

超轻Mg-Li合金的合金化和塑性变形研究进展

孙月花 张帆 任建 宋广生

(安徽工业大学材料科学与工程学院, 马鞍山 243002)

摘要 Mg-Li合金具有低密度、高比强度和比刚度、良好的成形性、优异的电磁屏蔽性等特性,是航空航天、武器装备、3C产业等领域理想的减重材料。对Mg-Li合金进行了简单概述,重点介绍了合金元素和塑性变形对Mg-Li合金组织与性能的影响,总结了Mg-Li合金的变形组织,探讨了Mg-Li合金研究中存在的问题及发展方向。

关键词 Mg-Li合金;合金化;塑性变形;组织;进展

中图分类号 G353.11;TG146.22

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.Z20240002

Research Progress in Alloying and Plastic Deformation of Ultralight Mg-Li Alloy

SUN Yuehua, ZHANG Fan, REN Jian, SONG Guangsheng

(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)

Abstract: Mg-Li alloy has become an ideal weight-reducing material in the fields such as aerospace, weapons and equipment, and 3C industry due to the low density, high specific strength and stiffness, well formability, and excellent electromagnetic shielding performance. Mg-Li alloy was briefly introduced, and effects of alloying and plastic deformation on microstructure and properties of Mg-Li alloy were emphasized. The deformation texture of Mg-Li alloy was summarized, and the problems and development directions in the research of Mg-Li alloys were explored.

Key Words: Mg-Li Alloy, Alloying, Plastic Deformation, Texture, Progress

Mg-Li合金是目前最轻的金属结构材料,具有较高的比强度和比刚度、优异的阻尼性能、良好的电磁屏蔽性能以及较弱的各向异性等特点,在航空航天、医疗器械、3C产品等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。随着能源短缺加剧,轻量化成为各领域的迫切需求和发展趋势。Mg合金由于低密度、丰富原料来源和优良的综合性能,被誉为21世纪最具有发展潜力的绿色工程材料^[4]。与普通Mg合金相比,Mg-Li合金具有更低的密度和更好的加工变形能力。因此,Mg-Li合金近年来成为各领域理想的轻量化材料。

Li的晶体结构为体心立方(bcc),在Mg合金中添加Li可降低Mg晶格的 c/a 轴比并改变合金的相组成和晶体结构,从而显著改善Mg-Li合金的塑性变形能力。由Mg-Li二元合金相图可知^[5],当Li含量低于5.7%(质量分数)时,Mg-Li合金为 α -Mg单相合金,其晶体结构为密排六方(hcp)结构;当Li含量高于10.3%时,Mg-Li合金为 β -Li单相合金,其晶体结构为体心立方(bcc)结构;当Li含量为5.7%~10.3%时,Mg-Li合金为 α -Mg+ β -Li双相合金,其晶体结构为

hcp+bcc结构。SUN Y H等^[6]发现Mg-Li合金中 α -Mg相的 c/a 轴比和 β -Li相的晶格常数 a 都随Li含量的增加而降低。此外,Mg-Li合金具有较好的焊接性能,焊接时直接用本体材料就可达到所需的焊接性能。Mg-Li合金在低温下表现出良好的抗冲击性能且可保持较高的塑性。然而,Mg-Li合金的绝对强度低且时效强化效果不明显严重制约了其在高端装备轻量化结构的广泛应用。

本研究对Mg-Li合金进行概述,重点介绍合金元素和塑性变形对Mg-Li合金组织与性能的影响,总结Mg-Li合金的变形组织,探讨Mg-Li合金研究中存在的问题及发展方向,旨在为Mg-Li合金的应用提供参考。

1 合金化对Mg-Li合金的影响

合金化是改善Mg-Li合金力学性能最简单且有效的方法之一。合金元素可固溶在合金基体中产生固溶强化效应,也可与基体元素反应生成金属间化合物产生第二相强化效应,从而达到提高合金力学性能的目的。

收稿日期:2024-04-15;修订日期:2024-06-16

基金项目:安徽省自然科学基金青年基金资助项目(2208085QE124);安徽省高等学校自然科学研究重点基金资助项目(KJ2021A0394)

第一作者简介:孙月花,女,1990年出生,讲师,E-mail: sunyuehua1008@126.com

通信作者:任建,男,1992年出生,讲师,E-mail: renjianahut@126.com

引用格式:孙月花,张帆,任建,等.超轻Mg-Li合金的合金化和塑性变形研究进展[J].特种铸造及有色合金,2025,45(3):321-333.

SUN Y H, ZHANG F, REN J, et al. Research progress in alloying and plastic deformation of ultralight Mg-Li alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(3): 321-333.

1.1 Al元素对Mg-Li合金的影响

Al是Mg-Li合金中最常见的合金元素之一。根据Mg-Al二元合金相图^[7],Al在Mg中的固溶度较大,在共晶温度438℃下最大固溶度可达12.7%。含Al的Mg合金由于固溶度随温度的降低变化明显,可进行热处理强化。此外,Al的密度较低(2.702 g/cm³),Al合金化有利于保持Mg-Li合金的低密度。

JACKSON JH等^[8]研究了Al含量对Mg-4Li(α -Mg单相)、Mg-7Li(α -Mg+ β -Li双相)和Mg-11Li(β -Li单相)挤压态合金力学性能的影响,发现Al对3种合金力学性能的影响趋势相似。随着Al含量增加,Mg-Li合金的屈服强度和抗拉强度提高,而塑性降低。当Al含量高于6%时,Mg-Li合金的强度随Al含量的增加提高并不明显,但伸长率明显降低。因此,Mg-Li-Al合金中Al添加量一般都不高于6%。Mg-Li-Al系合金中可能存在的金属间化

合物有Mg₁₇Al₁₂、MgLi₂Al、AlLi等。其中 β -Mg₁₇Al₁₂相和MgLi₂Al相属于强化相,而AlLi相则为软化相。SUN YH等^[6]和FEI P F等^[2]发现AlLi相在 α -Mg基体和 β -Li基体中分别以细丝状和块状存在,热变形后,细丝状AlLi相被破碎呈短棒状或颗粒状,而块状AlLi相仍保持原貌。SUN YH等^[9]在 β -Li基体中观察到纳米级的颗粒状MgLi₂Al相,这些颗粒可以单独存在,也可串联成细线状,热挤压后颗粒状MgLi₂Al串联成线性沿 β -Li基体的晶界分布。图1为Mg-Li-Al-Zn合金中观察到的AlLi相和MgLi₂Al相。已有研究表明,在高Li含量的Mg-Li-Al合金中存在相转变 β -Li \rightarrow MgLi₂Al \rightarrow AlLi^[10]。亚稳相MgLi₂Al在室温下就可发生过时效转变为AlLi相,这是Mg-Li-Al系合金组织性能不稳定的主要原因。通常,添加微量的Ag、Cu、Ca、Ce或其他稀土元素可改善合金的显微组织并提高其力学性能稳定性^[1,11-15]。

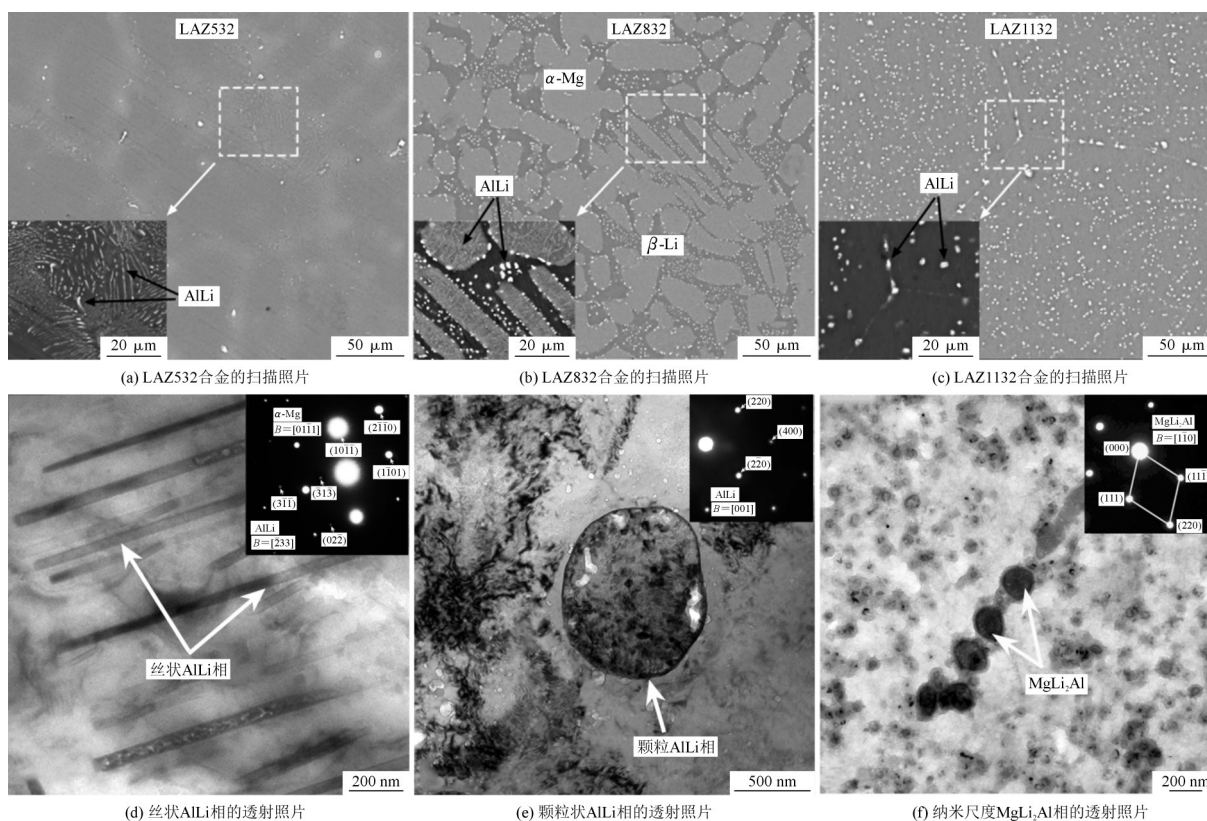


图1 Mg-Li-Al-Zn合金中AlLi相和MgLi₂Al相的形貌^[9,16]

Fig.1 Morphologies of AlLi phase and MgLi₂Al phase in Mg-Li-Al-Zn alloy^[9,16]

LENTZ M等^[17]采用原位能谱同步辐射X射线衍射研究了Mg-Li-(Al)合金的变形行为,发现Al的添加可提高合金在拉伸和压缩试验中的屈服应力和加工硬化率,这主要是因为Al的加入增加了基面<a>、柱面<a>和棱柱面<c+a>滑移所需的临界剪切应力,并降低了{10 $\bar{1}$ 2}<10 $\bar{1}$ 1}拉伸孪生的激活应力。HAN J等^[18]采用第一性原理研究了Li和Al合金化对Mg合金堆垛层错能的影响,发现Li合金化可提高Mg合金的堆

垛层错能,有利于位错的非基面滑移;而Al合金化则使Mg合金的堆垛层错能降低,有利于位错的基面滑移。ZOU Y等^[19]通过对Mg-11Li-6Al合金进行固溶处理,使得合金的力学性能和耐蚀性得到显著提高,在400℃时获得最高屈服强度(203 MPa)和抗拉强度(241 MPa),这主要归因于固溶强化和第二相(MgLi₂Al和AlLi)溶解的协同作用,但由于晶粒尺寸的增加导致合金耐蚀性下降。ZHAO D等^[20]研究了Al元素对含

LPSO相的Mg-Y-Zn-Li合金组织、力学性能和阻尼性能的影响,发现Al的添加使挤压态Mg-5Y-2Zn-2Li-0.5Al合金呈现出由细小动态再结晶晶粒和粗大变形晶粒组成的双峰型晶粒结构,并伴有14H LPSO相、 $Al_3(Y,Zn)$ 颗粒和纳米AlLi析出相的形成,合金的屈服强度(229 MPa)、抗拉强度(312 MPa)、伸长率(10.9%)和阻尼性能都得到了提高,认为力学性能的提高归因于晶界强化、应变强化和析出强化的共同作用,阻尼性能的提高是由于 $Al_3(Y,Zn)$ 与 α -Mg相之间的非共格界面被激活,晶界滑移加剧所导致的结果。

1.2 Zn元素对Mg-Li合金的影响

Zn和Mg的原子半径接近,且具有相同的密排六方(hcp)晶体结构,可与Mg形成连续固溶体。根据Mg-Zn二元相图可知^[7],Zn在Mg中的固溶度较大,在共晶温度(340 °C)下最大固溶度可达6.2%,且随温度降低固溶度变化明显,可产生时效强化。但Zn的密度较高(7.14 g/cm³),为保持Mg-Li合金轻质的优势,Zn的加入量不宜过高。

JACKSON J H等^[8]研究了Zn含量对不同Li含量的Mg-Li合金力学性能的影响,发现Zn对Mg-Li合金力学性能的影响与Al相似,即Mg-Li合金的强度随Zn含量的增加而提高,但伸长率呈下降趋势。不同的是

Zn对Mg-Li合金的塑性损害较小,而单位质量的强化效果却比Al要差。与Mg-Li-Al系合金相似,高Zn含量的Mg-Li-Zn系合金中也存在亚稳相MgLi₂Zn转变为稳定相MgLiZn的相转变,易发生过时效,从而导致合金的组织 and 性能稳定性较差^[21]。JI H等^[22]研究了Mg-Li-Zn(-Er)合金中的时效硬化和时效软化效应,发现Mg-10Li-5Zn合金的时效强化来自于半共格(Mg,Li)₃Zn相的析出,时效软化则是(Mg,Li)₃Zn相的粗化和Li、Zn原子逐渐替换Mg原子的结果。Er添加后,通过微量Er原子在基体中的固溶和Mg-Zn-Er相的形成显著延迟Mg-10Li-5Zn合金的时效软化。图2为Mg-Li-Zn合金中的MgLiZn相和(Mg,Li)₃Zn相的透射照片及电子衍射斑点。LOU W X等^[23]研究了超轻Mg-Li-Zn合金中Laves相的多样性析出行为,发现峰时效合金中存在垂直于基面的棒状和板条状析出相,以及平行于基面的盘状析出相,且时效后期棒状和板条状非基面相将完全转变为盘状基面相。3种析出相均以C15型的(Mg,Li)Zn₂的Laves结构为主,而非普遍认为的MgLiZn相。该研究证实了C15 Laves结构主导的(Mg,Li)Zn₂析出相不仅可以在低能的基面上析出,还可以在垂直于基面的柱面上形成,有望设计出基于非基面析出强化的轻质高强Mg-Li-Zn系合金。

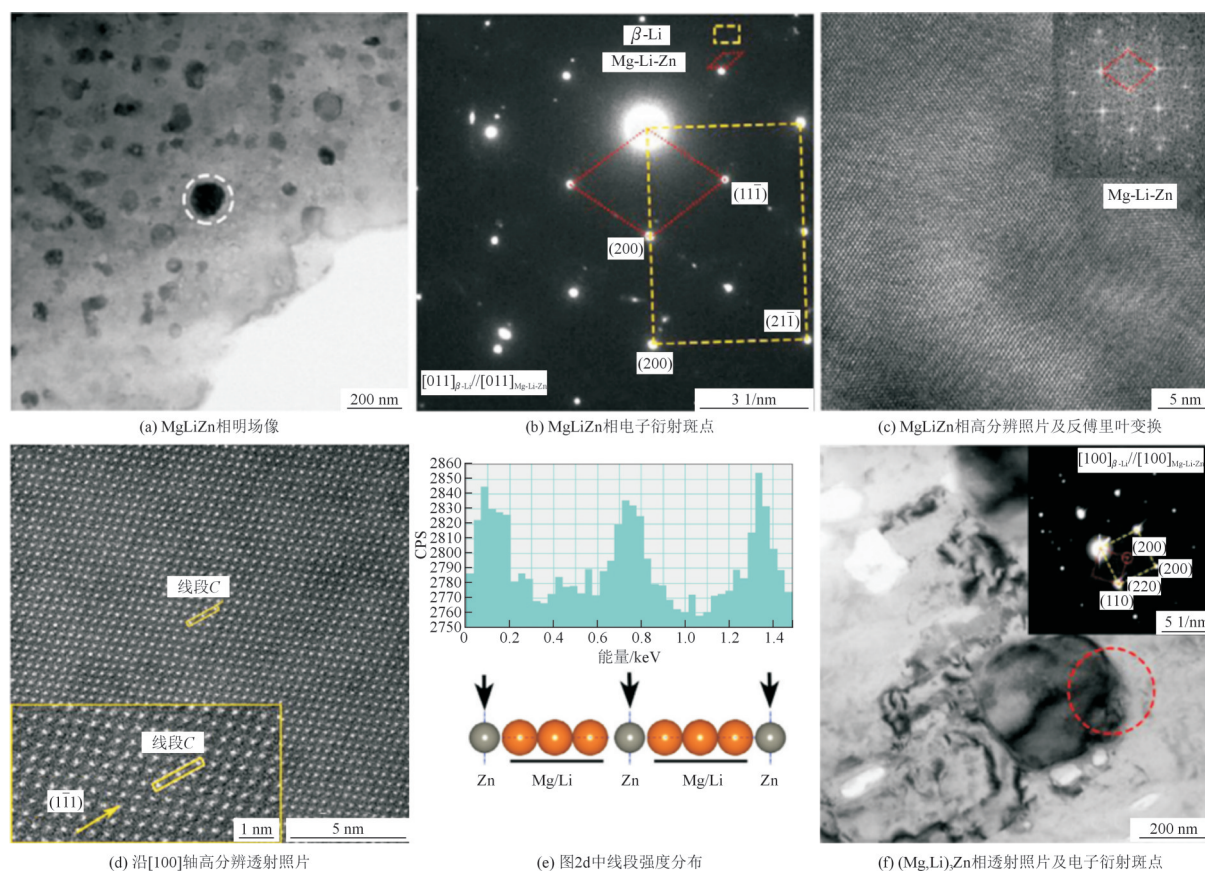


图2 Mg-Li-Zn合金中的MgLiZn相和(Mg,Li)₃Zn相的透射照片及电子衍射斑点^[22]

Fig.2 TEM images and electron diffraction spots of MgLiZn phase and (Mg,Li)₃Zn phase in Mg-Li-Zn alloy^[22]

1.3 Si元素对Mg-Li合金的影响

Si是一种常见的低价非金属元素。由Mg-Si二元相图可知, Si在Mg中的固溶度极小, 主要以Mg₂Si形式存在。通常, Mg-Li合金中Si的添加以Al-Si共晶形式加入, 其强化效果优于单一Al元素。ZHANG C等^[24]研究了Al-Si共晶对不同Li含量Mg-Li合金的组织与性能的影响, 发现3%(Al-Si)共晶的添加除了使合金中生成Mg₂Si强化相外, 分别在Mg-4Li、Mg-8Li和Mg-12Li合金中生成Al₃Li、AlLi和Li₃Al₂相。ZHAO Z L等^[25-27]系统研究了Al-Si共晶对α单相Mg-4Li合金、α+β双相Mg-8Li合金、β单相Mg-12Li

合金的组织与力学性能的影响。发现在α单相Mg-4Li合金中添加Al-Si共晶可生成Al₃Li和Mg₂Si强化相(见图3), 且Mg₂Si相的存在可抑制晶粒长大, 因此Al-Si共晶强化Mg-4Li合金是第二相强化和细晶强化的共同作用的结果。在α+β双相Mg-8Li合金和β单相Mg-12Li合金中添加Al-Si共晶, 析出相为AlLi软化相和Mg₂Si强化相, 当Al-Si共晶添加量分别为5%和7%时, 合金的综合力学性能达到最佳。当Al-Si共晶添加过量时, 脆性强化相Mg₂Si出现偏聚现象, 导致合金的抗拉强度和伸长率降低。表1为部分Mg-Li-(Al-Si)合金的力学性能^[24-28]。

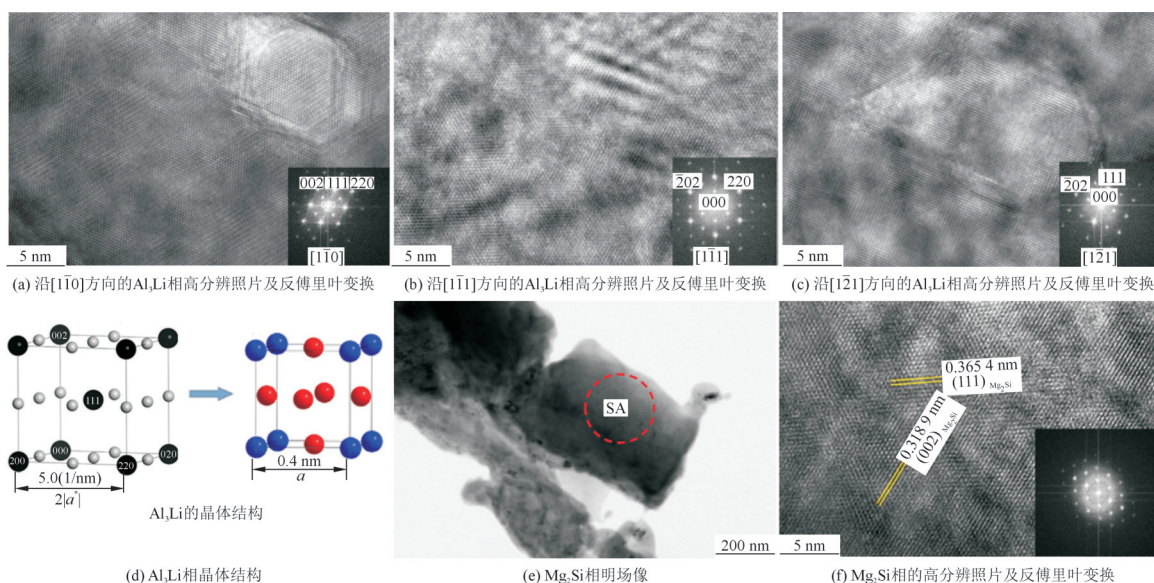


图3 Mg-4Li-3(Al-Si)合金中的Al₃Li相和Mg₂Si相的明场像和高分辨照片^[25]

Fig.3 Bright field images and high-resolution images of Al₃Li phase and Mg₂Si phase in Mg-4Li-3(Al-Si) alloy^[25]

表1 Mg-Li-(Al-Si)合金的力学性能^[24-28]

Tab.1 Mechanical properties of Mg-Li-(Al-Si) alloy^[24-28]

合金	试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Mg-xLi-3(Al-Si) (热轧退火态)	Mg-4Li-3(Al-Si)	191	249	6.3
	Mg-8Li-3(Al-Si)	168	210	11.6
	Mg-12Li-3(Al-Si)	149	173	26.0
Mg-4Li-x(Al-Si) (热轧态)	Mg-4Li	115	143	17.1
	Mg-4Li-3(Al-Si)	220	253	11.9
	Mg-4Li-6(Al-Si)	251	259	10.7
Mg-7Li-x(Al-Si) (挤压退火态)	Mg-7Li	148	168	11.0
	Mg-7Li-3(Al-Si)	192	250	22.0
Mg-8Li-x(Al-Si) (热轧态)	Mg-8Li	115	142	21.0
	Mg-8Li-2(Al-Si)	160	200	21.0
	Mg-8Li-3(Al-Si)	167	210	12.9
	Mg-8Li-4(Al-Si)	184	235	13.5
	Mg-8Li-5(Al-Si)	189	240	12.5
	Mg-8Li-6(Al-Si)	204	255	4.5
Mg-12Li-x(Al-Si) (热轧退火态)	Mg-12Li	75	105	27.0
	Mg-12Li-3(Al-Si)	142	167	27.0
	Mg-12Li-7(Al-Si)	173	196	27.0
	Mg-12Li-9(Al-Si)	169	181	9.9

1.4 Ag元素对Mg-Li合金的影响

金属Ag可抑制Mg-Li合金过时效, 改善合金的组织稳定性和性能稳定性。Ag在Mg和Li中均有较大的固溶度(分别约为15%和40%), 且固溶度随温度的降低而减小。因此, Ag在Mg-Li合金中的强化作用主要以固溶强化为主。Ag在Mg-Li合金中可与Mg形成Mg₄Ag、Mg₃Ag和MgAg相, 与Li可形成AgLi相, 这些相都可作为稳定强化相提升合金的强度。此外, Ag还在改善Mg-Li-Al和Mg-Li-Zn系合金的组织稳定性和性能稳定性方面具有显著作用, 可以抑制该类合金的过时效。楼阳^[29]研究表明, 在Mg-Li-Al-Zn合金中添加Ag元素会在晶界生成MgLi₂Ag相, MgLi₂Ag相的存在具有削弱主相、细化晶粒、圆滑晶界、弱化基面织构和激活非基面滑移的作用, 从而导致合金室温和高温力学性能提升, 而过量Ag(1.0%)的添加对合金强度优化不明显甚至会降低其伸长率。由于Ag价格高, 限制了Ag在Mg-Li合金中大规模使用。因此, 一般情况下加入Ag的主要目的不

在于提高Mg-Li合金的强度,而是用于改善合金组织和性能稳定性。

1.5 Zr元素对Mg-Li合金的影响

Zr是一种常用的晶粒细化剂,对Mg-Li合金也同样有明显的细化效果,有利于改善合金的组织 and 力学性能。刘旭贺等^[30]研究了Zr对Mg-11Li-3Al合金显微组织和性能的影响,发现Zr的添加产生明显的晶粒细化效果,挤压后Mg-11Li-3Al-0.1Zr合金的晶粒尺寸(30 μm)仅约为Mg-11Li-3Al合金(110 μm)的1/4。此外,Zr的添加可与合金中的Al元素结合形成Al₃Zr相,显著提高了合金的强度。CHEN B等^[31]认为Zr的添加可延迟Mg-Li合金的动态再结晶,但Mg-Li-Al合金中添加0.7%的Zr会形成大量的Al₂Zr和Al₃Zr相,从而降低固溶在基体中的Al含量,导致合金的伸长率下降且固溶强化效应减弱。因此,Zr作为晶粒细化剂添加量不宜过高,一般以0.1%~0.3%为宜。当Zr含量过高时,Zr对元素扩散的阻碍作用增大,导致热处理效果不佳,从而降低合金的强度和伸长率。

1.6 RE元素对Mg-Li合金的影响

向镁合金中添加微量稀土元素具有净化熔体、晶粒强化、固溶强化、析出强化、改善铸造性能和加工性能、提升热稳定性等作用,从而改善合金的力学性能和耐蚀性能。CUI C L等^[1]发现Y可与Al生成Al₂Y相,减少AlLi软化相的析出;当Y含量为0.8%时,LAZ532合金的晶粒尺寸最小且抗拉强度达到最高值。ZHAO J等^[32]研究了Y含量对双相LAZ832合金显微组织和力学性能的影响,发现LAZ832-0.5Y合金具有最佳的抗拉强度(218.5 MPa)和伸长率(16.9%),这主要归因于Y元素对合金的晶粒细化和第二相(Al₂Y)强化作用。ZHU T L等^[33]在LAZ532合金中复合添加Y和Nd元素,发现合金中主要存在α-Mg、AlLi、Al₂Y和Al₁₁Nd₃相。Y和Nd具有协同作用,当Y和Nd的含量分别为1.2%和0.8%时,晶粒细化效果最好且合金的抗拉强度(231 MPa)和伸长率(16%)达到最大值。GU M Y等^[34-35]发现Y和Nd元素可抑制双相Mg-Li合金中α-Mg相和β-Li相的微电偶腐蚀,使合金的腐蚀氧化膜更加致密,有利于提高Mg-Li合金的耐蚀性。稀土Ce在Mg-Li-Al合金中同样是以Al₂Ce相的形式存在,Ce也具有细化晶粒、改善显微组织、提高力学性能和耐蚀性的作用^[36-37]。HUANG Y C等^[38]研究了Zn和Gd含量及其配比对Mg-8Li合金组织和力学性能的影响,发现挤压后合金的强度和塑性均有较大提高,屈服强度和抗拉强度随Zn和Gd含量的增加而增大,其中Mg-8Li-8Zn-2Gd合金的屈服强度为274 MPa,抗拉强度为

283 MPa,伸长率为39.9%,表现出最佳的综合性能,这主要归因于双峰结构强化(β-Li的细晶强化和α-Mg的粗晶组织强化)和第二相弥散强化。SUN Y H等^[39]采用Gd合金化和热挤压相结合的方法提升Mg-8Li-3Al-2Zn合金的耐腐蚀性能,发现LAZ832-1.0Gd合金具有最佳的耐腐蚀性能,这主要归因于Al₂Gd相的形成、AlLi相的减少和破碎,以及含有Gd₂O₃的致密氧化膜的形成。JI H等^[40]研究了Er含量对Mg-10Li-5Zn合金组织与力学性能的影响,发现Er的添加显著细化铸态合金的晶粒尺寸,合金中形成以W相(Mg₃Zn₃Er₂)为主的Mg-Zn-Er相,并且Mg-Li-Zn相减少。W相的尺寸随着Er含量的增加而增大,分布于晶界的粗大W相不利于合金强度提升。当Er含量为0.5%时,合金获得最佳的力学性能,抗拉强度为198 MPa,屈服强度为223 MPa,伸长率为14.7%。当挤压温度为275 °C时,Mg-10Li-5Zn-0.5Er合金表现出最佳的力学性能,且微量Er可显著延缓Mg-10Li-5Zn合金的时效软化^[21,41]。

1.7 复合添加Zn和RE元素对Mg-Li合金的影响

在Mg-Li合金中复合添加Zn和部分稀土(如Y、Gd、Er和Nd)元素可形成Mg-Zn-RE三元相,如W相(Mg₃Zn₃RE₂,面心立方结构)、I相(Mg₃Zn₆RE,二十面准晶结构)和LPSO相(Mg₁₂ZnRE,长周期有序堆垛结构),这些三元相的生成取决于Zn、RE质量比^[42-44]。其中,W相强度不高,与α-Mg基体呈非共格界面关系,其热稳定性低于I相,对合金的性能不利^[45]。在Mg-Zn-Y合金中,当 $x(\text{Zn})/x(\text{Y}) > 4$ 时主要以I相为主,当 $x(\text{Zn})/x(\text{Y})$ 为1~4时,W相和I相同同时存在,当 $x(\text{Zn})/x(\text{Y}) < 1$ 时以W相为主,当Y元素含量较高时则形成LPSO相^[46]。I相和W相经常同时出现在合金中,可通过其在铸态微观组织中的独特形貌来区分,即鱼骨状共晶结构中的树枝状沉淀物为I相,而沿相界面或I相边缘分布的块状沉淀物则为W相^[47-49]。有时,W相沿着I相边缘分布,不便于分辨,这是因为I相既可以通过共晶反应直接从液相中析出($L \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \text{I}$ 相),也可由液相和W相反应转变而来($L + \text{W} \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \text{I}$ 相)^[50]。I相具有特殊的对称性,对α-Mg基体保持良好的共格界面,可有效阻碍位错运动,表现出良好的室温强化效果^[51]。此外,I相在440 °C以下具有优异的热稳定性,因此表现出良好的高温强化效果^[52]。近年来,已有报道在Mg-Li合金中添加Zn和Y或Gd可引入I相,且I不受Li含量变化的影响。XU D K等^[46,51,53]通过添加 $w(\text{Zn})/w(\text{Y}) > 5$ 的Zn和Y元素,将I相引入Mg-6Li和Mg-8Li合金中,发现I相的形成可以抑制Li元素从β-Li向α-Mg扩散,提高β-Li基体的热稳定性,

进而有效提高合金在室温和高温下的强度。LI C Q等^[54-55]通过添加6%的Zn和1%的Y将I相引入Mg-4Li和Mg-14Li合金中,发现I相的形成可削弱挤压态Mg-4Li和Mg-14Li合金的晶粒组织,并使Mg-4Li和Mg-14Li合金的抗拉强度分别从163 MPa和111 MPa提高至240 MPa和168 MPa。ZHANG Y等^[56]通过添加 $w(\text{Zn})/w(\text{Gd})=3$ 的Zn和Gd元素,将I相引入Mg-9Li合金中,发现挤压态Mg-9Li-9Zn-3Y合金的强度为230.9 MPa,强度的提升主要归因于I相的破碎和晶粒细化。SUN Y H等^[57]研究了挤压比对I相增强Mg-8Li-6Zn-2Gd合金组织与性能的影响,发现当挤压比为16:1时,合金的综合力学性能最佳(抗拉强度为248 MPa,伸长率为50.6%)。LPSO相的形成受合金成分、凝固条件、热处理工艺、变形工艺等条件的影响。目前在镁合金中发现的LPSO结构类型主要有6H、

10H、14H、18R和24R(H为六面结构,R为棱面结构,数字为堆垛层的层数),其中Mg-Li合金中以14H和18R最为常见^[58-61]。姜滨^[62]通过添加 $w(\text{Y})/w(\text{Zn})=3$ 的Y和Zn元素向Mg-Li合金中引入LPSO相,发现Mg-8Li合金在铸态和挤压态下都未发现LPSO相,经固溶处理后合金中的 $(\text{Mg}, \text{Zn})_{24}\text{Y}_5$ 相发生了相转变生成18R类型的LPSO相,而Mg-5Li合金在铸态下就可形成14H类型的LPSO相。WANG J H等^[63]发现复合添加Zn和稀土元素的铸态Mg-8Li合金中并没有LPSO相,热处理后 $(\text{Mg}, \text{Zn})_{24}\text{Y}_5$ 相转变可引入18R类型的LPSO相,且LPSO相的引入可有效提升合金的强度和伸长率。可以看出,LPSO相的形成明显受到Li含量的影响,高Li含量的Mg-Li合金引入LPSO相较为困难,必须经热变形或固溶处理才能引入LPSO相。图4为Mg-Li合金中I相、W相和LPSO相的形貌。

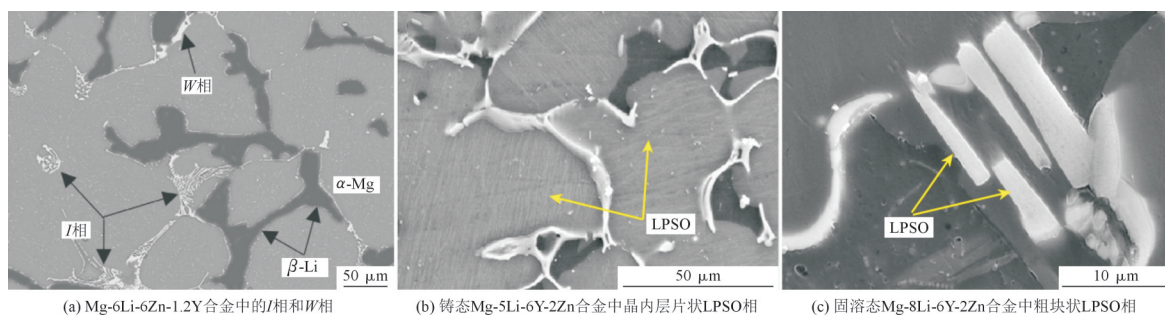


图4 Mg-Li合金中I相、W相和LPSO相的形貌^[53,61]

Fig.4 Morphologies of I phase, W phase and LPSO phase in Mg-Li alloy^[53,61]

2 塑性变形对Mg-Li合金的影响

Mg合金通常都要经过塑性加工才能成为最终应用的产品和部件。虽然目前部分镁合金产品仍然采用铸造件,但铸造件具有易于产生缺陷、组织晶粒粗大、力学性能差等缺点,限制了镁合金的广泛应用。塑性变形(包括挤压、轧制、锻造等)可有效减少缺陷、细化晶粒、改善合金的显微组织,更重要的是可通过工艺调整获得产品所需的性能要求,从而为镁合金的大范围应用奠定基础。

2.1 挤压对Mg-Li合金的影响

Mg-Li合金作为一种超轻质Mg合金,挤压也是最常用的塑性变形方式。在挤压过程中,影响Mg-Li合金组织和性能的因素很多,包括挤压温度、挤压比、挤压速度和均匀化处理等。

挤压温度是挤压过程中最重要的试验参数。挤压温度过低,则Mg-Li合金难以挤压成形,而过高的挤压温度则会导致Mg-Li合金在挤压过程中发生燃烧甚至爆炸等危险事故。锭坯的加热温度理论上可根据合金

相图、再结晶图和塑性图来确定,应确保锭坯温度高于再结晶温度而低于固相线温度。YANG Y等^[64]研究了不同挤压温度下(250、300、350 $^{\circ}\text{C}$)Mg-9Li-3Al-2.5Sr合金的显微组织和力学性能。发现当温度低于300 $^{\circ}\text{C}$ 时, α -Mg相的动态再结晶机制为连续动态再结晶,而 β -Li相的动态再结晶机制为不连续动态再结晶。当温度提高至350 $^{\circ}\text{C}$ 时, α -Mg相中也发生一定程度的不连续动态再结晶。随挤压温度提高,挤压合金的晶粒尺寸和伸长率增加,而强度降低,即250 $^{\circ}\text{C}$ 下挤压合金具有最高的抗拉强度(238 MPa)和最低的伸长率(18.1%),而350 $^{\circ}\text{C}$ 下挤压的合金具有最高的伸长率(21.6%)和最低的抗拉强度(208 MPa)。

挤压比的合理选择可以确保挤压产品获得较佳的组织结构和理想的力学性能。Mg合金挤压比一般为10~100。FENG S等^[65]采用不同挤压比对Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y合金进行热挤压试验,发现在250 $^{\circ}\text{C}$ 热挤压过程中, β -Li相发生动态再结晶,晶粒明显细化,而 α -Mg相随着挤压比的增加被愈发拉长,且当挤压比为16时分布最均匀。同时,在热挤压过程中,析出相呈现出破碎细小的颗粒(A)和不规则的大颗粒(B)两种形态,其中颗粒A沿挤

压方向均匀分布在基体上,而颗粒B则呈现出随着挤压比增大而细化的现象(见图5)。由于晶粒的细化和析出相的强化作用,热挤压同时提高了合金的强度和伸长率。当挤压比从4增加至25时,合金的力学性能呈先增加后降低的趋势,且当挤压比为16时合金获得最佳的力学性能,屈服强度为214 MPa,抗拉强度为243 MPa,伸长率为

41%(见表2)。DONG H W等^[66]研究了不同挤压比对Mg-5Li-2Zn合金显微组织和力学性能的影响,发现 α -Mg和 β -Li相的宽度和晶粒尺寸都随着挤压比的增加而减小,当挤压比为79时合金的显微组织比低挤压比获得的合金组织更加均匀。此外,随着挤压比的增加,合金的强度增加而塑性降低。

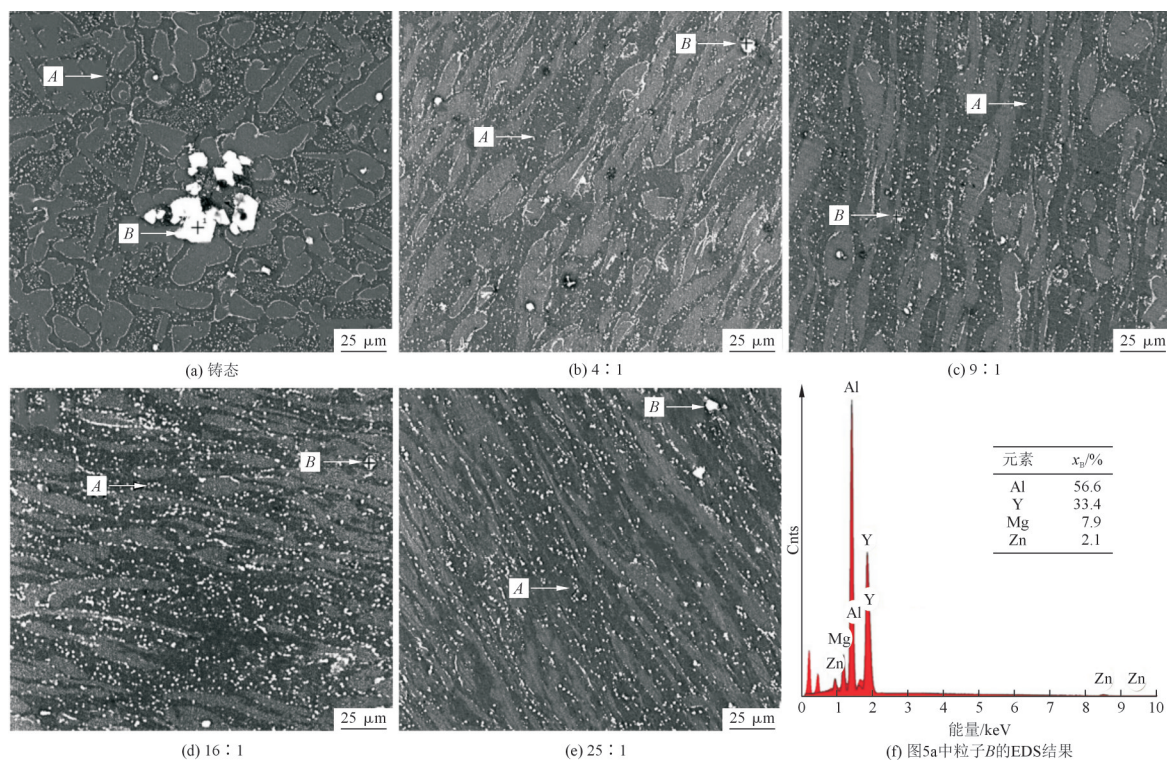


图5 铸态和不同挤压比的挤压态Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y合金的显微组织与EDS分析^[65]

Fig.5 Microstructure and EDS analysis of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy and as-extruded alloys with different extrusion ratios^[65]

表2 铸态和挤压态Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y合金的力学性能^[65]

Tab.2 Mechanical properties of as-cast and as-extruded Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy

材料	平均值				标准差			
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HV)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度(HV)
铸态	147	200	13	64	9.6	4.2	2.6	1.6
挤压态(4:1)	197	229	19	64	5.7	3.3	1.5	1.8
挤压态(9:1)	201	235	38	67	1.3	2.6	2.1	1.5
挤压态(15:1)	214	243	41	67	2.2	1.7	4.8	2.6
挤压态(25:1)	201	229	21	65	2.0	2.3	4.5	2.4

挤压速度和均匀化处理对Mg-Li合金的影响鲜有报道。挤压速度受合金成分、挤压温度、挤压设备、润滑条件等多因素影响,而挤压速度直接影响挤压成品的表面质量。当挤压速度较低时,合金的表面质量良好,随着挤压速度增加,合金的表面质量变差。若挤压速度过高可能会引起表面裂纹。均匀化处理主要是消除晶内的组织偏析和成分偏析,提高合金的可挤压性能,同时也有利于改善挤压合金的显微组织和力学性能。

2.2 轧制对Mg-Li合金的影响

轧制是将金属坯料通过轧辊的压缩使材料发生塑

性变形的一种压力加工方法,通常分为热轧和冷轧。普通镁合金由于塑性变形能力较差,通常在热态下才具有良好的轧制性能,因此大部分普通镁合金的轧制都选择热轧。Mg-Li合金由于Li的加入降低了非基面滑移所需的临界剪切应力,尤其是 β -Li相的出现大大提高了Mg-Li合金的塑性变形能力。因此,Mg-Li合金既可热轧也可冷轧,甚至可进行深冷轧制。

热轧多用于塑性变形能力较差的 α -Mg单相Mg-Li合金^[67-69]。MENG X R等^[67]对挤压态Mg-Li-Al-Zn合金进行了热轧处理(200 °C),发现合金经挤压和轧制

后,晶粒得到细化,强度的提高主要来自挤压和轧制过程中的晶粒细化和加工硬化效应,而伸长率的下降主要是变形过程中大量位错缠结的结果。相比于Mg-8Li-1Zn和Mg-8Li-1Al-1Zn合金,经热轧(压下量95%)后的Mg-8Li-1Al合金具有最高的强度(313.9 MPa)。NENE S S等^[68]研究了热轧态Mg-4Li-1Ca(LC41)合金的显微组织、力学性能与生物耐蚀性,发现热轧后,LC41合金的晶粒由铸态的100 μm 细化至5 μm ,大量拉伸孪晶和压缩孪晶的存在表明轧制过程中孪生是该合金的主要塑性变形模式,且轧制态LC41合金表现出较好的比强度和生物耐蚀性。WANG T Z等^[69]发现改变轧制方向可细化晶粒,且在轧制方向(RD)和轧件横向(TD)上保持较高水平的强度和伸长率。

冷轧一般用于塑性变形能力较好的 α -Mg+ β -Li双相和 β -Li单相Mg-Li合金^[70-73]。JI H B等^[70]对不同Li含量的Mg-Li-Zn合金进行冷轧,发现Mg-5Li-2Zn合金的最大轧制压下量不超过40%,Mg-9Li-2Zn合金的最大轧制压下量可达60%,而Mg-16Li-2Zn和Mg-22Li-2Zn合金的最大轧制压下量超过85%。CHIU C H等^[72]研究了冷轧和热处理对Mg-9Li-1Zn合金显微组织和力学行为的影响,认为合金的加工硬化效应主要来自轧制过程中形成的纤维组织和细化的 α -Mg相。

深冷轧制主要利用某些金属材料在深冷条件下具有优异的塑性变形能力以及阻碍塑性变形过程中位错运动和再结晶行为的能力,促使材料晶粒细化,赋予金属材料更高的强度和韧性^[74]。深冷轧制通常采用液态气体对轧件进行冷却,使轧件在深冷环境下(一般低于-100 $^{\circ}\text{C}$)进行塑性变形。与热轧和冷轧相比,由于变形温度低,深冷轧制可获得完全不同于常规轧制制备的微观组织和力学性能。目前,深冷轧制主要应用于制备高性能铝合金^[75-77]、铜合金^[78-79]、钛合金^[80]等,因为这些合金在深冷条件下具有优异的塑性变形能力。LIU H Y等^[81]采用冷轧和深冷轧制对Mg-14Li-1Al合金进行大塑性变形,发现深冷轧制可将合金的抗拉强度提升至223 MPa,伸长率提升至25.8%,性能提升远高于冷轧(抗拉强度为208 MPa,伸长率为18.5%)。JI Q等^[82]研究了冷轧和深冷轧制对Mg-16Li-4Zn-1Er合金组织与性能的影响,发现低温延迟了合金的动态回复和动态再结晶,深冷轧制压下量为60%时合金可获得267 MPa的抗拉强度,这归因于深冷轧制使其获得了高位错密度和纳米级细晶粒。

2.3 其他变形方式对Mg-Li合金的影响

采用传统的挤压、轧制、锻造以及随后的热处理工

艺,可获得晶粒组织细小且力学性能优良的合金产品,但有时仍难以满足部分产品对高性能的需求。大塑性变形(SPD)由于其独特的应力状态可获得超细晶、特殊的织构组分以及优异的力学性能,被广泛用于试验研究和生产应用。常用的大塑性变形有等径角挤压(ECAE/ECAP)、等径角轧制(ECAR)、高压扭转(HPT)、累积叠轧(ARB)等。目前,采用大塑性变形制备Mg-Li合金已有大量研究报道,其中等径角挤压最为普遍。LIU T等^[83]发现等通道转角挤压不仅能通过动态再结晶细化晶粒还能改变织构类型,实现合金强度和伸长率的同时提高。此外,还采用XRD和TEM等表征方法证实了等通道转角挤压制备的Mg-14Li-1Al合金中存在MgLiAl₂相^[84]。MINÁRIK P等^[85]在等通道转角挤压Mg-4Li-4Al-2RE合金中发现纳米Al颗粒的存在,并在位错处存在强偏析,认为这是等通道转角挤压的大塑性变形和Mg基体中Li原子的溶解共同造成的。MATSUNOSHITA H等^[86]在室温下采用高压扭转制备出500 nm的超细晶Mg-8Li合金,合金的维氏硬度(HV)为57~63,抗拉强度为110~160 MPa,并且表现出优异的低温超塑性,认为这是低的应变速率敏感性指数和位错在晶内运动的共同作用所导致的。TIAN C G等^[87]发现高压扭转可显著细化Mg-14Li-1Al合金的晶粒且平均晶粒尺寸随旋转次数的增加而减小,晶粒细化导致合金的断口呈现明显的韧性断裂,同时使其抗拉强度和塑性都得到了提高。HOU L G等^[88]在350 $^{\circ}\text{C}$ 下采用累积叠轧工艺制备出具有超细晶的高强Mg-5Li-1Al合金,发现随着轧制道次增加,合金的晶粒尺寸减小、强度增加,而伸长率基本保持不变,这是该合金受应变硬化和晶粒细化两种强化机制共同强化的结果,但是这两种机制对合金的延展性有着相反的影响,从而维持合金伸长率不变。经6道次累积叠轧后,合金的平均晶粒可达100 nm,强度和伸长率分别为318 MPa和8.43%。在累积叠轧过程中,Mg-Li合金的变形机理变化为孪生变形、剪切变形、宏观剪切带的形成。晶粒细化机理则由孪晶动态再结晶转变为旋转动态再结晶。FU H等^[89]对Mg-8Li合金进行超高压处理,得到一种纳米尺度的双重压缩孪晶组织,其具有稳定的界面,形成交错网络结构,有效阻碍位错运动。同时,在孪晶界处存在和基体完全共格的六方结构析出相,这种有序聚集的析出相能够阻碍孪晶界运动,在不降低合金塑性的前提下有效提升合金强度。YANG Y等^[90]利用低应变旋锻技术在室温下向粗晶粒内部引入大量孪晶和堆垛层错,通过孪晶和堆垛层错对位错移动的阻止和应变硬化的保持,成功将Mg-4Li-3Al-2Zn合金芯部和外层的抗拉强度分别提升至

368 MPa和405 MPa。

大塑性变形主要通过细晶强化来获得优异的综合力学性能,甚至可以将Mg-Li合金的晶粒细化到亚微米级别。然而,大塑性变形处理的试样尺寸极其有限,阻碍了实际应用。搅拌摩擦加工(FSP)通过施加工具的大载荷和低转速,可以将加工区域的晶粒尺寸细化到亚微米级别,同时获得优异的力学性能和耐蚀性。近几年,与Mg-Li合金有关的FSP已有大量研究报道。ZHOU M R等^[91]对Mg-9Li-1Zn合金进行了低温FSP处理,得到了超细晶组织,并且发现该合金在大应变速率范围内具有明显的超塑性。在200℃时,应变速率为 0.1 s^{-1} 和 $3.33\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 时的最大超塑性分别达到369%和1104%,这是由于晶界滑动(GBS)和相界滑动(PBS)的共同作用,使得试样在不同应变速率下表现出优异的超塑性。ZHOU M R等^[92]还研究了FSP的工艺路线对Mg-9Li-1Zn合金组织和力学性能的影响,发现在FSP中,通过奇数道次和偶数道次交替进行的工艺路线,可以有效形成超细晶组织,提高Mg-9Li-1Zn合金的力学性能。利用该方法使Mg-9Li-1Zn合金的晶粒尺寸达到了 $0.21\text{ }\mu\text{m}$, α 相和 β 相细小且分布均匀,并且在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时,合金的抗拉强度达到220.1 MPa,总伸长率为70.0%,这种优异的强度和延展性是由晶界滑动引起的。ZHU Y X等^[93]通过交叉路径搅拌摩擦加工(CP-FSP)实现了Mg-Li-Al-Zn合金强度、延展性和耐蚀性的协同优化,发现经过两次交叉处理之后,合金的抗拉强度由188.7 MPa提高到266.7 MPa,伸长率由33.1%提高到40.3%,电流密度由 $41.7\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降低到 $14.8\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$,大尺寸的AlLi相被尺寸小于100 nm的 MgLi_2Al 相所取代。其认为强度的提高是晶粒细化和 MgLi_2Al 相取代AlLi相两种机制共同作用的结果;伸长率的增加是由于CP-FSP中剪切方向的改变导致了双相晶粒的均匀分布,实现了局部应变的均匀积累;耐蚀性的增加是由于CP-FSP获得的细小晶粒和均匀分布的双相组织促进富含Al的保护性表面膜的形成,同时纳米级的 MgLi_2Al 相进一步阻碍了微电偶腐蚀。ZHU Y X等^[94]研究了搅拌转速对Mg-9Li-5Al-4Zn合金的组织与性能的影响,发现FSP可显著细化合金晶粒尺寸,但随着转速增加,晶粒尺寸和析出相粒径都略有增加,并且析出相的种类从AlLi相逐渐转变为 MgLi_2Al 相。随着转速增加,合金的强度逐渐增加,而伸长率则逐渐降低。这是因为高转速下AlLi相的溶解和 MgLi_2Al 相的析出有助于合金的固溶强化和弥散强化,而晶粒和析出相尺寸的增加则不利于合金的伸长率。GENG Y X等^[95]采用搅拌摩擦增材制造技术成功制备出双相Mg-10Li-3Al-3Zn合金,在搅拌

区可观察到均匀弥散分布的析出相和细小的晶粒组织,在晶粒细化和固溶强化的共同作用下合金实现强度、伸长率和耐蚀性的协同提升。

3 变形Mg-Li合金的织构

变形Mg合金织构是塑性变形过程中晶粒转动和取向定向流动的结果。近年来,Mg-Li合金的研究除了集中在合金化和塑性变形对合金显微组织、力学性能和耐蚀性等的影响,关于Mg-Li合金的变形机理和织构演变的相关研究也较多。Mg-Li合金的织构受合金元素、变形方式、变形温度和变形程度等因素的影响。

合金元素对Mg-Li合金织构的影响主要是因为合金元素的加入改变了Mg晶格的 c/a 轴比。Mg的 c/a 轴比影响着Mg合金的基面滑移和非基面滑移的临界分切应力值,进而影响合金的变形机制。金属Mg具有较大的 c/a 轴比(1.624),因此室温下通过基面滑移和孪生实现变形。Li的加入可降低Mg合金的 c/a 轴比,使Mg-Li合金室温下棱柱面滑移和锥面滑移成为可能。AGNEW S R等^[96]研究了Li的加入对Mg合金织构的影响,发现随着Li含量增加,Mg-Li合金的基面极图在RD方向上发生旋转,这种旋转与 $\{11\bar{2}2\}$ 面的 $\langle c+a \rangle$ 位错滑移有关。Li含量的增加还与基面极图在TD方向上的扩展有关,而这种扩展与柱面活性增加有关。MACKENZIE L W F等^[97]研究表明,在AZ31镁合金中添加Li元素可弱化合金的基面织构且使基面织构沿TD方向扩展,可获得更加随机的晶粒取向分布。Li在Mg中的固溶度很大,对合金的晶格参数影响显著。当Li含量为0%、1%、3%和5%时,合金的 c/a 轴比分别为1.624、1.622、1.617和1.608。Li加入Mg合金中降低了 c/a 轴比,使合金棱柱面的 $\langle a \rangle$ 位错滑移更加容易。PUGAZHENDHI B S等^[98]研究了Al含量对Mg-8Li- x Al合金织构的影响。发现对于hcp结构的 α -Mg相,所有挤压态合金均具有典型的纤维织构,晶粒的 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 晶向平行于挤压方向。当Al含量为4%时,织构组分基本保持不变,之后急剧减弱。在Mg-8Li-6Al合金中, $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 纤维织构的演变伴随着较弱的 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 纤维织构的出现。对于bcc结构的 β -Li相,所有合金的 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构平行于挤压方向,且 $\langle 110 \rangle$ 纤维织构的强度随Al含量的增加而不断减弱。稀土元素(如Y、Nd等)的加入也会削弱Mg-Li合金的基面织构,降低合金的各向异性^[69,99-100]。稀土元素对hcp结构的Mg-Li合金织构的影响主要归因于以下几个方面。首先,稀土元素的加入降低了Mg晶格的 c/a 轴比和晶格对称性,从而激活了非基面滑移系。其次,稀土元素的加入

会与合金中的Mg、Al等元素发生反应形成金属间化合物,可促进热变形过程中的动态再结晶,同时为动态再结晶晶粒提供更加自由的取向,从而导致合金的基面滑移减弱。这种效应称为粒子激发形核(PSN),是稀土元素导致Mg-Li合金基面织构弱化和非基面滑移激活的另一个主要原因。再者,由于稀土元素的原子扩散速度较慢,固溶在Mg基体中的稀土元素会产生溶质拖拽效应,可改变晶界的移动和再结晶机制,进而影响晶粒的取向。最后,添加的稀土元素固溶在Mg基体中会增加合金的层错能,促进位错滑移从基面转向非基面,从而激活非基面滑移系。

此外,LIU T等^[83]研究了传统挤压、等通道挤压线路A和线路B_c对Mg-Li合金织构的影响。发现传统挤压获得的织构以纤维织构为主,而等通道挤压获得的织构以板织构为主。等通道挤压线路A获得的试样中大部分晶粒的基面平行于拉伸加载方向,其主要的织构组分为(0001)[11 $\bar{2}$ 0]和(0001)[10 $\bar{1}$ 0]。等通道挤压线路B_c获得的试样中大部分晶粒的基面相对于拉伸加载方向呈40°,其主要的织构组分为($\bar{1}$ 012)[10 $\bar{1}$ 2]和($\bar{1}$ 013)[11 $\bar{2}$ 1]。ZOU Y等^[101]研究了轧制压下量和退火对双相Mg-9Li合金织构的影响,发现 α -Mg相和 β -Li相的织构演变都明显受轧制压下量的影响。当压下量为40%时, α -Mg相中{11 $\bar{2}$ 2}<1 $\bar{3}$ 21>织构组分占主导地位且较强的基面织构{0002}<1 $\bar{1}$ 00>由ND方向向RD方向倾斜 $\pm 25^\circ$, β -Li相的织构以{001}<100>织构组分为主。当压下量从40%增加到75%时, α -Mg相中的基面织构{0002}<1 $\bar{1}$ 00>和锥面织构{11 $\bar{2}$ 2}<1 $\bar{3}$ 21>的强度增强且基面向外倾斜的趋势消失, β -Li相中立方织构{001}<100>消失并形成{011}<100>和{113}< $\bar{3}$ $\bar{3}$ 2>织构。退火后, α -Mg相中的基面织构{0002}<1 $\bar{1}$ 00>增强而锥面织构{11 $\bar{2}$ 2}<1 $\bar{3}$ 21>消失, β -Li相中织构组分由{011}<100>转变为{001}<110>。SHEN G J等^[73]研究了bcc结构Mg-14Li合金在冷轧和退火过程中的织构演变,发现bcc结构的Mg-Li合金的轧制织构与其他bcc结构金属(IF钢、铁素体不锈钢、钼等)的轧制织构相似,形成以{100}<110>为中心的 α 纤维织构和以{111}<110>为中心的 γ 纤维织构。此外,还形成了一种新的纤维织构{100}<RP>,该织构有一个峰值与 α 纤维织构的{100}<011>重合,其他峰值集中在{100}<014>。当轧制压下量为90%时,合金主要的再结晶织构有{554}<225>和{100}<012>。退火处理后,由晶粒长大形成的织构接近{111}<123>

该织构处于再结晶织构{554}<225>和{100}<012>的扩展范围内。

4 总结及展望

Mg-Li合金虽然具有超低密度和高比强度等特点,是高端装备轻量化的理想减重材料,但其低强度、易腐蚀,以及高成本限制了其广泛应用,成为Mg-Li合金发展必须解决的问题。Mg-Li合金的未来发展将针对以上问题进行研究。

(1)针对Mg-Li合金的低强度,探寻Mg-Li合金中有效强化的纳米时效析出相、开发快速凝固组织细化的强化合金、发展镁锂基复合材料等将成为Mg-Li合金强化的未来发展方向。

(2)针对Mg-Li合金的易腐蚀,首先结合熔炼技术优化、稀土微合金化、热变形工艺调控等方法制备耐蚀Mg-Li合金,再者开发结合力强、绿色环保、可自修复的耐蚀耐磨涂层,从基体和涂层两方面解决Mg-Li合金的易腐蚀问题。

(3)针对Mg-Li合金的高成本,开发Mg-Li合金低成本高效率的非真空熔炼技术、基于材料基因工程设计高性能Mg-Li合金、研制Mg-Li合金快速成形专用设备途径都将有利于降低Mg-Li合金的研发应用成本。

参 考 文 献

- [1] CUI C L, WU L B, WU R Z, et al. Influence of yttrium on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509 (37): 9 045-9 049.
- [2] FEI P F, QU Z K, WU R Z. Microstructure and hardness of Mg-9Li-6Al-xLa (x=0, 2, 5) alloys during solid solution treatment [J]. Materials Science and Engineering, 2015, A625: 169-176.
- [3] WU R, YAN Y, WANG G, et al. Recent progress in magnesium-lithium alloys [J]. International Materials Reviews, 2015, 60 (2): 65-100.
- [4] TANG H, YAN Y D, ZHANG M L, et al. Fabrication of Mg-Pr and Mg-Li-Pr alloys by electrochemical co-reduction from their molten chlorides [J]. Electrochimica Acta, 2013, 107(107): 209-215.
- [5] WANG J H, WU R Z, FENG J, et al. Influence of rolling strain on electromagnetic shielding property and mechanical properties of dual-phase Mg-9Li alloy [J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109 924.
- [6] SUN Y H, WANG R C, REN J, et al. Microstructure, texture, and mechanical properties of as-extruded Mg-xLi-3Al-2Zn-0.2Zr alloys (x=5, 7, 8, 9, 11, %) [J]. Materials Science and Engineering, 2019, A755: 201-210.
- [7] 唐仁政, 田荣璋. 二元合金相图及中间相晶体结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.

- [8] JACKSON J H, FROST P D, LOONAM A C, et al. Magnesium-lithium base alloys-preparation, fabrication, and general characteristics[J]. *Metals Transactions*, 1949, 1(2): 149-168.
- [9] SUN Y H, WANG R C, PENG C Q, et al. Effect of Gd on microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of as-homogenized Mg-8Li-3Al-2Zn-0.2Zr alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(8): 2 494-2 509.
- [10] QU Z K, WU R Z, ZHAN H B, et al. The solution and room temperature aging behavior of Mg-9Li- x Al ($x=3, 6$) alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 536: 145-149.
- [11] WU R Z, ZHANG M L. Microstructure, mechanical properties and aging behavior of Mg-5Li-3Al-2Zn- x Ag[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, A520(1-2): 36-39.
- [12] LI J Q, QU Z K, WU R Z, et al. Effects of Cu addition on the microstructure and hardness of Mg-5Li-3Al-2Zn alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2010, A527(10-11): 2 780-2 783.
- [13] JIANG B, ZHANG C H, WANG T, et al. Creep behaviors of Mg-5Li-3Al- (0, 1) Ca alloy [J]. *Materials and Design*, 2012, 34: 863-866.
- [14] WU L B, CUI C L, WU R Z, et al. Effects of Ce-rich RE additions and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Mg-Li-Al-Zn-based alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, A528(4-5): 2 174-2 179.
- [15] WANG T, ZHANG M L, NIU Z Y, et al. Influence of rare earth elements on microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloys[J]. *Journal of Rare Earths*, 2006, 24(6): 797-800.
- [16] SUN Y H, WANG R C, PENG C Q, et al. Microstructure and corrosion behavior of as-homogenized Mg- x Li-3Al-2Zn-0.2Zr alloys ($x=5, 8, 11, \%$)[J]. *Materials Characterization*, 2020, 159: 110 031.
- [17] LENTZ M, KLAUS M, BEYERLEIN I J, et al. In situ X-ray diffraction and crystal plasticity modeling of the deformation behavior of extruded Mg-Li-(Al) alloys: An uncommon tension-compression asymmetry[J]. *Acta Materialia*, 2015, 86: 254-268.
- [18] HAN J, SU X M, JIN Z H, et al. Basal-plane stacking-fault energies of Mg: A first-principles study of Li- and Al-alloying effects [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(8): 693-696.
- [19] ZOU Y, QIAN X Y, LIU S H, et al. Achieving high mechanical and corrosion resistance synergy properties of the Mg-11Li-6Al alloy through simple solutionizing treatments [J]. *Vacuum*, 2024, 221: 112 953.
- [20] ZHAO D, CHEN X H, CI W J, et al. Effect of Al element on microstructure, mechanical properties and damping capacity of LPSO-containing Mg-Y-Zn-Li alloy [J]. *Materials Characterization*, 2024, 207: 113 542.
- [21] YAMAMOTO A, ASHIDA T, KOUTA Y, et al. Precipitation in Mg-(4-13)% Li-(4-5)% Zn ternary alloys[J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(4): 619-624.
- [22] JI H, WU G H, LIU W C, et al. Origin of the age-hardening and age-softening response in Mg-Li-Zn based alloys[J]. *Acta Materialia*, 2022, 226: 117 673.
- [23] LOU W X, XIE H B, ZHAO X B, et al. Variable precipitation behaviors of Laves phases in an ultralight Mg-Li-Zn alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11(6): 2 018-2 026.
- [24] ZHANG C, WU L, ZHAO Z L, et al. Effect of Li content on microstructure and mechanical property of Mg- x Li-3(Al-Si) alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29 (12): 2 506-2 513.
- [25] ZHAO Z L, SUN Z W, LIANG W, et al. Influence of Al and Si additions on the microstructure and mechanical properties of Mg-4Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A702(15): 206-217.
- [26] ZHAO Z L, CHEN J X, WU X, et al. Design of a Mg-7Li-2.6Al-0.4Si alloy with simultaneously improved strength and ductility [J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27: 102 244.
- [27] ZHAO Z L, XING X G, MA J Y, et al. Effect of addition of Al-Si eutectic alloy on microstructure and mechanical properties of Mg-12Li alloy [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, 34(9): 1 564-1 569.
- [28] 赵子龙. 添加 Al-Si 对镁锂合金组织性能的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [29] 楼阳. Ag、Y、Gd 掺杂体系的 Mg-Li-Al-Zn 合金的微观结构及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [30] 刘旭贺, 解海涛, 刘洋, 等. 铸态及挤压态 Mg-11Li-3Al- x Zr 合金的组织及性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(8): 816-820.
- [31] CHEN B, FENG L P, ZHOU T T, et al. Effects of Zr on microstructures and properties of a β matrix Mg-13Li-3Al-0.7Zr alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 488-489: 155-160.
- [32] ZHAO J, ZHANG J, LIU W C, et al. Effect of Y content on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn alloy with duplex structure [J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A650: 240-247.
- [33] ZHU T L, CUI C L, ZHANG T L, et al. Influence of the combined addition of Y and Nd on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloy [J]. *Materials and Design*, 2014, 57: 245-249.
- [34] GU M Y, WEI G L, ZHAO J, et al. Influence of yttrium addition on the corrosion behaviour of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2017, 33(7): 864-869.
- [35] GU M Y, WEI G L, LIU W C, et al. Influence of neodymium on microstructure and corrosion behavior of Mg-8Li-3Al-2Zn alloy [J]. *Materials and Corrosion*, 2017, 68(4): 436-443.
- [36] WANG T, ZHANG M L, WU R Z. Microstructure and properties of Mg-8Li-1Al-1Ce alloy [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(12-13): 1 846-1 848.
- [37] MANIVANNAN S, DINESH P, MAHEMAA R, et al. Corrosion behavior of as-cast Mg-8Li-3Al- x Ce alloy in 3.5% NaCl solution [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2016, 23(10): 1 196-1 203.
- [38] HUANG Y C, ZHANG Q D, OUYANG S J, et al. Effects of Zn and Gd contents and their ratios on microstructure and mechanical properties of as-cast and as-extruded Mg-8Li alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34 (3): 798-811.
- [39] SUN Y H, ZHANG F, WANG R C, et al. Improving the corrosion resistance of Mg-8Li-3Al-2Zn alloy by combining Gd alloying and hot extrusion [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 964: 171 205.
- [40] JI H, LIU W C, WU G H, et al. Influence of Er addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-10Li-5Zn alloy

- [J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, A739: 395-403.
- [41] JI H, WU G H, LIU W C, et al. Role of extrusion temperature on the microstructure evolution and tensile properties of an ultralight Mg-Li-Zn-Er alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 876: 160-181.
- [42] CHAMAN-ARA M, EBRAHIMI G R, EZATPOUR H R. Deformation behavior and processing maps of Mg-Zn-Y alloy containing *I* phase at elevated temperatures[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(4): 629-641.
- [43] 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.
- [44] LIAO H X, KIM J, LEE T, et al. Effect of heat treatment on LPSO morphology and mechanical properties of Mg-Zn-Y-Gd alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(4): 1120-1127.
- [45] 杨阳. 准晶增强 Mg-Zn-RE(Y, Gd)合金组织性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [46] XU D K, WANG B J, LI C Q, et al. Effect of icosahedral phase on the thermal stability and ageing response of a duplex structured Mg-Li alloy[J]. *Materials and Design*, 2015, 69: 124-129.
- [47] WEI G B, PENG X D, ZHANG B, et al. Influence of *I*-phase and *W*-phase on microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-3Zn alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3): 713-720.
- [48] SONG Y W, SHAN D Y, CHEN R S, et al. Effect of second phases on the corrosion behaviour of wrought Mg-Zn-Y-Zr alloy[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(5): 1830-1837.
- [49] YAN H, CHEN R S, HAN E H. Room-temperature ductility and anisotropy of two rolled Mg-Zn-Gd alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2010, A527(15): 3317-3322.
- [50] XU D K, HAN E H. Effects of icosahedral phase formation on the microstructure and mechanical improvement of Mg alloys: A review[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2012, 22(5): 364-385.
- [51] XU D K, LIU L, XU Y B, et al. The strengthening effect of icosahedral phase on as-extruded Mg-Li alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(3): 285-288.
- [52] LIU Y, YUAN G Y, LU C, et al. Stable icosahedral phase in Mg-Zn-Gd alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(10): 919-922.
- [53] XU D K, ZU T T, YIN M, et al. Mechanical properties of the icosahedral phase reinforced duplex Mg-Li alloy both at room and elevated temperatures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 161-166.
- [54] LI C Q, XU D K, YU S, et al. Effect of icosahedral phase on crystallographic texture and mechanical anisotropy of Mg-4Li based alloys[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, 33(5): 475-480.
- [55] LI C Q, XU D K, WANG B J, et al. Effects of icosahedral phase on mechanical anisotropy of as-extruded Mg-14Li based alloys[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, 35(11): 2477-2484.
- [56] ZHANG Y, ZHANG J, WU G H, et al. Microstructure and tensile properties of as-extruded Mg-Li-Zn-Gd alloys reinforced with icosahedral quasicrystal phase[J]. *Materials and Design*, 2015, 66: 162-168.
- [57] SUN Y H, ZHANG F, YANG B, et al. Effect of extrusion ratio on the microstructure, texture, and mechanical properties of dual-phase Mg-8Li-6Zn-2Gd alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2024, 34(3): 833-845.
- [58] MATSYDA M, LI S, KAWAMURA Y, et al. Variation of long-period stacking order structures in rapidly solidified $Mg_{97}Zn_1Y_2$ alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A393(1-2): 269-274.
- [59] 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(3): 669-674.
- [60] ABE E, KAWAMURA Y, HAYASHI K, et al. Long-period ordered structure in a high-strength nanocrystalline Mg-1Zn-2Y alloy studied by atomic-resolution *Z*-contrast STEM[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(15): 3845-3857.
- [61] TANG P Y, WU M M, TANG B Y, et al. Microstructure of 18R-type long period ordered structure phase in $Mg_{97}Y_2Zn_1$ alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(4): 801-806.
- [62] 姜滨. 镁锂合金力学性能及LPSO构筑[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [63] WANG J H, JIN Y, WU R Z, et al. Simultaneous improvement of strength and damping capacities of Mg-8Li-6Y-2Zn alloy by heat treatment and hot rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 927: 167027.
- [64] YANG Y, XIONG X M, SU J F, et al. Influence of extrusion temperature on microstructure and mechanical behavior of duplex Mg-Li-Al-Sr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750: 696-705.
- [65] FENG S, LIU W C, ZHAO J, et al. Effect of extrusion ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy with duplex structure[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A692: 9-16.
- [66] DONG H W, PAN F S, JIANG B, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of a duplex Mg-Li alloy under extrusion with an increasing ratio[J]. *Materials and Design*, 2014, 57: 121-127.
- [67] MENG X R, WU R Z, ZHANG M L, et al. Microstructures and properties of superlight Mg-Li-Al-Zn wrought alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1): 722-725.
- [68] NENE S S, KASHYAP B P, PRABHU N, et al. Microstructure refinement and its effect on specific strength and bio-corrosion resistance in ultralight Mg-4Li-1Ca (LC41) alloy by hot rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 615: 501-506.
- [69] WANG T Z, ZHU T L, SUN J F, et al. Influence of rolling directions on microstructure, mechanical properties and anisotropy of Mg-5Li-1Al-0.5Y alloy[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, 3(4): 345-351.
- [70] JI H B, YAO G C, LI H B. Microstructure, cold rolling, heat treatment, and mechanical properties of Mg-Li alloys[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 15(4): 440-443.
- [71] TANG Y, LE Q C, WANG T, et al. Experimental analysis and mathematical modeling on Mg-Li alloy sheets with three crystal structures during cold rolling and heat treatment[J]. *Materials*,

- 2017, 10(10): 1 167.
- [72] CHIU C H, WU H Y, WANG J Y, et al. Microstructure and mechanical behavior of LZ91 Mg alloy processed by rolling and heat treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 460(1-2): 246-252.
- [73] SHEN G J, DUGGAN B J. Texture development in a cold-rolled and annealed body-centered-cubic Mg-Li alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2007, A38(10): 2 593-2 601.
- [74] 喻海良. 深冷轧制制备高性能金属材料研究进展[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(1): 89-99.
- [75] 杨丽娟, 吴红艳, 高冠军, 等. 深冷轧制对AA6069铝合金组织和性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2018, 46(1): 14-19.
- [76] 杨世森, 邢健瑞, 王正宇, 等. 7075铝合金深冷轧制及时效处理微观组织和性能[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(11): 3 503-3 524.
- [77] HUSSAIN M, RAO P N, SINGH D, et al. Insight to the evolution of nano precipitates by cryo rolling plus warm rolling and their effect on mechanical properties in Al 6061 alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, A811: 141 072.
- [78] NAGARJUNA S, BABU U C, GHOSAL P. Effect of cryo-rolling on age hardening of Cu-1.5Ti alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, A491(1-2): 331-337.
- [79] IHIRA R, GWON H, KASADA R, et al. Improvement of tensile properties of pure Cu and CuCrZr alloy by cryo-rolling process [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 109-111: 485-488.
- [80] BHASKAR P, DASGUPTA A, SARMA V S, et al. Mechanical properties and corrosion behaviour of nanocrystalline Ti-5Ta-1.8Nb alloy produced by cryo-rolling [J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, A616: 71-77.
- [81] LIU H Y, WANG Y, LI B C, et al. Effect of cryogenic rolling process on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-1Al alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 157: 109 903.
- [82] JI Q, ZHANG S, WU R Z, et al. High strength BCC magnesium-lithium alloy processed by cryogenic rolling and room temperature rolling and its strengthening mechanisms [J]. *Materials Characterization*, 2022, 187: 111 869.
- [83] LIU T, WANG Y D, WU S D, et al. Textures and mechanical behavior of Mg-3.3Li alloy after ECAP [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(11): 1 057-1 061.
- [84] LIU T, WU S D, LI S X, et al. Microstructure evolution of Mg-14Li-1Al alloy during the process of equal channel angular pressing [J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A (460-461): 499-503.
- [85] MINÁRIK P, ČÍŽEK J, VESELÝ J, et al. Nanocrystalline aluminium particles inside Mg-4Li-4Al-2RE magnesium alloy after severe plastic deformation [J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 248-252.
- [86] MATSUNOSHITA H, EDALATI K, FURUI M, et al. Ultrafine-grained magnesium-lithium alloy processed by high-pressure torsion: low-temperature superplasticity and potential for hydroforming [J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, A640: 443-448.
- [87] TIAN C G, LU H M, ZHAO L Y. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-14Li-1Al alloy during the high-pressure torsion [A]. *Magnesium Technology [C]*. Switzerland: Springer, Cham., 2014.
- [88] HOU L G, WANG T Z, WU R Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-5Li-1Al sheets prepared by accumulative roll bonding [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, 34(2): 75-81.
- [89] FU H, GE B C, XIN Y C, et al. Achieving high strength and ductility in magnesium alloys via densely hierarchical double contraction nanotwins [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6 117-6 124.
- [90] YANG Y, CHEN X, NIE J F, et al. Achieving ultra-strong magnesium-lithium alloys by low-strain rotary swaging [J]. *Materials Research Letters*, 2021, 9(6): 255-262.
- [91] ZHOU M R, MORISADA Y, FUJII H, et al. Pronounced low-temperature superplasticity of friction stir processed Mg-9Li-1Zn alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, A780: 139 071.
- [92] ZHOU M R, ZENG Z R, CHENG C, et al. Effect of the processing route on the microstructure and mechanical behavior of superlight Mg-9Li-1Zn alloy via friction stir processing [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10(11): 3 064-3 081.
- [93] ZHU Y X, CHEN G Q, ZHOU Y F, et al. Achieving synergistic strength-ductility-corrosion optimization in Mg-Li-Al-Zn alloy via cross-pass friction stir processing [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 959: 170 581.
- [94] ZHU Y X, ZHOU M R, GENG Y X, et al. Microstructural evolution and its influence on mechanical and corrosion behaviors in a high-Al/Zn containing duplex Mg-Li alloy after friction stir processing [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, 184: 245-255.
- [95] GENG Y X, ZHOU M R, ZHU Y X, et al. Regulating microstructure of Mg-Li-Al-Zn alloy for enhancing comprehensive performance through friction stir additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering*, 2024, A895: 146 239.
- [96] AGNEW S R, YOO M H, TOMÉ C N. Application of texture simulation to understanding mechanical behavior of Mg and solid solution alloys containing Li and Y [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(20): 4 277-4 289.
- [97] MACKENZIE L W F, PEKGULERYUZ M. The influences of alloying additions and processing parameters on the rolling microstructures and textures of magnesium alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, A480(1-2): 189-197.
- [98] PUGAZHENDHI B S, KAR A, SINNAERUVADI K, et al. Effect of aluminium on microstructure, mechanical property and texture evolution of dual phase Mg-8Li alloy in different processing conditions [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18(4): 1 332-1 344.
- [99] 崔崇亮, 朱天龙, 孙俭峰, 等. 稀土Nd对 α 相Mg-Li合金热挤压织构的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(5): 1 177-1 180.
- [100] YAN H, CHEN R S, HAN E H. Microstructures and mechanical properties of cold rolled Mg-8Li and Mg-8Li-2Al-2RE alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(2): 550-554.
- [101] ZOU Y, ZHANG L H, WANG H T, et al. Texture evolution and their effects on the mechanical properties of duplex Mg-Li alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 669: 72-78.

(编辑:刘晨辉)