技術報告

AZ80マグネシウム合金の鍛造比および 加工流れ方向による機械的性質の変化

マグネシウム委員会・MWT 委員会**

Forging ratio and flow dependency of mechanical properties of AZ80

Japan Magnesium Association, Committee of MWT

(Received June 14, 1988)

1. ま え が き

AZ80マグネシウム合金の鍛造に関する基礎実験として、前報¹⁾では鍛造用押出し素材の押出し比および押出し形状による機械的性質の変化について報告を行った。本報告では、鍛造用素材として鋳造材および押出し材の両方を用いて、自由鍛造による据込み加工を行ったとき、鍛造材の機械的性質が圧下率、鍛造後の熱処理および加工流れ方向によってどのように変化するかについて、また、高い圧下率の試料を用いて、とくに破壊靱性およびき裂伝播について実験を行ったので、それらの結果をあわせて報告する。

2. 実験方法

実験に供した試料は、鋳造材は均熱処理として420°C、48 hの加熱後、225 mm (9 in) 直径から220 mm 直径に切削したもの (C 材) であり、押出し材は、鋳造材を押出し比6.1で押出し加工後、85 mm 直径から80 mm に切削したもの (E 材) である。それらの化学成分は表 1

表 1 鍛造用鋳造素材および押出し素材の化学成分

素材	化 学 成 分 (mass %)							
	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
鋳造	7.8	0.59	0.21	0.009	0.01	0.002	痕跡	残
押出し	7.8	0.54	0.18	0.005	0.01	0.002	痕跡	残

に示す。これらの材料は、鍛造後の最終厚さが15 mm となるように各圧下率に応じて最初の厚さ (T) を定め、表 2 に示す寸法に切削加工した。それぞれの圧下率 (R) は同表に示すとおりである。

表 2 各試料の鍛造圧下率および鍛造後処理

素材	試料記号	初期厚さ (mm)	圧下率 (%)	鍛造後処理*		
				FW	FA	T5
鋳造素材 (C) 押出し材 (E)	FW-O	15	0	0	—	—
	FW-3	22	30	0	—	—
	FW-5	30	50	0	—	—
	FW-7	50	70	0	—	—
	FW-9	150	90	0	—	—
	WT5-O	15	0	0	—	0
	WT5-3	22	30	0	—	0
	WT5-5	30	50	0	—	0
	WT5-7	50	70	0	—	0
	WT5-9	150	90	0	—	0
	FA-O	15	0	—	0	—
	FA-5	30	50	—	0	—
	FA-9	150	90	—	0	—
	AT5-O	15	0	—	0	0
	AT5-5	30	50	—	0	0
	AT5-9	150	90	—	0	0

* FW：鍛造後水冷，FA：鍛造後空冷，T5：焼戻し処理，O：該当処理施行

—AZ80マグネシウム合金の鍛造基礎実験*—

* 実験および執筆担当者については前報¹⁾参照** 委員については前報¹⁾参照

図1 引張試験片および衝撃試験片の採取箇所

図2 (a)衝撃試験片および(b)CT試験片の寸法

鋳造は、素材加熱温度を350℃、上下金型温度を300～350℃の範囲に設定し、潤滑剤を使用して据込み自由鍛造により行った。各試験片の鍛造後の熱処理は表2に示したとおりである。つまり、鍛造後水冷(FM)または空冷(FA)するか、その後177℃、20 h焼戻し(T5処理)したものである。これらの試料から図1に示す位置つまり加工流れを考慮して、試験片が採取された。

引張試験はJIS14A号試験片を用い、インストロン試験機によりひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で行い、引張強さ、0.2%耐力および伸びを測定した。衝撃試験はJIS3A号試験片〔図2(a)〕のUノッチ付で、容量5 kgf-mのシャルピー試験機で行った。硬さ試験は引張試験片と同一場所から採取した試験片について、荷重300 gfでマイクロビッカース硬さを測定した。さらに、破壊靱性およびき裂伝播試験に用いた試験片(CT試験片)を図2(b)に示す。用いた試料は70および90%圧下したC-FWおよびそれをT5処理したC-WT5である。

図3 鍛造後水冷した鋳造素材の引張性質の圧下率依存性

図4 鍛造後空冷した鋳造素材の引張性質の圧下率依存性

3. 実験結果

3.1 引張試験

3.1.1 鋳造素材による鍛造材(C材)

鋳造素材を用いて鍛造後、直ちに水冷した試料(C-FW)および空冷した試料(C-FA)、ならびにそれらをそれぞれ焼戻し処理した試料(C-WT5およびC-AT5)

の機械的性質の圧下率依存性を、図3および図4に示す。C-FW 試料のX方向における耐力は、圧下率が30%までは大きく上昇し、その後は一時停滞するが、50%を超えると再び上昇する。それに対して、引張強さは50%までは大きく上昇するが、それ以後はゆるやかな増加となる。また、外周の接線方向より採取したY方向の試験片の引張強さおよび耐力もX方向とほとんど同じ傾向を示し、これら両者間には大きな差はみられない。

一方、これらの試料における伸びは、50%以上の圧下により約16%と大きく増加する。これは、鍛造により形成される加工流れが低い圧下率のところでは弱く、鍛造時の樹枝状晶の一部が残存するのに対して、圧下率が50%以上を超えるとその加工流れが強く形成されるためと考えた。

焼戻し材 (C-WT5) の引張強さおよび耐力は、熱処理による析出効果がいきて、C-FW よりも全面的に高い値を示している。一方、伸びは圧下率30%において一度素材よりも減少するが、それ以後はC-FW と同様に増加の傾向を示す。しかし、全般的に6~10%と低い範囲にある。

鍛造後の冷却速度を遅くして空冷したとき (C-FA) でも、その性質はC-FW とほぼ同じ変化を示し、冷却速度の差による効果ははっきりと現れていない。一方、焼戻し材では、C-WT5の方が強さ、伸びともにC-AT5よりも高いが、その差はあまり顕著ではない。しかしながら、析出物分布の均一性等組織上からみると、水冷による方が好ましいとみられた。

3.1.2 押出し素材による鍛造材 (E 材)

押出し素材を用いて鍛造して水冷 (E-FW)、空冷 (E-FA) した試料ならびにそれらを焼戻しした試料 (E-WT5, E-AT5) について、それらの機械的性質の圧下率依存性を図5および図6に示す。E-FW についてみると、X方向における引張強さおよび耐力は、圧下率30%まではわずかな上昇にとどまり、C-FW にみられたような上昇傾向はない。しかし、それ以後の圧下率での上昇割合はかなり大きい。それに反して、伸びは圧下率30%で素材よりも大きく上昇するが、その後減少、増加と変動が大きい。とくに、外周のY方向に比べてX方向の伸びが低い値を示している。これは試料中央部の組織が外周部より細粒となっているためと思われる。

焼戻し材 (E-WT5 および E-AT5) での強さは、E-FW および E-FA と類似の傾向を示しているが、焼戻しによる効果が圧下率50および70%の試料の耐力にみられる。しかし、全般的にはC材にみられるような差が現れていない。これは、鍛造前に存在している押出し加工流れが大きく作用しており、析出による効果が顕出していないためと思われる。伸びについては、焼戻し材では

図5 鍛造後水冷した押出し素材の引張性質の圧下率依存性

図6 鍛造後空冷した押出し素材の引張性質の圧下率依存性

一様に低い値を示しており、圧下率に対する変化が小さい。

3.2 衝撃試験

鍛造素材を用いた鍛造試料、C-FW, C-WT5, C-FA および C-AT5 について衝撃値の圧下率依存性を図7に示す。C-FW では、圧下率の増加に伴い衝撃値は高くなり、70~90%の圧下で170~190 kJ/m²である。この傾向は伸びの増加 (図3参照) に対応している。また、Y方向はX方向に比べて全般的に高く、Z方向と類似

図7 鍛造後水冷または空冷した鋳造素材の衝撃値の圧下率依存性

図8 鍛造後水冷または空冷した押出し素材の衝撃値の圧下率依存性

な値である。一方、C-WT5では圧下加工によって衝撃値が低下し、20~40 kJ/m²の範囲にあって、試験片の方向にはほとんど依存しない。C-FAはC-FWよりも全般的に低い値を示すが、C-AT5はC-WT5と大差がなく、衝撃値は圧下率が増すにつれて低下する傾向にある。

E-FW, E-WT5, E-FA および E-AT5 等押出し素材を用いて鍛造した試料についての結果を図8に示す。E-FWでは、圧下率が70%まで衝撃値は高くなるが、90%の圧下においては非鍛造材（素材）と同程度に戻る。E-WT5は圧下率による変化が少なく、全般的にE-FWよりも低い値を示す。E-FA, E-AT5はそれぞれE-FW, E-WT5と同様の傾向を示すといえよう。

3.3 硬さ試験

鋳造材 (C) (-FW, -WT5, -FA, -AT5) および鍛造材 (E) (-FW, -WT5, -FA, -AT5) について、硬さの圧下率依存性を図9に示す。圧下による硬さの上昇はC材

図9 鍛造後水冷または空冷した鋳造または押出し素材の硬さ値の圧下率依存性

図10 圧下率70および90%鍛造した鋳造素材C-FW および C-WT5 ならびに押出し素材E-FW および E-WT5 の破壊靱性値 K_q 値: G-粒状破面, F-繊維状破面

の方が大きい。これは鍛造前の硬さが低いためである。冷却条件の違いによる効果は、C材では水冷の方(FW)およびWT5)が空冷のもの(FAおよびAT5)よりも高い硬さを示しているが、E材では両者の差はほとんどない。この理由については明らかではない。

3.4 破壊靱性およびき裂伝播試験

破壊靱性試験(CT試験)により得られた破壊靱性値 K_Q を一括して図10に示す。この図での70%圧下したE材の試験片(E-FW, E-WT5)は試料の寸法上、 X_1 , Y_1 は採取されず、 X_2 , Y_2 のみである。同図をみると、それぞれの素材(CおよびE)のF材の靱性はT5材よりも高い。しかし、C-FW(90%)以外のF材は異方性が大きく、値がばらついている。とくに外周X方向(試料 X_2)の靱性が高くなっている。それに対してT5処理のものは異方性がかなり少ない。測定値を単純に平均すると、F材の K_Q は $47 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($14.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、T5材では $39 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($12.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)である。

き裂伝播試験はCT試験片により行った。その結果を図11に示す。図中aはE材、bはC材の結果である。これらではF材とT5材との区別なく、また、a図には試料BのE-F材もあわせてプロットしてある。図11によると、C材の結果は誤差範囲内にあるとみられるが、E材では、同一系の試料間に測定値のばらつきが大きく、き裂の円滑な成長がみられないものがある。一方、同試験において、試料破壊直前でき裂長さ上限内での K_Q 値を求めた。それによると、下限応力拡大係数(き

裂非成長限界) K_{th} は $10 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($3.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、疲労破壊靱性値 K_{fc} は $25 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($7.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)以上とみられる。本系列の試料は $K_{fc}/K_Q=0.66 \sim 0.81$ として整理される。応力拡大係数に対する疲労き裂伝播速度の変化 $[(da/dN)/dK]$ をみると、E材の方がC材より

図11 鍛造したAZ80合金における疲労き裂成長速度と応力拡大係数変動幅との関連

a) 押出し素材 (E材): 1; E-FW (70%) Y2, 2; E-FW (90%) X1, 3; E-WT5 (90%) X2, 4; E-FW (試料B)
b) 鋳造素材 (C材): 5; C-FW (70%) Y2, 6; C-WT5 (70%) Y2, 7; C-FW (90%) Y1, 8; C-WT5 (90%) X1
これら試料の破壊靱性値 K_Q は、次のとおりである。

試料 No. と 破面模様	1 繊維状	2 粒状	3 (繊維状)	4 粒状	5 繊維状	6 粒状	7 繊維状	8 粒状
$K_Q \text{ kgf/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$	42	38	46	35	54	38	45	39
K_{IC} 許容判定	有効	有効	有効	無効	無効	無効	有効	有効

図12 破壊靱性試験 (1~3, 5, 7, 8) およびき裂伝播試験後 (4, 6) の破面例

表3 AZ80A 合金の ASTM 規格

合金 調質	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び(%)
AZ80A-F	>290	>179	>5
AZ80A-T5	>290	>193	>2

き裂の伝播が遅い傾向にあることがうかがわれる。

上記試験を終えた試料はその破面についてマクロ組織観察を行った。その結果、図12に例示するように、C-F、E-F 材いずれも繊維状の模様がみられたが、前者は直線状であり、後者は湾曲状である。T5 材では粒状模様となっている。

4. 考 察

本合金の鍛造品は ASTM において AZ80A-F および T5 が規定されている²⁾。その規格値を表3に示す。それと比較しながら本結果について考察する。

鍛造素材を用いた C-FW、C-FA では、圧下率50%において引張強さが304 MPa、伸びが16.3%であり、良好な値が得られているが、耐力は176 MPa で多少低い値となっているから F 材として用いるときには70%以上の圧下率を与える必要があろう。

一方、T5 処理をした C-WT5、C-AT5 は圧下率30%での平均値が、引張強さで293 MPa、耐力で215 MPa、伸びで4.7%であり、ASTM の規格値を満足している。しかし、鍛造した円盤状試料の周縁部の引張強さが304 MPa であるに対して中心部では284 MPa とやや低下しており、規格以上の値を確保するには50%以上の鍛造を行うことが望ましい。押出し素材を用いた E-FW、E-FA およびそれらの T5 材、E-WT5、E-AT5 の強さは90%近くまでの圧下加工を行わなければ、規格値を超える値が得られない。とくに、鍛造素材に比べて全般的に強さが低い。このことは、押出し加工流れにそって圧縮加工がなされたため、鍛造による加工流れの形成が弱められ、押出し加工の際にできた既存の加工流れが、70%

付近の圧下まで残存していることが一因と思われる。しかし、凝固による化合物偏析を伴う樹枝状晶組織を破壊するには押出し加工を行った素材を用いるのがよい。

5. ま と め

鍛造素材および押出し素材を用いて据込み自由鍛造を行い、機械的性質に及ぼす圧下率の影響と高圧下率加工材における破壊靱性およびき裂伝播について調べた。その結果、次のことが分かった。

(1) 鍛造素材を鍛造した C-FW、C-FA、C-WT5、C-AT5 のいずれも強さは圧下率50%まで大きく上昇するが、それ以後の増加割合は少ない。しかし、伸びは50%以上の圧下により増加する傾向にある。

(2) 機械的性質が ASTM 規格値を超えるには、圧下率を C-F 材では70%、C-T5 材では50%以上とする必要がある。

(3) 押出し素材を鍛造した試料では、押出しによりすでに形成されていた潜在加工流れは、かなり高い圧下率まで残存し、その残存加工流れと鍛造方向が一致すると成品の強さの上昇がみられないことがあるので、そのようなときには90%以上の強加工が必要である。

(4) 衝撃値は C-FW で100 kJ/m² 以上、C-WT5 で20 kJ/m² 以上の値が得られ、E-FW では40 kJ/m² 以上、E-WT5 で20 kJ/m² 以上であった。

(5) 破壊靱性試験では、平均して F 材では K_{Ic} 値は $47 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($14.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、T5 材で $39 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($12.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) であった。また、き裂伝播試験ではすべての試料を含めて K_{Ic} が $10 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($3.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、 K_{Ic} が $25 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ($7.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 以上とみられ、 $K_{Ic}/K_{IIc} = 0.66 \sim 0.81$ であった。

参 考 文 献

- 1) マグネシウム委員会：軽金属，38 (1988)，807.
- 2) ASTM: Annual Book of ASTM Standards (1986) Section (2)，75.