

311 ニオブの高ひずみ速度域における活性化体積のひずみ依存性

法政大学 ○崎野清憲 法政大学 [院] 木下佳典

Strain Dependence of Activation Volume of Niobium
at Very High Strain Rates

Kiyotaka SAKINO and Yoshinori KINOSITA

1 はじめに

体心立方金属の変形応力のひずみ速度依存性はひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 10^{-1}/\text{sec}$ 程度迄の準静的領域ではあまり大きくないが、それ以上の領域では非常に大きくなることは良く知られている。近年までに報告された多くの研究成果から、ひずみ速度およそ $1/\text{sec}$ から $10^3/\text{sec}$ 台の領域で見られる高い変形応力のひずみ速度依存の機構はらせん転位が高いパイエルスポテンシャルを乗り越える際のキンク対生成のための熱活性化過程で評価できるというのほぼ明らかである。また、変形量すなわち内部組織の違いが変形応力のひずみ速度依存性に与える影響については、藤野¹⁾が Fe-0.16%C 鋼に対しひずみ5~15%の範囲で、そして Karasima ら²⁾は Fe-0.91%C 鋼に対しひずみ1~6%の範囲で、ひずみ速度を1~2桁ほど増加させる試験を行い、変形応力のひずみ依存性すなわち活性化体積のひずみ依存性はほとんどないと報告している。しかし、行われたひずみ速度は準静的速度域であり、変形応力が非常に高くなる高ひずみ速度域での報告はない。最近、崎野³⁾は SS400に対し $\dot{\epsilon} = 10^4/\text{sec}$ 台の高ひずみ速度域で速度急変実験を行い、活性化体積がひずみとともに増加することを報告した。高ひずみ速度域では実験手法も難しく、また他の変形機構の介在や内部組織変化等の問題がある。

そこで、本研究は同じ体心立方金属のニオブに対しひずみ速度およそ $1.3 \times 10^4/\text{sec}$ で速度急変試験を行い、ひずみ量すなわち内部組織の違いが変形応力のひずみ速度依存の大きさ（活性化体積）に与える影響について考察した。

2 実験

2.1 供試材および試験片

実験に使用したニオブ試験片は直径および長さがそれぞれ 1.0 mm および 1.5 mm の円柱形であり、980°Cで1時間真空焼鈍した。焼鈍後の平均結晶粒径はおよそ $10 \mu\text{m}$ である。ニオブの化学成分を Table 1に示す。

Table 1 Chemical composition of Nb (mass %)

| C | N | O | Zr | Mo | Ni | Ta | W | Fe |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| 0.003 | 0.002 | 0.07 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.05 | 0.01 | 0.001 |

2.2 装置および方法

速度急変実験³⁾にはホプキンソン棒装置を使用した。

これは主に、打撃棒、出力棒そして出力棒外側に互いに接触することなく同心円状に設置された減速用の中空丸棒で構成される。出力棒は直径4 mm、長さ400 mm のタングステン製丸棒である。打撃棒と減速棒は両者とも外径が13 mm のチタン合金製である。試験片はグリースの粘着力を利用して出力棒端面に取り付けられており、それを打撃棒が直接圧縮変形するシステムである。試験片の変形応力は出力棒に貼られた2枚の半導体ひずみゲージによって検出され、デジタルメモリに記憶される。試験片の公称ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は棒中を伝わる縦波の初等解を用い、次式で与えられる。

a) 減速前

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left(v_1 - \frac{a_0 \sigma_n}{A_1 c_1 \rho_1} - \frac{a_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (1)$$

b) 減速後

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\ell_0} \left(\frac{v_1 - (a_0 \sigma_n / A_1 c_1 \rho_1)}{1 + (A_2 c_2 \rho_2 / A_1 c_1 \rho_1)} - \frac{a_0 \sigma_n}{A_3 c_3 \rho_3} \right) \quad (2)$$

ここで、 v_1 は試験片に接触する直前の打撃棒の衝突初速度である。 ρ , c , A は棒の密度、弾性波の伝ば速度および断面積であり、添字 1, 2, 3 は打撃棒、減速用中空丸棒および出力棒を表している。 a_0 , ℓ_0 , σ_n は試験片の変形前の断面積と長さおよび変形中の公称応力である。

3 結果及び考察

活性化体積の大きさを求めるための速度急変試験はひずみ速度およそ $13000/\text{sec}$ で、速度急変時のひずみは0.13から0.43の範囲で行った。速度急変試験による速度降下率は0.586である。

一般に、体心立方金属の律速機構は、転位が高いパイエルスポテンシャルを乗り越える際のキンク対生成のための熱活性化過程で表すことができるとされている。したがって、ひずみ速度はアレニウスの式

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \exp \left(\frac{-(E_0 - V \tau)}{k T} \right) \quad (3)$$

で表せると考えられている。ここに、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度、 $\dot{\gamma}_0$ は $\dot{\gamma}$ の次元を持つ定数、 E_0 はキンク対生成の

活性化エネルギー, τ は分解せん断応力, k はボルツマン定数, T は絶対温度である. せん断応力と垂直応力の変換にはテラー因子を3.07にとった.

上式から, 変形応力のひずみ速度依存性の大きさを表す活性化体積 V は次式のごとく表すことができる.

$$V = kT \frac{\partial \log \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} = kT \frac{\Delta \log \dot{\epsilon}}{\Delta \sigma} \quad (4)$$

上式の活性化体積 V は速度急変実験によるひずみ速度の差 $\Delta \log \dot{\epsilon}$ とそれによる変形応力の降下量 $\Delta \sigma$ から求めることができる. なお, ひずみ速度の違いによる変形応力差は瞬間のひずみ速度の差によるものであり, 内部組織変化を反映したひずみ速度履歴の影響は含まれないと考えている. Fig. 1 に一定ひずみ速度13300/sec と速度急変時のひずみ量を変えた4種類の速度急変実験における公称応力-時間線図を示す. 各速度急変実験におけるひずみ速度の値には幾分の違いはあるものの, 速度急変前の変形応力レベルは非常に一致を示している.

Fig. 2 は Fig. 1 に示されるそれぞれの速度急変実験の結果から, 速度急変による変形応力の降下量を定量的に評価するために求めた真応力-ひずみ線図である. 得られたそれぞれの変形応力の降下量と Eq. (4) を用いて求めたそれぞれの活性化体積を Table 2 に示す. ひずみ $\epsilon = 0.13$ における変形応力の降下量は他のひずみにおける結果に比べて小さいが, 活性化体積の大きさはほぼ平均的な大きさとなっている. また, 活性化体積の大きさに幾分のばらつきは見られるが, 統一的な傾向すなわちひずみ依存性は見られなかった. ここで, 転位の移動速度と移動転位に作用する応力の間には次式の関係がある.

$$\bar{v} = (\tau / \tau_0)^m \quad (5)$$

ここに, \bar{v} は転位の平均移動速度, τ_0 は単位の転位速度 (通常は1 cm/sec) を与えるせん断応力, m は転位速度の応力依存性を表すパラメーターである. 本実験結果が示すように, 各ひずみにおける $\Delta \sigma$ が一定と考えれば, 上式から転位の平均移動速度は一定となる. さらに, 可動転位密度 ρ と転位の平均移動速度の関係を表すオロワンの式

$$\dot{\gamma} = \rho b \bar{v} \quad (6)$$

から, ひずみの大きさに拘わらず一定ひずみ速度下における可動転位密度 ρ も一定と考えられる.

以上の考察から, 変形量の増加に伴い全転位密度は増加するが, 移動出来る転位の密度は一定であり, また転位の平均移動速度も一定と考えられる.

参考文献

- 1) 藤野宗昭, 新田哲夫, 山本正弘, 平修二, 材料, 20, 467 (1971).
- 2) Karashima, S. and Sakuma, T., Proceeding 11th Japan Congress Metallic Materials 100, (1968).
- 3) 崎野清憲, 実験力学講演会, 8, 310 (2008).

Table 2 Flow stress drop $\Delta \sigma$ and activation volume V determined from rate reduction test in each strain.

| ϵ | 0.13 | 0.18 | 0.27 | 0.33 | 0.42 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta \sigma$ (MPa) | 44.2 | 53.9 | 49.9 | 50.0 | 50.2 |
| V ($\times b^3$) | 17.20 | 14.63 | 17.18 | 17.57 | 19.31 |

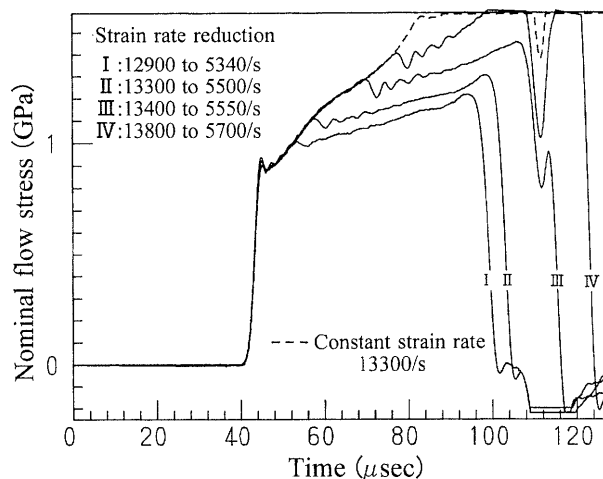


Fig. 1 Relation of nominal flow stress to time obtained from each reduction test at strain rate of about 13000/sec, respectively.

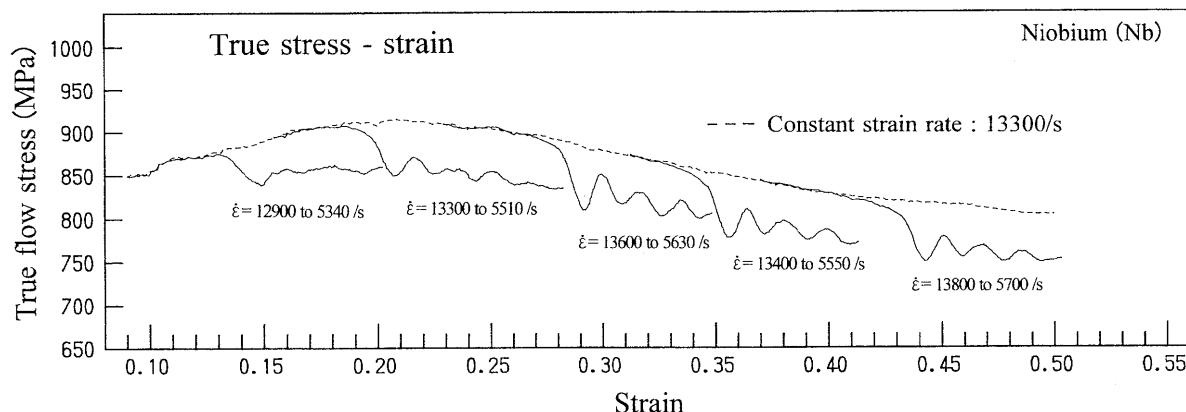


Fig. 2 Flow stress drop obtained from rate reduction tests carried out at each strain.