展伸マグネシウム合金の超高サイクル疲労強度特性 に及ぼす応力比の影響

塩澤 和章^{*1}, 池田 惇^{*2}, 福森 毅^{*3}

Effect of Stress Ratio on Very High Cycle Fatigue Properties of Extruded Magnesium Alloys

Kazuaki SHIOZAWA^{*4}, Atsushi IKEDA and Tsuyoshi HUKUMORI

^{*4} Fukui Univ. of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Gakuen 3-6-1, Fukui-shi, Fukui, 910-8505 Japan

To discuss an effect of stress ratio on very high cycle fatigue properties of the extruded magnesium alloys, axial loading fatigue tests have been performed under three conditions of stress ratio, R , of 0, -1 and -1.5 in laboratory air at room temperature using hourglass shaped specimen of three kind of alloys. Specimens tested under $R=-1$ and -1.5 showed a step-wise $S-N$ curve on which two knees appear while under the test of $R=0$ clear fatigue limit existed on the $S-N$ diagram. From the detail observation of fracture surface, It is suggested that fatigue crack initiation mechanism changed from the twin-induced failure mode at high stress amplitude level to the slip-induced one at low stress amplitude level. This transition was occurred by the relation between the minimum stress during a cycle and the compressive yield stress at which deformation twin occurred. The deformation twin is formed during fatigue process when the minimum stress exceeds the yield stress in compression that is smaller than that in tension.

Key Words : Very High Cycle Fatigue, Stress Ratio, Extruded Magnesium Alloy, Twin

1. 緒 言

マグネシウム (Mg) およびその合金の結晶構造は稠密六方格子構造 (hcp) であり、独立すべり系の数は極めて少なく、塑性変形は結晶のすべりに加えて双晶変形の寄与が極めて大きい。したがって、疲労変形挙動に対して双晶の影響が現れることが指摘され、また、著者らの一人は低サイクル疲労に関する実験を通して検討してきた。また、押出しや圧延によって製造された Mg 合金は鍛造材に比べて集合組織を形成しやすく、押出し材では結晶の c 軸が押出し方向に垂直に配向する。これに起因して双晶変形が生じて引張りと圧縮における降伏応力が異なることになり、顕著な変形異方性を示す。著者らはこれまでに展伸 Mg 合金 AZ80 の超高サイクル域の回転曲げ疲労試験を行い疲労強度特性について検討を行ってきた。その結果、同材は二段折れ曲がり $S-N$ 特性を示し、高応力振幅・短寿命域では双晶に起因するき裂発生、低応力振幅・長寿命域ではすべりに起因するき裂の発生となる

ことを指摘してきた⁽¹⁾。このき裂発生機構の差異は供試材の双晶変形による圧縮降伏応力に依るものであることが示唆された。変形異方性によって生じる引張りと圧縮の降伏応力が異なる場合、疲労強度特性に対して平均応力、すなわち負荷応力比の影響が現れることが予想される。本研究では、展伸 Mg 合金 AZ31 および AZ80 を用いて室温・大気中で応力比 $R=0$, -1 および 1.5 の軸荷重疲労試験を行い、疲労強度特性に及ぼす応力比の影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

2-1 供試材 本研究に用いた試験片材料は Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金 AZ31 および AZ80 であり、化学組成を表 1 に示す。素材は押出し比 99.4、押出し温度 623K、押出し速度 1.5m/min (AZ80)、5m/min (AZ31) の条件で押出した直径 16mm の丸棒である。なお、時効処理の影響を検討するために、押出しをした AZ80 材に 473K で 32h 保持後空冷の T5 処理を行った素材を用意した。時効処理材に T5、未時効材に F の記号を付けて区別して表示する。疲労試験片は図 1 に示す形状・寸法に機械加工した。試験片表面は #2000 までのエメリー紙仕上げおよびバフ仕上げを施して実験に供した。

^{*1} 正員、福井工業大学 (〒910-8505 福井市学園 3-6-1)

^{*2} 関西電力 (株)

^{*3} (株) シマノ

E-mail: shiozawa@fukui-ut.ac.jp

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen tested.

Table 1 Chemical compositions of materials tested (mass %).

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
AZ31	3.10	0.93	0.33	0.001	0.005	0.001	-	Bal
AZ80	8.53	0.57	0.17	0.005	0.012	0.001	0.0008	Bal
AZ61	6.30	0.61	0.28	0.005	0.012	0.001	0.0010	Bal

Table 2 Mechanical properties of materials tested.

	Tensile test			Vickers hardness HV	Grain size $d(\mu\text{m})$	0.2% proof stress (ISLUT)		
	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)			Tension $\sigma_{0.2}^T$ (MPa)	Compression $\sigma_{0.2}^C$ (MPa)	$\sigma_{0.2}^C/\sigma_{0.2}^T$
AZ31-F	209	232	19.2	54.0	88.4	200	65	0.325
AZ80-F	226	329	15.4	62.0	16.0	225	150	0.667
AZ80-T5	246	361	11.4	78.5	16.0	250	220	0.880
AZ61-F	227	298	19.2	59.8	13.7	230	100	0.435

ISLUT: Incremental-Step Loading and Unloading Test

表2に供試材の静的引張試験から得られた強度特性、ビッカース硬さおよび結晶粒径を示す。また、0.1%のひずみ増分を加えながら負荷・除荷（ISLUT）を引張側と圧縮側でそれぞれ行って得られた0.2%耐力を同表中に併記した。引張側と圧縮側の耐力は大きく異なっており、圧縮の降伏時には双晶変形が寄与していることが理解できる。

2・2 実験方法 実験には電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて軸荷重疲労試験を行った。荷重波系は正弦波であり、荷重制御条件下で繰返し速度20~40Hz、室温・大気中の実験室雰囲気中で実施した。負荷応力比 R は0、-1および1.5の3条件とした。

3. 実験結果および考察

3・1 S-N 曲線 実験から得られた AZ31-F および

AZ80-F の $S-N$ 曲線を図2に示す。図より、負荷応力比 R によって異なった $S-N$ 特性を示すことがわかる。すなわち、 $R=0$ の完全片振り条件下では両材共明確な疲労限度が認められるが、 $R=1$ および1.5の条件下では二段折れ曲がり $S-N$ 特性を示す傾向が認められる。AZ31-F の $R=1$ では $S-N$ 曲線に明確な水平部を生じた後、 10^7 回を越えた附近から再度低下して疲労限度が消失している。AZ80-F では $R=1$ および1.5の高応力振幅域に水平部が認められる。この水平部は後述するように、き裂発生機構の違いによって生じるものと考えられる。なお、AZ31-F の $R=1.5$ 条件下では二段折れ曲がり現象が生じていないが、

より長寿命域・低応力振幅域で生じることが予想される。

3・2 破面観察 走査型電子顕微鏡（SEM）による破面の観察結果の典型例を図3に示す。図(a)に示すように、き裂発起点近傍に平坦な領域（領域I）が認められ、その周囲に領域Iを中心とした放射状の筋模様の領域（領域IIA）が観察される。さらにその周囲には複数の筋状模様が形成され、破面単位ごとに筋状の模様の方向が異なっている。このような様相を呈する破面は応力比 $R=1$ および1.5の低応力振幅・長寿命域、並びに $R=0$ の全応力振幅域で観察された。一部の試験片では非金属介在物（Al-Mn系）を起点としたき裂発生が認められた（図(b)）。この場合、介在物から放射状にのびる筋状の模様（領域IIA）が観察された。 $R=1$ および1.5の高応力振幅・短寿命域では図(c)に示すように、き裂発起点近傍には図(a)

Fig. 2 Typical example of $S-N$ curve on AZ31-F (a) and AZ80-F (b) obtained from the axial loading fatigue

(a) AZ80-T5, $R=-1$, $\sigma_a=120\text{MPa}$, $N_f=3.80 \times 10^4$

(b) AZ80-T5, $R=0$, $\sigma_a=110\text{MPa}$, $N_f=9.03 \times 10^3$

(c) AZ80-F, $R=-1$, $\sigma_a=180\text{MPa}$, $N_f=4.12 \times 10^3$

Fig. 3 Typical SEM observations around crack initiation site.

と同様な領域 IIB の筋状模様が観察され、領域 I および IIA は認められなかった。同様の破面様相は回転曲げ疲労試験でも観察されている⁽¹⁾。

3・3 き裂発生形態の分類とき裂発生機構 実験を行った全ての試験片の破面を観察して、領域 I および IIA の有無でき裂発生形態の分類を行った。その結果を図 4 に示す。図の縦軸は負荷最小応力 $\sigma_{\min}$ を表 2 に示した

Fig. 4 Experimental relation between the minimum stress in a cycle divided by 0.2% proof stress in compression and fatigue life.

ISLUT で求めた圧縮の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}^C$ で除した値 $\sigma_{\min}/\sigma_{0.2}^C$ であり、破壊繰返し数 N_f との関係で整理した。図から明らかなように、破面様相は $\sigma_{\min}/\sigma_{0.2}^C=1$ を境として分類される。すなわち、 $\sigma_{\min}/\sigma_{0.2}^C>1$ では破面に領域 I および IIA が観察されず、一方、 $\sigma_{\min}/\sigma_{0.2}^C<1$ ではこれらの領域が観察される。なお、 $R=0$ の実験条件では $\sigma_{\min}=0$ で $\sigma_{\min}/\sigma_{0.2}^C=0$ のため結果を示していないが、全ての破面には領域 I および IIA が観察されている。負荷最小応力が圧縮の耐力を越える場合、結晶のすべりに先行して変形双晶が生じて疲労き裂発生の起点となることが考えられる。図 3(c)のき裂発生起点に観察された筋状模様はこの変形双晶に起因したものであると推察される。一方、負荷最小応力が圧縮の耐力を越えない場合には、変形双晶が生じないために結晶のすべりによって疲労き裂が発生する。図 3(a)の領域 I はこのすべりによって形成されたものと考えられる。 $S-N$ 曲線に認められた二段折れ曲がり現象はき裂の発生機構が双晶からすべりに遷移することによって生じたものと推察できる。 $R=-1$ および 1.5 で生じた $S-N$ 曲線の折れ曲がり負荷最小応力が圧縮の耐力に等しくなる負荷状態で生じることになる。なお、 $R=0$ 条件ではき裂の発生が結晶のすべりによって生じ、すべりによるき裂の発生限界によって明瞭な疲労限度を生じる。

4. 結 言

展伸 Mg 合金の応力比 $R=-1$ および 1.5 条件下の疲労において二段折れ曲がり $S-N$ 曲線が認められた。これは双晶変形と結晶のすべりに起因する疲労き裂発生機構の遷移によるものである。

文 献

- (1) 塩澤, 柏木 他, マグネシウム合金 AZ80 展伸材のギガサイクル疲労挙動とフラクトグラフィ, 機論 A, 75-754 (2009), pp.733-741.