

Ti-Fe-O合金の常温における応力緩和挙動

守谷 英明*・長井 寿*²・河部 義邦*³・岡田 厚正*³

Room-temperature Stress Relaxation in a Ti-Fe-O Alloy.

Hideaki MORIYA, Kotobu NAGAI, Yoshikuni KAWABE and Atsumasa OKADA

Synopsis : Stress relaxation behavior of a Ti-Fe-O alloy was investigated at room temperature, varying pre-strain level and pre-strain rate. The relaxation behavior is independent of pre-strain. And the stress relaxation rate decreases with relaxation time. At the early stage of relaxation, 0 to 200s, the stress relaxation rate increases with pre-strain rate. However, after 200s, it does not depend on pre-strain rate as $d\sigma/dt = -19.6t^{-1}$, where $d\sigma/dt$ and t are stress relaxation rate and relaxation time, respectively.

Key words : stress relaxation ; pre-strain ; pre-strain rate ; titanium alloy.

1. 緒言

金属材料は引張試験の途中でクロスヘッドを停止させ、クロスヘッド変位を一定に保つ(以後、クロスヘッド停止試験と呼ぶ)と、時間とともに試験片を含む試験機系全体にかかる応力が低下する応力緩和現象を示す。

高温域においては、長時間の使用に際して、材料の組織変化や回復などが生じるために、応力緩和における応力低下の時間依存性が材料の寿命を考える際に重要になる。したがって、高温での応力緩和現象は、高温クリープと並んで重要な現象との認識が強く、応力の時間依存性と組織の関連性や高温クリープとの関連性に基づいた研究が多くなされてきた¹⁻⁷⁾。

一方、常温においても応力緩和現象は、ワイヤの締付け金具やボルトの締付け力の低下につながり、機械や土木建築物の安全性において極めて重要な現象である。しかし、変形機構などを調べる目的で短時間の応力緩和現象の解析⁸⁻¹⁰⁾が行われてきたが応力緩和挙動そのものについては、ほとんど調べられていない。

ところで、クロスヘッド停止試験では、まず、試験片にある一定の塑性ひずみ(以後、予ひずみと称する)まで変形を与える。変形応力はひずみ速度依存性を持つので、試験を開始するときの応力(以後、開始応力と呼ぶ)レベルは、予ひずみを与えるまでの塑性ひずみ速度(以後、予ひずみ速度と呼ぶ)に依存して変化する。しかし、従来の低温クリープやリラクゼーションの議論においては、予ひずみやそれを与えるまでの変形過程は充分には考慮されていないので、

応力緩和現象に及ぼす予ひずみや予ひずみ速度の影響を調べる必要がある。ここで、予ひずみ速度は、例えば、ボルトの締付けの際の締付け速度に対応すると考えられる。

チタン合金は、常温においても応力緩和現象¹¹⁾や低温クリープ^{11,12)}が顕著な金属材料であり、著者らも前報¹³⁾において、クロスヘッド停止試験によって変形応力が大きく減少することを報告した。しかし、応力緩和過程における予ひずみと予ひずみ速度の影響に関する報告は見あたらない。

そこで、本研究では前報¹³⁾で用いたnear α 型のTi-Fe-O合金について、常温で予ひずみと予ひずみ速度を変化させて応力緩和挙動を詳細に調べた。

なお応力緩和とは、全ひずみ一定の条件下で試験片の応力が時間的に低下する現象¹⁴⁾であるが、本研究ではクロスヘッド変位一定の条件下での応力の低下を取り扱う。

2. 実験方法

供試材は、Table 1 に示す化学成分を有するラボ溶製したTi-Fe-O合金で、板圧延および焼鈍を施したものであり、顕微鏡組織をFig. 1 に示した。これより、Fig. 2 に示す直径3.5mm、平行部長さ25mmの丸棒試験片を採取した。

応力緩和挙動を調べるために、引張試験の途中でクロスヘッドを停止して荷重の低下が停止するまでクロスヘッド変位を保持し、その間の応力とひずみの時間変化を調べた(クロスヘッド停止試験)。

試験には島津オートグラフを用い、試験片に標点距離25mmの伸び計を装着して、荷重-クロスヘッド変位、荷重-

平成9年1月7日受付 平成9年5月16日受理 (Received on Jan. 7, 1997; Accepted on May 16, 1997)

* 千葉工業大学大学院生 (Graduate Student, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma Narashino 275)

* 2 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

* 3 千葉工業大学 (Chiba Institute of Technology)

伸び計変位、荷重-時間および伸び計変位-時間を記録した。

クロスヘッド停止試験における予ひずみの影響を調べるために、クロスヘッド速度0.05および0.5mm/min(予ひずみ速度 2.8×10^{-5} , $2.8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$)について1本の試験片で予ひずみ0.02ごとに繰り返し行った。また、クロスヘッド速度の影響を調べるために、クロスヘッド速度0.05, 0.5, 5, 50mm/min(予ひずみ速度 2.8×10^{-5} , 2.8×10^{-4} , 3.0×10^{-3} , $3.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$)について予ひずみ0.04でクロスヘッド停

Table 1. Chemical compositions of test material (wt%).

O	N	C	Fe	H	Ti
0.268	0.158	0.015	0.71	0.0011	Bal.

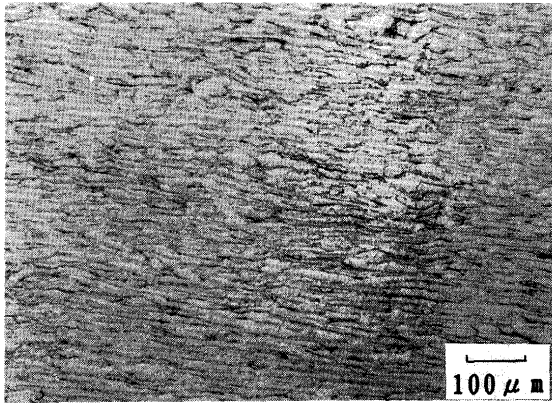


Fig. 1. Microstructure of specimen.

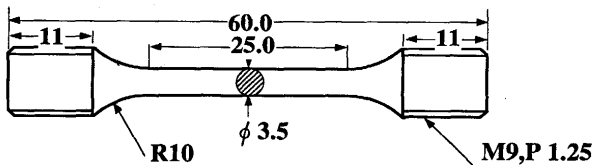


Fig. 2. Shape of tensile test piece.

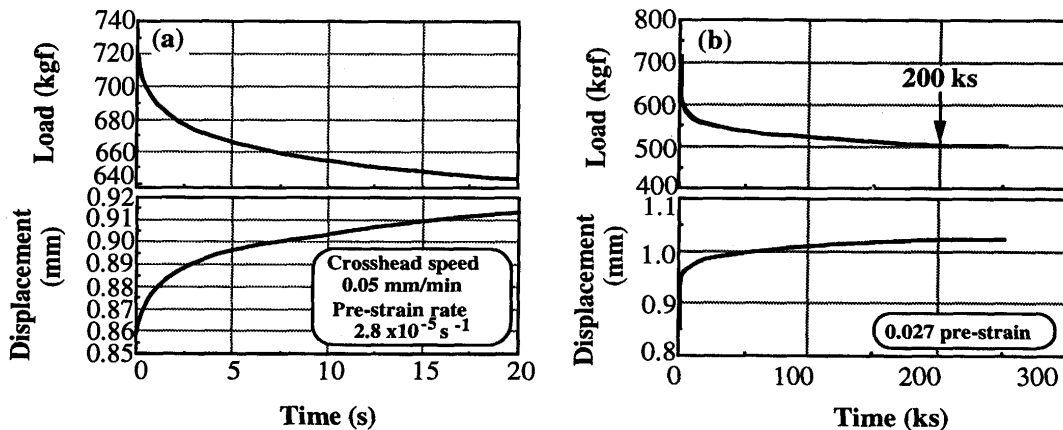


Fig. 3. Load-time curve and displacement-time curve of a crosshead displacement dwell test. (a) short period scale; (b) long period scale.

止試験を行った。なお、試験中の温度は、 $293 \pm 2 \text{K}$ に保持された。

3. 結果

3.1 応力緩和中の荷重および伸び計変位の時間変化と荷重低下量

Fig. 3は、クロスヘッド速度0.5mm/minの引張試験の途中、公称予ひずみ0.027のところまでクロスヘッドを停止させた場合の荷重と停止時間の関係ならびに伸び計変位と停止時間の関係を示したものである。クロスヘッド停止直後、荷重は急速に低下し、数秒後から荷重の低下が緩やかになる。一方、伸び計変位は、荷重の低下に対応して、クロスヘッド停止直後、急速に増加し、数秒後から伸び計変位の増加は緩やかになるのがわかる。その後、荷重と伸び計変位はともに、約200ksで停止したものと判断された。以上のように本試験材は、応力緩和現象を示し、この試験条件での荷重の低下が停止するまでの初期荷重からの荷重低下量は、約220kg(公称応力で224MPa)であった。

3.2 応力緩和中の公称応力と公称塑性ひずみの関係

3.1項に示されたように荷重の時間変化と伸び計変位の時間変化は対応する。そこで、最初にクロスヘッド停止試験における応力緩和中の公称応力と公称塑性ひずみの関係を調べた。

クロスヘッド変位制御試験におけるクロスヘッド変位は、塑性変位成分と弾性変位成分からなる。塑性変位成分は、試験片の塑性変位そのものである。一方、弾性変位成分は、機械の弾性変位と試験片の弾性変位からなる。機械の弾性変位は、主にプルロッドの伸縮によるものと考えられる。

すなわち、クロスヘッド変位Lは、以下のように表される。

$$L = C \cdot P + \delta \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、Cは試験機と試験片の剛性を組み合わせたコンプライアンス、Pは荷重、 δ はクロスヘッド変位の塑性成分である。

したがって、公称応力 $\sigma_{eng.}$ は以下のように表される。

$$\sigma_{eng.} = P/A_0 \\ = \{(L-\delta)/C\}/A_0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A_0 は試験片の初期断面積である。

一方、公称ひずみ $\varepsilon_{eng.}$ は以下のように表される。

$$\varepsilon_{eng.} = \delta/l_0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 l_0 は試験片の標点間距離である。

(2)および(3)式より、公称応力と公称ひずみの関係として下式が導き出される。

$$\sigma_{eng.} = -M\varepsilon_{eng.} + ML/l_0 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $M = l_0/(CA_0)$ (=一定)である。

クロスヘッド停止試験においては、クロスヘッド変位 L が一定に保持されるので、(4)式右辺の第2項の ML/l_0 は、定数となる。したがって、クロスヘッド停止試験中の公称応力と公称ひずみの関係は下式となる。

$$\sigma_{eng.} = -M\varepsilon_{eng.} + K \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $K = ML/l_0$ (=一定)である。

以上のように、公称応力と公称ひずみは直線的に変化することが予想される。また、この場合(5)式の導出において、クロスヘッド変位量を特定する必要はないので、この関係がクロスヘッド停止に対応する公称ひずみによらず成立すると考えられる。

Fig. 4は、クロスヘッド速度0.05mm/minの引張試験の途中、各公称予ひずみ(ここでは、0.02と0.04のみを示す)でクロスヘッド停止試験を行った時の公称応力と公称ひずみの関係である。図に示されているように、応力緩和中の公称応力と公称ひずみの関係は予想されたように直線であり、また、各直線は平行で、その傾き((5)式における M)がひずみによらず一定となった。そこで、 M を求めたところ、 $M = 2.33 \times 10^4$ MPaであった。

ところで、応力緩和中の公称ひずみの変化量は微小であ

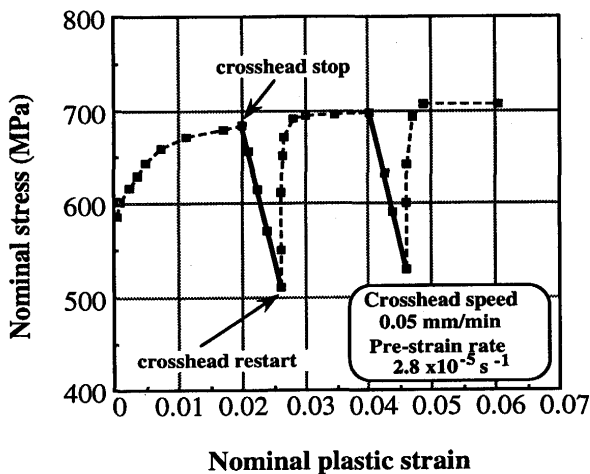


Fig. 4. Nominal stress - nominal strain curve of the cyclical crosshead displacement dwell (CCDD) test at the initial crosshead speed of 0.05 mm/min.

り、 $\Delta\sigma_{eng.} \doteq \Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon_{eng.} \doteq \Delta\varepsilon$ とすることができる。そこで、以後は応力緩和挙動を(真)応力と(真)塑性ひずみで取り扱うことにする。

3.3 応力緩和挙動に及ぼす予ひずみおよび予ひずみ速度の影響

3.1項に示したように、応力緩和中の荷重は、停止時間の極初期(<200s)を除いて、緩やかに低下する。そこで、応力と停止時間の対数の関係をFig. 5にプロットした。この図は、クロスヘッド速度0.05mm/minの引張の途中、予ひずみ0.02、0.04、0.06および0.08でクロスヘッド停止試験を行った結果である。予ひずみ0.04と0.06の場合は、図の煩雑さを避けるために、約200sでプロットを打ち切っている。この図に示されているように停止時間の極初期を除いて、応力 σ は停止時間の対数に対して直線的に減少し、この領域においてはそれぞれの予ひずみに対して下式のように表される。

$$\sigma = -A \ln t + B \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 A 、 B は常数、 t は停止時間である。予ひずみの増大に対して A は一定であり、 B のみが変化している。なお、200ks以降は、この直線関係からはずれ、応力の低下は停止したものと同判断された。

一方、ここでは具体的には示さないが、ひずみは(5)式と(6)式から導かれる下式に従って変化している。

$$\varepsilon = A' \ln t - B' \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $A' = A/M$ 、 $B' = (B-K)/M$ はそれぞれ定数である。

さて、応力緩和中の応力とひずみは、クロスヘッド停止試験の開始応力、予ひずみおよび停止時間 t における応力低下量とひずみ増加量に分けて考えることができる。すなわち、停止時間 t における応力 σ_t とひずみ ε_t は、それぞれ下式で表される。

$$\sigma_t = \sigma_{t_0} - \Delta\sigma \dots \dots \dots (8)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t_0} + \Delta\varepsilon \dots \dots \dots (9)$$

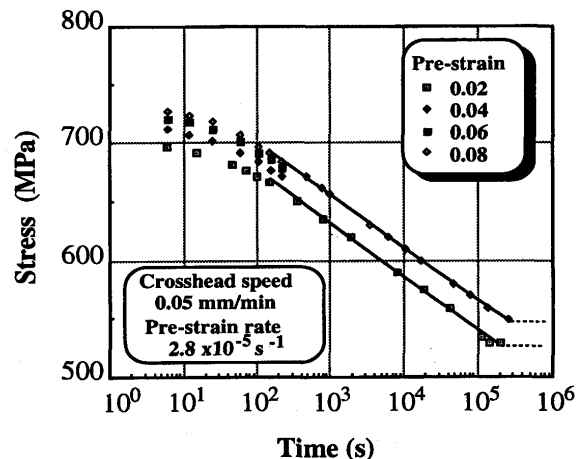


Fig. 5. Relationship between stress and log time during the CCDD test at various strains.

ここで、 σ_{t_0} および ϵ_{t_0} は、停止時間0sにおける開始応力と予ひずみ、 $\Delta\sigma_t$ および $\Delta\epsilon_t$ は、停止時間tにおける応力低下量とひずみ増加量である。

Fig. 6は、開始応力から停止時間tのときの応力を差し引いて求めた応力低下量と停止時間の関係を各予ひずみについて示したものである。この整理の結果より、応力低下量と停止時間の関係は予ひずみに依存しないことがわかる。

応力低下量と停止時間の関係を直線回帰により求めたところ、下式となった。

$$\Delta\sigma_t = 19.6 \ln t - 63.4 \dots\dots\dots (10)$$

このように、応力低下量は予ひずみに依存せず、停止時間のみの関数として表される。

また、(10)式より下式が導出される。

$$d\sigma/dt = -d\Delta\sigma/dt = -19.6/t \dots\dots\dots (11)$$

したがって、応力緩和中の応力低下速度も予ひずみに依存しないと考えられる。

実際に、荷重-時間チャートの曲線の接線から応力低下速度(絶対値)の実測値と停止時間の関係を求め、両対数でプロットしたものがFig. 7である。Fig. 7の停止時間の極初期を除いたデータを用いて、応力低下速度の絶対値の対数と停止時間の関係を直線回帰により求めたところ、下式が得られ、(11)式が成立することが確かめられた。

$$d\sigma/dt = -d\Delta\sigma/dt = -18.5/t \dots\dots\dots (12)$$

ただし、(12)式の係数は、18.5であり(11)式の19.6に極めて近いが、正確には一致しない。これは、(12)式で求めた場合の方が測定誤差が大きくなるためと考えられるので、以後は(11)式の19.6の値を採用することにする。

このようにクロスヘッド速度一定(前報¹³⁾で示したように、クロスヘッド速度一定の試験であっても試験開始からひずみが0.02に達すると以降のひずみ速度はほぼ一定となる)で引張変形した後の応力緩和では、応力低下速度は予ひずみ

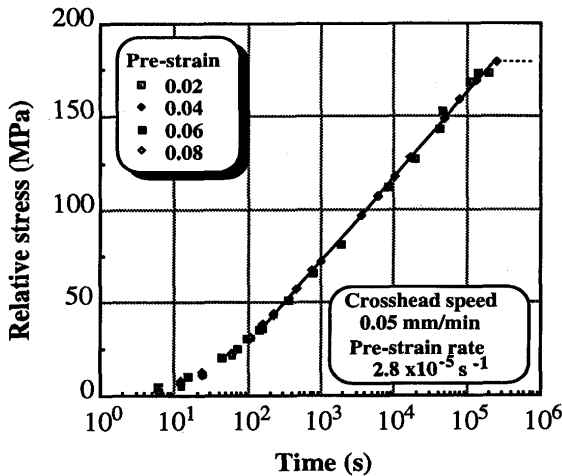


Fig. 6. Relationship between relative stress and log time. Relative stresses were obtained by subtracting residual stress from initial stress when crosshead was stopped.

によらず、一定の時間依存性を示すことがわかる。

次に、種々の予ひずみ速度で、ある予ひずみまで変化させた場合の応力低下速度と停止時間の関係を調べた。

Fig. 8は、各予ひずみ速度で、予ひずみ0.04まで変形し、クロスヘッド停止試験をしたときの応力低下速度の絶対値と停止時間の関係である。停止時間の極初期を除いて、応力低下速度は予ひずみ速度に依存せず、同一の時間依存性を示した。なお、いずれの予ひずみ速度の場合にも、200ks以降は応力低下は停止したものと判断された。

Fig. 8のデータを停止時間の極初期を除いて直線回帰したところ、(12)式と全く同一の結果が得られた。

したがって、応力低下速度と停止時間の関係は予ひずみ速度にも依存しないことがわかった。

以上をまとめると、クロスヘッド変位一定の応力緩和においては、応力とひずみは常に同一の傾きをもつ直線関係に従って変化し、それぞれの停止時間による相対変化は、

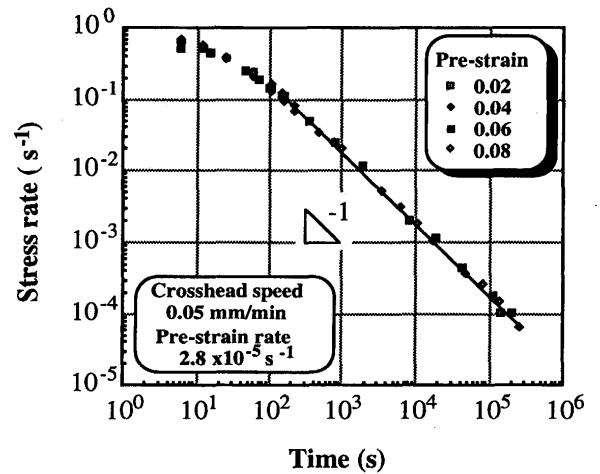


Fig. 7. Relationship between log stress rate and log time during the CCDD test at various strains.

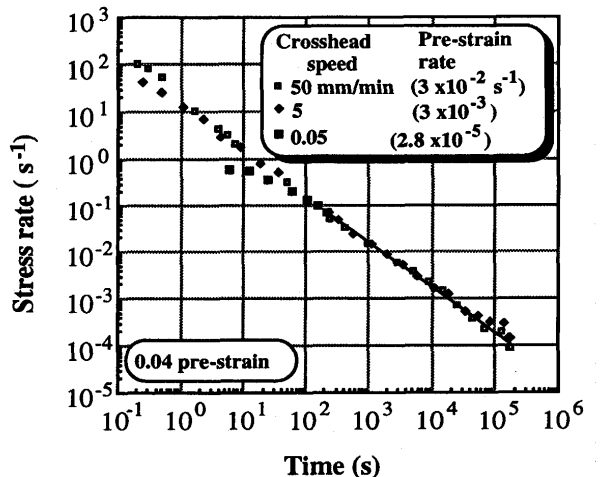


Fig. 8. Relationship between log stress rate and log time during the CCDD test at various crosshead speeds.

予ひずみによらない。また、応力低下速度は、引張変形の予ひずみ速度、予ひずみによらず、停止時間のみに依存することが明らかとなった。

4. 考察

4.1 等時間応力緩和による応力-ひずみ曲線の推定

チタン合金は、常温域以下の温度においてもクリープ(低温クリープ)が観察されている^{11,12)}。低温クリープ試験を長時間行うとクリープ変形は停止してクリープひずみは停留する。複数の応力レベルの低温クリープで得られた各停留点を結ぶ応力-ひずみ曲線は、引張試験で得られる応力-ひずみ曲線と曲線形状が同一(応力軸方向に平行移動)であることが報告されている¹¹⁾。

一方、著者らは任意の予ひずみ速度において複数の予ひずみから求めた停留点を結ぶ応力-ひずみ曲線も引張試験で得られる応力-ひずみ曲線と曲線形状が同一(応力軸方向に平行移動)であることを報告した¹³⁾。さらに、異なる予ひずみ速度によって、応力緩和開始応力レベルを変化させても、応力緩和停留点は、すべて前者の(Base曲線と付けた)曲線上にまとまる¹³⁾。

これらの停留曲線より下側では、それ以上の塑性流動(塑性変形)が生じ得ないという点から、停留点を結ぶこれらの応力-ひずみ曲線は、変形の経路によらず同一の曲線となる可能性がある。

また、ある短時間の等時間応力緩和試験で得られた応力-ひずみ曲線も引張試験の応力-ひずみ曲線と曲線形状が同一であることが報告されている¹¹⁾。そこで、本実験結果に基づいて、等時間の応力緩和による応力-ひずみ曲線について詳細に検討してみた。ここでは、予ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (クロスヘッド速度 0.05 mm/min)における応力緩和の場合について述べる。

応力緩和中の応力と停止時間の関係は、(8)式と(10)式より下式となる。

$$\sigma = \sigma_0 - (19.6 \ln t - 63.4) \dots\dots\dots (13)$$

一方、応力緩和中のひずみ増加量と応力低下量の関係は、 $\Delta \epsilon_t = \Delta \sigma_t / M$ であるので、(10)式より下式となる。

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \sigma_t / M = 8.4 \times 10^{-4} \ln t - 2.7 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $\Delta \epsilon_t$ は停止時間 t sにおけるひずみ増加量である。したがって、予ひずみと停止時間の関係は、(9)式と(14)式より下式となる。

$$\epsilon = \epsilon_{t0} + (8.4 \times 10^{-4} \ln t - 2.7 \times 10^{-3}) \dots\dots\dots (15)$$

ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (クロスヘッド速度 0.05 mm/min)の引張変形からの等時間応力緩和における応力-ひずみ曲線(予ひずみ 0.02 から 0.1 の範囲に相当)を(13)式および(15)式より求めて示したものがFig. 9である。計算に使った停止時間はそれぞれ 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 sである。また、各停止時間におけるひずみ増加速度も()内に併記してある。さらに、

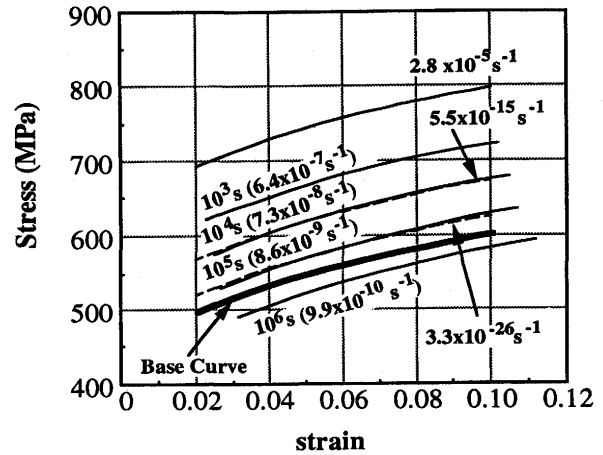


Fig. 9. Stress-strain curves (solid lines; from relaxation, broken lines; from proposed equation in the previous work¹¹⁾, solid line; Base Curve).

比較のために、停止時間 10^4 sおよび 10^5 sの等時間応力緩和の曲線になるべく近似するように、前報¹³⁾で提案した推定式によって一定ひずみ速度における応力-ひずみ曲線を求め、破線で示してある。

このように、等時間の応力緩和における応力-ひずみ曲線は、いずれも一定ひずみ速度の曲線およびBase曲線と同一の曲線形状を示し、それと等価な一定ひずみ速度の曲線を求めることができる。

以上では、等時間の応力緩和によって一定ひずみ速度による応力-ひずみ曲線と等価な曲線を再現することができるという興味深い事実を実験結果に基づいて説明できた。ところが、(13)式、(15)式に基づいてそのまま外挿すると、停止時間 10^6 sの曲線が示すように停留曲線(Base曲線)を下回ってしまう(約 2×10^6 sの停止時間曲線が、Base曲線に一致している)。また、等価な曲線どうしにおける一定ひずみ速度とひずみ増加速度(一定)は全く一致しないことから、この等価性の原因の説明は現状では困難である。

いずれにせよ、理由は未解明であるが、著者らによる前回の研究¹³⁾と今回の結果から、任意の一定ひずみ速度もしくはある一定ひずみ速度からの一定停止時間を選べば、Base曲線より上側にそれを応力軸方向にほぼ平行移動した応力-ひずみ曲線を任意に描くことができることになる。

応力緩和の時間依存性の関数は、対数クリープの形式と同一であるので等時間クリープ後の応力-ひずみ曲線も同じ形状の曲線を再現できる可能性がある。今後これらの点についてさらに検討する必要がある。

4.2 応力緩和停止について

塑性流動は、内部応力を越えて材料に与えられた応力、すなわち、外力から内部応力を差し引いた塑性流動成分($\sigma_a - \sigma_i$, ここで、 σ_a は外力、 σ_i は内部応力である)によって生じると考えられる。そこで、この考えに基づいて、長時間のクロスヘッド停止試験において、変形が停止して応力が停

留する理由について考察する。

クロスヘッド停止試験における応力緩和挙動は、リラクゼーション($\epsilon = \text{一定}$)と低温クリープ($\sigma_a = \text{一定}$)が混合したものと考えることができる。そこで、まず、それぞれの場合の長時間変形挙動について考えることにする。

低温クリープ($\sigma_a = \text{一定}$)変形では、塑性流動成分により、転位が増殖する。さらにそれらの上昇運動等によって転位組織構造も変化し、これらによって σ_f が増大する(加工硬化)。したがって、ひずみの増大と共に塑性流動成分が減少し、終には σ_a と σ_f が釣り合い、塑性流動成分はなくなり変形は停止する。

一方、常温におけるリラクゼーション($\epsilon = \text{一定}$)においては、運動転位の減速に伴い塑性流動成分が減少し、運動転位が停止した時点で、 σ_a と σ_f が釣り合うとされている¹⁰⁾。

いずれの場合にも、時間とともに塑性流動成分が減少して、外部応力が内部応力と釣り合う($\sigma_a = \sigma_f$)時に応力の低下が停止すると考えられる。

クロスヘッド停止試験では両者が組み合わさり、応力とひずみの変化は(5)式に従って起こるが、いずれ塑性流動成分がゼロになり応力低下が停止する。

ここで、特に指摘したい点は、従来の低温クリープやリラクゼーションの議論において、予ひずみや開始応力までの変形経過を充分考慮してこなかったことである。

例えば、停留点の集合であり外力と内部応力の釣り合い点を示していると考えられるBase曲線の上下の応力レベルにおいて、任意のひずみにおいて、それに対応する外力を保持することを考える。まず、そのひずみまでは、Base曲線よりも高い外力(有限のひずみ速度)で変形しなければならない。保持しようとする外力がBase曲線よりも高い場合には、そのひずみで外力を保持することはできず、応力緩和が生じて内部応力と釣り合うBase曲線まで、外力は低下する。一方、保持しようとする外力がBase曲線よりも下の場合は、保持しようとする外力に対応するひずみまで、Base曲線より上の応力-ひずみ空間を通過して塑性変形させ、その後弾性除荷する過程以外には、その外力とひずみに到達できない。この場合は、外力は内部応力と釣り合って保持することができる。

すなわち、塑性流動もしくは塑性変形は、塑性流動成分を正に保つことによって初めて、しかも「動的」に行うことができ、逆に「静的」な塑性変形を、連続的な実現象としてとらえることはできないということである。

5. 結言

クロスヘッド停止試験によって、near α 型のTi-Fe-O合金の常温における応力緩和挙動を調査し、以下のことが明らか

かになった。

(1) 引張試験の途中でクロスヘッドと停止すると、クロスヘッド停止直後、荷重は急速に低下し、数秒後から荷重の低下が緩やかになった。一方、伸び計変位は、荷重の低下に対応して、クロスヘッド停止直後に急速に増加し、数秒後から伸び計変位の増加は緩やかになった。その後、荷重と伸び計変位はともに約200ksで停止したものと判断された。

(2) 応力緩和中の公称応力と公称塑性ひずみの関係は、下式で表される。

$$\sigma_{\text{eng.}} = -M\epsilon_{\text{eng.}} + K$$

ここで、 $\sigma_{\text{eng.}}$ は公称応力、 $\epsilon_{\text{eng.}}$ は公称塑性ひずみ、M、Kは常数である。

(3) クロスヘッド速度一定の引張変形からの応力緩和では、クロスヘッド停止時間の極初期を除いて、応力低下量は初期塑性ひずみによらず、停止時間のみの関数として表される。クロスヘッド速度0.05mm/minの場合は下式であった。

$$\Delta\sigma = 19.6 \ln t - 63.4$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は停止時間tにおける応力低下量である。また、応力緩和中の応力低下速度も塑性予ひずみに依存せず、下式であった。

$$d\sigma/dt = -d\Delta\sigma/dt = -19.6/t$$

ここで、 $d\sigma/dt$ は応力低下速度である。

(4) クロスヘッド速度を変化させた場合も、クロスヘッド停止時間の極初期を除いて、応力低下速度はクロスヘッド速度に依存せず、(3)と同一の時間依存性を示した。

(5) 任意の等時間の応力緩和における応力-ひずみ曲線は、いずれも引張試験で得られる応力-ひずみ曲線およびBase曲線と同一の曲線形状を示した。

文 献

- 1) I.A.Oding, V.S.Ivanova, V.V.Burdukskii and V.N.Geminov: Creep and Stress Relaxation in Metals, ed. by I.A.Oding, Oliver and Boyd, Edinburgh; London, (1965).
- 2) Stress Relaxation Testing, ed. by A.Fox, ASTM, STP676, (1978).
- 3) 篠田哲守, 佐々木良一: 材料, **18** (1969), 240.
- 4) 篠田哲守, 佐々木良一: 材料, **19** (1970), 234.
- 5) 田中千秋: 材料, **24** (1975), 247.
- 6) 田中千秋, 大場敏夫, 群宗幸: 材料, **26** (1977), 221.
- 7) 田中千秋, 大場敏夫: 材料, **32** (1983), 620.
- 8) G.A.Sargent: Acta Met, **13** (1965), 663.
- 9) P.P.Tung and A.W.Sommer: Met.Trans., **1** (1970), 947.
- 10) I.Gupta and J.C.M.Li: Met.Trans., **1** (1970), 2323.
- 11) G.Shatil, M.Phoplunker, D.J.Smith and J.Galsworthy: Proc. of the 8th World Conf. on Titanium '95 Science and Technology, ed. by P.A.Blenkinsop, W.J.Evans and H.M.Flower, (1996), 1011.
- 12) A.W.Thompson and B.C.Odegard: Met.Trans., **4** (1973), 899.
- 13) 守谷英明, 長井寿, 河部義邦, 岡田厚正: 鉄と鋼, **82** (1996), 876.
- 14) JIS Z 2276, 金属材料の引張リラクゼーション試験方法, 日本工業規格, (1975).