

新型 Mg-Zn-Mn 变形镁合金的挤压特性与组织性能研究

Researches on Extrusion, Microstructure and Mechanical Properties of New Mg-Zn-Mn Alloy

戴庆伟¹, 张丁非^{1,2}, 袁 炜¹, 石国梁¹, 段红玲¹

(1 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045;

2 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

DAI Qing-wei¹, ZHANG Ding-fei^{1,2}, YUAN Wei¹, SHI Guo-liang¹, DUAN Hong-ling¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2 National Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

摘要: 研究发现, 所开发的 Mg-Zn-Mn 新型变形镁合金可实现在 310℃ 下的挤压成型, 并在该温度下发生了完全的动态再结晶。固溶及时效处理, 特别是双级时效处理, 能够显著提高该合金的强度, 其最高强度达到高强变形镁合金 ZK60 的强度水平。

关键词: Mg-Zn-Mn 合金; 挤压; 强度; 显微组织

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)04-0038-05

Abstract: It was found that the new Mg-Zn-Mn wrought magnesium alloy could be extruded at 310℃ while complete dynamic recrystallization took place during extruding. Solution and aging treatment, especially 2-step aging, can significantly increase the strength of the alloy which can achieve the strength of the high strength ZK60 wrought magnesium alloy.

Key words: Mg-Zn-Mn alloy; extrusion; strength; microstructure

镁及镁合金具有比重轻, 比强度、比刚度高, 阻尼性、切削加工性及导热性好, 电磁屏蔽能力强, 易于回收等一系列优点, 受到人们的极大关注, 被誉为“21 世纪的绿色工程结构材料”^[1-3]。在各种镁合金材料中, 变形镁合金材料由于可以通过塑性变形生产尺寸多样的板、棒、管、型材及锻件产品, 并且可以通过热处理工艺调整和控制材料的组织结构和力学性能, 获得比铸造镁合金材料更高的强度, 更好的延展性, 从而满足更多结构件的性能需要, 显示出较大的应用潜力^[4-6]。

以 ZM21 变形镁合金为基础, 本工作研究开发了一种高锌含量的高强度 Mg-Zn-Mn 变形镁合金, 该合金不含稀土元素, 制作简单, 价格低廉, 挤压温度低, 推广应用前景好。一般情况下, Mg-Zn 系合金较 Mg-Al

系合金的屈服强度高, 承载能力好, 特别适合用在强度要求较高的金属结构零件上。在 Mg-Zn 系合金的基础上添加 Zr, Y 等合金元素, 可显著提高合金的强度, 并改善韧性, 但 Zr, Y 等稀土元素的添加, 不但显著增加材料的成本和冶炼难度, 还易在铸锭过程中产生热裂等缺陷^[1]。本工作旨在探索在 ZM21 合金基础上提高 Zn 含量, 尝试在保持 ZM21 优良挤压性能的条件下, 配合适当的热处理工艺控制来提高合金强度。

1 材料制备与实验方法

实验用 Mg-Zn-Mn 镁合金由实验室自行熔炼铸造而成, 经原子吸收光谱仪成分分析测定其化学成分, 见表 1。

表 1 Mg-Zn-Mn 变形镁合金材料成分

Table 1 Chemical composition of the Mg-Zn-Mn wrought Mg alloy

Element	Mg	Zn	Mn	Other
Mass fraction/ %	91.69	5.77	1.25	1.29

坯料经过 310℃保温 24h 的均匀化处理后进行挤压,挤压机吨位 800t,挤压工艺参数见表 2。

表 2 实验镁合金挤压工艺参数
Table 2 Extrusion parameters of the Mg-Zn-Mn wrought Mg alloy

Billet temperature/℃	Mould temperature/℃	Extrusion chamber temperature/℃	Extrusion speed / (m·min ⁻¹)	Extrusion ratio	Lubricant
310	320	320	1.5~2	55.75	-

将挤压后的 $\phi 15\text{mm}$ 镁合金棒料锯切成 120~140mm 长,在石墨粉埋覆条件下进行各种温度和时间下的固溶处理,出炉后水淬,随后进行各种工艺参数的时效处理。对在各种热处理条件下获得的 Mg-Zn-Mn 变形镁合金试棒进行拉伸力学性能测试、显微组织分析和能谱分析,金相腐蚀剂采用 4% 硝酸酒精溶液。

2 结果与分析

表 3 不同合金的常用挤压温度^[8-11]
Table 3 Extrusion temperatures of current Mg alloys^[8-11]

Alloy	AZ31	AZ91	ZK60	ZM21	Experimental material
Common extrusion temperature/℃	400	375	390	450	310

实验所用材料的挤压温度是上述常用镁合金中最低的,与同系列的 ZM21 相比,挤压温度相差 140℃。在 310℃的较低挤压温度下,实验材料可以顺利挤压成型。初步分析认为是高 Zn 降低再结晶温度和 α -Mn 对塑性变形的协调作用所造成的。

2.2 不同状态下的力学性能

本实验对获得的挤压棒材分别进行了固溶处理(T4)、固溶处理+人工时效处理(T6),和固溶处理后的双级时效处理(T4+2-step aging)。不同热处理状态下的拉伸力学性能见表 4。

表 4 不同热处理状态下的拉伸力学性能
Table 4 Mechanical properties under various heat treatments

Condition	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%
Extrusion	213	312	11.1
T4	192	297	10.6
T6	281	333	7.8
T4+2-step aging	340	366	6.3

由表 4 可见,T6 处理,尤其是 T4+ 双级时效能够显著提高此 Mg-Zn-Mn 新型变形镁合金的抗拉强度和屈服强度,屈服强度的提高幅度最大达 64%,达到高强度变形镁合金 ZK60 的强度水平。

挤压态合金经过 T4 处理后,延伸率和强度都有

2.1 挤压特性分析

镁及镁合金的挤压温度与合金种类和挤压件形状有关,典型的挤压温度范围为 330~400℃,如果挤压温度过高易导致挤压件的热裂,且由于镁合金的塑性变形能力较差,挤压温度过低时又难以挤压成型^[7]。本实验所采用的挤压温度为 310℃,与普通镁合金的挤压温度相比,属低温挤压。常用镁合金的挤压温度见表 3。

所降低,这是因为,挤压后棒料的冷却速度较慢,在冷却过程中会析出少量沉淀强化相,而经 T4 处理后,少量沉淀强化相溶入 α -Mg 基体,而且合金的晶粒也有所长大,从而造成了合金强度的降低。

挤压态合金经过 T6 处理后,强度有了明显的提高,屈服强度提高近 70MPa,但是延伸率有所降低。T6 处理使得固溶入 α -Mg 基体的合金元素以第二相化合物或元素形式析出,从而起到了时效强化的作用。

T4+ 双级时效能够显著的提高合金的屈服强度和抗拉强度。这是由于,预时效处理生成了 GP 区,且在晶内形成了大量的溶质富集区或过渡相,为高温(终)时效提供了弥散析出的结晶核心,所以 T4+ 双级时效处理的强化效果更好,更有利于提高合金的强度。

2.3 不同热处理状态下合金的显微组织

所设计的 Mg-Zn-Mn 新型变形镁合金的铸态、挤压态和挤压后各种热处理态的显微组织如图 1。

由图 1 可见,挤压态组织的晶粒呈等轴状,明显要比铸态组织的晶粒细小,表明挤压过程中发生了动态再结晶。从而提高了镁合金的室温强度、改善了其可塑性,同时由于挤压效应的存在使合金的强度有较大的提高,综合力学性能得到显著改善。

与挤压态组织相比,T4 处理的组织中已经没有带状组织,组织更加的均匀,但是析出物有所减少,且

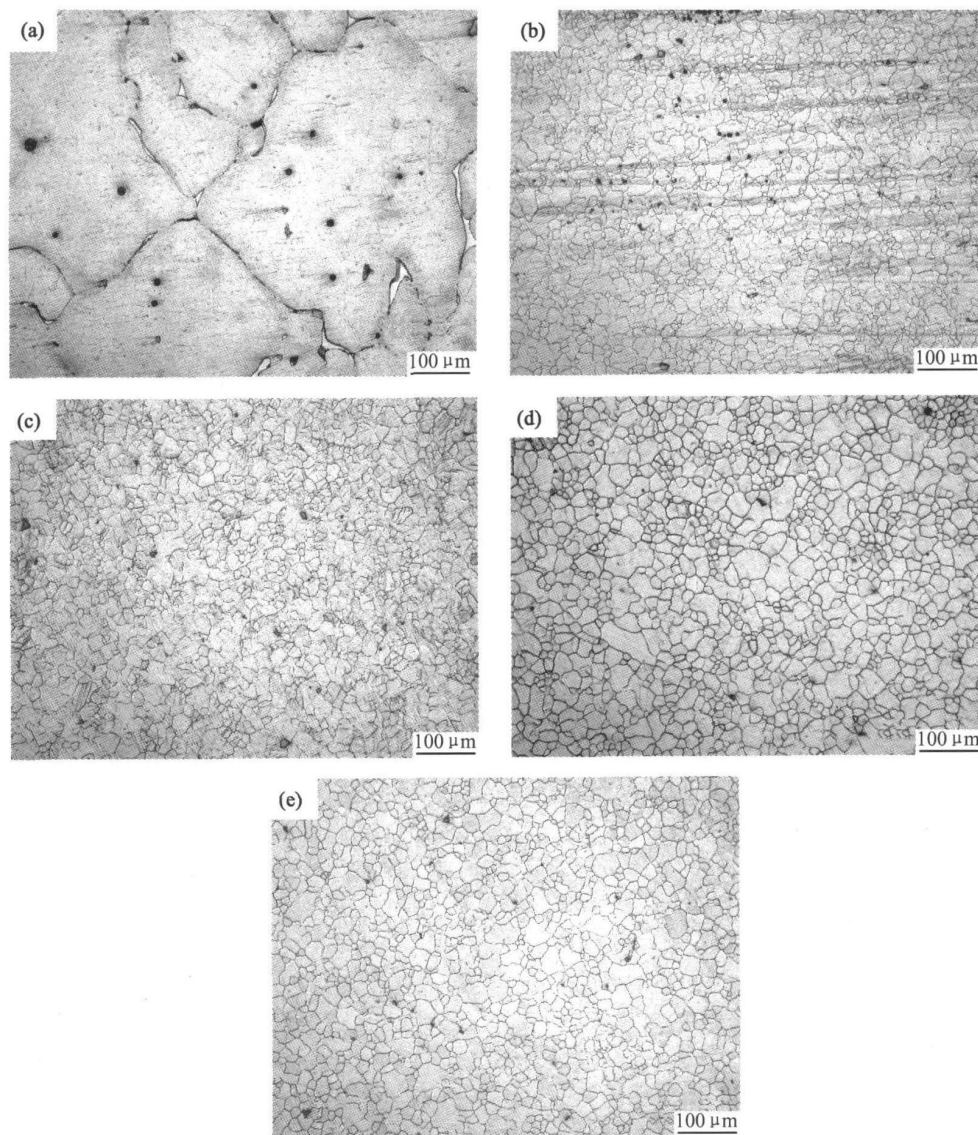


图1 各种热处理状态下合金的金相显微组织 (a) 铸态组织; (b) 310℃挤压态组织;
(c) 310℃挤压+ T4 处理的组织; (d) 310℃挤压+ T6 处理的组织; (e) 310℃挤压+ T4+ 双级时效处理的组织
Fig. 1 Microstructures under various heat treatments (a) as-cast; (b) 310℃ extruded;
(c) 310℃ extruded + T4 treated; (d) 310℃ extruded + T6 treated; (e) 310℃ extruded + T4+ 2-step aged

晶粒尺寸比挤压态稍大。

从图 1d 可以看到, 经 T6 处理第二相化合物在晶界处析出, 富集, 且有黑色颗粒分散在基体中, 从而起到了时效强化的作用。

从图 1e 中可以看到, 经 T4+ 双级时效处理的合金的组织较 T6 处理的组织没有太大的变化, 只是组织更加的均匀, 黑色颗粒更弥散和细小。

通过 SEM 结合能谱分析(图 2) 可以看到, 基体中弥散着许多 Mn 颗粒(小亮点), 在晶界处富集了一些 MgZn 等第二相化合物, 这些化合物为时效过程中析出的强化相。这些细小的 Mn 颗粒起到了弥散强化的效果, 同时 Mn 对合金中的第二相 β (MgZn) 的析出也

有影响。Mn 的存在提高了 β' 相的析出密度, 使第二相的析出更加的弥散。双级时效处理中的较低温度下的预时效处理在基体(10 $\bar{1}0$)面上生成了 GP 区, 起到了时效硬化的作用^[11], 而且形成了一些溶质富集区和过渡相, 从而为终时效处理中的 β' 相的析出强化做了准备。在终时效处理时, β' 相弥散析出, 从而进一步提高了合金的强度。从图 2 可见, 与 T6 处理比较, 双级时效处理使合金的 Mn 颗粒和第二相粒子(MgZn 等)更加的细小和弥散, 这是 GP 区和弥散的 Mn 的共同作用造成的。之所以 T4+ 双级时效处理的合金的强度要比 T6 处理的合金的强度高很多, 是因为双级时效处理中有 GP 区强化和 β' 相析出强化的双重作用, 而且 Mn 的

存在和 GP 区的生成还起到了细化 β' 相的作用, 提高了

其析出的密度, 使其发挥了更好的强化效果。

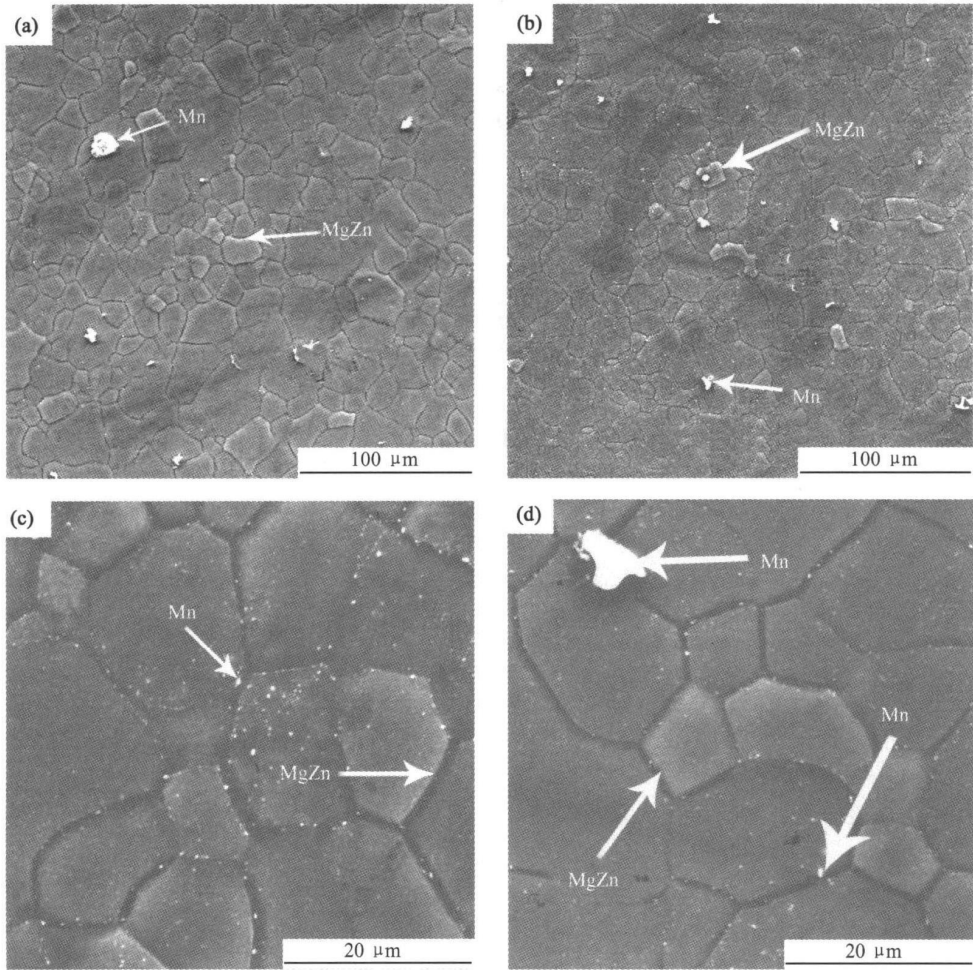


图 2 新型 Mg-Zn-Mn 变形镁合金的物相能谱分析结果
(a), (c) 为 T6 处理的合金; (b), (d) 为 T4+ 双级时效处理的合金

Fig. 2 EDX analyses for the new Mg-Zn-Mn alloy
(a), (c) T6 treated; (b), (d) T4+ 2 step aged

2.4 断裂组织研究

由图 3 为拉伸试样断口的侧截面金相组织, 从中

可以观察到断裂裂纹穿晶扩展的特征, 表明合金应该具有比较好的强韧性。

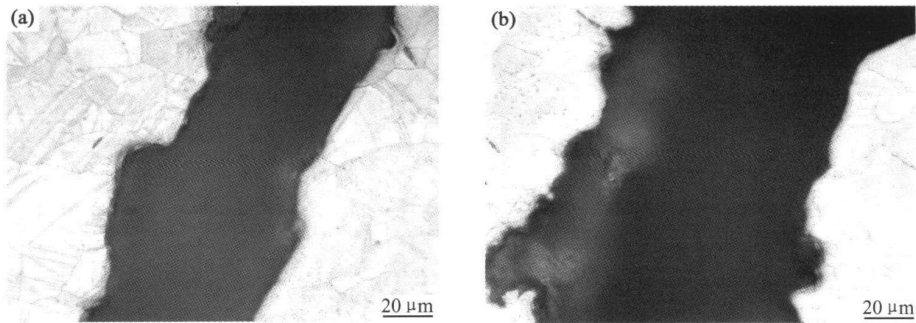


图 3 拉伸试样断口侧截面不同区域金相组织

Fig. 3 Microstructures of the fracture cross section at different area

图 4 是双级时效处理的 $Mg-Zn-Mn$ 变形镁合金断口的 SEM 形貌图, 每个小断裂面的微观形态颇类似于晶体的解理断裂, 也存在一些类似的河流花样, 但

在各小断裂面间的连结方式上又具有某些不同于解理断裂的特征, 如存在一些所谓撕裂岭等。显示出一种介于韧断与脆断之间的断裂特征。

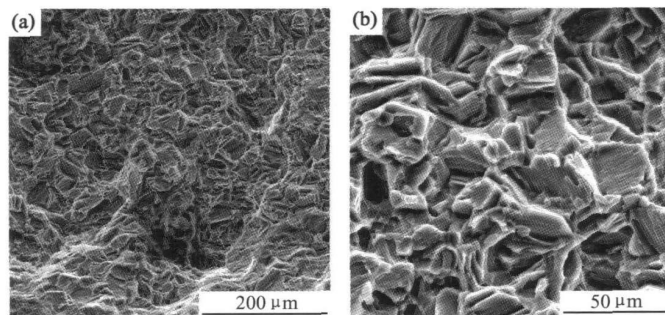


图 4 双级时效处理的 $Mg-Zn-Mn$ 变形镁合金断口 SEM 形貌图

Fig. 4 SEM photos of fracture surface for 2-step aged $Mg-Zn-Mn$ alloy

3 结论

(1) $Mg-Zn-Mn$ 新型变形镁合金可在 $310^{\circ}C$ 的相对低温下挤压成型, 并在该温度下发生了完全的再结晶, 晶粒明显的细化, 力学性能得到显著的改善。

(2) 热处理能够显著的提高合金的强度。T4+ 双级时效处理的合金比单级时效处理的合金的强度提高更显著, 处理后的合金的强度可达到 ZK60 的水平。

参考文献

- [1] 陈振华. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] POLMEAR I J. Magnesium alloys and applications[J]. Materials Science and Technology, 1994, (4): 1- 16.
- [3] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] MAENG D Y, KIM T S, LEE J H, et al. Microstructure and strength of rapidly solidified and extruded $Mg-Zn$ alloys[J]. Scripta Mater, 2000, 43: 385- 389
- [5] 刘英, 李元元, 张卫文. 镁合金的研究进展和应用前景[J]. 轻金

属, 2002, (8): 20- 25

- [6] 余琨, 黎文献, 王日初, 等. 变形镁合金的研究、开发及应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277- 288.
- [7] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [8] 程俊伟, 夏巨谔, 王新云, 等. AZ31 变形镁合金挤压成形工艺的研究[J]. 金属成形工艺, 2004, 22(3): 4- 10.
- [9] 李淑波, 吴昆, 郑明毅, 等. 挤压对 AZ91 铸造镁合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2006, (12): 54- 57.
- [10] 董国振. 高强度变形镁合金组织及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [11] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.

基金项目: 国家 973 项目(2007CB613700); 重庆市自然科学基金重点项目 (CSTC2005BA4015); 重庆市科技攻关重大专项 (CSTC2005CF4001); 国家十一五科技支撑计划项目(2006BAE04B03)

收稿日期: 2007-10-23; 修订日期: 2007-12-30

作者简介: 戴庆伟(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事轻合金材料及加工技术研究, 通讯地址: 重庆大学 A 区综合实验大楼东 309(400044). E-mail: shanren_123@163.com

(上接第 26 页)

- [6] WU C F. Functional design of organic hybrids consisting of polarized polymers and hindered phenol[J]. J Mater Sci Lett, 2001, 20(15): 1389- 1391.
- [7] HE Y, ASKAWA N, INOUE Y. Studies on poly-(ϵ -caprolactone)/thiodiphenol blends: the specific interaction and the thermal and dynamic mechanical properties[J]. J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 2000, 38(14): 1848- 1859.
- [8] WU C F. Effects of a hindered phenol compound on the dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene, acrylic rubber, and their blend[J]. J Appl Polym Sci, 2001, 80(13): 2468- 2473.

- [9] WU C F. Organic hybrid of chlorinated polyethylene and hindered phenol. III. Influence of the molecular weight and chlorine content of the polymer on the viscoelastic properties[J]. J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 2000, 38(22): 2943- 2953.

- [10] WU C F, OTANI Y. Dynamic properties of an organic hybrid of chlorinated polyethylene and hindered phenol compound[J]. J Appl Polym Sci, 2001, 82(7): 1788- 1793.

收稿日期: 2007-05-09; 修订日期: 2007-11-12

作者简介: 丁新波(1980—), 博士研究生, 现从事功能复合材料制备与性能研究, 联系地址: 上海市松江区人民北路 2999 号东华大学纺织学院(201620)。