AZ31 マグネシウム合金押出パイプの曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響

須貝 純一*・岩井 匡之**・本保 元次郎***・清水 亨****
早田 博*****・アレキサンダー マクリーン*****

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 12 (2006), pp. 705-710

Effects of Mn content on bending formability of extruded AZ31 magnesium alloy pipes

Jun-ichi SUGAI*, Tadashi IWAI**, Genjiro MOTOYASU***, Toru SHIMIZU****
Hiroshi SODA***** and Alexander McLean*****

Formability of extruded round AZ31 magnesium alloy pipes with different manganese concentrations was evaluated by performing bending tests and measuring strain along the length of the pipes during the bending process. It was found that an increase in the amount of manganese content from 0.3% to 0.7% did not exert any significant effect on the values of yield stress, elongation, or compression to fracture, while the values of hardness tended to increase and UTS decreased. The compression ductility was significantly lower than tensile ductility for all manganese concentrations. Accordingly, the formability of pipes decreased, causing cracks in areas where compression strain occurred during bending. It was also found that a larger strain occurred in the latter half of the region along the length of pipe between the clamp-end and pipe positioning block. For alloy pipes with higher manganese concentrations (0.5 and 0.7 Mn mass%), there was a clear strain peak occurring in the strain profile in the region, while for the 0.3 Mn mass% alloy pipe it exhibited a more uniform strain profile along the length of the pipe in this region, indicating that a more uniform deformation took place which was confirmed by microstructure analysis of the specimens.

(Received April 3, 2006 Accepted August 8, 2006)

Keywords: AZ31 magnesium alloy, extruded pipe, bending formability, mechanical properties

1. 緒 言

マグネシウムは比重 1.74 と鉄の 1/4, アルミニウムの 2/3 と実用金属中最も軽量で, 高い比強度を誇る。優れた振動減衰能や対くぼみ性を有することから, 輸送用機器への適用において多くのメリットがある¹⁾。また, 製品重量が利用者および介護者の負担に大きく影響する福祉機器において, 軽量なマグネシウム合金の適用は利用者や介護者の負担軽減に大きく寄与する。マグネシウム合金を構造材に用いることで前述の多くのメリットを得ることができる。そのため, マグネシウム合金パイプを使用した種々の製品の試作^{2,3)}が試みられている。

これらの製品において, 展伸材の適用部位は多く, マグネシウム合金の適用拡大のために, パイプ曲げ加工技術は欠かすことのできない要素であるといえる。しかし, パイプの曲げ加工性について検討した研究^{4,5)}は少なく, 今後のマグネシウム合金の適用拡大のためにはより一層の研究が必要である。

一般に AZ 系マグネシウム合金には不純物として Fe が含まれているが, Fe は耐食性を著しく低下させる。そこで耐食性

の低下を防ぐために Mn が 0.2%~0.7% 程度添加されるが, 過剰 Mn は Al-Mn 化合物を晶出させている⁶⁾。そしてこのような金属間化合物は硬く脆い特性を持っており, 塑性変形能に影響を与えると考えられる。一方高 Mn 含有合金では加工性が低下するとの報告⁷⁾もあり, 曲げ加工条件によっては, 同じマグネシウム合金でも Mn 量の違いによって不良が発生することが予測される。しかし, ASTM 規格で規定される AZ31 合金の Mn 量は 0.2% 以上と添加量の上限はなく, 市場には種々の Mn 量の AZ31 合金が出回っている。しかしながら, AZ31 合金の曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響について知見はほとんどない。

そこで本研究では, 現在最も広く使用されている AZ31 合金押出パイプにおいて, 組織や機械的性質について調べ, さらに曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響について検討を行った。

2. 供試材および実験方法

試料は Mn 目標値 0.3%, 0.5%, 0.7% と Mn 量の異なる AZ31 マグネシウム合金押出材を使用した。試料組成を Table 1 に示す。Mn 量目標値 0.3%, 0.5%, 0.7% に対し, 実際の Mn 量は 0.32%, 0.58%, 0.71% となっている (以後

* 千葉工業大学, 大学院生 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1) [現在: ホダカ(株)]。Graduate Student, Chiba Institute of Technology (2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba 275-0016) [Present: Hodaka corp.]

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

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

**** 大阪富士工業(株) (大阪市)。Osaka Fuji Corporation (Osaka-shi, Osaka).

***** トロント大学工学部。Faculty of Engineering, University of Toronto (CANADA).

Table 1 Chemical composition of tubes

Alloy	Chemical composition (mass%)							
	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Mg
AZ31-0.3%Mn	3.05	0.90	0.32	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Bal.
AZ31-0.5%Mn	3.00	0.86	0.58	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Bal.
AZ31-0.7%Mn	3.05	0.98	0.71	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Bal.

Fig. 1 Work history of extruded AZ31 alloy pipes.

0.3%Mn-AZ31, 0.5%Mn-AZ31, 0.7%Mn-AZ31 と記す)。試料形状は直径 $\phi=25$ mm, 肉厚 $t=2$ mm 押出丸パイプである。押出条件は Fig. 1 に示したように, ビレット温度 623~643 K, 押出速度 5~7 m/s, 押出工程は $\phi 450$ mm 铸造ビレット → $\phi 88.9$ mm 押出ビレットとし, その押出ビレットから $\phi 25$ mm, $t=2$ mm 押出パイプへの 2 段階押出である。

曲げ加工前の各組成のパイプより試験片を採取してマイクロ組織観察を行い, 各試料間の組織について比較を行い, 切片法により結晶粒径を測定した。AZ31 合金中の Mn 量と金属間化合物の晶出の関係を検討するため, 倍率 200 倍にて $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 四方中に観察される金属間化合物数を目視により測定した。測定は長辺長さ $1\ \mu\text{m}$ 以上の化合物に限定し, 無作為に選んだ 30 の領域で行った。また, 曲げ加工後の試料からも試験片を採取してマイクロ組織観察を行い, 変形状態について考察した。

試料の機械的性質を知るために, 丸パイプと同組成, 同一の加工履歴の一片 25 mm, $t=2$ mm 角パイプより Fig. 2 に示した寸法形状の JIS 13B 引張試験片を作製し, 試験片とした。引張ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で試験を行い 0.2% 耐力, 引張強さ, 破断伸びを求めた。

圧縮試験は, $\phi 25$ mm, $t=2$ mm 丸パイプより全長 40 mm の試料を作製し, 試験片とした。評点間は試料全長の 40 mm である。圧縮ひずみ速度 $4.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で試験を行い, 降伏点, 圧縮強さ, 割れ発生ひずみを求めた。荷重が低下したところを圧縮強さとし, それに対応するひずみ量を割れ発生ひずみとした。

硬さ測定は, マイクロビッカース試験機を用い, パイプ周方向断面の肉厚中央部における硬さを, 試験荷重は 100 g, 加圧時間は 20 s の条件で測定した。

本研究において, 曲げ加工性の評価は曲げ加工試験およびひずみ測定によって行った。以下にその方法を述べる。

曲げ加工試験は, 京葉ベンド社製 (KBC DWB38PM) パイプベンダを用いて行った。本機は油圧により曲げ加工の制御

Fig. 2 Dimension of tensile test piece.

Fig. 3 Set-up and bending of pipe material.

を行うものである。試料であるパイプと接触する部分は, Fig. 3 の曲げ加工工程図に示されるように, パイプが収まる溝を持った曲げ型, クランプ, パイプの挿入位置を一定に保つための支えとなるプレッシャから構成される。曲げ型は, 引曲げ式加工によるパイプの曲げ加工限界 $R=2.75 \sim 3.00D^{7)}$ と比較して厳しい加工条件を得られるよう曲げ半径 60 mm ($R=2.4D$) のものを作製し, 使用した。

クランプで試料 (パイプ) を固定後, プレッシャで保持し, クランプ曲げ型と共に回転させ, パイプを曲げ型に添って巻きつけるようにして加工を行う。曲げ加工速度は $20^\circ/\text{s}$ に設定, 室温で加工した。加工開始時のクランプ端を曲げ開始位置として加工角度 (クランプ端とプレッシャがなす角度) を種々に変化させ割れの有無を観察し, 割れが発生し始める限界曲げ加工角度を見出しパイプの曲げ加工性を評価した。また, この試験では限界曲げ加工角度近傍の各条件においては 5 回以上曲げ試験を繰返し, 限界曲げ加工角度を確認した。なお, 本研究における限界曲げ加工角度は, 曲げ加工機の設定角度, 言い換えると曲げ加工時にパイプに加えられた変形

Fig. 4 Microstructures of extruded pipes.

角度としている。そして、加工後の弾性変形緩和により生じるスプリングバックの戻り角度は除外している。

曲げ加工時の変形挙動を調べるため、ひずみゲージを用いて曲げ加工時にパイプに生じるひずみを測定した。パイプを曲げ型に巻きつけて曲げ加工を行うため、パイプ外側のひずみを測定することは不可能である。そこで、治具を用いてパイプ内側にひずみゲージを接着して曲げ加工時におけるパイプ内側のひずみ量変化を測定した。ひずみ測定は、変形域であるクランプ端から 5, 15, 25, 35, 45, 55 mm の 6 地点で曲げカーブ内側において行った。曲げ加工角度を増加させていき、ひずみ量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 組織および機械的性質に及ぼす Mn 量の影響

Fig. 4 に各 Mn 量の AZ31 合金のミクロ組織を示す。パイプ材の押出温度が 350° から 370° と再結晶温度以上であるため、観察された組織は 10 μm から 20 μm 程度の結晶粒からなる再結晶組織であり、組織中には矢印で示した黒く見える金属間化合物の分散が観察された。切片法により求めた結晶粒径は、0.3%-AZ31 が平均 15.6 μm, 0.5%-AZ31 が平均 17.6 μm, 0.7%-AZ31 が平均 16.4 μm であった。このような差は Mn 量の違いによる影響とも考えられないこともないが、各ビレットの押出条件が必ずしも同一ではなかったのではないかと推測される。しかし、各試料での結晶粒径の差は 2 μm 以内と小さく、結晶粒径がパイプの曲げ加工性に与える影響は本研究では少ないと考えられる。

一方、合金中の Mn 量が増加するのに伴い、Al-Mn 金属間化合物⁶⁾と見られる相が増加し、またその化合物の分布には Fig. 4 に見られるように偏りがあるのが認められる。これらの金属間化合物について EPMA による元素分析を行った結果、SEM 像で観察された金属間化合物と推測される組織の部分の Al, Mn および Fe の特性 X 線強度が高いことから、これらの組織は Al-Mn, Al-Mn-Fe を主成分とする金属間化合物であると推測される。また、Table 1 に示されるように合金中の Fe 量は微量なため、Mn 量の増加に伴い増加するのは Al-Mn 系金属間化合物とみられる。

Fig. 5 に合金中の Mn 量と 100 μm×100 μm 四方中に観察された金属間化合物の数を示す。観察領域では 100 μm 四方に

Fig. 5 Number of intermetallic compounds, larger than 1 μm, observed in an area of 100 μm×100 μm in micrographs. Each value represents an average of 30 area counts.

1 個から 11 個の金属間化合物が確認できた。0.3%Mn-AZ31 では、各観察領域において観察される金属間化合物の数は比較的少なく、1 つの領域内において観察された金属間化合物は最大で 7 個である。0.5%Mn-AZ31 では 1 つの領域内において観察される金属間化合物は多くなり、最大で 10 個の金属間化合物が観察された。0.7%Mn-AZ31 では、さらに金属間化合物が多く観察される領域が増加している。それぞれの平均値は 0.3%Mn-AZ31 で 100 μm 四方あたり 4.70 個、0.5%Mn-AZ31 で 5.13 個、0.7%Mn-AZ31 で 6.23 個と、合金中の Mn 量が増加するのに伴い、観察される金属間化合物の個数は増加傾向にあることが確認された。なお、これらの金属間化合物は長辺が最大でも 7 μm 以下と小さいため、後述する試験での破壊起点にはなりにくいものと思われる。

Fig. 6 に押出したパイプの引張特性を示している。どの試料においても破断伸びはほぼ同じ値であり、Mn 量の増加の影響が見られなかった。しかし、合金中の Mn 量が増加するのに伴い 0.2% 耐力は増加し、後述する硬さの結果と一致し

Fig. 6 Values of tensile strength, yield stress, and elongation to fracture for the 0.3Mn%-AZ31, 0.5Mn%-AZ31 and 0.7Mn%-AZ31 alloy pipe materials.

Fig. 7 Values of compression strength, yield stress and compression strain to fracture for the 0.3Mn%-AZ31, 0.5Mn%-AZ31 and 0.7Mn%-AZ31 alloy pipes.

た。これに対し、Mn量の増加に伴い引張強さは逆に減少する傾向が見られた。これは引張変形に対する加工硬化の割合の違いによるものとも考えられるが本実験では明らかにならなかった。

押出したパイプの圧縮特性を **Fig. 7** に示す。図に見られるように合金中の Mn 量が増加した場合、降伏点がやや低下するものの圧縮特性に顕著な影響は認められなかった。また、破壊時の圧下率は約 10% と引張試験時の破断伸びと比べて低く、Mn 量による圧下率の差は見られなかった。また、Mn 量の違いによる試験片の変形状態についても差は見られなかった。**Fig. 8** に試験後の圧縮試験片の一例を示しているが、圧縮された試験片は矢印部分で端面付近のみがわずかに湾曲し 2~4% 程度膨らんでいた。いずれのパイプも割れは湾曲した内側で座屈により起こり、パイプ壁は折れ込むように割れ

Fig. 8 Example of a 0.3Mn%-AZ31 pipe after a compression test, showing deformation at the pipe end.

Fig. 9 Change in hardness value with manganese concentration.

ているのが確認された。以上のことは、曲げ加工時において圧縮側は引張側と比較してわずかな変形量で座屈破断することを示唆している。

なお、引張特性に対し圧縮特性が異なる傾向となったことについては、試験片の断面形状の違いや破壊形態の違いによるものと思われる。つまり、圧縮試験ではパイプ状試験片の上下端が圧縮プレートに接し、上下端が圧縮プレートに拘束された状態で変形している。加圧に伴い圧縮プレート近傍がバルジ状のたわみにより変形し、次にパイプ外周部からパイプ内部に向かって 45 度方向に座屈破断している。このような変形挙動や座屈による破壊形態が影響したものと推測する。

次に、各パイプの硬さ測定の結果を **Fig. 9** に示す。各組成で硬さ測定値のばらつきは大きいですが、それらの平均をとると 0.3%-AZ31 の硬さは 49.9HV となり、0.5%-AZ31 では 51.2HV、0.7%-AZ31 では 52.4HV と、Mn 量の増加に伴い、硬さが増加していく傾向が見られた。

Fig. 10 A 0.3%Mn-AZ31 alloy pipe, exhibiting fracture (indicated by an arrow) at the inner curved corner after bending to an angle of 49°.

Fig. 11 Manganese concentration in AZ31 alloy pipes and the change in the critical angle at which pipe fracture occurred.

3.2 パイプの曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響

Fig. 6, Fig. 9 に示されるように合金中の Mn 量の違いにより 0.2% 耐力や硬さ等の一部の機械的性質に変化が見られるため、次に Mn 量の違いがパイプの曲げ加工性に及ぼす影響を検討した。最初に、パイプの曲げ加工限度が Mn 量によってどのように変化するかを知るため、各々の合金パイプ破壊がおこるまで曲げ角度を変え加工試験を行い割れ発生角度を調べた。

曲げ加工後の破断した丸パイプの表面状態の例を Fig. 10 に示す。なお、割れが発生しなかった試料におけるスプリングバック量は 4~5° で、設定曲げ加工角度の約 10% である。割れの発生した試料では、パイプが割れ発生部で折れ込んでいる。いずれも割れは曲げカーブの内側で発生した。本研究の試料である AZ31 合金パイプは、引張側では約 20% の伸び変形が可能であるのに対し、圧縮側はわずか約 10% の圧下変形で破壊する。また、このパイプ材の降伏点は引張応力に対しては 160~175 MPa であるが、圧縮応力に対しては約 100 MPa と低いため、パイプの曲げ内側の湾曲面のほうで先

Fig. 12 Change in measured strain along the length of the pipes during the bending process.

に変形が始まると考えられる。そのため、曲げ内側で割れが先に発生する傾向になったと考えられる。

Fig. 11 に合金中の Mn 量と割れ発生角度の関係を示す。丸パイプ曲げ加工試験の結果、0.3%Mn-AZ31 は平均 49.6° で割れが発生した。0.5%Mn-AZ31 は 44.7°, 0.7%Mn-AZ31 は 40.9° で割れが発生し、Mn 量の多い試料ほど曲げ加工性は低下する傾向が認められた。

曲げ加工初めからパイプの破壊直前にいたるまでのひずみの変化を調べるため、ひずみゲージをクランプ端より 5, 15, 25, 35, 45, 55 mm のパイプ内壁面 6 点に取付け測定を行った。0.3%Mn-AZ31, 0.5%Mn-AZ31, 0.7%Mn-AZ31 合金パイプの曲げ加工角度の上限は Fig. 10 から判断して、それぞれ 50°, 44°, 40° とした。**Fig. 12** にそのひずみ分布の測定結果を示す。

本研究における曲げ加工では、パイプはクランプ端より順番に変形していくため、ひずみのピーク位置は図に示したように曲げ加工角度が増加するとともにクランプ端から離れた位置に移動していく。

Fig. 13 Microstructures of pipe specimens taken from the inner bent corner, showing the deformation twins.

0.3%Mn-AZ31 では、パイプに割れが発生せずに測定が可能な限界であった曲げ加工角度 50° の時点で、クランプ端から 45mm の地点で 10.0% の最大圧縮ひずみを検出した。このときのひずみ量のピークは曲げ加工とともにクランプ端から離れた位置に移動していき、最大ひずみを検出したのはクランプ端から 45mm の地点である。0.5%Mn-AZ31 では、曲げ加工角度 44° の時点においてクランプ端から 35mm 地点で 9.9% の最大圧縮ひずみを検出した。0.7%Mn-AZ31 では、曲げ加工角度 40° の時点においてクランプ端から 35mm 地点で 9.4% の最大圧縮ひずみを検出した。このことから、この曲げ試験では割れ直前の最大ひずみはクランプ端と支えの中間から支え側に位置し、大体クランプ端から 3/4 地点で起こることがわかった。

また、いずれの試料も曲げひずみが測定できた最大加工角度の 50° , 44° , 40° での最大ひずみ量は 10% に近い値を示している。これは Fig. 7 に示した圧縮試験時に割れが生じる圧下率の値とほぼ一致した。

一方、前に Fig. 6 および Fig. 7 で示したように、圧縮時の 0.2% 耐力は約 100MPa と低く、また合金中の Mn 含有量が多くなっても変化があまり見られないのに対し、Mn 含有量が多くなるに従って引張時の 0.2% 耐力が 160MPa から 175MPa へと高まる傾向が認められた。0.2% 引張耐力の増加はパイプの外側の塑性変形を起こしにくくするものであり、結果的に内側の変形量の増大につながるものと考えられる。Fig. 12 に示した各試料の加工角度 40° の時点で注目した場合、0.3% および 0.5%Mn-AZ31 合金パイプでは最大ひずみ量が 9% 以下であるのに対し、0.7%Mn-AZ31 合金パイプではクランプ端から 35mm の位置で 9.4% とかなり高い値を示している。

それに加えて、Mn 量が低く柔らかい 0.3%Mn-AZ31 合金パイプの場合は、加工角度が大きくなるとともに一か所の変形量が突出する部分変形からある範囲にわたって変形する均一変形になる傾向を示し、 40° および 50° の時点でクランプ端より 25mm から 45mm の位置のひずみ量とほぼ同じとなっているのが認められる。このように、Mn を多く含む硬いパイプ試料より均一に変形しやすいといえる。

以上のように合金中の Mn 量が少ないパイプほどパイプ内

側の変形量が少なくなりやすく、均一に変形するために限界曲げ加工角度が増加したと考えられる。

Fig. 13 に曲げ加工後、パイプの曲げ内側から切出した試料のマイクロ組織を示す。どの組成においても結晶粒内には変形による多くの双晶が観察された。そして、この変形双晶は 0.3%Mn-AZ31 合金パイプのマイクロ組織において最も均一に分布しているようにも思われたが、明確な差は見られなかった。

4. 結 言

本研究では、Mn 量が AZ31 マグネシウム合金押出パイプの機械的性質や曲げ加工性に及ぼす影響の検討を目的として行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) AZ31 パイプ押出材の Mn 量が 0.3% から 0.7% と増加した場合、金属間化合物の量が増加することが明らかとなった。
- (2) Mn 量の増加は圧縮特性に及ぼす影響はほとんど見られなかったが、硬さ、引張特性に影響を与えることが明らかとなった。
- (3) 曲げ加工時の破断はパイプ内側の座屈破断により起こり、Mn 量の増加に伴い座屈破断までの曲げ角度は低下する傾向が明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 例えば：大阪富士工業株式会社 Mg 事業部 マグネシウム合金の特性, <http://www.ofic.co.jp/mg/magne.htm>
- 2) 千葉工業大学マグネシウム材料研究所：軽金属, **49** (1999), 263-269.
- 3) 有限会社村山コーポレーション, 三協アルミニウム：マグネシウム合金製三輪車の試作, <http://www.sankyoalumi.co.jp>, (2004).
- 4) 代市敬之, 田村洋介, 本保元次郎, 金沢憲一, 佐藤英一郎, 清水貞明：軽金属学会第 103 回秋期大会講演概要, (2002), 123-124.
- 5) 長谷川収, 真鍋健一, 西村 尚：軽金属, **52** (2002), 298-302.
- 6) 吉田 雄, シーザー ローレンス, 関根卓義, 鎌土重晴, 小島陽：日本金属学会誌, **68** (2004), 412-417.
- 7) 雄澤 悟, 勝田基嗣：軽金属学会第 107 回秋期大会講演概要, (2004), 57-58.
- 8) 社団法人日本塑性加工学会：曲げ加工, コロナ社, (1995), 214.