Mg 合金の種々の応力比における疲労寿命分布特性に関する研究

○北川翔^{*1}, 石原外美^{*2}, 柴田博司^{*3}, 五嶋孝仁^{*2}

Distribution of fatigue lives of the Mg alloy under different R ratios

Sho KITAGAWA^{*1}, Sotomi ISHIHARA^{*2}, Hiroshi SHIBATA^{*3}, Takahito GOSHIMA^{*2}

^{*1,2} Univ. of Toyama, Dept. of Mechanical Engineering
3190 Gofuku, Toyama, 930-8555, Japan

^{*3} Toyama National College of Technology, Dept. of Electronic Control Engineering
Shinminato, Toyama, 930-0293, Japan

Magnesium alloy is the lightest metal in practical material, and it has excellent specific strength, machinability, recyclability, and vibration absorption. In particular, extrusion material has been applied to the structures in terms of high-strength material can be obtained. In this study, fatigue tests were carried out in laboratory air using an extruded Mg alloy AZ61 to study the distribution of fatigue lives under the different stress ratios. During the fatigue process of the extruded Mg alloy, cracks were initiated from the inclusions existing on the specimen surface. The extreme-value distribution of the defect sizes was investigated experimentally in detail. The crack propagation behavior was analyzed using a modified linear elastic fracture mechanics parameter, M . The relation crack propagation rate vs. M parameter was found to be useful in predicting fatigue lives at different R ratios. Good agreement between the estimated and the experimental results at each stress ratio was obtained.

Key Words : Magnesium alloy, stress ratio, Material Flaw, Life Prediction, Numerical Simulation

1. 緒 言

マグネシウム(以下 Mg)合金は、実用金属材料の中で最も軽量であり、優れた比強度、切削性、リサイクル性、振動吸収性を有する。特に、押出し材は高強度の材料が得られる点で構造物等に適用されている。

しかし、同材の疲労寿命分布に関する研究は少なく、寿命の分布の度合い、及びその支配因子について不明な点が多い。

本研究では、Mg 合金 AZ61 押出し材の疲労特性を解明することを目的とし、実験室環境下における疲労試験を行い、疲労特性、き裂進展特性、及びこれらに及ぼす応力比 R の影響について調査した。また、き裂の発生起点となる欠陥の大きさ、空間の確率分布を詳細に調査し、石原・A. J. McEvily らが提案している修正線形弾性破壊力学アプローチを適用することで Mg 合金 AZ61 押出し材の疲労特性の解析を行った。

2. 試験片及び実験方法

2・1 試験片 本研究で使用した試験片素材は、Mg 合金 AZ61 押出材である。その化学成分を表 1 に、機械的特性を表 2 に示す。試験片は、最小径部直径 6

mm、つかみ部直径 12 mm、及び最小径部直径 6 mm、つかみ部直径 16 mm の 2 種類の砂時計型形状を有する丸棒試験片を用いた。

Table 1 Chemical compositions of the material used (mass %).

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
6.03	0.57	0.38	0.002	0.008	0.0016	0.0005	Bal.

Table 2 Mechanical properties of the material used.

Tensile strength	0.2 % Proof stress	Elongation	Vickers Hardness
312 [MPa]	285 [MPa]	18.3 [%]	59.5

2・2 実験方法

2・2・1 疲労試験 応力比 $R = -1$ の疲労試験を片持ち回転曲げ疲労試験機を用いて、また、応力比 $R = 0.1$ 、並びに 0.5 の疲労試験を、軸疲労試験機を用いて行った。なお、実験は室温大気中で行った。応力繰返し速度 f は 15~30Hz である。き裂長さの観察はレプリカ法を用いて行った。本研究ではき裂形状を半円表面き裂と仮定し、式(1)により応力拡大係数 K を求めた。

^{*2} 正員、富山大学 (〒930-8555 富山県富山市五福 3190)
E-mail: ishi@eng.u-toyama.ac.jp

$$K = 0.73Y\sigma_a\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここでき裂形状を半円と仮定することにより 0.73 を用いた⁽¹⁾。また, Y は補正係数である。 a はき裂半長, σ_a は応力振幅である。 また, 巨視貫通き裂の進展特性は疲労挙動がほぼ同じと考えられる Mg 合金 AZ31 押し出し材のデータを用いた。

2・2・2 欠陥の確率論的調査 疲労寿命分布を調査した試験片を用いて, 欠陥の確率的分布特性を調査した。 各試験片の表面を鏡面研磨した後, 1 試験片に対して 10 視野(1 視野 = 0.75mm²)を光学顕微鏡により観察することで試験片に含まれる欠陥の面積を調査した。

3. 実験結果

3・1 S-N 線図並びに疲労寿命分布特性 図 1 は本研究で用いた供試材の, 3 つの応力比 $R = -1, 0.1, 0.5$ における応力振幅 σ_a と破断までのサイクル数 N_f の関係を片対数グラフに示したものである。 図中の矢印は試験片が未破断であることを示している。 図よりわかるように, 高応力振幅域における疲労寿命分布はほぼ同一のばらつきを示しているが, 低応力振幅域では疲労寿命のばらつきは大きくなっている。 また, 応力比の増加に伴い, 一定応力振幅下における疲労寿命は, 減少していることがわかる。

Fig. 1 Distribution of fatigue lives.

3・2 き裂伝播特性 図 2 はき裂の連続観察から得た, き裂長さ $2a$ と繰返し数 N との関係を示したものである。 図からわかるように, 疲労き裂は全疲労寿命の初期の段階で発生している。 また, 破壊するまでの過程のほとんどをゆっくりとした速度でき裂が進展していることがわかる。 このことから, 疲労寿命の大半を疲労き裂の伝播が占めていると推察される。

Fig. 2 Crack length $2a$ vs. fatigue life ratio N/N_f .

3・3 欠陥の極値分布特性 図 3 は, AZ61 押し出し材を用いて, 試験片表面の欠陥を調査し, 極値確率紙上にプロットしたものである。 図よりわかるように, 分布形は式(2)で表される図中の破線によって近似することができる。 ここで α, γ はそれぞれ尺度パラメータ, 位置パラメータであり, 最小二乗法で求めるとそれぞれ 3.28, 10.94 となる。 破面の破壊起点の欠陥寸法の分布 (8 点) を同図中にプロットした。 また, 図中の実線は危険面積 (1mm²) 中の欠陥極値分布 (直線) を, 観察面積 (0.75mm²) の分布から, 再帰期間 T を用いて予測したものである。 図から, 再帰期間 T を用いて本試験片形状に対して推測した極値分布 (実線) は, 破壊起点から得た実験の分布と良く一致し, 合理的な結果を与える。

Fig. 3 Extreme-value distribution.

$$F(\sqrt{area_{max}}) = \exp \left[- \exp \left\{ - \left(\frac{\sqrt{area_{max}} - \gamma}{\alpha} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

4. 考察

4・1 修正線形弾性破壊力学パラメータによる微小き裂の進展挙動解析 微小き裂の進展過程は線形破壊力学に対する適用ができないということがこれまでの研究により報告されている⁽²⁾。そこで, 本研究では, 石原・A.J.McEvily らが提案している式(3)に示される修正線形破壊力学パラメータ (M パラメータ)⁽³⁾に基づくき裂進展則の整理を試みた。 式(4)の右辺第一項中の F は微小き裂先端の弾塑性性を考慮したもの, 第

二項はき裂の開閉口挙動を考慮したものである。最後の項は有効応力拡大係数幅の下限界値であり、-1 から 0.5 までの応力比の増加によって、わずかに減少させた。式(4)中の K_{opmax} , k は貫通き裂の進展特性から決定されるパラメータであり、本研究ではこれまでの著者らの結果をもとに決定した。これらのパラメータ値を表 3 に示す。 r は材料中の欠陥を円としたときの平均半径である。

式(3)を r から最終き裂長さ a_c まで積分することにより、き裂伝播寿命を求めることができ、また、寿命初期にき裂が発生することから、き裂発生寿命を無視すると、疲労寿命をき裂伝播寿命に近似することができる。図 4 に導出された寿命曲線を赤の実線にて示す。図より、計算によって求めた寿命曲線と実験値とは各応力比において良い一致を示していることがわかる。また、図 5 に応力振幅と平均応力の関係も示す。図から、応力振幅と平均応力の関係は直線もしくはわずかに上に凸の曲線となった。

4・2 モンテカルロシミュレーションによる寿命分布評価 本研究で行った欠陥の観察結果を用いて、モンテカルロシミュレーションによって疲労寿命分布を評価した。

修正線形破壊力学パラメータによる解析において、材料に含まれる欠陥を初期き裂とみなし、図 3 の実験結果から、実線に対応する極値乱数を発生させた。これらの値を式(3)に代入し積分することにより疲労寿命 N_f を決定した。以上のプロセスを 1 回の疲労実験と対応付けし、一定の応力振幅毎に 1000 回のシミュレーションを行い、疲労寿命の分布を求めた。得られたシミュレーション結果を図 4 に示している。図よりモンテカルロシミュレーションにより予測した疲労寿命分布は実際の実験結果と比較的良好一致を示すことがわかる。

$$\frac{da}{dN} = AM^2 \quad (3)$$

$$M = 0.73Y\sqrt{\pi aF} \cdot \Delta\sigma - (1 - e^{-k(a-r)})(K_{opmax} - K_{min}) - \Delta K_{effh} \quad (4)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\sec \frac{\pi\sigma_{max}}{2\sigma_y} + 1 \right) \quad (5)$$

Table 3 Parameters used for the calculation.

K_{opmax}	r	σ_y	k	σ_{EL}
1.7 [MPa $\sqrt{m}$]	6.41 [μm]	285 [MPa]	16000 [m^{-1}]	155 [MPa]

Fig. 4 Comparison of the simulation results with experimental ones.

Fig. 5 Stress amplitude σ_a vs. mean stress σ_m .

5. 結 言

- (1) 疲労寿命のばらつきは応力の低下に伴い増加する。
- (2) 疲労寿命並びに疲労限度は、一定応力振幅下において応力比の増加に伴い減少する。
- (3) 微小き裂の進展挙動を修正線形破壊力学パラメータ M を用いて解析することによって、種々の応力比に対する S-N 曲線を導出した。解析結果と実験結果の間には良い一致が見られた。
- (4) 極値分布を考慮したモンテカルロシミュレーションを併用することで、疲労寿命分布は予測できる。

文 献

- (1) Murakami Y et al. Stress intensity factors handbook. Oxford: Pergamon Press; 1987.
- (2) M. Endo, A J McEvily. Prediction of the behavior of small fatigue cracks. Materials Science and Engineering A 468-470 (2007) 51-58.
- (3) S. Ishihara, A. J. McEvily, M. Sato, K. Taniguchi, T. Goshima. The effect of load ratio on fatigue life and crack propagation behavior of an extruded magnesium alloy. International Journal of Fatigue 31 (2009) 1788-1