

Zn 对 WE43 镁合金凝固组织和力学性能的影响

刘武平 陈乐平 周 全 袁源平 刘曜熙
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 以 WE43 镁合金为研究对象,采用 SEM、XRD、EDS 及拉伸试验等手段,研究了 0~1.6% (质量分数,下同)的 Zn 含量对合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,随着 Zn 含量增加,合金的晶粒尺寸先减小后增大,在 Zn 含量为 1.2% 时达到最小值,为 52.8 μm ,相比未添加 Zn 时的 64.3 μm 减小了 17.8%。Zn 的加入使得合金中产生了 Mg_{12}YZn (LPSO)相,且随着 Zn 含量增加,LPSO 相的数量不断增加。合金的抗拉强度、显微硬度(HV)和伸长率均随着 Zn 含量的增加先提高后降低,在 Zn 含量为 1.2% 时,分别为 191.67 MPa、92.53 和 7.7%,对比未添加 Zn 时,分别提高了 20.6%、14.2% 和 102.6%。

关键词 WE43 镁合金;Zn 合金化;凝固组织;力学性能
中图分类号 TG146.22;TG244.3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Zn on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of WE43 Magnesium Alloy

Liu Wuping, Chen Leping, Zhou Quan, Yuan Yuanping, Liu Yaoxi

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of 0~1.6% Zn content on the solidification microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy were investigated by means of SEM, XRD, EDS and universal tensile testing machine. The results show that with the increase of Zn content, the grain size of the alloy is decreased firstly and then increased, and reaches the minimum value of 52.8 μm with the Zn content of 1.2%, which is decreased by 17.8% compared with that of ones without Zn. The addition of Zn can result in the formation of Mg_{12}YZn (LPSO) phase, and the amount of LPSO is increased with the increase of Zn content. The tensile strength, elongation and microhardness of the alloy are firstly increased and then decreased with the increase of Zn content, and reach the peak values of 191.67 MPa, 92.53 HV and 7.7%, respectively, with the Zn content of 1.2%, which is increased by 20.6%, 14.2% and 102.6%, respectively, compared with those of ones without Zn.

Key Words: WE43 Magnesium Alloy, Zn Alloying, Solidification Structure, Mechanical Properties

航空航天领域的飞速发展对轻量化的需求越来越迫切,而镁合金具有密度小、比刚度和比强度高、铸造性能好等特点^[1-3],因此在航空航天领域有着广泛的应用。稀土镁合金能够很好地改善常规镁合金强度低、塑性差等问题,如 WE43 合金,具有较好的高温力学性能,是典型轻质耐热镁合金之一^[4]。但 WE43 合金铸态组织较为粗大,其性能已无法满足产品日益提高的需求。因此,找到一种有效的强化方法来改善 WE43 合金的组织以提升其力学性能十分必要。细晶强化是一种常用

的强化方法,目前镁合金常用的晶粒细化方法主要有合金化法、机械搅拌法、外加物理场等,其中合金化法具有操作简单、成本低、强化效果显著等特点,得到广泛应用^[5]。添加 Zn 可以降低合金的堆垛层错能,阻碍位错的滑移,从而提升合金的力学性能。此外,Zn 加入到 Mg-RE 合金中会形成长周期堆垛有序结构(Long Period Stacking Ordered, LPSO)相^[6-9],对合金的力学性能有益,能同时提高强度、塑性及弹性模量^[10-12]。史浩鹏等^[13]研究发现,铸态 $\text{Mg-10Gd-3Sm-xZn-0.5Zr}$ 合金

收稿日期:2023-02-12;修改稿收到日期:2023-04-12

基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(20212BBE53018);南昌航空大学研究生创新专项资金资助项目(YC2022-20)

第一作者简介:刘武平,男,2000 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1697048098@qq.com

通信作者:陈乐平,男,1964 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com

引用格式:刘武平,陈乐平,周全,等. Zn 对 WE43 镁合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 094-1 098.

LIU W P, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of Zn on solidification microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 094-1 098.

[22] 李建存,刘忠侠,陈亚东,等. $\text{Cu}_x\text{Cr}_2\text{Fe}_2\text{Ni}_3\text{Mn}_2\text{Nb}_{0.4}\text{Mo}_{0.2}$ 高熵合金的组织 and 耐蚀性能[J]. 特种铸造及有色合金,2018,38(6):666-669.

在室温下的力学性能会随着 Zn 含量的增加呈先升高后下降的趋势。ZHEN R 等^[14]研究发现, Mg-6Gd-4Y-1Zn 合金采用 T6 态处理之后, 其抗拉强度和伸长率会得到提高, 屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 309 MPa、438 MPa 和 6.8%。袁淑等^[15]研究发现, 添加 Zn 后, Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 合金的室温力学性能明显提高; 当 Zn 含量为 0.5% 时, 合金的综合力学性能达到最优, 屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 160 MPa、197 MPa 和 4.37%。杨平旺^[16]研究发现, Mg-*x*Zn-2.8Nd-0.6Zr-0.6Cd 合金中, 随着 Zn 含量增加, 屈服强度呈上升趋势, 但是当 Zn 含量从 3.85% 增加到 5.20% 时, 屈服强度却略有降低。

综上所述, Zn 合金化是一种强化镁合金的有效方式, 并且具有操作简单、成本低的优点。目前对于 Zn 合金化改善 WE43 合金凝固组织以提升其力学性能的相关研究报道较少。基于此, 本研究考察添加不同 Zn 含量对 WE43 镁合金凝固组织和力学性能的影响, 为该合金的进一步应用提供参考。

1 试验材料和方法

试验所用镁合金试样的化学成分为 Mg-4Y-2.5Nd-0.5Gd-*x*Zn-0.5Zr (*x* = 0、0.4、0.8、1.2, 质量分数, %)。采用质量分数为 99.9% 的工业级高纯度 Mg、Zn 锭, 以及 Mg-30Y、Mg-30Nd、Mg-30Gd、Mg-30Zr 中间合金制备 WE43-*x*Zn 合金。

首先使用坩埚电阻炉对合金原材料进行加热熔炼, 在熔炼和浇注的全过程中通入体积分数为 99.5% 的 CO₂ 和 0.5% 的 SF₆ 混合气体对熔体进行保护。待合金完全熔化后, 进行精炼。温度降到 720 ℃ 后, 将其浇注到预热至 200 ℃ 的石墨铸型中, 待其冷却后将铸件取出。

从铸件中制取金相试样, 采用体积分数为 4% 的硝酸溶液对金相试样进行腐蚀后, 再用 XJP-6A 光学金相显微镜对试样的初生相形貌进行观察, 采用 S-Viewer

软件对合金试样的晶粒尺寸进行测量; 采用 X 射线衍射仪对合金试样的相组成进行定性分析; 采用 SU1510 型钨灯丝扫描电镜对合金试样中的第二相的形貌和分布情况以及拉伸测试后试样的断口形貌进行观察; 采用 HV-1000SPTA 型维氏硬度计对合金试样进行硬度测量, 其中载荷为 49 N, 保持 10 s; 采用 WH-5000 微机控制电子万能试验机来测试合金试样的拉伸力学性能, 拉伸速率为 1 mm/min; 按照 GB6397-86 制备拉伸试样, 见图 1。

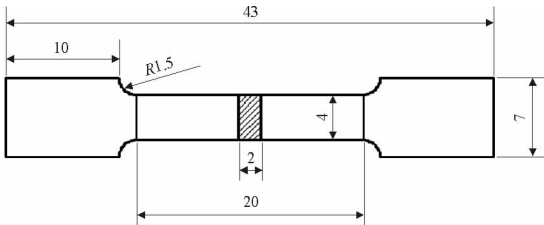


图 1 拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 和图 3 分别为不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌和晶粒尺寸。从图 2 可以看出, Zn 含量在 0~1.6% 内, 随着其含量增加, 合金的初生相形貌未发生明显改变, 均为等轴晶。从图 3 可以看出, 合金的平均晶粒尺寸随着 Zn 含量的增加先减小后增大, 在 Zn 含量为 1.2% 时达到最小值, 为 52.8 μm, 相比 Zn 含量为 0 时的 64.3 μm 减小了 17.9%。

图 4 为不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的 XRD 图谱。可以看到, 未加入 Zn 处理时, 合金组织的相组成主要为 α-Mg 基体、Mg₄₁Nd₅、Mg₁₂Nd 和 Mg₂₄Y₅ 等; 加入 Zn 后, 合金组织中生成了新相 Mg₁₂YZn(LPSO) 相, 且随着 Zn 含量增加, LPSO 相的衍射峰有所增强。

图 5 为不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的 SEM 形貌。可以看到, 合金中的第二相主要沿晶界分布。在

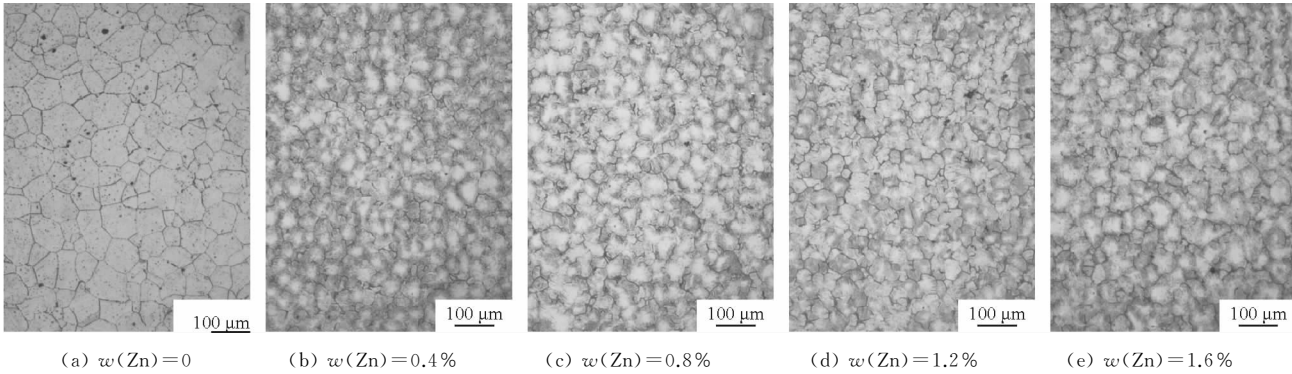


图 2 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌

Fig.2 Primary phase morphologies in WE43 magnesium alloys with different Zn contents

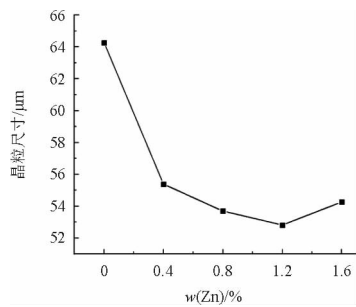


图 3 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的晶粒尺寸
Fig.3 Grain sizes of WE43 magnesium alloys with different Zn contents

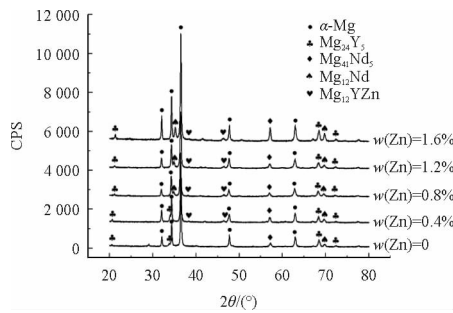


图 4 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of WE43 magnesium alloys with different Zn contents

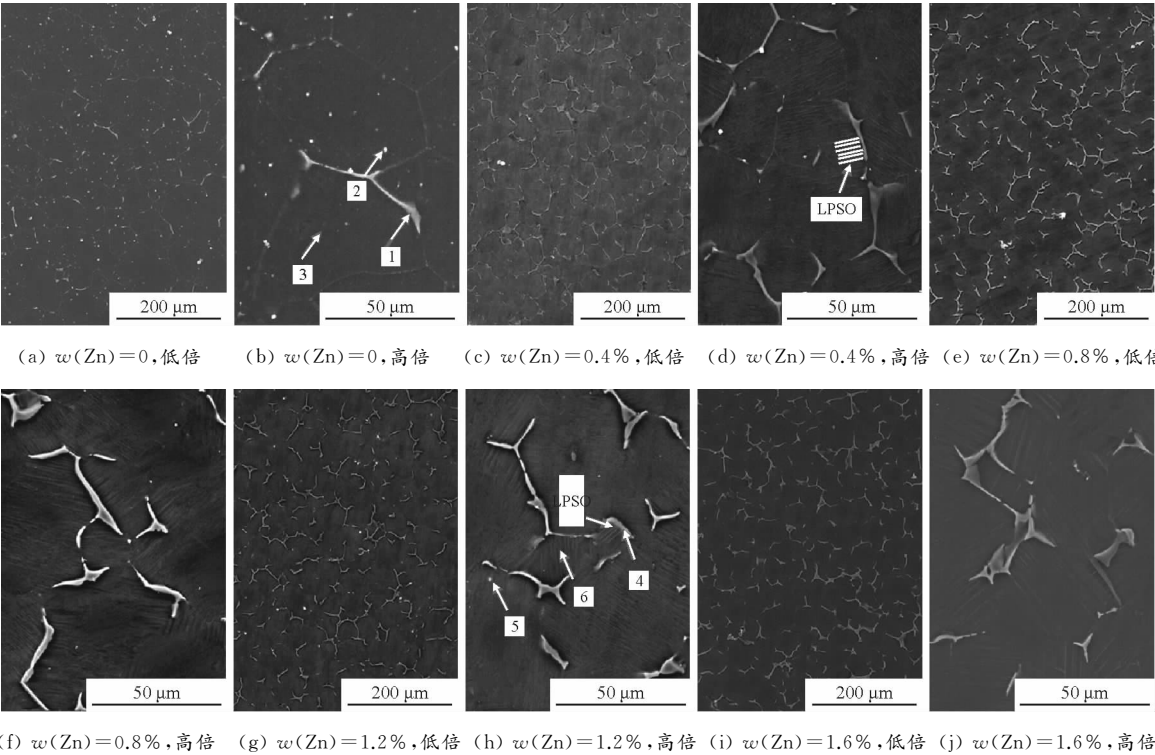


图 5 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的 SEM 图

Fig.5 SEM images of WE43 magnesium alloys with different Zn contents

0~0.4%内,随着 Zn 含量增加,合金中第二相的数量明显增多,且第二相分布由块状、条状向断续网状转变;在 0.8%~1.6% 范围内,随着 Zn 含量继续增加,晶界处的第二相数量变化不大,但断续网状第二相有逐渐破碎的趋势;而 Zn 含量为 1.6% 时,晶界处的第二相明显粗化。

为确定合金第二相的化学成分,对图 5 中的各点进行 EDS 点扫描的元素分析,结果见表 1。结合 XRD 分析结果,条状、断续网状第二相可能为 $Mg_{41}Nd_5$ 相、 $Mg_{24}Y_5$ 相的混合共晶相;点 4 处的混合共晶相中还存在 LPSO 相。块状第二相可能为 $Mg_{24}(Y,Gd)_5$ 相、 $Mg_{12}Nd$ 相,块状第二相中还有 $\alpha-Zr$ 相。从图 5h 中可以看到,点 6 处的共晶混合相的边缘部位存在一些延伸向晶粒内部的层片状组织,结合 XRD 和 EDS 分析结果

可推断,这种层片状组织为 LPSO 相,且随着 Zn 含量增加,这种层片状组织由边缘逐渐向晶粒内部延伸的趋势更明显,即层片状组织的数量增加。

表 1 图 5 中各点的 EDS 分析结果

Tab.1 EDS analysis results of each point in Fig.5 %

位置	x_B					
	Mg	Y	Nd	Gd	Zr	Zn
1	88.67	2.51	6.76	0.41	1.65	—
2	76.56	16.27	1.21	0.48	5.48	—
3	97.42	1.00	0.51	0.15	0.92	—
4	85.28	5.06	5.04	0.51	0.37	3.74
5	91.02	—	0.11	—	8.24	0.63
6	97.46	1.39	0.38	0.09	0.34	0.34

2.2 力学性能

图 6 为不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的力学性能。可以看出,合金的抗拉强度和伸长率都随着 Zn 含量的

增加先提高后降低。在 Zn 含量为 1.2% 时,合金的抗拉强度和伸长率达到峰值,分别为 191.67 MPa 和 7.7%,比未添加 Zn 时的分别提高了 20.6% 和 102.6%。

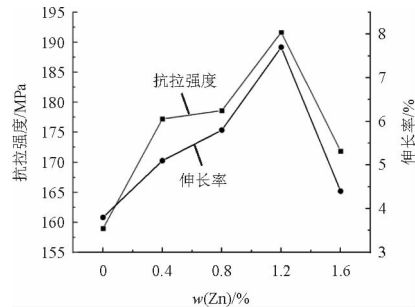


图 6 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的力学性能
Fig.6 Mechanical properties of WE43 magnesium alloys with different Zn contents

图 7 为不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的显微硬度。可以看到,随着 Zn 含量增加,合金的显微硬度也先增大后减小,在 Zn 含量为 1.2% 时达到峰值,其规律与强度一致。当 Zn 含量为 1.2% 时,合金的显微硬度(HV)为 92.53,比未添加 Zn 时的提升了 14.2%。

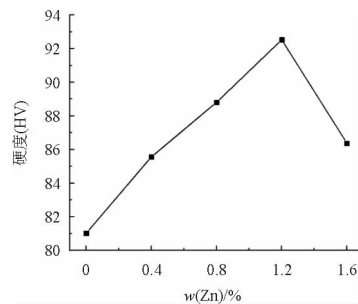
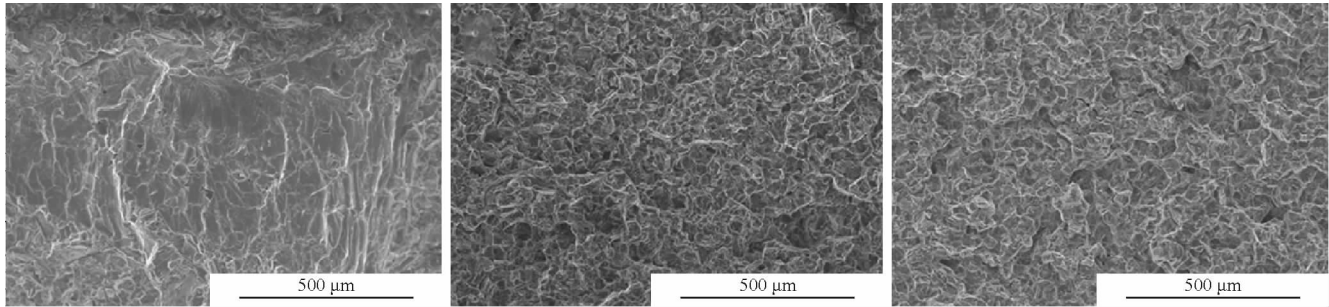


图 7 不同 Zn 含量下 WE43 镁合金的硬度
Fig.7 Hardness of WE43 magnesium alloys with different Zn contents

图 8 为典型 Zn 含量下 WE43 镁合金的拉伸断口形貌。可以看到,当未添加 Zn 时,合金的断口存在大量的解理台阶和解理面,以及少量的撕裂棱,合金断裂方式为脆性断裂。当 Zn 含量为 1.2% 时,合金的断口出现了大量的韧窝,解理面变小,撕裂棱显著增多且呈各向异性,断裂方式变为混合断裂;Zn 含量为 1.6% 时,合金的韧窝数量减少,解理面面积增大,河流状撕裂棱减少,断裂方式为偏脆性断裂的准解理断裂。



(a) $w(\text{Zn})=0$ (b) $w(\text{Zn})=1.2\%$ (c) $w(\text{Zn})=1.6\%$

图 8 典型 Zn 含量下 WE43 镁合金的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies of WE43 magnesium alloys with typical Zn content

2.3 分析与讨论

2.3.1 Zn 对 WE43 镁合金凝固组织的影响

合金的凝固组织发生上述变化主要是 Zn 的加入使得合金的晶粒尺寸及第二相发生变化导致的。Zn 的加入使得 Y、Nd、Gd 等稀土元素在 Mg 中的固溶度下降且在凝固界面前沿发生富集,从而增大了合金的过冷度^[17],致使晶粒发生细化。此外,由于 Y 原子与 Zn 原子的结合能力远大于 Y 原子与 Mg 原子,故在晶界附近富集的 Y 与 Zn 更易结合,从而形成 LPSO 相,随后在晶界附近层错的诱导下 LPSO 相开始逐渐由晶界向晶粒内部生长;当 LPSO 相形成时,晶界处富集 Y 含量下降,使得合金的过冷度下降,晶粒细化受到抑制。同时由于 Y 与 Zn 大量结合,使得 Mg_{24}Y_5 相的含量下降。

在 0~0.4% 内,Zn 的加入会使得合金的过冷度增加,从而使晶粒发生细化,但此时由于 Zn 含量较低,形

成 LPSO 相的数量较少,凝固界面前沿富集的 Y 消耗较低,对合金的过冷度影响较小,并且合金中的第二相主要仍为 Mg_{24}Y_5 相,故与未加入 Zn 相比,合金的晶粒尺寸明显减小,第二相数量也明显增多。在 0.8%~1.2% 内,随着 Zn 含量增加,合金的过冷度会进一步增大,但此时凝固界面前沿富集的 Y 被大量消耗形成 LPSO 相,合金的过冷度下降较大,合金的晶粒细化和 Mg_{24}Y_5 相的形成均受到较大的抑制作用,故在此范围内,合金的晶粒尺寸及第二相数量均无明显变化。当 Zn 含量增大到 1.6% 时,合金中形成大量的 LPSO 相,富集的 Y 被消耗而使得合金过冷度进一步下降,合金的晶粒细化抑制效果增强,故合金晶粒尺寸有所粗化。另外,Zn 含量的继续增加使 LPSO 相也更加粗化,导致晶界处的第二相也明显粗化。

2.3.2 Zn 对 WE43 镁合金力学性能的影响

显微组织发生变化使得合金的力学性能发生变化。

Zn 的加入使得合金晶粒发生细化,由细晶强化可知,晶粒尺寸越小,晶界数量越多,变形也会分散在更多晶粒中进行,从而使得合金的强度和塑性均得到提升。此外,由于合金中形成了 LPSO 相,其强度和硬度远高于 α -Mg 基体^[18],且 LPSO 相主要分布在晶界处,随着塑性变形过程进行,晶界滑动受到 LPSO 相的钉扎作用,使得裂纹倾向下降,合金的塑性提高。

在 0~0.4% 内,Zn 的加入会使得合金的晶粒较未加入 Zn 时发生明显细化,同时促使合金形成 LPSO 相,在细晶强化和 LPSO 相的共同强化作用下,合金的强度、硬度和塑性均不断增大;在 0.8%~1.2% 内,随着 Zn 含量进一步增加,合金的晶粒细化不明显,但此时 LPSO 相的数量不断增加,在 LPSO 相的作用下,在此范围内合金的强度、硬度和塑性仍呈不断增大的趋势。当 Zn 含量增大到 1.6% 时,虽然 LPSO 相的数量有所增加,但其强化效果弱于合金的晶粒粗化和第二相的粗化导致的性能下降,故在此范围内合金的强度、硬度和塑性有所降低。

3 结 论

(1)0.4%~1.6% 的 Zn 的加入能有效改善 WE43 镁合金的凝固组织并提高其力学性能。

(2)WE43 镁合金的晶粒尺寸会随着 Zn 含量的增加先减小后增大,在 Zn 含量为 1.2% 达到最小值,为 52.8 μm ,相比未添加 Zn 时的 64.3 μm 减小了 17.8%。

(3)Zn 的加入会促进 WE43 镁合金形成长周期堆垛有序结构相 Mg_{12}YZn (LPSO)相,并且随着 Zn 含量增加, Mg_{12}YZn (LPSO)相的体积分数逐渐增大。

(4)WE43 镁合金的抗拉强度、硬度(HV)和伸长率都随着 Zn 含量的增加先提高后降低,在 Zn 含量为 1.2% 时达到峰值,分别为 191.67 MPa、92.53 和 7.7%,对比未添加 Zn 时的分别提高了 20.6%、14.2% 和 102.6%。

参 考 文 献

- [1] LIU N Y, ZHANG Z Y, PENG L M, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Gd-Sm-Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A627: 223-229.
- [2] LI B, TENG B G, CHEN G X. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy during equal channel angular pressing[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A744: 396-405.
- [3] 朱嘉楠,李志清,陈洪美,等. Mg-Gd-Y-Zn-Zr 稀土镁合金的组织性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 571-574.
- [4] 张好好. 铸造 WE43-Zn 镁合金微观组织与力学性能研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018.
- [5] 张迁,李全安,陈晓亚. Mg-Gd-Nd 系合金组织和力学性能的研究进展[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(2): 206-217.
- [6] BALASUBRAMANI N, PILLAI U, PAI B C. Effect of Zn concentration on the microstructure and phase formation of Mg-5Gd alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460(1-2): 6-10.
- [7] YAMASAKI M, ANAN T, YOSHIMOTO s, et al. Mechanical properties of warm-extruded Mg-Zn-Gd alloy with coherent 14H long periodic stacking ordered structure precipitate[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(7): 799-803.
- [8] NIE J F, GAO X, ZHU S M. Enhanced age hardening response and creep resistance of Mg-Gd alloys containing Zn[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(9): 1 049-1 053.
- [9] HONMA T, OHKUBO T, KAMADO S, et al. Effect of Zn additions on the age-hardening of Mg-2.0Gd-1.2Y-0.2Zr alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(12): 4 137-4 150.
- [10] LI Y X, ZHU G Z, QIU D, et al. The intrinsic effect of long period stacking ordered phases on mechanical properties in Mg-RE based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 660: 252-257.
- [11] XU Y, XU D, SHAO X, et al. Guinier-preston zone, quasicrystal and long-period stacking ordered structure in Mg-based alloys, a review[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2013, 26(3): 217-231.
- [12] TANE M, NAGAI Y, KIMIZUKA H, et al. Elastic properties of an Mg-Zn-Y alloy single crystal with a long-period stacking-ordered structure[J]. Acta Materialia, 2013, 61(17): 6 338-6 351.
- [13] 史浩鹏,李全安,陈晓亚,等. Zn 对铸态 Mg-10Gd-3Sm-0.5Zr 合金组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(4): 34-39.
- [14] ZHEN R, SUN Y, SHEN X W. Effect of Zn content on the microstructure and mechanical properties of the extruded Mg-6Gd-4Y alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(10): 2 957-2 963.
- [15] 袁淑,张奇,李林峰,等. Zn 对 Mg-10Gd-2Y-0.5Zr 镁合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 163-167.
- [16] 杨平旺. Zn 对 Mg-xZn-2.8Nd-0.6Zr-0.6Cd 合金拉伸力学性能及抗蚀性能的影响[D].长沙:中南大学, 2012.
- [17] 田政. 组分优化对 WE43 镁合金显微组织与力学性能的影响[D]. 长春:吉林大学, 2020.
- [18] 刘明明,李全安,陈晓亚,等. 热处理对 Mg-10Y-1Zn-0.5Zr 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 34-41.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com