

半固态流变成形技术及其应用现状

刘志中, 阮明, 冯志军

(沈阳铸造研究所, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 本文总结了国外几种应用较广泛的半固态流变成形技术, 对每种流变成形技术的制浆原理进行了较详细的介绍, 并对其应用进行了简要的介绍。

关键词: 半固态; 流变成形; 应用现状

近几年来, 随着我国航空、航天、武器装备、轨道交通、医疗器械、汽车等领域的不断发展, 对优质复杂铝合金精密铸件的需求量不断扩大, 如航空用的仪表壳体、航天用的铝合金光学镜架、汽车横梁、控制臂、转向节、连杆等零件等。未来五年是中国航空航天事业发展的重要机遇期, 中国政府将大力推进发展新支线飞机、大型飞机、直升机和先进发动机、机载设备^[1]。我国武器装备的不断更新换代, 对零部件的性能、集成度、精度等方面均提出了更高的要求, 对铸件毛坯的要求也相应的提高, 要求铸件的抗拉强度达到 400MPa, 伸长率 3% 以上。利用传统铸造工艺生产该类合金铸件容易产生多种缺陷, 例如缩孔、缩松, 裂纹, 偏析等, 特别是裂纹、偏析极难解决甚至无法避免; 而且传统铸造工艺生产效率较低、能量消耗大, 无法满足航空、航天等领域的需求^[2]。然而半固态流变技术以其独特的优势: (1) 半固态浆料在型腔内以层流形式存在, 导致半固态浆料在凝固的过程中少卷气, 而且凝固收缩和热裂倾向性较小, 因此铸件致密, 可以热处理强化; (2) 铸件晶粒细小, 不存在宏观偏析, 性能更均匀; (3) 半固态流变成形易于近净成形, 机加工量减少; (4) 半固态流变成形浆料温度低, 对模具热冲击小, 模具寿命长, 被誉为 21 世纪最有发展前途的金属材料加工技术之一^[3]。许多半固态流变成形技术正在取得突破性进展, 本文简要论述国外几种比较前沿的流变成形技术及其应用现状。

1 低过热度弱机械搅拌式流变成形技术

2000 年, 美国麻省理工学院的 Martinez 和 Flemings 等提出了低过热度弱机械搅拌式流变成形技术 (Semi-Solid Rheocasting 简称 SSRTM), 该流变成形工艺流程如图 1 所示^[4]。首先将低过热度的合金液 (以 A356 合金为例, 过热度仅为 7℃) 浇注到制备坩埚中, 利用石墨搅拌杆对坩埚中的合金液进行短时 (搅拌时间一般在 5~20s) 弱机械搅拌, 使合金熔体冷却到液相线以下 (低于液相线 2℃); 然后移走搅拌器, 待坩埚中的流变压铸。半固态合金液静态冷却到预定的温度或固相分数后, 将其倾入压铸机压室, 进行流变压铸成形。

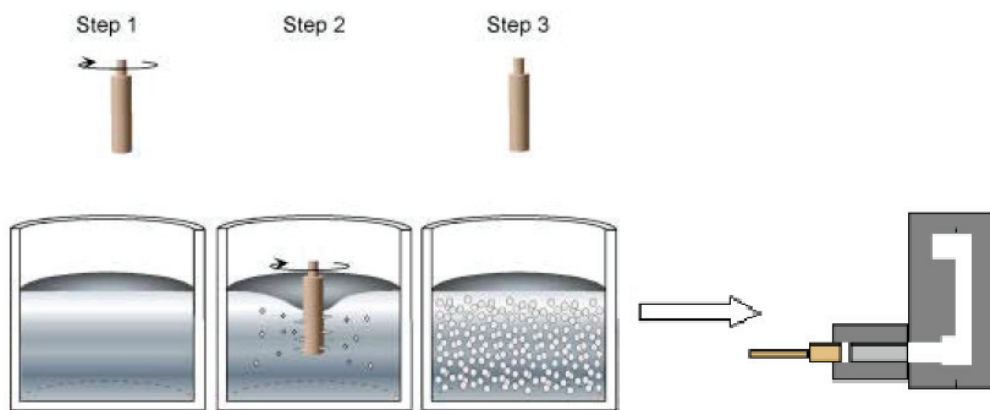


图 1 SSRTM 流变成形技术示意图

美国麻省理工学院的研究表明, 制备非枝晶半固态浆料的关键因素是: 在合金凝固的最初期, 对合金熔体进行快速冷却, 快速移除合金熔体中的过热, 再加上较强对流的复合作用, 使合金熔体各处均处于形核和凝固中, 一旦形成一定量的初生晶核后, 搅拌就失去了作用, 即可停止搅拌, 在此后的静态控冷过程中初生晶粒就会自动转变成球状晶粒。研究还表明移除合金熔体过热量的大小取决于搅拌时间, 合金熔体的对流量取决于搅拌速度, 而且当熔体温度降低到液相线以下时, 半固态颗粒的形态因子几乎不受到搅拌速度的影响^[5]。

SSRTM工艺曾在 2001 年北美压铸会议上讨论, 并于 2002 年转让给 Idra Casting Machines 公司。在美国麻省理工学院研究成果基础上, Idra 公司开发了半固态浆料制备及流变成形设备 SSRTM Station^[6], 如图 2 所示。目前, Idra Casting Machines 公司已经利用 SSRTM Station 成功低固相率压铸了 A356、A357、A380 铝合金, 对于 A356 合金, 其熔体开始搅拌温度控制在 635~665℃之间, 搅拌完毕浆料浇注温度控制在 605~610℃之间, 浆料固相率控制在低于 20%。与传统高压铸造相比, 获得的铸件气孔率得到降低, 硬度相当, 生产周期缩短约 50%。

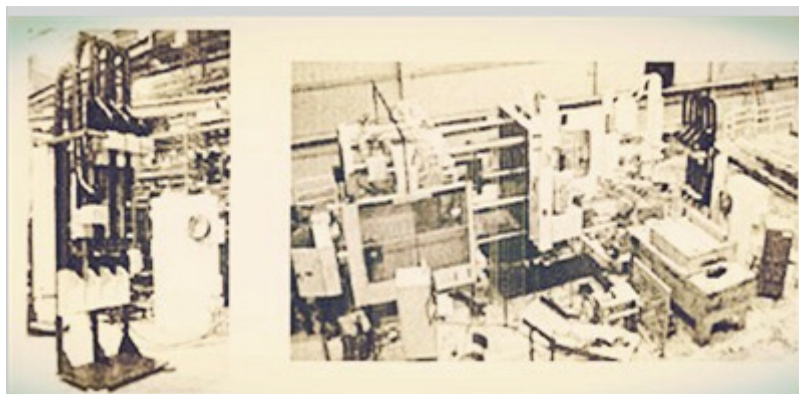


图 2 Idra 公司半固态浆料制备及其流变成形设备 SSRTM Station

目前, Idra 公司正已经应用 SSRTM 流变成形技术大批量一些铝合金压铸件, 例如燃油泵、悬挂支臂 (见图 3a) 和刹车盘卡钳 (见图 3b)。而且随着汽车行业对车辆轻量化要求的增加, Idra 公司指出 SSRTM 流变成形技术将在汽车缸体、气缸头、进气歧管、车轮等方面具有很大的应用潜力。

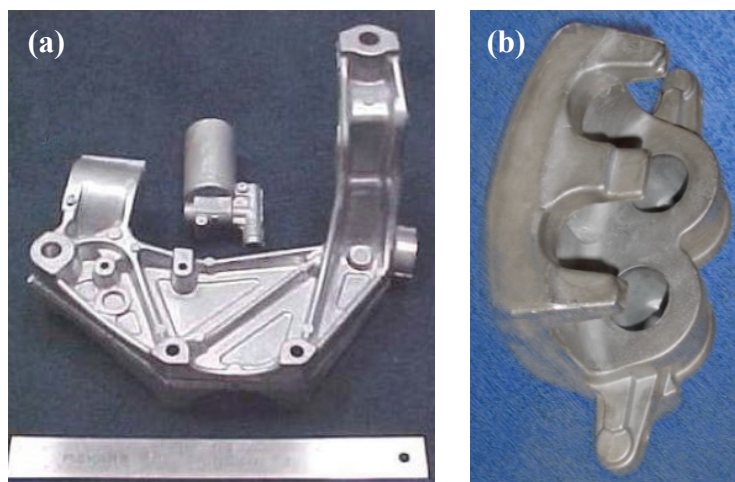


图 3 Idra 公司 SSRTM 流变成形技术生产的压铸件

2 低过热度倾斜板浇注式流变成形技术

1996 年, 日本 UBE 公司申请了非机械或非电磁搅拌的低过热度倾斜板浇注式 (New rheocasting process, 简称 NRC) 流变成形技术^[7]。New Rheocasting 技术路线的核心是: 首先降低浇注铝合金的

过热度，将铝合金液浇注到一个倾斜板上，铝合金熔体经过倾斜斜板冷却和剪切作用后再流入到收集坩埚，这时的半固态铝合金熔体中的初生固相就呈球状，均匀分布在低熔点的残余液相中；最后对收集坩埚中的铝合金浆料进行温度调整，以获得尽可能均匀的温度场或固相率。当收集坩埚中的半固态铝合金浆料制备完毕之后，立即将其送入压铸机的压室、挤压铸造机的压室或锻造机的锻模中，进行流变铸造。该工艺后来经后续改进取消了倾斜板，而在熔体浇注时直接将收集坩埚倾斜，可取得与倾斜板相同的浇注效果。该工艺具体流程见下图 4 所示^[8]。

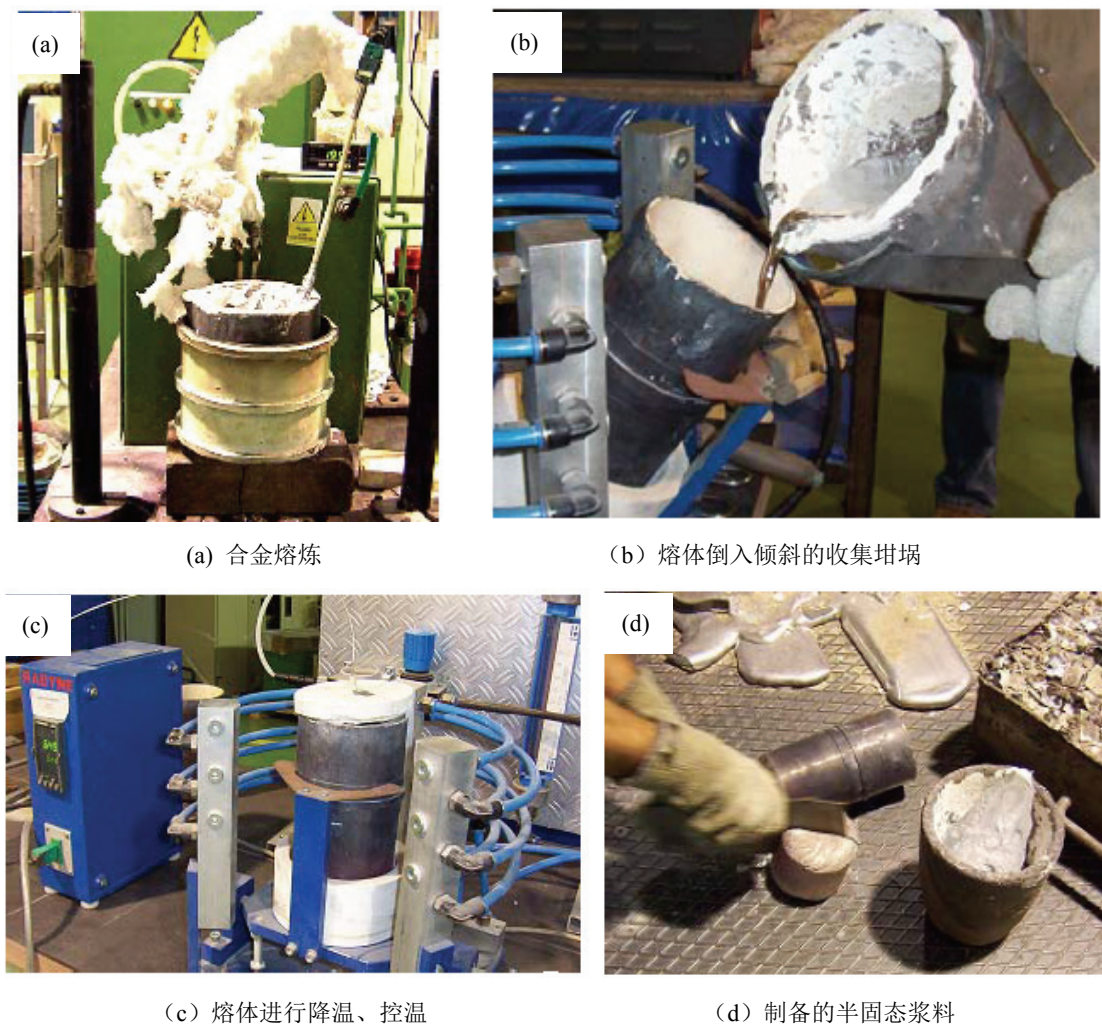


图 4 NRC 制浆工艺流程示意图

NRC 技术的实施可以明显缩短金属半固态铸造的工艺流程，降低生产成本，所以，NRC 技术已经在一些公司投入生产，如奥地利的 LKR 公司，意大利的 Stam-pal 公司等。在意大利的 Stampal 公司，利用 NRC 流变成形技术流变挤压铸造了许多汽车用铝合金铸件，如发动机油轨、支架、支架臂、支架盖、传动齿轮变速杆及柴油发动机泵体。

3 CSIR 流变成形技术

CSIR 是由南非科学与工业研究委员会 (CSIR) (council for scientific and industrial research) 开发的流变压铸技术。CSIR 流变成形技术的核心思想是：将接近液相线的合金熔体舀到浇杯中，在升降机构的作用下沿着竖直方向移动，在浇杯移动的过程中先通过一个空气强冷装置，熔体的温度由强制空气冷却控制；当熔体温度降低到一定程度时，浇杯移动到电磁感应线圈中，熔体在电磁搅拌的作用下初生枝晶被打碎，当浆料固相率 f_s 达到 30% 时，再用机械手将浇杯转移到高压压铸机附近并

进行压铸成形^[9]。CSIR 流变成形技术站设备如图 5 所示。

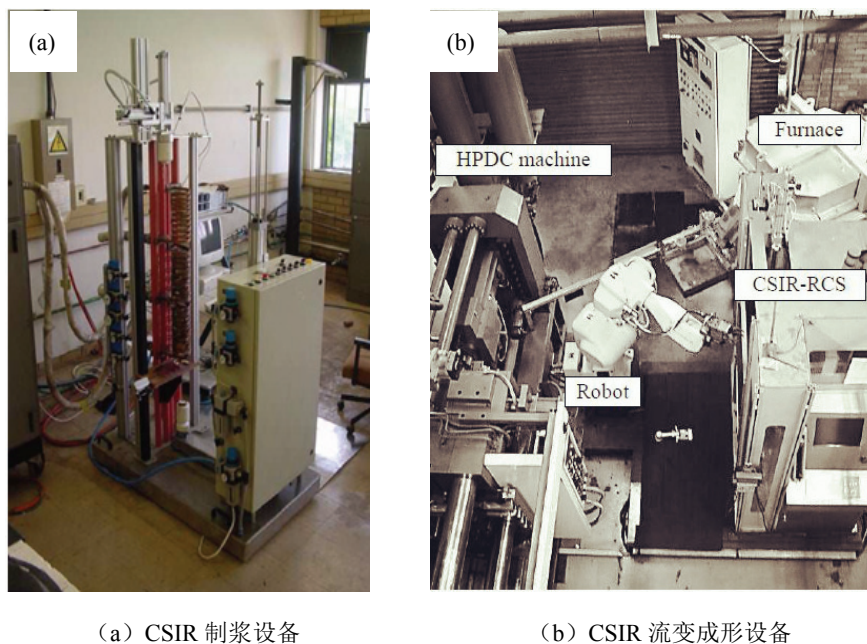


图 5 CSIR 流变成形技术站设备示意图

南非科学与工业研究委员会拥有 130t 和 630t 两套压铸成形系统,主要用于铝合金及镁合金成形,目前研究的铝合金主要有 Al-Si-Mg、Al-Zn-Mg-Cu 等。该技术委员会利用 CSIR 流变成形技术开发了制动钳和发动机连杆等零件,如图 6 所示。

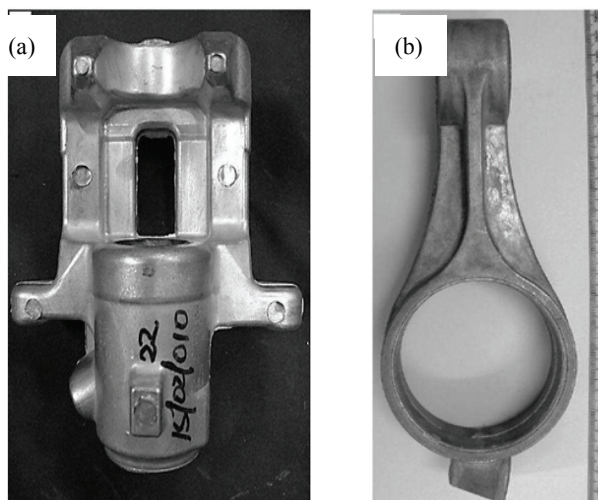


图 6 CSIR 流变成压铸成形的铸件

4 RheoMetal 流变成形技术

RheoMetal 流变成形技术也叫 RSF (rapid slurry forming) 方法,由瑞典延雪平大学(Jonkoping University)开发,其基本原理是用熵交换材料(enthalpy exchange material, EEM)来移除熔体的过热,并且在搅拌的作用下熔体内部发生较强的对流,从而制备出浆料,其浆料的固相率主要是由 EEM 的质量及大小来控制,如图 7 所示^[10]。控制该方法制备浆料质量的关键因素包括合金成分、搅拌速度、EEM 比例、EEM 温度、和熔体过热度。该工艺的制浆原理可用以下两个公式表示,公式(1)是熔体冷却和部分凝固释放的热量,公式(2)是熵交换材料 EEM 被加热和熔化吸收的热量,当熔体释放的热量与 EEM 吸收的热量相平衡时,即可获得温度均匀的半固态浆料。

$$\Delta Q_{melt} = V_{melt} \cdot \rho_{melt} \cdot \left[\underbrace{C_{p_{melt}} \cdot (T_0^{melt} - T_{Slurry})}_{\text{熔体冷却}} + \underbrace{\Delta H_{melt} \cdot f_S^{slurry}}_{\text{部分凝固}} \right] \quad (1)$$

$$\Delta Q_{eem} = V_{eem} \cdot \rho_{eem} \cdot \left[\underbrace{C_{p_{eem}} \cdot (T_{Slurry} - T_{eem}^0)}_{\text{EEM被加热}} + \underbrace{\Delta H_{eem} \cdot (1 - f_S^{slurry})}_{\text{EEM部分熔化}} \right] \quad (2)$$

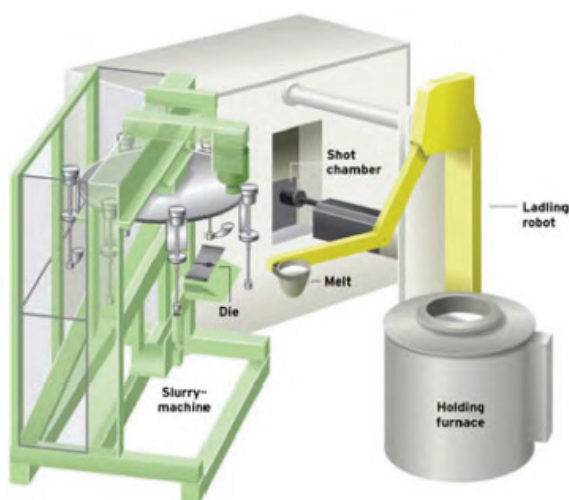


图7 RheoMetal 流变成形设备示意图

目前 RheoMetal 流变成形技术已经在我国福建三名市得到应用，使用该技术已经批量生产了部分零件，例如纺织机配件、铝合金车轮、空调压缩机涡轮等。具体如图 8 所示。



图8 RheoMetal 流变成形铸件

5 偏旋热焓平衡式流变成形技术

偏旋热焓平衡式流变成形工艺 (Swirled enthalpyequilibration device, 简称为 SEED) 是加拿大 Alcan 铝公司提出的一种流变成形技术。该技术的核心思想是：将接近液相线的合金熔体倒入一个倾斜的坩埚中，在坩埚下方设有一个偏心旋转杆，由于合金熔体温度较低，在冷的坩埚壁上首先形成一部分晶核，该晶核在偏心旋转的剪切作用下从坩埚壁游离出来，而且由于偏心旋转的作用合金熔体内部发生较大的对流，在这两者的相互作用下最初形成的初生 α (Al) 晶核转变为球状，熔体经碰撞冷却之后最终获得固相率为 30%~45% 非枝晶半固态浆料。该工艺的偏心旋转转速大约在 200r/min，旋转时间在 30~60s，能制备 1~18kg 的半固态浆料^[1]。SEED 制备工艺的关键是控制浇注温度和熔体的浇注质量，其制备半固态浆料工艺流程如图 9 所示。

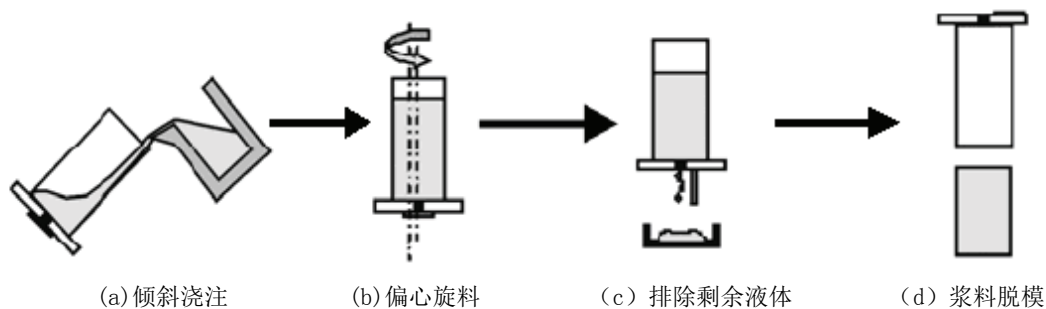


图9 SEED 制浆工艺流程

SEED 式流变成形试验过的合金有 A206、A319、A356/357、A6061、A6082、Al-3Mg-1Mn、Al-5Si(0、0.25、0.5、1.0Cu)等，并且实验研究了一种高强度 Al-Cu 合金。实验结果表明，随着硅含量的增加合金的热裂倾向大大降低，而且铁的含量对合金的伸长率影响不明显，综合性能考虑获得最佳的合金成分为 Al-4.4Cu-0.8Si-0.15Fe。使用该合金半固态压铸成形的试棒经 T7 热处理（500℃固溶 10h，然后在 65℃水中淬火，并且自然时效 12h，再在 195℃进行人工时效 4h）之后，其抗拉强度达到 370MPa，伸长率为 9.5%，屈服强度为 315 MPa。试棒铸态组织均为球状，而且分布均匀，晶粒大小约为 $60\mu\text{m}$ ^[12]。Alcan 铝公司对 SEED 式流变成形工艺进行了工业生产验证，流变压铸了 204 件前顶控制臂（见图 10），选择其中的 100 件进行破坏性检验，铸件的最大弯曲量、最大受能力、吸收功均超过铸件的标准要求。根据以上试验结果，Alcan 铝公司组建了 SEED 式流变成形试验工厂，主要设备包括浇注机、机器人、Buehler SC6000 kN 压铸机、制浆单元等，如图 10 所示。



图10 SEED 流变压铸成形的前顶控制臂

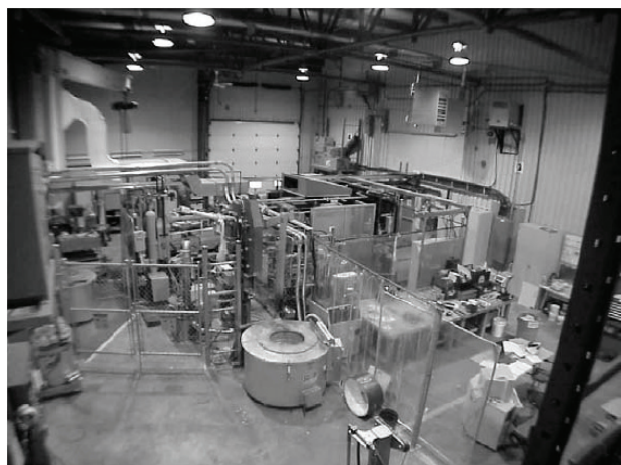


图11 实验工厂设备和 SEED 制浆预工业生产设备原型

6 连续流变转换式流变成形技术

半固态合金浆料的连续流变转换制备技术(Continuous rheoconversion process, 简称 CRP)是美国 Worcester Polytechnic Institute 的 Findon 等提出的制备技术^[13]。该工艺制备半固态浆料的核心思想是利用两个预热的通道将位于两个容器中的低过热度铝合金液(相同成分或不同成分)导入反应器,在反应器内产生两股铝合金熔体的激烈紊流、碰撞、混合,同时铝合金熔体向反应器传热和凝固,熔体经过强烈的对流、传热和降温转变成了非枝晶组织的半固态浆料(流出反应器的铝合金熔体已是半固态铝合金浆料),该工艺制浆设备如图 12 所示。

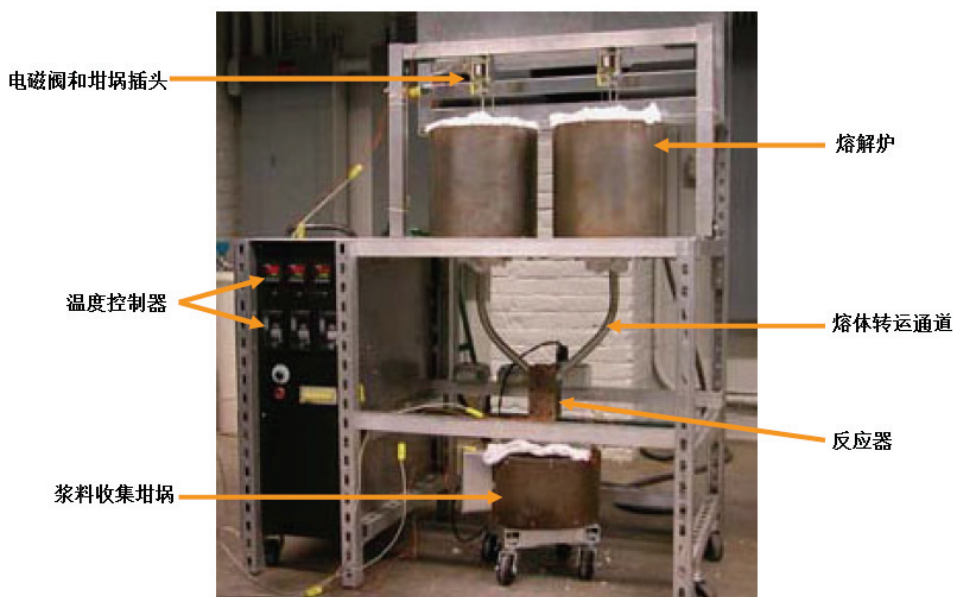


图 12 连续流变转换制备半固态浆料设备

该半固态合金浆料的连续流变转换制备技术(CRP 技术)具有以下优点:制备浆料设备简单,操作方便,制浆过程简便而且易于控制;工艺适应性强,既可制备触变成形的半固态合金坯料,又可制备流变成形的半固态合金浆料;既可制备铸造铝合金浆料,也可制备锻造铝合金和过共晶铝合金浆料。但反应器结构较为复杂,特别是熔体转运通道和反应器内部容易粘挂浆料,需要及时清理,而且清理较困难。鉴于此缺点,而且为了更好地与传统压铸机相衔接, Q. Y. Pan, D. Apelian, and P. Hogan 等人^[14]对 CRP 制浆设备进行了优化、改进,将接近于液相线的熔体直接浇注到反应器内,然后经一个通道直接流入压铸室内,具体见图 13 所示。

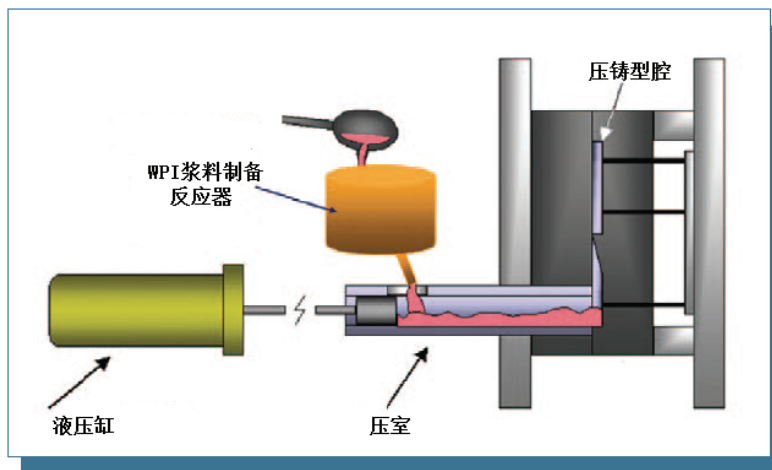


图 13 改进型 CRP 流变成形示意图

采用 CRP 流变成形技术研究了 A356、A383 等合金，并用 A356 合金进行了流变压铸棒状试样，如图 14 所示。研究表明，采用 CRP 流变压铸成形的试样相比纯液态挤压其强度和伸长率有稍微的提高；采用 Sr 变质的 A356 合金经 CRP 流变压铸成形后，其试样的力学性能没有显著的提高，但是对液态挤压的试样性能却有较大的提高。



图 14 CRP 流变挤压成形的 A356 合金试样

7 结束语

与常规铸造技术相比，半固态流变成形技术具有独特的优势，为推广这一新技术在铸造领域生产中的应用，今后应着重加强以下几方面的研究。

(1) 目前对非枝晶组织的形成机理还处于探讨阶段，所提出的机制也仅限于解释由熔体冷却至半固态过程，且集中在搅拌作用下球状组织的形成规律，没有一个比较系统的半固态球状组织形成机制，应该重点深入研究非枝晶组织的形成机理。

(2) 目前对半固态合金材料的研究主要集中于 Al-Si 系的合金，而对于高强度的 Al-Cu 系的合金研究较少，应该加强对半固态高强度合金的开发和设计，为半固态合金材料提供更多的选择。

(3) 开发黑色金属、复合材料的半固态铸造技术。不锈钢、高温合金和复合材料在工业生产中得到了广泛的应用，然而其半固态材料制备技术的研究工作刚刚开始，加强黑色金属、复合材料的半固态铸造技术研究，对扩大半固态铸造技术的应用范围将具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张钰. 铝合金在航天航空中的应用[J]. 铝加工 (技术工程), 2009, 3: 50-52.
- [2] 宋仁国. 高强度铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2000, 14 (1): 20-22.
- [3] 赵大志, 路贵民. 半固态成形轻合金的发展状况[J]. 铸造, 2007, 56 (6): 572-576.
- [4] FlemingsMC, MartinezRA, Figueredo AM, et al. Metal alloy compositions and process. United States Patent, 6645323[P]. 2003-11-11.
- [5] Raul A.Martinez and Merton C.Flemings, et al. The Use of Semi-Solid Rheocasting(SSR) for Aluminum Automotive Castings[J]. SAE TECHNICAL PAPER SERIES, 2003, 0433:1734-1736.
- [6] James A. Yurko, Raul A. Martines and Merton C.Flemings. Commercial development of the semi-solid rheocasting (SSRTM) process[J]. METALLURGICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2003, 21 (1): 11-13.
- [7] MITSURU A, HIROTO S, YASUNORI H, et al. Method and apparatus for shaping semisolid metals: EP 0745691A1[P].
- [8] Marco Valencia, Javier Coletto Fiano, Viadimir Martinez. Semisolid processing of the alloy A356 by NRC[J]. Scientia et

- Technica, 2007, 8(36):93-95.
- [9] CURLE Ulyate A, MÖLLER Heinrich, GOVENDER Gonasagren.R-HPDC in South Africa[J]. Solid State Phenomena, 2013, 192-193:3-15.
- [10] Lorenz Ratke , Ashok Sharma.Microstructural studies of A357 Alloy Cast by RSF process[J]. Metall Trans, 2009, 62 (4-5), 328-330.
- [11] Don Doutre, Joseph Langlais, Serge Roy.THE SEED PROCESS FOR SEMI-SOLID FORMING[J]. Acta Material, 2005, 53: 3807-3819.
- [12] A. LEMIEUX, J. LANGLAIS, BOUCHARD, X. GRANT CHEN. Effect of Si, Cu and Fe on mechanical properties of cast semi-solid 206 alloys [J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 1555-1560.
- [13] WilliamJ.The Continuous Rheoconversion Process: Scale-up and Optimization [D].New England: WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2005, 20-24.
- [14] Q.Y. Pan, D. Apelian, P. Hogan.THE CONTINUOUS RHEOCONVERSION PROCESS (CRP™):OPTIMIZATION & INDUSTRIALAPPLICATIONS [J].Metallurgical Science and Technology, 2007, 8:9-15.