

半固态成形镁稀土系镁合金研究进展

汪存龙¹ 王翔宇¹ 谢赫² 刘文才³ 张亮³ 吴国华³

(1. 江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013; 2. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430032; 3. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘要 高性能镁稀土合金由于具备良好的室温和高温力学性能而受到广泛关注, 但成形技术限制了其大规模应用。半固态成形技术在镁稀土合金中有望突破其在轻质高强关键零部件的应用, 以充分发挥镁稀土合金的性能优势。综述了近年来国内外针对半固态成形镁稀土合金的成分设计、浆料制备方法及成形技术等, 总结了半固态成形镁稀土合金的力学和服役性能, 并展望了半固态成形镁稀土合金在研究和应用中可能存在的问题和未来的发展方向。

关键词 镁稀土合金; 半固态成形; 力学性能; 半固态浆料

中图分类号 TG292; G353.11; TG146.22

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.Z20240036

Research Progress in Semi-solid Processing of Mg-RE Series Alloys

WANG Cunlong¹, WANG Xiangyu¹, XIE He², LIU Wencai³, ZHANG Liang³, WU Guohua³

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013; 2. School of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430032; 3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240)

Abstract: High-performance Mg-RE alloys have been widely concerned due to well mechanical performance at both room and elevated temperatures. However, large-scale application is limited by forming technologies. Application of semi-solid processing (SSP) technology in Mg-RE alloys is expected to break through application in lightweight and high-strength key components to fully leverage the performance advantages of Mg-RE alloys. The composition design, slurry preparation, and forming technology of Mg-RE series alloy by SSP at home and abroad were reviewed. Moreover, mechanical properties and service performances of SSPed Mg-RE alloys were summarized. Finally, the possible problems of SSPed Mg-RE alloys in the research and application were prospected, and future direction was forecast.

Key Words: Mg-RE Alloys, Semi-solid Processing, Mechanical Properties, Semi-solid Slurries

镁合金因其低密度、高导热性、良好的阻尼和电磁屏蔽等优异性能得到研究者重视^[1-2]。作为目前最轻的

工程结构材料, 镁合金在航空航天、武器军工、轨道交通和 3C 电子产品等领域具有重要的应用价值。根据

收稿日期: 2024-12-16; 修订日期: 2025-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105348)

第一作者简介: 汪存龙, 男, 1988 年出生, 副教授, E-mail: cunlongw@ujs.edu.cn

通信作者: 谢赫, 男, 1997 年出生, 讲师, E-mail: xiaoxiehe1997@163.com

引用格式: 汪存龙, 王翔宇, 谢赫, 等. 半固态成形镁稀土系镁合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(6): 807-821.

WANG C L, WANG X Y, XIE H, et al. Research progress in semi-solid processing of Mg-RE series alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 807-821.

- [17] TODA H, NISHIMURA T, UESUGI K, et al. Influence of high-temperature solution treatments on mechanical properties of an Al-Si-Cu aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2010, 58(6): 2 014-2 025.
- [18] 谭佳, 张劲, 邓运来, 等. Al-Cu-Li 合金蠕变时效过程的性能演变及显微组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1 341-1 347.
- [19] 郝敏, 王亮, 李国爱, 等. 热力耦合作用下 Al-2.8Cu-1.35Li-0.11Zr 合金析出相演化和力学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(1): 60-66.
- [20] ZHAN L, LIN J, DEAN T A. A review of the development of creep age forming: Experimentation, modelling and applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(1): 1-17.
- [21] SONG Y F, DING X F, ZHAO X J, et al. The effect of stress-aging on dimensional stability behavior of Al-Cu-Mg alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 718: 298-303.
- [22] ZHANG J, WANG C, ZHANG Y, et al. Effects of creep-aging upon Al-Cu-Li alloy: Strength, toughness and microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 764: 452-459.
- [23] SHOU W B, YI D Q, YI R W, et al. Influence of electric field on microstructure and mechanical properties of an Al-Cu-Li alloy during ageing[J]. Materials & Design, 2016, 98: 79-87.
- [24] LI H Y, KANG W, LU X C. Effect of age-forming on microstructure, mechanical and corrosion properties of a novel Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 640: 210-218.
- [25] LIU G, LIN Y C, ZHANG X C, et al. Effects of two-stage creep-aging on precipitates of an Al-Cu-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A614: 45-53.

(编辑: 彭瑾)

主要合金化元素的组成,镁合金可分为:镁铝系(Mg-Al-Zn、Mg-Al-Mn、Mg-Al-Si、Mg-Al-Sr、Mg-Al-RE等)、镁锌系(Mg-Zn-Zr和Mg-Zn-RE等)以及镁稀土系(Mg-Gd-Y-Zr、Mg-Gd-Zn-Zr、Mg-Y-Zn-Zr等)等系列。目前,Mg-Al-Zn系和Mg-Zn-Mn系镁合金占据主导地位。然而,商业Mg-Al-Zn系镁合金中Mg₁₇Al₁₂相在150℃即发生软化(AZ91、AM60等),使得合金表现出较差的耐热性能^[3],无法满足服役要求。在Mg-Al-Zn系合金中添加稀土元素形成的Mg-Al-RE系合金(AE42、AE44等)的高温性能有所提升,但是其服役温度仍低于200℃。以重稀土元素(如Gd、Y等)为主合金化元素的Mg-RE系合金,由于RE原子在Mg中固溶度随温度变化有较大的差异而具有显著的时效硬化特征,可在棱柱面析出热稳定性好且弥散分布的纳米级 β' 相,使其具有良好的室温、高温强度和抗蠕变性能^[4-7](WE43、WE54等)。以Mg-Gd-Y系为代表的镁稀土合金表现出更加优越的高温力学性能,在250℃以上仍保持良好的服役性能。此外,稀土元素的添加还改善了镁合金的阻燃性能、导热性能等^[8-9],使镁稀土合金成为极具应用潜力的新型镁合金。

由于RE元素的化学活性较高,合适的成形工艺是促进铸造Mg-RE系合金广泛应用的关键。近年来,研究者尝试了多种方法用于镁稀土合金成形,包括常规重力铸造、低压砂型铸造、消失模铸造、高压压铸、挤压铸造和半固态成形等^[10-11]。其中,高压压铸(High Pressure Die Casting, HPDC)工艺具有铸造质量好、生产效率高、力学性能优良等特点,在Al合金^[12-13]、Mg-Al^[14-15]合金中得到了广泛应用。然而,HPDC方法制备的铸件内的气孔可能导致后续热处理时表面起泡,因而不能进行热处理强化^[10]。在HPDC充型时,湍流中被卷入的气体只能在小范围内流动,无法扩散,气体在凝固前就被困在液态金属中而形成气孔^[16]。为此,研究者提出将HPDC与半固态制浆相结合形成的半固态压铸方法。半固态成形(Semi-solid Processing, SSP)技术经过几十年的发展^[17],已在Al合金^[18-19]、Mg-Al系合金^[20]上实现了应用。如将半固态制浆与HPDC结合的半固态压铸方法兼具传统压铸的效率与质量,能够在较低的成形载荷下实现复杂构件的近净成形。同时,成形温度降低除了可以延长模具寿命外,相对低温的黏性半固态浆料可以实现层流形式的充型^[21-24],有助于减少甚至消除铸件的铸造缺陷。此外,半固态成形制备的铸件孔隙率非常低,有助于提升铸件的力学性能。半固态成形工艺根据其加工路线可分为触变成形和流变成形,其前提均是制备高品质的半固态浆料,即获得尺寸细小、圆整、体积分数稳定的初生相。此外,将制

备的半固态浆料结合挤压铸造、轧制、挤压和锻造等进行二次成形,还可以形成一系列新的半固态成形工艺^[25-27]。半固态成形技术不仅可以生产出近净成形的大型薄壁复杂形状的构件,而且在组织致密度和力学性能^[28-29]上均优于传统重力铸造,特别是显著提升合金的塑性^[30]。此外,由于半固态成形有助于消减压铸件中的气孔,因而半固态成形铸件可以进行后续的热处理,这尤其适用于时效硬化型Mg-RE系合金。因此,半固态成形方法在Mg-RE系合金铸件的成形加工方面具有广阔的应用前景。

目前,关于Al合金和Mg-Al系合金的半固态成形研究和工程应用较多。近年来,随着高性能铸造Mg-RE系合金的快速发展,研究者开始关注半固态成形Mg-RE系合金的研究与应用,有望拓宽镁稀土合金的成形工艺及半固态成形技术的发展。为了促进半固态成形高性能Mg-RE系合金的实际应用,综述近年来国内外关于Mg-RE系合金半固态成形的研究进展,整理半固态成形Mg-RE系合金的成分设计原则,总结了Mg-RE系合金半固态浆料制备技术和半固态成形Mg-RE系合金的触变和流变成形工艺方法,并评价半固态成形Mg-RE系合金的服役性能。同时,对高性能Mg-RE系合金半固态成形技术的未来发展进行展望。

1 半固态成形镁稀土合金的成分设计和材料体系研究进展

半固态成形技术因其独特的凝固特性可显著提升产品的力学性能。为实现工艺优势与材料性能的最佳匹配,需基于半固态成形过程中的非平衡凝固机制与浆料流动特性,开展针对性的合金成分设计。对于半固态成形Mg-RE系合金,成分设计原则应遵循:①优化合金元素调控浆料的流变行为,确保半固态成形工艺窗口的稳定性;②利用稀土元素强的时效硬化响应特性,构建具有显著时效硬化响应的多相强化体系。通过成分设计既可保障复杂构件的半固态成形能力,又能充分发挥稀土镁合金的强韧化潜力。

扩大半固态成形工艺的加工窗口,确保半固态浆料顺利成形是合金成分设计目的之一。合金的凝固区间定义为液相线温度 T_L 与固相线温度 T_S 的差值,适宜的凝固区间有利于半固态浆料制备。PATEL J B等^[31]认为,半固态加工温度应在固相线温度以上10~150℃范围内,从而确保较高的抗热裂性。过低的温度区间会引起半固态浆料加工窗口变窄,不利于浆料固相率的准确控制及后续充型过程。因此,稳定且易于控制的固相率是制备半固态浆料的关键。CHANG Z Y等^[32]对温度、时间、焓敏感的适用性做了综述。①温度

敏感性判据,通过控制温度可以更容易地将合金浆料的固相率维持在理想的范围内。评价流变成形铝合金的可加工性上,PATEL J B等^[31]认为针对流变成形,固相率在 $f_s=30\%$ 处的温度敏感性应小于 $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;②时间敏感性判据,就高纯度Al、Mg及Al-Si二元共晶合金,这一类金属在理论上不存在熔化和凝固的温度区间,从而不适合半固态加工。但是,由于熔化和凝固需要一定的时间,在达到热平衡时存在一个处于半固态的时间区间,因此提出了一个时间敏感性判据,其适应性更强,覆盖了纯金属、固溶体合金以及共晶成分合金。在工艺上控制加热/冷却速率的降低,液相的时间敏感性趋于降低,从而有助于扩大半固态加工窗口;③焓敏感性判据,基于不存在半固态温度区间的纯金属、共晶合金,在熔化、凝固存在吸放热过程中,即使温度保持不变,材料体系的热量也会随着液、固相变而不断变化,见图1。半固态加工窗口与 dH/dT 数值变化密切相关,平稳的 dH/dT 表明熔体进入了稳定而可加工的半固态区间。

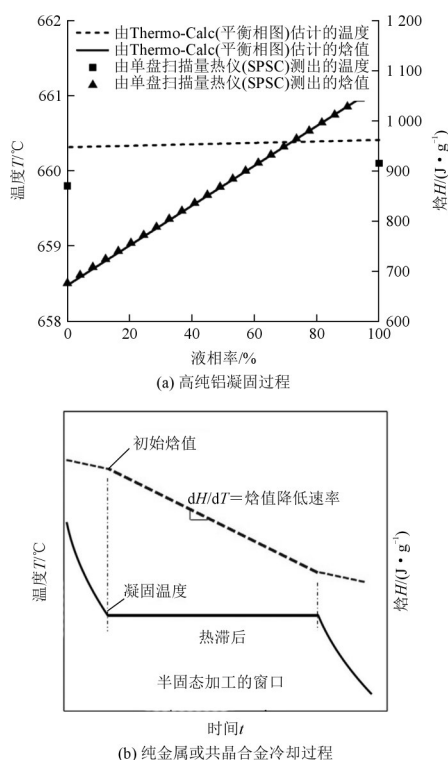


图1 高纯铝凝固过程以及纯金属或共晶合金冷却过程中焓和温度的变化示意图^[33]

Fig.1 Variations of enthalpy and temperature during the solidification of high-purity Al and cooling of pure metals or eutectic alloys^[33]

上述评价判据中,时间敏感性和焓敏感性判据不能给出一个明确的判断指标,甚至不能给出一个适合半固态加工的粗略范围。因为在实际生产中,最直接、最容易获取的参数是温度。对于温度的测量和控制均容易实现,因此现有研究应用最多的是温度敏感性判

据。温度敏感性直接影响半固态浆料固相率的稳定性。固相率的温度敏感性参数(R_s)可以用固相率随温度变化曲线的斜率来定义^[34]:

$$R_s = \frac{\partial f_s}{\partial T}$$

式中, f_s 为固相率; T 为温度。可以认为, R_s 数值越小,在制浆时固相率 f_s 越容易控制,即温度的轻微变化不会导致固相率显著增加,有利于提高成品组织结构的稳定性,固相率随温度变化曲线见图2。

利用稀土元素较强的时效硬化行为,提高半固态成形镁稀土合金性能是合金成分设计的另一目的。目前,半固态成形技术制备的Mg-RE系合金的研究关注于合金元素的添加,其中稀土元素的选择主要为重稀土元素,如Gd、Nd、Y。Mg-Gd系和Mg-Y系合金的时效析出序列基本相同: $\text{SSSS} \rightarrow \beta''(\text{D019}) \rightarrow \beta'(\text{cbco}) \rightarrow \beta_1(\text{FCC}) \rightarrow \beta(\text{FCC})$ ^[35],其中起到峰时效强化作用的是 β' 相。镁稀土合金不仅在室温下表现优异,在高温条件下, β' 相的稳定存在可以提高镁合金的抗蠕变性能。SHI H等^[5]研究了峰时效态Mg-12Gd-0.4Zr合金的压缩蠕变性能,在 $250\text{ }^{\circ}\text{C} \times 80\text{ MPa}$ 时,稳态蠕变速率为 $5.56 \times 10^{-9}\text{ s}^{-1}$,100 h的总应变量为0.60%。CHEN X Y等^[4]发现Mg-10Gd-3Y-Nd-0.5Zr合金在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的抗拉强度超过309 MPa。在成分设计时,多种稀土元素的加入产生了稀土元素的交互作用,合金的性能明显改善。目前,对多稀土镁合金半固态成形的研究主要集中在Mg-Gd-Y系^[36]和Mg-Y-Nd系^[37]合金。

使用更廉价的合金元素代替部分稀土已成为新型低成本含稀土铸造镁合金的重要发展方向。FANG X G等^[38]将轻稀土元素La、Ce引入到Mg-Y-Zn合金中,采用流变挤压铸造的方法制备了Mg-3RE-6Zn-1.4Y-0.6Zr合金。在Mg-Gd体系中引入一定含量的Ca构成新型Mg-Gd-Ca合金可以降低Gd元素用量并显著改善基体合金的高温蠕变性能。MO N等^[39]发现Mg_{98.3}Gd_{0.5}Ca_{1.2}合金的 α -Mg固溶体中溶质Gd和Ca倾向于以共簇的形式出现,该结构可以提供额外的局部有序强化。在 $210\text{ }^{\circ}\text{C} \times 100\text{ MPa}$ 条件下最小蠕变速率为 $1.96 \times 10^{-8}\text{ s}^{-1}$,表现出较好的抗蠕变性能。XU C等^[40]发现随Ca含量增加,Mg-2Gd-0.5Zn-0.2Zr合金的稳态蠕变速率逐渐减小。加入质量分数为0.4%的Ca之后, $250\text{ }^{\circ}\text{C} \times 110\text{ MPa}$ 下测试的最小蠕变速率为 $5.75 \times 10^{-8}\text{ s}^{-1}$ 。添加Ca会导致G.P.区的析出,并显著提升高温下的抗蠕变性能。利用半固态成形方法,可更好发挥其他廉价元素代替昂贵稀土元素,并设计出可在高温蠕变领域应用的新型多元镁合金体系。

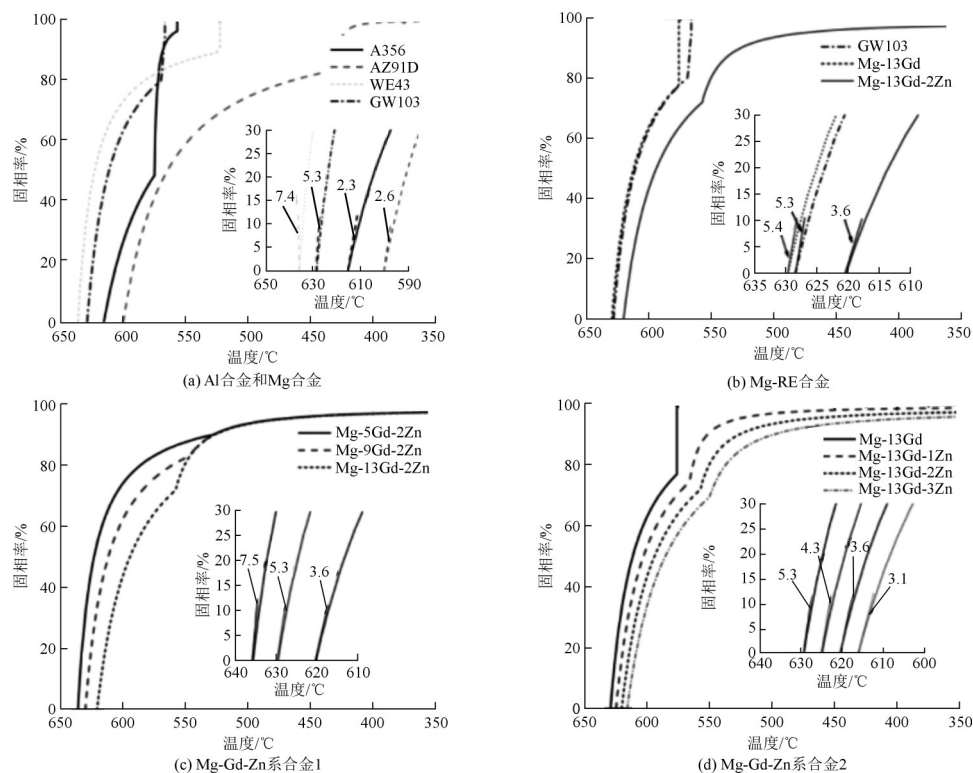


图2 基于Scheil方程的相图热力学计算得到的固相率与温度关系曲线(曲线上的数字表示斜率)^[34]

Fig.2 Relationship curves of solid fraction and temperature by thermodynamic calculations based on Scheil equation^[34]

2 镁稀土合金半固态浆料制备研究进展

半固态加工技术按照浆料(或坯料)的制备顺序可分为流变成形和触变成形。两种工艺的前提都是制备出合适的浆料,而半固态浆料的质量主要取决于 α -Mg颗粒的尺寸和形貌。在制浆过程中,需要在半固态浆料中产生细小、近球形的初生相,使其产生良好的流动性。关于半固态制浆过程中非枝晶初生相的形成机制,研究者提出了多种假说,包括枝晶臂断裂机制^[17]、枝晶臂根部重熔机制^[34,41]以及生长控制机制^[42]。QIN R S等^[43]发现随剪切速率增加,初生相的形态由蔷薇晶演化为球状晶。JI S X等^[44]认为强对流增加了生长速度,促进固液界面的稳定生长。制浆中引入各种外场如机械搅拌^[45]、电磁搅拌^[46]、超声波振动^[47]等产生的对流,使得熔体中的温度场和成分场更加均匀,导致 α -Mg由玫瑰状向球状转变。另一种制备半固态浆料的路径是利用对合金锭升温,加热到半固态温度区间获得半固态浆料,其中以半固态等温热处理法和应变诱导熔化激活法应用最多。这种方法在控制半固态浆料初生相颗粒中优势明显,不同于液相法制浆中复杂的工艺参数,固相法制浆需要考虑的参数主要有加热温度和保温时间,大幅降低了半固态浆料制备的难度。在金属坯料半固态等温热处理时,通常会产生球形的 α -Mg颗粒。

目前,半固态制浆方法有近30种^[18],其中具有代表

性的工艺有:双螺杆搅拌法^[48]、电磁搅拌法(EMS)^[49]、冷却斜槽法^[50]、超声波振动法(UV)^[51]、旋转热焓平衡法(SEED)^[52]、气泡搅拌法(GISS)^[53]、半固态等温热处理法(SSIT)、应变诱导熔化激活法(SIMA)等。其中旋转热焓平衡法和气泡搅拌法在Al合金零件的半固态成形上已经实现了规模化应用^[53-54],制浆方法见图3。

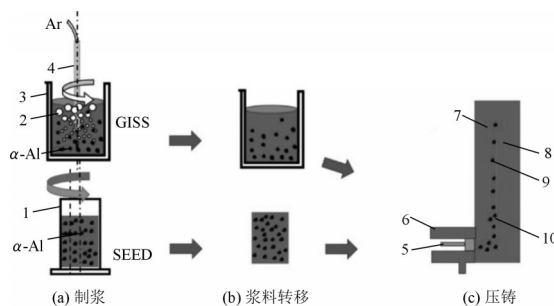


图3 GISS法和SEED法制浆方式^[53]

Fig.3 Preparation methods of semi-solid slurry by GISS and SEED^[53]

1. 钢制坩埚 2. 气泡 3. 石墨坩埚 4. 陶瓷杆 5. 压射冲头 6. 套筒 7. 溢流槽 8. 模具 9. 工件 10. 流道

气泡搅拌法作为一种高效制备技术,近年来在镁合金半固态浆料的制备与微观组织调控领域已得到深入研究。NAJAFI J Y等^[55]系统研究了GISS工艺参数对AZ91镁合金半固态浆料微观组织的影响,优化出了最佳的制浆参数:气体流速为4 L/min,温度为610℃,气体搅拌时间约为10 s,获得了细小、球形的半固态浆

料,平均颗粒尺寸为 58.4 μm ,平均形状因子为 0.75。ZHANG Y 等^[56]采用 GISS 法制备了 AZ91-2Ca 合金半固态浆料, α -Mg 颗粒的平均直径小于 50 μm ,平均形状因子大于 0.7,并采用流变挤压铸造成形。

目前,针对镁稀土合金体系半固态浆料制备的研究报道较少。镁稀土合金半固态浆料制备方法及其对 Mg-RE 合金中 α -Mg 尺寸的改善效果见表 1,其中低频电磁搅拌(LFEMS)法被证明可成功制备 Mg-Gd-Zn^[34,57]、Mg-Nd-Zn^[58]合金半固态浆料,见图 4。研究者对其制浆参数如施加电压、旋转频率和冷却速度及稀土溶质元素含量等进行了系统的研究,通过优化各工艺参数和成分,最终得到了质量较好的半固态浆料, α -Mg 的平均粒径从约 680 μm 细化到约 150 μm ,见图 5,且 α -Mg 颗粒逐渐从树枝状向蔷薇状或球状转变^[57-58]。此外,在 Mg-Y-Zn^[47,59]、Mg-RE-Y-Zn^[60]合金半固态制浆中引入超声波振动已有系统研究,超声波功率密度对半固态浆料的微观组织产生影响,施加超声振动可以促进 α -Mg 颗粒的球化。

表 1 镁稀土合金半固态浆料制备方法^[36,38,47,57-68]

Tab.1 Preparation methods of semi-solid slurries of Mg-RE alloys ^[36,38,47,57-68]			
制浆方法	合金	固相率/%	α -Mg 颗粒尺寸/ μm
LFEMS	Mg-14.2Gd-2.3Zn	35	约 150
LFEMS	Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr	36	43
UV	Mg-3RE(Ce,La)-6Zn-1.4Y-0.6Zr	34	22
UV	Mg-6Zn-1.4Y-0.6Zr	17	32
UV	Mg-3RE(Ce,La)-3Zn-0.7Y-0.6Zr	38	55
UV	Mg-7Y-2.5Zn-0.4Zr	35	57
SEED	Mg-11Gd-3Y-1Zn-0.2Zr	50	63
NRC	Mg-10Gd-2Ca-0.6Zr	20	30
混合粉末重熔	Mg-5.2Nd-4.2Y-1.4Gd-0.3Zn-1Zr	75	59
SIMA	Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.36Zr	75	62
SIMA	Mg-8Y-6Gd-1Nd-0.17Zn	60	91.3
SIMA	Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr	62	74
SSIT	Mg-10Gd-3Y-0.5Zr	52	约 80
SSIT	Mg-5.7Y-1.1La-1Ce-1.8Nd-1.9Zr	45	50
SSIT	Mg-5Zn-1.8Y	61	120

注:NRC 为新型流变成形法

流变成形 Mg-RE 合金的制浆工艺过程中,除了引入外加物理场作用以外,单独或辅助将 Mg-Zr 中间合金引入到熔体中也是制备质量良好浆料的有效办法。在镁合金中,溶解 Zr 具有生长限制作用而未溶解的小颗粒 Zr 起到异质形核作用,两种形式的 Zr 共同存在可实现铸态晶粒的细化。在半固态制浆时加入 Zr,会使 α -Mg 颗粒尺寸大幅减小,因而同样可用于半固态浆料的制备。QIAN M^[69]发现 Zr 在 Mg-3.8Zn-2.2Ca 合金半固态浆料中可以起到很好的制备效果,而且在 α -Mg

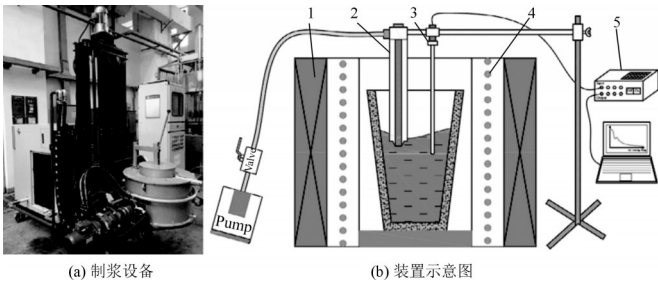


图 4 LFEMS 半固态浆料制备设备及装置示意图^[34]

Fig.4 Preparation device of semi-solid slurry by LFEMS and schematic diagram of experimental apparatus^[34]

1. 电磁线圈 2. 真空试样采集装置 3. 热电偶 4. 加热线圈 5. 温度记录系统

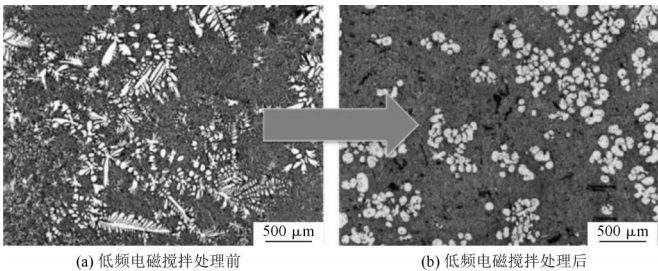


图 5 Mg-Gd-Zn 半固态浆料的 OM 显微组织^[57]

Fig.5 OM microstructures of semi-solid slurries of Mg-Gd-Zn alloys^[57]

的球化上也十分有效。将 Zr 加入到 Mg-RE 合金中同样可以制备半固态浆料,WANG X Y 等^[62]在 Mg-Gd-Ca 合金中加入 0.6% 的 Zr, α -Mg 颗粒从约 131 μm 降低到约 30 μm ,形貌也由粗大的树枝晶转变为细小、球形的颗粒,平均形状因子接近 0.8,见图 6。此外,制浆时 Gd 含量越高、冷却速率越大,越容易制备出细小的球形的 α -Mg 颗粒。半固态制浆时,晶粒细化还会降低浆料的表观黏度,有助于提高浆料流动性^[70]。

Mg-RE 系合金触变成形的制浆方法主要包括:在凝固时引入外场、细化剂、细小的初生相颗粒或对其进行塑性变形等,然后将铸锭重新加热至半固态温度区间获得组织较好的浆料,其中研究相对较多的有应变诱发熔化激活法^[36]和半固态等温热处理法^[68]。等温处理 Mg-RE 系合金典型的触变成形半固态浆料微观组织见图 7。通过研究合金在不同温度、时间下半固态浆料的微观组织,从而确定球状组织均匀的半固态浆料。观察到随等温温度和保温时间增加,液相体积分数逐渐增加;在等温温度不变时,随保温时间延长, α -Mg 颗粒发生粗化,平均颗粒尺寸、平均形状因子逐渐增加。上述规律在 Mg-Gd-Y-Nd-Zn-Zr^[71]、Mg-Gd-Y-Zn^[72]、Mg-Nd-Zn-Zr^[73]等合金中得到验证。在半固态等温热处理时, α -Mg 颗粒的粗化主要受奥斯特瓦尔德熟化机制控制,同时某些情况下也存在颗粒聚结机制^[36],见图 8。此外,CHEN Q 等^[73]发现,半固态等温热处理后

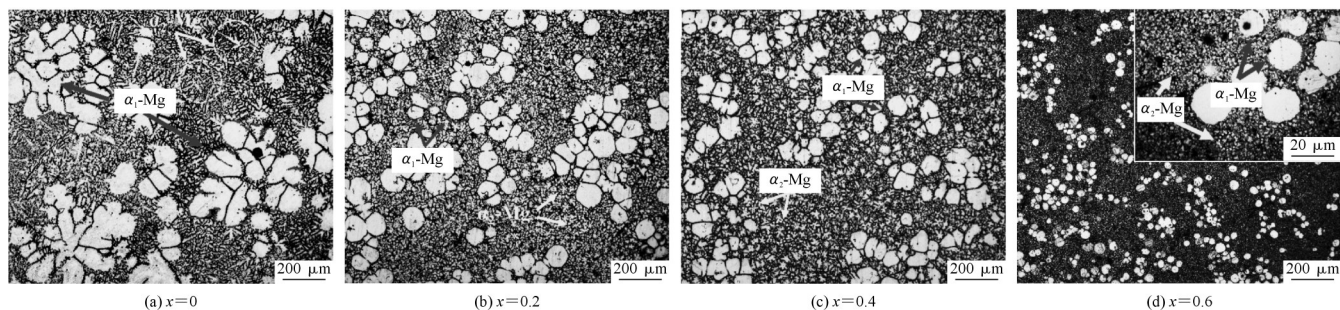

 图 6 Mg-10Gd-2Ca- x Zr($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, \%$)合金半固态浆料微观组织^[62]

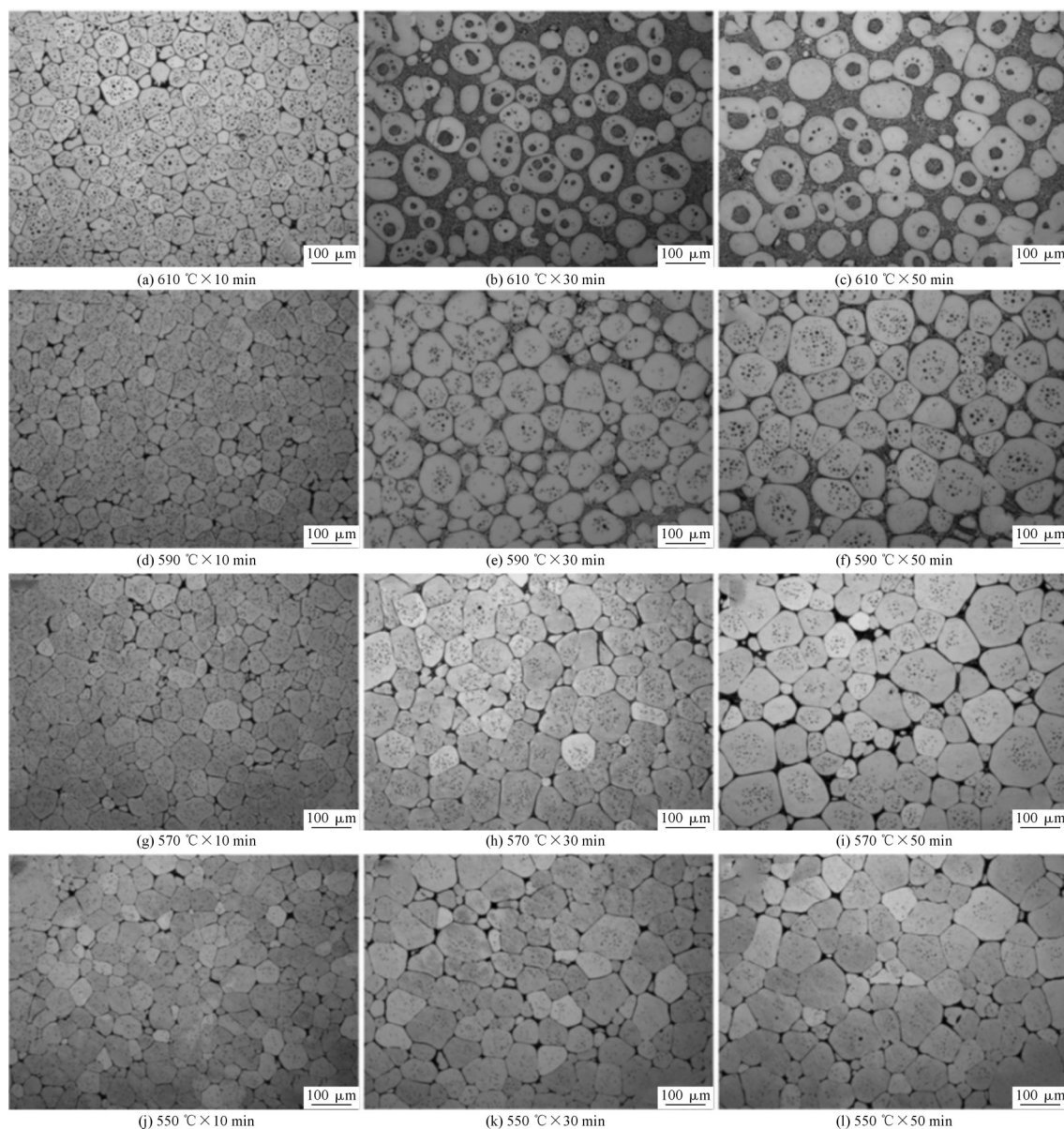
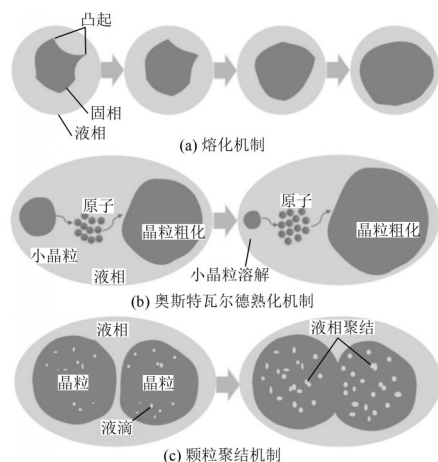
 Fig.6 Microstructures of semi-solid slurry of Mg-10Gd-2Ca- x Zr alloy^[62]

 图 7 Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr 合金的半固态组织随等温温度和等温时间的变化^[36]

 Fig.7 Microstructure evolution of semi-solid Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr alloy with isothermal temperatures and durations^[36]

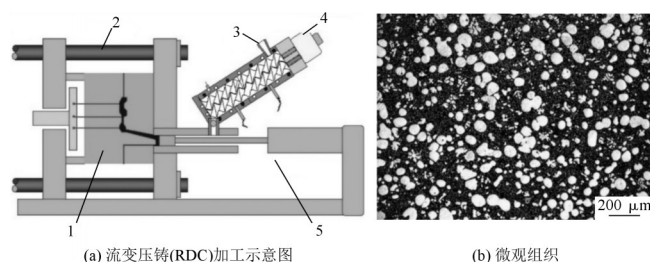
的组织受原始组织影响,与直接铸造的相比,挤压变形处理后 α -Mg 颗粒具有更小的尺寸和更高的平均形状因子。这表明塑性变形对于触变成形的晶粒细化起到贡献。WANG J G 等^[74]在预变形的 AZ91D 合金等温热处理后获得了更细小、更圆整的 α -Mg 颗粒,并且随着变

形程度增大,初生相颗粒中的液相也会减少。由于涉及到的加工参数少且能精准控制,触变法制备半固态浆料可以稳定地制备出合格的半固态坯料。而且在熔体纯净度方面,触变法可以避免绝大多数氧化缺陷,有望成为制备高性能镁稀土合金半固态浆料的重要方法。

图8 半固态组织演化过程中机制演变示意图^[36]Fig.8 Mechanism diagram of semi-solid slurries during evolution^[36]

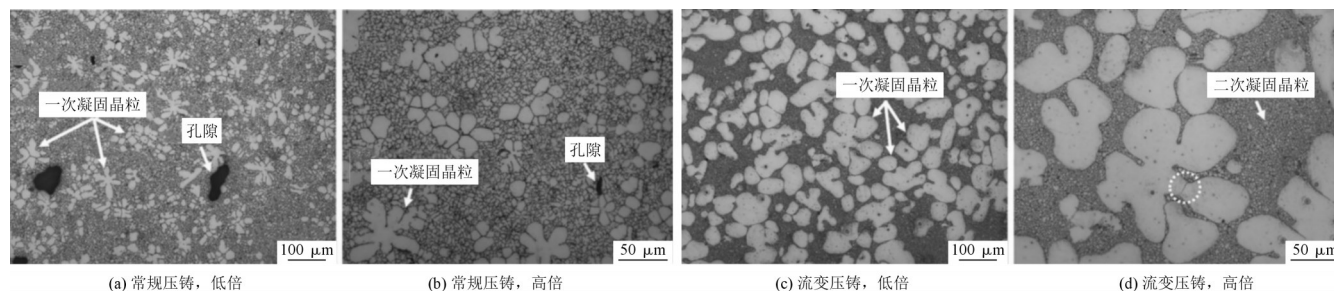
3 镁稀土合金半固态成形工艺研究进展

半固态成形铝合金已经在汽车制造、消费电子等领域得到应用,包括汽车差速器、轮毂、燃油分配管及上叉板等零部件,包含触变成形和流变成形的零件。半固态成形镁合金中仅有少量触变成形零件得到了应用。在镁合金的半固态浆料流变成形工艺方面,在实现半固态浆料的稳定制备后,采用合理的成形工艺将其制备成零部件,可通过高压充型与精确控温相结合的流变压铸(RDC)和流变挤压铸造(RSC)工艺实现。采用半固态浆料代替熔融液态金属的压铸或挤压铸造可解决卷气问题,从而使得制备的铸件可进行热处理,尤其适合Mg-RE合金。FAN Z等^[75]利用双螺杆剪切搅拌制得AZ91D半固态浆料,并利用RDC方法成形,其成形设备和典型的微观组织见图9。其铸件气孔率接近0,组织细小均匀,不存在其他铸造缺陷,力学性能优于常规压铸件。WANG Y等^[48]与GU Y H等^[76]均发现半固态成形铸件改变了第二相形貌、分布状态,并且可进行时效处理,此外还表现出不同的时效硬化行为。相对于流变压铸,流变挤压铸造合金在压力下凝固,不仅使孔隙率大幅降低,同时促进了晶粒细化^[77],最终提

图9 RDC加工示意图及其制备合金的典型微观组织^[29,75]Fig.9 Schematic diagram of RDC processing and typical micro-structure of prepared alloy^[29,75]

1.模具 2.锁模机构 3.投料口 4.双螺杆搅拌制浆 5.压射系统
高铸件的力学性能^[56]。

目前,国内已经开展了与镁稀土合金的半固态成形相关的研究。CHANG Z Y等^[61]利用流变压铸的方法制备出Mg-11Gd-3Y-1Zn-0.2Zr合金薄壁(0.55 mm)铸件,施加压力为60 MPa,压射速度为2.5 m/s。传统HPDC和RDC合金铸态微观组织见图10,在传统的HPDC中经常能观察到氧化膜、孔洞缺陷,但在RDC合金中既没有氧化膜也没有孔洞缺陷。在此基础上,CHANG Z Y等^[78]利用流变压铸工艺制备Mg-xGd-3Y-1Zn-0.4Zr合金,研究了Gd含量变化时的显微组织和力学性能的差异,见图11和图12。发现合金的平均晶粒尺寸和共晶体积分数逐渐增大,导致合金的强度逐渐提高,伸长率逐渐降低。其中,GWZ831K合金伸长率最高(6.4%±1.3%),GWZ1431合金的强度最高[抗拉强度为(270±9) MPa,屈服强度为(201±5.7) MPa]。CHEN Y S等^[79]利用低频电磁搅拌制浆,采用挤压铸造方法制备Mg-Nd-Zn-Zr合金。发现随着成形模具温度的升高,晶粒尺寸增大,合金密度增大,Zn₂Zr₃相的含量逐渐增加。随后,CHEN Y等^[80]发现增大挤压压力提高了形核率,造成了更多的细小晶粒保存下来,并建立了施加压力、过冷度和形核速率之间的关系。FANG X G等^[38]利用超声振动制备的半固态浆料与挤压铸造相结合,基于流变挤压铸造制备了Mg-3RE-1Zn-1.4Y-0.6Zr合金,RSC工艺见图13^[81]。可见不同压力下所获得铸件显微组织有所差异,随施加压力增加,一次凝固α-Mg的平均晶粒尺寸减小,见图14。

图10 传统HPDC和RDC制备的GWZ1131K合金的OM显微组织^[61]Fig.10 OM images of GWZ1131K alloy manufactured by conventional HPDC and rheo die casting^[61]

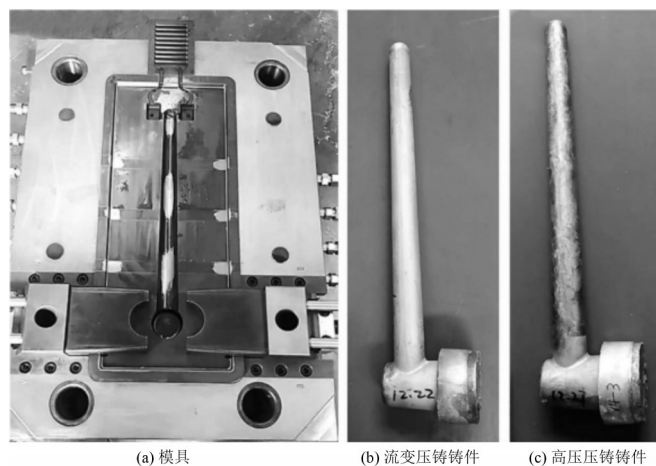


图 11 RDC 模具和铸件的实物图^[78]

Fig.11 Entities of RDC mold and castings^[78]

在镁稀土合金半固态触变成形的研究中,典型的触变成形工艺流程见图 15。ROGAL L 等^[63]提出了一

种将两种合金混合进行触变成形的方法,采用 50% 的 EK21 与 50% 的 WE43B 镁合金混合挤压后顺利地进行触变成形,所制备试样的微观组织见图 16。XIE Z Y 等^[82]以挤压态 Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.36Zr 合金棒材为原材料,采用触变成形工艺制备了杯形铸件,力学性能测试发现,外加载荷对杯底区域的强度有较大影响,而对杯壁区域的影响有限。提高温度可以改善触变成形性能,在 580 °C 的成形温度下,可形成无宏观缺陷和微观缺陷的杯形铸件。使用复杂形状的模具进行触变成形,铸件微观结构的均匀性会存在差异,越靠近边缘处越容易发生液相偏析^[83],从而对铸件的整体性能不利^[84]。触变成形制备铸件存在液相偏析的现象,主要解决办法是减小 α -Mg 颗粒平均颗粒尺寸,有助于减少液相偏析,可以减轻微观组织的不均匀性,同时还可以降低半固态浆料成形时的阻力。在成形工艺方面也对半固态浆料中细小的初生相颗粒提出了要求。

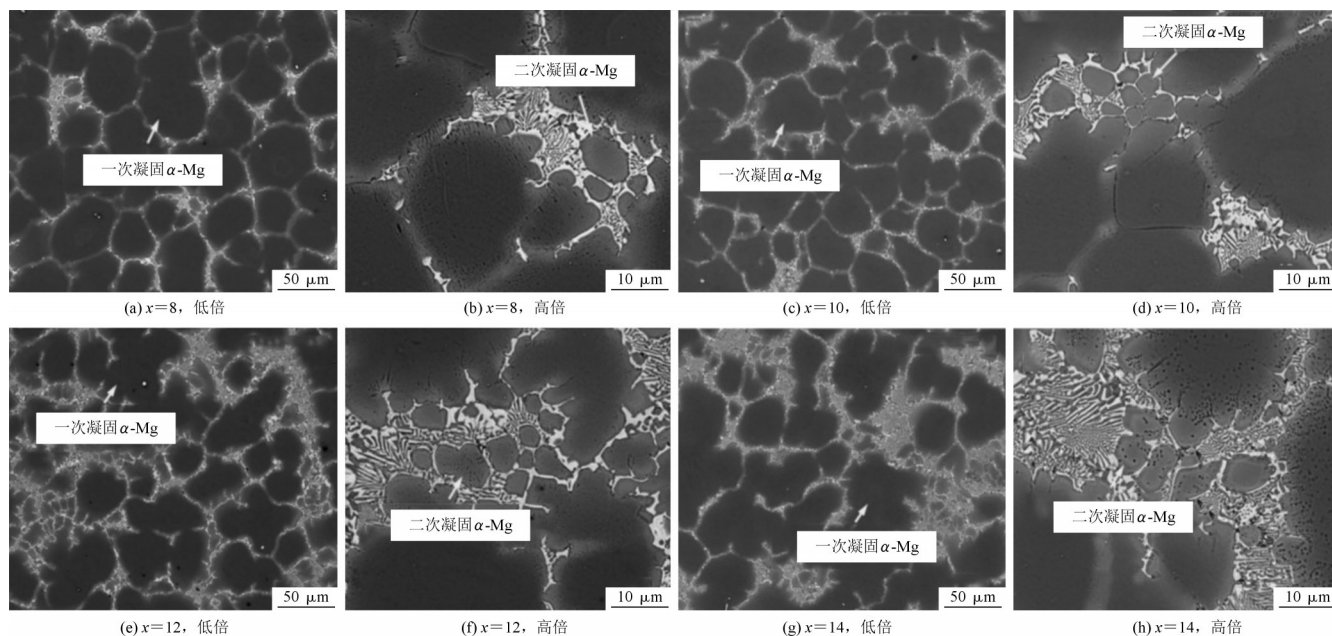


图 12 流变压铸 Mg- x Gd-3Y-1Zn-0.4Zr ($x=8, 10, 12, 14, \%$) 合金铸态的 SEM-BSE 图像^[78]

Fig.12 SEM-BSE images of as-cast Mg- x Gd-3Y-1Zn-0.4Zr alloys prepared by rheo die casting^[78]

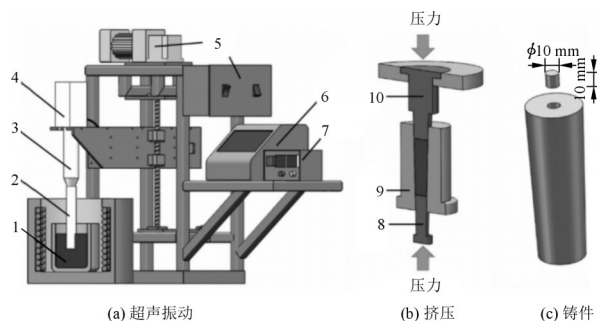


图 13 RSC 工艺示意图^[81]

Fig.13 Schematic diagram of RSC process^[81]

1. 熔体 2. 超声探头 3. 变幅杆 4. 超声换能器 5. 升降装置 6. 超声源 7. 温控器 8. 顶销 9. 固定模 10. 上模

近年来,注射成形(Injection Molding)在镁合金的制备中受到广泛关注。半固态注射成形属于典型的触变成形技术,其核心工艺为:对预制固态坯料(如铸锭切割颗粒)进行感应加热,通过精确控制温度使其发生部分重熔,形成液固混合的半固态浆料,最终实现高精度注射成形。镁合金半固态注射成形技术凭借其精密高效、低碳环保等特点,在轻量化零部件制造领域展现出广泛的应用前景。在新能源汽车领域,已成功实现电驱壳体、车轮、仪表盘横梁支架(CCB)及减震塔等关键部件的规模化生产;在 3C 电子领域,笔记本电脑外壳、无人机结构件等产品通过该技术实现复杂结构高精度成形。

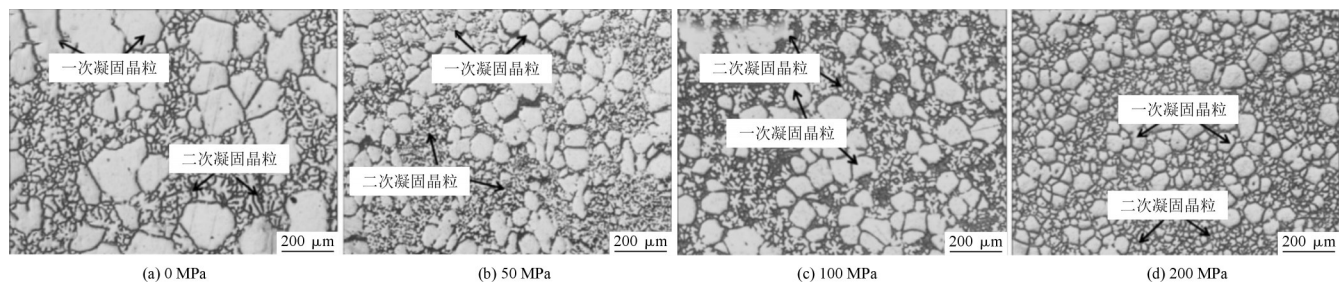


图 14 流变挤压铸造试样在不同压力下的显微组织^[38]

Fig.14 Microstructures of rheo-squeeze casting specimens under different pressures^[38]

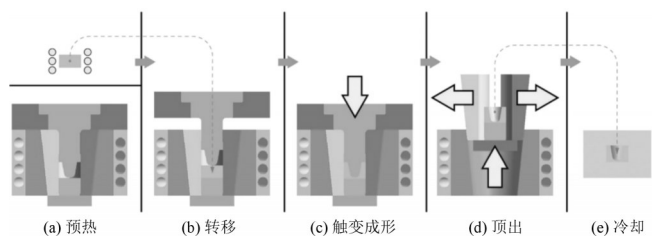


图 15 触变成形工艺流程^[82]

Fig.15 Schematic diagram of thixo-forming process^[82]

镁合金半固态注射成形的具体工艺流程为:将镁合金铸锭加工成直径为 3~6 mm 的颗粒加入到料斗内,经过料筒的加热与螺杆的旋转挤压混合均匀,通过调节加热器(一般为多段控制)进行控温,镁合金颗粒发生部分重熔进入到半固态温度区间,在螺杆的旋转带动下,将半固态浆料经过喷嘴注射到封闭的模具型

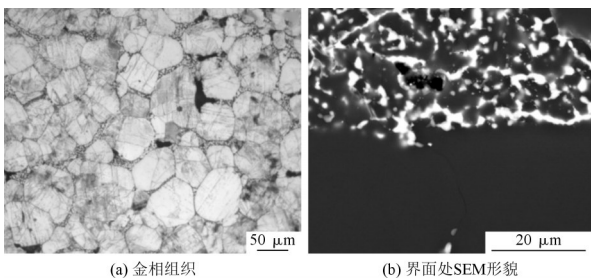


图 16 触变成形EK21-WE43B合金的微观组织^[63]

Fig.16 Microstructure of thixo-formed EK21-WE43B alloy^[63]

腔中成形,注射成形装置见图 17^[85]。镁合金半固态注射成形工艺参数主要包括:料筒温度、螺杆转速、模具温度和注射速度。为满足成形要求,必须保证足够的压力和速度,注射成形所用注射压力一般为 80~120 MPa,注射速度为 1.5~3.5 m/s^[86]。

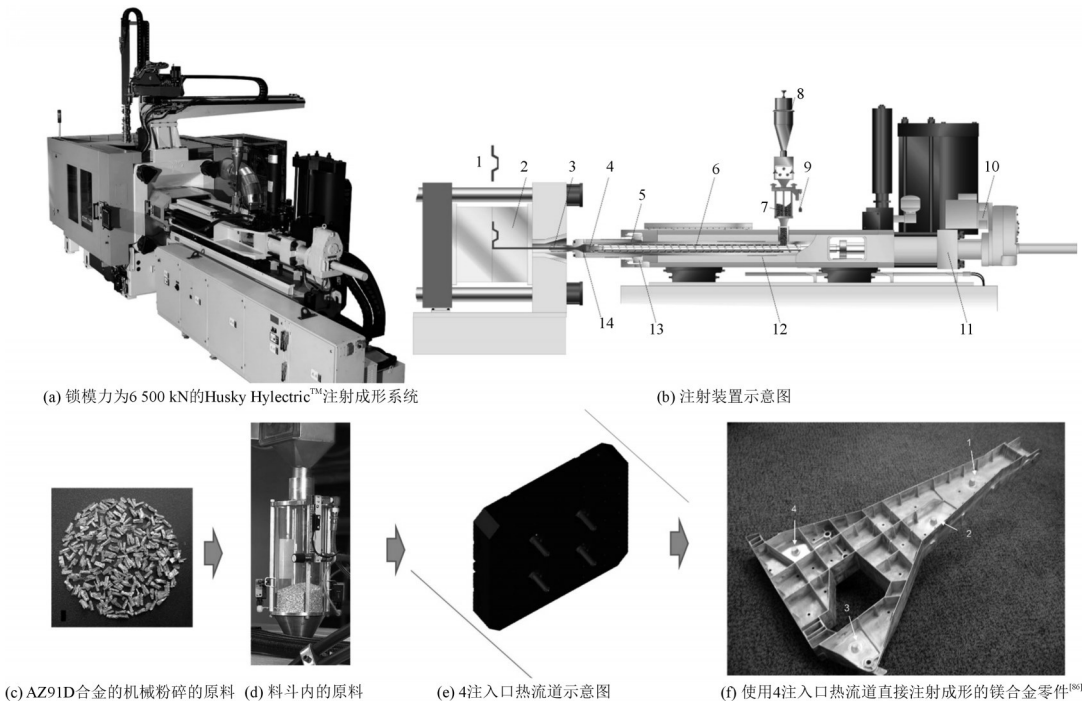


图 17 镁合金的注射成形装置与产品^[85]

Fig.17 Injection molding apparatus and product of Mg alloy^[85]

1. 产品 2. 模具 3. 喷嘴 4. 止回阀 5. 双金属桶 6. 螺杆 7. 镁屑 8. 加料斗 9. 保护气体 10. 伺服电机 11. 高速注射单元 12. 加热线圈
13. 桶架 14. 半固态浆料

郭春榕等^[87]采用半固态注射成形方法制备 AZ91D 镁合金,研究了半固态温度对铸件的微观组织与力学

性能的影响。发现随着半固态温度的升高(即固相率的降低),AZ91D 的合金力学性能呈先升高后降低的趋

势,固相率在 2.5%~3.2% 时获得了最优的室温拉伸性能。此外,发现与传统压铸镁合金相比,半固态注射成形技术可以产生明显的晶粒细化效果,平均晶粒尺寸为 20~30 μm ^[88]。然而,目前未见有关半固态注射成形制备镁稀土合金的研究报道。随着材料基因工程技术的快速发展,有望采用高通量计算与机器学习驱动的半固态成形用镁稀土合金的成分设计方法,在半固态注射成形设备的国产化与大型化的驱动下,为镁稀土合金作为大型复杂结构件领域的规模化应用奠定基础。

4 半固态成形镁稀土合金的性能

由于半固态成形工艺对材料微观组织的独特影响,半固态成形镁合金的性能与常规铸造有较大区别,包括静态拉伸性能、蠕变性能、疲劳性能以及耐蚀性和摩擦磨损性能等。NAMI B 等^[89]研究了 Ca 和稀土元素对常规铸造和半固态成形镁合金组织和蠕变性能的影响。结果表明,半固态成形镁合金的稳态蠕变速率比常规铸造方法显著降低,而且 RE 和 Ca 元素的加入明显改善了 AZ91 合金的蠕变性能。因此半固态成形的合金的抗蠕变性能优于常规铸造方式。PATEL H A 等^[90]研究了半固态成形 AM60B 镁合金的低周疲劳性能,在低应变幅值下的疲劳寿命明显长于压铸合金,且随应变幅值和应变比的减小而增大。此外,与挤压态镁合金不同,半固态成形的合金表现出基本对称的迟滞回线。在室温拉伸性能上,CHANG Z Y 等^[78]发现半固态成形的镁稀土合金试样表现出较高的伸长率,见图 18。有研究认为,对伸长率的改善主要归功于半固态成形镁稀土合金在控制铸造缺陷方面明显优于常规压铸工艺^[78]。

表 2 为利用半固态成形工艺制备的 Mg-RE 合金的室温拉伸性能。CHANG Z Y 等^[61]利用流变压铸方法制备出 Mg-11Gd-3Y-1Zn-0.2Zr 合金。经过 T4 热处理,球形或蔷薇状的 α -Mg 演变为具有明显晶界的晶粒。屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 169 MPa、250 MPa 和 6.1%。FANG X G 等^[38]利用超声振动处理后的半固态浆料与挤压铸造相结合,制备了 Mg-3RE-1Zn-1.4Y-0.6Zr 合金。力学性能测试发现,随着施加压力从 0 MPa 增加到 200 MPa,流变挤压铸造 Mg-3RE-1Zn-1.4Y-0.6Zr 合金的抗拉强度不断提高。在 200 MPa 压力下凝固的合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 110 MPa、180 MPa 和 8.6%,分别比无压力凝固的合金提高了 17%、19% 和 87%。LÜ S L 等^[91]采用流变挤压铸造方法制备了 Mg-2Y-1Zn-0.1Zr 合金,在 400 MPa 挤压压力下,合金的抗拉强度和伸长率达

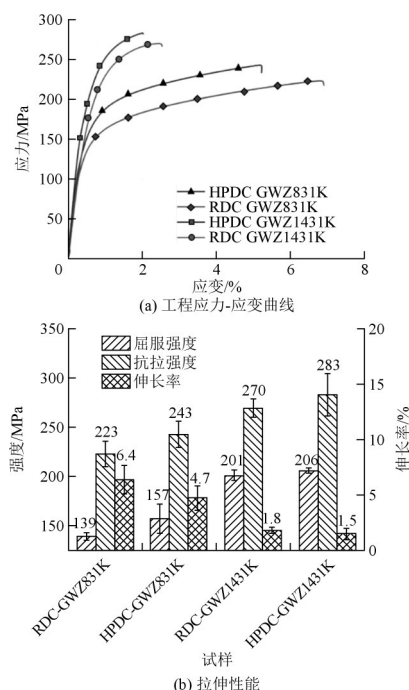


图 18 采用 RDC 和常规 HPDC 制备的 Mg-RE 合金的工程应力-应变曲线和力学性能^[78]

Fig.18 Engineering stress-strain curves and mechanical properties of Mg-RE alloys prepared by RDC and conventional HPDC^[78]

表 2 半固态成形镁稀土合金室温力学性能^[37-38, 46-47, 59-61, 78, 80, 82, 92-95]

Tab.2 RM mechanical properties of semi-solid Mg-RE alloys^[37-38, 46-47, 59-61, 78, 80, 82, 92-95]

合金	试样状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Mg-3RE(Ce,La)-3Zn-0.7Y-0.6Zr	PM-铸态	—	144	4.4
Mg-8Gd-3Y-1Zn-0.4Zr	RDC-铸态	139	223	6.4
Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr	RDC-铸态	156	236	5.1
Mg-12Gd-3Y-1Zn-0.4Zr	RDC-铸态	178	247	2.8
Mg-14Gd-3Y-1Zn-0.4Zr	RDC-铸态	201	270	1.8
Mg-11Gd-3Y-1Zn-0.2Zr	RDC-T4	169	250	6.1
Mg-3RE(Ce,La)-6Zn-1.4Y-0.6Zr	RSC-铸态	110	180	8.6
Mg-6 Zn-1.4Y-0.6Zr	RSC-铸态	129	231	18.5
Mg-7Y-2.5Zn-0.4Zr	RSC-铸态	—	234	17.6
Mg-12Zn-2Y	RSC-铸态	140	236	3.2
Mg-6Gd-3Y	RSC-铸态	119	156	6.9
Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr	RSC-T6	165	309	5.7
Mg-2.68Nd-0.39Y-0.27Zn-0.43Zr	RSC-T6	168	329	8.7
Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.36Zr	触变成形-铸态	160	215	9.0
Mg-11Gd-7Y-2Zn-0.7Zr	触变锻造-铸态	—	283	3.1
Mg-8.57Gd-3.72Y-0.54Zr	触变成形-T4	148	228	17.6
Mg-4.2Y-2.5Nd-0.53Zr	触变成形-T6	180	280	6.0

注:PM为永久模铸造。

到最大值,分别为 234 MPa 和 17.6%。CHEN Y S 等^[58]利用低频电磁搅拌制浆,同样采用流变挤压铸造方法制备 Mg-Nd-Zn-Zr 合金,研究了施加压力和热处理工艺对合金力学性能的影响。结果表明,随压力增加,T6

处理合金力学性能不断提高。与 T6 处理的金属型铸造合金相比,流变挤压铸造试样的力学性能更高,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别达到 165 MPa、309 MPa 和 5.7%。此外,在 Mg-RE 合金的触变成形中,ROGAL L 等^[63]采用 50% 的 EK21 与 50% 的 WE43B 镁合金混合挤压后进行触变成形。研究了其时效硬化行为,发现经 T6 处理后,屈服强度为 190 MPa,抗压强度为 475 MPa,伸长率为 13.1%,平均硬度(HV)为 85。GAO L 等^[92]基于 Pandat 热力学计算,优化了 Mg-8.57Gd-3.72Y-0.54Zr 半固态浆料的加工窗口。根据得到的温度参数,采用触变成形成功制备了铸件。力学性能测试结果表明,与金属型铸造的合金相比,触变成形合金的力学性能得到了显著提升。

在半固态成形镁稀土合金腐蚀性能方面,SUN H

等^[96]发现半固态成形 Mg-6Zn-0.9Nd-0.9Zr 镁合金在电化学和浸泡试验中均表现出较好的耐蚀性。网状分布的液相阻止了腐蚀介质在固相之间的流动,从而抑制了大部分局部腐蚀。FANG X G 等^[81]发现,流变挤压铸造 Mg-8.6Zn-0.6Y 合金的耐腐蚀性能随施加压力的增大而增强,试样的三维腐蚀形貌见图 19。当压力为 200 MPa 时,腐蚀电流、腐蚀电位和平均腐蚀速率分别为 $2.361 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、 -1.300 V 和 $0.18 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,分别比未施加压力时提高了 594.6%、14.1% 和 227.8%。SZKLARZ Z 等^[37]研究发现,触变成形的 WE43 镁合金在 Cl^- 环境中具有更好的力学性能和耐腐蚀性。图 20 为触变成形前后镁合金表面腐蚀的模型图,半固态成形导致了微观结构的变化,减缓了合金的腐蚀,但经过 T6 热处理,WE43 的耐腐蚀性略有下降。因

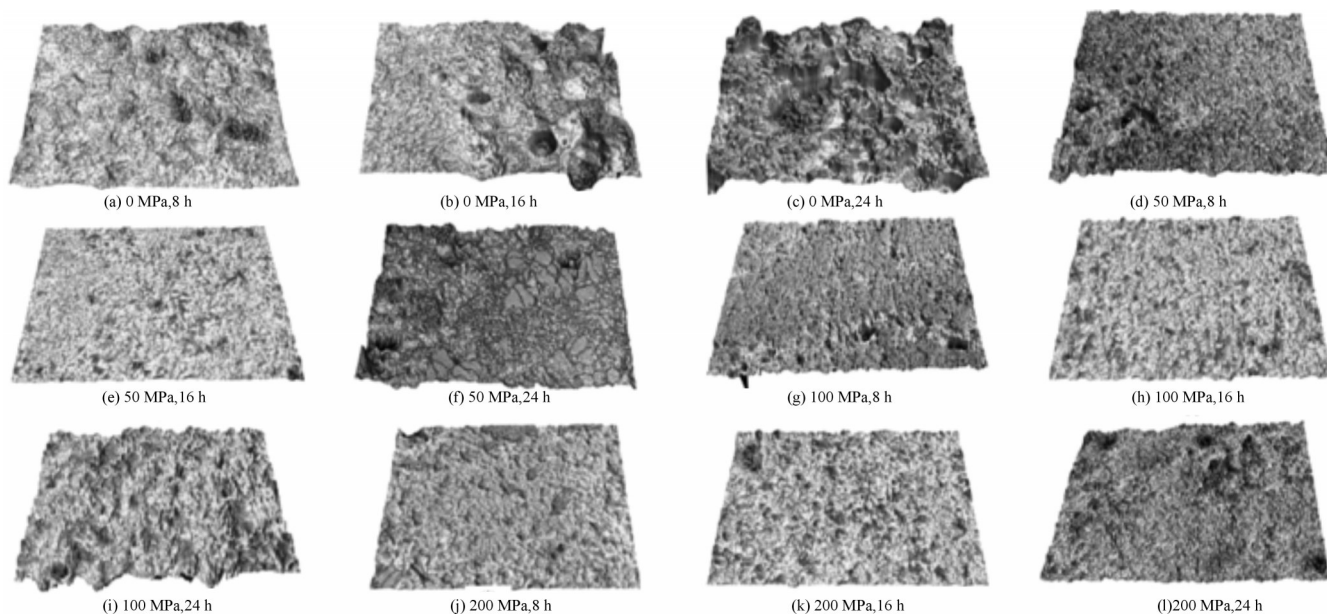


图 19 不同压力下 RSC 试样在不同浸泡时间下的三维腐蚀形貌^[81]

Fig.19 3D corrosion morphologies of RSC specimens under different pressures for different immersion durations^[81]

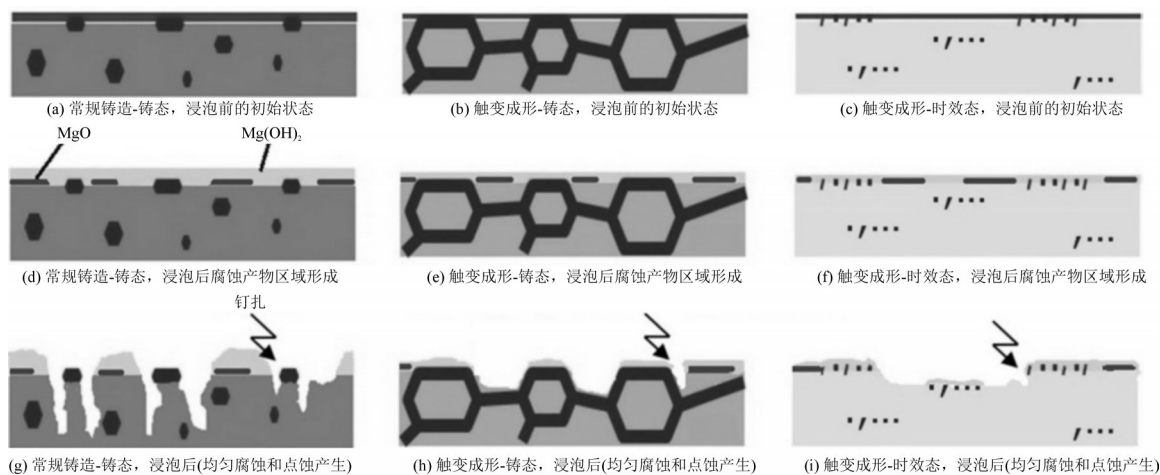


图 20 在 0.1 mol/L NaCl 水溶液中浸泡试验中 WE43 镁合金表面腐蚀过程的简化模型^[37]

Fig.20 Simplified model of corrosion processes occurring on WE43 magnesium alloy surface during immersion test in 0.1 mol/L NaCl water solution^[37]

此,采用半固态成形对镁合金微观组织进行定制,可能是实现其腐蚀性能调控的有效途径。

5 结语与展望

半固态成形技术因其低成本、短流程、低能耗等特点在Mg-RE合金体系中具有广阔的应用前景:

(1)适用于半固态成形技术的Mg-RE合金成分设计是获得优异质量铸件的前提,利用热力学计算软件对Mg-RE合金半固态制浆过程中固相率的计算,分析不同合金化元素对 f_s - T 曲线斜率的影响从而确定合金化元素对半固态浆料成形性能的影响。稀土元素的种类及添加量的调控有助于Mg-RE半固态成形铸件的性能提升。非稀土元素如Ca、Zn、Zr主要作为功能性的合金化元素,有助于半固态浆料的成形性能、铸件的高温性能的提升。

(2)半固态浆料的稳定制备是保证成品质量的前提,目前主要聚焦于半固态浆料的制备技术。液相法制备半固态浆料时往往辅以外物理场,可以获得较大体量的半固态浆料,缺点是制备工艺复杂,对设备要求高,容易产生缺陷。固相法制备半固态浆料时对设备要求不高,并且非扰动的加热可以避免绝大多数氧化缺陷,缺点是零件毛坯尺寸小,制备大件时对设备要求高、组织偏析严重。

(3)Mg-RE合金的半固态成形技术主要包括半固态高压压铸、半固态挤压铸造,采用半固态成形后的高压压铸的铸件可以进行热处理强化,从而发挥Mg-RE合金时效硬化的优势。压力铸造下的微观组织致密度得到提升,避免了孔洞、气孔等铸造缺陷对铸件的不利影响。

(4)利用半固态成形技术可在一定程度上改善Mg-RE合金的室温、高温拉伸性能和耐腐蚀性能。而半固态成形在Mg-Al合金中的研究还发现高温抗蠕变性能和抗疲劳性能得到提升,有望对Mg-RE合金起到类似的效果。

采用半固态成形技术制备的Mg-RE半固态合金表现出的力学性能尤其是高温力学性能的提升潜力巨大,对于发展耐热镁合金提供了新思路。针对目前存在的问题,镁稀土合金半固态成形技术的发展需重点关注以下方面:

(1)从合金成分的设计出发,研究添加微量元素对镁稀土合金半固态加工窗口的进一步拓宽,并对实现初生相尺寸、体积分数的稳定控制提出了要求。

(2)开发针对半固态浆料熔体净化工艺,实现低温

净化,保证半固态浆料的纯净度,优化当前已有制浆工艺或者开发新型高效、绿色友好的制备工艺有助于镁稀土合金半固态成形的实践。

(3)半固态成形镁稀土合金的成形工艺参数探索,结合仿真模拟软件实现对铸造流程的控制,同时还需开发面向Mg-RE合金半固态成形的专用设备。

(4)利用镁稀土合金的优势,重点关注半固态成形镁合金的热处理制度及相应状态的力学性能,尤其应关注其高温蠕变变形行为和疲劳断裂行为等。

参考文献

- [1] 陈娇,赵超宇,刘冬.耐热镁合金在航空航天工业的应用[J].热加工工艺,2024,53(22):11-14.
- [2] LIU B, YANG J, ZHANG X Y, et al. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(1): 15-47.
- [3] MO N, TAN Q Y, BIRMINGHAM M, et al. Current development of creep-resistant magnesium cast alloys: A review[J]. Materials & Design, 2018, 155: 422-442.
- [4] CHEN X Y, LI Q A, YAN J L, et al. Microstructure and high temperature mechanical properties of the Mg-Gd-Y(-Nd)-Zr alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 866-878.
- [5] SHI H, HUANG Y D, YANG L X, et al. Compressive creep behavior and microstructural evolution of sand-cast and peak-aged Mg-12Gd-0.4Zr alloy at 250 °C[J]. Materials Science and Engineering, 2023, A882: 1-12.
- [6] OUYANG S X, YANG G Y, CHEN C, et al. Opposite effects of Zn addition on the creep resistance at low and high temperatures for as-cast Mg-15Gd alloy[J]. Scripta Materialia, 2022, 213: 114 598.
- [7] OUYANG S X, YANG G Y, QIN H, et al. Effect of the precipitation state on high temperature tensile and creep behaviors of Mg-15Gd alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(12): 3 459-3 469.
- [8] MENG X K, ZHAO W M, DING J. Study on interfacial tension and flammability of Mg-Ca-Ce alloy melt[A]//Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes [C]. Switzerland, Baeck, Trans. Tech. Publications Ltd., 2012.
- [9] ZHONG L P, WANG Y J, GONG M, et al. Effects of precipitates and its interface on thermal conductivity of Mg-12Gd alloy during aging treatment [J]. Materials Characterization, 2018, 138: 284-288.
- [10] WU G H, WANG C L, SUN M, et al. Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(1): 1-20.
- [11] LI J L, CHEN R S, KE W. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 761-766.
- [12] SUN Q C, YUAN L Y, TONG X, et al. Formation mechanism of the microstructural heterogeneity in a die-cast Al-Mg-Si alloy and its effect on mechanical properties [J]. Materials Characterization,

- 2024, 213: 1-10.
- [13] ZHU H Y, XIA C J, ZHANG H W, et al. Design of non-heat treatable high pressure die casting Al alloys: A review[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(17): 8 601-8 626.
- [14] YU X H, BAI Y, YE B, et al. A Mg-6Y-3Zn-1Al Mg HPDC alloy having high thermal stability: Study of grain growth kinetics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 925: 166 503.
- [15] WU X H, YANG Q, XU T, et al. Influence of rare earth addition on microstructures and mechanical properties of high-pressure die casting Mg-8Zn-6Al alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 7 912-7 924.
- [16] CAO H X, WANG C C, SHAN Q Y, et al. Kinetic analysis of pore formation in die-cast metals and influence of absolute pressure on porosity[J]. *Vacuum*, 2019, 168: 1-10.
- [17] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. *Metallurgical Transactions*, 1991, B22: 269-293.
- [18] LI G, QU W Y, LUO M, et al. Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: Status, opportunity, and challenge in China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(11): 3 255-3 280.
- [19] LI G, LU H X, HU X G, et al. Current progress in rheoforming of wrought aluminum alloys: A review[J]. *Metals*, 2020, 10(2): 238.
- [20] FENG J Y, XING B. Microstructural and mechanical characterization of AM60 alloy in semisolid rheo-die casting with varying injection velocity[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2023, 18(3): 2 533-2 544.
- [21] PAN Q Y, APELIAN D, ALEXANDROU A N. Yield behavior of commercial Al-Si alloys in the semisolid state[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004, B35(6): 1 187-1 202.
- [22] SIM J G, MOON J Y, KIM J M, et al. Flow characteristics of thin plate for rheo-diecasting process in commercial A356 alloys[A]// *Proceedings of the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Switzerland, Trans. Tech. Publications Ltd., 2006.
- [23] VANEETVELD G, RASSILI A, LECOMTE BECKERS J, et al. Thixoforming of 7075 aluminium alloys at high solid fraction[A]// *Proceedings of the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Switzerland, Trans. Tech. Publications Ltd., 2006.
- [24] LIU J, LIANG T, WANG P. Semi-solid thixoforming simulation of ZL201 alloy parts via any casting[A]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Functional Materials and Structures* [C]. Switzerland, Trans. Tech. Publications Ltd., 2009.
- [25] MENG Y, LI Q, TANG Y, et al. Partial melting behaviors and thixoforming properties of cast and extruded Mg-5.15Y-3.75Gd-3.05Zn-0.75Zr alloys[J]. *Vacuum*, 2018, 150: 173-185.
- [26] ZHAO Z Y, GUAN R G, SHEN Y F, et al. Temperature distribution and its influence on microstructure of Mg-3Sn-1Mn alloy during rheo-rolling process[J]. *Philosophical Magazine*, 2018, 98(26): 2 367-2 379.
- [27] YANAGIMOTO J, TAN J B, SUGIYAMA S, et al. Controlled semisolid forging of aluminium alloys using mechanical servo press to manufacture products with homo- and heterogeneous microstructures[J]. *Materials Transactions*, 2013, 54(7): 1 149-1 154.
- [28] LIU Y Q, QIAN M, FAN Z. Microstructure and mechanical properties of a rheo-diecast Mg-10Zn-4.5Al alloy[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(10): 2 221-2 228.
- [29] FAN Z, LIU G, WANG Y. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast AZ91D magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(12): 3 631-3 644.
- [30] 李璐, 周荣锋, 岑启宏, 等. ZL101过流冷却转移法半固态压铸工艺及性能研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(10): 907-910.
- [31] PATEL J B, LIU Y Q, SHAO G, et al. Rheo-processing of an alloy specifically designed for semi-solid metal processing based on the Al-Mg-Si system[J]. *Materials Science and Engineering*, 2008, A476(1-2): 341-349.
- [32] CHANG Z Y, WANG X C, WU Y J, et al. Review on criteria for assessing the processability of semisolid alloys[J]. *Materials Letters*, 2021, 282: 128 835.
- [33] HU X G, HU Z H, QU W Y, et al. A novel criterion for assessing the processability of semi-solid alloys: The enthalpy sensitivity of liquid fraction[J]. *Materialia*, 2019, 8: 100 422.
- [34] WANG C L, WU G H, SUN M, et al. Formation of non-dendritic microstructures in preparation of semi-solid Mg-RE alloys slurries: Roles of RE content and cooling rate[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 279: 1-8.
- [35] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.4Zr (wt.%) alloy during isothermal ageing at 250 °C[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 421(1-2): 309-313.
- [36] CHANG Z Y, WU Y J, SU N, et al. Microstructural evolution of Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.4Zr (wt%) alloy prepared by strain-induced melt activation process[J]. *Materials Characterization*, 2021, 171: 110 831.
- [37] SZKLARZ Z, ROGAL L. Influence of heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of thixo-cast Mg-Y-Nd-Zr[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(9): 6 181-6 195.
- [38] FANG X G, LÜ S L, ZHAO L, et al. Microstructure and mechanical properties of a novel Mg-RE-Zn-Y alloy fabricated by rheo-squeeze casting[J]. *Materials & Design*, 2016, 94: 353-359.
- [39] MO N, MCCARROLL I, TAN Q Y, et al. Understanding solid solution strengthening at elevated temperatures in a creep-resistant Mg-Gd-Ca alloy[J]. *Acta Materialia*, 2019, 181: 185-199.
- [40] XU C, NAKATA T, OH-ISHI K, et al. Improving creep property of Mg-Gd-Zn alloy via trace Ca addition[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 139: 34-38.
- [41] MAO W M, LI Y J, ZHAO A M, et al. The formation mechanism of non-dendritic primary α -Al phase in semi-solid AlSi7Mg alloy[J]. *Science and Technology of Advanced Materials* 2001, 2(1): 97-99.
- [42] VOGEL A. Turbulent flow and solidification: stir-cast microstructure[J]. *Metal Science*, 1978, 12(12): 576-578.
- [43] QIN R S, WALLACH E. Phase-field simulation of semisolid metal processing under conditions of laminar and turbulent flow[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A357(1-2): 45-54.
- [44] JI S X, FAN Z Y. Solidification behavior of Sn-15Pb alloy under a high shear rate and high intensity of turbulence during semisolid processing[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2002, A33(11): 3 511-3 520.

- [45] FAN Z Y, LIU G J. Solidification behaviour of AZ91D alloy under intensive forced convection in the RDC process[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(16): 4 345-4 357.
- [46] 张泉达, 黄玉川, 孙福臻, 等. 电磁搅拌辅助流变挤压铸造 Mg-6Gd-3Y 镁合金的显微组织和力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(7): 2 043-2 055.
- [47] FANG X G, WU S S, LÜ S L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of quasicrystal-reinforced Mg-Zn-Y alloy subjected to ultrasonic vibration[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A679: 372-378.
- [48] WANG Y, LIU G J, FAN Z Y. Microstructural evolution of rheo-diecast AZ91D magnesium alloy during heat treatment [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(3): 689-699.
- [49] BIAN J C, YU B Y, SUN W T, et al. Improving the microstructure and tensile properties of AZ91 magnesium alloy via electromagnetic stirring[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 1265j1.
- [50] GUAN R G, ZHAO Z Y, CHAO R Z, et al. Boundary layer and cooling rate and microstructure formation on the cooling sloping plate [J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19(5): 949-957.
- [51] ZHANG L, WU G H, WANG S H, et al. Effect of cooling condition on microstructure of semi-solid AZ91 slurry produced via ultrasonic vibration process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(10): 2 357-2 363.
- [52] CÔTÉ P, LAROUCHE M E, CHEN X G. New developments with the SEED technology[J]. *Solid State Phenomena*, 2012, 192-193: 373-378.
- [53] GU G C, XIANG L X, LI R F, et al. A comparative study on microstructure, segregation, and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy parts processed by GISS-HPDC and SEED-HPDC[J]. *Materials*, 2023, 16(20): 6 652.
- [54] QI M F, KANG Y L, XU Y Z, et al. A novel rheological high pressure die-casting process for preparing large thin-walled Al-Si-Fe-Mg-Sr alloy with high heat conductivity, high plasticity and medium strength [J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, A776: 139 040.
- [55] NAJAFI Y, SHABESTARI S G. Investigation of the effect of inert gas bubbling semi-solid process on the microstructure and mechanical characteristics of AZ91 magnesium alloy [J]. *JOM*, 2023, 75(9): 3 924-3 934.
- [56] ZHANG Y, WU G H, LIU W C, et al. Preparation and rheo-squeeze casting of semi-solid AZ91-2Ca magnesium alloy by gas bubbling process[J]. *Journal of Materials Research*, 2015, 30(6): 825-832.
- [57] WANG C L, CHEN A T, ZHANG L, et al. Preparation of an Mg-Gd-Zn alloy semisolid slurry by low frequency electro-magnetic stirring[J]. *Materials & Design*, 2015, 84: 53-63.
- [58] CHEN Y S, ZHANG L, LIU W, et al. Preparation of Mg-Nd-Zn-(Zr) alloys semisolid slurry by electromagnetic stirring[J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 398-409.
- [59] 吕书林, 杨雄, 吴树森. 流变挤压铸造制备 LPSO 结构增强 Mg-Zn-Y-Zr 合金及其组织性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(1): 1-6.
- [60] FANG X G, WU S S, ZHAO L, et al. Effect of ultrasonic power on microstructure and mechanical properties of Mg-3RE-3Zn-0.7Y alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(1): 7-12.
- [61] CHANG Z Y, DENG Q C, LAN Q, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy prepared by rheo-diecasting [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A848: 1-10.
- [62] WANG X Y, SUN K L, WANG C L, et al. Influence of solute content and cooling rate on the preparation of semi-solid slurries for novel creep-resistant Mg-Gd-Ca-Zr alloys[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 1 409-1 418.
- [63] ROGAL L, GARZEL G. Semi-solid state mixing of Mg-Zn-RE alloys-microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 264: 352-365.
- [64] MENG Y, CHEN Q, SUGIYAMA S, et al. Effects of reheating and subsequent rapid cooling on microstructural evolution and semi-solid forming behaviors of extruded Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.36Zr alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 192-203.
- [65] 刘崇亮. Mg-8Y-6Gd-1Nd-0.17Zn(wt.%) 稀土镁合金半固态组织演变及变形行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [66] WU G H, ZHANG Y, LIU W C, et al. Microstructure evolution of semi-solid Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy during isothermal heat treatment[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2013, 1(1): 39-46.
- [67] MORADJOY-HAMEDANI M, ZAREI-HANZAKI A, FATEMI S M, et al. The microstructure evolution of a high Zr-containing WE magnesium alloy through isothermal semi-solid treatment[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(11): 1 623-1 630.
- [68] LIU W, YANG D D, QUAN G F, et al. Microstructure evolution of semisolid Mg-2Zn-0.5Y alloy during isothermal heat treatment [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(8): 1 967-1 972.
- [69] QIAN M. Creation of semisolid slurries containing fine and spherical particles by grain refinement based on the Mullins-Sekerka stability criterion[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(8): 2 241-2 252.
- [70] BOLOURI A, CHEN X G. Transient rheological behavior of semi-solid SEED-processed 7075 Aluminum alloys in rapid compression [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2018, B49(5): 2 858-2 867.
- [71] SU G H, CAO Z Y, LIU Y B, et al. Effects of semi-solid isothermal process parameters on microstructure of Mg-Gd alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(2): 402-406.
- [72] NIE S, GAO B Y, WANG X J, et al. The influence of holding time on the microstructure evolution of Mg-10Zn-6.8Gd-4Y alloy during semi-solid isothermal heat treatment [J]. *Metals*, 2019, 9(4): 420.
- [73] CHEN Q, CHEN G, HAN L N, et al. Microstructure evolution of SiC_p/ZM6 (Mg-Nd-Zn) magnesium matrix composite in the semi-solid state [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 656: 67-76.
- [74] WANG J G, LU P, WANG H Y, et al. Effect of predeformation on the semisolid microstructure of Mg-9Al-0.6Zn alloy[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(30): 3 852-3 856.

- [75] FAN Z, JI S X, LIU G J. Development of the rheo-diecasting process for Mg-alloys[J]. Materials Science Forum, 2005, 488-489: 405-411.
- [76] GU Y H, WANG Z, ZHOU L, et al. Study on semisolid rheo-diecasting process, microstructure and mechanical properties of Mg-6Al-1Ca-0.5Sb alloy with high solid fraction[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(1): 123-137.
- [77] WANG C L, DONG Z Y, LI K, et al. A novel process for grain refinement of Mg-RE alloys by low frequency electro-magnetic stirring assisted near-liquidus squeeze casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 1-10.
- [78] CHANG Z Y, DENG Q C, WU Y J, et al. Semi-solid rheo-diecast Mg-xGd-3Y-1Zn-0.4Zr alloys and their comparison with conventional HPDC alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1 003: 175 508.
- [79] CHEN Y S, WU G H, LIU W C, et al. Effect of mold temperature on microstructure and mechanical properties of rheo-squeeze casting Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr alloy [J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(22): 4 206-4 218.
- [80] CHEN Y S, WU G H, LIU W C, et al. Effects of pressure and aging treatment on microstructures and mechanical properties of rheo-squeeze casting Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr alloy [J]. Journal of Materials Research, 2018, 33(6): 758-771.
- [81] FANG X G, WU D C, LIU J G, et al. Microstructure evolution and corrosion resistance of high-pressure rheo-cast Mg-Zn-Y alloy containing quasicrystal[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 542-556.
- [82] XIE Z Y, TIAN Y, LI Q, et al. Effects of forming parameters on microstructure and mechanical properties of a cup-shaped Mg-8.20Gd-4.48Y-3.34Zn-0.36Zr alloy sample manufactured by thixo-forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 101(5-8): 1 807-1 819.
- [83] MORADJOY-HAMEDANI M, ZAREI-HANZAKI A, FATEMI S M. Characterization of semisolid deformation behavior of a high Zr-containing WE magnesium alloy [J]. Rare Metals, 2018, 41(12): 4 201-4 208.
- [84] 李元东, 陈体军, 马颖, 等. 触变成形 AZ91D 镁合金的组织与二次凝固行为[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 18-23.
- [85] CZERWINSKI F. Magnesium research in Canada: Highlights of the last two decades[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(10): 3 484-3 510.
- [86] 陈冲. 半固态镁合金注射成型机喷嘴压盖漏料原因及改进[J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(5): 21-25.
- [87] 郭春榕, 谢胜川, 陈炽辉, 等. 近液相线温度注射对 AZ91D 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(7): 949-954.
- [88] 宇文江涛, 赵雄, 董璐, 等. 注射成形增强半固态 AZ91D 镁合金的组织及性能[J]. 热加工工艺, 2024, 53(6): 122-127.
- [89] NAMI B, SHABESTARI S G, RAZAVI H, et al. Effect of Ca, RE elements and semi-solid processing on the microstructure and creep properties of AZ91 alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(3): 1 261-1 267.
- [90] PATEL H A, CHEN D L, Bhole S D, et al. Low cycle fatigue behavior of a semi-solid processed AM60B magnesium alloy [J]. Materials & Design, 2013, 49: 456-464.
- [91] LÜ S L, YANG X, HAO L Y, et al. Ultrasonic vibration and rheo-casting for refinement of Mg-Zn-Y alloy reinforced with LPSO structure[J]. Metals and Materials International, 2018, 24(6): 1 315-1 326.
- [92] GAO L, CHEN R S, HAN E H. Thixoformability of a Mg-Gd-Y magnesium alloy and its mechanical properties[J]. Materials Science and Technology, 2013, 27(6): 1 084-1 091.
- [93] LIU J G, DONG B K, FANG X G, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg-12Zn-2Y alloy containing quasicrystal phase fabricated by different casting processes [J]. China Foundry, 2021, 18(2): 147-154.
- [94] 陈玉狮. 流变挤压铸造 Mg-Nd-Zn 镁合金微观组织 与力学性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [95] 于莹. Mg-Gd 镁合金半固态坯料制备及模锻成形研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [96] SUN H, ZHAO Z Y, WANG Z, et al. Corrosion behavior of semi-solid formed Mg-Zn-Zr-Nd alloy [J]. Materials Transactions, 2023, 64(12): 2 845-2 848.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

