

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	Kohei Takeda
氏名	武田 亘平
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第46号
学位授与	平成26年2月27日
学位授与条件	学位規定第3条第3項該当
論文題目	TiNi形状記憶合金のサブループ負荷における変形特性および窒素イオン注入による疲労特性の向上 (Deformation Properties in Subloop Loadings and Improvement in Fatigue Properties by Nitrogen Ion Implantation of TiNi Memory Alloy)
論文審査委員	(主査) 教授 戸伏壽昭 ¹ (審査委員) 教授 松室昭仁 ¹ , 教授 高木誠 ¹ , 教授 谷本隆一 ¹ , 講師 松井良介 ¹

論文内容の要旨

TiNi形状記憶合金のサブループ負荷における変形特性および窒素イオン注入による疲労特性の向上

(Deformation Properties in Subloop Loadings and Improvement in Fatigue Properties by Nitrogen Ion Implantation of TiNi Memory Alloy)

本研究ではインテリジェント材料として応用が期待されているTiNi形状記憶合金 (shape memory alloy, 以下SMA) について, 実用において重要であるサブループ負荷における超弾性変形特性, 変態誘起クリープとクリープ回復特性, 変態誘起応力緩和と応力回復特性および窒素イオン注入が変形特性と曲げ疲労特性に与える影響について解明した. 超弾性変形, 変態誘起クリープとクリープ回復および変態誘起応力緩和と応力回復については試験片表面に現れる変態帯および試験片表面の温度の局所的な変化に基づきその変形特性を解明した. 窒素イオン注入が変形特性と曲げ疲労特性に与える影響については, 引張変形特性と両振り平面曲げ疲労特性および疲労破断面の観察に基づきイオン注入量と疲労寿命の関係を明らかにした.

第1章では, SMAの特徴や応用例, 従来の研究について述べ, SMAの実用において重要なサブループ変形特性および疲労特性について説明した.

第2章では, SMAの応力-ひずみ-温度関係を示し, 形状記憶効果と超弾性特性を説明した. また, 応力-ひず

み-温度の関係を表す構成式を示し, 変態の進展条件について説明した. さらにサブループ負荷のひずみ制御および応力制御における変形特性について説明した.

第3章では, 試験片と実験装置について説明した.

第4章では, TiNi SMA薄板材の引張試験により種々のサブループにおける超弾性変形の特性をサーモグラフィによる局所的な温度変化とマイクロスコプによるマルテンサイト (martensite, 以下M) 変態帯の表面観察に基づいて調べた. 本章で示した主な結果は次の通りである. (1) 応力速度が低い場合, 上部応力水平段からの除荷の初期においてはM変態帯の進展によりひずみが増加する. (2) 応力速度一定でひずみ2%まで負荷し, 上部応力水平段におけるこの時の応力を一定に保持するとM変態帯の進展によりクリープひずみが生じる. 一定応力下で生じるクリープひずみ速度はほぼ一定である. この場合のM相の体積分率はひずみの増加に比例して増加する. (3) 応力水平段からの負荷・除荷でひずみ変動する場合, 再負荷の応力-ひずみ曲線で回帰点記憶が現れる. M変態帯の拡大と縮小は, 先行する過程において現れている変態帯の境界が起点となって進展する. (4) 変態帯境界の引張軸との傾き角は標点間のアスペクト比が5の場合には33°であり, アスペクト比が10の場合には試験片中心部では42°であり, つかみ部近傍では37°である.

第5章では, 応力制御サブループ負荷における変態誘起クリープおよびクリープ回復特性をマイクロスコプおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の局所的な変化に基づき検討した. また, 応

力保持開始ひずみが応力保持過程におけるひずみ速度に与える影響を調べた。本章で示した主な結果は次の通りである。(1) 応力速度一定で上部または下部応力水平段の応力保持開始ひずみまで負荷または除荷しその応力を保持すると、変態の進展によりクリープまたはクリープ回復が現れる。応力保持過程において変態ひずみが大きいほど変態による発熱または吸熱反応による温度変化が大きくなり、応力保持過程におけるひずみ速度は高くなる。(2) クリープ速度およびクリープ回復速度と各変態ひずみの関係は、ほぼ比例関係となる。(3) 外部からの加熱冷却ではなく負荷除荷による発熱吸熱の変態により一定応力下で変形が生じるため、SMA素子の設計においてはこれらの点を考慮することが重要である。

第6章では、応力制御サブグループ負荷における変態誘起応力緩和および応力回復の特性を、マイクロスコプおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の局所的変化に基づき検討した。また、種々の応力速度に関する応力緩和および応力回復の特性を調べた。本章で示した主な結果は次の通りである。(1) 負荷過程において、応力速度一定で負荷するとM変態開始点以降においては、ひずみ速度が高くなり、M変態の発熱反応による熱が周囲に逃げる時間がないため材料の温度は上昇し、その後ひずみを保持すると、周囲空気により冷却されるため材料の温度は降下してM変態が進展することにより、応力緩和が生じる。(2) 除荷過程において、応力速度一定で除荷すると、負荷過程と同様に、逆変態開始点以降において、逆変態の吸熱反応により材料の温度は降下し、その後ひずみを保持すると、周囲空気により加熱されるため材料の温度は上昇して逆変態が進展することにより、応力回復が生じる。(3) 応力緩和および応力回復はひずみ保持過程の初期に大きく現われ、その後応力は徐々に一定値に飽和する。(4) 応力制御のサブグループ負荷においてはひずみ速度が高くなり、SMAの雰囲気媒体の温度が一定であっても負荷除荷過程における変態に伴いSMAでは温度変化が生じ、一定ひずみ保持下で応力緩和および応力回復が現れるので、SMA素子の設計においてはこれらの点を考慮することが重要である。

第7章では、対向する2方向から窒素イオンを注入したTiNi SMAワイヤについて、イオン注入による引張変形と曲げ疲労特性に対する影響を検討した。本章で得られた結果は次の通りである。(1) イオン注入量が多くなると、変態温度は上昇し、上部および下部応力水平段の応力が低下し、イオン注入なしの超弾性に代わって形状記憶効果が現れる。(2) 大きな曲げひずみ振幅では疲労寿命は短くなる。ひずみ振幅が4%の場合、イオン注入の有無にかかわらず全てのワイヤの疲労寿命は、ほぼ同じになる。

ひずみ振幅が小さい場合、イオン注入量が多いほど、疲労寿命は長くなる。(3) 疲労き裂はSMAワイヤ表面で発生し、扇形の疲労き裂進展領域となるように中央に向けて進展する。小さなひずみ振幅の領域においてイオン注入量が多い場合、疲労き裂の発生位置は最大曲げひずみの位置と異なるため、結果として疲労寿命は長くなる。

第8章では、本研究で得られた成果を各章ごとに総括し、将来の展望の方向について簡潔に述べた。

論文審査結果の要旨

本研究ではインテリジェント材料として応用が期待されているTiNi SMAについて、実用において重要であるサブグループ負荷における超弾性変形特性、変態誘起クリープとクリープ回復特性、変態誘起応力緩和と応力回復特性および窒素イオン注入が変形特性と曲げ疲労特性に与える影響について解明している。

第1章では、SMAの特徴や応用例、従来の研究について述べ、SMAの実用において重要なサブグループ変形特性および疲労特性について説明している。

第2章では、SMAの応力-ひずみ-温度関係を示し、形状記憶効果と超弾性特性、変態の進展条件について説明し、さらにサブグループ負荷のひずみ制御および応力制御における変形特性について説明している。

第3章では、試験片と実験装置について説明している。

第4章では、TiNi SMA薄板材の引張試験により種々のサブグループにおける超弾性変形の特性を調べ、以下に示す点を明らかにしている。(1) 応力速度が低い場合、上部応力水平段からの除荷の初期においてはM変態帯の進展によりひずみが増加する。(2) 応力速度一定で上部応力水平段における一定のひずみまで負荷し、この時の応力を一定に保持するとM変態帯の進展によりクリープひずみが生じる。一定応力下で生じるクリープひずみ速度はほぼ一定である。この場合のM相の体積分率はひずみの増加に比例して大きくなる。(3) 低ひずみ速度による応力水平段からの負荷・除荷においてひずみが変動する場合、再負荷の応力-ひずみ曲線では回帰点記憶が現れる。(4) M変態帯の拡大と縮小は、先行する過程において現れている変態帯の境界が起点となって進展する。

第5章では、応力制御サブグループ負荷における変態誘起クリープおよびクリープ回復特性をマイクロスコプおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の局所的な変化に基づき検討し、さらに、応力保持開始ひずみが応力保持過程におけるひずみ速度に与える影響を調べ、以下に示す点を明らかにしている。

(1) 応力速度一定で上部または下部応力水平段の応力保

持開始ひずみまで負荷または除荷しその応力を保持すると、変態の進展によりクリープまたはクリープ回復が現れる。応力保持過程において変態ひずみが大きいほど変態による発熱または吸熱反応による温度変化が大きくなり、応力保持過程におけるひずみ速度は高くなる。(2) クリープ速度およびクリープ回復速度と各変態ひずみの関係は、ほぼ比例関係となる。(3) 外部からの加熱冷却ではなく負荷除荷による発熱吸熱の変態により一定応力下で変形が生じるため、SMA素子の設計においてはこれらの点を考慮することが重要である。

第6章では、応力制御サブグループ負荷における変態誘起応力緩和および応力回復の特性を、マイクロスコップおよびサーモグラフィにより観察した試験片表面の変態帯と温度分布の局所的変化に基づき検討し、さらに、種々の応力速度に関する応力緩和および応力回復の特性を調べ、以下に示す点を明らかにしている。(1) 負荷過程において、応力速度一定で負荷するとM変態開始点以降においては、ひずみ速度が高くなり、M変態の発熱反応による熱が周囲に逃げる時間がないため材料の温度は上昇し、その後ひずみを保持すると、周囲空気により冷却されるため材料の温度は降下してM変態が進展することにより、応力緩和が生じる。(2) 除荷過程において、応力速度一定で除荷すると、負荷過程と同様に、逆変態開始点以降において、逆変態の吸熱反応により材料の温度は降下し、その後ひずみを保持すると、周囲空気により加熱されるため材料の温度は上昇して逆変態が進展することにより、応力回復が生じる。(3) 応力緩和および応力回復はひずみ保持過程の初期に大きく現われ、その後応力は徐々に一定値に飽和する。(4) 応力制御のサブグループ負荷においてはひずみ速度が高くなり、SMAの雰囲気媒体の温度が一定であっても負荷除荷過程における変態に伴いSMAでは温度変化が生じ、一定ひずみ保持下で応力緩和および応力回復が現れるので、SMA素子の設計においてはこれらの点を考慮することが重要である。

第7章では、対向する2方向から窒素イオンを注入したTiNi SMAワイヤについて、イオン注入による引張変形と曲げ疲労特性に対する影響を検討し、以下に示す点を明らかにしている。(1) イオン注入量が多くなると、変態温度は上昇し、上部および下部応力水平段の応力が低下し、イオン注入なしの超弾性に代わって形状記憶効果が現れる。(2) 大きな曲げひずみ振幅では疲労寿命は短くなる。ひずみ振幅が4%の場合、イオン注入の有無にかかわらず全てのワイヤの疲労寿命は、ほぼ同じになる。ひずみ振幅が小さい場合、イオン注入量が多いほど、疲労寿命は長くなる。(3) 疲労き裂はSMAワイヤ表面で発生し、扇形の疲労き裂進展領域となるように中央に向かって進展する。小さなひずみ振幅の領域においてイオン注入

量が多い場合、疲労き裂の発生位置は最大曲げひずみの位置と異なるため、結果として疲労寿命は長くなる。

第8章では、本研究で得られた成果を各章ごとに総括し、将来の展望の方向について簡潔に述べている。

以上のように、本研究では形状記憶合金素子の設計において重要なサブグループ負荷における超弾性変形特性、変態誘起クリープとクリープ回復特性、変態誘起応力緩和と応力回復特性および窒素イオン注入による疲労特性の向上を明らかにしており、その工学的価値は高く、博士(工学)の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

(受理 平成26年3月 19日)