

镁基材料半固态压铸成形研究进展与展望

吴 贝¹ 熊京鹏¹ 谷立东² 邓俊钧³ 刘 勇¹

(1. 南昌大学先进制造学院轻合金材料江西省重点实验室,南昌 330031;2. 上海交通大学材料科学与工程学院,上海 200240;3. 伯乐智能装备股份有限公司,宁波 315801)

摘 要 镁基材料作为轻量化的代表材料之一,在各行业已有广泛应用。半固态压铸作为一种有效的镁基材料成形方式,经过半个多世纪的发展,形成了流变成形、触变成形两大类。由于材料、装备及生产工艺限制,镁合金半固态成形技术的应用发展较为缓慢。近年来,轻量化要求的提高和以触变为基础的注射成形机的开发,极大推动镁基材料半固态压铸成形的产业化发展。简述了镁基材料半固态压铸成形的方法和工艺,总结了半固态成形方式相关研究,介绍了注射成形半固态压铸件中常出现的缺陷和解决方法。

关键词 镁基材料;注射成形;半固态压铸

中图分类号 TG146.22;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.Z20250013

Research Progress and Prospects of Semi-solid Die-casting Forming of Mg-based Materials

WU Bei¹, XIONG Jingpeng¹, GU Lidong², DENG Junjun³, LIU Yong¹

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Light Alloy, School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 3. Bole Intelligent Machinery Co., Ltd., Ningbo 315801)

Abstract: As one of representative materials for lightweighting, Mg-based materials are extensively applied in various industries. As an effective method for forming Mg-based materials, semi-solid die casting has been developed for over five decades and comes to categories of rheo-forming and thixo-forming branches, which is previously hindered by limitations in materials, equipment, and process control. In recent years, the increscent demand for lightweighting and development of rheology-based injection molding machines greatly accelerate the industrialization of semi-solid die casting forming of Mg-based materials. The method and process of semi-solid die casting for Mg-based materials were reviewed, and relevant research was summarized. Common injection defects in thixo-forming semi-solid die castings as well as solutions were identified.

Key Words: Mg-based Materials, Injection Forming, Semi-solid Die Casting

作为最轻的金属结构材料,镁被誉为“21世纪绿色环保工程材料”^[1]。由于其高比强度、高比刚度和高阻尼等特点,在汽车制造、轨道交通、3C电子以及国防军工等行业已有广泛的应用^[2]。在我国提出“碳达峰,碳中和”的背景下,镁的低密度、易回收和易加工的特性使其在轻量化制造、降低生产能耗等方面更凸显出广阔的发展前景。镁的晶体结构决定了镁基材料塑性较差,难以通过塑性变形大规模生产镁合金零件。通过成分设计、组织调控和工艺改进^[3]等手段可以使镁基材

料塑性大幅提升,但大部分零件仍是铸造件。对比液态压铸,采用半固态浆料进行压铸具有以下优势^[4]:①固-液共存的半固态浆料可以降低凝固过程中的体积收缩率,实现近净成形。②半固态浆料温度低于液态浆料,能减少热冲击来延长模具使用寿命。③半固态浆料具有非牛顿流体特性,压铸过程中流动更易控制、充型平稳,更易实现稳定化生产。④浆料中的球形或近球形的晶粒,有利于提高铸件力学性能。⑤半固态浆料在铸造过程中不易产生飞溅、涡流,减少铸件中卷

收稿日期:2025-09-24;修订日期:2025-10-24

基金项目:江西省“千人计划”人才资助项目(S2021GDKX0864);江西省重大科技成果熟化与工程化资助项目(20243BDD40002);江西省重点研发计划资助项目(20243BBG71024, 20223BBE51021);国家重点研发计划资助项目(2021YFB3501001, 2022YFC2905204)

第一作者:吴贝,男,1999年出生,硕士研究生,E-mail:1263395102@qq.com

通信作者:刘勇,男,1980年出生,教授,E-mail:liuyong@ncu.edu.cn

引用格式:吴贝,熊京鹏,谷立东,等. 镁基材料半固态压铸成形研究进展与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4):496-507.

WU B, XIONG J P, GU L D, et al. Research progress and prospects of semi-solid die-casting forming of Mg-based materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4):496-507.

人性缺陷。⑥均匀分布的初生固相可以改善铸件组织、成分的均匀性。

尽管如此,镁基材料的易氧化特性使其半固态工艺的应用与发展受到一定限制。为此,研究者持续致力于开发新的工艺方法,并探索提升材料性能的途径。如今,制造业飞速发展,特别是新能源汽车蓬勃兴起,轻量化被放到一个十分重要的位置,镁基材料成为轻量化材料的首选之一。本综述总结半固态压铸的工艺和方法的部分研究进展,并概述镁基材料半固态压铸的工业化应用和发展现状,提出对其未来发展的看法。

1 镁基材料半固态压铸成形制浆方法

半固态压铸成形流程主要包括制浆和压铸,可分为流变成形、触变成形两大类。其中,流变成形是将熔融金属液冷却到半固态区间获得半固态浆料后成形;触变成形是将具有一定组织的金属坯料加热到半固态区间获得半固态浆料后成形。半固态注射成形从原理上属于触变成形,其示意图见图1。传统的触变成形包括预先制坯、分割、二次加热和铸造成形等复杂流程,而注射成形则直接使用普通铸锭切割的毫米级镁粒子作为原料,采用剪切制浆-射出成形的一体化工艺,极大地简化了生产流程,是目前工业化应用的热门。

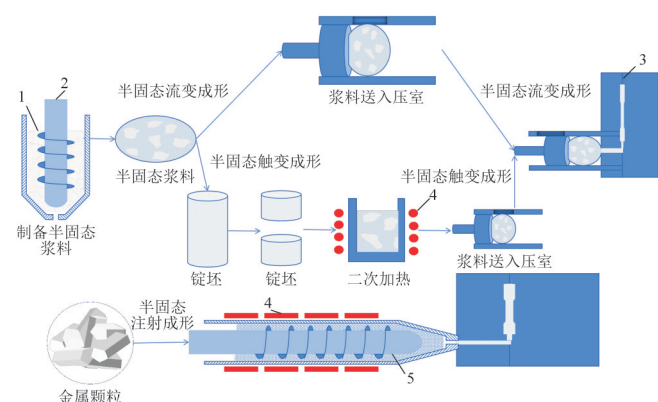


图1 半固态成形方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of semi-solid forming methods

1. 浆料 2. 搅拌装置 3. 压铸装置 4. 加热元件 5. 螺杆

半固态成形的首要步骤便是制备高品质浆料,浆料中的初生固相会直接遗传到最终铸件中。因此,初生固相的形貌和含量会直接影响到铸件的力学性能。

1.1 流变浆料

1.1.1 搅拌法

机械搅拌法^[5]是在金属液冷却的过程中施加一个强剪切力,起到破碎枝晶、均匀温度场和浓度场的作用^[6],从而获得具有近球形初生固相的半固态浆料。该

方法装置简单、生产效率高、浆料质量好,有利于大规模生产。通过调整浇注温度、搅拌速度和冷却速度等工艺参数,可以很好地控制浆料中固相的大小和形貌^[7-8],但搅拌棒的磨损会向浆料中引入杂质。

电磁搅拌法是通过外加变化的电磁场使金属液中产生感应电流,金属液在洛伦兹力的作用下被搅拌。该方法无需外加装置与浆料直接接触,有利于保持浆料纯度,制备半固态浆料时,搅拌功率和时间、电流频率等因素都会对浆料中固相体积分数和形貌产生很大影响^[9-10]。

气体搅拌法^[11]是通过多孔介质向金属液中通入气体来达到搅拌的目的,其优势在于可以灵活布置通气管道,并使用惰性气体(如Ar)搅拌,气体逸出后可以在浆料表面形成一层保护气,减少浆料的氧化。不同的工艺参数会对浆料质量产生明显影响^[12-13]。

超声振动法是通过在熔融金属液中外加超声场来细化、球化初生固相,其主要应用到超声波在熔体中的声流效应^[14]和空化效应。研究者对超声促进金属液形核的机理进行了大量的研究并作出了不同的解释^[15],总体可以归结为促进形核和破碎晶粒。ZHANG L等^[16]通过研究超声振动法制备AZ91镁合金半固态浆料的工艺参数,发现较大的超声温度区间和冷却速率均能提高固相的体积分数,但冷却速率过快会使固相的形貌变差。

1.1.2 非搅拌法

冷却通道法是让熔融金属液在重力作用下流过斜槽或者通道,由于浇道的冷却作用和流动产生的搅拌作用而形成大量球形初生固相。该方法生产设备简单,适用于大规模、连续生产,但浆料在流动过程中可能会产生一些卷入性缺陷。冷却通道法制备半固态浆料的装置见图2^[17-20],浇注温度、浆料流速^[21]等工艺参数都会对浆料产生影响。YANG XR等^[22]采用连续冷却蛇形通道一次制备了大容量半固态浆料,并对浆料快速水淬后观察,发现固化浆料横向和纵向的组织均形貌良好、分布均匀。研究发现,球形晶粒除了由枝晶破碎得到,还能从液相中直接生长得到^[23]。

近液相线铸造法是将金属液在液相线附近保温一段时间,获得足够多的原子团聚后快速浇注,这些原子团聚作为有效的形核核心而大量形核^[24],从而获得具有非枝晶初生固相的半固态浆料,该方法也能用于制备半固态坯料^[25]。

引晶法^[26]制备半固态浆料是通过在过热的熔融金属液中加入相同化学成分具有传统凝固组织的引晶,熔化后破碎的枝晶作为有效形核核心而大量形核。

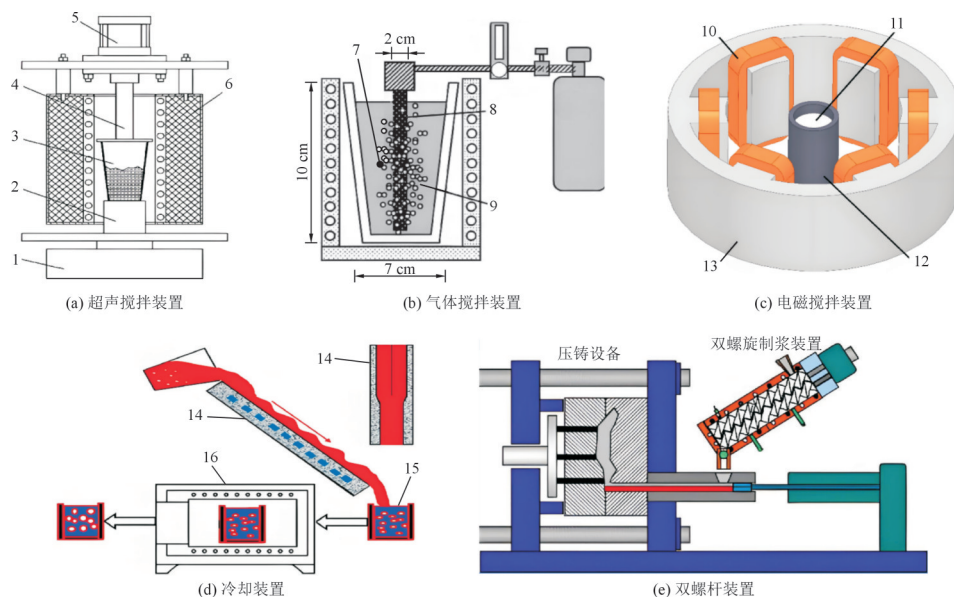


图2 半固态流变成形制浆装置^[17-20]

Fig.2 Slurry preparation device for semi-solid rheforming^[17-20]

1. 超声发生器 2. 超声振动器 3. 金属杯 4. 顶杆 5. 气缸 6. 加热炉 7. 热电偶 8. 多孔石墨 9. 氩气 10. 电磁线圈 11. 金属液 12. 坩埚
13. 外壳 14. 流道 15. 收集坩埚 16. 恒温保温炉

1.2 触变浆料

触变成形所用的浆料是通过加热金属锭坯或者颗粒到半固态温度区间得到,制备适用于触变成形的锭坯和加热的工艺参数通常是研究的热点。由于流变成形的浆料中具有初生非球形晶粒,将其冷却即可得到用于触变成形的锭坯。此外,通过其他办法也能制得适用于触变成形的锭坯。变形法(也叫应变诱导熔体激活法)通过对金属坯料进行变形加工(冷加工和热加工)获得一定变形量,再加热到半固态温度区间获得非枝晶组织半固态浆料。有研究者认为,球形晶粒来源于塑性变形导致的再结晶晶粒。这种方法制备半固态浆料的关键在于使坯料获得足够的变形。因此,研究者通常将重点放在变形工艺上,提出了单一或者多种变形方式组合的办法,并研究了不同变形方式对应的工艺参数,包括镦粗挤压^[27]、多向锻造^[28]和等通道角挤压^[29]等。JIANG J F等^[30]采用等通道角挤压获得的高性能半固态 AZ61 镁合金零件,抗拉强度达到 300 MPa,伸长率达到 22%。坯料变形处理示意图见图 3。

传统工艺得到的铸锭通过等温热处理也能得到用于半固态触变成形的浆料^[31],其最主要的参数就是保温温度和时间,直接决定半固态浆料和最终铸件的品质。此外,喷射成形法、粉末冶金法等^[32]方法也能小批量制备用于触变成形的坯料,其中粉末冶金法还能用于制备镁基复合材料锭坯,增强体通过球磨等方法可以得到较好的分散以提高最终铸件

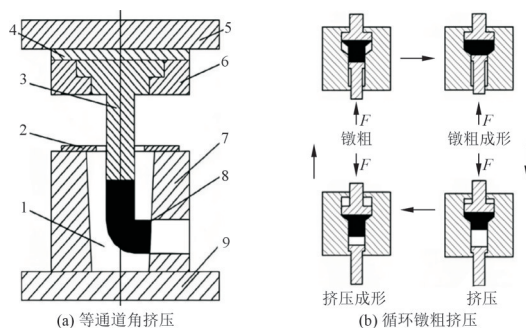


图3 坯料变形处理示意图^[29,32]

Fig.3 Schematic diagram of deformation treatment for billet^[29,32]

1. 凹模 2. 压板 3. 凸模 4. 垫板 5. 上模板 6. 安装板 7. 模座
8. 铸锭 9. 下模座

的力学性能。WANG L Y等^[33]通过粉末冶金的方法,成功制备了具有双峰结构的GO(氧化石墨烯)+ZK60 镁基复合材料,并实现了强度和塑性的协同提升。

2 镁基材料半固态压铸成形工艺

基于半固态浆料固-液共存的特性,部分液态成形和固态成形的办法被设计用于半固态成形。针对镁基材料的半固态成形方式已开发出了压铸、挤压铸造、轧制和锻造等工艺。特别是采用半固态锻造成形的零件,其在力学性能、服役条件等方面有着明显优势,可以适用于要求更高的应用场景。JIANG J F等^[34]采用半固态锻造得到的 AZ80 镁合金零件屈服强度达到 216.9 MPa,抗拉强度达到 312.4 MPa,伸长率达到 26%。对比铸态力学性能获得大幅提升,传

统挤压铸造在保证强度的同时提升韧性,克服了镁合金低塑性的问题。同时,半固态坯料变形抗力低,能有效降低生产过程中的能耗,延长设备的使用寿命。

尽管半固态锻造等方法生产的零件拥有优良的性能,但其生产效率较低且主要是针对特定要求或更极端应用场景。压铸是在压力(一般 20~200 MPa)下使金属液或者半固态金属快速充满型腔,并在高压下凝固的铸造方法。压铸能够在满足零件使用要求的同时高效生产各种高精度的薄型件和结构复杂件,其力学性能见图 4^[21,35-45],这是锻造、轧制等方法难以做到的,并且产品表面质量高,对后续处理要求低,是一种高效、节能的成形方式。

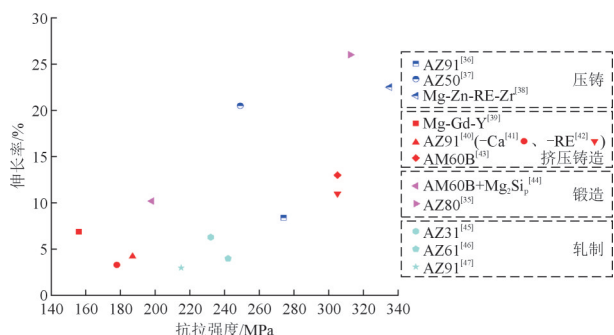


图 4 不同半固态铸造状态零件力学性能对比^[21,35-45]

Fig.4 Mechanical property comparison of components in different semi-solid casting states^[21,35-45]

半固态压铸的工艺参数包括浆料温度、压铸速度、模具温度和铸造压力等,通过影响半固态浆料的流动、充型和凝固行为来影响压铸件的质量。半固态浆料是固-液混合浆料,其黏度和表面张力较高,在流动和充型过程中与纯液态金属表现出不同行为。对于浆料前沿状态,可用韦伯数 We 来表示为:

$$We = \frac{\rho L v^2}{\gamma} \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; L 为流道水利半径; v 为流速; γ 为表面张力。当 We 小于 1 时流体前沿呈现平面填充的形式。通过模拟发现,低的压铸速度和高的固相率

有利于浆料前沿呈现平面填充,这与 We 计算公式相一致。JANUDOM S 等^[46]设计了一种半填满型腔的压铸试验,直接观察浆料前沿的状态,发现半固态浆料比液态浆料有更好的流动前沿并且验证了模拟的结果。对于浆料内部状态,可用雷诺数 Re 来表示:

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (2)$$

式中, η 为流体黏度。当流体在流动过程中超过其临界雷诺数时产生紊流,半固态浆料的临界雷诺数与其固相研究者有关^[47]。通常固相率越高,浆料流动越趋近层流。但有研究者发现,半固态浆料的 Re 与固相研究者并非单纯的负相关,即高固相研究者浆料也易出现紊流现象^[48]。LUO M 等^[49]研究发现,浆料中固相形貌也会影响其流动状态,球形和近球形颗粒表现出更好的流动行为。

浆料充型的好坏直接决定了铸件最终的质量。由于各种模拟软件的发展和不断完善,通过建立模型来预测半固态浆料的充型正在不断发展成熟。很多研究者通过模拟软件,如 AnyCAST、ANSYS、ProCAST 和 Flow-3D Cast 等来预测半固态压铸过程中的充型、凝固行为,并进行了试验验证^[50-51]。

2.1 浆料温度

半固态浆料的温度直接决定浆料中固相分数。压铸温度较高意味着浆料中固相率低,浆料的流动性和充型能力较好。但过低的固相率可能会导致浆料在流动过程中产生卷气等现象,导致最终铸件中出现气孔缺陷。同时,过低的固相率不能有效地体现出半固态压铸的优势,见图 5 和图 6^[35]。压铸温度较低意味着浆料中固相率高,浆料流动平稳。但过高的固相率可能会导致凝固窗口时间短,极易造成冷隔和充型不良。特别是在薄壁件中,过多的初生固相可能会在狭缝中塞积导致充型不满或液相偏析^[52]。GUO H M 等^[53]研究发现,浆料中初生固相含量会对铸件力学性能产生影响。

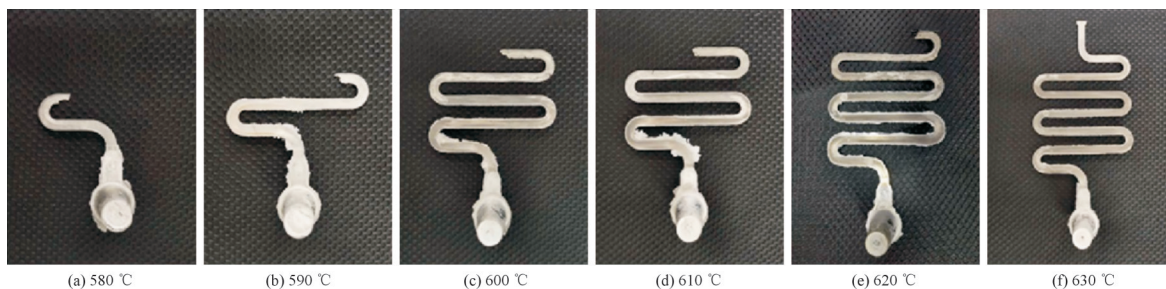


图 5 不同注射温度 AZ91 浆料流动性^[35]

Fig.5 Fluidity of AZ91 slurry at different injection temperatures^[35]

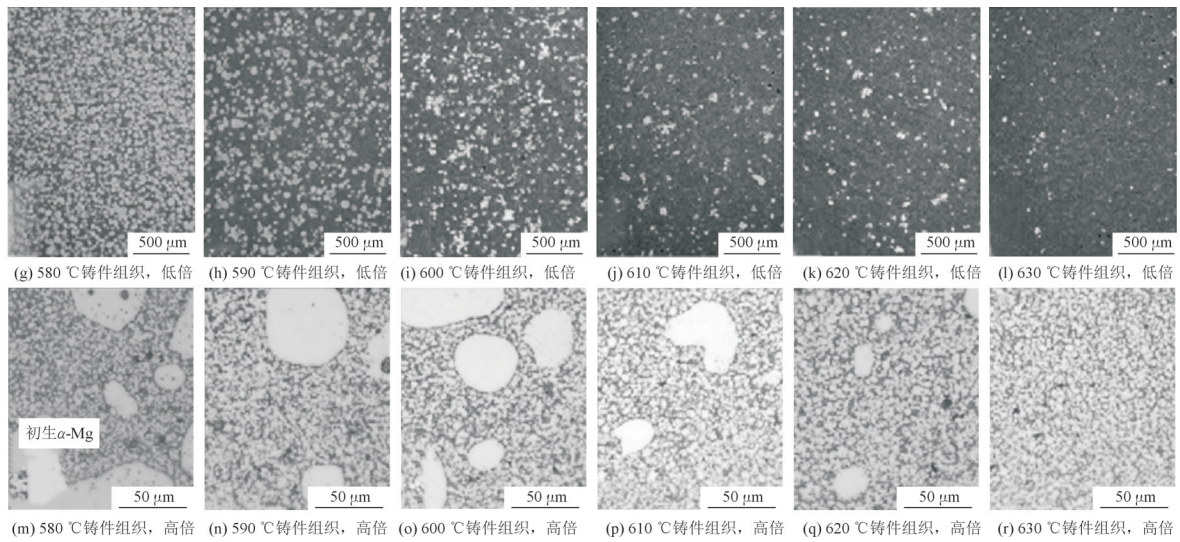


图6 不同注射温度AZ91铸件组织形貌^[35]

Fig.6 Microstructure of AZ91 casting at different injection temperatures^[35]

2.2 压铸速度

压铸速度也是半固态压铸中的重要工艺参数,对于浆料的流动状态起重要影响。过高的压铸速度可能会使铸件产生气孔,影响充型。特别是在填充有障碍物的型腔时,过高的压铸速度会使铸件产生明显缺陷。GU Y H等^[54]通过正交试验分析了半固态压铸中压铸速度、浆料温度、模具温度,发现对铸件中气孔率的影响程度呈现出压铸速度>模具温度>浆料温度的影响,而对铸件中氧化夹杂的影响程度呈现压铸速度>

模具温度>浆料温度的影响,压铸速度对于这两种常见缺陷均产生关键影响。邢博等^[55]研究了压铸速度对流变压铸AM60镁合金铸件中缺陷产生的规律,指出低的压铸速度(<4 m/s)有利于减少气孔、氧化夹杂等缺陷,高的压铸速度有利于减少铸件中的偏析现象,见图7。KUMAR S G等^[56]通过模拟和试验发现,较低的压铸速度能使铸件中温度场均匀、减少铸件中的缺陷。综上,压铸速度对铸件最终质量至关重要,应当在能保证完全充型和生产效率的前提下,适当采用

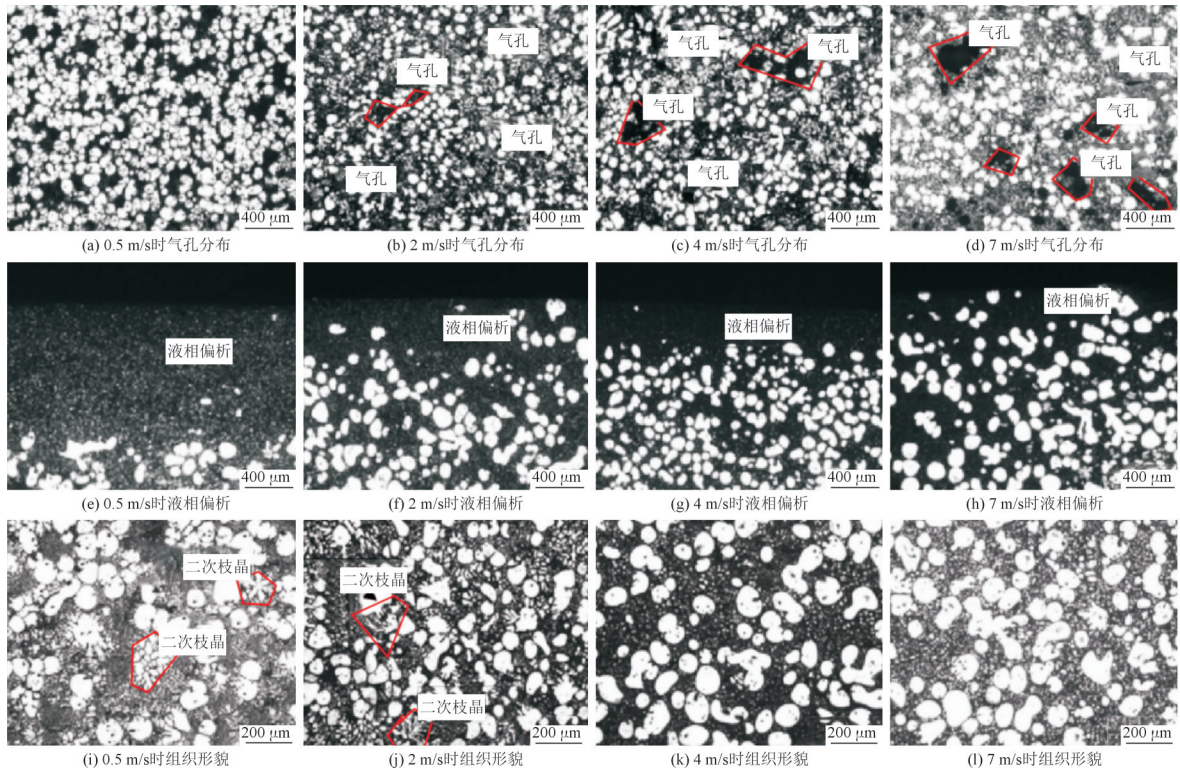


图7 不同压铸速度流变成形AM60镁合金缺陷^[55]

Fig.7 Defects of rheo-formed AM60 magnesium alloy under different die casting velocities^[55]

低的压铸速度。

2.3 模具温度

半固态压铸中通常会对模具进行预热来减小与浆料之间的温度差,从而降低热冲击对模具使用寿命的影响,并提高浆料的充型能力,减少因充型不足产生的缺陷^[57]。模具与浆料间的热传递过程也会影响浆料的凝固行为。LILF等^[58]采用不同导热系数的模具来改变压铸过程中的冷却速率,发现具有高冷却速率的铸件中晶粒明显细化,力学性能和伸长率都得到提升。崔晓鹏^[59]研究了模具温度对半固态注射成形AZ91D镁合金组织性能的影响,发现对于手机壳体类薄壁产品,在180℃时组织细化而具有最优的抗拉强度和伸长率,但模温达到230℃时,具有最好的表面质量和尺寸精度。由于浆料的加热作用,长时间生产会导致模具温度升高。因此,在实际生产中需要实时监测模具温度确定合理的模具预热或冷却方案,以保证同一批零件的性能一致。

2.4 铸造压力

铸造压力是压铸区别于普通铸造最显著的特征。高压状态能有效促进金属液形核从而细化晶粒^[60]。对于合金制品,高压可以增加合金元素在基体间的固溶而产生固溶强化。AIS M等^[61]研究认为,高压状态下(5~6 GPa),Mg-Al合金中Al-Al、Mg-Mg和Mg-Al键强度均得到提高。因此,压铸件相对于传统铸件往往具有更好的力学性能。余亮等^[62]研究了不同压力对半固态铸件的影响,发现提高压力会使晶粒明显细化,但过高的压力导致新相析出,同时增加机械结构的载荷。不同铸造压力对AZ91铸件的影响见表1^[63]。因此,实际生产中要合理选择铸造压力。

表1 不同铸造压力对AZ91合金铸件的影响^[63]

Tab.1 Effects of casting pressures on AZ91 alloy castings^[63]

压力/MPa	孔洞面积分数/%	密度/(g·cm ⁻³)
18	8.5	1.798
45	4.2	—
65	2.2	—
75	1.3	1.882

3 镁基材料注射成形

半固态注射成形过程类似于注塑成形。通过螺杆将镁合金颗粒运输到加热筒中,在加热和螺杆提供的剪切作用下制备出适合半固态成形的浆料,再将浆料高速注射到模具中成形。注射成形与触变成形原理相似,但用于注射成形的原料不需要预处理获得一定的

组织,而是直接使用金属颗粒。部分镁基材料半固态压铸件的力学性能见表2^[35-36,64-74]。相较于传统的半固态成形方法具有以下优点:①无须额外金属熔炼和转移,极大提高生产安全性。②金属熔化过程在密闭的加热筒中完成,无需使用SF₆作为保护气,节约成本、保护环境。③生产效率高,可连续生产。④生产流程简略,可以实现自动化、规模化生产。基于此,半固态注射成形已广泛应用到实际生产当中,且是唯一适用于工业大规模生产的半固态成形方式。

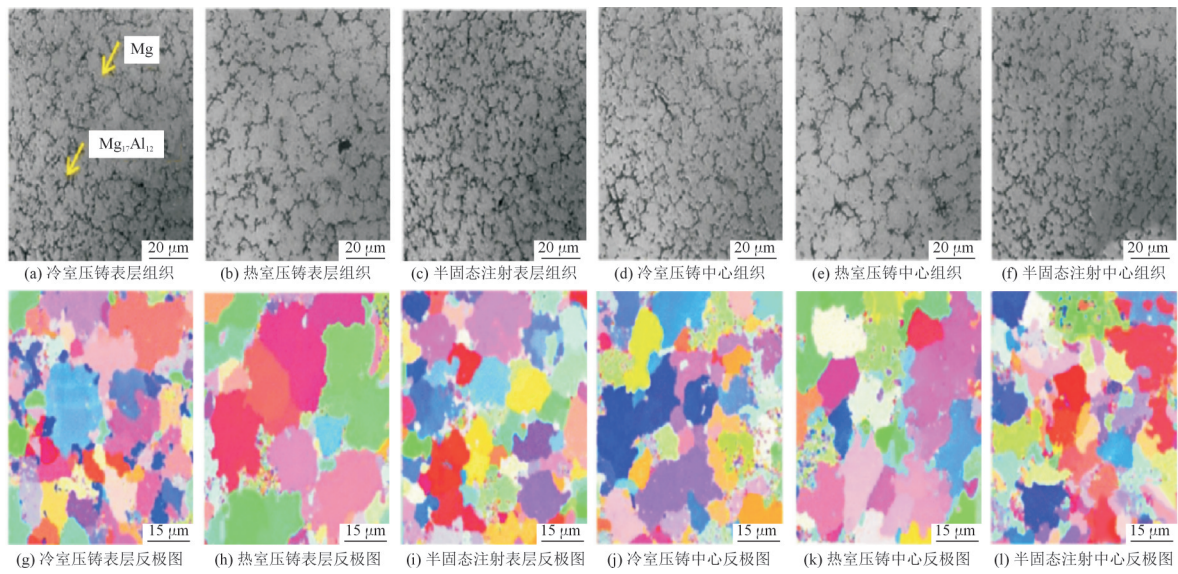
表2 部分镁基材料半固态压铸件的力学性能^[35-36,64-74]

Tab.2 Mechanical properties of semi-solid die castings of partial Mg-based materials^[35-36,64-74]

成形方式	成分	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/%
流变成形	Mg-6Gd-3Y	119	156	6.9
	AM50	122	249	20.5
	AM90	150	253	10.2
	AZ61	126	253	12.3
	AZ91	172	285	4.9
	AZ91-2Ca	177.9±2.1	—	3.32±0.43
	AZ91-2Ca-1.5Ce	154	202	2.3
	GWZ1431K	201	270	1.8
	GWZ831K	139	223	6.4
	Mg-5Zn-2Gd-0.6Zr	—	191.61	6.5
触变成形	Mg-6Al-1Ca-0.5Sb	101	188	10.3
	AZ91D	—	237.5	4.8
	AZ63	—	247	13.7
	Mg-Zn-RE-Zr	90	335	22.5
	GW94	162	208	5.4
	AM50	183	312	14.0
	AZ91D	163	274	8.4
	AZ91D+GO	165	245	—
	AM60	142	266	24.2
	AZ37	158	304	13.0±1.7

3.1 镁合金

AZ91镁合金是一种适合于半固态注射成形的材料,其熔点较低,约为596℃。在半固态温度区间黏度较低,能实现高效充型。同时,AZ91镁合金表现出良好的触变性。因此,镁基材料半固态注射成形的研究和工业化应用多以AZ91镁合金为原料或基体,探索合适的成形工艺或复合材料。图8为不同铸造工艺AZ91镁合金显微组织和反极图。郭春榕等^[75]和宇文江涛等^[64]研究表明,半固态注射成形AZ91D镁合金产品在保证耐蚀性能的前提下,综合力学性能显著提高。半固态成形零件中低的孔隙率使其能够进一步热处理提升其综合性能。从图8可以看出,半固态注射成形可以有效细化AZ91镁合金晶粒,对比热室压铸和冷室压铸细化效果分别提升了70%、20%,同时晶粒取向也更加均匀。JIANG J F等^[34]采用半固态注射成形的方式,在

图8 不同铸造工艺AZ91镁合金显微组织和反极图^[67]Fig.8 Microstructure and inverse pole figures of AZ91 magnesium alloy by different casting processes^[67]

620 °C下获得综合力学性能最优的AZ91D试样,其抗拉强度达到273 MPa,伸长率为7.2%。胡宇阳等^[65]研究表明,合适的固溶处理能协同提升半固态注射AZ91D镁合金零件的强度和塑性。相比AZ91镁合金,AM60B镁合金具有更好的塑性。运用在汽车轻量化设计中,由于其变形吸能,能有效降低碰撞中驾驶员的风险系数。同样,AM60B镁合金也能作为半固态注射成形原料。PATEL H A等^[66]研究表明,对比传统压铸,半固态注射成形AM60B镁合金表现出优良的抗疲劳性能。

3.2 镁基复合材料

半固态浆料由于黏度较高,能够较好地包裹住外加的增强颗粒,因此半固态注射成形的过程中,螺杆的搅拌能进一步分散增强颗粒,提高复合材料组织和成分的均匀性。与常见的镁基复合材料制备方法相比,其最大的优势在于极大简化操作流程,无需熔炼和采用保护气,提高生产安全系数,是一种制备镁基复合材料的高效方法。当前常见用作镁基复合材料的增强体包括^[67-68]:以碳纳米管(CNTs)、石墨烯(GNPs)为代表的碳材料;以碳化硅(SiC)、氧化铝(Al_2O_3)为代表的陶瓷材料;以Ti、Ni为代表的金属材料 and 以 Mg_2Si 、 Al_2Y 为代表的金属间化合物。已有以注射成形为基础,碳材料和陶瓷材料作为增强体为相关研究。张婷等^[6]通过触变注射成形制备了分散均匀、界面结合良好的石墨烯纳米片增强镁基复合材料,当GPNs含量为0.6%时复合材料的抗拉强度和硬度(HV)可分别达到245 MPa和92.3。JING J等^[69]研究认为,半固态注射成形制备的石墨烯增强镁基复合材料中, α -Mg/MgO/

GPNs的界面结构改善了石墨烯和镁基体间的结合,并协调提升了AZ91D的力学性能和导热系数。LU X K等^[70]通过半固态注射成形制备了SiC增强AZ91D镁基复合材料,发现当SiC含量(质量分数,下同)为2.5%时,材料表现出良好的力学性能。断面分析认为,材料断裂主要由于半固态浆料中未完全熔化颗粒与再凝固基体之间脱离引起,SiC与基体之间表现出良好的界面结合,且该复合材料在较低载荷下表现出较好的耐磨性能^[71]。此外,半固态注射成形能改善镁基复合材料伸长率下降的问题,这主要得益于半固态浆料中初生 α -Mg的存在和铸件组织均匀性的提升。GOLLAPALLI P等^[72]通过搅拌铸造制备SiC+粉煤灰镁基复合材料,其伸长率仅为4%,降幅达57%。GUL D等^[73]采用注射成形制备了SiC+ Al_2O_3 镁基复合材料,在提升强度的同时伸长率略微下降。

3.3 常见缺陷

3.3.1 孔隙

通过改进模具设计改变凝固顺序,让最后凝固部分能得到足够补缩、改进压铸工艺参数能有效减少缩孔和缩松^[74]。气孔可能来源于温度降低,溶解在浆料中的气体析出;也可能来源于浆料在压铸过程中的卷气。半固态浆料由于温度低于液态浆料且黏度较高,能有效减少析出性和卷入性气孔,生产的高质量铸件可以进行后续热处理^[75]。降低压铸速度可以显著减少气孔。同时,需要合理设计浇口避免压铸时浆料流直接冲击模具产生卷气。

3.3.2 冷隔

浆料在充型过程中由于流动和模具设计等因素被

分成几股浆料,在焊合前沿处容易出现冷隔缺陷。在传统压铸中,高温浆料的前沿部分通常能有效焊合,而半固态浆料由于其温度较低、固相成分的存在,可能会导致焊合效果差,严重影响铸件的力学性能。当两股浆料汇合时,前沿呈“V”形时有利于气体和夹杂排除,而前沿呈“倒V”形时往往出现明显的缺陷。较高的浆料温度和较低的压铸速度有利于焊合质量。同时,在焊合处应设置溢流口和排气口,让浆料前沿的杂质和气体排出,能有效提高焊合质量。LID等^[76]通过模拟和试验发现,排气口的设置对焊合至关重要,无排气口的焊合位置会出现明显的缺口,导致铸件报废,见图9。

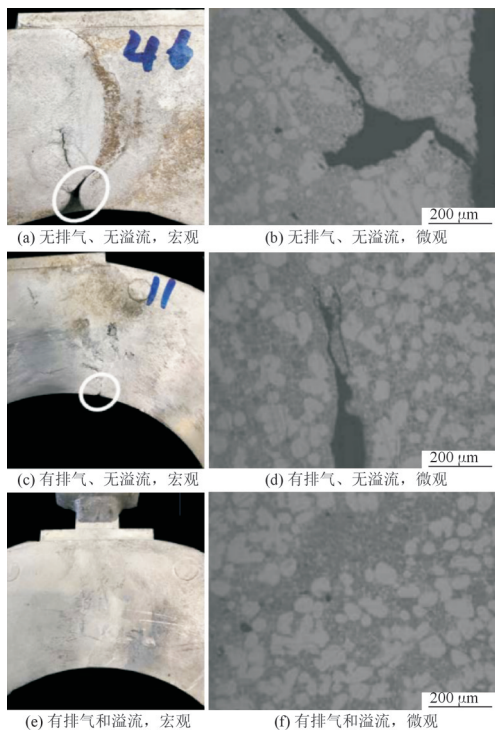


图9 溢流和排气对焊合形貌的影响^[76]

Fig.9 Effects of overflow and venting on rewelding^[76]

3.3.3 偏析

偏析是液态成形、半固态成形中常见的缺陷之一。根据铸件中偏析存在的尺度可以分为宏观偏析和微观偏析。其中,宏观偏析是由于先凝固的贫溶质固相和未凝固的富溶质液相之间的相对运动导致大范围存在的合金元素分布不均^[77];微观偏析则是由于溶质元素在固相和液相中分配系数不同导致枝晶偏析、溶质晶界富集等晶粒尺度的偏析现象。偏析会严重影响铸件的力学性能。针对宏观偏析,许多研究者建立了不同数学模型,采用模拟的方法预测铸件中可能出现的偏析,来指导修改工艺参数^[78]。XU X W等^[79]开发了一种实时监测系统,可实时监测并对宏观偏析进行预测来指导生产,见图10。对于微观偏析,溶质通常会聚集

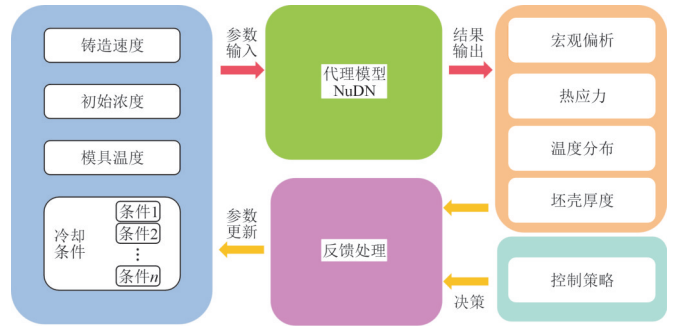


图10 机器学习在铸造工艺中的应用^[79]

Fig.10 Application of machine learning in casting process^[79]

在枝晶根部,半固态浆料由于初生固相多为近球形晶粒,配合高压的成形状态能有效改善这种状况^[61]。此外,初生固相的存在可能会使浆料流动受阻而产生固-液分离导致偏析现象,特别是狭孔、薄壁零件中。此时应适当提高压铸温度或压铸速度^[80]。

3.3.4 其他缺陷类型

在半固态注射成形中,由于模具、工艺设计不当还会导致以下缺陷^[81-82]:①夹杂,夹杂源于浇注系统中残存的杂质颗粒和熔体氧化两部分。夹杂颗粒通常与铸件基体界面结合较差,会严重影响铸件的力学性能。通过及时清理浇注系统,缩短加工时间减少熔体氧化能有效避免夹杂的产生。镁基材料半固态注射成形是无保护气的加工环境,需要合理设计冒口来排出氧化夹杂。②充不满,半固态浆料黏度高、有部分固相导致充型能力较差。特别是针对薄壁型零件,易出现充型不满的情况。适当提高浆料温度或模具温度能改善充型情况。③毛刺、飞边,这类缺陷由于压铸过程中定模和动模未能紧贴产生。通过清理分型面、增大模锁力可以避免此类缺陷的产生。

3.4 工业化应用

近年来,半固态注射成形一体化设备的研制和开发为镁基材料的工业化应用开辟了道路。国内许多高校和企业都展开了相关的研究,并取得了一定的结果,见图11和表3。在装备研制方面,许多企业展开了与生产相结合的探索。如力劲集团开发了一种TPI模组,能够可逆地将普通压铸机转变为半固态压铸系统;伯乐智能发布了40 000 kN超大型镁合金半固态注射成形机。我国镁合金半固态注射机的制造已极具规模,国内许多压铸机厂商如伊之密、力劲、伯乐、海天等公司,生产的注射机均到达世界先进水平。

镁基材料半固态注射成形的工业化应用正处于快速发展阶段。小型零件的生产工艺已较为成熟,已有的注射产品主要集中在电子行业和交通运输行业,如笔记本电脑外壳、新能源汽车支撑件、无人机电池外壳

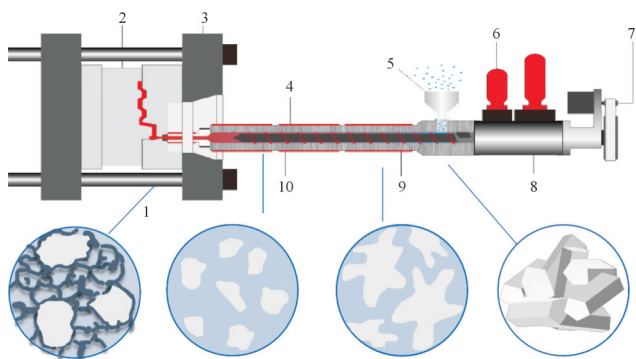


图11 半固态注射成形工艺原理图^[83]

Fig.11 Principle diagram of semi-solid injection molding process^[83]

- 1.喷嘴 2.模具 3.模锁系统 4.料筒 5.料斗 6.蓄能器
7.储料系统 8.高速射出装置 9.加热器 10.螺杆

表3 部分半固态注射成形机和零件生产企业

Tab.3 Partial semi-solid injection molding machines and component manufacturing enterprises

注射机品牌	模锁力/kN	螺杆直径/mm	注射压力/MPa	单次最大注射量/kg
伊之密	32 000	160	100	11
日钢集团	30 000	120	—	12
伯乐智能	40 000	170	90~110	17
海天金属	30 000	150	—	10

等。上汽部分品牌新能源汽车已经采用半固态压铸合金电驱系统,对比传统铝合金材料实现了减重7 kg。华孚科技建设了完整的生产线用于生产汽车及新能源汽车零件,其产品包括汽车前横梁支架、多联屏显示器支架及壳体、车灯支架、转向支架、车门框、座椅骨架以及电机壳体等,见图12。

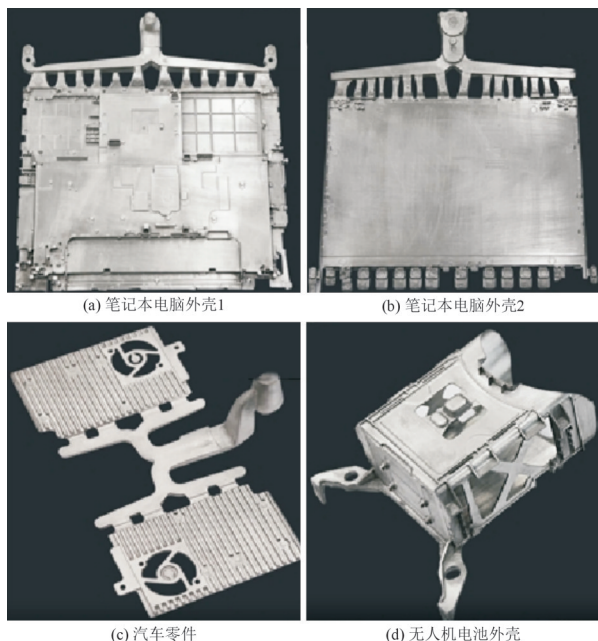


图12 注射成形镁合金零件^[84]

Fig.12 Magnesium alloy components formed by semi-solid injection molding^[84]

我国在一体成形大型结构件方面也展开了研究并取得很多结果,见图13。2023年,上海交通大学成功试制半固态注射成形发动机下缸体零件,最大产品实际注射质量突破9 kg;重庆大学联合多家单位试制了大型CCB结构件,其投影面积达到2.2 m²;2025年,又成功批量试制出全球首例半固态注射成形镁合金汽车车轮,单次注射量达10 kg,相比传统铝合金车轮减重约30%^[84]。同时,上海交通大学与多家单位联合,成功开发了全球首例50.8 cm(20英寸)级镁合金半固态注射成形汽车轮毂,注射质量达到16 kg^[84]。其他大型汽车用结构件,如减震塔、仪表盘横梁支架也在近年陆续试制成功。

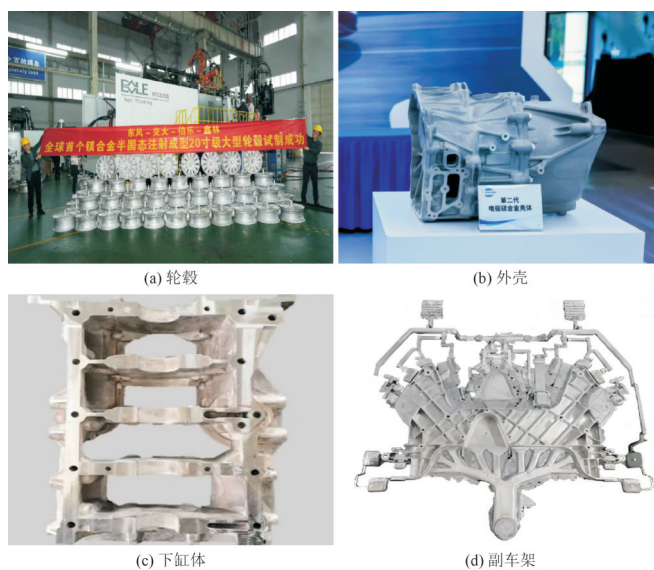


图13 注射成形大型镁合金结构件

Fig.13 Large-scale magnesium alloy structural components by semi-solid injection molding

3.5 半固态注射成形发展瓶颈

近年来,由于新能源产业的快速兴起,特别是新能源汽车、小型飞行器的快速普及,大量的制造企业正在寻求以轻量化为手段的降耗、增程方法。镁基材料作为轻量化代表材料之一,也顺势拥有了广泛的市场。大量的高校和企业都展开了与工业生产相结合的研究,半固态注射成形依靠其独特优势迅速脱颖而出。由于半固态注射成形过程类似于注塑成形,许多注塑机和液态压铸机生产厂家都开展了相关的研发。目前,镁基材料半固态注射成形正处在由“小规模研究探索到大规模产业应用”的转型关键期,但仍存在以下问题:①材料体系,目前有报道用于实际生产的半固态注射成形镁合金零件多以AZ91合金为主,其强度、耐腐蚀和抗疲劳性能有待提高。其他Mg-Al系、Mg-RE系合金的成形,多停留在实验室阶段。同时,半固态注射

成形的方式难以生产高含量颗粒增强复合材料。②压铸设备,针对半固态镁合金注射成形机已有行业标准,且在2024年进行了团体标准修订,但不同厂家生产的注射机性能差异明显。同时,针对不同铸件,最优压铸工艺参数往往不同。这导致在实际生产中缺乏可靠的参考数据,必须以本设备和铸件的实际情况进行最优工艺探索。③成形工艺,镁基材料半固态注射成形温度区间通常在580~630℃之间,其温度区间较窄,小的温度波动会对浆料状态,特别是固相率,产生明显影响,从而影响后续浆料填充、凝固等一系列过程。铸件中组织、成分均匀性控制难度大,精准的温度-速度-压力匹配还需要不断探索。尽管已有许多模拟软件可以使用,但由于半固态浆料的特殊流变性,针对大型铸件还需要不断进行参数优化。

4 展 望

经过数十年的发展,我国已经成为镁合金半固态压铸方向最大的研究国和产业国。随着新能源汽车蓬勃发展,镁基材料也迎来广泛的应用市场。对于半固态压铸镁基材料的开发和成形,总体呈现以下趋势。

(1)通过开发新的材料成分体系,克服镁基材料本身存在的绝对强度和耐蚀性的缺点。同时,对已有的高性能镁基材料进行成分优化,使其适用于半固态成形。

(2)基于大数据模型、机器学习等手段,对半固态成形过程中组织变化、最终力学性能做出预测,从而指导实际生产。

(3)开发先进镁基材料半固态成形设备,进行一体化压铸大型结构件的试制和应用,以满足新能源汽车轻量化的需求。

(4)半固态注射成形蓬勃兴起,许多企业展开了大规模的镁基材料半固态压铸件的试制,但仍需要对工艺不断优化,并对后续使用中安全性、经济性、绿色性进行不断考察,使半固态镁基材料铸件获得广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 丁文江,吴玉娟,彭立明,等.高性能镁合金研究及应用的新进展[J].中国材料进展,2010,29(8):37-45,36.
- [2] 谭军,王芳磊,蒋斌,等.镁合金结构材料应用现状与展望[J].自然杂志,2023,45(2):93-105.
- [3] 潘复生,蒋斌.镁合金塑性加工技术发展及应用[J].金属学报,2021,57(11):1362-1379.
- [4] 潘帅,李强,于宝义,等.镁合金半固态研究进展[J].稀有金属材料与工程,2019,48(7):2379-2385.
- [5] 谢水生,黄声宏.半固态金属加工技术及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [6] 胡勇,饶丽,闫洪.机械搅拌法制备半固态镁合金的研究[J].热加工工艺,2011,40(9):65-67,70.
- [7] 杨柳青,徐骏,刘国钧,等.高剪切熔体处理下半固态A357合金浆料的组织特征研究[J].铸造,2012,61(2):143-146.
- [8] XIAO Z H. Performance of semi-solid slurry produced by twin-screw stirring mixer and rheo-diecasting process of AZ91D alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, 2004(3): 81-85.
- [9] 毛卫民,甄子胜,陈洪涛.电磁搅拌参数对半固态AZ91D镁合金组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2005,25(9):538-540,510.
- [10] ASADI T M K. Mechanical properties and microstructural evolution of rheocast A356 semi-solid slurry prepared by annular electromagnetic stirring [J]. China Foundry, 2023, 20(4): 315-328.
- [11] WANNASIN J, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification [J]. Scripta Materialia, 2006, 55(2): 115-118.
- [12] ZHANG Y, WU G H, LIU W C, et al. Effects of processing parameters on microstructure of semi-solid slurry of AZ91D magnesium alloy prepared by gas bubbling [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2181-2187.
- [13] XU J, WU G H, LIU W C, et al. Effects of rotating gas bubble stirring treatment on the microstructures of semi-solid AZ91-2Ca alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1(3): 217-223.
- [14] 谢恩华,李晓谦.超声波熔体处理过程中的声流现象[J].北京科技大学学报,2009,31(11):1425-1429.
- [15] 吴文华,翟薇,王建元,等.超声场中液体材料的空化和声流动力学研究进展[J].中国科学:技术科学,2023,53(1):2-27.
- [16] 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): 2357-2363.
- [17] LÜ S L, WU S S, LIN C, et al. Preparation and rheocasting of semisolid slurry of 5083 Al alloy with indirect ultrasonic vibration process [J]. Materials Science & Engineering, 2011, A528(29): 8635-8640.
- [18] LUO H, ZHANG X, WANG Y, et al. Multi-physics coupled numerical simulation study to optimize process parameters for electromagnetic stirring of semi-solid A356 aluminum alloy under the influence of skin effect [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107834.
- [19] LI M, LI Y D, HUANG X F. Solidification behavior and rheo-diecasting microstructure of A356 aluminum alloy prepared by self-inoculation method [J]. China Foundry, 2017, 14(1): 1-9.
- [20] FAN Z. Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys [J]. Materials Science & Engineering, 2005, A413: 72-78.
- [21] SAHU S K, KUND N K. Influence of slurry delivery rate and height from cooling slope outlet on solidification and structural behaviors of molded AZ91 magnesium alloy [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2023, C237(7): 1719-1727.
- [22] YANG X R, MAO W M, SUN B Y. Preparation of semisolid A356 alloy slurry with larger capacity cast by serpentine channel [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 455-460.

- [23] 李涛, 陈光, 林鑫, 等. 搅拌条件下二元合金凝固组织的形态演化[J]. 金属学报, 2006(6): 577-583.
- [24] 董杰, 路贵民, 任栖峰, 等. 液相线铸造法非枝晶半固态组织形成机理探讨[J]. 金属学报, 2002(2): 203-207.
- [25] 乐启焱, 张新建, 崔建忠, 等. AZ91D镁合金近液相线铸造半固态坯料的部分重熔[J]. 金属学报, 2002(12): 1 266-1 272.
- [26] CHEN Z Z. Preparation of semi-solid A356 Al-alloy slurry by introducing grain process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1 307-1 312.
- [27] XU Y, JIA J B, CHEN C, et al. Thixoforming of semi-solid AZ91D alloy with high solid fraction prepared by the RUE-based SIMA process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(9-12): 4 317-4 328.
- [28] JIANG J, PAN X Y, REN Y F, et al. Mechanical properties and micro-structural of Al-Zn-Mg-Cu alloy by semi-solid SIMA processed [J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107 126.
- [29] JIANG J F, LUO S J. Microstructure evolution of AZ91D magnesium alloy semi-solid billets prepared by a new SIMA method [J]. Solid State Phenomena, 2006, 691(116-117): 132-135.
- [30] JIANG J F, WANG Y, LIU J, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy parts achieved by thixo-extruding semisolid billets prepared by new SIMA [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(3): 576-585.
- [31] 黄晓峰, 魏浪浪, 杨剑桥, 等. 半固态等温热处理对Mg-7Zn-1Cu-0.3V镁合金非枝晶组织的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(14): 14 116-14 121.
- [32] 杨明波, 代兵, 伍光凤, 等. 铝合金半固态压铸触变成形技术的研究进展 [J]. 铸造, 2003(8): 533-537.
- [33] WANG L Y, CHEN T J. Optimizing microstructure and mechanical properties of bimodal-structured magnesium matrix composites by regulating the remelting time of powder thixoforming [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 987: 174 211.
- [34] JIANG J F, WANG Y, DU Z M, et al. Microstructure and properties of AZ80 alloy semisolid billets fabricated by new strain induced melt activated method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): 422-427.
- [35] GU L D, SHANG X Q, WANG J, et al. Effect of hierarchical cell structure and internal pores on mechanical properties of thixomolded AZ91D magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(3): 749-764.
- [36] RO GAL L, KANIA A, BERENT K, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-RE-Zr alloy after thixoforming [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1 121-1 131.
- [37] 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.
- [38] ZHAO D J, LÜ S L, GUO W B, et al. Effects of Mg₁₇Al₁₂ phase on microstructure evolution and ductility in the AZ91 magnesium alloy during the continuous rheo-squeeze casting-extrusion process [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 191: 63-79.
- [39] 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.
- [40] CHEN Q, YUAN B, 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, 2012, A537: 25-38.
- [41] WANG L P, JIANG W Y, CHEN T, et al. Pheroidal microstructure formation and thixoforming of AM60B magnesium alloy prepared by SIMA process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S2): 435-444.
- [42] ZHANG S Q, CHRN T J, ZHOU J X. Effects of punch velocity on microstructure and tensile properties of thixoforged Mg₂Si_p/AM60B composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 110-122.
- [43] GUAN R G, ZHAO Z Y, WANG X, et al. Process parameter optimizing and studies on microstructure and properties of AZ31 alloy prepared by semisolid rolling process [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(3): 293-298.
- [44] ZHAO Y Z, GUAN G R, WANG X, et al. Microstructure formation mechanism and properties of AZ61 alloy processed by melt treatment with vibrating cooling slope and semisolid rolling [J]. Metals and Materials International, 2013, 19(5): 1 063-1 067.
- [45] GUANG R G, WANG X, TIE D, et al. Tailoring the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy by rheo-rolling and heat treatment[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3 718-3 723.
- [46] JANUDOM S, WANNASIN J, BASEM J, et al. Characterization of flow behavior of semi-solid slurries containing low solid fractions in high-pressure die casting [J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 6 267-6 275.
- [47] MATAS J P, MORRIS F J, GUAZZELLI E. Transition to turbulence in particulate pipe flow [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(1): 014 501.
- [48] HU X G, ZHU Q, MIDSON S, et al. Blistering in semi-solid die casting of aluminium alloys and its avoidance [J]. Acta Materialia, 2017, 124: 446-455.
- [49] LUO M, LI D Q, LU H X, et al. Effects of grain morphology on flow behavior of semi-solid slurries [J]. Solid State Phenomena, 2022, 61(55): 140-145.
- [50] BAI Y L, MAO W M, XU J, et al. Numerical simulation on rheo-diecasting mould filling of semi-solid key-shaped component [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3): 682-685.
- [51] 史立峰, 赵大志, 王平, 等. 铝合金半固态压铸与液态压铸充型过程的模拟[J]. 铸造, 2012, 61(5): 494-497.
- [52] KIM H H, LEE S M, KANG C G. Reduction in liquid segregation and microstructure improvement in a semisolid die casting process by varying injection velocity [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2011, B42(1): 156-170.
- [53] GUO H M, ZHANG S G, YANG X J, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of rheo-squeeze cast Mg-9Al-1Zn alloy by experiments and thermodynamic calculation [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2015, 46(5): 2 134-2 142.
- [54] GU Y H, WANG F, JIAO J, 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.
- [55] 邢博,李元东,胡光山,等. 压射速度对流变压铸AM60镁合金缺陷形成的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(5): 497-501.
- [56] KUMAR S G, HIMADRI R, KUMAR A L, et al. Studies on mold filling behavior of Al-10.5Si-1.7Cu Al alloy during rheo pressure die casting system [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17 (4): 2 868-2 877.
- [57] WANG Z C, YAO H G, LIU G F. Numerical simulation of die casting for semi-solid aluminum alloy and its mould research [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1 894 (534): 13-16.
- [58] LI L F, LI D Q, FENG J, et al. Effect of cooling rates on the microstructure and mechanical property of La modified Al7SiMg alloys processed by gravity die casting and semi-solid die casting [J]. Metals, 2020, 10 (4): 549.
- [59] 崔晓鹏. AZ91D镁合金半固态触变注射组织与工艺研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [60] GUO K Y, XU C, LIN X P, et al. Microstructure and strengthening mechanism of Mg-5.88Zn-0.53Cu-0.16Zr alloy solidified under high pressure [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (1): 99-109.
- [61] AI S M, LIN X P, GUO Y W, et al. Effect of high pressure on microstructure and microsegregation of Mg-11Al alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(9): 2 874-2 885.
- [62] 余亮, 吴树森, 杨雄, 等. 挤压铸造压力对半固态Mg_{98.5}Ni_{0.5}Y_{1.0}合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造, 2019, 68(6): 607-612.
- [63] 杨柳青, 康永林, 张帆, 等. 铸造压力对AZ91D镁合金流变压铸件致密性的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(7): 630-632, 584.
- [64] 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.
- [65] 胡宇阳, 牛立斌, 高冲, 等. 固溶处理对半固态注射成形Mg-Al-Zn合金组织及性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43(7): 38-45.
- [66] 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 and Design, 2013, 49: 456-464.
- [67] OKAYASU M, FUKUI T. A study of the mechanical properties of a Mg-Al-Zn alloy (AZ91) produced via Thixomolding [J]. International Journal of Material Forming, 2021(2): 271-280.
- [68] 熊锦林, 吴艳, 雷琪, 等. 镁基复合材料及其制备工艺研究现状与展望 [J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(2): 340-350.
- [69] 张婷, 赵宇宏, 陈利文, 等. 触变注射成型法制备石墨烯纳米片增强镁基复合材料 [J]. 金属学报, 2019, 55(5): 638-646.
- [70] LU X K, HAO W N, KUANG S X, et al. High-strength, high-toughness SiC_p reinforced Mg matrix composites manufactured by semisolid injection molding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 4 219-4 228.
- [71] LU X, KUANG S, ZHOU B, et al. Tribological behavior of SiC reinforced AZ91D composites manufactured by semisolid injection molding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 4 076-4 087.
- [72] GOLLAPALLI P, PANT M, CHANDRA A A, et al. On the microstructural, mechanical, damping, wear properties of magnesium alloy AZ91-3%SiC_p-3% fly ash hybrid composite and property correlation thereof [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2025, 13 (5): 2 374-2 389.
- [73] GU L D, SHANG X Q, WANG J, et al. The influence of SiC-Al₂O₃ reinforcements on the deformation and fracture mechanism of thixomolded Mg-based composite [J]. Journal of Materials Science, 2024, 59 (22): 9 892-9 907.
- [74] KANG Z L, MIN L, QUAN D L, et al. Effects of process parameters on shrinkage porosity in 357 semi-solid die casting parts [J]. Materials Science Forum, 2020, 59: 9 892-9 907.
- [75] 郭春榕, 谢胜川, 陈焜辉, 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.
- [76] LI D, SONG C, LI D Q. Experimental and simulation study for rewelding defects during the flow process of semi-solid die casting [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 13(47): 012 124.
- [77] BECKERMANN C. Modelling of macrosegregation: Applications and future needs [J]. International Materials Reviews, 2002, 47 (5): 243-261.
- [78] 沈厚发, 陈康欣, 柳百成. 钢锭铸造过程宏观偏析数值模拟 [J]. 金属学报, 2018, 54(2): 151-160.
- [79] XU X W, REN N, LU Z Q, et al. A data-driven approach for the fast prediction of macrosegregation [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2024, 55 (6): 2 083-2 097.
- [80] CHEN G, ZHANG S, ZHANG H M, et al. Controlling liquid segregation of semi-solid AZ80 magnesium alloy by back pressure thixomolding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259: 88-95.
- [81] 蒋斌, 张昂, 宋江凤, 等. 镁合金一体化压铸缺陷控制 [J]. 金属学报, 2025, 61(3): 383-396.
- [82] 王瑞权. 镁合金半固态压铸缺陷分析与防止 [J]. 金属加工(热加工), 2011(13): 69-70.
- [83] 谷立东, 李子昕, 尚晓晴, 等. 镁合金半固态注射成形技术的发展现状与应用前景 [J]. 汽车工艺与材料, 2025(4): 1-12.
- [84] 全球首例镁合金半固态注射成形汽车车轮试制成功 [J]. 铸造工程, 2025, 49 (2): 16.

(编辑: 彭瑾)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿, 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!