120 マイクロインデンテーションによる金属材料の加工硬化特性同定

Determination of Workhardening Property of Metals by means of Micro-indentation Method

○ 井上 匠 (広島大学・院)

正 吉田 総仁 (広島大学院)

Takumi INOUE, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshimashi, Hiroshima

Fusahito YOSHIDA, Hiroshima University

Key words : Workhardening, Perfectly plastic body, Micro-indentation

1. 緒言

信頼性のあるマイクロマシンをはじめとするマイクロシステムの実現にあたっては、実際に使用されるサイズの微小部品の機械的特性や強度特性を把握することが不可欠である。しかし微小部分では従来の機械要素に対して行なわれてきた手法を適用することができず、微小部に対応した新たな手法を確立する必要がある。

近年、 μm オーダの微小な圧痕を試料表面に付与し、このときの圧子にかかる荷重と押込み量の関係(P - h 曲線)より機械的特性を評価するインデンテーション試験¹⁾が注目されている。この特長を以下に示す。

- ・ 試料は小さく単純な形でよい
- ・ 選んだ場所の力学物性値が得られる
- ・ 試験時間が比較的短い

本研究では、材料特性が既知の弾完全塑性体材料および加工硬化特性を持つ材料に対して球圧子および円錐圧子を用いたマイクロインデンテーション試験の有限要素法(以下 FEM)解析を行い、得られた P - h 曲線の負荷曲線および応力-塑性ひずみ関係を調べ、材料の加工硬化特性を決定する手法を提案し、その検証を行った。

2. 加工硬化特性同定手法

2.1 球圧子を使用した加工硬化特性同定手法

手法に用いる圧子は球圧子である。弾完全塑性体材料では P - h 曲線において負荷曲線のみ式(1)が成立する。

$$P = Y \cdot \phi \left(\frac{h}{R} \right) \quad (1)$$

ここで Y は弾完全塑性体材料の降伏応力、 R は圧子半径である。また ϕ は種々の弾完全塑性体材料を想定したマイクロインデンテーション試験の FEM 解析を行い、 h/R の関数として導出する。

次に Fig.1(a)に示すように、それぞれ降伏応力が Y_1 , Y_2 , Y_3 の弾完全塑性体の P - h 曲線と、加工硬化材の曲線との交点を求める。それぞれの押込み深さ h_1 , h_2 , h_3 に対応する荷重は、それぞれ P_1 , P_2 , P_3 である。この交点においてそれぞれの材料で圧子直下の相当塑性ひずみ分布が等しいと仮定すると、両材料の応力-塑性ひずみ関係の交点(Fig.1(b))で降伏応力が Y_1 , Y_2 , Y_3 の弾完全塑性体の応力-塑性ひずみ曲線と加工硬化材の曲線の交点における塑性ひずみはそれぞれ ϵ_1^p , ϵ_2^p , ϵ_3^p より、圧子直下の支配的な塑性ひずみ ϵ^p を求めることができる。ここで二つの材料から求まる P - h 曲線の負荷曲線の交点において、Fig.1(c)のようにそれぞれの押込み深さ h_1 , h_2 , h_3 を圧子半径 R で除し無次元化した値とそのときのそれぞれの塑性ひずみ ϵ_1^p , ϵ_2^p , ϵ_3^p の関係を求め式(2)で表す。

$$\epsilon^p = \psi \left(\frac{h}{R} \right) \quad (2)$$

ここで関数 $\psi(h/R)$ が加工硬化特性によらず一意に求まるならば、式(1)とマイクロインデンテーション試験から得られる P - h 曲線の負荷曲線の交点を求め、式(2)に代入することで、材料の加工硬化同定を行うことが可能となる。

Fig.1 Relationships used for proposed method with ball indenter.

2.2 円錐圧子を使用した加工硬化特性同定手法

手法に用いる圧子は半頂角 θ が 65° , 71° , 80° の円錐圧子である。弾完全塑性体材料では P - h 曲線において負荷曲線のみ式(1)が成立する。

$$P = c \cdot Y \cdot h^2 \quad (3)$$

ここで c は無次元定数、 Y は弾完全塑性体材料の降伏応力である。圧子の半頂角により c は異なる。Fig.2(a)はある降伏応力の弾完全塑性体に半頂角 θ_1 , θ_2 , θ_3 ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$) の圧子で押込んだときの P - h 曲線である。

次に P - h 曲線の負荷曲線から加工硬化特性を求める方法を示す。加工硬化特性のある材料に対し P - h 曲線を求めると、式(3)のように近似でき、円錐圧子で押込んだときの加工硬化材の支配的な応力を求めることができる。

弾完全塑性体と加工硬化材の圧子直下の相当塑性ひずみ分布が等しいと仮定すると、両材料の応力-塑性ひずみ関係の交点より、圧子直下の支配的な塑性ひずみ ϵ^p を求めることができる(Fig.1(b))。

Fig.2 Relationships used for proposed method with conical indenter.

また自己相似型圧子では押し込み深さに関係なく塑性ひずみ分布が相似になる。このときの支配的な塑性ひずみ ϵ^p が加工硬化特性によらず一意に求まるならば、Fig.2(b)のようにそれぞれの半頂角 θ_1 , θ_2 , θ_3 における代表的な塑性ひずみ ϵ_1^p , ϵ_2^p , ϵ_3^p を求めることができる。そして半頂角を変化させることで様々な塑性ひずみを得ることができる。また応力はマイクロインデンテーション試験から得られる P - h 曲線の負荷曲線を式(3)に代入することで求めることができ、材料の加工硬化同定を行うことが可能となる。

3. FEM 解析を使用した手法検証

3.1 弾完全塑性体材料の P - h 曲線の負荷曲線の近似式作成

降伏応力が異なる種々の弾完全塑性体材料に対して、インデンテーション試験の数値実験を行い、 P - h 曲線の負荷曲線の近似式を作成した。試験片表面の加工変質層の影響²⁾を回避するために、球圧子は圧子半径 500 μm とした。式(4)は球圧子を使用したときの近似式、Table 1 は円錐圧子を使用したときの式(3)における c の値である。

$$P = Y \cdot \left[5575 \times (h/R) - 4346 \times (h/R)^2 \right] \quad (4)$$

Table 1 Relationship of c value to half apex angle.

Half apex angle [degree]	65	71	80
c value	0.05483	0.1052	0.3627

3.2 塑性ひずみと押し込み深さ関係の導出

Table 2 に示す Ludwik 型の数式($\sigma = Y + C \cdot (\epsilon^p)^n$), n 乗硬化則($\sigma = C \cdot (\epsilon^p)^n$)および 2 種類の材料の単軸引張試験結果で表される 6 種類の材料の材料定数を使用してインデンテーション試験の数値実験を行い、得られた P - h 曲線に提案した手法を適用して ϵ^p - h/R 曲線および ϵ^p - θ 曲線を求めた。6 種類の材料の ϵ^p - h/R 曲線を Fig.3, その近似曲線を式(5)に示した。また ϵ^p - θ 曲線を Fig.4 に示した。

$$\epsilon^p = 0.327 \times (h/R)^{0.859} \quad (5)$$

Table 2 Material properties of six metals for FE simulation.

Metals	Young's modulus (GPa)	Hardening law
Aluminum	70	Ludwik $\sigma = 15 + 155(\epsilon^p)^{0.33}$
Brass	100	Ludwik $\sigma = 180 + 610(\epsilon^p)^{0.48}$
Stainless	200	Ludwik $\sigma = 100 + 1300(\epsilon^p)^{0.57}$
S35C	200	Power hardening law $\sigma = 1300(\epsilon^p)^{0.23}$
Copper	105	Experiment
Duralumin	68.5	Experiment

Fig.3 ϵ^p - h/R curves of six metals and approximation.

Fig.4 ϵ^p - θ curves of six metals and approximation.

3.3 FEM 解析結果からの加工硬化特性同定および考察

Fig.5 に FEM 解析に使用した応力-塑性ひずみ曲線と、提

案手法から求めた応力-塑性ひずみ曲線の比較を、一部の材料で行った図を示す。提案手法から求めた応力-塑性ひずみ曲線と FEM 解析に使用した曲線は、ジュラルミンと S35C を除いて概ね一致していた。この原因は Fig.3 および Fig.4 においてジュラルミンと S35C の ϵ^p - h/R 曲線が近似曲線から最も離れていることであると考えられる。

Fig.5 σ - ϵ^p curves of copper and aluminum derived by proposed method.

4. 実験による手法検証および考察

供試材に純銅を使用して、単軸引張試験とインデンテーション試験を行い、実験による手法検証を行った。インデンテーション試験には超硬製の圧子半径 500 μm の球圧子と、半頂角 θ が 65, 71, 80° の円錐圧子を使用し、押し込み速度 0.05mm/min で試験片に押し込んだ。

Fig.6 に純銅の単軸引張試験および提案手法から求めた応力-塑性ひずみ曲線の比較図を示す。球圧子を使用した場合は両者の曲線は塑性ひずみが 0.02 以下の領域では比較的一致していたが、0.02 以上の範囲では両者の差が大きくなっていった。この原因は、Fig.3 に示すように純銅の ϵ^p - h/R 曲線が近似式からずれていること、インデンテーション試験の P - h 曲線と FEM 解析の P - h 曲線(材料定数は単軸引張試験の結果)が、完全に一致していないことであると考えられる。

円錐圧子を使用した場合は、71° の圧子を使用した場合の応力が大きくなっていった。この原因も同様に P - h 曲線が実験値と解析値で若干異なるからであると考えられる。

Fig.6 Comparison of σ - ϵ^p curves of copper determined by proposed method with uniaxial tension data.

5. 結言

数種類の加工硬化材料を用いて FEM 解析より得られた P - h 曲線を仮想実験データとした場合には、本手法より加工硬化特性を概ね決定できることを確認した。しかし 2 種類の圧子(球, 円錐)の場合で、 ϵ^p - h/R 曲線および ϵ^p - θ 曲線が近似曲線から離れている材料に関しては両者に若干の差がみられた。

実験においては単軸引張試験結果と提案手法を比較すると、両圧子の場合で加工硬化特性は概ね同定することができた。しかし、その精度においては改良の余地が残っている。

参考文献

- 1) 藤原雅美: 軽金属, 第 52 巻 6 号(2002), 282.
- 2) 小笠原ほか: 日本機械学会論文集(A 編), 69 巻 680 号(2003), 805.