AZ31 マグネシウム合金板の温間プレス成形性に及ぼす成形温度の影響

松居 正夫*・矢野 治久*・井上 孝司*・河部 昭雄**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 57, No. 1 (2007), pp. 2-5

Influence of forming temperature on warm press formability of AZ31 magnesium alloy sheets

Masao MATSUI*, Haruhisa YANO*, Takashi INOUE* and Akio KAWABE**

Press forming test apparatus to be able to change from room temperature to 673 K was developed for evaluating characteristics of warm press formability in magnesium alloy sheets. By using of this apparatus, a cylindrical cupping test for deep drawability, a bore expanding test with flat punch for stretch-flanging formability, and a hat-shape bending test for shape fixability have been carried out on two kinds of AZ31 magnesium alloy sheets (A material and B material). As a result, limiting drawing ratio (LDR) becomes 2.5 at the time of forming temperature 433 K, and forming height in the cylindrical cupping test is higher for larger punch shoulder radius. In the stretch-flanging formability, bore expanding ratio can get maximum value at 473 K and is constant at more than 473 K. Shape fixability is improved as the forming temperature is raised, and at 573 K, spring back is reduced to almost zero. A characteristic of warm press forming varies with a production condition of materials, and has strong correlation with mechanical properties at forming temperature.

(Received May 11, 2006 Accepted September 8, 2006)

Keywords: magnesium alloy sheet, press formability, forming temperature

1. 緒 言

マグネシウムは構造用金属の中で最も軽く、比強度、比剛性において有利な材料であるため、携帯電話やパソコンなど電子機器の筐体を中心に利用され始めている。

一方、地球温暖化の元凶である二酸化炭素削減に向けて国際的な取組みがなされているが、自動車業界では、その対策の一つとして車体の軽量化が推進されており、高張力鋼板やアルミニウム合金板の使用が増加している。そしてさらに、今後のさらなる車体軽量化を目指して、マグネシウム合金板の採用を視野に入れた研究・開発が材料技術、生産技術の面から検討され始めている。

マグネシウムの結晶構造は稠密六方晶であり、常温で活動するすべり系は底面すべりのみであるため、自動車外板パネルのような複雑な形状の部品を冷間でプレス成形することは極めて困難である。しかし、成形温度を上げていくと非底面すべりが活動するようになり、すべり系の数が増すことによって伸びが増加し、成形限界が向上する¹⁾。

近年、マグネシウム合金の成形加工技術について多くの研究成果が報告されているが、鋳造や射出成形に関するものが多く、薄板のプレス成形に関する報告^{2)~7)}は比較的少ない。また、それらの報告は深絞り性に関するものが中心である。しかし、マグネシウム合金板の使用を拡大させるためには種々の変形条件下でのプレス成形性と成形温度との関係の評価しておくことが重要である。

そこで、本研究では、成形温度を室温から 673 K まで変える温間プレス成形性試験機を試作し、それを用いて AZ31 マグネシウム合金板の実成形で重要となる深絞り性、伸びフランジ性、形状凍結性の温度依存性を明らかにする。あわせて、同一規格ではあるが機械的特性値の異なる 2 種類の素材についても検討を加えた。

2. 試験方法

2.1 試験装置

試作した温間プレス成形性試験機の外観を Fig. 1 に示す。ダイは支柱に固定された上板に取付けられており、しわ押え板は上下に可動可能な下板に固定されている。下板は 2 本のピストンロッドに支えられ、油圧によって上下動をしてダイとしわ押え板で挟まれたブランクにしわ押え力を付与できる構造になっている。パンチは 400 W のインバータモータの回転をねじによって上下動する構造にし、ブランクに変形を与えるようにした。成形温度は、ダイとしわ押え板の外周に設置した最大出力 800 W のバンドヒータの入力を制御することによって、所望の温度に設定できるようになっている。

試験機の仕様を Table 1 に示す。最大パンチ荷重は 100 kN、最大しわ押え力は 50 kN、最大パンチストロークは 100 mm、最大パンチ速度は 100 mm/min であり、成形温度は室温から 673 K まで変化させることができる。

2.2 供試材料

入手した A 社、B 社の AZ31 マグネシウム合金板 (以下 A

* 大同工業大学工学部 (〒457-8530 愛知県名古屋市中区滝春町 10-3)。Faculty of Engineering, Daido Institute of Technology (10-3 Takiharuchō, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi 457-8530).

** 静岡県静岡工業技術センター (静岡市)。Shizuoka Industrial Research of Shizuoka Prefecture (Shizuoka-shi, Shizuoka).

Fig. 1 Warm press forming test apparatus.

Table 1 Specification of test apparatus

Max. punch force	100 kN
Max. blank hold force	50 kN
Max. punch stroke	100 mm
Max. punch speed	100 mm/min
Forming temperature	RT~673 K

Table 2 Chemical composition (mass%)

Mate.	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ca
A	2.67	0.94	0.58	0.003	0.006	0.001	0.006
B	2.84	1.04	0.40	0.004	0.016	<0.001	0.001

Table 3 Mechanical properties (at room temperature)

Mate.	Tensile strength (MPa)	Proof stress (MPa)	Elongation (%)	n-value	r-value	Thickness (mm)
A	240	182	6.2	0.231	1.43	0.6
B	290	238	16.4	0.137	2.08	0.6

材, B 材と称す) の化学成分を Table 2 に, 室温での圧延方向の機械的特性値を Table 3 に示す。A 材の Al, Zn の含有量は B 材より少なく, 機械的特性値では, B 材の引張強さ, 0.2% 耐力, r 値は A 材より高く, 伸びも 9% ほど大きい。一方, n 値は B 材より A 材の方が大きい。

Fig. 2 は A 材, B 材の引張強さ, 0.2% 耐力および伸びの温度依存性を示したものである。両材料とも, 引張温度が高くなると引張強さ, 耐力は低下し, 伸びは大きくなる。室温での引張強さ, 耐力は A 材と B 材で差があるが, 473 K になるとその差は小さくなり, 523 K では両者の差はほとんどなくなる。一方, 室温で A 材と B 材に大きな差がある伸びは, 473 K ではその差は変わらないが, 523 K になると, A 材は 473 K の場合と変わらないのに対し, B 材は大きくなり, 45% と軟鋼並みの伸びとなる。なお, 製造過程は A 材, B 材とも, 溶解ビレットより熱間押し出し, 温間圧延, 冷間圧延した後焼なましを加えてあるが, それぞれの条件は不明である。

Fig. 2 Influence of temperature on mechanical properties.

Table 4 Testing conditions

Method Condition	Deep drawing test	Bore expanding test	Hat-shape bending test
Punch	φ40, R1~10	φ25, R3	30×60, R4
Die	φ44, R6	φ27.4, R3	32×65, R4
Blank holding Force (kN)	10	25	5
Forming temperature (K)	373~433	423~573	453~573
Forming height (mm)	Forming height at fracture		36
Forming speed (mm/min)	20		
Dimensions of specimen (mm)	φ84, 100	φ84, Bore diameter φ5	50×200
Lubricant	Water-soluble graphite		

2.3 試験条件

円筒深絞り試験, 穴広げ試験, ハット曲げ試験に用いたパンチ, ダイの寸法, および試験条件を Table 4 に示す。深絞り試験では, 肩半径 $R=6\text{ mm}$ のパンチを用い, しわ押え力 10 kN で絞り比 $DR=2.5$ が得られる成形温度 T を求め, さらにパンチ肩半径 R が成形高さ H に及ぼす影響を, 直径 84 mm の円板ブランク ($DR=2.1$) を用い, $T=413\text{ K}$ の条件で調べた。

円筒パンチによる平底穴広げ試験では, 中心部に直径 5 mm の穴をドリル加工した円板状ブランクを用い, 穴縁に亀裂が生じるまで成形し, 次の式で穴広げ率を求めた。

$$\text{穴広げ率 } \lambda = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100(\%)$$

ただし, d_0 は初期穴径, d は亀裂発生時の穴径である。

ハット曲げ試験では, 幅 50 mm , 長さ 200 mm の短冊状ブランクを用いて成形高さ 36 mm まで成形し, Fig. 3 に示した開き量 ΔW , 開き角 θ , 側壁曲率 ρ を求め, これらをスプ

Fig. 3 Measure of sheet geometry after spring-back on cross section of hat-shape bending test.

Fig. 4 Example of products in cylindrical cupping test (at $T=413\text{K}$).

リングバック量として形状凍結性を評価した。なお、すべての試験で、成形速度は 20mm/min 一定とし、潤滑剤として水溶性グラファイトを試験片に塗布した。

3. 試験結果と考察

3.1 深絞り性に及ぼす成形温度の影響

Fig. 4 に肩半径 $R=6\text{mm}$ のパンチを用い、成形温度 $T=413\text{K}$ で成形したときの成形品の外観を示す。(a) は A 材、(b) は B 材の場合であるが、同一 T でも A 材はパンチ肩で破断しているのに対し、B 材は絞り抜けてカップ状に成形されており、同規格の材料でも成形性に差があることがわかる。

Fig. 5 は成形高さ H と成形温度 T の関係を示したものである。 $T=373\text{K}$ での H は A 材と B 材でほとんど差がなかったが、 T が上昇するとともに両材料とも H は高くなり、B 材では $T=413\text{K}$ で、A 材では $T=433\text{K}$ で絞り抜けることがわかった。すなわち、絞り抜けたときのブランク径 D をパンチ径 d_p で除した限界絞り比 $\text{LDR} (=D/d_p)$ を得るための成形温度は、 r 値、および伸びの低い AZ31 マグネシウム合金板でも、 $T=433\text{K}$ と比較的低い温度で鋼板以上の LDR が得られることがわかった。

3.2 深絞り性に及ぼすパンチ肩半径の影響

直径 84mm のブランク（絞り比 2.1）を用いて、成形温度 $T=413\text{K}$ で成形した場合の成形高さ H とパンチ肩半径 R の関係を Fig. 6 に示す。A 材、B 材とも $R=1\text{mm}$ では数 mm 程度の H でパンチ肩破断となるが、B 材は $R \geq 2\text{mm}$ で絞り抜けてカップ状に成形される。一方、A 材は R が大きくなるにつれて H は高くなるものの絞り抜けにはならず、 $R \geq 8\text{mm}$ で絞り抜けるようになる。

Fig. 5 Relationships between H and T in cylindrical cupping test.

Fig. 6 Influence of R on H in cylindrical cupping test.

Fig. 7 Relationships between λ and T in bore expanding test.

3.3 伸びフランジ性の温度依存性

穴広げ率 λ と成形温度 T の関係を Fig. 7 に示す。A、B 材とも、 λ は $T=473\text{K}$ までは大きくなるが、それ以上の成形温度ではほぼ一定になる。すなわち、伸びフランジ性を確保するための成形温度 T は 473K でよく、それ以上の高い温度で成形する必要がないことがわかった。A 材の穴広げ率 λ は高々 100% であるのに対し、B 材の λ は 300% 程度になり、同一規格の材料で、同一成形条件で成形しても伸びフランジ性が大きく異なることがわかった。一般に、伸びフランジ性は材料の伸びとよい相関関係があると言われているので、Fig. 2 の伸びと引張温度との関係に照らしあわせて妥当といえる結果と考える。

3.4 形状凍結性の温度依存性

しわ押え力 5kN でハット曲げ試験を行い、離型後のスプリングバック量で形状凍結性を評価した。Fig. 8 に B 材を用いて成形した場合の離型後の代表的な外観を示す。(a) は成形

Fig. 8 Example of products in hat-shape bending test (B material).

温度 $T=453\text{K}$ で成形した場合であり、スプリングバックが明確に現れた例、(b) は $T=573\text{K}$ で成形した場合で、スプリングバックがほとんどない例である。これらの成形品から Fig. 3 で示したスプリングバック量を求めた結果を Fig. 9 に示す。(a) は開き量 ΔW と成形温度 T の関係、(b) は開き角 θ と T の関係、(c) は側壁部の曲率 ρ と T の関係である。A 材、B 材とも T が高くなるほど ΔW , θ , ρ は小さくなり、A 材では $T=573\text{K}$ ですべての評価値はゼロになり、B 材では $T=523\text{K}$ でゼロになる。

一般に、スプリングバック量は材料の引張強さが低いほど小さくなるのが高張力鋼板で明らかにされている⁸⁾。本実験では、Fig. 2 で示したように T の上昇とともに引張強さが低くなっており、このために T の高いほどスプリングバック量が小さくなったと推測する。

以上の結果から、AZ31 マグネシウム合金板の形状凍結性のよい成形をするためには、 573K の温度で成形すればよいことがわかった。

4. 結 言

室温では成形困難な AZ31 マグネシウム合金板の温間成形性を評価するために、温間プレス成形性試験機を試作し、メーカーの異なる 2 種類の材料の深絞り性、伸びフランジ性、形状凍結性を評価した。得られた主要な知見は次の通りである。

(1) 限界絞り比 $\text{LDR}=2.5$ を得るための成形温度 T は 433K と比較的低温でよいことがわかり、パンチ肩半径が大きいほど深絞り性がよいことを明らかにした。

(2) 伸びフランジ性は、 $T \leq 473\text{K}$ では T の上昇とともに良好になるが、それ以上の T ではほぼ一定になることがわかった。すなわち、伸びフランジ性を確保するためには $T=473\text{K}$ でよいことを穴広げ試験によって明らかにした。

(3) 形状凍結性は成形温度 T が高いほど良好になり、 $T=573\text{K}$ でスプリングバックは発生しないことをハット曲げ試験によって明らかにした。

(4) 同一規格の AZ31 マグネシウム合金板でも、メーカー(製造法)の違いによってプレス成形性は異なり、成形温度における材料の機械的特性値のうち、とくに伸びが大きいほどプレス成形性は良好になる傾向があった。

(5) 以上の結果から、AZ31 マグネシウム合金板を自動車外板パネルのような複雑形状の部品に適用する場合、どの変形状態が最重要かを認識して成形温度を決定する必要があることを明らかにした。

最後に、本試験に用いたマグネシウム合金板をご提供いただいた日本金属株式会社、株式会社住友金属直江津に厚くお礼申し上げます。また、本研究の多くは大同工業大学の修士

Fig. 9 Influence of T on the amount of spring back in hat-shape bending test.

研究として遂行されたものであり、当時の大学院生 坪内佳樹氏、渡邊 真氏(現 豊臣機工株式会社)に感謝いたします。

参 考 文 献

- 金子純一, 菅又 信: 軽金属, **54** (2004), 484-492.
- 古閑伸裕: 塑性と加工, **44** (2003), 250-255.
- 大上哲郎, 関口昭一, 菊池正夫, 伊藤 毅: 塑性と加工, **42** (2001), 246-248.
- 宅田裕彦, 井上大輔: 塑性と加工, **43** (2002), 1173-1177.
- 行武栄太郎, 金子純一, 菅又 信: 塑性と加工, **44** (2003), 276-280.
- 渡辺博行, 向井敏司, 鈴木桂介, 清水 亨: 軽金属, **53** (2003), 50-54.
- 西村 尚, 長谷川収, 小磯宣久, 松本幸司: 軽金属, **53** (2003), 302-308.
- 葛森秀夫, 岩田徳利, 鈴木直守: 塑性と加工, **44** (2003), 519-523.