

Mg-Li合金剧烈塑性变形的研究现状及展望

张 宁 张 扬 康 豪 汪昊男 沈 洋

(江苏理工学院材料工程学院,常州 213001)

摘 要 剧烈塑性变形技术在细化合金组织、改善性能方面的潜力引起了广泛关注。在全面分析 Mg-Li 合金剧烈塑性变形研究现状的基础上,重点介绍了采用等通道角挤压、累积叠轧、搅拌摩擦加工、高压扭转和多向锻造等技术对 Mg-Li 合金进行剧烈塑性变形的加工工艺和变形机理,并对剧烈塑性变形过程中 Mg-Li 合金的微观组织演变和力学性能进行了总结分析。进一步从制备、强化和应用方面对 Mg-Li 合金剧烈塑性变形的研究发展进行了展望。

关键词 Mg-Li 合金;剧烈塑性变形;微观组织;力学性能;展望

中图分类号 TG146.22;G353.11

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.Z20250002

Research Status and Prospect of Severe Plastic Deformation of Mg-Li Alloys

ZHANG Ning, ZHANG Yang, KANG Hao, WANG Haonan, SHEN Yang

(School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001)

Abstract: The potential of severe plastic deformation technology in refining microstructure and improving properties has attracted extensive attention in the research field. A comprehensive analysis of the research status of severe plastic deformation on Mg-Li alloys was reviewed. On this basis, the processing technology and deformation mechanism of severe plastic deformation on Mg-Li alloys by equal channel angle pressing, accumulative roll bonding, friction stir processing, high pressure torsion and multidirectional forging were emphasized. The microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Li alloys during severe plastic deformation were summarized. Furthermore, the research and development of severe plastic deformation of Mg-Li alloys were prospected from aspects of preparation, strengthening and application.

Key Words: Mg-Li Alloys, Severe Plastic Deformation, Microstructure, Mechanical Properties, Prospect

收稿日期:2025-01-08;**修订日期:**2025-02-17

基金项目:江苏省高等学校基础科学(自然科学)重大资助项目(21KJA430009);常州市科技支撑计划(社会发展)资助项目(CE20235041)

第一作者简介:张宁,男,1998年出生,硕士研究生,E-mail: zhangn980415@163.com

通信作者:张杨,男,1988年出生,副教授,E-mail: zhangyang@jsut.edu.cn

引用格式:张宁,张杨,康豪,等. Mg-Li合金剧烈塑性变形的研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(6):832-841.

ZHANG N, ZHANG Y, KANG H, et al. Research status and prospect of severe plastic deformation of Mg-Li alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 832-841.

参 考 文 献

- [1] 丁文江. 镁合金科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 潘复生, 吴国华. 新型合金材料: 镁合金[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [3] ZHANG S, ZHAO D L. Aerospace Materials Handbook [M]. New York: CRC Press, 2012.
- [4] 陈振华. 耐热镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [5] 曾小勤, 陈义文, 王静雅, 等. 高性能稀土镁合金研究新进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 2 963-2 975.
- [6] 何上明. Mg-Gd-Y-Zr-Ca合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] 肖旅, 邹文兵, 刘颖卓, 等. 高强耐热镁合金舱体铸造技术[J]. 航天制造技术, 2015(1): 18-22.
- [8] 曹樑, 刘文才, 李中权, 等. 热处理对砂型铸造 Mg-10Gd-3Y-0.5Zr 镁合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(3): 611-618.
- [9] ZHANG Y, WU Y J, PENG L M, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultra-high strength casting Mg-15.6Gd-1.8Ag-0.4Zr alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 703-711.
- [10] WANG D, HE Y, YU Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of cast Mg-6Gd-Zr alloy with different Y addition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4 494-4 502.
- [11] 陈志. Y含量对Mg-Gd-Y-Sm-Zr合金组织和性能的影响[D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [12] 付三玲. Mg-Gd(-Y-Sm-Zr)耐热镁合金组织和性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [13] 汪泉. 砂型铸造 Mg-6Gd-3Y 镁合金断裂失效行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [14] QIN H, YANG G Y, KAN Z Y, et al. Effect of substituting Gd with 3% Nd on high temperature creep behaviors of peak-aged Mg-10Gd-0.4Zr casting Mg alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 5 781-5 794.
- [15] LI Y L, WU G H, CHEN A T, et al. Effects of Gd and Zr additions on the microstructures and high-temperature mechanical behavior of Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloys in the product form of a large structural casting[J]. Journal of Materials Research, 2015, 30(22): 3 461-3 473.
- [16] WANG D, FU P H, PENG L M, et al. A study of microstructure, mechanical behavior and strengthen mechanism in the Mg-10Gd-0.2Zn-(Y)-0.4Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A793: 139 881.

(编辑: 彭瑾)

作为密度最低的金属结构材料,Mg-Li合金具有高强度及优异的阻尼和电磁屏蔽性能等特点,在航空航天、交通运输、消费电子等轻量化需求迫切的领域有广阔的应用前景^[1-2]。此外,由于Li具有体心立方晶体结构,Mg-Li合金的晶体结构由密排六方(HCP)结构转变为具有更多滑移系的体心立方(BCC)结构,克服了传统镁合金塑性差的固有缺陷^[3]。然而,Li的化学性质活泼,这对镁合金的熔炼制备提出了更高的要求,且Mg-Li合金的耐腐蚀性比普通镁合金更差。此外,Li的加入会引起合金强度的显著下降,难以满足工程应用要求^[4-5]。

为了提高Mg-Li合金的综合力学性能,常采用塑性变形来改善Mg-Li合金的微观组织,其通过施加大应变导致材料发生剧烈塑性变形,将粗晶粒细化为超细晶粒。与传统的塑性变形相比,剧烈塑性变形技术能够在较低的温度下实现晶粒尺寸的显著细化,尺寸通常可以达到亚微米甚至纳米级别,并且在细化晶粒提高强度的同时不降低材料的延展性,在制备超细晶材料方面具有明显优势^[6-8]。目前,常用的剧烈塑性变形技术包括等通道角挤压(ECAP)、累积叠轧(ARB)、搅拌摩擦加工(FSP)、高压扭转(HPT)和多向锻造(MDF)等。剧烈塑性变形技术在细化组织、改善性能方面引起了Mg-Li合金研究者的广泛关注,国内外研究者分别采用不同类型的剧烈塑性变形技术针对若干Mg-Li合金材料开展了研究,并取得了一定进展。

在深入调研Mg-Li合金剧烈塑性变形研究现状的基础上,综述不同类型剧烈塑性变形技术加工Mg-Li合金过程中的微观组织和性能演变,并对Mg-Li合金剧烈塑性变形的未来发展和应用进行展望。

1 Mg-Li合金剧烈塑性变形研究现状

1.1 等通道角挤压

等通道角挤压(ECAP)是一种广泛研究的剧烈塑性变形技术,图1为ECAP技术原理示意图。将具有与模具通道尺寸几乎相等横截面的块体材料放入润滑良好的通道入口,在外加载荷作用下,试样被压入通道内的交截处时,材料内部会发生近似理想的纯剪切变形。由于挤压前后试样的截面形状和面积不发生改变,故多道次挤压可以获得相当大的累积应变量,使材料的晶粒得到细化,并消除铸造过程中的缺陷,从而改善材料的力学和物理性能。ECAP技术在细化晶粒、制备超细晶材料方面的能力已在铝合金、钛合金、镁合金等金属材料中得到证实。在已有的关于Mg-Li合金剧烈塑

性变形的研究中,ECAP相关研究相对较多,并涵盖了单相和双相Mg-Li合金,主要集中在ECAP处理对Mg-Li合金微观组织和力学性能的影响^[9]。

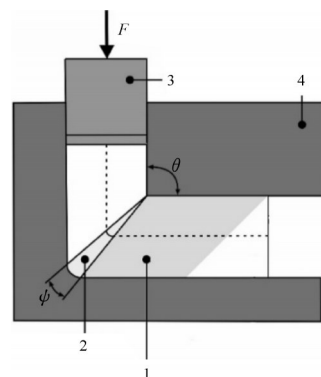


图1 等通道角挤压(ECAP)示意图^[10]

Fig.1 Schematic diagram of equal channel angle pressing (ECAP)^[10]

1. 试样 2. 剪切带 3. 冲头 4. 模具

已有研究发现,对具有HCP结构的 α -Mg或BCC结构的 β -Li单相(近单相)Mg-Li合金,ECAP技术通常表现出较好的晶粒细化效果。PETER M等^[11]采用ECAP技术对具有 α -Mg单相的LAE442(Mg-4Li-3.6Al-2.4RE)合金进行变形,经过1次变形后,晶粒尺寸即从最初的约21 μm 减小到约11 μm ,进一步经过8道次和12道次变形后,细晶效果更加显著,晶粒尺寸分别细化至约1.9 μm 和约1.5 μm 。火照燕等^[12]采用ECAP技术在室温下对具有 β -Li单相的LA141(Mg-14Li-1Al)合金进行了1~4道次变形。原始态LA141合金经ECAP变形后,合金组织中粗大的晶粒在剪应力作用下沿挤压方向被拉长而形成带状组织。在ECAP过程中,随着道次增加,剪切带变得更加细小且分布均匀,晶界变得模糊,晶粒碎化严重。这种细化机制主要是由于机械剪切和动态再结晶的共同作用。在ECAP变形初期,机械剪切起主导作用,而在多道次变形后,动态再结晶逐渐成为主要机制。

当Mg-Li合金为双相结构且 α -Mg和 β -Li相含量相近时,常规ECAP处理的细化效果并不理想。KARAMI M等^[13]系统研究了ECAP对3种不同Li含量的Mg-Li合金(LZ61、LZ81和LZ121)微观组织的影响,见图2。可见在连续动态回复和再结晶机制作用下,多道次ECAP工艺在近 α -Mg单相LZ61合金和 β -Li单相LZ121合金中均诱发了均匀的晶粒细化效果;但在 α -Mg和 β -Li相含量相近的LZ81合金中,由于 α -Mg和 β -Li相中Mg和Li原子迁移能力的不同,导致 β -Li相晶粒得到细化但 α -Mg相晶粒发生粗化。LIU X W等^[14]在不含第二相颗粒的Mg-8.4Li合金和含第

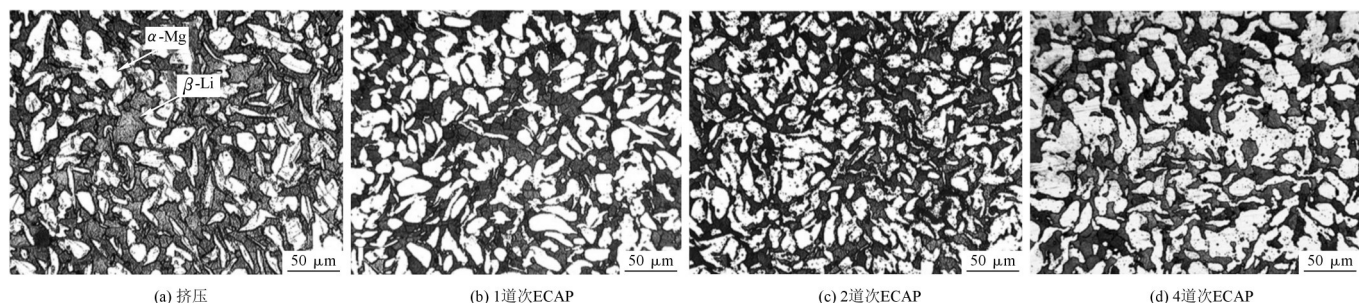


图2 LZ81光学显微组织^[13]

Fig.2 OM microstructure of LZ81 alloy^[13]

二相颗粒的Mg-8.4Li-3(Al-12Si)-1(Al-5Ti-1B)合金也发现了类似现象,当ECAP道次大于2时,合金中的 α -Mg晶粒发生聚集长大,晶粒尺寸明显增大。

将ECAP技术与常规轧制工艺相结合,能够在双相Mg-Li合金中取得较好的晶粒细化效果,并显著提高合金的力学性能。EDWIN E K等^[15]对Mg-9Li合金进行先室温ECAP后轧制处理,见图3。首先通过室温ECAP抑制动态回复和再结晶的发生,将Mg-9Li合金中的 α -Mg相晶粒尺寸细化到1 μ m以下;进一步进行室温轧制,使 α -Mg相晶粒尺寸减至500~

700 nm,并在 α -Mg相中形成了较强的(0002)基面织构,这一处理取得了较好的强化效果,合金抗拉强度达到206 MPa,相比铸态提高了1倍以上。EDWIN E K等^[16]对Mg-9Li-1Al合金进行ECAP处理后,再进行反复退火和室温轧制, α -Mg相晶粒尺寸由ECAP后的约350 nm减至约200 nm,并形成了强基面织构。此外,与Mg-9Li合金相比,少量Al加入后在合金中均匀分布,促进了 α -Mg相晶粒细化,并提高了拉伸变形过程中的应变硬化率,对合金强化做出了较大贡献。

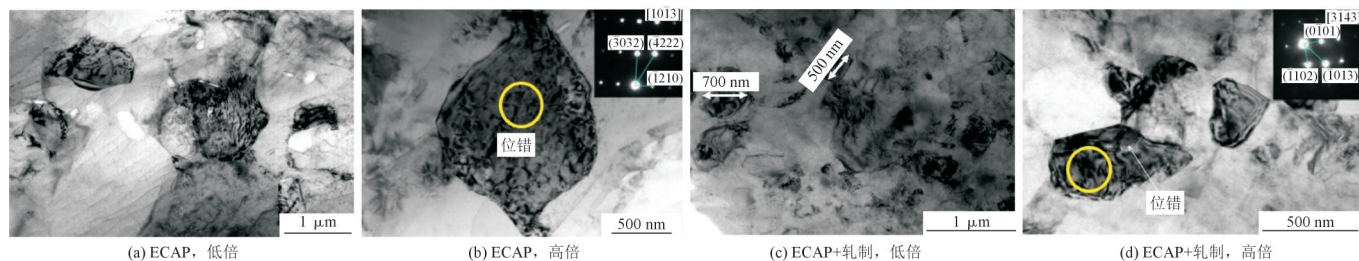


图3 室温ECAP与轧制组合加工后Mg-9Li合金的TEM微观组织^[15]

Fig.3 TEM microstructure of Mg-9Li alloy after combined processing of room temperature ECAP and rolling^[15]

孔晶等^[17]对Mg-10.73Li-4.49Al-0.52Y合金进行ECAP变形研究,发现变形初期由于原始铸态晶粒尺寸较大,主要以晶内位错运动为主,导致位错密度急剧增加,从而使合金硬度显著提高。随变形进行,位错缠结、晶界和析出相等障碍物会阻碍位错运动,形成位错塞积群,进一步导致加工硬化,使合金硬度继续上升。现有研究表明,ECAP处理对Mg-Li合金的强化效应主要来自细晶强化,此外位错强化、织构强化等强化机制也在其中起到一定作用。

1.2 累积叠轧

累积叠轧(ARB)技术的示意图见图4^[18]。将两块或多块相同的金属板材通过表面预处理(如打磨、脱脂等)后叠放在一起,将板材固定,在一定的温度中保温一段时间后进行轧制。轧制过程中,板材在轧辊的压力作用下发生塑性变形,形成牢固的冶金结合。一次轧制后,将得到的复合板材沿轧制方向切割成相同尺

寸的两块或多块,再进行重复的表面处理和轧制操作。ARB过程中,金属材料会经历多次叠轧变形,每次叠轧都会在材料中引入应变。这些应变会逐渐累积,导致材料的晶粒形变和位错密度增加,从而提高材料的抗变形能力^[19-22]。采用ARB技术制备大尺寸超细晶板带材的能力已在钢铁、铝合金、铜合金等材料中得到验证。

王天资^[23]、郑海鹏^[24]和武华杰^[25]针对采用ARB技

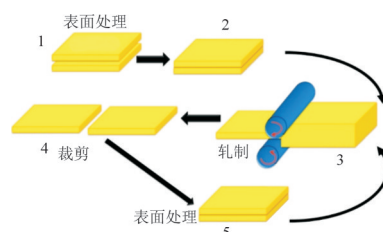


图4 累积叠轧(ARB)工艺示意图^[18]

Fig.4 Schematic diagram of accumulative roll bonding (ARB) process^[18]

术制备超细晶 Mg-Li 合金材料开展了系统研究,涵盖单相和双相 Mg-Li 合金,研究涉及合金成分、叠轧层数、交替板材厚度、轧制温度等因素对 Mg-Li 合金微观组织和力学性能的影响规律。结果发现,在双层 ARB 处理过程中,Mg-5Li-1Al 合金的变形机制从孪生变形转变为剪切变形,形成宏观剪切带,并引发动态再结晶。晶粒细化机制最初是孪生动态再结晶,随后主要通过旋转动态再结晶进行。经过 6 道次双层 ARB 处理后,Mg-5Li-1Al 合金累计达到 64 层单层板材厚度由 2 mm 减小至 $31.25\ \mu\text{m}$,平均晶粒尺寸细化至约 100 nm,见图 5^[23]。随着双层 ARB 道次增加,合金的组织均匀性得到提高,晶粒间的取向差也增大。在双层

ARB 处理过程中,合金的基面织构强度随着加工道次的增加而增强,晶粒 c 轴沿轧向(RD)方向的偏转程度先增加后降低。此外,非基面滑移系也有所启动,主要表现为锥面滑移系的启动。随着双层 ARB 处理的进行和晶粒尺寸减小,Mg-5Li-1Al 合金的力学性能显著提高。经过 1 道次双层 ARB 处理后,合金的屈服强度和抗拉强度分别提高了 20 MPa 和 50 MPa 以上。随着双层 ARB 道次的增加,强度继续升高,6 道次双层 ARB 处理后,板材沿 RD 和 TD 方向的屈服强度和抗拉强度分别达到 196.43 MPa、317.80 MPa 和 199.92 MPa、315.57 MPa,与母材相比分别提高了 180.5%、147.3% 和 185.5%、145.6%^[22]。

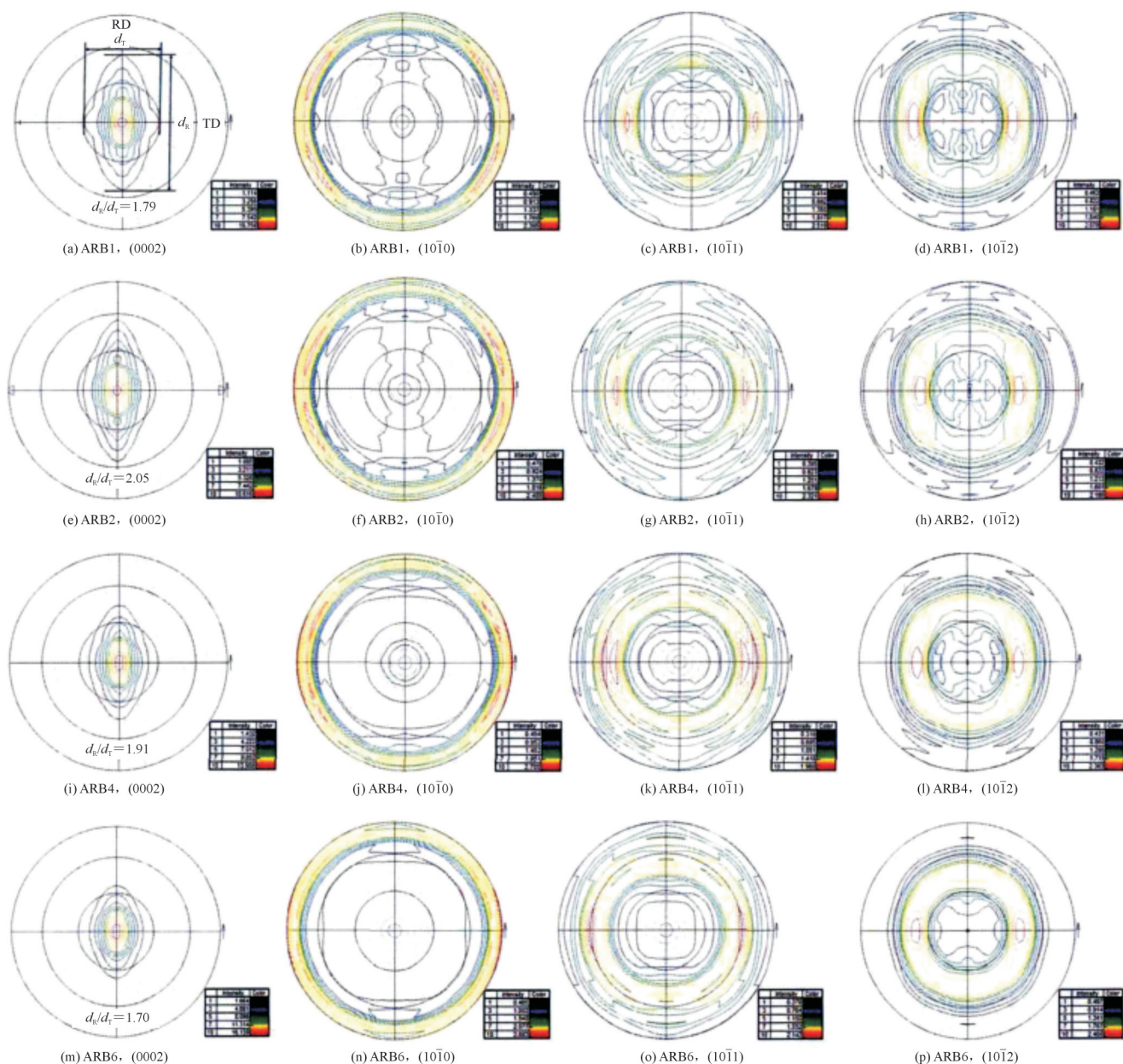


图 5 累积叠轧 Mg-5Li-1Al 板材极图^[23]

Fig.5 Polar figure of ARB Mg-5Li-1Al sheet^[23]

在常规双层ARB技术基础上,进一步开发了具有更高变形效率的4层ARB技术,并对两者在Mg-14Li-3Al-2Gd板材中的晶粒细化效果进行了对比^[24]。结果表明,4层ARB技术具有更好的晶粒细化效率。采用双层ARB技术经过6道次后平均晶粒尺寸减至14.5 μm ,而采用4层ARB技术仅经过4道次后平均晶粒尺寸减至5.3 μm 。

在LA51和LA141合金复合板材交替累积叠轧研究中发现,经3道次ARB处理后,复合板材中 α -Mg相和 β -Li相的位错密度值接近饱和,分别为 5.1×10^{13} 和 $3.5 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$,见图6。计算得出位错强化对板材强度的贡献为35 MPa^[25]。在ARB过程中,位错增殖与道次间退火过程中的位错湮灭之间达到了平衡,导致位错密度趋于饱和。这种现象与许多超细晶粒材料的强度饱和效应一致^[18]。

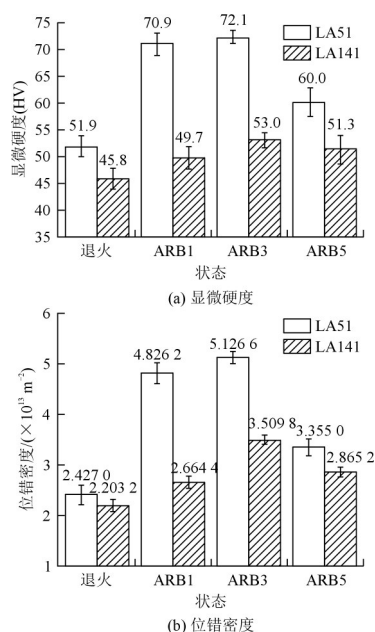


图6 累积叠轧LA51和LA141合金复合板材的硬度和位错密度^[25]

Fig.6 Hardness and dislocation density of ARB LA51 and LA141 alloy composite sheets^[25]

XU L等^[26]采用电泳沉积结合累积叠轧技术 (ARB)制备出了LA141/MWCNTs复合材料。在该复合材料中,增强体多壁碳纳米管(MWCNTs)不仅在基体中分布均匀,而且复合材料中还观察到大量的超细晶。此外,该复合材料不仅使LA141 Mg-Li合金的抗拉强度从144 MPa提高到266 MPa,同时使其获得了 $1.89 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m/kg}$ 的高比强度。

1.3 搅拌摩擦加工

搅拌摩擦加工(FSP)^[27-28]是一种基于搅拌摩擦焊(FSW)原理发展而来的剧烈塑性变形技术。该技术利

用搅拌头与金属摩擦产生大量热量来软化金属,材料的流动方向主要是围绕搅拌头呈环形流动,靠近搅拌头的材料流动速度较快,而远离搅拌头的材料则在热传导和搅拌头压力的作用下逐渐参与流动,这种材料的流动使得原本的微观组织结构发生变形,原本的晶粒会在搅拌过程中被拉长、破碎,然后在新的位置重新结晶^[29-33],其工艺示意图见图7^[34]。自20世纪90年代问世以来,由于其良好的工艺适应性,FSP技术已被广泛用于各种金属材料的剧烈塑性变形研究。FSP制备Mg-Li合金的研究主要包括其对微观组织、力学性能、腐蚀行为及超塑性的影响,涉及的Mg-Li合金包括Li含量较高的双相及 β -Li单相Mg-Li合金。

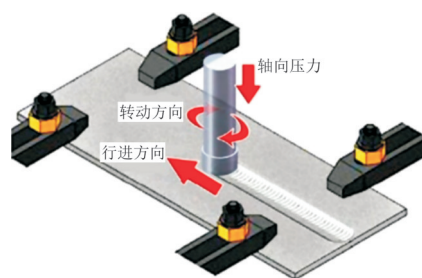
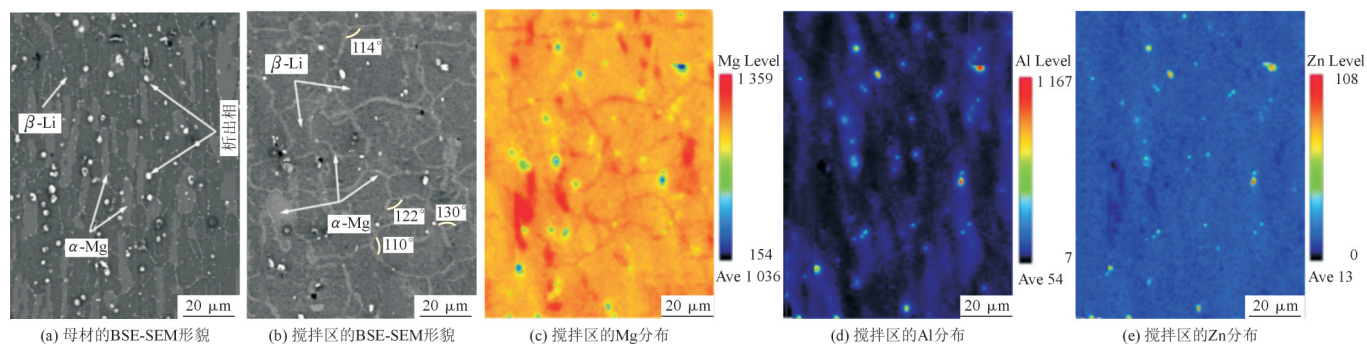
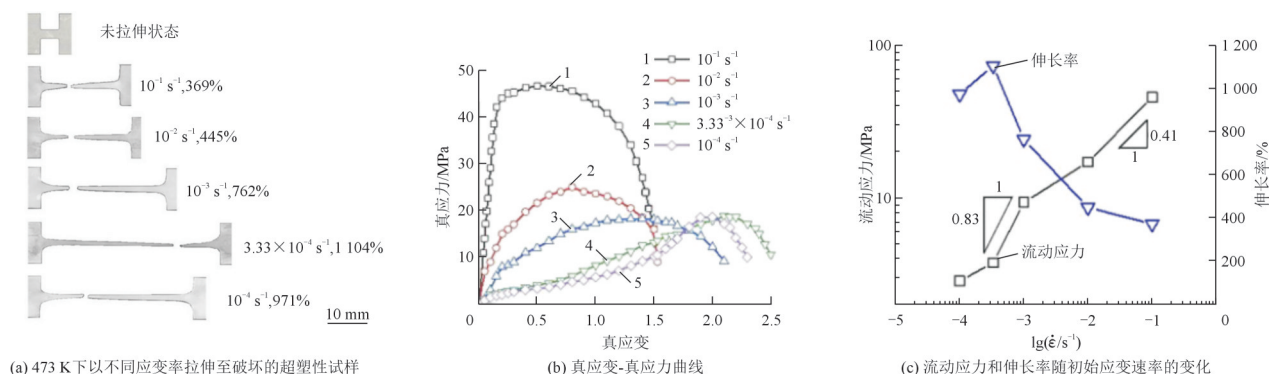


图7 搅拌摩擦加工(FSP)工艺示意图^[34]

Fig.7 Schematic diagram of friction stir processing (FSP) process^[34]

LI Y等^[35]对FSP处理后的LA103Z合金研究发现,在FSP过程中, β -Li相发生完全动态再结晶,晶粒细化明显,见图8。大部分 α -Mg相在摩擦热作用下溶解,晶界附近的Mg在 β -Li相晶粒周围形成连续的 α -Mg相层; β -Li晶粒内部部分Mg与Al、Li形成 MgLi_2Al 相;剩余Mg以溶质原子形式固溶于 β -Li相基体中。由于固溶强化和加工硬化效应,FSP处理LA103Z表现出优异的力学性能,抗拉强度提高了71.7%。

XU N等^[36]研究发现,FSP处理后,LA141合金的搅拌区发生完全动态再结晶,形成大量晶界、纳米级 MgAlLi_2 析出相和层错。FSP处理后合金的力学性能和耐腐蚀性均有明显提升,力学性能的提升来自纳米级 MgAlLi_2 析出相、晶界及Lomer-Cottrell锁对位错运动的抑制作用,而耐腐蚀性的提升则来源于缺陷密度降低和均匀细小 MgAlLi_2 颗粒减弱电偶腐蚀效应,以及由 Li_2CO_3 和 Al_2O_3 组成的致密稳定保护膜。ZHOU M R等^[37]通过对Mg-9Li-1Zn合金进行FSP处理得到超细晶组织,其中 α -Mg和 β -Li相的平均晶粒尺寸分别为0.61 μm 和0.96 μm ,见图9。该合金表现出优异的低温超塑性,在473 K和初始应变速率为 $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 条件下,塑性达到369%~1 104%。分析表明,优异的低温超塑性来源于:① α -Mg和 β -Li相晶粒均被明显细

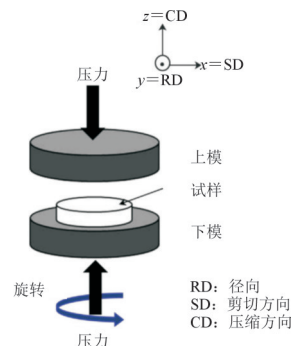
图8 LA103Z合金微观组织^[35]Fig. 8 Microstructure of LA103Z alloy^[35]图9 FSP处理 Mg-9Li-1Zn合金的超塑性行为^[37]Fig.9 Superplastic behavior of FSP-treated Mg-9Li-1Zn alloys^[37]

化;② α -Mg和 β -Li相的充分混合使得两相界面长度大大增加,促进了两相间扩散的发生;③尺寸较小的Li在相界的偏析提高了界面扩散系数。

XU L等^[38]采用电泳沉积技术、搅拌摩擦加工和冷轧工艺制备多壁碳纳米管增强 Mg-14Li-1Al复合材料(MWCNTs/Mg-14Li-1Al),研究复合材料的显微组织和力学性能。结果表明,该复合材料的显微硬度(HV)可达84.4,比铸态基体合金提高了91.38%;其屈服强度和抗拉强度分别为259 MPa和313 MPa,分别比铸态基体合金提高了135.45%和115.86%,比强度高达 2.22×10^5 kN·m/kg。MWCNTs在搅拌摩擦加工和冷轧过程中作为形核颗粒,引起动态再结晶和晶粒细化。此外,MWCNTs的加入可以阻碍位错运动和传递基体载荷,从而提高合金的强度。

1.4 高压扭转

高压扭转(HPT)原理示意图见图10。将材料置于室温或者特定温度下的模具腔中,并在垂直于材料平面的方向上施加压力。同时,旋转下模具产生剪切应力和剪切扭矩,使材料在压力和剪切力的双重作用下发生变形。HPT过程中,所施加的压力一般达到1~10 GPa,高压作用能够有效地抑制再结晶发生、促进晶粒的形变和细化^[39-43]。因此,HPT被认为在众多SPD技术中具有最强的晶粒细化潜力。HPT处理Mg-Li合

图10 高压扭转(HPT)工艺示意图^[44]Fig.10 Schematic diagram of high pressure torsion (HPT) process^[44]

金的研究尚处于起步阶段,主要集中在该工艺对晶粒细化及塑性变形行为的影响。此外,还有关于HPT作用下 β -Li相中析出 α -Mg相行为的报道。

HIROTAKA M等^[45]在室温和3 GPa条件下对Mg-8Li合金进行了5圈的高压扭转(HPT)变形。研究发现,变形后合金中获得了均匀的超细晶组织,平均晶粒尺寸为500 nm,见图11。在初始应变速率为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ s⁻¹条件下,合金在沸水中表现出350%~480%的超塑性,表明该合金具有在热水中进行液压成形的潜力。

SU Q等^[46]在室温和6 GPa条件下对LZ91合金进行了1/4~10圈的高压扭转(HPT)变形。结果发现,HPT具有显

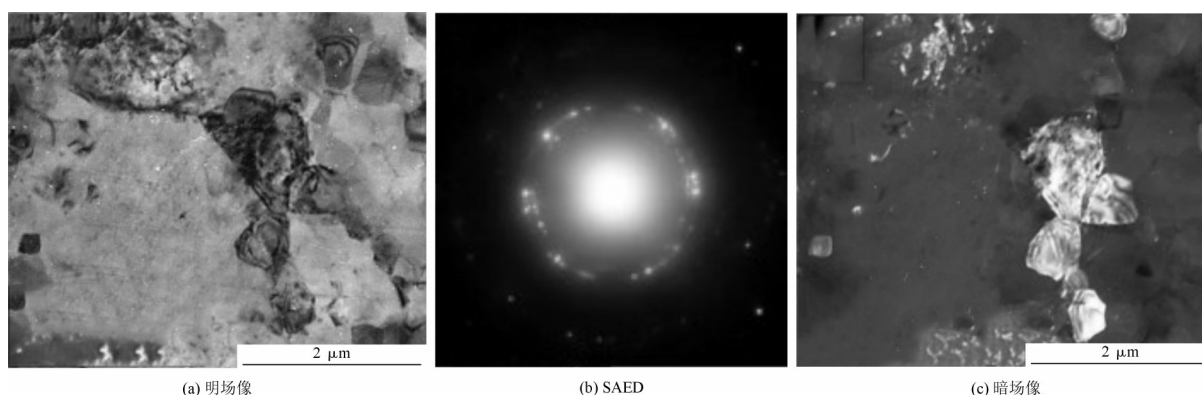

 图 11 HPT 处理 5 圈后 Mg-8Li 合金的 TEM 微观组织^[45]

 Fig.11 TEM microstructure of Mg-8Li alloy after 5 cycles of HPT treatment^[45]

著的晶粒细化效果,经 1 圈 HPT 处理后,晶粒尺寸从 30 μm 减至 260 nm,进一步增加至 10 圈,晶粒尺寸缓慢降至 230 nm,见图 12。受益于细晶强化的贡献,合金的显微硬度呈现出先急剧升高后缓慢上升的趋势,见图 13。经过 10 圈 HPT 处理后,合金在 473 K 和初始应变速率为 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 条件下,表现出 400% 的高伸长率。

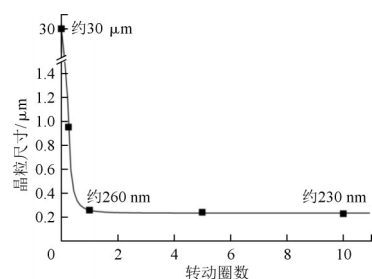
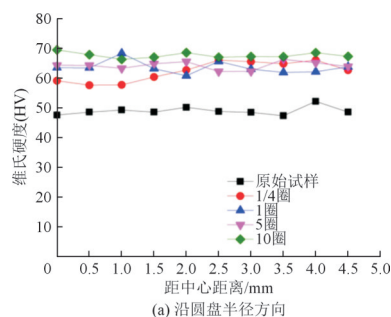
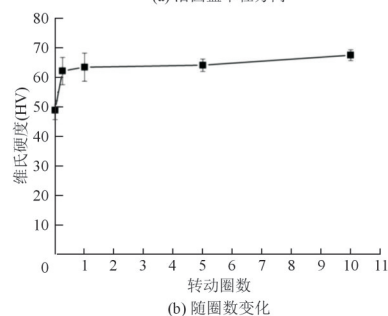

 图 12 HPT 加工前后 LZ91 合金的平均晶粒尺寸变化^[46]

 Fig.12 Average grain size variation of LZ91 alloy before and after HPT processing^[46]


(a) 沿圆盘半径方向



(b) 随圈数变化

 图 13 HPT 处理对 LZ91 合金维氏硬度的影响^[46]

 Fig.13 Effects of HPT treatment on Vickers hardness of LZ91 alloy^[46]

1.5 多向锻造

多向锻造(MDF)是基于传统锻造技术开发的一种通过对金属坯料在多个方向上施加压缩变形,从而细化晶粒、改善金属材料组织性能的剧烈塑性变形技术。不同于传统锻造工艺主要在单一或少数方向进行变形,MDF 是利用特殊的模具或锻造设备,使坯料能在相互垂直或不同角度的多个方向依次或同时承受锻造力^[47-48],其工艺示意图见图 14^[49]。与 HPT 技术类似,MDF 处理 Mg-Li 合金的研究也处于起步阶段,现有研究主要关注 MDF 对合金微观组织、力学性能及超塑性的影响。

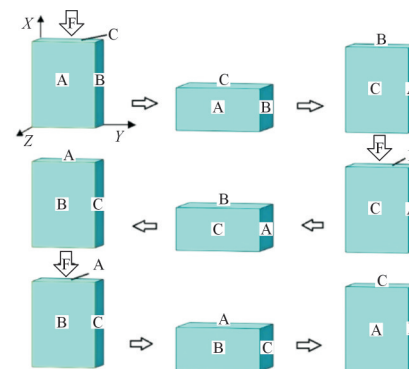

 图 14 多向锻造(MDF)工艺示意图^[49]

 Fig.14 Schematic diagram of multidirectional forging (MDF) process^[49]

MEHRABI A 等^[50]在 423 K 对 Mg-8Li-1Zn 合金进行 MDF 处理时发现,经过 8 道次 MDF 处理后,合金中 β -Li 相平均晶粒尺寸由 8 μm 降至 4 μm ,晶粒宽高比由 1.8 降至 1.3,大角晶界占比从 54% 升至 83%,该合金的超塑性变形主要依赖于晶界扩散主导的晶界滑动。

CAO F R 等^[49,51-52]将 MDF 与常规轧制相结合,开发了 MDFR 技术,并采用 MDFR 制备了双相超细晶 6.4Li-3.6Zn-0.37Al-0.36Y 合金,平均晶粒尺寸仅为

5.5 μm ,同时具有 286 MPa 的抗拉强度和 31.8% 的伸长率。在多向锻造过程中, α -Mg 和 β -Li 相的晶粒细化机制有所不同。 α -Mg 相主要通过机械破碎和变形诱导的动态再结晶来实现晶粒细化, α -Mg 相因 HCP 结构限制,依赖不连续动态再结晶,新晶粒在晶界形核,而 β -Li 相的晶粒细化则主要依赖于变形诱导原位 DRX 晶

粒细化, β -Li 相因 BCC 结构优势,通过连续动态再结晶实现原位晶粒细化,强调亚结构原位演变,见图 15^[50]。Mg-9.55Li-2.92Al-0.027Y-0.026Mn 合金经 MDF 处理后平均晶粒尺寸从铸态的 144.68 μm 降至 1.9 μm ,并在 523 K 和应变速率为 10^{-2} s^{-1} 条件下测得 228.05% 的伸长率,表明合金在该温度下具备高应变速率准超塑性。

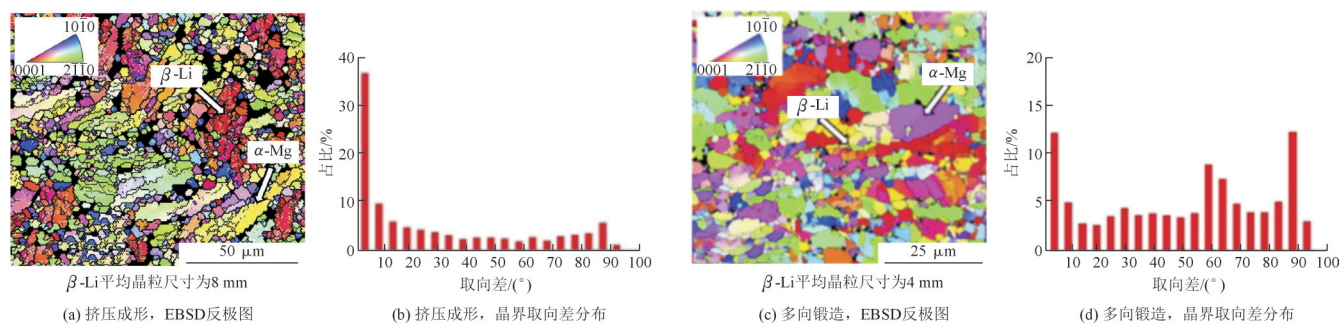


图 15 挤压成形和多向锻造 Mg-8Li-1Zn 合金的 EBSD 反极图和相应的晶界取向差分布^[50]

Fig.15 EBSD inverse pole figure and corresponding grain boundary orientation difference distributions for extruded and multidirectional forged Mg-8Li-1Zn alloys^[50]

2 Mg-Li合金剧烈塑性变形研究展望

2.1 制备

分析 Mg-Li 合金研究现状可发现,由于 Mg-Li 合金材料特性和剧烈塑性变形技术本身局限性,大尺寸均匀超细晶 Mg-Li 合金的制备在 Mg-Li 合金剧烈塑性变形中仍未解决。尽管不同剧烈塑性变形技术对 Mg-Li 合金的细化程度不一,但是采用同样的剧烈塑性变形技术,Mg-Li 合金材料能够达到的晶粒细化效果明显低于常规镁合金,这是由于 Mg-Li 合金本身的回复和再结晶温度较低、晶粒粗化倾向较强,因此要获得超细晶 Mg-Li 合金仍然存在较大难度。现有研究发现,将剧烈塑性变形技术与轧制等常规塑性变形技术相结合,是进一步细化 Mg-Li 合金晶粒的有效途径,值得深入研究。此外,由于 Mg-Li 合金变形过程中的晶粒形核和长大具有显著的温度敏感性,采用较低变形温度能够有效抑制 Mg-Li 合金再结晶晶粒粗大,而 Mg-Li 合金良好的塑性变形能力也确保了其在低温下的变形性能,因此将低温变形与剧烈塑性变形相结合,是制备超细晶 Mg-Li 合金的另一个潜在途径。另一方面,由于大多数剧烈塑性变形技术在制备试样尺寸方面受到较大限制,难以制备大尺寸试样,使得剧烈塑性变形 Mg-Li 合金材料的研究和应用受到较大限制。为了突破剧烈塑性变形技术的试样尺寸限制,近年来研究者已经开展了一些有益尝试,如 ARB 技术本身在制备大尺寸板带材方面就具有天然优势,在 FSP 技术基础上发展而来的多道搭接 FSP 技术也在制备大面积超细晶

材料方面表现出较大潜力,因此,大尺寸均匀超细晶 Mg-Li 合金材料的制备有望借助这些技术取得突破。

2.2 强化

目前剧烈塑性变形 Mg-Li 合金的主要力学性能并不突出,与常规铝、镁合金相比存在较大差距。从强化机制的角度分析,剧烈塑性变形 Mg-Li 合金的强化机制以细晶强化为主,加工硬化、织构强化等仍属于辅助强化机制,由于 Mg-Li 合金在制备超细晶方面存在较大难度,也限制了其细晶强化作用的效果。未来应在深入分析不同剧烈塑性变形 Mg-Li 合金微观组织演变和应力应变行为的基础上,针对性开展 Mg-Li 合金成分和变形工艺设计,充分发挥不同强化机制的协同作用,以获得更佳的强化效果。同时,基于 ARB、FSP 等技术制备金属基复合材料已逐渐受到研究者关注。通过挑选合适的增强体、优化制备工艺,有望通过复合强化与剧烈塑性变形技术相结合,达到显著改善 Mg-Li 合金力学性能的目标。

2.3 应用

目前,Mg-Li 合金材料已在航空航天、武器装备、生物医用等领域取得了一定规模的应用,但受技术、工艺、成本等多方面因素影响,剧烈塑性变形 Mg-Li 合金材料距离大规模实际应用仍存在较大差距。根据材料特点,寻找合适的应用场景,实现剧烈塑性变形 Mg-Li 合金的应用突破,是研究的关键所在。MDF 已成功应用于航空航天、轨道交通及生物医疗等领域,尤其在难变形合金精密成形中展现出显著优势。但目前大部分剧烈塑性变形技术存在设备成本高、材料成本高、加工

成本高、生产效率低、质量稳定性差等问题,在工业化应用中相当受限,需要进一步研究和开发以降低成本、提高生产效率和产品质量。

3 结 语

综述了Mg-Li合金的各种剧烈塑性变形加工工艺和Mg-Li合金剧烈塑性变形的变形机理,其对微观组织和力学性能的影响进行了总结分析,并在制备、强化和应用等方面对Mg-Li合金剧烈塑性变形研究进行了展望。通过不断的技术创新和跨学科合作,剧烈塑性变形Mg-Li合金的前景将更加广阔,为轻量化材料的发展贡献重要力量。

参 考 文 献

- [1] GUO F, LIU L, MA Y L, et al. Mechanism of phase refinement and its effect on mechanical properties of a severely deformed dual-phase Mg-Li alloy during annealing[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, A772: 138-179.
- [2] 林涛,刘运腾,周吉学,等. 挤压比对AZ31B镁合金组织与力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(6): 119-123.
- [3] ZHANG S, MA X C, WU R Z, et al. Effect of Sn alloying and cold rolling on microstructure and mechanical properties of Mg-14Li alloy[J]. *Materials Characterization*, 2021, 182: 111-149.
- [4] GAO Z K, LIU W C, WU G H, et al. Effects of Al and Y addition on microstructures and mechanical properties of as-cast Mg-14Li based alloy [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(2): 1800-1815.
- [5] MA X C, JIN S Y, WU R Z, et al. Corrosion behavior of Mg-Li alloys: A review[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(11): 3228-3254.
- [6] AZUSHIMA A, KOPP R, KORHONEN A, et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals[J]. *CIRP Annals*, 2008, 57(2): 716-735.
- [7] MERKLEIN M, BOHM W. Accumulative roll bonding: Forming behavior, tailored properties and upscaling approach[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 907: 3-16.
- [8] RICHERT M, MCQUEEN H J, RICHERT J. Microband formation in cyclic extrusion compression of aluminum[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1998, 37(5): 449-457.
- [9] VALIEV R Z, ISLAMGALIEV R K, ALEXANDROV I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation[J]. *Progress in Materials Science*, 2000, 45(2): 103-189.
- [10] NADJA B, NADJA A R, MARTIN F X W. Evolution of plastic deformation during multi-pass ECAP of an AA6060 aluminum alloy-An experimental flow line analysis[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 34: 359-371.
- [11] PETER M, ROBERT K, JOSEF P, et al. Evolution of mechanical properties of LAE442 magnesium alloy processed by extrusion and ECAP [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2015, 4(1): 75-78.
- [12] 火照燕,马勤,完彦少君,等. 通道转角挤压对LA141Mg-Li合金显微组织及力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(7): 32-35.
- [13] KARAMI M, MAHMUDI R. Work hardening behavior of the extruded and equal-channel angularly pressed Mg-Li-Zn alloys under tensile and shear deformation modes [J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, A607: 512-520.
- [14] LIU X W, BIAN L P, TIAN F, et al. Microstructural evolution and mechanical response of duplex Mg-Li alloy containing particles during ECAP processing [J]. *Materials Characterization*, 2022, 188: 111910.
- [15] EDWIN E K, SONG D, LI C, et al. Achieving ultra-fine grains and high strength of Mg-9Li alloy via room-temperature ECAP and post rolling [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A833: 142-171.
- [16] EDWIN E K, JIANG J H, WANG G W, et al. Achieving ultra-high specific strength of an ultrafine grained Mg-9Li-1Al alloy via the combined processing of ECAP with repeated annealing and rolling [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 3228-3242.
- [17] 孔晶,刘秦,康志新. 等通道转角挤压双相Mg-10.73Li-4.49Al-0.52Y合金的组织与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(9): 2415-2423.
- [18] HASANABADI M, JAFARIAN H R, SABZI M, EIVANI A R. Investigating the microstructure and mechanical properties of Al-Ag-Sc ultra-fine grain alloy processed by accumulative rolling bonding method [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 2334-2344.
- [19] SAITO Y, UTSUNOMIYA H, TSUJI N, et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding (ARB) process [J]. *Acta Materialia*, 1999, 47(2): 579-583.
- [20] TSUJI N, SAITO Y, LEE S H, et al. ARB (Accumulative roll-bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2003, 5(5): 338-344.
- [21] 詹美燕,李元元,陈维. 累积叠轧技术的研究现状与展望[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(6): 841-851.
- [22] PEREZ-PRADO M T, VALLE D, RUANO O A. Grain refinement of Mg-Al-Zn alloys via accumulative roll bonding [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(11): 1093-1097.
- [23] 王天资. 累积叠轧Mg-Li合金板材组织与性能演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [24] 郑海鹏. 累积叠轧Mg-14Li-3Al-2Gd合金的微观组织与力学行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [25] 武华杰. 累积叠轧 α/β 交替Mg-Li合金层状复合材料的微观组织和力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- [26] XU L, WANG J H, WU R Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-14Li-1Al/MWCNTs composites prepared by electrophoretic deposition and accumulative roll bonding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 72: 431-438.
- [27] WANG W, HAN P, PENG P, et al. Friction stir processing of magnesium alloys: A review [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 33(1): 43-57.
- [28] ROSHAN V M, TAMIRU A L, NABIHAH S, et al. Research

- progress in friction stir processing of magnesium alloys and their metal matrix surface composites: Evolution in the 21st century[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(6): 2 091-2 146.
- [29] JIANG L Y, JIANG W, FEI G F, et al. Micro-nano structure characteristics and texture evolution of the friction stir processed dual-phase Mg-Li alloy [J]. Materials Characterization, 2021, 173: 110 979.
- [30] ZHU Y X, ZHOU M G, 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.
- [31] 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.
- [32] HU K, GUAN Y J, ZHAI J Q, et al. Effect on microstructure and properties of LA103Z Mg-Li alloy plate by multi-pass friction stir processing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 3 985-3 994.
- [33] CHEN X Y, ZHANG Y, CONG M Q. Effect of friction stir processing on microstructure and tensile properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Sn alloy[J]. Vacuum, 2020, 175: 109 292.
- [34] SARMADI H, KOKABI A H, REIHANI S M S, Friction and wear performance of copper-graphite surface composites fabricated by friction stir processing (FSP) [J]. Wear, 2013, 304(1-2): 1-12.
- [35] LI Y, GUAN Y J, LIU Y, et al. Microstructure and tensile properties of the friction stir processed LA103Z alloy[J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112 616.
- [36] XU N, QIU Z H, SONG Q N, et al. Enhanced mechanical properties and corrosion resistance of friction-stir processed ultralight LA141 magnesium-lithium-aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 1 553-1 571.
- [37] ZHOU M R, YOSHIKI M, HIDETOSHI F, et al. Pronounced low-temperature superplasticity of friction stir processed Mg-9Li-1Zn alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A780: 139 071.
- [38] XU L, WANG J H, WU R Z, et al. High specific strength MWCNTs/Mg-14Li-1Al composite prepared by electrophoretic deposition, friction stir processing and cold rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(12): 3 914-3 925.
- [39] ORLOVA T S, LATYNINA T A, MAVLYUTOV A M, et al. Effect of annealing on microstructure, strength and electrical conductivity of the pre-aged and HPT-processed Al-0.4Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 784: 41-48.
- [40] 李惠曲, 邢清源, 饶茂, 等. 超高强度 7A36 铝合金挤压管材热处理工艺研究[J]. 材料工程, 2023, 51(4): 113-121.
- [41] VALIEV R Z, ISLAMGALIEV R K, ALEXANDROV I V. Processing and properties of nanostructured materials prepared by severe plastic deformation[J]. Progress in Materials Science, 2001, 50: 15-21.
- [42] KRASILNIKOV N A, SHARAFUTDINOV A. High strength hand ductility of nanostructured Al-based alloy prepared by high-pressure technique[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A463(1): 74-77.
- [43] XING J, YANG X Y, H MIURA, et al. Superplasticity of fine-grained magnesium alloy AZ31 processed by multi-directional forging[J]. Materials Transactions, 2007, 48(6): 1 406-1 411.
- [44] YAN Z M, ZHU J X, ZHANG Z M, et al. The microstructural, textural, and mechanical effects of high-pressure torsion processing on Mg alloys: A review [J]. Frontiers in Materials, 2022 (9): 964 992.
- [45] HIROTAKA M, KAVEH E, MITSUAKI F, et al. Ultrafine-grained magnesium-lithium alloy processed by high-pressure torsion: Low-temperature super plasticity and potential for hydroforming[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A640: 443-448.
- [46] SU Q, XU J, LI Y Q, et al. Microstructural evolution and mechanical properties in superlight Mg-Li alloy processed by high-pressure torsion[J]. Materials, 2018, 11(4): 598.
- [47] MIURA H, MARUOKA T, YANG X, et al. Microstructure and mechanical properties of multi-directionally forged Mg-Al-Zn alloy [J]. Scripta Materialia. 2012, 66: 49-51.
- [48] JAMALI A, MAHMUDI R. Evolution of microstructure texture and mechanical properties in a multi-directionally forged ZK60 Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A752: 55-62.
- [49] CAO F R, ZHANG J, DING X, et al. Mechanical properties and microstructural evolution in a superlight Mg-6.4Li-3.6Zn-0.37Al-0.36Y alloy processed by multidirectional forging and rolling [J]. Materials Science and Engineering, 2019, A760: 377-393.
- [50] MEHRABI A, MAHMUDI R, MIURA H. Superplasticity in a multi-directionally forged Mg-Li-Zn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2019, A765: 138 274.
- [51] CAO F R, SHANG H H, GUO N P, et al. High strain rate quasi-superplasticity behavior in an ultralight Mg-9.55Li-2.92Al-0.027Y-0.026Mn alloy fabricated by multi-directional forging and asymmetrical rolling[J]. Materials, 2022, 15(21): 7 539.
- [52] CAO F R, XUE G Q, XU G M. Superplasticity of a dual-phase-dominated Mg-Li-Al-Zn-Sr alloy processed by multidirectional forging and rolling [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A704: 360-374.

(编辑:彭瑾)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!