

Zn 和 Sr 复合处理对 WE43 镁合金组织及性能影响

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 镁合金为对象,采用 OM、SEM、XRD、EDS 及万能拉伸试验机等手段,研究了 Zn 添加量为 1.2% 时和在此基础上添加 0~0.25% 的 Sr 对合金的凝固组织及力学性能的影响。结果表明,经加入 Zn、Sr 处理后,WE43 镁合金的初生相形貌无明显变化,仍为等轴晶。单一添加 1.2% 的 Zn 和 Zn、Sr 复合处理均能明显地细化晶粒;当 Zn 含量为 1.2%,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,合金的晶粒尺寸先减小后增大,在 Sr 含量为 0.15% 时最低,为 37.3 μm ,相较于基体和单一添加 1.2% 的 Zn 时,分别细化了 41.3% 和 29.4%。经单一添加 Zn 和 Zn、Sr 复合处理后,合金中会产生新相 Mg_{12}YZn (LPSO)相,且 Zn 含量为 1.2%,当 Sr 含量从 0 增加到 0.15% 时,合金中的衍射主峰强度逐渐增强。单一添加 1.2% 的 Zn 和 Zn、Sr 复合处理均能明显提高合金的强度;当 Zn 含量为 1.2% 时,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,合金的抗拉强度先增大后减小,在 Sr 含量为 0.15% 时,达到最高 204.05 MPa,相较于基体和单一添加 1.2% 的 Zn 时,分别提高了 26.8% 和 6.5%,但其伸长率有所降低。

关键词 WE43 镁合金;复合处理;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.011.021 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Zn and Sr Compound Treatment on Microstructure and 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%~0.25% Sr on the solidification structure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy were investigated with the 1.2% content of Zn by OM, SEM, XRD, EDS and universal tensile testing machine. The results indicate that the morphology of the primary phase in WE43 magnesium alloy keeps equiaxed structure after the addition of Zn and Sr. Single addition of 1.2% Zn and combined treatment of Zn and Sr can obviously refine the grain. When the Zn content is 1.2%, the grain size of alloy is decreased firstly and then increased with the increase of Sr content in the range of 0~0.25%, reaching the minimum value of 37.3 μm with 0.15% Sr, which are decreased by 41.3% and 29.4%, respectively, compared with the matrix and one with 1.2% Zn addition. After single addition of Zn and the combined treatment of Zn and Sr, a new Mg_{12}YZn (LPSO) phase can be formed. When the Sr content is increased from 0 to 0.15%, the diffraction peak intensity in the alloy with 1.2% Zn addition is gradually increased. The strength of the alloy can be improved obviously by adding 1.2% Zn alone or by combining Zn and Sr. When the Zn content is 1.2%, the tensile strength of the alloy is increased firstly and then decreased with the increase of Sr content in the range of 0~0.25%. When the Sr content is 0.15%, tensile strength reaches the maximum of 204.05 MPa, which is increased by 26.8% and 6.5%, respectively, compared with the matrix and the one with single addition of 1.2% Zn, while the elongation is decreased slightly.

Key Words: WE43 Magnesium Alloy, Compound Treatment, Mechanical Properties

随着航空航天领域的飞速发展,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],因此得到重视。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

收稿日期:2023-06-27;修改稿收到日期:2023-08-26
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:jnncpl@163.com
引用格式:刘武平,陈乐平,周全,等. Zn 和 Sr 复合处理对 WE43 镁合金组织及性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(11):1 555-1 560.
LIU W P, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of Zn and Sr compound treatment on microstructure and properties of WE43 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(11):1 555-1 560.

合金,具有较好的高温力学性能,是理想的轻质耐热含稀土镁合金之一^[4]。

但 WE43 合金铸态组织较为粗大,其强度和塑性无法满足产品的升级和开发需求。因此,寻找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。细晶强化是目前镁合金常用的晶粒细化方法,主要包括合金化法、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]。袁淑等^[13]研究发现,添加质量分数(下同)为 0.5% 的 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%。Sr 作为一种微合金化元素,可以有效细化镁合金的晶粒尺寸。谢东原等^[14]研究发现,在 0~0.18% 范围内,随着 Sr 添加量提高,Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸逐渐减小,由 42.5 μm 细化至 21.8 μm ;第二相数量逐渐增多,尺寸逐渐减小,分布逐渐均匀;随着 Sr 含量提高,Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的抗拉强度和伸长率也随着 Sr 含量提高而逐渐增加,分别由 170 MPa、7.2% 提高至 192 MPa、12.9%。崔红卫等^[15]研究发现,铸态 ZWK611 合金中添加微量 Sr (0.08%),晶粒得到明显细化,第二相数量显著增多,合金的抗拉强度和伸长率比未添加 Sr 的合金分别提高了 10.1% 和 21.8%,达到 246.1 MPa 和 14.5%。

综上所述,Zn、Sr 合金化是一种强化镁合金的有效方式,并且操作简单、成本低。但目前对于 Zn 和 Sr 复合处理改善 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,本研究针对 Zn 添加量为 1.2% 时和在此基础上添加 0~0.25% 的 Sr 对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响进行分析,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 WE43-1.2Zn- x Sr 镁合金试样的化学成分为 Mg-4Y-2.5Nd-0.5Gd-0.5Zr-1.2Zn- x Sr ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$, 质量分数,%)。原材料采用质量分数为 99.9% 的工业级高纯度 Mg、Zn 锭,以及 Mg-30Y、Mg-30Nd、Mg-30Gd、Mg-30Zr、Mg-30Sr 中间

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 CO_2 和 0.5% 的 SF_6 混合气体对熔体进行气氛保护。合金完全熔化后进行精炼。待熔体温度降到 720 $^{\circ}\text{C}$ 后,将其浇注到温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 的石墨铸型中,待其冷却后将铸件取出并取样进行凝固组织分析和力学性能测试。

从铸件中截取金相试样,经粗磨抛光后,采用体积分数为 4% 的硝酸水溶液对金相试样进行腐蚀后,用 XJP-6A 光学金相显微镜观察试样的初生相形貌,并采用 S-Viewer 软件对合金试样的晶粒尺寸进行测量;采用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪对合金试样的相组成进行定性分析;采用 SU7510 型钨灯丝扫描电镜对合金试样的第二相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 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,尺寸示意图见图 1。

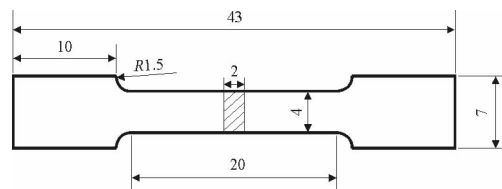


图 1 拉伸试样示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 为不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌。可以看出,当 Zn 添加量为 1.2% 时,WE43 镁合金的初生相形貌未发现明显变化,仍为等轴晶;当 Zn 含量为 1.2%,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 添加量增加,WE43 镁合金的初生相形貌仍无明显变化,均为等轴晶。

图 3 和图 4 分别是 Zn 含量为 1.2%,不同 Sr 添加量下和不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的晶粒尺寸。从图 3 可以看到,随着 Sr 含量增加,合金的晶粒尺寸呈现出先减小后增大的趋势,在 Sr 含量为 0.15% 时,达到最低 37.3 μm 。从图 4 中可以看出,经 Zn、Sr 复合处理后,合金的晶粒尺寸明显更小,相较于 WE43 基体材料和单一添加 1.2% 的 Zn 分别细化了 41.3% 和 29.4%。

图 5 为不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的 XRD 图谱。可以看到,WE43 镁合金的相组成主要为 α -Mg、 Mg_{24}Y_5 、 $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$ 、 Mg_{12}Nd 相;而当 WE43 镁合金经单

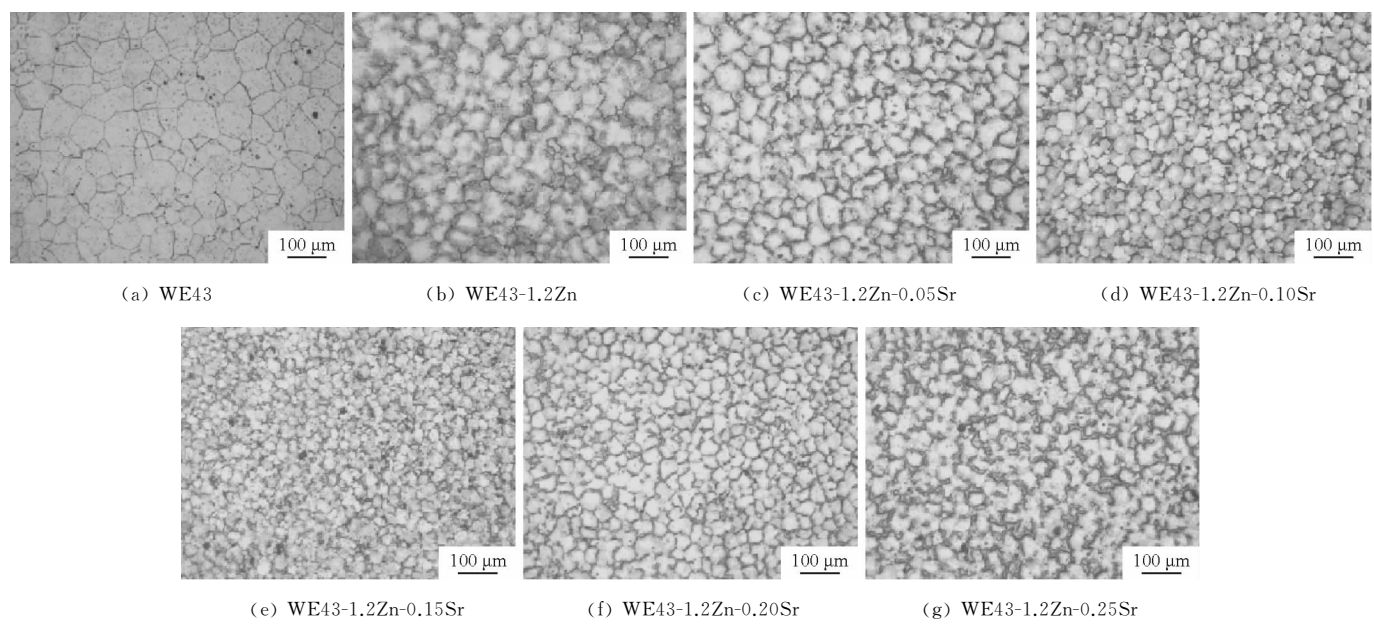


图 2 不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌

Fig.2 Primary phase morphologies of WE43 magnesium alloys with different Zn and Sr contents

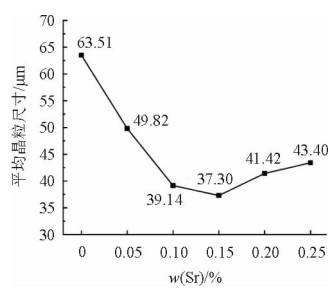


图 3 Zn 含量为 1.2%，不同 Sr 添加量时镁合金的晶粒尺寸

Fig.3 Grain size of WE43 alloy with 1.2% Zn under different Sr addition

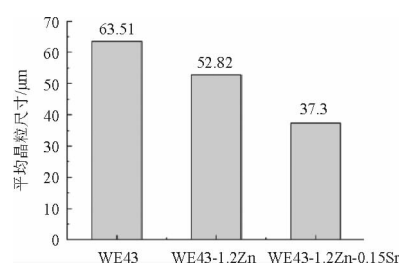


图 4 不同 Zn、Sr 含量处理工艺下 WE43 镁合金的晶粒尺寸

Fig.4 Grain size of WE43 magnesium alloy under different Zn and Sr content

一添加 Zn 处理和 Zn、Sr 复合处理后均产生了 $Mg_{12}YZn$ (LPSO)相;且经 Zn 添加量为 1.2%、Sr 添加量为 0.15% 的 Zn、Sr 复合处理后,合金中的衍射主峰强度较原 WE43 镁合金基体材料和单一添加 1.2% Zn 均明显增强。

图 6 为不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的 SEM 图。可以看到,合金中的第二相主要沿晶界分布。当单一添加 1.2% Zn 处理时,晶界处第二相数量增多,由块

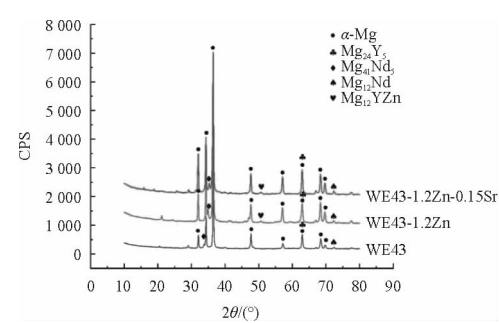


图 5 不同 Zn、Sr 含量 WE43 镁合金的 XRD 图谱

Fig.5 XRD pattern of WE43 magnesium alloy with different Zn and Sr contents

状、条状向断续网状转变,且合金中出现由晶界向晶粒内生长的层片状结构;当 Zn 含量为 1.2% 时,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,晶界处的第二相数量明显增加,其形貌由断续网状向连续网状转变,且第二相逐渐粗化。

为确定合金第二相的化学成分,对图 6 中的各点进行 EDS 元素分析,结果见表 1。结合 XRD 分析结果,图 6 中的条状、断续网状、连续网状第二相分别为 $Mg_{41}Nd_5$ 相、 $Mg_{24}Y_5$ 相的混合共晶相;点 4、点 7 处的混合共晶相中还存在着 $Mg_{12}YZn$ 相。块状第二相为 $Mg_{24}(Y,Gd)_5$ 相、 $Mg_{12}Nd$ 相,块状第二相中还有 α -Zr 相。点 4 和点 8 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 $Mg_{12}YZn$ (LPSO)相。当 Zn 含量为 1.2%,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量的增加,层片状组织数量明显增加。

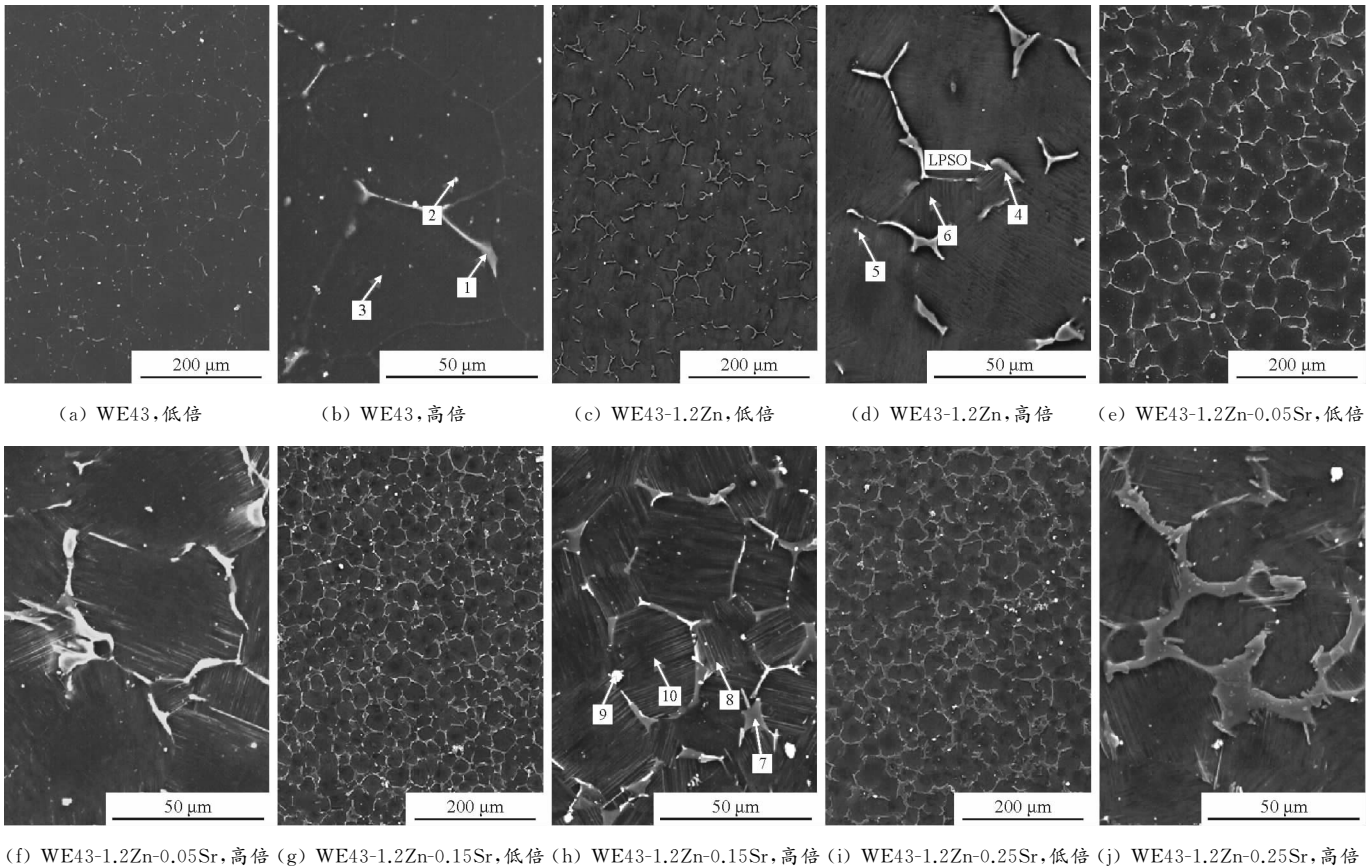


图 6 不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的 SEM 图

Fig.6 SEM images of WE43 magnesium alloy with different Zn and Sr contents

表 1 图 6 中各点的 EDS 分析结果

Tab.1 EDS analysis results of each point in Fig.6 %							
位置	X_B						
	Mg	Y	Nd	Gd	Zr	Zn	Sr
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	-
7	91.48	2.78	2.50	0.31	0.22	1.83	0.87
8	95.63	2.07	0.70	0.22	0.12	1.22	0.04
9	85.93	1.13	0.60	0.06	11.51	0.62	0.15
10	98.20	0.68	0.22	0.04	0.46	0.39	0.01

2.2 力学性能

图 7 和图 8 分别是 Zn 含量为 1.2% 不同 Sr 添加量下和不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的力学性能。从图 7 可以看出,随着 Sr 含量增加,合金抗拉强度呈现出先增大后减小的趋势,在 Sr 含量为 0.15% 时,达到 204.05 MPa,而合金的伸长率则随着 Sr 添加量的增大而逐渐减小。从图 8 中可以看出,经 Zn、Sr 复合处理后,合金的抗拉强度明显提高,相较于 WE43 镁合金基体材料和单一添加 1.2% Zn 时分别提高了 26.8% 和 6.5%,但其伸长率有所降低。

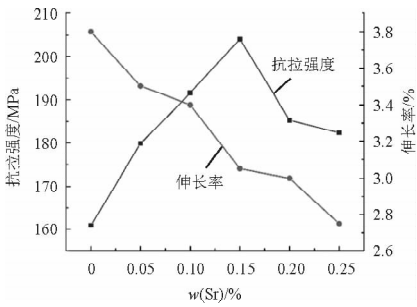


图 7 不同 Sr 添加量下 WE43-1.2Zn 镁合金的力学性能
Fig.7 Mechanical properties of WE43-1.2Zn magnesium alloy with different Sr addition

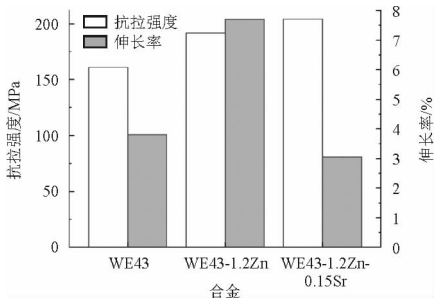


图 8 不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的力学性能
Fig.8 Mechanical properties of WE43 magnesium alloy under different Zn and Sr contents

图 9 为不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的拉伸断口形貌。可以看出,合金基体的断口中存在较多的解理面和解理台阶,且解理面面积较大,撕裂棱数量较少,为脆性断裂;经单一添加 1.2% 的 Zn 处理后,合金断口中

的解理面面积明显变小,撕裂棱数量明显增多,韧窝数量增多,为准解理断裂;经 Zn、Sr 复合处理后,合金断口中解理台阶和解理面面积显著增大,仅存在少数撕裂棱,呈脆性断裂特征。

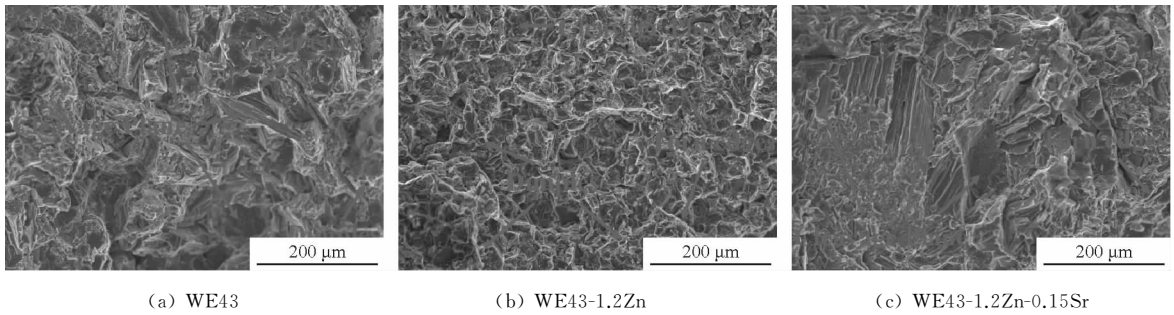


图 9 不同 Zn、Sr 含量下 WE43 镁合金的拉伸断口形貌

Fig.9 Tensile fracture morphologies of WE43 magnesium alloy under different Zn and Sr contents

2.3 分析与讨论

2.3.1 Zn、Sr 复合处理对 WE43 镁合金凝固组织的影响

合金的凝固组织变化主要是 Zn、Sr 的加入使得合金的晶粒尺寸及第二相发生变化所导致。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^[16],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 $Mg_{12}YZn$ (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。此外,Sr 是一种表面活性元素,在 Mg 中的溶解度仅为 0.11%^[17],未溶解的游离态 Sr 会富集在固/液生长界面前沿,从而增大 α -Mg 的堆垛层错能,并且降低合金的液相线温度,使得合金的过冷度增大。根据经典凝固原理,临界晶核半径 r_k 与过冷度 T 之间的关系为^[18]:

$$r_k = \frac{2\sigma}{\Delta G_r} = \frac{2\sigma T_m}{L_m \cdot \Delta T} \quad (1)$$

式中, σ 为晶核与液相间的界面能; ΔG_r 为体积自由能的变化; L_m 为结晶潜热; T_m 为熔点; ΔT 为过冷度。由式 (1) 可知,熔体的过冷度越大,晶核临界半径越小,熔体的形核率就越高,合金的晶粒越细。从晶粒限制生长机制的角度考虑,根据生长限制因子 G_{RF} 理论,溶质元素对晶粒大小的影响关系为^[19]:

$$G_{RF} = \sum_i m_i c_{0,i} (k_i - 1) \quad (2)$$

式中, m_i 为 i 元素的液相线的斜率; $c_{0,i}$ 为 i 元素的初始浓度; k_i 为 i 元素平衡分配系数。Sr 的加入会增大合金的 G_{RF} 值,合金晶粒的长大受到抑制,从而使晶粒细化。但过量的 Sr 会与 Mg、Y、RE 等元素发生反应形成含 Sr 化合物,降低 Sr 的表面活性所引起的晶粒细化作

用,从而导致晶粒粗化^[15]。此外,Sr 较强的表面活性还会降低晶界附近 Mg、Zn 和 Y 等元素的扩散速度^[20],使得 Mg、Zn、Y 原子在晶界处富集,从而更容易结合形成 LPSO 相,富集在晶界处的稀土元素还会导致 $Mg_{24}Y_5$ 等第二相的数量增加。

因此,当加入 1.2% 的 Zn 后,由于 Zn 提高合金的过冷度从而增加形核密度,使得合金的晶粒尺寸减小。当 Zn 含量为 1.2% 时,在 0~0.15% 范围内,随 Sr 添加量提高,Zn 和 Sr 的共同细化作用使得合金的平均晶粒尺寸进一步减小。但在 0.15%~0.25% 范围内,随着 Sr 的添加量继续增加,过量的 Sr 会与 Mg、RE 元素形成 Sr 化合物,减弱 Sr 的细化效果,使得合金的晶粒尺寸逐渐粗化。当 Zn 含量为 1.2% 时,在 0~0.25% 范围内,随 Sr 添加量提高,由于 Sr 较强的表面活性降低了晶界附近 Mg、Zn 和 Y 等元素的扩散速度,富集的 Mg、Zn、Y 等原子会导致 LPSO 相数量增加,晶界处的第二相的数量也增加,并逐渐相连,使得晶界处第二相逐渐粗化。

2.3.2 Zn、Sr 复合处理对 WE43 镁合金力学性能的影响

WE43 合金的力学性能主要受其晶粒尺寸和第二相的影响。合金的晶粒尺寸越小,其力学性能越高。一方面,由于细晶强化,根据 Hall-Petch 公式可知,合金平均晶粒尺寸越小,合金强度就越高;另一方面,合金中细小的第二相能起到很好的钉扎作用,能够有效的阻碍位错运动,也有利于合金力学性能提高。此外,合金中一些增强相的强度高于基体,对合金的强度也有提升作用。但粗大的第二相是合金在变形过程中的裂纹源,容易在变形时产生裂纹并迅速扩散。

Zn 和 Sr 元素的加入可以减小合金的晶粒尺寸,在细晶强化作用下,使得合金的抗拉强度提高。此外,Zn 的加入形成的 $Mg_{12}YZn$ (LPSO) 相,作为一种有效的增

强相,可以阻碍位错运动从而使合金具有更好的强度,故当 Zn 含量为 1.2% 时,在 0~0.15% 范围内,随着 Sr 含量增加,合金的抗拉强度逐渐提高。在 0.15%~0.25% 范围内,随着 Sr 含量进一步增加,由于合金的晶粒尺寸逐渐粗化,合金的抗拉强度下降,而 Zn 和 Sr 复合处理后虽然能使合金晶粒细化,但在晶界处形成的粗大第二相,在合金发生塑性变形过程中,萌生更多的裂纹,从而降低合金的塑性;故当 Zn 含量为 1.2% 时,在 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,合金的伸长率逐渐降低。

3 结 论

(1)经加入 Zn、Sr 处理后,WE43 镁合金的初生相形貌无明显变化,仍为等轴晶。单一添加 1.2% 的 Zn 和 Zn、Sr 复合处理均能明显地细化晶粒。当 Zn 含量为 1.2% 时,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,WE43 镁合金的晶粒尺寸呈先减小后增大的趋势,在 Sr 含量为 0.15% 时,达到最小 37.3 μm ,相较于 WE43 镁合金基体材料和单一添加 1.2% 的 Zn 分别细化了 41.3% 和 29.4%。

(2)经单一添加 Zn 和 Zn、Sr 复合处理后,WE43 镁合金中会产生新相 Mg_{12}YZn (LPSO)相,且当 Zn 含量为 1.2%,Sr 含量从 0% 增加到 0.15% 时,合金中的衍射主峰强度逐渐增强。

(3)单一添加 1.2% 的 Zn 和 Zn、Sr 复合处理均能明显提高合金的强度。当 Zn 含量为 1.2% 时,在 Sr 添加量为 0~0.25% 范围内,随着 Sr 含量增加,合金的抗拉强度呈先增大后减小的趋势,在 Sr 含量为 0.15% 时,达到最高 204.05 MPa,相较于 WE43 镁合金基体材料和单一添加 1.2% 的 Zn,分别提高了 26.8% 和 6.5%,但其伸长率有所降低。

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 14Hlong 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] 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.
- [14] 谢东原,周全,陈舸,等. Sr 对 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(4): 445-449.
- [15] 崔红卫,张甜甜,贾秋荣,等. Sr 添加对 Mg-5.5Zn-1.2Y-0.6Zr 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(11): 1 165-1 170.
- [16] 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.
- [17] 孟波波,李全安,陈晓亚,等. Sr 对镁合金组织及其耐热性的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 42-45.
- [18] 程仁菊,姜山,李权,等. 铈对 AZ31 镁合金晶粒细化作用研究[J]. 功能材料, 2014, 45(5): 5 070-5 073.
- [19] 刘涛. Ca、Sr 对 Mg-8Zn-3.2Al-0.9Si 合金组织及性能的影响[D]. 郑州:郑州大学, 2011.
- [20] 占维,胡鹏鹤,金帆,等. Sr 对 Mg-Zn-Y 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 1 034-1 036.

(编辑:张正贺)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |