

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

粉末燒結鍛造材料內空孔演化與破壞之分析及預測

Void Evolution and Fracture Prediction in Powder Sintered Materials

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-171

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：黃承照 國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫主旨為探討粉末燒結材料成形極限，發展材料破壞判準，同時考量變形過程空孔之演化。結合實驗量測及有限元素模擬，藉以探討燒結材料破壞機制。新的孔隙材料成形極限判準乃擷取材料內「最大主軸應力方向之應變能密度」而建構，將其定義為最大主軸應變能密度。鍛造過程材料內之最大主軸應變能密度不斷累加，一旦達到臨界值，表示材料發生破壞。燒結材料所含空孔降低其成形極限。而裂紋初始係決定於最大主應力之垂直方向。研究流程透過簡單拉伸及壓縮實驗獲取材料基本性質，並進行不同荷載條件下之有限元素模型驗證。繼續推廣此模型從事粉末鍛造實例破裂預測。

關鍵詞：粉末鍛造、孔隙材料、空孔演化、破壞判準、應變能密度、有限元素分析

Abstract

This project is to investigate the forging limit of sintered materials by developing a new workability criterion to exactly consider the effects of void evolution in the process. The most important concept is the connection of experiments and finite element simulations to examine fracture mechanisms of sintered materials. The new fracture criterion for porous media is developed with the strain energy density on the maximum principal axis, which is defined as the maximum principal strain energy density (MPSED). Fracture occurs in materials once the accumulated MPSED meets the critical value. Voids degrade the forming limit of sintered materials. The crack initiation depends on the normal direction of the maximum principal stress. Material properties of porous compacts are measured by both the simple tension and compression test. Finite element models are verified with experiments under different loading conditions. The fracture prediction in P/F practices is presented.

Keywords: powder forging, porous materials, void evolution, fracture criteria, strain energy density, finite element analysis (FEA)

二、前言

粉末鍛造 (powder forging) 結合粉末冶金 (powder metallurgy) 與鍛造技術，同時包括兩種製程之優點，適於生產複雜外形、特殊用途，以及機械性質符合嚴苛操作條件之多樣化製品。

然而胚料幾何尺寸不適合或模具設計不當，將導致工件於鍛造過程發生破壞。過去許多學者探討孔隙材料可鍛性，Abdel-Rahman 與 El-Sheikh [1] 採用應力分量建構可加工性判準；Downey 與 Kuhn [2] 以及 Zhang et al. [3] 利用應變分量以探討孔隙材料破壞軌跡。另外，Tabata 與 Masaki [4] 以及 Lee and Zhang [5] 則透過應變能密度臨界值研究燒結材料鍛造成形極限。

本研究計畫旨在探討粉末燒結材料成形極限，發展材料破壞判準，結合實驗及有限元素模擬，考量變形過程空孔之演化，掌握燒結材料破壞機制。

三、理論基礎

3.1 降伏準則

關於孔隙材料力學行為，本計畫採用 Gurson [6] 所提出，以及 Tvergaard [7] 引入純量參數修正之孔隙介質降伏方程式，公式如下所示

$$\Phi(\sigma, f) = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3q_2 p}{2\sigma_y}\right) - (1 + q_3 f^2) = 0, \quad (1)$$

其中

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (2)$$

為 von Mises 等效應力，

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - p \mathbf{I} \quad (3)$$

為應力張量 $\boldsymbol{\sigma}$ 中的偏差應力，

$$p = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{I} \quad (4)$$

則為靜水應力，以及 \mathbf{I} 為單位矩陣(identity matrix)。而 f 為空孔體積比例(void volume fraction)， σ_y 為基材流變應力， q_1 、 q_2 和 q_3 為純量參數，加權方程式中各項之影響比重。本研究乃直接透過實驗取得 Gurson-Tvergaard 公式中 q_1 、 q_2 和 q_3 。

3.2 孔隙材料成形破壞判準

本文最重要的具體貢獻，乃依據能量觀點建構新的孔隙材料成形極限判準，進行粉末鍛造成形過程工件破壞預測。成形過程材料產生塑性變形，可將其所累積總應變能密度分解到三個主軸方向，公式表示如下：

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int \sigma_3 d\varepsilon_3, \quad (5)$$

其中 $U_1 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1$ 為最大主軸方向之應變能密度。材料發生破壞係由最大主軸方向之應變能所主控，可追蹤 U_1 以評估材料可加工性。

新的孔隙材料成形極限判準乃追蹤材料內「最大主軸應力方向之應變能密度」，將其定義為最大主應變能密度(maximum principal strain energy density, MPSED)。同時考量變形過程中，材料所含空孔演化之效應，公式如下所示：

$$\int_0^{\varepsilon_{1, fract}} \sigma_1 d\varepsilon_1 = C_{cr} \cdot e^{-mf}, \quad (6)$$

其中 σ_1 為最大主軸應力， $d\varepsilon_1$ 為此最大主軸方向之應變增量， $\varepsilon_{1, fract}$ 破壞瞬間此最大主軸方向上之應變量；公式右半邊， C_{cr} 為緻密化基材發生破裂臨界值， m 則為材料常數，用以描述材料成形極限臨界值受到空孔率 f 之敏感度。鍛造過程材料內之最大主軸應變能密度不斷累加，一旦達到臨界值，表示材料發生破壞。破壞判準中基材的最大主應變能密度臨界值 C_{cr} ，以及材料常數 m ，須透過實驗配合有限元素計算而取得。

四、實驗架構

4.1 燒結材料準備

利用粉末冶金製程準備燒結試片，其中為了測試基材之降伏應力及塑性行為，將孔隙試片滾軋(rolling)緻密化處理。軋延過程導致材料加工硬化，須經過再結晶(recrystallization)步驟，促使基材回復既有之微觀組織，以便量測正確的材料性質。經由單軸拉伸測試，取得楊氏模數(Young's modulus)、浦松比(Poisson's ratio)、基材初始降伏應力(first yield stress)以及塑性行為等。

4.2 單軸拉伸與壓縮實驗

對於緻密化基材之拉伸測試，試片外形呈平板

狀，中間量測段長度(gauge length)為 50 mm，寬度 12.5 mm。經由單軸拉伸實驗，所得之基材初始降伏應力值約為 126 MPa。基材之塑性行為呈現次方率(power law)的關係 $\bar{\sigma} = k(\bar{\varepsilon}^p)^n$ ，其中係數 k 為 543.63 以及應變硬化指數 n 為 0.3。

繼續製作不同初始比密度和粗高比(aspect ratio)之燒結胚料在不同摩擦條件下進行鍛粗(upsetting)試驗，並且利用應變計製作直徑量測規(diameter gauge)和伸長計(extensometer)，監視燒結材料於變形過程中力學行為以及空孔之演化，確保量測精準度。根據破壞鍛粗測試，獲得不同圓柱試片破裂衝程，以供給有限元素模擬計算之用，從而掌握材料成形極限。

對於 Gurson-Tvergaard 公式中純量參數 q_1 、 q_2 和 q_3 之取得，乃直接將實驗數據帶入降伏方程式中，進行擬合湊配。將楊氏模數 E ，浦松比 ν ，基材初始降伏應力 $\sigma_{first\ yield}$ ，以及孔隙材料之純量參數分別列於表 1。

表 1 基本材料常數

Matrix property			Porous parameter		
E [GPa]	ν	$\sigma_{first\ yield}$ [MPa]	q_1	q_2	q_3
180	0.27	126	1.81	1.00	2.80

五、有限元素模型驗證

5.1 有限元素模型建立

本研究引用有限元素軟體 ABAQUS/Standard 建立模型且執行分析。為使研究順利進行，合理假設以簡化問題有其必要，分列如下：

1. 空孔均勻分佈於試片中，為等向性(isotropic)、均質性(homogeneous)材料。
2. 試片基材為完美鍵結同時不可壓縮。
3. 圓柱試片於無摩擦阻力鍛粗下保持均勻變形。

有限元素模型首先須建立幾何外形及適當網格(mesh)劃分，由於圓柱狀試片外形具有對稱性，僅取 1/4 圓柱部分進行分析，網格建立與邊界條件設定如圖 1，其中靠近模具方向之網格更為細分，以便材料與模具接觸部分產生大變形之精確模擬。使用四節點連續體軸對稱元素於胚料，模具部分則使用剛性元素。將表 1 中材料常數輸入模型中。

5.2 破壞鍛粗驗證

進行無摩擦阻力之圓柱胚料鍛粗模擬，單軸壓縮過程中材料保持均勻變形，輸出不同初始密度之胚料其真實應力(true stress)-應變(strain)曲線，並與實驗數據相互比對，確認有限元素模型真實重現孔隙材料變形行為。繼續進行有摩擦阻力下孔隙燒結圓柱試片壓縮破裂模擬之鍛粗模擬直到胚料產生，輸出不同初始密度之荷重(load)-位移(displacement)曲線和實驗結果比較，如圖 2 所示，試片發生破裂所承受之荷重隨材料所含空孔增加

而降低。

模擬不同初始密度圓柱試片，其在破裂處所計算獲得之應變能密度和孔隙率數據，帶入成形極限判準中，進行擬合湊配，獲得基材的最大主應變能密度臨界值 C_{cr} 為 179.77，以及材料常數 m 為 12.59。

為使有限元素模型能確實掌握粉末燒結材料之成形極限，具備預測材料破壞之能力，在模型中加掛 ABAQUS 所提供的使用者副程式 (user's subroutine) USDFLD 和 URDFIL，將新建構之成形極限判準撰寫於其內，同時輸入經由破壞鍛粗實驗所取得之材料常數。就模擬過程時間增量 (time increment) 中，使用者副程式 USDFLD 逐一積分點計算累加材料內最大主應變能密度。一旦達到臨界值，由副程式 URDFIL 強制中斷分析的進行，旋即輸出破壞分析結果。

為重現燒結材料在破壞鍛粗瞬間，材料所處應變能狀態以及何處開始發生破壞，將工件內部各點在應變能平面上作圖表示，以初始密度為 0.8 之圓柱試片變形後，其內部不同位置的主應變能密度分佈狀態如圖 3 所示，其中赤道線上之 K 點已碰觸到臨界曲線，表示該處首先發生破裂。而圓周面上 H、G 點亦靠近臨界曲線，當鍛粗持續進行，H、G 點向右移動，其最大主應變能密度不斷增加直到碰觸臨界曲線，相繼產生破壞，模擬與實驗結果相當吻合。

六、粉末鍛造實例破壞預測

為了將分析能量實現於粉末鍛造技術，達成預測破壞之目的，藉由前述破壞鍛粗驗證之模型，進行齒輪毛胚鍛造模擬破壞預測，並與實驗結果相互驗證。齒輪毛胚鍛造模具尺寸及圓柱胚料有限元素網格如圖 4 所示，其中圓形胚料直徑 12.5 mm、高 6 mm，而模具外徑 27.5 mm。

齒輪毛胚鍛造破壞實驗及有限元素模擬之荷重-衝程曲線共同呈現於圖 5 中，模擬結果與實驗相當接近。由不同初始密度胚料之破壞鍛造分析，工件之成形極限衝程隨材料所含空孔率增加而驟減，燒結材料之可鍛造性受孔隙影像甚劇。

圖 6 顯示初始密度為 0.8 之圓柱試片破壞鍛造瞬間，工件內部不同位置的主應變能密度在應變能平面上分佈狀態，其中工件上表面之 B 點已碰觸到臨界曲線，表示該處已發生破裂。而其附近之 B'、B'' 和 D 點均相當靠近臨界曲線，表示該區域處於破裂邊緣，由各點之最大主應變能密度相對於臨界值的比例可分析得材料距離發生破壞的程度。

七、結論

本論文旨在研究粉末燒結材料之成形極限，進而從事粉末鍛造應用實例破壞預測以及預防。根據

實驗及分析結果，綜合歸納得下列幾點結論：

- (1) 根據最大主軸應變能密度建構新的孔隙材料破壞判準。
- (2) 新的成形極限判準可精確預測不同荷載狀態下之材料破壞。
- (3) 空孔缺陷導致材料強度劣化，甚至成形極限呈指數驟減。
- (4) 摩擦阻力造成孔隙材料變形及密度分佈不均勻，抑制成形能力。

綜合上述，可繼續擴展此驗證模型於更複雜粉末鍛造實例之破壞預測，對於成品機械強度、模具設計或胚料準備等，各方面均可獲致極佳改善。

參考文獻

- [1] M. Abdel-Rahman and M. N. El-Sheikh, "Workability in Forging of Powder Metallurgy Compacts," *J. Mat. Proc. Tech.*, v. 54, pp. 97-102 (1995).
- [2] C. L. Downey and H. A. Kuhn, "Application of a Forming Limit Concept to the Design of Powder Preforms for Forging," *J. Eng. Mat. Tech.*, Trans. ASME, v. 97, pp. 121-125 (1975).
- [3] X. Q. Zhang, Y. H. Peng, M. Q. Li, S. C. Wu, and X. Y. Ruan, "Study of Workability Limits of Porous Materials under Different Upsetting Conditions by Compressible Rigid Plastic Finite Element Method," *J. Mat. Eng. Perf.*, v. 9, pp. 164-169 (2000).
- [4] T. Tabata and S. Masaki, "A Fracture Criterion for Porous Materials and its Application to the Shape of Sintered Preforms in Forging," *J. Eng. Mat. Tech.*, Trans. ASME, v. 99, pp. 16-22 (1977).
- [5] J. H. Lee and Y. Zhang, "A Finite-Element Work-Hardening Plasticity Model of the Uniaxial Compression and Subsequent Failure of Porous Cylinders Including Effects of Void Nucleation and Growth - Part II: Localization and Fracture Criteria," *J. Eng. Mat. Tech.*, Trans. ASME, v. 118, pp. 169-178 (1996).
- [6] Gurson, A. L., "Continuum theory of Ductile rupture by Void Nucleation and growth: Part I - Yield Criteria and flow Rules for Porous ductile Media," *J. of Eng. Mat. Tech.*, ASME, V.99, pp.2-15 (1977).
- [7] Tvergaard, V., "Influence of Voids on Shear Band Instabilities Under Plane Strain Conditions," *Int. J. Fracture*, v.17, pp.389-407 (1981).

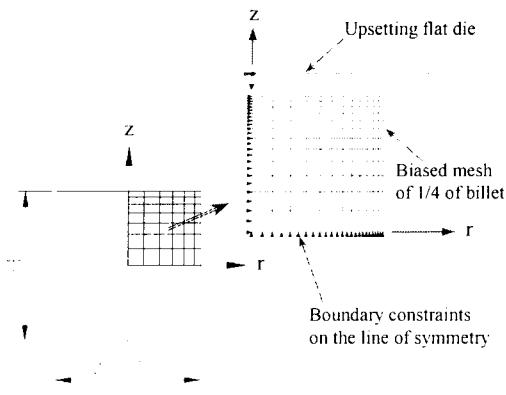


圖 1 鍛粗模擬圓柱試片之有限元素網格及邊界條件

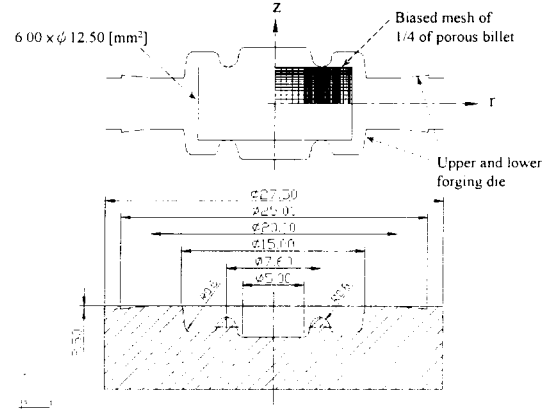


圖 4 齒輪毛坯鍛造模具尺寸及圓柱胚料有限元素網格

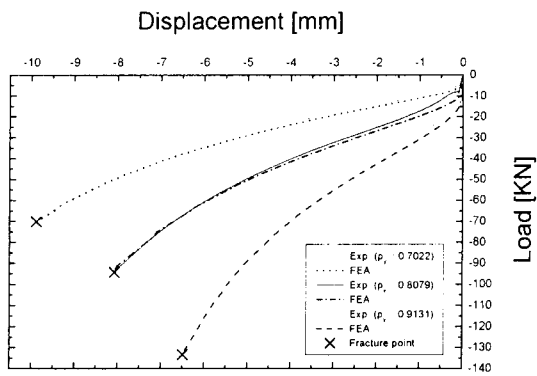


圖 2 孔隙燒結圓柱試片壓縮破裂實驗及有限元素模擬之荷重-位移曲線

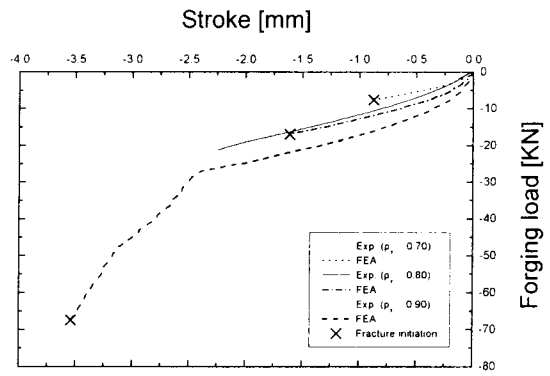


圖 5 齒輪毛坯鍛造破壞實驗及有限元素模擬之荷重-行程曲線

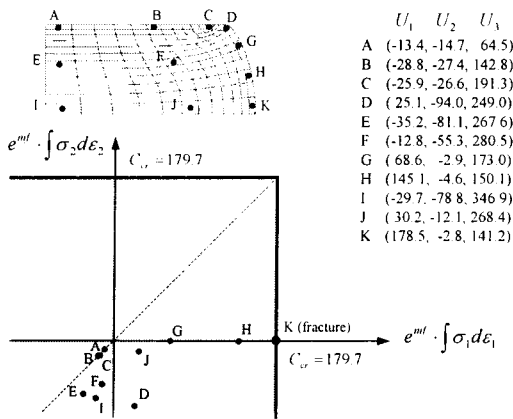


圖 3 初始密度 0.8 之圓柱試片變形後其內部不同位置的主應變能密度分佈狀態

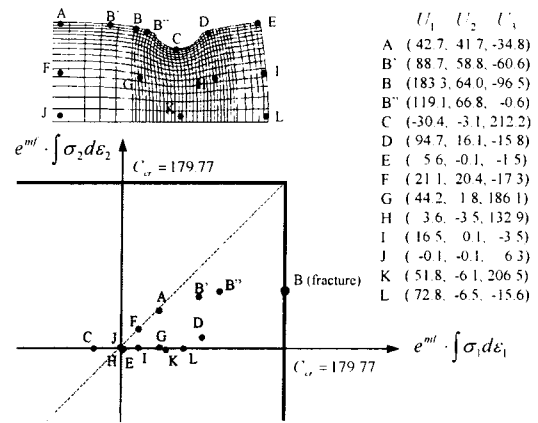


圖 6 初始密度 0.8 之圓柱試片鍛造變形後工件內部不同位置的主應變能密度分佈狀態