金属・合金の高温変形機構の解析 ——最近提案された試験法を中心として——

吉 永 日 出 男*

1. は じ め に

高温変形の特徴は拡散が速いために生ずるいろいろな現象が複雑にからみ合っている点にある。すなわち、粒界すべり、粒界移動、析出物の消長などが起こるばかりでなく、回復や再結晶などのいわゆる復旧過程が変形中にも速かに進行する。このために、いわゆる有効応力と内部応力の識別さえも困難になるという問題を生ずる。

ここでいう有効応力と内部応力についてはすでに本会報の解説で述べている⁽¹⁾ので、ここでは簡単に「もし、転位密度などの内部構造が同じならば、温度やひずみ速度にほとんど依存しないような応力を内部応力、これらに依存する応力を有効応力」と考えることにしよう。内部応力は常に存在するものであるが有効応力は実際存在しないと考えてよい場合もある。

有効応力は転位運動の熱活性化過程と密接に関係していることから、変形機構の研究にこの応力成分が注目され、これを変形応力から分離測定する方法がいろいろ考案されてきたが、これらの研究が進むにつれて、高温では復旧過程が関与するために、内部応力の時間変化が問題となることが認識されるようになった。

これらの方法とその問題点についてはすでに解説している⁽¹⁾のでここでは触れないが、内部応力の焼なまし効果(復旧効果)による減少速度は高温ほど、内部応力が高いほど大きくなる一方、塑性変形による内部応力の増加速度はひずみ速度が大きいほど大きくなるので、両者の競合で決まる内部応力は有効応力と同様高温ほど低下し、高ひずみ速度ほど増大することとなり、両応力の識別が困難になるのである⁽²⁾。この難点を除く方法として、応力急減試験外挿法⁽³⁾、応力緩和法⁽⁴⁾、応力急変法⁽⁵⁾、ひ

ずみ速度急変法⁽⁶⁾などいろいろな方法が最近提案され、成果が得られつつある。

上述の方法の中、応力急減試験外挿法についてはすでに別のところ⁽¹⁾⁽²⁾で詳しく述べているので、ここではその他の方法を中心に概説したい。また、これらの方法にはいずれも実験上注意すべき問題点があるので、これらの注意事項についても筆者らの経験を参考に供し、批判を仰ぎたい。

2. 転位の運動様式と有効応力有無の関係

固溶体合金の場合、高温では溶質原子の拡散速度が大きいので、運動転位のまわりにも溶質原子の雰囲気形成され、転位は雰囲気を引きずる粘性的な運動をするものと考えられる。この場合の有効応力はこの粘性抵抗に対するもので、十分高い温度では転位速度に比例する⁽⁷⁾。

一方、熱活性化過程で越えられるような障害が密に分布する場合にも、障害の間隔よりも長い距離に対して転位速度を定義することができ、転位は準粘性的な運動をするものと考えられる。この場合にも、ある与えられた温度と内部構造に対して、有効応力と転位速度との関係が一義的に定まるであろう。

上述のような有効応力が存在しないかあるいは無視できるほど小さい場合には、運動転位は負荷応力よりも高い内部応力の山に停められるまで、音速に近い高速度で自由飛行的に運動するであろう。このような場合には、焼なまし効果によって内部応力が低下するか、負荷応力を高めるかしなければ変形は進行しない。また、内部応力よりも高い応力を試験片に負荷したときには、負荷応力以上の内部応力が転位の運動経路上に形成されるまで、変形は瞬時に進むものと思われる。実際、クリープ試験の最初に瞬間塑性ひずみが、観察されることがあるが、この瞬間ひずみは上述の現象に対応するものと思われる。

* 九州大学教授；大学院総合理工学研究科材料開発工学専攻

Analysis of High-Temperature Deformation Mechanisms in Metals and Alloys.—The Methods Proposed Recently—; Hideo Yoshinaga(Dept. Mater. Sci. and Tech, Graduate School of Eng. Sciences, Kyushu University, Fukuoka) 1981年1月6日受理

有効応力が存在する場合には、負荷応力の増減によって変化するのは転位速度であって、しかもその速度は自由飛行運動に比してはるかに遅いのが普通であるから、瞬間塑性ひずみは生じないであろう。実際、固溶体硬化の大きい合金ではこの瞬間ひずみは観察されない。

このように、有効応力の有無は転位の運動様式の差異と対応する。

3. 有効応力有無の識別法

Ahlquist と Nix⁽⁸⁾が有効応力の分離測定法として応力急減法を提案して以来、この方法を用いた研究が多数報告され、試験されたどのような材料でも有効応力がかかり存在するとの結果が示されたが、これらの研究ではいずれも前述の焼なまし効果による内部応力の減少が十分考慮されていなかった。そこで、この減少による誤差を除くために外挿法⁽³⁾が提案されたが、この方法を適用すると、それまでかなりの有効応力が存在するとされていくつかの *fcc* と *bcc* の純金属に対して有効応力は無視し得るほど小さいという結果が得られた⁽³⁾⁽⁹⁾。しかし、この方法は有効応力の大きさを知る方法としてはある程度有効ではあるが⁽¹⁾、実験精度上の問題があり、もっと信頼性の高い有効応力有無判定法の開発が望まれるようになった。以下に述べる方法はこの要請に応じて考案されたものである。なお、後に述べるように、これらの方法は高温変形に関与する内部応力の増減速度を精度よく測定する方法としても有効である。

(1) 応力急変法

前章に述べたように、有効応力の有無は転位の運動様式に反映され、応力急増にともなう瞬間塑性ひずみの有無によって判定し得る。及川ら⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾はこの点に着目して、クリープ変形の途上で応力急増と急減試験を行った。

有効応力が存在する場合には、これらの負荷応力の急増にともなう瞬間ひずみは弾性ひずみのみであるから、応力の増減に対応する瞬間ひずみはその絶対値が等しくなる。勿論、負荷応力を、転位の雰囲気からの離脱応力よりも大きくなるほど、あるいは熱活性化点の最大抵抗を上回るほど急増させれば、急増前の変形に有効応力が存在する場合でも瞬間塑性ひずみを生ずるのであろうが、図 1 に示した固溶体硬化の大きい合金では、試験した全応力範囲において、応力の増減に対応する瞬間伸び縮みの対称性はよく、溶質雰囲気引きずりによる有効応力の存在を示している。

一方、純 Al では、図 2 に示すように、同じ応力変化に対して瞬間伸びの方が瞬間縮みより大きく、応力急増にともなう瞬間塑性ひずみが生じている。したがって、純 Al の高温変形では、有効応力が存在するとしても変形応力に比べて極めて小さく、実際上無視し得ることが

図 1 応力変化 $\Delta\sigma$ と応力急増による伸び (白丸) および応力急減による縮み (黒丸) との関係。合金濃度は原子%。及川⁽¹⁰⁾による。

図 2 純 Al の瞬間変形。 $\Delta\sigma$: 応力変化量, Δl : 伸び (黒丸) または縮み (白丸)。及川⁽¹¹⁾による。

分かる。また、この方法では、有効応力が無視できる場合、応力変化 $\Delta\sigma$ に対応する瞬間塑性ひずみ $\Delta\epsilon$ より、 $\lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \Delta\epsilon / \Delta\sigma = h$ によって焼なまし効果を含まない純粋な加工硬化率 h を求めることができる⁽¹²⁾。

(2) ひずみ速度急変法

筆者ら⁽⁶⁾が提案したこの方法は通常の引張試験を用いる方法であるが、前節の応力急変法に比べて、いささか予備知識が必要である。

一般に変形応力 σ は有効応力 σ_e と内部応力 σ_i の和として表わされる。というよりは和で表わされるように各応力を定義しているというべきかも知れない⁽¹⁾。したがって、変形応力の変化も

$$d\sigma = d\sigma_i + d\sigma_e \quad (1)$$

と表わされる。ここで、転位速度が有効応力に比例するような溶質雰囲気引きずり運動の場合や有効応力が無視できる場合には、内部応力の変化は転位密度や転位配列などの内部構造の変化のみによって決まり、有効応力の変化は転位の平均速度の変化によって決まる。すなわち、有効応力は内部構造の変化がなくてもひずみ速度に依存する。転位速度が有効応力に比例しない場合には、内部応力の方も内部構造だけでなく負荷応力の変化(したがって、転位の平均速度の変化)によっても変わる⁽¹³⁾。しかし、一般に、有効応力が存在する場合には、変形応力は内部構造とひずみ速度の連続関数になっているであろう。とすれば、試験機のカロスヘッド速度を急変させたとしても、図3のように、変形応力は試験機系の弾性変形のために連続的にしか変化しないし、ひずみ速度は有限であるから内部構造も連続的にしか変化しないと考えられ、したがって、塑性ひずみ速度も連続的にしか変化しないであろう。つまり、クロスヘッド速度を不連続に変化させたとしても、それに対応して不連続に変化するのには弾性ひずみ速度であって、急変時点での塑性ひずみ速度はクロスヘッド速度の変化にもかかわらず等しいことになる。

図3 ひずみ速度急変試験で得られる応力-ひずみ曲線の説明図。

いま、クロスヘッドを dl_t 動かしたときの試験片の塑性伸びを dl_p 、弾性伸びを dl_s 、試験片以外の試験機系の弾性変位を dl_m 、負荷応力の変化を $d\sigma$ とすると、

$$dl_t = dl_p + dl_s + dl_m \quad (2)$$

ここで、試験片の長さを l 、断面積を S 、ヤング率を E 、試験機の弾性係数を k_M とすると、 $dl_p = l d\epsilon$ 、 $dl_s = l d\sigma / E$ 、 $S d\sigma = k_M dl_m$ の関係より、これらの弾性変形を含む見かけのひずみの変化 $d\epsilon_a = dl_t / l$ は

$$d\epsilon_a = d\epsilon + d\sigma \left(\frac{1}{E} + \frac{S}{l} \frac{1}{k_M} \right) \quad (3)$$

と表わせる。ここで、 $d\epsilon$ は塑性ひずみの増分である。また、

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{E} + \frac{S}{l} \frac{1}{k_M} \quad (4)$$

とおき、この K を見かけのヤング率と呼ぶことにする。このとき、クロスヘッド速度 $\dot{l}_t$ の急変に対応して急変する見かけのひずみ速度は

$$\dot{\epsilon}_a = \dot{\epsilon} + \dot{\sigma} / K \quad (5)$$

と与えられる。

急変前後の値を添字 0 と f で区別すれば、急変点で

$$\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_f \quad (6)$$

ならば、式(5)と(6)より

$$\dot{\epsilon}_{af} - \dot{\sigma}_f / K = \dot{\epsilon}_{a0} - \dot{\sigma}_0 / K$$

でなければならない。よって、

$$\dot{\epsilon}_{af} \left\{ 1 - \frac{1}{K} \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_f \right\} = \dot{\epsilon}_{a0} \left\{ 1 - \frac{1}{K} \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_0 \right\}$$

したがって、図3の急変点における応力-ひずみ曲線の勾配の間には

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_f = K \left[1 - \frac{\dot{\epsilon}_{a0}}{\dot{\epsilon}_{af}} \left\{ 1 - \frac{1}{K} \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_0 \right\} \right]$$

の関係がなければならない。

通常、

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_0 / K \ll 1 \quad (7)$$

であるので、急変直後の勾配は

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \right)_f = K \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_{a0}}{\dot{\epsilon}_{af}} \right) \quad (8)$$

となる。あるいは、応力変化速度で表わせば

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_f &= (d\sigma/d\epsilon_a)_f \cdot \dot{\epsilon}_{af} \\ &= K (\dot{\epsilon}_{af} - \dot{\epsilon}_{a0}) \end{aligned} \quad (8')$$

これに対して、有効応力が無視し得るならば、

$$d\sigma = d\sigma_i \quad (9)$$

となるが、このときの内部応力変化は塑性ひずみ増による増加 $h d\epsilon$ と $dt = d\epsilon / \dot{\epsilon}$ の時間の焼なまし効果による減少 $r dt$ との差として与えられるであろうから、

$$d\sigma = h d\epsilon - r dt \quad (10)$$

すなわち、Bailey-Orowan の式⁽¹⁴⁾が成立する。ここで、 h は焼なまし効果を含まない純粋な加工硬化率、 r は加工硬化を含まない純粋な軟化速度である。

式(3)と(10)より $d\sigma$ を消去して dt で割れば、

$$\dot{\epsilon} = (K \dot{\epsilon}_a + r) / (K + h) \quad (11)$$

の関係を得る。これより、有効応力を無視し得るときには、塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ も見かけのひずみ速度とともに不連続に変化し得ることが知られる。有効応力の有無によるこのような相違はひずみ速度急変直後の応力変化率にも反映される。

式(3)と(10)より $d\epsilon$ を消去すれば

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} = \frac{hK}{h+K} \left(1 - \frac{r}{h} \frac{1}{\dot{\epsilon}_a} \right)$$

が得られる。ここで、通常 $(d\sigma/d\epsilon_a)_0 \ll hK/(h+K)$ であるので、上式より

$$\dot{\epsilon}_{a0} = r/h \quad (12)$$

よって、急変直後の勾配は

$$\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon_a}\right)_f = \frac{hK}{h+K} \left(1 - \frac{\dot{\epsilon}_{a0}}{\dot{\epsilon}_{af}}\right) \quad (13)$$

となる。また、応力変化速度で表わせば

$$\dot{\sigma}_f = \frac{hK}{h+K} (\dot{\epsilon}_{af} - \dot{\epsilon}_{a0}) \quad (13')$$

すなわち、急変直後の応力変化率は一般に見かけのひずみ速度の比(式(8)と(13)または差(式(8')と(13'))に比例するが、有効応力の有無によってその比例定数が異なる。すなわち、有効応力が存在する場合には K となり、存在しなければ $1/(1+K/h)$ の割合で K より小さくなる。

図4は純AlとAl-5.4原子%Mg合金の測定結果⁽⁶⁾であって、応力急変法による及川らの結果と同様、合金では有効応力が無視できず、純Alでは無視できることを示している。

図4 純AlとAl-5.4原子%Mg合金のひずみ速度急変試験の結果。吉永ら⁽⁶⁾による。

(3) 応力緩和法

この方法は応力急変法やひずみ速度急変法に先立って阿部ら⁽⁴⁾によって提案された方法であるが、以下に述べるように、この方法はひずみ速度急変法の一様である。

変形の途上でクロスヘッドを停止し、図5のような応力緩和曲線を求めたとする。このとき、式(8')または(13')において、 $\dot{\epsilon}_{af} = 0$ であるから、 $\dot{\sigma}_f$ に相等する緩和開始点での緩和速度 $\dot{\sigma}_{r0}$ は、有効応力が無視できないとき

図5 応力緩和試験の説明図。阿部ら⁽⁴⁾による。

$$\dot{\sigma}_{r0} = -K\dot{\epsilon}_{a0} \quad (14)$$

無視できるとき、

$$\dot{\sigma}_{r0} = -\frac{hK}{h+K} \dot{\epsilon}_{a0} \quad (15)$$

となる。

式(5)より、 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_a - \dot{\sigma}/K = \dot{\epsilon}_a \{1 - (d\sigma/d\epsilon_a)/K\}$ で、通常 $(d\sigma/d\epsilon_a)_0 \ll K$ であることを考慮すれば

$$\dot{\epsilon}_{a0} = \dot{\epsilon}_0 \quad (16)$$

としてよい。

応力緩和直前の変形中の塑性ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ ($\dot{\epsilon}_0$ に相等)、応力緩和開始点での緩和中の塑性ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_{r0}$ とすると、式(5)で $\dot{\epsilon}_a = 0$ とすれば明かなように、一般に

$$\dot{\epsilon}_{r0} = -\dot{\sigma}_{r0}/K \quad (17)$$

の関係が成立する。よって、有効応力が無視できないならば

$$\dot{\epsilon}_{r0} = \dot{\epsilon} \quad (18)$$

無視できるならば

$$\dot{\epsilon}_{r0} = \frac{h}{h+K} \dot{\epsilon} \quad (19)$$

図6 純VとV-5.0原子%Fe合金の応力緩和試験の結果。阿部ら⁽⁴⁾による。

で、 $\dot{\epsilon}_{r0}$ の方が $\dot{\epsilon}$ よりも $1/(1+K/h)$ の割合で小さくなる。

図6は純VとV-5.0原子%Fe合金の結果で、合金では有効応力が無視できず、純Vでは無視できることを示している。

4. 実験上の注意事項

前章に述べた有効応力有無の判定試験は常用のどのような試験機でも簡単にこなせる筈のものであるが、次のような点に注意しないと誤った結果を得る恐れがある。

(1) 試験機の剛性

まず、試験機の剛性は十分高いものでなければならない。例えば、応力急変法では瞬間塑性伸びを同じ $\Delta\sigma$ を加えたときと除いたときの伸びと縮みの差として求めている。つまり、伸びは弾性変形+塑性変形、縮みは弾性変形のみと仮定している。この仮定の当否については次章で論ずるが、例えばこの仮定が正しいとしても、 $\Delta\sigma$ が小さい時の瞬間塑性伸びはあったとしても小さいので(図2)、試験機の伸び検出部の剛性が低いと弾性変形が大きく、上述の差として求められる塑性伸びが隠されてしまう恐れがある。また、完全に隠されないまでも、瞬間塑性伸びの測定精度が落ち、 $h = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} (\Delta\sigma/\Delta\epsilon)$ の値が不正確になる。

ひずみ速度急変法や応力緩和法では、式(13)と(19)に示したように、有効応力有無の判定は係数に $1+K/h$ の割合の相違があるかないかによっている。したがって、 $K \ll h$ であれば両者の識別はできない。

以上のように、試験機の剛性が小さいと、有効応力が無視できる場合でも無視できないと判定される恐れがある。これまでの測定によれば、 h は変形状態によって異なるが、しばしばヤング率程度に高い値になる^{(15)†}。したがって、 K も E 程度に高いことが必要である。

式(4)より、 K を E 以上に高めることはできないので、右辺第2項をできるだけ小さくし、 $1/E$ 程度にしなければならない。この第2項は試験機の弾性係数 k_M だけでなく、試験片の断面積と長さの比 S/l にも依存している。したがって、 S/l の小さい細くて長い試験片を用いるならば k_M が小さくても K を大きくすることができる。ただし、 S/l を小さくすると言っても実際上の限度があるので、その限度内で小さくし、同時に k_M を大きくする工夫が必要である。

† h がヤング率程度に高いというようなことはあり得ないと思う人が多い。しかし、それは弾性変形を含むひずみに対する加工硬化率を考えるからで、ここで問題にしているのは塑性ひずみに対するものであることに注意されたい。それにしても、測定される h の値が非常に高い理由の解明は必要である。

k_M にはまた次のような問題もある。引張軸上にいろいろな結合部があると、その部分の有効接触面積が負荷重の大きさによって変わるため、 k_M が荷重に依存し、高荷重になるほど大きくなるのが普通である。このため、筆者らは結合部を硬くボルト締めしている。しかし、こうすると試験機系が硬くなり過ぎて、次に述べる k_M の測定時に過荷重となって、ロードセルを壊す恐れがある。そこで、引張軸上に1カ所遊び部を設け、負荷時にスチールボール(超硬ボールの方がもっとよい)で点接触するようにしている。また、 k_M を大きくするにはユニバーサルジョイントは除き、ロードセルも弾性撓みの小さい剪断型のものを用いるのが良い。

k_M の測定には次のような方法を用いている。まず、本試験片よりも断面積が大きいカヤング率が大きく、本試験の荷重範囲が十分弾性領域に入るようなダミー試験片のいろいろの長さのものを用意し、荷重-変位曲線を書かせる。このときの曲線の勾配は式(4)と同様にして導かれる。

$$1/k = (l_D/S_D)/E + 1/k_M \quad (20)$$

の k を与える。ただし、添字Dはダミー試験片を意味する。図7はこのようにして測定した k と l_D/S_D との関係の一例である。試験機を前述のように硬くすると、このようによい直線関係が得られ、 $l_D/S_D=0$ の外挿値として k_M が求められる。ただし、ダミー試験片の取付方が悪く、その長さ方向が荷重軸とよく一致していないと、

図7 $1/k$ と l_D/S_D との関係の測定例。吉永ら⁽⁶⁾による。

図8 k_M と荷重との関係の測定例。白丸は試験機を硬くした場合、黒丸は特別な改良を加えなかった場合。吉永ら⁽⁶⁾による。

l_D/S_D の小さいところで k が異常に小さく測定されることがある。このような時は k 値の再現性もよくない。どうしても旨く行かないときには、一度大荷重を与えてダミー試験片に塑性伸びを与えると旨く行くことが多い。

以上のような点に注意すると、図 8 の白丸のような荷重依存性の殆んどない k_M が得られる。同図の黒丸は上述のような改良を施さなかったときの k_M で、その値が小さいばかりでなく、明らかな荷重依存性を示している。

(2) 試験機の応答速度

応力急変試験では、クリープ変形の途上で僅かに負荷重を増減させる。この増減は旨く行なわれないと試験機に振動を与える恐れがあるし、振動が入らないようにゆっくり増減させたのでは急変試験にならない。及川らはクリープ試験機のビームの支点の両側にモーメントが釣合ように重りを糸で吊って置き、その一方の糸を焼切ることによって負荷応力の急増急減 (30~40 ms 以内) に成功している。

最近、開発された電気油圧式の試験機でも同様の試験を行うことができるが、ゲインを高めて応答速度を上げ過ぎるとハンチングを起こすので注意しなければならない。しかし、筆者らの使用している試験機では⁽¹⁶⁾40 ms 以下でハンチングなしに必要な $\Delta\sigma$ を与えることができる。

インストロン型の試験機を用いてひずみ速度急変試験または応力緩和試験を行うときにはもっと注意が必要である。

前述のように、 k_M の荷重依存性がないようにしたときには、ダミー試験片の荷重速度と弾性変位速度が比例するので、荷重速度の変化からクロスヘッド速度の変化を精度よく検出することができる。すなわち、クロスヘッド速度を切換えたとき、指定の速度に達するまでの遷移時間が荷重-時間記録で 2 つの勾配の異なる直線の間をつなぐ丸みをおびた部分の長さから容易に求められる。図 9 はこのようにして求めた島津オートグラフ IS-20T (容量 2×10^5 N) 型試験機の遷移時間である。

クロスヘッド速度を v_{R0} から v_{Rf} に変えたときの遷移時間 Δt は v_{R0} が大きいほど、 v_{Rf} が大きいほど長くなるが、 $v_{R0} = 8.3 \mu\text{m/s}$ (0.5 mm/min) では v_{Rf} が v_{R0} より小さければ Δt は無視できるほど小さい。また、 $v_{R0} = 0.42 \mu\text{m/s}$ (0.025 mm/min) では v_{Rf} が $4v_{R0}$ より小さければ無視できる。このような特性は試験機によって大幅に異なる。別の試験機による試験では、 $v_{Rf} = 0$ とする応力緩和試験でも $v_{R0} > 8.3 \mu\text{m/s}$ とすると、停止時にクロスヘッドの横振れを生じ、正しい $\dot{\epsilon}_p$ が求められなかった⁽³⁾。

図 10 は本試験の一例で、ひずみ速度急変試験を行なったときの荷重と変位 (LVDT で測定) の時間変化を同時記録したものである。このように、変位速度に遷移時間

図 9 試験機のカロスヘッド速度切換比と遷移時間との関係の測定例。吉永ら⁽⁶⁾による。

図 10 クロスヘッド速度切換時に遷移時間があるときに生ずる S 字型の荷重-時間曲線の例 ($v_{R0}/v_{Rf} = 0.17$, $v_{R0} = 4.2 \mu\text{m/s}$ (0.25 mm/min)). 吉永ら⁽⁶⁾による。

が認められる (定規を当てて見ると分かる) 時には、荷重-時間曲線が S 字型になり、正しい $\dot{\epsilon}_f$ が求められなくなるので注意しなければならない。ちなみに、筆者らが使用している島津電気油圧式試験機サーボベット (容量 2×10^4 N) ではこの遷移時間は 10 ms 以下である⁽¹⁶⁾。

以上のように、使用する試験機の特性を十分チェックしておかないと誤った結果を出す恐れがあるので注意しなければならない。

(3) 記録計の応答性

ここで問題にしているような急変直後の挙動を知るためには、試験機の応答性ととも記録計の応答性も大切である。通常の X-Y レコーダは比較的応答性が悪く(フルスケールに対し 0.7 s のものが多い)、荷重やひずみ速度が急変しても記録に遷移時間があり、正しい勾配が求められないことがある。筆者らの経験では渡辺測器製のリニアコーダの応答速度(フルスケールに対して 1/30 s)以上の記録計ならば問題ない。

5. 各判定法の特徴と問題点

(1) 応力急変法

この方法はクリープ試験に適用するもので、伸び検出部の剛性を高めるのも容易であり、優れた判定法であるが、除荷による試験片の瞬間縮みが弾性変形のみであるとする前提の当否が問題である。

有効応力が存在し、転位が粘性運動する場合にはこの前提は正しいであろうが、有効応力が無視でき転位が自由飛行運動する場合には、内部応力の高い山に停められている転位が除荷によってその分だけ内部応力が低いところに瞬間的に逆移動するであろう。この移動による瞬間塑性変形が加荷による瞬間塑性変形と同程度に大きいと、この判定法は誤った結果を与えることになる。誤った結果を与えないまでも、 $\lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ で求められる h の値は過大評価となる。

しかし、最近の Parker と Wilshire の報告⁽¹⁷⁾によれば、有効応力が無視できる純 Al の場合、除荷による瞬間塑性縮みは確かに存在するけれども、クリープ応力の約 50% までの除荷ではその縮みの大部分が弾性縮みで、塑性縮みは無視できるほど小さいという。この報告は及川らの方法の正当性を支持するものである。

(2) ひずみ速度急変法

この方法は、弾性変形を含む見かけのひずみ速度を不連続に変えたときに塑性ひずみ速度が不連続に変化するかどうかを応力変化率の相違で判定しようとするものであるから、これらの測定には実際上無限小にはならない応力変化 $\delta\sigma$ が必要である。したがって、有効応力が存在する場合でも、この $\delta\sigma$ の変化によって塑性ひずみ速度に $\delta\dot{\epsilon}$ の変化が生ずる。もし、この $\delta\dot{\epsilon}$ が $\dot{\epsilon}_0$ に比べて無視し得ないほど大きいと、塑性ひずみ速度が恰も不連続に変化したように観察されることになり、有効応力が無視できると誤った判定を下すことになる。

この誤差 $\delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ は有効応力に対する応力変化の割合 $\delta\sigma/\sigma_0$ に比例すると考えられるので⁽⁶⁾、 $\dot{\epsilon}_{af} > \dot{\epsilon}_{a0}$ のときは $\delta\sigma > 0$ であるから正となり、 $\dot{\epsilon}_{af} < \dot{\epsilon}_{a0}$ のときは $\delta\sigma < 0$ であるから負となる。したがって、図 4 のようなプロット

をすると、測定点は (1, 0) 点を通る直線上には乗らなくなることが予想される⁽⁶⁾。

純 Al について得られた結果は、図 11 のように、 $\dot{\epsilon}_{a0}/\dot{\epsilon}_{af} > 1$ の領域も $\dot{\epsilon}_{a0}/\dot{\epsilon}_{af} < 1$ の領域も (1, 0) 点を通る直線によく乗り、しかもその勾配の絶対値は明らかに 1 より小さい⁽¹⁸⁾(温度やひずみ速度によって勾配が異なるのは h/K (主として h) に温度やひずみ速度依存性があるためと考えられる)。したがって、塑性ひずみ速度の不連続な変化は上述のような測定誤差によるものではなく、真に有効応力が無視し得ることを示している。

この場合、応力の変化率を測定するのに必要な $\delta\sigma$ は変形応力 σ の 0.5% 程度である。したがって、図 11 のような結果が得られたときには、有効応力が例え存在したとしても、変形応力の 0.5% よりずっと小さく、実際上無視して差支えない。

図 11 純 Al について行ったひずみ速度急変試験の結果。(a) 温度依存性、(b) ひずみ速度依存性。堀田ら⁽¹⁸⁾による。

(3) 応力緩和法

この方法は、変形の途上でクロスヘッドを停めるだけでよいので、最も簡便な方法である。しかし、前節のひずみ速度急変法をただ 1 回行なうのに相当するので、簡便ではあるが誤差の評価ができない。すなわち、塑性ひずみ速度に不連続な変化が観察された場合、これが前節に述べた誤差 $\delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}$ によるのか、真の不連続の変化なのか明らかでない。

有効応力が存在し、塑性ひずみ速度との間に

$$\dot{\epsilon} = \phi \rho b B \sigma_e^m \quad (21)$$

の関係があるものとする、上述の測定誤差により

$$\frac{\dot{\epsilon}_{r0}}{\dot{\epsilon}} \sim 1 - \frac{m}{2} \frac{\delta\sigma}{\sigma_e} \quad (22)$$

となる⁽¹⁹⁾。ここで、 $\delta\sigma \approx 0.005\sigma$ であるから、塑性ひずみ速度に不連続な変化が見られても

$$\frac{\sigma_e}{\sigma} \sim \frac{0.0025m}{1 - \dot{\epsilon}_{r0}/\dot{\epsilon}} \quad (23)$$

程度の有効応力が存在したのと区別がつかない。それゆえ、いろいろな $\dot{\epsilon}_{af}$ を用いるひずみ速度急変法に比し、判定法としての信頼性は低いことになる。ただし、一度ひずみ速度急変法で有効応力の有無を確認しておけば、 h の測定などにこの方法の簡便さが威力を発揮する。

(4) 共通の特徴と問題点

上述の各方法は有効応力有無の判定ばかりではなく、有効応力が無視できるときには、純粋な加工硬化率 h の測定に使用することができる。また、式(12)を用いて純粋な軟化速度 r を知ることができる。つまり、変形応力のみ測定に比べて高温変形についてより深い知見を得ることができる。

しかし、一方、粒界すべりや亜粒界移動⁽²⁰⁾のような粘性的であると考えられる変形が転位の自由飛行による変形と共存するときには、上述の方法はいずれも自由飛行運動に対応する情報しか提供せず、粘性変形分については何の情報ももたらさない。しかし、別の見方をすれば、粘性変形成分の有無に拘らず、自由飛行運動による変形の特性を分離して調べられる利点があるともいえる⁽¹⁹⁾。

6. お わ り に

紙数の関係で、測定結果から知られつつある高温変形

のいろいろな特性について述べるができなかったが、有効応力の大きい合金の場合に内部応力成分について求められる h と r が有効応力が無視される純金属と著しく異なることや、純金属の h が応力のみでなく温度にも依存することなど、これまで知られていなかったいろいろな知見が得られつつある。また、粒界すべりの効果など別の角度からの研究も進んでいる。しかし、これらの研究は進行中のものが多く、近い将来完成の域に達することが期待されるので、その時点で充実した解説が誰かによって執筆されることを望むものである。

文 献

- (1) 吉永日出男：日本金属学会会報，16(1977)，197.
- (2) 吉永日出男：軽金属，29(1979)，528.
- (3) 当摩 建，吉永日出男，諸住正太郎：日本金属学会誌，38(1974)，170；Trans. JIM，17(1976)，102.
- (4) 阿部勝憲，吉永日出男，諸住正太郎：日本金属学会誌，40(1976)，393；Trans. JIM，18(1977)，479.
- (5) H. Oikawa and K. Sugawara：Scripta Met., 12(1978)，85.
- (6) H. Yoshinaga，Z. Horita and H. Kurishita：Submitted to Acta Met.
- (7) 例えば，吉永日出男：日本金属学会会報，17(1978)，414.
- (8) C. N. Ahlquist and W. D. Nix：Acta Met., 19(1971)，373.
- (9) 当摩 建，吉永日出男，諸住正太郎：日本金属学会誌，39(1975)，621.
- (10) H. Oikawa：Phil. Mag., A37(1978)，707.
- (11) 及川 洪，中田昌之，辛島誠一：日本金属学会講演概要，(1981・4月)，119.
- (12) H. Oikawa and M. Ohnuma：Submitted to Met. Trans.
- (13) K. Abe，H. Yoshinaga and S. Morozumi：Mater. Sci. Eng., 41(1979)，65.
- (14) E. Orowan：Z. Phys., 89(1934)，614.
- (15) T. Watanabe and S. Karashima：Trans. JIM，9(1968)，Supplement，242.
- (16) 吉永日出男：金属，49(1979)，No. 4，15.
- (17) J. D. Parker and B. Wilshire：Phil. Mag., 41(1980)，665.
- (18) 堀田善次，吉永日出男：日本金属学会誌，44(1980)，1273.
- (19) 吉永日出男，栗下裕明，後藤正治：九大総理工報，2(1980)，1.
- (20) S. F. Exell and D. H. Warrington：Phil. Mag., 26(1972)，1121.