



长周期堆垛有序结构对镁合金力学性能和耐腐蚀性能的影响

牟 宇¹, 麻彦龙^{1,2}, 赵旭晗¹, 席国强¹, 马 凯³, 王敬丰³

- (1. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;
2. 重庆理工大学 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆 400054;
3. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要:近年来, 研究发现通过适当的合金化和热处理, 可在镁合金中引入长周期堆垛有序结构(LPSO), 从而显著改善镁合金的加工性能和力学性能, 同时, 对镁合金耐腐蚀性能的提高也有益处。目前, 国内外针对含 LPSO 相镁合金开展了大量基础研究, 特别对 LPSO 相的结构和形成条件已有较为深入和全面的认识, 但针对含 LPSO 相镁合金的力学性能及耐腐蚀性能的研究则相对较少。在简要总结 LPSO 相的结构类型与形成机理的基础之上, 全面综述含 LPSO 相镁合金的力学性能和耐腐蚀性能的国内外研究现状, 以期对新型含 LPSO 相镁合金的开发和性能调控提供参考。

关键词: 镁合金; 长周期堆垛有序结构; 力学性能; 耐腐蚀性能

文章编号: 1004-0609(2021)-05-1203-11

中图分类号: TG174.1

文献标志码: A

引文格式:牟 宇, 麻彦龙, 赵旭晗, 等. 长周期堆垛有序结构对镁合金力学性能和耐腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1203–1213. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36579

MOU Yu, MA Yan-long, ZHAO Xu-han, et al. Effect of long-period stacking ordered structure on mechanical properties and corrosion resistance of magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1203–1213. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36579

镁合金作为最轻的金属结构材料, 密度大约是铝合金的 2/3、钢的 1/4, 被誉为“21 世纪绿色工程结构材料”。具有比强度和比刚度高、阻尼减震和电磁屏蔽性能佳、导热导电性良好、易于回收利用等一系列优点, 在航空航天、国防军事、电子产品等领域有广阔的应用和发展潜力。然而, 由于镁合金普遍存在加工成本较高、绝对力学性能不佳、耐腐蚀性较差等缺点, 限制了其在结构件上的使用。然而, 镁合金在应用及发展过程中存在很多问题, 比如低温变形困难、易腐蚀、强度和伸长率低等, 限制了镁合金的进一步发展^[1-4]。近年来, 长周期堆垛有序结构(Long-period stacking ordered, LPSO)的发现, 为解决镁合金较低的室温和高温力学性

能、较差的耐腐蚀性以及较高的加工成本等关键问题提供了契机^[5-8]。研究表明: 在添加 Zn、Cu、Ni、Al 等元素的 Mg-RE 合金中, 通过合理调整合金成分、熔炼制度及热处理工艺, 会在镁合金中引入 LPSO 结构^[9-10]。Mg-Y-Zn 和 Mg-Gd-Zn 是两种较为常见的含 LPSO 相镁合金体系, 其中 Mg-Y-Zn 合金的抗拉强度在 370~440 MPa, 伸长率≤14%; Mg-Gd-Zn 合金的力学性能主要分为两类, 一类具有高抗拉强度(>450 MPa)和低伸长率(<5%); 另一类具有中等抗拉强度(350~400 MPa)和高伸长率(>15%)^[11-12]。在实际研究和应用中发现, 含 LPSO 相镁合金的中高温拉伸强度和高温抗蠕变性能均显著优于同样状态下的 WE54 等商用镁合金^[13]。

基金项目: 重庆英才·创新创业领军人才计划项目(CQYC201903051); 重庆市高校创新研究群体项目(CXQT20023); 重庆市自然科学基金重点项目(cstc2019jcyj-zdxmX0010); 山西省科技重大专项(Nos.20191102008)

收稿日期: 2020-06-18; **修订日期:** 2021-02-27

通信作者: 麻彦龙, 教授, 博士; 电话: 13594093263; E-mail: myl@cqut.edu.cn

由于 LPSO 相特殊的结构以及含 LPSO 相镁合金良好的综合力学性能, 受到科研工作者广泛关注^[14-18]。现阶段大部分研究工作主要集中在以下几个方面: 第一, LPSO 相的结构和形成机理; 第二, LPSO 相对镁合金高温力学性能的影响规律和作用机理; 第三, 含 LPSO 相镁合金的结构和性能调控。目前, 国内外研究者已针对 LPSO 相的微观结构、形成机理等科学问题进行了较为深入和全面的研究, 并达成一定共识。本文作者在简要总结了 LPSO 相的结构及形成机理的基础之上, 重点综述国内外关于 LPSO 相对镁合金力学性能和耐蚀性能影响的研究进展, 以期对含 LPSO 相镁合金的开发和性能调控提供参考。

1 LPSO 结构类型与形成机理

在添加了 Zn、Cu、Ni、Al 元素的 Mg-RE 合金中, 通过合理调整合金成分、熔炼制度和热处理工艺, 可以使合金中的溶质原子从随机无序分布过渡到有序占位的规则排列状态, 从而形成 LPSO 结构^[9-10]。目前发现的 LPSO 结构类型主要有 5 种, 即 6H、10H、14H、18R、24R, 其中 6H、14H 和 18R 是镁合金中比较常见的 LPSO 结构^[19]。表 1 列举了 Mg-RE-X 合金中已探明的 LPSO 结构及其特征^[20]。

KAWAMURA 等^[21]总结了 Mg-RE-Tm 合金中

LPSO 相的形成准则: 1) 稀土元素在室温下应具备 HCP 结构; 2) 镁与稀土和过渡族元素的混合熵应为负, 而稀土与过渡族元素的混合熵应更负; 3) 稀土在镁中的极限固溶度要超过 3.75%(原子分数); 4) 稀土原子尺寸应比镁原子尺寸大 8.4%~11.9%。目前, 被大多数学者认可的 LPSO 相的形成理论是层错与溶质浓度理论^[22-24]。该理论认为, LPSO 相的形成过程一般可以分为两个步骤: 一是 Mg 的密排面上产生了层错; 二是在层错中引入了溶质原子(Y、Zn 等)。晶格畸变提供了附加应力场, 推动了原子的扩散, 促进了 LPSO 相的形成和长大; 晶格畸变多在晶界处产生, 因此, LPSO 相优先在晶界处形成, 然后向晶粒内部侧向生长。

2 含 LPSO 相镁合金的力学性能

2.1 镁合金中 LPSO 相的强韧化机理

LPSO 相的增强增韧机理是含 LPSO 相镁合金研究的重点, 受到广泛关注。目前, 国内外学者通过理论计算、试验研究等手段, 较为深入地研究了 LPSO 相对镁合金强度、塑性和疲劳性能等力学性能的影响, 初步在 LPSO 相的增强增韧机理方面达成了一定共识, 为进一步提高含 LPSO 相镁合金的力学性能打下坚实的基础。

为了研究含 LPSO 相镁合金增强增韧机理, 蒋毅等^[25]通过基于密度泛函理论下的第一性原理分

表 1 Mg-RE-X 合金中已探明的 LPSO 结构及其特征

Table 1 Proven structure and characteristics of LPSO in Mg-RE-X alloy

Structure type	Atomic arrangement	Symmetry	LPSO chemical composition
6H	ABCBCB	Without	Mg ₉₄ Zn ₂ Y ₄
	ABACAB	Without	Mg ₈₇ Zn ₃ Y ₁₀ , Mg ₈₈ Zn ₄ Y ₈ , Mg ₉₇ Y ₂ Zn ₁
10H	ABACBCBCAB	With	Mg ₉₇ Y ₂ Zn ₁
14H	ACBCBABABABCBC	With	Mg ₈₇ Zn ₇ Y ₆
	ABABABACBCBCBC	Without	Mg ₈₇ Zn ₇ Y ₆ , Mg ₈₇ Zn ₇ Er ₆
	ABABABACACACACAC	Without	Mg _{97.5} Zn ₁ Gd _{2.5}
	ABACBCBCBCABAB	Without	Mg ₈₀ Cu ₁₅ Y ₅
18R	ACBCBCBACACABABAB	Without	Mg ₉₄ Zn ₂ Y ₄ , Mg ₉₁ Zn ₃ Y ₆
	ABABABCACACABCBCBC	Without	Mg ₉₀ Zn ₄ Y ₆ , Mg ₈₈ Zn ₇ Er ₅
	ACBCBCBACACABCABAB	Without	Mg ₁₂ Y ₂ Zn, Mg ₉₇ Y ₂ Zn
	ACACACCACACABCBCBC	Without	Mg ₈₉ Y ₇ Zn ₄
24R	ABABABABCACAACACABCBCBCBC	Without	Mg ₉₇ Y ₂ Zn ₁

析, 认为 Y 和 Zn 原子主要偏析在 Mg-Zn-Y 合金的层错层和层错邻层, 导致合金的层错能显著降低, 进而促进 LPSO 相的形成, 而分布在晶界处的 LPSO 相能够有效阻碍位错滑移, 从而提高合金强度。HAGIHARA 等^[26]、GARCE'S 等^[27]、XU 等^[28]、LU 等^[29]则通过实验研究, 基本阐明了 LPSO 相提升镁合金强度的微观机理。HAGIHARA 等^[26]在 LPSO 相体积分数为 24% 的挤压 Mg97Y2Zn1 合金中发现, 18R 型 LPSO 相与镁合金基体(0001)基面在平行于挤出方向很好地对齐, 有效提高合金强度, 其强化机理与短纤维增强机制大体一致。GARCE'S 等^[27]证实, 如果载荷轴与纤维方向(挤出方向)对齐, 则

拉长的纤维状 LPSO 相相当于金属基复合材料中的增强体; 当受到拉应力时, α -Mg 晶粒可以将部分负荷转移到 LPSO 相, 使 LPSO 相承受的局部负荷高于合金上施加的宏观应力。XU 等^[28]通过测试含有不同体积分数 LPSO 相的 Mg-Zn-Y 合金的拉伸性能, 发现在室温条件下, 随着 LPSO 相体积分数的增大, 合金的屈服强度和抗拉强度均增加。这是由于存在硬度高、模量高、各向异性强的第二相和 LPSO 相, 它们直接充当了增强体。LU 等^[29]通过热处理调控了 Mg95.3Zn2Y2.7 合金中 LPSO 相的形貌, 进一步研究发现, 不同形貌的 LPSO 相对合金的抗拉性能有显著影响(见图 1)。

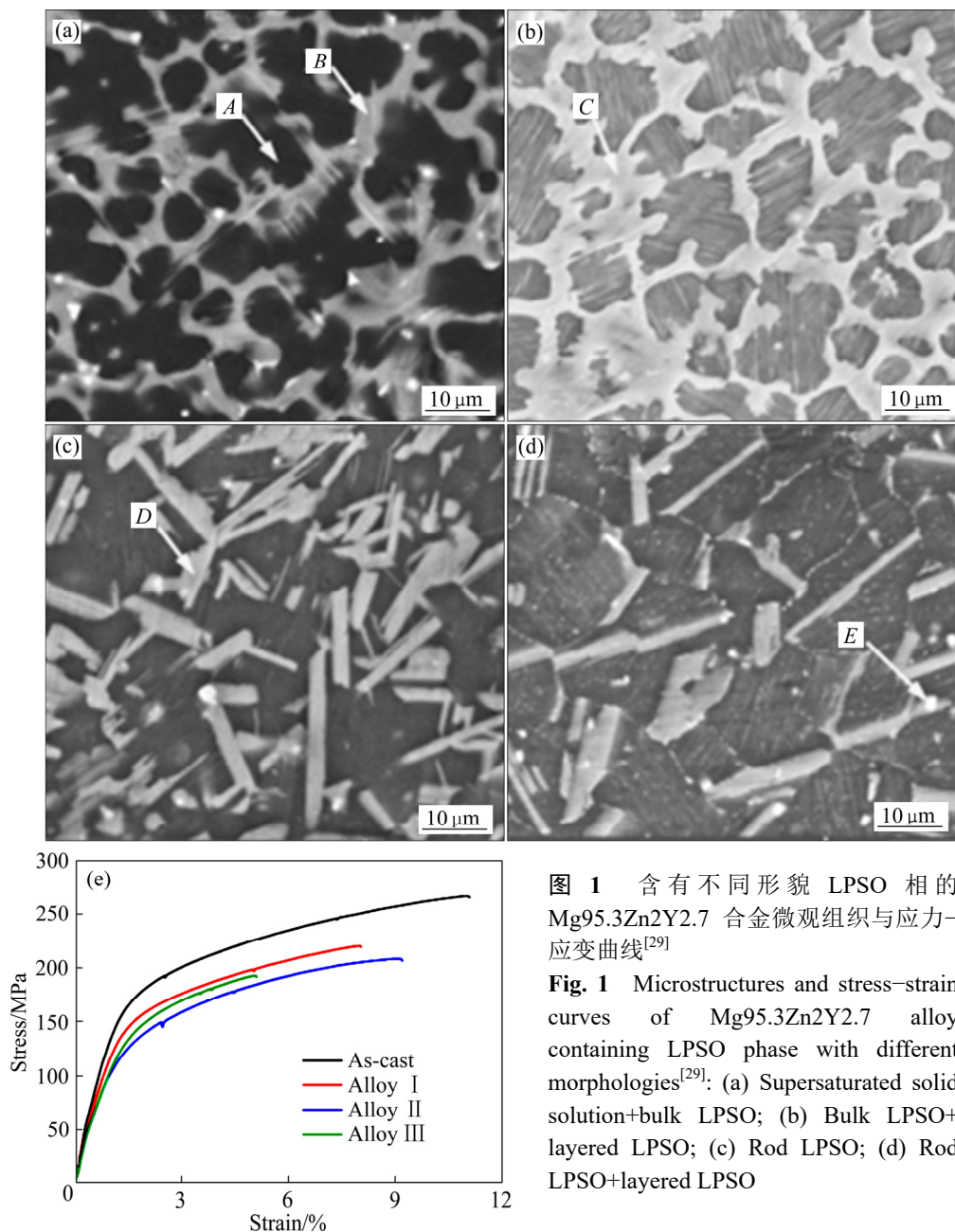


图 1 含有不同形貌 LPSO 相的 Mg95.3Zn2Y2.7 合金微观组织与应力-应变曲线^[29]

Fig. 1 Microstructures and stress-strain curves of Mg95.3Zn2Y2.7 alloy containing LPSO phase with different morphologies^[29]: (a) Supersaturated solid solution+bulk LPSO; (b) Bulk LPSO+layered LPSO; (c) Rod LPSO; (d) Rod LPSO+layered LPSO

大多数镁合金为密排六方点阵结构, 滑移系较少, 而 LPSO 相的形成在提高合金强度的同时还能够改善合金的塑性。MATSUDA 等^[30]从微观和宏观两个角度分析了 LPSO 相改善塑性的机理: 一方面, LPSO 相的形成会增加其基面的临界剪切应力, 激活锥面位错的滑移, 从而提高合金的塑性; 另一方面, LPSO 相结构本身拥有较好的协调变形能力, 从源头上减少了裂纹的萌生和扩展, 从而起到提升塑性的作用。MINE 等^[31]采用显微断口试验探究了挤压态 Mg-Zn-Y 合金的断裂韧性, 发现 LPSO 相能够提高合金的断裂韧性, 而且在室温和高温环境下断裂韧性变化不大。GAO 等^[32]研究发现: 14H 和 18R LPSO 相的强韧化机制不同, 14H LPSO 片层平行于挤压方向排列, 通过共格界面、抑制位错运动、扭结变形和载荷传递机制协同作用提高合金强韧性, 而 18R LPSO 主要通过颗粒强化的方式提高合金强度。

LPSO 相不仅对镁合金强度和韧塑性有益, 而且对镁合金疲劳性能也有所影响。SHAO 等^[33]研究了 LPSO 相对合金疲劳性能的影响机理, 发现当裂纹在其继续扩展的路径上穿过这些强化相时, 晶粒中薄的 LPSO 相使裂纹生长呈锯齿形, 这会消耗更多能量, 从而减缓裂纹的扩展速度。晶界处的块状 LPSO 结构可在一定程度上偏转或抑制疲劳裂纹扩展, 因此可提高相应镁合金的疲劳性能。需要注意的是, 日本学者 BRIFFOD 等^[34]研究了 Mg-Y-Zn 合金中 LPSO 相的含量对合金疲劳性能的影响, 他们发现, 虽然增加 LPSO 相体积分数能极大地提高材料循环屈服强度, 但对整体疲劳行为几乎没有影响; 在高应变条件下, 裂纹主要从 LPSO 面开始, 由于它的延展性低并且受到作用在其棱面上的拉伸应力高, 而在低应变条件下, 由于基体的强度低, 裂纹从 α -Mg 晶粒开始。

2.2 微合金化对含 LPSO 相镁合金力学性能的影响

微合金化是调控合金微观组织和力学性能的有效手段。近年来, 研究者主要针对 Mg-Zn-Y 和 Mg-Zn-Gd 两种含 LPSO 相镁合金, 研究了 Sn、B、Ni、Ca、Al 等合金元素^[35-38]以及 Zn、Y 摩尔比^[39]

对 LPSO 相和 W 相等主要合金相的种类、形态、数量和分布的影响, 进而研究了微合金化对合金力学性能的影响。此外, 也有研究者尝试添加 Dy、Nd 等稀土元素, 发展了新型的含 LPSO 相镁合金体系^[40-43]。这些研究进一步丰富了含 LPSO 相镁合金的微观组织, 一定程度上推动了含 LPSO 相镁合金的发展。

高俊杰^[35]研究了 Sn 元素添加对 Mg-Zn-Y 系列合金在铸态、退火态和挤压态下的显微组织和力学性能的影响, 研究发现: 添加了 Sn 元素后, 基体晶粒显著细化, 18R 型 LPSO 相长度变长, 且数量增加; 经过 500 °C 均匀退火后, 合金中的 LPSO 相由针状变为块状, LPSO 相的面积从 35% 增加到 58%。Mg₆Y₂Zn 合金挤压后屈服强度和抗拉强度分别为 280 MPa 和 370 MPa, 而含 Sn 合金的屈服强度和抗拉强度分别为 334 MPa 和 401 MPa, 且塑性几乎不受影响。研究还发现, 14H 型 LPSO 相能显著提高合金的塑性, 而 18R 型 LPSO 相则能显著提高合金的强度, 因此, 可通过合金化或者热处理等方式调控合金中 14H 型和 18R 型 LPSO 相的相对含量, 使合金获得不同的性能。马强强^[36]研究 B 元素对 Mg-Zn-Y-Mn 合金的影响, 发现把含 B 元素的 Zn-Mg-Zr-B 中间合金加入到 Mg-Zn-Y-Mn 合金中, 能够细化镁合金晶粒, 并且可以促进 18R 型 LPSO 相的生成, 抑制 W 相的析出。此外, 含 B 元素的 Zn-Mg-Zr-B 中间合金对基体合金动态再结晶过程有延迟作用, 并能够有效细化再结晶晶粒。在晶粒细化与 LPSO 相强化的共同作用下, 添加 Zn-Mg-Zr-B 中间合金的合金屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到 345 MPa、350 MPa 和 15%。LIU 等^[37]研究用 Ni 替代 Zn 对 Mg-Y-Zn 合金的组织 and 力学性能的影响。研究发现, 用 Ni 代替 Zn 后, LPSO 相和化合物的体积分数随 Ni 含量的增加而逐渐增加, 导致铸态合金屈服强度提高, 塑性变差。此外, LPSO 相的形态也逐渐由块状转变为片状。曾航航等^[38]研究 Ca 和 Al 对 Mg-Gd-Zn 合金中的 LPSO 相及力学性能的影响, 发现添加少量的 Ca 不能诱导 LPSO 相的形成, 但会促进 Mg-Gd-Zn 合金中 W 相的偏聚长大、结成网状, 经固溶处理随炉冷却后再在 390 °C 下挤压, 其综合性能达到最高; 接着在

Mg96Gd2.5Zn1Ca0.5 合金中进一步添加微量 Al 元素,发现微量 Al 元素能够同时提高 Mg-Gd-Zn 系合金强度和塑性,因为 Al 元素能诱导 Mg-Gd-Zn-Ca 合金中 W 相在铸态下直接转变为网状的 18R 型 LPSO 相,并生成 Al_2Gd 共晶化合物。周子荐^[39]研究发现: Mg-Zn-Y 合金中 Zn、Y 摩尔比与合金相的形成密切相关,且当 Zn、Y 摩尔比接近 1 时,合金中生成的 W 相会导致合金热裂倾向增加;而当 Zn、Y 摩尔比小于 1 时,生成的 LPSO 相会使得合金热裂倾向性明显降低。重庆理工大学杨明波团队^[40-43]针对 Mg-Dy-Zn-Zr 和 Mg-Y-Nd-Zr 等新合金体系,开展了较为系统而有益的探索。

3 含 LPSO 相镁合金的耐蚀性能

LPSO 相的存在不仅对镁合金的力学性能有很大影响,还显著影响合金的腐蚀性能。相对于力学性能而言,目前,国内外对含 LPSO 相镁合金的腐蚀性能的研究相对较少。关于 LPSO 相对镁合金的耐蚀性能有利还是有害这一问题,研究者针对不同

成分、不同加工工艺和不同体系的合金,往往得出不同甚至完全相反的结论。这一方面说明含 LPSO 相镁合金的腐蚀行为具有其特殊性和复杂性,另外一方面也说明目前国内外针对这类合金腐蚀行为和机理的研究还很不深入和系统。

LIU 等^[44]研究了 LPSO 相对 Mg-Gd-Zn-Zr 合金耐蚀性的影响,研究表明: LPSO 相能显著提高 Mg-Gd-Zn-Zr 合金的耐蚀性,微电偶腐蚀是合金主要腐蚀机制,局部电位和第二相体积分数决定了微电偶腐蚀的程度;进一步分析发现, LPSO 相与 $\alpha\text{-Mg}$ 基体的电位差为 243 mV,而铸态合金中共晶相与基体之间的电位差为 290 mV,因此,相对电位较低的 LPSO 相降低了微电偶腐蚀的驱动力。图 2 所示为 LIU 等^[44]提出的 LPSO 相提升合金耐蚀性的机理示意图。当暴露在 3.5%NaCl 溶液中,不管是铸态合金还是 T4 态合金,腐蚀首先都在镁基体上萌生,随后扩散直至 LPSO 相或共晶相。由于 LPSO 相相对于镁基体电位较高,所以当腐蚀前沿到达 LPSO 相时,腐蚀扩展受阻; LPSO 相的分布越连续,对腐蚀扩展的阻挡作用就越强,提高合金

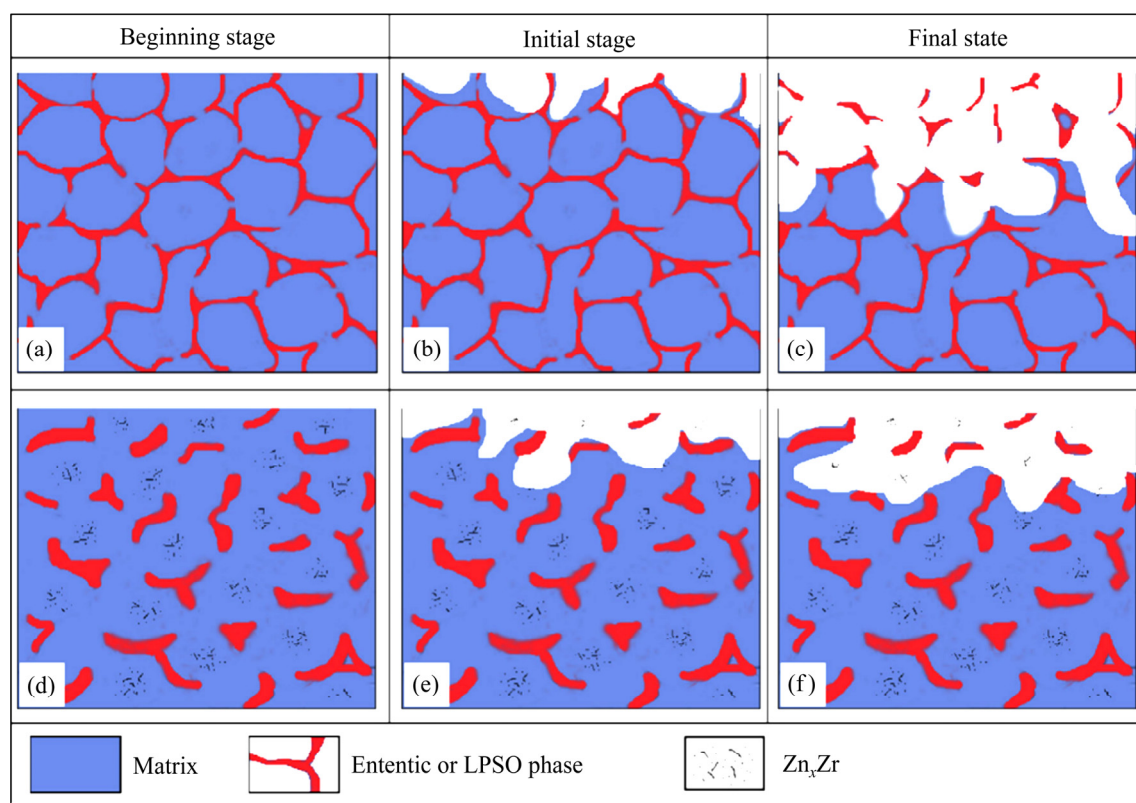


图2 不同浸泡时间铸态和 T4 处理 Mg-Gd-Zn-Zr 合金腐蚀示意图^[44]

Fig. 2 Corrosion diagrams of Mg-Gd-Zn-Zr alloys in as-cast ((a)–(c)) and T4 treatments ((d)–(f)) at different immersion time^[44]

整体耐蚀性能的能力就越强。LI 等^[45]研究了挤压态 Mg-6.5Li- x Y- y Zn 合金的显微组织和腐蚀行为,实验也证实了 LIU 等^[44]的模型,即当 LPSO 相以连续网络形式分布在晶界处时,成为基体和共晶相之间的屏障,阻止了基体的腐蚀。ZHANG 等^[46]研究表明:含有层状 14H 型 LPSO 相的挤压态 Mg-11.3Gd-2.5Zn-0.7Zr(质量分数,%)合金与不含 LPSO 相的挤压态 Mg-10.2Gd-3.3Y-0.6Zr(质量分数,%)合金相比,表现出更好的耐腐蚀性能和更加均匀的腐蚀形貌。

然而,其他研究者基于另外的合金体系,得出了与 LIU 等^[44]、LI 等^[45]和 ZHANG 等^[46]不同的结论。WANG 等^[47]将锻造 Mg-6Gd-2Y-1Zn-10.3Zr 合金在 0.1 mol/L NaCl 溶液中浸泡 120 h,发现 LPSO 相作为阴极相加速微电偶腐蚀,从而降低合金的耐腐蚀性能。张凯^[48]对比研究不同成分 Mg-Gd-Ni 合金在 3.5%NaCl 中的腐蚀行为,研究表明:Mg-Gd-Ni 合金主要由 α -Mg 和 LPSO 相组成,随着 Gd 和 Ni 元素含量的增加,LPSO 相的体积分数不断增加;LPSO 相由不连续的层片状变为连续网状,进而出

现块状 LPSO 相;在腐蚀介质中,含 Ni 元素的 LPSO 相作为阳极优先发生腐蚀,此后腐蚀主要沿着 LPSO 相扩展,最终导致合金整体耐蚀性能下降。SRINIVASAN 等^[49]研究表明:铸态 Mg-10Gd- x Zn ($x=2, 6$, 质量分数)合金中的层状 LPSO 相也会促进合金的丝状腐蚀,导致该合金的耐腐蚀性能不如一般的镁合金。ZHAO 等^[50]对比研究了铸态 $\text{Mg}_{100-3x}(\text{ZnY}_2)_x$ ($1 \leq x \leq 3$, 摩尔分数)合金在模拟体液中的降解行为。其研究发现,当 x 为 1、2、3 时,合金中的第二相主要为 18R 型 LPSO 相,其体积分数分别为 25%、48%、66%;随着 LPSO 含量的增加,电偶腐蚀加强,局部腐蚀的敏感性也增强,合金整体腐蚀速率增大。WANG 等^[51]研究了不同长周期有序堆垛组织的 Mg-Y-Zn 合金的组织表征和腐蚀行为,研究结果表明,具有单一 LPSO 相(18R 或 14H)的 Mg-Y-Zn 合金,其耐蚀性优于同时存在 18R 和 14H LPSO 结构的合金。这是由于同时存在两种类型 LPSO 相,合金内部也会产生电位差,导致作阳极的 LPSO 相被腐蚀。

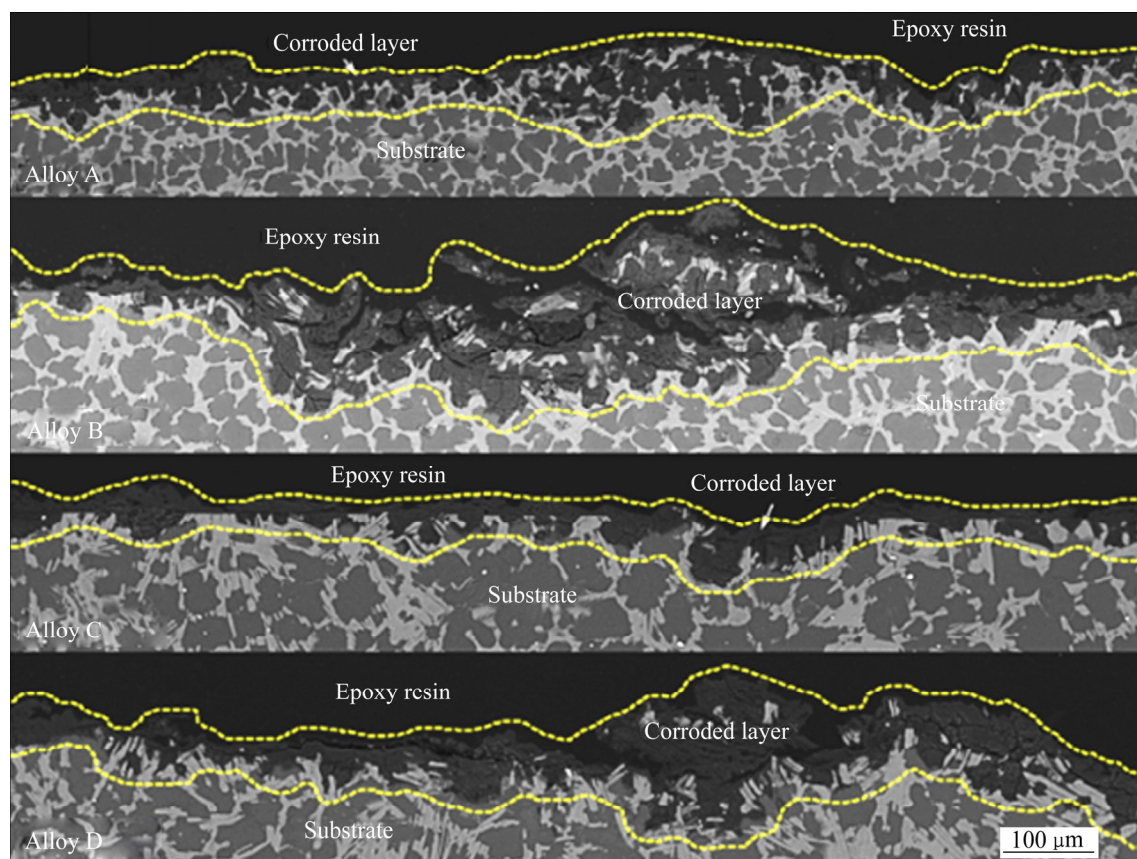


图3 Mg-Zn-Y 合金腐蚀截面形貌^[53]

Fig. 3 Corrosion cross-section morphologies of Mg-Zn-Y alloy^[53]

在给定合金成分的前提下,通过热处理、塑性加工等手段来调控合金中 LPSO 相的种类、形态和分布,可实现对含 LPSO 相镁合金耐蚀性能的调控。沈崇等^[52]研究了固溶处理对铸态 Mg-6.6Y-2.6Cu-1.2Zr 合金中 LPSO 相的分布以及对应合金耐蚀性能的影响,结果表明:随着固溶温度的升高(420~460 °C),LPSO 相逐渐减少,晶粒尺寸增大;当固溶温度为 460 °C 时,LPSO 相甚至会消失。进一步分析表明,含 LPSO 相镁合金的腐蚀行为(包括腐蚀速率和腐蚀方式)并不仅仅由 LPSO 相决定,还和合金的成分、析出相等因素有关。CHENG 等^[53]在研究 Mg-Zn-Y-Ti 合金时发现:高温热处理使铸态合金中的块状 LPSO 相转变为杆状 LPSO 相,而低温有利于晶粒内部层状相的析出;含杆状 LPSO 相的合金比含块状 LPSO 相的合金具有更均匀的腐蚀形貌和更好的耐腐蚀性(见图 3)。ZHANG 等^[54]对 Mg-5Gd-1Zn-0.6Zr(GZ51K)合金研究发现,挤压态合金表现出更慢的腐蚀速率和更均匀的腐蚀形貌,这主要与晶粒细化、LPSO 结构的形成以及富锆相的消失有关。

4 结语

含 LPSO 相镁合金因其具有良好的综合性能而备受关注。国内外对镁合金中 LPSO 相的结构类型、形成条件等科学问题已经有了较为深入和系统的研究。通过微合金化、冷热机械加工等手段,优化含 LPSO 相镁合金的微观结构、提升合金的力学和耐腐蚀性能、降低合金成本,将是很长一段时间内含 LPSO 相镁合金研究的重点。值得注意的是,目前对含 LPSO 相镁合金腐蚀行为和机理的研究还很不深入和系统,对于 LPSO 相在合金腐蚀过程中的作用还存在诸多分歧和争论,需要引起研究人员的高度关注。

REFERENCES

- [1] LIU Huan, HUANG He, WANG Ce, et al. Recent advances in lpsso-containing wrought magnesium alloys: Relationships between processing, microstructure and mechanical properties[J]. JOM, 2019, 71(9): 3314-3327.
- [2] 李昀昊. 镁合金材料的应用现状及发展趋势研究[J]. 世界有色金属, 2019(12): 149-150.
- LI Yun-hao. Study on the application status and development trend of magnesium alloy materials[J]. World Nonferrous Metals, 2019(12): 149-150.
- [3] LUKYANOVA E A, ROKHLIN L L, TABACHKOVA N Y, et al. Reversion after ageing in an Mg-Y-Gd-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 635: 173-179.
- [4] 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.
- YU Kun, LI Wen-wen, WANG Ri-chu, et al. Research, development and application of deformed magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-288.
- [5] 陈振华, 周涛, 陈鼎. 快速凝固高性能镁合金研究进展——长周期堆垛有序结构镁合金[J]. 材料导报, 2007(11): 50-55.
- CHEN Zhen-hua, ZHOU Tao, CHEN Ding. Research progress of rapidly solidified high-performance magnesium alloys—Long-cycle stacked ordered structured magnesium alloys[J]. Materials Reports, 2007(11): 50-55.
- [6] 李响, 毛萍莉, 王峰, 等. 长周期有序堆垛相(LPSO)的研究现状及在镁合金中的作用[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1182-1189.
- LI Xiang, MAO Ping-li, WANG Feng, et al. Research status of long-cycle ordered stacking phase (LPSO) and its role in magnesium alloys[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1182-1189.
- [7] LUO S Q, TANG A T, JIANG B, et al. The element features and criterion of formation of LPSO in magnesium alloys[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S4): s133-s137.
- [8] HAGIHARA K, KINOSHITA A, SUGINO Y, et al. Plastic deformation behavior of Mg97Zn1Y2 extruded alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(7): 1259-1268.
- [9] WU Y J, XU C, ZHENG F Y, et al. Formation and characterization of microstructure of as-cast Mg-6Gd-4Y-xZn-0.5Zr (x=0.3, 0.5 and 0.7wt.%) alloys[J]. Materials Characterization, 2013, 79: 93-99.
- [10] 席俊杰, 刘杰. 高性能稀土镁合金的研究及其应用[J]. 热加工工艺, 2014, 43(10): 15-19.
- XI Jun-jie, LIU Jie. Research and application of high

- performance rare earth magnesium alloy[J]. Hot working technology, 2014, 43(10): 15–19.
- [11] FUJITA N, YAMASHITA K, MATSUSHITA M, et al. B22-P-12A novel long-period structure formed in a high-pressure synthesized Mg-Zn-Yb alloy[J]. Microscopy, 2015, 64(suppl 1): i108.
- [12] 高岩, 王渠东, 赵阳, 等. Mg₉₇ZnY₂合金中LPSO结构的研究现状[J]. 材料导报, 2008, 22(1): 94–97.
GAO Yan, WANG Qu-dong, ZHAO Yang, et al. Research status of LPSO structure in Mg₉₇ZnY₂ alloy[J]. Materials Reports, 2008, 22(1): 94–97.
- [13] LIU Huan, HUANG He, SUN Jia-peng, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-RE-TM cast alloys containing long period stacking ordered phases: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2019, 32(3): 269–285.
- [14] SHINTARO Y, MICHIKI Y, YOSHIHITO K. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg-Zn-Y alloys with 14H long period ordered structure[J]. Materials Transactions, 2006, 47: 959–965.
- [15] CAO L, LIU W C, LI Z Q, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of sand-cast Mg-10Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3): 611–618.
- [16] SOMEKAWA H, ANDO D, YAMASAKI M, et al. Microstructure and mechanical properties of low-temperature wrought-processed Mg-Y-Zn alloy containing LPSO phase[J]. Materialia, 2020, 12: 100786.
- [17] LI Kai, CHEN Zhi-yong, CHEN Tao, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization behaviors of Mg-Gd-Zn alloy with LPSO phases[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 729: 894–906.
- [18] 徐志超, 冯中学, 史庆南, 等. Mg-Zn-Y合金中14H-LPSO相与W相的电子结构与弹性性能的第一性原理计算[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 1026–1031.
XU Zhi-chao, FENG Zhong-xue, SHI Qing-nan, et al. First-principles calculation of electronic structure and elastic properties of 14H-LPSO phase and W phase in Mg-Zn-Y alloy[J]. Materials Reports, 2018, 32(6): 1026–1031.
- [19] 王红梅, 王宇飞. 镁合金中的LPSO结构[J]. 材料导报, 2010, 24(Z15): 467–472.
WANG Hong-mei, WANG Yu-fei. LPSO structure in magnesium alloy[J]. Materials Reports, 2010, 24(Z15): 467–472.
- [20] 徐春杰, 田军, 陈利萍, 等. 镁合金中LPSO结构与形成机制的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(3): 131–135.
XU Chun-jie, TIAN Jun, CHEN Li-ping, et al. Research progress on the structure and formation mechanism of LPSO in magnesium alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(3): 131–135.
- [21] KAWAMURA Y, YAMASAKI M. Formation and mechanical properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ alloys with long-period stacking ordered structure[J]. Materials Transactions, 2007, 48(11): 2986–2992.
- [22] INOUE A, KAWAMURA Y, MATSUSHITA M, et al. Novel hexagonal structure and ultrahigh strength of magnesium solid solution in the Mg-Zn-Y system[J]. Journal of Materials Research, 2001, 16(7): 1894–1900.
- [23] ZHANG J S, ZHANG W B, RUAN X Q, et al. Effect of zirconium on the microstructure and mechanical properties of long period stacking ordered Mg₉₆Gd₃Zn₁ alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 560: 847–850.
- [24] KISHIDA K, NAGAI K, MATSUMOTO A, et al. Data in support of crystal structures of highly-ordered long-period stacking-ordered phases with 18R, 14H and 10H-type stacking sequences in the Mg-Zn-Y system[J]. Data in Brief, 2015, 5: 314–320.
- [25] 蒋毅, 唐壁玉. 溶质偏析对Mg-Y-Zn合金层错能的影响[J]. 广西大学学报, 2011, 36(6): 887–891.
JIANG Yi, TANG Bi-yu. The effect of solute segregation on the stacking fault energy of Mg-Y-Zn alloy[J]. Journal of Guangxi University, 2011, 36(6): 887–891.
- [26] HAGIHARA K, KINOSHITA A, SUGINO Y, et al. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy[J]. Acta Materialia, 2010, 58(19): 6282–6293.
- [27] GARCE'S, PEREZ P, CABEZA S, et al. Effect of extrusion temperature on the plastic deformation of an Mg-Y-Zn alloy containing LPSO phase using in situ neutron diffraction[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(11): 5332–5343.
- [28] XU H X, INOUE K, NAGAI Y, et al. Positron annihilation study of the Mg-Zn-Y alloys with long period stacking ordered (LPSO) structures[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 443(1): 012029.

- [29] LU Ruo-peng, WANG Jing-feng, CHEN Yong-liang, et al. Effects of heat treatment on the morphology of long-period stacking ordered phase, the corresponding damping capacities and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 639: 541–546.
- [30] MATSUDA M, ANDO S, NISHIDA M. Dislocation structure in rapidly solidified $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ alloy with long period stacking order phase[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(2): 361–364.
- [31] MINE Y, YOSHIMURA H, MATSUDA M, et al. Microfracture behaviour of extruded Mg-Zn-Y alloys containing long-period stacking ordered structure at room and elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 570: 63–69.
- [32] GAO Jun-jie, FU Jie, ZHANG Nan, et al. Structural features and mechanical properties of Mg-Y-Zn-Sn alloys with varied LPSO phases[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 768: 1029–1038.
- [33] SHAO X H, LIU H Q, YANG H J, et al. Enhanced very high cycle fatigue resistance of solution treated Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.5Zr magnesium alloy containing long-period stacking ordered phase[J]. *Materialia*, 2020, 11: 100672.
- [34] BRIFFOD F, ITO S, SHIRAIWA T, et al. Effect of long period stacking ordered phase on the fatigue properties of extruded Mg-Y-Zn alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 128: 105205.
- [35] 高俊杰. Mg-Y-Zn 系合金长周期相(LPSO)的调控与力学性能的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- GAO Jun-jie. Research on the regulation and mechanical properties of the long-term phase (LPSO) of Mg-Y-Zn alloys[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [36] 马强强. Zn-Mg-Zr-B 中间合金对 Mg-Zn-Y-Mn 合金显微组织和力学性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- MA Qiang-qiang. Effect of Zn-Mg-Zr-B master alloy on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y-Mn alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [37] LIU Jin-bei, KING Jong-yun, LIAO Hong-xin, et al. Effect of substitution of Zn with Ni on microstructure evolution and mechanical properties of LPSO dominant Mg-Y-Zn alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 773: 138945.
- [38] 曾航航, 边丽萍, 赵元亮, 等. Ca 和 Al 对 Mg-Gd-Zn 合金中的 LPSO 相及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(6): 1996–2001.
- ZENG Hang-hang, BIAN Li-ping, ZHAO Yuan-liang, et al. Effects of Ca and Al on the LPSO phase and mechanical properties in Mg-Gd-Zn alloy[J]. *Rare Metals Materials and Engineering*, 2019, 48(6): 1996–2001.
- [39] 周子荐. Mg-Zn-Y 合金凝固行为及热裂敏感性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- ZHOU Zi-jian. Research on solidification behavior and hot crack sensitivity of Mg-Zn-Y alloy[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [40] 钟罗喜, 杨明波. Mg-4Y-3Dy-0.4Zr-Zn/Gd 镁合金的铸态显微组织和拉伸性能[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(1): 99–104.
- ZHONG Luo-xi, YANG Ming-bo. As-cast microstructure and tensile properties of Mg-4Y-3Dy-0.4Zr-Zn/Gd magnesium alloy[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(1): 99–104.
- [41] 杨明波, 刘 婧, 钟罗喜. Gd 对 Mg-3Dy-2Zn-0.5Zr 镁合金铸态显微组织和力学性能的影响[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(2): 99–105.
- YANG Ming-bo, LIU Jing, ZHONG Luo-xi. Effect of Gd on the microstructure and mechanical properties of Mg-3Dy-2Zn-0.5Zr magnesium alloy as-cast[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2019, 33(2): 99–105.
- [42] 杨明波, 沈威武, 钟罗喜, 等. Zn 和 Gd 对 Mg-4.0Y-2.8Nd-0.4Zr 镁合金铸态组织和拉伸性能的影响[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(3): 143–149.
- YANG Ming-bo, SHEN Wei-wu, ZHONG Luo-xi, et al. The effect of Zn and Gd on the as-cast structure and tensile properties of Mg-4.0Y-2.8Nd-0.4Zr magnesium alloy[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(3): 143–149.
- [43] 钟罗喜, 杨明波, 袁 淑, 等. 不同固溶温度对 Mg-10.5Gd-1.0Y-1.0Zn-0.5Zr 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2019, 33(8): 90–94.
- ZHONG Luo-xi, YANG Ming-bo, YUAN Shu, et al. The effect of different solid solution temperature on the microstructure and mechanical properties of Mg-10.5Gd-1.0Y-1.0Zn-0.5Zr magnesium alloy[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2019, 33(8):

- 90–94.
- [44] LIU Jing, YANG Li-xin, ZHANG Chun-yan, et al. Role of the LPSO structure in the improvement of corrosion resistance of Mg-Gd-Zn-Zr alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 25: 648–658.
- [45] LI Jin-guang, YANG Yan, DENG Hong-ju, et al. Microstructure and corrosion behavior of as-extruded Mg-6.5Li-xY-yZn alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 823: 153839.
- [46] ZHANG X, WU Y, XUE Y, et al. Biocorrosion behavior and cytotoxicity of a Mg-Gd-Zn-Zr alloy with long period stacking ordered structure[J]. *Materials Letters*, 2012, 86: 42–45.
- [47] WANG Yu-jiao, ZHANG Yun, WANG Pan-pan, et al. Effect of LPSO phases and aged-precipitations on corrosion behavior of as-forged Mg-6Gd-2Y-1Zn-0.3Zr alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 7087–7099.
- [48] 张 凯. 含 LPSO 相 Mg-Gd-Ni 合金腐蚀特性的研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- ZHANG Kai. Research on corrosion characteristics of Mg-Gd-Ni alloy containing LPSO phase[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [49] SRINIVASAN A, HUANG Y, MENDIS C L, et al. Investigations on microstructures, mechanical and corrosion properties of Mg-Gd-Zn alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2014, 595: 224–234.
- [50] ZHAO Xu, SHI Ling-ling, XU Jian. Mg-Zn-Y alloys with long-period stacking ordered structure: In vitro assessments of biodegradation behavior[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2013, 33(7): 3627–3637.
- [51] WANG Li-sha, JIANG Jing-hua, LIU Huan, et al. Microstructure characterization and corrosion behavior of Mg-Y-Zn alloys with different long period stacking ordered structures[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(4): 1208–1220.
- [52] 沈 崇, 章晓波, 薛亚军, 等. 热处理对含 LPSO 结构 Mg-Y-Cu-Zr 镁合金组织与腐蚀行为的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(9): 137–142.
- SHEN Chong, ZHANG Xiao-bo, XUE Ya-jun, et al. Effect of heat treatment on the structure and corrosion behavior of Mg-Y-Cu-Zr magnesium alloy containing LPSO structure[J]. *Transactions of Materials Heat Treatment*, 2015, 36(9): 137–142.
- [53] CHENG Peng, ZHAO Yu-hong, LU Ruo-peng, et al. Effect of the morphology of long-period stacking ordered phase on mechanical properties and corrosion behavior of cast Mg-Zn-Y-Ti alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 226–238.
- [54] ZHANG Xiao-bo, BA Zhi-xin, WANG Zhang-zhong, et al. Effect of LPSO structure on mechanical properties and corrosion behavior of as-extruded GZ51K magnesium alloy[J]. *Materials Letters*, 2016, 163: 250–253.

Effect of long-period stacking ordered structure on mechanical properties and corrosion resistance of magnesium alloy

MOU Yu¹, MA Yan-long^{1,2}, ZHAO Xu-han¹, XI Guo-qiang¹, MA Kai³, WANG Jing-feng³

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology,
Chongqing 400054, China;

2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts, Ministry of Education,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Recently, it is found that long-period stacking ordered (LPSO) structure can be introduced into magnesium alloys through proper alloying and heat treatment processes, which can improve the process ability and mechanical properties of magnesium alloys, obviously, and also have some positive effect on the corrosion resistance of magnesium alloys. At present, a large number of basic researches on LPSO-containing magnesium alloys have been carried out at home and abroad. Although there has been relatively deep understanding on the structure and formation behavior of the LPSO phase, there are relatively few studies on the mechanical properties and corrosion resistance of LPSO-containing magnesium alloys. After a brief summary of the structure and formation behavior of the LPSO phase, the research status of the mechanical property and corrosion resistance of LPSO-containing magnesium alloys have been comprehensively reviewed in order to provide references for the development and performance control of new type LPSO-containing magnesium alloys.

Key words: magnesium alloy; long-period stacking ordered structure; mechanical properties; corrosion resistance

Foundation item: Project(CQYC201903051) supported by the Chongqing Talent Plan: Leading Talents in Innovation and Entrepreneurship, China; Project(CXQT20023) supported by the University Innovation Research Group of Chongqing, China; Project(cstc2019jcyj-zdxmX0010) supported by the Key Project of Chongqing Natural Science Foundation, China; Project(Nos.20191102008) supported by the Major Science and Technology Project of Shanxi Province, China

Received date: 2020-06-18; **Accepted date:** 2021-02-27

Corresponding author: MA Yan-long; Tel: +86-13594093263; E-mail: myl@cqut.edu.cn

(编辑 李艳红)