

マグネシウム合金の破壊靱性値と その変形組織に及ぼす結晶粒径の影響

物・材機構 ○染川英俊 シンアロック 金 漢洙 向井敏司

Effect of grain size on fracture toughness and deformed microstructure in magnesium alloys

Hidetoshi SOMEKAWA, Alok SINGH, Han S. KIM and Toshiji MUKAI

1. 緒 言

マグネシウムは実用金属材料の中で最も軽量な金属材料であり、高比強度、高比弾性率などの優れた機械的特性を有する材料である。従って、近年の省エネルギー・省資源や排気ガス規制などの環境負荷を低減するという社会的要請から、鉄道車輛や自動車などの移動用構造部材への適応が検討され始めている。そのため今後、マグネシウム構造部材に対する安全性や信頼性が要求されることは必須である。一般的に、構造部材に対するそれらの評価は、破壊靱性値などを用いる。しかし、マグネシウムの破壊靱性値に関する調査は限られているのが現状であり、マグネシウムの破壊靱性値は、アルミニウムのそれに比べ遥かに小さいと報告されている程度である。

一方、マグネシウムは六方晶構造を有するため、室温での機械的特性は集合組織の分布に影響を受ける。近年、亀裂が底面に対して垂直方向に進展した場合、大きな破壊靱性値を示すと言われている[1,2]。さらに、結晶粒微細化により、破壊靱性値が向上することも報告されている[3,4]。しかし、結晶粒微細化に及ぼす変形組織観察に関する研究報告はない。本研究では、底面の集合組織制御が可能で、結晶粒を微細化することができる Equal-Channel-Angular Extrusion(ECAE)加工法により、試料を作成し、結晶粒径に及ぼす破壊靱性値とその変形組織の関係性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

商業用 AZ31 マグネシウム合金(Mg-3mass%Al-1mass%Zn-0.2mass%Mn)を使用し、503 K または 493 K でECAE加工(8 pass, route Bc)を行い、試料を製した。異なる結晶粒径を有する試料を準備するために、503 K でECAE加工した試料を、573 K 24 時間熱処理を施した。それぞれの平均結晶粒径は、4 μm および 16.3 μm であった。(以下、微細粒材、粗大粒材と称す)

室温の機械的特性を調査するために、断面直径 2.5 mm、平行部長さ 10 mm を有する丸棒試験片を用い、初期ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で引張試験を実施した。破壊靱性試験は、厚さ 5 mm、高さ 10 mm を有し、板厚方向断面上に標準 V ノッチを刻入した三点曲げ試験片を用い、ASTM-E399 に準拠し調査した。平面ひずみ破壊靱性値(K_{IC})は、試験片の板厚が薄く小規模降伏条件を満足しな

いため、走査型電子顕微鏡(SEM)ならびにレーザー顕微鏡を利用したストレッチゾーン破面解析により算出した。平面ひずみ破壊靱性値とストレッチゾーンは下記式(1)の関係にある。

$$K_{IC} = [4 \times SZH \times \sigma_{ys} \times E / (1-\nu)^2]^{1/2} \quad (1)$$

SZH: ストレッチゾーン高さ、 σ_{ys} : 降伏強度、E: 剛性率、 ν : ポアソン比

変形組織は、光学顕微鏡、電子線後方散乱回折(EBSD)法ならびに透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて観察した。観察には、破壊靱性試験において最大荷重に到達した時、試験を停止し、変形途中の試料を用いた。

3. 実験結果

室温で実施した引張試験の結果を Table I にまとめる。従来金属材料と同様に、結晶粒微細化に伴い、強度が向上していることがわかる。

Fig. 1 に典型的な SEM 破面観察結果を示す。亀裂の先端にストレッチゾーンを形成し、その近傍では延性破壊特有のディンプルを呈していることが観察される。これらの現象は、結晶粒の大きさに関係なく、それぞれの試料において観察された。式(1)を用い、ストレッチゾーン解析による破壊靱性試験の結果を Table II にまとめる。過去の研究報告例と同様[3,4]、結晶粒微細化により、破壊靱性値が向上していることが分かる。

Fig. 2 に、粗大粒材(a)および微細粒材(b)の破壊靱性試験後の光学顕微鏡観察結果を示す。粗大粒材では、多くの変形双晶が観察されるが、微細粒材では、明らかに減少していることが分かる。一般的に、変形双晶は、破壊の起点となりやすく、機械的特性の劣化を招く。そのため、本研究で得られた破壊靱性値の違いのひとつには、変形双晶の割合が予測される。

Fig. 3 に微細粒材の破壊靱性試験後の TEM 観察結果を示す。(a)明視野像および制限視野回折像、(b)ウィークベーム法を用いた暗視野像) マグネシウムの室温における塑性変形は、一般的に、底面転位の活動がよく知られている。しかし、Fig. 3 より、非底面転位が活動していることが観察される。この変形挙動は、結晶粒径 6.5 μm を有する引張試験後の変形組織においても観察され[5]、結晶粒微細化の影響だと推測される。

Table I: The result of tensile test at room temperature.

	σ_{ys} , MPa	σ_{UTS} , MPa	δ , %
微細粒材	158	243	30.3
粗大粒材	107	226	40.3

σ_{ys} : 降伏強度, σ_{UTS} : 最大引張強度, δ : 破断伸び値

Table II: The result of plane-strain fracture toughness test.

	SZH, μm	K_{IC} , $\text{MPam}^{1/2}$
微細粒材	11.6	27.3
粗大粒材	12.5	23.5

SZH: ストレッチゾーン高さ, K_{IC} : 平面歪み破壊靱性値

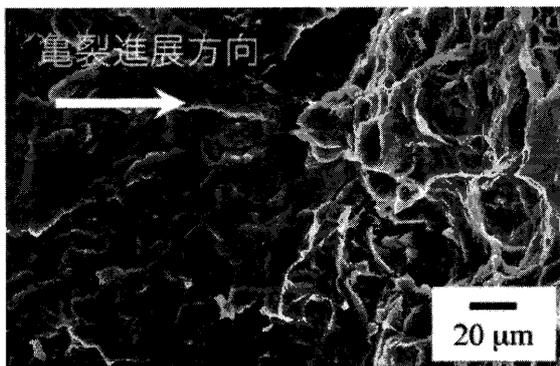


Fig. 1: Typical SEM micrograph after fracture toughness test in fine-grained alloy.

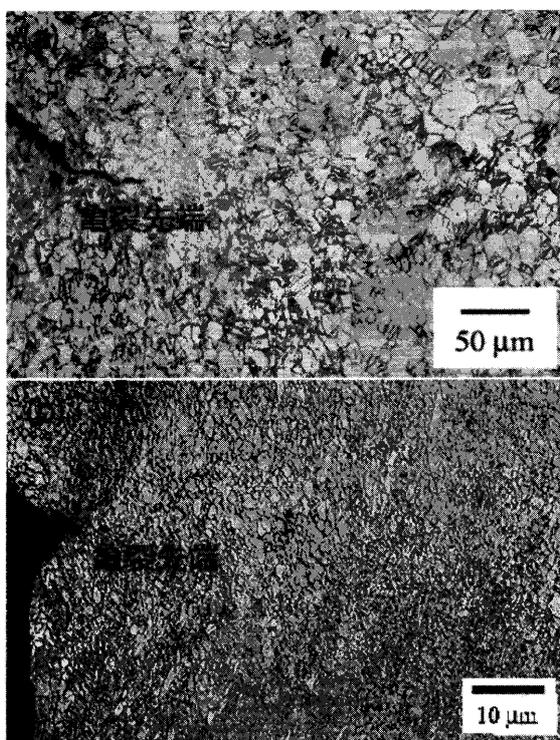


Fig. 2: Typical microstructures after fracture toughness tested samples: (a) coarse-grained and (b) fine-grained alloy, respectively.

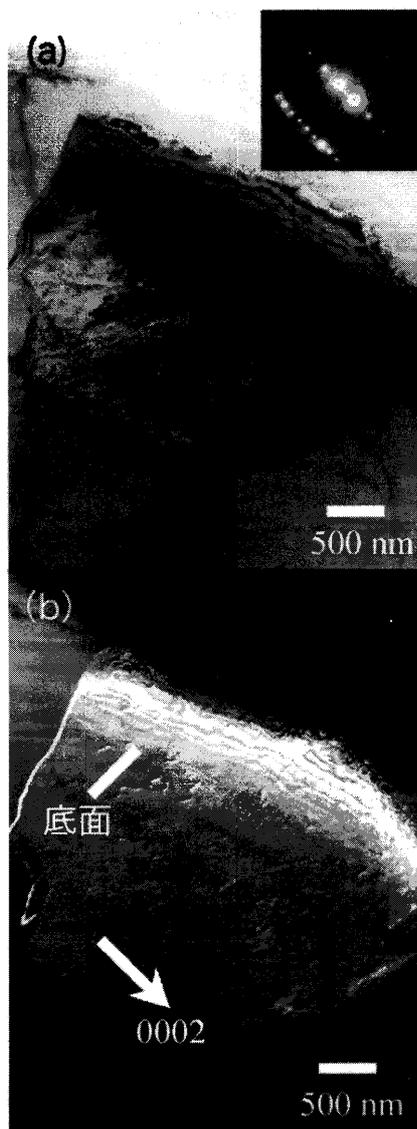


Fig. 3: Typical TEM micrographs in the deformed fine-grained alloy: (a) bright-field image and (b) corresponding weak-beam dark-field image.

4. 結 言

- 1) ストレッチゾーン解析より、ECAE 微細粒材および粗大粒材の平面ひずみ破壊靱性値は、それぞれ 27.3、23.5 $\text{MPam}^{1/2}$ を示し、結晶粒微細化に伴い、向上することが分かった。
- 2) 結晶粒微細化に伴い、変形双晶の発生が減少し、室温にもかかわらず非底面転位が活動することが分かった。

参考文献

- [1] H. Somekawa, T. Mukai. Scripta Mater, **53**, 541, (2005).
- [2] 染川, 向井: 第 54 回学術講演会 (2005).
- [3] H. Somekawa, T. Mukai. Scripta Mater, **53**, 1059, (2005).
- [4] H. Somekawa, T. Mukai. Scripta Mater, **54**, 633, (2006).
- [5] J. Koike, T. Kobayashi, *et al.* Acta Mate, **51**, 2055, (2003).