AZ31マグネシウム合金板の深絞り成形性

相田 収平*・田辺 寛*・須貝 裕之*
高野 格*・大貫 秀樹**・小林 勝***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 50, No. 9 (2000), pp. 456-461

Deep-drawability of cup on AZ31 magnesium alloy plate

Shuhei AIDA*, Hiroshi TANABE*, Hiroyuki SUGAI*
Itaru TAKANO*, Hideki OHNUKI** and Masaru KOBAYASHI***

Recently, magnesium alloys are often applied in the auto industries and electric appliances. Most of them are manufactured by using some casting methods. But, from the viewpoints of productivity and quality of product, it is easily expected that the development of press forming technology is strongly required along with other metals and alloys. It is therefore important to grasp the plasticity of magnesium alloys. The purpose of this work is to investigate the possibility of press forming on AZ31 magnesium alloy plate. So, the tensile tests were performed to understand its basic material characteristics, and press forming tests were strived to improve its deep-drawability. The results of this study are summarized as follows. From the tensile test, the elongation of AZ31 was about 10% at room temperature, but the elongation increases in increasing temperature and amounts to 80~90% at 473 K. It was also found that the limit of drawing ratio of AZ31 plate resulted in 3.2 by heating the die at 473 K or above and by cooling the punch at room temperature or below.

(Received March 16, 2000)

Keywords: draw, AZ31B magnesium alloy, deep-drawability, tensile property

1. 緒 言

マグネシウム合金は、実用金属としては最も軽い材料であるとともに、再生に要するエネルギーが新塊製造エネルギーの4%程度で済むといったリサイクル性にも富んだ金属であるなどの特長を有しており、近年では欧米を中心として自動車部品への適用が多く見られる。一方、国内では自動車部品のほか、ノートパソコンやミニディスクプレーヤなど携帯情報家電の筐体への採用例が注目を集めている。ところで、これらの多くはダイカストあるいは射出成形法（チクソモールディング法）で作られている。これは、マグネシウムの結晶構造が最密六方晶であることに起因する、常温での塑性加工性の悪さのためにプレス成形による加工技術の普及が遅れていること、およびマグネシウム合金板の塑性加工成形性についての報告がそれほど多くはなく^{1),2)}、加工データも不足しているなどの理由によると考えられる。しかし生産性や製品の均質化などの観点から、他の金属材料と同様に今後はプレス成形加工への要求が高まっていくものと予想される。

本研究では、これまでにあまり試みられてはいなかったマグネシウム合金のプレス加工の実用化を検討すべく、代表的なマグネシウム合金展伸材であるAZ31合金を取上げ、引張

Table 1 Chemical composition of sample plate

Material	Chemical composition (mass%)			
	Al	Zn	Mn	Mg
AZ31B-H24	3.3	1.1	0.5	Bal.

試験による材料の基本的な特性を明らかにするとともに、プレス加工による深絞り成形性試験を行った結果について報告する。

2. 実験方法

実験に供したマグネシウム合金圧延材の化学組成をTable 1に示すとともにFig. 1には金属組織観察写真を示す。供試材は板厚約0.88 mmのAZ31B (Mg-3Al-1Zn)合金で、圧延後に一部焼なましを行った板材 (H24材)であり、硬さはHV65~70程度、結晶粒径はおおむね10~20 μmとなっている。また、加工性と関連の深い供試材の集合組織についても測定を行った。測定面は底面、柱面および錘面の各面について行ったが、ここでは{0001}面 (底面) について結晶格子の配列方向を示した極点図をFig. 2に示す。図で明ら

* 新潟県工業技術総合研究所 (〒950-0915 新潟市鑑西 1-11-1)。Industrial Research Institute of Niigata Prefecture (1-11-1, Abumi-nishi, Niigata-shi, Niigata 950-0915).

** 新潟県工業技術総合研究所 (新潟市) [現在: (株)東陽理化学研究所 (燕市)]。Industrial Research Institute of Niigata Prefecture (Niigata-shi, Niigata).

*** 千葉工業大学 (習志野市)。Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba).

Fig. 1 Cross sectional photograph of AZ31B-H24 magnesium alloy plate.

Fig. 2 {0001} pole figure of AZ31B-H24 magnesium alloy plate.

かなように、結晶の底面が圧延板の板面にはほぼ平行な集合組織になっており、圧延工程によって結晶粒の結晶方位が揃ったことがうかがわれる。このような材料を用いて引張試験および深絞り成形性の両試験を行った。

引張試験は、板材の圧延方向に対してそれぞれ 0° , 45° , 90° 方向に JIS Z 2201 による 13B 号試験片（平行部幅 12.5 mm, 標点間距離 50 mm）を採取し、引張試験機（インストロン 5582 型）によりクロスヘッド速度 8.3×10^{-2} mm/s の条件で、室温から 473 K の温度範囲で行い、引張強さと破断伸びを求めた。また同様の試験片および温度範囲において、クロスヘッド速度 4.2×10^{-2} mm/s の条件により、深絞り成形性に関連のある加工硬化指数 n 値、およびランクフォード値 r 値を求めた。

一方、深絞り成形性試験については、複動型油圧プレス（インナ出力 490 kN, アウタ出力 784 kN）に取付けた金型により円筒および角筒の深絞り試験を行い、下記に示す各成形条件における限界絞り比 LDR を求めることにより評価した。

Fig. 3 Schematic illustration of drawing method.

Fig. 3 に金型の断面構造を示す。金型は平面ダイス構造であり、油圧によりしわ押さえ力を一定に保つことができる。加熱方法については、円形に曲げた棒状ヒータをヒータホルダに組み込み、伝熱板を介してダイスとしわ押さえの両方を加熱するとともに、温度制御はダイスとしわ押さえの表面近傍に熱電対を取付け、PID 方式によるフィードバック制御を行っている。また、パンチは内部に水を流すことで温度調節ができる構造とし、温度調節機によりパンチ頭部の温度を 273 K 近傍から 373 K 近傍まで制御している。

実験に際しては、金型表面が所定の温度になるまで放置するとともに、温度調節した水をパンチ内に 5 分間程度流し、一定温度になったことを確認した後、水を流し続けることでパンチの温度を保持して絞り加工を行った。

成形条件はしわ押さえ力を 19.6 kN 一定とし、絞り速度は約 1.0~15.7 mm/s の範囲で行った。また成形温度はダイス、しわ押さえとも室温~523 K の温度範囲で行うとともに、パンチ温度を 277 K, 303 K, 373 K の各温度に設定し、パンチ冷却効果の有無の比較についても検討を行った。

工具各部の寸法は、円筒深絞り用金型ではパンチ径 60.4 mm, パンチ肩半径は 6.0 mm, ダイス穴径は 62.5 mm, ダイス肩半径 6.0 mm とした。また、角筒深絞り用金型については $\square 65.0$ mm, パンチ肩半径およびパンチコーナ肩半径 10.0 mm のパンチに対し、 $\square 67.8$ mm, ダイス肩半径 10.0 mm のダイスを用いた。なお、絞り加工時の潤滑剤については、冷間圧延鋼板やステンレス鋼板などに比べて高い温度で加工実験を行うこと、およびマグネシウム合金の絞り加工がまだ広く実用化されておらず、これに適した市販の潤滑剤は見当たらなかった。そのために今回の実験には 523 K の温度に対応でき、かつ潤滑性の良好なテフロンシート（厚さ 0.05 mm）を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 引張試験結果

Fig. 4 に AZ31B-H24 材について圧延方向に対する採取角度と引張強さおよび破断伸びの温度依存性を示す。引張強さは室温で 348 MPa (90° 方向) であるが、試験温度の上昇と

Fig. 4 Relationship between temperature and tensile strength and elongation.

Fig. 5 Relationship between temperature and r value.

Fig. 6 Relationship between temperature and n value.

ともに徐々に低下し、473 Kでは111 MPa (90°方向)と約1/3程度の強度にまで低下している。一方、伸びは、室温では約10~15%程度の伸びにとどまるのに対し、373 Kまでは温度の上昇とともにほぼ直線的に増加し、約70%程度の伸びが得られる。それ以上の温度ではその増加がやや鈍化するが、473 Kでは80~90%の伸びが得られるようになる。これは、温度が高くなるにつれて、結晶粒における底面すべり以外での臨界せん断応力が低下し、他のすべり面が現れてくることに起因していると考えられる。一方、材料の採取角度による違いについては、引張強さは90°方向が高く、0°、45°方向は低い傾向が見られる。伸びはそれとは逆に、0°、45°方向が大きく、90°方向が低くなっている。

Fig. 7 Relationship between die temperature and DR.
Punch temperature: 373 K.

Fig. 8 Relationship between die temperature and DR.
Punch temperature: 303 K.

Fig. 5には材料の板面異方性および深絞り性と強い相関を持っている r 値について試験温度との関係を示している。室温から373 K程度までの範囲では、材料の採取角度間での r 値の差が大きいが、それ以上473 Kまでにおいては徐々にこの差が縮まってくるとともに、 $r=1$ の値に収束している様子がうかがえる。

またFig. 6には、 r 値と並んでプレス成形性と相関のある特性値である加工硬化指数 n 値の温度依存性について示している。この場合も r 値と同様に、室温での値と473 Kでは異なった値を示し、室温では0°、90°方向で約0.2程度であるが、473 Kでは板の採取角度にかかわらずほぼ0となっている。

3.2 深絞り成形性試験結果

まず深絞り成形の基本である円筒深絞りを取上げ、ダイスおよびパンチの設定温度を変化させて絞り加工を試みた場合についての絞り比DRを、パンチの設定温度別にFig. 7~Fig. 9に示す。図中、材料が加工途中で破断せずに円筒容器の形状に絞り得たものを○印で示し、途中で破断した場合を×印で示している。なお、絞り速度は2.5 mm/sで行った。

先に示した引張試験の結果からもうかがえるように、室温では材料の伸びがあまりないために絞り加工は不可能である。しかし、パンチ温度が373 K (Fig. 7)では、ダイス温度423 Kで絞り比2.5が得られ、それ以上のダイス温度では絞り比3.0まで加工が可能となっている。また、パンチを水冷することにより温度を303 Kに設定した場合 (Fig. 8)では、ダイス温度423 K以下の温度領域では加工中に割れが発生するが、448 KではLDR 2.0が得られ、473 K以上の温度

Fig. 9 Relationship between die temperature and DR.
Punch temperature: 277 K.

Fig. 10 Relationship between punch stroke and drawing force.

領域では LDR 3.2 といった大きな絞り比が得られるようになる。パンチ温度をさらに下げ、277 K とした場合を Fig. 9 に示すが、448 K 以下のダイス温度では絞り加工ができないのに対し、473 K で LDR 2.8 が得られ、それより高い温度領域では LDR 3.2 が得られている。

ダイスの加熱により、間接的にマグネシウム合金ブランク材を加熱し、材料の伸びを大きくすることで絞り加工が可能になると考えられるが、高温領域では伸びの増加と同時に材料の引張強さも低下してしまう。Fig. 7～Fig. 9 の結果の比較から明らかであるが、ダイス温度が 473 K 以上の温度領域においては、パンチ温度が 373 K (Fig. 7) では LDR が 3.0 にとどまっているが、Fig. 8 および Fig. 9 に示すように、パンチを冷却することで絞り加工時に最も破断の危険が大きい部位の一つであるパンチ頭部の強度低下を抑えることができるために、 LDR 3.2 と絞り性が向上するものと考えられる^{3),4)}。しかしながら、パンチ冷却については、フランジ部の変形抵抗とパンチ頭部近傍における破断力とのバランスによりその効果が現れる。マグネシウム合金は室温近傍の温度領域では、材料の伸びが得られず脆性的な破壊をする。すなわちダイスの温度が低い領域では、材料のフランジ部においては、加熱による材料の伸びの効果よりもパンチ冷却によって生じる脆性破壊の影響が強く現れてしまうために、加工途中にパンチ肩部で破断を生じ、限界絞り比 LDR が小さくなってしまふと考えられる。Fig. 7～Fig. 9 に示したダイス温度 448 K の場合では、この影響をよく反映しており、それぞれパンチ温度 373 K で LDR 3.0、パンチ温度 303 K では LDR 2.0 と低下し、さらにパンチ温度 277 K と最も低い場合には絞り

Fig. 11 Relationship between drawing speed and DR.

Fig. 12 Relationship between punch stroke and drawing force.

加工が不可能となっている。

また Fig. 10 に、パンチ温度 373 K、絞り比 3.0 とし、ダイス温度を 448 K～523 K まで 25 K ステップで変化させた場合の各温度におけるパンチストロークと絞り力の関係を示す。各成形条件とも、ストロークがパンチ側壁部とブランク材の接する位置が円筒部となる深さである約 12 mm に達した後は、ほぼ絞り力が一定となっている。図中に示した各温度条件において絞り加工は可能であるが、ダイス温度を高く設定するに従って最大絞り力は低下し、523 K では約 15.7 kN と 448 K の場合の約 1/2 程度になっており、加熱による材料の伸びの増加と変形抵抗の低減効果がこの結果からもうかがえる。

以上の実験は、絞り速度 2.5 mm/s で行っているが、マグネシウム合金の絞り加工の実用化を考えた場合には、生産効率の点などから、さらに速い絞り速度が要求されるものと予想される。そこで、絞り速度の依存性についても検討を行った。Fig. 11 には、絞り速度を約 1.0～15.7 mm/s の範囲で変化させた場合の絞り比 DR と絞り速度との関係について示すとともに、Fig. 12 に絞り速度を変化させた場合のパンチストロークと絞り力の関係を示す。絞り速度が増加すると、深絞り限界が徐々に低下していく傾向が見られ、10.0 mm/s で LDR 2.8、15.7 mm/s で LDR 2.5 となっている。また、絞り力は速度の増加に従って大きくなっていることから、速度の増加による限界絞り比 LDR の低下がうかがわれる。しかしながら、ステンレス鋼板などの絞り比が 2.0 程度であること⁵⁾を考慮すると、本実験の速度範囲においては十分実用的

Fig. 13 Photograph of drawing sample.

な絞り性を有していると考えられる。

通常の絞り速度の範囲内では、絞り速度が材料の変形に与える影響は少なく、絞り速度の依存性は主に潤滑性の速度効果と関連性があるとされている。油性の潤滑剤では、絞り速度の増加により潤滑剤の摩擦抵抗が減少し、フランジおよびダイス肩部での変形抵抗が減少し絞り性の向上が見られる⁶⁾。しかし本実験においては、潤滑剤としてテフロンシートを用いており、摩擦抵抗の速度依存性は少ないと考えられる。本実験結果では、絞り速度が大きくなるに従って絞り力が大きくなっている傾向が現れているが、これは、材料の塑性変形に関する特性以外に、工具と材料間の摩擦抵抗や潤滑条件など複雑な要素が影響しているものと考えられる。

Fig. 13にはダイス温度473 K、パンチ温度373 Kの成形条件による加工サンプルを示す。絞り比は3.0、パンチストロークは80 mmで、絞りきっていないためにフランジ部が残っている。ところで blanks 材はマグネシウム合金であり、その良好な熱伝導特性と薄板であることなどからダイス温度と加工温度はほぼ同じと考えることができる。したがって、Fig. 13に示した加工についてフランジ部からダイス肩部においてはほぼ473 Kで加工したと見なせる。

ところで、Fig. 5 図中の Δr は板面の塑性異方性を表す値であり、式(1)で表される⁷⁾。

$$\Delta r = (r_{90^\circ} + r_{45^\circ} - 2r_{0^\circ}) / 2 \quad (1)$$

この Δr と深絞り加工時のフランジ部分における形状の間には、 $\Delta r > 0$ では $0^\circ, 90^\circ$ 方向に耳が発生し、 $\Delta r < 0$ では 45° 方向に耳が発生するのに対して、 $\Delta r = 0$ では耳が生じない、すなわち異方性が解消され等方的な性質になるといった関係がある^{7), 8)}。本研究で使用した AZ31 材では、 Δr は室温および423 Kでは約0.9、373 Kでは1.9であるが、試験温度を473 Kまで上昇させると0.2程度まで減少している。

Fig. 13に示した加工品では、Top viewでわかるようにフランジ形状はほぼ円形となっており、この加工温度では異方性が解消され等方的になっていることがうかがえるが、このことと、前述の Fig. 5 の単軸引張試験で得られた r 値とはよく一致している。

Fig. 14には、ダイス絞り加工品の断面におけるビッカース硬さの分布を示す。図中における横軸の測定長 L (mm) は絞り加工品底中心部を0とし、底部半径方向から側壁部方向へと2 mm間隔で測定を行っている。絞り加工において底部は等二軸引張状態となる⁸⁾が、中心部 ($L=0$) では変形を受けないことになり、ほぼ加工前の供試材の硬さに等しいと考

Fig. 14 Variation of Vickers hardness of drawing sample with distance from center of bottom.

Fig. 15 Variation of thickness of drawing sample with distance from center of bottom.

えられる。パンチ底中心部の硬さはHV65~70程度であり、加工前母材硬さにはほぼ等しい値となっている。さらに、半径方向の引張りと曲げがかかるパンチ肩部や材料のすべりこみに伴って周方向に圧縮力が働くフランジ部においてもHV65~80程度であり、測定区間の全域にわたって際だった硬さの変化が認められない。

ところで Fig. 14に示した加工はダイス温度が448 Kであることより、フランジ部からダイス肩部においてはほぼ448 Kで加工されたと見なせる。一方、Fig. 6に示した結果では、引張試験において448 K以上で n 値がほぼ0に収束しており、加工硬化の点においては、これら単軸引張試験と深絞り試験の結果はよく一致している。以上のことから、AZ31合金は極めて加工硬化を生じにくい材料であると推測できる。実際に絞り加工により製品を製作する場合には、しばしば再絞り工程を必要とするが⁹⁾、このように加工硬化現象が見られない材料では絞り工程間の焼なましの必要がないために、加工コストや工数の点でも有利であると考えられる。

さらに Fig. 15では、絞り加工品の板厚について示している。図中横軸の測定長 L (mm) は Fig. 14と同様に絞り加工

Fig. 16 Photograph of drawing sample.

品底中心部を0とし、底部半径方向から側壁部方向へと10 mm 間隔で測定を行った。先程と同様に中心部 ($L=0$) では、ほぼ加工前ブランク材の板厚に等しいと考えられる。さらに、パンチ肩部では引張変形下での曲げ戻しにより板厚の減少が見られるとともにフランジ部では周方向の圧縮が支配的となり、板厚の増加となって現れる傾向は、冷間圧延鋼板やステンレス鋼板など、他の一般的な材料の板厚変化と同様の傾向を示している¹⁰⁾。

現在、AZ91D マグネシウム合金を用いてダイカスト製法などによって製作されている携帯情報家電の筐体などは多くの場合、四角形状を呈している。Fig. 16には、これら製品へのプレス成形加工の適用を想定し、深絞り成形の応用例として試みた角筒深絞りの加工サンプルを示す。成形条件は、ダイス温度498 K、パンチ温度321 Kで行った。角筒絞りは円筒の場合とは異なり、コーナ部と直辺部ではフランジの材料の流れ込みに速度差が生じるためにこの部分でせん断変形が生じることなどにより、コーナ部で破断を起こしやすいが、図で明らかなように不具合を生じずに絞り加工が可能であることを確認した。

4. 結 言

AZ31B-H24 マグネシウム合金板について、その基本的な

材料特性と深絞り成形性について検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 引張試験の結果、室温では10%程度の伸びしか得られないが、温度を上げるに従って伸びが得られるようになり、473 K では80~90%の高い伸びが得られ、 r 値は1に収束し、 n 値はほぼ0になる。

(2) 深絞り成形性試験においては、ダイスの加熱によるマグネシウム合金の間接的な加熱によって、材料の伸びを得るとともに変形抵抗を減らすことで絞り加工が可能となる。ダイスの設定温度はおおむね473 K 以上で絞り比3.0が得られた。

(3) 携帯情報家電の筐体などへのプレス成形加工の適用を想定し、角筒の深絞り成形を試みた結果、円筒深絞り時の加工温度と同等の条件による角筒深絞りも可能であることを確認した。

これらの結果よりマグネシウム合金プレス加工の実用化へ端緒がついたと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 金子純一, 菅又 信, 沼 政弘, 西川泰久, 大久保通則: 塑性加工学会春期講演論文集, (1997), 41.
- 2) 長田直樹, 勝田基嗣: 軽金属学会第89回秋期講演概要集, (1995), 179.
- 3) 大橋延夫, 小野 寛, 野原清彦: 鉄と鋼, 63 (1977), 252.
- 4) 紫竹耕司, 山崎 淳, 渡部豊臣, 小倉健一: 塑性加工学会春期講演論文集, (1991), 239.
- 5) たとえば山口文雄: プレス技術, 26 (1988), 22.
- 6) 山田嘉昭, 輪竹千三郎: 塑性と加工, 4 (1963), 341.
- 7) 日本塑性加工学会編: プレス加工便覧, 丸善, (1975), 336.
- 8) 中川威雄, 阿部邦雄, 林 豊: 薄板のプレス加工, 実教出版, (1991), 122.
- 9) 渡部豊臣: プレス技術, 24 (1986), 99.
- 10) 中川威雄, 阿部邦雄, 林 豊: 薄板のプレス加工, 実教出版, (1991), 104.