

半固态流变成形数值模拟研究现状及展望

裴桓伟^{1,2} 张树国^{1,2,3} 刘旭波¹ 郭洪民³ 杨湘杰³

(1.南昌航空大学江西省金属材料微结构调控重点实验室; 2.南昌航空大学航空制造工程学院;
3.江西省高性能精确成形重点实验室)

摘 要 合金流变成形数值模拟可有效预测半固态成形中充型和凝固过程,对压力场、速度场、固相分布、充填速度、充填温度,以及成形过程的缺陷等进行分析,对工艺、设计相关的方案优化提供相关的决策帮助。综述了近年来半固态流变成形数值模拟技术的理论基础,以及国内外流变成形合金的研究进展和未来发展方向。

关键词 半固态;流变成形;数值模拟

中图分类号 TP311;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Prospect of Numerical Simulation of Rheological Forming

Pei Huanwei^{1,2}, Zhang Shuguo^{1,2,3}, Liu Xubo¹, Guo Hongmin³, Yang Xiangjie³

(1.Key Laboratory of Microstructure Control of Metal Materials of Jiangxi Province,
Nanchang Hangkong University; 2.School of Aeronautical Manufacturing Engineering,
Nanchang Hangkong University; 3.Key Laboratory of High Performance and Net Forming)

Abstract: The application of numerical simulation of rheological forming of alloy can effectively predict the filling and solidification process in semi-solid forming, analyze the pressure field, velocity field, solid phase distribution, filling speed, filling temperature and defects in forming process, and provide relevant decision help for the related schemes optimization of process and design. The theoretical basis of numerical simulation were reviewed of rheological forming in recent years as well as the research progress and future development direction of rheological forming alloys at home and abroad.

Key Words: Semi-solid, Rheological Forming, Numerical Simulation

半固态浆料能形成球晶,减少内部缺陷,提高合金的力学性能,并具有较低的成形温度,模具受到的热冲击也比较小,使模具的使用寿命得到延长。由于半固态流变成形具有能耗较少、成本较低、质量较优等特点,已逐渐成为半固态成形技术发展与技术推广的主要趋势^[1~4]。半固态流变成形过程是一个涉及到多种物理场变化的复杂过程,如温度场、应力场、流场、速度场等^[5,6]。由于半固态流变成形技术综合了传统铸造、锻造等加工方法的诸多特点,已成功应用到交通运输、航空航天等领域轻量化设计生产,具有较好的应用前景^[7]。

半固态流变成形过程具有温度较高,试验过程内部变化难以观测等问题,利用计算机模拟技术可实现对半固态成形的充型、凝固等过程的仿真。通过计算机模拟

仿真,能有效缩短试验周期,降低材料消耗和人力成本等。能够预测流变成形过程中半固态浆料各物理场量的变化规律和构件可能产生缺陷的位置与类型,对流变成形的最佳工艺参数设计和方案优化具有重要的指导意义^[8,9]。

1 流变成形数值模拟的数学模型建立

半固态金属的充型过程是不可压缩的非稳态流动过程,在充型过程中,固相率大于 40% 时,其流动一般为层流流动,在充填过程中流动控制方程采用能量守恒方程、动量方程、连续性方程、体积函数方程等^[10]。

2 流变成形数值模拟的研究现状

SEYBOLDT C 等^[11]利用 AlSi7Mg0.3、AlMgSi1

收稿日期:2021-03-09;修改稿收到日期:2021-04-10
基金项目:江西省重点研发计划一般资助项目(20192BBE50002);江西省金属材料微结构重点实验室开放基金资助项目(EJ201931)
第一作者简介:裴桓伟,男,1994 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1213225564@qq.com
通信作者:张树国,男,1970 年出生,高级工程师,南昌(330063),E-mail:422210701@qq.com
引用格式:裴桓伟,张树国,刘旭波,等. 半固态流变成形数值模拟研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10):1 264-1 268.
PEI H W, ZHANG S G, LIU X B, et al. Research status and prospect of numerical simulation of rheological forming[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 264-1 268.

两种合金的熔点差异,通过磁场加热使两种材料的温度差控制在 50 ℃,为进一步使目标构件成形至温度降低而不发生相变化的状态,将两种合金连接部分混合成均匀的半固态,采用试验与 ANSYS 数值模拟相结合,运用电磁感应加热制备浆料的方法,分析两种不同熔点的固相铝合金至半固态成形过程中的温度场变化规律。但由于该计算过程忽略了浆料、模具及环境的导热过程,其计算的加热时间和实际的加热时间存在比较明显的差异。

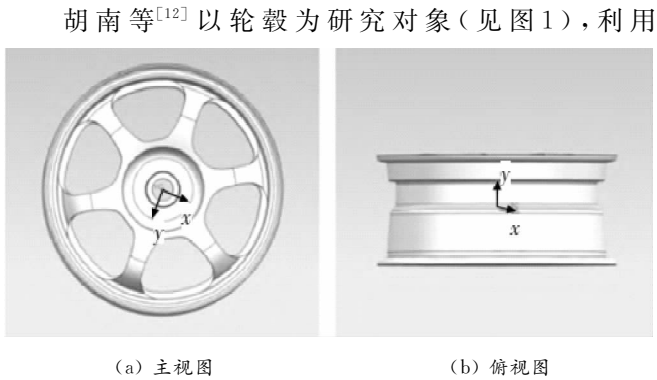


图1 铝合金汽车轮毂结构图^[12]

Fig.1 Structural diagram of aluminum alloy automobile hub^[12]

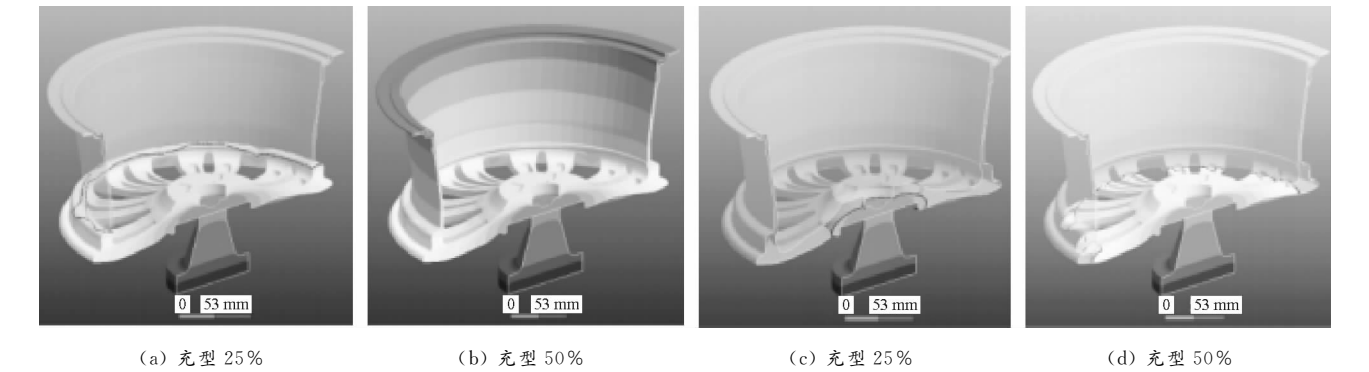


图2 半固态浆料的充型过程^[13]

Fig.2 Filling process of semi-solid slurry^[13]

力、压射速度对其充型及凝固过程的影响,并通过试验对其进行验证。结果发现随着压射压力和压射速度增大,半固态浆料的流变行为由层流状态向紊流状态转变;同时随着压射压力、压射速度增大,铸件产生气孔的几率也变大。岑尧等^[15]采用 ProCAST 软件对某四缸柴油机的曲轴进行模拟,采用正交试验分析了浇注温度、压射速度及模具预热温度对铸件力学性能和缺陷的影响,获得了最优的工艺参数:浇注温度为 625 ℃、压射速度为 3.5m/s、模具预热温度为 400 ℃。高倩等^[16]采用 ProCAST 对 7075 铝合金及 4.5TiB₂/7075 复合材料流变压铸轮毂的生产过程进行数值模拟,研究了模具温度、浇注温度对铸件孔隙率的影响。发现流变铸造充型过程相比液态铸造更为平稳。轮毂孔隙率随模具温度降低而增大,浇注温度降低,最大热裂指数减小而孔隙

ProCAST 模拟高固相率(大于 40%)下半固态浆料充型过程的流场、温度场变化,并用正交试验方法(各因素、水平的选取见表 1)得出较为理想的工艺参数。发现浆料充型过程中呈层流流动,没有卷气和涡流,同时铝合金轮毂的内部缺陷体积较小,X 射线探伤发现轮毂中的缺陷基本被消除。

表 1 正交试验表^[12]

Tab.1 Factors and levels of orthogonal tests ^[12]			
水平	浆料温度(A)/℃	模具预热温度(B)/℃	压射速度(C)/(m·s ⁻¹)
1	570	200	0.15
2	580	250	0.3
3	590	300	0.45

李道忠等^[13]以轮毂为研究对象,用半固态流变挤压铸造代替传统铸造生产轮毂(见图 2),探究了半固态浆料充型过程中的压射速度、浇注温度等工艺参数对凝固的影响。发现半固态浆料的浇注温度对铸件缺陷的影响最大,压射速度其次,模具预热温度最小;最佳工艺参数是压射速度为 0.07 m/s、浇注温度为 595 ℃、模具预热温度为 225 ℃。

郑鹏等^[14]采用 Flow-3D 软件对 A357 铝合金半固态流变压铸连杆件生产过程进行研究,分析了压射压

率变化较小。高倩等^[17]使用 ProCAST 软件对蛇形管制备 TiB₂/7075 半固态浆料过程进行了数值模拟,得出了适宜的蛇形管温度、浇注温度及蛇形管弯道数量,在蛇形管保温温度为 400 ℃,浇注温度为 670 ℃时能够获得半固态浆料。根据数值模拟得到的工艺参数,进行流变挤压铸造试验,能够获得良好的球状晶组织。管仁国等^[18]分别取辊-靴型腔内和模具型腔内合金为研究对象,建立三维模型,然后用 ANSYS 软件对 AZ31 镁合金连续流变挤压成形过程中的温度场和流场进行数值模拟。为了获得优良的半固态金属浆料,确定浇注温度为 710~770 ℃;AZ31 合金在辊-靴型腔内层流运动时,越靠近工作辊内表面,合金的运动速率越大;为了改善型腔内金属流动速度的不均匀性,扩展角以 45°为宜。RAGAB K A 等^[19]采用 ProCAST 软件进行 A357 铝合

金半固态成形技术研究,设计了 4 种不同结构的控制臂模型,使用 ProCAST 软件模拟可视化半固态金属浆料流动成形过程中流场的分布和凝固特点,预测产生湍流和凝固缺陷,提出了优化方案。周冰等^[20]利用自行研发的强制对流流变成形设备制备 7075 铝合金半固态浆料,观察半固态浆料在不同搅拌速率下的微观组织的状态,并对半固态料浆的制备过程进行数值模拟(见图 3),研究半固态浆料在装置内的流动特性以及搅拌速度对浆料温度场和固相率的影响。发现在半固态料浆的制作过程中,强制对流流变成形装置的内部存在较为复杂的对流状态,明显改变了浆料的温度场分布和固相率。研究发现,如果增加对流强度,会有利于减小其过冷度梯度,并改善初生晶粒的分布。

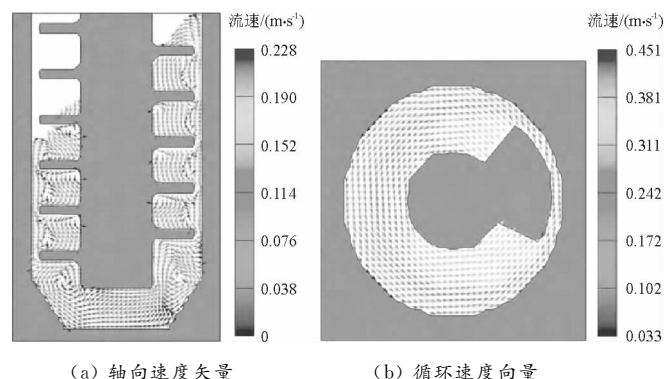


图 3 7075 铝合金熔体在 FCR 装置内的流速分布^[20]

Fig.3 Flow velocity field distribution of 7075 aluminum alloy melt in FCR device

DAS P 等^[21]建立了一个计算流体学(CFD)模型,以研究 A356 铝合金半固态浆料在流变压力压铸(RP-DC)系统中的充型和凝固过程,用于试验模具的型腔对应汽车转向节的型腔。通过 CFD 的理论分析和试验,确定了用于 CFD 模拟的流变模型。通过计算机数值模拟得到了充型阶段料浆在型腔内的粘度变化、流场、固

相分数分布以及型腔内凝固过程中的温度场和压力场的分布状态。该研究的主要目的是确定浇注温度和注射条件,以获得理想的组织和力学性能。胡勇等^[22]以 $Mg_2Si/AM60$ 复合材料的半固态浆料为研究对象,对其充型凝固过程进行数值模拟,预测了可能出现的缺陷,并对半固态流变成形过程进行试验,为流变压铸工艺提供参考。结果发现在液相充型过程中,压力的变化没有规律可循,而在半固态充型过程中,伴随半固态浆料在方向上的移动,压力呈现出逐渐减弱的趋势,产生出十分有利于浆料充型的背压;而且能够有效减小,甚至避免液态充型状态下的缩孔和缩松。试验结果与模拟结果基本相符,验证了半固态流变成形的质量优于液态成形。房元明等^[23]采用 Magma 软件模拟了 7075 铝合金汽车连杆铸件(见图 4)的充型和凝固过程,并对该模拟过程进行优化,在此基础上还进行了流变压铸试验研究。发现已有的模拟仿真模型可以较好地反映出 7075 合金在不同压铸工艺参数下的充型和凝固过程(见图 5 和图 6),当压射速度为 3 m/s、模具温度为 150 °C 时,可以获得无缺陷或缺陷可忽略的铸件。用优化模拟后的工艺参数再次对 7075 铝合金连杆件进行压铸和普通压铸试验,发现流变铸件显微组织表现为颗粒较小且均匀有序,而普通压铸件的显微组织则表现为颗粒

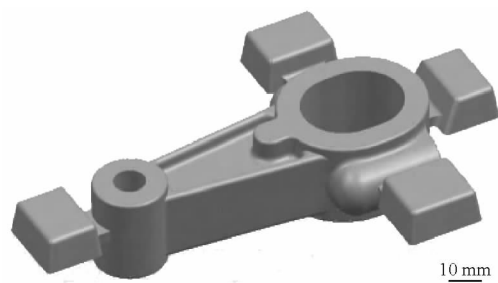


图 4 7075 铝合金连杆铸件^[23]

Fig.4 7075 aluminum alloy connecting rod die casting^[23]

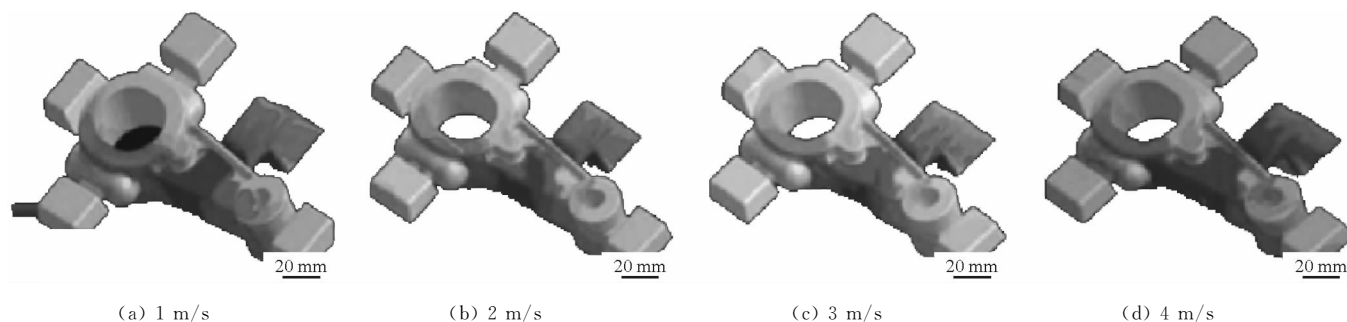


图 5 不同压射速度铸件的填充材料分析^[23]

Fig.5 Analysis of filling materials at different extruding speeds

较大且不均匀无序。

张莹等^[24]从半固态浆料在外力作用下发生的流动和变形的角度进行研究(见图 7 和图 8),运用 Fluet 软件对 AZ31 半固态镁合金流变铸轧过程进行了数值模

拟,分别对 4 种不同的粘度模型进行分析,得到了镁合金铸轧凝固过程的偏移速率图、粘度分布图和温度场之间相互作用的关系。结果显示,简单的等温稳态粘度模型适用于大范围剪切速率下的凝固模拟,而此种工况下

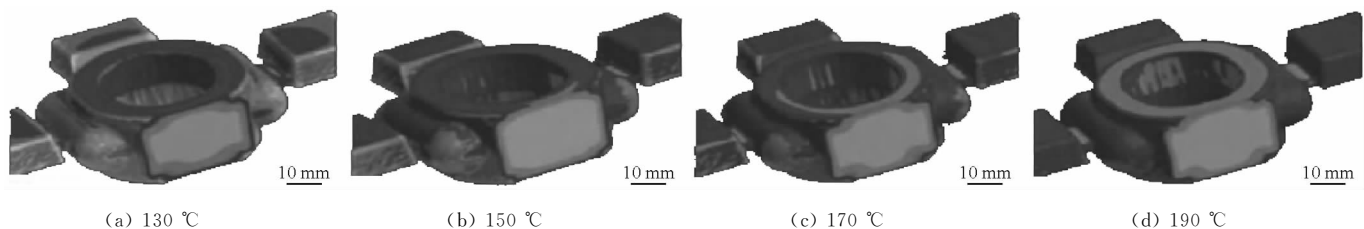
图6 不同模具温度凝固过程中的温度梯度分布图^[23]

Fig.6 Distribution of temperature gradient during solidification process at different mould temperatures

较理想的粘度模型为 Carreua 粘度模型。

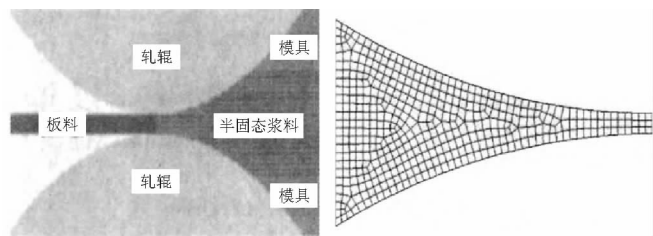
图7 数学模型图^[24]

Fig.7 Mathematical model diagram^[24]

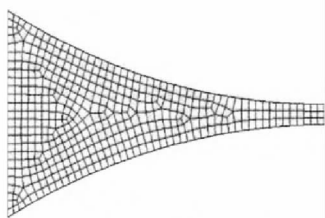
图8 网格划分图^[24]

Fig.8 Meshing diagram^[24]

综上,经过数十年的发展和探索,半固态流变成形数值模拟随着计算流体力学软件有了很大发展。研究者利用商业软件或基于现有的流变学软件,自主研发了多种模拟半固态浆料流动的模型。通过计算机模拟半固态流变成形主要研究发展重点方向:①不同压射压力、压射速度、浇注温度等工艺参数下,半固态浆料充型和凝固过程的影响规律,从而能更好地解决铸件球状晶组织、晶粒之间的偏析问题;②模拟半固态流变成形充型过程的流场和温度场,能够预测铸件内部可能产生湍流和出现陷入性缺陷的位置以及严重程度;③通过数值模拟,采用不同的粘度模型进行分析,得到合金凝固过程的剪切速率图、粘度分布图和温度场,获取最佳的粘度模型;④通过数值模拟,可以对铸造工艺进行方案优化,能够做出更贴合实际生产要求、直观呈现多相流动过程中流动行为的模拟结果,为更加精确预测多相流动过程,为实际生产过程提供参考。

3 流变成形数值模拟研究的展望

基于流体力学中建立相关常见的模型有 VOF 模型、Mixture 模型、Eulerian 模型和 Wet Steam 模型等。在半固态流变成形中,最常用的模型是 VOF 模型,可以充分模拟液体的充型过程。数值模拟能够有效地模拟试验过程中的充型、气孔分布、缺陷、浆料在流动过程中的粘度分析、热应力、温度场变化等,为大规模生产提供技术服务,还能够进一步改进压射速度、浇注温度等工艺参数。

但是由于半固态流变成形的过程复杂多变,致使相

关的研究进展比较缓慢。目前,半固态流变成形的形成过程不能反映半固态浆料微观组织的具体流动过程。因此,对半固态浆料微观建模是今后研究的关键。随着数值模拟技术的发展,基于数值模拟建立稳定的数据分析,对工业的生产指导作用越来越大。特别是大数据技术的广泛应用、PYTHON 等新语言、三维建模软件的升级等,能够对三维模型和模拟分析过程进行优化,为半固态流变成形数值模拟提供有效支撑。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] WU S S, XIE L, ZHAO J W, et al. Formation of non-dendritic microstructure of semi-solid aluminum alloy under vibration [J]. Scripta Materialia, 2008, 58(7): 556-559.
- [3] 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.
- [4] FAN Z. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 2002, 47(2): 49-85.
- [5] POOLTHONG N, QUI P, NOMURA H. Primary particle movement and change of property of cast iron by centrifugal effect in semi-solid processing[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2016, 4(5): 481-489.
- [6] 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.
- [7] 李干,卢宏兴,罗敏,等.铝合金半固态流变成形技术研究进展[J].精密成形工程,2020,12(3): 29-48.
- [8] WU S, ZHAO J, WAN L, et al. Numerical simulation of mould filling in rheo-diecasting process of semi-solid magnesium alloys[J]. Semi Solid Processing of Alloys and Composites, 2006, B116-117: 554-557.
- [9] YAN H, WANG T, FU M F. Numerical simulation of rheo-diecasting mould filling process of semisolid magnesium alloys[A]. International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing[C]. Zhengzhou, 2008.
- [10] 毛卫民.半固态金属成形技术[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [11] SEYBOLDT C, LIEWALD M. Numerical simulation of the induction heating of hybrid semi-finished materials into the semi-solid state[A]. American Institute of Physics Conference Series[C]. 2017.
- [12] 胡南,苏勇,吴楠.高固相率半固态成形铝合金轮毂的数值模拟[J].热加工工艺:2020(21): 54-57.

Mg-Zn-Ca 合金研究进展

刘人杰 曹富荣
(东北大学材料科学与工程学院)

摘 要 近年来,镁合金因为其更高的比强度和比刚度引起了广泛的关注。然而,由于镁合金的塑性和韧性较低,以及室温下成形性差,限制了其应用范围。镁合金的成形性和延展性可以通过添加一些元素来改善,如 Zn 和 Ca 元素。Mg-Zn-Ca 系合金,由于其低成本、良好的沉淀硬化性能和抗蠕变性,以及良好的生物降解性,受到越来越多的关注。介绍了 Mg-Zn-Ca 合金近年来的研究进展,并对国内外 Mg-Zn-Ca 合金的材料研究、合金化以及加工方法等进展做了总结,随后对 Mg-Zn-Ca 合金的发展进行了展望。

关键词 Mg-Zn-Ca 合金;合金化;力学性能;加工方法;复合材料

中图分类号 TG146.22;TG146.1⁺3

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.10.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Mg-Zn-Ca Alloys

Liu Renjie, Cao Furong

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University)

Abstract: In recent years, magnesium alloys have attracted much attention because of their lower density, higher specific strength and higher specific stiffness. However, due to the low plasticity and toughness of magnesium alloy and the poor formability at room temperature, the application of magnesium alloy was limited. The formability and ductility of magnesium alloys can be improved by adding some elements, such as zinc and calcium. Mg-Zn-Ca alloys have attracted more and more attention due to their low cost, good precipitation hardening properties, creep resistance and good biodegradability. The research progress in Mg-Zn-Ca alloys in recent years was summarized focusing on material research, alloying and processing methods of Mg-Zn-Ca alloys at home and abroad, and the future development of Mg-Zn-Ca alloys was prospected.

Key Words: Mg-Zn-Ca Alloy, Alloying Method, Mechanical Properties, Processing Method, Composites

镁合金因其密度低、比强度高、阻尼性能好等特点^[1,2],在汽车、航空航天、生物等领域中具有很高的应

收稿日期:2021-04-07;**修改稿收到日期:**2021-04-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51334006)
第一作者简介:刘人杰,男,1996 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:782382151@qq.com
通信作者:曹富荣,男,1964 年出生,研究员,沈阳(110819),E-mail:cfr-lff@163.com
引用格式:刘人杰,曹富荣. Mg-Zn-Ca 合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(10):1 268-1 272.
LIU R J, CAO F R. Research progressin Mg-Zn-Ca alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(10):1 268-1 272.

[13] 李道忠,丁武学,孙宇,等. AISi7Mg 轮毂半固态流变挤压铸造成形数值模拟[J]. 铸造技术, 2020, 41(5): 474-479.

[14] 郑鹏,徐骏,张志峰,等. A357 铝合金半固态流变压铸数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(1): 43-46,124.

[15] 岑尧,高倩. 基于 ProCAST 的 TiB₂/7075 复合材料流变压铸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 90-93,97.

[16] 高倩,杨滨. 7075 及 TiB₂/7075 复合材料流变压铸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 72-75.

[17] 高倩,杨滨,甘贵生. 蛇形管浇注制备 TiB₂/7075 半固态浆料及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(9): 937-940.

[18] 管仁国,赵占勇,陈礼清,等. AZ31 镁合金型材连续流变挤压成形过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 923-929.

[19] RAGAB K A, BOUAICHA A, BOUAZARA M. Optimization of casting design parameters on fabrication of reliable semi-solid aluminum suspension control arm[J]. Journal of Materials Engineer- ing & Performance, 2017, 26(9): 4 450-4 461.

[20] 周冰,康永林,朱国明,等. 强制对流流变成形制备 7075 铝合金半固态浆料及其数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 1 109-1 116.

[21] DAS P, BHUNIYA B, SAMANTA S K, et al. Studies on die filling of A356 Al alloy and development of a steering knuckle component using rheo pressure die casting system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 293-311.

[22] 胡勇,何柏林,闫洪. 镁基复合材料半固态压铸过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1 260-1 266.

[23] 房元明,徐骏,高志华,等. 7075 铝合流变压铸数值模拟及实验研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(11): 1 180-1 187.

[24] 张莹,倪泽联,韩婧潇,等. 基于流变学模型的镁合金流变铸轧数值模拟[J]. 热加工工艺, 2013, 42(3): 35-37,40.

(编辑:刘晨辉)