

材質制御塑性加工用流動応力決定システムの構築

東京工業大学 工学部 機械宇宙学科

教授 白樫高洋

(平成4年度研究開発助成 AF-92009)

1. はじめに

熱間塑性加工において、製品の形状だけでなく材質をも予め予測し、最適な製品形状・製品材質を実現することを目的とする材質制御加工技術が注目されている。これは製品の製造過程を制御することにより、素材の有する機能を十分に引き出した製品を得ることを目的としたいいわゆるCAEのための基礎技術であり、次世代の塑性加工技術の中核を成すものであると期待されている。ところが現在のところ、圧延のように変形が固定された特定のプロセスにおける材質予測・制御は研究が進んでいるが、任意の形状を成形することを目的としている鍛造加工においては殆ど検討されていないのが現状である。これは、金属材料に加えられた塑性変形とそれによって誘起される材質変化の定量的関係、特に変形履歴が材料特性に与える影響が明確にされていないためである。

筆者らは金属材料の流動応力変化に及ぼす変形履歴の影響が変形エネルギーによって評価できること示してきた¹⁾⁻⁵⁾。本研究では、変形エネルギーに基づいた流動応力式を構築する方法、特になるべく少ない材料試験からこの流動応力式を構築するためのシステムを検討する。また組織変化へ及ぼす変形履歴の影響も変形エネルギーにて定量的に評価出来ることを示す。

2. 基礎的理論

加工硬化仮説⁶⁾によると加工量と加工硬化量(すなわち流動応力)との関係は、次式のように、加工に要した外部仕事量 W の関数として表される。

$$\sigma = F(W) \quad (1)$$

ただし外部仕事量 W は内部仕事量に等しいので

$$W = \int \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

のように流動応力 σ を相当塑性ひずみ ε で積分したものと表される。これによると加工の履歴の影響を全て W で評価することを意味し、 W のみにより流動応力が定まることを示している。流動応力は履歴だけではなくその瞬間の変形環境、すなわちひずみ速度と温度、に依存するため、式(1)は次式の形になる。

$$\sigma = f(W, \dot{\varepsilon}, T) \quad (3)$$

ここで W は温度履歴、ひずみ速度履歴の影響を総合して得られる変形エネルギーである。Clearboughらによると、変形エネルギーのうち数%が材料内に転位等の格子欠陥として蓄積される⁷⁾ので、 W は転位密度の変化に相当することになる。すると加工硬化は変形エネルギーの蓄積、回復はその放出と見なすことができる。そこで微小時間 dt における変形エネルギーの蓄積量の変化 dW は次式のように表わされる。

$$dW = \sigma d\varepsilon - k W dt \quad (4)$$

ここ k は静的回復速度係数であり、次式のように温度の逆数に比例している。

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{C}{T}\right) \quad (5)$$

この変形エネルギーが材料に及ぼす影響は、標準の試験環境(高ひずみ速度 1500sec^{-1} 、室温 300K)における降伏応力で測ることが出来る。この降伏応力を材料状態と呼ぶが、それまでの変形履歴に拘わらず変形エネルギー量のみで材料状態が定まり、次式で表す。

$$\sigma_{st} = a(W + \alpha)^n \quad (6)$$

3. 熱間流動応力式の構成

3.1 チタン合金における材料状態の確認

以上の理論に基づいて具体的な流動応力式を構成するために、いくつかの材料について実験を行った。流動応力式を構築するには以下に示す手続きが必要である。

- ① 室温において材料状態が適用可能であることの確認、および式(6)の決定。
- ② 回復速度係数の測定、および式(5)の決定。
- ③ 室温において材料状態が適用可能であることの確認
- ④ 流動応力に及ぼす加工環境の影響の測定、および式(3)の決定。

ここでは例としてチタン合金(Ti-6Al-4V)について示す。

試験片は $\phi 6\text{mm} \times h10\text{mm}$ の円柱形とし、室温(300K)

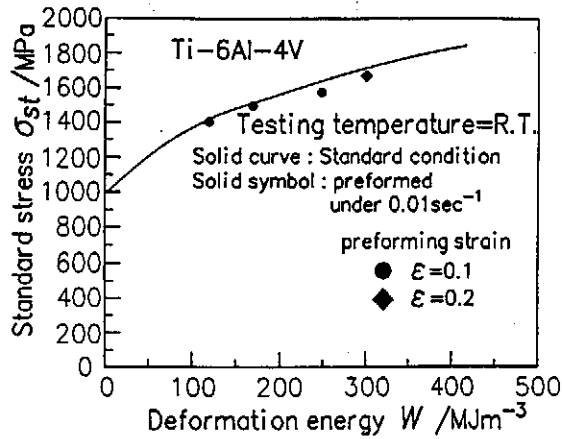


図1 チタン合金の室温における材料状態と変形エネルギーの関係

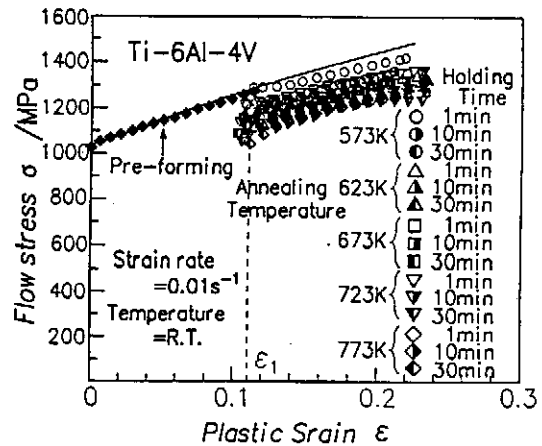


図2 焼鈍によるチタン合金の回復効果

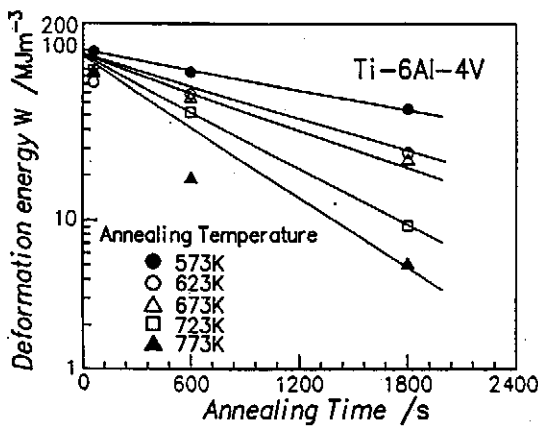


図3 残留変形エネルギーと焼鈍時間の関係

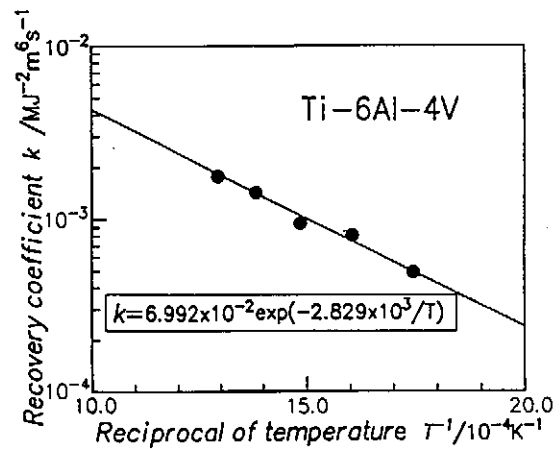


図4 回復速度係数と焼鈍温度の関係

において、ホプキンソン棒型衝撃圧縮試験機および万能試験機を用いて、3つのひずみ速度 (1500sec^{-1} , 0.2sec^{-1} , 0.01sec^{-1}) にて圧縮加工した。この応力-ひずみのデータから式 (2) を用いて変形エネルギーを計算した。このとき、室温であるため、回復は無視できるものとして、 $k=0$ とした。さらにその試験片を標準環境 (ひずみ速度 1500sec^{-1} 、温度 300K) にて圧縮試験し、そのときの降伏応力 (材料状態) を測定した。その結果を図1に示す。縦軸に材料状態 σ_{st} 、横軸に変形エネルギー W を示す。この図より、チタン合金においても材料状態による変形履歴評価は可能であり、式 (6) が成り立つことは明らかである。よってこの関係は次式のようになる。

$$\sigma_{st} = 175.0 (W + 195.0)^{0.365} \quad (7)$$

3.2 回復速度係数の測定

室温下 (300K)、ひずみ速度 0.01sec^{-1} で予め 0.11 まで圧縮した試験片を種々の温度・時間で焼鈍し、冷却後再び同じ環境で圧縮試験した。図2にその応力-ひずみ関係を示す。同図より焼鈍により流動応力が低下しており、回復

の効果が現れていることが判る。この回復量を変形エネルギーで評価するために式 (2) を用いて予備変形時の変形エネルギーと流動応力の関係を求め、さらに焼鈍後の降伏応力がその流動応力-変形エネルギー曲線に対応する位置より、焼鈍後に試験片内に残留している変形エネルギーを推定した。

図3に残留した変形エネルギーと焼鈍時間の関係を示す。縦軸に変形エネルギーを対数軸で示し、横軸に焼鈍時間を示す。図より明らかに変形エネルギーは片対数グラフ上で直線的に減少することより、次式が成り立つことが判る。

$$\log(W) = -kt + C \quad (8)$$

これより

$$\frac{dW}{dt} = -kW \quad (9)$$

が成り立つことは明らかであり、式 (4) が確認される。ここで回復速度係数 k は図3の直線の傾きであり、焼鈍温度に依存している。図4に k と焼鈍温度の関係を示すが、片対数グラフ上で直線で表される。よって回復速度係数 k は式 (5) に則って次式のように表される。

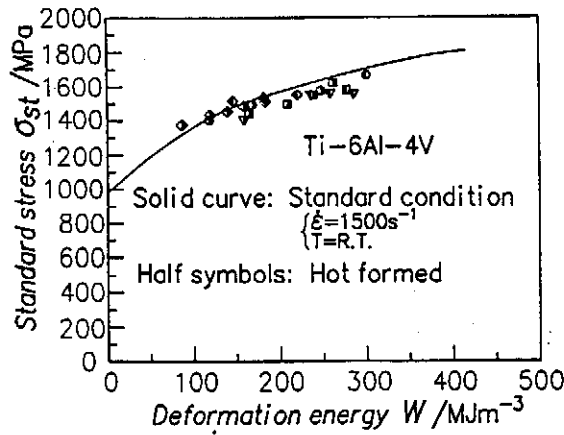


図5 様々な温度履歴における材料状態と変形エネルギーの関係

$$k = 6.99 \times 10^{-2} \exp\left(-\frac{2.829 \times 10^3}{T}\right) \quad (10)$$

3.3 高温環境における材料状態の確認

式(5)と式(10)を用いることにより、高温環境における変形エネルギーを計算できる。そこで、ひずみ速度 0.01sec^{-1} および所定の温度 (373K, 573K, 773K) において試験片を予備的に単軸圧縮変形させ、その後標準環境で圧縮試験し材料状態を測定した。予備変形における変形エネルギーと材料状態の関係を図5に示す。図中シンボルがこれらの測定値であり、実線は式(7)の曲線である。同図より多少のパラッキはあるが、シンボルはほぼ実線上に並び、式(7)が高温履歴においても適用できることが確認できた。

3.4 流動応力式の構成

まずひずみ速度の影響を求めた。温度300K、ひずみ速度 1500sec^{-1} 、 0.2sec^{-1} 、 0.01sec^{-1} における単軸圧縮試験より、流動応力-変形エネルギー関係を求めた。さらにひずみ速度 1500sec^{-1} における流動応力で他の条件の流動応力を無次元化した。これを図6に示すが、無次元化した流動応力 $\sigma_{RT} / \sigma_{st}$ は変形エネルギーに依存せずほぼ一定の値をとっている。よってひずみ速度の影響は次式で表される。

$$\sigma_{RT} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}}\right)^{0.0136} \sigma_{st}, \quad \dot{\epsilon}_{st} = 1500 \text{sec}^{-1} \quad (11)$$

次に温度の影響を求めるために、種々の温度環境において、ひずみ速度 0.2sec^{-1} または 0.01sec^{-1} で圧縮試験を行い、その応力-ひずみ関係より流動応力-変形エネルギー関係を求めた。さらに室温の流動応力 σ_{RT} を用いてこれを無次元化した。すると流動応力の比 σ / σ_{RT} は変形エネルギーに依存せずほぼ一定の値をとることが確認できた。その比と温度の関係を図7に示す。この図より両者は直線の

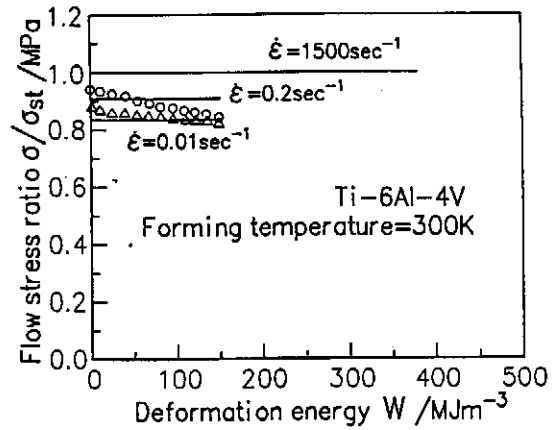


図6 流動応力に及ぼすひずみ速度の影響

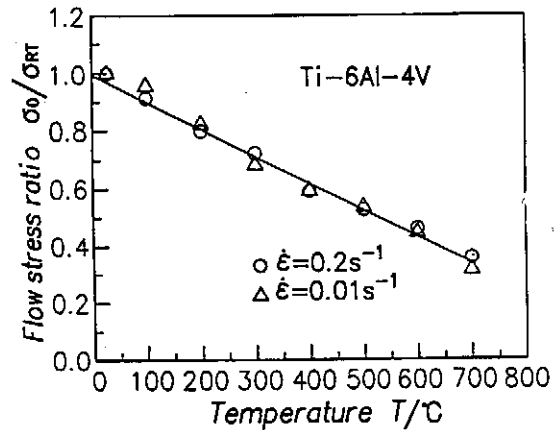


図7 流動応力に及ぼす温度の影響

関係で表されており、

$$\frac{\sigma}{\sigma_{RT}} = 1.0 - 9.87 \times 10^{-4} (T - 300) \quad (12)$$

が成り立つ。よって式(11)と式(12)より次の流動応力式が得られる。

$$\sigma = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{st}}\right)^{0.0136} \sigma_{st} \{1.0 - 9.87 \times 10^{-4} (T - 300)\} \quad (13)$$

3.5 流動応力のシミュレーション例

以上の式(4)(7)(10)(13)を用いて適当な加工履歴における流動応力変化をシミュレートした。計算方法の詳細は省略するが、各瞬間の変形環境が与えられれば、微小時間増分におけるひずみ増分が得られ、式(4)より変形エネルギーの増分が計算でき、式(13)の流動応力が計算できる。図8下部に変形中に変形環境が変化する場合の流動応力変化を示す。上部の図はこのときの変形環境の変化を示している。下図中の実線でシミュレーション結果、シンボルで実験結果を示すが、変形環境が激しく変化しているにも拘わらず、両者は良く一致していることが判る。図中の破線は全ひずみに基づいた従来の流動応力式にて計算し

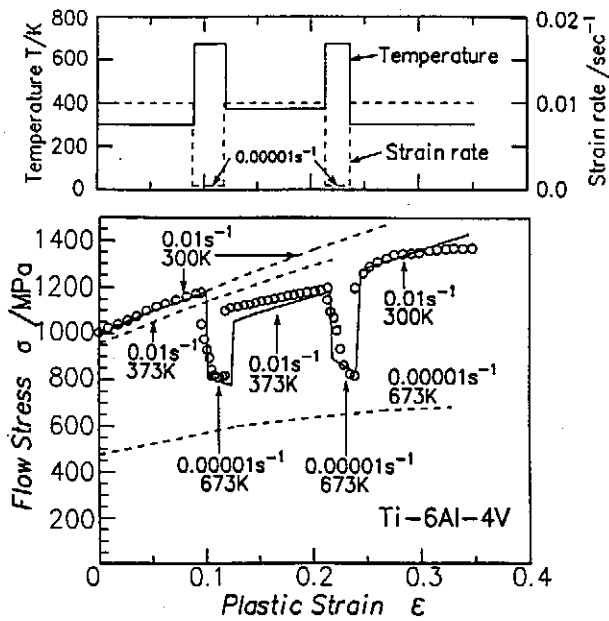


図8 変形環境が変化する場合の流動応力変化

た結果を示しているが、変形が進むに従い実験値との誤差が拡大していくことがわかる。このように変形エネルギーに基づいた本流動応力式は、変形環境が大きく変化する加工過程についてもよく適用できることが確認できた。

なお、ここで示したように本流動応力式を構成するためには①～④までの手続きが必要であり、従来の流動応力式よりも手間が掛かることは明らかである。しかし、①③の材料状態の適用可能性については、現在のところアルミニウム、銅、フェライト系ステンレス、共析鋼、チタン合金について確認されており、その他の金属についても適用できる可能性が大きい。将来研究が進めば、基本的に全ての金属について適用できることが確認できることが期待できる。その場合、①③の作業が省略できるので、必要な測定は②回復速度係数の測定と④流動応力に及ぼす加工環境の影響の測定のみである。すなわち通常材料試験と同等の試験で済むことになる。

4. 再結晶過程に及ぼす変形履歴の影響

金属材料の材質変化に及ぼす変形履歴の影響は変形エネルギーで評価できることが明らかになった。同様に組織変化に及ぼす変形履歴の影響の評価にも変形エネルギーが適用できると期待できる。そこで、純銅を用いて再結晶過程に及ぼす変形エネルギーの影響を検討した。まず以下に示す3条件で単軸圧縮により純銅試験片を予加工した。

試験片A：低ひずみ速度 0.001sec^{-1} 、加工温度 473K、ひずみ量 0.14

試験片B：低ひずみ速度 0.001sec^{-1} 、加工温度 473K、ひずみ量 0.22

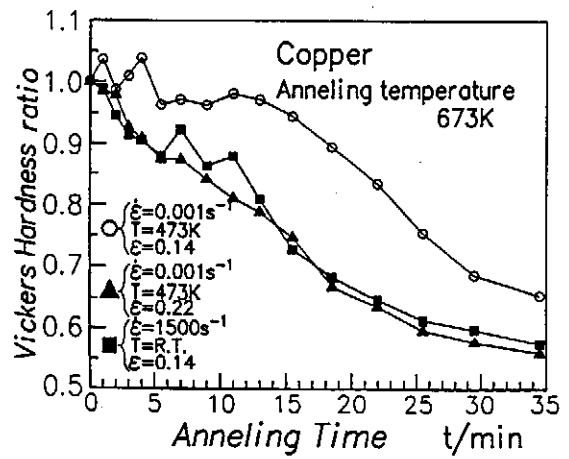


図9 純銅の再結晶過程

試験片C：高ひずみ速度 1500sec^{-1} 、加工温度 300K、ひずみ量 0.14

ここで試験片Aと試験片Cは全ひずみ量は等しいが、変形履歴が異なり、変形エネルギーも異なっている。当然、試験片Aの変形エネルギーは試験片Bのそれより少ない。一方、試験片Bと試験片Cは全ひずみ量も変形履歴も異なっているが、両者の変形エネルギーは等しい。その後各試験片を673Kで一定時間焼鈍し、水冷した後、ビッカース硬度計にて硬さを測定した。図9に焼鈍時間に対するビッカース硬度の変化を示す。ここで○は試験片A、▲は試験片B、■は試験片Cを示している。この場合焼鈍温度が比較的高いため2～3分で再結晶が開始するため、同図で示されるビッカース硬度の低下は再結晶に依るものである。

同図より明らかなように、▲と■はほぼ同一の再結晶過程を示しており、それに対して○は明らかに再結晶の進行が遅いことが判る。すなわち、変形履歴が異なっても等しい変形エネルギーを有している試験片BとCは同一の再結晶過程を示し、一方、変形エネルギーの少ない試験片Aは前者より遅い再結晶過程を示している。このように塑性変形によって誘起される再結晶は、通常考えられている全ひずみ量ではなく⁸⁾、変形エネルギー量に依存していることが確認できる。よって組織変化に及ぼす変形履歴の影響を評価するには、変形エネルギーが適していることが明らかである。

5. おわりに

塑性解析に加工による材質変化の影響を導入するために、変形履歴を評価する手法を確立し、変形エネルギーを用いた新しい流動応力式を提案した。これにより、任意の変形履歴においてもその影響が正確に評価でき、加工中の複雑な流動応力変化が予測できることが判った。

本流動応力式を構成するためには通常より複雑な測定が

必要であるが、適当な仮定、すなわち材料状態が必ず適用できるという仮定、を認めれば、必要な手続きは大幅に簡略化される。最終的には、通常の方法試験から本流動応力式を決定できるようになるものと考えられる。

変形エネルギーは、単なる本流動応力式の内部変数ではなく、組織変化を支配している因子と考えられる。加工により誘起される再結晶は明らかに全ひずみ量ではなく変形エネルギーに依存しており、既存の再結晶理論の見直しが必要ではないかと考えられる。

今後更に詳細な検討が必要であるが、今まで全く別の理論体系に基づいて成り立っていた金属学と塑性力学を、変形エネルギーを介して連結できると考えられる。将来的には塑性加工によって生じる金属学的現象を塑性力学に取り込み、両者の相互作用を統一的に解析することが可能になると期待できる。

謝 辞

本研究に御理解を頂き、研究助成によりご協力頂いた天田金属加工機械技術振興財団に謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉野雅彦・白樫高洋：塑性と加工, 31 - 359 (1990), 1433.
- 2) 吉野雅彦・渡部司・白樫高洋：同上, 31 - 359 (1990), 1439.
- 3) 吉野雅彦・堀江正之・白樫高洋：同上, 33 - 372 (1992), 69.
- 4) 吉野雅彦・堀江正之・白樫高洋：同上, 33 - 372 (1992), 75.
- 5) 吉野雅彦・白樫高洋：同上, 34 - 386 (1993), 283.
- 6) 竹山寿夫：初等塑性力学、丸善, (1969), 52.
- 7) Clarebrough, L. M., Hargreaves, M. E. & West, G. W. : Pro. Roy. Soc. A. 232 - A (1955), 252.
- 8) 須藤一ほか：金属組織学、丸善 (1972).