

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560083

研究課題名(和文)欠陥鋭敏構造材の疲労寿命分布評価法に関する研究

研究課題名(英文) Study on evaluation method of distribution of fatigue lives of defect-sensitive materials

研究代表者

石原 外美 (Ishihara, Sotomi)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・名誉教授

研究者番号：60019221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、製造工程で発生する内部欠陥を含む構造材の疲労寿命の分布を、欠陥分布及びき裂の進展挙動を考慮して評価する方法を確立することである。そこでマグネシウム合金AZ61押し材を用いて、極値統計に基づき介在物の分布特性を明らかにした。き裂の進展挙動に関しては巨視貫通き裂と微小き裂を同等に扱うことを目的としたき裂伝播特性の提案を行い、本研究で得られた介在物の分布特性を用いて得られる疲労寿命分布は、試験片サイズや応力比が異なる場合においても適用可能であることを実験結果との比較から実証した。

研究成果の概要(英文)：Fatigue tests under different R ratios were conducted using an extruded Mg alloy. In order to estimate the maximum inclusion area within the dangerous section of the specimen, the extreme-value statistics proposed by Gumbel was utilized. An initial crack length can be estimated by using the distribution of the extreme-value of the inclusion areas with an assumption that inclusion is equivalent to the crack. To analyze the small fatigue crack propagation behavior, a modified linear elastic fracture mechanics parameter, M proposed by McEvily et al was used. The relationship between the crack propagation rate da/dN and M parameter was found to be appropriate in predicting the fatigue lives under different R ratios. Moreover, the distribution of fatigue lives can also be predicted with Monte-Carlo simulation using the distribution of the extreme-value distribution of the inclusion areas and M parameter. The estimated results were in good agreement with the experimental ones.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：疲労 信頼性

1. 研究開始当初の背景

ダイカストマグネシウム合金あるいは押し出しマグネシウム合金は、軽量かつ生産性が良く、また製品精度、比強度も高いため、自動車部品や構造部材として使用することが期待されている。しかしこれらの長所とは別に、ダイカストプロセスや押し出し工程において、欠陥の生成や、非金属介在物の生成が疲労過程でき裂の発生と伝播を促進するために、疲労寿命が大きくばらつくことが知られている。従って、欠陥に基づく疲労破壊寿命のばらつきを考慮した疲労設計法が必要となるが、このような技術はいまだ確立されていない。

2. 研究の目的

本研究は、欠陥を内蔵する材料の疲労寿命分布を調査し、その場合の疲労寿命分布を、き裂の伝播挙動と欠陥分布を考慮して簡便に定量的に評価する方法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 試験片

本研究で使用した試験片素材は、Mg合金 AZ61 押し出し材である。試験片は、最小径部直径 6 mm の砂時計型形状を有する丸棒試験片と、片側切欠きを有する板状試験片を用いた。

(2) 微小表面き裂の進展特性評価

疲労寿命分布、微小表面き裂の進展挙動を 2 種類の砂時計型丸棒試験片を用いて、応力比 $R = -1$ の回転曲げ疲労試験と、 $R=0.1, 0.5$ の引張圧縮疲労試験により調査した。なお、実験は室温大気中で行った。応力繰返し速度 f は 5~30Hz である。き裂長さの観察はレプリカ法を用いた。本研究ではき裂形状を半円表面き裂と仮定し、応力拡大係数 K を求めた。

(3) 巨視貫通き裂の進展特性

巨視貫通き裂の進展特性は片側切欠き試験片を用いて、繰返し速度 $f=5\sim 15\text{Hz}$ のもと三点曲げ疲労試験を行った。疲労き裂は試験片表面を光学顕微鏡及びレプリカ法を用いて観察し、その長さを測定した。き裂閉口の測定には、き裂先端前方に歪みゲージを貼り付け、弾性コンプライアンス法を用いて求めた。

(4) 最大欠陥の確率分布

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 = 0.75mm^2) 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。

4. 研究成果

(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 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、疲労寿命のばらつきは応力の低下に伴い増加しており、一定応力振幅下に

おいては、応力比 R の増加に伴い大きく減少していることがわかる。また、応力比 -1 の結果をみると応力振幅が小さくなるに従い疲労寿命のばらつきは大きくなっている。

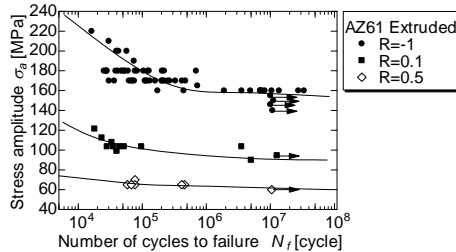


Fig.1 Distribution of fatigue lives.

(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。

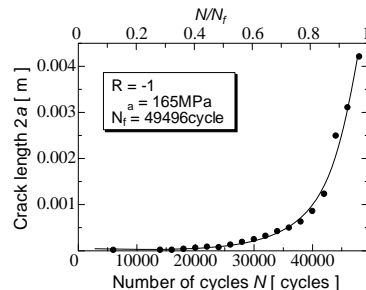


Fig.2 Crack length $2a$ vs. Number of cycle N .

(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(1)で表される図中の破線によって近似することができる。また、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。図中の実線は危険面積 (1mm^2) 中の欠陥極値分布 (直線) を観察面積 (0.75mm^2) 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。ここで式(1)中の λ 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。

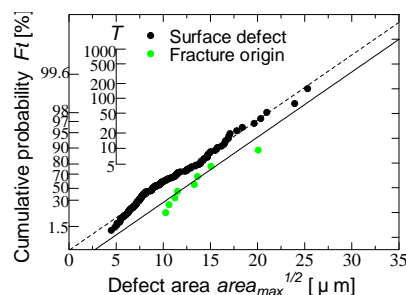


Fig.3 Extreme-value distribution.

$$F(\sqrt{area_{max}}) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{\sqrt{area_{max}} - \gamma}{\alpha}\right)\right\}\right] \quad (1)$$

(4)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

本研究では、式(2)に示される修正線形破壊力学パラメータ(Mパラメータ)に基づくき裂進展則の整理を試みた。式(3)の右辺第一項中のFは式(4)で表される微小き裂先端の弾塑性性を考慮したもので、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る。式(2)、(3)中のパラメータの値を表1に示す。図4は縦軸にき裂進展速度 da/dN 、横軸に算出したMの値をとり両対数グラフ上にプロットしたものである。図には微小表面き裂並びに貫通巨視き裂のデータを示している。なお、巨視貫通き裂については横軸を $M = K_{eff} - K_{effth}$ の関係により整理した。図から、 da/dN とMの関係は両対数上で傾き2の直線として表される。また、本研究では実験プロットのばらつきを考慮するために図中の破線で示すようなAの範囲($5 \times 10^{-9} \sim 1.6 \times 10^{-8}$)を設けた。

式(1)をr(材料中の欠陥を円としたときの半径)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、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5に導出された寿命曲線を実線にて示す。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。

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

$$M = Y\sqrt{\pi a}F \cdot \Delta\sigma - (1 - e^{-k\Delta a})(K_{opmax} - K_{min}) - \Delta K_{effth} \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\sec \frac{\pi\sigma_{max}}{2\sigma_y} + 1 \right) \quad (4)$$

Table 1 Parameters used for the calculation.

K_{opmax}	K_{effth}	γ	k
2.0 [MPa m]	2.0 [MPa m]	285 [MPa]	16000 [m ⁻¹]

(5)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。これらの値を用い、式(2)を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5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。

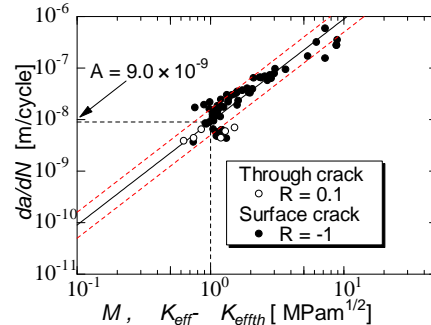


Fig.4 Log-log plot between da/dN and M parameter for the short surface crack, and da/dN vs. $K_{eff} - K_{effth}$ for the through crack.

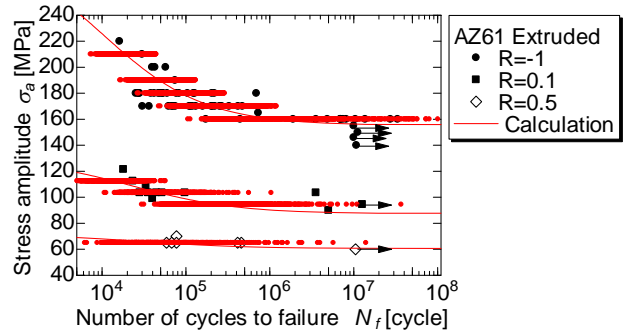


Fig.5 Comparison of the simulation results with experimental ones.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 3 件)

S. Ishihara, T. Namito, S. Yoshifuji and T. Goshima, On Fatigue Lives of Diecast and Extruded Mg Alloys, International Journal of Fatigue 査読有, vol.35, 2012, 56-62

S. Ishihara, S. Kitagawa, M. R. QI, H. Shibata and T. Goshima, Evaluation of distribution of fatigue lives of the extruded magnesium alloy, Acta Mechanica, 査読有, Vol. 224, 2013, 1251-1260

Kenichi MASUDA, Sotomi ISHIHARA, Yuya SUGAI and Arthur J. McEVILY,

Experimental and Numerical Simulation Study of Plasticity-induced and Roughness-induced Fatigue Crack Closure, Advanced Materials Research, 巻:891-892, 2014, 307-312,
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.307, 査読有

[学会発表](計 8 件)

北川翔, 石原外美, 五嶋孝仁, 斉美栄, 欠陥の極値統計による2種類のMg合金の疲労寿命分布特性の評価, 日本機械学会 M&M2011材料力学カンファレンス

北川翔, 石原外美, 五嶋孝仁, 林宏次朗, 極値統計学に基づく高速度鋼の疲労寿命分布特性の評価, 日本機械学会 北陸信越支部 第49期総会・講演会

北川翔, 石原外美, 柴田博司, 細井裕之, Mg合金の種々の応力比における疲労特性と疲労寿命評価に関する研究, 日本機械学会 北陸信越支部 第50期総会・講演会

佐藤大輔, 石原外美, 西脇大貴, 櫛田孝隆, 黒崎英一, 冷間工具鋼SKD11のき裂進展特性, 日本機械学会 北陸信越支部 第50期総会・講演会

北川翔, 石原外美, 柴田博司, 五嶋孝仁, 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, 日本機械学会 M&M2012材料力学カンファレンス

Kenichi Masuda, Sho Kitagawa and Sotomi Ishihara, Evaluation of distribution of fatigue lives for the extruded magnesium alloy under different R ratios, 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids

佐藤大輔, 増田健一, 小熊規泰, 石原外美, 櫛田孝隆, 黒崎英一, 冷間工具鋼SKD11の疲労強度と表面及び内部き裂進

展特性評価, M&M2013 Materials and mechanics conference

増田健一, 棚川佑樹, 石原外美, マグネシウム合金押出材のき裂進展挙動とき裂閉口に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 外美 (ISHIHARA, Sotomi)
富山大学 大学院理工学研究部 (工学)
名誉教授
研究者番号: 60019221

(2) 研究分担者

増田 健一 (MASUDA, Kenichi)
富山大学 大学院理工学研究部 (工学)
講師
研究者番号: 40548153