委員会報告

マグネシウム合金展伸材の 標準性質測定に関する研究 (1)

マグネシウム委員会

On properties of wrought magnesium alloys products (1)

Magnesium Committee

1. 目的および供試材料

1.1 目的

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体の要件である。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。次にくべきものは展伸材部品のマグネシウム合金化である。

たとえば炭素鋼の桁をマグネシウム合金展伸材にかえるとすれば、同一の剛性を持たした時で、重量が4/10になる。かように軽量なものが得られるにもかかわらず、マグネシウム合金の展伸材は、いまだ JIS をも制定しえない程、わが国では経験が少ない状態である。これは1つには、マグネシウム合金展伸材に対する認識が少ないことであり、また終戦前の未発達な材料の経験をもととして、信頼性を疑われているためである。

本研究は、下記の供試材料により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。

1.2 供試材料

ASTM の規格に掲載されている合金の種類を選び、工業的生産規模において作成したものである。

マグネシウム合金板〔神神戸製鋼所長府工場製作〕

AZ31-O (標準成分 Al 3%, Zn 1%, Mn>0.2%, Mg 残)

AZ31-H24 (標準成分同上)

MIA-O (標準成分 Mn>1.2%, Mg 残)

MIA-H24 (標準成分同上)

マグネシウム合金押出型材〔古河アルミ製作〕

AZ31-F (標準成分 Al 3%, Zn 1%, Mn>0.2%,

Mg 残)

AZ61-F (標準成分 Al 6%, Zn 1%, Mn>0.2%, Mg 残)

ZK60-F (標準成分 Zn 5%, Zr 0.75%, Mg 残)
板厚; 1mm, 2mm, 4mm, 板幅×長さ; 60mm×1500mm

押出型材の寸法は Fig.1 に示す。

Fig. 1 押出し型材 (長サ 2000mm)

2. 引張試験およびカタサ試験

2.1 板材の常温の機械的性質

各所で試験した機械的性質の総括表を Table 1 に示す。

(1) AZ31-O について

同一板内の性質のバラツキには例外はあるが、引張強サおよび耐力では少いなが、伸びについて目立つ。板厚の変化による引張強サの相違はない。耐力も1例を除き相違はない。伸びは1mmと2mm厚は同一とみなされるが、4mm厚は大きい。

タテ、ヨコの方向性は、1mm, 2mm厚で引張強サ約1kg/mm² ヨコの方が大である。耐力はさらにヨコの方が大である。

伸びは1例を除いて相違がみられない。

(2) AZ31-H24 (2)について

同一板内の性質のバラツキは、O材に比較してはなはだしくはない。供試板全部についてのバラツキは1mm板タテ同一、ヨコ大、2mm板タテ、ヨコとも大、4mm板タテ小、ヨコ同一である。結局伸びを除きバラツキは多いことになる。板厚の変化による性質の変化は、バラツキが多いため推測できない。

Table 1 機械的性質の総集計表

	板厚	タ			ヨ			ビカース硬サ
		引張強サ (kg/mm ²)	耐力 (0.2%) (kg/mm ²)	伸ビ (%)	引張強サ (kg/mm ²)	耐力 (0.2%) (kg/mm ²)	伸ビ (%)	
AZ31-O	1 mm	24.0~25.8	14.0~15.1	11~20	25.3~26.3	15.7~16.5	10~20	49 48.6
	2 mm	23.2~25.0	12.7~14.7	11~19	24.3~26.3	16.7~17.6	8~20	
	3 mm	24.7~26.1	13.6~18.8	15~28	25.3~26.5	16.5~19.8	12~25	
AZ31-H24	1 mm	28.9~30.5	25.1~26.6	3~7	31.4~33.8		7~10	68.9
	2 mm	26.3~29.5	16.2~22.6	1~18	28.9~33.4	(25.5)	6~16	68.5 63.7
	3 mm	27.6~28.2	22.5~25.8	6~17	29.9~31.0	(27.3)	12~17	66.0 63.3
MIA-O	1 mm	19.4~21.0	10.4~11.6	7~11	23.0~24.8	15.0~16.7	6~9	41.2 50.7 42.8 51.3
	2 mm	20.8~23.1	14.7~15.7	5~9	24.0~27.6	20.5~22.5	6~13	
	3 mm	20.9~22.4	(15.6)	3~6	25.0~26.6	(20.2)	9~14	
MIA-H25	1 mm	19.2~20.0	13.2~13.6	4~6	(26.3~27.9)		(8)	41.3
	2 mm	20.2~29.6	18.1~19.3	5~8	26.2~31.4	(20.5)	9~11	41.7~45.6 49.0
	3 mm	20.4~26.0	18.9~20.8	1~10	22.4~27.6	(23.5)	4~10	40.9~45.6 46.6
AZ31-O		22.4~28	—	>12	Mil Specification (タテヨコ不明)			
AZ31-H24		>27.3	>20.3	>6	〃			
MIA-O		<26.6	—	>12	〃			
MIA-H24		>22.4	>15.4	>3	〃			

タテ、ヨコの方向性は、引張強サで約 2kg/mm² 位、ヨコの方が大である。

(3) MIA-O について

同一板の性質のバラツキはあまりない。供試板全部についての数値では 2 mm 板でバラツキがはなはだしい。板厚の変化による相違は 1 mm 板が引張強サおよび耐力が低い。

タテ、ヨコの方向性は、ヨコ板の方が引張強サおよび耐力で約 4kg/mm² 位大である。伸びはバラツキの範囲で不明である。

伸びについては、標点上あるいは標点外切断が約45%におよび、とくにタテ方向のものがこの傾向が多い。この原因は不明であるが、上記の表中の値はこれを考慮する必要がある。

(4) MIA-H24 について

同一板内の性質のバラツキは、4mm 板の 1 例を除き、O 材と同程度である。供試材全部についての数値でははなはだしい。タテ、ヨコの方向性は、O 材と同様ヨコ方向が大である。

MIL Specification の数値と、供試板とを比較すると、

AZ31-O は 3 つほどの不合格値が見られたが、大部分合格である。

AZ31-H24 は 1mm 板は、伸びがほとんど不合格である。

MIA-O は、伸びがすべて不合格となる。

MIA-H24 は 2mm 板は先ず合格であるが、1mm および 4 mm 板は、引張強サにおいて不合格が多い。

2.2 押出し型材の機械的性質

2.2.1 引張試験

Dow Metal Product Co. の標準的性質を基準に本実験の結果を検討する。Table 2 から押出材は、Dow C. の最小値を十分こえているが、標準値に達しない数値もある。

2.2.2 部分強度試験

試験方法は 15.5×3mmφ (平行 7mm) の Micro specimen (平行 7mm) を L 型、T 型押出型材より採り、シユナーベル型微少材料試験機で引張試験を行なった。引張試験の結果を Table 3 に示す。

2.2.3 破壊試験

材料としては、Table 2 に示した 6 種類の押出型材を

Fig. 2 破壊強度試験法

用い、Fig. 2 のように材料を 50mm 長サに切断したもの試験片として、治具にボルト止めして、腕の長サ約 20mm の点にアムスラー万能試験機にて圧縮力を加え、

Table 2 実験値と Dow 社保証値との比較

	材 質	引張強サ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸 ビ (%)	ブリネル硬サ
		(標準) (最小)	(標準) (最小)	(標準) (最小)	
Dow 社 保証 値	AZ31B —F	26.7 24.6	20.4 15.5	15 10	49 —
	AZ61A —F	31.6 28.1	23.2 16.9	16 10	60 —
	ZK60A —F	34.4 30.2	26.7 21.8	14 5	75 —
本実験値	AZ31B —F	26.5 ~ 27.3	15.8 ~ 17.0	14.3 ~ 19.8	—60.3 ~ 66.3
	AZ61A —F	30.5 ~ 30.9	17.9 ~ 19.5	17.7 ~ 23.2	—68.1 ~ 70.1
	ZK60A —F	31.1 ~ 34	21.6 ~ 27	11 ~ 14.7	—74.1 ~ 78.6

Table 3 微小試験片による押出し材の試験

材 質	形状	方向 ⁽¹⁾	機 械 的 性 質		
			引張強サ (kg/mm ²)	耐 力 (kg/mm ²)	伸 ビ (%)
AZ31B-F	T型	1	26	17.5	14.5
		2	26	15	18.5
		3	27	19.5	17.5
	L型	1 ¹	26	13.5	20.5
		2 ¹	27	19	18.5
AZ61A-F	T型	1	31	21.5	17.5
		2	31	20	19
		3	31	21	19
	L型	1 ¹	29.5	16	14
		2 ¹	31	22	17.5
ZK60A-F	T型	1	32	24.5	14.5
		2	31	18.5	23.5
		3	34	27	17
	L型	1 ¹	29	15.5	23.5
		2 ¹	31.5	24	18

(注) 表中の値は 0 つの実験値の平均を示す。

(1) は方向を示す番号でそれぞれ 1 は T 形脚部の押出方向にとつたもの、2 は T 形脚部の押出方向に直角のもの、3 は T 形脚部ツケ根で押出方向にとつたもの、1¹ は L 形押出方向に直角のもの、2¹ は L 形曲り角で押出方向に直角のもの。

試験片が破壊するまでの最大荷重を求めた。

この圧縮力の伝達には、ほぼ試験片と同じ長さを持った圧手を用いたので、試験中力が横へそれることなく、支点からの距離はほとんどくるわなかった。

弾性域での計算式をそのまま塑性域にまで適用して、計算した結果を Table 4 に示す。最大曲げ応力は引張強サ（押出方向に直角）の 96%~112% となつていることから、これらの押出材程度の表面粗さならば、曲げ応力に関しては影響はほとんどないと考えてよい。

3. 高 温 試 験

3.1 板材の高温引張試験

R.D (圧延方向), T.D (圧延方向と 30° をなす方向), S.D (圧延方向と 60° をなす方向), C.D (圧延方向に直角の方向) について室温 100℃, 200℃ において引張試験を行ない、板の方向性と温度依存性を調べた。ただし引張

Table 4 押出し材の破壊強度

諸 元 材 料	M (w × l)	$Z\left(\frac{bh^2}{6}\right)$	$\delta\left(\frac{M}{Z}\right)$	δ (平均)
AZ31B-F L型	9630	326	29.8	29.2
	9630	326	29.6	
	9310	324	28.8	
	9360	327	28.6	
AZ31A-F T型	5130	215	23.9	25.3
	5410	211	25.6	
	5610	211	25.6	
AZ61A-F L型	9860	337	29.2	29.8
	10150	335	30.3	
AZ61A-F T型	6440	210	30.7	29.6
	6080	209	29.1	
	6080	210	28.9	
ZK60A-F L型	11040	333	33.1	31.4
	10340	330	31.3	
	9950	327	30.5	
	10030	328	30.7	
ZK60A-F T型	7803	205	38.0	35.6
	7140	206	34.6	
	7400	212	34.9	
	7180	206	34.9	

(注) W : 試験片破断までの最大荷重(kg)

M : 水平にでた腕のつけ根の曲げモーメント。すなわち最大曲げモーメントを意味する (kg・mm)

Z : 腕のつけ根の断面係数 (Modulus of section)
矩形の場合 $Z = bh^2/6$ (mm³)

δ : 最大曲げ応力 $\delta M/Z$ (kg/mm²)

速度は 10mm/min (0.56%/sec) とした。

特に 30°, 60° という方向を選んだのは、圧延板の集合組織を考慮してのことである。すなわち、V. Cayliot と G. Sachs によれば (Metal Wirtschaft, Vol. 19 (1930) p. 693) マグネシウムの圧延板は底面が圧延面に平行で $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向が圧延方向に一致するような集合組織をとる。従つて R.D は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, T.D は $\langle 10\bar{1}0 \rangle$, S.D は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, C.D は $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 方向と一致するものと見られるからである。しかし、得られた結果は引張強サについては、Fig. 3, 伸ビについては Fig. 4 のごとくであ

Fig. 3 極限強さおよび耐力の異方性

Fig. 4 破断までの伸びの異方性

り、R.D. 方向から C.D. 方向に近づくにつれて機械的性質は単調に増加し、集合組織とは無関係であつた。R.D. 方向が悪いのは、マグネシウムにおいては広く認められている事実で、これは $\langle 30\bar{3}4 \rangle$ 双晶の形成によるのかも知れない。ただし Fig. 4 より伸びは 200°C では R.D. 方向の方がかえって大きい。100°C から 200°C の間で機械的性質に大きな相異があり、この温度範囲に再結晶温度があるものと思われる。200°C では異方性が少なくなっている。

3.2 押出し型材の高温引張試験

オルゼン式万能試験機 (5 t) に内径 80mm, 長さ 350 mm の炉を取付け、引張速度 7mm/min とし、試験温度に到達したら直ちに荷重する。

試験片は平行部長さ 60mm, 幅 14mm を T 形材の脚部から切断した。温度測定は試験片中央、標点の両端およ

Fig. 5 AZ31 ASM Data と国産材との比較

Fig. 6 AZ61 ASM Data と国産材との比較

び両チャック部の 5 カ所とした。切断までの要する時間は 3 分から 28 分間であつた。

高温引張強さは 75°C よりすでに下がり始め、100°C あたりより下がり方はさらに急となる。しかし 150°C 以上では引張強さの下降はゆるやかになり、400°C まで双曲線に近い形状で漸近的に下降していく。

室温から 75°C に至る引張強さの減少は、ZK60A が最も著しく $32.1 \text{ kg/mm}^2 (\text{R.T.}) - 27.0 \text{ kg/mm}^2 (75^\circ\text{C}) = 5.1 \text{ kg/mm}^2$ であり、AZ31 ではこれが 3.0 kg/mm^2 , AZ61A では 2.6 kg/mm^2 となつている。

引張強さ-温度のグラフは総じてなめらかであり、試験区間に特に異常な点は認められない。

一方、高温における伸びは 250°C ~ 275°C を越えると急にその値を増し始め、最大点での伸びは 200% を越えている。特に ZK60A は、350°C において最大 35% の伸びを示した。伸びは AZ31 が約 35%, AZ61A は約 40%, ZK60A は約 350°C で最大を示し、それ以上の温度ではかえって減少し、試験片の表面には「あれ」を生じ始める。

なお、ASM Committee Data より引用した AZ31, AZ61, ZK60 の高温強度・伸びの図と国産材を試料とした今回の試験結果とを比較のため Fig. 5 と Fig. 6 に併記したが、両者とも概略は同様の傾向であつた。

3.3 高温クリープ試験

(1) 試験装置

新三菱重工業㈱で試作した熱風式短時間引張クリープ試験機を用いた。

加熱された空気を循環させ、空気が試験温度に達したら、試験片を取り付けてある試験室へ導き、試験片を急速に試験温度まで加熱し、静荷重をかけてクリープ試験を行なうものである。この場合の変形量を抵抗式伸び計にて電気的に取りだして XY レコーダーにてクリープ曲線をえがく。

試験片の温度は直接試験片に熱電対を接触させて記録し、さらにこの熱電対によつて電子管式自動温度調節装置を用いて炉温を一定に保つようにした。また試験片に加わる荷重はレバーによつて伝えられるので、実際の荷重の大きさは張力計により測定し、これも記録をとつた。

(2) 試験材料

板材（輸入材以外はすべて板厚 2mm のものを使用した）、① AZ31B-O、② AZ31B-H24、③ AZ31B-H24 輸入材、④ MIA-O、⑤ MIA60-H24

押出型材、⑥ AZ31B-F、⑦ AZ61A-F、⑧ ZK60A-F、⑨ ZK60A-T5

ZK60A-T5 は、供試材 ZK60A-F を新三菱重工業㈱で熱処理したもので、その熱処理条件は Metals Handbook の 150°C 24hrs に従つた。

上記材料をそれぞれ Fed. Test Method No. 151 の Type 5 の試験片に機械加工した。

(3) 試験条件

温度：100、150、200、250、300°C の各温度で行なつた。

時間：この試験機では、1 回に 1 本の試験片しか実験できないので、長時間クリープ試験には不適當である。しかし、短時間でもその材料のクリープ性能の傾向を知ることができ、高温成形の点からいえば短時間クリープのデータこそ必要であるから、試験能率を上げるため実験はすべて 30 分まででうち切つた。

応力：各温度のもとで 30 分以内に適当なクリープ曲線をえがくような応力を 6～7 点取つた。

変形量：最大 10% までに止めた。

(4) 試験結果

各温度でのクリープ曲線から一定の変形量を生ずるような時間と応力の関係図を求め、さらにこの曲線より変形量と時間が一定の場合の温度と応力の関係図を求められ

ば Fig. 7 のようになる。

この図によれば、一定時間内に一定の変形を起すようなクリープ（クリープ速度が一定の場合）は、温度が上昇した場合どのような応力が作用すれば起るものか、が一見して判定できる。すなわち、Fig. 7 のような曲線は、その材質のもっている各温度におけるクリープ強度を示しているということができる。

各種合金について同様な図を求めたが、AZ31B-O、—H24, H24（輸入品）、MIA-O、—H24, AZ-61F, ZK61A-F-T5 の結果のみを Fig. 8 および Fig. 9 に示す。

AZ31B-H24 輸入材のみは、他の曲線と全然その形状

Fig. 7 一定変形量 (2.5mm/min) についての時間—応力曲線 (AZ31B, MIA)

Fig. 8 一定変形量 (2.5mm/30min) についての時間—応力曲線 (AZ31B, MIA)

が異なっている。そこで、他の曲線よりも測定量を増して再検討したが、結果は図に示す曲線のとおりであった。この傾向はエリクセン試験の結果とも一致するところで、一般に加工硬化をうけた材料はその材質のもつ再結

Fig. 9 一定変形量についての時間一応力曲線 (A61, ZK60)

Fig. 10 AZ31-O のタテ、ヨコの疲労曲線

晶温度以上に加熱すれば急激に強さが低下するはずで、輸入材のように、ある温度を境にして曲線の勾配が急になるのが普通であろう。したがって、他のすべての国産

Fig. 11 AZ31-O, ZK60-F の疲労曲線

材の方がむしろこの点からいえば、異常であるといえ、これらは加工硬化材特有の性質が弱く、むしろO材に近い性質であるためと考えられる。

4. 疲 労 試 験

(1) 試験方法

試験のために提供された材料は AZ31-O の板材および ZK60-F のT 型押出材であるから、試験機としてはシエンク式(板曲ゲ)疲労試験機を使用した。試験機の仕様は次のようである。

型式	41kg-m
繰返しモーメント	±2kg-m
繰返し速度	3000.p.m
主電動機	3Hp

試験は2カ所で行なった。

(2) AZ31-O

疲労曲線を Fig. 10 に示す。試験機Aで行なった試験ではわずかではあるが、中心部の材料が外側の材料よりも高い値を示している。試験機Bでは板厚が薄くなると同じ荷重でもフレが小さくなるから、それだけばつきが多くなることを考慮して板厚4mmのみを使用した。しかし板厚の厚いものが必ず高い疲労限を示すとは考えられない。

(3) ZK60-F (D13530)

試験機BにおいてT材の長手断面部を使用した。その疲労曲線を Fig. 11 に示す。この試験片は AZ31 のような圧延材よりも表面が粗く、左右の厚みのばらつきも多少認められた。

(以下次号につづく)