

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

粉末燒結材料鍛造成形之模擬與實作

Forging Simulation and Practice of Powder Sintered Materials

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-111

執行期限：2000年08月01日至2001年07月31日

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

本研究計畫旨在充分瞭解粉末鍛造製程，掌握孔隙材料之變形行為與成形能力，同時結合實驗與有限元素分析工具。首先利用粉末冶金(powder metallurgy)製程準備燒結試片，透過基本實驗獲得材料常數。引用有限元素法(finite element method)進行胚料之鍛粗分析，並與實驗相互驗證。結果顯示，空孔導致材料強度及成形能力變差；變形過程材料內部空孔演化由體積塑性應變所統馭；摩擦阻力導致材料變形及密度分佈不均勻，甚而造成破壞。另進行齒輪毛胚之鍛造成形模擬，進行原型成品之設計開發，更可推展應用於其他複雜構件製造。

關鍵詞：燒結材料、粉末鍛造、降伏準則、塑性流變、孔隙率、有限元素法

Abstract

This research project is aiming at completely understanding the powder forging process, mastering the deformation behavior and the forgability of sintered porous materials. This study combines experiments with the finite element analysis tool. The specimens are prepared from the powder metallurgy processes. The material constants are obtained from simple tests, and the finite element method is used to simulate upsetting process of preforms. The data of this analysis are verified with experiments. Results show that the strength and the deformation capability of a workpiece deteriorate with the presence of voids. The evolution of porosity is governed by volumetric plastic strains. Friction contributes to the non-uniformity of deformation and density variation that may cause fracture on a workpiece. Powder forging of a gear blank is simulated using the results of this study. This is greatly helpful in the development of forging prototype products, which also can provide guidelines for other complex applications.

Keywords: sintered materials, powder forging, yield criteria, plastic deformation, porosity, finite element method

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、特殊用途合金，以及機械性質符合嚴苛操作條件之多樣化製品。首先將金屬粉末施予混合、預壓(compact)及燒結(sinter)步驟，準備所需胚料，然後藉由模具鍛造成形得精確尺寸成品。此種製程只需更少模具，同時減少廢料產生，降低加工成本，對於齒輪、傳動連桿，或是微小軸承等複雜外形、尺寸微小之構件，使用傳統機械加工法製造相當困難，即非常適合利用粉末鍛造製程生產。

對於粉末燒結材料變形特徵，乃至空孔、摩擦力的破壞之影響，以及利用有限元素法(finite element method)分析材料變形過程，已有 Hartley 等人[1]，Jha 和 Kumar[2]，Spitzig 等人[3]，以及 Hom 和 McMeeking [4]等學者相當程度之研究進展。

三、降伏準則與空孔演化

Gurson [5]根據球對稱空孔之變形模型提出孔隙介質降伏方程式，Tvergaard [6]引入純量參數修正模型，公式如下所示

$$W(\mathbf{f}, f) = \left(\frac{\mathcal{F}}{f_y} \right)^2 + 2q_1 f \cosh \left(\frac{3q_2 p}{2f_y} \right) - (1 + q_3 f^2) = 0, \quad (1)$$

其中

$$\mathcal{F} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (2)$$

為 von Mises 等效應力，

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

為應力張量 \mathbf{f} 中的偏差應力，

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

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)， \mathcal{F} 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。

當孔隙材料承受荷重加載產生塑性變形，材料內孔隙率亦隨之改變，其空孔體積比例總變化量乃由既有存在空孔之成長以及新缺陷之成核發生所累加，如下式所列

$$\dot{f} = \dot{f}_g + \dot{f}_n, \quad (8)$$

其中 \dot{f}_g 為既有空孔之成長量，而 \dot{f}_n 則為新孔隙成核發生量。既有空孔體積成長量可藉由質量不減定律求得，即等於材料體積塑性應變量，公式如下

$$\dot{f}_g = (1-f)\dot{\nu}^p : \dot{\mathbf{E}}. \quad (9)$$

另一方面，新孔隙之成核發生可歸諸於唯材料處於拉伸應力狀態時，新缺陷乃由材料內微觀裂紋或者基材-異物顆粒交界面剝離所衍生。因此，若處於壓縮應力狀態下，基材內之空孔成核機制可忽略不予考慮。

四、實驗架構與流程

4.1 燒結材料準備與試片製作

實驗試片乃將金屬粉末經過欲壓、燒結等程序而獲得。粉末為採用水噴霧法(water atomization)製造之純鐵粉，其含碳量低於 0.01%，粉末平均粒度約 150 μm ，顆粒外形呈現不規則狀，將其置入預壓模內乾壓成形。預壓成形時，採用中模懸空法(floating die method)，得到之生胚密度較為均勻。生胚直徑為 12.5mm，高度與密度則隨預壓壓力而改變，實驗操作採取控制生胚重量，維持粗高比(高度/直徑)不超過 1.5，減少試片於鍛粗過程中發生挫曲(buckle)。接續將預壓成形生胚放入管形燒結爐內燒結，燒結條件採用每分鐘升溫 10°C，直到 1200°C 持溫 1 小時，然後待其爐冷至室溫。燒結氣氛(atmosphere)使用強還原性的氫氣，防止純鐵於高溫燒結時發生氧化。

為獲取基材之流變應力及塑性行為，茲將燒結完成之其中部分試片透過軋延機施以滾軋緻密化處理，除去材料內所含孔洞。軋延過程大量塑性變形造成晶格滑移與差排堆積，造成加工硬化(work hardening)，必須施以適當再結晶(recrystallization)步驟，促使基材回復既有之微觀組織，以便量測正確材料性質。

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，厚度則介於 2 到 3 mm 之間。經由單軸拉伸實驗，獲取基材之材料常數，如楊氏模數，浦松比，初始降伏應力，以及塑性行為等。實驗中額外使用應變規(strain gauge)於平行、垂直拉伸方向，輔助監測試片變形量。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 $\bar{\nu} = k(\bar{\nu}^p)^n$ ，其中係數 k 為 543.63 以及應變硬化指數 n 為 0.3。

接著，利用不同初始比密度之圓柱燒結試片進

行單軸壓縮實驗。模具與試片間墊以鐵氟龍片(teflon)做為潤滑劑，降低其間摩擦阻力，使試片於鍛粗過程中保持均勻變形。然孔隙材料於變形過程中，因材料之體積塑性應變導致孔隙率改變，試片體積不再不可壓縮，無法透過傳統塑性力學直接由實驗取得真實應力、應變數據，必須掌握試片於變形過程中瞬時體積，才能切確得知真實應力、應變，以及孔隙率的變化。因此，本研究中著手設計製作直徑量測規(diameter gauge)，基於無摩擦阻力鍛粗過程中試片仍保持均勻變形之假設，量測規可記錄試片之瞬時外徑，提供瞬時截面積計算所需。

處理鍛粗實驗數據取得壓縮應力-應變曲線，並將其彈性限平移 0.2%，與原有曲線相交處，定義為初始降伏點。將不同初始比密度之試片其初始降伏應力-孔隙率繪於同一座標上，發現材料中空孔量增加，導致其降伏應力劣化。

本文對於 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，擬合程式則利用數值方法配合符號運算語言 Macsyma 撰寫而成。茲將楊氏模數 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 |

無摩擦阻力壓縮實驗主要用以獲得材料模式及基本材料參數，為進一步驗證有限元素模型，另外進行有摩擦阻力鍛粗實驗。試片與模具間並未墊以鐵氟龍，由於接觸表面之摩擦力阻礙材料變形，試片產生酒桶狀(bulge)外形。

五、有限元素模型驗證

5.1 建構有限元素模型

為能確實掌握孔隙材料之變形機制與成形能力，利用有限元素法進行鍛造模擬。研究中使用有限元素分析軟體 ABAQUS，建構模型與分析。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，為有效減少電腦計算時間及收斂困難性，幾何形狀需作合理簡化，由於圓柱狀試片呈高度方向對稱以及軸對稱，僅取 1/4 圓柱對稱部分進行分析，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。使用八節點連續體軸對稱二階元素於胚料，模具部分則使用剛性元素。並將表 1 中材料常數輸入模型中。

5.2 無摩擦阻力及有摩擦阻力鍛粗驗證

為確保有限元素模型能真實掌握孔隙材料變形行為，分別考慮兩種不同摩擦條件之鍛粗模擬，並與實驗數據相互比較。當進行無摩擦阻力鍛粗分析時，給定摩擦係數 $\mu=0$ ，維持圓柱試片均勻變形。此分析之目的在於驗證輸入模型中的實驗數據是否能真實表現材料行為。然後，調整摩擦係數為 $\mu=0.2$ ，進行有摩擦阻力之鍛粗模擬。

先將無摩擦阻力之鍛粗結果與實驗數據比較，圖 2 和圖 3 分別顯示初始比密度為 0.6897、0.8071 和 0.9058 之圓柱試片，其壓縮真實應力-應變以及真實應力-孔隙率曲線，發現分析結果與實驗相當接近。圖 2 中各曲線說明工件之降伏強度與荷重能力隨空孔含量增加而退化。圖 3 中曲線表示鍛粗過程中試片內孔隙率之演化情形，可發現空孔減少量和試片初始比密度相關。當試片仍處於彈性變形，空孔量鮮少有改變，俟材料降伏後變化趨於明顯，且空孔演化是由材料之體積塑性應變所統馭。由於基材之不可壓縮性，試片之體積改變可完全歸諸於空孔體積變化。

繼續進行有摩擦阻力之鍛粗模擬作為另一驗證實例，初始比密度分別為 0.6772、0.7898 和 0.9143 之試片，其壓縮荷重-位移曲線如圖 4 所示，空孔之存在降低材料荷重與變形能力。模具與胚料接觸介面之摩擦阻力導致材料變形及密度分佈不均勻，試片圓周方向向外突出呈酒桶狀，甚而造成破壞。

六、齒輪毛胚鍛造成形

藉由前述鍛粗驗證之模型，進行齒輪毛胚鍛造模擬，探討孔隙材料塑性流變特徵與可加工性，提供推展粉末燒結材料應用於製造傳動構件之範例。鍛造齒輪毛胚之模具與胚料尺寸設計如圖 5，其中圓形胚料直徑 12.5 mm、高 6 mm，而模具外徑 27.5 mm。由於 8 節點連續體二階元素不適於分析具有複雜接觸問題，因此採用 4 節點擬線性軸對稱連續體元素於胚料，以及 2 節點線性軸對稱剛體元素於模具。基於幾何形狀對稱性，僅需選取 1/4 胚料與模具，配以適當邊界條件進行模型建構。胚料中間區域網格更加細分，以應付較大變形量之計算精確。

雖然複雜構件鍛造成形過程中，材料內部可能遭受拉伸應力作用，導致新缺陷之成核，本計畫限於研究進度，模型中並未考量空孔成核機制，暫時將成形過程空孔變化完全歸諸於既有孔洞之成長，忽略新孔隙之成核。胚料初始比密度給定為 0.86，將鍛造過程中，分別對應於 2.48、3.15、3.91 和 4.19 mm 之衝程，其材料內部 von Mises 等效應力以及比密度分佈情形共同陳列於圖 6 中，左行均為等效應力分佈圖，右行則為比密度分佈狀況，鍛造過程討論如下：

圖 6-(1a)和(1b)指出工件右上角開始碰觸模壁。圖 6-(2a)和(2b)則表示工件截面中心區域開始與模壁接觸。繼續如圖 6-(3a)和(3b)所示，工件之圓周方向開始接觸模具側壁，其中顯示出材料幾乎充模。最後，根據圖 6-(4a)和(4b)，表示材料已完

全充滿模穴，工件鍛造定形，材料內部等效應力分佈均勻且相對密度趨近 100%，顯示胚料內之孔洞被靜水壓力擠扁除去。經由閉模鍛造成形之齒輪毛胚，不但結構幾乎完全緻密化，無毛邊產生，其機械強度亦明顯提升。

七、結論

粉末鍛造結合粉末冶金製程之產品幾何外形可複雜化與合金成分可特殊化，以及鍛造製程提升產品機械性質與尺寸精度等優點，使粉末鍛造製程深具研究的價值。經過以上分析，綜合歸納得下列結論：

- (1) 採用 Gurson-Tvergaard 降伏判準建構有限元素模型，納入空孔校應考量，於不同摩擦狀況下進行鍛粗模擬，並與實驗數據相互驗證契合。
- (2) 工件中空孔量增加導致材料強度劣化及成形能力變差。
- (3) 摩擦阻力導致材料變形及密度分佈不均勻，甚而造成材料破壞。

綜合上述，可更進一步應用於其他複雜構件的成形模擬，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] P. Hartley, C. E. N. Sturgess, and G. W. Rowe, "Influence of Friction on the Prediction of Forces, Pressure Distributions and Properties in Upset Forging," *Int. J. Mech. Sci.*, v.22, pp.743-753 (1980).
- [2] A. K. Jha, S. Kumar, "Deformation Characteristics and Fracture Mechanisms During The Cold forging of Metal Powder Preforms," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, v.26, pp.369-384 (1986).
- [3] Spitzig, W. A., Smelser R. E., and Richmond, O., "The Evolution of Damage and Fracture in Iron Compacts with Various Initial Porosity," *Acta Metall.*, v.36, pp.1201-1211 (1988).
- [4] C. L. Hom, R. M. McMeeking, "Void Growth in Elastic-Plastic Materials," *J. Applied Mech.*, ASME, v.56, pp.309-317 (1989).
- [5] 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).
- [6] Tvergaard, V., "Influence of Voids on Shear Band Instabilities Under Plane Strain Conditions," *Int. J. Fracture*, v.17, pp.389-407 (1981).

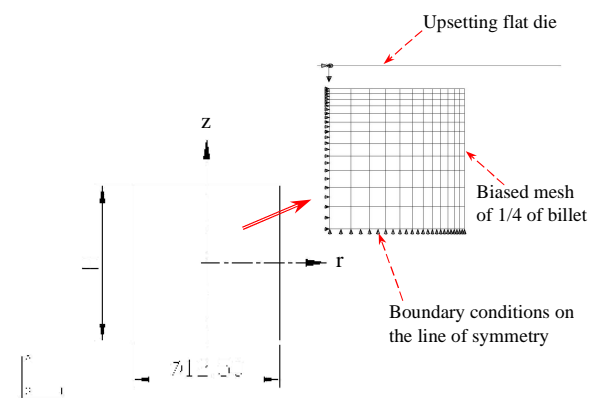


圖 1 鍛粗模擬圓柱試片之有限元素網格及邊界條件

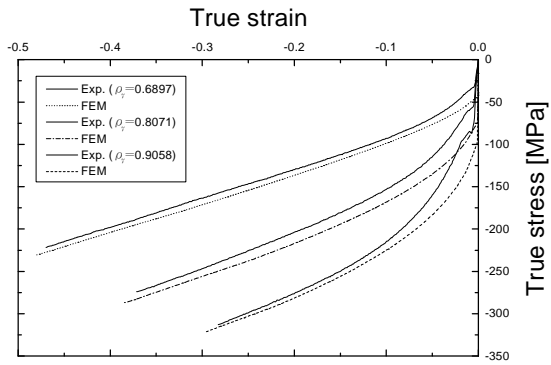


圖 2 無磨擦阻力壓縮實驗及有限元素模擬之真實應力-應變曲線

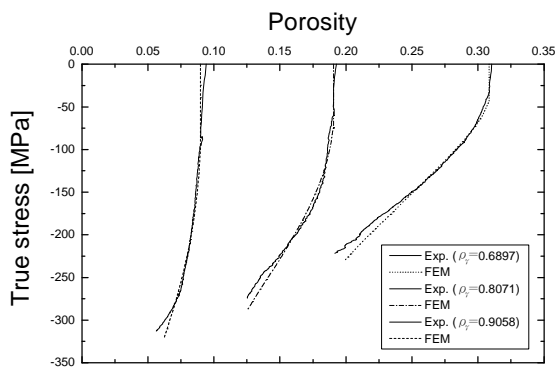


圖 3 無磨擦阻力壓縮實驗及有限元素模擬之真實應力-孔隙率曲線

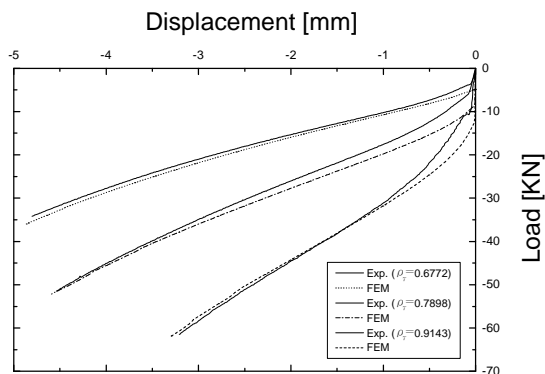


圖 4 有磨擦阻力鍛粗實驗及有限元素模擬之荷重-位移曲線

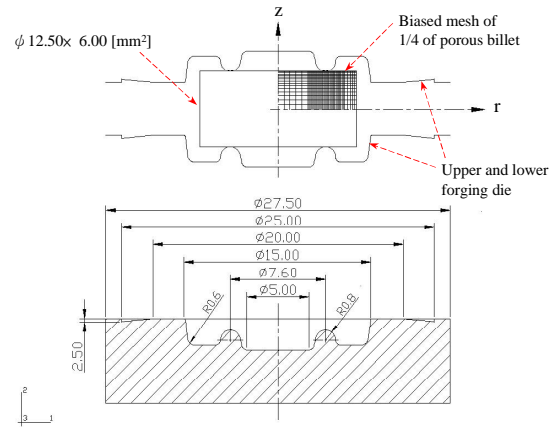


圖 5 齒輪毛胚鍛造模具尺寸及圓柱胚料有限元素網格

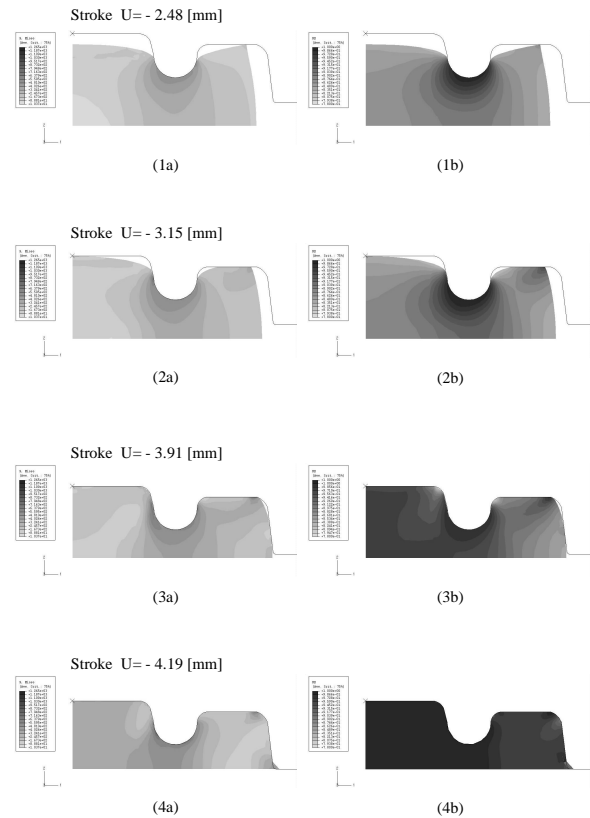


圖 6 齒輪毛胚特定鍛造行程下 von Mises 等效應力分佈 (1a)、(2a)、(3a)和(4a)，以及比密度分佈(1b)、(2b)、(3b)和(4b) (摩擦係數 $\mu = 0.1$)