

合金化元素对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金组织和力学性能影响的研究进展

梁晋瑞 曹富荣
(东北大学材料科学与工程学院)

摘 要 镁合金具有比强度、比刚度高,铸造性能好等特点,是最轻的金属结构材料之一,具有良好的应用前景。近十年来,长周期堆垛有序(LPSO)结构的镁合金在 Mg-Y-Zn 三元体系中表现出独特的微观结构和优异的力学性能,受到广泛的关注。Mg-Y-Zn 合金中 LPSO 相的晶体结构以周期性层错为特征,并伴随着 Zn 和 Y 原子在特定原子面上的富集。LPSO 相由于其尺寸大,可以通过短纤维强化机制来提高合金的强度。研究表明,向含 LPSO 相的 Mg 基合金中添加不同合金元素,能够显著改善合金的组织 and 力学性能。综述了不同合金化元素对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金组织和性能的影响,进一步梳理该领域研究现状,并指出了未来发展的方向。

关键词 LPSO 相;合金化元素;Mg-Y-Zn 合金;组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Progress in Effect of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Y-Zn Alloy Containing LPSO Phase

Liang Jinrui, Cao Furong

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University)

Abstract: Magnesium alloy has the advantages of high specific strength, high specific stiffness and good casting performance. It is the lightest structural material and has a good application prospect. In recent ten years, magnesium alloys with long period stacking order (LPSO) structure have attracted more and more attention due to their unique microstructure and excellent mechanical properties in Mg-Y-Zn ternary system. The structure of LPSO phase in Mg-Y-Zn alloy is characterized by periodic stacking faults, accompanied by the enrichment of Zn and Y atoms on specific atomic planes. Because of the large size, the strength of LPSO phase can be improved by short fiber strengthening mechanism. The microstructure and mechanical properties of Mg-based alloy containing LPSO phase can be significantly improved by adding different alloying elements, which can refine the grain structure and mechanical properties of the alloy. The effects of different alloying elements on the microstructure and properties of Mg-Y-Zn alloys containing LPSO phase were reviewed, and the research status in this field was further summarized, which could provide useful references for researchers in related fields.

Key Words: LPSO Phase, Alloying Element, Mg-Y-Zn Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

镁基合金具有密度低、加工性能好、比强度高等特点,在交通运输、航空航天、汽车、医疗器械等领域具有广阔的应用前景。但与铝合金和钢相比,这些合金的强度较低并且塑性差,在很大程度上限制了其在许多领域的应用。近年来,三元 Mg-RE-X 合金(其中 RE 代表稀土元素,如 Y、Gd、Er、Dy、Tm 和 Tb;X 代表过渡元素,如 Zn、Cu、Ni 或 Co)因其独特的微观结构和优异的

室温和高温综合力学性能而备受关注^[1~6]。典型的特点是,这些合金均含有 α -Mg 晶粒和金属间相,呈现长周期堆垛有序(LPSO)结构。通过高分辨透射电镜(HRTEM)的精确表征,证实了 LPSO 相的结构为 10H、14H、18R 和 24R。在这些结构中,18R 和 14H 的 LPSO 相一直是关注的焦点^[7~13]。

LPSO 相对镁合金具有显著的强化作用。因

收稿日期:2021-03-23;修改稿收到日期:2021-04-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51334006)
第一作者简介:梁晋瑞,男,1997 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:3112605319@qq.com
通信作者:曹富荣,男,1964 年出生,研究员,沈阳(110819),E-mail:cfr-lff@163.com
引用格式:梁晋瑞,曹富荣. 合金化元素对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金组织和力学性能影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):932-937.
LIANG J R, CAO F R. Progress in effect of alloying elements on microstructure and mechanical properties of Mg-Y-Zn alloy containing LPSO phase[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):932-937.

此,LPSO 结构的改善和改性对合金的性能至关重要。研究表明,Mg-RE-Zn 合金中的 LPSO 相具有层状有序结构。通常,较低的层错能(SFE)有利于 LPSO 相的形成。合金化是控制镁合金层错和组成相的有效方法。最近,ZHAO R 等^[14]发现在 $\text{Mg}_{94}\text{Zn}_{2.5}\text{Y}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金中添加 Ca 元素不仅有利于晶粒细化,而且对 LPSO 相的改善也有较好的作用。

此外,通过计算和分析广义层错能(GSFE),ZHANG P L 等^[15]预测 Sn 降低 Mg 的 SFE,非基底滑移 GSFE 的降低,不仅提高塑性,而且促进 LPSO 相的析出。

诸多研究表明,不同元素添加对含 LPSO 相的 Mg-Y-Zn 合金性能的提高有积极作用^[16~19]。因此,为了进一步研究不同元素添加对 Mg-Y-Zn 合金组织和性能的影响,综述了不同元素添加对 Mg-Y-Zn 合金组织和性能的影响机理和影响参数。同时,通过分析不同元素添加对 Mg-Y-Zn 合金组织及性能的影响,探索多种合金元素耦合作用对合金性能的影响。

1 含 LPSO 相的 Mg 基合金研究现状

根据 Y、Zn 摩尔比,可以形成 3 种主要的三元平衡相 Mg-Zn-Y,分别是 W 相($\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2$,立方结构)、I 相($\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$,二十面体准晶结构)和 X 相(Mg_{12}YZn ,长周期堆垛有序结构)。近年来,一系列 Y、Zn 摩尔比为 2:1 的 Mg-Y-Zn 合金由于具有大的长周期堆垛有序(LPSO)结构而备受关注。一般来说,当 Y 含量高于 Zn 含量时,X 相更容易形成。由于稀土 Y 价格高,因此,限制含 Y 稀土 Mg 合金商业应用的一个主要问题是合金成本高。

NIE J F 等^[16]在研究 Mg-Y-Zn 合金过程中首次发现并提出了 18R 长周期结构相(LPSO)。随后,ABE E 等^[17]用快速凝固技术制备了具有长周期结构相的非平衡凝固 $\text{Mg}_{97}\text{Zn}_1\text{Y}_2$ 合金,该合金的屈服强度高达 600 MPa,其强化的原因是在基体中析出了一种沿着密排六方结构(hcp)的 c 轴方向呈长程有序,能抑制变形孪晶生长的 LPSO。WANG K 等^[18]对合金进行纳米压痕测试发现,LPSO 相的硬度值(HV,870 MPa)高于 α -Mg 的硬度值(570 MPa),证明 LPSO 相是一种有效的强化相。YAMASAKI M 等^[19]对 $\text{Mg}_{96.5}\text{Gd}_{2.5}\text{Zn}_1$ 合金进行普通铸造和挤压加工,获得了屈服强度为 345 MPa,伸长率为 6.9%的优异的力学性能。

MATSUDA M 等^[20]根据铸态组织是否含长周期相把 Mg-RE-Zn 系合金分为两种类型,第 1 种类型合金中的长周期堆垛结构在凝固阶段已经形成,符合这种

情况的稀土元素包括 Dy、Er、Tm、Y 及 Ho^[21,22];第 2 种类型合金中在铸态下不存在 LPSO 结构,只有固溶处理后才从过饱和固溶体中析出 14H 的长周期结构相,符合这种情况的稀土元素有 Tb 和 Gd。YU H Y 等^[23]在常规凝固的铸态 Mg-Gd-Zn 合金内部发现了层片状 14H-LPSO 结构。HUANG S 等^[24]在铸态 Mg-Gd-Zn 合金中发现了 14H-LPSO 和 18R-LPSO 相共存现象,从而对这一分类进行了修正和补充。

但是,无论哪种合金系,一些因素如冷却速率快慢、合金元素种类、热处理工艺以及挤压等对长周期结构相的产生都有很大的影响。随着对长周期结构相的深入研究,普遍认为在镁合金中共有 5 种不同的 LPSO 结构。表 1 为镁合金中 5 种类型 LPSO 结构的原子堆垛序列。其中 A,B,C 分别代表 Mg、Zn、Y 原子。数字表示堆垛层数,字母 H 为六方晶系,R 为斜方晶系。

表 1 不同类型 LPSO 结构的原子堆垛排列^[4]

Tab.1 Atom stacking arrangement of different types of LPSO structures			
堆垛类型	LPSO 结构中密排面的排列方式	a/nm	c/nm
6H	ABACAB	0.560	1.560
10H	ABACBCBCAB	0.313	2.603
14H	ABACBCBCBCABAB	1.112	3.647
18R	ACBCBCBACACACBABAB	0.321	0.521
24R	ABABABABCACACACBCBCBC	0.322	6.181

2 不同元素添加对组织性能的影响

2.1 Sn 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

长周期堆垛有序相完全受化学有序性和层错的控制,合金元素可以对 LPSO 相进行强烈的改性。添加 Sn 元素能改变 LPSO 相的形貌和体积分数,导致 Mg-Y-Zn 基合金的力学性能产生变化。GAO J J 等^[25]研究了微量 Sn 对 Mg-6Y-2Zn 合金铸态、退火态和非挤压态的 LPSO 相及其力学性能的影响。发现 18R-LPSO 相呈针状分布于晶界。同时,Sn 的加入明显影响铸态下合金中 LPSO 结构的长度和密度。退火后 18R 的含量随着针状到块状形貌的变化而增加。此外,在晶粒内和 18R 相之间都有细小的 14H-LPSO 片晶析出。与退火态无 Sn 合金相比,含 Sn 镁合金中 18R 相的面积分数由 35%提高到 58%,14H 也有一定程度的提高。挤压态合金的拉伸试验表明,含 Sn 合金的力学性能比三元合金显著提高。

此外,YE L 等^[26]研究了 Sn 对热挤压 Mg-Y-Zn 合金组织及性能的影响,发现加入 0.5%的 Sn,使合金抗拉强度提升了 10.5%,屈服强度提升了 15.6%,伸长率从 15.9%下降至 11.3%。与此同时,加入 0.5%的 Sn,合金显微硬度(HV)从 82.9 增加至 89.1。Sn 含量不

同,其对合金性能影响也不同。通过扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)分析,发现随着 Sn 含量增加,LPSO

相的数量和尺寸不断减小。此外,随着 Sn 含量增加, Sn_3Y_5 、 MgZnY 、 MgSnY 和 MgZn 颗粒析出,见图 1。

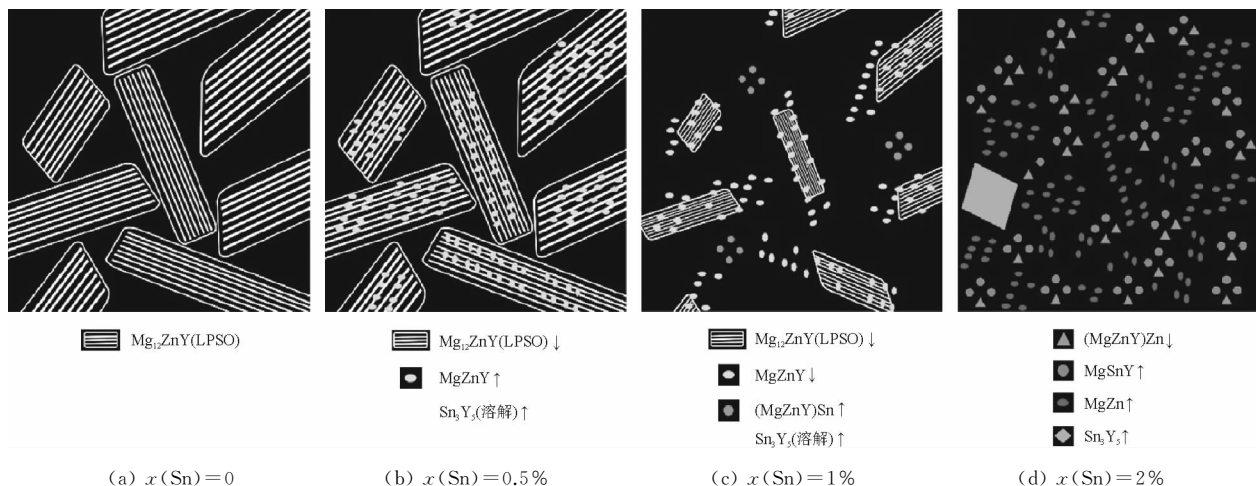


图 1 不同 Sn 加入对合金组织的影响^[26]

Fig.1 Effects of different Sn additions on the microstructure

研究表明,LPSO 相对挤压过程中 α -Mg 晶粒的动态再结晶(DRX)细化有明显的促进作用,而取向良好的 LPSO 相有效地强化了挤压合金,与短纤维强化机制基本符合。随着 LPSO 相尺寸和数量的减小,位错运动速度增大,强度降低,塑性提高。但是,Sn 摩尔分数为 1% 时, MgZnY 颗粒的尺寸和数量明显增加,LPSO 相的尺寸和数量明显减少,导致合金的强度略有下降。Sn 摩尔分数为 2% 时,由于缺少 LPSO 相的强化作用,合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和显微硬度均显著降低。

总之,在 Mg-Y-Zn 合金中添加适量的 Sn 元素,可以较好地改善 LPSO 相的含量和形貌,促进挤压态合金中 LPSO 相的析出,从而促进晶粒细化和晶粒分布均匀性,以达到强化的目的。寻找最佳 Sn 含量和合适的热处理工艺参数还需要进一步研究。

2.2 Mn 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

有研究表明,添加 Mn 后,合金晶粒更细,第二相更加致密,腐蚀产物形成膜更稳定,能够显著提高镁合金的抗腐蚀性能^[27]。但是 Mn 对含 LPSO 相的 Mg-Zn-RE 合金影响的相关报道较少。LI D 等^[28]研究了 Mn 添加对含 LPSO 相 $\text{Mg}_{95}\text{Y}_{2.5}\text{Zn}_{2.5}$ 合金的影响。发现未添加 Mn 的固溶体合金中只存在少量 LPSO 相,且随着 Mn 添加量的增加,LPSO 相的数量先增加后减少。当 Mn 质量分数为 1% 时,LPSO 相的体积分数约为 19%。当 Mn 质量分数增加到 1.5% 时,体积分数下降到 17%。随着 Mn 含量增加,共晶组织先减小后增加,与 LPSO 体积分数的变化趋势相反,另外,晶粒尺寸呈现先减小后增大的趋势。当 Mn 含量为 1.5% 时,晶粒尺寸最小(约为 $25\text{ }\mu\text{m}$),比未添加 Mn 时小 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。结果

表明,Mg-2.5Zn-2.5Y 合金中加入一定量的 Mn,可以促进 LPSO 相的形成,抑制 W 相($\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Y}_2$,立方结构)的生成,细化晶粒。

随 Mn 添加量的增加,合金的硬度呈现先升高后降低的趋势,Mn 质量分数为 1.5% 时合金的硬度最高,铸态合金硬度(HB)为 82.6,固溶态合金硬度略低,为 69。

总之,添加 Mn 元素后,尤其是加入质量分数为 1.5% 的 Mn 后,LPSO 相的体积分数提高到 17% 左右,提高了合金的强度。固溶处理后 W 相减少 5%,降低了变形过程中产生裂纹的概率,合金的晶粒尺寸明显减小,产生了细晶强化的效果。

2.3 Ca 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

在镁合金中添加 Ca 有利于组织细化,能显著提高合金的强度和塑性。此外,KISHIDA K 等^[29]还用密度理论研究了不同 LPSO 析出物的热力学稳定性,并预测 Ca 元素,特别是与 Zn 元素在形成稳定的 LPSO 相方面具有优势。因此,降低 LPSO 沉淀强化在工业应用中的成本是非常可取的。

WANG J 等^[30]研究了 Ca 对含 LPSO 相 $\text{Mg}_{94}\text{Zn}_{2.5}\text{Y}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金的影响。发现含 Ca 合金中初生 α -Mg 相的晶粒尺寸明显小于三元合金。当 Ca 摩尔分数为 0.34% 时,观察到均匀的球形晶粒,平均晶粒尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。可见,Ca 对 Mg-Zn-Y-Mn 合金的晶粒细化有很大的影响。另外,Ca 对 Mg 具有很高的生长限制因子,因为它具有很强的分离能力。Mg 中 Ca 的生长抑制因子高达 11.91,在所有合金元素中仅低于 Fe 和 Zr。因此,Ca 的加入可以明显抑制晶粒长大,从而细化晶粒,改善合金的力学性能。Ca 的添加除了具有细化晶粒的作用外,还可以诱导生成大量的 LPSO 相。当 Ca 摩尔分数

从 0 增加到 0.34% 时, LPSO 相的体积分数由 8.9% 增加到 24.8%。表 2 为合金的一些相关力学性能。可见, 随着 Ca 含量增加, 合金硬度呈现先增大后减小的趋势, 当 Ca 摩尔分数为 0.34% 时, 硬度最高。挤压后含 0.34% 的 Ca 的 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为 400 MPa、434 MPa 和 19.5%。

表 2 不同 Ca 添加对 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}$ 合金力学性能的影响^[30]

Tab.2 Effects of different Ca additions on mechanical properties of Mg-Y-Zn alloys			
<i>x</i> (Ca) / %	布氏硬度 (HB)	抗拉强度 / MPa	伸长率 / %
0	75.5	191	4.8
0.17	77.9	215	5.9
0.34	79.5	231	8.6
0.51	78.7	213	6.5
0.67	76.3	205	5.0

总之, 添加 Ca 能显著改善 Mg-Y-Zn 合金组织, 诱导 LPSO 相生成, 促进 W 相纳米颗粒的动态析出, 抑制挤压过程中的 DRX 晶粒长大。含 Ca 挤压合金优异的力学性能归因于 W 相纳米颗粒, 大量 LPSO 相和晶粒细化的协同强化效果。

2.4 Ti、Zr 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

Ti、Zr 会改变晶界 Y 和 Zn 的浓度, 对促进 LPSO 相的形成具有重要作用。HAO J Q 等^[31]研究了 Ti 对 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金 LPSO 相形成及屈服不对称性的影响, 见图 3, 加入适量的 Ti, 可以促进 LPSO 相的形成, 降低屈服不对称性。无论拉伸还是压缩, 屈服强度、抗拉强度和伸长率均随 Ti 含量的增加先增大后减小。 $Mg_{93.7}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1Ti_{0.3}$ 表现出最好的强度。然而, 0.5% 的 Ti 的加入导致了最差的屈服不对称性。这些变化归因于晶粒细化、LPSO 相增加和轴比 (*c/a*) 减小的综合作用。

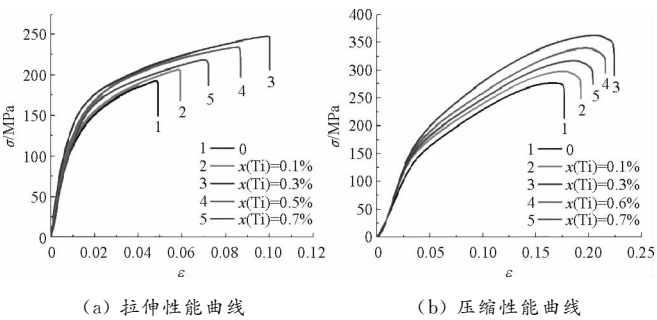


图 2 不同 Ti 元素添加对 Mg-Zn-Y-Mn 合金力学性能的影响^[31]

Fig.2 Effect of different Ti elements additions on mechanical properties of Mg-Zn-Y-Mn alloys

此前, 关于 Zr 对 Mg-Y-Zn 合金的影响已有报道, 研究者通过添加 Zr 细化了铸态 $Mg_{97}Y_2Zn_1$ 合金的组织^[32]。挤压过程中, 合金的初始形核位置主要是原始晶界和第二相。Zr 的加入促进了 DRX 的形成, 提高了

DRX 速率, 同时, Zr 的加入也提高了合金的强度和伸长率。为了进一步研究 Zr 对于含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金形变的影响, 在 $Mg_{95}Y_{2.5}Zn_{2.5}$ 合金中加入 Ti、Zr 元素后, 一方面使 α -Mg 晶粒得到细化, 另一方面促进了合金中 LPSO 相的形成^[32]。

主要是因为通过添加细化剂元素减小了合金中 α -Mg 的面积分数, 减缓了 Y、Zn 的扩散速度, 抑制其进一步聚集, 从而改变了晶界中 Y、Zn 的浓度, 进而促进了合金中 LPSO 相的形成, 抑制 W 相的形成。但是, 当 LPSO 相与 W 相的界面结合面积增加, 使界面变得连续时, 从微观角度上将不利于合金的力学性能。这说明, 决定合金力学性能的因素不仅包括强化相数量的多少, 还包括其形貌的微观和宏观的变化, 以及和其他相的界面结合状态^[32,33]。在较低的 Y、Zn 摩尔比 (摩尔比为 1) 情况下, Ti 和 Zr 的添加导致 LPSO 相含量增加, 经过挤压后, 对合金力学性能有明显改善。以 Y 含量较低的挤压 $Mg_{93.1}Y_{2.5}Zn_{2.5}Ti_{1.6}Zr_{0.3}$ 合金性能最佳, 抗拉强度从 112 MPa 提升至 356 MPa, 伸长率从 3.5% 提升至 8.2%。

总之, 添加 Ti、Zr 都会促进 LPSO 相的形成, 两种元素复合添加到 Mg-Y-Zn 合金后改变了 LPSO 相与 W 相的界面结合状态, 微观上不利于合金的性能。但是经过固溶处理和挤压后的含 Ti、Zr 合金的 18R 的 LPSO 相较多, 与 α -Mg 相之间的相界面为共格界面, 相界面稳定且不易破坏。同时 LPSO 相沿挤压方向分布, 使 α -Mg 相和 LPSO 相的界面面积增大, 从而增强了合金的强度。

2.5 B 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

在金属材料中添加 B 有益于改善合金的力学性能。作用机理为: ①在晶界优先纳米级偏析; ②相改性 (包括基体中的沉淀调节)。然而, 到目前为止, 对含 B 镁合金的强化研究还很少。特别是 B 对 LPSO 相形成的影响。因此, YANG K 等^[34]研究在 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金中加入不同量 (0、0.002%、0.003%、0.004% 和 0.01%, 质量分数, 下同) 的 Mg-B 中间合金, 研究 B 对 $Mg_{94}Zn_{2.5}Y_{2.5}Mn_1$ 合金显微组织和力学性能的影响。

发现当 B 含量从 0 增加到 0.003% 时, 晶粒更加细小、球状。然而, 随着 B 含量的增加, 晶粒有变粗大的趋势, 具有树枝状特征。当添加 0.003% 的 B 时, 均匀的球形晶粒平均尺寸为 22 μm 。MgB₂ 相是 Mg 晶粒中潜在的形核剂, 因此, B 的加入可以明显抑制晶粒长大, 细化晶粒。B 促进 LPSO 相的形成, 阻碍 W 相的形成。当 B 含量从 0 增加到 0.003% 时, LPSO 相的体积分数由 5.8% 增加到 21.9%。同时, B 含量的变化对合金的力学性能有显著影响。当 B 含量从 0 增加到 0.003%

时,经过固溶处理和挤压之后的 $\text{Mg}_{94}\text{Zn}_{2.5}\text{Y}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金的抗拉强度和塑性显著提高。

微量 B 的添加在 $\text{Mg}_{94}\text{Zn}_{2.5}\text{Y}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金挤压后,可以通过促进 14H-LPSO 相的析出,延缓动态再结晶过程,在 Mg-Y-Zn 合金中存在 W 相的情况下,B 的添加还会细化 W 相并降低其体积分数,进一步提升 Mg-Y-Zn 合金的力学性能。

2.6 Cd 对含 LPSO 相 Mg-Y-Zn 合金的影响

Cd 的加入可以通过形成外来的形核剂来细化晶粒,从而在高温下阻止晶界滑移从而提高强度,同时在镁合金中加入 Cd 后,层错能降低,有利于 LPSO 相的形成。ZHANG Y G 等^[35]系统地研究了添加 Cd 对含 α -Mg 基体、W 相和 18R-LPSO 组织的 $\text{Mg}_{94}\text{Y}_{2.5}\text{Zn}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金组织和力学性能的影响。发现微量 Cd 能有效细化 α -Mg 晶粒,促进 18R-LPSO 结构的形成,但显著抑制 W 相的生长。此外,由于 Cd 的加入,LPSO 结构和 W 相的生长模式由耦合生长转变为离异生长。Cd 的加入使合金晶粒得到明显细化,合金的抗拉强度最高为 247.5 MPa,伸长率为 16.5%。

对 Cd 在该体系中的晶粒细化和第二相演化机理进行了广泛的讨论。由于 Cd 独特的化学性质,其被用来保护其他金属不受腐蚀和生锈。与 $\text{Mg}_{94}\text{Y}_{2.5}\text{Zn}_{2.5}\text{Mn}_1$ 合金体系中其他元素相比,Cd 具有最高的电负性,而 LPSO/ α -Mg 界面的负电位最低。可以认为,在凝固过程中,Cd 原子容易扩散到 LPSO/ α -Mg 界面。根据电负性与化合物形成关系原理,电负性差越大,化合物就越容易形成。因此,可以认为 Cd 原子的扩散促进了 LPSO 相的形成。

随着 Cd 含量的增加,LPSO 相呈现先增大后减少的趋势,而 W 相呈现相反的趋势。Cd 的加入还使晶粒的成分过冷区变宽,为晶粒的成核提供了足够的过冷度,使晶粒细化。因此,添加微量 Cd 对 Mg-Y-Zn 合金组织和力学性能有明显的改善作用。与无 Cd 的合金相比,含 0.35% 的 Cd 的 Mg-Y-Zn 合金的抗拉强度和伸长分别提高了约 36% 和 146%。

3 结 语

Mg-RE-Zn 合金作为一种重要的金属材料,因其良好的阻尼性能和优异的力学性能而备受关注。该合金具有不同类型的强化相,如 I - $\text{Mg}_{30}\text{Zn}_{60}\text{RE}_{10}$ 相、W- $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{RE}_2$ 相和具有 LPSO 结构的 X- $\text{Mg}_{12}\text{ZnRE}$ 相,这些强化相可以在不同的热处理条件下通过不同的元素成分获得。Mg-Y-Zn 合金具有良好的力学性能,应用前景广阔,为了进一步研究合金化元素在 Mg-Y-Zn 合金

中的应用,可以从以下 3 个方面开展深入研究。

(1)LPSO 相的体积分数和排列方式对 Mg-Y-Zn 基合金的组织和性能起着至关重要的作用。但是合金化元素添加对 LPSO 相的影响机制研究不够充分和明确,特别是各种元素的交互作用和对材料各类性能的影响机制都需要进一步研究。

(2)已有研究多数以合金化元素的含量为变量,探讨元素添加对经过一种工艺处理的 Mg-Y-Zn 合金的影响。采用不同加工方式和热处理工艺与不同含量合金化元素添加进行复合处理,进一步改善合金的组织和性能,有待进一步开展研究。

(3)含其他合金化元素的 Mg-Y-Zn 铸造及变形合金的相关热力学数据不足,导致部分含 LPSO 相的 Mg-Y-Zn 基合金的成分设计受阻。含 LPSO 相的 Mg-Y-Zn 基合金的研究应与热力学、动力学和第一性原理结合,形成含 LPSO 相的 Mg-Y-Zn 基合金的完整体系。

参 考 文 献

- [1] GARCES G, PEREZ P, CABEZA S, et al. Reverse tension/compression asymmetry of a Mg-Y-Zn alloys containing LPSO phases[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A647: 287-293.
- [2] LI K, INJETI V S Y, MISRA R D K, et al. The contribution of long-period stacking-ordered structure (LPSO) to high strength-high ductility combination and nanoscale deformation behavior of magnesium-rare earth alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A713: 112-117.
- [3] KIM J, KO W S, SANDLOEBES S, et al. The role of metastable LPSO building block clusters in phase transformations of an Mg-Y-Zn alloy[J]. Acta Materialia, 2016, 112: 171-183.
- [4] 潘龙伟. Al 对长周期有序堆垛结构增强的 Mg-Y-Zn-Mn 合金组织和性能的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- [5] HAGIHARA K, OKAMOTO T, IZUNO H, et al. Plastic deformation behavior of 10H-type synchronized LPSO phase in a Mg-Zn-Y system[J]. Acta Materialia, 2016, 109: 90-102.
- [6] JIANG M, ZHANG S, BI Y D, et al. Phase equilibria of the long-period stacking ordered phase in the Mg-Ni-Y system[J]. Intermetallics, 2015, 57: 127-132.
- [7] ABE E, ONO A, ITOI T, et al. Polytypes of long-period stacking structures synchronized with chemical order in a dilute Mg-Zn-Y alloy[J]. Philosophical Magazine Letters, 2011, 91: 690-696.
- [8] YIN S M, WANG C H, DIAO Y D, et al. Influence of grain size and texture on the yield asymmetry of Mg-3Al-1Zn alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 29-34.
- [9] ZHANG D X, TAN Z, HUO Q H, et al. Dynamic recrystallization behaviors of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy with different morphologies and distributions of LPSO phases[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A715: 389-403.
- [10] 李康宁, 张英波, 汪煜凡, 等挤压 Mg-4.5Zn-0.75Y 合金的热变形行为[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(2): 66-73.
- [11] ZHOU X J, YAO Y, ZHANG J, et al. Improved workability for Mg-Y-Zn alloys via increased volume fraction of block LPSO pha-

- ses[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A794: 139 934-139 939.
- [12] FEKETE K H, DROZDENKO D, CAPEK J, et al. Hot deformation of Mg-Y-Zn alloy with a low content of the LPSO phase studied by in-situ synchrotron radiation diffraction[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 199-209.
- [13] GAO J J, FU J, ZHANG N, 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: 1 029-1 038.
- [14] ZHAO R, WANG J, ZHANG J S, et al. Enhanced performance of Mg-Zn-Y-Mn alloy via minor Ca addition[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(12): 1-11.
- [15] ZHANG P L, ZHAO Y H, LU R P, et al. Microalloying effect of Sn on phase transformation during heat treatment in Mg-Y-Zn-Zr alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32 (5): 550-558.
- [16] NIE J F, ZHU Y M, MORTONA J. On the structure, transformation and deformation of long-period stacking ordered phases in Mg-Y-Zn alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, 45A(8): 3 338-3 348.
- [17] ABE E, KAWAMURA Y, HAYASHI K, et al. Long-period ordered structure in a high-strength nanocrystalline Mg-1% Zn-2% Y alloy studied by atomic resolution Z-contrast STEM[J]. Acta Materialia, 2002, 50(15): 3 845-3 857.
- [18] WANG K, WAN J F, HUANG S, et al. Enhanced mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy by tailoring the morphology of long period stacking ordered phase[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A733: 267-275.
- [19] 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]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 53(7): 799-803.
- [20] MATSUDA M, LI S, KAWAMURA Y, et al. Interaction between long period stacking order phase and deformation twin in rapidly solidified $Mg_{97}Zn_1Y_2$ alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A386: 447-452.
- [21] YI J X, TANG B Y, CHEN P, et al. Crystal structure of the mirror symmetry 10H-type long-period stacking order phase in Mg-Y-Zn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 669-674.
- [22] WANG J F, SONG P F, GAO S, et al. Effects of Zn on the microstructure, mechanical properties, and damping capacity of Mg-Zn-Y-Zr alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528: 5 914-5 920.
- [23] YU H Y, YAN H G, CHEN J H, et al. Effect of minor Gd addition on microstructures and mechanical properties of the high strain-rate rolled Mg-Zn-Zr alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 586: 757-765.
- [24] HUANG S, WANG J F, HOU F, et al. Effect of Gd and Y contents on the microstructural evolution of long period stacking ordered phase and the corresponding mechanical properties in Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A612: 363-370.
- [25] GAO J J, CHEN Y, WANG Y. Effect of Sn element on the formation of LPSO phase and mechanical properties of Mg-6Y-2Zn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A 711: 334-342.
- [26] YE L, LIU Y, ZHAO D S, et al. Effects of Sn on the microstructure and mechanical properties of a hot-extruded Mg-Zn-Y-Sn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A724: 121-130.
- [27] ZHANG J X, ZHANG J S, HAN F, et al. Modification of Mn on corrosion and mechanical behavior of biodegradable $Mg_{88}Y_4Zn_2Li_5$ alloy with long-period stacking ordered structure[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 42: 130-142.
- [28] LI D, ZHANG J S, QUE Z P, et al. Effects of Mn on the microstructure and mechanical properties of long period stacking ordered $Mg_{95}Zn_{2.5}Y_{2.5}$ alloy[J]. Materials Letters, 2013, 109: 46-50.
- [29] KISHIDA K, NAGAIA K, MATSUMOTO A, et al. 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]. Acta Materialia, 2015, 99: 228-239.
- [30] WANG J, ZHANG J S, ZONG X M, et al. Effects of Ca on the formation of LPSO phase and mechanical properties of Mg-Zn-Y-Mn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A648: 37-40.
- [31] HAO J Q, ZHANG J S, XU C X, et al. Effects of Ti addition on the formation of LPSO phase and yield asymmetry of Mg-Zn-Y-Mn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A735: 99-103.
- [32] WU S Z, MA Y B, ZHANG J S, et al. Effect of Ti and Zr combined modification on microstructures and mechanical properties of $Mg_{95}Y_{2.5}Zn_{2.5}$ alloy containing LPSO and W phases[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(7): 1-10.
- [33] CHENG P, ZHAO Y H, LU R P, et al. Effect of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of cast Mg-Gd-Y-Zn alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A708: 482-491.
- [34] YANG K, ZHANG J S, ZONG X M, et al. The influence of minor boron on the precipitation behavior of LPSO phase and dynamic recrystallization in the $Mg_{94}Y_{2.5}Zn_{2.5}Mn_1$ alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A705: 257-264.
- [35] ZHANG Y G, LIU W, ZHANG J S, et al. Influence of micro-alloying with Cd on growth pattern, mechanical properties and microstructure of as-cast $Mg_{94}Y_{2.5}Zn_{2.5}Mn_1$ alloy containing LPSO structure[J]. Materials science and Engineering, 2019, A748: 294-300.

(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