

自動車用マグネシウム合金展伸材料の変形・破壊機構の解明

材料環境部

円城寺隆志 川上雄士 臼井一郎

佐賀大学 理工学部

大野信義 森田繁樹

自動車部品への適用が期待されているAZ31Bマグネシウム合金展伸材の疲労特性に及ぼす組織異方性の影響を検討した。その結果、以下のことが分かった。(1) 疲労限度は圧延方向に対して 0° 、 45° 方向が 95MPa、 90° 方向が 85MPaであった。(2) 疲労試験の結果、 $10^4 \sim 10^5$ 回付近でS-N曲線に折れ曲がりが確認された。(3) 引張および圧縮による繰返し負荷-除荷の際、非弾性的な挙動を示した。(4) 負荷方向によらず非弾性ひずみは増加し、その後、緩やかに減少した。

1. はじめに

地球環境保護の観点から二酸化炭素の排出抑制のために自動車の軽量化が求められている。軽量化に最も有効な手段としては、鉄鋼部材のマグネシウム合金への置換があげられる。強度をあまり必要としない一部の部品では、すでにマグネシウム合金への材料置換が行われており、軽量化が進みつつある。しかし、強度を必要とする構造部材については製造プロセスを含めた材料開発が十分でなく、その多くは実用化には至っていない。この理由として、マグネシウム合金については、自動車の安全性・信頼性の面から最も重要であると考えられる疲労に関する詳細な研究がほとんど進んでいないことが挙げられる。

一般に、マグネシウム合金展伸材は鋳造材に比べ、均質で優れた特性を得ることができる。しかし、展伸材では強い集合組織を形成するために顕著な変形異方性を示し、特に圧縮と引張の耐力比が0.5~0.7程度となることが知られている。著者らはこれまでに、AZ31B (JIS 1種B) マグネシウム合金押出材において疲労限度と低い圧縮耐力との関係を示唆する結果を得ている¹⁾。また、両振り軸力疲労試験において疲労限度の応力振幅であっても応力-ひずみヒステリシスループに擬弾性的な挙動が現れることを

明らかにしてきている。さらに、AZ31BおよびAZ61Aマグネシウム合金押出材の引張および圧縮負荷-除荷時の変形挙動調査において、その擬弾性的な挙動を明らかにした²⁾。これらの結果、すなわち負荷-除荷時において擬弾性的な挙動を示すこと²⁾および顕著な変形異方性を示すことは、疲労特性に影響を及ぼすと考えられる。しかし、マグネシウム合金展伸材の疲労特性に及ぼす組織異方性の影響に関する報告の多くは疲労強度およびき裂進展挙動に関するものであり^{3,4)}、き裂が発生するまでの繰返し変形挙動については不明な点が多い。

本研究では、完全両振り一軸応力振幅下および引張/圧縮繰返し負荷-除荷における応力-ひずみ挙動を記録することにより、AZ31B マグネシウム合金圧延材の疲労特性および繰返し変形挙動に及ぼす組織異方性の影響について調査、検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験試料

本研究では、市販のAZ31B マグネシウム合金圧延材(板厚=15mm)を用いた。化学組成を表1に示す。圧延方向に対して 0° 、 90° および 45° 方向(以下、L、T、および 45° 方向とする)に試験片を加工し、各種実験に用いた。

表1 AZ31B マグネシウム合金圧延板の化学組成 [mass%]

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
3.13	0.98	0.29	0.01	0.005	0.004	0.002	Bal.

表 2 AZ31B マグネシウム合金圧延板の機械的性質

方向	0.2%圧縮耐力 $\sigma_{0.2}$ (圧縮)[MPa]	0.2%引張耐力 $\sigma_{0.2}$ (引張)[MPa]	引張強さ [MPa]	破断ひずみ ε [%]
L	75	145	253	17.5
T	76	128	251	16.9
45 °	77	136	252	20.5

2.2 引張試験および圧縮試験

引張試験には、標点間が 30mm、直径 5mm に機械加工した試験片を用いた。圧縮試験には、直径 10mm、高さ 15mm に機械加工した試験片を用いた。引張および圧縮試験は負荷速度 0.5mm/min、室温で行った。

2.3 疲労試験

疲労試験には標点間が 10mm、直径 5mm に機械加工した試験片を用いた。ロードセル容量 9.8kN の油圧サーボ式疲労試験機（平成 7 年度技術開発研究費補助事業（広域共同研究）補助設備）を用い、応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=10\text{Hz}$ 、室温で行った。応力 - ひずみヒステリシスループは試験片の標点間の表面に箔ひずみゲージを貼付し、応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=0.1\text{Hz}$ にて記録した。

2.4 引張および圧縮繰返し負荷 - 除荷試験

繰返し負荷 - 除荷試験は疲労試験と同様の試験片および試験機を用いた。引張繰返し負荷 - 除荷試験

は 120MPa から 10MPa ずつ増加させ、負荷速度 0.2kN/sec で行った。圧縮繰返し負荷 - 除荷試験は 70MPa から 5MPa ずつ増加させ、負荷速度 0.1kN/sec で行った。ひずみの検出には、標点間部に貼付した箔ひずみゲージを用いた。

3. 結果および考察

3.1 引張試験および圧縮試験結果

表 2 に AZ31B マグネシウム合金圧延板の機械的性質を示す。L 方向の引張の 0.2%耐力は T 方向のそれと比べて 13% 高い値を示した。45° 方向は L および T 方向のほぼ中間の値であった。L 方向、T 方向および 45° 方向の圧縮の 0.2%耐力および引張強さはほぼ同じ値であった。また圧縮の 0.2%耐力と引張の 0.2%耐力の比はいずれの場合も 0.5~0.6 となり顕著な異方性を示した。L 方向および T 方向の破断ひずみは同程度の値を示し、45° 方向のそれは L 方向よりも約 15%、T 方向よりも約 18% 高かった。Ishihara ら³⁾の報告では、引張強さに関しては L 方向に比べ T 方向の方が高い値を示しているが、他の値に関しては本報とほぼ同様の傾向を報告している。また、小林ら⁴⁾の報告は本報と同様の傾向であった。

3.2 疲労試験結果

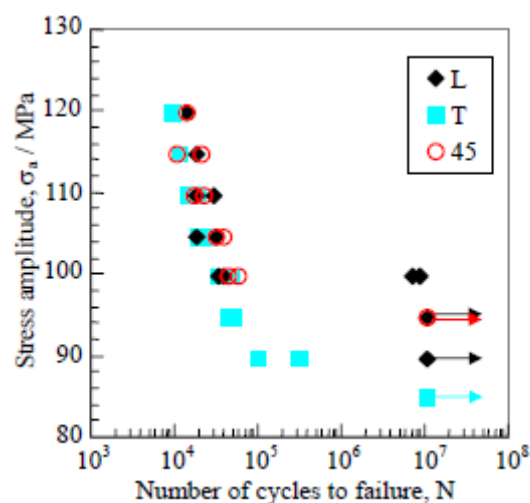


図 1 AZ31B マグネシウム合金
圧延材の S-N 曲線

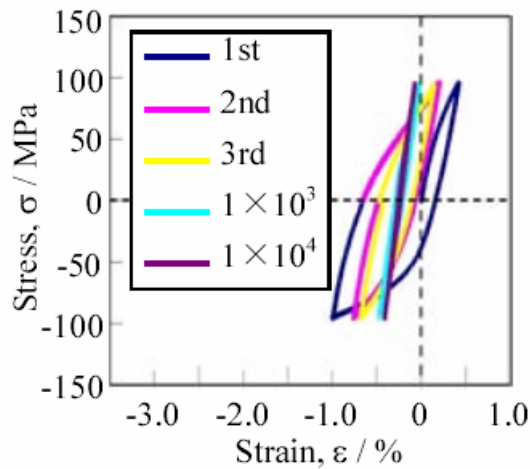


図2 応力 - ひずみヒステリシスループ

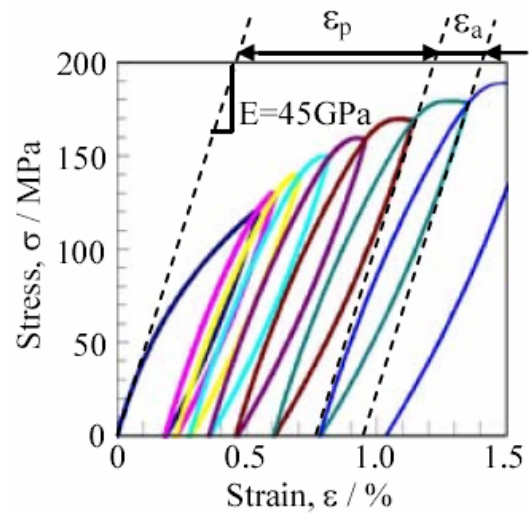


図4 45°方向の引張繰返し負荷 - 除荷の応力 - ひずみヒステリシスループ

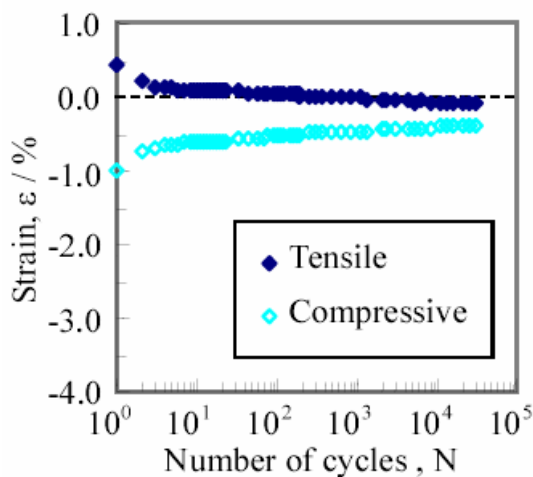


図3 最大ひずみおよび最小ひずみと繰返し数の関係

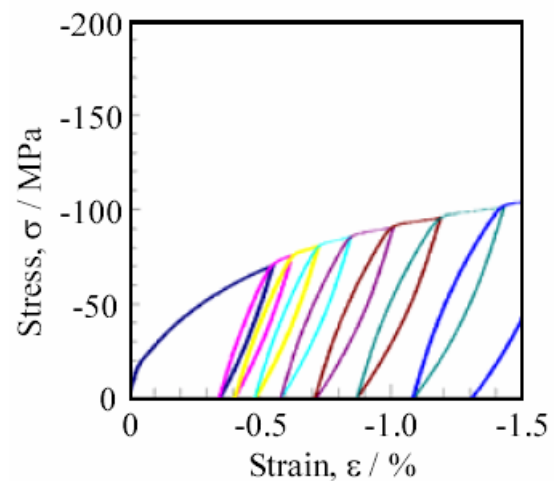


図5 45°方向の圧縮繰返し負荷 - 除荷の応力 - ひずみヒステリシスループ

図1にAZ31B マグネシウム合金圧延材のS-N 曲線を示す。疲労限度はL方向および45°方向がともに95MPa, T方向が85MPaであった。一般的に非金属材料では明確な折れ曲がり(knee)が認められないが, 本研究においてはL方向, T方向および45°方向とも繰返し数 $10^4 \sim 10^5$ 回付近で折れ曲がり確認される。これは過去の多くのマグネシウム合金展伸材の研究結果と同様である^{1,3)}。また, 低サイクル領域においてはL方向, T方向および45°方向とも同様の傾向を示す。このような結果はIshihara ら³⁾によっても報告されている。また, 著者らの前報¹⁾におけるAZ31B マグネシウム合金押出材(引張0.2%耐力: 210MPa, 圧縮0.2%耐力: 105MPa, 疲労限度(軸力疲

労試験): 90MPa)と比較すると, 圧延材の引張および圧縮の0.2%耐力が低いものの, 疲労限度はほぼ同程度である。

図2に疲労限度である応力振幅95MPaでの45°方向の応力 - ひずみヒステリシスループを示す。図3に1サイクルごとの最大ひずみおよび最小ひずみと繰返し数の関係を示す。疲労限度の応力振幅であっても1サイクル目では圧縮負荷時に塑性変形を起こしていることが確認される。その後, 数回の繰返しで加工硬化により徐々に収束する。この傾向はL方向およびT方向でも同様であった。また, 同様の結果はAZ31 マグネシウム合金押出材の大粒径試料においても見られている¹⁾。

3.3 繰返し負荷 - 除荷試験結果

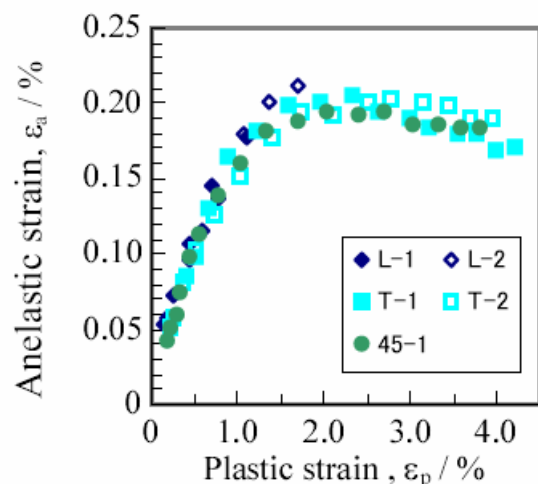


図6 圧縮による繰返し負荷—除荷における塑性ひずみと非弾性ひずみの関係

図4および図5に45°方向の引張および圧縮繰返し負荷 - 除荷の応力 - ひずみヒステリシスループを示す。図4には本報で用いる各特性値²⁾の説明を合せて示す。 ϵ_p は塑性ひずみ、 ϵ_a は非弾性ひずみである。引張および圧縮どちらにおいても除荷時に擬弾性的挙動を示す。AZ31B マグネシウム合金圧延材においては引張も圧縮も同程度の擬弾性的な変形を示した。マグネシウム合金においてこのような擬弾性的挙動を示す原因は{1012}双晶の一部が負荷時と除荷時において可逆的な挙動を示すことによるということが確認されている⁵⁾。また、図6に圧縮による繰返し負荷—除荷における塑性ひずみと非弾性ひずみの関係を示す。塑性ひずみ2.0%付近まで非弾性ひずみは増加し、その後、緩やかに減少する。繰返し負荷 - 除荷の応力 - ひずみヒステリシスループおよび塑性ひずみと非弾性ひずみの関係について、AZ91 マグネシウム合金ダイキャスト材においても同様の傾向が見られている⁵⁾。しかしながら、AZ31B およびAZ61Aマグネシウム合金押出材においては、擬弾性的な変形は、引張方向においては、わずかしき見られず、圧縮方向においては圧延材等と同様の傾向を示した²⁾。これは、圧延材と押出材において形成される集合組織の違いに起因するものであると

考えられる。よって0.2%耐力に差はあるものの、疲労限度に関して押出材と圧延材に大きな差が見られない原因は、この集合組織の差異から生じる繰返し変形挙動の違いによるものと推測される。これは、マグネシウム合金展伸材の繰返し変形挙動と疲労特性に密接な関係が存在することを示めているものと思われる。

4. おわりに

疲労限度はL方向および45°方向が95MPa、T方向が85MPaであった。全ての試験片において折れ曲がり確認された。引張および圧縮による繰返し負荷 - 除荷の際、非弾性的な挙動を示した。負荷方向によらず非弾性ひずみは増加し、その後、緩やかに減少した。

参考文献

- 1) 田中慎吾, 森田繁樹, 浜村幸輝, 大野信義, 川上雄士, 円城寺隆志: 軽金属学会第112回講演概要, (2007), 379.
- 2) 森田繁樹, 田中慎吾, 浜村幸輝, 大野信義, 川上雄士, 円城寺隆志: 軽金属学会第113回講演概要, (2007), 421.
- 3) S. Ishihara, Z. Nan, T. Goshima: Materials Science and Engineering A, 468-470 (2007), 214.
- 4) 小林康男, 高野知行, 石川圭介: 軽金属学会第96回講演概要, (1999), 81.
- 5) C. H. Cáceres, T. Sumitomo and M. Veridit: Acta Materialia, 51 (2003), 6211.