

镁合金复合细晶强化研究进展

章欧¹, 胡红军¹, 胡刚¹, 张丁非², 戴庆伟³, 欧忠文⁴

(1. 重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400050; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 重庆科技学院 冶金与材料学院, 重庆 401331; 4. 陆军勤务学院 化学与材料学院, 重庆 401311)

摘要: 细化镁合金的晶粒可极大改善其综合力学性能, 单一的细化方法包括在熔体中施加外力场作用、高压和激冷作用以及大塑性变形, 单一细化方法下的材料性能难以满足实际需求, 且生产效率低、成本高、质量难以保证。2种及以上细化晶粒方法的结合可以实现镁合金性能的极大提升, 通过评述镁合金复合加工方法, 包括挤压铸造-固态挤压成形、挤压铸造-正挤压成形、FE-CCAE 复合变形工艺、电磁脉冲结合轧制工艺、超声振动-挤压加工等, 详细阐述镁合金复合细晶强化工艺的研究进展, 为进一步研究和开发更加高效绿色的镁合金晶粒细化复合成形技术提供参考。

关键词: 镁合金; 复合加工; 外加场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.06.013

中图分类号: TG146.2⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)06-0098-08

Research Progress on Composite Refinement Strengthening of Magnesium Alloy

ZHANG Ou¹, HU Hong-jun¹, HU Gang¹, ZHANG Ding-fei², DAI Qing-wei³, OU Zhong-wen⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. School of Metallurgy and Materials, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

4. School of Chemistry and Materials, Army Service College, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: The grain refinement of magnesium alloy can greatly improve the comprehensive mechanical properties. Single refinement method includes applying external force field, high pressure and chilling action, and large plastic deformation in melt. The properties of materials processed by single refinement method are difficult to meet the actual production needs, and the production efficiency is low, the cost is high, and the quality is difficult to guarantee. The combination of two or more grain refinement methods can achieve greater improvement in the properties of magnesium alloys. Through the review on composite processing methods of magnesium alloy, including squeeze casting-solid extrusion forming, squeeze casting-positive extrusion, FE-CCAE composite deformation process, electromagnetic pulse combined rolling process, ultrasonic vibration-extrusion processing, et al, the research progress on composite refinement strengthening process of magnesium alloy is expounded in detail, which provides a reference for further research and development of more efficient and green composite forming technology of refining magnesium alloy grains.

KEY WORDS: magnesium alloy; composite processing; external field

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52071042, 51771038); 重庆英才计划 (CQYC202003047); 重庆市自然科学基金 (cstc2018jcyjAX0249, cstc2018jcyjAX0653)

作者简介: 章欧 (1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为镁合金组织与性能的优化调控。

通讯作者: 胡红军 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轻合金材料科学与工程。

镁合金作为最轻的结构材料，具有比强度和比刚度高等特点，被誉为“21 世纪绿色工程金属”。镁的晶体结构为密排六方结构，滑移系少，在低温和室温条件下的塑性比较差，成形困难、成材率低，制约了镁合金产业的发展。师昌绪等^[1]认为“开发镁工业是一项既具有现实意义又关系到今后长远发展战略的事业，政府部门应给予特殊考虑”。目前镁合金的应用主要为铸造产品，变形镁合金材料因加工成本高、服役寿命较短、延展性差等因素，其产业化受到了限制，其中高成本极大制约了其大规模推广应用和镁合金产业的发展。

激冷铸造和压力铸造虽然可细化镁合金零部件的表面组织，但心部晶粒粗大并存在大量孔洞类缺陷，因此，镁材的综合性能差。热塑性变形虽然可消除这些缺陷，但易形成纤维组织和强烈的基面织构，且延展性低、塑性差、成形困难、成材率低，镁材后续的加工性能及服役性能较差^[2]。左铁镭等^[3]认为材料的制备、生产是一个不断消耗资源和破坏人类赖以生存环境的过程，并会影响经济、社会的可持续发展。综上所述，研发可高效调控镁合金微观组织和性能的低成本成形技术是提升镁合金综合性能亟需解决的重要科技问题。

根据 Hall-Petch 理论，晶粒细化可同时提高镁合金的强度和塑性，各国学者普遍认为晶粒细化和织构优化是提高镁合金综合性能的最有效途径，主要包括 3 个方面^[4]：合金化、外加场和模具激冷作用、热变形及动态再结晶。单独工艺的使用已经难以满足现在对镁合金性能调控的需求，目前多种复合工艺得到不断发展，促进了镁合金各项性能的改善以及生产效率的提升。

1 铸造镁合金细化晶粒技术

镁合金成形分为塑性成形和铸造成形。当前主要使用铸造成形工艺，包括砂型铸造、消失模铸造、压铸、半固态铸造等方法，近年发展起来的新技术有真空压铸和充氧压铸，铸造镁合金的晶粒细化主要是着眼于合金化、变质处理^[5]、外加场和激冷作用等方法^[6-7]。

1.1 变质细化处理

变质处理就是向金属液体中加入细小的形核剂（又称为变质剂），使金属液中形成大量分散的、人工制造的非自发晶核，从而获得细小的铸造晶粒，达到提高材料性能的目的^[8]。王欣欣等^[9]研究表明，变质剂 C₂Cl₆ 对 α-Mg 的晶粒组织具有明显的细化作用，且随着加入量的增多，细化效果也愈加显著，同时 β 相变得弥散细小。稀土对镁合金具有很好的固溶强化

作用，与 α-Mg 形成固溶体，偏析导致固液界面前沿液体的平衡温度降低，界面的过冷度减小，使晶体的生长受到抑制，从而促进晶核的形成，细化晶粒。艾庐山等^[10]研究表明，稀土元素 Ce 可以细化 AZ91 镁合金铸态晶粒，当 Ce 的质量分数为 1.2% 时，细化效果最明显。

1.2 外加场作用

通过对镁合金熔体施加脉冲磁场以及脉冲电流、超声波、机械振动、搅拌等，使镁合金熔体中的枝晶破碎，促进形核，从而细化晶粒，提高镁合金性能。石文静等^[11]研究表明，电磁搅拌可以提高合金的力学性能，当电磁搅拌的频率为 6 Hz，电流强度为 150 A 时，抗拉强度达到了 175 MPa，伸长率为 13.75%。在电磁搅拌作用下，β-Mg₁₇Al₁₂ 相逐渐被打碎，且晶粒得到细化。杨院生等^[12]将低压脉冲磁场作用于镁合金熔体，研究发现，二次臂的折断和其产生的焦耳热极大促进了晶粒细化。如表 1 所示，低压脉冲磁场对镁合金产生了良好的晶粒细化作用。

表 1 合金晶粒细化的统计结果
Tab.1 Statistical results of alloy grain refinement

合金	晶粒尺寸/μm	
	无低压脉冲磁场	有低压脉冲磁场
AZ31	2500	157
AZ91D	424	104
AZ80	2200	215
AM60	628	143
AS31	1116	217
Mg-Gd-Y-Zr	65	37

超声波在传播时具有声空化、声压和机械等效应，产生的搅拌可以使枝晶破碎，提高熔体形核率，减少宏观和微观偏析；超声波还可以使温度场变均匀，促进结晶潜热的散发，增加过冷度，从而促进晶粒细化。Shao 等^[13]、余琨等^[14]和张志强等^[15]采用不同强度超声对镁合金熔体进行了处理，以改善合金的凝固组织。付浩等^[16]研究表明，通过控制超声熔体的处理参数与凝固条件，可以细化 AZ91D-3Ca 阻燃合金的凝固组织。赵宇昕等^[17]研究表明，通过对 AZ31 镁合金进行超声处理，可有效促进合金晶粒细化，获得均匀晶粒组织，抑制连续的 Mg₁₇Al₁₂ 相析出。Guan 等^[18]研究表明，使用震动的倾斜板浇注，并采用半固态铸轧，可显著提高形核率，形成球状的初生晶粒。

1.3 高压和激冷作用

通过对熔体施加高压或激冷作用既可以促进晶粒的细化，还可减少铸造镁合金的内部缺陷。林小婷

等^[19]研究表明,在4 GPa高压作用下,AZ91D合金凝固组织中的 α -Mg基体不仅得到了显著细化,且分布于枝晶间的 β -Mg₁₇Al₁₂也由常压下的“骨骼状”连续分布转变为纳米级颗粒状弥散分布,因此,使该合金的硬度得到显著提升。激冷作用是通过不同厚度的冷铁对合金铸件进行激冷或者采用金属模铸造,实现熔体金属材料的快速冷却,增大过冷度,最终促进形核。Xu^[20]等采用金属模铸造和激冷铸造生产了Mg-3.6Al-3.4Ca-0.3Mn,发现激冷铸造形成的胞状晶明显较细。王其龙等^[21]研究表明,金属模铸造的镁合金晶粒组织远远比砂型铸造的细。

2 变形镁合金细化晶粒技术

使用传统铸造和压铸工艺批量化生产镁合金时,存在气孔、偏析、晶粒粗大等缺陷,导致镁合金的性能受到极大限制,无法满足工业化要求。通过变形加工如轧制、挤压等方法,既可以减少铸造镁合金的部分缺陷,也可以增强镁合金的综合性能。

变形镁合金主要采用热塑性变形来细化晶粒^[22],并对变形织构进行优化^[23],如轮毂新型挤压法^[24]、挤压轧制^[25]、反复镦粗^[26]、等通道挤压^[27]、热轧^[28]、连续挤压^[29]、异步轧制^[30]、纯剪切挤压^[31]、双向连续挤压^[32]等成形方法。大量实验表明,大塑性变形是细化镁合金晶粒更加有效的方法,如等通道转角挤压、剧烈热轧、累积叠轧、高压扭转法^[33]等。

2.1 累积叠轧

累积叠轧(ARB)是在一定温度下,对经表面处理尺寸相等的两块及以上金属板进行叠轧结合,反复轧制,产生大累积应变,使内部晶粒在大应变下破碎,得到均匀细小的组织,同时材料性能也发生突变,有利于提高板材强度及延伸率^[34—35]。张兵等^[36]研究表明,累积复合轧制可有效细化镁合金晶粒,经过4道次后,平均晶粒尺寸由17.8 μm 减小到近1.2 μm ,且强度和硬度都有所增加,组织均匀性也得到提高。为解释晶粒细化机制的转变对板材微观组织的影响,有学者对ARB后的AZ31镁合金板材进行了深入研究。据Trojanova等^[37]报道,在400 $^{\circ}\text{C}$ 下累积叠轧两道次后,晶粒发生持续旋转动态再结晶,晶粒细化。

2.2 等通道转角挤压

等通道转角挤压(ECAP)是在挤压前后材料的截面面积和形状不发生改变的前提下发生大塑性变形,使晶粒细化到微米、亚微米及纳米尺度,可显著提高Mg合金的综合性^[38—39]。ECAP在制备高强度轻合金的应用上受到越来越多研究人员的关注。火照燕等^[40]对LA14镁锂合金进行等通道转角挤压变形后,合金强度得到大幅提升,且随着等通道转角挤压道数

的增加,其强韧性和塑性变形能力增强。杨宝成等^[41]研究发现,AZM63-1Si镁合金经等通道转角挤压后, α -Mg基体和片层状Mg₂Zn相得到有效细化,随着道次的增加,汉字状Mg₂Si逐渐破碎成颗粒状,并逐步均匀地分布到细化后的 α -Mg基体中,合金的力学性能显著提高。杨杰等^[42]研究表明,采用160 $^{\circ}$ 大角度等通道转角挤压对AZ61进行处理,一定条件下可以获得平均尺寸为1 μm 的晶粒组织,细化机理以动态再结晶为主。需要进行多道次挤压才能得到超细晶组织,挤压效率低下、成本较高,不利于工业化应用^[43]。如何进一步提高材料的各方面性能,提高加工效率,需要对不同的材料采用不同的工艺进行研究,同时也需要对等通道转角挤压的模具与挤压方式进一步优化。

2.3 往复挤压

往复挤压是集挤压和镦粗为一体的剧烈塑性变形工艺,能有效细化晶粒,克服传统轧制和挤压后的材料裂纹和各向异性等缺陷,使材料内部组织均匀化,十分有望实现商业化应用。夏显明等^[44]研究表明,在往复挤压过程中,ZK60镁合金晶粒得到显著细化,随着道次增加,晶粒等轴倾向明显,晶粒分布趋于均匀。程正翠^[45]研究表明,随着ZK30镁合金往复挤压次数增加,合金晶粒慢慢细化,当ZK30往复挤压变形道次超过8次后,其力学性能变化不大。韩飞等^[46]研究表明,铸态ZK60镁合金在一定范围内增加挤压比和往复挤压的次数,均有利于组织细化,虽然挤压道次对晶粒细化效果不明显,但有利于晶粒的均匀化,因此,选用合理的挤压比和挤压道次可以获得均匀细小的组织。

3 复合成形工艺研究现状

复合工艺成形就是将2种及以上的细晶强化手段结合,实现快速、高效的镁合金生产。细化铸造合金和变形镁合金晶粒的方法虽然均有独有的强化机制,但各自也有一定的局限性。有研究人员通过将2种及以上的细化方法相结合,综合利用各自优势实现了镁合金综合性能的最优化,如外力场铸造与挤压成形相结合^[47—48]、激冷铸造与轧制成形相结合、外加场与塑性变形结合等复合成形工艺。

3.1 特种铸造与塑性变形复合

激冷铸造^[49]和外力场作用虽可有效细化晶粒,但铸坯内部总是存在一些空洞类缺陷和粗大晶粒,降低了镁合金结构件的力学性能,因此,学者们采用特种铸造和塑性变形相结合的复合工艺改善镁合金的性能。哈尔滨工业大学的Jiang等^[50]开发了一种镁合金压铸-锻造双控设备生产摩托车汽缸体,与压铸相比,

此工艺生产的镁合金材料极限抗拉强度和伸长率大大增加,同时铸造缺陷显著减少。Chen 等^[51]发现,挤压铸造-固态挤压成形 AZ91D-RE 的拉伸力学性能优于触变锻造 AZ91D-RE。

为了减少铸造镁合金气孔、夹杂等缺陷,同时缩短热挤压的加热时间,Chen 等^[51]利用挤压铸造和正挤压两步工艺生产 AZ91D-RE 镁合金半固态坯料,如图 1 所示;然后采用触变锻造生产无孔洞缺陷的复杂零件。Zhao 等^[52]开发了一种改善 AZ31 合金晶粒和性能的新型连续挤压铸造-挤压工艺,无需进行严重的塑性变形和热处理即可细化晶粒、强化结构,且高效节能。冯靖凯等^[53]研究了一种固液两相区的复合挤压工艺,如图 2 所示。由于是固液两相共存,挤压引起的枝晶破碎和压力会影响过冷度,因此,既可细化晶粒,又可促进组织均匀化,且液相的存在降低了挤压织构的强度,后续的剪切变形进一步细化了晶粒,最终提升了其综合力学性能。该工艺既提升了镁合金的综合性能,降低了挤压的难度,还进一步缩短了制备的工艺流程。

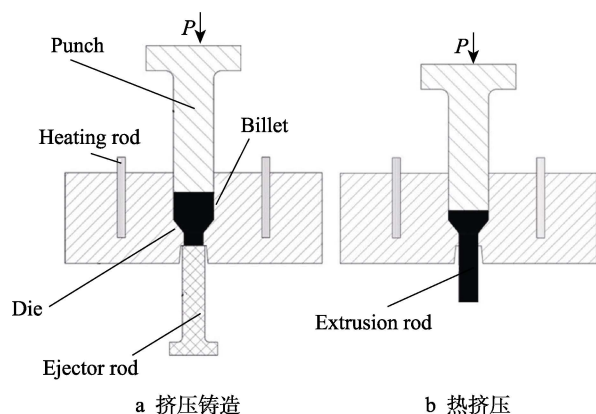


图 1 连续挤压铸造工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of continuous squeeze casting process

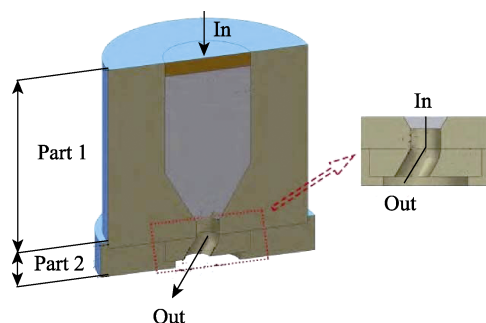


图 2 挤压模具及坐标系示意

Fig.2 Schematic diagram of extrusion die and coordinate system

3.2 大塑性变形复合

2 种大塑性变形加工工艺结合可以增强镁合金的累积变形和晶粒细化效果。于彦东等^[54]在变通道转角挤压 (CCA) 工艺和正挤压工艺 (FE) 的基础上设

计出一套正挤压-变通道转角挤压复合挤压模具 (见图 3),发现 FE-CCA 复合变形工艺后的累积变形量大于分别进行 FE 和 CCA 的累积变形量之和,晶粒细化显著。刘雁峰^[55]设计出一种新型的大塑性变形方法,即正挤压和弯曲剪切结合的连续成形新工艺 (DEBS),既可以显著细化晶粒,又可弱化典型的强基面织构,镁合金综合性能得到极大提升,且该工艺效率高、生产成本低、可一道次成形,具有极大的发展前景。尹振入^[56]采用预变形和正挤压扭转变形的方法改善 AQ80 镁合金的综合性能,该方法可以很好地弱化 AQ80 镁合金 (002) 基面织构,力学性能也得到明显改善。

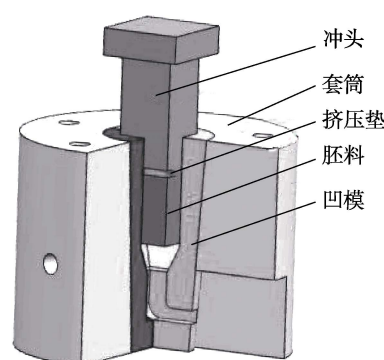


图 3 FE-CCA 模具

Fig.3 FE-CCA die

3.3 外加场与塑性变形复合

外加场既可以降低塑性变形的难度,还能促进镁合金的动态再结晶。Su 等^[57]将静磁场引入镁合金铸轧中,成功得到晶粒细小的镁合金薄板。Kuang 等^[58]研究表明,电磁脉冲结合轧制可以使 AZ31 镁合金的变形晶粒产生 TD 劈裂织构,该织构可以提高镁合金板材的轧制性能。Yan 等^[59]研究表明,脉冲磁场产生的洛伦兹力和焦耳热可以使轧制后的 AZ31 镁合金残余应力下降 26.6%~30.3%。曹秒艳等^[60]研究表明,在超声振动条件下, AZ31B 镁合金的流动应力下降量与超声振幅呈正比,变形难度降低。在塑性变形后期,超声作用可以增强位错的增殖和再分布,使材料得到硬化。何劲松等^[61]研究表明,将超声振动和挤压结合,超声波可使 ZK60 合金发生动态再结晶,变形应力下降,变形能力提高,晶粒由原始的 132 μm 下降到 19 μm 。

4 结语

要提高镁合金的综合性能需要综合利用外加温度场、磁场、应力场等多场耦合作用,充分考虑镁合金晶粒细化的工艺和装备因素,实现低成本、高效、快速的镁合金加工,对如今镁合金的商业化发展极其

重要。目前对镁合金复合成形方法的研究较少,新型复合成形方法及强化机理还需进一步探索,主要包括以下3个方面。

1) 研发外加场如电磁场、温度场、超声波等与大塑性变形工艺相结合的多场条件下的变形镁合金晶粒复合强化工艺,将其应用于高性能变形镁合金的工业化生产。目前,许多复合工艺在生产高性能镁合金方面具有巨大潜力,且在实际情况下,设备开发及参数控制优化较难,因此,需要进行更加深入的研究,以开发适合企业生产应用的复合工艺。

2) 完善新型铸造工艺与塑性成形工艺结合的镁合金复合加工技术。特种铸造和各种塑性成形工艺在细化晶粒方面均具有优劣势,如能够更多地将2种及以上的晶粒细化工艺联合起来,可极大提升镁合金材料性能。

3) 加强晶粒组织对各项性能影响的研究。目前,越来越多的学者重点对镁合金的强化机制进行研究探讨,以寻找晶粒组织与镁合金性能的关系,进而更好更快地实现镁合金性能的优化。

参考文献:

- [1] 师昌绪,李恒德,王淀佐,等.加速我国金属镁工业发展的建议[J].材料导报,2001,15(4):5—7.
SHI Chang-xu, LI Heng-de, WANG Dian-zuo, et al. Suggestions on Accelerating the Development of China's Magnesium Industry[J]. Materials Review, 2001, 15(4): 5—7.
- [2] 柯伟,陈荣石.深闺待嫁镁合金[J].科学中国人,2013(5):16—19.
KE Wei, CHEN Rong-shi. Bestie Magnesium Alloy[J]. Scientific Chinese, 2013(5): 16—19.
- [3] 左铁镭,戴铁军.有色金属材料可持续发展与循环经济[J].中国有色金属学报,2008,18(5):755—763.
ZUO Tie-yong, DAI Tie-jun. Nonferrous Metal Material Sustainable Development and Circular Economy[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 755—763.
- [4] 杨素媛,才鸿年,王富耻.动态加载条件下细晶镁合金的组织特征及形成机制[J].北京理工大学学报,2009,29(2):168—172.
YANG Su-yuan, CAI Hong-nian, WANG Fu-chi. Microstructure Characteristics and Formation Mechanism of Fine Grain Magnesium Alloy under Dynamic Loading Conditions[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(2): 168—172.
- [5] 张坤敏,敬学锐,何雄江川,等.对Mg-4Zn变形镁合金组织与性能的影响[J].精密成形工程,2020,12(5):46—52.
ZHANG Kun-min, JING Xue-rui, HE Xiong-jiang-chuan, et al. Effect on Microstructure and Properties of Wrought Mg-4Zn Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 46—52.
- [6] DAI J, ZHU S, EASTON M A, et al. Precipitation Process in a Mg-Gd-Y Alloy Grain-Refined by Al Addition[J]. Materials Characterization, 2014, 88: 7—14.
- [7] 徐河,刘静安,谢水生.镁合金制备与加工技术[M].北京:冶金工业出版社,2007:120—180.
XU He, LIU Jing-an, XIE Shui-sheng. Magnesium Alloy Preparation and Processing Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 120—180.
- [8] 万迪庆,袁艳平,周新建.高强镁合金组织细化方法研究现状[J].材料导报,2015,29(9):76—80.
WANG Di-qing, YUAN Yan-ping, ZHOU Xin-jian. Research Status of Microstructure Refinement Methods for High Strength Magnesium Alloys[J]. Material Guide, 2015, 29(9): 76—80.
- [9] 王欣欣,袁森,曾书峰,等.C₂Cl₆对AM60合金组织与性能的影响[J].热加工工艺,2008(13):17—20.
WANG Xin-xin, YUAN Sen, ZENG Shu-feng, et al. Effect of C₂Cl₆ on the Structure and Properties of AM60 Alloy[J]. Thermal Processing Technology, 2008(13): 17—20.
- [10] 艾庐山,袁森,康彦,等.添加稀土元素Ce对AZ91D镁合金组织的影响[J].稀有金属快报,2006(2):31—35.
AI Lu-shan, YUAN Sen, KANG Yan, et al. Effect of Adding Rare Earth Element Ce on the Microstructure of AZ91D Magnesium Alloy[J]. Rare Metals Express, 2006(2): 31—35.
- [11] 石文静,卞健从,王冰,等.电磁搅拌AZ31镁合金固溶处理研究[C]//2017中国铸造活动周论文集,2017:7.
SHI Wen-jing, BIAN Jian-cong, WANG Bing, et al. Study on Electromagnetic Stirring AZ31 Magnesium Alloy Solution Treatment[C]//2017 China Foundry Activity Week Proceedings, 2017: 7.
- [12] 杨院生,付俊伟,罗天骄,等.镁合金低压脉冲磁场晶粒细化[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2639—2649.
YANG Yuan-sheng, FU Jun-wei, LUO Tian-jiao, et al. Magnesium Alloy Low-Voltage Pulsed Magnetic Field Grain Refinement[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2639—2649.
- [13] SHAO Z W, LE Q C, ZHANG Z Q, et al. Numerical Simulation of Acoustic Pressure Field for Ultrasonic Grain Refinement of AZ80 Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(11): 2476—2483.
- [14] 余琨,薛新颖,毛大恒,等.超声铸造对AZ31镁合金铸锭及热轧板材组织与性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):1918—1923.
XU Kun, XUE Xin-ying, MAO Da-heng, et al. Effect of Ultrasonic Casting on the Microstructure and Properties of AZ31 Magnesium Alloy Ingot and Hot Rolled Sheet[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2011, 42(7): 1918—1923.

- [15] 张志强, 乐启炽, 崔建忠, 等. 超声场作用下 Mg-4Al-1Si 合金凝固组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 574—578.
- ZHANG Zhi-qiang, LE Qi-chi, CUI Jian-zhong, et al. Solidified Structure of Mg-4Al-1Si Alloy under Ultrasonic Field[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 574—578.
- [16] 付浩, 周全. 超声处理对 AZ91D-3Ca 镁合金凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(2): 178—181.
- FU Hao, ZHOU Quan. The Effect of Ultrasonic Treatment on the Solidification Structure of AZ91D-3Ca Magnesium Alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2013, 33(2): 178—181.
- [17] 赵宇昕, 王朝辉, 李淑波, 等. 超声处理对 AZ31 镁合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(7): 674—677.
- ZHAO Yu-xin, WANG Chao-hui, LI Shu-bo, et al. The Effect of Ultrasonic Treatment on the Structure and Properties of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2010, 30(7): 674—677.
- [18] GUAN R G, ZHAO Z Y, ZHANG H, et al. Microstructure Evolution and Properties of Mg-3Sn-1Mn Alloy Strip Processed by Semisolid Rheo-Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1430—1436.
- [19] 林小婷, 徐瑞, 樊志斌, 等. 铝、镁合金高压凝固及高压凝固理论研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 1—7.
- LIN Xiao-pin, XU Rui, FAN Zhi-bin, et al. Research Progress in High-Pressure Solidification and High-Pressure Solidification Theory of Aluminum and Magnesium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 1—7.
- [20] XU S W, OH-ISHI K, KAMADO S, et al. Effects of Different Cooling Rates during Two Casting Processes on the Microstructures and Mechanical Properties of Extruded Mg-Al-Ca-Mn Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 542(4): 71—78.
- [21] WANG Q-L, WU G H, HOU Z Q, et al. A Comparative Study of Mg-Gd-Y-Zr Alloy Cast by Metal Mould and Sand Mould[J]. China Foundry, 2010, 7(1): 6—12.
- [22] 杜文博, 秦亚灵, 严振杰, 等. 大塑性变形对镁合金微观组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(10): 1870—1876.
- DU Wen-bo, QIN Ya-ling, YAN Zhen-jie, et al. The Effect of Large Plastic Deformation on the Microstructure and Properties of Magnesium Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(10): 1870—1876.
- [23] 丁文江, 靳丽, 吴文祥, 等. 变形镁合金中的织构及其优化设计[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2371—2381.
- DIN Wen-jiang, JIN Li, WU Wen-xiang, et al. Texture and Optimization Design in Wrought Magnesium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2371—2381.
- [24] WANG Q, ZHANG Z M, ZHANG X, et al. New Extrusion Process of Mg Alloy Automobile Wheels[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: s599—s603.
- [25] 李秀莲, 王茂银, 辛仁龙, 等. AZ31 镁合金挤压轧制过程微观组织演变[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(5): 61—65.
- LI Xiu-lian, WANG Mao-yin, XIN Ren-long, et al. Micro-Texture Evolution of AZ31 Magnesium Alloy during Extrusion Rolling[J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(5): 61—65.
- [26] LIU J F, WANG Q D, ZHOU H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of NZ30K Magnesium Alloy Processed by Repetitive Upsetting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 589(3): 372—377.
- [27] JAHADI R, SEDIGHI M, JAHED H. ECAP Effect on the Micro-Structure and Mechanical Properties of AM30 Magnesium Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 593(1): 178—184.
- [28] SHI B Q, CHEN R S, KE W. Effects of Yttrium and Zinc on the Texture, Microstructure and Tensile Properties of Hot-Rolled Magnesium Plates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 560(1): 62—70.
- [29] GUAN R G, ZHAO Z Y, CHAO R Z, et al. Effects of Technical Parameters of Continuous Semisolid Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-3Sn-1Mn Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1): 73—79.
- [30] YANG Q S, JIANG B, ZHOU G Y, et al. Influence of an Asymmetric Shear Deformation on Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Sheet[J]. Materials Science Engineering A, 2014, 590(1): 440—447.
- [31] TORK N B, PARDIS N, EBRAHIMI R. Investigation on the Feasibility of Room Temperature Plastic Deformation of Pure Magnesium by Simple Shear Extrusion Process[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 560(1): 34—39.
- [32] HUANG H, YUAN G Y, CHU Z H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Double Continuously Extruded Mg-Zn-Gd-Based Magnesium Alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 560(1): 241—248.
- [33] 丁春慧, 李萍, 丁永根, 等. 基于高压扭转工艺的 Al-Zn-Mg-Cu 合金强韧化机理研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 126—131.
- DING Chun-hui, LI Ping, DING Yong-gen, et al. Research on the Mechanism of Strengthening and Toughening of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Based on High-Pressure Torsion Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 126—131.
- [34] 汪程鹏, 李付国, 陆红亚, 等. 剧烈塑性变形制备纳米材料的变形细化机理[J]. 金属热处理, 2012,

- 37(2): 14—19.
- WANG Cheng-peng, LI Fu-guo, LU Hong-ya, et al. Deformation Refinement Mechanism of Micro-Nano Materials Prepared by Severe Plastic Deformation[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(2): 14—19.
- [35] 郭俊卿, 丁祎, 陈拂晓, 等. AZ63 镁合金累积叠轧界面结合机制的研究[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1): 60—65.
- GUO Jun-qing, DIN Wei, CHEN Fu-xiao, et al. Study on the Interface Bonding Mechanism of AZ63 Magnesium Alloy Cumulative Rolling[J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 60—65.
- [36] 张兵, 袁守谦, 张西锋, 等. 累积复合轧制对镁合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(9): 1607—1612.
- ZHANG Bing, YUAN Shou-qian, ZHANG Xi-feng, et al. Effect of Cumulative Composite Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(9): 1607—1612.
- [37] TROJANOVA, DROZ D, LUKÁ P, et al. Amplitude-Dependent Internal Friction in AZ31 Alloy Sheets Submitted to Accumulative Roll Bonding[J]. Low Temperature Physics: Simultaneous Russian-English publication, 2018, 44(9): 966—972.
- [38] ENZE C, LAURENT D, ANNE M H, et al. Multiscale Modeling of Back-Stress Evolution in Equal-Channel Angular Pressing: from One Pass to Multiple Passes[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(17): 4696—4704.
- [39] 葛佳琪, 杨文朋, 王诗蒙, 等. 镁合金等通道转角挤压的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 527(1): 13—16.
- GE Jia-qi, YANG Wen-peng, WANG Shi-meng, et al. Research Progress of Equal Channel Angular Extrusion of Magnesium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 527(1): 13—16.
- [40] 火照燕, 马勤, 完彦少君, 等. 通道转角挤压对 LA141 镁锂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.
- HUO Zhao-yan, MA Qin, WANYAN Shao-jun. Effect of Equal Channel Angular Extrusion on the Microstructure and Mechanical Properties of LA141 Magnesium-Lithium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(7): 32—35.
- [41] 杨宝成, 韩富银, 马盈, 等. 等通道转角挤压 ZAM63-1Si 镁合金的组织 and 性能[J]. 轻合金加工技术, 2018, 488(4): 38—42.
- YANG Bao-cheng, HAN Fu-yin, MA Ying, et al. Microstructure and Properties of ZAM63-1Si Magnesium Alloy by Equal Channel Angular Extrusion[J]. Light alloy Processing Technology, 2018, 488(4): 38—42.
- [42] 杨杰, 樊建锋, 单召辉, 等. 160°大角度等通道转角挤压 AZ61 组织演化与力学性能[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 729—733.
- YANG Jie, FAN Jian-feng, SHAN Zhao-hui, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ61 under 160° High Angle Equal Channel Angular Extrusion[J]. Casting Technology, 2019, 40(7): 729—733.
- [43] 董蔚霞, 王晓溪, 夏华明, 等. 新型等径角挤压工艺下的 5052 铝合金变形行为的有限元模拟[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 43—47.
- DONG Wei-xia, WANG Xiao-xi, XIA Hua-ming, et al. Finite Element Simulation of Deformation Behavior of 5052 Aluminum Alloy under New Equal Channel Angular Extrusion Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 43—47.
- [44] 夏显明, 薛克敏, 李萍, 等. 挤压态 ZK60 镁合金往复挤压力学性能研究[J]. 有色金属工程, 2017, 7(3): 24—29.
- XIA Xian-ming, XUE Ke-ming, LI Ping, et al. Study on the Mechanical Properties of Reciprocating Extrusion of Extruded ZK60 Magnesium Alloy[J]. Non-Ferrous Metal Engineering, 2017, 7(3): 24—29.
- [45] 程正翠. 往复挤压对 ZK30 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2019, 19(6): 11—14.
- CHENG Zheng-cui. Effect of Reciprocating Extrusion on the Microstructure and Mechanical Properties of ZK30 Magnesium Alloy[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2019, 19(6): 11—14.
- [46] 韩飞, 陈刚, 刘洪伟, 等. 铸态 ZK60 镁合金往复挤压的组织与性能[J]. 精密成形工程, 2017, 9(2): 40—44.
- HAN Fei, CHEN Gang, LIU Hong-wei, et al. Microstructure and Properties of As-Cast ZK60 Magnesium Alloy Reciprocating Extrusion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(2): 40—44.
- [47] HAO H, MAIJER D M, WELLS M A, et al. Modeling the Stress-Strain Behavior and Hot Tearing during Direct Chill Casting of an AZ31 Magnesium Billet[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(8): 2067—2077.
- [48] 赵金桥, 刘胜, 马龙. 基于 ANSYS 的管线抗震支架抗震特性研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 80—86.
- ZHAO Jin-qiao, LIU Sheng, MA Long. Seismic Analysis of Seismic Braces in Pipelines Based on ANSYS[J]. Journal of Chongqing Technology and Business (Natural Sciences Edition), 2019, 36(2): 80—86.
- [49] CARON E, WELLS M A. Secondary Cooling in the Direct-Chill Casting of Magnesium Alloy AZ31[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(4): 585—595.
- [50] JIANG J F, WANG Y, LI Y F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of the Motorcycle Cylinder Body of AM60B Magnesium Alloy Formed by Combining Die Casting and Forging[J]. Materials and Design, 2012,

- 37(1): 202—210.
- [51] CHEN Q, YUAN B G, ZHAO G Z, et al. Microstructural Evolution during Reheating and Tensile Mechanical Properties of Thixoforged AZ91D-RE Magnesium Alloy Prepared by Squeeze Casting-Solid Extrusion[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 537(1): 25—38.
- [52] ZHAO D J, LÜ S L, LI J Y, et al. A Novel Continuous Squeeze Casting-Extrusion Process for Grain Refinement and Property Improvement in AZ31 Alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2021, 808: 140942.
- [53] 冯靖凯, 张丁非, 陈霞, 等. 一种细化 AZ31 镁合金的固液两相区复合挤压工艺[J]. *材料工程*, 2021, 49(4): 78—88.
- FENG Jing-kai, ZHANG Ding-fei, CHEN Xia, et al. A Solid-Liquid Two-Phase Composite Extrusion Process for Refined AZ31 Magnesium Alloy[J]. *Materials Engineering*, 2021, 49(4): 78—88.
- [54] 于彦东, 李磊. 正挤压和 CCAE 复合变形工艺数值模拟[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2018, 23(5): 134—137.
- YU Yan-dong, LI Lei. Numerical Simulation of Composite Deformation Process of Forward Extrusion and CCAE[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2018, 23(5): 134—137.
- [55] 刘雁峰. 镁合金正挤压-弯曲剪切复合连续变形模具型腔设计及工艺参数优化[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017: 63—65.
- LIU Yan-feng. Magnesium Alloy Forward Extrusion-Bending-Shear Compound Continuous Deformation Die Cavity Design and Process Parameter Optimization[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017: 63—65.
- [56] 尹振入. 航空用镁合金预变形—正挤压扭转变形加工工艺研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017: 60—62.
- YIN Zhen-ru. Pre-Deformation of Magnesium Alloy for Aviation-Research on Forward Extrusion and Torsion Deformation Process[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017: 60—62.
- [57] SU X, XU G M, JIANG D H. Abatement of Segregation with the Electro and Static Magnetic Field During Twin-Roll Casting of 7075 Alloy Sheet[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 599(2): 279—285.
- [58] JIE K, THADDEUS S E L, STEPHEN R, et al. Abnormal Texture Development in Magnesium Alloy Mg-3Al-1Zn during Large Strain Electroplastic Rolling: Effect of Pulsed Electric Current[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 87: 86—99.
- [59] YAN M, WANG C, LUO T J, et al. Effect of Pulsed Magnetic Field on the Residual Stress of Rolled Magnesium Alloy AZ31 Sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, 34(1): 45—53.
- [60] 曹秒艳, 田少杰, 胡晗, 等. 超声振动条件下 AZ31B 镁合金本构关系[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(7): 1584—1593.
- CAO Miao-yan, TIAN Shao-jie, HU Han, et al. Constitutive Relationship of AZ31B Magnesium Alloy under Ultrasonic Vibration[J]. *The Chinese Journal of Non-ferrous Metals*, 2020, 30(7): 1584—1593.
- [61] 何劲松. ZK60 镁合金超声波辅助振动微挤压变形研究及有限元模拟分析[D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 52—54.
- HE Jin-song. Research on Deformation of ZK60 Magnesium Alloy by Ultrasonic-Assisted Vibration Micro-Extrusion and Finite Element Simulation Analysis[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 52—54.