

微型鑽針切削問題之塑性變形與破壞因子之探討

白廷文¹, 黃育熙¹, 洪光民²

¹國立臺灣科技大學 機械工程系

²華夏技術學院機械工程系

摘要

本研究探討微型鑽針在給定不同進給量及轉速的條件下切削中碳鋼(AISI 1045)的過程，主要對微型鑽針產生的反作用力大小進行研究探討。鑽孔的切削問題相對於材料之彈塑性特性，實際上也牽涉到刀具與材料間的熱傳及破壞問題等複雜行為，在過去於理論解析時多半亦僅探討刀具切面與工件材料相互之間的接觸力學問題，然而利用傳統數學解析方法進行定量分析與研究較難以確認其合理性，實驗上也不易測試其真實性與正確性，故以往的研究結果可能導致預測鑽孔行為會有失真的情形發生。近年來，許多切削問題透過有限元素法數值分析求解的結果與實驗結果相互比對得到一致性，顯示可由有限元素法數值分析來預測進行初步的確認，同時還可減少實驗成本，利用有限元素法給定正確且完整的材料特性即可處理許多工程物理現象，現今的研究主流方法已可在複雜的加工過程進行可信度極高的分析。

本文藉由ABAQUS有限元素分析軟體模擬微型鑽針切削AISI 1045的過程，有限元素分析軟體在模擬切削過程會經由設定的網格元素與材料特性進行判斷，若超過工件在力學的臨界值即會發生破壞並產生切屑。其中鑽削的工件AISI 1045需定義Johnson-Cook塑性材料參數與破壞因子之材料特性，在此條件下即可使網格元素移除來達到實現切屑分離的結果。然而若未定義Johnson-Cook塑性變形參數將使AISI 1045僅發生彈性變形，未定義Johnson-Cook破壞因子的條件，將導致AISI 1045之網格元素加工時僅發生塑性變形而不會發生網格元素移除之特性。

關鍵字：微型鑽針、有限元素法、Johnson-Cook 模型、Johnson-Cook 破壞因子、網格元素移除

ABSTRACT

The machining processes of microdrill are investigated on removing mid-carbon steel (AISI 1045). By means of different feeds and rotation speeds, the reaction force on microdrill and the chip of AISI 1045 are studied on the elastic-plastic, fracture, and thermal-stress problems. Cutting process is hard to be quantitative using theoretical analysis and experimental measurements. In recent years, the numerical calculation of personal computer is improvement on the finite element method (FEM). The numerical solution of cutting process obtained by FEM was shown well-consistent on the experiment results in literature. Hence, the FEM prediction on the micro-machining analyzing the mechanics behavior could design the parameters of microdrill rapidly and decrease the cost of experimental measurements.

The FEM commercial software, ABAQUS, is applied on the machining processing of microdrill. The removal material AISI 1045 was defined on the material constants by Johnson-Cook plastic and failure damage models. Under the definition of material properties, the plastic deformation and the result of chip separation could be achieved on the FEM calculation. Through define completely material constants, the elastic-plastic, fracture, and thermal-stress problems can be analyzed on the machining process of microdrill.

Keywords: microdrill, finite element method, Johnson-Cook model, Johnson-Cook failure damage, chip remove

一、前言

微型鑽針於精密加工與製造扮演不可獲缺的角色，尤其近年來在電子產品輕薄短小的發展趨勢下，廣泛地應用在印刷電路板等工業應用的微孔加工中。然而，微型鑽針本身的材料與尺寸等設計參數影響了製造加工品質與成本，鑽針應力的分佈與破壞機制強烈的影響其本身的強度與壽命，亦影響了加工時的切削速度、進給速率、排屑效率與散熱效應等因素，因熱應力集中或裂紋破壞造成微型鑽針的磨耗與斷裂的發生，更會使得工業量產製造時鑽孔品質的低落與產線進度的延遲。因此，微型鑽針必須經由完整且嚴密的設計分析，始能嚴密控管鑽針的品質使其不會受到應力集中的破壞效應，進而建立微型鑽針的尺寸參數設計準則。

有限元素數值分析中，微型鑽針實體模型之繪製參照洪坤宏[1]所建構之幾何外型，此文獻提供了本研究對於微型鑽針幾何特性觀念上的認知，並由其幾何外型與實際外型相互比照之下呈現的一致性，確認微型鑽針的幾何模型可經由此文獻進行建構，本研究雖然在鑽針的繪製方法與該論文之研究團隊有所不同，但採用更有效率的幾何模型建置，並予實際鑽針的刀具切面進行影像的比較有足夠的準確度。另一方面，不論微型鑽針或加工工件都必須正確定義其材料性質，若未確切定義材料性質將導致分析結果與實際問題不一致，故於本研究的切削問題，採用 Johnson-Cook model 描述材料塑性變形及熱傳性質，該模型所提出的方程式可表達材料塑性變形與熱傳特性，參照 Lin *et al.* [2]所提出的模型理論，文獻敘述以不同應變率及溫度大小的條件下對合金鋼進行單軸向拉伸測試，實驗結果顯示了在不同應變率及溫度之應力應變曲線圖可透過數學模型的運算，定義出 Johnson-Cook 材料塑性變形的特性，提供了 Johnson-Cook 塑性變形與熱傳分析應用於有限元素數值的模型，同時以此模型可考量加工變形的應變率與溫度特性，故對於牽涉材料彈塑性及熱傳的加工切削問題，本研究採用 Johnson-Cook model 作為評估工件材料塑性與熱傳參數設定的最佳理論模型。除此之外，有限元素數值分析中需定義破壞失效準則作為切屑產生的條件，若無此條件之設定將無法實現

切屑產生的結果，Majzoobi 與 Dehghan [3] 描述將一材料藉由準靜態測試，透過數學模型運算定義材料 Johnson-Cook damage 係數，此係數乃輸入有限元素法進行力學分析計算中切屑形成的重要分析參數，本研究採用 Johnson-Cook damage 定義材料破壞失效條件，以實現材料受到刀具切削的作用下形成切屑的材料特性條件。本文提供微型鑽針輸入有限元素軟體分析所需的尺寸參數死詳細幾何形狀，研究的特點在於完整考慮微型鑽針在切削加工的工件材料之塑性變形與破壞準則影響因子，利用有限元素法給定鑽針在不同進給量及轉速的參數設定，進行微型鑽針切削中碳鋼 (AISI 1045) 時所產生的反作用力大小與力學特性。

二、有限元素數值分析

微型鑽針切削 AISI 1045 的有限元素數值計算採用 ABAQUS 6.11-2 版商用套裝軟體進行分析，其數值計算之求解使用顯性動態求解器 ABAQUS/Explicit 進行運算，探討微型鑽針在轉速每分鐘 10 萬轉 (100Krpm) 的兩週期旋轉切削時間 0.0012 秒，微型鑽針對 AISI 1045 的切削在不同的轉速與進給量下，中碳鋼產生的反作用力與時間歷程之結果。

2.1 有限元素模型

本研究中以 SolidWorks 繪製微型鑽針三維實體模型，再轉檔匯入有限元素工程分析軟體 ABAQUS 進行分析，微型鑽針的三維模型實體圖與規格如圖 1 與表 1 所示，中碳鋼的模型繪製採用 ABAQUS 內建繪圖模組進行建模，其尺寸規格設定為 0.4mm × 0.4mm × 0.15mm，如圖 2 所示。

2.2 選用材料及網格元素

有限元素數值模擬中，微型鑽針的材料彈性係數、浦松比與密度如表 2 所示，另一方面中碳鋼的材料參數引用 Vaziri *et al.* [4] 進行基本材料特性參數設定所示，如表 3 所示。本文進行切削的工件 AISI 1045 必須定義其塑性變形條件與破壞失效條件，其中，塑性變形採用 Johnson-Cook 塑性變形模型，此塑性變形理論的數學模型如下式所示

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中， σ 為 Von Mises 應力， A 為降伏應力， B 為應變硬化係數， ε 為材料之塑性應變值， n 為應變硬化指數， C 和 m 為材料常數， $\dot{\varepsilon}^*$ 為無因次之應變率，表示成

$$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0, \quad (2)$$

且 $\dot{\varepsilon}_0$ 為參考應變率， T^* 為同源溫度，表示成

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r), \quad (3)$$

其中 T 為室溫， T_m 為熔融溫度， T_r 為參考溫度。本研究採用的 AISI 1045 材料之塑性變形各參數如表 4 所示。

同時，為了能使網格元素在切削的分析過程中有移除的效果，受切削之工件的破壞失效條件採用 Johnson-Cook damage 進行為參數的設定，其表示式如下

$$\bar{\varepsilon}_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \times [1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (4)$$

其中， $\bar{\varepsilon}_f$ 為塑性應變， D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 ， D_5 為材料破壞常數，其量值可由實驗反算獲得， σ^* 為無因次應力比率，表示成

$$\sigma^* = \sigma_m / \bar{\sigma}, \quad (5)$$

且 σ_m 為三軸正交應力平均值， $\bar{\sigma}$ 為 Von Mises 應力。

由於微型鑽針的鑽頭部份幾何形狀較為複雜，且在分析中考慮其熱傳條件與特性考慮，故網格元素採用三維十節點二階四面體修正耦合應力元素 (C3D10M)，為了減少軟體的計算時間，中碳鋼則採用三維八節點一階四面體減積分溫度耦合應力元素 (C3D8RT)，受切削之工件材料的幾何與網格如圖 2 所示，切削部位的上表面區域設定較緻密的網格以求分析的精準度。本研究共進行 41244 個網格元素數目及 52426 個節點數的數值計算。

2.3 邊界條件

本研究的邊界條件乃依據實際切削過程中刀具與工件產生的拘束條件進行設定，鑽針的運行方向與工件的邊界條件如圖 3 所示，可以看到中碳鋼周圍採用 6 個自由度方向皆被拘束的固定邊界設定方式，微型鑽針於切削工件的中碳鋼上方中心定位並進行剛體 (*Rigid) 或耦合條件 (*Couple) 的設定，其運動的邊界條件列出兩個方案進

行討論分析

1. 圖 3 的 Z 軸方向給予不同速度 V_z ，分別採用 16.66 mm/s、33.33 mm/s、50 mm/s，以模擬 3 種不同的進給量，其中鑽針的運動繞 Z 軸方向給予 100Krpm 轉速，此進給速度與鑽針轉速量值乃是經由理論運算的結果，以表示鑽針進給量分別採用 0.01 mm/rev、0.02 mm/rev、0.03 mm/rev 的分析條件進行結果的討論。
2. 圖 3 的 Z 軸方向分別給予鑽針以 5 種不同轉速 100Krpm、150Krpm、200Krpm、250Krpm、300Krpm，但採用相同進給速度 16.66 mm/s 以模擬在同一進給量 0.01 mm/rev 之下的鑽削特性。

三、結果與討論

本節利用上述兩種邊界條件的分析條件，分別對微型鑽針的兩種運行模式進行討論，簡單來說，其一採用不同進給速度大小在固定轉速，另一種則是以不同轉速在固定進給量的條件下，進行兩種方案於力學特性的分析。

3.1 不同進給量之微型鑽針切削歷程

微型鑽針切削中碳鋼在不同進給量下所產生反作用力大小隨時間變化之歷程，如圖 4 所示，由反作用力與時間歷程圖可知進給量愈大，產生反作用力愈大，且整個鑽削的過程皆呈現加工的工件材料產生彈性變形、塑性變形、切屑形成與排屑移除等四個階段。以圖 4 當中的進給量 0.02 mm/rev 時間歷程圖為例，0 秒至 0.0003 秒時，反作用力從零迅速上升於起始切削階段，中碳鋼發生彈性變形，微型鑽針受到的反作用力量值逐漸增加，如圖 5 的彈性變形狀態，呈現了中碳鋼受到微型鑽針的切削並未產生劇烈變形；接著在 0.0003 秒至 0.0005 秒時，反作用力的量值上升的現象逐漸趨緩，可得知切削的中碳鋼已進入塑性變形階段，並由圖 6 可見中碳鋼已產生塑性變形；再由 0.0005 秒至 0.0006 秒的反作用力時間歷程可知，反作用力量值已逐漸下降，圖 7 可以看到受到切削的中碳鋼已有切屑形成的現象，由於材料被移除而造成切削過程產生的阻力逐漸減少，反作用力的量值因而下降；最後在 0.0006 秒至 0.0012 秒，反作用力的量值逐

漸趨於穩定，回到約略為零的量值，由圖 8 可見，切屑此階段已被移除使得切削阻力減至最小值。

3.2 不同轉速之微型鑽針切削歷程

微型鑽針切削中碳鋼產生反作用力在不同轉速之下的時間歷程如圖 9 所示，可以獲得在轉速 300Krpm 與 200Krpm 運行一週期的反作用力約略為轉速 100Krpm 的 1/2 與 1/3 的時間，顯示改變轉速對於切削作用的時間在本研究的設定中可利用較快的轉速達到完整的切削效果。然而，在反作用力量值大小的分析上，雖然在轉速 300Krpm 有最大反作用力的產生，轉速遞減至 200Krpm 反作用力下降的趨勢，但轉速 150Krpm 與 100Krpm 的最大反作用力卻不會小於 200Krpm，故若欲得到最小反作用力的鑽針轉速，可透過有限元素法的分析進行鑽削的評估設計，以獲得鑽削加工的最佳製造條件。

四、結論

本研究採用 Johnson-Cook 塑性變形與及破壞理論模型進行微型鑽針與工件的鑽削分析，成功分析微型鑽針切削中碳鋼過程中反作用力的時間歷程，實現鑽削過程工件切屑分離的結果。由模擬的反作用力時間歷程與鑽針與工件接觸的變形過程，可以得知鑽針與工件在切削中存在彈性變形、塑性變形、切屑形成與排屑移除等四個階段。實際上於有限元素分析微型鑽針與中碳鋼相互接觸仍有網格穿透的現象發生，網格穿透問題與網格數值求解精度的準確性還需再做更進一步的探討。但由本文可知，經由完整的彈塑性材料與破壞因子之特性設定，可將複雜之微型鑽針模型進行完整的力學特性的解析，對於鑽針的尺寸參數與材料特性的設計製造，以及配合加工材料的材料參數，可進行完整的分析與預測。

五、參考文獻

[1] 洪坤宏，由應力分析探討微鑽頭之最佳幾何設計及其鑽削球格陣列(BGA)基板之磨耗分析研究，國立台灣科技大學，民國 95 年。

[2] Y. C. Lin, X. M. Chen, and G. Liu, "A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel," *Materials Science and Engineering*, Vol. 527 (A), No. 26, 2010, pp.6980-6986.

[3] G. H. Majzooobi, F. Rahimi Dehgolan, "Determination of the constants of damage models," *Procedia Engineering*, Vol. 10, 2011, pp.764-773.

[4] M. R. Vaziri, M. Salimi, and M. Mashayekhi, "Evaluation of chip formation simulation models for material separation in the presence of damage models," *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 19, No. 2, 2011, pp.718-733.

[5] A. Shrot and M. Bäker, "Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations," *Computational Materials Science*, Vol. 52, No. 1, 2012, pp.298-304

六、表格

參數	尺寸
刀刃直徑 D1(mm)	0.25
末端直徑 D2(mm)	3.175
刀刃長度 L1(mm)	5.81
前端錐柱 L2(mm)	5.46
末端長度 L3(mm)	26.83

表 1 微型鑽針之規格

材料性質	微型鑽針
楊氏模數(GPa)	590
浦崙比	0.21
密度(kg/ m ³)	14400

表 2 微型鑽針材料性質[1]

材料性質	中碳鋼
熱傳導(W/m °C)	48.3
比熱(J/kg°C)	420
熱膨脹係數(1/°C)	1.1×10^{-5}
楊氏模數(GPa)	210
浦松比	0.3
密度(kg/m ³)	7862

表 3 中碳鋼材料性質[4]

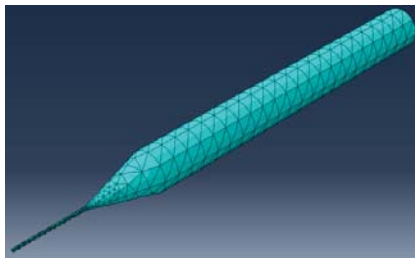
A (MPa)	553.1
B (MPa)	600.8
C	0.0134
n	0.234
m	1
T _m (°C)	1460

表 4 中碳鋼 Johnson-Cook model 材料係數[4]

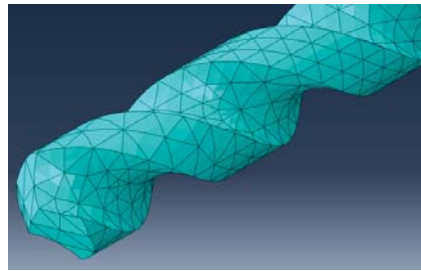
D ₁	0.05
D ₂	4.22
D ₃	-2.73
D ₄	0.0018
D ₅	0.55

表 5 AISI 1045 Johnson-Cook damage 材料係數[4]

七、圖片



(a)



(b)

圖 1 微型鑽針三維實體模型之(a)完整模型與(b)放大鑽針區域

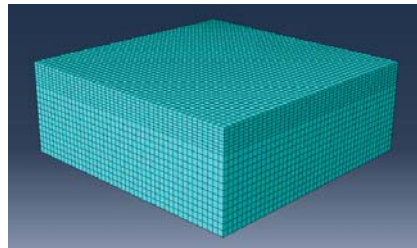


圖 2 切削工件中碳鋼的三維實體模型

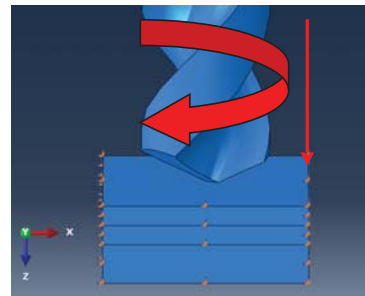
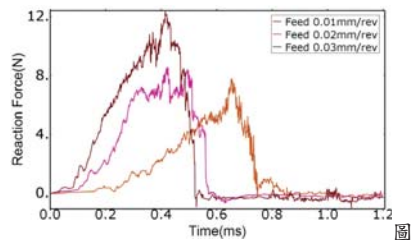


圖 3 鑽針與工件之邊界條件與運行方式



4 不同進給量條件下微型鑽針產生反作用力之時間歷程圖

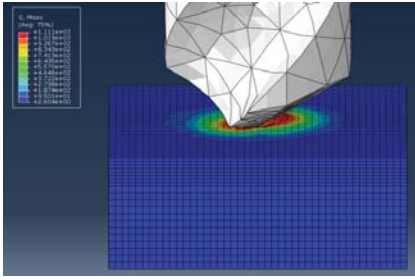


圖 5 彈性變形

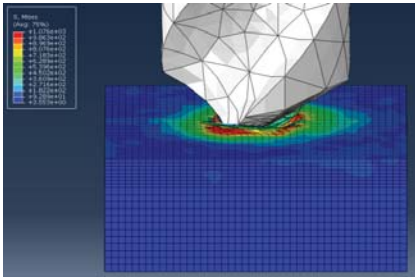


圖 6 塑性變形

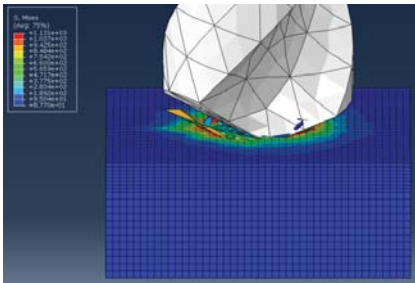


圖 7 切屑形成

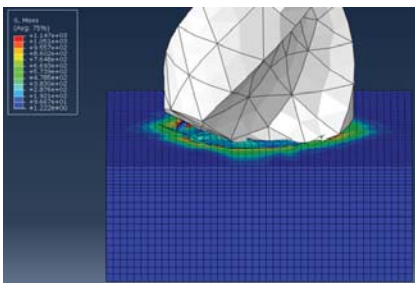


圖 8 切屑移除

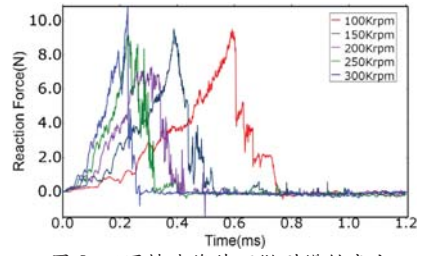


圖 9 不同轉速條件下微型鑽針產生反作用力之時間歷程圖