

高ひずみ速度域における変形応力のひずみ速度依存性 (概要)

Strain Rate Dependence of Dynamic Flow Stress at Very High Strain Rates

理工学部 崎野清憲

1. はじめに

一般に金属材料, 特に面心立方金属においては変形応力のひずみ速度依存性” $d\sigma/d \log \dot{\epsilon}$ ” は, 図 1 に示す如くひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ およそ $5 \times 10^3 / \text{sec}$ 付近から顕著な上昇を示すことが良く知られている. つまり, ひずみ速度 $1 \times 10^{-4} / \text{sec}$ 程度のいわゆる準静的変形の領域からひずみ速度 $1 \times 10^3 / \text{sec}$ 程度の領域までは変形特性に本質的な変化は見られず, 変形応力はひずみ速度の対数に対しほぼ直線的に緩やかに上昇するが, ひずみ速度が $5 \times 10^3 / \text{sec}$ 程度以上になるとひずみ速度そのものに比例して上昇する. したがって, ひずみ速度が $1 \times 10^5 / \text{sec}$ 程度に達すると変形応力もかなり高い値に達し, これ以下のひずみ速度領域では動かなかった変形機構も働き始める. このように, ひずみ速度 $5 \times 10^3 / \text{sec}$ 付近から現れる変形応力のひずみ速度依存性の顕著な上昇は, それ以上のひずみ速度領域における金属材料の高速変形特性に非常に重要な意味を持つと考えられるが, その機構は未だ明らかにされたとは言いがたい. 連続体力学の立場からは, 上述の変形応力のひずみ速度依存性の急上昇はその瞬間のひずみ速度に依存するという見方と, ひずみ速度の瞬時値ではなくひずみ速度の履歴に依存するという見方とがある. また, そのいずれであるかを明らかにすることは, ひずみ速度 $5 \times 10^3 / \text{sec}$ 付近から顕著になる変形応力のひずみ速度依存性の微視的機構を明らかにするためにも重要であり, さらにこの領域を含む広いひずみ速度領域に対する構成式を導くためにも欠かせない. 本研究は, このような問題を明らかにするため, 従来困難視されていた高ひずみ速度域において高い時間分解能を持つ速度急変法, およびその試験装置 (図 2) を開発した. そして, 面心立方金属のアルミニウムと銅に対し, ひずみ速度およそ $2 \times 10^4 / \text{sec}$ 迄の高速領域で速度降下型のひずみ速度急変実験および定速度実験を行なった. その結果, 従来定説になかった高ひずみ速度における変形機構について明確な知見を得ることが出来た. さらに, この知見を基に, 広いひずみ速度範囲にわたって適用できる構成式の基本形を提案した.

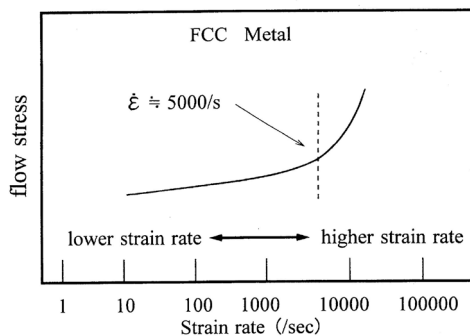


図 1 変形応力とひずみ速度の関係

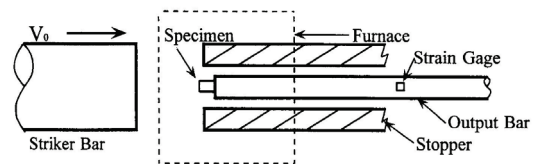


図 2 実験装置の概略

2. 高ひずみ速度域における変形機構 (構成式の導出)

速度急変実験結果から, 変形応力のひずみ速度依存性は大部分が瞬間ひずみ速度に支配されていることが示されたので, その変形機構については転位論による微視的考察が必要となる. そこで, 転位の運動に対する内在的な抵抗としてフォノン粘性抵抗, 外在的な抵抗として林転位を考える. 図 3 に簡単な転位の動力学モデルを示す.

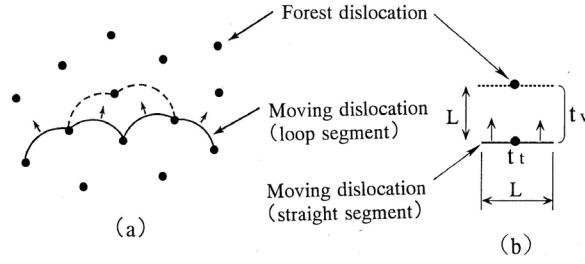


図3 転位運動の簡単な動力学モデル

図3(a)に示す如く、運動転位は林転位に引っ掛かりループ状に張り出すが、簡単のため変形の素過程を図(b)に示すように、運動転位を長さ L の剛セグメントとして扱った。なお、平均林転位間隔は L となる。運動転位が林転位を切る際の待ち時間を t_t 、林転位間を通過するのに要する時間を t_v とすると

$$t_t = \nu \exp\{-(E - \tau V^*)/kT\} \quad (1)$$

$$t_v = LB/\tau b \quad (2)$$

となり、運動転位の平均移動速度 \bar{v}_d は

$$\bar{v}_d = L/(t_t + t_v) \quad (3)$$

となる。上式の E はジョグ形成の活性化エネルギー、 V^* は活性化体積、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度そして B はフォノン粘性抵抗係数である。

よって、広範囲ひずみ速度域における構成式(応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係)は

$$\dot{\gamma} = \rho_d b \bar{v}_d = \frac{\rho_d b L}{\nu^{-1} \exp\{-(E - \tau V^*)/kT\} + LB/\tau b} \quad (4)$$

となる。上式は、転位の運動に対する熱活性化機構と粘性抵抗機構を含んだ式となっている。

図4に示す如く、式(4)は変形応力の急上昇(実線)を表すことが出来る。さらに、信頼できる具体的な値を式(4)に代入することによって、図5に示される変形応力(実測値◆)の急上昇を評価することが出来る。

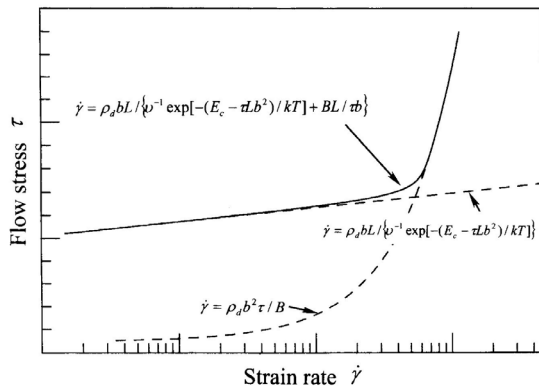


図4 式(4)による変形応力とひずみ速度の関係(実線)

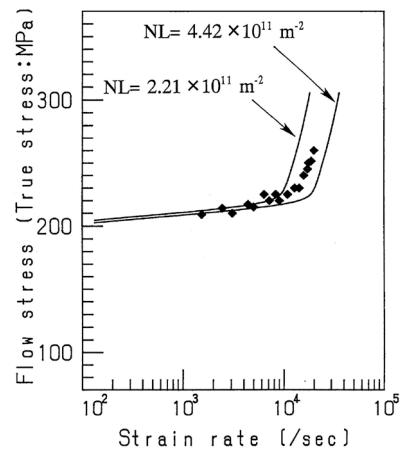


図5 実測値(◆)と計算値(実線)との比較

3. 結論

高ひずみ速度域で見られる変形応力の急上昇は、運動転位の律速機構が低速側の林転位との斬り合いによる熱活性化過程支配から高速側の粘性抵抗支配へ遷移することによって評価できる。