

铝合金高固相流变压铸成形技术研究进展

卢宏兴 胡小刚 朱 强
(南方科技大学机械与能源工程系)

摘 要 高固相流变压铸成形是一种新兴的铝合金成形技术,具有生产效率高、产品致密度高、综合制造成本低等特点,在过去十年内快速发展,在汽车、工程机械、通讯设备等领域获得应用。总结了该技术在浆料制备、材料、模拟仿真、缺陷控制等方面的研究进展以及产业应用情况,并对未来发展进行讨论。

关键词 流变压铸;高固相分数;铝合金

中图分类号 TG146.21; TG249.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.004 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Research Progress in High-solid Fraction Rheo-diecasting Technology of Aluminum Alloys

Lu Hongxing, Hu Xiaogang, Zhu Qiang

(Department of Mechanical and Energy Engineering, Southern University of Science and Technology)

Abstract: High-solid fraction rheo-diecasting is a new kind of aluminum alloy forming technology with high production efficiency, high product density and low comprehensive manufacturing cost, which has been developed rapidly in the past decades and applied in automobile, engineering machinery, communication equipment and other fields. The research progress of the technology in slurry preparation, materials, simulation and defect control as well as industrial application were summarized, and the future development was also prospected.

Key Words: Rheo-diecasting, High-solid Fraction, Aluminum Alloys

流变压铸成形技术自 20 世纪 70 年代起源于美国麻省理工学院^[1],经过近 50 年的发展,逐步形成了较完整的技术链条,并在汽车、工程机械、通讯设备、光伏等多个领域实现了工业化应用^[2-4]。在流变压铸成形中,金属或合金熔体被直接制备为半固态浆料,转移到压铸机压射室中,在压射杆推动下流动充填模具型腔,并在压力作用下凝固成形。与触变压铸成形相比,流变压铸成形具有工艺流程短、成本低等特点;与常规压铸成形相比,流变压铸成形具有铸件致密度高、模具使用寿命长等优势。根据半固态浆料固相分数的不同,流变压铸成形可以分为两类:低固相流变压铸成形(浆料固相分数低于 40%),主要被用于提高压铸件的品质,代表性产品有 5G 通讯基站壳体、电源转换器壳体、光伏逆变器壳体等;高固相流变压铸成形(浆料固相分数高于 40%),主要被用于制造高品质铸件,其产品致密度和性能对标锻造产品,代表性产品有涡轮增压器叶轮、发动

机支架等。相比于低固相流变压铸成形,高固相流变压铸成形在铸件品质控制方面具有更大优势,近年来产业化进程不断加快,比亚迪、福田戴姆勒、通用等汽车制造商相继采用了高固相流变压铸成形铝合金零部件。为了满足更多应用场景的具体需求,高固相流变压铸成形技术还在不断发展。本研究总结了近年来该技术在浆料制备、材料、模拟仿真和缺陷控制等方面的研究进展以及产业应用情况,并对未来发展进行讨论。

1 浆料制备

已报道的流变制浆技术有 30 余种,但仅有少数可以用来制备高固相分数浆料,这些技术及其使用的铝合金材料见表 1。其中,旋转热焓平衡法(Swirled Enthalpy Equilibration Device, SEED)和新流变铸造法(New Rheocasting, NRC)得到产业化应用。

近年来,浆料制备技术的相关研究主要集中在解决

收稿日期:2023-03-06;修改稿收到日期:2023-03-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52250710160);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515012407);深圳市科技计划资助项目(KQTD20170328154431627)
第一作者简介:卢宏兴,男,1989 年出生,副研究员,广东深圳(518055),E-mail:luhx@sustech.edu.cn
通信作者:朱强,男,1960 年出生,教授,广东深圳(518055),E-mail:zhuq@sustech.edu.cn
引用格式:卢宏兴,胡小刚,朱强. 铝合金高固相流变压铸成形技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(6):741-746.
LU H X, HU X G, ZHU Q. Research progress in high-solid fraction rheo-diecasting technology of aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):741-746.

表 1 高固相分数流变制浆技术^[5-21]

Tab.1 Preparing technologies of high-solid fraction semi-solid slurry

制浆技术	使用的铝合金材料
旋转热焓平衡法	A356(固相分数为 30%~45%)、206、390、7075(固相分数为 42%~55%)
新流变铸造法	A356(固相分数为 41%~47%)
直接热控制法	A356(固相分数为 10%~60%)
双螺旋搅拌法	A357(固相分数为 25%~41%)
剪切低温浇注法	A356(固相分数为 41%)、2024(固相分数为 55%)、6082、7075
倒锥形通道浇注法	7075(固相分数为 40%)
蛇形通道法	A356(固相分数为 50%)
分流汇合浇道法	A356(固相分数为 26%~48%)
自孕育法	6061(固相分数为 40%)
热焓控制法	7075(固相分数为 40%~50%)

非亚共晶 Al-Si 系铝合金的浆料制备难题上。在浆料制备过程中,接近散热通道的熔体冷却较快,远离散热通道的熔体冷却较慢,因而浆料内部不可避免存在温度差异,也存在固相分数差异。图 1 为不同铝合金的固相分数随温度的变化曲线。可以看出,在 40%~50% 固相分数区间,7075 铝合金(非 Al-Si 系)的曲线斜率大于 A356 铝合金(Al-Si 系),即 7075 铝合金的固相含量对温度变化更敏感。因而,非亚共晶 Al-Si 系铝合金半固态浆料的制备对浆料温度场均匀性控制提出了更高的要求。

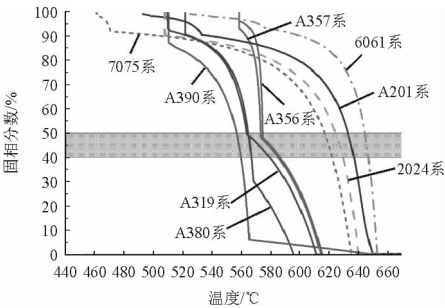


图 1 不同铝合金的固相分数随温度变化曲线
Fig.1 Variation curves of solid fraction of different Al alloys with temperature

为了改善浆料温度场均匀性,LUO M 等^[22-24]分析了工艺参数、材料热物性参数、热边界条件、系统几何参数对 SEED 法浆料温度场均匀性的影响,发现坩埚-空气界面传热系数、浆料直径是对浆料温度场均匀性影响最大的两个因素,并改进了 SEED 法制浆坩埚的设计,成功制备了 7108、6063、7050 等多种非 Al-Si 系铝合金的高固相浆料,见图 2。LI G 等^[21,25]发明了热焓控制法(Enthalpy Control Process,ECP),通过外加电磁场对浆料温度场进行了有效调控,并采用机器学习方法优化工艺,成功制备了固相分数均匀的 7075 铝合金高固相浆料。

近年来模拟仿真技术被应用于制浆技术的研究。

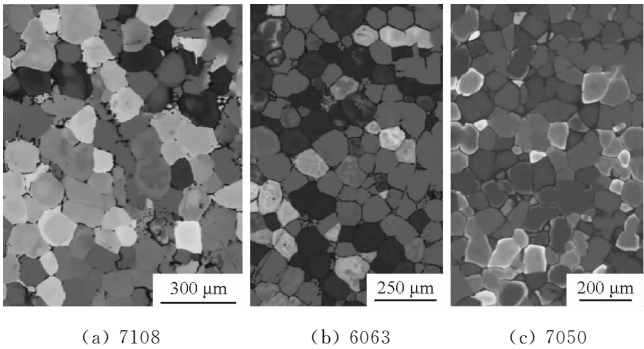


图 2 改进 SEED 法制备的 7108、6063 和 7050 铝合金高固相分数半固态浆料微观组织^[24]

LI G 等^[25]采用有限元方法模拟了浆料温度场在电磁场作用下的演变。QU W Y 等^[26-27]、屈文英^[28]采用相场法模拟了 SEED 法制浆过程中 α -Al 晶粒的长大和形貌演变,见图 3,并分析了温度场、流场和成分场对 α -Al 晶粒的长大和形貌演变的影响规律,为浆料制备技术优化提供了参考。

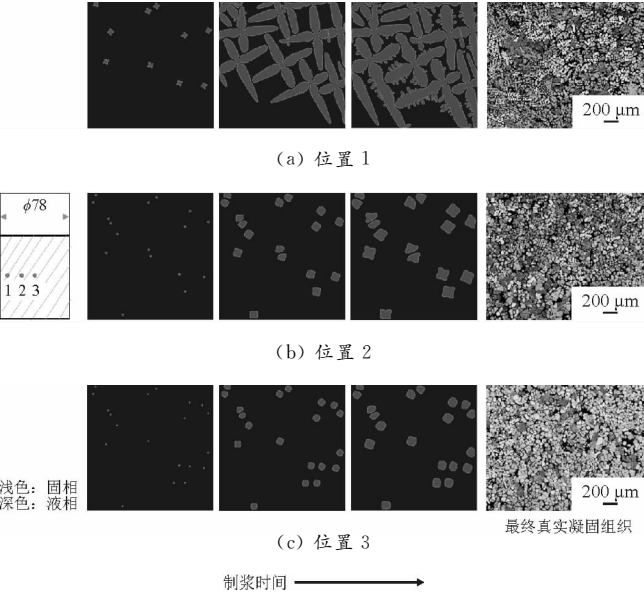


图 3 微观组织长大过程模拟仿真结果与真实凝固组织对照^[28]
Fig.3 Comparison between simulation results of microstructure growth process and actual solidification microstructures^[28]

2 高性能铝合金材料

目前,高固相流变压铸成形实现工业化应用的铝合金材料以亚共晶 Al-Si 系合金为主,常用材料包括 A356、A357、A319s 铝合金。部分高固相流变压铸成形铝合金的力学性能见表 2。可以看出,流变压铸成形铝合金的力学性能与锻造成形 7075 铝合金还有一定的差距。为了满足更多应用场景的具体应用需求,国内外开展了流变压铸成形用高性能铝合金材料的研发。

表 2 部分高固相流变压铸成形铝合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of aluminum alloy by high-solid fraction rheo-diecasting

合金	制造工艺	热处理状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	参考文献
A356	LSPSF-流变压铸	T6	330	240	13	[13]
A357	SEED-流变压铸	T6	354	313	10.5	[29]
A319s	SEED-流变压铸	T6	397	317	5.9	[29]
7075	ICSPC-流变压铸	铸态	293.1~299.5	-	1.65	[30]
7075	ICSPC-流变压铸	T6	461.6~489.5	-	1.2	[30]
7075	锻造	T6	572	503	11	ASM手册

研发工艺专用新材料首先要判断合金是否适用于流变压铸成形工艺。ATKINSON H V^[31]提出流变成形合金适用的关键因素是合金的液相分数与温度曲线在指定液相分数下的斜率。但是,CURLE U等^[32-33]完成了高纯铝和共晶 Al-Si 合金的流变压铸成形,对该准则提出了挑战。随后,ZHANG D等^[34]提出新的判断方法,用合金的液相分数与制浆时间曲线作为判断依据,HU X G 等^[35]从合金凝固熔变的角度出发提出新的判断方法,用液相分数与熔变曲线作为判断依据,见图 4。这两种判断方法扩充了工艺使用材料的成分范围,为非亚共晶 Al-Si 系合金的设计提供了指引。

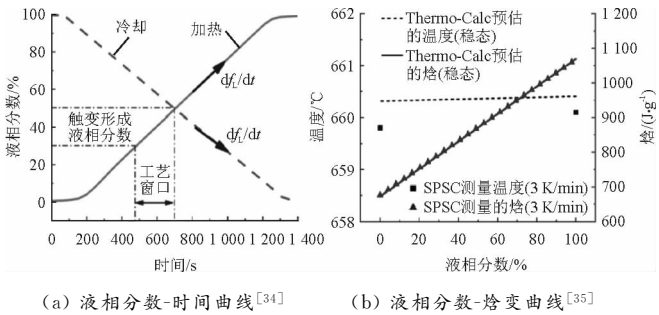


图 4 流变成形合金适用的判别方法

Fig.4 Discrimination methods suitable for rheo-diecasting alloys

基于上述两个准则,采用材料热力学计算方法分析了 Si、Cu、Mg、Zn、Fe 和 Mn 等元素含量对合金 SEED 流变压铸成形工艺窗口的影响,并针对不同应用场景的具体应用需求,设计了多款适用于高固相流变压铸成形的高性能铝合金,部分材料的性能见表 3。

表 3 部分 SEED 流变压铸成形用高性能铝合金的性能

Tab.3 Properties of high-performance aluminum alloys by SEED rheo-diecasting

合金	热处理状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	热导率/(W·m·K ⁻¹)
NK01	T5	210~240	16~170	4.0~8.0	182~186
NK02	T5	160~230	74~99	12.0~16.0	150~188
NK03	T6	414~424	343~358	4.3~8.4	-
NK04	F	277~293	197~218	4.8~5.8	-
NK05	F	296~303	234~242	0.3~0.9	-

注:T5、T6 为热处理态;F 为铸态

3 流体建模与模拟仿真

模流分析是辅助模具设计的重要手段,准确的流体模型是实现精准模流分析的基础。对半固态流体模型的研究是伴随着半固态技术诞生开始的,先后有近 20 种数学模型被用于描述半固态流体的流变特性^[36],这些模型可以被分为单相流模型和多相流模型。

单相流模型方面,幂律模型(Power-Law)和赫-巴模型(Herschel-Bulkley)因为形式简单、易于求解,已经被广泛应用到计算机模拟仿真中。近年来的相关研究集中在如何提高模型准确度的问题上。董恩洁^[37]研究了测试系统几何结构和 Taylor 涡对双筒流变仪测量精度的影响,并提出测量系统改进设计方案。陈娟^[38]研究了固相颗粒特征对半固态浆料流变特性的影响,并建立考虑固相颗粒特征的流体模型。QU W Y 等^[39]采用剪切速率扫描(SSR)、稳定剪切速率(SRS)、剪切应力扫描(SSS)3 种模式表征了半固态流体的流变特性,并分别拟合了幂律模型,通过对比模拟仿真结果与试验结果发现,剪切应力扫描数据拟合模型更接近试验结果,见图 5。虽然上述研究采用的同轴双筒剪切法只适用于低固相半固态浆料,但是在高固相流变压铸成形全过程中,熔体经历了从液态到低固相半固态、再到高固相半固态的演变,低固相条件下的半固态浆料流变特性也应该被全流程模拟仿真所考虑。在高固相浆料流变特

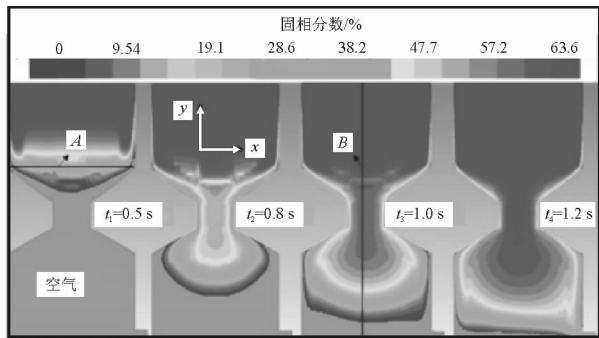


图 5 采用 SSR、SRS 和 SSS 测试拟合的幂律模型获得的模拟结果和试验结果^[39]

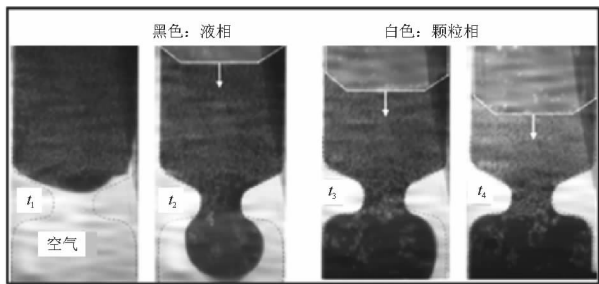
Fig.5 Experimental and simulation results obtained by adopting Power-Law models fitted from SSR, SRS and SSS tests^[39]

性表征方面, HU X G 等^[40] 设计了平板高速压缩测试系统, 用该测试系统测量数据拟合高固相分数 319s 铝合金的幂律模型, 该模型对浆料流动的模拟仿真结果与试验结果的特征相吻合, 证明了模型的准确性。

在多相流模型方面, QU W Y 等^[41] 建立了适用于半固态浆料充型过程的粘度 ($k-\epsilon$ realizable)-颗粒间作用 (Syamlal-O'brien)-液固间作用 (Gidaspow) 多相流模型, 并对固相分数为 50% 的 Sn-15Pb 合金和 A357 铝合金半固态浆料流动过程进行了模拟仿真。模拟结果显示, 固液两相分离情况与试验结果相吻合 (见图 6), 证明了模型的准确性。



(a) 模拟结果



(b) 试验结果

图 6 多相流模拟固相分布模拟与试验结果对比^[41]
Fig.6 Comparison between simulation and experimental results of solid distribution in multiphase flow^[41]

4 缺陷控制

MIDSON S P^[2] 基于 Campbell 的高品质铸件十准则, 提出适合半固态成形的高品质铸件十条准则。在此基础上, 卢宏兴^[42] 通过对铸造缺陷形成机理的系统性研究, 整理归纳出了半固态成形的 6 条缺陷控制方法, 即选择合适的合金、保证干净的熔体、制备合格的半固态金属、采用高模具温度以及设置充足的排气口, 避免出现困气、凝固过程避免出现热节。

热处理鼓泡是高固相流变压铸成形在生产实践过程的主要缺陷之一, 也是研究热点。MIDSON S P^[43]、HE Y F 等^[44-45]、LU H X 等^[46] 首先提出鼓泡缺陷的形成条件, 即亚表层气孔内气压超过基体材料强度, 并研究了压铸工艺、模具涂料等对鼓泡缺陷严重程度的影响规律。卢宏兴^[42] 研究了热处理过程中亚表层气孔的膨胀行为, 分析了气孔几何特征、深度、气压及基体材料强度对鼓泡缺陷形成临界温度的影响规律。HU X G 等^[47-48] 采用单相流和多相流模拟仿真手段研究了亚表层气孔的形成条件, 为消除亚表层气孔提供了指导。

5 产业化应用

自 2014 年建成国内第 1 条高固相流变压铸成形生产示范线, 高固相流变压铸成形的产业化应用进程不断加快。据不完全统计, 国内建有高固相流变压铸成形生产线的企业已有近 10 家。产品包括: 汽车涡轮增压器叶轮, 乘用车制动卡钳体、控制臂、发动机支架、气室支架, 商用车后处理器支架、蓄电池支架, 大巴车骨架接头, 特种车辆高压管道卡箍和滤波器腔体等^[3,49], 见图 7。

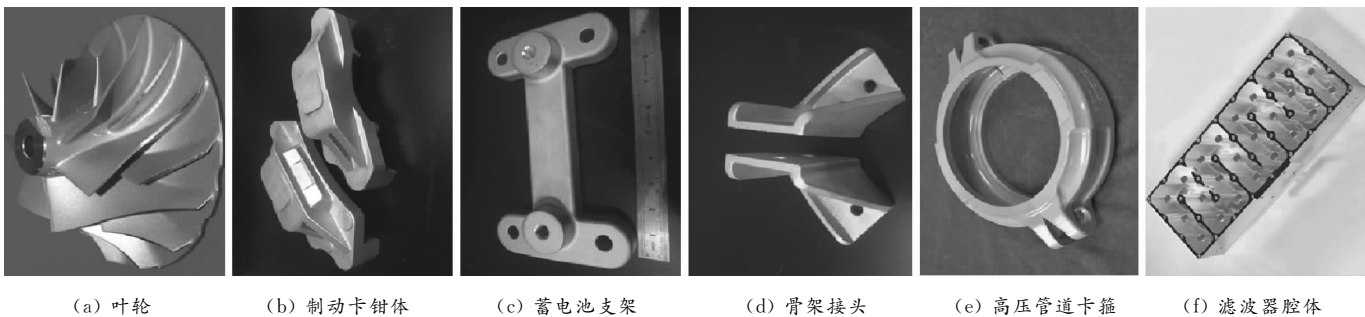


图 7 部分高固相流变压铸成形铝合金产品^[3,49]

Fig.7 Partial aluminum alloy products by high-solid fraction rheo-diecasting^[3,49]

6 结 语

高固相流变压铸成形技术不断发展和完善, 在浆料

制备、材料、模拟仿真、缺陷控制等方面都取得了进步, 并在汽车、工程机械、通讯等领域获得产业化应用。但是, 随着社会发展和科技进步, 铸件大型化的趋势已初

现端倪,大尺寸通讯设备壳体件、超大型车身结构件相继问世,已经对高固相流变压铸成形提出了新的挑战。高固相流变压铸成形技术参与到超大型铸件的制造中,有两条技术路径可以选择。一是突破一体化制造的几个关键问题:①高效率浆料制备技术(单个浆料质量 ≥ 40 kg);②兼具高流动性和优异综合性能的铝合金新材料;③大型铸件成形过程精确快速模拟仿真技术。二是攻关高固相流变压铸成形件的焊接技术,先通过高固相流变压铸成形制造高品质小尺寸铸件,然后采用焊接方式拼接小件制造超大件。其中第二条技术路径更容易在短期内实现,并且与超高真空一体化压铸技术相比,具有技术难度较低、设备投资小等优势,势必会在未来几年内掀起技术研发和应用浪潮,将高固相半固态流变压铸成形技术推向新的发展阶段。

参 考 文 献

- [1] FLEMINGS M, RIEK R, YOUNG K. Rheocasting[J]. Materials Science and Engineering, 1976, 25: 103-117.
- [2] MIDSON S P. Industrial applications for aluminum semi-solid castings[J]. Solid State Phenomena, 2015, 217: 487-495.
- [3] 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.
- [4] KAPRANOS P. Current state of semi-solid net-shape die casting [J]. Metals, 2019, 9(12): 1 301.
- [5] LANGLAIS J, LEMIEUX A, ANDRADE N, et al. Impact of semi-solid process parameters on the microstructure, morphology and mechanical properties of A356 alloy[A]. The 45th International Conference of Metallurgists[C]. Canada, Montréal (Québec), 2006.
- [6] LEMIEUX A, BOUCHARD D, LANGLAIS J, et al. Effect of Si, Cu and Fe on mechanical properties of cast semi-solid 206 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1 555-1 560.
- [7] TEBIB M, MORIN J B, AJERSCH F, et al. Semi-solid processing of hypereutectic A390 alloys using novel rheoforming process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1 743-1 748.
- [8] BOLOURI A, ZHAO Q, CÔTÉ P, et al. Microstructure and rheological properties of semi-solid 7075 slurries using SEED rheocasting process[J]. Solid State Phenomena, 2016, 256: 288-293.
- [9] EASTON M A, KAUFMANN H, FRAGNER W. The effect of chemical grain refinement and low superheat pouring on the structure of NRC castings of aluminium alloy Al-7Si-0.4Mg[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A420(1-2): 135-143.
- [10] KAUFMANN H, FRAGNER W, UGGOWITZER P. Influence of variations in alloy composition on castability and process stability. Part 2: Semi-solid casting processes[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2005, 18(5): 279-285.
- [11] AHMAD A H, NAHER S, BRABAZON D. The effect of direct thermal method, temperature and time on microstructure of a cast aluminum alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(2): 134-139.
- [12] FAN Z, FANG X, JI S. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast (RDC) aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A412(1-2): 298-306.
- [13] GUO H M, YANG X J, WANG J X. Pressurized solidification of semi-solid aluminum die casting alloy A356[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 485(1-2): 812-816.
- [14] GUO H M, YANG X J. Preparation of semi-solid slurry containing fine and globular particles for wrought aluminum alloy 2024[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(4): 799-804.
- [15] GUO H M, YANG X J. Efficient refinement of spherical grains by LSPSF rheocasting process[J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(1): 55-63.
- [16] GUO H M, YANG X J, WANG J X, et al. Effects of rheoforming on microstructures and mechanical properties of 7075 wrought aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 355-360.
- [17] YANG B, MAO W M, SONG X J. Microstructure evolution of semi-solid 7075 Al alloy slurry during temperature homogenization treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3 592-3 597.
- [18] CHEN Z Z, MAO W M, WU Z C. Influence of serpentine channel pouring process parameters on semi-solid A356 aluminum alloy slurry[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 985-990.
- [19] QI M F, KANG Y L, LI J Y, et al. Microstructures refinement and mechanical properties enhancement of aluminum and magnesium alloys by combining distributary-confluence channel process for semisolid slurry preparation with high pressure die-casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116 800.
- [20] LI M, LI Y D, ZHENG H Q, et al. Solidification behavior of 6061 wrought aluminum alloy during rheo-diecasting process with self-inoculation method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(5): 879-889.
- [21] LI G, PENG J K, DONG E J, et al. Characterizing the effect of processing parameters on temperature distribution of 7075 aluminum alloy slurry prepared by enthalpy control process[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 263-271.
- [22] LUO M, LI D, MIDSON S P, et al. Model for predicting radial temperature distribution of semi-solid slug produced by swirled enthalpy equilibration device (SEED) process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116 236.
- [23] LUO M, LI D, QU W, et al. Mold-slug interfacial heat transfer characteristics of different coating thicknesses: Effects on slug temperature and microstructure in swirled enthalpy equilibration device process[J]. Materials, 2019, 12(11): 1 836.
- [24] 罗敏. 旋转热平衡法制备半固态坯料的温度场及微观组织的控制及其机理研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2019.
- [25] LI G, LU H X, HU X G, et al. Numerical simulation of slurry making process of 7075 aluminum alloy under electromagnetic field

- in rheocasting process[J]. Solid State Phenomena, 2019, 285: 373-379.
- [26] QU W Y, LUO M, GUO Z P, et al. Effect of temperature gradient on the grain size homogeneity of SEED produced semi-solid slurries by phase-field simulation[J]. Materials, 2019, 12(20): 3 309.
- [27] QU W Y, LUO M, GUO Z P, et al. Microstructural evolution mechanism of semi-solid slurry: A study using Phase-Field-Lattice-Boltzmann scheme[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 280: 116 592.
- [28] 屈文英. 半固态浆料微观组织演变及多相流动机理数值模拟研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2019.
- [29] 杜康. 半固态铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理工艺及强化机理研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2017.
- [30] YANG B, MAO W M, SONG X J. Microstructure characteristics and mechanical properties of rheocasting 7075 aluminum alloy[J]. China Foundry, 2013, 10(5): 277-281.
- [31] ATKINSON H V. Alloys for semi-solid processing[J]. Solid State Phenomena, 2013, 192: 16-27.
- [32] CURLE U, MÖLLER H, WILKINS J. Shape rheocasting of high purity aluminium[J]. Scripta Materialia, 2011, 64(6): 479-482.
- [33] CURLE U, MÖLLER H, WILKINS J. Shape rheocasting of unmodified Al-Si binary eutectic[J]. Materials Letters, 2011, 65(10): 1 469-1 472.
- [34] ZHANG D, DONG H, ATKINSON H. What is the process window for semi-solid processing? [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2016, A47(1): 1-5.
- [35] 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.
- [36] ATKINSON H V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50(3): 341-412.
- [37] 董恩洁. 半固态熔体流变性测量数值分析及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [38] 陈娟. 基于固相颗粒特征的铝合金半固态浆料流变性能研究[D]. 广东深圳: 南方科技大学, 2022.
- [39] QU W Y, CHEN J, LI Z, et al. Rheological modeling and simulation of semi-solid slurry based on experimental study[J]. Scripta Materialia, 2022, 220: 114 932.
- [40] HU X G, ZHU Q, ATKINSON H V, et al. A time-dependent power law viscosity model and its application in modelling semi-solid die casting of 319s alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 410-420.
- [41] QU W Y, LI D Q, ZHANG F, et al. Multiphase modelling of the transient flow for Sn-15Pb and 357.0 alloys in semi-solid die casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116 534.
- [42] 卢宏兴. 铝硅合金半固态压铸成形产品缺陷的形成机理及控制研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2017.
- [43] MIDSON S P. Minimizing blistering during T6 heat treating of semi-solid castings[J]. Die Casting Engineer, 2011, 55(6): 40-43.
- [44] HE Y F, XU X J, ZHANG F, et al. Influence of Process Parameters on Blistering during T6 Heat Treatment of Semi-solid Castings [A]. Shape Casting: 5th International Symposium [C]. England: John Wiley & Sons, 2013.
- [45] HE Y F, MIDSON S P, ZHU Q. Impact of Die and Plunger Lubricants on Blistering during T6 Heat Treatment of Semi-Solid Castings [A]. 2013 NADCA Die Casting Congress [C]. USA: Louisville, 2013.
- [46] LU H X, HE Y F, MIDSON S P, et al. Controlling and minimizing blistering during T6 heat treating of semi-solid castings[J]. Solid State Phenomena, 2016, 256: 192-198.
- [47] HU X G, ZHU Q, MIDSON S P, et al. Blistering in semi-solid die casting of aluminium alloys and its avoidance[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 446-455.
- [48] HU X G, ZHU Q, ATKINSON H V, et al. Application of multiphase modelling in semi-solid die casting: Blister prediction[J]. Solid State Phenomena, 2016, 256: 139-145.
- [49] 任俊成, 陈颂, 李涛, 等. 半固态流变压铸铝合金主轴承盖[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(7): 917-920.

(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, SA、CA、MA、AJ、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学术期刊等。

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: 武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编: 430019

电话: 027-85358206, 85486024

传真: 027-85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

