種々のひずみ速度条件下における AZ31 マグネシウム合金の高温塑性変形特性

High-Temperature Plastic Deformation of AZ31 Magnesium Alloy
under Various Strain Rate Conditions

○ 久保山 裕満 (三重大院)

正 稲葉 忠司 (三重大工)

正 吉川 高正 (三重大工)

Hiromitsu KUBOYAMA Department of Mechanical Engineering, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan

Tadashi INABA, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan

Takamasa YOSHIKAWA, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu 514-8507, Japan

Key Words: AZ31 Magnesium alloys, Super plasticity, Strain Rate, Yield surface, m value, Jump test

1. 緒言

現在、軽金属材料としてマグネシウム合金に対する期待が高まっている。マグネシウムは、実用金属の中でも非常に軽量で、高い比強度を有している。これらの特徴により、軽量化による低燃費・省エネルギー化を実現できる自動車構造用材料として応用・開発が進められている。また、電磁波シールド性を有することから、軽量で高強度なケーシング材としてノートパソコンなどの電子機器に実用展開されている⁽¹⁾。しかしながら、マグネシウム合金は結晶構造が稠密六方格子であるため、すべり面が少なく、塑性加工が困難である。そのため、マグネシウム合金を用いた製品のほとんどは鋳造に頼っており、製品形状やコストの点から産業応用が制限されているのが現状である⁽²⁾。以上のような問題を解決するために、塑性加工の観点から超塑性現象を利用した成形法が注目されている。超塑性現象とは、数十 μm 以下の微細な結晶粒で成り立った材料が、絶対温度における融点の T_m に対して、 $T \geq T_m/2$ の温度域において、比較的遅いひずみ速度での引張負荷に対して、くびれを生じることなく数百～数千%もの伸びを示す現象である。一般的な延性金属材料の塑性変形が結晶粒の粒内すべりを変形メカニズムとしているのに対し、超塑性変形は結晶粒のすべり面を必要としない粒界すべりが主な変形メカニズムである。超塑性変形のような変形メカニズムを利用することによって、すべり面が極めて少ないマグネシウム合金においても十分大きな塑性変形を期待することができる。これまで、マグネシウム合金の超塑性挙動に対する研究は、主に超塑性現象の発現しやすい 623~723K の温度域で調査されたものが多い。これらの温度域は高温であるため、成形炉や工具等のコスト面で負担が大きくなる。よって、マグネシウム合金の広範な応用展開のためには、より低温域における加工特性を明らかにすることが必要となる。

当研究室では、673K で顕著に超塑性挙動が現れる $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ にひずみ速度を統一し、種々の温度域における変形特性について調査してきた。しかしながら、より複雑で実用的な形状を塑性加工によって成形するためには様々なひずみ速度領域における降伏曲面の提示が必須である。

そこで、本研究では、AZ31 マグネシウム合金に対し、ひずみ速度 6.0×10^{-4} , 6.0×10^{-3} , $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で単軸引張、単軸圧縮、および単純ねじり試験を実施した。その結果から、降伏応力とひずみ速度との相関を検証し、超塑性が発現しやすいと言われている温度域より低温における AZ31 マグネシウム合金の塑性変形メカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験片

本研究では、最も広く実用化されている AZ31 マグネシウ

ム合金(三協マテリアル製)を用いた。本材料は AZ 系マグネシウムでは特に延性に優れ、塑性加工に適した材料である。本材料に各種力学負荷を加えるため、押し出し丸棒($\phi 50\text{mm}$)を切削して、試験片を製作した(図 1)。

供試材の成分は、Mg:95wt%以上, Al:3.06wt%, Zn:0.93wt%, Mn:0.35wt%, および微量成分 Fe, Si, Cu, Ni である。実験前に組織微細化のための熱処理などは一切加えなかった。標線間部の形状は外径 6mm×内径 4mm×標線間距離 15mm で、その両端に R 形状の肩部を有している。また、両端 20mm をねじ切りし、めねじを施した試験機取付治具に固定した。

Fig.1 Shape of specimen

2.2 実験装置および実験方法

本研究では、環境制御型力学試験機(オートグラフ AG-G20kN: 島津製作所製)を用いた。本試験機は、クロスヘッドの上下移動によって試験片に引張負荷および圧縮負荷を与え、試験機下部の旋回機構によってねじりによるせん断力を負荷することができる。また、高温条件を実現するため、最大加熱温度 1073K の電気炉を備えている。高温時の試験片の実体温度を管理するため、試験片標線部に K 型熱電対を取付け、デジタルマルチメータ (34401A: 東洋計測器製)を用いて表面温度を実測した。荷重はロードセルによって計測し、ひずみは高温用箔ひずみゲージ(KFU: 共和電業製)を用いて計測した。

超塑性が発現しやすいと言われている温度域より低い温度域で塑性変形能の可能性を確認するためにひずみ速度急変法による試験(JIS H7007 以下 Jump test)により m 値を調査した。温度条件は 423K, 523K と比較のため 623K, 673K に設定した。初期ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で引張負荷を与え、試験片が降伏するごとに 6.6×10^{-5} , 3.3×10^{-4} , 6.6×10^{-4} , 3.3×10^{-3} , 1.5×10^{-2} , $7.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ と変化した。

定常状態変形における応力 σ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係は

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

で示される。ここで K は定数、m はひずみ速度感受性指数(以下 m 値と表記する)である。また、(1)より、

$$\log \sigma = m \log \dot{\epsilon} + \alpha \quad (2)$$

を用い(α は K と m による定数)、各実験値と前後 3 点から最小二乗近似によって傾き m を求めた。

各種力学試験は、ひずみ速度 6.0×10^{-4} , 6.0×10^{-3} , $6.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ で試験片に引張・圧縮およびねじり負荷を与えた。

3. 実験結果

Jump test の m 値とひずみ速度の相関を図 2 に示す。423K は、ひずみ速度 1.5×10^{-2} で破断した。図 2 から温度の下降とともに、 m 値はいずれも減少していることが確認できる。AZ31 マグネシウム合金の融点の半分 $T_m/2$ ($T_m=903\text{K}$) よりも低い 423K において、ひずみ速度が高速側に移行するにしたがって、 m 値が 0 に近づくことが確認できる。

一方、 $T_m/2$ よりも高温における 523K では、高速側でも比較的高いひずみ速度を有することが確認された。 $T_m/2$ 付近で変形のメカニズムに変化が生じている可能性が示唆される。そこで、超塑性が発現しやすいと言われている温度域よりも低く、塑性加工が実現できる可能性のある 523K での変形特性を調査した。

本研究で調査したひずみ速度域での AZ31 マグネシウム合金に関するポテンシャル面を図 3 に示す。それぞれ (a) $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 、(b) $6.0 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、(c) $6.0 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ の速度条件下で各種負荷経路について力学試験を実施したときの応力-ひずみ曲線から、0.2%耐力を軸力成分(横軸)およびせん断成分(縦軸)にプロットしたものである。縦軸のせん断成分は、Mises の相当せん断応力を用いて $\sqrt{3}\tau$ で示している。また、各グラフには参照のために、引張りの降伏応力を基準とした Mises および Tresca のポテンシャル面を併記してある。

図 3 (a), (b), (c) を比較すると、どのひずみ速度条件下においても引張りと圧縮については対称性が確認できる。せん断応力は、 $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ および $6.0 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ については引張り・圧縮に比べ低応力で降伏するのにに対し、 $6.0 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ については Tresca の降伏理論と同じ応力値を示した。

引張りと圧縮の降伏応力が等しく、せん断応力が Tresca の降伏曲面から予測されるせん断応力より低い降伏応力を示すという特徴は、超塑性現象に特有のものである。超塑性変形のメカニズムは一般に粒界すべりによって支配されているとされる。すなわち、超塑性発現条件下において、せん断応力だけが Tresca の降伏曲面から予測される値よりも低応力に移行したポテンシャル面は、粒界すべりメカニズムが作用した時に特徴的に現れるものと考えられる。このことから、 $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ は粒界すべりが主な変形メカニズムであると考えられる。

また、一般に、転位を伴う粒内すべり変形においては、Mises あるいは Tresca の降伏理論に一致すると考えられ、圧縮応力・せん断応力は Mises あるいは Tresca のポテンシャル面上に存在すると考えられる。よって、523K において、ひずみ速度 $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ および $6.0 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ で粒界すべりが支配的であった機構から、 $6.0 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ へとひずみ速度が高速化するに従い、粒内すべりに支配された変形へ移行していくものと考えられる。

Fig.2 Relationship between m value and strain rate of AZ31Mg by jump test

Fig.3 Potential surface at 0.2% proof stress of AZ31 magnesium alloy deformed at temperature of 523K for various strain rate.

4. 結言

本研究では、室温で塑性変形が困難な AZ31 マグネシウム合金の変形特性に関して、超塑性が発現しやすいと言われている温度域よりも低温である 523K において、種々のひずみ速度条件下での降伏応力を検証した。その結果以下のことが明らかになった。

(1) ひずみ速度 $6.0 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ および $6.0 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ で負荷を与えた際、変形メカニズムにおいて粒界すべりの影響が大きいと考えられる。

(2) ひずみ速度 $6.0 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ で負荷を与えると、粒内すべりによる変形メカニズムが支配的に現れると考えられる。

以上の結果から、AZ31 マグネシウム合金について、超塑性が発現しやすいと言われている温度域よりも低温で十分に塑性加工可能であることが実験的に確認できたとともに、より複雑で実用的な形状を塑性加工で実現するために重要な知見が得られたと考えられる。

5. 引用文献

- (1) 日本塑性加工学会, マグネシウム加工技術 (2004), p1-25, コロナ社
- (2) 小島陽, 井藤忠男, マグネシウム合金の応用と成形加工技術 (2001), p29-85, CMC