

Cu 含量对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响

潘俊霖 陈乐平 周 全 袁源平
(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 及万能拉伸试验机等手段,研究了 0~1.1% (质量分数,下同)的 Cu 含量对合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,随着 Cu 含量增加,合金的晶粒尺寸呈先减小后增大、抗拉强度先增大后减小的趋势,转折点 Cu 含量均为 0.7%;当 Cu 含量为 0.7% 时,合金的晶粒尺寸和抗拉强度分别为 31.46 μm 和 200.17 MPa,相较于 Cu 含量为 0 时的 58.76 μm 和 160.93 MPa,晶粒尺寸减小了 46.46%,抗拉强度提高了 24.38%。Cu 的加入使得合金中产生 LPSO 相,且随着 Cu 含量增加,LPSO 相的数量不断增加,而伸长率则呈逐渐降低的趋势。

关键词 WE43 镁合金;Cu 合金化;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.008 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Cu Content on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of WE43 Magnesium Alloy

Pan Junlin, Chen Leping, Zhou Quan, Yuan Yuanping
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of Cu content in range of 0~1.1% on the solidification structure and mechanical properties of the WE43 magnesium alloy were investigated by SEM, XRD, EDS and universal tensile testing machine. The results indicate that with the increase of Cu content, the grain size of the alloy is decreased firstly and then increased, and the tensile strength is increased at first and then decreased, and the turning point is 0.7%. With the Cu content of 0.7%, the grain size and tensile strength of the alloy reach 31.46 μm and 200.17 MPa, respectively, which is decreased by 46.46% and increased by 24.38% compared with that of ones without Cu content. The formation of LPSO phase can be observed with Cu addition in the alloy, and the number of LPSO is increased with the increase of Cu content, while elongation is gradually decreased.

Key Words: WE43 Magnesium Alloy, Cu Alloying, Solidification Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2023-04-13;**修改稿收到日期:**2023-05-24
基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(20212BBE53018);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2023-5700)
第一作者简介:潘俊霖,男,2000 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1264847169@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:潘俊霖,陈乐平,周全,等. Cu 含量对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 375-1 379.
PAN J L, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of Cu content on solidification microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 375-1 379.

[52] SMITH K N, TOPPER T H, WATSON P. A stress-strain function for the fatigue of metals[J]. Journal of Materials, 1970(4): 767.

[53] CHOI J, CHOI J R, LEE K P, et al. Fatigue life prediction methodology of hot work tool steel dies for high-pressure die casting based on thermal stress analysis[J]. Metals, 2022, 12(10): 1 744.

[54] LU Y, RIPPLINGER K, HUANG X J, et al. A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 444-454.

[55] 王子超. 铝合金压铸模具热循环、应力与疲劳的模拟研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[56] 吴炳尧, 姚毓平. 一体化压铸应谨慎徐图[J]. 铸造工程, 2022, 46(6): 1-5.

[57] 戴愿桥. 基于二叉树的铸造前处理自适应网格划分算法研究及应

用[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.

[58] 李阳东. 复杂铸件变网格技术及其在流动场数值模拟中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.

[59] 张伟, 李忠林, 张子珂等. 基于高性能计算的云原生超大规模压铸模拟技术[J]. 铸造, 2023, 72(4): 451-454.

[60] 王罡, 熊守美, 都志辉, 等. 压铸充型过程模拟并行搜索算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(8): 1 042-1 044, 1 052.

[61] 王罡, 熊守美, 柳百成. 基于 Schwarz 混乱松弛法的压铸充型模拟并行分区算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005(5): 581-584.

[62] HADDAD M, HECHT F, SAYAH T, et al. Parallel computing investigations for the projection method applied to the interface transport scheme of a two-phase flow by the method of characteristics[J]. Numerical Algorithms, 2019, 80(2): 447-467.

(编辑:彭瑾)

镁合金因其具有比强度和比刚度高、密度低等特点,在航天、航空、3C、汽车等工业中拥有广泛的应用前景,其中 WE 系合金(Mg-Y-RE)因其优异的室温力学性能、高温抗蠕变性能和耐腐蚀性能,在航空航天和汽车交通等领域得到广泛应用^[1-7]。

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,其中合金化不但可以有效地提高镁合金的强度,还能在一定程度上改善镁合金的韧性、耐腐蚀性和铸造性。Cu 元素在镁合金中具有优异的强化效果。毛萍莉等^[8]研究发现,当 Cu 的添加量为 1% 时,Mg-4Zn-0.5Ca 合金的平均晶粒尺寸由 93 μm 减小至 75 μm ,其抗拉强度和伸长率分别比未添加 Cu 时提高了 12.8% 和 34.4%。刘莉滋^[9]研究发现,当 Cu 添加量为 0.5% 时,Mg-5Zn-0.6Zr 合金的平均晶粒尺寸由 72.8 μm 减小至 69.5 μm ,其抗拉强度、伸长率分别比未添加 Cu 时提高了 8.8%、17.5%;张丁非等^[10]研究发现,当 Cu 的添加量为 1% 时,AZ61 镁合金的抗拉强度比未添加 Cu 时提高了 5%,但其伸长率由 10.2% 减少至 9.7%。刘立尚^[11]研究发现,当 Cu 的添加量为 0.9% 时,Mg-6Zn-3Al 合金的平均晶粒尺寸由 125 μm 减小至 102 μm ,其抗拉强度和硬度分别比未添加 Cu 时提高了 14.6% 和 23.2%。

综上所述,Cu 元素对镁合金起到了良好的晶粒细化效果和强化效果。基于此,针对目前 WE43 镁合金存在铸态组织较为粗大,强度较低限制了该合金体系应用的问题,本研究通过加入不同含量 Cu,探究其对 WE43 镁合金凝固组织和力学性能的影响,为该合金的进一步开发和应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用 99.96% (质量分数,下同) 的工业纯镁、Mg-30Y、Mg-30Nd、Mg-30Gd、Mg-30Cu 和 Mg-30Zr 中间合金制备 WE43- x Cu($x=0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, \%$) 合金试样。

使用 SC2-5-10 坩埚电阻炉对合金原材料进行熔炼,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 混合气体进行保护。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。

采用体积分数为 3% 的柠檬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,并采用 S-Viewer 软件对试样的晶粒尺寸进行测量;采用 D8ADVANCE-A25 X 射线衍射仪对试样的相组成进行定性分析,采用 SU1510 扫描电镜

对试样的第二相形貌和分布情况及断口形貌进行观察;采用 WH-5000 微机控制电子万能试验机测试试样的拉伸性能,拉伸速率为 1 mm/min;拉伸试样按 GB6397-86 制备,尺寸见图 1。

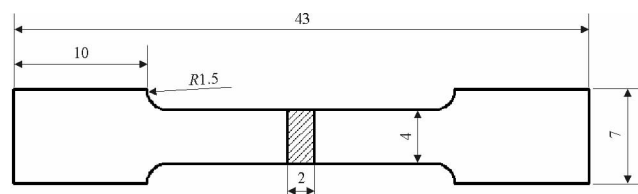


图 1 室温拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 The dimensional diagram of tensile specimen at room temperature

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 和图 3 分别为不同 Cu 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌和晶粒尺寸。可以看出,Cu 含量在 0~1.1% 范围内,随着 Cu 含量增加,合金的初生相形貌未发生明显变化,均为等轴晶。合金的晶粒尺寸随着 Cu 含量的增加呈先减小后增大的趋势,转折点为 0.7%;当 Cu 含量为 0.7% 时,合金的晶粒尺寸为 31.46 μm ,相较于未添加 Cu 时的 58.76 μm ,细化了 46.46%。

图 4 为不同 Cu 含量下 WE43 镁合金的 XRD 图谱。可以看到,未添加 Cu 时,合金主要由 α -Mg、 Mg_{24}Y_5 、 Mg_{12}Nd 相组成;当 Cu 含量在 0.3%~1.1% 范围内,合金的相组成发生了变化,产生了新相 LPSO 和 Mg_2Cu 。图 5 为不同 Cu 含量下 WE43 镁合金的 SEM 图。可以看出,未添加 Cu 时,晶界第二相数量较少,且呈条状结构;当 Cu 含量为 0.3% 和 0.7% 时,晶界第二相数量增加,分布变得均匀,形貌由条状结构转变为断续网状结构;当 Cu 含量为 1.1% 时,晶界第二相数量增加,分布存在偏聚,形貌部分断续网状结构转变为块状结构。

为进一步确定合金第二相的化学成分,对图 5 中典型第二相进行 EDS 点扫描分析,结果见表 1。结合 XRD 和 EDS 结果,可知点 1 处的 Y 含量较高而 Nd 含量较低,判定其是以 Mg_{24}Y_5 为主要成分的混合共晶相;点 2 处 Y 和 Nd 含量较高,判定其是 Mg_{12}Nd 和 Mg_{24}Y_5 相的混合共晶相;点 3、5 和 6 处的混合共晶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 14H-LPSO 相;结合 JIANG M 等^[12]的研究可以推断出点 4 处的混合共晶相中还存在着 14H-LPSO 和 Mg_2Cu 相。

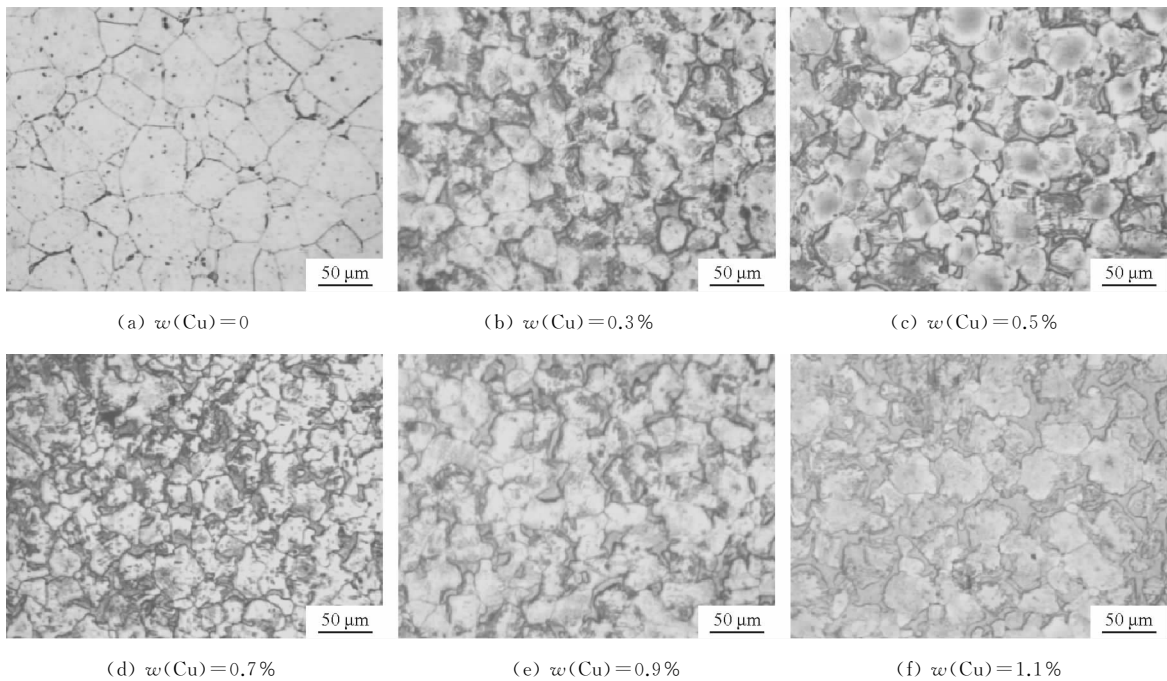


图 2 不同 Cu 含量下 WE43 镁合金的初生相形貌

Fig.2 Primary phase morphologies of WE43 magnesium alloy with different Cu contents

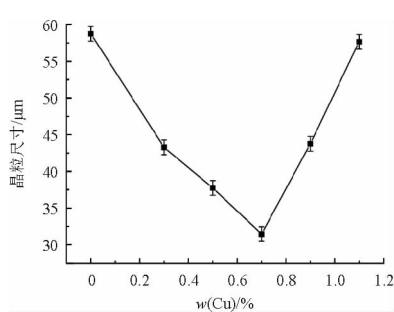


图 3 不同 Cu 添加量下 WE43 镁合金的晶粒尺寸

Fig.3 Grain size of WE43 alloy with different Cu contents

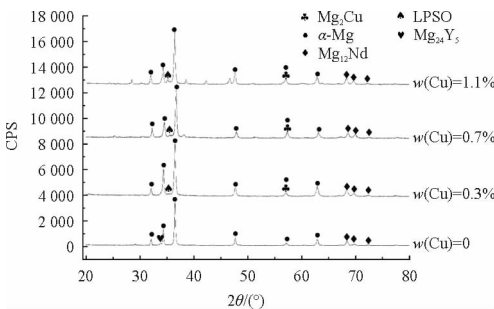


图 4 不同 Cu 含量下镁合金组织的 XRD 图

Fig.4 XRD patterns of magnesium alloys with different Cu contents

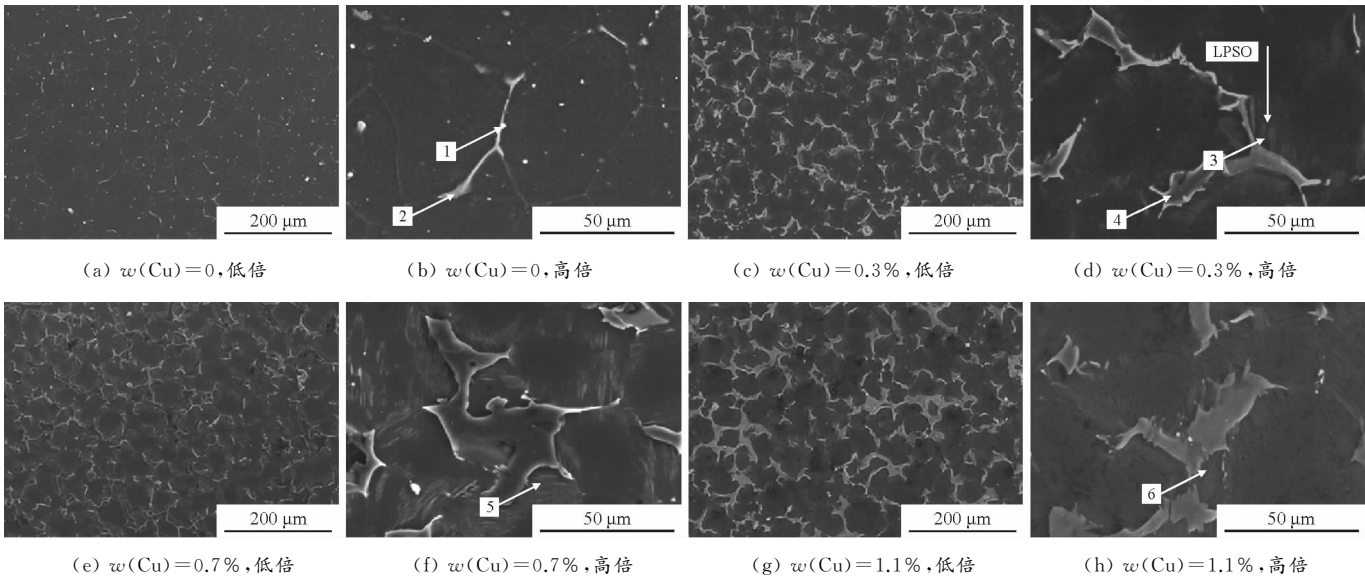


图 5 不同 Cu 含量下镁合金组织的 SEM 图

Fig.5 SEM images of magnesium alloy with different Cu contents

表 1 图 5 中各点的 EDS 分析结果

Tab.1 EDS analysis results of each point in Fig.5 %						
位置点	x_B					
	Y	Nd	Gd	Zr	Cu	Mg
1	22.51	2.77	0.77	3.14	-	59.66
2	2.41	6.50	0.39	1.59	-	85.27
3	5.57	7.63	0.63	0.13	0.26	85.78
4	2.69	3.26	0.29	-	5.29	88.47
5	2.45	2.65	0.45	-	3.53	91.56
6	1.32	0.29	0.09	0.11	0.34	97.86

2.2 力学性能

图 6 为不同 Cu 添加量下 WE43 镁合金的力学性能。可以看出,合金的抗拉强度随着 Cu 含量的增加呈先增大后减小的趋势;当 Cu 含量为 0.7% 时,合金的抗拉强度达到 200.17 MPa,相较于未添加 Cu 时的 160.93 MPa,提高了 24.38%;合金的伸长率则随着 Cu 含量的增加逐渐减小。

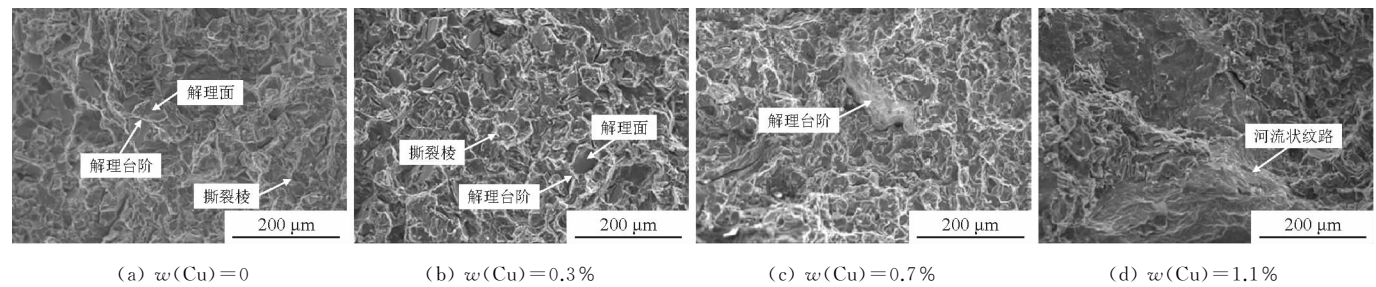


图 7 不同 Cu 含量下 WE43 合金的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of WE43 alloy with different Cu contents

金断口的解理台阶面积增大;当 Cu 含量为 1.1% 时,合金断口存在大量解理台阶和解理面,且存在少量河流状纹路。

3 试验分析与讨论

3.1 Cu 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原因有两个方面。一方面,Cu 的加入可以降低合金体系的过饱和度,促进合金中其他元素的析出^[9],且 Cu 也改变了析出反应动力学,使得形核动力增加^[13],最终使析出物增多;另一方面,在晶界处形成的具有高熔点的含 Cu 金属间化合物使固液界面前沿的成分过冷区增大^[9],阻碍晶粒长大,但过量的 Cu 加入,形成的第二相发生偏聚,不利于组织细化。

合金的第二相数量、分布、形貌发生上述变化是由于 Mg-Y-Cu 具有非常强的非晶形成能力,在 442 ℃ 时会发生准包晶反应: $L + \alpha\text{-Mg} \rightarrow \text{Mg}_{91}\text{Cu}_4\text{Y}_5$ (14H-LP-SO)+ Mg_2Cu ,14H-LPSO 相是稳定结构。在 Cu 含量低时,生成的 Mg_2Cu 和 14H-LPSO 相数量少,出现的

层片状结构少,合金中第二相分布更均匀,其形貌主要呈断续网状和层片状结构;随着 Cu 含量增加, Mg_2Cu 和 14H-LPSO 相数量增加,层片状结构增加,合金的第二相分布出现部分偏聚,其形貌主要呈断续网状、块状和层片状结构。

当 Cu 含量由 0 增加至 0.7% 时,合金中的析出物增多,同时生成的 Mg_2Cu 和 14H-LPSO 相使固液界面前沿的成分过冷区间增大,致使合金晶粒发生明显细化,在 Cu 含量为 0.7% 时,合金的晶粒尺寸最为细小,且合金中第二相分布由于晶粒细化而更加均匀,合金中第二相形貌主要为断续网状和层片状结构;当 Cu 含量由 0.7% 增加至 1.1% 时,由于过量 Cu 的加入,形成的第二相发生偏聚,阻碍了晶粒细化,合金的第二相主要为断续网状、块状和层片状结构。

3.2 Cu 对 WE43 镁合金力学性能的影响

合金的力学性能与显微组织密切相关,其发生上述变化主要来源于两个方面。一方面,Cu 含量的提高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,变形分散在更多晶粒中进行,合金的强度得到提升。此外,Cu 在镁合金中的固溶度低,Cu 的

原子半径与 Mg 接近,二者原子尺寸差在 15%~20% 之间,同时 Cu 与 Mg 的电负性相似,有一定的固溶强化效果^[14],使合金的强度得到提升;另一方面,由于 Cu 的加入,所生成的 14H-LPSO 相是稳定存在的 LPSO 相,其存在能够增加基面滑移的临界剪切力^[15],阻碍位错运动。超过临界应力时能够使位错堆积, α -Mg 基体和 LPSO 相之间界面共格,结合紧密排列的层片状 LP-SO 使得合金的强度得到提高。但是由于 Cu 含量较高,形成的 Mg_2Cu 和 LPSO 相割裂合金基体,损害合金的力学性能,在抵消了细晶强化作用的同时,又使得固溶强化效果和 LPSO 相增强效果减弱,从而使得合金的力学性能降低。

当 Cu 含量由 0 增加至 0.7% 时,由于 Cu 含量增加,形成的固溶强化效果佳,且生成了 LPSO 相,同时晶粒发生明显细化,合金的强度得到提高,但形成的第二相割裂合金基体,使得合金的塑性下降;当 Cu 含量由 0.7% 增加至 1.1% 时,由于过量 Cu 的加入,使得合金的第二相尺寸增大,当晶界第二相尺寸大于 1 μm 时,合成分裂纹萌生、扩展的位置,使得合金的抗拉强度下降,其塑性进一步降低。

4 结 论

(1)WE43 镁合金的晶粒尺寸会随着 Cu 含量的增加先减小后增大,当 Cu 含量为 0.7% 时,晶粒尺寸由未添加 Cu 时的 58.76 μm 减小至 31.46 μm ,细化了 46.46%。

(2)适宜的 Cu 含量可有效改善 WE43 镁合金的凝固组织并提高其力学性能,同时促进 LPSO 相形成,随着 Cu 含量增加,LPSO 相的体积分数逐渐增大。

(3)WE43 镁合金的抗拉强度随着 Cu 含量的增加先增加后减小,在 Cu 含量为 0.7% 时达到最大值,为 200.17 MPa,相比于未添加 Cu 时提高了 24.38%;合金的伸长率随着 Cu 含量的增加呈逐渐减小趋势。

参 考 文 献

- [1] 王其龙,吴国华,侯正全,等.Mg-Gd-Y-Zr 合金的高温时效行为研究[J].特种铸造及有色合金,2009,29(11):1 053-1 057.
- [2] 肖旅,侯正全,吴国华,等.高强韧稀土镁合金大型复杂铸件制造技术研究现状及展望[J].特种铸造及有色合金,2021,41(7):793-801.
- [3] WENDT J, KAINER K U, ARRUEBARENA G, et al. Magnesium Technology[M]. San Francisco: TMS, 2009.
- [4] ABE E, KAWAMURA Y. Long-period ordered structure in a high-strength Nano crystalline Mg-1Zn-2Y alloy studied by atomic-resolution Z-contrast STEM[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 3 845-3 857.
- [5] MATSUURA M, KONNO K, YOSHIDA M, et al. Precipitates

with peculiar morphology consisting of a disk shaped amorphous core sandwiched between H typed long period stacking order crystals in a melt quenched $Mg_{98}Cu_1Y_1$ alloy[J]. Materials Transactions, 2006, 47(4): 1 264-1 267.

- [6] BAMBERGER M. Structural refinement of cast magnesium alloys[J]. Mater. Sa. Techn., 2010, 17(1): 15-22.
- [7] KAWAMURA Y, KASAHARA T, IZUMI S, et al. Elevated temperature $Mg_{97}Y_2Cu_1$ alloy with long period ordered structure[J]. Scripta Materialia, 2016, 55(5): 453-456.
- [8] 毛萍莉,杨金龙,刘正,等. Cu 对铸造 Mg-4Zn-0.5Ca 镁合金的组织及性能影响[J].材料热处理学报,2016,37(7):95-99.
- [9] 刘莉滋.合金化对 Mg-Zn-Zr 镁合金电磁屏蔽性能和力学性能的影响[D].重庆:重庆大学,2015.
- [10] 张丁非,段作衡,张红菊,等. Cu 含量对 AZ61 镁合金显微组织和力学性能的影响[J].重庆大学学报,2013,36(7):79-84.
- [11] 刘立尚. Cu 对 Mg-6Zn-3Al 镁合金组织和性能的影响[D].重庆:重庆大学,2019.
- [12] JIANG M, SU X, LI H, et al. The phase equilibria and thermal stability of the long-period stacking ordered phase in the Mg-Cu-Y system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 593: 141-147.
- [13] LIAO Y G, HAN X Q, ZENG M X, et al. Influence of Cu on microstructure and tensile properties of 7xxx series aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2015, 66: 581-586.
- [14] 伍华怡. Cu 元素对 AZ80 镁合金组织和性能的影响[D].重庆:重庆大学,2019.
- [15] 王风雪. Cu, Co, Ni 替换 Zn 对含 LPSO 相的 Mg-2Y-2Zn 合金组织与力学性能的影响[D].重庆:重庆大学,2021.

(编辑:张正贺)

多家新能源车企 9 月销量创历史新高

近日,多家新能源车企公布了 9 月交付以及销售情况,且销量创历史新高。其中,比亚迪 9 月新能源汽车销量 28.75 万辆,同比增长 42.8%;今年累计销量 207.96 万辆,同比增长 76.23%。广汽埃安 9 月销量达到 5.16 万辆,同比增长 72%,再创月销量新高;1~9 月埃安累计销量超过 35 万辆,同比增长 93%。长安汽车 9 月新能源汽车销量为 5.10 万辆,环比增长 27.09%。

9 月,理想汽车交付新车 3.61 万辆,同比增长 212.7%,创单月交付新高;1~9 月理想汽车累计交付量达到了 24.42 万辆。深蓝汽车 9 月销量 1.74 万辆;1~9 月深蓝汽车累计销量为 8.69 万辆。零跑汽车 9 月交付量达到 1.58 万辆,同比增长 43%;1~9 月零跑累计销量为 8.76 万辆。蔚来汽车 9 月交付 1.56 万辆,同比增长 43.8%;1~9 月蔚来累计交付量为 10.99 万辆。

小鹏汽车 9 月交付新车 1.53 万辆,环比增长 12%,同比增长 81%;1~9 月小鹏汽车累计销量为 4.00 万辆。哪吒汽车 9 月全系交付 1.32 万辆,同比下降了 26%;1~9 月哪吒汽车累计销量为 9.78 万辆。极氪汽车 9 月交付新车 1.25 万辆,同比增长 45.6%;1~9 月极氪累计销量为 7.90 万辆。

(摘自压铸周刊)