

铝合金半固态加工的现状和发展前景探讨

李杰华

(奥地利莱奥本大学铸造研究所)

摘 要 基于 16 届国际半固态加工会议探讨了半固态加工的现状和发展前景。可以发现,再生铝合金流变铸造正在成为铝合金流变铸造的主流,计算机断层扫描在分析铝合金流变铸造缺陷方面正在得到越来越多的应用,同步辐射在分析半固态流变行为方面具有非常重要的科学意义和应用价值。虽然正在面临着大型真空一体化压铸的激烈竞争,半固态加工通过和连接技术的结合依然在大型复杂薄壁优质铸件的生产方面具有广泛的应用前景。

关键词 流变压铸;再生铝合金;计算机断层扫描;同步辐射分析

中图分类号 TG146.21;G253.11;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Semi-solid Casting Technology of Aluminum Alloys

Li Jiehua

(Chair of Casting Research, Montanuniversität Leoben, Austria)

Abstract: Based on the 16th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, some views on research progress in semi-solid casting technology were summarized. The results indicate that recycled Al alloy becomes predominate, computed tomography has been widely used in the defect control of rheo-casting of Al alloys, and synchrotron radiation is of fundamental and practical importance for the further development of semi-solid processing. Although facing the fierce competition of large vacuum integrated die casting, semi-solid combined with suitable join technologies is still promising for the increasing demands of producing large thin complex high-performance casting parts processing.

Key Words: Rheo-casting, Recycled Al Alloys, Computed Tomography, Synchrotron Radiation

半固态加工主要包括流变成形和触变成形。在流变成形过程中,首先需要制备半固态浆料,然后通过常规压铸机进行流变成形。流变成形改变了传统凝固条件下的枝晶组织,生成近球晶组织,因此具有更高的力学性能,尤其是动态疲劳性能。在触变成形过程中,首先需要制备棒料,然后通过后续加热进行触变成形。与

触变成形相比,流变成形具有工艺流程短、过程成本低等特点。目前来看,流变成形由于制浆技术的逐渐成熟,已经占据了半固态加工的主导地位。虽然半固态加工在铜合金、钢铁以及高温合金等方面也有报道,但还是以 Al-Si 系合金为主。一方面,Al-Si 合金具有流动性良好、力学性能较高、成本较低等特点,一直占据铸造

收稿日期:2023-04-26;修改稿收到日期:2023-05-06

作者简介:李杰华,男,1979 年出生,教授,Franz Josef straÙe 18, Austria, Leoben(8700), E-mail:jiehua.li@unileoben.ac.at

引用格式:李杰华. 铝合金半固态加工的现状和发展前景探讨[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):752-755.

LI J H. Research progress in semi-solid casting technology of aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):752-755.

[8] LEI S M, GAO L, HARADA Y, et al. Microstructure analysis of quenched semi-solid A356 aluminum alloy slurry by using Weck's reagent[J]. Materials Transactions, 2020, 61(6): 1 077-1 083.

[9] QI M F, KANG Y L, LI J Y, 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: 116 586.

[10] 李伟东,陈和兴,王顺成,等.工艺参数对半固态挤压铸造 A356 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2012,32(7): 611-614.

[11] 胡传林.A356 铝合金流变挤压铸造工艺及数值模拟研究[D].南昌:南昌大学,2016.

[12] QI M F, KANG Y L, LI J Y, et al. Synchronously improving the thermal conductivity and mechanical properties of Al-Si-Fe-Mg-Cu-Zn alloy die castings through ultrasonic-assisted rheoforming[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 34(10): 1 331-1 344.

[13] LIU Y, GAO M Q, MENG S C, et al. Solidification behavior and enhanced properties of semi-solid Al-8Si-0.5Fe alloys fabricated by rheo-diecasting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 3 160-3 171.

(编辑:彭瑾)

铝合金 90% 以上的市场份额。另一方面,双碳目标的提出,对能源和环境提出了更高的要求。再生铝合金仅消耗初生铝合金 5% 的能耗,减碳效果显著,得到越来越多的重视。主要介绍了再生 Al-Si 合金流变成形,重点介绍计算机断层扫描分析再生铝合金流变铸造缺陷以及同步辐射分析半固态流变行为,旨在为其应用提供参考。

1 再生 Al-Si 合金流变成形

再生 Al-Si 合金已经成为半固态加工的研究热点之一^[1-3]。LI J H 等^[1]报道了在 Al7Si0.3Mg 合金中使用高达 30% 再生铝合金的研究成果。图 1 分析了杂质含量随再生铝合金添加量的变化。可以看出,随着再生铝合金添加量的增加,TiB₂ 颗粒的含量也增加,但是半固态凝固组织变化不大,见图 2。更重要的是,流变成形后的铸造缺陷较少,尤其在薄壁区域,见图 3。研究发现,添加 30% 再生铝合金不会对流变成形工艺和组织产生不良的影响。虽然再生铝合金的使用量还可以

继续提高到 50% 甚至更高,但是由于客户使用要求的限制,只报道了添加 30% 再生铝合金的研究成果,而且由于保密要求,其相应的力学性能尚没有报道。此外,通过可持续性分析^[2],也发现使用再生铝合金可以显著降低成本和碳排放。虽然再生铝合金中不可避免地存在各种杂质,如 Fe、Pb 和 Sn^[3],但是半固态加工工艺,如电磁搅拌^[1,4],可以显著减低这些杂质对铝合金半固态加工工艺、组织和性能的影响,提高再生铝合金的使

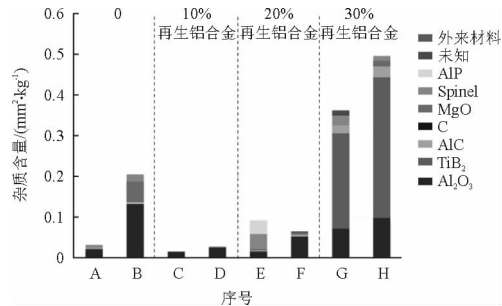


图 1 杂质含量随再生铝合金添加量的变化^[1]
Fig.1 Impurity variation with addition of recycled Al alloy^[1]

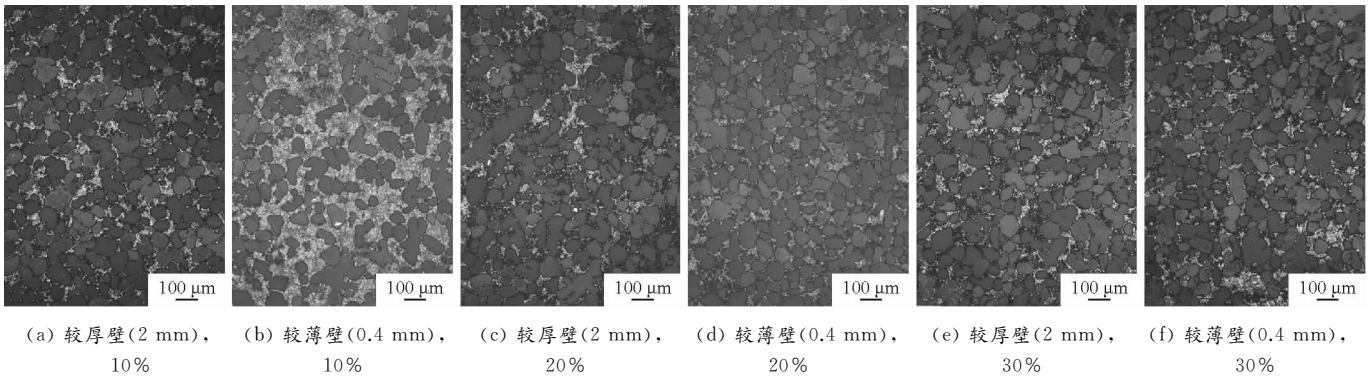


图 2 两个不同壁厚试样的半固态凝固组织随再生铝合金添加量的变化^[1]

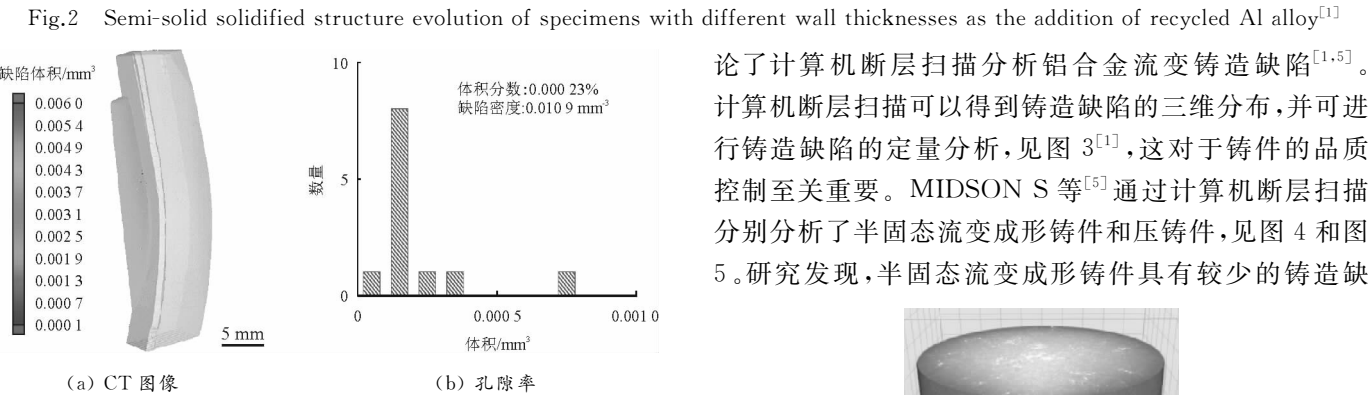


图 3 计算机断层扫描分析再生铝合金流变铸造缺陷^[1]
Fig.3 Analysis of rheological casting defects of recycled Al alloy by computed tomography^[1]

用容限度。

2 计算机断层扫描分析流变铸造缺陷

在第 16 届国际半固态加工会议上,有 2 篇论文讨

论了计算机断层扫描分析铝合金流变铸造缺陷^[1,5]。计算机断层扫描可以得到铸造缺陷的三维分布,并可进行铸造缺陷的定量分析,见图 3^[1],这对于铸件的品质控制至关重要。MIDSON S 等^[5]通过计算机断层扫描分别分析了半固态流变成形铸件和压铸铸件,见图 4 和图 5。研究发现,半固态流变成形铸件具有较少的铸造缺

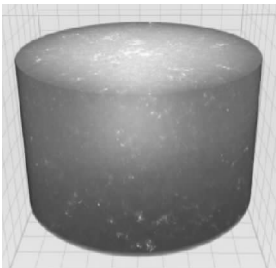


图 4 计算机断层扫描分析铝合金流变铸造缺陷^[5]
Fig.4 Analysis of rheological casting defects of aluminum alloy by computed tomography^[5]

陷。由于计算机断层扫描的分辨率和扫描试样的尺寸紧密相关,为了得到更高的分辨率,需要使用尺寸更小的试样。但是,这也导致计算机断层扫描得到的铸造缺陷信息较为局限。在某些特定的情况下,这些局部的铸造缺陷信息并不具有很好的代表性。计算机断层扫描图片的重构是另外一个需要特别强调的因素。如果不能得到正确重构海量的计算机断层扫描图片,就有可能出现各种假象甚至错误(如试样表面的影响,见图 5),因此仍然需要进一步发展数据重构算法和软件平台,尤其是基于互联网的数据共享分析平台。

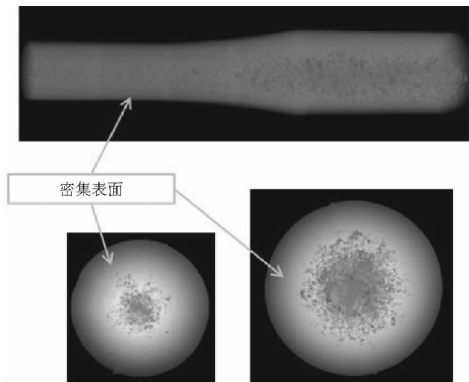


图 5 计算机断层扫描分析压铸铝合金中的铸造缺陷^[5]
Fig.5 Analysis of rheological casting defects of die-casting aluminum alloy by computed tomography^[5]

3 半固态流变行为同步辐射分析

计算机断层扫描的分辨率具有一定局限性,这主要与 X 射线的能量有关。在使用直径为 $\phi 2\text{ mm}$ 的圆柱试样的情况下,计算机断层扫描的分辨率可以达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。这个分辨率对于常规铸造缺陷的分析是可以满足使用需求的,但是尚不能进行半固态流变行为的研究,尤其是大多数正在使用的计算机断层扫描设备尚不具备原位加热和变形的功能。SU T C 等^[6]详细讨论了同步辐射分析技术在半固态流变行为研究中的应用,并和计算机模拟结果进行了比较,得到了很好的一致性。由于同步辐射具有更高的能量,因此具有更高的分辨率。更重要的是,同步辐射装置大多具备原位加热和变形的功能。SU T C 等^[6]使用 Al_xCu ($x=6, 8$ 和 15 , 质量分数,%)合金通过同步辐射成形观察研究了半固态流变行为随固相分数($38\% \sim 85\%$)和剪切速率($10^{-4} \sim 10^{-1}\text{ s}^{-1}$)的变化规律。通过同步辐射分析技术可以清楚地观察到半固态流变过程的不同阶段,见图 6,进而可以定量地分析半固态变形行为,定义了 3 个流变转变过程:临界固体、净膨胀和剪切开裂,这对于半固态材料以及加工工艺技术的开发具有重要的科学意义和应用价值。需要进一步强调的是,半固态流变行为的

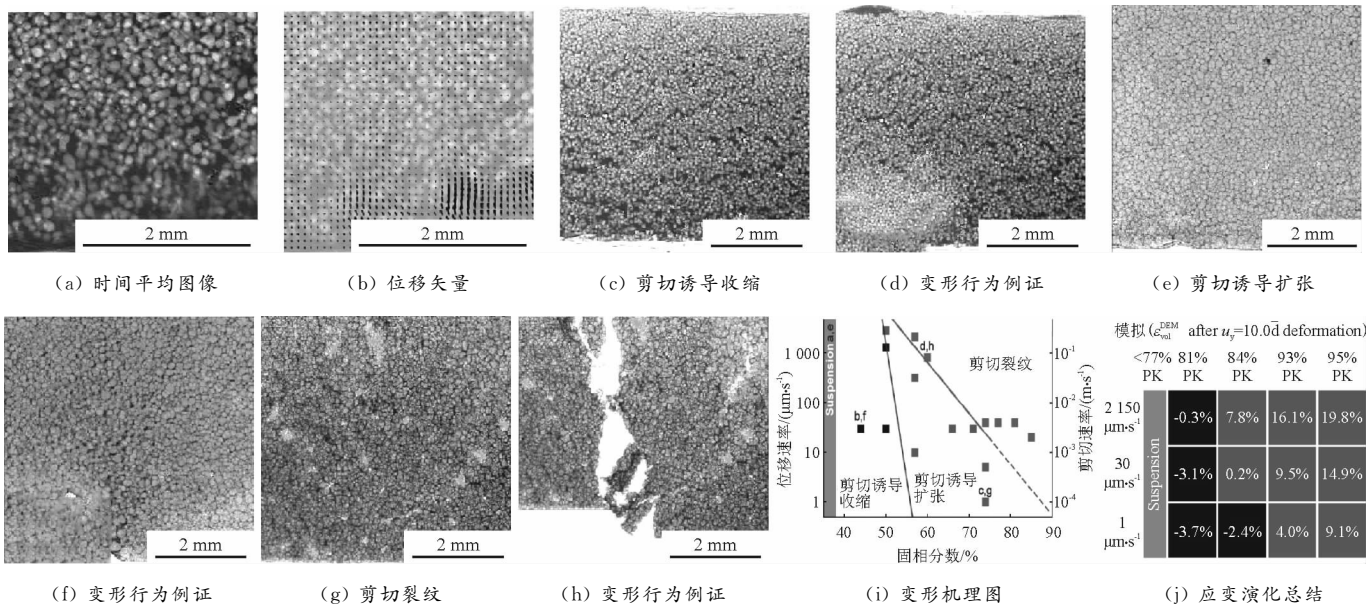


图 6 半固态流变行为同步辐射分析^[6]

Fig.6 Synchrotron radiation analysis of semi-solid rheological behavior^[6]

研究一直是半固态加工的核心内容之一^[7-9]。

4 结 语

过去近十年,半固态流变成形技术不断发展和完善,并在汽车、通讯(5G)等领域获得产业化应用,但是

和压铸相比,半固态流变成形技术的应用规模 and 市场份额仍然相对较小。尤其是在一体化压铸技术和免热处理铝合金材料正在变得越来越成熟的产业背景下,如何持续发展半固态加工仍然是一个亟待解决的问题。基于第 16 届国际半固态加工会议所发表的论文和所展示

的报告,可以得到以下 3 个结论:

(1)再生铝合金流变铸造正在成为铝合金流变铸造的主流。首先,流变铸造可以细化含 Fe 相的尺寸并改变含 Fe 相的形貌,这有利于控制铸造缺陷进而提升力学性能。其次,流变铸造可以提高 Fe 含量的使用上限,允许添加更高含量的 Fe,有利于增加再生铝合金的使用量,降低成本,降低能源消耗,减少碳排放。

(2)计算机断层扫描在分析铝合金流变铸造缺陷方面正在得到广泛的应用,但是其分辨率尚待提高,分析区域尚待增加,尤其需要在计算机断层扫描图片的重构方面开发新的算法和软件平台,并避免重构过程中可能出现的各种假象或者错误。目前,快捷、简便的计算机断层扫描技术和装备正在铸件品质控制方面得到越来越多的应用。

(3)同步辐射在分析半固态流变行为中具有非常重要的科学意义和应用价值,尤其是其分辨率已经足以观察到半固态流变过程,并具备原位加热和变形功能,这为深入研究半固态变形行为提供了极大方便和无限可能。但是和计算机断层扫描类似,同步辐射在分析半固态流变行为方面也存在分析区域尚待增加等典型问题。更为重要的是,通过同步辐射分析得到的半固态流变行为是否能够直接应用于大规模工业生产条件下的半固态加工场景尚待验证。

(4)虽然使用大型真空一体化压铸技术生产大型复杂薄壁优质铸件正在成为市场主流,半固态加工需要结合连接技术,可以大幅降低一次性设备投资,在大型复杂薄壁优质铸件的生产方面仍然具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

[1] LI J H, ZHANG X, WINKLHOFFER J, et al. Using recycled materials for semi-solid processing of Al-Si-Mg based alloys[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 207-222.

[2] JARFORS A E W, DU A, YU G G, et al. Semisolid materials processing: A sustainability perspective[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 287-292.

[3] FILHO A, FERREIRA L, NETO P, et al. Recycling Al-Si alloy by semisolid material dragged during continuous-casting strip processing[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 293-299.

[4] MURAKAMI Y, OMURA N. Control of amount of α -Al phase particles in near eutectic Al-Si alloy by electromagnetic stirring[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 250-254.

[5] MIDSON S. Using micro-CT scanning to quantitative characterize porosity in high pressure die castings and semi-solid castings[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 33-44.

[6] SU T C, O'SULLIVAN C, YASUDA H, et al. Understanding the rheological transitions in semi-solid alloys by a combined in situ imaging and granular micromechanics modeling approach[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 127-132.

[7] TOCCI M, POLA A, MODIGELL M. Visco-elastic properties of

semi-solid alloys[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 119-126.

[8] LUO M, LI D Q, LU H X, et al. Effects of grain morphology on flow behavior of semi-solid slurries[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 140-145.

[9] QU W Y, HU X G, LUO M, et al. Experimental and numerical study of the effect of pouring temperature and fluid convection on spherical grains formation[J]. Solid State Phenomena, 2022, 327: 133-139.

(编辑:彭瑾)

欧洲铝协乘用车用铝量研究与预测
报告(2022-2030)

近日,欧洲铝协发布《欧洲乘用车铝含量研究评测及 2030 预测报告》。该报告是欧洲铝协委托 Ducker Carlisle 咨询公司完成的。最新研究发现,欧洲汽车中铝的平均使用量从 2019 年的 174 kg 增加到 2022 年的 205 kg,增长了 18%。该研究预测,这一增长趋势将持续下去,预计乘用车平均用铝量将从 2022 年的 205 kg 增加到 2026 年的 237 kg (+15.6%),到 2030 年每辆车的铝用量将达到 256 kg (+24.9%)。根据这项研究,汽车行业的轻量化和电气化趋势正在推动用铝量的显著增加。电动汽车尤其对这一增长做出了最重要贡献,2022 年在欧洲生产的电池电动汽车(BEV)平均含有 283 kg 铝,而纯汽油或柴油 ICE 汽车的铝含量仅为 169 kg。2022 年至 2026 年间,电动汽车的平均用铝量预计将进一步增加 9.5%,达到 310 kg。纯电动汽车中铝使用量的巨大增长,主要归因于其在电驱外壳、电池组外壳、电池托盘和冷却板中的使用。此外,铝在电动汽车基础设施中发挥着至关重要的作用,包括电力电缆和充电站。铝的独特可回收性,也保证了当今汽车用铝材在汽车报废后可以一次又一次地回收循环使用。

Ducker Carlisle 总裁 Hélène Wagnies 表示:“我们的最新评估,更加强化了铝在减重方面的关键作用。随着动力总成电气化的加速,对减轻质量以抵消电池质量的要求都在显著增加,汽车中的用铝量也在随之增加。除了电动汽车专用部件外,在汽车车身结构中实施大型和巨型铸件也将有力地促进更多的铝消费用量。随着欧盟到 2030 年将汽车二氧化碳排放量减少 55% 的宏伟目标的实现,铝将继续在汽车制造商实现可持续发展目标的材料组合中发挥关键作用,并将在所有产品形式中都呈现增长态势,包括铝挤压材、板材、铸件和锻件。”

2022 年,欧洲乘用车单车平均用铝量为 205 kg,其中铝铸件为 123 kg,铝板材为 45 kg,铝挤压材为 27 kg,铝锻件为 10 kg。2030 年,预测铝铸件将达到 155 kg,铝板材为 59 kg,铝挤压材为 42 kg,铝锻件为 10.5 kg。乘用车变型材增幅将高于铝铸件增幅。

报告分析预测,2022 年欧洲乘用车用铝量为 285.2 万 t,2026 年预计将达到 435.6 万 t,200 年将达到 481.2 万 t。

(摘自中国有色网)