

|             |                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------|
| 氏 名(本 籍)    | 下 建 春 (中華人民共和国)                                  |
| 学 位 の 種 類   | 博 士 (工学)                                         |
| 学 位 記 番 号   | 甲 第 42 号                                         |
| 学位授与年月日     | 平成 8 年 3 月 25 日                                  |
| 専 攻         | 生産開発システム工学専攻                                     |
| 学 位 論 文 題 目 | $\beta$ 型 Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金の疲労特性に及ぼす組織の影響に関する研究 |
| 学位論文審査委員    | (主査) 教 授 戸 梶 恵 郎<br>(副査) 教 授 丸 井 悦 男 教 授 長谷川 典 彦 |

### 論文内容の要旨

$\beta$  型チタン合金は、( $\alpha + \beta$ )チタン合金と比較して、比強度が同程度であるが、耐食性および加工性に優れているので、最近特に注目されている。

本研究の目的は、 $\beta$  型チタン合金 Ti-15Mo-5Zr-3Al について、疲労特性に及ぼす組織の影響を系統的に明らかにすることにある。この目的を達成するために、5種類の組織材を準備した。すなわち、時効条件を一定とし、溶体化処理温度のみを変えて(700℃, 735℃, 765℃, 850℃, 1000℃), 溶体化時効処理(STA)を行うことによって、5種類の組織材、すなわち STA700材, STA735材, STA765材, STA850材および STA1000材を作製した。これらの組織は、 $\beta$  変態点以下で溶体化処理された組織材( $T_s < \beta$ -transus の組織材: STA700材, STA735材, STA765材)と  $\beta$  変態点以上で溶体化処理された組織材( $T_s > \beta$ -transus の組織材: STA850材, STA1000材)の2つのグループに分けられる。前者では、初析  $\alpha$  相が存在し、その体積率は溶体化処理温度の上昇に伴い増加する。これに対して、後者では、初析  $\alpha$  相は存在せず等軸  $\beta$  相粒のみから成り、溶体化処理温度の上昇に伴い  $\beta$  結晶粒径は増大する。納入材として丸棒材と板材が準備され、前者は疲労強度特性試験に、後者は疲労き裂進展特性試験に用いた。

丸棒材から作製した5種類の組織材に対して、回転曲げ疲労試験を行い疲労強度特性を調べた。疲労強度に及ぼす  $\alpha$  相量の影響はほとんど認められなかったが、 $T_s > \beta$ -transus の組織材と比較して、 $T_s < \beta$ -transus 組織材の疲労限度は約16%高かった。 $T_s < \beta$ -transus の組織材のき裂発生が遅いこと、またき裂進展において組織の影響が認められなかったことから、 $T_s < \beta$ -transus の組織材の優れた疲労強度特性は、その組織に含まれた初析  $\alpha$  相がもたらす高い疲労き裂発生抵抗に起因していることがわかった。疲労き裂の発生は、 $T_s < \beta$ -transus の組織材においては繰返しすべり変形により生じるのに対して、 $T_s > \beta$ -transus の組織材においては  $\beta$  結晶粒界で生じることが明らかになった。特に、STA850材においてきわめて特徴的なき裂発生挙動を確認した。すなわち、疲労き裂は高応力では試験片の表面で、低応力では試験片の内部で発生した。疲労強度の結晶粒径依存性を Hall-Petch の関係を用いて評価したところ、 $10^5$  回時間強度は Hall-Petch の関係に従うのに対して、疲労限度は従わない。これは、上述したような STA850材のき裂発生機構の応力依存性に関係していることを明らかにした。

板材から作製した5種類の組織材に対して軸荷重疲労試験を行い、疲労き裂進展特性について検討した。STA1000材を除いて、き裂進展特性に及ぼす組織の影響はほとんど認め

られなかった。STA1000材は高いき裂進展抵抗を示し、これは他の組織材と比較して、組織の粗大化による高い閉口レベルに起因していることがわかった。Ti-6Al-4V合金に比較して、本合金は組織にかかわらずき裂進展抵抗がかなり低い。両合金のき裂閉口挙動を調べたところ、本合金はきわめて低いき裂閉口レベルを示し、これは低いき裂進展抵抗の原因であることを明らかにした。各組織材において、疲労き裂進展に及ぼす応力比の影響も調べた。 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験における $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係は、 $R=0.05$ 一定試験における $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係より加速側に位置することがわかった。両者ともにき裂閉口が関与していないので、この結果はき裂進展速度に及ぼす影響因子として、き裂閉口以外の因子が存在していることを示唆している。各組織材に対して、 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験、および $R=0.05$ 一定試験後の破面観察を詳細に行い、それぞれの組織材の引張破面に見られた静的破壊様相( $T_s<\beta$ -transusの組織材ではデンプル、 $T_s>\beta$ -transusの組織材では粒界割れ)が疲労破面にも認められ、試験タイプにかかわらず $K_{max}$ の増加に伴ってその程度も顕著となることがわかった。各組織材の破壊じん性値を測定したところ、その値は約21~48 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で比較的低いことがわかった。 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験では、破壊じん性値と比較して $K_{max}$ が相対的に大きいので、 $K_{max}$ の大きさに依存して静的破壊機構が疲労き裂進展に介在したと考えられる。すなわち、 $K_{max}$ がき裂進展挙動に影響を及ぼし、その結果として $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験における $da/dN-\Delta K$ 関係は、 $R=0.05$ 一定試験における $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係より加速側に位置した。弾性係数 $E$ によって有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}$ を基準化したパラメータ $\Delta K_{eff}/E$ で整理した本合金のき裂進展特性は、鉄鋼、アルミニウム合金および $(\alpha+\beta)$ 型チタン合金とほぼ一致した。

以上、本研究において得られた本合金の静的機械的性質、疲労強度特性および疲労き裂進展特性などを考慮して、実用においてSTA735材(735℃, 1h+500℃, 1000min)が推奨される。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、種々の優れた特性のために広範囲に応用が期待されている $\beta$ 型チタン合金Ti-15Mo-5Zr-3Alの疲労特性に及ぼす組織の影響を系統的に明らかにしている。

まず、時効条件を一定とし、溶体化処理温度 $T_s$ のみを変えて(700℃, 735℃, 765℃, 850℃, 1000℃)、溶体化時効処理(STA)を行うことによって5種類の組織材、すなわちSTA700材, STA735材, STA765材, STA850材およびSTA1000材を得ている。これらは、 $\beta$ 変態点以下で溶体化処理された組織材( $T_s<\beta$ -transus: STA700材, STA735材, STA765材)と $\beta$ 変態点以上で溶体化処理された組織材( $T_s>\beta$ -transus: STA850材, STA1000材)の2つのグループに分けられ、前者は初析 $\alpha$ 相が存在し、その体積率は $T_s$ の上昇に伴い増加する組織であるのに対して、後者は等軸 $\beta$ 粒のみから成り、 $T_s$ の上昇に伴い $\beta$ 粒径が増加する組織である。

丸棒材から作製した上記の5種類の組織材について回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度特性を調べている。疲労強度に及ぼす $\alpha$ 相量の影響はほとんどみられず、 $T_s>\beta$ -transusの組織材と比較して、 $T_s<\beta$ -transusの組織材の疲労限度は約16%高く、これはこの組織に含まれる初析 $\alpha$ 相がもたらす高い疲労き裂発生抵抗に起因していることを明らかにしている。さらに、疲労き裂の発生は、 $T_s<\beta$ -transusの組織材においては繰返しすべり変形により生じるのに対して、 $T_s>\beta$ -transusの組織材においては $\beta$ 粒界で生じることを明らかにしている。特に、STA850材において、疲労き裂は高応力では試験片の表面で、低応力では試験片の内部で発生する興味ある現象を確認している。疲労強度の結晶粒径依存性をHall-Petchの関係を用いて評価し、 $10^5$ 回時間強度はHall-Petchの関係に従うのに対して疲労限度は従わず、これは上述したようなSTA850材のき裂発生機構の応力依存性に関係し

ていることを指摘している。

次に、板材から作製した5種類の組織材に対して軸荷重疲労試験を行い、疲労き裂進展特性について検討している。STA1000材を除いて、き裂進展特性に及ぼす組織の影響はほとんど認められないこと、STA1000材は高いき裂進展抵抗を示し、これは組織の粗大化による高い閉口レベルに起因していること、Ti-6Al-4V合金に比較して、本合金は組織にかかわらずき裂進展抵抗はかなり低く、これは本合金のきわめて低いき裂閉口レベルに起因していることなどを明らかにしている。疲労き裂進展に及ぼす応力比 $R$ の影響も検討し、 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験における $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係は、 $R=0.05$ 一定試験における $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係より加速側に位置することを確認している。両者ともにき裂閉口が関与しないことから、き裂進展速度に及ぼす影響因子として、き裂閉口以外の因子が存在していることを指摘している。各組織材に対して、 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験および $R=0.05$ 一定試験後の破面観察を詳細に行い、それぞれの組織材の引張破面に見られた静的破壊様相( $T_s < \beta$ -transusの組織材ではデンプル、 $T_s > \beta$ -transusの組織材では粒界割れ)が疲労破面にも認められ、試験タイプにかかわらず $K_{max}$ の増加に伴ってその程度も顕著となることを確認している。さらに、各組織材の破壊じん性値を測定し、その値は約21~48 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で比較的低いことを示している。これらの事実に基づいて、 $K_{max}=18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 一定試験では、破壊じん性値と比較して $K_{max}$ が相対的に大きいので、 $K_{max}$ の大きさに依存して静的破壊機構が疲労き裂進展に介在する、すなわち本合金の場合、 $K_{max}$ が疲労き裂進展の支配力学因子のひとつであることを明らかにしている。最後に、弾性係数 $E$ によって有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff}$ を基準化したパラメータ $\Delta K_{eff}/E$ で整理した本合金のき裂進展特性は、鉄鋼、アルミニウム合金および $(\alpha + \beta)$ 型チタン合金とほぼ一致することを確認している。

以上の結果を総合して、 $\beta$ 型Ti-15Mo-5Zr-3Al合金では、STA735材の組織、すなわち735℃、1h+500℃、1000minの熱処理が実用において推奨できることを結論している。

以上のように、本研究は $\beta$ 型チタン合金の疲労特性に関して価値ある知見を得ており、工学的、工業的に意義あるものと判断し、本論文を博士(工学)の学位論文に価するものと認める。