

铝合金半固态成形技术研究进展

潘帅¹, 付莹², 王玉¹, 杨博威¹, 刘岩¹, 余江伟¹, 管仁国^{1,3}, 铁镛³

(1. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

(3. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

摘要: 随着经济和科技的快速发展, 航空、航天、军事和电子工业技术等领域对优质铝合金铸件的需求迫切。利用半固态成形技术制备优质铝合金是铝合金成形技术的重要研究方向之一。本文从半固态成形用铝合金材料、制浆工艺及应用 3 个主要方面介绍了铝合金半固态成形技术的研究现状。指出了目前研究中存在的问题, 并展望了铝合金半固态成形未来的发展方向。

关键词: 铝合金; 半固态; 研究进展

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)08-3110-11

所谓金属半固态成形技术 (semisolid metal processing), 就是当金属处在相图中的固相线与液相线之间温度时, 对其施以强烈搅拌或扰动、或改变金属的热状态、或加入晶粒细化剂, 即改变初生相的形核和长大过程, 得到一种液态金属母液中均匀地悬浮着一定球状初生固相的固液混合浆料, 利用这种固液混合浆料进行加工成形的方^[1]。金属半固态浆料具有触变性, 即非枝晶半固态金属静置一段时间后, 粘度急剧增大, 可以像固态金属一样进行搬运; 又具有流变性, 当施加剪切力或搅拌时, 又像液态金属一样具有很好的流动性^[2]。利用半固态成形技术具有以下优点: 半固态浆料制备过程中所生成的固相部分的凝固潜热已经放出, 因此减轻了对模具的热冲击, 延长了模具的使用寿命; 半固态合金成形温度远低于压铸成形温度, 不存在高温熔体降温时的液相收缩, 只有部分糊状区收缩和固相收缩, 所以铸件成形尺寸精度高, 可以实现近净成形; 半固态成形铸件的组织为细小的非枝晶组织且分布均匀, 所以铸件的力学性能好; 半固态为复合材料的生产开辟了一条途径, 在半固态浆料制备过程中可加入各种增强材料和颗粒等^[3]; 半固态浆料黏度比液态金属高, 在压铸过程中半固态浆料的充填更加平稳, 可以使成形件减少缩松、缩孔, 甚至消除, 从而提高材料的利用率^[4]。

铝合金零件广泛应用于交通运输、军工产品、航空航天及汽车等领域, 尤其是随着汽车产业的蓬勃发展越来越受到人们的重视。铝合金材料以其质轻、比强度高、

导热性好、机加工性能优异和可回收等优点, 是制造汽车内燃机及压缩机活塞、汽车覆盖件的理想材料^[5]。铝合金在实际使用过程中, 存在因生产环境、工艺因素以及原材料质量好坏等问题造成的各种缺陷, 如熔体均匀性差、气孔、疏松、非金属夹杂等, 显著降低材料的强度、塑性、疲劳抗力、耐腐蚀性能等。然而, 传统的熔炼浇注工艺往往不能全面地满足这些质量要求, 为了获得优质铸件关键技术, 人们致力于研究先进的半固态成形新技术。在半固态成形合金研究方面主要有二类: 一类主要集中在 Al-Cu、Al-Mn、Al-Si、Al-Mg 及 Al-Si-Mg; 另一类在传统合金的基础上开发出了许多非标准铝基复合材料用于半固态成形^[6]。另外, 制备具有细小、均匀的非枝晶组织半固态浆料是半固态成形技术的关键。为此, 人们开发了多种半固态浆料制备工艺, 研究了制浆工艺参数对初生固相晶粒的形貌、尺寸、分布及半固态零件力学性能的影响^[1]。

本文在铝合金半固态成形, 涉及半固态成形用铝合金材料、制浆工艺及应用方面开展了大量的研究工作。这里主要对近几年来所展开的研究及取得的成果进行介绍。

1 半固态成形用铝合金材料

1.1 半固态合金体系的设计原则及研究进展

为了获得适合的半固态成形材料, 在合金成分设计时需要根据半固态成形工艺特点来分析合金应满足的基本条件。首先, 合适的凝固范围 $\Delta T_{L,S}$ 。由于纯金属和共

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2001800); 国家自然科学基金 (51871184, 51771045)

作者简介: 潘帅, 男, 1993年生, 博士, 东北大学, 辽宁 沈阳 110819, E-mail: panshuai@stumail.neu.edu.cn

晶合金没有凝固区间, 所以不适合半固态加工, 但过宽的凝固区间会导致热裂抗力减小, 因此, 合理的凝固区间对于半固态合金设计很重要。出于保证好的成形能力和高的热裂抗力的考虑, 根据半固态成形的特点, 设定凝固区间范围为 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{L-S} \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]; 其次, 具有良好的铸造性能, 半固态合金的铸造性能除了与其固相体积分数和固相形貌有关外, 还与其剩余的液相成分有关, 而这时的液相成分与实际的成分有较大偏差, 因此在合金设计时需考虑合金成分既要保证一定的固相分数又要具有足够的流动性以满足实际充型性能的要求^[6]; 此外, 合金中的强化相应具有较大的溶解度, 使合金具有良好的可热处理强化性^[7]。

根据半固态合金设计原则, 将介绍 Cu、Mn、Si、Mg 元素对合金性能的影响。对于 Al-Cu 系合金来说, Cu 作为一种重要的添加元素, 其含量一般不超过 5.5% (质量分数), 否则就会有较多的共晶及过共晶脆性相金属间化合物产生。Cu 含量越高, 产生的 CuAl_2 就越多, 使其强度降低、塑性变差。利用半固态成形技术, 使 Al-Cu 合金具有良好的可热处理强化性, 经热处理后显著提高固溶度, 改善固溶组织, CuAl_2 以弥散形式大量析出, 导致合金强度大幅度提高^[8]; Al-Mn 系合金具有较小的凝固区间, 同时 Mn 元素在结晶时极易形成偏析。采用半固态成形技术不仅能制备出组织均匀, 晶粒细小的浆料, 而且使 Al-Mn 系合金有了应用的可能; Al-Si 系合金具有较宽的凝固区间, 随 Si 含量的增加, 结晶区间变小, 共晶体增加, 流动性也随之增加。但过宽的凝固区间, 导致组织中初生 Si 晶粒粗大, 力学性能下降, 使其应用受到限制^[8]。采用半固态成形技术可以使初生 Si 细化, 同时出现球状或近球状的 α -Al 相, 合金的力学性能显著提高; Mg 含量对 Al-Mg 系合金塑性的影响很大, 当 Mg 含量小于 0.3% 时, 随着含量的增加, 强度、塑性也在增加。但是, Mg 含量大于 0.6% 时, 将会形成 Al_3Mg_2 脆性相, 严重恶化合金的塑性^[8]。半固态成形技术使合金中粗大的枝晶转变为细小的等轴晶, 同时改善了合金的塑性。对于 Al-Si-Mg 系合金来说, 为了保证合金有足够的流动性以满足充型性能的要求, 成分设计中 Si 含量一般很高, 使得合金的力学性能不高。由于半固态成形技术能够制备出非枝晶组织的半固态浆料, 这种浆料在较小力的作用下仍具有很好的流动性, 因此可以适当降低 Si 含量, 相应的增加 Mg 含量。合适的 Si、Mg 含量有助于 Mg_2Si 强化相的形成。另外, 在固溶处理时, Mg_2Si 固溶到 α -Al 相中, 人工时效后, Mg_2Si 呈弥散相析出, 使 α -Al 的结晶点阵发生畸变, 强化合金, 力学性能将大幅提高^[7]。

1.1.1 Al-Cu 系合金

铝铜合金具有高强度、低密度, 广泛用于航空航天、

汽车和国防等领域^[9]。但是, 组织中 CuAl_2 导致合金脆化, 并使合金偏析严重, 晶粒粗大, 熔体流动性差, 铸造后收缩和疏松严重, 铸造性能和力学性能都将显著降低^[10]。陈莉娟等人^[11]成功制备了 Al-6.6%Cu 半固态浆料, 组织中初生 α -Al 细小、圆润。潘志勇等人^[12]发现半固态 Al-20%Cu 合金试样与普通铸造相比, 抗拉强度、屈服强度和伸长率均有不同程度的提高, 如表 1 所示。说明半固态加工对改善 Al-Cu 合金的强度和塑性均有较大的作用。另外, 王平等^[13]利用半固态成形工艺使 ZL201 合金中脆化 CuAl_2 相细化且接近粒状。经 T5 热处理后合金屈服强度、伸长率分别为 278 MPa、9%。

1.1.2 Al-Mn 系合金

铝锰合金具有良好的耐蚀性、导电性、导热性、加工性能和焊接性能, 具有广阔的应用前景。前苏联学者发现 Al-Mn 合金半固态区间非常小, 其液相线和固相线几乎重合在一起, 再加上 Mn 元素扩散速度远低于其它合金元素, 故在凝固时极易形成偏析, 严重影响铸件的塑性。刘劲松^[14]采用固液混合技术成功制备了 Al-30%Mn 浆料, 组织均匀, 晶粒细小, 呈等轴或蔷薇状, 合金的抗拉强度为 130 MPa, 伸长率为 1%。3A21 属典型的 Al-Mn 系合金, 其化学成分(质量分数)为 Mn 1.04%, Cu 0.039%, Mg 0.004%, Fe 0.42%, Si 0.15%, Ti 0.04%, Al 为余量, 经 DSC 测定该合金的固相线温度为 656 $^{\circ}\text{C}$, 液相线温度为 670 $^{\circ}\text{C}$, 具有较小的半固态区间, 适合用 SIMA 法来制备半固态坯料^[15]。王雪等人^[16]采用 SIMA 法得到的 3A21 合金晶粒细小、圆整、均匀分布, 其平均晶粒直径为 83.7 μm , 平均形状因子为 0.84。

1.1.3 Al-Si 系合金

铝硅合金具有低密度、良好的导热及耐磨性, 因此, 被广泛应用于交通运输、医疗设备等领域^[17]。但 Al-Si 合金凝固区间过宽, 凝固组织中产生的初生 Si 相呈粗大针状或板片状, 并且在基体中的分布也极不均匀, 显著降低了合金的强度和塑性^[18]。A356 合金是最早应用于半固态成形的铝合金, 具有明显的半固态区间 (557~613 $^{\circ}\text{C}$) 和良好的流动性, 因此十分适合半固态成形^[19]。朱亮^[20]发现半固态成形后初生 Si 从粗大针状或板片状转变为短纤维状且分布均匀, 铸件屈服强度可达

表 1 Al-20%Cu 合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of Al-20%Cu alloy^[12]

Processing method	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
Common casting	112	68	0.5
Semisolid processing	152	91	1.5

146 MPa, 抗拉强度可达 224 MPa, 伸长率可达 37.21%。另外, 对于二元过共晶 Al-Si 合金而言, 郑志凯等人^[21]细化了 Al-30%Si 合金中的初生 Si 相, 将 Al-30%Si 合金中的初生 Si 相晶粒尺寸由 46 μm 细化至 39 μm 。廖福锦等人^[22]发现 Al-20%Si 合金半固态挤压后, 合金的硬度 HB 和抗拉强度分别为 1313 MPa 和 167 MPa, 与液态挤压铸件相比, 分别提高了 10.6% 和 67%。

1.1.4 Al-Mg 系合金

铝镁合金具有密度小, 抗海水腐蚀性能优良, 焊接性能、抛光性能好等优点^[23]。但是, Mg 元素对合金的韧性损害比较大, 使铸件的塑性显著下降。管仁国等人^[24]成功制备了 Al-3%Mg 半固态坯料, 在坯料加热温度 620~630 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间 90~120 min 时, 得到的 Al-3%Mg 半固态组织晶粒细小、球状度高。吕书林等人^[25]采用超声振动法制备的 5052 浆料初生 $\alpha\text{-Al}$ 细小、圆整且分布均匀, 平均尺寸约为 110 μm 。经流变挤压后, 铸件的抗拉强度和伸长率分别为 225 MPa 和 17.8%, 与液态挤压铸件相比, 分别提高了 9.7% 和 42.4%。

1.1.5 Al-Si-Mg 系合金

铝硅镁合金是一种适合于汽车行业的轻量化材料, 可用于车身、车轮及油箱等^[26]。Al-Si-Mg 合金表现出流动性好、收缩率小等优点^[27], 但当 Mg、Si 元素的质量比较大, 生成 Mg_2Si 相使合金强度增加, 塑性降低, 除形成化合物 Mg_2Si 外, 还有过剩的 Mg 元素存在。过剩 Mg 元素的存在能显著降低 Mg_2Si 在固态铝中的溶解度, 造成强化相从铝基体析出, 严重降低铝合金材料的强度。另一方面, 当 Mg、Si 元素的质量比较小时, 则 Si 元素过剩, 既使强度增加, 又使塑性上升, 但严重影响合金的耐腐蚀性能^[8]。因此, 在半固态合金成分设计时应严格控制 Mg、Si 元素的比例。北京有色金属研究总院设计了 Al-Si-Mg 系半固态专用铝合金, 其最佳合金成分为 Al-6%Si-2%Mg^[6], 实验表明, 该合金的固相分数对温度的敏感性较小, 成形可控性大大提高, 半固态坯料组织均

匀细小, 成形零件组织致密, 热处理后力学性能较好^[6]。

目前, 半固态成形材料的研究主要集中在 Al-Cu、Al-Mn、Al-Si、Al-Mg 及 Al-Si-Mg 合金, 但是, Al-Li 合金作为航空材料中发展最迅猛的轻量化材料^[28], 具有密度低、弹性模量高、比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀等特点, 取代常规铝合金后, 质量可减轻 10%~20%, 刚度提高 15%~20%。美国 ALCOA 公司在 21 世纪初启动了“ALCOA 航空 20/20 计划”, 目标是在 20 年内将航空铝合金成本和质量各减轻 20%。肯联铝业公司开发了低密度、高韧性和高损伤容限性能的 2050 和 2198 铝锂合金 (Al-Cu-Li-Mg-Ag)。但是, 我国自主研制的 Al-Li 合金牌号极少, 仅 1420 合金获得应用, C919 客机使用的 Al-Li 合金由美国铝业公司提供。另外, 国内外尚未有关于 Al-Li 合金半固态的相关报道。因此开展新型 Al-Li 合金设计、半固态成形技术具有重要意义。

1.2 半固态成形铝基复合材料

半固态成形技术易于制备复合材料, 易与同质甚至是异质的材料连接, 其目的是增加金属液中的形核数量进而提高形核率, 同时抑制枝晶生长, 得到圆整细小的组织。另外, 控制过程简单、成形速度快、应用范围广等, 使材料精密加工成本大大降低。

纳米碳化硅 (SiC) 具有高强度、低密度和耐腐蚀等优良性能, 以颗粒直径小, 纯度高, 分布均匀等特点, 常作为铝合金细化剂^[29]。王宏坤等人^[30]研究了 $\text{SiC}_p/\text{ZL102}$ 复合材料的半固态流动变形性能。结果表明, 在相同的实验条件下, 复合材料的半固态流动变形性能比基体合金优越, 且在 SiC 颗粒体积分数小于 12% 时, SiC 颗粒越多, 材料的半固态流动变形性能越好。聂希^[31]研究了不同温度下 SiC/7075 铝基复合材料半固态浆料等温处理的平均晶粒尺寸及圆整度。发现随着温度的增加, 浆料的晶粒尺寸先增大后减小, 圆整度随着温度的增加先减小后增加, 如图 1 所示。纳米 SiC/7075 铝基复合材料的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 264MPa、

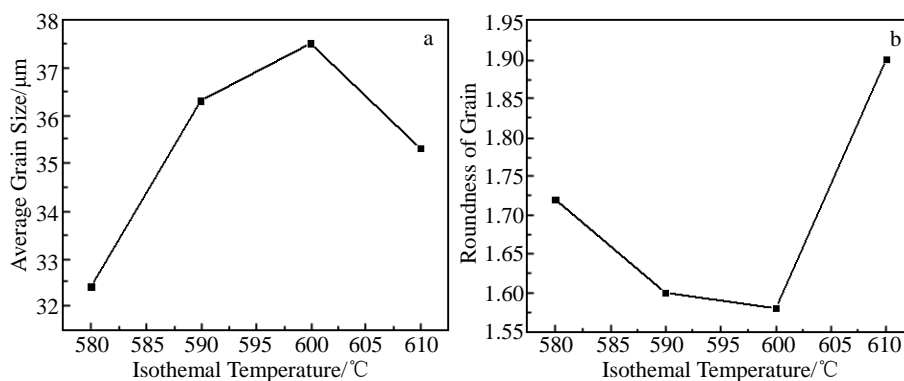


图 1 不同温度下坯料等温处理的平均晶粒尺寸及圆整度

Fig.1 Average grain size (a) and grain roundness (b) of billet treated isothermally at different temperatures^[31]

357 MPa 和 7.5%^[32]。

Al_2O_3 陶瓷颗粒与 Al 具有较好的错配关系, 常作为铝合金的细化剂^[33]。张颂阳等人^[34]研究了不同体积分数的 Al_2O_3 对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料组织变化的影响。结果表明, Al_2O_3 颗粒能明显提高半固态复合材料的流变性; Al_2O_3 颗粒抑制半固态复合材料晶粒的长大; 当 Al_2O_3 颗粒含量为 1% 时, 半固态复合材料呈弥散分布; 当 Al_2O_3 颗粒含量为 5% 时, 晶粒尺寸稳定, 晶界上的颗粒明显增多且呈网状结构。孟明艾等人^[35]研究了 Al_2O_3 含量对半固态 A356 铝合金力学性能的影响。当 Al_2O_3 含量为 0.2% 时, 硬度 (HV) 高达 1130 MPa。邹秀亮^[36]发现 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{np}/7075$ 试样在热处理后 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 块状相基本没有发生变化, 但明亮片状 Al_2CuMg 相逐渐溶解, 如图 2 所示。同时, 与 7075 基体相比, 硬度、抗拉强度、伸长率分别提高了 55.1%, 40.9% 和 109.1%。

稀土元素发生 Al-RE 反应形成稀土铝化合物产物, 也达到细化晶粒的效果^[37]。赵宾等人^[38]在 A356 铝合金浆料中加入 0.2% Sc, 与 A356 铝合金相比, 制备出了具有细小、均匀、近球状的半固态浆料, 如图 3 所示。谌庆春^[39]研究了 Y 含量对 A356 铝合金半固态浆料的影响,

研究表明, 添加 0.5% Y 的半固态浆料平均晶粒尺寸和形状因子分别为 33.60 μm 、0.74。L. Rogal 等人^[40]通过添加 Sc、Zr 改性剂获得了高性能 7075 铝合金触变成形件, 当添加 0.5% 时, 触变成形件的硬度 (HV) 为 1029 MPa, 抗拉强度为 300 MPa。

学者们还探究了其他细化剂对铝合金性能的影响。Di Tie 等人^[41]研究了半导体材料碳化硼 (B_4C) 对 A356 铝合金流变成形件摩擦磨损的影响。随着磨损载荷的增加, 复合材料的失效类型由界面脱粘转变为裂纹。在 60 N 载荷下, 复合材料的摩擦系数显著降低, 磨损率比铝合金低 48%。杨斌等人^[42]通过球磨混粉+半固态烧结法成功制备出质量分数为 0.5% 的石墨烯/7075 铝基复合材料, 结果表明, 复合材料中的石墨烯纳米片均匀的分散在 7075 铝合金基体中, 相比于未添加石墨烯的 7075 铝合金基体, 复合材料的密度有所下降, 硬度和抗拉强度则分别提高了 14% 和 32%。

2 铝合金半固态制浆工艺

半固态金属浆料的制备是半固态加工中最关键的技术环节之一, 浆料的性质直接影响着后续半固态成形件

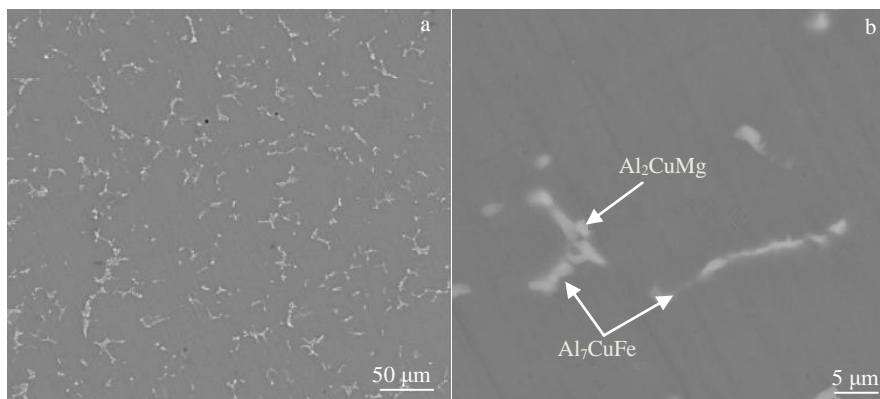


图 2 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{np}/7075$ 铝基复合材料在 480 °C 固溶 5 h SEM 照片

Fig.2 SEM images of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{np}/7075$ aluminum matrix composites after solid solution at 480 °C for 5 h^[36]

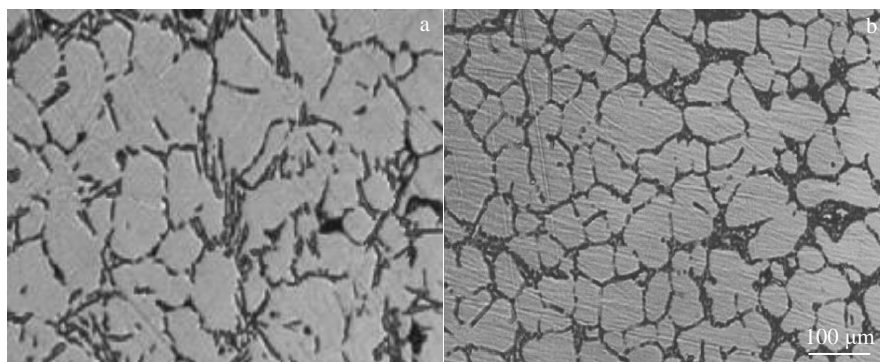


图 3 不同 Sc 含量 A356 铝钪合金半固态组织

Fig.3 Microstructures of semi-solid A356 alloy with different Sc mass fractions: (a) 0% and (b) 0.2%^[38]

的组织与性能。一般来说，评价半固态浆料的好坏主要依据是晶粒尺寸及分布是否均匀、晶粒的球化程度等。目前常见的制浆工艺有机械搅拌法、机械振动法、电磁搅拌法、脉冲磁场技术、超声振动技术、近液相线铸造法、应变诱导熔化激活法、蛇形通道浇注工艺、冷却斜坡法、阻尼冷却管法及分散混合流变制浆工艺等 10 余种。

2.1 机械搅拌法

机械搅拌法采用螺旋式搅拌器或者剪切力来强化凝固过程中金属液的流动使得枝晶折断、破碎，从而形成弥散球状静态颗粒的半固态组织^[43]。杨柳青^[44]研究了双螺旋高强度搅拌剪切对半固态 A357 铝合金浆料组织的影响。研究表明，搅拌时间越长，坯料组织中初生 α -Al 晶粒圆整、均匀，但尺寸逐渐增大。周冰^[45]采用自主研发的强制对流搅拌装置成功制备了 A356 铝合金半固态浆料。结果表明，当浇注温度为 620~630 °C，模具温度为 570~580 °C，转速为 200 r/min 以上时，均能获得理想的半固态浆料。为了得到质量更好的半固态浆料，阮明^[46]采用优化之后的低过热度弱机械搅拌式 SSRTM 流变成形工艺，实验设备如图 4 所示。得到的 A357 合金初生 α -Al 晶粒平均尺寸为 74 μm ，形状因子为 0.86。Shusen Wu 等人^[47]结合机械搅拌和超声振动法制备了半固态 SiC/A356 铝合金复合材料浆料。研究表明，浆料的抗拉强度和伸长率为 259 MPa、5.3%，比 A356 合金分别提高了 20%、15%。

2.2 机械振动法

机械振动在金属凝固过程中施加振动可以影响晶粒形核和长大过程，从而获得非枝晶的金属浆料。Abu-Dheir Numan 等人^[48]研究了机械振动对 Al-Si 合金微观组织的影响。实验表明，随着振幅的增加，微观组织先变圆而后逐渐粗化。F. Taghavi 等人^[49]采用自制的设备（如图 5 所示）指出，增加振动频率和振幅可以进一步提高晶粒细化的程度。王文俊^[50]探究了机械振动与气流搅拌复合工艺对 ZL101 铝合金浆料的影响。得到半固态浆

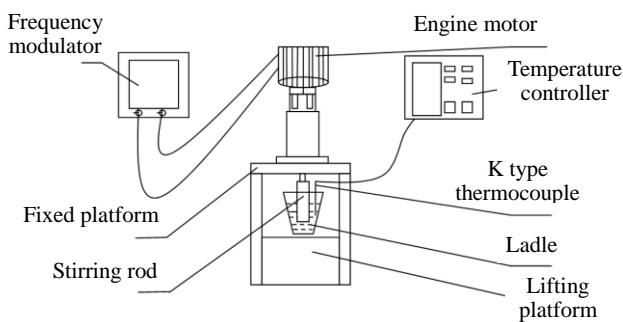


图 4 机械搅拌装置原理图

Fig.4 Principle diagram of mechanical stirring device^[46]

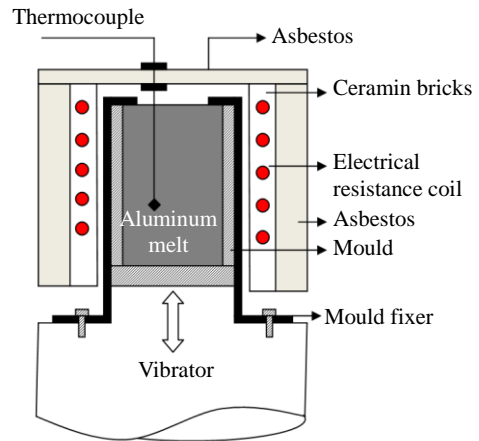


图 5 自制机械振动实验系统及设备原理

Fig.5 Self-made mechanical vibration test system and equipment principle^[49]

料平均晶粒尺寸为 60.92 μm ，形状因子为 0.42，抗拉强度为 170.9 MPa，伸长率为 5.43%。

2.3 电磁搅拌法

电磁搅拌法的工作原理就是借助电磁力来改变凝固过程的流动、传热、传质，达到细化晶粒、改善浆料质量的目的^[51]。罗浩林^[52]探究了电磁搅拌频率参数对半固态 A356 铝合金组织的影响。得出在搅拌频率为 30 Hz 时，初生 α -Al 最圆整、细小，其平均晶粒尺寸与形状因子分别为 76.1 μm 、0.8。同样，朱艳丽^[53]采用电磁搅拌法也得到了良好的半固态 7A04 变形铝合金浆料。此外，冉绍兵^[54]将电磁搅拌技术和传统的低过热度浇注技术相结合，成功地制备出了半固态 Al-30%Si 合金浆料，实验设备如图 6 所示。研究表明，初生 Si 相平均晶粒尺寸由 138.8 μm 减小至 11.49 μm ，而且均匀分布于基体上。与常规铸态铝合金相比，布氏硬度提高了 74.59%，抗拉强度增加了 46.9 MPa，伸长率提高了 7.86 倍。采用此工艺提高了过共晶 Al-30%Si 合金的综合性能，为科学研究和实际生产提供了一定的指导意义。

2.4 脉冲磁场技术

脉冲磁场技术能够显著的细化凝固组织，使初生相由粗大的枝晶状态转变为细小的球状或近球状。张磊等人^[55]利用低压脉冲磁场技术成功制备了半固态 2A12 铝合金浆料，设备如图 7 所示。最佳工艺参数如下：加热温度 620 °C，保温时间 20~40 min 时，初生 α -Al 相为均匀的近球形颗粒，平均晶粒尺寸为 79 μm ，形状因子为 0.56。邱辉^[56]研究了脉冲时间对半固态 Al-4.5%Cu 铝合金浆料的影响。研究表明：晶粒的平均尺寸随着脉冲磁场作用时间增长而先减小后增加。当作用时间为 60 s 时，效果最佳，平均晶粒尺寸达到了 89 μm 。龙文元等人^[57]

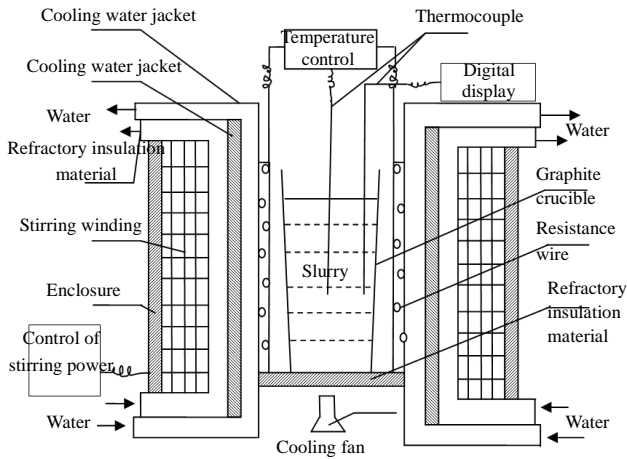


图 6 半固态合金浆料设备示意图

Fig.6 Schematic illustration of the experimental apparatus for the semi-solid-alloy slurry produces^[54]

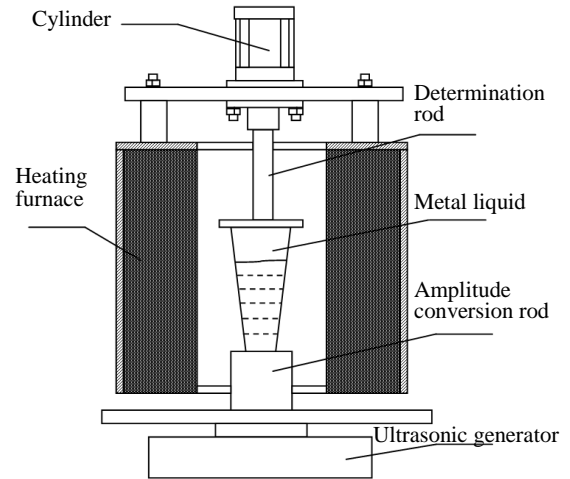


图 8 间接超声震动制备铝合金半固态浆料装置示意图

Fig.8 Schematic of the device for preparing semi-solid aluminum alloy slurry by indirect ultrasonic vibration^[58]

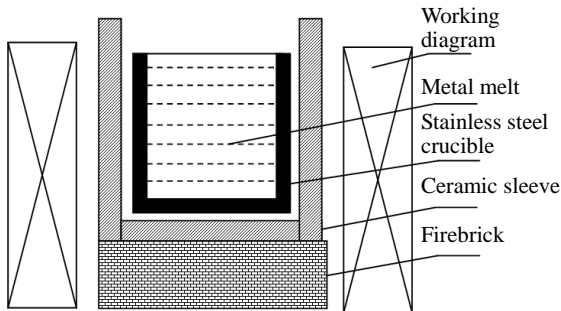


图 7 低压脉冲磁场凝固装置示意图

Fig.7 Schematic of low voltage pulse magnetic field solidification device^[55]

利用自主研发的脉冲磁场和倾斜管半固态装置制备了 Z1101 合金半固态浆料。合金中近球形的颗粒状组织明显增加，并随着脉冲电压的逐渐增加，树枝晶进一步减少，初生 α -Al 相逐渐变成以近球形的颗粒状为主，并且逐渐细化。

2.5 超声振动技术

超声振动利用超声波将初生树枝晶打碎，成为细小的晶粒，最终达到半固态成形的要求。朱明泽等人^[58]研究了间接超声振动对半固态 A356 铝合金浆料组织的影响，实验设备如图 8 所示。研究表明，对 A356 合金进行间接超声振动处理 40 s 时，得到平均晶粒尺寸与形状因子分别为 70 μm 、0.6。邓丛瑶^[59]利用改进的漏斗型双振头功率超声装置成功制备了半固态 A356 铝合金浆料。研究发现，当漏斗角度为 45°，浇注温度 610 $^{\circ}\text{C}$ 时。初生 α -Al 相平均晶粒尺寸及形状因子分别为 29 μm 、0.84。此外，H. R. Kotadia 等人^[60]采用高能超声工艺使半固态

Al-2Si-2Mg-1.2Fe-(0.5,1.0)Mn 铝合金基锭中粗大的枝晶被彻底细化为致密的细晶。刘昭亮^[61]利用功率超声与斜板冷却法相结合成功制备了 A356 半固态浆料。利用该方法使晶粒均匀细小、球化，打破以往制备半固态浆料容量的限制和减小功率超声的衰减效应，生产工艺与设备简单，具有一定的工业应用前景。

2.6 近液相线铸造法

近液相线铸造法是将合金熔体在液相线下温度保温形核后，进行铸造成形的工艺，其优点是无需制备半固态浆料或坯料即可获得球状晶^[62]。孔雪^[63]通过严格控制二次加热工艺得到了 A390 铝合金半固态浆料。当加热功率和加热温度分别为 7.3 kW、540 $^{\circ}\text{C}$ ，此时浆料微观组织细小且分布均匀，力学性能最佳。Guangfei Xiao 等人^[64]分析了二次加热工艺对半固态 7075 铝合金再结晶组织的影响。结果表明，当加热温度为 580 $^{\circ}\text{C}$ 时，再结晶基本完成，完全转变为等轴晶。此外，H. K. Jung 等人^[65]研究了感应加热工艺对半固态 A356 铝合金浆料组织的影响，实验设备如图 9 所示。研究表明：在频率 56~60 Hz，加热温度 584 $^{\circ}\text{C}$ 及保温 2 min 时，能得到较好的球状组织。Gan Li 等人^[66]研究热焓补偿工艺对半固态 7075 铝合金浆料的影响。研究表明，采用此工艺可以得到较好的半固态料浆组织。隋少华等人^[67]采用全新的循环加热方法制备了 LC9 铝合金半固态浆料。研究表明，最佳成形工艺在 620 $^{\circ}\text{C}$ 等温 10 min，循环处理 3 次时，平均晶粒尺寸可达 32 μm 。

2.7 应变诱导熔化激活法

应变诱导熔化激活法 (SIMA) 是指将试样进行加工变形，然后再加热至半固态区间保温一定时间，使粗大

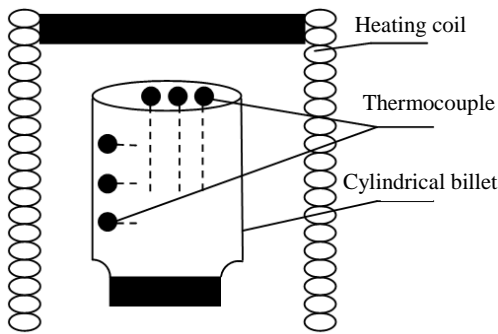


图 9 线圈和圆柱形钢坯的感应加热系统示意图

Fig.9 Schematic of induction heating system for coil and cylindrical billet^[65]

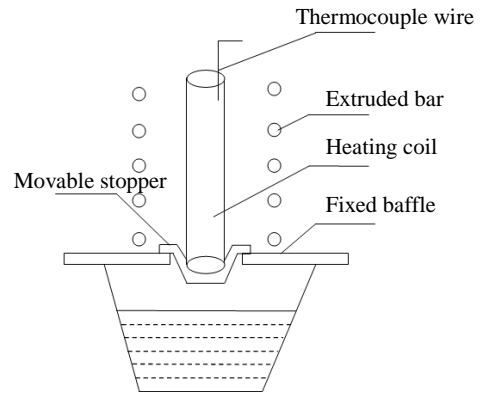


图 10 7075 挤压棒材半固态重熔实验

Fig.10 Semi-solid remelting experiment of 7075 extruded bar^[72]

的树枝晶转变为球状或近球状晶^[68]。A. Bloluri 等人^[69]研究了压缩比对半固态 7075 铝合金微观组织的影响。研究发现，晶粒的平均尺寸随着压缩比的增加先增加后下降，当压缩比为 0.3 时，晶粒圆整度最好。肖文华^[70]研究了挤压比工艺对 5083 铝合金半固态坯料的影响，得出在挤压比为 17.36，等温温度为 605~610 °C，保温时间为 15~20 min 时，树枝晶转变为球状晶，效果最佳。同时，谢金乐^[71]对 SIMA 法制备出半固态 7050 铝合金坯料进行热轧。研究表明：随着轧制温度的升高，材料的强度先升高后降低，其中热轧温度为 470 °C 时，材料的力学性能最好，抗拉强度达到了 546.0 MPa。此外，魏斌^[72]采用图 10 设备成功解释了 7075 铝合金半固态触变-塑变复合成形棒材组织演变过程，最终形成液相依附在细小圆整固相颗粒晶界处，为后续具体制件加热工艺的制定、成形参数的选择提供了有力的帮助。近年来，一种新型的等通道角挤压 SIMA 工艺被提出。韩国民^[73]采用等通道角挤压 SIMA 工艺制备了 Al-30%Si 半固态浆料。结果表明，与传统 SIMA 相比，等通道角挤压后的浆料微观晶粒更加细小。Ramin Meshkabadi 等人^[74]经过 5 道次等径角挤压，在 630 °C 等温处理 15 min，获得了良好的 7075 铝合半固态浆料组织。

2.8 蛇形通道浇注工艺

蛇形通道浇注工艺具有流程短，能耗低，设备简单和生产高效等特点，在制备半固态合金浆料和流变压铸领域具有广阔的工业应用前景^[75]。刘志勇^[76]利用图 11 设备成功制备了 A380 铝合金半固态浆料。发现当蛇形通道浇注温度在 630~650 °C 时，浆料组织中初生 α-Al 晶粒平均直径为 48 μm，形状因子为 0.81。Shujian Cheng 等人^[77]也做了相应的研究，研究表明，ZL101 半固态铝合金随着浇注温度的降低，初生相形貌由玫瑰形转变为球状。在浇注温度相同的情况下，增加蛇形变形凹槽的数量可以改善原组织晶粒的形貌，减小晶粒的尺寸。该

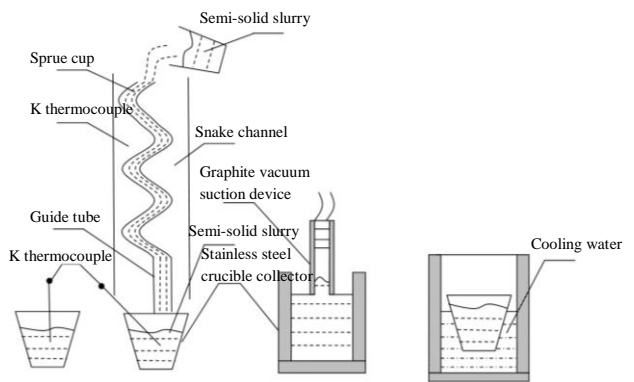


图 11 蛇形通道制备半固态 A380 铝合金浆料示意图

Fig.11 Schematic of preparing semi-solid A380 aluminum alloy slurry by serpentine channel^[76]

研究的特点是浆料在蛇形通道中具有自搅拌作用，使初生相逐渐演化为球形和近球形晶粒。

2.9 冷却斜坡法

冷却斜坡法，又叫非机械或非电磁搅拌的低过热度倾斜板浇注式流变铸造技术。Kolahdooz Amin 等人^[78]采用 FLOW-3D 软件模拟了冷却坡度法对半固态 A356 浆料的影响。模拟结果表明，浆料在冷却坡面上的停留时间必须足够长，剪切应力和湍流度必须尽可能高，才能获得球化度高、晶粒细小的最佳微观结构。Prosenjit Das 等人^[79]进一步研究了冷却坡度法制浆，从而建立了半固态浆料形核初期的体积分数、直径、密度和形状因子等特性。在此基础上，管仁国等人^[80]提出了一种新型倾斜板制浆技术，采用波浪形倾斜板设备，如图 12 所示，成功制备了性能优良的 Al-18Si-5Fe 半固态浆料。

2.10 阻尼冷却管法

利用熔体在管壁的冷却下形成许多细小的晶核，晶核形成后，将迅速长大，由于金属熔体流的冲击，使长大到一定尺寸的晶粒从管壁上脱落，随金属熔体流入下

面的容器，进一步迅速冷却合金熔体，获得较理想的半固态浆料。张小立^[81]采用阻尼冷却管法制备了 A356 铝合金半固态浆料，实验设备如图 13 所示。结果表明，浇注温度越低，铸件晶粒尺寸数值就越小，晶粒球化程度越高。与冷却斜槽法相比，具有可控性好，金属熔体不与空气接触而避免氧化等特点。

2.11 分散混合流变制浆工艺

梁博等人^[82]利用熔体分散原理，采用分散混合流变制浆工艺(MSMT)成功制备了半固态 Al-6.6Si 铝合金浆料，设备如图 14 所示。研究了合金浆料保存过程中冷却速率、保温时间对浆料组织的影响规律。发现冷却速率越大，浆料组织中初生相越细小，但冷却速率过大，初生相界面发生失稳，向树枝晶演变的趋势，降低了浆料的流动性；保温时间是影响浆料组织的一个重要因素，随着时间的延长，初生相形貌越来越圆整，尺寸有所增加，在 2 min 以内组织良好，能满足后续成形对浆料质量的要求。

半固态成形技术的首要关键技术环节是制备含有球

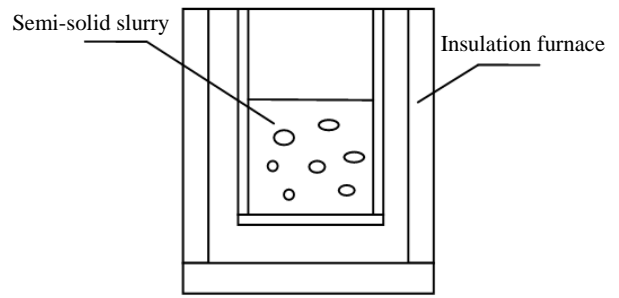


图 14 浆料保存装置示意图

Fig.14 Schematic of slurry storage device^[82]

形固相的浆料，但是目前已有的制浆技术仍存在不足之处。需改变传统单一制浆工艺，实现多种复合技术的有机结合，通过各种技术的优势互补，可制备晶粒细小、球形度高的半固态金属浆料，并同时解决传统半固态金属浆料制备技术中存在的易卷气、易污染、效率低、成本高等瓶颈问题，显著提高产品性能，推动行业技术进步。

3 应用

随着科技与经济快速发展，航空、航天、国防和电子工业技术对铝合金的质量要求日益严格，对优质铸件的需求迫切^[83,84]，铝合金材料的纯净化与组织调控是获得优质铸件两大共性关键技术，虽然我国铝合金材料的制备技术水平取得了显著进步，但在材料的纯净化与组织调控方面与发达国家水平相比仍存在较大差距，导致飞机铝合金材料、军用车辆铝合金活塞等高端铝合金材料仍依赖进口。

在铝合金纯净化方面^[85]，如何最大限度的降低材料中的杂质与气体是业内重点解决的共性难题。传统的熔炼与铸造工艺中，由于空气中的水汽、氧气等与金属熔体原子的物理化学作用，铝合金在熔炼、转包、浇铸过程中极易吸气、氧化，从而在凝固后的铸件中形成杂质缺陷^[86]，并且由于气体在高温与室温下金属中的溶解度不同，从而在铸件中形成气孔等一系列缺陷，显著降低了材料的力学性能、疲劳性能以及耐腐蚀性能等。为此，业内开发出了旋转喷吹搅拌熔体净化技术，利用多孔的旋转搅拌器，其中通入一定压力的氮气或氩气，在熔体中形成弥散的气泡并逐渐上浮到熔体表面，利用粘附力将熔体中的杂质与气体运载到表面而除去^[87,88]。但是这种技术净化能力有限，一般铝合金的净化水平为 0.10~0.15 mL/100 g Al，而航空等高端铝材通常要求达到 0.10 mL/100 g Al 以下。为此，亟需开发深度净化技术。

在铸造过程组织性能调控方面，半固态流变铸造技术已成为降低铸造缺陷，调控铸件组织性能的先进成形技术，被誉为 21 世纪最有应用前景的绿色加工技术。该

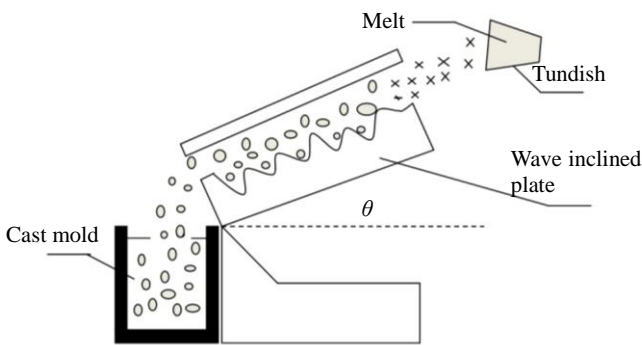


图 12 波浪形倾斜板流变铸造基本原理示意图

Fig.12 Schematic of the basic principle of rheological casting of wavy inclined plate^[80]

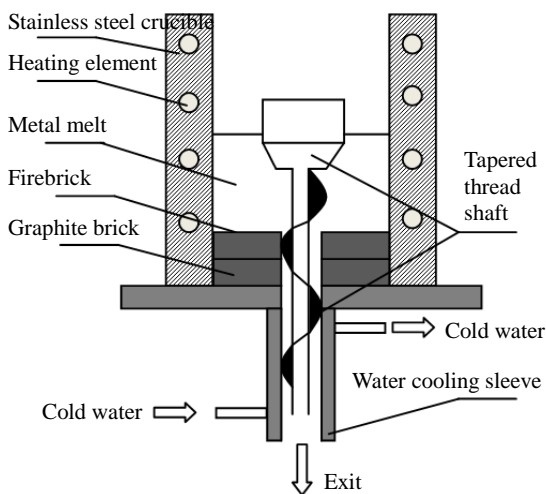


图 13 阻尼冷却管设备

Fig.13 Damped cooling pipe equipment^[81]

技术的首要关键技术环节是制备含有球形固相的浆料,但是已有的制浆技术存在两大弊端:需要单独的制浆工作站,浆料的制备过程、转运过程温度与固相率波动大,成形工艺控制难,成本高;已有制浆技术主要是搅拌技术熔体容易卷气,易污染、效率低等,因为这些技术均为在非真空条件下的制浆方式,难以克服熔体卷气和氧化夹杂,在铸件中不可避免的产生气孔与杂质缺陷,从而使铸件的性能大幅度下降,因此未能大规模应用。开发高效、低成本、洁净化制浆技术对推动半固态流变成形技术发展具有重要意义。

东北大学管仁国与松山湖材料实验室付莹团队针对上述铝合金净化与半固态流变铸造技术中存在的共性关键问题,提出了铝合金真空净化与制浆一体化技术,在较高的真空条件下采用机械搅拌对熔体进行净化,在差压作用下使熔体中的气体和微小杂质从熔体中排出^[89];真空净化后,将熔体静置,使熔体温度降低到略低于液相线温度,在真空条件下进行机械搅拌,制备具有一定固相率的半固态金属浆料,随后进行流变铸造成形。该技术解决了在常压下净化能力有限的难题,避免了在空气中搅拌时氧化夹杂的产生,使熔体深度净化,达到国际领先水平。实现了真空净化与半固态金属浆料制备的一体化,不需要单独的制浆工序和设备,突破了传统制浆方法单独设置制浆站时效率低、浆料输送困难、工艺控制难、成本高等技术瓶颈,工艺高度简化,在单机上实现净化和制浆双功能,并且解决了传统制浆工艺中卷气、引入缺陷的难题,浆料的纯净度高,且具有短流程、低成本的显著优势。

4 铝合金半固态成形未来发展方向

半固态成形作为低成本、低能耗的新型工艺技术,是实现铝合金近净成形的有效途径^[90],但要想使这项先进的金属加工技术得到快速发展,还需要在从以下几方面加大力度研究:

1) 目前半固态成形用铝合金大多数为铸造及铝基复合材料,而在开发多元合金化方面相对较少,因此拓展合金材料新领域显得尤为重要。例如:Al-Li 合金具有低密度、优异的比强度、低温性能,良好的耐腐蚀性和卓越的超塑成形性等特点,取代常规铝合金后,质量可减轻 10%~20%,刚度提高 15%~20%,但至今还鲜有关于半固态 Al-Li 研究的报道。

2) 改变传统单一制浆工艺,实现多种复合技术的有机结合,制备出晶粒细小、球形度高的半固态金属浆料,这将极大地改善浆料质量不理想、制浆效率低的技术瓶颈。

3) 目前常见的半固态制浆工艺已有 10 余种且各具特色^[91],但半固态制浆技术开放环境居多,在熔体保护和熔体净化方面尚有缺陷,能否制备高纯净度浆料的关

键在于制浆过程要保持相对封闭,且能保证纯净度。因此,开发高效、洁净化的真空制浆技术对推动半固态成形技术具有重要意义。

参考文献 References

- [1] Zhou Song(周松). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013
- [2] Li Ming(李明). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018
- [3] Li Nannan(李楠楠). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018
- [4] Kang Yonglin(康永林), Zhang Fan(张帆), Zhou Bing(周冰) et al. *Nonferrous Metals Science and Engineering*(有色金属科学与工程)[J], 2011, 21(6): 1
- [5] Wang Nan(王娜). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010
- [6] Xie Lijun(谢丽君), Xu Jun(徐骏), Yang Bicheng(杨必成) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2006, 35(5): 70
- [7] Zhang Zhifeng(张志峰), Xu Jun(徐骏), Shi Likai(石力开). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2005, 4(9): 3
- [8] Xiang Qiang(向前). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008
- [9] Chen Zhongwei, Zhao Yanni, Zhang Zhe. *Vacuum*[J], 2021, 189(12): 110 263
- [10] Yucel Birol. *Thermochimica Acta*[J], 2018, 663(5): 189
- [11] Chen Lijuan(陈莉娟), Yang Huimin(杨慧敏), Tao Shufen(陶淑芬). *Science Technology Vision*(科技视界)[J], 2015, 15: 37
- [12] Pan Zhiyong(潘志勇). *MW Metal Forming*(金属加工)[J], 2008, 4(7): 53
- [13] Wang Ping(王平), Gao Chao(高超), Lu Wenquan(卢温泉) et al. *Journal of Northeastern University, Natural Science*(东北大学学报, 自然科学版)[J], 2009, 30(12): 1747
- [14] Liu Jinsong(刘劲松). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Hunan University, 2005
- [15] Wang Na, Zhou Zhimin, Lu Guimin et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2011, 1(27): 10
- [16] Wang Xue(王雪), Li Ping(李萍), Zhu Guangyu(朱广余). *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2012, 4(6): 71
- [17] Zhao Chenxi, Li Yang, Xu Jin et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 94: 104
- [18] Cheng W, Liu C Y, Ge Z J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 804(15): 140 786
- [19] Zheng Zhiqiang(郑志强), Xiong Xingen(熊新根), Hu Fotao(胡佛涛) et al. *Special-cast and Non-ferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2009, 29(12): 1112
- [20] Zhu Liang(朱亮). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin:

- Harbin Institute of Technology, 2019
- [21] Zheng Zhikai(郑志凯), Mao Weimin(毛卫民), Wang Dong(王东). *Special-cast and Non-ferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2017, 37(1): 61
- [22] Liao Fujin(廖福锦). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018
- [23] Min Z, Hmz B, Xtm B *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 89: 141
- [24] Guan Renguo(管仁国), Kang Liwen(康立文), Du Haijun(杜海军) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2006, 16(5): 811
- [25] Lv Shulin(吕书林). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012
- [26] Bochvar N R, Rybalchenko O V, Yu N *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 188(10): 160 583
- [27] Liu Likun(刘立坤). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Shanghai: Shanghai University, 2009
- [28] Li Meicheng, Seyeux Antoine, Fr'ed'eric Wiame *et al. Corrosion Science*[J], 2020, 176: 109 040
- [29] Arunkumar T, Selvakumaran T, Subbiah R *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2021, 76: 105 631
- [30] Wang Hongkun(王宏坤), Huang Jiewen(黄洁雯), Wu Qiang(吴锵). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2002, 12(4): 774
- [31] Nie Xi(聂希). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [32] Jiang Jufu, Wang Jing. *Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 582(4): 350
- [33] Zhao Zude(赵祖德), Cheng Yuansheng(程远胜), Zhu Shifeng(朱世凤) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2007, 17(9): 1460
- [34] Zhang Songyang(张颂阳), Chao Yanan(曹亚楠), Zhang Xing(张星) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2011, 40(6): 66
- [35] Meng Mingai(孟明艾), Chen Gang(陈刚), Zhao Yutao(赵玉涛) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2019, 48(14): 68
- [36] Zhou Xiuliang(邹秀亮). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017
- [37] Zhao Junwen, Xu Chao, Dai Guangze *et al. Materials Letters*[J], 2016, 173(15): 22
- [38] Zhao Bin(赵宾), Li Ping(李萍), Xu Jie(徐杰) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2015, 36(2): 23
- [39] Zhen Qingchun(谌庆春). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014
- [40] Rogal Ł, Dutkiewicz J, Atkinson H V *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 580(1-2): 362
- [41] Tie Di, Ren Haobo, Guan Renguo *et al. Materials Research Express*[J], 2020, 7(5): 2053
- [42] Yang Bin(杨斌), Du Gengxin(杜更新), Cheng Fulai(程福来) *et al. Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术)*[J], 2018, 36(4): 303
- [43] Sukumaran K, Pai B C, Chakraborty M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 369(2): 275
- [44] Yang Liuqing(杨柳青), Xu Jun(徐骏), Liu Guojun(刘国钧) *et al. Foundry(铸造)*[J], 2012, 61(2): 143
- [45] Zhou Bing(周冰), Kang Yonglin(康永林), Hao Junzhen(郝俊震) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2014, 24(1): 61
- [46] Luan Ming(阮明). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Shenyang: Shenyang Foundry Research Institute, 2015
- [47] Wu Shusen, Yuan Du, Chen Qiang *et al. Solid State Phenomena*[J], 2019, 285: 33
- [48] Numan Abu-Dheir, Marwan Khrisheh, Kozo Saito *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 393(1-2): 109
- [49] Taghavi F, Saghafian H, Kharrazi Y H K. *Materials and Design*[J], 2009, 30(1): 115
- [50] Wang Wenjun(王文俊). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011
- [51] Sukumaran K, Pai B C, Chakraborty M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 369(2): 275
- [52] Lou Haolin(罗浩林). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016
- [53] Zhu Yanli(朱艳丽). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014
- [54] Ran Shaobing(冉绍兵). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007
- [55] Zhang Lei(张磊), Yuan Xiulin(袁秀林), Rao Junping(尧军平). *Special Casting & Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2013, 33(1): 25
- [56] Qiu Hui(邱辉). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012
- [57] Long Wenyan(龙文元), Liu Xuan(刘煊), Liu Weiguo(刘伟国). *Special Casting & Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2017, 37(2): 121
- [58] Zhu Mingze(朱明泽), Wu Shusen(吴树森), Lv Shulin(吕书林) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2011, 21(2): 325
- [59] Deng Congyao(邓丛瑶). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014
- [60] Kotadia H R, Qian M, Das A. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 823: 153 833
- [61] Liu Zhaoliang(刘昭亮). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012
- [62] Wang Shaozhu, Ji Zesheng, Sugiyama Sumio *et al. Materials & Design*[J], 2015, 65: 591

- [63] Kong Xue(孔雪). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Beijing: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, 2015
- [64] Xiao Guanfei, Jiang Jufu, Liu Yingze *et al.* *Materials Characterization*[J], 2019, 156: 109 874
- [65] Jung H K, Kang C G. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 120(1-3): 355
- [66] Li Gan, Lu Hongxing, Hu Xiaogang *et al.* *Solid State Phenomena*[J], 2019, 285: 373
- [67] Sui Shaohua(隋少华), Song Tiange(宋天革), Zhao Hongyun(赵洪运). *Foundry*(铸造)[J], 2007, 56(1): 10
- [68] Chandan Choudhary, Sahoo K L, Mandal D. *Materials Today: Proceedings*[J], 2018, 5(13): 107
- [69] Bolouri A, Shahmiri M, Kang C G. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509(2): 402
- [70] Xiao Wenhua(肖文华). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011
- [71] Xie Jinle(谢金乐), Liu Yunzhong(刘允中), Wu Huihong(吴汇红) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2011, 31(9): 816
- [72] Wei Bin(魏斌). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [73] Han Guomin(韩国民). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009
- [74] Meshkabadi Ramin, Faraji Ghader, Javdani Akbar *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(12): 3091
- [75] Chen Liwen, Zhao Yuhong, Yan Feng *et al.* *Journal of Alloys & Compounds*[J], 2017, 275(25): 673
- [76] Liu Zhiyong(刘志勇). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015
- [77] Cheng Shujian, Zhao Yuhong, Hou Hua *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(7): 1820
- [78] Amin Kolahdooz, Sasan Aminian. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(1): 189
- [79] Prosenjit Das, Pradip Dutta. *Computational Materials Science*[J], 2020, 184: 109 856
- [80] Guan Renguo(管仁国), Zhao Zanyong(赵占勇), Huang Hongqian(黄红乾) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2011, 31(1): 1
- [81] Zhang Xiaoli(张小立), Xie Shuisheng(谢水生), Li Tingju(李廷举) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(5): 915
- [82] Liang Bo(梁博), Xu Jun(徐骏), Zeng Yidan(曾怡丹) *et al.* *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2009, 30(2): 164
- [83] Li Yue, Li Hongxiang, Laurens Katgerman *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2020, 117: 100 741
- [84] Jiang Wenming, Zhu Junwen, Li Guangyu *et al.* *Journal of Materials Science and Technology*[J], 2021, 88: 119
- [85] Fashu Simbarashe, Hu Qiandan, Li Jianguo. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*[J], 2011, 52(3): 254
- [86] Zhang Chunli. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*[J], 2017, 33(3): 35
- [87] König A, Schreiner A. *Powder Technology*[J], 2001, 121(1): 88
- [88] Lazaro-nebreda Jaime, Patel Jayesh B, Fan Zhongyun. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 6: 117 146
- [89] Wan Heli, Xu Baoqiang, Yang Bin *et al.* *Vacuum*[J], 2020, 171: 108 839
- [90] Kiuchi M, Kopp R. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2002, 51(2): 653
- [91] Li Gan(李干), Lu Hongxing(卢宏兴), Lou Ming(罗敏) *et al.* *Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2020, 12(3): 29

Research Progress of Al Alloy Semisolid Forming Technology

Pan Shuai¹, Fu Ying², Wang Yu¹, Yang Bowei¹, Liu Yan¹, Yu Jiangwei¹, Guan Renguo^{1,3}, Tie Di³

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Songshan Lake Material Laboratory, Dongguan 523808, China)

(3. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: With the rapid development of science and technology and the economy, the demand for high-quality aluminum alloy casting is urgent in the fields of aviation, aerospace, military, and electronics industry technology. Preparation of high-quality aluminum alloy by semi-solid forming technology is one of the important research directions of aluminum alloy forming technology. The present status of aluminum alloy semi-solid forming technology from three fields, including aluminum alloy material used, a semi-solid pulping process, and application was introduced. The problems existing in the current research were pointed out, and the future development direction of the semi-solid forming of aluminum alloys was prospected.

Key words: Al alloy; semi-solid forming; research progress

Corresponding author: Guan Renguo, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, E-mail: guanrenguo@sina.cn