β 型チタン合金の機械的性質と疲れ強さ

Mecanical and Fatigue Properties of the Beta Titanium Alloy

小 松 征 士*

Masashi KOMATSU

1. ま え が き

チタンは軽く、耐食性が高いことから、航空機や宇宙機器をはじめ化学工業・石油産業分野を中心に用いられ研究されている。チタンがばねに利用された例はあまりなく¹⁾、これは純チタンの強度が軟鋼程度であること、最も高い強度を有する β 型チタン合金の研究が最近まであまり進んでいないこと、さらにチタンが非常に高価であることなどに起因している。

ここではチタン合金の中で最も高い強度が得られる β 型チタン合金をばね素材に取り上げ、機械的性質と疲れ強さについて検討してみた。

2. 供試材・試験片

供試材の化学成分を表1に示す。この合金はチタンに15% Mo, 5% Zr, 3% Al, を加えた β 型チタン合金²⁾で Mo, Zr の合金により高温でのみ安定な β 相を常温で準安定 β 相とし、Al により α 相の強化とぜい化防止を計ったものである。強度は溶体化処理後の析出硬化処理により α , w 粒子の析出により強化される。

供試材はピレットを 880~600°C で 9.5 ϕ の丸棒に熱間圧延し、溶体化処理 (785°C×1 hr, 水冷)、矯正した

図 1 試験片

後表面研削により 8.0 ϕ の丸棒としたもので、これより引張試験片、ねじり、疲れ試験片を機械加工により製作した。各試験片は図1に示す同一形状の試験片を用い、有効径を 5.0 ϕ とした。引張試験片は JIS 14 A 号、疲れ試験片は JIS Z 2273 に基づき製作し、析出硬化処理は 500°C×16 hr, 空冷により大気中にて行い、表面に形成された酸化皮膜は研摩紙によりそれぞれの試験前に除去しておいた。写真1に試験片横断面の顕微鏡組織写真を示す。試験片の結晶粒度は粗く、粒度番号 ASTM No. 2.5~3 であった。

3. 試験方法

3.1 機械的性質

機械的性質として引張試験とねじり試験を、溶体化試験片、析出硬化試験片について行った。引張試験はインストロン型万能引張圧縮試験機により、引張強さ・のび・絞りを求めた。ねじり試験は 5 kg-m 精密ねじり試験

表 1 供試材 化学 成分

(%)

	Mo	Zr	Al	Fe	C	O	H	N
供 試 材	14.97	5.04	2.93	0.047	0.006	0.1650	0.0124	0.0129

×100

溶体化試験片

×400

析出硬化試験片

写真 1 試験片顕微鏡組織 (硝酸フッ化水素水溶液腐食)

* 日本発条株式会社

図 2 ねじり強さの求め方

機により最大せん断応力, 降伏応力 ($\gamma=0.3$), 横弾性係数を求めた。ねじり試験における各値は図 2 に示す記録紙により $T_{\max}$, $T_{0.3}$, $\theta dT/d\theta$ を求め次式により算出した。

$$\text{最大せん断応力 } (\tau_{\max}) = 12T_{\max}/\pi D^3$$

$$\text{降伏応力 } (\tau_{0.3}) = 4(3T_{0.3} + \theta dT/d\theta)/\pi D^3$$

$$\text{横弾性係数 } (G) = T/\theta \times 32l/\pi D^4$$

(D : 試験片直径 l : 試験片長さ θ : ねじり角)

なお, 横弾性係数測定の場合はツカミ部での誤差をなくするため, 標点部に鏡を取り付け, 鏡装置によりねじり角を求めた。

3.2 疲れ特性

疲れ試験は 4 kg-m 小型シェンク疲れ試験機を用い, 片振りと部分片振りでねじり疲れ試験を行った。負荷応力は試験機に取り付けられたダイヤルゲージより, トルクを求め設定し, 繰返し速度は 3,000 r. p. m, 疲れ限度は 5×10^6 回の繰返しに耐え得る応力とした。なお, 部分片振りの試験では平均応力を, 溶体化試験片の場合 35 kg/mm², 析出硬化試験片の場合 45 kg/mm² を目標とした。

4. 結 果

4.1 機械的性質

引張試験, ねじり試験の結果を表 2 に示す。引張試験ではのび計が付けられなかったため, 引張強さ・のび・絞りのみを求めた。析出硬化処理により引張強さは約 15 % 向上し, 125 kg/mm², ねじり強さは約 30 % 向上し, 最大せん断応力は 83.8 kg/mm² であった。反面, 析出硬化処理により延性が低下し, 特に絞りは局部絞りが認められず, カップアンドコーン型の破壊様式は示さなかった。写真 2 に引張試験後の破断状況を示す。

ねじり特性は溶体化状態で引張強さの約 60 % の降伏応力を有し, 析出硬化処により 65 % にまで向上した。また, 最大せん断応力に対する降伏比は析出硬化前後ともに 96~97 % 程度であった。

横弾性係数は析出硬化前後で大きく変化し, 硬化後平均 4,024 kg/mm² とおよそ 25 % 大きくなっている。

なお, 各値の標準偏差を参考に求めたが, どの値も析出硬化処理によりバラツキが小さくなる。

4.2 疲れ特性

ねじり疲れ試験を図 3・4 の S-N 線図に示す。また, 疲れ限度線図を図 5 に示す。析出硬化処理により疲れ限度は向上し, 片振りでは ± 13 kg/mm² から ± 19 kg/mm² にまで, 部分片振りでは 10 kg/mm² から 15 kg/mm² にまで向上した。この結果より, 析出硬化処理後の最大許容応力は片振りで約 38 kg/mm², 部分片振りではおよそ 60 kg/mm² ほどであった。疲労クラックはどの場合も線軸にはほぼ 45° 方向に進み, 破面は非常に粗かった。

上) 溶体化試験片
下) 析出硬化試験片

写真 2 引張り破断状況

表 2 試験片の機械的性質

			引張強さ (kg/mm ²)	の (%)	絞 (%)	最大せん断応 力 (kg/mm ²)	ねじり降伏点 (kg/mm ²)	横弾性係数 (kg/mm ²)	試験片数
溶 体 化 片			108.6 (2.57)	14.2	61.1	64.2 (2.27)	61.7 (1.47)	3,219 (98.8)	8
析 出 硬 化 片			125.2 (2.15)	11.8	17.3	83.8 (1.13)	81.2 (1.14)	4,024 (57.3)	8

() は標準偏差 σ

図3 片振り S-N 線図

図4 部分片振り S-N 線図

5. 考 察

5.1 機械的性質

試験材は溶体化状態では体心立方構造の β 相で、析出硬化処理により微細な粒子が析出する。析出粒子は二次ソルバイト状であるが、結晶粒界は明確に観察され、腐食液により短時間に腐食される。機械的性質はこの α 粒子の析出により増大し、 125 kg/mm^2 を得たが本合金は硬

図5 疲れ限度線図

化後の引張強さ 140 kg/mm^2 以上と言われており³⁾、やや低い特性値であった。この原因としては試験片の結晶粒度が粗いことが考えられるが、さらに熱処理条件に問題があったことも推察される。すなわち、硬化後は延性が失われ、引張試験で局部絞りがほとんど見られない破壊様式を示している⁴⁾。写真3の走査電子顕微鏡に認められるように溶体化処理状態では多数の大きなディンプルが一面に観察されるが、析出硬化後は脆性的な粒界破面が多数みられ、細かなディンプルとが混在する破面を呈し、脆化している。

一方ねじり強さは析出硬化処理により大きく向上しているが引張特性とはほぼ同様の傾向を示している。

横弾性係数は析出硬化前後で大きく変化し、一般のばね鋼には見られない特性である。チタン合金の同種のデータが無いので比較できないが、縦弾性係数は硬化前後で本結果と同様に变化しており⁵⁾チタン合金の特性と考えられる。しかし、一般のばね材に比較して値が小さいこと、熱処理前後で大きく変化することはばね素材として利用する場合注意する必要がある。

5.2 疲れ特性

析出硬化処理により疲れ強さは向上したが、静的な強度から比較するとやや低い疲れ特性であった。疲れ破面はばね鋼などと比較すると粒が粗く、試験片の結晶粒度

溶体化試験片

50 μ

析出硬化試験片

50 μ

写真3 S.E.M 引張り破面写真

溶体化試験片

200 μ

析出硬化試験片

200 μ

写真 4 S.E.M 疲労破面写真

溶体化試験片

5 μ

析出硬化試験片

5 μ

写真 5 S.E.M 疲労破面写真

も影響しているものと思われる。溶体化試験片と析出硬化試験片の疲れ破面を走査電子顕微鏡で観察すると写真 4 に示すようにどちらも壁開破壊を示しており、特に硬化片には疲労破面特有のストリーションがほとんど見られず、高倍率の写真 5 にもステップがあまり観察されない。溶体化片、析出硬化片ともに疲れ強さがやや低い原因としては結晶粒度が粗大であることの他に熱処理条件が考えられる。特に析出硬化条件については脆性、過時効から脆化しやすいので、今後この点についてさらに検討してみる必要がある。

6. あとがき

チタン材料をばね材料として利用する場合にはその比強度と耐食性の点であり、特にチタン合金を用いる場合には比強度が高いことが大きな特長である。今回の試験材ではまだ十分な特性は得られなかったが、今後さらに今回の問題点を検討するなら、特殊環境下でのばね素材として、あるいは重量軽減の長所を発揮することは十分可能と思われる。ピーニング、表面硬化処理などにより疲れ強さを向上することも可能であろう。

ばね素材として新しい β 型チタン合金について機械的性質と疲れ強さについて試験を行ったが、その結果をまとめると次の通りである。

(1) 機械的性質は引張強さ 125 kg/mm^2 を硬化後得ることができ、従来のチタン材料に比較してかなり高い値を示すことがわかった。しかし、本合金はさらに高い強度が得られると言われており、これは本試験片の結晶粒度が粗大であったこと、および熱処理により脆化したことに起因していると思われる。

(2) 横弾性は硬化後平均 $4,204 \text{ kg/mm}^2$ で、一般のばね鋼に比較するとかなり小さく、熱処理前後で大きく変化することがわかった。

(3) 疲れ強さは析出硬化処理により片振りで $\pm 19 \text{ kg/mm}^2$ 、部分片振りで $\pm 15 \text{ kg/mm}^2$ の疲れ限度を有することがわかった。しかし、静的強度から比較するとやや低い特性値であり、試験片の結晶粒の粗いこと、熱処理による脆化が疲れにも影響しているものと思われる。

文 献

- 1) Robert A. Budington, SPRING, 8-1 (1972), 39
- 2) 大谷・西垣, 日本金属学会誌, 36-1 (1972), 90
- 3) 大谷・西垣, 日本金属学会誌, 36-4 (1972), 346
- 4) A. Gysler ら, ACTA METALLURGICA, 22-July (1974), 901
- 5) Battelle Columbus Laboratories, Beta Titanium Alloys, (1972) Metals and Ceramics Information Center