

純MgおよびMg合金多結晶における 変形機構

崇城大学[学] ○安井健悟 崇城大学[院] 幸島元彦
崇城大学 小野長門 崇城大学 三浦 精

1 緒 言

実用金属中で最も軽いMgは比強度および減衰能が高く電磁遮蔽性やリサイクル性にも優れていることから、その合金は次世代の循環型超軽量材料として大いに期待されている。しかし、Mg合金は最密六方構造を有し室温では底面すべり系が支配的で変形能が低く、柱面および錐面すべり系が変形に寄与する高温でなければ加工が困難とされている。このMgは粒径依存性が大きく、結晶粒微細化が強度の向上に大きな影響を及ぼすことも指摘されている。

本研究では、AZ31のMg合金を用いて77~523Kで引張試験を行い、まず変形応力と結晶粒径との関係を明らかにした。この結果から、各変形温度の0.2%耐力でのHall-Petch¹⁾²⁾関係の妥当性やその傾きと切片応力の温度依存性を調べ、塑性変形機構について検討した。さらに、純MgとAZ31合金に対し、188~573Kで歪速度急変試験および応力緩和試験を行って歪速度感受性指数や活性化体積を求め、熱活性化変形機構についても追求した。

2 試料および実験方法

本研究では、大阪富士工業(株)で作製された99.95%純度のMgとMg-3wt%Al-1wt%Zn合金のAZ31合金圧延板を用いて、まず平行部が1mm×5mm×50mmの板状試験片を切り出した。次に、573Kおよび673Kでの歪焼鈍法により、純Mgは60 μ m、AZ31合金は16~35 μ mに調整した試料を作製した。AZ31合金は電解研磨した後、77~523Kで常に歪速度 $1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ での引張試験を行った。さらに、平均粒径60 μ mの純Mgと23 μ mのAZ31合金に対し、188~573Kで歪速度急変試験および応力緩和試験を行った。なお、歪速度急変試験での歪速度の比は1:10とし、応力緩和試験では300s間応力を緩和させた。

3 実験結果および考察

3.1 Hall-Petch 関係の検討 AZ31合金の293K、0.1~3%歪量での変形応力と $d^{-1/2}$ 乗した平均粒径との関係をFig.1に示す。図中の各プロット点は、3回以上測定したときの平均値である。変形応力と粒径は、すべてHall-Petch関係をよく満足する。さらに、この直線関係は77~523Kにおいてもほぼ同様に成立する。各試料の直線の傾き k_p 値には歪量依存性が認められないが、切片応力 σ_0 値は歪増加に伴って加工硬化により大きくなる。Fig.2は、AZ31合金の77~523Kでの0.2%耐力と $d^{-1/2}$ 乗した平均粒径との関係をまとめたものである。各直線の k_p と σ_0 値はともに変形温度の増加に伴って減少し、特に423K以上の温度で小さくなる。

Fig.2に示した0.2%耐力での直線の傾き k_p 値の温度依存性を表したものをFig.3に示す。AZ31合金の k_p 値は純Mgの結果³⁾に比べてすべての温度で大きくなるが、その差は温度増

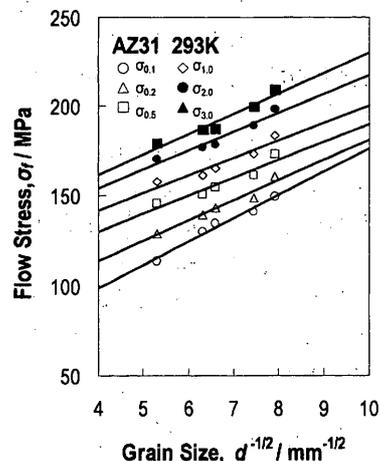


Fig.1 Relation between the flow stress and the inverse square root of the average grain size in AZ31 alloys at 293K.

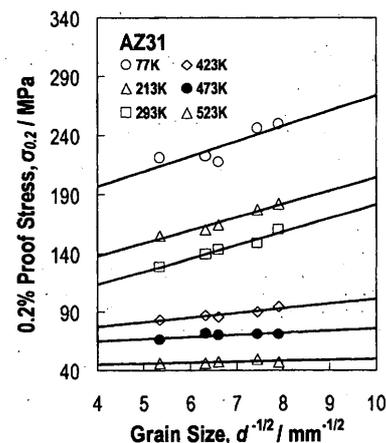


Fig.2 Relation between the 0.2% proof stress and the inverse square root of the average grain size in AZ31 alloys at various temperatures.

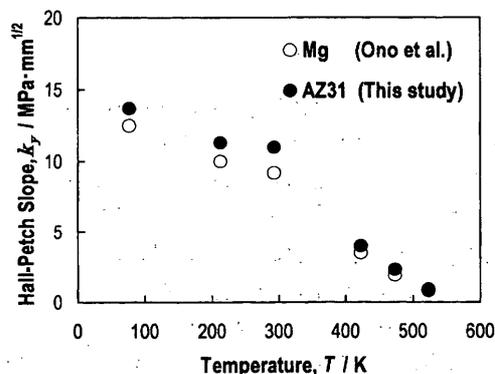


Fig.3 Temperature dependence of the k_p values of the straight lines shown in Fig.2. The empty circles are the data according to Ono et al.³⁾

加に伴って減少し 523K ではほとんど認められない。この k_p 値の差異は、Mg 母相中での Al や Zn による可動転位の固着作用によるものといえる。また、AZ31 合金での温度増加に伴う k_p 値の減少傾向は、純 Mg のものとよく一致する。特に、423K 以上での k_p 値の顕著な低下は、室温の変形で支配的な底面すべりに加えて非底面すべりが活動することによるものと考えられる。このため、活動すべり系の数に関係した方位因子 m 値が小さくなり⁴⁾、 k_p 値が低下するといえる。

3.2 熱活性化変形機構の検討 応力緩和試験における応力低下率は次の式⁷⁾で表される。

$$\ln(-\dot{\sigma}) = C + n \ln \sigma \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\sigma}$ は応力低下率、 C は定数、 n は応力感受性指数である。また、活性化体積 v^* は次の式⁶⁾で表される。

$$nkT = \sigma v^* \quad (2)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は変形温度、 σ は変形応力である。(2)式で求めた v^* の値から、次の(3)式を用いて Hall-Petch 関係での k_p 値を求めることができる。

$$\frac{d \ln(-\dot{\sigma})}{d \ln a} = \frac{k_p d^{-1/2}}{2 \Psi \Psi^* k T} \quad (3)$$

この式の Ψ は Taylor 因子、 Ψ^* は Sachs 因子である。

応力緩和試験で求めた純 Mg の 453K での k_p 値を $10\mu\text{m}$ 以下の微細粒径試料を用いて行った Trojanová et al.⁵⁾ の結果と比較したものを Table 1 に示す。本実験値 1.2 は Trojanová et al. の値のおよそ 1/3 となるが、この k_p 値は $43\sim 172\mu\text{m}$ の粒径範囲の試料による Ono et al. の結果とよく一致する。上述した AZ31 合金の 473K での k_p 値は、純 Mg のおよそ 1.5 倍大きくなる。

Table 1 The k_p values derived from various method.

Specimen	Temperature	k_p (MPa · mm ^{1/2})	Method
Mg	453K	1.2	Stress-relaxation (This study)
		3.0	Stress-relaxation (Trojanová et al.)
	473K	1.3	Conventional manner (Ono et al.)
1.9		Conventional manner (This study)	

Fig.4 は、歪速度急変試験で求めた純 Mg の 188~573K での活性化体積 v^* の温度依存性を示したものである。本実験の v^* 値を Table 2 に示す変形の律速機構に対する活性化体積の大きさ、並びに Conrad⁷⁾ がまとめたその判定基準と比較した。この結果、188~453K では転位の交差機構、473K 以上ではジヨグの非保存運動が純 Mg の変形を律速していると考えられる。Fig.4 の 188~453K で温度増加に伴って v^* の値が次第に低下するのは、底面すべりに加えて非底面すべりが活動することで転位間の交差距離が小さくなるためと考えられる。しかし、473K 以上では変形を支配する律速機構が変化すること

から、 v^* の値が増加すると考えられる。

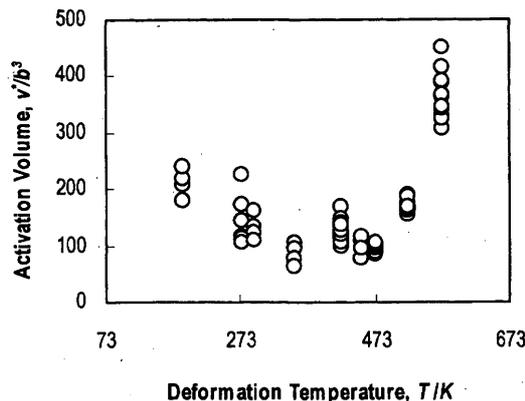


Fig.4 Temperature dependence of activation volume in Pure Mg.

Table 2 Activation volume for the dislocation mechanisms⁷⁾.

Mechanism	Activation volume
Overcoming of the Peierls-Nabarro stress	$10^1\sim 10^2 b^3$
Intersection of dislocations	$10^2\sim 10^4 b^3$
Nonconservative motion of jogs	$10^2\sim 10^4 b^3$
Cross-slip	$10^1\sim 10^2 b^3$
Climb	$1 b^3$
Overcoming of impurity atoms	$10^1\sim 10^4 b^3$

4 結 言

- (1) AZ31 合金の 77~523K での変形応力と粒径の間にはすべて Hall-Petch 関係が成立する。この直線の傾き k_p 値には歪量依存性が認められないが、切片応力 σ_0 値は歪増加で加工硬化により大きくなる。
- (2) AZ31 合金の温度増加に伴う k_p 値の減少傾向は、純 Mg の結果とよく一致する。特に、423K 以上での k_p 値の顕著な低下は、室温の変形で支配的な底面すべりに加えて非底面すべりが活動することによるものと考えられる。
- (3) 純 Mg の変形は 188~453K では転位の交差機構、473K 以上ではその律速機構が変化すると考えられる。

参考文献

- 1) E.O.Hall, Proc. Phys. Soc. London, **64B**, 747(1951).
- 2) N.J.Petch, J.Iron Steel Inst, **174**, 25(1953).
- 3) N.Ono, K.Nakamura, and S.Miura, Materials Science Forum, **419-422**, 195(2003).
- 4) R.Armstrong, I.Codd, R.M.Douthwaite and N.J.Petch, Philos Mag, **7**,45(1962).
- 5) Z.Trojanová, P.Lukac, H.Ferkel, B.L.Mordike and Riehemann, Mater. Sci. Eng, **A243**, 798(1997).
- 6) V.I. Dotsenko, Phys. Stat. Sol. (b), **93**, 11(1979).
- 7) H. Conrad, Journal of Metals, 582(1964).