

铝合金半固态浆料中的卷入性缺陷

郭洪民^{1,3} 杨湘杰^{2,3}

(1.南昌大学物理与材料学院;2.南昌大学先进制造学院;3.江西省高性能精确成形重点实验室)

摘 要 已开发的半固态浆料制备方法均会产生卷入性缺陷,浇注操作和强烈的搅拌混合是产生卷入性缺陷、降低半固态浆料品质的重要因素,半固态浆料内部的卷入性缺陷主要表现为气孔、缩孔、双层膜和气泡轨迹等。开发无卷入性缺陷半固态浆料的制备方法和 技术是研究和发展流变铸造首要解决的关键问题。促进卷入性缺陷钝化是减少其危害的有效途径,卷入性缺陷闭合与焊合行为机 理研究将丰富铸造领域卷入性缺陷的调控理论。

关键词 铝合金;流变铸造;半固态浆料;卷入性缺陷;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG249.2⁺6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Entrained Defects in Semi-solid Slurry of Aluminum Alloys

Guo Hongmin^{1,3}, Yang Xiangjie^{2,3}

(1.School of Physics and Materials Science, Nanchang University; 2.School of Advanced Manufacture, Nanchang University; 3.Key Laboratory of Near-Net Forming in Jiangxi Province)

Abstract: All methods developed to prepare semi-solid slurry can take entrained defects, and pouring operation and intense stirring or mixing are main factors for entrained defects formation. Entrained defects in semi-solid slurry present in form of gas porosity, shrinkage porosity, bifilm and bubble trail. Developed preparation method of semi-solid slurry without entrained defects is the key for rheo-casting processes. Decrease of entrained defects is an effective way to reduce negative effects from entrained defects, and investigations on closing mechanisms and bonding mechanisms can enrich the controlling theories for entrained defects in casting fields.

Key Words: Aluminum Alloys, Rheo-casting, Semi-solid Slurry, Entrained Defects, Mechanical Properties

在全球低碳节能环保要求的推动下,汽车、轨道交通和航空航天等领域对高综合性能、高可靠性、轻量化的机械产品和零部件的需求越来越强烈^[1]。铝合金流变铸造是实现“以铝代替钢和铸铁”的有效手段,具有实现铸件的性能达到材料本征性能的巨大潜力。因此,研究开发流变铸造铝合金零件具有非常重要的应用价值和现实意义,对进一步推动轻量化技术的发展具有重要作用。

国内外学者在合金设计、半固态浆料制备、半固态浆料流变行为及本构方程、流变铸造工艺及模具、热处理和力学性能等方面开展了广泛的研究^[2-3]。然而,流变铸造尚未实现规模化生产高性能结构件以及在汽车和轨道交通等领域推广应用^[3-7],关键问题表现为:①流变铸造结构件的综合性能缺乏竞争力,如流变铸造 A356 和 A357 等铸造铝合金具有良好的塑性但强度缺乏明显的竞争优势,流变铸造 2024 和 7075 等高强铝合

金的强度可以达到锻件水平但塑性偏低;②流变铸造结构件的力学性能一致性差,低于锻造、触变铸造和低压铸造,这已经成为制约流变铸造铝合金零件在轻量化领域应用的主要瓶颈。本研究针对卷入性缺陷进行分析,旨在为其应用提供参考。

1 卷入性缺陷

铝合金铸造存在两个共性特征,①铝与氧的亲合力非常高,铝合金熔体表面始终存在氧化膜,该氧化膜瞬间形成,且干燥、粗糙、稳定;②在原始锭坯制备、熔化精炼、转运、浇注和充型等操作过程中,搅拌、喷射、飞溅和水跃等表面湍流现象非常普遍。在破裂波作用下,固态表面氧化膜被卷入到金属液内部形成卷入性缺陷,主要包括双层膜和气泡,见图 1。双层膜和气泡是析出性气孔、缩孔和热裂等缺陷产生的最佳起始位置,是影响铸件综合性能及力学性能一致性的本质因素^[8-10]。

收稿日期:2023-02-22;修改稿收到日期:2023-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52165048);江西省重大科技研发专项“揭榜挂帅”企业需求类项目(20223AAE02009)

第一作者简介:郭洪民,男,1976 年出生,教授,南昌(330031),E-mail:guohongmin@ncu.edu.cn

引用格式:郭洪民,杨湘杰. 铝合金半固态浆料中的卷入性缺陷[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):737-740.

GUO H M, YANG X J. Entrained defects in semi-solid slurry of aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6): 737-740.

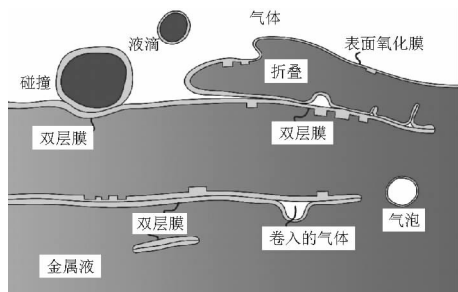


图1 铝合金熔体表面氧化膜的卷入行为示意图

Fig.1 Schematic diagram of entrainment behavior of oxide film on the surface of aluminum alloy melt

流变铸造采用具有高粘度和触变性的半固态浆料，能够实现充型过程平稳可控，避免充型阶段形成卷入性缺陷。若铝合金熔体足够纯净，则流变铸造结构件的综合性能缺乏竞争力及力学性能一致性差主要来源于半固态浆料制备过程产生的卷入性缺陷^[11-12]。

常见的半固态浆料制备方法可以分成4类。分类Ⅰ：将合金熔体浇注到坩埚内，采用特定的冷却介质激冷和强烈搅拌该合金熔体，典型代表为 Semi-solid Rheocasting(SSR)^[13]、Gas Introduced Semi-solid processing (GISS)^[14]、Rapid Semi-solid Forming(RSF)^[15]和 Air-cooled Stirring Rod Rheocasting(AC-SRR)^[16]；分类Ⅱ：将合金熔体浇注到坩埚内，通过坩埚激冷合金熔体，采用浇注操作或外物理场搅拌混合该合金熔体，典型代表为 Swirled Enthalpy Equilibration Device(SEED)^[17]、New Rheo Casting(NRC)^[18]和 Council for Scientific and Industrial Research Rheocasting System(CSIR-RCS)^[19]；分类Ⅲ：将合金熔体浇注到坩埚内，通过坩埚激冷合金熔体，采用外物理场强烈搅拌该合金熔体，典型代表为 Hong-Nano Cast Method(H-NCM)^[20]、环缝电磁搅拌^[21]、电磁搅拌^[22]和机械/超声振动^[23]；分类Ⅳ：采用浇注操作使合金熔体流经具

有特定长度的浇注通道，激冷和强烈搅拌合金熔体，典型代表为蛇形通道法^[24]、振动倾斜板法^[25]、自孕育法^[26]和 Low Superheat Pouring with a Shearing Field/Limited Angular Oscillation(LSPSF/LAO)^[27]。这些已开发的半固态浆料制备方法具备两个共性特征：①浇注操作将合金熔体从熔炼炉输送至浆料制备坩埚。表面湍流是表面氧化膜卷入形成卷入性缺陷的必要条件，铝合金熔体产生表面湍流的临界流动速度为 0.5 m/s，临界浇注高度为 12.5 mm^[28]。该浇注高度临界值极小，因此浇注操作是产生卷入性缺陷降低半固态浆料品质的重要因素。②强烈的搅拌混合实现细化晶粒、均匀化温度场、控制初生固相形态。分类Ⅰ和分类Ⅲ引入外物理场实现搅拌混合，为了达到较好的效果，外物理场均会使韦伯数大于1，产生表面湍流。分类Ⅱ和分类Ⅳ依靠浇注操作和重力作用产生搅拌混合，在较高动能作用下合金熔体的流动速度远大于 0.5 m/s。因此，强烈的搅拌混合是在半固态浆料内部产生卷入性缺陷的另一个重要因素。

综上，已开发的半固态浆料制备方法均会污染合金熔体，在半固态浆料内部产生卷入性缺陷。课题组前期采用 SEM、EDS、X-Ray 断层扫描和断口分析方法系统研究了机械搅拌、斜坡、RSF 等方法制备的半固态浆料中的卷入性缺陷，表明卷入性缺陷在半固态浆料中主要以气孔、缩孔、双层膜和气泡轨迹等形式存在。半固态浆料具有较高的粘度，卷入性缺陷一旦产生，气体很难从半固态浆料内逸出或去除，最终以铸造缺陷的形式存在于铸件中。图2为流变铸造 A356 铝合金 T6 热处理状态的力学性能汇总。Weibull 统计分析表明抗拉强度的韦布尔模量为 21.6，屈服强度的韦布尔模量为 10.8，伸长率的韦布尔模量为 4.7。根据缺陷与力学性能间的关系，可以确定含有卷入性缺陷半固态浆料是流

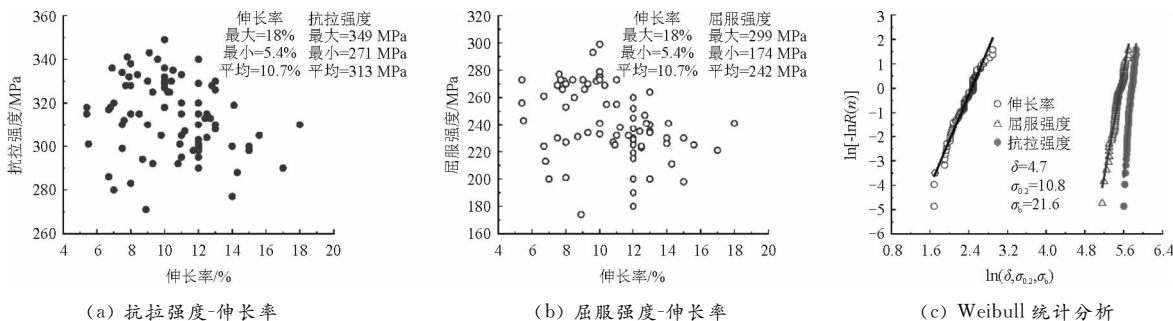


图2 流变铸造 A356 铝合金 T6 热处理状态力学性能及统计学分析

Fig.2 Mechanical properties and statistical analysis of T6-treated A356 aluminum alloy by rheo-casting

变铸造零件的综合性能缺乏竞争力、力学性能一致性差的本质原因。采取有效措施对卷入性缺陷进行调控是流变铸造高性能高一致性铝合金零件需要亟待解决的关键基础问题。

2 建议和策略

针对以上关键问题，调控流变铸造中的卷入性膜缺陷需要从两方面着手：一是研发高品质半固态浆料制备

方法以减少卷入性缺陷的形成,二是降低已经形成的卷入性缺陷的危害,有效提高流变铸造铝合金零件的综合性能及力学性能的一致性。

2.1 研发高质量半固态浆料制备方法

半固态浆料是由球形/近球形初生固相与液相组成的固-液混合物,其微观组织特征是半固态浆料触变性的来源。因此,半固态浆料制备是流变铸造领域的研究核心。目前,仅 GISS、RSF、ACSRR 和 SEED 等 4 种技术在我国初步实现了工业化应用,但国内企业在使用 GISS、RSF 和 SEED 等国外技术时需要支付高昂的专利使用费,且只有 SEED 技术可以生产力学性能要求中等的结构件。突破壁垒,研发拥有自主知识产权并胜任工业化生产的高性能高安全性结构件的半固态浆料制备方法,已经成为我国流变铸造领域的迫切需求和重大挑战。

纵观国际半固态浆料制备方法,学术界和产业界主要以初生固相的尺寸和形貌等微观组织特征衡量半固态浆料的品质,关于半固态浆料制备阶段卷入性缺陷的研究鲜有报道,自 2010 年之后半固态浆料制备方法一直没有取得突破。CHUNG I G 等^[29]研究了真空辅助电磁搅拌制备铝合金半固态浆料,随着搅拌强度的增加卷入性缺陷增加。当浆料制备坩埚内的压力在 5~101 kPa 范围变化时卷入性缺陷呈先减少后增加的趋势。LIU J L 等^[30]认为消除表面氧化膜形成的方法(如真空、保护性气氛等)无法真正避免卷入性缺陷的产生,可行的方案是通过控制表面氧化膜的卷入来抑制卷入性缺陷的形成。浇注操作和强烈的搅拌混合是现有半固态浆料制备方法中细化晶粒和控制晶粒生长的重要手段,也是引起表面湍流产生卷入性缺陷的根本因素,这是一对矛盾体。根据近期研究结果^[11-12],有必要取消传统半固态浆料制备方法中的浇注操作和强烈的搅拌混合,创新探索如何在无表面湍流条件下制备半固态浆料,通过减少卷入性缺陷的形成来降低其危害。

2.2 半固态浆料内部卷入性缺陷的钝化

对于铝合金和铸造技术发展水平而言,完全避免卷入性缺陷的形成非常困难。反应分子动力学计算表明卷入性缺陷内表面与其内部的 O、N、H 发生理化作用,导致卷入性发生一定程度的粘结而钝化^[30],促进卷入性缺陷钝化可以降低其危害^[8]。目前卷入性缺陷的学术研究主要侧重于特定铸造条件下缺陷的形成、形貌表征及其对力学性能的影响^[31-33],而对卷入性缺陷钝化的研究鲜有开展,尚未认识其钝化机理并研发出有效的钝化方法。

流变铸造条件下半固态浆料内部卷入性缺陷的钝化过程分为 2 个阶段:卷入性缺陷的闭合及闭合表面的

焊合。闭合是指卷入性缺陷内表面在应力和应变作用下实现物理接触;焊合是指卷入性缺陷内表面在一定温度、接触压力以及氧化膜性质发生变化等条件下通过扩散等方式实现冶金结合。闭合是焊合的前提,只有闭合表面完全焊合后才能完全消除卷入性缺陷的危害。

半固态浆料在压力作用下流经浇注系统并充填模具型腔,压力和变形的复合作用将加快卷入性缺陷内 O 和 N 的反应,促进卷入性缺陷的闭合。适当的变形可能撕裂卷入性缺陷,压力能够促进扩散粘结或者产生新的物相,这些方式都能够有效地将卷入性内表面焊合在一起。相应地在温度较高的固溶处理阶段,卷入性缺陷将进一步焊合。研究表明,微量元素可以改变氧化膜的强度和渗透性等性质,进而影响闭合与焊合^[28]。挤压铸造与锻造一体化成形技术通过压力变形等方式也可以调控孔洞类缺陷的闭合与焊合^[34],这说明可通过压力成形、固溶处理和微量元素等对卷入性缺陷进行调控,促进卷入性缺陷的闭合与焊合,进一步降低卷入性缺陷的危害。

3 结 语

已开发的半固态浆料制备方法均会产生卷入性缺陷,该缺陷主要表现为气孔、缩孔、双层膜和气泡轨迹等形式。开发无卷入性缺陷半固态浆料的制备方法和技术是研究和发展流变铸造首要解决的关键问题。促进卷入性缺陷钝化是减少卷入性缺陷危害的有效途径,卷入性缺陷闭合与焊合行为机理的研究将丰富铸造领域卷入性缺陷的调控理论。

参 考 文 献

- [1] 谢建新. 航空航天与现代交通高性能铝合金材料[A]. 2019 年中国铝加工产业年度大会暨中国(邹平)铝加工产业发展高峰论坛[C]. 山东邹平, 2019.
- [2] NAFISI S, GHOMASHCHI R. Semi-Solid Processing of Aluminum Alloys[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [3] ZHU Q, RASSILI A, MIDSON S P, et al. Semi-solid of Alloys and Composites XV. 15th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C], Switzerland: Tans. Tech. Publication Ltd., 2018.
- [4] 彭立明. 高固相率流变压铸技术及其产业化应用[A]. 第八届国际控制凝固与成形工程技术研讨会暨半固态技术及应用研讨会[C]. 福建将乐, 2019.
- [5] KAPRANOS P. Current state of semi-solid net-shape die casting [J]. Metals, 2019(9): 1 301.
- [6] LI G, LU H X, HU X G, et al. Current process in rheoforming of wrought aluminum alloys: A review[J]. Metals, 2020(10): 238.
- [7] MIDSON S P. Industrial application for aluminum semi-solid castings[J]. Solid State Phenom., 2015, 217-218: 487-495.
- [8] CAMPBELL J. The Mechanisms of Metallurgical Failure [M]. Switzerland: Elsevier, 2020.
- [9] YOUSEFIAN P, TIRYAKIOGLU M. Pore formation during solid-

- ification of aluminum: Reconciliation of experimental observations, modeling assumptions, and classical nucleation theory[J]. Metall. Mater. Trans., 2018, A49: 563-575.
- [10] WANG Q G. Best practices for making high integrity lightweight metal castings - Molten metal composition and cleanliness control [J]. China Foundry, 2014, 11(4): 365-374.
- [11] 郭洪民, 张力文, 杨湘杰. 流变成形的两个本质问题[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 516-522.
- [12] 郭洪民, 马腾飞, 孙铁秩, 等. 铝合金流变铸造中的双层膜缺陷[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 104-112.
- [13] MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Evolution of particle morphology in semisolid processing[J]. Metall. Mater. Trans., 2005, A36: 2 205-2 210.
- [14] WANNASIN J, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification[J]. Scr. Mater., 2006, 55(2): 115-118.
- [15] GRANATH O, WESSEN M, CAO H. Determining effect of slurry process parameters on semisolid A356 alloy microstructures produced by Rheometal process[J]. Inter. J. Cast Met. Res., 2008, 21(5): 349-356.
- [16] 祁明凡, 李静媛, 康永林, 等. 大体积流变浆料制备与压铸成型一体化工艺及其应用[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 12-19.
- [17] COTE P, LAROUCHE M, CHEN X G. New development with the SEED technology[J]. Solid State Phenom., 2013, 192-193: 373-378.
- [18] KAUFMANN H, POTZINGER R, UGGOWITZER P. An update on the new rheocasting- development work for Al- and Mg- alloys [J]. Die Cast. Eng., 2002, 46(4): 16-19.
- [19] MOLLER H, GOVENDER G. R-HPDC in South Africa[J]. Solid State Phenom., 2012, 192-193: 3-15.
- [20] SIN J G, CHOI B H, JANG Y S, et al. Development of a nucleation accelerated semisolid-slurry-making method and its application to rheo-diecasting of ADC10 alloy[J]. ISIJ International, 2010, 50(8): 1 165-1 174.
- [21] 何敏, 张志峰, 毛卫民, 等. 螺旋环缝电磁场对 7075 合金熔体处理过程中多物理场及组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(10): 1 045-1 050.
- [22] WANG Y F, ZHAO S D, GUO Y. Numerical simulation and experimental investigation of the preparation of aluminum alloy 2A50 semi-solid billet by electromagnetic stirring[J]. Materials, 2020, 13: 5 470.
- [23] DAI W, WU S S, LV S L, et al. Effects of rheo-squeeze casting parameters on microstructure and mechanical properties of Al-CuMnTi alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2012, A538: 320-326.
- [24] 刘志勇, 毛卫民, 王伟番, 等. 蛇形通道制备半固态 A380 铝合金浆料组织的演变[J]. 工程科学学报, 2016, 38(2): 263-269.
- [25] GUAN R G, ZHAO R G, LI Y D. Microstructure and properties of squeeze cast A356 alloy processed with a vibrating slope[J]. J. Mater. Process. Technol., 2016, 229: 514-519.
- [26] LI M, LI Y D, BI G L, et al. Effects of melt treatment temperature and isothermal holding parameter on water-quenched microstructure of A356 aluminum alloy semisolid slurry[J]. Trans. Non-ferrous Met. Soc. China, 2018, 28(3): 393-403.
- [27] GUO H M, YANG X J, LUO X Q. Formation of grain refined and non-dendritic microstructure of an aluminum alloy under angular oscillation[J]. J. Alloys Compd., 2009, 482(1-2): 412-415.
- [28] CAMPBELL J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design[M]. Switzerland, Elsevier, 2015.
- [29] CHUNG I G, BOLOURI A, KANG C G. A study on semisolid processing of A356 aluminum alloy through vacuum-assisted electromagnetic stirring[J]. Inter. J. Adv. Manuf. Technol. 2012, 58: 237-245.
- [30] LIU J L, WANG Q G, QI Y. Atomistic simulation of the formation and fracture of oxide bifilms in cast aluminum[J]. Acta Mater., 2019, 164: 673-682.
- [31] LI T, DAVIES J M T. Evolution of entrainment defects formed in Mg-Y alloy casting[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, A51: 5 389-5 400.
- [32] GYARMATIA G, FEGYVERNEKIA G, MENDEB T, et al. Characterization of the double oxide film content of liquid aluminum alloys by computed tomography[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109 925.
- [33] SONG H Q, ZHANG L Y, CAO F Y, et al. Oxide bifilm defects in aluminum alloy casting [J]. Materials Letters, 2021, 285: 129 089.
- [34] 张琦, 曹苗, 张帅, 等. 汽车轮毂铸锻一体化制造工艺[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(2): 1-6.

(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

