研 究

AZ91 マグネシウム合金切粉押出し材の押出し比と機械的性質との関係

中西 勝^{☆1}, 馬淵 守^{☆1}
久保田耕平^{☆2}, 東 健司^{☆3}

^{☆1} 名古屋工業技術研究所材料プロセス部, 〒462 名古屋市北区平手町1-1.

^{☆2} 三井金属鉱業株式会社総合研究所, 〒362 上尾市原市1333-2.

^{☆3} 大阪府立大学工学部, 〒593 堺市学園町1-1.

Relationship Between Extrusion Ratio and Mechanical properties of Extruded Machined-chips of AZ91 Magnesium Alloy

Masaru Nakanishi^{☆1}, Mamoru Mabuchi^{☆1}
Kohei Kubota^{☆2} and Kenji Higashi^{☆3}

^{☆1} Materials Processing Division, National Industrial Research Institute of Nagoya, 1-1 Hirate-cho.

^{☆2} Corporate R & D Center, Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd., 1333-2 Haraichi, Ageo 362.

^{☆3} Dept. Mech. Eng., University of Osaka Prefecture, 1-1 Gakuen-cho, Sakai 593.

Received December 5, 1994

Relationship between extrusion ratio and mechanical properties was examined on hot extruded machined-chip of AZ91 magnesium alloy so as to establish a technology to recycle magnesium alloys from machined chips by a simple method. High tensile strength was achieved when the machined chips were extruded at an extrusion ratio of 4.9 or more compared with a material extruded at a ratio of 1.8 or a hot pressed material because the machined chips were completely bonded to each other and microstructure such as grains and $Al_{12}Mg_{17}$ precipitates was refined by severe plastic deformation of the machined chips during hot extrusion. A material extruded at a ratio of 44 showed the highest tensile strength of 373MPa, while the strength decreased when the extrusion ratio increased up to 100 owing to recovery of the microstructure. On the other hand, fracture strain increased with increasing extrusion ratio; 7.3% or more fracture strain was achieved especially when the extrusion ratios were 44 or 100 because initiation and growth of cracks were suppressed by the refined microstructure.

1 緒 言

マグネシウムは比重が約 1.7 で実用金属中最も軽く、比較的高い強度を示すため、航空宇宙あるいは自動車などの構造用材料としての利用が期待され、今後消費量が增大するものと思われる。また、マグネシウムは高速で精密な切削加工が可能で、製品の製造過程に切削加工が用いられる場合が多いことから、将来マグネシウムの消費量の増大に伴って、多量の切削粉が産出

されることが予測される¹⁻⁴⁾。このような切削粉は適切な方法で処理する必要があるが、現在のところ再溶解や焼却などの処理法が採用されており、多大なコストあるいは資源の浪費が避けられない。したがって、マグネシウムの利用を促進するためには切削粉を効率的に再利用する技術を確認することが重要である^{5, 6)}。

以前の報告で、著者らは AZ91 マグネシウム合金を直接熱間押出しするという簡単な方法によって、優

れた強度と延性を合わせ持つ材料が得られることを明らかにした⁷⁾。熱間押出しの際には、押出し比や押出し温度などの押出し条件が、粒径や析出物などの微視組織に影響を及ぼし、したがって押出し材の特性を支配する。しかし、現在のところ、マグネシウム切削粉の押出し条件と材料特性の関係について調べた例は見られない。そこで、この報告では、AZ91マグネシウム合金の切削粉を種々の押出し比で熱間押出しして押出し材を作製し、その微視組織を光学顕微鏡で観察した後、引張試験や硬さ測定を行うことによって、押出し比と室温での機械的性質との関係について調べた。

2 試料および実験方法

今回用いた AZ91 合金は、Mg-9.0%Al-0.7%Zn の組成を持ち、そのインゴットを旋削することによって切削粉を用意した。得られた切削粉の外観を Fig. 1 に示す。この切削粉を、大気中・温度 523K で、Table 1 に示すように 1.8 から 100 までの押出し比で直接熱間押出しすることにより、押出し比の異なる 4 種類の押出し材を得た (R1.8 材, R4.9 材, R44 材, R100 材と呼ぶ)。また比較のため、温度を押出し材と同じ 523K とし、Table 1 に示す圧力で切削粉を焼結することにより、ホットプレス材を作製した。

これらの試料は研磨後、エッチングを行い、光学顕微鏡を用いて微視組織を観察した。また、室温での機械的性質を調べるために、引張試験、引張破面観察およびビッカース硬さの測定を行った。引張試験片は、平行部径 5mm、標点距離 18mm として、押出し材では押出し方向と平行に、またホットプレス材では加圧方向と垂直に切り出し、クロスヘッド速度 1.7×10^{-5} m/s で引張試験を行った。引張破面観察には SEM を使用した。

3 実験結果および考察

ホットプレス材、R4.9 材、R44 材の微視組織をそれぞれ Fig. 2 (a)-(c) に示す。マグネシウム母相中に濃い灰色の $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 化合物の析出が見られ、ホットプレス材では Al-Mg 化合物は粗大であり、形状が板状であるのに対して、押出し材ではサイズが小さく粒状であり、R4.9 材よりも R44 材の方が均一に分散している。また、結晶粒径に関しても、ホットプレス材より押出し材の方が小さく、R4.9 材よりも R44 材の方が小さい様子が観察される。

このように押出し材が微細な組織を持つ原因は次の

Figure 1 Appearance of AZ91 machined chips.

Table 1 Extruding conditions for machined chips of AZ91 magnesium alloy.

material	extrusion ratio	extruding temperature(K)	pressure (MPa)
R 1.8	1. 8	5 2 3	2.6×10^2
R 4.9	4. 9	5 2 3	3.9×10^2
R 44	4 4	5 2 3	9.4×10^2
R 100	1 0 0	5 2 3	1.1×10^3
H P	(hot pressed)	5 2 3	3.1×10^2

ように説明される。ホットプレス材では、ホットプレスによって AZ91 合金の切削粉が固められるものの、切削粉の塑性変形の程度は小さく、粒径や析出物などの組織は粗大なままである。それに対して押出し材では、熱間押出しによって切削粉が激しく塑性変形をおこして互いに結合し、それに伴って粒径が小さくなって、析出物も微細化する。押出し比が大きい程切削粉の塑性変形の程度が大きくなり、組織が微細化するものと考えられる。

押出し材とホットプレス材の引張破面の SEM 写真を Fig. 3 に示す。R44 材および R100 材では (c),(d) に示すように均一で小さいディンプルが観察され、粒内延性破壊によって破断したことがわかる。R4.9 材においても (b) に示すようにディンプルが観察されるが、小さいクラックも見られることから、R4.9 材は R44 材や R100 材よりも脆いことがわかる。押出し材とは対照的に、ホットプレス材では (a) に示すようにディンプルは見られず、大きいクラックが観察され、脆性破壊による破断を示している。

R4.9 材と R44 材の応力ひずみ曲線および 0.2% 耐力

Figure 2 Optical micrographs of (a) hot pressed material, (b) material R4.9 and (c) material R44.

を Fig. 4 に示す。両材料ともひずみが 1.5% 以下の領域では加工硬化率が高いが、ひずみがおおよそ 2% 以上になると硬化率は非常に小さくなり、応力はあまり変化せずにひずみが増大する。ただし、破断に至るひ

Figure 3 SEM fractographs of (a) hot pressed material, (b) material R4.9, (c) material R44 and (d) material R100.

ずみの値は R4.9 材より R44 材の方が大きいことがわかる。低ひずみ域での加工硬化率が高いため、0.2% 耐力は、R4.9 材で 259MPa、R44 材で 282MPa とマ

Figure 4 Nominal stress strain curves and 0.2% proof stresses of material R4.9 and material R44.

グネシウム合金としてはかなり高い値となった。このように、押出し材の低ひずみ域で高い加工硬化率が得られるのは、Fig. 2に見られるような、 $Al_{12}Mg_{17}$ 析出物の微細分散や、小さい結晶粒径によるものと考えられる。R44材では組織がR4.9材よりも微細であるために、0.2%耐力がR4.9材よりも高くなった。

Figures 5, 6はそれぞれ押出し比と引張強さ、破断伸びの関係を示す。図中、ホットプレス材は押出し比を1として示してある。引張強さは、ホットプレス材で105MPa、R1.8材で141MPaであるのに対して、R4.9材、R44材ではそれぞれ366MPa、374MPaと非常に高い値となっている。また、R100材ではR44材よりも約8%引張強さが低下し、349MPaとなった。一方、破断伸びはホットプレス材、R4.9材、R44材、R100材でそれぞれ1.6%、5.6%、7.3%、9.2%となった。これは、押出し比が大きい程破断伸びが大きくなり、延性が増大する傾向があることを示している。さらに、Fig. 7に押出し比とビッカース硬さとの関係を示す。引張強さの場合と同様、ホットプレス材およびR1.8材よりもR4.9材、R44材の方が値は大きくなり、R4.9材とR44材ではビッカース硬さは約100となった。R100材ではR44材よりも約9%値が低かった。

以上のように引張強さ、破断伸びおよびビッカース硬さは押出し比に依存することがわかったが、これは以下のように説明される。まず、ホットプレス材では

Figure 5 Relationship between extrusion ratio and tensile strength of both hot pressed and extruded materials.

Figure 6 Relationship between extrusion ratio and fracture strain of both hot pressed and extruded materials.

析出物や結晶粒がFig. 2で見られるように粗大であり、また切削粉が互いに完全に結合していないと思われる。したがって、引張によって切削粉の界面でクラックが発生し、初期の段階でそれが容易に大きいクラックに成長して破断に至るため、引張強さ・破断伸びは小さくなる。次に、押出し比が1.8の押出し材では熱間押

Figure 7 Relationship between extrusion ratio and Vickers hardness of both hot pressed and extruded materials.

出しによって切削粉の結合がホットプレス材よりも強くなるため、変形抵抗が大きくなって引張強さやビッカース硬さはやや増大する。これらの材料と比較して、押出し比が4.9以上の押出し材では、熱間押出しによって激しい塑性変形がおこり、切削粉どうしが強く結合しながら組織が微細になるため、引張強さやビッカース硬さは顕著に増大する。さらに、組織の微細化によってクラックの成長が抑制されるため、破断伸びも大きくなる。

押出し比が4.9以上の3種類の押出し材の間の特性の相違も押出し比によって微視組織が異なることに起因する。R4.9材とR44材では引張強さやビッカース硬さがほぼ等しいのに対して、破断伸びはR44材の方が大きい。これは、R4.9材はR44材よりも組織が粗いことに関係している。すなわち、破面のSEM写真(Fig. 3(b))でディンプルとクラックの両方が観察されることからR4.9材はある程度は通常の延性機構で伸びるものの、組織の粗さのために最終的にはクラックの成長によって破断がおこると推測され、そのためR44材よりも破断伸びが小さくなる。R44材とR100材では、組織が微細であるためクラックの発生と成長が抑制され、SEMによる破面観察からもわかるように粒内延性破壊によって破断する。ところが、両者の特性には相違があり、引張強さやビッカース硬さは

R44材の方が大きく、破断伸びはR100材の方が大きい。両者の破面にはほとんど差が見られないことから(Fig. 3(c),(d))、このような特性の相違は、熱間押出し時の組織の回復によると考えられる。すなわち、R100材では押出し比が高く、激しい塑性変形がおこるため、523Kという比較的低い温度であっても組織の回復がおこって転位密度が低くなり、そのため上述の特性の相違が生じる。

4 ま と め

種々の押出し比で熱間押出したAZ91マグネシウム合金の切削粉について微視組織や室温での機械的性質を調べた結果、以下のようなことがわかった。

(1) 押出し比が大きい程、切削粉の塑性変形の程度が激しくなり、その結果、結晶粒や $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 析出物が微細になるなど、組織が微細化する傾向が見られた。

(2) 押出し材の引張強さは、押出し比が4.9以上の時に、切削粉どうしが強く結合するためほぼ350MPa以上と押出し比が1.8のものに比べてはるかに高い値が得られ、特に押出し比が44の時には組織の微細化によって、374MPaとなった。しかし、押出し比を100まで上げると44の場合よりも低くなった。

(3) 破断伸びは押出し比が大きい程増加し、特に押出し比が44以上では微細な組織のためにクラックの発生と成長が抑制され、7.3%以上の破断伸びが得られた。

(4) 本実験で見られた押出し比による性質の相違は、主に結晶粒の大きさや、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 析出物の大きさと分散状態に依存するが、押出し比が低い領域では切削粉の結合状態が異なることによって、また押出し比が高い領域では組織の回復が転位密度の変化をもたらすことによって説明される。

文 献

- 1) 嵯峨常生：軽金属，42 (1992) 699.
- 2) 栗原健助，菊池庄作：軽金属，16 (1966) 188.
- 3) 諸住正太郎：金属，57 (1987) No.5, 8.
- 4) 嵯峨常生，永井修次，佐藤英一郎：軽金属，41 (1991) 232.
- 5) J.S.Viland：マグネシウム，20 (1991) No.3, 10.
- 6) H.Culter：マグネシウム，22 (1993) No.1, 9.
- 7) 馬淵守，久保田耕平，東健司：粉体および粉末冶金，40 (1993) 397.