

115 変動荷重を受ける TiNi 形状記憶合金のサブループ変形特性

Subloop Deformation of TiNi Shape Memory Alloy Subjected to Variable Loading

正 戸伏 壽昭 (愛知工大)

○ 学 井川 毅信 (愛知工大)

H. TOBUSHI and T. IKAWA, Aichi Institute of Technology, Yagusa-cho, Toyota, Aichi

Key words: Shape Memory Alloy, Titanium-Nickel Alloy, Superelasticity, Strain Rate, Stress Control, Subloop, Stress relaxation

1. 緒 言

形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下 SMA) では約 6% のひずみが加熱により回復する形状記憶効果 (shape memory effect, 以下 SME) と除荷により回復する超弾性 (superelasticity, 以下 SE) が現れる。いずれの場合にも負荷過程において応力誘起マルテンサイト変態 (stress-induced martensitic transformation, 以下 SIMT) によりひずみが生じ、加熱または除荷で生じる逆変態によりひずみは消滅する。

SMA の SIMT で現れる回復応力および回復ひずみはアクチュエータやロボットなどの駆動素子に应用される。このような SMA の応用においては、その変形特性が重要となる。SIMT の変形特性は温度および変形速度に依存して異なった特性を示す。変形速度を規定する基本的な方法にひずみ制御と応力制御とがあり、両者で異なった変形特性を示すことが最近報告された。これまで、ひずみ制御で規定される場合の変形特性は多く研究されているが、応力制御による研究はほとんど行われていない。応力制御でサブループ負荷を受けた場合、再負荷で SIMT の開始応力は除荷開始応力と一致しない。SIMT の途中においてひずみ変動がある場合、SIMT に伴い熱・力学的変化が起こる。このため力学的な条件だけでは SIMT に伴う変形の進展は規定できない。さらに、SMA 駆動素子は繰返し作動するので、SMA の繰返し変形特性は特に重要である。

本研究においては、TiNi SMA についてひずみ制御および応力制御での単軸引張試験を行い、速度依存性およびサブループのひずみ変動を受ける場合の変形挙動を調べる。応力制御とひずみ制御での変形挙動の違いを考察する。

2. 実験方法

供試材は、古河電気工業 (株) 製の Ti-55.4wt%Ni SMA 線材であり、直径は 0.75mm であった。この線材を 673K で 1 時間保持し、炉冷することによって直線形状を記憶させる形状記憶熱処理を行い、試験片とした。試験片の逆変態終了温度 A_f は、約 323K であった。

実験としては単軸引張りで以下の 3 種類の負荷・除荷試験を行った。

実験 I : フルループでの負荷・除荷

実験 II : サブループにおいてひずみを一定に保つ

実験 III : 一定応力速度でのサブループ

3. 実験結果および考察

3.1 ひずみ制御と応力制御での変形特性

フルループでの実験 I により得られた応力-ひずみ曲線を図 1 に示す。ひずみ制御および応力制御で、負荷過程の初期で弾性変形が現れ、点 M_s から応力誘起 M 変態が開始し、母相から M 相へ変態する。点 M_F で M 変態は終了する。除荷過程では初期で M 相の弾性変形が現れ、点 A_s から点 A_F の間で逆変態が起こり M 相から母相へ変態する。ひずみ制御では、ひずみ速度が低い場合には点 M_s でオーバーシュートおよび点 A_s でアンダーシュートが現れる。オーバーシュートは M 相と母相の界面が移動する水平段の応力より高い応力が M 相の核形成に必要なために現れる。アンダーシュートは母相の核形成に必要な応力が、逆変態応力レベルより低くなるために現れる。一方、ひずみ速度が高くなるとオーバーシュートおよびアンダーシュートが現れない。速度が高くなると、変態の進展は M 相と母相の界面が移動するのではなく試験片全体で起こる。また、M 変態は発熱変態であり、逆変態は吸熱変態である。そのため速度が高いと M 変態中に試料内部の温度が上昇し変態応力が増加する。応力制御では、M 変態域で応力は減少しないので、変態は試験片全体で均質に起こり、ひずみ速度が高い場合と同様の挙動を示す。

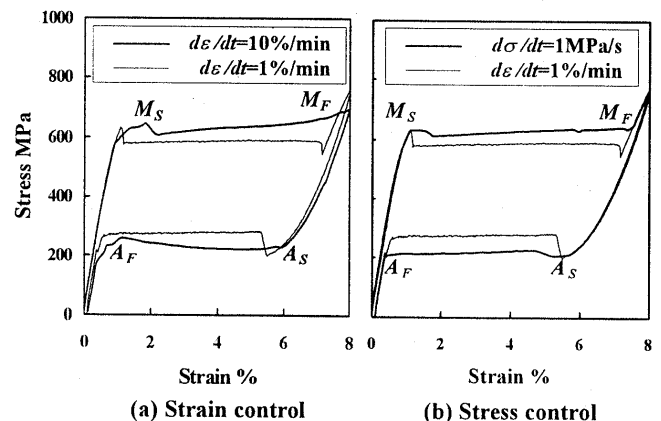


Fig. 1 Stress-strain curves at 353K

3.2 サブルーブの一定ひずみ下での変形挙動

サブローブの途中でひずみを一定に保つ実験Ⅱで得られた応力-ひずみ曲線を図2に示す。点 A_i から点 B_i の間と点 C_i から点 D_i の間ではひずみを一定に保った。

図2からわかるように、一定ひずみ下での点 A_i から点 B_i 間で応力が減少し、点 C_i から点 D_i 間で応力は増加する。

負荷過程のSIMTでは温度が上昇する。点 A_i でひずみを一定に保つと、上昇した温度は試験温度まで低下する。このために応力は減少してSIMTが進展する。結果として応力緩和が現れる。除荷過程の逆変態では温度が低下する。点 C_i でひずみを一定に保つと、低下した温度は試験温度まで上昇する。このために応力は増加してSIMTが進展する。結果として、応力緩和の逆の現象が現れる。

一定ひずみ下の $A_i \rightarrow B_i$ および $C_i \rightarrow D_i$ の間で応力が減少および増加する挙動を考慮するために応力-温度相図におけるM変態および逆変態の進展状況を図3に示す。図3からわかるように、一定応力において温度が減少するときにM変態は進展し、温度が上昇するときに逆変態は進展する。上述のように一定ひずみ下において応力が減少・増加する現象は粘弾性材料の応力緩和に類似する。

3.3 応力制御でのサブローブ変形挙動

応力速度一定のサブローブ実験Ⅲで得られた応力-ひずみ曲線を図4に示す。図中の点 A_i から点 D_i は除荷過程、点 D_i から点 A_{i+1} は再負荷の過程を示す。図4からわかるように、M変態は点 M_S から開始し除荷開始点 A_i が過ぎ除荷に入っても点 B_i まで進展している。逆変態は点 C_i から開始し、点 D_i で負荷過程に変わっても点 E_i まで逆変態は進展する。再負荷の場合、M変態開始点 F_i および F_2 の応力レベルはほぼ同じである。これは変態進展に必要な応力であり、ひずみ速度が低い場合のM変態応力レベルと等しくなる。 M_S から点 A_i 、点 F_i から点 A_2 および点 F_2 から点 M_F 間の負荷過程のM変態は発熱変態のため試料内部の温度が上昇する。点 A_i から点 B_i 間では負荷過程のM変態で上昇した温度が試験温度に戻るのて試料の温度は降下する。その温度降下によってM変態は点 B_i まで進展する。また、点 C_i から点 D_i および点 A_S から点 A_F 間の除荷過程の逆変態では吸熱変態のため試料内部の温度が降下する。点 D_i から再負荷した場合、除荷過程の逆変態で降下した温度が試験温度に戻るのて試料の温度は上昇し、変態は点 E_i まで進展する。

4. 結言

TiNi SMAのサブローブ挙動を調べた結果を得た。

- (1) ひずみ速度の高い場合と応力制御での応力-ひずみ曲線ではオーバーシュートとアンダーシュートが現れず、類似の挙動を示す。
- (2) サブルーブで一定ひずみに保つ場合、負荷過程では温度が減少することにより応力は減少し、除荷過程では温度が上昇することにより応力は増加する。

- (3) サブルーブ挙動に関して、変態の進展条件を満たすように除荷過程で温度が低くなるとM変態が進展し、同様に再負荷過程で温度が高くなると逆変態が進展する。

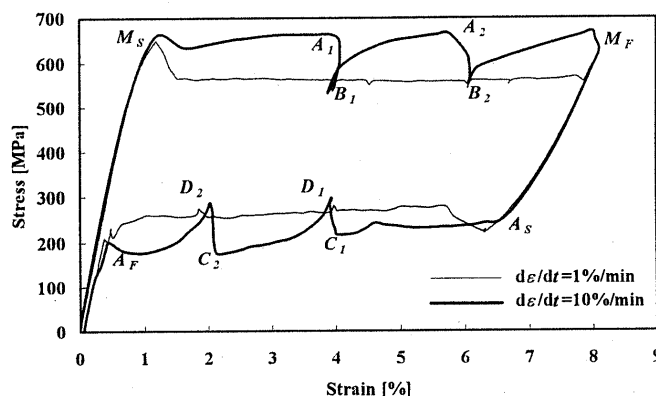


Fig.2 Stress-strain curves

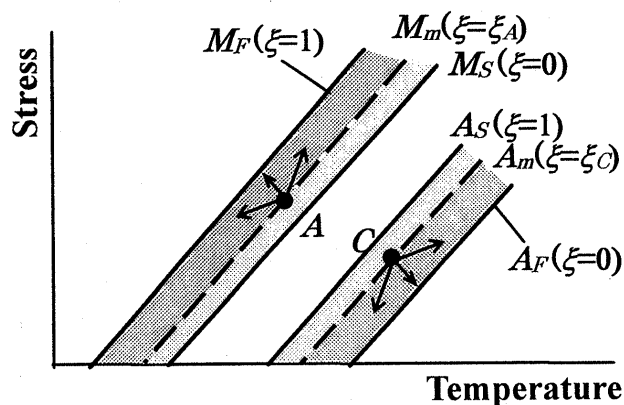


Fig.3 Condition for progress of phase transformation during subloop loadings

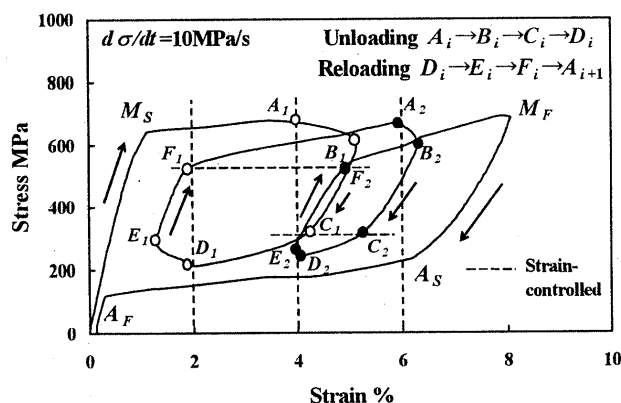


Fig.4 Stress-strain curves under constant stress rate