# 大体积流变浆料制备与压铸成形一体化 工艺及其应用

祁明凡<sup>1</sup>,李静媛<sup>1</sup>,康永林<sup>1</sup>,李谷南<sup>2</sup>,王继成<sup>2</sup>,刘爱森<sup>3</sup>,陈俊臣<sup>3</sup>
(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院,北京 100083;2. 珠海市润星泰电器有限公司,广东 珠海 519000;3. 森特士兴集团股份有限公司,北京 100176)

**摘要:目的**研究气体流量对 ACSR 流变压铸 Al-Si-Fe 合金组织的影响,同时研究与对比流变压铸与传统压 铸合金的组织性能。**方法** 通过改变气体流量制备流变压铸 Al-Si-Fe 合金,采用光学显微镜、扫描电子显微 镜、电子探针、万能试验机等研究了合金的微观组织与拉伸性能。**结果**随着气体流量由 0 提高至 6 L/s,流 变压铸合金中 α<sub>1</sub>-Al 平均尺寸由 35.6 μm 下降到 23.9 μm,形状因子由 0.71 上升到 0.82;与传统压铸合金相 比,流变压铸合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 15%和 75%。**结论** ACSR 流变压铸工艺可以制备出组织 细小圆整且力学性能高的铸件。

关键词:大体积流变浆料;流变压铸;Al-Si-Fe 合金;气冷搅拌棒;力学性能 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.002

中图分类号:TG249.2 文献标识码:A 文章编号:1674-6457(2020)03-0012-08

## Integrated Technology and Application of Large Volume Rheological Slurry Preparation and High-pressure Die-casting

QI Ming-fan<sup>1</sup>, LI Jing-yuan<sup>1</sup>, KANG Yong-lin<sup>1</sup>, LI Gu-nan<sup>2</sup>, WANG Ji-cheng<sup>2</sup>, LIU Ai-sen<sup>3</sup>, CHEN Jun-chen<sup>3</sup>

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
 Zhuhai Runxingtai Electric Appliance Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;
 Center International Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect of gas flow on the microstructure of air-cooled stirring rod (ACSR) rheological high-pressure die-casting (Rheo-HPDC) Al-Si-Fe alloy, and to study and compare the microstructure and properties of Rheo-HPDC alloy and traditional HPDC alloy. The Rheo-HPDC Al-Si-Fe alloy was prepared by changing the gas flow and the microstructure and tensile properties of the alloy were studied by optical microscope, scanning electron microscope (SEM), electron probe micro analysis (EPMA) and universal testing machine. With the increase of gas flow from 0 L/s to 6 L/s, the average size of  $\alpha_1$ -Al in the Rheo-HPDC alloy decreased from 35.6 µm to 23.9 µm, and the shape factor increased from 0.71 to 0.82. Compared with the HPDC alloy, the tensile strength and elongation of the Rheo-HPDC alloy were increased by 15% and 75%, respectively. The ACSR Rheo-HPDC process can be used to produce the castings with fine and spherical microstructure and high mechanical properties.

KEY WORDS: large volume rheological slurry; Rheo-HPDC; Al-Si-Fe alloy; air-cooled stirrer rod; mechanical properties

收稿日期: 2020-04-06

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFB0704102);中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-18-043A1);中国博士 后科学基金(2019M650486)

作者简介:祁明凡(1989-),男,博士,讲师,主要研究方向为高性能铝合金开发及近净成形。

通讯作者:康永林(1954-),男,博士,教授,主要研究方向为半固态成形、薄板坯连铸连轧。

13

压铸作为一种高生产率、低成本的近净成形工艺, 在通讯、汽车、3C 等领域得到了广泛应用。Dong 等 <sup>[1]</sup>认为目前制约压铸技术进一步扩大应用的主要问 题是铸件的多孔性以及由此带来的强度问题。在传统 压铸过程中,液态熔体会以紊流状态充填型腔,使得 型腔内气体无法及时排出而卷入合金内部,形成气孔 缺陷。气孔减少了铸件的有效承载面积,造成应力集 中,从而降低铸件力学性能。Li 等<sup>[2]</sup>认为难以发现的 内部气孔是产品工作时突然失效的严重隐患。

为了改善压铸件的气孔缺陷,半固态压铸技术得 到了关注。与传统压铸使用的高温液态熔体相比,半 固态压铸使用的具有较高固相率的半固态浆料拥有 较高的表观粘度和层流特性,在高速充型过程中流动 平稳,不易卷气,并且浆料凝固收缩比传统液态金属 小,这样能减少或消除气孔和疏松等缺陷,提高铸件 力学性能<sup>[3—4]</sup>。另外,由于浆料进入压室的温度比传 统液态金属低,这样大大减少了对压铸模型腔的热冲 击,延长模具使用寿命<sup>[5]</sup>,因此,半固态压铸兼顾半 固态成形和传统压铸的优点,在工业化应用中有着光 明前景。半固态压铸主要分为触变压铸和流变压铸, 触变压铸由于二次加热效率低的缺点,使得近年来流 变压铸的为半固态加工领域研究热点,这样也使得流 变压铸的工业化应用格外受到重视和关注。

高品质半固态浆料的制备是流变压铸技术发展 的前提和关键。近些年来,国内外学者已提出多种半 固态浆料制备技术。英国布鲁内尔大学 Fan<sup>[6]</sup>等研发 的双螺旋剪切技术,通过一对高速旋转的螺杆对熔体 实施高剪切率搅拌来制备半固态浆料; 瑞典 Jonkoping 大学 Mostafa<sup>[7]</sup>等开发出 RSF 制浆技术,采用熵 交换材料作为冷却介质从金属熔体中吸收热量从而 制备半固态浆料;加拿大 Alcan 铝公司 Doutre 等<sup>[8]</sup>提 出了 SEED 制浆工艺,在低过热度浇注条件下,使制 备坩埚偏心旋转,在熔体中产生有效剪切作用,抑制 初生相枝晶生长,从而制备出半固态浆料;泰国宋卡 王子大学的 Thanabumrungkul 等<sup>[9]</sup>开发的 GISS 技术, 在熔体凝固时通入惰性气体,利用气泡扰动来制备半 固态浆料;西北工业大学管仁国[10]等开发出振动倾斜 板工艺制备半固态浆料 ,认为是形核热力学条件和振 动剪切碰撞的综合作用;南昌大学杨湘杰[11]等开发出 LSPSF 制浆工艺,该工艺是将合金熔体浇注到转动输 送管入口,在重力和转动输送管内壁剪切/冷却综合 作用下,合金由熔融状态转变为具有一定固相率的半 固态浆料; Zhu<sup>[12]</sup>等开发的 SCP 技术,将过热熔体浇 入立式蛇形通道中降温 ,利用自身重力引起的扰动来 制备半固态浆料。这些工艺大大丰富了半固态浆料制 备技术,并推动了流变压铸工艺的发展与应用,但为 了更加稳定、连续、高效制备出高品质半固态浆料, 迎合流变压铸产业化推广和突破国外制浆工艺专利 保护,非常有必要再开发出一些新的简单、高效、实 用的制浆技术。

鉴于此,同时结合流变压铸行业现状,一种气冷搅 拌棒制浆工艺(Air-Cooled Stirring Rod,简称 ACSR) 应运而生,以实现大体积半固态浆料的连续快速制备, 并与压铸机紧密衔接,形成集浆料制备-输送-成形于 一体的流变压铸工艺。文中主要介绍 ACSR 流变压铸 工艺特点,同时以 Sr 变质的 Al-Si-Fe 合金为原料, 结合一款大型薄壁 5G 通信基站壳体研究 ACSR 工艺 参数(气体流量)对流变压铸合金组织的影响,同时 对比流变压铸与传统压铸合金的组织性能。

## 1 实验

#### 1.1 材料

实验材料为一种 Sr 变质 Al-Si-Fe 合金,其中 Si, Fe, Sr 的质量分数分别为 8.1%, 0.7%, 0.015%, 其 余为 Al。利用 SETARAM TGA-92 高温综合热分析仪 进行合金加热过程的差热分析,结果见图 1a,可得到 该合金的液相线和固相线温度分别为 633 ℃和 569 ℃。对差热分析曲线进行小步长面积积分,计算面 积比<sup>[13-14]</sup>,得到合金温度与固相率关系曲线,如图 1b 所示,可以看出,该合金的固液相温度区间宽,且固 相率随温度下降均匀提高,表明该合金适合流变压铸。



## 1.2 ACSR 流变压铸工艺

ACSR 流变压铸工艺具体流程如图 2 所示。首先, 将合金锭放入铝合金熔化炉内升温到 720 ℃至完全 熔化,采用旋转喷吹氩气技术精炼铝合金熔体,喷气 20 min 后除气、扒渣,然后将熔体温度调整到 660 ℃。 舀料勺舀取合金熔体(见图 2a),接着,石墨搅拌棒 移动并深入到舀料勺内部开始对熔体进行强制均匀 凝固处理(见图 2b),即在合金熔体凝固过程中,对 熔体搅拌的同时将压缩空气通过导气管喷入搅拌棒 的内腔带走大量热量,从而达到加速熔体冷却并促进 熔体形核的效果,快速获得晶粒细小圆整的半固态浆 料(见图 2c)。具体 ACSR 制浆工艺参数为熔体温度 为 660 ℃,搅拌速度为 800 r/min,气体流量为 0~6 L/s,搅拌时间为 28 s。将制备好的浆料倒入 DCC3000 压铸机压室(见图 2d)进行压铸成形(见图 2e),制 备出大型薄壁 5G 通信基站壳体,具体实物如图 3 所 示。ACSR 流变压铸工艺结构简单、操作方便、稳定 连续、效率高,特别适合于大体积半固态浆料的快速 制备和高品质大型薄壁件的生产。为了对比,文中传 统压铸的浇注温度为 660 ℃,压铸工艺参数与流变压 铸一致,均为铸造压力为 60 N/cm<sup>2</sup>,慢压射速度为 0.3 m/s,快压射速度为 3.5 m/s,模具温度为 200 ℃。



图 2 ACSR 流变压铸工艺具体流程 Fig.2 Specific process of ACSR Rheo-HPDC technology



图 3 流变压铸大型薄壁 5G 通信基站壳体实物 Fig.3 Physical picture of large thin-walled 5G communication base station shell by Rheo-HPDC

## 1.3 组织观察与性能测试

从基站壳体不同位置切取试样用于微观组织观察,具体位置如图 3 中位置 A 和 B 所示。试样经粗磨、细磨和抛光后用体积分数为 0.5%的氢氟酸溶液

侵蚀。采用 Neophot 21 型金相显微镜观察试样组织, 拉伸件的断口形貌采用 ZEISS-SUPRA40 型扫描电镜 进行观察。电子探针显微分析(EPMA, JXA8100)用 于元素分布和相特征分析。采用专业图像分析软件 Image-Pro Plus 对初生晶粒 α<sub>1</sub>-A1 的平均直径 *D* 和形 (2)

状因子 F 进行计算,其计算见式(1-2)。

$$D = \sqrt{4A/\pi} \tag{1}$$

 $F = 4\pi A / P^2$ 

式中: *A* 为晶粒面积; *P* 为晶粒界面周长。形状 因子 *F* 的平均值越接近于 1,表示初生晶粒越圆整。

根据 ASTM E8 M,从铸件位置 C 处切取横截面 为矩形的拉伸试样。拉伸试样的宽度、厚度和标距分 别为 12.5,1.3,50 mm,拉伸测试采用 MTS810 电子 万能实验机,应变速率为 1 mm/min,拉伸结果取 5 根 拉伸试样测试平均值。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 气体流量对流变压铸合金组织影响

图 4 为在浇注温度为 660 ℃ 搅拌速度为 800 r/min, 搅拌时间为 28 s, 气体流量为 0~6 L/s 的工艺条件下 制备的流变压铸件在位置 A 处的显微组织。图 5 统 计了不同气体流量下制备的铸件组织中 α<sub>1</sub>-A1 的平均 晶 粒 尺 寸 和 形 状 因 子 。 可 以 看 出 , 随 着

50 μm

空气流量由 0 提高到 4 L/s,流变压铸件固相率由体 积分数为 21%增加到 33%, α1-Al 晶粒的平均尺寸由 35.6 µm 下降到 24.1 µm ,形状因子由 0.71 提高到 0.80。 当空气流量增加到 4 L/s 后,大量细小的近球状  $\alpha_1$ -Al 颗粒(平均晶粒尺寸小于25μm 且形状因子高于0.80) 存在于流变压铸件中。在相同的浇注温度、搅拌速度 和搅拌时间条件下,气体流量越大,合金熔体在舀料 勺内的冷却速度越大,合金熔体的过冷度越大,稳定 形核的临界功和临界半径减小,形核率相应提高,有 利于获得大量细小的 α1-A1 晶粒。另外,流变浆料中 固相率的提高使初生固相  $a_1$ -Al 之间的距离减小,强 制搅拌过程中固相颗粒的碰撞、摩擦更加频繁,有利 于初生固相变得更加细小、圆整和分布均匀,但并不 是气体流量越大越好,对于此款大型薄壁件来说由于 齿高大,气体流量达到6L/s时固相率达到43%,会 引起在散热齿顶产生欠铸缺陷的可能(见图 4d),导 致良品率下降,因此对于这款5G通信基站壳体来说, 在保证铸件完整充型、高良品率的基础上,结合铸件 显微组织,生产时将气体流量设定为4L/s。





c 4 L/s d 6 L/s 图 4 不同气体流量条件下制备的流变压铸件在位置 A 处的显微组织 Fig.4 Microstructure of the Rheo-HPDC parts prepared under different gas flow at position A

### 2.2 流变压铸和传统压铸合金组织比较

图 6 为 ACSR 流变压铸(浇注温度为 660 ℃、搅 拌速度为 800 r/min、气体流量为 4 L/s 和搅拌时间为 28 s)与传统压铸(浇注温度为 660 ℃)通信壳体在 位置 A 和 B 处的显微组织。可以看出,传统压铸件 组织内存在较多枝晶状  $\alpha$ -Al 且可观察到较多缩孔缩 松缺陷(见图 6a—b)。对于 ACSR 流变压铸件,可观 察到组织中有大量细小近球状  $\alpha_1$ -Al 晶粒且铸件内部 缺陷显著减少(见图 6d—e)。与传统压铸合金组织相 比,ACSR 流变压铸件内次生  $\alpha$ -Al( $\alpha_2$ -Al)晶粒也得到 明显细化(见图 6c 和 f)。另外,通过 EPMA 探





Fig.5 Average grain size, shape factor and solid fraction of a1- A1 in the Rheo-HPDC parts prepared under different gas flow



图 6 传统压铸与流变压铸件在位置 A 和 B 处显微组织比较 Fig.6 Comparison of microstructures between traditional HPDC and Rheo-HPDC parts at positions A and B

针检测分析发现流变压铸 Al-Si-Fe 合金中的富铁相 均匀分布于共晶组织中,且平均尺寸要小于传统压铸 合金,如图7所示。

流变压铸和传统压铸合金力学性能比较 2.3 图 8 列出了传统压铸与流变压铸工艺制备 Al-Si-

Fe 合金的应力应变曲线。可以看出,流变压铸合金



a ACSR 流变压铸 Al-Si-Fe 合金 EPMA









具有更优异的力学性能,其抗拉强度和伸长率分别为 232 MPa 和 10.5%,与传统压铸合金相比,流变压铸 合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 15%和 75%。流 变压铸合金力学性能的强化主要归纳于以下几个方 面: 组织细小、圆整且分布均匀,晶粒尺寸对合 金力学性能影响可用 hall-petch 公式描述<sup>[15]</sup>:  $\sigma_s=\sigma_0+kd^{-1/2}$ ,其中 $\sigma_s$ 为屈服强度,d为晶粒尺寸, $\sigma_0$ 和k为常数,流变压铸合金的晶粒细化对其力学性能 有利; 流变浆料充型时稳态流动,保证合金具有 高致密度<sup>[16]</sup>; 流变压铸合金组织内的富铁相有所 细化,降低富铁相本身发生断裂可能性,并提高富铁 相与基体之间的结合力[17-18]。

图 9 为传统压铸与流变压铸 Al-Si-Fe 合金拉伸 后的断口形貌。可以看出,对于传统压铸合金,一些 尺寸较大的气孔和缩孔缩松出现在拉伸试样的断口 上,如图 9a 所示,这些缺陷在拉伸过程中成为断裂 源。图 9b 为传统压铸合金断口内非缺陷区域形貌, 在其断口中可观察到撕裂棱、解理面、二次裂纹和少 量韧窝,表明拉伸试样断裂模式为准解理断裂。与传 统压铸合金的断口相比,流变压铸合金拉伸断口内 的气孔和缩孔缩松缺陷显著改善;在流变压铸合金 断口内观察到一些河流花样和二次裂纹,并观察到 大量韧窝和撕裂棱(见图 9c—d),表现出典型的局 部塑性断裂特征,因此,流变压铸合金具有更优的力 学性能。

## 3 结论

1)开发出一种稳定、高效大体积流变浆料制备 与压铸成形一体化工艺——ACSR 流变压铸工艺,通 过与压铸工艺结合制备出高品质大型薄壁 5G 通信 壳体。

2) 对于 ACSR 工艺制备流变浆料,增大气体流 量有利于获得大量细小近球状的 α<sub>1</sub>-A1 晶粒。

3) 与传统压铸 Al-Si-Fe 合金相比, ACSR 流变 压铸合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 15%和 75%。





#### 参考文献:

- DONG Xi-xi, ZHU Xiang-zhen, JI Shou-xun. Effect of Super Vacuum Assisted High Pressure Die Casting on the Repeatability of Mechanical Properties of Al-Si- Mg-Mn Die-Cast Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 105–113.
- [2] LI Xiao-bo, YU Wen-bo, WANG Jun-sheng, et al. Influence of Melt Flow in the Gating System on Microstructure and Mechanical Properties of High Pressure Die Casting AZ91D Magnesium Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 736: 219—227.
- [3] 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: 100422.
- [4] HU X G, ZHU Q, MIDSON S P, et al. Blistering in Semisolid Die Casting of Aluminium Alloys and Its Avoidance[J]. Acta Material, 2017, 124: 446–455.
- [5] SEO P K, KIM D U, KANG C G. The Effect of the Gate Shape on the Microstructural Characteristic of the Grain Size of Al-Si Alloy in the Semi-solid Die Casting Process[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 445/446: 20-30.
- [6] FAN Z, FANG X, JI S. Microstructure and Mechanical Properties of Rheo-diecast (RDC) Aluminum Alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 412: 298– 306.
- [7] MOSTAFA P, JARFORS A E W, WESSEN M. Effect of

Superheat on Melting Rate of EEM of Al Alloys during Stirring Using the RheoMetal Process[J]. Solid State Phenomena, 2013, 192/193: 392—397.

- [8] DOUTRE D, LANGLAIS J, ROY S. The Seed Process for Semi-solid Forming[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limmasol, Cyprus, 2004.
- [9] THANABUMRUNGKUL S, JANUDOM S, BURAPA R, et al. Industrial Development of Gas Induced Semi-solid Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 1016–1021.
- [10] 管仁国,赵占勇,钞润泽,等.倾斜板振动熔体处理 技术研究与应用进展[J]. 特种铸造及有色合金,2012, 32(3):230—237.
  GUAN Ren-guo, ZHAO Zhan-yong, CHAO Run-ze, et al. Research and Application of Melt Treatment by Vibrating Sloping Plate[J]. Special-cast and Non-ferrous Alloys, 2012, 32(3): 230—237.
- [11] YANG Xiang-jie, WANG Ming, DING Liang-sheng, et al. Squeeze Casting of Semisolid A356 Alloy[J]. Solid State Phenomena, 2014, 217/218: 436—441.
- [12] ZHU Wen-zhi, MAO Wei-min, TU Qin. Preparation of Semi-solid 7075 Aluminum Alloy Slurry by Serpentine Pouring Channel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24: 954—960.
- [13] JIANG Ju-fu, WANG Ying, ATKINSON H V. Microstructural Coarsening of 7005 Aluminum AlloySemisolid Billets with High Solid Fraction[J]. Materials

Characterization, 2014, 90: 52-61.

- [14] QI Ming-fan, KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming. Microstructure and Properties of Rheo-HPDC Al-8Si Alloy Prepared by Air-Cooled Stirring Rod Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27: 1939—1946.
- [15] KUBOTA K, MABUCHI M, HIGASHI K. Review Processing and Mechanical Properties of Fine-grained Magnesium Alloys[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34: 2255—2262.
- [16] HU Xiao-gang, ZHU Qiang, 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.

- [17] QI Ming-fan, KANG Yong-lin, XU Yu-zhao, et al. A Novel Rheological High Pressure Die-casting Process for Preparing Large Thin-Walled Al-Si-Fe-Mg-Sr Alloy with High Heat Conductivity, High Plasticity and Medium Strength[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 776: 139040.
- [18] QI Ming-fan, KANG Yong-lin, LI Jing-yuan, et al. Improvement in Mechanical, Thermal Conductivity and Corrosion Performances of a New High-thermally Conductive Al-Si-Fe Alloy through a Novel R-HPDC Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279: 116586.