

文章编号: 1004 - 0609(2003)03 - 0594 - 05

变形 AZ31 镁合金的晶粒细化^①

汪凌云, 黄光胜, 范永革, 黄光杰
(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 利用 Gleeble 1500D 热模拟机, 对 AZ31 镁合金在 300~450 ℃以及应变速率为 0.1 和 1.0 s⁻¹ 条件下进行了热压缩。发现在热压缩变形过程中发生了动态再结晶, 其动态再结晶平均晶粒尺寸(d)的自然对数与 Zener-Hollomon 参数(Z)的自然对数成线性关系。再利用 d 与 Z 的关系, 通过较低的热挤压温度(300~350 ℃), 获得了动态再结晶晶粒直径在 10~20 μm 之内的镁合金管材。

关键词: 镁合金; 动态再结晶; 晶粒细化

中图分类号: TG 146.2; TG 111.7

文献标识码: A

镁合金具有密度小, 比强度、比刚度高, 散热性、屏蔽性好, 能回收, 无污染, 资源丰富等一系列优点。在汽车、摩托车、航空航天、兵器等领域有着广泛的应用前景, 成为减重节能, 保护环境的首选材料^[1~4]。但是, 由于镁及常用镁合金是密排六方结构(HCP), 塑性成形能力差, 所以铸造镁合金得到了大量应用。然而变形镁合金比铸造镁合金具有更优良的性能, 更多样的型式, 更高的生产率, 更便于连续化、自动化, 因此研究变形镁合金及其晶粒细化具有十分重要的实际意义和理论意义。

晶粒细化不仅可以提高材料的强度而且可以提高其塑性, 对于 AZ31 镁合金而言更是如此, 因为 AZ31 镁合金既不可能靠热处理强化亦不能靠应变强化。细晶强化几乎是提高 AZ31 镁合金强度的唯一方法^[5]。

晶粒细化可分为两方面, 一方面是铸态晶粒的细化, 另一方面是变形态晶粒的细化, 本文作者讨论后者。材料的屈服强度与晶粒大小存在着函数关系, 也就是 Hall-Petch 公式^[6]:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中 σ_s 为屈服强度, σ_0 为单晶体的屈服极限, K 为常数, d 为晶粒大小。 K 值随泰勒系数的增加而增加, 通常泰勒系数取决于滑移系的多少。由于镁是密排六方结构, 与面心立方和体心立方金属相比, 镁的泰勒系数大, 因此其 K 值也大^[6]。镁合金晶粒的大小对屈服强度的影响比铁合金和铝合金的

都大^[7~10]。本文作者从控制动态再结晶晶粒大小出发, 研究了 AZ31 镁合金的热压缩行为, 并通过挤压实例, 获得了细晶组织。

1 实验

AZ31 镁合金的名义成分为: 3% 铝, 1% 锌, 0.2% 锰, 其余为镁。在 20 kW 的电阻炉中熔炼, 熔剂保护, 石墨模浇注成型。将铸锭进行均匀化处理, 工艺为 400 ℃保温 15 h。在 Gleeble 1500D 热模拟机上对铸态试样进行热压缩试验, 压缩温度为 300~450 ℃, 变形速率为 0.1 和 1.0 s⁻¹。压缩前升温速度为 1 K/s, 保温 5 s。相对压下量为 60% 左右。试样变形后水淬。

挤压前空心圆锭用感应炉加热, 在 6.37 MN 的立式挤压机上挤压, 用石墨润滑剂润滑。挤压温度为 300, 350 ℃, 挤压比在 15~30 之间, 挤压速度为 0.5~7.0 m/min, 挤压后空冷至室温。

2 实验结果与分析

2.1 热压缩变形行为

AZ31 镁合金热压缩时的真应力-真应变曲线如图 1 所示, 具有典型的动态再结晶特征。开始变形时, 由于加工硬化, 应力急剧增长, 达峰值 σ_0 后, 开始下降, 最后几乎趋于稳定。说明已发生动

① 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA351050) 收稿日期: 2002 - 10 - 28; 修订日期: 2003 - 01 - 12

作者简介: 汪凌云(1934 -), 男, 教授, 博士生导师。

通讯联系人: 汪凌云, 教授; 电话: 023 - 65103711; E-mail: cqlywang@yahoo.com.cn

态软化而且软化程度逐渐加大。随着变形温度的升高, 流变应力减小。变形速率降低时, 相应的流变应力也相应减小。

图 2 所示是 AZ31 热压缩后的再结晶组织, 图 2(a) 为部分再结晶组织, 图 2(b) 为完全再结晶组织。动态再结晶通常开始于旧晶界处, 新的晶粒又在正在长大的再结晶晶粒边界形核长大, 这样就形成了再结晶晶粒的增厚带^[11]。变形温度较低时, 与原始晶粒相比, 再结晶晶粒直径较小, 就形成了图 2(a) 所示的“项链”结构; 但当应变足够大时, 将会发生完全再结晶。变形温度较高时, 再结晶晶粒尺寸较大, 形成图 2(b) 所示的完全再结晶结构^[3]。

再结晶晶粒大小不仅与温度有关, 而且还与应变速率有关。变形温度升高, 晶界扩散和晶界迁移能力增加, 晶粒长大容易, 导致晶粒粗化。应变速率增加, 变形过程中产生的位错来不及抵消, 位错增多, 再结晶形核增加, 导致晶粒细化。

Zener-Hollomon 参数综合了温度和应变速率的影响, 因此可引入 Z 参数来分析热压缩过程晶粒尺寸。 Z 值与变形温度和应变速率的关系如下^[12]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp \left[\frac{Q}{RT} \right] \quad (2)$$

式中 Q 为变形激活能, R 为气体常数, T 为变形温度(绝对温度), $\dot{\epsilon}$ 为变形速率。热压缩过程中再结晶晶粒的平均直径(d)与 Z 参数的关系如图 3 所示。随着 Z 的增加, d 减少, 而且 $\ln Z$ 与 $\ln d$ 成线性关系。通过一元线性回归, 可得:

$$\ln d = -0.343 \ln Z + 11.059 \quad (3)$$

其相关性大于 0.99。

2.2 AZ31 镁合金挤压时晶粒细化途径探讨

常用的铝合金、铁合金等, 其加工产品都可通过固溶、时效等热处理手段改善其强度和塑性。但 AZ31 镁合金中加入的合金元素量小, 在常温下基

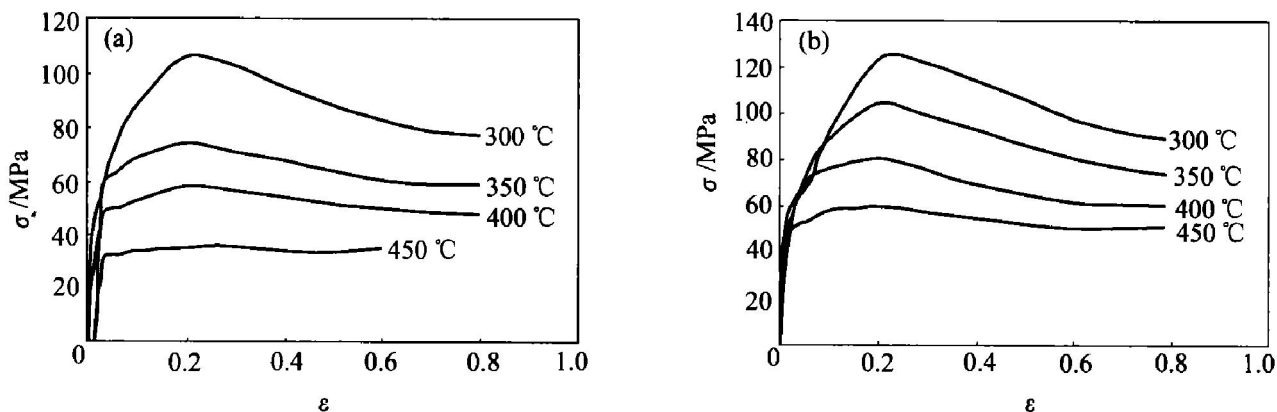


图 1 真应力—真应变曲线

Fig. 1 Curves of true stress(σ)—true strain(ϵ)

(a) — $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$; (b) — $\dot{\epsilon} = 1.0 \text{ s}^{-1}$

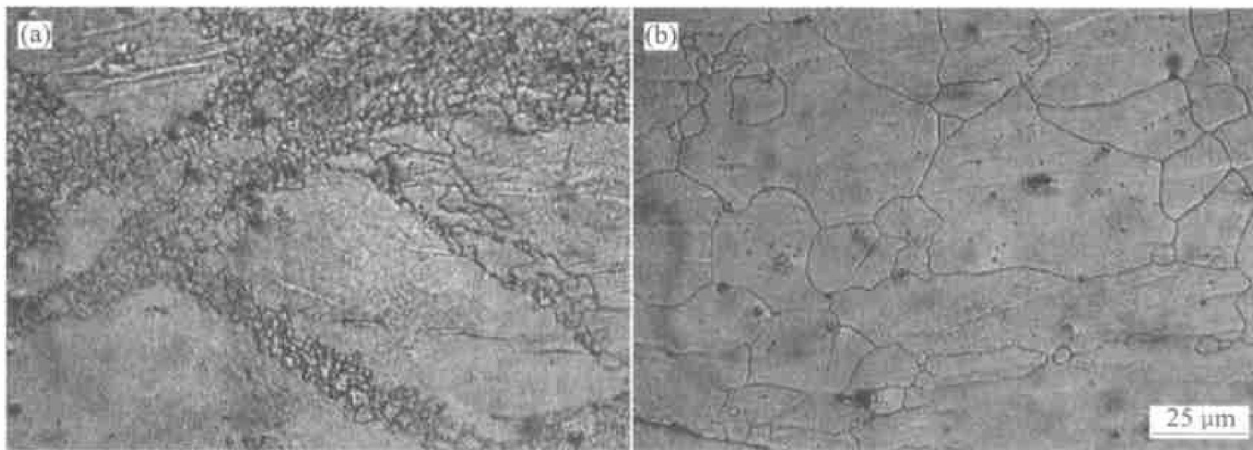


图 2 AZ31 热压缩后的再结晶组织

Fig. 2 Microstructures of AZ31 after hot compressing

(a) —Partially crystallized; (b) —Recrystallized

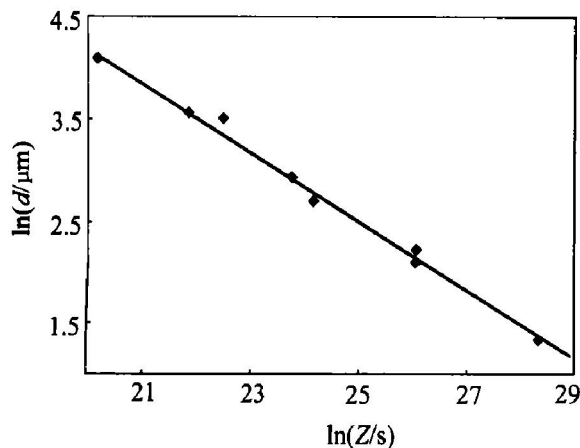


图3 再结晶晶粒直径与 Z 参数的关系

Fig. 3 Relationship between recrystallization grain size and Z parameter

本都是以固溶形式存在, 形成 $Mg_{17}Al_{12}$ 第二相的量又非常少, 因此该合金不能进行热处理强化^[5]。对于AZ31镁合金, 获得理想的组织与性能只能通过适当的挤压工艺来实现。所以与铝合金、钢铁等相比, 制订合适的塑性加工工艺对镁合金来说显得更加重要。

由Hall-Petch公式可知, 材料的晶粒越小, 其屈服强度也就越高。细晶强化在提高材料强度的同时, 还可提高材料的塑性。根据式(3), 挤压变形后要获得细晶组织, 应增加 Z 值, 即采用适宜温度和高应变速率的加工工艺。

根据式(2), 温度与 Z 值成指数形式, 而应变速率与 Z 值呈线性关系, 所以对于 Z 值, 温度是最主要的影响因素。再由式(3)可知, 温度对再结晶晶粒的大小影响最显著, 而应变速率次之。因此制订AZ31镁合金热加工工艺时, 应主要考虑温度的影响。要获得细晶组织, 必须采用适宜的变形温度。

由于镁是密排六方结构, 低于 225 °C 时, 塑性变形限于基面 $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ 滑移及锥面 $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$ 孪生, 只有 3 个几何滑移系和 2 个独立滑移系, 因此其常温下塑性变形能力差。高温下可激活棱柱滑移面 $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$, 使镁更具延展性, 易于塑性变形^[13]。所以镁及镁合金的挤压加工, 通常都是在高温下进行的, 特别是在动态再结晶温度以上进行。

3 挤压实例

根据以上分析, 再综合挤压设备等因素, AZ31 镁合金管材的挤压温度为 300~ 350 °C。而挤压速

度、挤压比常受产品的规格与设备影响, 其影响不如温度显著, 因此可根据实际情况制订。在实验中, 挤压比为 15~ 30, 挤压速度为 0.7~ 6.8 m/min。

图4所示是AZ31镁合金挤压态的显微组织, 其挤压温度为 350 °C, 挤压比为 20.9, 挤压速度为 3.33 m/min。挤压后的组织为细小等轴晶, 是典型的再结晶组织, 其平均晶粒直径仅有 12.3 μm 。挤压温度为 300 °C 时, 相同挤压比下, 能获得更细的组织, 其晶粒为 8.8 μm 。但是其组织为不完全再结晶, 金相显微镜下偶尔能观察到未发生再结晶而被拉长的纤维组织, 这种组织上的不均匀性会造成材料性能的不均匀。

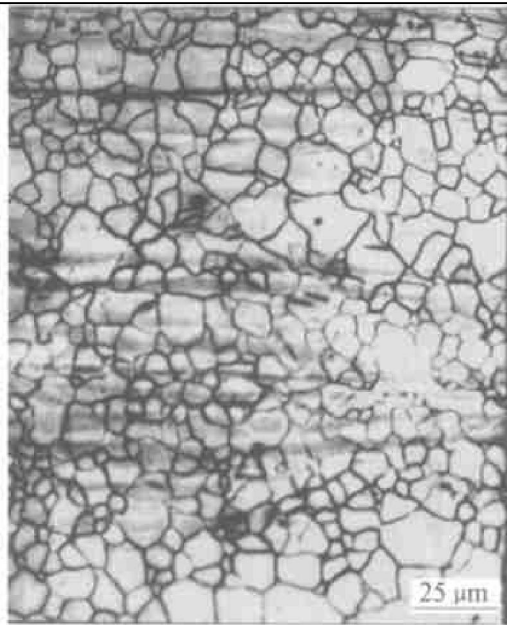


图4 AZ31 挤压态显微组织

Fig. 4 Microstructure of as-extruded AZ31

挤压比对挤压态晶粒尺寸的影响见图5, 挤压温度为 350 °C, 挤压速度(v)控制在 1.5~ 2.5 m/min 之内。结果表明, 挤压比越高, 其晶粒越细小。挤压过程中, 等效平均应变速率与挤压比的自然对数成正比, 因此当挤压比增加时, 等效平均应变速率 $\dot{\epsilon}$ 增加, 于是 Z 值也增加, 再根据式(2)可知变形后的晶粒尺寸变小。

在挤压温度为 350 °C、挤压比均为 20.9 的条件下挤压, 挤压速度对晶粒大小的影响如图6所示。尽管挤压速度相差较大, 但是晶粒的平均直径都在 10.5~ 13.4 μm 之间, 说明挤压速度 (0.5~ 7.0 $m \cdot min^{-1}$) 在试验范围内, 对晶粒大小影响不大。通常情况下, 挤压速度提高, 挤压的应变速率增加, Z 值增加, 晶粒变小。挤压时, 由于摩擦及变形内能等因素, 常使变形区内金属温度剧烈升

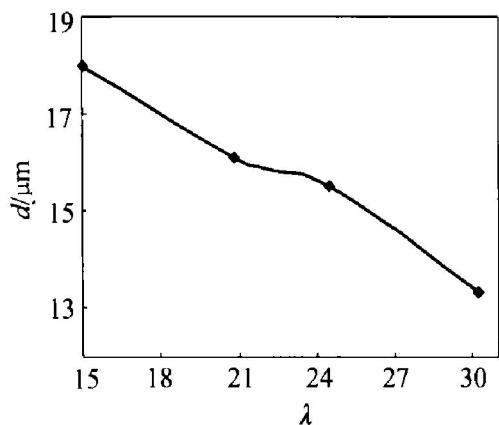


图 5 挤压比与晶粒大小的关系

Fig. 5 Relationship between extrusion ratio and grain size

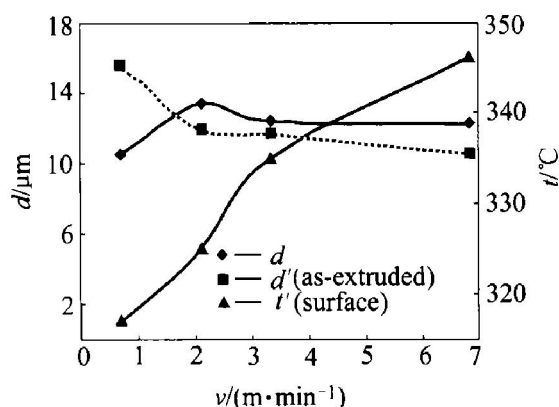


图 6 挤压速度对晶粒大小和挤压温度的影响

Fig. 6 Effect of extrusion speed on grain size and extrusion temperature

高。图 6 还表明, 随着挤压速度的增加, 挤出后管材表面温度 (t') 也增加, 在挤压过程中的变形温度也必然升高。因此, 挤压速度升高, 挤压温度升高, 也就是变形温度升高, Z 值减少, 晶粒变大。所以当挤压速度增加时, 变形速率与温升从两个相反的方向影响晶粒的大小, 两者在挤压过程中对晶粒尺寸的贡献相当, 使挤压速度对晶粒尺寸影响较小。

假设挤压速度为 2.14 mm/s 的挤压过程中产生的热量与散热平衡, 温升为零, 变形温度仍为 350 °C, 根据挤出管材表面温度反推变形温度, 再由挤压速度计算出等效变形速率, 可计算出理论上的 AZ31 镁合金挤压态晶粒大小 (d'), 如图 6 中虚线所示, 可看出晶粒平均直径理论值与实际值接近。

3 结论

1) AZ31 镁合金的热压缩变形过程中, 发生动态再结晶。动态再结晶晶粒大小的自然对数与 Z 值

的自然对数成线性关系, 即 $\ln d = -0.343 \ln Z + 11.059$ 。

2) AZ31 镁合金适宜的挤压温度为 300~350 °C, 挤压比在 15~30 之间, 挤压速度为 0.7~6.8 m/min, 挤压态的平均晶粒直径可控制在 10~20 μm 之内。

REFERENCES

- [1] Westengen H K. Magnesium die casting: from ingots to automotive parts[J]. Light Metal Age, 2000, 58(3-4): 44-52.
- [2] Dwain M, Magers A. Global review of magnesium parts in automobiles[J]. Light Metal Age, 1996, 54(9-10): 60-63.
- [3] Luo A, Pekguleryuz M O. Review cast magnesium alloys for elevated temperature applications[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(20): 5259-5271.
- [4] Avedisian M M, Baker H. ASM Specialty Handbook—Magnesium and Magnesium Alloys[M]. USA: ASM International, 1999: 1-30.
- [5] Wiley J. Magnesium and its Alloys[M]. USA: Sons Inc, 1960: 177-180.
- [6] Kubota K, Mabuchi M, Higashi K. Review processing and mechanical properties of fine-grained magnesium alloys[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(10): 4311-4320.
- [7] Kojima Y. Platform science and technology for advanced magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 3-18.
- [8] Mabuchi M, Nakamura M, Ameyama K. Superplastic behavior of magnesium alloy processed by ECAP[J]. Materials Science Forum, 1999, 304-306: 67-72.
- [9] Watanabe H, Mukai T, Higashi K. Low temperature superplastic behavior in ZK60 magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 1999, 304-306: 303-308.
- [10] Watanabe H, Tsutsui H, Mukai T, et al. Superplastic behavior in commercial wrought magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 171-176.
- [11] 卡恩 R W, 主编, 雷廷权, 等译. 材料科学与技术丛书第 15 卷: 金属与合金工艺[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 408-414.
Cahn R W. Processing of Metals and Alloys (Materials Science and Technology, Vol. 15) [M]. Beijing: Science Press, 1999. 408-414.
- [12] Takuda H. Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 513-516.
- [13] 卡恩 R W, 主编, 丁道云, 等译. 材料科学与技术丛

书第 8 卷: 非铁合金的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 108 - 115.

Cahn R W. Structure and Properties of Nonferrous Alloys

(Materials Science and Technology, Vol. 8) [M]. Beijing: Science Press, 1999. 108 - 115.

Grain refinement of wrought AZ31 magnesium alloy

WANG Ling-yun, HUANG Guang-sheng, FAN Yong-ge, HUANG Guang-jie

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The hot compression behaviors of AZ31magnesium alloy at 300 - 450 °C, with strain rate of 0.1 - 1.0 s⁻¹ were investigated by means of isothermal compression test at Gleeble 1500D thermal mechanical simulator. Dynamic recrystallization takes place during the deformation process. The natural logarithm of dynamic recrystallization grains size(*d*) is linear with the natural logarithm of Zener-Hollomon parameter (*Z*). The fine grain microstructure of extruded AZ31 magnesium alloy between 10 and 20 μm are observed at the lower deformation temperature of 300 - 350 °C by means of the relationship between *d* and *Z* parameter.

Key words: magnesium alloy; dynamic recrystallization; grain refinement

(编辑 黄劲松)