7075-T6 Al 押出し材の疲労特性に及ぼす組織の影響

Effects of Microstructures on Fatigue Properties of Extruded 7075-T6 Al Alloy

○竹中 真迪 (鹿児島大学)

大坪 伸二 (鹿児島大学 (現 住友軽金属))

西 祐希 (鹿児島大学 (現 サツマ酸素工業))

正 中村祐三 (鹿児島大学)

正 皮籠石 紀雄 (第一工業大学)

正 仮屋 孝二 (第一工業大学)

Masamichi TAKENAKA, Kagoshima University, korimoto 1-21-40, kagoshima-shi, Kagoshima
 Yuki NISHI, Satsuma Sanso Kougyou Co., Ltd., tokaicho 3-42, kagoshima-shi, Kagoshima
 Shinji OTUBO, Sumitomo Light Metal Industries Ltd., sennen 3-1-12, minato-ku, nagoya-shi, Aichi
 Yuzo NAKAMURA, Kagoshima University, korimoto 1-21-40, kagoshima-shi, Kagoshima
 Norio KAWAGOISHI, Daiichi Institute of Technology, kokubuchuo 1-10-2, kirishima-shi, Kagoshima
 Kohji KARIYA, Daiichi Institute of Technology, kokubuchuo 1-10-2, kirishima-shi, Kagoshima

Key Words: 7075-T6 Al alloy, fatigue properties, microstructure.....

1. 緒論

時効硬化形 Al 合金は高強度を有し、軽量であることから、航空機等、軽量性、高比強度を望まれる様々な分野において利用され、特に、Al 中に Zn, Mg, Cu を添加した 7000 系合金はもっとも優れた強度をもつ有用な材料である。一方、こうした Al 合金の疲労特性は腐食環境下において劣化し、大気中の湿度が高い場合にも疲労強度が低下する。筆者らの以前の 7075-T6 押出し材の疲労特性に関する研究¹⁾では、回転曲げ疲労試験、また高サイクル疲労特性を調べるために用いた超音波疲労試験のいずれにおいても、相対湿度 (以下 RH) が 60% 以上において疲労強度が乾燥雰囲気の場合よりも半分近く減少することを明らかにしている。また、このような高湿度雰囲気中における疲労強度劣化には、高速で伝播するせん断形きの裂進展が密接に関わっており、せん断形き裂の方向は、荷重軸に対して常に 35° の角度をなし、試験片全体に及ぶこともあることがわかっている。

これまでの研究では、このような 7075-T6 押出し材の高湿度雰囲気中における疲労強度の低下は、Al 表面において大気中の水分子が反応して形成された H 原子の一部が、材料内に拡散して転位の運動を促進し、低応力で塑性変形を助長する水素促進局所塑性変形 (以下 HELP) が原因と考えている。しかし、多結晶材料において巨視的なすべり方向が一定となるだけでなく、押出し材特有の集合組織がせん断形き裂の形成・進展を助長していると考えている。一方、素材の加工、熱処理の履歴、あるいは疲労試験の条件によって必ずしも、高湿度特有のせん断形き裂が形成されない場合もあることがわかってきた²⁾。このことから、高湿度雰囲気中で強度劣化を示す押出し材のき裂伝ばと集合組織の関係を明らかにすることは、こうした違いに関して知見を得る上で重要である。

本研究では、これまで得られている高湿度雰囲気下における 7075-T6 Al 押出し材の疲労特性について組織の影響を調べることを目的として、電子後方散乱回折 (以下 EBSD) ならびに X 線回折 (以下 XRD) を用いて押出し組織について調べ、せん断形き裂の結晶学的幾何学について検討した。

2. 実験方法

Table 1. Composition of 7075-T6 Al.

Element	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Mn	Ti + Zr	Al
Mass fraction (%)	5.46	2.56	1.47	0.19	0.09	0.25	0.03	0.03	bal.

本実験で用いた 7075-T6Al 押出し材は、既に前の研究^{1), 2)}で疲労特性が詳細に調べられたものであり、その組成は Table 1 のようになっている。試験片は、市販材を改めて 733 K の温度で 10.8 ks の時間保持して溶体化処理を行った後、393 K で 86.4 ks の T6 時効処理が施している。この T6 処理による引張特性は、降伏強度 527 MPa、引張強さ 673 MPa、絞り 11.3 % となっており、市販材の降伏強度 630 MPa、引張強さ 691 MPa よりも強度が減少した。疲労試験は、Fig. 1 に示す形状・寸法の試験片を用い、室温で RH を 0%~100% で変化させて、50Hz の回転曲げによって行った。このとき、0% RH は窒素雰囲気中の試験、100%RH は蒸留水中の試験である。EBSD ならびに XRD の解析は、上記の再溶体化・T6 時効材に加えて、比較のため市販材、ならびに 773 K、118.8 ks で再溶体化し同じ T6 時効を施した試験片についても行った。EBSD は電界放出形走査電子顕微鏡 (Hitachi, SU-70) に取り付けられた EBSD 解析装置 (Edax, GE-1) を用いて行い、押出し材の横断面ならびに縦断面の組織を調べた。用いた加速電圧は 15 kV である。なお、EBSD 観察面は切断後、ペーパー研磨、ダイヤモンド研磨、20 nm のシリカパウダーによる研磨を順次行い、さらに 50eV 程度の低エネルギー Ar イオンによる仕上げを行っている。また、XRD 解析は、EBSD 解析を終えた表面について、高速 X 線回折装置 (PANalytical, X'Pert PRO MPD) により Cu K α 線を用いて行った。

3. 実験結果及び考察

Fig. 2 は、降伏強度 σ_y を基準応力として応力振幅 σ_a を規格化した SN 曲線である。また図中の曲線は、

$$\sigma_a = \sigma_{ao} + k \{ (N_f / N_{fo})^m - 1 \}$$

を用いて表したものである。ここで k , m は定数であり、 N_{fo} は 10^7 とし、 σ_{ao} は 10^7 回での耐久限度となる。これより、

Fig. 1 Shape and size of specimen (mm).

50%以下の相対湿度では SN 曲線はほぼ同様であるが、これ以上になると疲労強度は低下し、特に 85%RH 以上で減少が大きく、蒸留水中では耐久限度は降伏強度の 18%まで低下する。破壊の形態も湿度の影響を受け、Fig. 3(a)のように低湿度の場合には引張形のき裂が生じてせん断形へ遷移するのにに対し、高湿度では、Fig. 3(b)のように、高応力レベルでせん断形のき裂が生じて発達する傾向がある。一方、高湿度雰囲気であっても低応力レベルでは巨視的に引張形の破壊モードとなるが、表面にせん断形き裂が多数形成されて合体した結果であると考えられる。Fig. 3(b)より、せん断形き裂の発生は荷重軸に対して傾いており、その角度は 35° であった。この幾何学的特徴はせん断形き裂が伝ばするときも同じであった。

Fig. 4(a), (b)はそれぞれ、EBSD 解析により横断面における表面に垂直な方向と平行な方向の結晶方位を表した IPF マップである。横断面は約 80%が法線が $\langle 111 \rangle$ に近い結晶粒（以下 $\langle 111 \rangle$ 粒）で占められ、残りは $\langle 001 \rangle$ 方位に近い粒（以下 $\langle 001 \rangle$ 粒）で占められていた。またこれらの粒内は多数の亜粒界が存在することがわかる。亜粒界を含めないときの粒径は約 $12 \mu\text{m}$ であり、含めたときには $3.9 \mu\text{m}$ となった。一方、縦断面を観察すると押し出し方向には $\langle 111 \rangle$ 方位の結晶粒が占めていることがわかる（Fig. 4(c)）。ただしこの場合にも詳細に見ると亜粒界が多数含まれている（Fig. 4(d)）。再溶体化処理を行ってない供試材では同じ疲労試験条件で、窒素雰囲気を除き、引張形の破壊が生じることがわかっているが²⁾、この試験片では $\langle 111 \rangle$ 粒の割合は 61%であり、粒径も小さかった。このことより、せん断形き裂の形成と伝ばは、再溶体化処理で $\langle 111 \rangle$ 粒が優先的に成長したこと、ならびに、 $\langle 111 \rangle$ 粒の優先的な配向がせん断形き裂の発生・伝ばと密接に関わっていることが考えられる。また縦断面の $\langle 001 \rangle$ 粒を見ると、周りの $\langle 111 \rangle$ 粒と結晶方位が連続的に繋がっている箇所があることがわかる。このことから、方位が連続した $\langle 001 \rangle$ 粒と $\langle 111 \rangle$ 粒では方位が共通する特定のすべり系が容易に伝ばすると考えられる。

同様の集合組織の特徴は XRD 解析でも得られたが、供試材では XRD ピークの幅が広がっているのに対して、再溶体化材では狭まっていた（Fig. 5）。このことは、供試材では大量の転位が含まれていたものが、再溶体化処理によって著しく低減されたことを示唆している。また、供試材では疲労試験中に既存の多量の転位がそれぞれのすべり面に沿って運動するが、再溶体化処理材では増殖される転位が上述した $\langle 111 \rangle$ 粒の優先組織において特定のすべり面を運動するものと考えられる。高湿度雰囲気ではこうした集合組織に従う選択的なすべり系が活動において、HELP 機構によって転位の運動が助長されると考えられる。

破面のエッチピット観察から、せん断形き裂は $\{100\}$ 面において $\langle 011 \rangle$ 方向に進展することがわかっている²⁾。本研究で得られた EBSD 解析の結果を用いて結晶学的な幾何学を検討すると、このようなせん断形亀裂伝ばの結晶学的特徴は、 $\langle 111 \rangle$ 粒内の二つのすべり面においてそれと交わるすべり方向に等価なすべりが発生した場合に生じることによって示唆される。また表面に現れる V 字形の対称的なせん断き裂の発生は $\langle 001 \rangle$ 粒内での二つのすべり系が働いた場合に起こりえることが示唆される。

4. 結論

7075-T6 押し出し材の高湿度雰囲気における疲労強度の劣化に伴うせん断形き裂の発生原因について、EBSD ならび

Fig. 2 SN curves normalized by yield strength.

Fig. 3 Fracture manners at 280 MPa (a) in 25%RH and (b) in 85%RH.

Fig. 4 IPF maps. (a) Normal and (b) parallel to transverse cross-section. (c) Parallel to extrusion direction and (d) normal to surface in longitudinal cross-section.

Fig. 5 XRD peaks of (111) reflection.

に XRD 解析を行い、 $\langle 111 \rangle$ 粒の優先的な配向により選択的なすべりが生じやすいことがわかった。また結晶学的幾何学を検討した結果、せん断形き裂の特徴をよく表すことがわかった。XRD 解析の結果からは、低転位密度の場合に集合組織に従った選択的なすべり系の活動が示唆された。こうした集合組織に従う選択的なすべりによりせん断形き裂を伴う高湿度での疲労強度低下が生じると考えられる。

文 献

- 1) 仮屋孝二、他、時効硬化 Al 合金押し出し材の回転曲げ疲労強度に及ぼす大気湿度の影響、材料、60(2011) pp.339-344.
- 2) 仮屋孝二、高強度 Al 合金の疲労特性に及ぼす大気湿度の影響に関する研究、博士論文（鹿児島大学、2012）。