

414 大気中におけるアルミニウム合金 2024-T3 の疲労き裂発生と進展

Fatigue crack initiation and growth Behavior of Aluminum alloy 2024-T3 in air

○ 学 坂 晋二 (富山大・院) 正 石原 外美 (富山大)
 正 五嶋 孝仁 (富山大) 野侯 新一郎(YKK)

Shinji Saka, Sotomi Ishihara, Goshima Takahito and Shinichiro Nomata,
 Toyama University, Gofuku 3190, Toyama, 930-8555, Japan

Key Words: Fatigue, Crack initiation, Crack propagation, Aluminum alloy

1. 緒言

アルミニウム合金 2024-T3 は、軽量化を図る目的で航空機や自動車などのフレーム材に用いられている。これらのフレーム材は、大気中において長期間使用することによってき裂が発生し、最終的に破壊に至ることが知られている。

しかし、これまでアルミニウム合金における数 μm オーダーの微小き裂の研究は、あまりなされていない。

そこで本研究では、2024-T3 材を供試材とし、回転曲げ疲労実験を行い、 $20\mu\text{m}$ よりもさらに短い数 μm オーダーの微小き裂の観察を行い、微小き裂発生メカニズムを調査した。さらに、寿命に対して何割で初期き裂が発生するかも調査した。このことより、より正確な寿命予測法を開発することが目的である。

2. 試験片及び実験方法

2.1 試験片

本実験で用いた2024-T3材の化学成分、機械的性質は、Table 1, Table 2に表したとおりである。

Table 1 Chemical Component wt(%)

Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Al
4.25	1.32	0.56	0.25	0.12	Bal.

Table 2 Mechanical property

Yield Strength	Tensile Strength	Elongation
345MPa	485MPa	17.0%

試験片は、納入材よりFig.1に示す試験片形状まで機械加工し、作成した。試験片の観察部である最小径部をエメリー紙#600, 800, 1000, 1500と粗さの順に研磨した後、ダイヤモンドペーストMDP-2を用いて鏡面に仕上げた後、実験に供した。

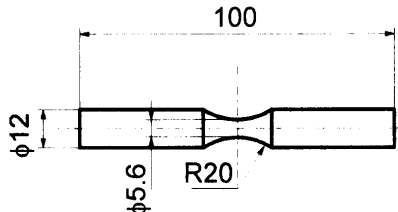


Fig. 1 Dimension of the fatigue specimen

2.2 実験方法

本研究で用いた疲労試験機は片持ち回転曲げ疲労試験機であり、応力繰返し速度30Hzのもとで実験を行った。

き裂発生と進展特性を調査するために用いた応力振幅は、 $\sigma_a=300\text{MPa}$, 250MPa , 200MPa であり、一定の時間ごとに実験を中断し、試験片表面のレプリカを採取するレプリカ法を用いて調査した。その得られたレプリカを光学顕微鏡で100, 200, 500倍の倍率で $10\mu\text{m}$ 程度まで観察し、それ以下の長さ

のき裂については、SEMや走査型プローブ顕微鏡(SPM)を用いて観察した。

3. 実験結果

3.1 S-N線図

Fig.2は、2024-T3の大気中におけるS-N線図を示したものである。Fig.2より、 $\sigma_a=300\text{MPa}$ では 1×10^5 cycle, $\sigma_a=250\text{MPa}$ では 1×10^6 cycle, $\sigma_a=200\text{MPa}$ では 1×10^7 cycleで破断に至っていることがわかる。

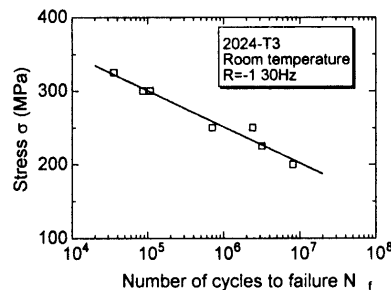
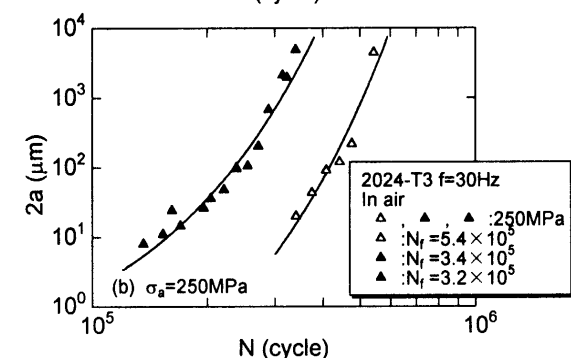
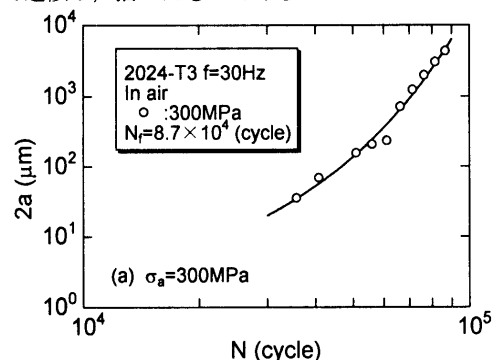


Fig.2 S-N curve for the 2024-T3 alloy

3.2 き裂進展特性

Fig.3は疲労過程の連続観察から得られたき裂進展曲線を示したものである。Fig.3(a)は $\sigma_a=300\text{MPa}$, Fig.3(b)は $\sigma_a=250\text{MPa}$, Fig.3(c)は $\sigma_a=200\text{MPa}$ におけるき裂進展曲線を示している。また、図中の実線は実験データを最小二乗法によって近似し、描いたものである。



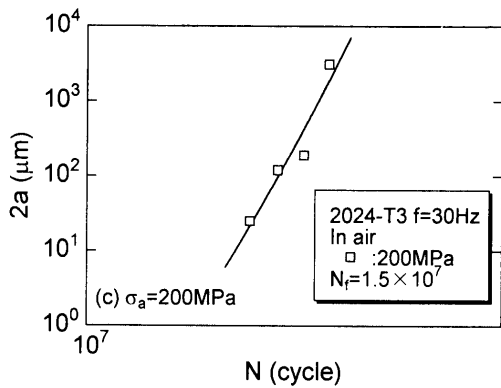


Fig.3 Crack growth curve in laboratory air

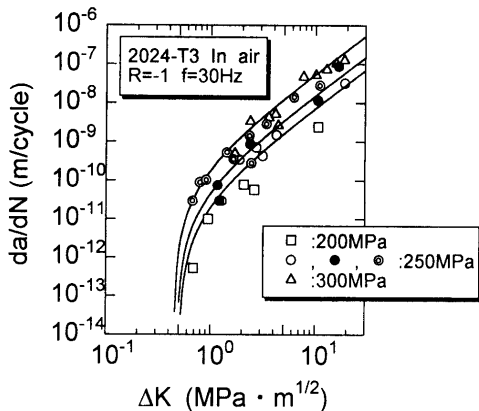


Fig.4 Relationship between crack growth rate da/dN and stress intensity factor range ΔK

き裂進展線図より、き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を求め、Fig.4 に示す。但し ΔK の計算には次式 eq.(1)を用いた。

$$\Delta K = 1.04Y\sigma_a\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここで、Yは補正係数であり、き裂形状を半円と仮定しY=0.73としている。また1.04は試験片形状に基づく応力集中係数である。a、σ_aはそれぞれき裂半長並びに応力振幅を示している。図よりき裂進展速度と応力拡大係数幅との間には予想されるように応力依存性があることが分かる。図中の曲線は各応力振幅における近似曲線を示している。

き裂進展速度の ΔK による整理は応力振幅依存性を示すので、次にA.J.McEvilyらが提案している次式で示されるMパラメータによる整理を試みる。

$$M = \left[\sqrt{\pi_e \left(\sec \frac{\pi \sigma_{\max}}{2 \sigma_y} + 1 \right)} + Y \sqrt{\pi \left(\sec \frac{\pi \sigma_{\max}}{2 \sigma_y} + 1 \right)} \right] \Delta \sigma - (1 - e^{-k\lambda}) (K_{OP \max} - K_{\min}) - \Delta K_{effh} \quad (2)$$

eq. (2) の右辺第一項は微小き裂領域におけるき裂進展に対する応力コントロールの特性を考慮したものであり、第二項は微小き裂先端の弾塑性特性を考慮した項、また第三項はき裂閉口を考慮したものである。最後の項は有効応力拡大係数の下限界値を示している。

Eq. (2) 中のK_{OP max}、ΔK_{effh}、re、σ_y、kは定数であり、各定数に対してFig.5中に示す値を用いてMを計算した。

Fig.5はき裂進展速度da/dNとM値との関係を両対数グラフ上に示したものである。

Fig5より、da/dNとMの関係には応力振幅依存性が認められず、また両対数グラフ上で傾き2の直線として表されることから次式が成立する。

$$\frac{da}{dN} = 1.1 \times 10^{-10} M^2 \quad (4)$$

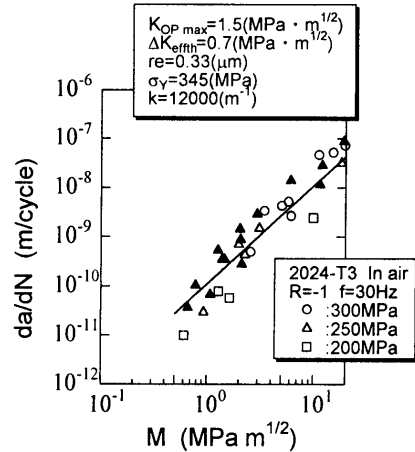


Fig.5 Relationship between da/dN and M

3.3 き裂長さ と 破断寿命 に対する 繰返し 数の 割合 の 関係

き裂長さ2aと破断寿命N_fに対する繰返し数の割合N/N_fの関係をFig.6に示す。図中には3つの応力振幅に対する実験結果がプロットされている。また、図中の曲線はeq. (4)のda/dNとM値との関係を2reから破断が生じる臨界き裂長さ4mmまで積分することによって求めたものである。Fig.6より、き裂長さ2aとN/N_fの関係には明確な応力振幅依存性が認められ、低応力振幅域ほど、寿命の大半が10μm以下のき裂進展期間で占められることがわかる。また式(4)の計算結果と実験データは良い一致を示している。10μm以下の微小き裂については、現在SEM並びにSPMを用いて検討を行っている。

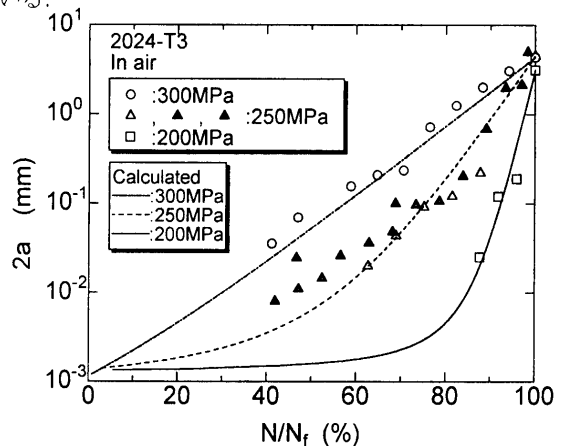


Fig.6 Relationship between 2a and N/N_f

4. 結言

(1)アルミニウム合金2024-T3におけるき裂進展速度と応力拡大係数幅との関係には応力依存性が認められた。しかし、き裂進展速度をM値によって整理すると、応力依存性がなくなり、両対数グラフ上で傾き2の直線として表されM値の有効性が確認された。

(2) き裂長さ2aとN/N_fの関係には明確な応力振幅依存性が認められ、低応力振幅域ほど、寿命の大半が10μm以下のき裂進展期間で占められることがわかる。