

电磁场诱发半固态合金熔体混沌对流及对凝固组织影响

刘 政

(江西理工大学机电工程学院)

摘 要 综述了半固态合金熔体中电磁场诱发的混沌对流现象及其对半固态合金凝固组织的影响等方面的研究进展,介绍了混沌理论及其在工程中的应用、混沌对流在半固态合金制备中的应用。在此基础上,着重阐述了计算机模拟技术解析半固态合金熔体流动混沌对流方面的工作进展及成果。最后,总结了电磁场诱发的混沌对流对半固态合金凝固组织影响的研究进展,并对其潜在应用和主要发展方向进行了展望。

关键词 电磁场;半固态合金;混沌对流;凝固组织

中图分类号 TG146;TG249

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Chaotic Advection in Semi-solid Alloy Melt Induced by Electromagnetic Field and Effects on Solidified Microstructure

Liu Zheng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology)

Abstract: The research progress in aspects of the effects of chaotic advection induced by electromagnetic field on the solidified microstructure in semi-solid alloy was reviewed. The chaotic theory and its engineering application, as well as the application of the chaotic advection in the preparation of the semi-solid alloy were introduced. On this basis, the progress and the results achieved that apply the mathematical modeling to parse the chaotic advection during melt flow in semi-solid alloy were mainly expounded. Finally, the research advances on the effects of chaotic advection induced by electromagnetic field on solidified microstructure in semi-solid alloy were summarized, and the potential application and the main development direction were prospected.

Key Words: Electromagnetic Field, Semi-solid Alloy, Chaotic Advection, Solidified Microstructure

合金凝固时的能量、质量和动量传输对合金的组织形貌和性能有重要影响,这是个复杂的过程,伴随着许多非线性现象和行为^[1]。而合金凝固时电磁场的应用可加速合金熔体流动,强化合金凝固时的能量、质量和动量传输,使该过程变得更加复杂,出现更多非线性行为与现象^[2]。对电磁场作用下合金凝固过程的认知还需要建立在传统金属凝固理论基础上,从非线性科学理论角度剖析。

合金半固态加工具有高效节能的特点,也是应用电磁场技术的重要领域。目前,大部分工艺过程都需要在合金的固-液两相区间实施外场扰动,实现调控合金的凝固过程的目的。外场扰动(如电磁或机械搅拌等)可改变合金凝固进程,均匀温度场、溶质场,使正在生长的枝晶破碎向球状晶转变^[3]。但是,半固态合金熔体在电磁场的作用下的流动规律尚未明晰。因此,对电磁场作

用下合金熔体的流动特性与凝固过程规律以及非线性行为的研究和探索,揭示其中隐含的规律及工艺信息十分必要。对近年来应用电磁场技术制备半固态合金过程中所涉及熔体流动的非线性行为与理论应用进行了归纳总结。

1 电磁场下合金凝固过程中的流动行为

探索合金熔体流动对其凝固组织的影响是凝固技术研究中的重要课题,主要包括:改变柱状晶的生长方向、促进柱状晶向等轴晶的转化、细化凝固晶粒等。从20世纪中叶以来,研究者就意识到了合金凝固过程中施加电磁场是改善组织结构、细化晶粒和提高材料性能的重要方法,并且对处于液相流动状态的合金熔体施加电磁搅拌展开探索,研究电磁搅拌改善合金微观组织的效果。

收稿日期:2021-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51361012,51864020);江西省自然科学基金资助项目(2014bab206012)

作者简介:刘政,男,1958年出生,教授,江西赣州(341000),E-mail:liukk66@163.com

引用格式:刘政. 电磁场诱发半固态合金熔体混沌对流及对凝固组织影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):397-403.

LIU Z. Chaotic advection in semi-solid alloy melt induced by electromagnetic field and effects on solidified microstructure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):397-403.

TRIVEDI R 等^[4]研究了不同凝固速率和温度梯度情况下, Al-Cu 合金试样定向凝固过程中的液相流动对平界面、胞状晶和树枝晶生长的影响, 发现液相流动可以抑制平界面向胞状晶的转变, 同时也增大了胞枝晶转变的临界速度。SHIN Y 等^[5]发现由于强制对流对枝晶形貌的影响, 模拟结果出现了迎流生长的现象。旋转磁场能够消除 Sn-Bi 合金的宏观偏析、碎断枝晶和细化凝固组织, 随着磁场旋转频率增大, 合金的生长形态经历了从枝晶→等轴晶→球状晶→枝晶的转变。此外, 还加快了熔体流动, 促进了熔体中溶质场和温度场在分布上趋于均匀化^[6]。HIDEYUKI Y 等^[7]研究了交替静磁场作用下熔体流动对中碳钢凝固组织的影响。对于低过冷区的凝固组织, 随着静磁场强度增加, 熔体流动逐渐减弱, 凝固组织中等轴晶的数量减少。在电磁场引起的强制对流作用下, 凝固前沿的压力差驱使溶质在糊状区域流动, 当溶质在偏析通道富集到一定程度时, 可使溶质浓度达到共晶成分^[8]。METAN V 等^[9]通过对 Al-Si 合金熔体施加向上和向下的电磁场对在凝固过程中的熔体进行强制对流, 导致了初生相组织的细化、球化, 进而提升了合金的力学性能。利用低频率电磁搅拌制备半固态 A356-Y 合金浆料可获得初生相的等积圆直径和形状因子分别达到 $65\ \mu\text{m}$ 以下和 0.80 以上。稀土 Y 在电磁场引起的熔体强制对流驱动下, 其分布沿着铸锭的半径趋于边缘富集, 而且随着电流频率增大, 稀土 Y 在铸锭边缘富集程度增大^[10]。弱熔体对流对定向凝固组织生长有显著作用, 平均界面过冷度与熔体流动强度有关, 当生长速度一定时, 随着流动强度增大, 平均界面过冷度减小^[11]。旋转电磁搅拌条件下镁合金熔体在水平方向上围绕结晶器中心做旋转运动, 随着磁感应强度从 0 增大到 $1\times 10^{-2}\ \text{T}$, 水平方向流速从 0 增大到 $6\ \text{mm/s}$, 熔体凝固速度加快, 结晶器内液穴深度从 20.2 cm 减小到 10.6 cm, 结晶器中心到边部温度梯度减小。电磁搅拌条件下, 镁合金凝固组织中等轴晶比率增大, 当磁感应强度增大到 $4\times 10^{-3}\ \text{T}$ 时, 晶粒平均尺寸由未搅拌时的 $366\ \mu\text{m}$ 细化为 $110\ \mu\text{m}$ ^[12]。宋小鹏等^[13]利用数值模拟方法建立了薄板坯二冷区的电磁场、流场和温度场模型, 发现电磁场可改变钢水流动状态且分布不均匀, 单侧搅拌器产生的电磁场在其研究范围内分布较为均匀。赵军超等^[14]运用 ANSYS 软件分析了椭圆坩埚中半固态合金熔体的流场分布规律, 发现合金熔体在椭圆坩埚 x 轴和 y 轴方向上的流速不一样, 电磁力和电磁频率皆会对熔体流速造成影响且前者大于后者, 当电磁频率为 30 Hz 和电流强度为 5 A 时, 获得合金的凝固组织最佳。

2 熔体流动时的混沌现象及其工程应用

混沌现象起源于 20 世纪 60 年代初, LORENZ E N^[15]研究大气层对流现象时, 提出了大气对流的混沌现象为一种“非确定性周期流动”, 认为初始条件细微的改变将导致结果巨大的改变, 如果系统是稳定的, 其最后的结果是可知的。AREF H^[16]提出了“混沌场”(Chaotic advection)的概念, 利用“Blinking vortex”模型研讨了不可压缩的理想流体在二维间隙混合器混沌触发的过程, 搅拌方式不同可导致流体运动状态不同, 达到混沌对流的标志, 使搅拌更加高效。此后, 大量研究内容主要集中于高粘度流体间隙混沌过程, 使得混沌理论得到快速推广与发展, 还促进混沌理论在各个学科中的应用。20 世纪 90 年代以来, 混沌理论很快就在化工、高分子材料制备等行业中得到应用, 常用于溶质混合、强化传热等过程。近年来的研究表明, 扩散特性趋近于湍流的流动状态, 也称为混沌对流^[17]。MOKRANI A 等^[18]研究了低雷诺数下混沌对流对传热的影响, 产生这种混沌对流的主要机制是空间混沌轨迹。混沌式换热器的传热效率高于螺旋式, 效率提高了 13%~27%, 混沌对流在很大程度上均匀化并增强了传热。王玫瑰等^[19]对高分子材料加工动力学过程进行分析, 根据流体力学技术, 得出了混合强化螺杆挤出过程。徐百平等^[20]通过插入一种强化混合的副螺棱结构, 发现系统存在混沌混合区和隔离区, 借助 Fluent 求解其速度场, 发现副螺棱周期越小, 扰动强度越大, 混合效果越好。刘作华等^[21]提出混沌混合是提升高粘度流体混合效率的有效方法, 研究发现柔性桨与自浮颗粒协同强化高粘度流体混沌混合的效果最佳。

研究表明, 混沌对流应具备以下特征之一: 流体轨迹线或轨迹面被剧烈弯曲或折叠; 流体对初始状态条件敏感; 在有些区域内流体间的弯曲程度成指数增长, 这种特性是混沌对流可以强化混合、传热与传质的主要原因。混沌改变了流域内速度场的分布, 流场的变化直接对温度场的分布造成影响^[22,23]。混沌对流对初始条件敏感, 初始条件的轻微改变会对系统最后的结果造成重大的影响。流体流动的轨迹或形成的轨迹面自发地存在一个奇异吸引子, 使得混沌对流运动轨迹表现出一种高级有序的行为。

混沌理论是一门新型学科, 由耗散系统产生, 可以由确定的方程描述。混沌现象把表观的无序性与内在的规律性巧妙地融合为一体, 具有两个显著特征, 即运动对初始条件的敏感依赖性和表现出一定的规律性, 见图 1 和图 2。在原来空间中的两个点, 与经混沌混合后到达的最终点之间的关系根本无法预测。开始相邻的

点经过了无数次拉伸与折叠后,可能被驱赶到任意远处,而后来碰巧靠得很近的点可能是由开始相距任意远的点运动得到。利用流体在混沌状态下流动时流体流线经过反复拉伸与折叠,使流体运动流线呈现出特殊形貌这一现象开始在粘性物体与流体的加工理论和方法中获得了应用。

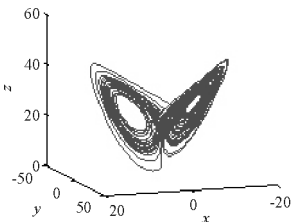


图1 Lorenz 系统吸引子图
Fig.1 Attractor diagram
of Lorenz system

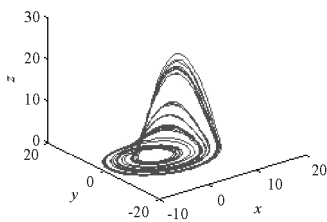


图2 Rössler 系统吸引子图
Fig.2 Attractor diagram
of Rössler system

混沌对流是流体流动过程中存在的现象,规律和特点需要进一步认知,作用与优势已经在技术研究和工程实践中得到了应用。其可以增强粘性流体在层流状态下的溶质扩散、迁移、混合等,对于节能降耗、保证质量具有积极的作用。将混沌对流的原理和方法应用到半固态合金的研究和制备过程中,可为半固态合金的研制带来新思路、新方法、新技术,并丰富合金凝固理论。

3 半固态合金熔体流动的混沌性

合金凝固行为的复杂性在于凝固系统的复杂性,有学者曾将凝固系统的复杂性归纳为非线性、随机性、混沌性和分形性,后来通过具体的凝固行为和现象对动力性、非线性、随机性和分形性进行了充分的论述^[24~27],但对混沌性尚未作定性的探讨。为了深刻认识凝固系统的复杂性质,旨在对凝固系统的混沌性进行定量研究,可在试验研究的基础上提取凝固组织形貌特征和凝固工艺参数,运用功率谱、分形维数和 Lyapunov 指数等方法,联合验证凝固过程中熔体流动具有混沌行为的基本特征,由此证明凝固系统的混沌性。

揭示凝固系统的混沌性,不仅可以加深对凝固系统复杂性的认识,而且有助于对金属与合金凝固问题的量化研究。在混沌理论中,混沌运动的稳定轨迹是混沌吸引子,在混沌吸引子上的混沌行为是一种高级有序行为。凝固时,合金熔体进入固液共存状态的凝固行为是一种在混沌吸引子上的混沌凝固行为。基于混沌行为对初始条件的敏感依赖性,可以进行合金系统的半固态凝固过程设计,使合金系统尽快进入固-液两相共存状态,并在外场的作用下改变组织的凝固进程、赋予凝固组织应具有形貌与尺寸,以实现高效和节能的半固态合金制备技术的设计理念。因此,探明和揭示电磁场作

用下半固态合金凝固系统的混沌特性,对半固态合金凝固系统的主动设计和凝固过程控制具有积极的意义,同时也对非平衡凝固理论的应用和发展具有促进作用。

刘政等^[28]应用 Fluent 软件研究了电磁场作用下 A356 铝熔液中微粒的流动轨迹,计算了这些流动轨迹的 Kolmogorov 熵和分形维数,证明了施加适当的电磁频率能在合金熔体中产生混沌运动;电磁频率为 5~30 Hz 时,铝合金熔体中都发生了混沌对流,其最大 Lyapunov 指数都大于 0,且其 Kolmogorov 熵随着频率增大而迅速增加。电磁场作用下的合金凝固是一个非平衡过程,具备了形成耗散结构的所有条件^[29],而该过程不可避免地要和周边环境产生物质、能量等的交换,凝固的热力学、动力学条件与凝固组织的数量、尺寸、分布以及产生的细化效应等亦要随凝固进程,特别是电磁场的实施而变化。对于此耗散结构系统,单纯应用传统的凝固理论还不足以认知电磁场作用下合金熔体的流动规律及其对合金的凝固进程和组织变化的影响,需要引入新的科学理论来开展研究,尤其是电磁场作用下半固态合金熔体中混沌对流的形成及调控、半固态合金熔体混沌对流特征的提取与表征、半固态合金初生相在混沌对流中的凝固形貌演化规律等,还需要进一步的探究。

4 计算机模拟技术解析半固态合金熔体流动混沌现象

随着计算机科学技术的发展,各种应用软件的成熟和商业化为数值模拟技术在探明电磁场作用下半固态合金熔体流动特性与规律的研究和应用中奠定了良好基础。

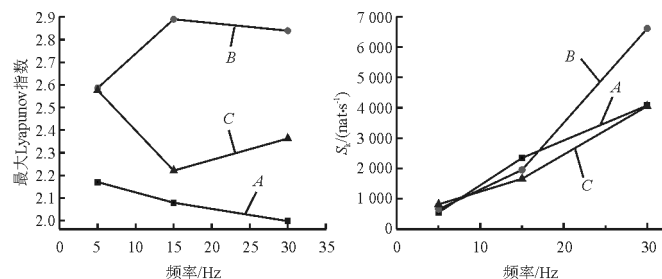
郭大勇等^[30]使用 Fluent 软件建立了电磁场凝固过程合金熔体动量传递及传质耦合数学模型,通过熔体的流动速度以及枝晶受力状态,发现枝晶在流动的熔体下能产生很大的速度变化,在不断的流动冲刷下碎断,从而促进晶体由柱状晶向等轴晶转变。王永庆等^[31]基于采用周期性计算模型得到的混沌流道内的流体流动与传热数值结果,应用场协同原理,对混沌混合内强化传热进行分析,发现混沌流道改变了流体的速度场分布。LI D 等^[32]在元胞自动机模型中考虑到强制对流,模拟了 Fe-C 合金在过冷条件下单个枝晶的生长过程,表明枝晶迎流侧生长快。GAO D R 等^[33]采用 CFD 模拟证明了偏心搅拌能诱发混沌流动且能破坏系统周期与对称性。

利用计算流体动力学软件 Fluent,采用 MHD 模块和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,对电磁场中铝液进行三维数值模拟,通过调节磁场中不同频率下的熔液内部流场,可得

到电磁场中铝熔体的温度场分布图;同时选取熔体细化剂微粒进行示踪,得到微粒运动轨迹,证明了 Fluent 软件对于电磁场中铝熔液的模拟仿真的可行性,为研究电磁场中混沌对流奠定了基础^[34]。

对于电磁场作用在铝合金熔体中引起的流动特性,应用 Fluent 软件模拟电磁场中铝熔液微粒运动轨迹,通过 Matlab 分析计算运动轨迹的 Lyapunov 指数以及 Kolmogorov 熵值,并对其变化规律进行混沌判断描述及分析,发现在一定频率电磁场的扰动下,铝合金熔体中可以产生混沌流动^[28],使其初生相发生相对运动。随着电磁搅拌频率增大,相对运动速度增大,熔体快速的流动使枝晶臂产生碎断,从而使晶粒细化^[35]。

为探明铝合金熔体在电磁场作用下的流动特征,利用 Fluent 软件模拟电磁场作用下铝熔体中微粒的流动轨迹,计算这些流动轨迹的混沌特征参数:最大 Lyapunov 指数及 Kolmogorov 熵。根据不同电磁频率搅拌下铝合金熔体中微粒的运动轨迹,对其进行混沌特征判断及分析^[28]。图 3 为模拟微粒在不同频率相同运动时间下对应的混沌特征参数变化趋势图。可以看出,铝合金熔体在电磁场作用下的流动具有混沌特征。电磁频率为 5、15 和 30 Hz 时,在铝合金熔体中都发生了混沌对流,其最大 Lyapunov 指数都大于 0,且其 Kolmogorov 熵随着电磁频率增大而迅速增加,说明其系统内混沌程度较大,信息损失量也较大。



(a) 最大 Lyapunov 指数 (b) 微粒轨迹的 Kolmogorov 熵值

图 3 模拟微粒 A、B 和 C 在不同频率相同运动

时间下混沌特征参数变化趋势图

Fig.3 The trend of chaotic characteristic parameter of A, B and C particle trajectories at different frequencies and the same moving duration

为了表征半固态 A356 铝合金熔体中混沌对流及其电磁场诱发的混沌对流对半固态 A356 铝合金熔体中初生相形貌演变的影响,应用 Fluent 软件研究了电磁场作用下 A356 铝熔液中微粒的流动轨迹,计算了这些流动轨迹的 Kolmogorov 熵和分形维数,证明了施加适当的电磁频率能在合金熔体中产生混沌运动^[35]。模拟研究以电磁搅拌频率与时间作为变量(包括无电磁搅拌),频率分别为 5、10、20、30 和 40 Hz,搅拌时间为 15

s。选取近邻的 2 个微粒坐标作出微粒轨迹以计算系统混沌特征,见图 4。可以看出,熔体内微粒在凝固系统中受施加的电磁场作用产生不规则的三维流动。当未施加电磁场时微粒的运动轨迹较有规律,呈层流运动,见图 4a;施加电磁场之后,熔体微粒做复杂的湍流运动,且随着电磁频率增大,电磁场对合金熔体的扰动加剧,熔体流速加快,湍流越明显,其中的微粒运动轨迹越复杂多变,见图 4b~图 4f。

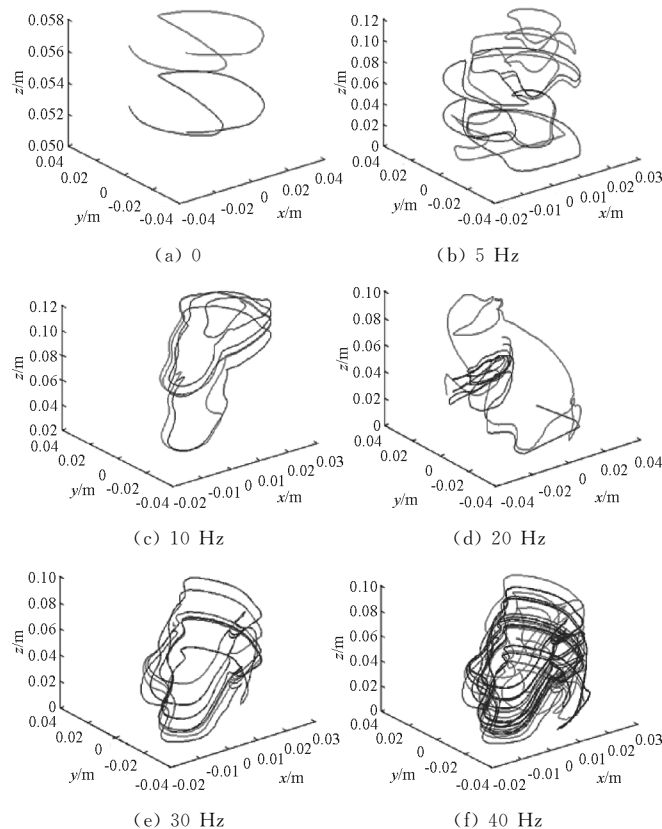


图 4 微粒在不同频率下的运动轨迹

Fig.4 The trajectories of particles at the different frequencies

运用最大似然算法进行 Matlab 编程,根据图 4 的微粒运动轨迹,计算得出未施加电磁场和施加不同频率搅拌 15 s 时的 Kolmogorov 熵 S_k ,分别为 2.195、4 126.4、6 609.3、6 829.5 和 7 302.8 nat/s。图 5 为 S_k 和分形维数的变化趋势图。可以看出,在相同搅拌时间 15 s 下, S_k 和分形维数都随频率的增加而增加。 S_k 是表征混沌系统的特征量,当 $S_k > 0$ 时,则说明此凝固系统发生混沌运动。分形维数是另一个重要判断系统混沌的特征量,从熔体内微粒运动轨迹的分形维数就可判断其混沌程度。从分形维数结果中可以看出,熔体微粒的运动轨迹的维数都为分数维,可见其凝固系统发生混沌运动。此外,随着频率增加,相同搅拌时间内的微粒运动轨迹的分形维数也随之增加,但增加到一定频率后, S_k 与分形维数不再大幅上升,由于电磁搅拌功率有限,产生的 Lorentz 力趋近于最大值,使每个熔体微粒在电磁场中

所受的 Lorentz 切向分力与径向分力受限,故增长速率变缓。

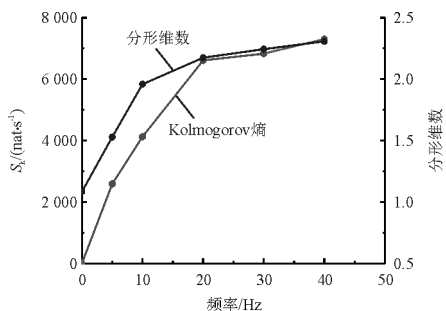


图5 不同频率下凝固系统的 Kolmogorov 熵和分形维数变化趋势图

Fig.5 Trend chart of Kolmogorov entropy (S_k) and fractal dimension of solidification system at different frequencies

5 混沌对流在半固态铝合金制备中的应用

已有研究表明,在电磁搅拌过程中,电磁频率仅为 5 Hz 时,在半固态铝合金熔体即可产生混沌流动^[28],这意味着半固态合金熔体在外场作用下极易产生混沌流动。这需要在应用电磁场等外场制备半固态合金时充分发挥混沌流动积极、有利的一面,保证和提高半固态合金制品品质。

前期的研究表明,半固态 A356 铝合金初生相形貌具有分形结构^[36],其物理机制在于系统的耗散性^[37]。耗散结构具有自组织特性^[38],即当外界控制参数发生变化时,系统会自发地调整与外界环境物质、能量的交换方式及速率来改变其生长形态。另外,不同电磁搅拌频率都将引起合金熔体中产生混沌流动,导致整体熔体中温度降低,也意味着冷却速率增加,初生相与周围环境的传热、传质速率和强度的增加,都会引起半固态初生相的形貌演化。

电磁搅拌作用下,搅拌坩埚中半固态铝合金熔体受到电磁力作用而产生水平和竖直方向上的流动,且各方向上的流速不同,熔体产生的运动不是单一的水平旋转运动,而是方向不定的混沌流动^[39]。在试验研究范围内,半固态 A356 铝合金在搅拌频率为 30 Hz、搅拌电流为 4 A、搅拌时间为 12 s 时,得到的初生相最细小、圆整,平均等积圆直径为 80.6 μm ,形状因子为 0.78。随着电磁频率和励磁电流增大,熔体流速逐渐增大,在电磁搅拌参数为 4 A、25 Hz 时, x 、 y 、 z 轴方向流速最大,分别为 67.79、60.00 和 40.30 mm/s,4 A、30 Hz 时初生相最细小、圆整,此时最大流速分别为 69.27、58.84 和 39.77 mm/s,说明并非流速越大得到的初生相越好。

半固态 A356-Yb 合金于 620 $^{\circ}\text{C}$ 浇注后经频率为 30 Hz 电磁搅拌 15 s,并在 590 $^{\circ}\text{C}$ 保温 10 min,能获得较细

小圆整的初生相组织。此时,平均等积圆直径为 62.3 μm ,平均形状因子为 0.78。在试验研究范围内(电磁频率),其晶粒最圆整、细小^[40]。

在数值模拟基础上,结合试验研究,对不同电流频率及工艺参数的试验结果进行对比。图 6 为 A356 铝合金初生相的平均等积圆直径和平均形状因子随电磁频率增加的变化。可以看出,电磁频率为 30 Hz 时,平均等积圆直径(D)最小,平均形状因子(F)最大。此时晶粒最圆整细小,组织形貌最佳^[35]。

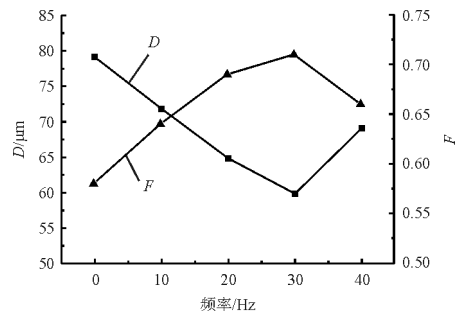


图6 不同电磁搅拌频率下初生相的平均等积圆直径和平均形状因子

Fig.6 Average equal-area circle diameter (D) and shape factor (F) of primary phase at different electromagnetic stirring frequencies

此外,还研究了不同半固态铝合金-稀土熔体混沌对流的表征及在不同电磁搅拌频率和时间下诱发的混沌对流对加入相同量 La 及 Yb 的半固态 A356 铝合金初生相形貌演化的影响。用 Fluent 软件模拟电磁场作用下 A356 铝熔液中微粒的流动轨迹,计算流动轨迹的混沌特征量 Kolmogorov 熵,发现只要适当施加电磁场,Kolmogorov 熵值随电磁搅拌频率及时间的增大而增加。在 A356 铝合金中添加两种等量不同稀土并施加不同搅拌频率及时间后,两种合金都在搅拌频率为 30 Hz、搅拌时间为 15 s 时,初生相形貌最理想,晶粒细小圆整且 Kolmogorov 熵值达到最大。研究结果还表明,A356-Yb 铝合金的初生相形貌优于 A356-La 铝合金初生相形貌^[41],其原因与 Al 和 La、Yb 在高温下相互作用的产物 Al_xRE_y 的结构有关^[42,43]。混沌看似无规则但其中暗含着规律,加入的稀土和施加的磁场频率及时间都会影响混沌对流下的合金初生相形貌。

采用自行设计的电磁调控装置对结晶器内的 A356 铝合金熔体进行双向电磁搅拌处理,可获得凝固组织为球状或类球状初生固相颗粒的半固态浆料,分析了磁场频率、电磁搅拌方式(单向连续电磁搅拌、双向连续电磁搅拌、双向间歇电磁搅拌)对初生相形貌演化的影响。结果表明,随着磁场频率增加,初生固相生长形态由树枝状、长条状、粗颗粒状转变为球状;晶粒尺寸先减小后增大;磁场频率存在最佳值 30 Hz。此时,初生相平均

等积圆直径为 $38.2\ \mu\text{m}$, 形状因子为 0.75。此外, 双向连续电磁搅拌作用于熔体形成强烈的紊流和惯性冲击, 使熔体的流动方式以紊流为主, 层流基本消失, 加快凝固体系的质量传输、热量传递, 相较于单向连续电磁搅拌, 双向间歇电磁搅拌后合金凝固组织更加细小圆整^[44]。结晶器内的熔体处于混沌态, 增强了流体宏观运动携带热量的能力以及强化了流体间的传热。这种因电磁搅拌引起的熔体混沌流动对溶质扩散和半固态初生相的细化有重要影响^[28]。

研究了分级电磁搅拌下半固态 A356 合金熔体中电磁场分布规律及电磁场对合金熔体中初生相形貌演变的影响。结果表明, 磁场强度和电磁力由合金熔体中部依次向外递增且呈现中间小边缘大的现象, 变更电流强度比电磁频率可更好地调控初生相的形貌。另外, 对不同搅拌工艺和参数进行对比, 发现应用分级电磁搅拌制备半固态 A356 合金浆料是可行的且分级搅拌诱发了合金熔体凝固系统的混沌对流, A356 铝合金熔体于 $630\ ^\circ\text{C}$ 浇注, 并在分级电磁搅拌频率为 $30\ \text{Hz}$ 条件下搅拌 $5\ \text{s}$, $20\ \text{Hz}$ 条件下搅拌 $10\ \text{s}$, 电流强度为 $5\ \text{A}$, 并在 $590\ ^\circ\text{C}$ 保温 $15\ \text{min}$, 获得的晶粒最圆整细小, 组织形貌最佳^[45]。在合适的工艺参数下获得了较为细小的初生相组织, 其平均形状因子为 0.73, 平均等积圆直径为 $84\ \mu\text{m}$ 。从细化机理来看, 分级电磁搅拌促进了熔体流动, 同时诱发了混沌对流, 使合金中溶质扩散加快且更加均匀分布。

另外, 还研究了搅拌电流突变行为以及不同电磁频率下电流突变对磁感应强度、电磁力和半固态 A356 合金熔体中初生相的影响。结果表明, 在电磁频率为 $25\ \text{Hz}$ 和突变电流为 $2\sim 6\ \text{A}$ 时, 初生相达到最佳, 其形状因子和平均等积圆直径分别为 0.71 、 $118\ \mu\text{m}$ ^[46]。经过时间为 $5\ \text{s}$ 、电流强度为 $2\ \text{A}$ 的第一段搅拌, 坩埚中的半固态铝合金熔体已处于低流速的混沌状态下, 随着搅拌电流的突变, 熔体中的电磁力与磁感应强度也随之发生突变, 实现了在第一段搅拌的基础上的二次搅拌, 即对熔体中的晶体产生了二次破碎效应。

6 结 语

将电磁场应用于半固态合金的制备中不仅改善了合金制品品质、提高了生产效率, 也促进了半固态合金技术的快速发展。但是, 电磁场的应用在合金熔体中产生的熔体流动不仅加剧了半固态合金凝固的非平衡特性, 同时也使得半固态合金熔体的流动出现混沌现象, 这对认知电磁场作用下半固态合金的凝固规律和阐明其机理带来了新的挑战。虽然, 已初步进行了半固态合金熔体流动时混沌特性的探索, 但是, 电磁场诱发的混

沌对流对合金凝固时温度场、浓度场和流场的作用及其对合金熔体中溶质扩散、聚集与分布以及合金凝固组织形貌和性能的影响, 仍然任重道远。为此, 宜在传统金属凝固理论的基础上, 坚持探索和应用新的研究理论和方法, 指导电磁场作用下半固态合金熔体流动特性和非线性规律的研究, 这对深入阐明电磁场对半固态合金熔体流动的影响, 半固态合金凝固组织形成的实质及规律, 以及开发新的半固态加工技术等具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] 王海丰, 王慷, 况望望, 等. 平衡凝固理论的发展[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(4): 358-376.
- [2] 徐严谨, 苏彦庆, 骆良顺, 等. 磁场在材料凝固技术中的应用研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(3): 548-553.
- [3] REISI M, NIROUMAND B. Effects of stirring parameters on rheocast structure of Al-7.1Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470: 413-419.
- [4] TRIVEDI R, MIYAHARA H. The effective convectivity model for simulation of molten metal layer heat transfer in a boiling water reactor lower head[J]. Cryst. Growth, 2001, 10(15): 231-501.
- [5] SHIN Y, HONG C. Modeling of dendritic growth with convection using a modified cellular automaton model with a diffuse interface [J]. ISIJ International, 2002, 42(4): 359-367.
- [6] 陈钊, 陈长乐, 温晓莉, 等. 旋转磁场驱使强迫流对 Sn-Bi 合金微观结构的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(5): 609-614.
- [7] HIDEYUKI Y, TSUTOMU Y, TAKUYA M. Effect of the melt flow on the solidified structure of middle carbon steel by means of the levitation method using alternation and static magnetic fields [J]. ISIJ International, 2007, 47(4): 612-624.
- [8] NOEPPEL A, CIOBANAS A, WANG X D, et al. Influence of forced/natural convection on segregation during the directional solidification of Al-based binary alloys[J]. Metall. Mater. Trans., 2011, B42: 341-369.
- [9] METAN V, EIGENFELD K. Controlling mechanical and physical properties of Al-Si alloys by controlling grain size through grain refinement and electromagnetic stirring[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2013, 220(1): 139-150.
- [10] 刘政, 刘小梅, 朱涛, 等. 低频电磁搅拌对半固态铝合金中稀土分布的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 272-280.
- [11] 徐小花, 陈明文, 王自东. 弱熔体对流对定向凝固中棒状共晶生长的影响[J]. 物理学报, 2016, 65(13): 215-222.
- [12] 张威武, 汪渊源, 李彬, 等. AZ61 镁合金电磁连铸过程流场-温度场-组织的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(2): 241-247.
- [13] 宋小鹏, 程树森, 张利君, 等. 薄板坯二冷区电磁搅拌铸坯内磁场分布和钢液流动[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(11): 1 275-1 281.
- [14] 赵军超, 刘政, 李泽文, 等. 电磁搅拌参数对椭圆坩埚中半固态铝合金熔体流动与凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1 523-1 534.
- [15] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(4): 130-141.

- [16] AREF H. Stirring by chaotic advection[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 143: 1-21.
- [17] 王永庆, 董其伍. 混沌对流中扩散特性的数值计算及应用[J]. 石油机械, 2009, 37(8): 456-460.
- [18] MOKRANI A, CASTE L C, PEERHOSSAINI H. The effects of chaotic advection on heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer., 1997, 40(13): 3 089-3 104.
- [19] 王玫瑰, 徐百平. 混沌场强化高分子材料加工装备技术实现[J]. 现代塑料加工应用, 2012, 22(4): 56-65.
- [20] 徐百平, 喻慧文, 冯彦洪, 等. 单螺杆挤出机内混沌混合数值模拟[J]. 塑料, 2014, 43(6): 109-113.
- [21] 刘作华, 杨鲜艳, 谢昭明, 等. 柔性浆与自浮颗粒协同强化高黏度流体混沌混合[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2 794-2 800.
- [22] LASBET Y, AUVITY B, CASTELAIN C, et al. A chaotic heat-exchanger for PEMFC cooling applications[J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(1): 114-118.
- [23] LEMENAND T, PEERHOSSAINI H. A thermal model for prediction of the nusselt number in a pipe with chaotic flow[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(15): 1 717-1 730.
- [24] IVANOVA V S, BUNIN I J, NOSENKO V I. Fractal material science: A new direction in materials science[J]. JOM, 1998(1): 52-54.
- [25] WANG J M, ZHOU Y Y, LAN S, et al. Numerical simulation and chaotic analysis of an aluminum holding furnace[J]. Metall. Mater. Trans., 2014, B45: 2 194-2 210.
- [26] LIU Z, LIU X M. Research on fractal characteristics of morphology of primary phase in semi-solid A356 alloy[J]. Acta Metall. Sin., 2009, 22(6): 421-428.
- [27] HANGAI Y, KITAHARA S. Quantitative evaluation of porosity in aluminum alloy die castings by fractal analysis of spatial distribution of area[J]. Materials and Design, 2009, 30: 1 169-1 173.
- [28] 刘政, 张嘉艺, 余昭福. 电磁场作用下铝合金熔体中流动的混沌特征的仿真与分析[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3 026-3 032.
- [29] ORLIK M. Self-organization in nonlinear dynamical systems and its relation to the materials science[J]. J. Solid State Electrochem., 2009, 13: 245-261.
- [30] 郭大勇, 杨院生. 电磁驱动熔体流动与枝晶变形断裂模拟[J]. 金属学报, 2003, 39(9): 914-919.
- [31] 王永庆, 董其武. 混沌对流强化传热的场协同分析[J]. 郑州大学学报, 2011, 32(3): 456-462.
- [32] LI D, ZHANG P. A cellular automaton technique for modelling of a binary dendritic growth with convection[J]. Mathematic Modelling, 2007, 31(6): 971-982.
- [33] GAO D R, GUO M J, LI Y. PIV experimental investigation of chaotic mixing using non-constant speed stirring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 445-448.
- [34] 刘政, 张嘉艺, 邓可月. 基于 Fluent 的电磁场中铝熔液及其质点运动轨迹的数值模拟[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(4): 46-51.
- [35] 刘政, 张嘉艺, 罗浩林, 等. 混沌对流下的半固态 A356 铝合金初生相形貌演变研究[J]. 金属学报, 2016, 52(2): 177-183.
- [36] LIU Z, MAO W M, LIU X M. Effect of pouring temperature on fractal dimension of primary phase morphology in semi-solid A356 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(5): 1 098-1 103.
- [37] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H. Free-Man, 1982.
- [38] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [39] 李泽文, 刘政, 赵军超, 等. 电磁搅拌下半固态 A356 铝合金凝固时电磁场-流场数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1 297-1 306.
- [40] 张嘉艺, 刘政, 沈俊波. 不同温度场下半固态铝-稀土合金初生相形貌研究[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 272-279.
- [41] 刘政, 张嘉艺. 混沌对流中不同稀土元素对半固态铝合金初生相形貌研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 77-85.
- [42] LIU Z, HU Y M. Effect of yttrium on microstructure in semi-solid A356 Al alloy[J]. Rare Metals, 2008, 27(5): 536-540.
- [43] 孙梦桐, 刘政, 赵军超, 等. 双重梯度保温下多元稀土对 A356 铝合金初生相细化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(3): 449-457.
- [44] 刘政, 陈涛, 陈志平. 双向电磁搅拌对半固态 A356 铝合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(1): 31-38.
- [45] 张课微, 刘政, 洪鑫, 等. 分级电磁搅拌对半固态 A356 铝合金凝固组织的影响[J]. 铸造, 2021, 70(6): 687-694.
- [46] 洪鑫, 刘政, 张课微, 等. 电磁搅拌下电流突变对磁场及半固态 A356 铝合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 393-1 399.

(编辑:彭瑾)

万丰镁瑞丁主持制定的国家标准 正式发布

国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会发布 2022 年第 2 号国家标准公告,万丰镁瑞丁新材料科技有限公司主持制定的 GB/T 25747-2022《镁合金压铸件》正式发布,将于 2022 年 10 月 1 日正式实施。

该标准规定了镁合金压铸件的技术要求、试验方法、检验规则等内容,具有充分的先进性、科学性、普遍性、广泛性,可提高镁合金压铸件产品的品质,为镁合金压铸件的研发、设计、制造、销售和服务提供技术支撑和验收依据。

近年来,万丰镁瑞丁积极主导和参与国际、国家、行业标准制修订工作,既是标准的积极贡献者,同时也是标准的受益者。作为世界镁合金行业的全球领导者,万丰镁瑞丁将继续以标准化工作助推技术创新,致力成为全球汽车金属轻量化推动者和引领者,为全球镁合金产业高品质可持续发展和汽车行业轻量化进程贡献力量。

(摘自中国有色金属报)