

含 Er 铸造镁合金材料研究现状及展望

季 松¹ 庞 松¹ 龚政轩¹ 许 泉² 华溪如¹ 武丽丽¹ 孙明珠² 江善尧¹ 肖 旅¹ 胡 涛¹
(1.上海航天精密机械研究所上海金属材料近净成形工程技术研究中心; 2.上海机电工程研究所;
3.上海航天技术研究院)

摘 要 在介绍国内外含 Er 铸造镁合金研究进展的基础上,分析了 Er 在镁合金熔体净化、组织与性能优化方面的作用,构建了含 Er 稀土镁合金固溶度变化简易模型,讨论了含 Er 镁合金的强化机理与耐蚀机理,对含 Er 铸造镁合金的未来发展方向进行了展望。
关键词 镁合金;Er;铸造;组织;性能
中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.003 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Present Status and Prospect of Cast Magnesium Alloys Containing Er

Ji Song¹, Pang Song¹, Gong Zhengxuan¹, Xu Quan², Hua Xiru¹, Wu Lili¹, Sun Mingzhu²,
Jiang Shanyao¹, Xiao Lü¹, Hu Tao¹

(1.Shanghai Metal Material Near-clean Forming Engineering Technology Research Center, Shanghai
Spaceflight Precision Machinery Institute; 2.Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute;
3.Shanghai Academy of Spaceflight Technology)

Abstract: Based on the recent research, effects of Er on melt purification, microstructure and properties have been analyzed. Besides, a simple model has been built up to describe the solubility-changing of RE magnesium alloys containing Er. Furthermore, strengthening mechanisms and corrosion resistance of cast magnesium alloys containing Er were discussed. Finally, prospect of research on cast magnesium alloys containing Er was presented.
Key Words: Magnesium Alloys, Er, Cast, Microstructure, Properties

镁合金是以镁为基体,同时加入其他元素合金化以改善材料的物理、力学、热力学、耐腐蚀等性能,从而满足不同领域及工作环境的需求^[1,2]。稀土元素能够在一定程度上改善镁合金的熔体净化效果和铸造能力,同时能够优化组织,提高材料的力学性能及抗氧化和抗蠕变性能^[3~5],使镁合金强度提高 150%~250%,极限工作温度提升至 350℃,且耐蚀性能显著提升,拓展了镁合金材料的应用领域^[6~8]。Gd 对镁合金具有显著的强化效果,但其高昂的价格限制了 Mg-Gd 系合金的应用与推广,因此,需要寻找到与 Gd 作用相似且廉价的合金化元素^[9~11]。Er 在镁合金中与 Gd 具有类似的作用,这使得新型含 Er 高性能铸造镁合金的应用成为可能,目前已开发出一系列具有较高强度和热稳定性的含 Er 铸造镁合金。本课题综述了 Er 对铸造镁合金熔体、组织与性能的影响规律及其作用机理,构建了含 Er 稀土镁合金固溶度变化简易模型,展望了含 Er 镁合金材

料未来的研究方向。

1 Er 对镁合金的熔体净化作用

镁合金在熔炼和浇注过程中容易与环境中的水气等发生反应产生氢气、氧化物,导致缩松、缩孔、夹杂等铸造缺陷产生^[12~14]。含 Er 镁合金在熔化时,由于 Er 与氧的亲合力更大,将优先生成 Er₂O₃,在熔体表面形成较致密的氧化膜,其体积比例系数>1,能够有效减少熔体的氧化夹杂^[15]。通过热力学分析可知,Er 与熔剂中的 MgCl₂具有较强的交互作用,在熔化和精炼过程中,Er 会与熔体中过剩的 MgCl₂发生还原反应,生成 ErCl₃并沉降,有效地抑制合金中的熔剂夹杂,见图 1^[16,17]。此外,Er 会与镁熔体中析出的氢气反应,生成密度较高的高熔点化合物 ErH₂,下沉后形成固体渣,从而减少缩松和夹杂^[18]。浇注过程中,Er₂O₃所形成的致密氧化膜可以有效地减少熔体中的二次氧化夹杂。

收稿日期:2021-04-15;修改稿收到日期:2021-06-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2037601);上海市科学技术委员会资助项目(18511109300)
第一作者简介:季松,男,1992 年出生,助理工程师,上海(210016),E-mail:lingsong0923@163.com
通信作者:庞松,男,1983 年出生,高级工程师,上海(210016),E-mail:songpangnb@163.com
引用格式:季松,庞松,龚政轩,等.含 Er 铸造镁合金材料研究现状及展望[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 463-1 468.
JI S, PANG S, GONG Z X, et al. Present status and prospect of cast magnesium alloys containing Er[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 463-1 468.

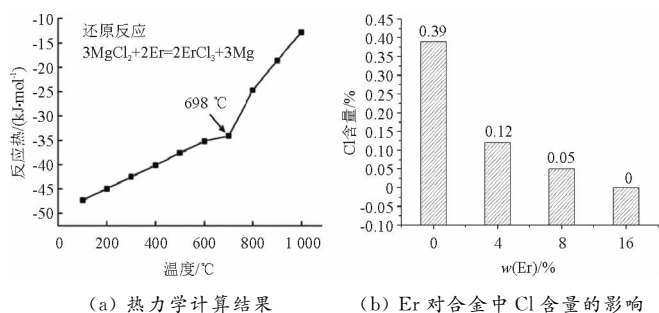


图 1 Er 在 Mg-8Al-0.5Zn 合金中的除杂作用^[16,17]

Fig.1 Impurity removal of Er in Mg-8Al-0.5Zn alloys^[16,17]

2 含 Er 镁合金的铸态组织

2.1 Er 对镁合金晶粒的细化作用

根据 Hall-Petch 公式: $\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, 合金的屈

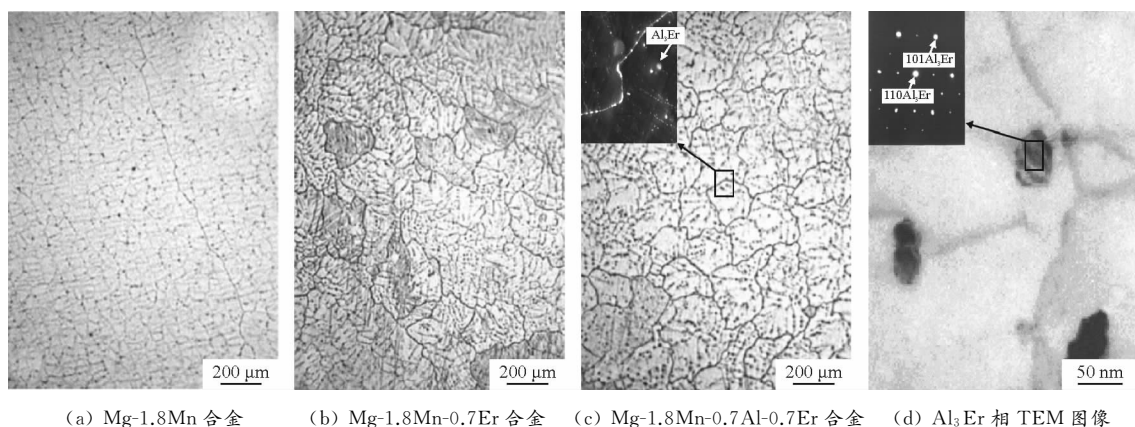


图 2 不同 Er 含量的铸态 Mg-1.8Mn 合金组织形貌^[23]

Fig.2 Effects of Er content on microstructure of as-cast Mg-1.8Mn alloys^[23]

用,对晶粒细化具有积极的作用。

陈波全^[24]发现,在 Mg-6Zn-0.5Zr 合金中添加 1% 的 Er 后,其铸态的平均晶粒尺寸从 57 μm 减小至 41 μm ,降幅接近 30%,当 Er 的添加量超过 1%,晶粒尺寸

会略微增大,见图 3。Er 在合金凝固过程中会富集于固液界面前沿,抑制晶粒的长大,但是也会增加合金在铸造过程中的凝固潜热,减小温度梯度,降低过冷度,不利于晶粒的细化。

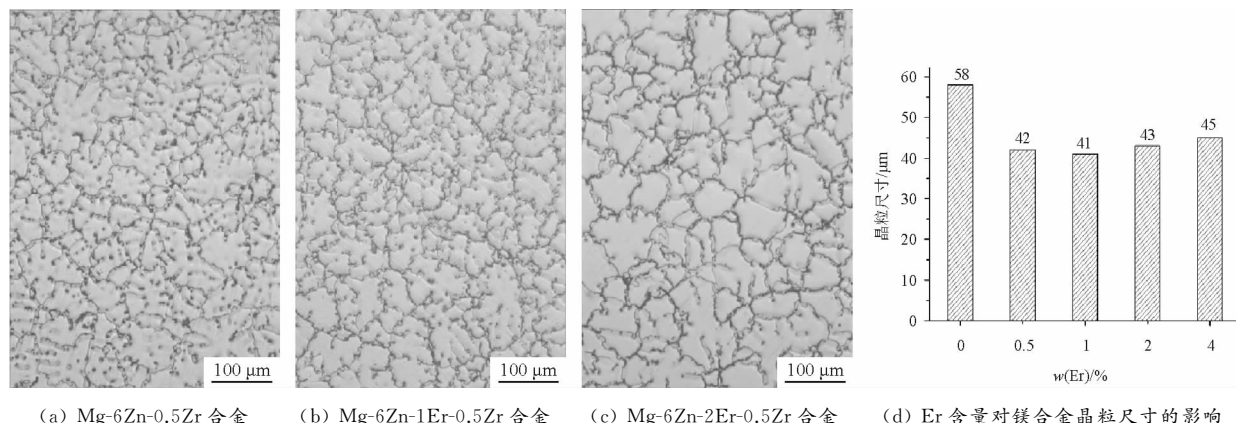


图 3 Er 对铸态 Mg-6Zn-0.5Zr 合金晶粒尺寸的影响^[24]

Fig.3 Effects of Er on grain size of as-cast Mg-6Zn-0.5Zr alloys^[24]

对于稀土镁合金,Er 同样能起到一定的晶粒细化作用。梁叔全等^[25]研究了 Er 对 Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金铸态组织的影响,发现添加 0.5% 的 Er 能够使其平

均晶粒尺寸减小约 40%,见图 4。结合 EDS 分析可知,Er 会在组织中以第二相的形式分布在晶界,钉扎晶界,阻碍晶粒长大,见图 4c。

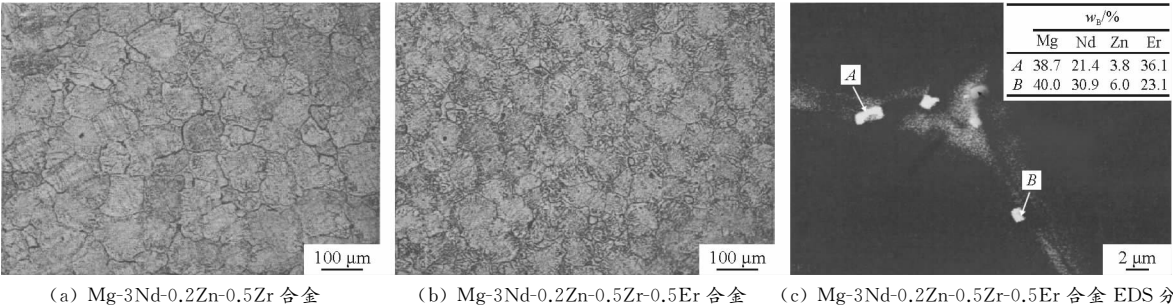


图 4 不同 Er 含量的铸态 Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金组织形貌^[25]

Fig.4 Effects of Er content on grain size of as-cast Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr alloys^[25]

无论是非稀土镁合金,还是稀土镁合金,Er 均有一定的晶粒细化效果。对于非稀土镁合金,凝固过程中 Er 会富集在固液界面前沿,抑制晶粒的长大,并且复合添加 Al 之后,所形成的 Al₃Er 共晶相有明显的异质形核效果,促进晶粒细化,在此可以推断,Er 对于含 Al 铸造镁合金晶粒具有显著的细化效果。对于稀土镁合金,尽管其本身的晶粒尺寸较小,但是 Er 的添加有助于促进第二相的析出,强化第二相的钉扎晶界作用,进一步阻止晶粒的长大。因此,Er 可以作为晶粒细化剂理想的化学组成元素,见表 1。

表 1 不同体系含 Er 镁合金铸态晶粒尺寸^[23~28]

Tab.1 As-cast grain size of different systems of magnesium alloys containing Er

类型	合金	w(Er)/%	晶粒尺寸的变化/μm	晶粒尺寸减小幅度/%	参考文献
非稀土镁合金	Mg-1.8Mn	2	800→185	76.9	[23]
	Mg-9Al-1Zn-0.5Zr	2	57→21	63.2	[26]
	Mg-6Zn-0.5Zr	1	58→41	29.3	[24]
	Mg-2Zn-0.5Zr	2	94→72	23.4	[27]
稀土镁合金	Mg-4Y-3Nd-0.5Zr	2	105→85	19.0	[28]
	Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr	0.5	108→72	33.3	[25]

2.2 Er 对镁合金第二相的影响

镁合金中细小均匀的第二相析出往往会起到改善合金性能的作用。然而,当第二相尺寸过大或者分布较密集,一方面会引起应力集中,割裂组织,影响材料的力学性能;另一方面会增强材料的电化学反应活性,削弱其耐腐蚀能力,因此,对镁合金组织中第二相的尺寸及分布的调控尤为重要^[29~31]。

Er除了能够细化镁合金晶粒,对第二相的尺寸和

分布同样能起到优化作用。马正青等^[32]在 Mg-6Al-5Pb 合金中添加了 0.5% 的 Er 后,发现第二相由连续网状结构转变为细小的颗粒状,见图 5。Al₃Er 的生成温度高于 Mg₁₇Al₁₂相,熔炼过程中,Er 将优先与 Al 反应生成颗粒状的 Al₃Er 相,消耗了部分 Al,使得 Mg₁₇Al₁₂相的析出量减少,并且在 Mg₁₇Al₁₂相生长过程中,吸附在枝晶尖端,抑制长大。

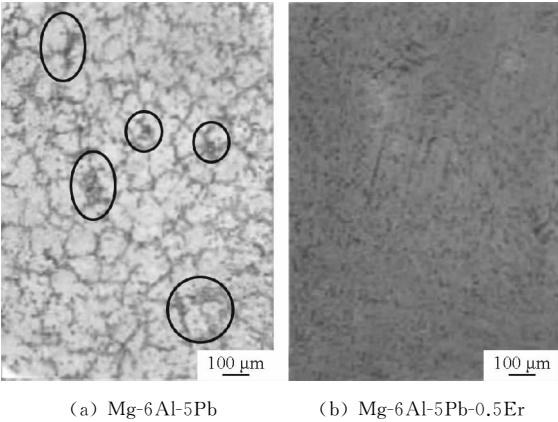


图 5 不同 Er 含量的铸态 Mg-6Al-5Pb 镁合金第二相形貌^[32]

Fig.5 Effects of Er content on secondary phase of as-cast Mg-6Al-5Pb alloys^[32]

对于稀土镁合金,Er 同样能够改善第二相的尺寸及分布。Mg-3Zn-4Ce-0.5Zr 合金中加入 1% 的 Er,铸态组织中的第二相由粗大连续状转变为细小非连续状。绝大部分 Er 固溶到基体中,局部区域的 Er 含量高达 11.94%,晶界处依旧为 Mg-Zn-Ce 共晶相。固溶到基体中的 Er 引起了晶格畸变,使得基体的体积分数增大,第二相尺寸减小,见图 6。对比固溶度较低的稀土元素

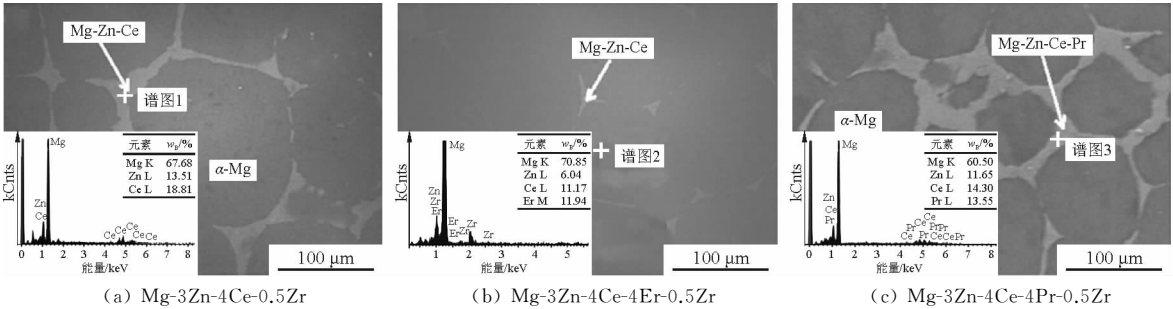


图 6 不同稀土元素的铸态 Mg-3Zn-4Ce-0.5Zr 合金第二相形貌及 EDS 分析^[33]

Fig.6 Effect of different rare earth elements on the second phase and EDS analysis of as-cast Mg-3Zn-4Ce-0.5Zr alloys^[33]

Pr(最大固溶度为1.7%),Er对第二相优化效果显著^[33]。

3 含 Er 镁合金热处理后的组织

3.1 固溶态组织

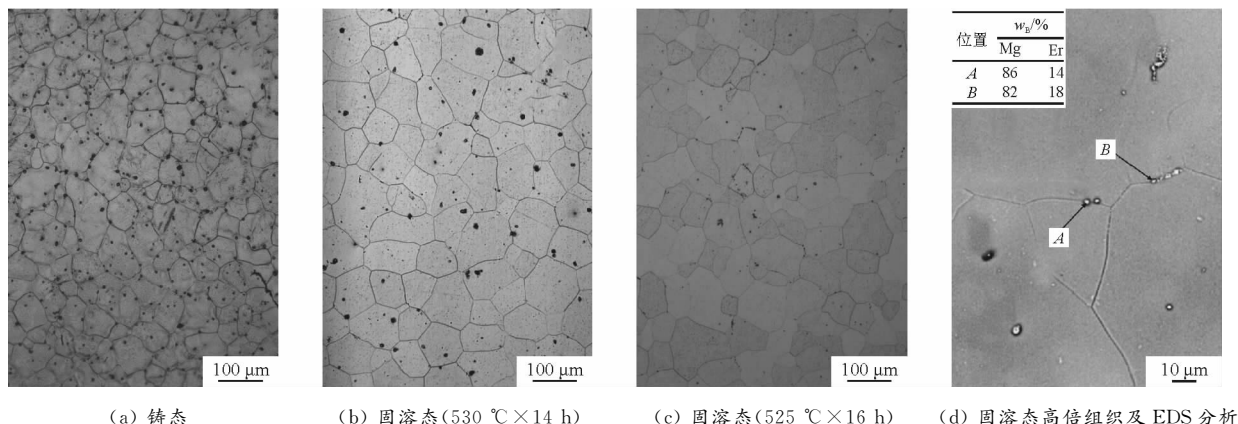
由 Mg-Er 二元相图可知,平衡状态下,Er 在 Mg 中的极限固溶度高达 32.7%,Er 与 Mg 可能形成 $Mg_{24}Er_5$ 和 $ErMg_2$ 两种共晶相。ROKHLIN L L 等^[34]发现,Mg-2.5Y-2.5Gd-5Er-0.5Zr 合金的共晶转变温度为 515 °C,在该温度下会生成一种灰色的相,即 $Mg_{24}Er_5$ 相,经 515 °C×6 h 固溶处理后消失。

陈波全^[24]发现,Mg-6Zn-0.5Zr 合金经 450 °C×15 h 固溶处理后,平均晶粒尺寸由 105 μm 增大至 150 μm,增幅约为 50%。添加 1% 的 Er 后,在同样的固溶工艺下,平均晶粒尺寸由 68 μm 增大至 72 μm,增幅约

为 5%。Er 的添加不仅减小了合金的铸态晶粒尺寸,也降低了合金在固溶时晶粒的长大幅度。

武晓方^[28]发现,Mg-4Y-3Nd-0.5Zr 合金中添加 2% 的 Er,可以在一定程度上抑制晶粒的固溶长大行为。Er 的添加并没有改变未溶解相的种类,分布在晶界的未溶解相依旧为 Mg-Y 和 Mg-Nd 共晶相,但是数量明显增多,且分布更均匀。添加到合金中的 Er 绝大部分固溶到基体中,使得 Y 和 Nd 的固溶度降低,并从基体中析出,分布在晶界,形成金属间化合物,对晶界起到了一定的钉扎作用,抑制晶粒长大。

本课题组发现,Mg-15Er-0.5Zr 合金分别经 530 °C×14 h 和 525 °C×16 h 固溶处理后,平均晶粒尺寸分别由 102 μm 增大至 110 μm 和 112 μm。结合能谱分析可知,固溶后组织的晶界处分布着大量的 Mg-Er 共晶相,抑制了晶粒的长大,见图 7。



(a) 铸态 (b) 固溶态(530 °C×14 h) (c) 固溶态(525 °C×16 h) (d) 固溶态高倍组织及 EDS 分析

图 7 铸态和固溶态 Mg-15Er-0.5Zr 合金组织与 EDS 分析

Fig.7 Microstructure and EDS analysis of as-cast and solution-treated Mg-15Er-0.5Zr alloys

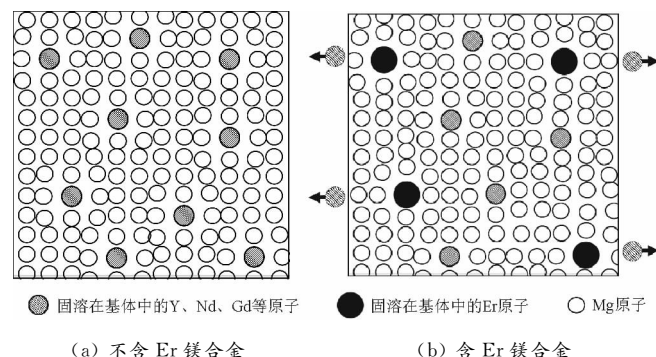
3.2 时效态组织

析出强化是稀土铸造镁合金的主要强化方式之一^[35~38]。当 Er 添加到稀土镁合金中,单一稀土元素的固溶度会降低,改变了稀土元素的时效析出过程,改善了合金的时效强化效果。陈亮^[39]发现,Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金中添加 0.4% 的 Er,合金在时效阶段的析出相依旧为细小长条状析出相。只是在添加 Er 之后,析出相的数量明显增多,且分布更均匀。通过观察时效后选区衍射花样及对应的 SAED 标定图解,可知该衍射斑是具有密排六方特征的 Mg-Nd 化合物。由此可知,在 Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金中添加 Er 并没有改变析出相的种类,但是析出相的数量增多。

温凯^[40]研究发现,Mg- x Gd-(14- x)Er-1Zn-0.5Zr 合金的时效强化效果与 $w(Er)/w(Gd)$ 有关,随着比值下降,合金的时效强化效果越发明显。当 $w(Er)/w(Gd) \geq 1$ 时,合金没有明显的时效峰值,时效相很难从基体中析出;当 $w(Er)/w(Gd) < 1$ 时,时效强化效果

明显,存在明显的第二相孕育、长大、析出。

图 8 为含 Er 稀土镁合金固溶度变化简易模型。由于 Er 在 Mg 中的最高固溶度达到 32.7%,远高于其他的稀土元素,因此 Mg-Er 系合金在时效阶段第二相析出的难度极高。当少量的 Er 添加到低稀土镁合金(Mg-3Nd-0.5Zr、Mg-5Zn-1.5Nd-2.5Ca 等),Er 绝大部



(a) 不含 Er 镁合金 (b) 含 Er 镁合金

图 8 含 Er 镁合金固溶度变化简易模型

Fig.8 A simplified model of solubility-changing of magnesium alloys containing Er

分固溶到基体中,引起晶格畸变,起到一定的固溶强化效果,但可能弱化析出强化效果,并降低其他稀土元素在镁中的固溶度。当 Er 添加到高稀土镁合金(Mg-9Gd-0.5Zr、Mg-6Y-5Zn-0.5Zr、Mg-4Y-3Nd-0.5Zr 等),同样会导致其他稀土元素固溶度降低,引起材料在时效阶段第二相的大量析出、聚集,并可能弱化析出强化效果,在一定程度上降低了材料的力学性能。

4 含 Er 镁合金力学性能与耐蚀性能

崔红卫等^[41]发现,在 Mg-6Al 合金中添加 Er 后,添加量达到 1%时,其力学性能达到最优,抗拉强度和伸长率分别为 181 MPa 和 9.3%,比不含 Er 的提高了 18.3%和 60.3%。随着 Er 含量增多,未溶解相 Al₃Er 开始团聚,割裂基体,引起应力集中,影响其力学性能。何曲波等^[42]发现,Er 可以改善 Mg-7Zn-3Al 合金的力学性能,当 Er 的添加量达到 0.7%时,铸态合金的抗拉强度和伸长率分别达到 153 MPa 和 29%,抗拉强度提升幅度约为 30%,伸长率提高近 4 倍。

王忠军等^[43]采用在熔剂中添加 Er 的方式研究了 Er 含量对 Mg-9Al-1Zn 合金力学性能的影响。发现当熔剂中 Er 的添加量达到 10%时,其抗拉强度和伸长率分别从 156 MPa 和 1.8%(不加 Er)上升到 220 MPa 和 4.1%。随着熔剂中 Er 的添加量进一步提升,其力学性能开始下降。

陈亮^[39]在研究 Er 对 Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金性能的影响时发现,当 Er 添加量达到 0.5%时,其在铸态、固溶态以及时效态的屈服强度和抗拉强度都明显提高,伸长率略微下降,见表 2。

表 2 不同 Er 含量的 Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr 合金力学性能^[39]
Tab.2 Effects of Er on mechanical properties of Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr alloys^[39]

状态	Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr			Mg-3Nd-0.2Zn-0.5Zr-0.5Er		
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
铸态	154.3	118.5	5.6	177.2	122.3	4.8
固溶态	195.2	103.2	6.4	201.5	105.8	5.5
时效态	255.8	152.6	4.2	283.4	170.2	4.0

镁合金的耐蚀性能较差,在一定程度上制约了其工程化应用。刘楚明等^[26]、杨森^[16]发现 Er 还能有效改善镁合金的耐腐蚀性能。当 Mg-9Al-1Zn 合金中添加 0.7%的 Er 时,其腐蚀速率由不含量 Er 的 7.8 mg/(cm²·d)降低至 0.5 mg/(cm²·d);当 Mg-5Al-0.5Mn 合金中添加 1.0%的 Er 时,腐蚀速率由不含量 Er 的 0.36 mg/(cm²·d)降低至 0.16 mg/(cm²·d),腐蚀速率减小的同时,阴极 Tafel 曲线斜率逐渐增大。镁合金中添加 Er 之后,合金腐蚀后的形貌发生了明显的变化,

腐蚀面积由 60%以上降至 10%以下,腐蚀坑明显变浅,腐蚀产物明显减少。

无论是非稀土镁合金,还是稀土镁合金,Er 均能在一定程度上提升材料的力学性能和耐蚀性能。对于非稀土镁合金,Er 的适量添加能够增大熔体的成分过冷,细化晶粒,优化第二相的析出行为,起到明显强化作用,并减少腐蚀微电偶的形成,提高腐蚀膜的致密性,提升合金的耐蚀性;对于低稀土镁合金,添加到合金中的 Er 以固溶体的形式存在于基体中,引起晶格畸变,增强材料的固溶强化行为,提高了强度和塑性;对于高稀土镁合金,Er 的添加会使得其他稀土元素固溶度降低,强化合金在时效阶段的析出强化行为,但是过多的析出相会使得第二相团聚,弱化其力学性能和耐蚀性能。

5 展望

Er 能够改善镁合金的组织与性能,具有一定的应用前景。因此,国内外研究者开展了相关的研究,发现 Er 能够净化镁熔体,消除铸造缺陷,细化镁合金晶粒,并促进第二相的析出,提升铸造镁合金的力学性能,有效地改善镁合金的耐热和耐腐蚀性能。

然而,对于含 Er 铸造镁合金,晶粒细化以及微合金化作用机理还有待研究,特别是时效析出动力学研究还不够全面。未来的研究重点:①通过对 Mg-Er 系合金时效析出机制的分析与探索,得到具有理想形貌和分布的析出相;②研究析出的 Mg-Er 共晶对组织的强化行为,探索析出相之间的相互作用及其强化机理;③结合模拟与试验的结果,得出析出相的原子结构,并解释其析出行为;④开发适用于含 Er 铸造镁合金材料的特种铸造与热处理技术,进一步提升合金的性能与适用性。

参 考 文 献

[1] 周天承,杜文博,王朝辉,等. 高强度超声对 Mg-Zn-Er 合金显微组织和性能的影响[J]. 铸造, 2009, 58(11): 1 101-1 104.
[2] 李淑波,杜文博,王旭东,等. Zr 对 Mg-Gd-Er 合金晶粒细化机理的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(6): 911-917.
[3] 尹健,马修军,戴斌煜,等. Zn 对铸态 Mg-Er-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(1): 106-112.
[4] 刘先兰,刘楚明,李慧中,等. Er、Nd 对 Mg-0.6Zr 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(2): 173-176.
[5] ZHANG L, ZHANG J H, LENG Z H, et al. Microstructure and mechanical properties of high-performance Mg-Y-Er-Zn extruded alloys[J]. Materials and Design, 2014, 54: 256-263.
[6] WANG Q F, LIU K, WANG Z H, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of as-extruded Mg-Zn-Er alloys containing W-phase[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 602: 32-39.
[7] ZHANG J, LI W G, ZHANG B X, et al. Influence of Er addition and extrusion temperature on the microstructure and mechanical

- properties of a Mg-Zn-Zr magnesium alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, A528: 4 740-4 746.
- [8] LENG Z H, ZHANG J H, YIN T T, et al. Influence of biocorrosion on microstructure and mechanical properties of deformed Mg-Y-Er-Zn biomaterial containing 18R-LPSO phase[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, 28: 332-339.
 - [9] DU X H, WEI C B, WU B L, et al. A high-performance Mg-Er-Zn-Zr alloys with low Er/Zn mass ratio[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2015, 22: 4 123-4 127.
 - [10] LIU X Q, ZHAO D S, YE L, et al. Effect of Er contents on the microstructure of long period stacking ordered phase and the corresponding mechanical properties in Mg-Dy-Er-Zn alloys[J]. *Materials Science & Engineering*, 2018, A718: 461-467.
 - [11] ZHANG J, FANG C, YUAN F, et al. Grain refinement of as cast Mg-Mn alloys by simultaneous addition of trace Er and Al[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2013(12): 334-340.
 - [12] MA C H, ZHANG D F, FAN Y H, et al. Isothermal sections in the Mg-corner of Mg-Er-Sn ternary system at 300, 400 and 500 °C [J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2013, 34(1): 9-16.
 - [13] ZHAG M Q, ZHANG J H, WU R Z, et al. The effect of Y/Er and Zn addition on the microstructure and mechanical properties of Mg-11Li alloys[J]. *Materials*, 2019(12): 1-13.
 - [14] WANG Z J, JIA W P, CUI J Z, et al. Study on the deformation behavior of Mg-3. 6Er magnesium alloys[J]. *Journal of Rare Earths*, 2007, 25: 744-748.
 - [15] LIU L L, HE Y L, LIU D X, et al. Temperature-dependent generalized planar fault energy and twinnability of Mg microalloyed containing Er, Ho, Dy, Tb, and Gd: First-principles study[J]. *Hindawi*, 2016(1): 1-9.
 - [16] 杨森. AM50 镁合金腐蚀力学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
 - [17] WANG Z J, SU G Q, JIA W P, et al. Microstructure and performance of AZ80D magnesium alloys by purification of chloride flux containing Er[J]. *Rare Metals*, 2014, 33(5): 541-546.
 - [18] XU C H, ZHANG J H, LIU S J, et al. Microstructure, mechanical and damping properties of Mg-Er-Gd-Zn alloys reinforced with stacking faults[J]. *Materials and Design*, 2015, 79: 53-59.
 - [19] BAMBERGER M, DEHM G. Trends in the development of new Mg alloys[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2008, 38 (3): 505-533.
 - [20] ZHANG J, CHEN B Q, LIU C P, et al. An investigation of dynamic recrystallization behavior of ZK60-Er magnesium alloys[J]. *Materials Science & Engineering*, 2014, A612: 253-266.
 - [21] DING Y, GAO K Y, XIONG X Y, et al. Effect of Zn/Er weight ratio on phase formation and mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Er alloys[J]. *Materials and Design*, 2012, 35: 259-265.
 - [22] LI H, DU W B, LI S B, et al. High corrosion resistance and strain hardening of high Mg Al-alloys containing Er and Zr by using a new reverse stabilization process[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 171: 26-30.
 - [23] ZHANG J, FANG C, YUAN F, et al. Grain refinement of as cast Mg-Mn alloys by simultaneous addition of trace Er and Al[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2012, 25(6): 335-340.
 - [24] 陈波全. 稀土 Er 对 Mg-Zn-Zr 合金力学性能和热加工过程中微结构演化的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
 - [25] 梁叔全, 陈亮, 官凯迪, 等. 微量 Er 对 Mg-Nd-Zn-Zr 合金显微组织与力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2012, 41(2): 1-4.
 - [26] 刘楚明, 葛位维, 李慧中, 等. Er 对铸态 AZ91 镁合金显微组织和耐腐蚀性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(5): 847-853.
 - [27] 张旭峰. 稀土 Er 对 ZK21 变形镁合金组织和性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
 - [28] 武晓方. Er 对 Mg-4Y-3Nd-0. 5Zr 合金组织和性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
 - [29] JI Q, WANG Y, WU R Z, et al. High specific strength Mg-Li-Zn-Er alloys processed by multi deformation processes[J]. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110-135.
 - [30] LIU J N, BIAN D, ZHENG Y F, et al. Comparative in vitro study on binary Mg-RE(Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb and Lu) alloys systems[J]. *Acta Biomaterialia*, 2020, 102: 508-528.
 - [31] 刘耀鸿, 王朝辉, 刘轲, 等. Er 对 Mg-5Zn-xEr 镁合金热裂敏感性的影响[J]. *金属学报*, 2019, 55(3): 389-398.
 - [32] 马正青, 王诗野, 高晨璟, 等. Er 对 AP65 镁合金组织与电化学性能的影响[J]. *昆明理工大学学报*, 2019, 44(1): 19-23.
 - [33] AHAMD R, SHEGGAF Z M, ASMAEL M B A, et al. Effect of rare earth addition on solidification characteristics and microstructure of ZRE1 magnesium cast alloys[J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2017, 6(8): 3-10.
 - [34] ROKHLIN L L, LUK'ANOVA E A, DOBATKINA T V, et al. Effect of cerium and Er on the aging kinetics and the properties of an IMV7-1 alloys of the Mg-Gd-Zr system[J]. *Russian Metallurgy (Metallurgy)*, 2019(1): 8-13.
 - [35] FENG Y, ZHANG J H, QIN P F, et al. Characterization of elevated-temperature high strength and decent thermal conductivity extruded Mg-Er-Y-Zn alloys containing nano-spaced stacking faults[J]. *Materials Characterization*, 2019, 155: 1-12.
 - [36] 肖代红, 黄伯云, 等. Er 对 AZ91 镁合金铸态组织与力学性能的影响[J]. *中国稀土学报*, 2008, 26(1): 78-82.
 - [37] 滕昭阳. 合金元素对镁阳极腐蚀与电化学性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
 - [38] 冯艳. 新型 Mg-Er-Y-Zn-Mn[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
 - [39] 陈亮. Er 对 Mg-Nd-Zn-Zr 合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
 - [40] 温凯. Mg-Gd-Er-Zn-Zr 合金微观组织演变及其力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
 - [41] 崔红卫, 张甜甜, 余晖, 等. 稀土 Er 对铸态 Mg-6Al 合金显微组织和力学性能的影响[J]. *铸造*, 2017, 66(12): 1 256-1 261.
 - [42] 何曲波, 张静, 左汝林, 等. Er 对 ZA73 镁合金显微组织与力学性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29(3): 273-277.
 - [43] 王忠军, 张彩磊, 邵晓宏, 等. 添加稀土 Er 于熔剂中对铸态 AZ91 镁合金组织与性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(2): 181-187.

(编辑: 张正贺)