

岐阜大工 ○戸梶恵郎  
大同工大 高藤新三郎

大同キャスティングス 大矢耕二  
岐阜大名誉 加藤容三

ダイフク 森 清二

## 1 緒 言

β型チタン合金は溶体化処理状態でも比較的高い強度を有するが、構造材料として用いる場合、高強度化が不可欠である。そこで著者らはこれまでに、Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金<sup>1)4)</sup>や Ti-22V-4Al 合金<sup>5)11)</sup>について各種疲労特性に及ぼす時効条件の影響を系統的に検討し、時効による疲労強度の向上とそれに伴う破壊機構の変化を明らかにしてきた。

ところで、チタン合金のさらなる高強度化の手法として冷間加工後時効を施す方法がある。冷間加工によって結晶粒内に転位等の析出サイトが導入されるので、続く時効が促進されることが知られている<sup>12),13)</sup>。しかし、冷間加工後時効を施した材料の疲労特性に関する研究はきわめて少ない<sup>14)16)</sup>。

そこで本研究では、β型 Ti-22V-4Al 合金の異なる加工率で冷間加工後時効を施した材料を用いて回転曲げ疲労試験を行い、その疲労挙動を単一時効材 (STA 材) と比較することによって冷間加工の影響について評価、検討した。

## 2 実験方法

**2・1 材料および試験片** 供試材は直径 20mm のβ型 Ti-22V-4Al 合金であり、その化学成分 (wt.%) は V: 21.29, Al: 3.78, C: 0.01, N: 0.01, Fe: 0.11, O: 0.19, H: 0.0002, Ti: bal. である。素材を直径 16mm (加工率 36%) および 12mm (64%) までスエーピングにより冷間加工した。以後、冷間加工のままの試験片を CW36 および CW64、それらに 450°C・8h の時効を施した試験片を CWA36 および CWA64 と呼ぶ。なおこの時効条件は、比較に用いた STA750 (750°C で溶体化処理後時効) と同様である。

**2・2 組織** 納入材は縦断面および横断面ともほぼ等軸のβ結晶粒から成る組織である。それに対して、CW36 および CW64 では、結晶粒が試験片軸方向に引き伸ばされた結果、横断面では結晶粒の微細化が生じ、平均結晶粒径は納入材の 31μm に対して CW36 では 23μm、CW64 では 19μm である。時効後の横断面の SEM 組織写真を Fig.1 に示す。STA750 では粒界近傍に針状のα相が、粒内には粒状のα相の析出が認められる。一方 CWA36 および CWA64 では、微細なα相が高密度に析出している。しかし、α相の析出は必ずしも均一ではないようである。これは冷間加工によって生じた双晶やすべり帯に沿

ってα相が優先的に析出し、それらの間の領域では析出が遅れるためと考えられる<sup>17),18)</sup>。

機械的性質を Table 1 に示す。CW 材の場合、加工率の増加に伴って引張強さ  $\sigma_B$  は増加し、伸びおよび絞りも減少する。一方時効を施すと、いずれも強度は大きく上昇する。CWA 材の  $\sigma_B$  は STA750 よりも高く、低加工率の CWA36 が高加工率の CWA64 よりも若干高い  $\sigma_B$  を示す。また伸びや絞りは STA750 より増加し、加工率に伴って増加する。以上の結果から、時効前に冷間加工を施すことによって強度のみならず延性における改善も可能であり、両者のバランスの良い材料 (組織) が得られることがわかる。

**2・3 実験方法** 疲労試験には容量 98Nm の小野式回転曲げ疲労試験機を用い、室温大気中、繰返し速度 57Hz で実験を行った。用いた試験片は最小断面部直径 5.5mm の砂時計形試験片である。応力集中係数は約 1.05 であり、ほぼ平滑とみなせるものである。試験片加工を STA750 については溶体化処理後、また CWA 材については冷間加工後に行い、その後時効を施した。試験片の曲率部分をエメリー紙に続いてバフ研磨した後、電解研磨を施して実験に用いた。

表面き裂の発生および成長の観察にはレプリカ法を用いた。また試験後、破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察した。

## 3 実験結果および考察

**3・1 疲労強度** Fig.2 に S-N 線図を示す。図中、中空印は表面を起点とする破壊 (表面起点型破壊)、中実印は内部を起点とする破壊 (内部起点型破壊) を表している。

図から明らかなように STA750 と同様に、CWA 材において

Table 1. Mechanical properties.

Material code	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Elongation $\phi$ (%)	Reduction of area $\phi$ (%)	Vickers hardness HV	Grain size d (μm)
As-received	669	18	65	239	31
CW36	934	8	57	286	23
CW64	1011	7	54	286	19
STA750	1279	1	13	380	31
CWA36	1372	5	23	384	23
CWA64	1308	7	45	385	19

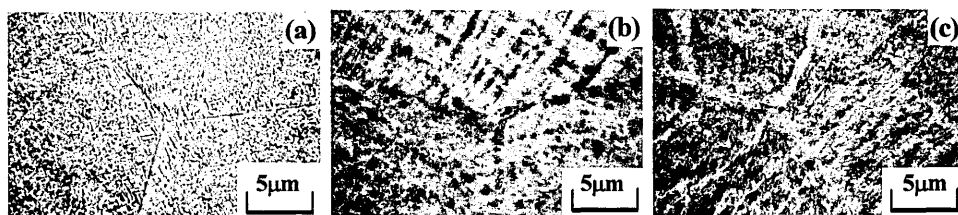


Fig.1. SEM micrographs showing microstructure: (a) STA750, (b) CWA36, (c) CWA64.

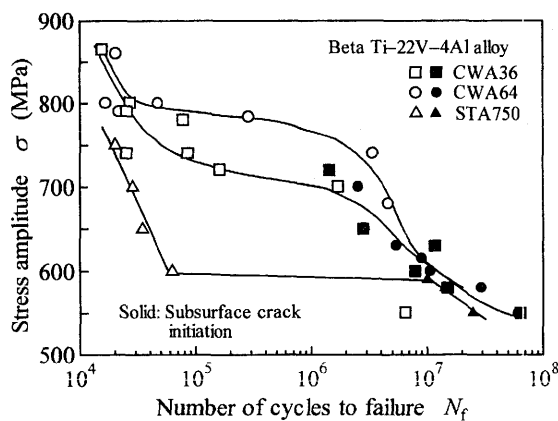


Fig.2. S-N diagram.

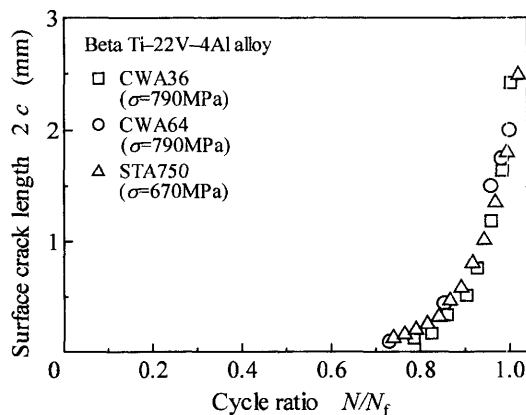


Fig.3. Relationship between surface crack length and cycle ratio.

も表面起点型と内部起点型の両破壊形態が現れる。表面起点型破壊が支配的な  $10^7$  回以下の寿命領域では、疲労強度は STA750 よりも著しく上昇し、CWA64 の疲労強度が CWA36 よりも高い。内部起点型破壊が生ずる長寿命領域では、両 CWA 材の疲労強度は同程度であり、STA750 よりもわずかに高い。なお、遷移応力は STA750 (600MPa) より大きく上昇し 720MPa 程度である。このように、時効前に冷間加工を施すことによって疲労強度は向上する。

**3・2 表面起点型破壊** 表面き裂長さ  $2c$  と繰返し数比  $N/N_f$  ( $N_f$ : 疲労寿命) の関係を Fig.3 に示す。いずれの材料もき裂発生は相対的に遅く、き裂発生までの寿命が  $N_f$  の大部分を占めている。この結果に基づいて、き裂成長速度  $da/dN$  と最大応力拡大係数  $K_{max}$  の関係を求めたところ、き裂成長抵抗は STA750 が最も高く、次いで CWA64, CWA36 であった。

**3・3 内部起点型破壊** Fig.4 に CWA36 および CWA64 における内部き裂発生点の SEM 写真の例を示す。多くの場合、加工率にかかわらず発生点には平坦なファセットが観察されたが、明瞭なファセットが見られない場合もあった。

ファセットの面積  $V_{area}$  と表面からの距離  $d_{facet}$  の関係を Fig.5 に示す。図にはそれぞれの材料の平均結晶粒径  $d$  も併記した。CWA64 のひとつの例外を除いて発生点は浅く、約 20~70 $\mu$ m である。大きい応力勾配のために表面に近い箇所でき裂が発生すると考えられるが、CWA64 において観察された

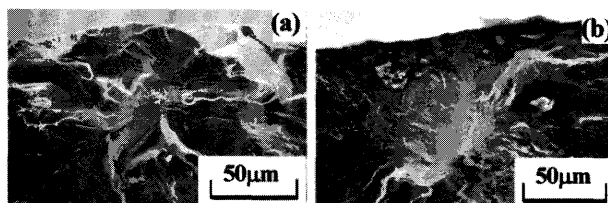


Fig.4. Subsurface crack initiation site: (a) CWA36 ( $\sigma=720$ MPa,  $N_f=1.43 \times 10^6$ ), (b) CWA64 ( $\sigma=600$ MPa,  $N_f=1.08 \times 10^7$ ).

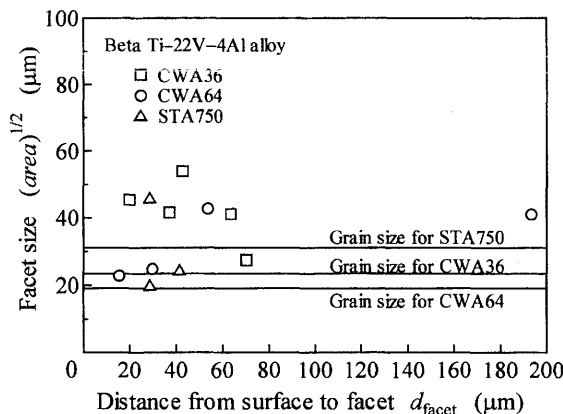


Fig.5. Relationship between facet size and distance from surface to facet.

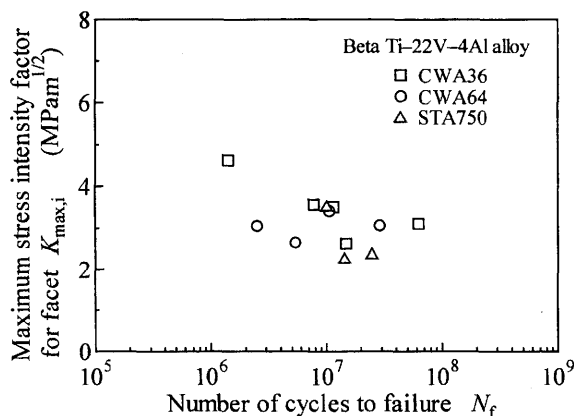


Fig.6. Relationship between maximum stress intensity factor for facet and fatigue life.

約 200 $\mu$ m の深い位置のき裂発生は、積極的な組織因子の関与を示している。また、ファセット寸法はばらついているが  $d$  の 1~2 倍である。このことはファセットの結晶学的な形成を示唆している。

き裂発生点のファセットをき裂と見なしたときの最大応力拡大係数  $K_{max,i}$  と  $N_f$  の関係を Fig.6 に示す。 $K_{max,i}$  と  $N_f$  の間には比較的良好な相関があり、 $K_{max,i}$  の減少に伴って  $N_f$  は増加する傾向がある。

#### 4 結 言

時効前に冷間加工を施すことによって短寿命領域では表面起点型破壊、長寿命領域では内部起点型破壊が現れた。前者の領域では STA 材と比べて疲労強度の顕著な向上が認められ、後者の領域でもわずかな増加が見られた。

(参考文献省略)