マグネシウム合金板の深絞り加工 —マグネシウム委員会の共同研究 (昭和35年) の紹介を兼ねて—

戸澤 康壽*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 51, No. 10 (2001), pp. 492-497

Deep drawing of magnesium alloy sheets —With introduction of a cooperative work at Magnesium Committee—

Yasuhisa TOZAWA*

Keywords: *magnesium, deep drawing, mechanical properties, sheet forming, welding*

1. ま え が き

「輸送機関における自重軽減は、機関の性能向上および運転経費の節約には絶対の要件である。自重軽減に対する材料として、マグネシウム合金は、その比重と強度との関係から最適なものであるが、従来はわが国における生産量の貧弱な点で、このマグネシウム合金の利用があまり進められていなかった。近年その生産力も発展の域に達し、漸く鋳物部品として、自動車、オートバイなどに供給されつつある。次に来るべきものは展伸材部品のマグネシウム合金化である。

(中略)

本研究は近年の発達したマグネシウム合金展伸材の機械的性質、耐食性などを測定し、その標準性質を広く一般に発表することにより、マグネシウム合金展伸材の使用を促し、輸送機関のみならず一般の機械器具の発達にも寄与しようとするものである。」

以上は、社団法人軽金属協会 (現 社団法人日本アルミニウム協会) が昭和35年度通商産業省応用研究補助金の交付を受け、同協会内に設置していたマグネシウム委員会 (現 日本マグネシウム協会) が中心になって実施した「マグネシウム合金展伸材の標準性質測定に関する研究」の報告書¹⁾の最初に述べられている文章である。40年も前にすでに今日あるを見越してこのような広範囲にわたる共同研究が行われていたのであり、その貴重な成果は一部「マグネシウム便覧²⁾」にも引用紹介されているが、残念ながらこの事実をご承知ない会員が多いように思われる。このことは学術情報の提供を一つの重要な仕事としている学協会側に責任があるのかもしれない。いずれにせよ、このたび編集委員会からマグネシウム特集号の発行に当たり、かつて行われた上記共同研究の紹介に併せて、その中で小生が担当した深絞り加工についての解説を執筆するよう依頼を受けたので、前記報告書を基に以下記すことにする。

2. マグネシウム委員会の共同研究

上記「マグネシウム合金展伸材の標準性質測定に関する研究」は、マグネシウム委員会石田四郎委員長 (明治大学教授、以下いずれも当時) のもと27名の委員が麻田 宏東京大学教授を主査として1年半にわたって実施したものである。研究に要した経費は、政府補助金以外古河マグネシウム^株、旭化成工業^株、^株神戸製鋼所、古河アルミニウム工業^株の4社が分担したほか、一部はマグネシウム委員会経常費でまかなわれた。

供試材料として、^株神戸製鋼所で製作した板材 (板厚 1, 2, 4 mm) の AZ31-O, AZ31-H24, M1A-O, M1A-H24, および古河アルミニウム工業^株製作の押出型材 (T 形, L 形) の AZ31-F, AZ61-F, ZK60-F が用いられた。なお輸入材も比較検討のために一部用いられた。

以下、試験項目ごとに試験実施場所とその内容ならびに得られた成果を要約して記す。

2.1 引張試験 (新明和工業^株, 富士重工業^株, 富山大学工学部, 東北大学金属材料研究所, 東京大学航空研究所, プリンス自動車工業^株, 新三菱重工業^株)

引張強さ、耐力、伸びを測定し、板材に対してはそれらの方向性、1枚の板中での分布状態、数値の分散を求めるとともに、多数の板について値のばらつきを測定し、製板の均一性を求めている。H24材の焼なましによる性質変化、高温における引張特性およびクリープ特性も求めている。表1は常温での結果、図1および図2は高温における結果を示したものである。

2.2 疲労試験 (金属材料技術研究所, プリンス自動車工業^株)

シェンク式疲労試験機を用い、厚さ2mmと4mmのAZ31-O板材とZK60-FのT形押出材について疲労限を求めている。

* 名古屋大学・大同工業大学名誉教授, ^株軽金属学会名誉会員 (〒470-0117 愛知県日進市藤塚6-128)。

受理日: 平成13年5月8日

表 1 常温における引張試験結果

材質	調質	方向	引張強さ (MPa)	耐力 (MPa)	伸び (%)
AZ31	O	R.D., C.D.	227~258	124~194	8~20
		H24	258~299	159~261	1~18
		C.D.	283~331	254	3~17
M1A	O	R.D.	190~226	102~154	3~11
		C.D.	225~270	147~221	6~14
		H24	188~290	129~204	1~10
		C.D.	220~308	216	4~11
AZ31B	F	—	260~268	155~167	14.3~19.8
AZ61A	F	—	299~303	175~191	17.7~23.2
ZK60A	F	—	305~333	212~265	11~14.7

2.3 衝撃試験 (東京工業大学, プリンス自動車工業㈱)

押出材に対するシャルピー衝撃試験では、いずれの材料も $-200 \sim +300^{\circ}\text{C}$ の範囲において、延性-脆性遷移現象は認められなかった。AZ31-F の高速引張試験の結果では、引張速度が 30 m/s 以上で引張強さは約 50 MPa 上昇している。

2.4 溶接試験 (新明和工業㈱, 富士重工業㈱, 茨城大学工学部)

板材に対してアルゴン溶接および点溶接を行い、引張試験、曲げ試験、硬さ試験、顕微鏡組織検査、X線検査などの結果から、標準的な作業条件を提示している。AZ31はM1Aに比べると溶接しやすい材料である。

2.5 塑性加工性試験 (富士重工業㈱, 新三菱重工業㈱, 千葉大学工学部, 新明和工業㈱)

厚さ 2 mm 、長さ 200 mm 、幅 30 mm の試験片に対する先端半径 6 mm の工具による常温での曲げ試験の結果、割れが発生するまでの曲げ角度はAZ31-Oで $78 \sim 180^{\circ}$ 、M1A-Oで $45 \sim 58^{\circ}$ であった。試験片の採取方向による差の著しい場合もある。

板厚 1 mm のAZ31-H24に対する、ゴムパッドで加圧成形するゲーリン法による熱間での曲げ試験の結果によれば、曲げ半径が $5 \sim 6 \text{ mm}$ の場合は 140°C であれば割れも生じないので、適当な加工温度は $140 \sim 160^{\circ}\text{C}$ と言える。曲げ半径が $2.5 \sim 3 \text{ mm}$ のときは 180°C 前後が適当な温度と思われる。

エリクセン試験機をオイルバス中に浸漬して、板厚 1 mm のAZ31-O, AZ31-H24, M1A-O, M1A-H24に対して常温から 175°C までの高温エリクセン値を測定した結果は、常温の $2 \sim 4 \text{ mm}$ から温度とともにほぼ直線的に増加して $5 \sim 9 \text{ mm}$ となっており、全般的にM1Aの方がAZ31よりも低い値である。

円筒深絞り試験の結果については次章で説明する。

輸入材を用いて熱間でゲーリン法により生産していたヘリコプタの部品に対して、国産材のAZ31-H24, 板厚 1 mm の成形性を検討している。対象とした成形はカーブドチャネル成形 (伸びおよび縮みフランジング), パーリング, ビーディング, 縁曲げを含んだ組合せ成形である。輸入材に比べると割れの発生から見てやや成形性が劣るが、小さな半径の曲

図 1 高温における引張試験結果 (板材)

図 2 高温における引張試験結果 (押出材)

げ以外は成形温度として 160°C 前後が適当と思われる。

2.6 ペアリング強度試験 (川崎航空機工業㈱)

AZ31-H24あるいはM1A-H24の試験片をずらして重ね合わせ、17Sまたは24Sアルミニウム合金のリベットで結合したものを引張試験機に取付け、リベットに対してせん断荷重をかけて破壊荷重を求めている。各種のリベットの径および形、エッジディスタンスに対する結果から、ペアリング強度は全般的にAZ31-H24の方が高いと言える。

2.7 腐食試験 (東北大学金属材料研究所, 富山大学工学部, プリンス自動車工業㈱, 富士重工業㈱, 川崎航空機工業㈱, 新明和工業㈱)

板および押出材に対し、塩水噴霧試験 (連続および断続), 浸漬試験 ($3, 5, 10\% \text{ NaCl}$, 板に対してはさらに HCl , 硝酸塩, リン酸塩, 炭酸塩, 苛性ソーダ) などの腐食条件を変えた試験, また試験片も納入状態, 防食処理, 塗装などを施したもののについて腐食状況をみている。さらに, 溶接した試験片に対しても腐食試験を行っている。

3. 円筒深絞り加工

上記共同研究の一部として行ったものであるが、ここでは単にその紹介にとどめず解説として記す。

3.1 加工温度条件

マグネシウム合金板の成形加工は、常温では延性が乏しいため難しいが、高温になれば延性も増すので一般に高温状態で行われている。しかし深絞り加工の場合は、ほかの成形加工と違って必ずしも延性に富んでいるほど大きな加工度が与えられるとは限らない。

一般の延性材料における深絞り加工限度は、フランジ部分

図3 各温度条件におけるAZ31-H24の深絞り性

の変形に対する抵抗とその変形に必要な荷重を負担する領域の強度との兼ねいで決まり、前者が小さく後者の大きい材料ほど大きな加工度を与えることができる。集合組織制御により高 r 値を持つ板として開発された深絞り鋼板はその代表的な例である。このように、高加工度の絞りを可能にするためにはブランクの場所ごとに異なった特性が要求されるわけであり、加工硬化材のブランクの外周部のみを焼なましすることによってこの要求を満たすようにしたものが周辺焼なまし深絞り法^{3)~5)}である。ブランクに温度差を与える方法はより効果的である。具体的には、パンチを加熱せず熱間で絞る方法^{6)~10)}、ダイスの内縁も低温に保ち熱間で絞る方法¹¹⁾、さらに絞り終わった部分に冷却水を噴射する方法¹²⁾などがあるが、絞り比4.0がアルミニウム板で得られている^{10), 12)}。

以上の状況を基に、マグネシウム合金板の深絞り試験に対して次の3条件が選ばれた。すなわち、

a) パンチ、ダイス、しわ押さえ、すべてを同一温度に加熱し、ブランクをその温度で絞る。これは一般の成形加工におけるいわゆる熱間加工の温度条件である。

b) パンチは水冷し、ダイス、しわ押さえは一樣な温度に加熱する。ブランクは、ダイスとしわ押さえの間にはさみ、パンチと接触させて3分間保持することにより、工具と同様の温度分布としている。

c) パンチを水冷し、ダイスおよびしわ押さえは、内縁を水冷するとともに、その外側の中間部、最外部をそれぞれに内蔵したヒータにより加熱し、フランジ部分に積極的に温度勾配を与える。

3.2 供試材料および工具

板厚1mmのAZ31-O, AZ31-H24, M1A-OおよびM1A-H24を対象としている。標準工具の寸法は、パンチ直径 $d_p = 36$ mm, パンチ角半径 $r_p = 10$ mm, ダイス穴径 $d_d = 40$ mm, ダイス肩半径 $r_d = 10$ mmである。しわ押さえ力は油圧により一定に保持でき、パンチは油圧で駆動される。なお潤滑剤として二硫化モリブデンを用いている。

3.3 深絞り限界

3.3.1 AZ31-H24の各温度条件の場合

各温度において割れることなしに絞れたブランク直径と割れたブランク直径とから、絞り限界のブランク直径あるいは

図4 条件c)における工具表面の温度分布

それをダイス穴径で割った限界絞り比を求め、温度との関係で示したのが図3である。ここで横軸の温度は、条件b)の場合はダイスおよびしわ押さえの温度、条件c)の場合は後述の半径45mmにおける温度である。

条件a)の場合は、常温ではブランク直径 $D = 50$ mm (絞り比1.25)ですら割れが生じるが、温度が高くなるとかなり絞れるようになり、140°Cで絞り比1.8が得られている。しかしそれ以上高温になると再び絞り性は劣化する。

条件b)の場合も深絞り限界の温度に対する関係は、条件a)と同じような傾向を示すが、温度による絞り性改善の効果ははるかに顕著である。すなわち、170~240°Cの間で限界絞り比は2.5を超えており、この値はほとんどの延性材料の常温絞りにおける値より大きい。そして180°Cのとき最大の限界絞り比2.8に達している。

条件c)におけるダイスとしわ押さえの温度分布は、内蔵した内側と外側のヒータを個別に制御することによって調整される。図4に測定例を示す。絞り限界は、温度分布の形状によっても影響されるであろうが、ここでは半径45mmの測定点での温度をとって整理してある。図3に示すように、この条件の場合は実験した範囲内では高温になるほど絞り性は向上し、限界絞り比は200°Cで2.5を超えており、250°Cで3.5に達している。

図5は、各条件で得られた最大の限界絞り比のときの容器であり、条件c)のときの容器の高さは直径の約3倍になっている。これらの容器を絞ったときの絞り力曲線が図6に示してある。

図5 各温度条件で得られた最大絞り比の容器

図6 各条件での最大ブランクに対する絞り力曲線

3.3.2 その他の合金の温度条件 b) の場合

それらの結果は図7に示してある。AZ31-Oの絞り性は、図3に示したAZ31-H24の結果と比較すると、比較的低い温度では若干よいが、高い温度域での向上の程度は少なく、最大の限界絞り比は220°Cのときの2.5である。この低温側でO材の方がH24材より限界絞り比が大きいのはO材の方が延性が大きいからであり、高温になると逆にO材の方が限界絞り比が小さくなるのは荷重負担部の強度が小さいためである。なお図には示していないが、パンチ角半径 r_p によって限界絞り比の値は影響を受ける。最大の限界絞り比となる温度はほとんど同じであるが、限界絞り比の値は、パンチ角半径が標準工具の1/2である $r_p = 5\text{ mm}$ のときは2.3、 $r_p = 18\text{ mm}$ の球頭パンチのときは2.7となり、 r_p の大きい方が最大の限界絞り比は大きい。

M1A-H24の絞り性が改善される温度は、AZ31材より高温側にずれており、また改善の程度も少なく、最大の限界絞り比は2.1に留まっている。M1A-Oの場合もほぼ同様である。

3.4 割れの発生

温度条件 a) のとき (図3参照) 限界絞り比が最大になる140°C以下の温度で、限界よりわずかに大きいブランクを絞ると、絞りを完了する直前に容器の縁から図8に示したような板面に対して45°の割れが入る。これは容器の縁がダイス肩半径部に達し、しわ押さえによる拘束がなくなったため、円周方向の圧縮により生じたものであり、明らかに材料の延性不足による。したがって、温度が高くなると絞り性が向上することは延性の増加によって説明される。なおフランジをわ

図7 温度条件 b) における各合金の深絞り性

図8 容器の縁に生じた割れ

図9 高温における機械的性質

ずかにダイス上に残し、しわ押さえで縁の部分を押さえた状態で絞りを止めれば、ここに示した限界より若干大きなブランクまで割れなしに絞ることができる。

一方、140°C以上で絞ったときに発生する割れはこれとは異なり、一般の延性材料を絞ったときと同様容器底の角近傍に生じる。一般の延性材料では、限界絞り比と加工硬化指数 n 値との間に正の相関が認められている。そこでAZ31押出材の高温引張試験により求めた図9の結果から n 値の温度依存性を調べると、 n 値は温度が高いほど小さく、200°C以上ではほとんど変化していない。したがって図3に示した140°C以上で絞り性がむしろ悪くなる現象は、 n 値の変化から説明される。

図10は各種の温度における絞り力曲線を示したものである。

図10 低温側と高温側で割れが発生するときの絞り力曲線

140°Cより高温側で割れたものは強度不足に基づくので、絞り力が増加するストロークの前半で割れは発生するが、低温側の割れは強度とは関係なく延性不足によるものなので、最大絞り力を過ぎたストロークの後半で割れが発生している。なお最大絞り力に達する時期は温度が高いほどストロークの初期に寄っているが、これも n 値の減少で説明される。

温度条件 b) の場合も温度が低いときは割れは容器の縁で生じ、また140~150°Cになると容器底の角近傍で生じるが、大きな絞り比まで絞れる高温では、図11に示したように、割れはすでに絞り完了した胴部に生じる。これは加熱されずに板本来の強度を保っている容器底の角近傍部よりも、フランジ部にあったときに加熱されて胴部に移ってきた部分の強度の方が低いためである。温度条件 c) の場合も同様である。

3.5 限界絞り比に及ぼすしわ押さえ力の影響

しわ押さえ力はフランジ部の摩擦抵抗を介して絞り力に影響を与える。したがって荷重負担領域の強度不足によって割れが生じる温度での限界絞り比はしわ押さえ力によって変化する。図12はその一例である。

3.6 限界絞り比に及ぼす絞り速度の影響

材料の変形抵抗は特に高温ではひずみ速度の影響を受け、したがって絞り速度が速くなると絞り力は増加する。そのため強度との兼ねいで絞り限界が決まる状態での限界絞り比は、図13に示したように絞り速度が増加すると低下する。

3.7 深絞り容器に生じる耳

絞られた容器に生じる耳は板の面内異方性によるものであ

図11 容器の底部および胴部に生じた割れ (AZ31-O, 温度条件 b))

図12 限界絞り比に及ぼすしわ押さえ力の影響

図13 限界絞り比に及ぼす絞り速度の影響

図14 AZ31-O 絞り容器に生じた45°方向の耳 (温度条件 b))
上 : $D=90$ mm, 下 : $D=80$ mm

るが, AZ31-H24では非常に低い耳が圧延および直角方向に生じた。しかしAZ31-Oの場合は耳の生じる方向は圧延方向に対し45°の4方向であった。そして耳の高さは温度によって図14のように変化し, 190°Cあたりで最も高く, それより低温でも高温でも低くなっている。

4. む す び

マグネシウム合金は(強度/重量)の比が鋼の約3倍もある最も軽い実用金属材料であるばかりでなく, リサイクルも容易なので時代にマッチした材料として多くの関心を集めている。そして更なる利用拡大を期待して活発に研究活動が行われている。ここに紹介した共同研究は, 40年も前のものであって陳腐化した内容がないとは言いきれないが, 今後研究を進めるに当たって問題点を明らかにし, 方針を定めるための貴重な情報を提供してくれることは間違いない。この中にとり上げられている項目に興味のある方は, 報告書に直接目

を通されることをお勧めする。

参 考 文 献

- 1) 軽金属協会マグネシウム委員会: マグネシウム合金展伸材の標準性質測定に関する研究, 軽金属協会, (1962).
- 2) 軽金属協会編: マグネシウム便覧, (1975).
- 3) 戸澤康壽: 591回塑性加工専門講演会前刷, (1954), 11; マシナリー, 22 (1959), 161.
- 4) E. Siebel und E. Beisswanger: Tiefziehen, (1955), 158.
- 5) E. G. Meader: Engineering, 181 (1956), 48.
- 6) D. M. Finch, S. P. Wilson and J. E. Dorn: ASM Trans, 36 (1946), 254.
- 7) 福井伸二: 科学研究所報告, 24 (1948), 465.
- 8) H. Kostron: Archiv Eisenhuttenw., 22 (1951), Ht7/8, 205.
- 9) N. A. Klyucharev: Vestnik Mashin, 37 (1957), 40.
- 10) 戸澤康壽: 塑性と加工, 1 (1960), 23.
- 11) D. Lenz: Archiv Eisenhuttenw., 22 (1951), 215.
- 12) 宮川松男: 機械学会誌, 62 (1959), 713.