

Zn 添加对挤压态 Mg-Al-Ca-Mn 合金微观组织和力学性能的影响

王丽娟, 牛瑞利

(郑州工业应用技术学院, 郑州 451100)

摘要: **目的** 研究不同含量 Zn 元素对镁合金塑性、强度的改良效果。**方法** 以 Mg-Al-Ca-Mn 合金为基础, 采用热挤压成形加工方法, 分析不同 Zn 含量对其显微组织和力学性能的影响。**结果** Zn 元素可以改变挤压态镁合金的显微组织, 对其主合金相影响不大, 但可以改变衍射峰强度。Zn 元素可以提高挤压态镁合金的屈服强度和伸长率, 提高镁合金韧性; ACMZ₂ 合金综合性能最佳。**结论** 热挤压成形能够细化镁合金晶粒, Zn 元素含量可以改善镁合金微观组织和力学性能, 可在实际生产中根据需求调整 Zn 元素含量以获得最佳性能。

关键词: Mg-Al-Ca-Mn 合金; 热挤压成形; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.020

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0139-05

Effect of Zn Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Extruded Mg-Al-Ca-Mn Alloy

WANG Li-juan, NIU Rui-li

(Zhengzhou University of Industrial Technology, Zhengzhou 451100, China)

ABSTRACT: In order to study the improvement effect of different Zn content on the plasticity and strength of magnesium alloy, the influence of different Zn content on the microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Ca-Mn alloy is analyzed by hot extrusion process. The results show that Zn element can change the microstructure of extruded Mg alloy. It has little effect on the main alloy phase, but it can change the diffraction peak intensity. Zn element can improve the yield strength and elongation of extruded magnesium alloy, and improve the toughness of magnesium alloy. ACMZ₂ alloy has the best comprehensive properties. Hot extrusion can refine the grain size of magnesium alloy, and Zn content can improve the microstructure and mechanical properties of magnesium alloy. Therefore, the content of Zn element can be adjusted according to the demand in actual production to obtain the best performance.

KEY WORDS: Mg-Al-Ca-Mn alloy; hot extrusion forming; microstructure; mechanical properties

镁合金作为最轻的结构材料, 被称为“21 世纪的绿色工程材料”。镁合金具有高比刚度、高比强度以及良好的机械加工性能, 在轻量化生产等方面前景广

阔^[1-2]。镁合金分子结构为密排六方形, 室温下其塑性较低、成形性不够理想, 在很大程度上限制了镁合金的应用。众多研究表明, 可通过细化晶粒来改善镁

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 河南省重点研发与推广(科技攻关)项目(192102210224); 河南省教育厅民办普通高等学校品牌专业建设项目(教政法[2019]527号)

作者简介: 王丽娟(1984—), 女, 讲师, 主要研究方向为材料的微观组织和力学性能分析。

合金的综合性能。目前,比较常用的晶粒细化方法包括合金化和塑性变形,例如摩擦加工、轧制、挤压等^[3-5]。以挤压为例,可将镁合金坯料放在挤压筒内,通过施加外力使其从模孔中流出,进而获取一定尺寸、形状的产品。总体来说,镁合金挤压成形优点比较多,既可以提高镁合金塑性确保产品综合质量,又不会提高加工成本或加工难度,因此许多学者在镁合金挤压成形方面进行了大量研究。Y. J. Wang等^[6]以挤压态 Mg-8Sn-2Zn 合金为例,探讨了 Cu 对其微观组织、力学性能的影响,结果表明,Cu 可使合金相细化,进而导致晶粒细化、结构强度减弱。杨明波等^[7]以 Mg-5Zn-5Sn 合金为例,探讨了 Ca 对其微观组织、力学性能的影响,结果表明,Ca 可提高合金抗蠕变性和轻度。T. T. Sasaki 等^[8]则探讨了 Mg-Sn-Zn-Al 合金的挤压工艺,认为挤压温度为 250 °C,挤压比为 20,挤压速率为 0.1 mm/s 时,合金强度最优。

文中以 ACMZ 系列镁合金为研究对象,其基体合金为 Mg-Al-Ca-Mn,介绍热挤压成形方法以及不同含量 Zn 元素对该镁合金微观组织、力学性能的影响。

1 实验

先熔炼镁合金,然后进行均匀化处理,最后对镁合金进行挤压实验。通过微观组织观察和力学性能测试,探讨 Zn 含量对镁合金综合性能的影响。

1.1 材料

选定的实验材料为 ACMZ_x,基体合金为 Mg-Al-Ca-Mn,其中 Mg 为主体元素,Al 为 1%,Ca 为 0.3%,Mn 为 0.3%(质量分数)Zn 含量会发生变化,ACMZ₀,ACMZ₂,ACMZ₄,ACMZ₆ 型号的 Zn 元素的质量分数分别为 0,0.2%,0.4%,0.6%。

合金熔炼原材料包括工业纯镁、工业纯铝、Mg-20%Ca 中间合金以及 Mg-10%Mn 中间合金。具体步骤可描述为:首先,按照不同成分进行配料;其次,将预热到 150 °C 左右的工业纯镁放入电阻炉并加热至 720 °C,此时镁锭会变成熔体;然后,将其他合金原料加入镁熔体,完全熔化后添加精炼剂精炼并打碎搅拌,将温度提高至 740 °C 并保温 40 min 左右;最后,通过金属模铸造得到实验原材料——镁合金铸锭。整个熔炼过程需要在惰性气体(如二氧化碳、SF₆)下进行。

为降低成分偏析的影响、提高镁合金铸锭的热挤压性能,需要对其进行均匀化处理。参考相关文献以及实验结果,文中选取的均匀化处理工艺为:在 330 °C 下保温 24 h,然后取出室温空冷,最后将其加工成 $\phi 80 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的合金锭。

1.2 热挤压成形

镁合金热挤压成形系统如图 1 所示,主要由挤压

模具、反挤压装置、液动力装置、压力监测系统、温度控制系统等组成^[9-10]。液动力装置可驱动挤压轴运动,为挤压装置提供充足动力;温度控制系统可实现挤压模具和坯料的实时加热、温度监控;压力监测系统可实时监测挤压轴的位置和挤压载荷。一般情况下,挤压装置多采用四柱型压机。挤压模具固定在压机工作台上,压机主轴带动模具运动进而挤压坯料,实现镁合金的热挤压成形^[11-13]。

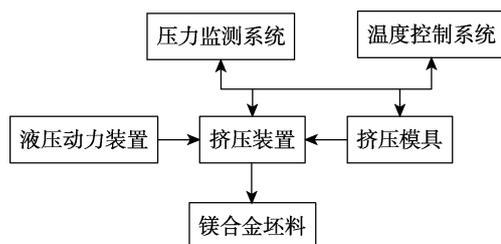


图 1 镁合金热挤压成形系统

Fig.1 Mg alloy hot extrusion forming system

热挤压设备为 500 t 卧式挤压机,文中选择正向挤压,挤压筒直径为 80 mm,长度为 450 mm。需要先将已均匀化处理的合金锭预热,同时模具也要预热至相同温度。预热完成后,立即放入挤压筒完成挤压。热挤压工艺参数如下:预热温度为 280 °C,挤压温度为 260 °C,挤压比为 22,挤压速度为 2 mm/min。

1.3 微观形貌

文中选择型号为 Olympus BX53M 的设备观察镁合金微观组织。具体步骤可描述为:将不同成分的镁合金截取为数段 16 mm×10 mm 样品;制样处理,利用 280#~1000# 水磨两用砂纸将样品表面打磨成镜面;腐蚀处理,打磨好的样品需要进行腐蚀处理,腐蚀后用酒精冲洗表面并用冷风吹干;挑选晶界或枝晶清晰的样品观察并拍照^[14-15]。

采用 Ultima 型 X 射线衍射仪对不同成分镁合金进行物相分析。首先,要将样品打磨至金相水准进行测试;然后,设置相关参数,例如:扫描角度为 10°~90°、扫描速度为 4(°)/min、Cu 靶材、加速电压和电流分别为 45 kV 和 200 mA。

采用扫描电镜(SEM)观测镁合金样品,扫描电镜型号为 JSM-6360。

2 微观组织及力学性能分析

2.1 微观组织

挤压态 ACMZ_x 沿挤压方向的微观组织如图 2 所示,可以看出,不同成分镁合金均出现了不完全动态再结晶,镁合金出现细小再结晶组织,沿挤压方向被拉长部分未出现再结晶组织,ACMZ₀ 和 ACMZ₂ 的晶粒细化现象比较明显;如果 Zn 含量进一步增加,未

出现再结晶的区域会增加，另外，ACMZ₆ 出现晶粒粗大现象。还可以看出，再结晶的晶粒大小不同，说明再结晶不是同时发生，而是个别区域先出现再结

晶；上述再结晶晶粒会优先生长，之后再结晶区域的晶粒尺寸要小一些，部分长大晶粒会出现二次再结晶的情况。

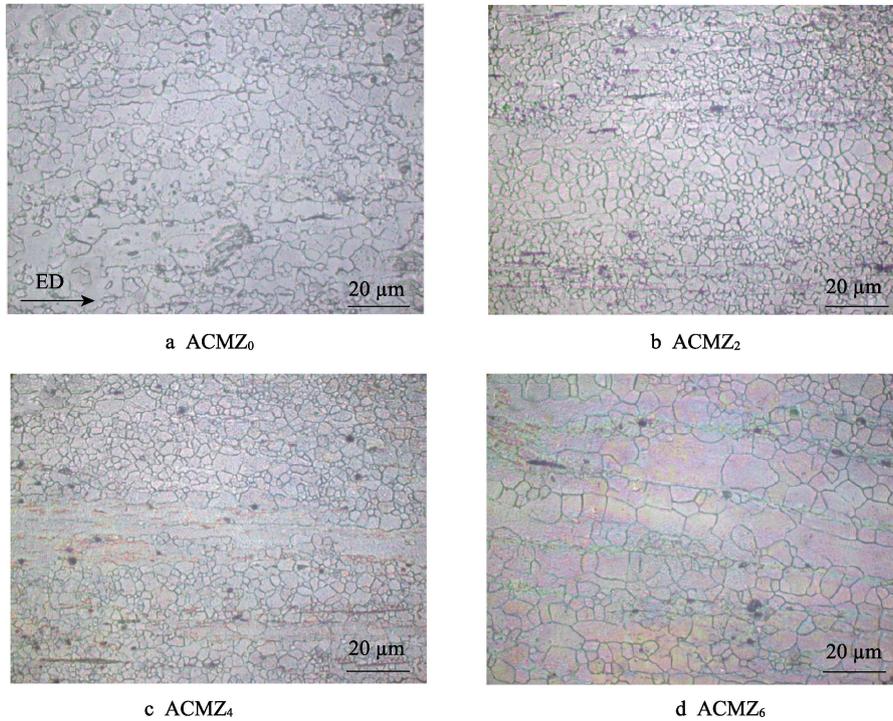


图 2 挤压态 ACMZ_x 微观组织
Fig.2 Microstructure of extruded ACMZ_x

挤压态 ACMZ_x 合金的 XRD 图谱如图 3 所示。可以看出，不同成分 ACMZ_x 合金经热挤压处理后，其主要相都是 α-Mg 和 Al₂Ca，但是衍射峰强度发生变化，表明热挤压并不会生成新相，但可以改变相衍射峰强度。

可以看出，Zn 元素含量对镁合金最大抗拉强度几乎没有影响；Zn 元素含量增加时，合金屈服强度先变大后变小，ACMZ₂ 合金的屈服强度最大，约为 257 MPa；ACMZ₄ 和 ACMZ₆ 合金的屈服强度只有 170 MPa 和 165 MPa。说明 Zn 元素可以提高镁合金的屈服强度和伸长率，伸长率会随 Zn 含量的增加而变大。特别地，ACMZ₂ 的伸长率并没有因为强度变大而减小，即 ACMZ₂ 合金综合性能最佳。

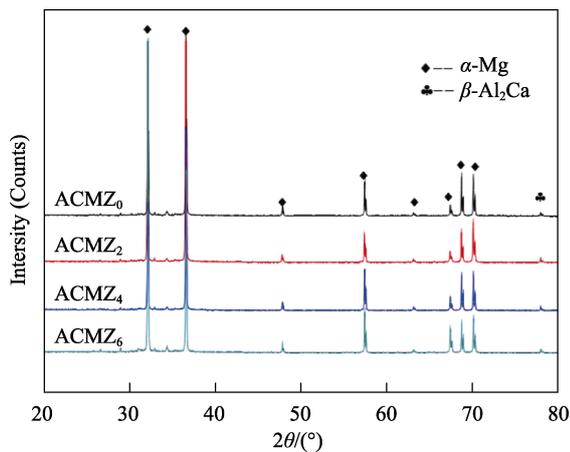


图 3 挤压态 ACMZ_x 合金的 XRD 图谱
Fig.3 XRD pattern of extruded ACMZ_x alloy

2.2 力学性能

挤压态 ACMZ_x 合金应力-应变曲线如图 4 所示，

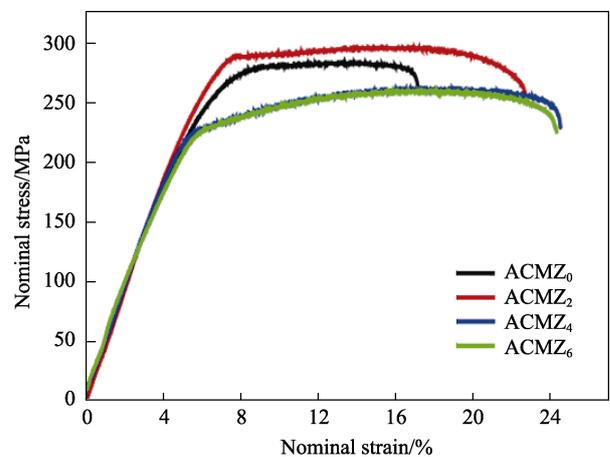


图 4 挤压态 ACMZ_x 合金应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve of extruded ACMZ_x alloy

挤压态 ACMZ_x 合金断口扫描结果如图 5 所示, 可以看出, ACMZ₀—ACMZ₆ 合金断口均包括韧窝、撕裂棱, 是比较典型的韧性断裂。其中 ACMZ₀ 合金

的韧窝比较少, 因此其韧性最差; Zn 含量增加, 合金断口韧窝数量也会增加, 深度也会增加, 即韧性变好。

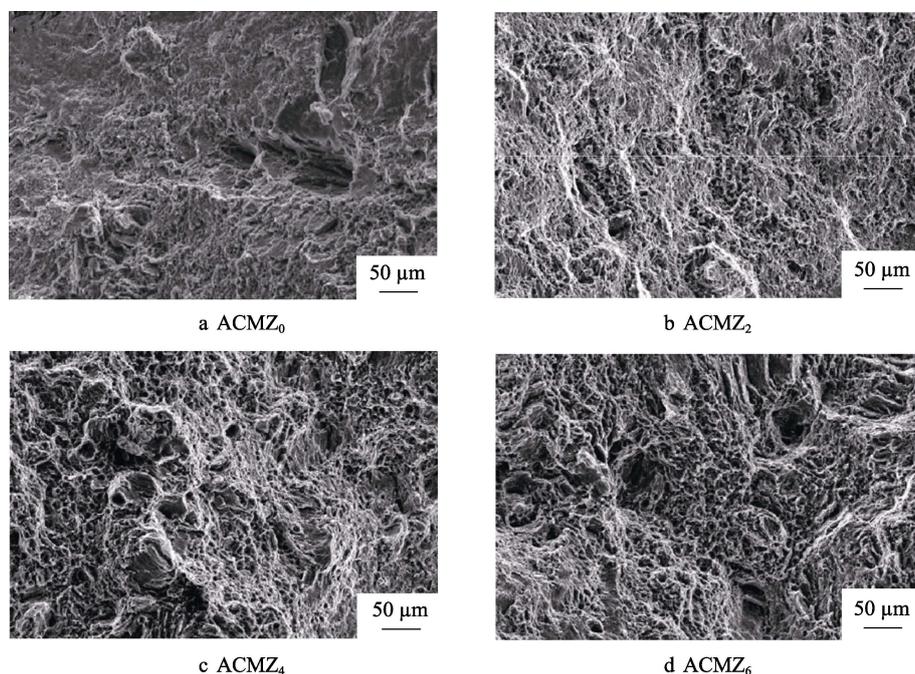


图 5 挤压态 ACMZ_x 合金断口形貌特征

Fig.5 Fracture morphology characteristics of extruded ACMZ_x alloy

综上所述, Zn 元素可以改变挤压态镁合金的显微组织, Zn 元素对挤压态镁合金的主合金相影响不大, 但可以改变衍射峰强度; Zn 元素可以提高挤压态镁合金的屈服强度和伸长率, Zn 含量增加会提高镁合金韧性, ACMZ₂ 合金综合性能最佳。

3 结论

1) 随着 Zn 含量增加, 镁合金会出现细小再结晶组织, ACMZ₀ 和 ACMZ₂ 晶粒细化现象比较明显, 但是 Zn 含量进一步增加, 未出现再结晶的区域会增加。

2) 热挤压并不会使镁合金生成新相, 但可以改变衍射峰强度。

3) 随着 Zn 元素含量增加, 合金屈服强度先变大后变小, 伸长率会变大; 随着 Zn 含量增加, 镁合金韧性会变好, ACMZ₂ 合金综合性能最佳。

参考文献:

- [1] 杨嘉傲, 房宇轩, 杨景超, 等. 导热镁合金的发展和现状[J]. 铸造设备与工艺, 2019, 12(6): 55—58.
YANG Jia-ao, FANG Yu-xuan, YANG Jiang-chao, et al. Development and Research Status of Thermal Conductive Mg Alloys[J]. Foundry Equipment and Technology, 2019, 12(6): 55—58.
- [2] 李落星, 周佳, 张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形

技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 35—43.

LI Luo-xing, ZHOU Jia, ZHANG Hui. Advanced Extrusion Technology and Application of Aluminium, Magnesium Alloy for Vehicle Body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 35—43.

- [3] 赵悛, 董刚, 赵博. 镁合金在航空领域应用的研究进展[J]. 有色金属工程, 2015, 5(2): 23—27.

ZHAO Yi, DONG Gang, ZHAO Bo. Research Progress of Magnesium Alloy Application in Aviation Manufacturing[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(2): 23—27.

- [4] ZHANG Y, CHEN X, LU Y L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of As-Extruded Mg-Sn-Zn-Ca Alloy with Different Extrusion ratios[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(11): 2190—2198.

- [5] 张德芬, 谭盖, 刘璐, 等. 热处理对 6061 铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 184—187.

ZHANG De-fen, TAN Gai, LIU Lu, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(11): 184—187.

- [6] WANG Y J, PENG J, ZHONG L, et al. On the Microstructure and Mechanical Property of As-Extruded Mg-Sn-Zn Alloy with Cu Addition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 744: 234—242.

- [7] YANG B M, CHENG L, PAN F S, et al. Effects of Calcium Addition on As-Cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5Zn-5Sn Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(5): 769—775.
- [8] SASAKI T T, YAMAMOTO K, HONMA T, et al. A High-Strength Mg-Sn-Zn-Al Alloy Extruded at Low Temperature[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(10): 1111—1114.
- [9] 张静, 袁付庆, 黄浩. 铸态和挤压变形态 Mg-Zn-Al-Re 镁合金的室温和高温力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 593—597.
ZHANG Jing, YUAN Fu-qing, HUANG Hao. Mechanical Properties of As-Cast and As-Extruded Mg-Zn-Al-Re Magnesium Alloys at Room Temperature and Elevated Temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 593—597.
- [10] HU G S, ZHANG D F, DONG Y, et al. Microstructures and Mechanical Properties of As-Extruded and Heat Treated Mg-6Zn-1Mn-4Sn-1.5Nd Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1439—1445.
- [11] 李广, 靳丽, 董杰, 等. Zn 添加对挤压态 Mg-Zn-Ce-Zr 合金微观组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 251—258.
LI Guang, JIN Li, DONG Jie, et al. Effects of Zn Addition on Microstructures and Mechanical Properties of As-Extruded Mg-Zn-Ce-Zr Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 251—258.
- [12] 白尧, 董晨全, 何子博, 等. 添加 Al、Sn 元素对 Mg-Zn-Ca 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(17): 19—22.
BAI Yao, DONG Chen-quan, HE Zi-bo, et al. Effect of Al and Sn Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Ca Alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(17): 19—22.
- [13] ZHANG X B, BA Z X, WANG Z Z, et al. Microstructure and Biocorrosion Behaviors of Solution Treated and As-Extruded Mg-2.2Nd-xSr-0.3Zr Alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(12): 3797—3803.
- [14] WANG B, CHEN X H, PAN F S, et al. Effects of Sn Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Al Alloys[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2017, 27(6): 695—702.
- [15] WANG G G, HUANG G S, CHEN X, et al. Effects of Zn Addition on the Mechanical Properties and Texture of Extruded Mg-Zn-Ca-Ce Magnesium Alloy Sheets[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 705: 46—54.