

• 今日铸造 Today Foundry •
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5001

镁合金半固态浆料制备及注射成形技术研究进展

吴振波^{1,2}, 郭威³, 黄润华³, 李祥^{1,2}, 隋铁军^{1,2}, 赵觅⁴,

王锦程⁵, 乔彦强⁵, 吴树森³, 毛有武⁶

(1. 伊之密股份有限公司, 广东 佛山 528306; 2. 广东省智能化模压成型装备企业重点实验室(伊之密), 广东 佛山 528306; 3. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 华中科技大学航空航天学院, 湖北 武汉 430074; 5. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 6. 华中科技大学材料科学与工程国家级示范教学中心, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着节能减排对于材料轻量化的要求不断提高, 镁合金在诸多领域得到了广泛应用。然而, 镁合金熔体易氧化燃烧, 使得镁合金构件的成形方式有限。半固态成形通过将液态金属转化为球形半固态颗粒, 可减少成形缺陷并提升材料性能。半固态注射成形则结合了高压铸造与注射成形的优点, 实现了半固态浆料制备和成形过程一体化, 可用于生产具有复杂形状的薄壁零部件。本文综述了镁合金半固态浆料非树枝晶结构的形成机制, 总结了相关的半固态浆料制备工艺, 并对镁合金半固态注射成形技术进行了介绍, 对镁合金半固态成形技术的未来发展进行了总结与展望。

关键词: 镁合金; 半固态浆料; 注射成形; 研究进展

中图分类号: TG146.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)03-0277-11

The Research Process for the Preparation of Mg-based Semi-solid Slurry and Thixomolding Technology

WU Zhenbo^{1,2}, GUO Wei³, HUANG Runhua³, LI Xiang^{1,2}, SUI Tiejun^{1,2}, ZHAO Mi⁴,
WANG Jincheng⁵, QIAO Yanqiang⁵, WU Shusen³, MAO Youwu⁶

(1. Yizumi Holding Co., Ltd., Foshan 528306, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Molding Equipment Enterprises (Yizumi), Foshan 528306, China; 3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. School of Aerospace Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 5. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 6. National Experimental Teaching Demonstration Center of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Due to the increasing requirements for lightweight materials in energy conservation and emission reduction, magnesium alloys have been widely applied in numerous fields. However, magnesium-based melts are prone to oxidation and combustion, which limits the methods used to form magnesium alloy components. Semi-solid formation can reduce defects and enhance material properties by transforming liquid metals into spherical semi-solid particles. Semi-solid thixomolding technology combines the advantages of high-pressure casting and injection molding, realizing the integration of semi-solid slurry preparation and the forming process, and can be used to produce thin-walled parts with complex shapes. This paper reviews the formation mechanism of the nondendritic structure of magnesium-based semi-solid slurries,

收稿日期: 2025-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(52201075); 凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLS202308, SKLS202309); 湖北省自然科学基金(2023AFB798); 深圳市科技计划(JCYJ20220530160813032, JCYJ20240813153421029)

作者简介: 吴振波, 1990年生, 本科, 工程师。主要从事半固态镁合金注射成型机设备研发与镁合金注射成型技术研究方面的工作。
Email: wuzhenbo@yizumi.com

通信作者: 毛有武, 1965年生, 本科, 高级工程师。研究方向为铸造合金熔炼与微观组织分析、金属材料检测与控制。
Email: ywhust@hust.edu.cn

引用格式: 吴振波, 郭威, 黄润华, 李祥, 隋铁军, 赵觅, 王锦程, 乔彦强, 吴树森, 毛有武. 镁合金半固态浆料制备及注射成形技术研究进展[J]. 铸造技术, 2025, 46(3): 277-287.

WU Z B, GUO W, HUANG R H, LI X, SUI T J, ZHAO M, WANG J C, QIAO Y Q, WU S S, MAO Y W. The research process for the preparation of Mg-based semi-solid slurry and thixomolding technology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 277-287.

summarizes the relevant semi-solid slurry preparation processes, introduces magnesium-based semi-solid thixomolding technology, and finally summarizes and prospects for the future development of magnesium-based semi-solid forming technology.

Key words: Mg-based alloys; semi-solid slurry; thixomolding technology; research process

镁合金是目前实际应用中密度最低的一类金属结构材料,具有高比强度、高比刚度、高阻尼性、优异铸造性和可回收性等特点,被誉为“21 世纪绿色工程材料”,在汽车、电子器件、航空航天等领域具有广泛的应用前景^[1-3]。然而,目前商用镁合金存在机械强度偏低、抗蠕变性能较差、耐腐蚀性差等缺点,同时镁合金由于熔炼过程中易氧化、易燃烧,造成镁合金零部件成形方式有限,限制了镁合金的应用^[4-5]。因此,开发出满足性能和成形需求的镁合金及其成形工艺具有重要的意义。

镁合金现有的主要成形工艺包括高压铸造、挤压铸造和重力铸造等。其中,高压铸造是生产镁合金零部件最常用的成形工艺,能够成形大尺寸、薄壁和复杂几何形状零部件^[6]。然而,高压铸造获得的镁合金铸件常含有孔隙或热裂等铸造缺陷。此外,由于热处理会诱发表面下的孔隙起泡,高压铸造零部件难以通过热处理进一步提高其机械性能^[7-8]。半固态成形工艺的出现为解决上述问题提供了新的思路^[9]。半固态成形的主要特点是将液态金属转变为半固态浆料,该浆料包含球形非树枝态初级固态颗粒,能以更加可控和非紊流的方式充填模具型腔,从而消除卷气和缩孔缺陷。半固态成形工艺具有可热处理、良好的尺寸公差、稳定的机械性能和优异的表面质量等^[10-11]。在镁合金半固态成形工艺开发过程中,研究人员将半固态铸造工艺与塑料注射成形原理结合,开发出了全新的镁合金半固态注射成形技术^[12-14]。相较于传统的半固态铸造工艺,半固态注射成形工艺将半固态金属浆料的制备、输送、成形等过程集为一体,解决了半固态浆料的保存输送氧化、成形控制困难等问题。半固态注射成形因其工艺简单、能耗低、精度高、产品机械性能优异等优势,被广泛应用于汽车、电子通信等领域,逐渐成为关注的热点并获得快速发展^[8,15-16]。本文将围绕镁合金半固态浆料非树枝晶结构的形成机制、半固态浆料制备方法和半固态注射成形工艺进行现有研究及应用现状的总结,并对镁合金半固态注射成形技术未来前景和挑战进行展望。

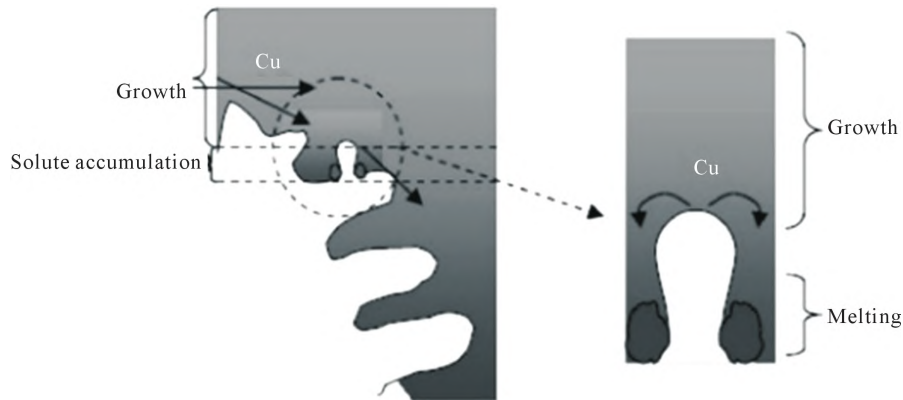
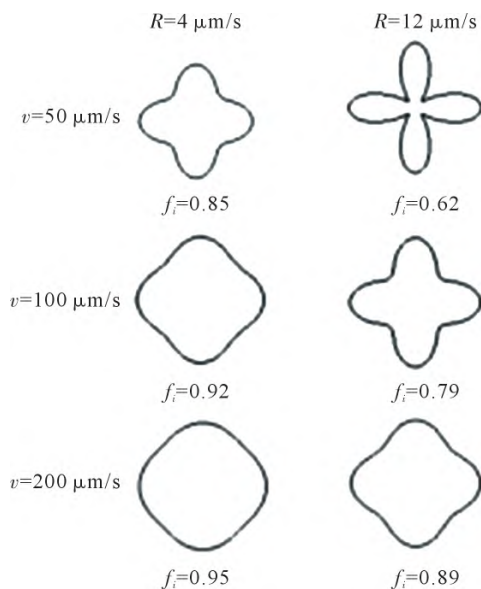
1 半固态浆料非树枝晶结构形成机制

制备高质量的半固态浆料是半固态注射成形的前提和关键,通过将微观组织形态从树枝晶转变

成球形非枝晶结构,能够改善传统铸造工艺中存在的气孔、偏析和热裂等缺陷^[17-19]。因此,获得球形非枝晶结构的浆料对于镁合金半固态注射成形至关重要。目前,针对半固态浆料球形非枝晶结构提出了诸多形成机制,主要包括枝晶臂机械破碎^[20-22]、枝晶臂塑性弯曲和晶界浸润熔断^[23-24]、枝晶臂根部重熔^[25-27]和生长控制机制^[26,28-29]。

在早期研究中,Vogel 等^[23]为解释半固态浆料制备过程中晶粒数量倍增的现象,提出了枝晶臂机械破碎机制。熔融时搅拌产生的剪切力导致枝晶臂发生塑性弯曲,最终导致枝晶破裂。近期,Wang 等^[30]利用高速相机发现枝晶破碎是流体流动弯曲后产生应力集中的结果,枝晶次臂总是从根部发生断裂并从主臂上脱落。此外,Hellawell 等^[31]提出,由于溶质富集和热溶质对流,二次枝晶臂会在根部位置重熔并分离,并在强制对流环境下不断演变,最终呈现出晶粒增殖。同时,Ruvalcaba 等^[32]通过高亮度同步加速器 X 射线显微镜原位观察了 Al-20%Cu(质量分数)合金枝晶臂破碎过程中的局部溶质富集,这种溶质富集导致枝晶臂根部固液界面处的局部成分波动,导致根部重熔和进一步的分枝分离,如图 1 所示。同时,研究人员也发现了机械剪切或毛细管效应引起的枝晶臂重熔,从而导致枝晶破碎的现象^[33-35]。上述理论可用于解释半固态浆料制备过程中非枝晶晶粒增殖的现象,但未能对枝晶碎片在后续搅拌过程中发展为玫瑰花状或球形形态的行为做出合理解释。

随着研究的不断深入,研究人员认为球形颗粒是在强制对流情况下液相析出的原生固相颗粒生长所造成,而不是通过机械破碎等机制得到,即生长控制机制。Ji 等^[29]提出,剪切强度可以改变熔体中的流动特性。在低剪切速率下,悬浮在层流中的颗粒发生旋转并且枝晶臂发生弯曲,从而形成玫瑰花状颗粒并不断生长;在高剪切速率下,金属熔体以湍流方式流动,使得液体进入枝晶间区域,从而消耗溶质边界层并抑制枝晶生长。在这种情况下,枝晶臂可能会发生分离;当剪切速率足够高时,固液界面不断更新,促进球形颗粒的形成。Wu 等^[36]构建了搅拌条件下的晶粒生长模型,模拟了不同凝固速率和搅拌速率下晶粒形态的变化,如图 2 所示。剪切速率和熔体流动方式导致初级固相颗粒由枝晶→玫瑰花状→球形的演变。Fan 等^[37]也提出了“有效连续形核”理论,认为

图1 由于外部溶质平流和局部溶质排斥溶质富集并破碎的示意图^[32]Fig.1 Schematic diagram of solute enrichment and fragmentation due to external solute advection and local solute rejection^[32]图2 不同凝固速率和搅拌速率下的晶粒生长模型^[36]Fig.2 Grain growth models under different solidification rates and stirring rates^[36]

形核与晶粒生长存在竞争,强制对流所产生的均匀温度和成分场,使得所有晶核能够稳定生长,最终达到所需的固相分数。

部分学者也提出了凝固初期形成大量自由晶,从而促进半固态组织形成的理论^[38]。当大量自由晶在金属熔体中,相邻晶粒周围的浓度场叠加提高固液界面的稳定性,并促进晶粒在各个方向上均匀生长,从而形成非枝晶组织^[39-40]。通过在凝固前期获得更多的自由晶,成功开发出液相线铸造^[40]、剪切低温浇注式半固态浆料制备(low superheat pouring with a shear field, LSPSF)^[41]等工艺,能够在凝固过程中直接促进球形晶的形成,无需在后续冷却过程中由枝晶熔断与晶粒增殖而形成非枝晶组织。

目前,对于半固态浆料非枝晶结构的形成机制,尚未达成普遍共识。在实际应用过程中,工程师们相对更容易理解枝晶臂破碎机理,对镁合金半固态浆料制备起到了积极的指导作用。非枝晶结构

形成机理尚未完全明晰,上述机制需要进一步的实际证据来证明,以同步辐射技术和模拟仿真方法为代表的新型研究方式,在未来有望通过深入组织分析与模拟仿真的结合来进一步完善上述理论。

2 半固态浆料制备方法

镁合金半固态浆料是由非枝晶固相和合金液组成的固液混合物,这种浆料具备优异的流变特性,在充型过程中相较于合金液流动更加平稳,能够直接应用于成形加工。通常,以施加外场等方法来调控合金液的凝固行为,从而获得一种液态合金母液中存在一定比例固相颗粒的混合浆料,固相率可达60%。镁合金半固态浆料的质量决定了能否获得优异组织和性能的镁合金零部件。制备半固态金属浆料并形成非枝晶组织的关键在于2个方面:①形成大量晶核并保持其稳定性;②在随后的凝固过程中,控制非枝晶的生长,促进球形晶粒组织的形成。在此基础上,研究人员开发了各类半固态浆料制备技术,主要有机械搅拌等施加外场的方式和部分晶粒细化技术。

2.1 机械搅拌

机械搅拌是用于制备半固态浆料的典型方法,其直接在凝固过程中施加连续搅拌并使液态合金冷却至液相线温度以下^[42-43]。随着机械搅拌工艺的开发,发展形成了单螺杆机械搅拌^[44]和双螺杆机械搅拌^[45]等装置。机械搅拌能够在熔体中营造强制对流环境,形成均匀的温度场和成分场,从而导致树枝晶发生剪切、变形或熔断,生长形成球形颗粒^[45]。在高剪切速率和高湍流强度下,更利于形成细小的初级相和更均匀的相分布^[46]。由于机械搅拌所需设备和工艺条件简单、成本较低,应用于多种镁合金零件的工业化生产。然而,该方法也存在弊端,比如搅拌器腐蚀、气体夹杂、氧化物夹杂、大规模制备控制困难和生产效率较低等^[47]。

2.2 超声波振动

超声波振动装置如图3所示^[48],通过在液态合金中施加高功率的超声波,将声能带入液态合金中,同时引入非线性效应,如空化和声流能引起枝晶碎裂^[49],不仅增加了凝固过程中的晶核数量,还可细化晶粒尺寸、增加均匀性,改善凝固合金的微观结构^[50]。此外,超声振动还会影响半固态浆料的表观黏度,导致浆料内部结构过冷,促进更多晶核的形成,并使固相分布更加均匀^[51]。与其他浆料制备方法相比,超声波振动可不与液态合金直接接触,避免造成污染,设备也相对简单,但其工艺稳定性不高,限制了其在半固态镁合金制浆上的应用。

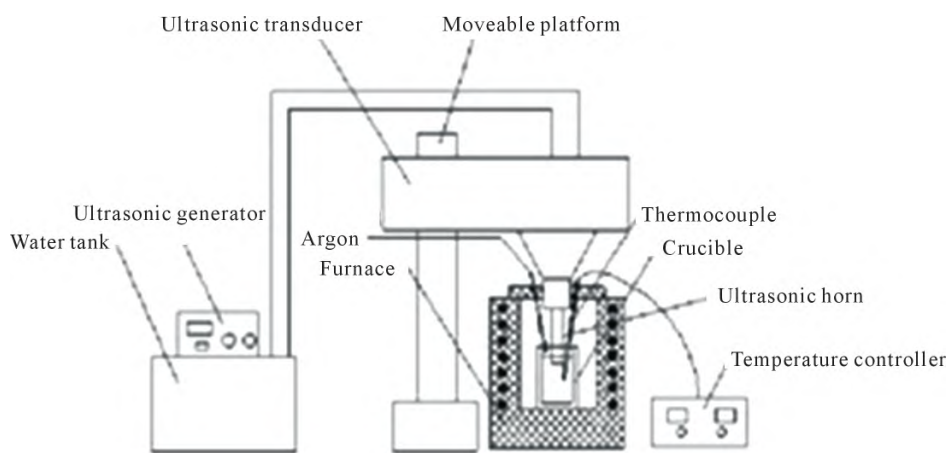


图3 超声振动装置^[48]

Fig.3 Schematic diagram of the slrasonic vibration device^[48]

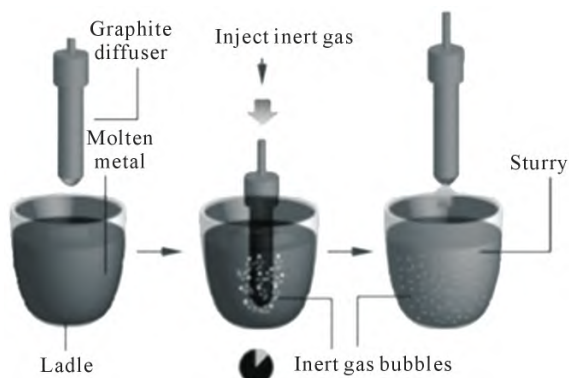


图4 气体诱导半固态工艺步骤示意图^[52]

Fig.4 Schematic diagram of the steps of the gas-induced semi-solid process^[52]

的半固态浆料制备,当固相分数提高时合金熔体粘度增加,气体难以从熔体中逸出,从而影响浆料和后续产品的质量。

2.4 电磁搅拌

电磁搅拌是对合金熔体施加交变电磁场、产生感应电流后,合金熔体在洛伦兹力作用下运动来增强传热传质过程,从而获得非枝晶结构^[54]。该方法采用非接触式搅拌,可降低浆料中的气体残留和夹杂物污染。此外,在低频电磁搅拌过程中,镁合金熔体

2.3 气体诱导半固态工艺

气体诱导半固态工艺是一种在连续冷却过程中,向过热金属熔体中不断注入惰性气体,利用气体进行搅拌冷却到预定温度,从而制备半固态浆料的方式,其工艺原理如图4所示^[52]。该方法具有处理时间短、半固态浆料质量高、操作流程短和工艺灵活高等优点。此外,该方法制备镁合金浆料时惰性气体可实现剧烈搅拌,有效避免氧化夹杂物的产生,同时离开熔体的惰性气体可在表面形成气体保护层,一定程度上隔绝外界空气^[53]。该方法工艺简单且设备成本相对较低,在镁合金半固态浆料制备中具有良好的应用前景。但是,该方法仅适用于固相分数较低

表面的氧化膜不易破裂,不污染内部金属液。目前电磁搅拌可实现水平搅拌、垂直搅拌和螺旋搅拌3种模式。整个工艺过程较易控制,可连续生产半固态浆料,但存在能耗高、设备投资大、工艺复杂等缺点。由于电磁搅拌产生的电流在金属熔体内不同位置有所差异,且感应电流会使得金属熔体温度升高,从而导致熔体内部的宏观温度场不均匀^[55]。

2.5 应变诱导法

应变诱导法是通过将塑性变形(发生再结晶行为)后的合金重新加热至半固态温度,进而制备半固态浆料的方法。图5为基于重复镦粗挤压(repertitive upsetting-extrusion, USE)的应变诱导熔融活化(strain induced melt activation, SIMA)工艺示意图^[56]。该方法可实现高纯净度、高效率、大批量的半固态浆料制备。在实际应用过程中,塑性变形量、保温温度和保温时间等关键工艺参数均会影响球形固体颗粒的大小和形貌^[57]。该方法制备AZ91D半固态浆料时的组织演变顺序为:枝晶→粗化等轴晶→细小块状晶粒→团块状晶粒→球形大颗粒^[58]。利用该方法制备获得的半固态浆料中球形颗粒更加圆润,能够提供更好的流动性和成形性,并且保持较高的熔体纯净

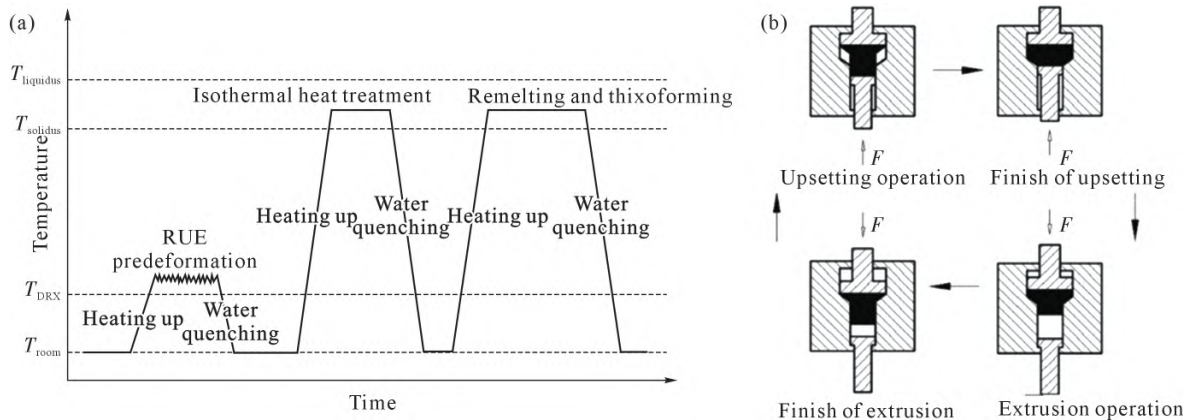


图5 应变诱导制备半固态浆料:(a) 基于 RUE 的 SIMA 工艺曲线;(b) RUE 工艺示意图^[56]

Fig.5 Strain-induced preparation of semi-solid slurries: (a) SIMA process diagram based on RUE; (b) schematic diagram of the RUE process^[56]

度,能够实现大批量生产,适应性较广。

2.6 自孕育法

自孕育法是控制凝固过程中的热力学条件和动态结晶行为,促进熔体在凝固初期大量形核的制浆方法。该方法主要包括3个阶段(图6)^[59]:①将合金熔体温度调整至所需范围内;②将自孕育剂加入到合金熔体中,然后快速搅拌;③将混合后的合金熔体倒入流体导向器中。为避免对浆料造成污染,自孕育剂一般是与熔体成分相同的金属颗粒或块体。在整个过程中,浇注温度、自孕育剂的大小和数量以及流体导向器的参数均会影响浆料质量^[60-61]。该方法的优点是不需要复杂的设备,可实现连续铸造,对合金无污染、生产效率高、成本低,可适用的合金范围广。

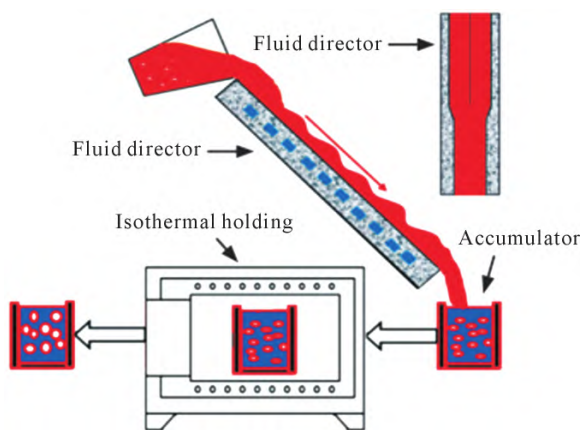


图6 自孕育法工艺示意图^[59]

Fig.6 Schematic diagram of the self-inoculation process^[59]

除上述方法外,制备镁合金半固态浆料的方法还包括连续流变转换工艺^[62]、快速浆料成形工艺^[63]、直接部分重熔^[64]、锥形桶流变成形工艺^[65]等,均可获得具有优异微观结构的半固态浆料。事实上,上述制备技术虽然部分已在工业上进行应用,但大部分还处在试验阶段。对于单螺杆和双螺杆机械搅拌的方式,在镁合金半固态成形上实现了应用,但依旧存

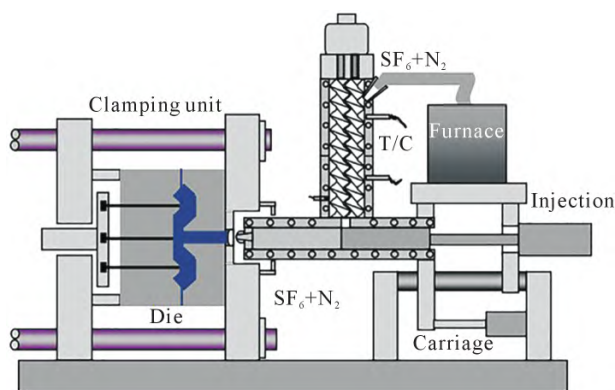
在设备复杂、清理困难等问题,并且螺杆材料寿命等因素也限制了其广泛应用。目前,气体诱导半固态工艺和自孕育法由于设备和工艺简单、成本相对较低,在未来大规模制备镁合金浆料方面具有良好的应用前景。综上所述,从工业化应用的角度来看,成本、效率、浆料质量和工艺稳定性是人们关注的重点,未来还需要持续解决存在的问题,进一步提高设备和工艺的可靠性。

3 半固态注射成形工艺

半固态成形工艺是由 Fleming 等^[66]在 1970 年提出,涉及到在固相线和液相线温度之间进行金属加工,可分为触变途径和流变途径。在流变路线中,金属液在凝固过程中直接制浆,随后进行成形。触变路线则是将固态或半固态胚料二次加热至两相区间,获得具有触变特性的浆料,随后施加一定压力成形。半固态注射成形工艺结合了塑料注射成形与半固态铸造工艺的特点,将半固态浆料的制备和成形连续完成,为半固态铸造技术实现大规模工业应用提供了新思路^[67-68]。

3.1 半固态流变注射成形

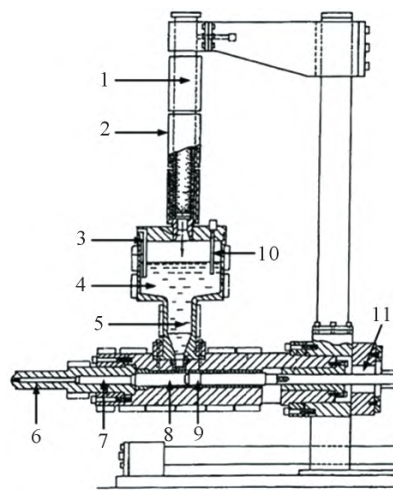
流变注射成形首次由 Wang 等^[67]提出,液态金属在重力作用下从熔化炉中进入搅拌筒体,通过螺杆搅拌剪切并冷却至半固态,达到一定量的半固态金属液后由注射装置注射成形,整个过程在保护气氛下进行。Peng 等^[69]开发了 100 t 卧式流变注射成形机,进行了相关的镁合金流变注射实验,发现注射后的零件气孔率远低于传统压铸件。Fan 等^[45,70]参考高分子材料注塑成形的丰富经验,结合传统的高压压铸,实现 AZ91D 镁合金零件的半固态注射成形,开发了一种新的双螺杆流变注射成形装备,如图 7 所示。成形过程由中央控制单元对温度和注射速度进行智能控制,同时引入保护气体,防止镁合金氧

图 7 双螺杆流变成形机示意图^[70]Fig.7 Schematic diagram of the twin-screw rheoform machine^[70]

化。通过该双螺杆流变成形机对 Mg-30%Zn(质量分数)合金进行实验后发现,该工艺能够得到均匀分布在共晶基体中的单一尺寸固体颗粒^[71]。

Yang 等^[72]基于双螺杆流变成形机,研究了不同搅拌速度下合金熔体的非枝晶结构变化,发现随着搅拌速率增加,初生 α -Mg 相颗粒增加并变得更细小和球化。Qi 等^[73-74]开发出了一种基于低过热浇注技术的流变注射成形工艺,取代了螺旋剪切和电磁搅拌等传统制浆方法,不仅可保护设备免受磨损,还可避免浆料污染,流变注射装置如图 8 所示。此外,还研究了浇注温度、缸体温度、注射速度等工艺参数对于 AZ91D 零件组织和性能的影响规律,获得了流变注射成形 AZ91D 的工艺参数区间。

流变注射成形使用的原材料可以是锭状、棒状或回炉料等,其以液态金属直接作为供料,节省了材料的预处理时间和成本,可制备低孔隙率、高致密度零件。目前,相较于触变注射,流变注射工艺具备更加简单、能耗低等经济优势,在尽可能降低生产成本的经济压力下,流变注射也受到更多关注。但是,镁合金浆料的制备设备和工艺稳定性、效率和成本等问题依然还未能有效解决,限制了其应用。



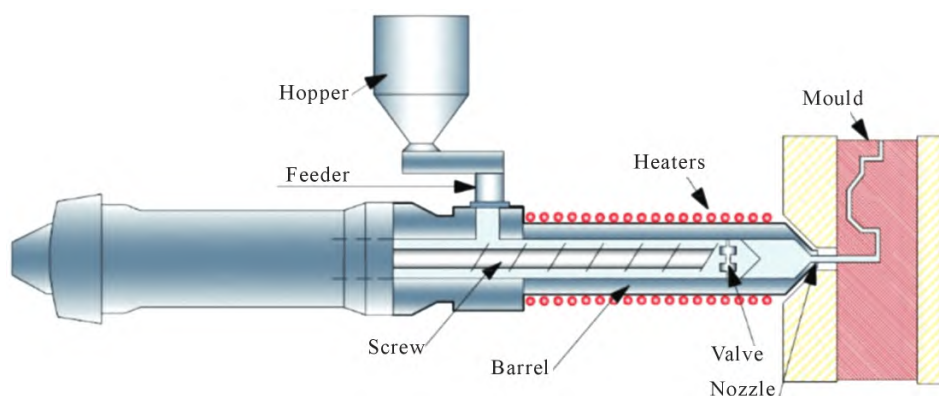
1-melting barrel; 2-heating zone; 3-inert gas injection pipe; 4-storage tank; 5-temperature control barrel; 6-nozzle; 7-runner; 8-material measuring chamber; 9-punch press; 10-liquid level detector; 11-injection system

图 8 流变注射装置示意图^[73]Fig.8 Schematic diagram of the rheo-injection device^[73]

3.2 半固态触变注射成形

20 世纪 80 年代美国 DOW 化学公司首次提出触变注射成形技术,该技术生产过程则类似于塑料注塑成形,后续由 Thixomat 公司在 1992 年将其商业化应用^[75],其注射机工作原理如图 9 所示^[68]。该机器主要由给料器、注射系统、套筒、螺杆、加热器、喷嘴等组成。该机器通过加热剪切镁合金粒料,获得固相率在 60% 以上的半固态浆料,同时可通过温控系统精确控制套筒内温度。1996 年,索尼公司将触变注射成形技术应用于手机和数码相机的外壳生产。该技术逐渐被应用于“3C”电子、航空航天、家用电器和汽车等领域,最为典型的是在手机、数码相机部件、电脑外壳等产品上的应用^[76]。

加拿大的 HUSKY 和日本制钢所(JSW)在 2003 年开发出了第二代触变注射成形机,可生产 AZ91D、AM60、AM50 和 AZ61 等镁合金零部件。崔晓鹏等^[77]

图 9 触变注射成形机示意图^[68]Fig.9 Schematic diagram of the thixomolding machine^[68]

和张友法^[78]研究了注射成形参数对 AZ91D 镁合金组织及性能的影响,并且探究了相应的热处理工艺,重点研究了其中固液相的形貌和分布情况,建立了相关的演变模型。在众多工艺参数中,料筒温度是最为重要的影响因素。半固态浆料的固相含量、成形件的气孔率、组织和性能均受到料筒温度的影响^[79]。Ozaki 等^[80]研究了半固态浆料温度和注射速度对产品表面密度的影响,发现提高浆料温度和注射速度均会降低产品的表观密度。2010 年,Patel 等^[81-82]对触变注射制备的 AZ91D 和 AM60B 的组织与拉伸性能进行了相关研究,评估了微观结构与断裂机制等方面的关系。张涛等^[12]则聚焦于工艺过程中的注射速度控制方式,成功实现了半固态注射成形制备手机壳,并开发了 UN250-MG 镁合金注射成形设备。随后,伊之密在 2015 年成功研制了新一代的半固态镁合金注射成形机,技术指标达到国际领先水平。2016 年,Hashimoto 等^[83]发现,通过向 AZ91D 中添加碳纳米颗粒,能够有效提高材料在触变注射过程中的流动性,并且材料的机械性能也能得到提高。2017 年,Makoto 等^[84]利用触变注射成形机制备了 C/AZ91D 镁基复合材料,C 有效改善了复合组织、细化晶粒并减少了内部缺陷,其拉伸强度和伸长率都得到了提高,疲劳强度也有明显提升。张婷^[85]和 Chen 等^[86]基于触变注射技术开发了石墨烯纳米片增强镁基复合材料,对其微观结构演变、界面作用进行了重点探究,发现触变注射成形能促进石墨烯纳米片的分散,实现其与基体的强界面结合,为开发新型复合材料提供了思路。2015 年,伊之密公司成功交付了镁合金半固态触变注射机,实现自行车前叉、汽车座椅头枕支架、汽车 GPS 外壳等多款镁合金产品的

量产,如图 10 所示^[87]。

触变注射成形技术能够在较低的成形温度下制备镁合金零件,拥有低气孔率、高尺寸精度、良好重复性等优势。然而,所使用的原材料为粒料或细块料,需要预加工,原材料成本高,并且高温下螺杆等关键零件的磨损严重,使用寿命短。

流变注射和触变注射作为半固态注射两种不同路线,制备 AZ91D 零件时的机械性能如表 1 所示^[73,79]。流变注射相较于触变注射工艺更加简单,半固态浆料制备工艺可选性更多,固相率等参数更易控制,但是受限于浆料的保存输送,未能实现大规模工业化应用。触变注射工艺更加复杂,但将半固态浆料的制备、保存和输送实现一体化,制备的零件性能更加突出,工业化应用十分成熟。然而,原材料预加工、螺杆使用寿命等因素提高了其成本和能耗,未来还需进一步改善优化。

4 总结与展望

随着轻量化需求的不断提高,镁合金半固态加工技术有着广泛的应用前景。在半固态成形过程中,获得高质量的半固态浆料是关键,虽然对于枝晶破碎和球形颗粒形成机制并未达成共识,但现有理论为半固态浆料的制备提供了有效指导。针对镁合金半固态浆料已开发出了众多制备工艺,但受限于设备和成本等因素,绝大多数工艺未能实现工业化应用。镁合金触变注射成形技术因其生产效率高、产品质量好和成本优势明显等原因,已实现商业化应用。研究发现,成形过程中料筒温度和螺杆转速是关键工艺参数。相较于触变注射,其他镁合金半固态加工技术还需攻克低成本浆料制备、浆料转移过程的半

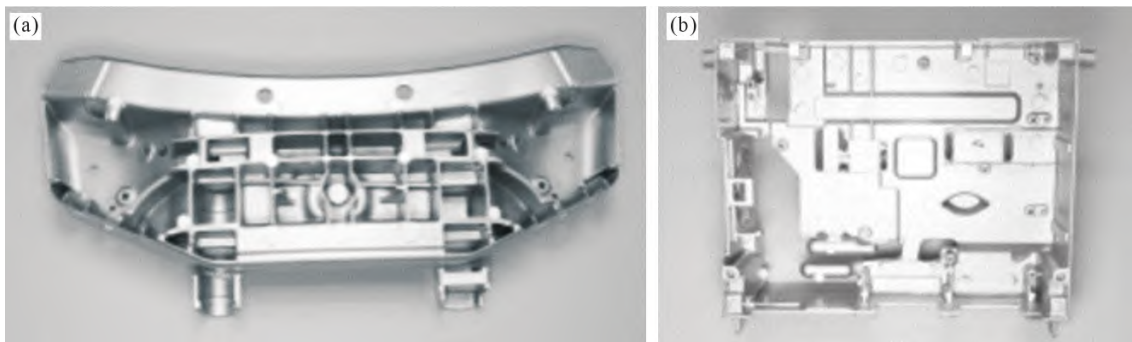


图 10 触变注射镁合金产品:(a) 汽车座椅头枕支架;(b) 汽车 GPS 外壳^[87]

Fig.10 Magnesium alloy products obtained by thixomolding technology: (a) automobile seat headrest bracket; (b) automobile GPS housing^[87]

表 1 AZ91D 流变与触变注射零件机械性能
Tab.1 Mechanical properties of AZ91D rheo-injection and thixomolding parts

Alloy	Preparation process	Yield strength /MPa	Ultimate yield strength/MPa	Elongation/%	Vickers Hardness(HV)	Ref.
AZ91D	Rheo-injection	169	270	7.1	102	[73]
	Thixomolding	180	292	5.7	74	[79]

固态形貌控制等技术难点。

未来需针对非树枝结构的形成机制进行更深入的实验研究,开发稳定、高效和低成本的浆料制备工艺。同时,需进一步开发出新型的镁合金半固态成形工艺,制备获得兼具复杂形状与优异性能的镁合金构件。

参考文献:

- [1] 李青壮,张汉铮,王烁,王鹏,冯梦楠. 镁合金增材制造技术研究进展[J]. 材料工程, 2023, 51(11): 34-51.
LI Q Z, ZHANG H Z, WANG S, WANG P, FENG M N. Research progress in additive manufacturing technology of magnesium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(11): 34-51.
- [2] 唐伟能,莫宁,侯娟. 增材制造镁合金技术现状与研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(2): 205-225.
TANG W N, MO N, HOU J. Research progress of additively manufactured magnesium alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(2): 205-225.
- [3] 王煜烨,周海涛,李逸,孙鑫,杨力祥,王世伟,肖旅. 强度-塑性协同的变形镁合金及其微观结构调控研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(3): 683-702.
WANG Y Y, ZHOU H T, LI Y, SUN X, YANG L X, WANG S W, XIAO L. Research progress on wrought magnesium alloys with strength-ductility synergy and their microstructural control[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(3): 683-702.
- [4] 黄居峰,宋光铃. 镁合金腐蚀测试与分析研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(3): 519-528.
HUANG J F, SONG G L. Research progress on corrosion testing and analysis of Mg-alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(3): 519-528.
- [5] 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.
PAN F S, JIANG B. Development and application of plastic processing technologies of magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1362-1379.
- [6] 杨媛,李加强,宋宏宝,刘鹏成. 镁合金的应用及其成形技术研究现状[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 24-27.
YANG Y, LI J Q, SONG H B, LIU P C. Research situation on application of magnesium alloys and its forming technology[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(8): 24-27.
- [7] BALASUNDARAM A, GOKHALE A M. Quantitative characterization of spatial arrangement of shrinkage and gas (air) pores in cast magnesium alloys[J]. Materials Characterization, 2001, 46(5): 419-426.
- [8] 陈力禾,刘正,林立,梁立超. 镁——汽车工业通向新世纪的轻量化之路[J]. 铸造, 2004, 53(1): 5-11.
CHEN L H, LIU Z, LIN L, LIANG L C. Magnesium—the road to weight lightening for automobile industry in new century [J]. Foundry, 2004, 53(1): 5-11.
- [9] 陈国香,梅楹,闫洪,徐晨. 高固相率半固态镁合金触变成形数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(6): 433-435.
CHEN G X, MEI Y, YAN H, XU C. Numerical simulation of thixoforming for high solid fraction semi-solid magnesium alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2004, 27(6): 433-435.
- [10] 潘帅,李强,于宝义,郑黎. 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.
PAN S, LI Q, YU B Y, ZHENG L. Research progress of Mg alloy semisolid forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(7): 2379-2385.
- [11] 肖冠菲,姜巨福,王迎,刘英泽. 高熔点合金半固态加工技术研究进展[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 62-68.
XIAO G F, JIANG J F, WANG Y, LIU Y Z. Research progress of semi-solid processing technology of high-melting alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2): 62-68.
- [12] 张涛,刘勇兵,隋铁军,李斌礼,沈锋利,崔晓鹏. 镁合金半固态注射成形试验及注射速度控制方法 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(8): 722-724.
ZHANG T, LIU Y B, SUI T J, LI B L, SHEN F L, CUI X P. Semi-solid injecting forming magnesium alloy and its injecting velocity control[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(8): 722-724.
- [13] 谢水生. 金属半固态加工技术的发展及应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(S1): 20-28.
XIE S S. Development and application of semi-solid metal processing technology[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007 (S1): 20-28.
- [14] GUO H M. Rheo-diecasting process for semi-solid aluminum alloys[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2007, 22: 590-595.
- [15] 洪慎章. 镁合金注射成形新技术[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32(1): 5-6, 15.
HONG S Z. New technique of the magnesium alloy injection molding[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004, 32(1): 5-6, 15.
- [16] 胡红军,杨明波,彭东,王春欢. 镁合金触变注射成形技术综述 [J]. 铸造, 2006, 55(8): 763-766.
HU H K, YANG M B, PENG D, WANG C H. Summary of magnesium alloy thixo-molding technology[J]. Foundry, 2006, 55(8): 763-766.
- [17] 周祥基. 镁合金铸造技术的发展[J]. 铸造技术, 2013, 34(11): 1535-1537.
ZHOU X J. Development of foundry technology of magnesium alloy[J]. Foundry Technology, 2013, 34(11): 1535-1537.
- [18] 迟秀梅,何凯,崔恩强,张娜,朱辉,王林. 镁合金壳体低(差)压铸造常见缺陷及防止措施[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(2): 156-158.
CHI X M, HE K, CUI E Q, ZHANG N, ZHU H, WANG L. Conventional defects and preventive measures for anti-gravity casting of magnesium alloy shell[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(2): 156-158.
- [19] JANUDOM S, WANNASIN J, BASEM J, WISUTMETHANG-OON S. Characterization of flow behavior of semi-solid slurries containing low solid fractions in high-pressure die casting[J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 6267-6275.
- [20] KIRKWOOD D H. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 173-189.

- [21] GARABEDIAN H, STRICKLAND-CONSTABLE R F. Collision breeding of crystal nuclei: Sodium chlorate. II[J]. Journal of Crystal Growth, 1972, 12(1): 53-56.
- [22] FAN Z. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 2002, 47(2): 49-85.
- [23] VOGEL A, DOHERTY R D, CANTOR B. Stir-cast microstructures and slow crack growth[M]//ARGENT B B. Solidification and Casting of Metals: Proceedings of an International Conference on Solidification. London: Metals Society, 1979: 518-525.
- [24] VOGEL A, CANTOR B. Stability of a spherical particle growing from a stirred melt[J]. Journal of Crystal Growth, 1977, 37(3): 309-316.
- [25] KATTAMIS T Z. Influence of coarsening on dendrite arm spacing of aluminum-copper alloys[J]. Transaction of the Metallurgical Society of AIME, 1967, 239: 1504-1511.
- [26] DOHERTY R D, LEE H I, FEEST E A. Microstructure of stir-cast metals[J]. Materials Science and Engineering, 1984, 65(1): 181-189.
- [27] 毛卫民. 半固态金属浆料先进制备技术的研究进展[J]. 铸造, 2012, 61(8): 839-855.
- MAO W M. Research progress of advanced preparation technology for semi-solid metal slurry[J]. Foundry, 2012, 61(8): 839-855.
- [28] DAS A, JI S, FAN Z. Morphological development of solidification structures under forced fluid flow: A Monte-Carlo simulation[J]. Acta Materialia, 2002, 50(18): 4571-4585.
- [29] JI S, FAN Z. Solidification behavior of Sn-15 wt.% Pb alloy under a high shear rate and high intensity of turbulence during semisolid processing[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33: 3511-3520.
- [30] WANG S, KANG J, ZHANG X, GUO Z. Dendrites fragmentation induced by oscillating cavitation bubbles in ultrasound field[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 26-32.
- [31] HELLAWEEL A, LIU S, LU S Z. Dendrite fragmentation and the effects of fluid flow in castings[J]. JOM, 1997, 49: 18-20.
- [32] RUVALCABA D, MATHIESEN R H, ESKIN D G, ARNBERG L, KATGERMAN L. In situ observations of dendritic fragmentation due to local solute-enrichment during directional solidification of an aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2007, 55(13): 4287-4292.
- [33] LI T, LIN X, HUANG W D. Morphological evolution during solidification under stirring[J]. Acta materialia, 2006, 54(18): 4815-4824.
- [34] CAMPBELL J. Effects of vibration during solidification[J]. International Metals Reviews, 1981, 26(1): 71-108.
- [35] PARADIES C J, SMITH R N, GLICHSMAN M E. The influence of convection during solidification on fragmentation of the mushy zone of a model alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28: 875-883.
- [36] WU S S, WU X P, XIAO Z H. A model of growth morphology for semi-solid metals[J]. Acta Materialia, 2004, 52(12): 3519-3524.
- [37] FAN Z, LIU G. Solidification behavior of AZ91D alloy under intensive forced convection in the RDC process[J]. Acta Materialia, 2005, 53(16): 4345-4357.
- [38] MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Evolution of particle morphology in semisolid processing[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36: 2205-2210.
- [39] 赵春芳, 马光全, 颜泽华, 胡茂良, 吉泽升. 浇注温度对近液相线挤压铸造 AZ91D 镁合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(1): 105-110.
- ZHAO C F, MA G Q, YAN Z H, HU M L, JI Z S. Effects of pouring temperature on microstructure and mechanical property of near-liquidus squeeze casting AZ91D alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(1): 105-110.
- [40] 王娜, 周志敏, 路贵民. 近液相线铸造过程中近球形 α 相的形成机理[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(2): 139-143.
- WANG N, ZHOU Z M, LU G M. Formation mechanism of sphere-like α phase in near-liquidus casting[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(2): 139-143.
- [41] 郭洪民, 杨湘杰. LSPSF 流变铸造工艺及其应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(S1): 355-359.
- GUO H M, YANG X J. Overview of LSPSF rheocasting process and its applications[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008 (S1): 355-359.
- [42] QI M F, KANG Y L, ZHOU B, ZHUO B, LIAO W N, ZHU G M, LI Y D, LI W R. A forced convection stirring process for Rheo-HPDC aluminum and magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 234: 353-367.
- [43] WANG W X, LIU J, LUO J Z, QIN S Y, WANG X H. Effect of compression deformation on the distortion energy and semi-solid microstructure of Mg-6Al-0.9Gd alloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 838: 012012.
- [44] ZHOU B, KANG Y L, QI M F, ZHANG H H, ZHU G M. Microstructure and property of rheo-diecasting magnesium-alloy with forced convection mixing process[J]. Solid State Phenomena, 2014, 217-218: 455-460.
- [45] BEHANMFARD S, TAHERZADEH MOUSAVIAN R, AZARI KHOSROSHAHI R, BRABAZON D. A comparison between hot-rolling process and twin-screw rheo-extrusion process for fabrication of aluminum matrix nanocomposite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 760: 152-157.
- [46] ZHEN Z, QIAN M, JI S, FAN Z. The effects of rheo-diecasting on the integrity and mechanical properties of Mg-6Al-1Zn[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(2): 207-211.
- [47] ZHOU B, QIU Z Y, CHEN K P, XUN C, WANG Z Y. Microstructure, properties, and numerical simulation of semi-solid aluminum alloy under planetary stirring process [J]. Materials, 2022, 15(9): 3009.
- [48] LYU S L, WU S S, LIN C, HU Z Q, AN P. Preparation and rheocasting of semisolid slurry of 5083 Al alloy with indirect ultrasonic vibration process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(29-30): 8635-8640.
- [49] JI H J, WANG Q, LI M Y, WANG C Q. Effects of ultrasonic irradiation and cooling rate on the solidification microstructure of Sn-3.0Ag-0.5Cu alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 13-20.
- [50] RAO Y S, YAN H, WAN J. Rheological model of semisolid Mg/Si/AM60 composites prepared by ultrasonic vibration treatment[J]. Rare Metals, 2022, 41(8): 2783-2788.
- [51] ZHANG L, YAN H, XU L X. Rheological research of semi-solid

- AlSi7Mg slurry by high-energy ultrasound and cerium addition[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30: 8589-8597.
- [52] WANNASIN J, JANUDOM S, RATTANOCHAIKUL T, CANYOOK R, BURAPA R, CHUCHEEP T, THANABUMRUNKUL S. Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(S3): s1010-s1015.
- [53] ZHANG Y, WU G H, LIU W C, ZHANG L, PANG S, DING W J. Microstructure and mechanical properties of rheo-squeeze casting AZ91-Ca magnesium alloy prepared by gas bubbling process[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 1-8.
- [54] JIN C K. Microstructure of semi-solid billets produced by electromagnetic stirring and behavior of primary particles during the indirect forming process[J]. *Metals*, 2018, 8(4): 271.
- [55] WANG C L, WU G H, SUN M, ZHANG L, LIU W C, DING W J. 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: 116545.
- [56] XU Y, JIA J B, CHEN C, LIU W C, LUO S Y, YANG Y, HU L X. 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: 4317-4328.
- [57] 吴纪红. 应变诱发熔化激活法工艺参数对 AZ91D 镁合金半固态组织的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- WU J H. Effects of the strain-induced melt activation process (SIMA) parameters on microstructures of semisolid AZ91D magnesium alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [58] 李元东, 郝远, 闫峰云, 方铭. AZ91D 镁合金在半固态等温热处理中的组织演变[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(4): 571-575.
- LI Y D, HE Y, YAN F Y, FANG M. Structural evolution of AZ91D magnesium alloy during semi-solid isothermal heat treatment[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(4): 571-575.
- [59] LI M, LI Y D, HUANG X F, CAO C, MA Y. Solidification behavior and rheo-diecasting microstructure of A356 aluminum alloy prepared by self-inoculation method[J]. *China Foundry*, 2017, 14: 1-9.
- [60] XING B, LI Y D, MA Y, HAO Y. Effects of novel self-inoculation method on microstructure of AM60 alloy[J]. *China Foundry*, 2011, 8(1): 121-126.
- [61] XING B, LI Y D, MA Y, CHEN T J, HAO Y. Evolution of rheocast microstructure of AZ31 alloy in semisolid state[J]. *China Foundry*, 2013, 10(4): 221-226.
- [62] LI Z, HU X G, QU W Y, ZHOU Y, GUO G, LU H X, M X X, MO-HAGHEGHIAN I, WHITING M J, ZHU Q. Slurry preparation for semi-solid metal direct writing by a novel approach of mixed powder remelting[J]. *Powder Technology*, 2023, 426: 118673.
- [63] YANG X J, YU A S, ZHENG B, GUO H M. Microstructure evolution of a semisolid magnesium alloy slurry obtained via an internal rapid cooling stirring process (IRCSP)[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020, 51: 2895-2904.
- [64] WANG K, LIU C M, ZOU M H, HAN Z T. Microstructure evolution of components of ZAlSi8Cu3Fe alloy in processing of thixo-diecasting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(1): 109-115.
- [65] YANG L Q, KANG Y L, ZHANG F, XU J. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecasting AZ91D Mg alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(S3): s862-s867.
- [66] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1991, 22: 269-293.
- [67] WANG K K, WANG N, WANG S P, PENG H. Method and apparatus for injection molding of semi-solid metals: EP0765198B1[P]. 1997-02-04.
- [68] BUSK R S. Method for making thixotropic materials: U.S., 4694882[P]. 1987-09-22.
- [69] PENG H S. Development of rheomolding of magnesium parts[A]. *The 6th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*[C]. Turin: Polytechnic University of Turin, 2000: 313-317.
- [70] JI S, FAN Z, LIU G, FANG X, SONG S. Twin-screw rheomoulding of AZ91D Mg-alloys[A]. *Proceedings of the 7th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*[C]. Tsukuba: University of Tsukuba, 2002: 25-27.
- [71] JI S, FAN Z, BEVIS M J. Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, 299(1-2): 210-217.
- [72] YANG L Q, KANG Y L, ZHANG F, DING R H, LI J. Rheo-diecasting of AZ91D magnesium alloy by taper barrel rheomoulding process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(6): 966-972.
- [73] QI M F, KANG Y L, YAN Y, ZHU G M, LIAO W N. Comparison of microstructure and mechanical properties of AZ91D alloy formed by rheomolding and high-pressure die casting[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24: 3826-3834.
- [74] QI M F, KANG Y L, ZHOU B, ZHANG H H, ZHU G M. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties of rheomolded AZ91D magnesium alloy[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69: 673-682.
- [75] 吉泽升, 吕新宇, 王国军, 郑小平, 路维. 镁合金半固态成形技术的研究进展[J]. *金属热处理*, 2003, 28(5): 8-11.
- JI Z S, LYU X Y, WANG G J, ZHENG X P, LU W. Research progress of semi-solid forming magnesium alloys[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28(5): 8-11.
- [76] 崔晓鹏, 修长军, 王金山, 王顺忠, 刘喜明. 镁合金半固态触变注射成形技术[J]. *汽车工艺与材料*, 2003(1): 33-35.
- CUI X P, XIU C J, WANG J S, WANG S Z, LIU X M. Semisolid thixomolding technology of Mg-alloy[J]. *Automobile Technology & Material*, 2003(1): 33-35.
- [77] 崔晓鹏, 刘海峰, 刘勇兵. 镁合金半固态触变注射成形过程中固相形成机制[J]. *铸造*, 2007, 56(11): 1147-1150.
- CUI X P, LIU H F, LIU Y B. Formation mechanism of solid phase in the thixomolding process of magnesium alloy[J]. *Foundry*, 2007, 56(11): 1147-1150.
- [78] 张友法. 触变注射成形镁合金组织和性能研究及成形模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2008.

- ZHANG Y F. Research on the microstructure and properties and processing simulation for thixomolded magnesium alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [79] 梁伟. AZ91D 镁合金半固态组织及其触变注射成型工艺参数的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- LIANG W. Research on semi-solid microstructure and processing parameters of thixomolding injection AZ91D magnesium alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [80] OZAKI K, TSUJI K, FUKUTA T, NOMOTO T, TAKEYA K, HAYAKAWA T. Influence of slurry temperature and gate velocity on injection molding of magnesium alloys[J]. Solid State Phenomena, 2006, 116-117: 468-471.
- [81] PATEL H A, CHEN D L, Bhole S D, SADAYAPPAN K. Microstructure and tensile properties of thixomolded magnesium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 496(1-2): 140-148.
- [82] PATEL H A, CHEN D L, Bhole S D, SADAYAPPAN K. Low cycle fatigue behavior of a semi-solid processed AM60B magnesium alloy[J]. Materials & Design, 2013, 49: 456-464.
- [83] HASHIMOTO Y, HINO M, MITOOKA Y, MURAKAMI K, KANADANI T. Effects of fixing carbon nanoparticle to AZ91D magnesium alloy chip surface on thixomold forming[J]. Materials Transactions, 2016, 57(2): 183-187.
- [84] HINO M, HASHIMOTO Y, MURAKAMI K, MITOOKA Y, KANADANI T. Influence of carbon addition on mechanical properties of thixomolded magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 2016, 879: 756-761.
- [85] 张婷. 石墨烯纳米片增强 AZ91D 镁基复合材料的制备及组织性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- ZHANG T. Preparation, microstructures and properties of AZ91D magnesium matrix composites with graphene nanoplates [D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [86] CHEN L W, ZHAO Y H, LI M X, LI L M, HOU L F, HOU H. Reinforced AZ91D magnesium alloy with thixomolding process facilitated dispersion of graphene nanoplatelets and enhanced interfacial interactions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 804: 140793.
- [87] 伊之密 UN650MGII 半固态镁合金注射成型机通过验收[J]. 模具制造, 2020, 20(8): 11-12.
- YIZUMI UN650MGII semi-solid magnesium alloy injection molding machine passed acceptance [J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20(8): 11-12.