

高湿度中における時効硬化Al合金の疲労特性に及ぼす 時効組織の影響

仮屋 孝二*・皮籠石紀雄**・中村 祐三**

*第一工業大学 機械システム工学科

**鹿児島大学大学院 理工学研究科

Effect of Aging Structure on Fatigue Properties of Age-Hardened Al Alloy in High Humidity

Kohji KARIYA*, Norio KAWAGOISHI** and Yuzo NAKAMURA**

In order to investigate the effect of aging structure on fatigue properties of an extruded bar of age-hardened Al alloy 7075, rotating bending fatigue tests were carried out on T62, T73 and RRA (retrogression and reaging) treated plain specimens in two relative humidity of 25% and 85%. Fatigue strength in low humidity was higher in the order of the RRA, T62 and T73 treated specimens corresponding to the order of static strength. On the other hand, fatigue strength decreased in high humidity in all of the alloys and the decrease was the highest in the RRA treated specimen, which means that the RRA treated alloy is very sensitive to humidity environment. In case of the T73 treated alloy, cracks propagated in shear mode in high humidity and under high stress levels due to the marked texture of the alloy, though tensile mode crack growth is more common in the alloy. Similar crack growth behavior was found in the T62 treated alloy, too. In case of the RRA treated alloy, however, the tendency for a crack to grow in the shear mode was very weak even in high humidity and under high stress levels in spite that the alloy had the same marked texture. The effects of microstructure and humidity on the initiation and propagation of small cracks were marked in all of the alloys.

Key words: Fatigue, Rotating bending, 7075, Aging condition, T62, T73, RRA, Humidity, Crack initiation, Crack propagation

1 緒 言

高強度金属材料は、応力腐食割れ(SCC)に敏感なため、その機構解明と耐SCC改善法に関する研究が数多く行われてきた。たとえば時効硬化Al合金のSCCにおいては、き裂発生過程は応力負荷による不動態被膜の破壊とそこのアノード溶解という機構が一般的であるが、¹⁾き裂伝ばの場合、水素による脆性割れ^{2)~5)}とそれとは逆に水素が転位の移動を助長するという延性破壊^{6)~8)}が考えられ、十分明らかにはされていない。このような状況は腐食疲労においても同様である。すなわち本材料の腐食疲労におけるき裂伝ばはぜい性割れにより加速されることが多数報告されているが、それに対する組織の影響は必ずしも明確になったとは言いがたい。このことに関し、著者らは、時効硬化Al合金7075-T6の押出し材を用いて、結晶粒径を変えた材料の疲労強度に及ぼす湿度の影響を調べ、高湿度下ではぜい性破壊が生じる場合とすべりによる延性破壊が生じる場合があり、それに材料の組織が関係していることを明らかにした。そして脆性破壊と延性破壊のいずれにも水素が影響し、それらの破壊のいずれが生じるかは粒界近傍の水素量が密接に関与している可能性

を指摘した。^{9)~11)}

ところで、耐SCC改善法としてT73処理が有効であることはよく知られており、その理由として過時効により粒界における析出物の粗大化とそれに伴う粒界被覆率の減少や、^{12), 13)}転位密度の低下^{14), 15)}が指摘されている。しかしT73処理の場合、過時効状態となることによる静強度の低下が問題である。これに対し、時効過程で生じる粒内析出物の粗大化を抑制する一方、粒界での析出物は粗大化させ、また高転位密度も低下させることにより、時効処理による強化とSCC特性の向上を両立させる復元再時効(RRA)処理が提案され、¹⁵⁾静強度の低下を抑制した耐SCC材料として評価されている。^{16)~18)}しかしT73処理やRAA処理した材料の疲労特性を調べた研究は必ずしも多くはない。

そこで本研究では、前報で検討した腐食環境下の疲労強度低下が顕著な時効硬化Al合金7075-T6の押出し材を基準材としてT73処理材とRRA処理材を用いて、相対湿度を変えた環境下で回転曲げ疲労試験を行い、疲労特性に及ぼす時効組織および湿度の影響を、疲労過程における試験片表面の連続観察と破面観察を通じて検討した。

2 材料, 試験片および実験方法

用いた材料は市販の時効硬化 Al 合金 7075-T6(直径 22mm の丸棒)の押し出し材である。その化学成分を Table 1 に示す。素材は、T6 の条件で時効処理された状態で納入されたものであるが、本研究では、素材に 460°C で 3h の溶体化処理を行い、次いで 120°C で 24h の時効処理(T6)、110°C、7h その後 180°C、6h の時効処理(T73)および T6 の時効の後 200°C、5min の復元処理を行ってから再び 120°C、48h の時効処理(RRA)の 3 種類の時効処理を行った。以下では各材を、それぞれ T62 材、T73 材および RRA 材と呼ぶ。なお T62 材の結果の一部は先に報告したもの¹¹⁾で、今回さらに追加試験を行った。丸棒の横断面で観察した平均結晶粒径はすべての材料で約 13μm である。

またすべての材料は、面(111)に顕著な集合組織を呈していた。¹⁹⁾

Table 2 に、各材の機械的性質を示す。引張強さは、T62 材に比べ T73 材はこれまで報告されているように過時効により低下し、RRA 材の場合はほぼ等しい。

Fig.1 に、試験片の形状、寸法を示す。ここで用いた試験片は疲労被害の観察を容易にするため、鈍く浅い円周切欠きを有するが応力集中係数は小さく($K_t=1.04$)、ほぼ平滑材とみなせるものである。試験片表面は、エメリーペーパーによる研磨の後、電解研磨で約 20μm 除去した。き裂の発生および伝ばの状況はレプリカ法を用い、光学顕微鏡で観察、計測した。またき裂の形態および破面の観察は SEM を用いて行った。

Table 1 Chemical composition. (wt.%)

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	Ti
0.09	1.47	0.25	0.03	2.56	0.19	5.46	0.03	0.03

Table 2 Mechanical properties.

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_T (MPa)	ϕ (%)	HV
T62	527	673	712	11.3	188
T73	485	649	769	15.5	174
RRA	541	674	838	28.9	192

$\sigma_{0.2}$:0.2% proof stress, σ_B : Tensile strength
 σ_T : True fracture stress, ϕ :Reduction of area

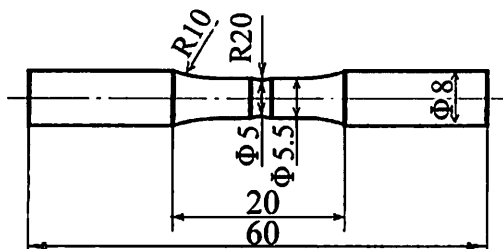


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen.

試験機は小野式回転曲げ疲労試験機(容量 15N・m、繰返し速度約 50Hz)である。試験環境は、相対湿度 RH25% および 85%であり、湿度の制御は、試験機全体をビニールでカバーしたキャビンで覆い、加湿器と除湿器を併用することで行った。このときの湿度は設定値±5%であった。ここで、湿度として RH25%と RH85%を選んだ理由は、これまでの研究で、RH60-70%付近を境に、それ以下では湿度の影響ほとんどないが、それ以上になると疲労強度は大きく低下することを考慮したためである。^{10), 11)} なお、疲労強度に対する湿度の影響は、長寿命になるほど顕著になると考えられるが、本研究では、疲労寿命が 10⁷回までの領域を検討対象とした。

3 実験結果

3・1 疲労強度に及ぼす時効組織と湿度の影響

Fig.2 に、T73 材と RRA 材の両環境下における S-N 曲線を示す。図中には、先に報告した T62 材の結果を比較として曲線のみで示してある(太い実線: T62-RH25%, 太い破線: T62-RH85%)。湿度 25% 中の場合、疲労強度は静強度が高い順に高い。一方湿度 85% の場合、T62 材に比べ T73 材はわずかに高く、RRA 材は逆に低い。すなわち湿度に対する感度は RRA 材が最も高い。この傾向は静強度はもちろん、T62 材に対して T73 材や RRA 材の耐 SCC 特性が優れているということとは必ずしも対応していない。このことはまた、SCC と腐食疲労では時効組織の影響が異なることを示唆している。そこで以下では、各材における疲労強度に及ぼす湿度の影響が、時効組織によりどのように異なるかについて、き裂の発生と伝ば過程に分けて検討する。

3・2 き裂の発生と伝ばに及ぼす時効組織と湿度の影響

Fig.3 は、T73 材と RRA 材の両環境下におけるき裂形態の巨視的写真であり、湿度と応力の影響を示している。湿度 25% 中の場合、両材とも応力に関係なく引張形で伝ばしているのに対し、湿度 85% 中の場合、T73 材は低応

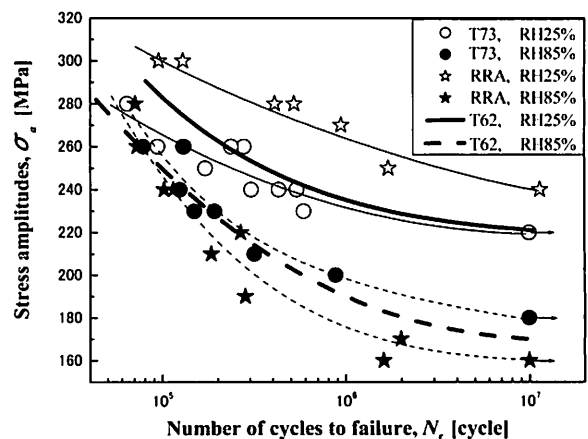


Fig.2 S-N curves.

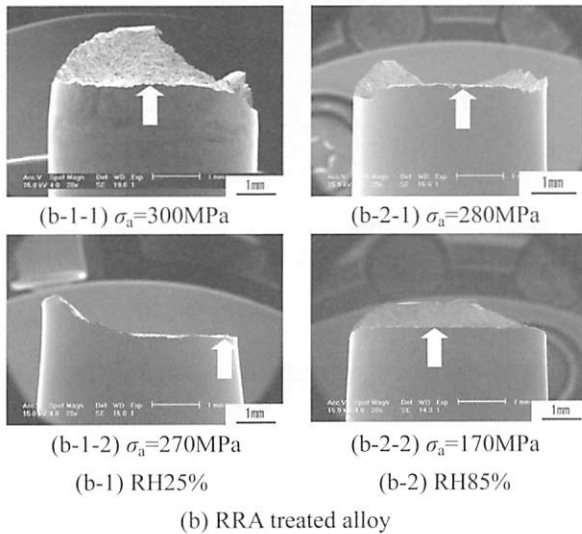
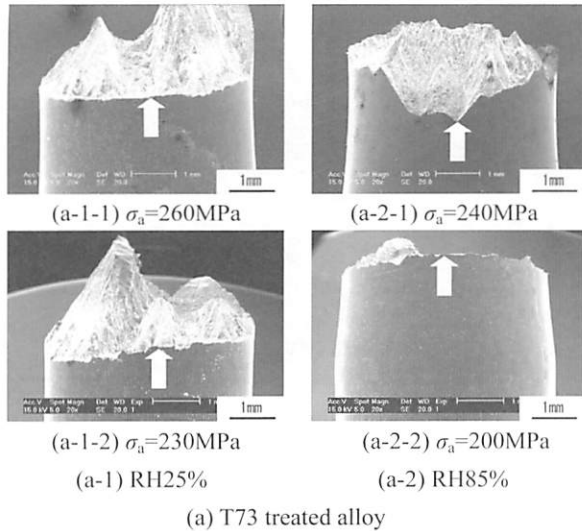


Fig.3 Morphology of crack (↑ crack initiation site).

力では湿度 25%中と同様に引張形伝ばであるが、高応力では発生初期のせん断形き裂が引張形へ遷移することなく、そのまま巨視的にもせん断方向へ伝ばしている（以下本論文では、このようなき裂をせん断形と呼びいわゆるモード I の引張形と区別する）。そして、せん断形き裂の伝ば方向は、試験片軸方向に対し約 35 度であり、これらの結果はすべて先に報告した T62 材¹¹⁾と同様である。また RRA 材の場合も高応力ではせん断形を呈しているが((b-2-1)の⇒印部分、詳細は Fig.4 (b-2)を参照)、その傾向は小さい。そして低応力になると T73 材と同様に引張形伝ばである。

Fig.4 に、T62 材、T73 材および RRA 材のき裂伝ば曲線を示す。Fig.2 に示したように、湿度 25%中の疲労強度は 3 種の材料で大きく異なるので、同図では材料間の比較を容易にするため応力を揃えた比較として、T62 材を基準に(a)T62 材と T73 材の比較、(b)T62 材と RRA 材の比較と分けて示してある。また T62 材と T73 材では高湿度でき裂がせん断形で伝ばする場合もあるので、引張形で伝

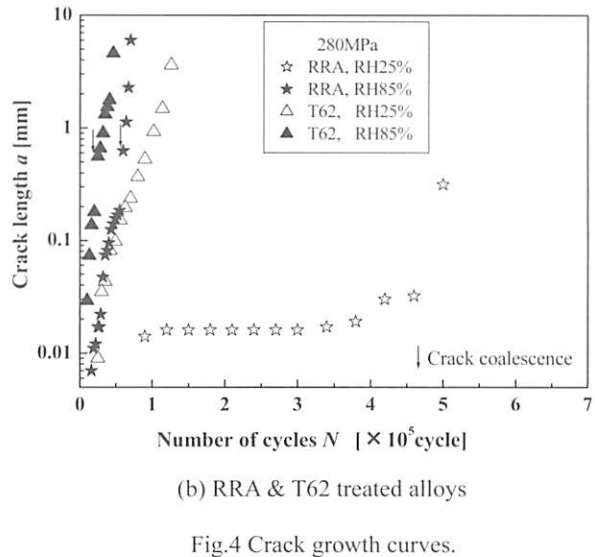
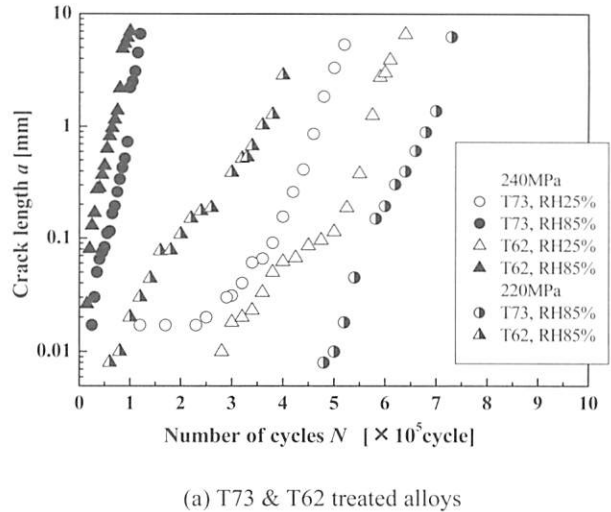
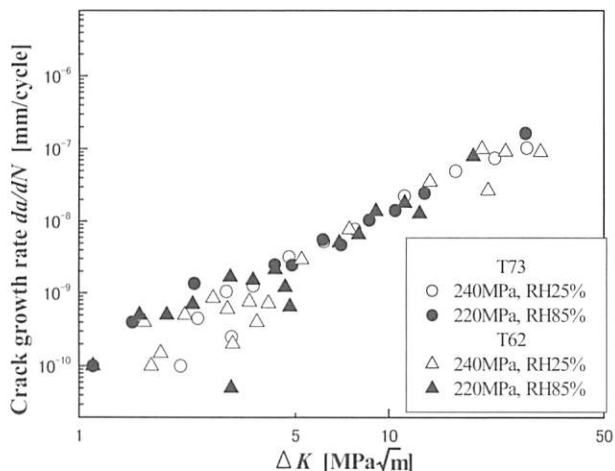


Fig.4 Crack growth curves.

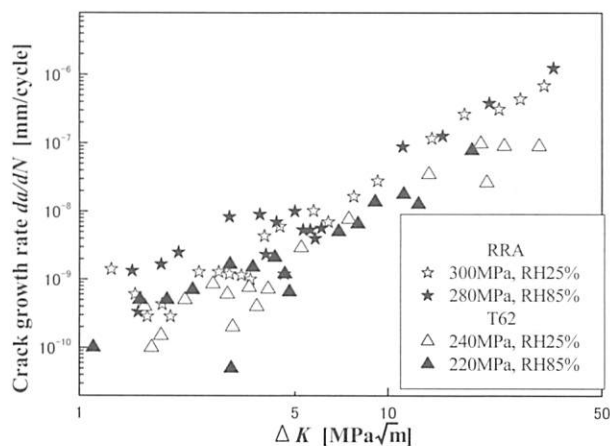
ばする場合 ($\sigma_a=220\text{MPa}$) に加え、せん断形で伝ばする場合 ($\sigma_a=240\text{MPa}$) の結果も示してある。まず時効組織の影響を湿度 25%中の結果でみると、き裂発生は T73 材が最も早く、次いで T62 材そして RRA 材の順である。

また発生したき裂は、T62 材では応力繰返しに伴いほぼ単調に伝ばするが、T73 材と RRA 材の場合発生後しばらく伝ばの停滞期間が認められる。そしてき裂伝ばは、結晶粒程度以上になると単調増加となる。これに対し湿度の影響は 85%中の結果との比較からわかるように、すべての材料でき裂発生は早くなるとともに、湿度 25%中の T73 材と RRA 材でみられた短いき裂の伝ば停滞は消失している。

Fig.5 は、両湿度中のすべての材料において、き裂が引張形で伝ばした場合のき裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数幅 $\Delta K[(2/\pi)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}]$ で近似の関係である。図中(a)は T73 材、(b)は RRA 材の結果であり、これらの図でも Fig.4 と同様に、T62 材の結果も示してある。前述のように、T73 材、RRA 材共にき裂が短い領域に相当する低 ΔK 域では、



(a) T73 & T62 treated alloys



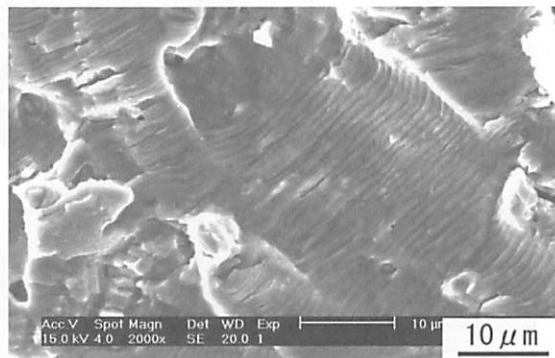
(b) RRA & T62 treated alloys

Fig.5 Crack growth rate against to stress intensity factor range (tensile mode crack).

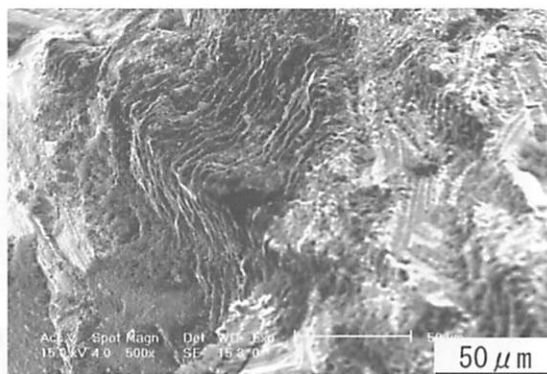
高湿度によりき裂伝ば速度は加速しているが、 $\Delta K = 5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上になると湿度の影響は非常に小さい。

さらにその時のき裂伝ば速度に対する時効組織の影響をみると、T73材とT62材ではほぼ等しく、RRA材で速い。一方高湿度中、高応力下で明確なせん断形き裂となる場合、T73材とT62材のき裂伝ば曲線 (Fig.4)の傾き (き裂伝ば速度) からわかるように、き裂伝ば速度に及ぼす時効組織の影響は小さい。なおせん断形き裂の場合、き裂面の形状が複雑であるためき裂伝ば速度を簡単なパラメーターで比較するのは難しい。

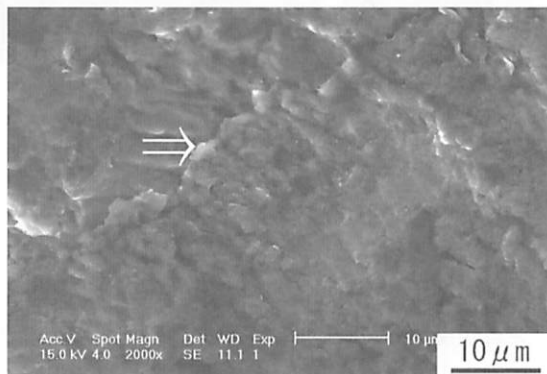
Fig.6とFig.7に、T73材とRRA材の破面写真をそれぞれ示す。湿度25%中の場合、両材ともに破面はストライエーションで占められる。これに対し高湿度になると、T73材の高応力域のせん断形で伝ばした領域では、き裂発生初期ではほとんどがボイドで占められ、き裂の成長に伴い、それは減少し、ボイドとすべり破面の混在した



(a) RH25% (tensile mode crack, $\sigma_a=240\text{MPa}$)



(b-1) Shear mode crack ($\sigma_a=240\text{MPa}$)

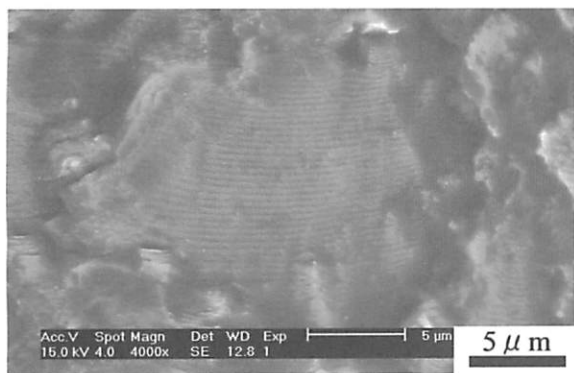


(b-2) Tensile mode crack ($\sigma_a=200\text{MPa}$)

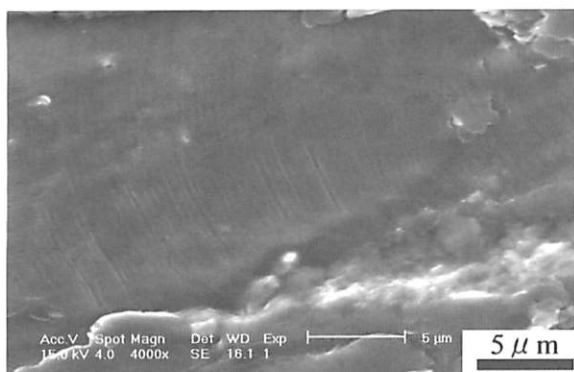
(b) RH85%(⇒brittle facet)

Fig.6 Fracture surfaces (T73 treated alloy).

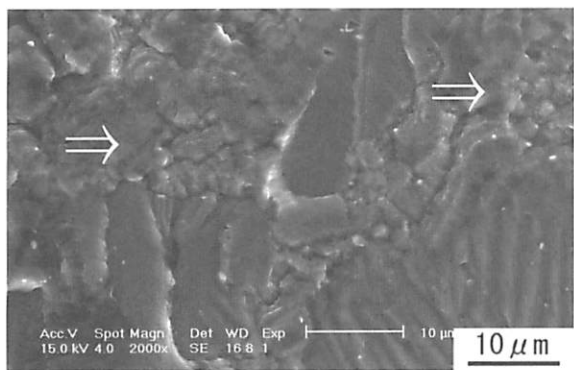
様相を呈する。ここで観察されたボイドは、蛇行すべりに類似しているが、それらは微小なボイドがつぶれた形状であることから、ボイドがせん断応力により変形した結果として形成されたものと考えられる。これに対し低応力域ではストライエーションが支配的で、その中に一部平坦な特徴を有するぜい性的破面 (Fig.6(b-2)中⇒印)が確認される。一方RRA材の場合、高応力域のせん断形伝ばとなるき裂発生後の極初期にT73材と同様のボイドが観察され、その後の引張形伝ばとなる内部はストライエ



(a) RH25% (tensile mode crack, $\sigma_a=300\text{MPa}$)



(b-1) Shear mode crack ($\sigma_a=280\text{MPa}$)



(b-2) Tensile mode crack ($\sigma_a=170\text{MPa}$)

(b) RH85% (⇒brittle facet)

Fig.7 Fracture surfaces (RRA treated alloy).

ーションの中に一部ぜい性的破面(Fig.7(b-1)および(b-2)中⇒印)が観察された。また引張形き裂の伝ばとなる低応力域では T73 材と同様に、ストライエーションが支配的で、その中にも一部ぜい性的破面(Fig.7(b-2)中⇒印)が確認される。なお図は省略するが、T73 材のせん断形伝ばにおける破面をエッチピット法で観察した結果、面(100)であることが確認された。すなわち、T73 材のせん断形き裂の伝ばにおける巨視的および微視的破面さらにその結晶学的特徴は T62 材のそれら¹¹⁾と同様である。

4 考察

以上示したように、時効組織の影響はき裂の発生とその後の初期伝ばにおいて顕著で、それに加えてき裂が結晶粒径程度以上の長さになるとき裂伝ば速度は T73 材と T62 材ではほぼ等しく、RRA 材で大きい。また湿度の影響は各材共に、高湿度によるき裂の発生とその初期伝ばの加速として生じるのみで、安定成長過程でのき裂伝ば速度への影響は非常に小さい。以下では、これらの結果を、時効組織と湿度の影響にわけて検討する。

4・1 き裂発生と伝ばに及ぼす時効組織の影響

Al-Zn-Mg-Cu 系のアルミニウム合金の時効過程は、整合な G.P. ゾーンの形成から η' 中間相を経て非整合な $\eta(\text{MgZn}_2)$ 安定相の形成に変化することが明らかにされており、²⁰⁾時効硬化の主たる要因は、G.P. ゾーンの形成と η' 中間相の析出であり、 η 相になると軟化する。すなわち過時効状態である T73 材の組織は、粒内、粒界共に析出物は T62 材より粗大化する。このことが強度低下の理由の一つであるが、逆に粒界析出物の粗大化に伴う析出物の粒界被覆率の低下が耐 SCC 特性の改善に寄与すると考えられている。¹³⁾一方 RRA 材の場合、粒内析出物は T62 材並に微細で、粒界析出物は T73 材並に粗大化したもので、T62 材と T73 材の優れた特性を併せ持つ組織となっている。¹⁷⁾

このような組織の相違を考慮して、疲労き裂の発生と初期伝ばに及ぼす組織の影響を推定すると、粒内強度が低い順にき裂は発生することになり、T73 材が最も早くき裂は発生する。しかし結晶粒径程度の小さいき裂の伝ばにおいては、T62 材の母相と整合な析出相は転位により容易にせん断されるのに対し、非整合な安定相を有する T73 材では析出物のせん断が困難になるので、その分き裂伝ばへの抵抗が大きく、結果として粒界近傍での伝ば停滞が生じる。また過時効によるすべりの分散、すなわち応力集中の緩和もき裂伝ば抵抗の増加に寄与するものと考えられる。一方 RRA 材の場合、T62 材並の粒内抵抗に加え、粒界は T73 材と同様の抵抗をもつことから、き裂の発生と初期伝ばのいずれにおいても高い抵抗を持つことになる。このような解釈のもとに、Fig.4 のき裂伝ば曲線を見ると、RH25% 中の場合、上記推定に対応して、T73 材のき裂発生は T62 材のそれより早い、き裂発生後、結晶粒径程度の短いき裂の伝ば過程で伝ばの停滞現象が確認される。また RRA 材の場合、き裂の発生時期は T62 材と同程度であり、さらにき裂の発生初期は T73 材と同様なき裂の停滞現象が生じることも理解される。しかしある程度長くなった後のき裂伝ば速度は T73 材や T62 材より大きい。これについては、RRA 材のき裂は T73 材のそれより直線的であることから、き裂開口効果が小さいことに関係しているものと考えられるが、直線的になる理由も含め析出物との関係でさらなる検討を要する。

4・2 き裂発生と伝ばに及ぼす湿度の影響

各材料のき裂発生と初期伝ばにおける湿度の影響も組織の違いから次のように説明できる。先ずすべての材料で、き裂の発生と初期伝ばは、高湿度により促進され、とくに T73 材と RRA 材の湿度 25% 中で認められたき裂伝ばの停滞現象は消失した。これらは、長寿命になるほど試験片表面に腐食生成物が明瞭に観察され、しかもそれは増加する⁹⁾ことから、マトリックスと析出物等間の電位差に基づくアノード溶解に起因したものと理解され、とくに Al 中で卑な電位となる η 相 ($MgZn_2$)²¹⁾ の溶解が大きく影響しているものと考えられる。一方、結晶粒径以上のある程度長いき裂の伝ばにおいては、引張形伝ばの場合 Fig.5 に示したように、すべての材料でき裂伝ば速度に及ぼす湿度の影響は非常に小さい。これは高湿度、低応力の場合、すべての材料でストライエーションの中にぜい性的割れが混在する破面が観察されたが、それらの破面に占める割合は非常に少なく高湿度による加速の原因としては小さいことが理由である。また高湿度下の T73 材や T62 材で顕著に生じたせん断形き裂の伝ばでも低湿度の引張形伝ばよりき裂伝ば速度は大きくなるものの、き裂発生と初期伝ばの加速に比べればその程度は小さく (Fig.4)、寿命低下の主因は引張形伝ばの場合と同様である。

以上、本研究の結果より、SCC で認められる時効組織の影響は腐食疲労では非常に小さいことが明らかになった。これは、SCC における時効組織の影響は主としてき裂伝ば過程で大きいことが、今回の高湿度下の疲労では、アノード溶解に起因してき裂発生と初期伝ばの加速として生じ、数結晶粒以上のき裂伝ば過程でのき裂伝ば速度への影響は非常に小さいことが関係している。そしてそれには両損傷における応力状態 (SCC の場合単調引張負荷であるのに対し、疲労の場合繰返し応力である)、負荷速度、き裂伝ば速度等が異なることに起因しているものと考えられる。いずれにしろ、本研究の結果は、少なくとも SCC における過時効組織の有効性を、高湿度下における疲労の場合にそのまま期待することはできないことを示唆している。

5 結 言

Al-Zn-Mg-Cu 系の Al 合金 7075 の疲労特性に及ぼす時効組織と湿度の影響を検討するため、T73 処理材と RRA 処理材を用いて、相対湿度を 25% と 85% に変えた環境下で回転曲げ疲労試験を行った。そして先に報告した T62 処理材の結果も含め、疲労き裂の発生と伝ばさらに破壊機構について検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

(1) 湿度 25% 中の場合、疲労強度は RRA 材が最も高く、T62 材、T73 材の順に低くなり、静強度の高い順に対応していた。これに対し、湿度 85% の場合、T62 材

に比べ T73 材はわずかに高く、RRA 材は逆に低い。すなわち高湿度に対する感度は RRA 材が最も高い。

- (2) 湿度 25% 中の場合、すべての材料が引張形で伝ばした。これに対し、湿度 85% 中の場合、T73 材、RRA 材共に T62 材と同様に高応力ではせん断形、低応力で引張形であった。しかし RRA 材におけるせん断形き裂の伝ば傾向は非常に小さい。
- (3) 時効組織と湿度の影響は、き裂の発生と初期伝ばにおいて顕著であった。
- (4) 安定成長するき裂の伝ば過程におけるき裂伝ば速度は、T73 材と T62 材でほぼ等しく、RRA 材で速い。また、その時のき裂伝ば速度に及ぼす湿度の影響は各材ともほとんど認められない。
- (5) 湿度 25% 中の場合、すべての材料の破面はストライエーションで占められた。これに対し高湿度の場合、T73 材の高応力域のせん断形で伝ばした領域では T62 材と同様にポイドとすべり破面、低応力域の引張形伝ば部ではストライエーションの中に一部ぜい性的割れが認められた。また RRA 材では、高応力域でせん断形により伝ばするき裂発生初期ではポイドが認められたが、その後の引張形による伝ば領域はストライエーションとわずかなぜい性的破面が、そして完全に引張形伝ばとなる低応力域では同じくストライエーションの中に一部ぜい性的割れが混在する破面であった。

文 献

- 1) Y. Murakami, "Stress-corrosion cracking of aluminum alloys", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.31, No.11, pp.748-757(1981).
- 2) M.O. Speidel, "Stress corrosion cracking of aluminum alloys", *Metallurgical Transactions A*, Vol.68, pp.631-650 (1975).
- 3) G.A. Young, Jr. and J.R. Scully, "The effects of test temperature, temper, and alloyed copper on the hydrogen-controlled crack growth rate of an Al-Zn-Mg-(Cu) alloy", *Materials Transactions*, Vol.33, No.1, pp.101-115(2002).
- 4) T. Ohnishi and Y. Nakatani, "Effects of some factors on stress corrosion susceptibility of Al-Mg alloys", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.26, No.1, pp.18-28(1976).
- 5) S. Kuramoto, M-H, Hsieh and M. Kanno, "Environmental embrittlement of Al-Mg-Si base alloys deformed at low strain rates in laboratory air", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.52, No.6, pp.250-255(2002).
- 6) C.D. Beachem, "A new model for hydrogen-assisted cracking (hydrogen embrittlement)", *Metallurgical Transactions Vol.3*, pp.437-451(1972).

- 7) P.J. Ferreira, I.M. Robertson and H.K. Birnbaum, "Hydrogen effects on the interaction between dislocations", *Acta Materialia*, Vol.46, pp.1749-1757(1998).
- 8) I.M. Robertson, "The effect of hydrogen on dislocation dynamics", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, pp.671-692(2001).
- 9) K. Kariya, N. Kawagoishi, T. Fukudome, Y. Nakamura and E. Kondo, "Effect of humidity on fatigue strength of extruded and age-hardened Al alloy under rotating bending", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.60, No.4, pp.339-344(2011).
- 10) N. Kawagoishi, T. Fukudome, K. Kariya, Q. Chen and M. Goto, "Fatigue strength of age-hardened & extruded Al alloy under high humidity (rotating bending and ultrasonic loading)", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, A*, Vol.76, No772, pp.1651-1658 (2010).
- 11) N. Kawagoishi, K. Kariya, Q. Chen, M. Goto and Y. Nakamura, "Growth mechanism of shear mode fatigue crack of age-hardened Al alloy", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.60, No.10, pp.890-897 (2011).
- 12) J.K. Park, "Influence of retrogression and reaging treatments on the strength and stress corrosion resistance of aluminum alloy 7075-T6", *Materials Science and Engineering, A*103, pp.223-231(1988).
- 13) T. Ohnishi, Y. Nakatani and H. Sakamoto, "Effect of microstructure on stress corrosion susceptibility of Al-Mg alloy", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.26, No.1, pp.8-17(1976).
- 14) A.J. Jacobs, "The role of dislocation in the stress-corrosion cracking of 7075 aluminum alloy", *Transactions of the ASM*, Vol.58, pp.579-600(1965).
- 15) M.N. Tarianker and B. Cina, "Retrogression and re-aging and the role of dislocation in the stress corrosion of 7000-type aluminum alloys", *Metallurgical Transaction, A*, Vol.20A, pp.2087-2092(1989).
- 16) X.J. Wu, M.D. Raizenne, R.T. Holt, C. Poon and W. Wallace, "Thirty years of retrogression and re-aging (RRA)", *Canadian Aeronautical and Space Journal*, Vol.47, No.3, pp.131-138(2001).
- 17) O.S. Es-Said, W.E. Frazier and E.W. Lee, "The effect of retrogression and reaging on the properties of the 7249 aluminum alloy", *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), JOM*, Vol.55, pp.45-48(2003).
- 18) T. Ohnishi and H. Kume, "Scattering in stress corrosion resistance of RRA-treated 7475 aluminum alloy", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.41, No.9, pp.582-589(1991).
- 19) N. Kawagoishi, T. Fukudome, Y. Nakamura, Y. Ohzono and M. Goto, "Propagation of shear mode crack in age-hardened and extruded Al alloy under ultrasonic loading", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.76, No.767, pp.938-947(2010).
- 20) The Japan Society of Light Metals ed., *Microstructures and properties of aluminums (in Japanese)*, p.302(1991).
- 21) Japan Society of Corrosion Engineering ed., *Bousyoku gijyutu binnran (in Japanese)*, p.426(1986).