The Japan Society of Mechanical Engineers

115

TiNi 形状記憶合金線材の曲げ疲労特性

Bending Fatigue of TiNi Shape-Memory Alloy Wire

正　戸伏 壽昭（愛知工大）　　　学　遠藤 雅人（愛知工大）
准　奥村 佳代（アイコクアルファ）　○学　島田 大介（愛知工大）
H.TOBUSHI, M.ENDO and D.SHIMADA, Aichi Institute of Technology , Yagusa-cho , Toyota , Aichi
K.OKUMURA, Aikoku Alpha, Ltd., Morikami, Sobue-cho, Nakashima-gun, Aichi

Key Words: Shape-Memory Alloy , Fatigue , Titanium-Nickel Alloy , Martensitic Transformation , Frequency , Atmosphere Pulsating-Bending , Crack

1. 緒言

ロボットやエンジンの駆動素子として TiNi 形状記憶合金（Shape-memory alloy，以下SMA）を応用する場合、SMA 素子は一定の繰返し変形を受けることが多い。SMA も常用金属と同様に繰返し変形により疲労現象が現れる。疲労特性の研究としては、線材の回転曲げ疲労試験により破断するまでの繰返し数に対する曲げひずみ、試験温度および試験雰囲気の影響について実験的に調査、検討が行われてきた。本研究では実際に多く用いられている片振り曲げを考慮して、一定のひずみ振幅に関する片振り曲げ疲労試験の行える実験装置を製作した。その装置を使用しTiNi SMA 線材の片振り曲げ疲労試験を行い、その疲労特性を検討し、破面観察によりき裂の進展を考察した。

2. 実験方法

2.1 供試材　供試材は古河電気工業（株）製の Ti-55.4wt%Ni SMA で、直径 0.75mm の線材であった。これを直線形状に記憶させ使用した。形状記憶熱処理温度 673K で 1 時間保持した後、炉冷した。

2.2 実験装置　製作した片振り曲げ疲労試験装置を図1に示す。本装置ではSMA線材に曲げを与えるために線材の両端はチャック部で固定し、一方のチャック部が他方に近づくことにより線材に任意の曲率、すなわち曲げひずみを与えることができる。そして両端が離れることにより直線状態の形状に戻る。この運動を往復させることによって曲げを繰り返し与える。駆動部の動力にモーターを使用し、モーターの回転速度をクランク機構を用いて往復運動に変換する。破断するまでのモーターの回転数が疲労寿命となる。モーターの繰返し速度は回転制御装置で調整し、反射式タコメーターで測定した。最大曲げひずみは試験片の形状を予め紙に写し、破断箇所の曲率から算出した。

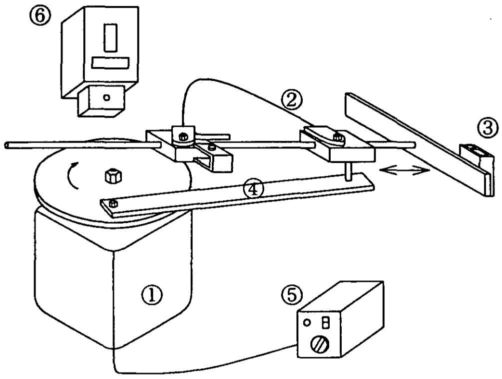
破面観察には走査型電子顕微鏡（Scanning Electric Microscope：以下SEM）を用いた。

2.3 実験手順　まず疲労試験では空気中の一定温度で片振り曲げの疲労試験を行った。ひずみ振幅は線材表面の最大曲げひずみにより規定した。繰返し速度 f は 300cpm と 500cpm の2種類とした。

次に破断した線材について破面観察を行った。観察は各試料の破断面に対し垂直な方向から 100 倍での全体写真を撮影した。さらに、破面の形態を詳しく観察するために 350 倍の局部写真を撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 線材の疲労特性　試験温度 T =303K における空気中での片振り曲げ疲労試験におけるひずみ振幅 ε_a ― 破断繰返し数 N_f の関係を図2に示す。図2より ε_a が大きいほど疲労寿命 N_f は短くなる。この理由としては、ひずみ振幅が大きくなるにつれて応力が増加するためである。応力の増加は疲労寿命の低下を招くために、ひずみ振幅が大きくなると疲労寿命は低下する。また ε_a が小さい範囲で ε_a ― N_f 関係には明瞭な折れ曲がり点が現れ、曲線は水平に近づく。この疲労限はひずみ振幅が 0.5～0.8%で現れる。この範囲の ε_a はR相変態域のひずみである。したがって、R相変態域における疲労特性は非常に良好である。これはR相変



① Motor
② SMA wire
③ Counter for number of cycles to failure
④ Defector for number of cycles
⑤ Rotational-speed controller
⑥ Reflectional tachometer

Fig.1 Experimental apparatus for pulsating-bending fatigue test on a wire in air

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

態ではマルテンサイト（martensite、以下 M）変態に比べ変態ひずみが小さく、変態および逆変態における材料内部の損傷が非常に小さいことによる。

これに対し、低サイクル域では ε_a — N_f 関係は両対数で傾きの大きな直線関係となる。この ε_a と N_f の関係は Manson-Coffin 則で表され、

$$\varepsilon_a \cdot N_f^{\beta} = \alpha$$

となる。ここでβは直線の傾きであり、αはN_f =1 での ε_aの値である。T=303K においてf= 300cpm , 500cpm では βはそれぞれ 0.41 , 0.46 である。この値は常用金属の 0.5 に近い。また空気中の TiNi SMA 線材の回転曲げ疲労に関する β =0.25 に比べて大きい。

3.2 繰返し速度が異なる場合の疲労特性　図 2 よりε_a — N_f 関係は繰返し速度が高いほど低寿命であることがわかる。この理由としては、TiNi SMA の引張試験の結果より、ひずみ速度が高いほど相変態の生じる応力が増加するのが確認されている。高応力であるほど低ひずみで相変態が起こる。高応力でひずみの大きい相変態が進んでいるほど、繰返し荷重を受けることにより材料内部でのき裂の発生が早く起こり、寿命が短くなる。

3.3. 片振り曲げと回転曲げの疲労寿命の比較　図 3 に片振り曲げと回転曲げでの疲労寿命曲線を示す。図からわかるように、ε_a = 1%の近傍で両者の曲線は交わる。片振り曲げと回転曲げでの疲労寿命を比較すると、交点よりも低サイクル域では、破断繰返し数 N_fは片振り曲げより回転曲げの方が小さい。そこで応力—ひずみ曲線がヒステリシスループを描くことに着目する。応力—ひずみ曲線に囲まれた部分の面積は単位体積当たりの散逸仕事を表す。散逸されるこのエネルギーは主に熱となって失われるため、試験片の温度上昇が生じる。この領域では片振り曲げでも回転曲げでも M 変態が生じるので、ひずみ振幅が等しければ散逸仕事は同じであると考えられる。しかし、試験片の局部の温度について、回転曲げでは一定の最大ひずみの形状を保ったままであるが、片振り曲げでは試験片が曲げ伸ばしの往復運動をしているので試験片は冷却される。このために片振り曲げよりも回転曲げの方が温度上昇が大きい。このために応力が高く、寿命は短くなる。温度上昇の効果の詳細については今後の課題である。

一方、高サイクル域では破断繰返し数 N_fは、回転曲げよりも片振り曲げの方が小さい。片振り曲げではひずみ振幅が 1%以下で M 変態が生じるが、回転曲げでは 1%以下で R 相変態のみであることが原因であると考えられる。

3.4. 破面の観察　疲労寿命と破壊の形態を評価するために、図 4 に片振り曲げ疲労での破断面を撮影した SEM 写真を示す。破断面はき裂が繰返し変形により安定に成長した貝殻模様の領域（stable）と、不安定に破壊した領域（unstable）の 2 つに分けられる。図中の矢印はき裂の発生起点を示す。き裂は最大ひずみの表面で発生する。最大ひずみの点においてき裂は表面近傍に存在する欠陥、偏析等を起点として進展し、繰返しとともに安定にき裂が成長する領域が増加し、やがて不安定破壊したものと考えられる。

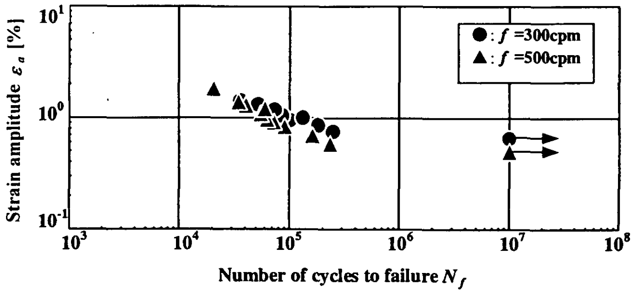


Fig.2　Strain amplitude versus fatigue life in pulsating-bending test at T=303K
[→ : nondestructive]

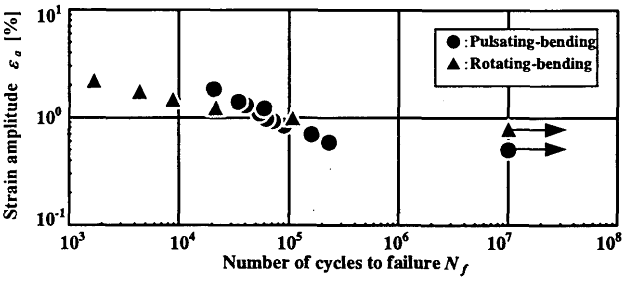


Fig.3　Strain amplitude versus fatigue life in pulsating-bending and rotating-bending test at f=500cpm and T=303K
[→ : nondestructive]

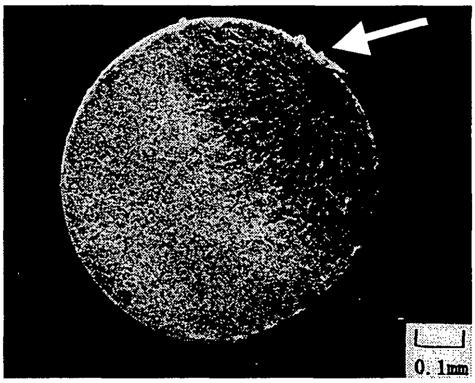


Fig.4　Fatigue fracture in pulsating-bending test

4. 結言

本研究では実用において重要になる TiNi SMA の片振り曲げ疲労特性について研究した。また疲労試験で破断した TiNi SMA 線材の破断面を SEM を用いて観察した。

本研究より得られた結果の要点を以下に述べる。

(1) 疲労寿命曲線はひずみ振幅 ε_a= 0.5〜0.8%の間に折れ曲がり点を有し、傾きの異なる 2 直線で表すことができる。

(2) 低サイクル域での疲労寿命はひずみ振幅 ε_a およびひずみ速度が大きいほど破断繰返し数N_fの値は小さくなる。

(3) 片振り曲げと回転曲げでの疲労寿命曲線は交わる。低サイクル域では破断繰返し数 N_fは、片振り曲げより回転曲げの方が小さく、高サイクル域では逆の関係になる。

(4) 疲労き裂は線材表面のある部分を起点として進展し、繰返しとともに安定にき裂の成長する領域が増加し、不安定破壊する。

NII-Electronic Library Service