ねじり荷重を受ける Al 合金小穴材の
き裂伝ばに及ぼす油環境の影響*皮籠石 紀雄^{*1}, 山田 繁治^{*2}, 宮城 雅夫^{*2}
田中 哲志^{*3}, 北村 一弘^{*4}Effect of Oil Environment on the Fatigue Crack Growth of Al Alloy
Specimens with a Small Blind Hole under Torsional LoadingNorio KAWAGOISHI, Shigeji YAMADA, Norio MIYAGI,
Satoshi TANAKA and Kazuhiro KITAMURA

In order to investigate the influence of oil on crack growth behavior, torsional fatigue tests were carried out on three kinds of age-hardened Al alloy specimens, 2017-T4 extruded, 2017-T4 drawn and 7075-T6 extruded, with a small blind hole, in air and in oil. In both environments, the initial crack growth mode is the macroscopic tensile type in all materials. The crack leading to the final failure, however, is a shear-mode crack which is initiated after the initial tensile-type crack, except in the case of 7075-T6 extruded in air which propagates in the tensile mode. The crack growth rate is higher in oil than in air as a result of the lubricating action of the oil when the crack propagates in shear mode. On the other hand, this rate is decelerated in oil by the oil wedging action when the crack growth mode is the tensile type.

Key Words: Fatigue, Torsion, Al Alloy, Oil Environment, Surface Crack, Crack Growth, Crack Growth Mode, Oil Wedging Action, Oil Lubricating Action

1. 緒 言

ねじり荷重下で平滑材表面に発生した微小き裂が伝ばする場合、伝ば期間のすべてをモード II 形で伝ばする場合と、モード II 形で初期成長した後モード I 形に変化する場合がある。また、同じモード II 形伝ばであっても巨視的に軸方向の場合とそれに直角方向の場合があるなどねじり荷重下のき裂伝ば挙動は複雑である^{(1)~(4)}。

これらの挙動は、組織の異方性も含めた材質や応力レベルに関係した現象であることが指摘されているが必ずしも十分明らかにされたわけではない。

一方、回転曲げ試験の結果によると、一部の Al 合金には特定の応力レベルや環境条件下で、巨視的伝ばのモード変化が起り、それに伴いき裂伝ば速度にも変化が生じることが認められている^{(5)~(8)}。このことから、ねじり荷重下のき裂伝ばでも条件によっては同様な現象が起こることも考えられ、このことを調べることは

各種条件下での疲労強度を評価する上で重要であると考えられる。

そこで本研究では、先に行った回転曲げ疲労試験⁽⁹⁾において、き裂の伝ばモードに変化が認められた Al 合金の中で、油の存在によるものとして 7075-T6 押出し材、応力レベルに依存して変化が生じた 2017-T4 押出し材、さらに比較のため、伝ばモードの変化が認められない 2017-T4 引抜き材の 3 種類の時効硬化 Al 合金を用いて油環境下におけるねじり疲労試験を行い、き裂伝ば速度に及ぼす油環境の影響を検討した。

2. 材料、試験片および実験方法

用いた材料は、時効硬化した状態で納入された 2017-T4 の引抜き材と押出し材、および 7075-T6 押出し材の 3 種類(素材寸法はいずれも直径 20 mm の丸棒)である。表 1、表 2 に各材の化学成分および機械的性質を示す。

試験片は図 1 に示す形状、寸法に機械加工した後、加工影響層を除去し、かつ表面観察を容易にする目的で表面を直径当たり約 40 μm 電解研磨してから実験に供した。

き裂長さの測定はレプリカ法により行ったが、材料や環境により、き裂形態および伝ば方向に相違が生じ

* 平成 4 年 4 月 3 日 第 69 期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 11 月 27 日。

^{*1} 正員、鹿児島大学工学部(〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

^{*2} 正員、第一工業大学(〒899-43 国分市中央 1-10-2)。

^{*3} 正員、九州産業大学(〒813 福岡市東区松香台 2-3-1)。

^{*4} 正員、電源開発(〒104 東京都中央区銀座 6-15-1)。

た。そのため、本論文ではき裂長さを図 2 に示すように各伝ばモードごとに定義し、小穴径 0.5 mm も含む試験片表面に沿う長さとした。

油中における疲労試験は、油(温度約 20°C)を流量約 50 cm³/min の割合で試験片中央部に滴下させる循環方式で行った。用いた油は無添加タービンオイル 32 である。疲労試験は、容量±50 N・m、繰返し速度 2 000 cpm の定荷重式曲げねじり疲労試験機で行った。

3. 実験結果および考察

3・1 き裂伝ば形態 図 3 は、各材の大気中および油中におけるき裂形態を示すレプリカ写真である。すべての材料、環境下で、き裂は試験片軸方向に約 45° 傾いた穴縁に発生し、発生初期においては、巨視的にはモード I 形で成長するが、最終破断に導くき裂の伝ばモードは材料、環境による異なる。すなわち、7075-T 6 押出し材の場合、大気中では完全なモード I 形伝ばとなるのに対し、油中では、最初モード I 形のき裂が発生成長するがそれより後から発生した軸に直角方向のモード II 形き裂のほうが伝ば速度は大きく、その伝ばによって最終破断に至る。2017-T 4 押出し材の場合、大気中、油中ともに最初モード I 形き裂が発生成長するが、その後軸に直角方向へ成長するモード II 形き裂が発生する。そして最終破断に導くき裂はモード II 形であり、7075-T 6 押出し材の油中における成長挙動と同様である。2017-T 4 引抜き材の場合も、他の材料と同様に最初に発生成長するき裂は巨視的にはモード I 方向であるが、その後軸方向にモード変化が起こる。また本材料の場合、巨視的にはモード I の伝ばであっても詳細にみると、軸方向と、それに直角な方向のモード II 形き裂が組織を反映した形で交

互に成長し、き裂の経路は階段状を呈している。すなわち、微視的にはモード II 形伝ばと考えられ、完全なモード I 形伝ばとなる 2017-T 4 押出し材や 7075-T 6 押出し材の場合とは異なる。

3・2 フラクトグラフィ 図 4 に各伝ばモードにおける典型的な巨視的破面を示す。(a)は、モード I 形伝ばにより破壊した 7075-T 6 押出し材の大気中の破面、(b)は、試験片軸に直角方向にモード II 形で破壊した 2017-T 4 押出し材の油中の破面、そして(c)は、試験片軸方向のモード II 形で破壊した 2017-T 4 引抜き材の大気中の破面である。

図 5 は、各伝ばモードに対する SEM 写真である。(a)は、7075-T 6 押出し材の大気中の結果、(b)は、同材の油中の結果、(c)、(d)は、2017-T 4 引抜き材の油中の結果で巨視的にモード I 形破壊した破面と巨視的にモード II 形破壊した破面が示してある。

7075-T 6 押出し材のモード I 形伝ばの場合、明りょうなストライエーションが観察され、巨視的だけでなく微視的にもモード I 形伝ばであることがわかる。一方、モード II 形伝ばの場合、巨視的にモード I 方向へ成長した 2017-T 4 引抜き材の結果も含め、破面はこすり合いにより平坦化しているため断定できないが、いずれの場合も微視的にはモード II 形もしくはモード I 形とモード II 形が混在した破壊機構で伝ばしたものと考えられる。このことは次に述べるき裂の伝ばモードと伝ば速度に及ぼす油の影響の関係からも示唆される。

図 1 試験片の形状・寸法(mm)

図 2 き裂長さの定義

表 1 化学成分

	wt. %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
2017-T4 Extruded	0.42	0.30	4.06	0.73	0.58	0.05	0.02	0.05
2017-T4 Drawn	0.41	0.32	3.87	0.70	0.62	0.04	0.03	0.04
7075-T6 Extruded	0.11	0.26	1.42	0.11	2.46	0.19	5.66	0.05

表 2 機械的性質

	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_u MPa	σ_T MPa	ψ %
2017-T4 Extruded	350	471	638	32.4
2017-T4 Drawn	303	464	718	43.7
7075-T6 Extruded	602	663	799	19.5

3・3 き裂伝ば速度に及ぼす油の影響 図 6 に各材の大気中および油中におけるき裂伝ば曲線を示す。図 6 中には、それぞれのき裂が伝ばするときの巨視的方向が模式的に示してある。前述のように、き裂の伝ばモードや破壊機構は、材料や環境により異なる。その結果き裂伝ば速度にも影響がみられる。すなわち、2017-T 4 押出し材の大気中の結果 [図 6 (b)] からわかるように、最初、巨視的モード I 方向に伝ばするき裂の伝ば速度はその後発生した巨視的モード II 方向のそれより小さい。2017-T 4 引抜き材の場合 [図 6 (c)], 前述のように巨視的にモード I 形伝ばであっても微視的にはモード II 形伝ばを含むため、巨視的にもモード II 形伝ばとなる後から発生するき裂の伝ば速度とほとんど変わらない。

次に、き裂伝ば速度に及ぼす油の影響をみると、巨視的にも微視的にもモード I 形伝ばをする 7075-T 6 押出し材と 2017-T 4 押出し材の初期伝ばでは、油に

図 5 各材の微視的破面写真

図 6 き裂伝ば曲線

よる伝ば速度の低下がみられ、特に 7075-T 6 押出し材の場合の低下は大きい。しかしながら巨視的にはモード I 方向であっても、微視的にモード II 形伝ばを含む 2017-T 4 引抜き材では逆にわずかな加速がみられる [図 6 (c)]。一方、巨視的なモード II 形伝ばにおいては、各材とも油によるき裂伝ば速度の大きな加速が認められ、特に 2017-T 4 引抜き材の結果からわかるように、同じモード II 形伝ばであっても巨視的にもモード II 方向になればその加速は非常に顕著になる。

3・4 考察 以上のように、き裂伝ば速度は油により影響を受け、モード I 形伝ばでは遅くなり、モー

ド II 形伝ばでは加速される。モード I 形伝ばにおけるき裂伝ば速度の抑制は、油のくさび作用⁽⁹⁾によるものと考えられるので、以下ではモード II 形伝ばにおける伝ば速度への油の影響について検討する。

図 7 は、2017-T 4 引抜き材の油中において巨視的にモード I 方向に伝ばした場合とモード II 方向に伝ばした場合のき裂の開口状態を示したもので、 $\tau_a=0$ MPa と $\tau_a=160$ MPa のもとでのき裂先端付近の写真である。いずれの伝ば方向でも、き裂は明らかに開口し、せん断形き裂であっても油はき裂内に浸入しているものと考えられる。また、き裂内への油の浸入は、試

図 7 2017-T 4 引抜き材のき裂開口状態

図 8 環境を切り換えたときのき裂伝ば曲線(2017-T 4 引抜き材, 大気中→油中, 油中→大気中)

験中、相対するき裂面のこすり合いにより生じた摩耗粉と考えられる黒くなった油がき裂内から流出するのが認められたことから確認された。せん断変位下でもき裂が開くのは、破面が凹凸をなしているためと考えられる。

以上のことからモード II 形伝ばでは、油の浸入による摩耗粉の流出およびき裂面のせん断変位における潤滑効果が生じ、き裂伝ば速度が加速されたものと考えられる。

図 8 は、2017-T 4 引抜き材のモード II 形伝ばにおいて、環境を変化させた場合のき裂伝ば速度の変化をみたものである。同図には、図 6 に示した大気中のみおよび油中のみの結果も併記してある。環境を変化させる前後の伝ば速度は図 6 に示した大気中のみあるいは油中のみのそれぞれとよく一致しており、大気中から油中への変化により伝ば速度の加速、油中から大気中への変化により伝ば速度の減速が明確に認められる。

4. 結 論

時効硬化 Al 合金 2017-T 4 押出し材および引抜き材と 7075-T 6 押出し材の小穴材を用いて油中におけるねじり疲労試験を行い、き裂伝ば速度に及ぼす油の影響を調べた。本実験で行った範囲で導かれた主な結論は次のとおりである。

(1) いずれの環境下でも、発生初期のき裂はすべての材料で、巨視的には試験片軸方向に 45° 傾いたモード I 方向へ成長する。しかし、最終破断に導くき裂

は、7075-T 6 押出し材の大気中を除くすべての材料環境下で、後から発生した巨視的モード II 形き裂である。すなわち、き裂伝ば速度はモード I 形よりモード II 形のほうが大きい。

(2) 巨視的にモード II 形で伝ばする場合の伝ば方向は、7075-T 6 押出し材と 2017-T 4 押出し材では試験片軸に直角方向、2017-T 4 引抜き材では軸方向である。

(3) 巨視的にモード I 方向に伝ばするき裂でも、微視的には、7075-T 6 押出し材では引張形破壊であるが、2017-T 4 引抜き材ではせん断形破壊となり、材料により異なる。

(4) き裂伝ば速度に及ぼす油の影響は、引張形伝ばでは減速、せん断形では加速現象として認められる。前者は油によるくさび効果、後者は油による潤滑作用および摩耗粉流出効果から説明される。

終わりに、本実験に用いた材料 2017-T 4 をご提供いただいた神戸製鋼所に謝意を表す。

文 献

- (1) 大路・ほか 3 名, 材料, 25-276(1976), 836.
- (2) 横堀・坂田, 金属誌, 40-10(1976), 988.
- (3) 戸梶・ほか 2 名, 機論, 46-406, A(1980), 547.
- (4) 皮籠石・西谷, 機論, 53-496, A(1987), 2248.
- (5) 村松・ほか 2 名, 軽金属, 23-7(1973), 317.
- (6) 小寺沢・志茂, 材料, 25-273(1976), 535.
- (7) 岡田・ほか 2 名, 材料, 31-343(1982), 383.
- (8) 皮籠石・西谷, 機論, 55-512, A(1989), 703.
- (9) 例えば, 遠藤・ほか 2 名, 機論, 37-300(1971), 1497.