チタン合金製弁ばねの開発*

藪下毅士**, 高村典利**, 丹下 彰**

Development of Valve Spring Made of Titanium Alloy

Takeshi YABUSHITA, Noritoshi TAKAMURA and Akira TANGE

We have investigated the influence of aging conditions on fatigue strength of titanium alloy and studied the wear resistant coatings for titanium alloy. Utilizing the results, we have developed the valve spring made of titanium alloy in order to increase engine speed and lighten engine weight.

The main results obtained are summarized as follows:

- 1) Tensile strength dependence of fatigue strength in Ti-13V-11Cr-3Al alloy is opposite to tensile strength dependence in steel.
- 2) Settling performance of Ti-13V-11Cr-3Al alloy is improved as increasing tensile strength, and settling performance is equivalent to steel with higher strength.
- 3) Ni-P electroless plating and Ni-P+Au-Ni electroless plating are excellent methods as wear resistant coating for titanium alloy.
- 4) Ti-13V-11Cr-3Al alloy springs with optimum tensile strength and coating by Ni-P electroless plating or Ni-P+Au-Ni electroless plating pass the motoring test.
- 5) Titanium alloy springs with optimum tensile strength and coating by Ni-P electroless plating or Ni-P+Au-Ni electroless plating in comparison with steel springs lead to a 13 percent decrease in free height and a 57 percent decrease in weight.

Key Words : Titanium alloy, Valve spring, Fatigue strength, Aging, Wear resistant coating, Motoring test

1. はじめに

エンジンの出力、燃費に大きな影響を与える動弁系に対しては慣性重量の低減が最も重要で、個々の部品の軽量化が盛んに研究されている。次世代の弁ばね用材料として、チタン合金は鋼に比べ比重が小さく低弾性率で比強度が高いため、大幅な軽量化が達成できるばね材料として有望視されてきた¹⁾。しかし、チタン合金の疲労強度へ大きな影響を及ぼす伸線や時効処理の詳細が明らかではなく、ばねとしての最適製造条件が知られてはいない。また、チタン合金は耐摩耗性が著しく悪く、使用時にばね線間、及び座面部が激しく摩耗し、ばね定数の低下や折損を引き起こすことがチタン合金製弁ばねの実用化の大きな課題となっている。そこで、チタン合金の疲労強度に及ぼす時効条件の影響を詳細に調査し、さらに、各種表面処理膜のチタン合金に対する耐摩耗向上効果を研究した。その結果、ばねとしての最適製造条件と耐摩耗性の優れた表面処理膜が見い出され、大幅な軽量化とコンパクト化が達成されるチタン合金製弁ばねの開発ができた。

2. 機械的特性

2.1 β 型チタン合金

β 型チタン合金には歴史のある Ti-13V-11Cr-3Al から β C(Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr) など比較的新しいものまで多くの種類がある。しかし、 β 型合金の自動車部品への適用例は少なく、現在でも十分な材料選択がなされているとは思われない。また、 β 型合金の機械的性質には溶解から伸線まで製造工程の厳密な管理が必要と言われている。

このような背景から、弁ばね用の β 型合金を評価するにあたり、最も歴史があり製造条件も安定していて、さらに、伸線加工と時効処理を組み合わせることで高い強度のでる Ti-13V-11Cr-3Al を評価材として選択した。Table 1 に実験に用いた Ti-13V-11Cr-3Al 合金の化学成分を示す。

Fig. 1 に伸線加工率を 80% とした線径 ϕ 3.95mm の線材を、673K から 823K まで時効処理温度を変えた場合の引張強さと伸びへ及ぼす時効時間の影響を示す。引張強さは時効温度 673~723K では時効時間と共に増加を続け、15h では 1850MPa もの値に達することがわかる。さらに、伸びについてみると、この時効条件においても 10% 程度の延性

を維持している。一方、時効温度の高い 773 K および 823 K においては、過時効のため引張強さは低下していて、伸びについても低下するという傾向が認められる。

2.2 疲労強度

2.2.1 線材の疲労強度

疲労強度へ及ぼす各種時効条件の影響を中村式回転曲げ疲労試験によって調べた。試験片は 80% の冷間伸線により線径 $\phi 3.95\text{mm}$ とした線材である。時効条件は、引張強さがほぼピークとなる時効条件の 698 K で 15 h 及び過時効となる 773 K で 2.5 h、さらに高温の 823 K で 2.5 h のものとした。なお、試験片には時効後、疲労強度向上を目的としてショットピーニングを行った。Fig. 2 に疲労試験結果を示す。図中の引張強さがピークとなる時効条件 698 K は折

Table 1 Chemical compositions of titanium alloy

Chemical compositions							wt%
V	Cr	Al	Fe	O	N	C	Ti
12.5	10.0	2.5	max.	max.	max.	max.	Rem.
~	~	~	0.35	0.17	0.05	0.05	
14.5	12.0	3.5

Fig.1 Relationship between aging conditions and mechanical properties in 13-11-3

損データをバンドで示し、最も過時効となる 823 K の条件については折損データの下限を実線で示してある。疲労強度は時効温度の高いほど、すなわち引張強さの低いほど高い傾向が明りょうに認められる。この疲労強度の材料強度依存性は一般の鋼とは逆であり、興味深い現象である。

Fig. 3 に疲労強度の高い 823 K と疲労強度の低い 698 K の場合の X 線応力測定法による残留応力分布を示す。両者ともにショットピーニングによって大きな圧縮残留応力場が表面に形成されていることがわかる。しかし、その分布の大きさや深さについては両者間に大きな差異は認められず、残留応力からは疲労強度の差の説明はできない。

Fig. 4 に折損したサンプルの破面写真の一例を、また、Fig. 5 に内部起点の起点寸法と時効温度の関係をそれぞれ示す。なお、起点寸法は起点の最大寸法としている。起点寸法は時効温度が高くなるほど小さくなる傾向を示しており、時効温度の高いほうが欠陥サイズが小さくなって、同じ残留応力分布でも疲労強度が高くなるものと思われる。また、起点部には介在物等は見られず、析出 α 相内、または析出 α 相と β 相の界面からの微視割れ起点と思われるものが見られる²⁾。

2.2.2 コイルばねの疲労強度

Fig. 6 は線径 $\phi 3.95\text{mm}$ 、コイル平均径 23.05 mm、有効巻き数 3.5 のコイルばねの疲労寿命と引張強さの関係を示したものである。試験応力条件は $490 \pm 392\text{MPa}$ と $490 \pm 343\text{MPa}$

Fig. 3 Distribution of residual stress

Fig. 2 Effects of tensile strength on fatigue strength

の2条件で、ばねには線材と同様にショットピーニングが施してある。コイルばねにおいても疲労寿命は引張強さが低くなると共に明らかに増加し、線材での疲労強度と同様の材料強度依存性を示している。また、 $490 \pm 392 \text{MPa}$ においても引張強さを 1470MPa とすれば繰返し数 10^7 回の優れた寿命を示すことがわかる。

2.3 へたり性

疲労強度と同様にへたり性（クリープ）は、ばねにとって重要な特性である。Fig. 7はFig. 6の疲労試験に供したばねと同一のばねに大気中 403K の雰囲気中で締付け試験を行っ

た結果を示したものである。締付け応力はワールの応力修正係数を考慮して 882MPa （考慮しない場合 700MPa ）で、締付け時間は 144h である。へたり量（残留せん断ひずみ）は一般の鋼と同様に引張強さの増加とともに小さくなるのがわかる。したがって、へたり性を向上させるためには引張強さをあげる必要があるが、疲労強度の維持を考慮すれば限界がある。そこで、Fig. 7中のSWOSCの高強度材（ $\sigma_B = 2059 \text{MPa}$ ）のへたりのレベルより優れた耐へたり性を示すチタン合金（13-11-3）の引張強さを読み取ると、はるかに強度の低い $\sigma_B = 1520 \text{MPa}$ 以上である。この引張強さはFig. 6の疲労強度において十分な寿命を示すことがわかる。

(1) Aging temperature : 698K Origin size : $154 \mu\text{m}$

(2) Aging temperature : 773K Origin size : $46 \mu\text{m}$

(3) Aging temperature : 823K Origin size : $30 \mu\text{m}$

Fig. 4 SEM observation of fractured surface by rotary bending test

Fig. 5 Relationship between aging temperature and origin size

Fig. 6 Effects of tensile strength on coil spring fatigue strength

Fig. 7 Effects of tensile strength on residual shearing strain

2.4 摩耗防止膜

2.4.1 耐摩耗表面処理の選択

チタン合金の耐摩耗表面処理としては Mo の溶射や CrN のイオンプレーティング膜、Ni-P 合金めっき膜などが報告されている。このうち Mo の溶射膜は一般に面粗度が大きく、ばね用としては適当でないと判断される。また、イオンプレーティング膜や耐摩耗 Ni-P 膜についてはその種類も多い。そこで、ピン/ブロック摩擦摩耗試験によって耐摩耗膜の選択を行った。

ピン/ブロック摩擦摩耗試験の模式図は Fig. 8 に示されるが、一定速度で回転するピンに V 型ブロックを押しつけていき、焼付きの限界荷重の大小によって膜の耐摩耗性を評価するものである。

Fig. 8 Mode of pin/block wear test

Fig. 9 Results of pin/block wear test

Fig. 10 Relationship between coating conditions and fatigue strength

Fig. 9 に各種の膜と焼付き限界荷重の関係を示す。本試験ではピンに Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金、ブロックに SKH51 を用い、耐摩耗膜はブロック表面にのみ成膜した。また、試験は鉱油による潤滑下で行い、摩擦速度は 0.4m/s とした。付した膜はイオンプレーティング膜として TiN, CrN, ダイヤモンド、そしてめっき膜として無電解 Ni-P, 無電解 Ni-P + Au-Ni である。Fig. 9 からイオンプレーティング膜はいずれも焼付き限界荷重は低く、未処理のものとはほぼ同等のレベルであることがわかる。一方、無電解 Ni-P めっき及び無電解 Ni-P + Au-Ni めっきは非常に優れた耐摩耗性を示し、弁ばね用の耐摩耗膜として有効なことがわかる。

2.4.2 コイルばねへの適用

Fig. 6 に結果を示すものと同一のばねに無電解 Ni-P めっきを膜厚を種々に変えて施し、疲労試験を行なった。Fig.10 に疲労試験結果を示す。試験応力条件は 490 ± 392 MPa, 試験に用いたばね材の引張強さは 1470 MPa で、膜厚は 8, 11 及び 18 μm とした。また、ばねにはめっき後にショットピーニングが施されている。疲労寿命は膜厚が薄くなるほど長くなり、8 μm ではめっきなしのものと

(1) Thickness of plating : 8 μm

(2) Thickness of plating : 18 μm

Fig. 11 SEM observation of fractured surface of coil spring coated by Ni-P electroless plating

等の疲労強度を得ることができた。

また、Fig. 11 に膜厚 8 μ m と 18 μ m の折損したサンプルの破面写真を示す。これらのばねの折損起点は、膜厚 8 μ m ではチタン合金内部からのフィッシュアイ状のものであり、膜厚 18 μ m ではめっき膜に生じた表面のき裂であった。このことから、膜厚が厚いとめっき膜のき裂によるノッチ効果、及び圧縮残留応力が深部まで付与されにくいことによりばねの表面が起点となり、膜厚が薄いとチタン合金内部での微視割れが起点になるものと思われる²⁾。

2.5 エンジン耐久

現行の鋼製の弁ばねとばね定数、取付時および弁開時荷重を同一にしたチタン合金（13-11-3）ばねを用い、モータリング耐久試験によって耐久性、耐摩耗性及び荷重損失を調べた。耐摩耗膜としては無電解 Ni-P 及び無電解 Ni-P+Au-Ni 膜とした。耐久試験の条件は弁開時応力 583MPa、取付時応力 244MPa、そしてエンジン回転数 6500rpm、耐久時間 600 h である。

Fig. 12 に摩耗量（試験中のばね重量変化）と時間の関係を示す。比較材の摩耗防止膜のないばねではわずか 5 h の試験において 0.09 g もの摩耗を生じていることがわかる。しかし、無電解 Ni-P 及び無電解 Ni-P+Au-Ni 膜を成膜し

Fig. 12 Value of wear in motoring test

Fig. 13 Load loss in motoring test

たばねは耐久時間 600 h において折損することもなく、また、摩耗減量も 0.03 g 以下で飽和する傾向にあり実用性のあることがわかる。

Fig. 13 に耐久時間と荷重損失の関係を示す。比較材は 5 h で 22.6N の荷重損失を生じているのに対し、無電解 Ni-P 及び無電解 Ni-P+Au-Ni 膜を用いたばねは 600 h でも 10N 以下の荷重損失に押さえられており、へたり性に関しても実用上問題のないレベルとなっている。

3. チタン合金ばねの効果

チタン合金ばねを、現行の鋼（SWOSC）ばねとばね定数、コイル外径及び最大たわみ量を同一にして設計した場合の設計例を Table 2 に示す。この設計例では鋼のばねに対しチタン合金のばねは自由高さが 13% 減、重量で 57% 減ものコンパクトで軽量なばねが期待されることがわかる。

Table 2 Example of design of compression coil spring

Materials	Dia. of wire (mm)	Spring rate (N/mm)	Outside dia. of coil (mm)	Maximum deflection (mm)	Free height (mm)	Weight (gr)
SWOSC	4.2	7.6	43.0	66	103	118
13-11-3	4.3	7.6	43.0	66	90	51
Effect	—	—	—	—	13%down	57%down

4. まとめ

- (1) β 型合金 Ti-13V-11Cr-3Al の疲労強度は鋼とは逆の材料強度依存性が認められる。
- (2) へたり性は引張強さが大きいほど優れるが、鋼と比較するとより低強度でも同等のへたり性を示す。
- (3) 耐摩耗膜としては無電解 Ni-P 及び無電解 Ni-P+Au-Ni 膜が優れている。
- (4) 最適材料強度及び無電解 Ni-P または無電解 Ni-P+Au-Ni めっき膜を用いたばねはモータリング試験に耐え、実用性のあるチタン合金製弁ばねであることがわかった。
- (5) 最適材料強度及び無電解 Ni-P または無電解 Ni-P+Au-Ni めっき膜を用いたチタン合金製弁ばねにより、鋼のばねに対し自由高さが 13% 減、重量で 57% 減ものコンパクトで軽量なばねが期待される。

参考文献

1) Murakami, A., Hagiwara, Y., Igarasi, T., Ozone, T., Matsuhashi, K. and Hayashi, H., SAE Technical Paper Series, No. 890470, 1989.

2) 梅澤修, 長井寿, 石川圭介, 鉄と鋼, 76-6 (1990), 924.