Ti-6Al-4V 合金の超高真空環境における疲労き裂進展特性*

小熊 博幸^{*1}, 中村 孝^{*1}, 脇田 実奈^{*1}Fatigue Crack Propagation Properties of Ti-6Al-4V Alloy
in Ultra High Vacuum EnvironmentHiroyuki OGUMA^{*2}, Takashi NAKAMURA and Mina WAKITA^{*2} Division of Mechanical and Space Engineering,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University,
North 13, West 8, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

To determine the effects of the vacuum environment on fatigue crack propagations, K -decreasing tests with compact tension (CT) specimens were conducted in air and vacuum environments. The test data clarified the fatigue crack propagation rate (da/dN) and threshold stress intensity factor range (ΔK_{th}) for both environments. The da/dN becomes lower and ΔK_{th} becomes larger with decreasing vacuum pressure. However, this tendency was not explained only by the crack closure. Based on fracture surface observations, the crack propagation properties in vacuum were compared with those in air. A few micrometer size granular region was observed on the fracture surface only in the high vacuum ($\sim 10^{-6}$ Pa) and ultra high vacuum ($\sim 10^{-7}$ Pa), but not in the air and medium vacuum ($\sim 10^{-1}$ Pa). The high vacuum environment is one of the necessary conditions for the formation of the granular region, and the fraction of surface coverage of fracture surfaces probably relates to the phenomenon. The formation of the granular region represents the difference of the crack propagation mechanism between in vacuum and in air environments, and the tendency observed in da/dN and ΔK_{th} can be accounted for by the different mechanism.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Granular Region, Surface Coverage, Vacuum, Titanium

1. 結 言

Ti-6Al-4V 合金はチタン合金の中で代表的な合金の一つであり、比強度、耐熱性、耐食性に優れることから、航空宇宙分野を始め多くの分野で使用されている。この合金では、繰返し数が 10^7 回を越える超高サイクル域において、一般的な材料表面を起点とした破壊（表面破壊）ではなく、材料内部を起点とした破壊（内部破壊）が生じる。著者らはこの内部破壊に注目し、主として破面観察に基づき、その疲労き裂進展過程について調べてきた。その結果、内部疲労き裂の起点周囲に、結晶粒よりも微細な凹凸からなる粒状の領域（以下、粒状領域）が形成されることを明らかにした。また、この粒状領域に類似した破面様相が真空中で表面破壊をした試験片の破面上においても観察されたことから、真空環境が粒状領域の形成に影響を与えることが示唆された⁽¹⁾。そこで、真空環境が疲労き裂進展特性に与える影響について詳細を明らかにするた

め、特に粒状領域の形成に着目し、種々の真空圧力下で疲労き裂進展試験を実施した。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材および試験片 供試材の化学成分は、Al: 6.12, V: 4.27, O: 0.16, N: 0.002, C: 0.02, Fe: 0.15, H: 0.0029, Ti: Bal. [mass%]である。分解鍛造→焼なまし→GFM 鍛造の工程で製造された 25mm×50mm×1000mm の板材に、1203K, 3.6ks 保持後空冷, 978K, 7.2ks 保持後空冷の熱処理を施した。組織は $\alpha+\beta$ の2相であり、平均粒径はいずれも 10 μ m である。熱処理後の機械的性質は、引張強さ: 943 MPa, 0.2%耐力: 860 MPa, 伸び: 17%, ビッカース硬さ: 316 Hv である。

疲労き裂進展試験には CT 試験片（幅 25mm, 厚さ 6mm）を用いた。また、試験片を疲労き裂の進展方向が板材の延伸方向（L 方向）に対して直角（T 方向）になるように採取した。予き裂用ノッチは EDM で加工し、長さを 8mm とした。試験片表面を #150~#1500 のエメリー紙で研磨し、機械加工による硬化層を除去した。さらに、疲労き裂の観察面にはアルミナ研磨材により鏡面仕上げを施した。

* 原稿受付 2009 年 9 月 28 日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)。

E-mail: Hiroyuki.Oguma@eng.hokudai.ac.jp

Table 1 Experimental conditions (Vacuum pressures)

MV (Medium vacuum)	1.3×10^{-4} Pa
HV (High vacuum)	2.7×10^{-5} Pa
UHV-A (Ultra high vacuum)	1.6×10^{-6} Pa
UHV-B (Ultra high vacuum)	3.0×10^{-7} Pa
	4.7×10^{-7} Pa

2・2 実験条件 ASTM E647-00 に準拠し、荷重漸減試験を実施した。試験環境は室温・大気中ならびに真空中（4 条件）とした。真空中における 4 条件について、真空圧力を表 1 に示し、以下では MV, HV, UHV-A, UHV-B と呼ぶ。試験には電気油圧サーボ試験機を用いて、応力比は $R=0.1$ 、周波数は $f=60\text{Hz}$ とした。真空中の試験はターボ分子ポンプで排気した真空チャンバー内で実施した。き裂長さの測定にはデジタルマイクロスコープ（スカラ株式会社, HDM-2100, 200 倍）を用いた。また、き裂開閉口を背面ひずみ除荷弾性コンプライアンスにより測定した。破面観察には走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた。

3. 実験結果

き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を図 1 に示す。●印が大気中、○印が MV, □印が HV, ◇印が UHV-A, △ならびに▽印が UHV-B の結果である。真空中のき裂進展速度は大気中と比較して低下した。特に $\Delta K = 10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の低 ΔK 領域ではき裂進展速度の低下は著しく、真空中では大気中の $1/3 \sim 1/100$ となった。さらに、真空中の結果については、MV よりも HV, UHV の方がき裂進展速度が低下した。 ΔK_0 は大気中： $4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, MV： $6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, HV： $7.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, UHV(A, B)： $7.8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, となり、真空圧力が低下するほど大きな値を示した。

き裂開閉口の測定結果を用いて有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を求めた。 da/dN と ΔK_{eff} の関係を図 2 に示す。大気中と MV では ΔK_{eff} に対する da/dN の低下の割合はほぼ一定となった。一方、HV や UHV では $\Delta K_{\text{eff}} = 8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ のあたりから進展速度が急激に低下し、大気中や MV の場合と異なる傾向を示した。また、 ΔK_{eff} の下限界値は大気中で約 $1\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となったのに対して、HV ならびに UHV では約 $4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり大気中よりも大きな値となった。このことから、大気中と真空中の疲労き裂進展速度の差はき裂開閉口のみでは説明できないといえる。

4. 破面観察

図 3 に Stage 2a 領域の破面写真の例を示す。一般的に Stage 2a 領域はき裂が結晶粒や粒界の影響を大きく

Fig. 1 Relation between da/dN and ΔK Fig. 2 Relation between da/dN and ΔK_{eff}

受けながら進展する領域であり、荷重漸減試験においては疲労き裂が停留するところの近くに形成される。試験環境を問わず、破面上は凹凸の激しい粗い様相を呈している。しかし、大気中ならびに MV で得られた破面において凹凸は角張っていて、平坦面（ファセット）やすべり模様が明瞭に観察されるのに対して（図中 A, B），HV と UHV で得られた破面では凹凸の角部は丸みを帯び、すべり模様は不明瞭であった。また、HV と UHV の破面上においてのみ、結晶粒径よりも微細な数 μm の粒状の凹凸からなる領域（粒状領域）が観察された。その一例として UHV の破面上に観察された粒状領域の拡大写真を図 4 に示す。以上から、き裂進展、特に粒状領域の形成に真空圧力の違いが影響していることが明らかになった。

5. 考察

著者らはこれまでに粒状領域は高真空あるいはそれに類似した環境で、き裂面の繰り返し接触が生じることにより形成されることを示した⁽¹⁾。大気中と真空

Fig. 3 Fracture surface of Stage 2a region

Fig. 4 Granular region (UHV-B, 4.7×10^{-7} Pa)

中の違いとして、き裂新生面への気体分子の吸着が考えられる。そこで、一定の温度条件において、化学平衡時での飽和吸着量に対する吸着量である被覆率と圧力の関係を示す等温吸着式を用いて、各環境においてき裂新生面にどの程度気体分子が吸着するかを検討する。被覆率の算出には以下に示す Langmuir の等温吸着式を用いた。

$$\theta = \frac{v_a}{v_s} = \frac{P}{P + P_0(T)} \quad (1)$$

$$P_0(T) = k_B T \left(\frac{2\pi m k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{\epsilon}{k_B T} \right)$$

ただし、 θ : 被覆率、 v_a : 吸着量、 v_s : 飽和吸着量、 P : 圧力[Pa]、 h : プランク定数 (6.62×10^{-34} J·s)、 k_B : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)、 m : 吸着分子一つの質量[kg]、 ϵ : 分子一つの吸着エネルギー[J/-]である。

Fig. 5 Relation between fraction of surface coverage and vacuum pressure

吸着分子を全て酸素であると仮定し、吸着熱として Ti-O_2 : 988 kJ/mol を用いて計算した結果を図5に示す。被覆率は 10^5 Pa から 10^{-1} Pa 程度まではほぼ100%となり、それよりも圧力が低下すると急激に減少し、 10^{-6} Pa あたりでは0%に近づく。

破面観察において、粒状領域は HV ならびに UHV で得られた破面でのみ観察された。図5より、被覆率は大気中 (圧力: 約 10^5 Pa) ならびに MV (約 10^{-1} Pa) で100%、HV (約 10^{-5} Pa) で約20%、UHV ($10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa) で5%以下だったと推定される。すなわち、HV と UHV ではき裂新生面に気体分子が吸着していない箇所が存在していたと考えられる。そして、そのような場所でき裂新生面同士の接触ならびに再結合が生じ、粒状領域が形成されたと思われる。また、このような特異な現象が起きていたため、HV と UHV における低 ΔK_{eff} 領域でのき裂進展速度の急激な低下 (図2) が見られたと考えられる。

6. 結 言

真空環境が疲労き裂進展特性に与える影響について詳細を明らかにするため、種々の真空圧力下で疲労き裂進展試験を実施した。その結果、真空圧力が低下するに伴い、き裂進展速度の低下ならびにき裂進展下限界値の上昇が確認された。破面観察の結果、高真空 (10^{-5} Pa 以下) においてのみ粒状領域が形成されることが明らかとなった。また、粒状領域の形成と被覆率との間に相関があることが示唆される。

文 献

- (1) Nakamura, T., Yamashita, R., Oguma, H., Wakita, M., Noguchi, T., Influential Factors on the Formation of Granular Fracture Surface of Interior-Originating Fatigue in Ti-6Al-4V, *Journal of the Society of Materials Science Japan*, Vol.56, No.12 (2007), pp. 1111-1117.