的因素，由模擬分析結果發現，本實驗所採用的試片，其接觸面摩擦係數小於 0.25 時，摩擦力對試片鍛粗變形模式影響很大，即不同的摩擦係數將造成試片網格變形及應力分佈的情況有所不同，但如果摩擦係數超過 0.25，則可以輕易解決此困擾。因此，欲使模擬分析更能接近真實情況，對模具與試片間之「平均摩擦係數」更顯重要，本文採用圓環壓縮試驗模擬分析做出一參考數據圖（圖 5），並利用實驗加以驗證，故得所需要的摩擦係數值。

四、結果與討論

由以上的結果可知，鋁合金材料經塑性變形至特定程度而不發生破裂之能力，利用圓柱壓縮試驗配合有限元素模擬，在 DEFORM 軟體中本身具有可以判讀出 Damage 值的大小，由模擬鍛粗實驗過程至破裂所得到之 Damage factor 作為該種材料在特定加工條件下（溫度、應變率等）之破壞臨界值（圖 4）。在應用時，可將以求得材料的變形過程與可能發生的缺陷。此結果可提供設計者在決定素材尺寸及模具設計或製程條件的決定時，有詳細的參考資料。藉由此工具的輔助可減少許多不必要的試誤法，節省很多製造成本。當鍛件幾何形狀簡單且尺寸叫小時，由於破裂較不易發生，而且所需的鍛造力不大，因此可以選擇在常溫狀態金行冷鍛加工，其優點是：可以得到光滑的表面及精確的尺寸，因為鍛件不需加熱，故鍛造操作環境較佳可減少污染的問題。

五、參考文獻

- [1] S.I. Oh and S. Kobayashi “Workability of Aluminum Alloy 7075-T6 in Upsetting and Rolling”, J. Eng. for Ind., pp.800-806. August 1976.
- [2] B.P.P.A.Gouveia, J.M.C.Rodrigue and P.A.F.Martins “Fracture Predicting in Bulk Metal Forming” Int. J. Mech. Sic. pp. 361-372, 1996. Vol. 38, No. 4.
- [3] C.C.Chen, S.I. Oh, and S. Kobayashi “Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing” Journal of Engineering

- for Industry , pp.23-35. Vol. 101 ,February 1979.
- [4] S. Kobayashi “Deformation Characteristics and Ductile Fracture of 1040 Steel in Simple Upsetting of Solid Cylinder and Rings” , J. Eng. Ind. , pp. 391-399, May 1970 .
- [5] S.I. Oh , W. T. Wu , J.P.Tang and A. Vedhanayagam “ Capabilities and applications of FEM code DEFORM:the perspective of the developer” Journal of Materials Processing Technology , pp.25-42 1991.
- [6] N.A.Abdul “Friction Determination During Bulk Plastic Deformation of Metals” Annals of the CIRP Vol. 30, pp.143-146,January 1981.

六、圖表

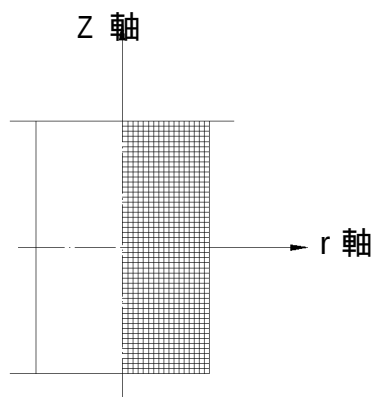


圖 1. 有限元素分割網格

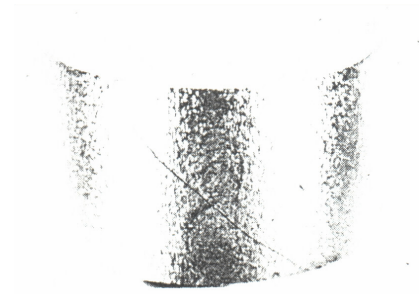


圖 2 鍛粗實驗結果 (剛產生破裂裂痕)



圖 3 鍛粗實驗結果 (已產生劇烈破壞)

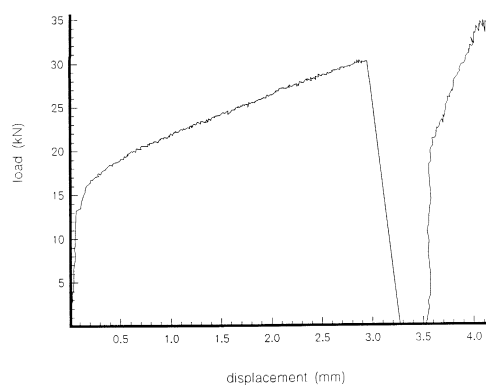


圖 4 實驗所得荷重對位移曲線

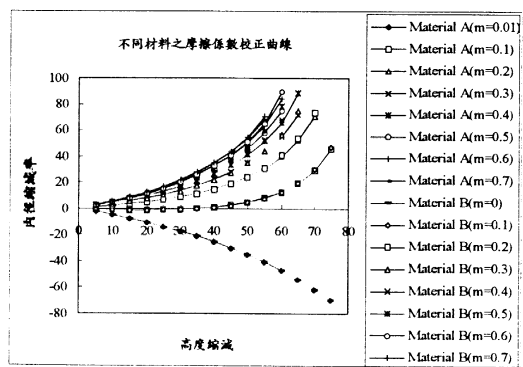


圖 5 不同材料之摩擦係數校正曲線