ペルチエ素子を用いた形状記憶変形挙動の高速測定

Yasubumi Furuya, Kouyuu Abe, Tsuneo Teshima, Minoru Matsumoto

Faculty of Engineering, TOUHOKU UNIVERSITY,

Aramaki-Aoba, Sendai 980 Japan

Tel. 022-222-1800. Fax. 022-268-3688

(Received 7, November 1991 Accepted 23, April 1992)

ABSTRACT

The fatigue test device of Shape Memory Alloy wire was developed using the Peltier element of Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 for p type and Bi_2Te_3 and Sb_2Se_3 for n type. The measurements of Ti-Ni-Cu wire and rapidly solidified Ti-Ni and Ti-Ni-Cu were carried out by short cycle time of heating and cooling under stable temperature control. From the experiment, it was concluded that the elongation by plastic deformation caused the fatigue and degradation of Shape Memory Alloy.

Key Words: Shape Memory Alloy, Peltier Element, Thermal Fatigue Test, Thermoelastic Deformation

1. 緒言

形状記憶合金（以下SMAと略す）は、温度センサーや微細機構のアクチュエータ、継手等の機械部品の材料などから、眼鏡のフレームや衣類などの身のまわりの品まで広い分野にわたって利用されている。¹ その中でも特に機械部品として用いられる場合は多数回の繰り返し動作が必要であるため、SMAの動作特性の疲労劣化現象を調べることが機械全体の寿命を考える上でも重要である。

ところが、従来の空冷型および水冷型の疲労劣化試験装置では、

- ① 空冷型の装置では室温まで、水冷型の装置では水温までしか冷却できないため、マルティンサイト変態終了温度（以下、 M_f 点と略す）がそれらの温度より低い場合は測定できない。
- ② 空冷型の装置は加熱・冷却のサイクルタイムは速いが、冷却時の温度管理が十分でない。

③ 水冷型の装置では温度の管理は十分に行えるが、そのために加熱・冷却のサイクルタイムが遅くなる。

などの欠点がある。また、最近ではアモルファス材料の急冷凝固法をSMAに応用することで、従来のSMAよりも飛躍的に寿命の長いSMAを開発しようとする試みがなされており、² ③のような欠点がある場合、耐久試験に非常に長い時間がかかる。

そこで、本研究では短時間で耐久試験を行うことができる装置を考案するため、電子冷却素子であるペルチエ素子によつての加熱・冷却を行う装置を開発し、その特性を調べた。また、SMAの一種であるTi-Ni-Cu合金の線材及びTi-Ni合金の薄帯について一定荷重下での加熱冷却サイクル繰り返し試験（単軸）を行い、形状記憶効果（以下、SMEと略す）特性の劣化の様子を調べた。

ペルチエ素子は電気を冷熱に変える素子であり、2種類の異なる金属もしくは半導体（p, n型）

を直列に接合し、直流電流を流すことにより、一方の接合部では吸熱、他方の接合部では発熱を示すというペルチェ効果を利用したものである。Figure 1 にその概念図を示す。

Fig.1. Peltier element.

実際のペルチェ素子は p・n 半導体を多数、電気的に直列に接続し、高熱伝導性の電気絶縁体基板で挟んだ構造を持つ。なお、本研究で用いたペルチェ素子は、p 型として Bi_2Te_3 および Sb_2Te_3 、n 型として Bi_2Te_3 および Sb_2Se_3 の固溶体の組合せが用いられている。このペルチェ素子を流れる電流と温度の関係を Fig. 2 に示す。

Fig.2. Current vs. Temperature curves at Peltier elements.

2. 実験

2-1 実験装置

本実験で用いた SMA 疲労試験装置の構成を Fig. 3 に示す。

Fig.3. SMA thermal fatigue test machine using Peltier elements.

試料の加熱・冷却はペルチェ素子を 5 個直列につないだものをさらに並列につなぎ、試料を両側から覆うようにしたもので行っている。治具は試料を 2 枚の金属板で挟み、ネジで強く締める形式のものである。薄帯の試料を試験する場合にねじれが生じないように、治具と剛性台及びフーラーとの間に「よりもどし」を入れている。下側治具は剛性台に固定、上側治具は固定せずに自由に動けるようにし、フーラーを介して荷重を加えた。試料の変形量はフーラーに接続した角度変位計の出力電圧の変化により検出している。温度は装置中に設置した熱電対により測定している。

実験装置の制御構造を Fig. 4 に示す。制御装置としてコンピュータを用いている。リレー-1 はペルチェ素子の加熱・冷却の切り替え、リレー-2 は電流の ON-OFF の切り替えを行っている。変位のデーターは 100 個ごとにプロットデスクに記録さ

Fig. 4. Control system of the developed SMA thermal fatigue test machine.

れる。1サイクルの流れは次の通りである。

- ① リレー-1 を加熱、リレー-2 をON状態にする。
- ② 温度を測定し、マルチサイト逆変態終了温度（以下、Af点と略す）以上になったら 変位を測定してリレー-2 をOFF状態にする。
- ③ 30秒間停止状態にする。
- ④ リレー-1 を冷却、リレー-2 をON状態にする。
- ⑤ 温度を測定し、Mf点以下になったら変位を測定してリレー-2 をOFF状態にする。
- ⑥ 30秒間停止状態にする。

ただし、今回の実験では疲労試験をする前に数個の π 素子が破損してしまい、その原因の1つとしてリレーをOFF状態にした瞬間の過剰な逆流電流も考えられるので、スイッチングの回数を減らすために π 素子は冷却のみに用い、加熱は通電で行うことにした。また、破損した π 素子の近辺では雰囲気温度が変化してしまうため、温度による制御ではなく時間による制御を行うことにした。

2-2 試料

本研究で用いたSMAの仕様は以下の通りである。

- ① 線材<古川電工（株）製>

材質 Ti-Ni-Cu

Af点 336.9K

線径 0.5mm

② 薄帯<関東特殊鋼製>

材質 Ti-Ni

Af点 331K

幅 2.0mm

厚さ 0.23mm

上記の試料（ $L_0=150\text{mm}$ ）を切り出して直線場に拘束し、電気炉において873Kで1時間保持した後、氷水にて急冷した。

2-3 実験方法

(1) 実験装置について

A. 通電加熱・空冷型

B. 通電加熱・水冷型

C. 通電加熱・ π 素子冷却型

D. π 素子による加熱・冷却型

の各装置について、加熱・冷却の1サイクルあたりのサイクルタイムを調べた。

(2) 試料について

本実験では各試料にかかる荷重を変えて、 10^3 回疲労試験を繰り返すことで、荷重応力とSMEによる変形量及び形状回復位置の低下（塑性変形による伸び）との関係をしらべた。SMAが完全に変態を起こすには、最高温度がAf点以上、最低温度がMf点以下になる必要がある。それに十分な通電電圧・電流、加熱・冷却時間をTable 1に示す。

Table 1. Test Conditions of Heating and Cooling by Peltier Effect.

Specimen No.	Input Current	Input Voltage	Heating time	Cooling time
①	2 A	7 v	3 sec	10 sec
②	4 A	15 v	5 sec	40 sec

3. 結果および考察

(1) 実験装置について

線材を加熱・冷却するときの各装置の1サイクルあたりのサイクルタイムをTable 2に示す。A, B, Cを比較すると、冷却時間が一番速いのは π 素子を用いたものであることがわかる。また、BとDでは温度管理は同程度にできるが、

Table 2. Thermal Cycle Time in Two Heating and Cooling Methods.

	A	B	C	D
Heating and cooling method	Direct current heating Fan air cooling	Direct current heating Water cooling	Direct current heating Peltier cooling	Peltier heating & cooling
Cycle time	15 sec	40 ~ 50 min	13 sec	5 ~ 6 min

サイクルタイムはBに比べDは1/7~1/10ですむことがわかる。

(2) 試料について

試料①、②について、繰り返し数とSME変形率($\Delta D/L_0$)および塑性変形率($\Delta U/L_0$)との関係をそれぞれFig. 5、Fig. 6に示す。試料1、2に共通していることであるがSMEによる変形量 ΔD は、線材・薄帯ともに負荷応力の増加とともに増加している。繰り返しの初期段階で変形量が一定でないのは、トレーニング(負荷応力以上の応力をかけて100回以上加熱・冷却のサイクルを繰り返すこと)の不足によるものと思われる。

塑性変形による伸び ΔU も、負荷応力の増加とともに増加している。また、SMA変形量はほぼ一定であるのに対し、繰り返し数の増加とともに塑性伸び量 ΔU は漸増している。このことは、SMA77.5MPaの繰り返し変形に伴う劣化(記憶ボケ)を防止するためには ΔU の小さな材料開発の重要なことがわかる。

4. 結言

(1) 実験装置について

半導体素子を用いることによって、温度制御を安定して行いながら、加熱・冷却のサイクルタイムを小さくすることができた。

(2) 材料について

10^3 回程度の繰り返しにおいては、SMEによる変形量 ΔD はほぼ一定であるが、塑性変形による伸び ΔU は繰り返し数が増すとともに増加している。このことより、SMAの疲労劣化は主に塑性変形による伸び ΔU が原因であることがわかった。

REFERENCES

- Special Issue "Shape Memory Alloy and its Applications", Bulletin of the Japan Institute of Metals, vol. 24, No. 1 (1985)
- Y. Furuya, M. Matumoto, T. Masumoto: Proc. of Intern. Symposium on Inter-

metallic Compounds, JIMIS-6 SENDAI, JAPAN, (1991), 275

Fig. 5. Fatigue test at Ti-Ni-Cu wire.

Fig. 6. Fatigue test at Ti-Ni thin belt. (2.0x0.23mm)