

二次挤压对 MB26 镁合金棒材组织及性能的影响

王 琪, 王 斌, 易丹青, 刘会群, 臧 冰, 文 智

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用二次挤压工艺制备 MB26(Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd) 镁合金棒材, 研究不同挤压比对 MB26 合金组织性能的影响, 通过金相(OM)、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等手段分析稀土元素在合金中的分布及其对微观组织的影响。结果表明: 合金在二次挤压过程中发生动态再结晶, 随着挤压比的增加, 再结晶晶粒细化, 当挤压比 $\lambda=25$ 时, 平均晶粒尺寸为 $1.9 \mu\text{m}$, 合金力学性能达到最优; 合金经挤压变形后出现大量 $W(\text{Mg}_3\text{Y}_2\text{Zn}_3)$ 相和 $\beta'(\text{MgZn})$ 相, 均呈弥散分布, 钉扎晶界, 阻碍了动态再结晶晶粒的长大。通过数据拟合得到该合金屈服强度与晶粒尺寸的 Hall-Petch 关系。

关键词: MB26 镁合金; 力学性能; 挤压比; 再结晶

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of double extrusion on microstructure and properties of MB26 magnesium alloy rod

WANG Qi, WANG Bin, YI Dan-qing, LIU Hui-qun, ZANG Bing, WEN Zhi

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: MB26 magnesium alloy (Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd) rod was prepared by double extrusion. The effects of extrusion ratio and rare earth elements (RE) on the microstructure and properties of MB26 alloy, as well as the distribution of RE in the alloy, were investigated by OM, XRD, SEM and TEM. The results show that, the dynamic recrystallization occurs during the double extrusion, the recrystallized grain size decreases with the increase of extrusion ratio. When extrusion ratio $\lambda=25$, the grain size is $1.9 \mu\text{m}$ with better mechanical properties. The large amount of dispersed $\text{Mg}_3\text{Y}_2\text{Zn}_3$ (W) and MgZn (β') phases appear after extrusion pinned the grain boundary and hindered the growth of recrystallized grain. By data fitting analysis, the Hall-Petch relationship of yield strength and grain size was calculated.

Key words: MB26 magnesium alloy; mechanical properties; extrusion ratio; recrystallization

Mg-Zn-Zr 系合金具有较高的强度、良好的工艺塑性等优点, 是变形镁合金中应用较广的体系之一。但该合金热裂倾向大, 室温力学性能较差, 常采用添加稀土元素来改善合金性能^[1-4]。余琨等^[5]研究发现, 添加 0.8% Ce 能够使合金塑性得到较大幅度提高。添加复合稀土 Y 和 Nd, 可细化镁合金的再结晶晶粒, 效果优于单一稀土 Nd 的^[6-7]。20 世纪 90 年代, 北京航空材料研究院在 Mg-Zn-Zr 系的 MB15 镁合金基础上,

用富 Y 混合稀土(MM)代替高品位 Y, 开发出了 MB26 镁合金(Mg-5.5Zn-0.7Zr-1.0~1.65RE), 该合金具有更高的室温强度和高温持久强度, 并在航空领域得到了应用^[8]。

为了进一步提高该合金的强韧性, 许多学者从变形工艺及热处理等方面对其进行研究。尹从娟等^[9]研究发现, MB26 镁合金直接时效可获得较好的综合力学性能。冯文涛等^[10]研究发现, 热轧总变形量为

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAE09B03)

收稿日期: 2011-07-18; 修订日期: 2011-09-28

通信作者: 易丹青, 教授; 电话: 0731-88830263; E-mail: yioffice@csu.edu.cn

70%时, MB26 镁合金板材抗拉强度达到 350 MPa, 但伸长率不到 9%。VOLKOVA^[11]和 ION 等^[12]分别研究了挤压和热处理工艺对 Mg-Zn-Zr 合金组织转变的影响。KIM 等^[13]研究发现, Mg-Zn-Zr-Re 镁合金板材轧制后发生再结晶, 经 300 °C 退火后仍呈现较好的塑性。据文献报道, 二次挤压可提高 Mg-RE 合金的塑性, 但抗拉强度和屈服强度有所降低^[14]。Mg-Zn-Zr-Re 合金经一次和二次挤压后都发生再结晶, 但二次挤压后的晶粒更加细小, 约为 3 μm^[15]。

综上所述, 二次挤压加工对促进 MB26 镁合金动态再结晶, 发挥细晶强化的作用, 但目前的研究还未涉及二次挤压对 MB26 镁合金组织演变的作用, 特别是变形工艺参数对其组织和性能的影响未见报道。因此, 本文作者对 MB26 合金进行二次挤压实验、研究不同挤压比对 MB26 镁合金显微组织和力学性能的影响, 分析稀土元素对合金再结晶行为的影响, 为制定合理的热加工工艺提供指导。

1 实验

实验用镁合金名义成分(质量分数, %)为 Mg-6.3Zn-0.7Zr-0.9Y-0.3Nd。采用电阻炉熔炼, 熔剂保护, 锆和稀土以 Mg-20Zr、Mg-30Y、Mg-30Nd 中间合金的形式加入, 金属水冷模浇注成直径 90 mm 的铸锭。锭坯车削加工后, 经 380 °C、18 h 均匀化退火, 一次挤压在 800 t 卧式挤压机上, 制品为直径 50 mm 的圆棒。随后在 300 t 立式挤压机上对圆棒进行二次挤压, 分别挤成直径 16、14、10 和 8 mm 的棒材, 挤压筒内径为 50 mm, 挤压比(λ)分别为 10、13、25 和 39。两次挤压前, 试样置于箱式电阻炉中加热到 400 °C 温度下保温 2 h, 模具、模筒及垫片加热至 350 °C, 采用石墨油剂润滑模筒, 挤压速度均控制在 15 mm/min, 挤压后棒材水淬。拉伸试样按照 GB/T 228—2002 规定进行加工, 采用 CSS-44100 电子万能试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 2 mm/min。用 SIMENS-500X 型 X 射线衍射仪对合金进行物相分析。金相试样用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液侵蚀, 在 POLYVAR MET 型金相显微镜下进行组织观察。用 Sirion200 场发射扫描电镜进行显微组织观察和能谱分析。透射试样经人工减薄至 70 μm 后进行双喷, 电解液为硝酸甲醇溶液, 电解液温度为 -20 °C, 电流为 50~70 mA, 在 TecnaiG²20 型透射观察其显微组织, 加

速电压为 200 kV。

2 结果与分析

2.1 合金铸态和均匀化显微组织观察

实验合金铸态显微组织如图 1 所示。由图 1 可见, 粗大的 α -Mg 基体和呈连续网状分布在晶界处的共晶产物, 晶界清晰, 平均晶粒尺寸为 25 μm 左右, 且存在大量颗粒状第二相。表 1 所列为图 1(b) 的能谱分析结果。由表 1 可知: Y、Nd 元素主要分布在晶界, 在晶内分布的很少; Zn 大部分集中于晶界, 少部分固溶于 α -Mg 基体中。结合能谱和 X 线衍射分析, 可确定第二相主要由 Z 相(Mg₃Zn₆Y)和 MgZn 相组成。

合金经过长时间的均匀化处理后, 合金中沿晶界连续分布的粗大共晶组织大部分已溶解到基体中, 晶界宽度变窄, 但仍有少量第二相残留在晶界处, 且尺寸有所减小。对合金中各元素分布进行分析(见图 1(e)) 可知: Mg、Zr、Nd、Zn 元素在晶内和晶界已分布均匀, 而 Y 元素则在晶界处仍分布较多。结合物相分析(见图 1(f)) 可知, 退火后合金已基本形成了单相的 α -Mg 固溶体, β (MgZn)相重新发生转变而溶入基体中, 第二相 Mg₃Zn₆Y(Z 相)的含量已大幅度降低。

2.2 合金挤压后显微组织观察

合金经一次挤压后的微观组织如图 2 所示。由图 2 可知, 铸态的枝晶组织沿挤压流线方向伸长, 出现大量变形组织, 但未观察到明显的再结晶晶粒。这可能是因为变形量较小(一次挤压比 $\lambda=3$), 合金中的变形畸变度小, 位错数量较低, 变形储能不足以引发动态再结晶^[11]。

合金经热挤压后显微组织如图 3 所示。经过挤压变形后, 合金中粗大的枝晶被新生成的细小晶粒所取代, 且在挤压力的作用下沿变形方向呈流线形分布。随着变形程度的增大(挤压比 $\lambda=10\sim 25$), 动态再结晶晶粒截面平均尺寸逐渐减小, 当 $\lambda=10$ 时(见图 3(a)), 显微组织呈现出少量大晶粒与大量再结晶的小晶粒共存的现象, 截面平均晶粒尺寸为 2.8 μm。 $\lambda=13$ 时, 动态再结晶的晶粒数量增多, 尺寸减小, 且分布均匀, 截面平均晶粒尺寸为 2.3 μm, 这说明变形程度的增大有利于动态再结晶的进行。当 $\lambda=25$ 时(见图 3(c)), 动态再结晶晶粒尺寸减小, 截面晶粒达到 1.9 μm, 数量更多, 分布更均匀。

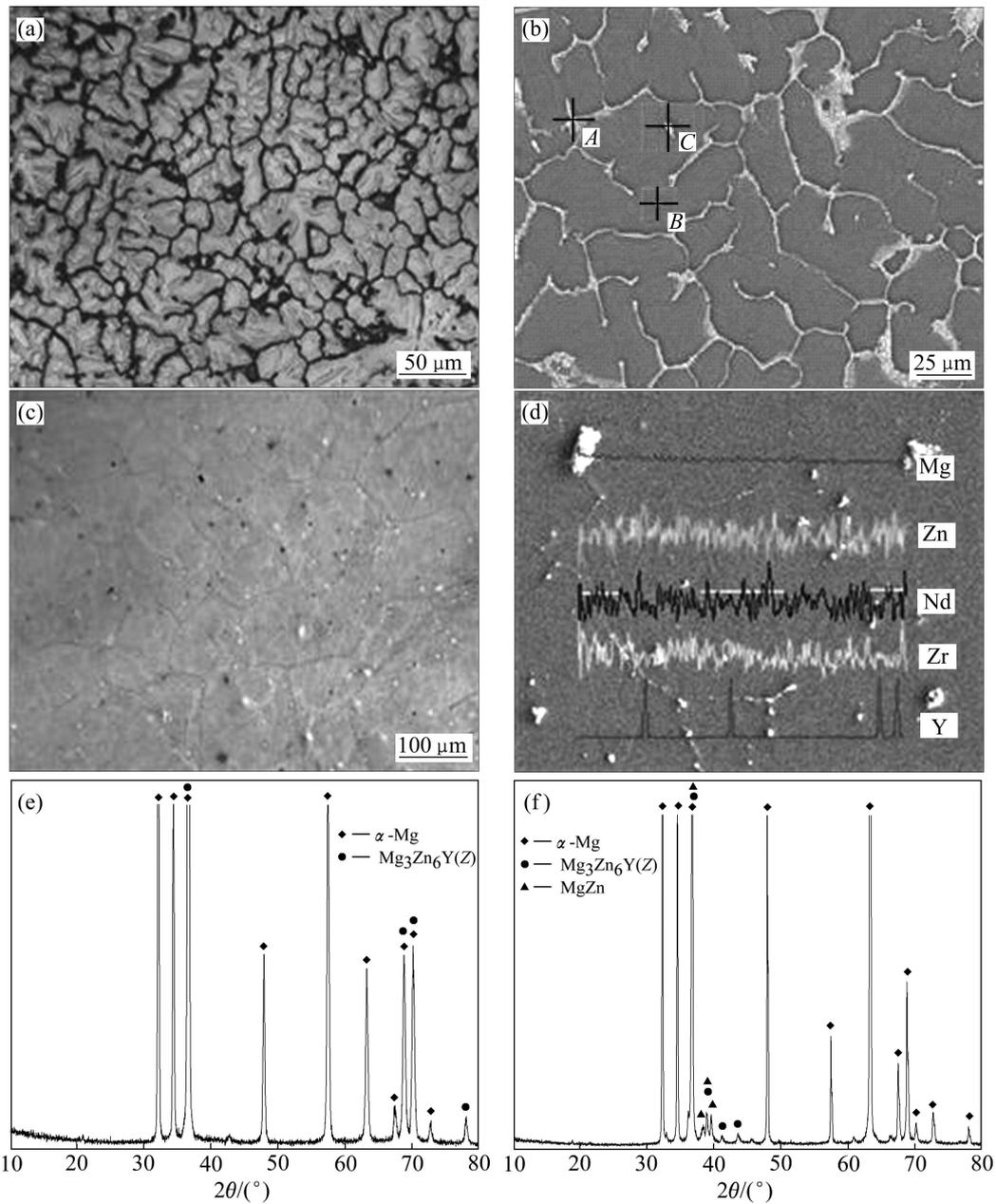


图 1 合金铸态和均匀化态的显微组织及 XRD 谱

Fig. 1 Microstructures of as-cast and homogenized alloys and XRD patterns: (a) OM image of as-cast alloys; (b) SEM image of as-cast alloys; (c) OM image of homogenized alloys; (d) SEM image of homogenized alloys; (e) XRD pattern of as-cast alloys; (f) XRD pattern of homogenized alloys

表 1 图 1(b)中合金铸态组织的能谱分析结果

Table 1 EDS analysis results of as-cast alloys shown in Fig.1(b)

Element	A		B		C	
	w/%	x/%	w/%	x/%	w/%	x/%
Mg	37.88	63.37	94.66	98.16	69.54	86.45
Y	8.68	3.97	0.51	0.15	4.38	1.49
Zn	51.71	32.17	4.03	1.55	26.08	12.06
Nd	1.74	0.49	0.8	0.14	0	0

但当挤压比 $\lambda=39$ 时, 合金棒材出现周裂纹, 样品失效(见图 3(d)), 这是由于挤压比过大, 变形抗力增大, 局部剪切应力过大, 产生微裂纹。文献[16]指出: 若 Mg-Zn-Zr 合金挤压比升高 50%, 则等效应力增大 110%, 相应的材料变形不均匀程度亦增加。即挤压件边部摩擦力大, 流动慢, 而心部流动速度快, 产生附加应力超过了材料临界剪切应力, 产生环状裂纹。

不同挤压比变形后第二相的分布如图 4 所示。挤

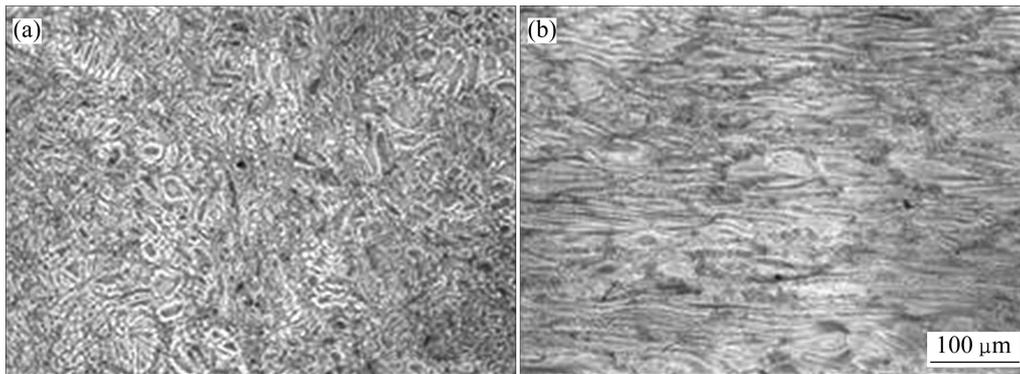


图2 合金一次挤压后的微观组织形貌

Fig. 2 Optical microstructures of MB26 as-once-extruded alloy (d 50 mm): (a) Cross-section; (b) Vertical-section

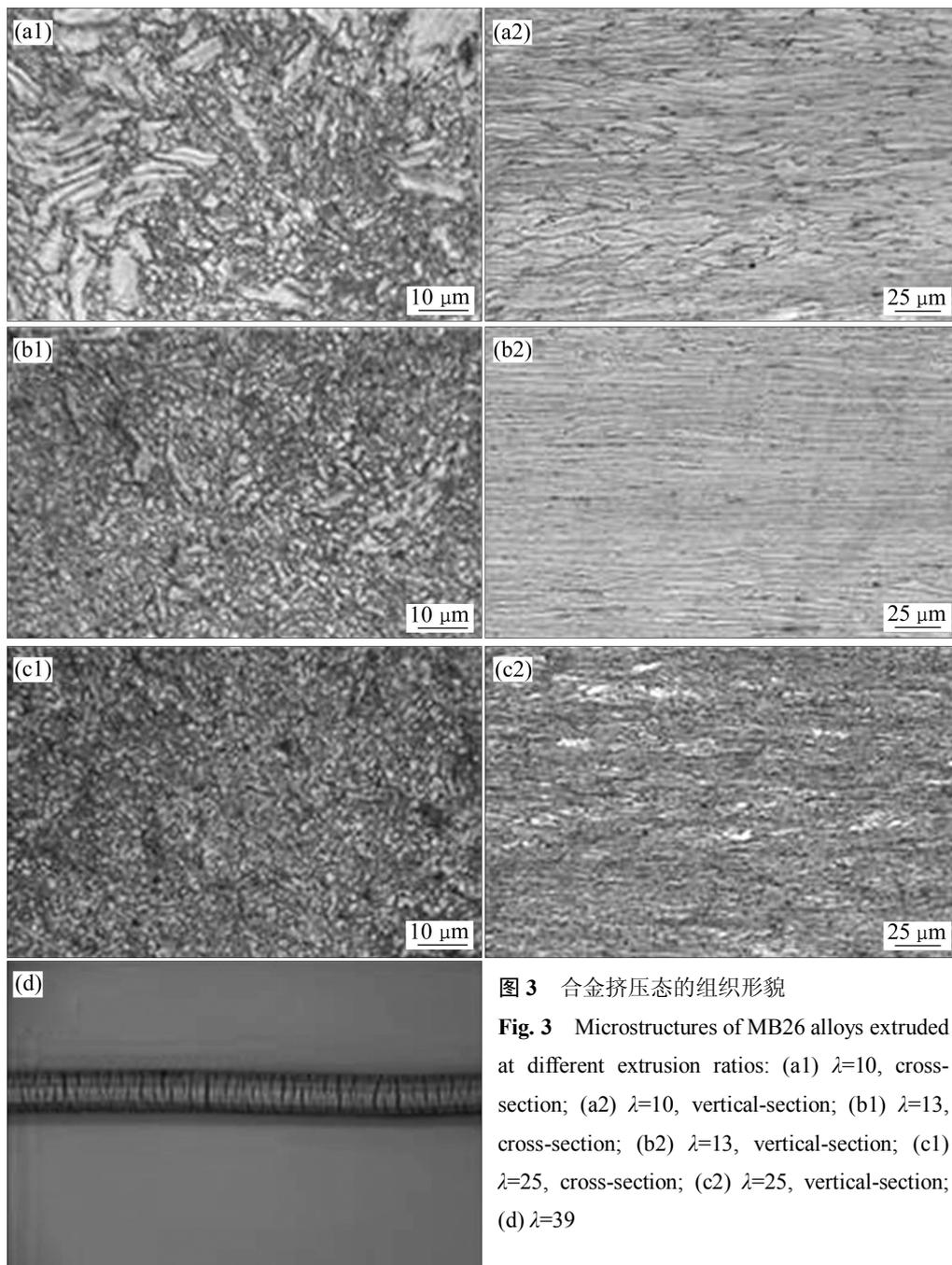


图3 合金挤压态的组织形貌

Fig. 3 Microstructures of MB26 alloys extruded at different extrusion ratios: (a1) $\lambda=10$, cross-section; (a2) $\lambda=10$, vertical-section; (b1) $\lambda=13$, cross-section; (b2) $\lambda=13$, vertical-section; (c1) $\lambda=25$, cross-section; (c2) $\lambda=25$, vertical-section; (d) $\lambda=39$

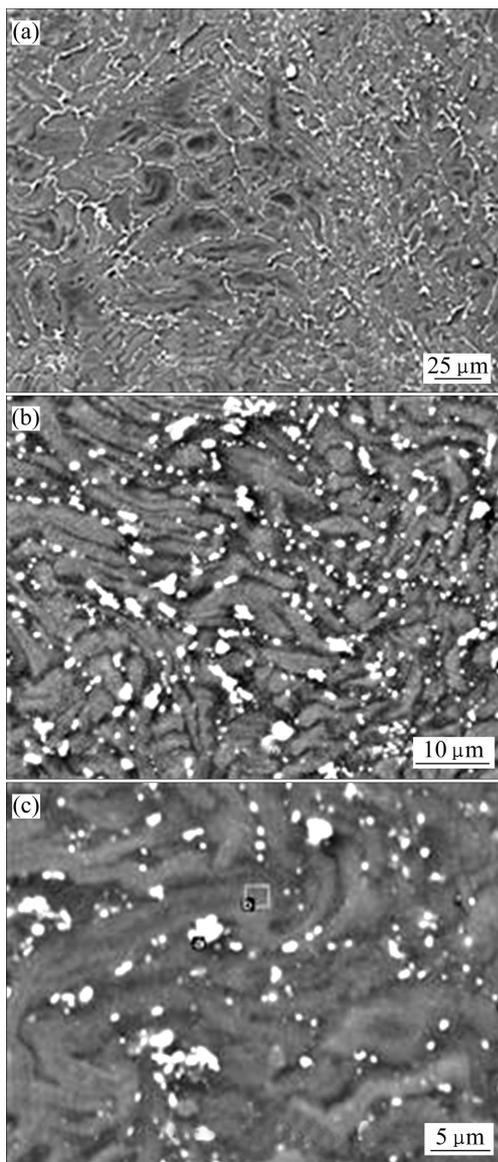
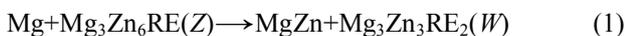


图 4 不同挤压比变形后合金的 SEM 像
Fig. 4 SEM images of alloys extruded at different extrusion ratios: (a) $\lambda=10$; (b) $\lambda=13$; (c) $\lambda=25$

压后合金中的第二相数量较铸态时增多, 尺度更细小, 且沿挤压流线分布。第二相主要集中在晶界附近, 晶内密度相对较低。随着挤压比的升高, 第二相的破碎程度加大。同时结合均匀化退火(见图 2(d))及挤压后(见图 5)的 X 线衍射结果可知, 在挤压过程中出现了新相 $Mg_3Y_2Zn_3(W)$ 相。文献[17-18]报道: Mg-Zn-RE 系合金中可能存在以下相变反应:



W 相属 $A1MnCu_2$ 结构, 空间群为 $Fm\bar{3}m$, 点阵参数 $a=0.69116 \text{ nm}^{[19]}$ 。合金中 Mg-Zn-Y 三元金属间化合物是 W 相还是 Z 相取决于合金中锌与稀土的摩尔

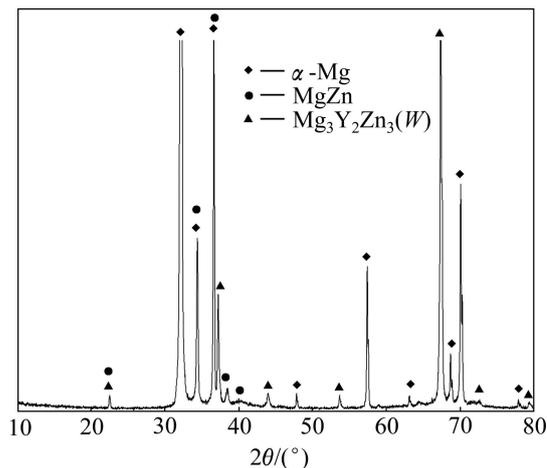


图 5 挤压后合金的 XRD 谱
Fig. 5 XRD pattern of alloy after hot extrusion

比^[20], 当 Zn 与稀土的摩尔比较高时, 主要产生 Z 相, 比例较低时主要产生 W 相。出现较多 W 相的可能原因如下: 在 X 射线结果中发现挤压材中 $\beta'(MgZn)$ 相的含量较铸态的高, 其 $\beta'(MgZn)$ 相的析出减少了合金基体中的锌含量, 导致原晶界处流变带及附近区域锌含量下降, 而 MB26 合金中稀土含量相对升高, 所以 Z 相由于锌和稀土的摩尔比减小而形成 W 相。

2.3 合金的力学性能分析

对合金进行了室温拉伸实验, 图 6 所示为不同变形条件下挤压态棒材的力学性能。从图 6 中可以看出, 挤压后, 合金的抗拉强度随挤压比的增大而增大。当挤压比从 10 增大到 25 时, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_b 分别提高了 23% 和 18%, 而伸长率则提高了 17%。

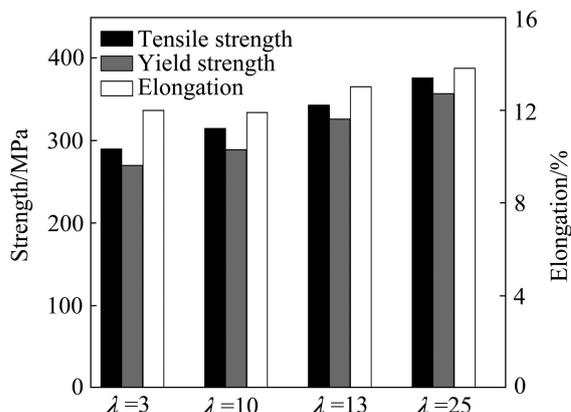


图 6 不同挤压比下合金的力学性能
Fig. 6 Mechanical properties of alloys at different extrusion ratios

通过数据计算了挤压后不同规格棒材截面平均晶粒尺寸和屈服强度的关系(见表 2 和 3)。将表 2 和 3 中数据代入 Hall-Petch 公式进行线性拟合,结果如图 7 所示。将图 7 中的直线斜率和截距作为 Hall-Petch 公式的系数,得到 MB26 镁合金合金屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 和晶粒尺寸 d 的关系式,如式(2)所示。从式(2)可以看到,镁合金的 K 值远大于一般铝合金的 K 值^[21],也说明晶粒尺寸对镁合金力学性能有较大影响。

$$\sigma_{0.2} = 182 + 220 d^{-1/2} \quad (2)$$

表 2 合金在不同状态下的截面平均晶粒尺寸

Table 2 Sectional average grain size of alloys under different conditions

Alloy state	Sectional average grain size/ μm	Yield strength/MPa
As-cast	24.7	239
As-once-extruded	14.1	270

表 3 合金在不同状态下的屈服强度

Table 3 Yield strength of alloys under different conditions

Extrusion ratio, λ	Sectional average grain size/ μm	Yield strength/MPa
10	2.8	289
13	2.3	326
25	1.9	357

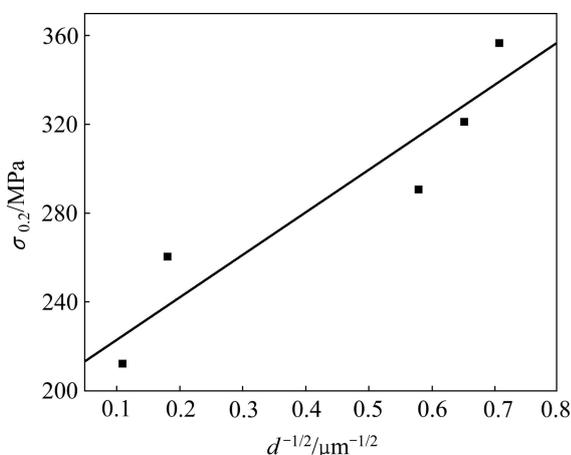


图 7 合金的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和截面平均晶粒大小 d 的关系

Fig. 7 Relationship between yield strength $\sigma_{0.2}$ and sectional average grain size d of alloys

2.4 变形量及第二相对动态再结晶的影响

图 8 所示为不同挤压比合金棒材的 TEM 像。当

挤压比 $\lambda=10$ 时,出现了再结晶晶粒,晶粒分布不均匀,部分亚晶形貌完整(见图 8)。合金中存在两类形貌各异的第二相(见图 8(a1)):一类为团聚在一起的大尺寸的颗粒相,其外形为不规则的椭球状,多团聚在晶界周围,尺寸为 $0.2\sim 0.5\ \mu\text{m}$,综合能谱分析结果(见图 8(a2))和文献[22]可确认为 $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2(W)$ 相,该相与基体不存在惯析面,易团聚。另一类为细小的析出相,外形呈短棒状,尺寸为 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$,与基体成一定角度析出(见图 8(a3)),该相为过渡相 $\beta'(MgZn)$,其具有 Laves 相结构,该相在脱溶早期为杆状形貌,与基体存在一定稳定共格关系。

当挤压比 $\lambda=14$ 时,动态再结晶晶粒数量增多,亚晶粒分布较均匀,尺寸基本上在 $1\ \mu\text{m}$ 左右(见图 8(b1));颗粒状的 W 相在挤压过程中得到部分破碎,并沿挤压方向弥散分布,尺寸为 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$ (见图 8(b2));部分 W 相在亚晶界分布,对晶粒的合并起阻碍作用(见图 8(b3));当挤压比 $\lambda=25$ 时,亚晶粒数目增多,亚晶界的位相差增大,亚晶粒尺寸未有明显变化。合金中的 W 相分布更加细小弥散,在亚晶界上镶嵌有细小的 W 相,尺寸为 $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$ (见图 8(c2))。细小的 W 相钉扎在亚晶界及晶界处,阻碍了界面的迁移,细化合金晶粒(见图 8(c2)),同时在晶内析出了大量的 β' 相,分布更加弥散,尺寸也更加细小(见图 8(c3))。

由图可知,MB26 镁合金中的变形量和第二相对动态再结晶过程具有重要影响,其作用机理如下。

1) 变形程度

随着变形程度的增大,动态再结晶晶粒尺寸细化,分布更均匀,其原因主要是变形量增大促进了再结晶形核率的提高。由于镁合金具有较高的堆垛层错能,扩展位错较宽,亚组织中的位错密度较高,很易于形核;而且其动态再结晶形核率低,晶核长大速度快,因此,形核过程是镁合金动态再结晶的主要控制过程。随着变形量的增大(λ 从 10 到 25),合金中粗大的晶粒在挤压力的作用下被压扁、弯曲和破碎成细晶粒,同时发生晶粒间的相对转动,导致变形不均匀及应力分布不均匀。当 $\lambda=25$ 时,大量的塑性变形造成金属晶体结构严重畸变和位错大幅度增加,为再结晶提供了更多有利条件,在严重畸变的区域产生大量新的晶核(如图 9(a))。

2) 第二相

含稀土的 $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2(W)$ 相形变后破碎,弥散分布在晶界及晶内,挤压后析出 $\beta'(MgZn)$ 相呈短棒状,尺寸较细小,与基体存在一定共格关系。合金塑性变形时,位错滑移遇到这两相会在其周围留下位错环。随

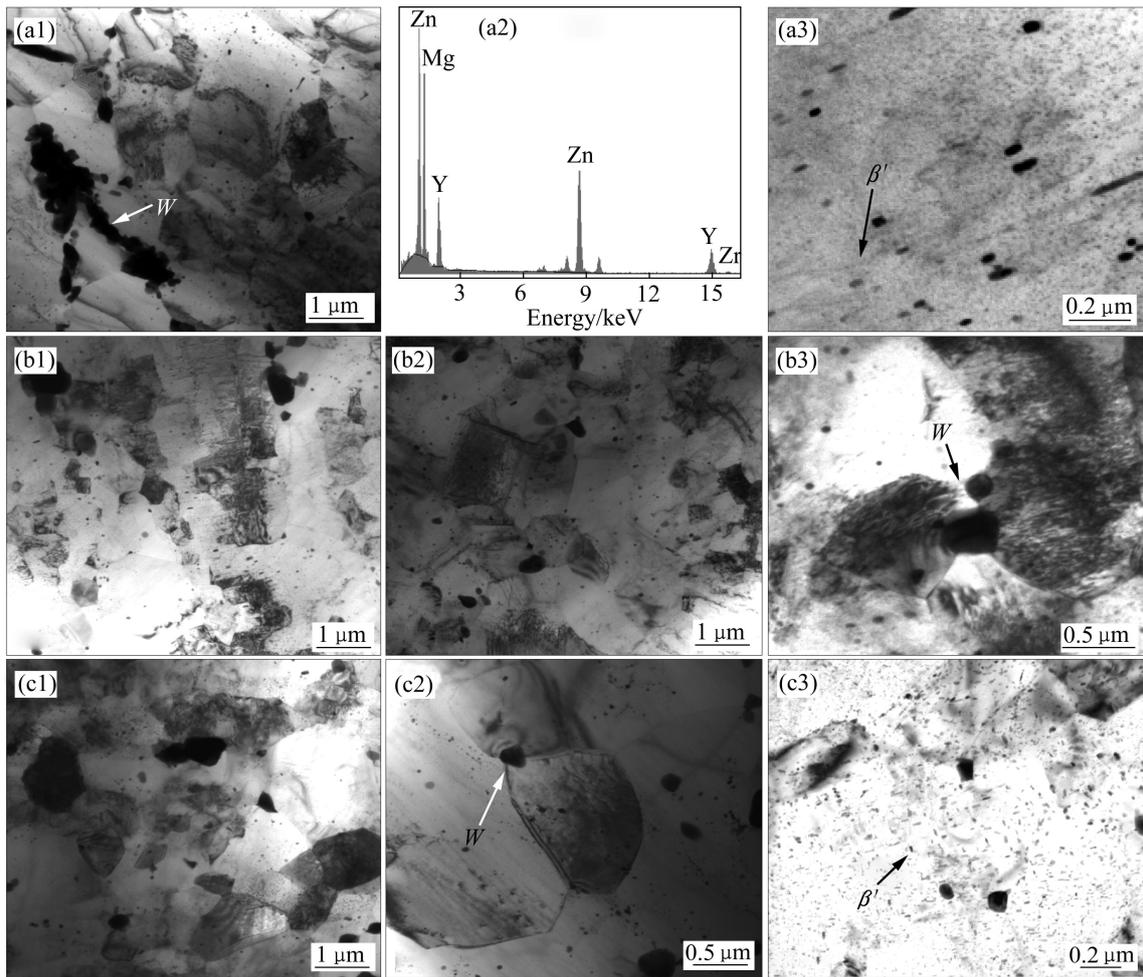


图 8 合金挤压态组织的形貌和能谱分析

Fig. 8 TEM images and EDAX pattern of MB26 alloys extruded at different extrusion ratios: (a1), (a3) TEM images ($\lambda=10$); (a2) EDAX pattern ($\lambda=10$); (b1), (b2), (b3) TEM images ($\lambda=14$); (c1), (c2), (c3) TEM images ($\lambda=25$)

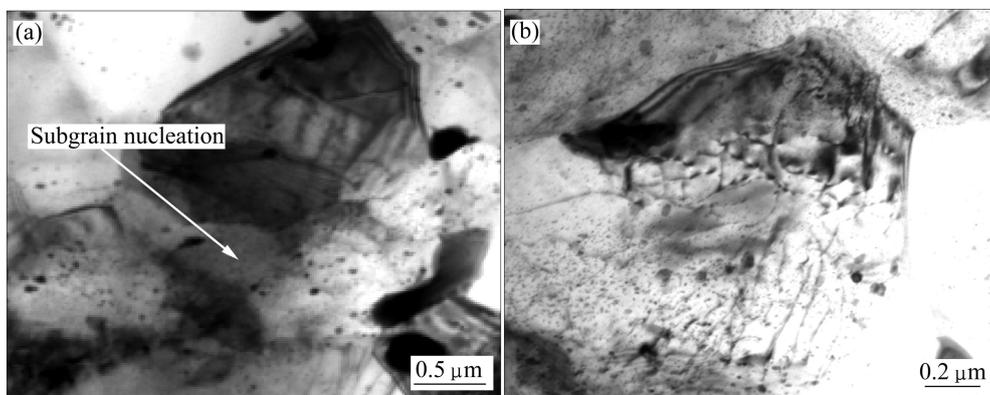


图 9 MB26 合金的挤压态组织的形貌

Fig. 9 TEM images of extruded MB26 alloy ($\lambda=25$): (a) Subgrain nucleation; (b) Block at boundaries

随着变形量的增加, 第二相附近位错环的积累会逐渐增多, 从而造成变形组织中的第二相附近高位错密度区和高的取向梯度(图 9(b)), 进而提高了第二相附近区

域的储能, 从而有利于再结晶形核。

W 相对亚晶界的迁移起阻碍作用, 其对合金晶界的阻力即 Zener 力^[23](p_z)与该相的含量和尺寸有关, 式

(3)所示为三者之间的关系:

$$p_z = kf/r \quad (3)$$

式中: Zener 力(p_z)是第二相粒子对合金位错迁移的阻力; k 为第二相粒子与基体之间的表面能常数; f 为第二相粒子的体积分数; r 为第二相粒子半径。第二相粒子体积分数越大, 颗粒越细小, f/r 的值就越大, 该粒子对位错迁移所施加的阻力就越大。由图 8 和 9 可见, 随着挤压比(λ)由 10 增大到 25, 原先聚集在一起的 W 相被充分破碎, 颗粒尺寸由 0.8~1.0 μm 细化到 0.2~0.4 μm , 且弥散度增大。根据式(3)计算其 Zener 力(p_z)可增大 2 倍以上, 则该粒子可强烈地阻碍亚晶的合并和大角度晶界的迁移, 阻碍再结晶晶粒的长大。

3 结论

1) MB26 镁合金在 400 $^{\circ}\text{C}$ 一次挤压过程(挤压比 $\lambda=3$)中未发生动态再结晶, 而二次挤压过程中发生了动态再结晶。随着二次挤压比 λ 从 10 增加到 25, 再结晶晶粒尺寸从 2.8 μm 细化到 1.9 μm 。

2) MB26 镁合金在铸态时出现 $Z(\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y})$ 相和 $\beta'(\text{MgZn})$ 相, 它们沿晶界呈网状分布。挤压变形后出现大量新相 $W(\text{Mg}_3\text{Y}_2\text{Zn}_3)$ 相, 它们细小弥散分布, 钉扎晶界, 阻碍了再结晶晶粒的长大。

3) 二次变形中, 挤压比 λ 对 MB26 镁合金力学性能有较大影响, 当 λ 在 10~25 之间时, 随着 λ 的增大, 挤压态棒材的力学性能逐步提高, 当 $\lambda=25$ 时, $\sigma_{0.2}=357$ MPa、 $\sigma_0=376$ MPa、 $\delta=13.4\%$ 。但当 $\lambda=39$ 时, 挤压后棒材出现周裂纹。通过数据拟合得出该合金屈服强度与平均晶粒尺寸的关系为 $\sigma_{0.2}=182+220d^{-1/2}$ 。

REFERENCES

- [1] DECKER R F. The renaissance in magnesium[J]. *Advanced Mater & Proc*, 1998(9): 31-35.
- [2] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 3-5.
CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Engineering Press, 2004: 3-5.
- [3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications potential[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 302(1): 37-45.
- [4] BOHLEN J, LETZIG D, KAINER K U. New perspectives for wrought magnesium alloys[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546/549(1): 1-10.
- [5] YU Kun, LI Wen-xian, WANG Ri-chu, ZHANG Shi-jun. Different grain refinement mechanisms of minor zirconium and cerium in magnesium alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(5): 405-409.
- [6] YI Dan-qing, WANG Bin, FANG Xi-ya, ZHOU Ling-ling, LUO Wen-hai. Effect of rare-earth elements Y and Ce on the microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 488/489(399): 103-106.
- [7] ZHOU H T, ZHANG Z D, LIU C M, WANG Q W. Effect of Nd and Y on the microstructure and mechanical properties of ZK60 alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 445/446(115): 1-6.
- [8] 罗治平, 张少卿, 隗国, 鲁立奇. 新型高强 Mg-Zn-Zr-RE 合金的微观结构[J]. *材料工程*, 1992, 7(9): 72-76.
LUO Zhi-ping, ZHANG Shao-qing, KUI Guo, LU Li-qi. The microstructure of a new high-strength Mg-Zn-Zr-RE alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1992, 7(9): 72-76.
- [9] 尹从娟, 张星, 张治民. 热处理工艺对 MB26 镁合金组织性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2008, 37(10): 54-58.
YIN Cong-juan, ZHANG Xing, ZHANG Zhi-min. Effects of heat treatment process on microstructure and properties of MB26 magnesium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(10): 54-58.
- [10] 冯文涛, 张修庆, 李伟, 马春江. 热轧 MB26 镁合金微观组织和力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(12): 15-18.
FENG Wen-tao, ZHANG Xiu-qing, LI Wei, MA Chun-jiang. Study on microstructure and mechanical properties of hot-rolling MB26 alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(12): 15-18.
- [11] VOLKOVA E F. Effect of deformation and heat treatment on the structure and properties of magnesium alloys of the Mg-Zn-Zr system[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2006, 48(11/12): 508-512.
- [12] ION S E, HUMPHREYS F J, WHITE S H. Dynamic recrystallization and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium[J]. *Acta Materialia*, 2002, 30(10): 1909-1913.
- [13] KIM J M, PARK B K, JUN J H, KIM K T, WOON J J. Formability of Mg-Zn-Zr based alloy sheets at elevated temperatures[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 345/346(12): 121-124.
- [14] 刘楚明, 李冰峰, 王荣, 李慧中, 陈志永. 二次挤压对 Mg-12Gd-3Y-0.6Zr 合金显微组织及力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(2): 171-175.
LIU Chu-ming, LI Bing-feng, WANG Rong, LI Hui-zhong, CHEN Zhi-yong. Effect of double-extrusion on microstructure and mechanical properties of Mg-12Gd-3Y-0.6Zr alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(2): 171-175.
- [15] 张振栋, 刘楚明, 常亚喆, 李慧中, 王荣, 周海涛. 挤压次数对 Mg-Zn-Zr-Re 合金组织和性能的影响[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2008, 39(2): 228-233.

- ZHANG Zhen-dong, LIU Chu-ming, CHANG Ya-zhe, LI Hui-zhong, WANG Rong, ZHOU Hai-tao. Effect of number of extrusion times on microstructure and properties of Mg-Zn-Zr-Re alloys[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(2): 228–233.
- [16] 王 斌, 易丹青, 顾 威, 王宏伟, 吴春萍, 方西亚. ZK60 镁合金型材挤压过程有限元数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(4): 272–279.
- WANG Bin, YI Dan-qing, GU Wei, WANG Hong-wei, WU Chun-ping, FANG Xi-ya. Finite element numerical simulation on extrusion process of ZK60 magnesium alloy sectional material[J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(4): 272–279.
- [17] LI Qiang, WANG Qu-dong, LI Da-quan, DING Wen-Jiang. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Zr alloy[J]. Materials Science Forum, 2007, 546/549(10): 1413–1416.
- [18] SINGH A, TASI A P. On the cubic W phase and its relationship to the icosahedral phase in Mg-Zn-Y alloys[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(2): 143–148.
- [19] SAHLBERG M, ANDNDRERSSON Y. Hydrogen absorption in Mg-Y-Zn ternary compounds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 446/447: 134–137.
- [20] TAO Chun-hu, ZHANG Shao-qing. Rare-earth phase analysis of Mg-Zn-Zr-RE alloys[J]. Journal of Rare Earths, 1990, 8(1): 52–56.
- [21] CHINO Y, MABUCHI M. Plastic-forming processes for magnesium alloys[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2008, 51(10): 798–802.
- [22] LI Qiang, WANG Qu-dong, WANG Ying-xin, ZENG Xiao-qin, DING Wen-jiang. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427(1/2): 115–123.
- [23] CHO J R, BAE W B, HWANG W J, HARTLEY P. A study on the hot-deformation behavior and dynamic recrystallization of Al-5wt.%Mg alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/3): 356–361.

(编辑 龙怀中)