



双向电磁搅拌对半固态 A356 铝合金 凝固组织的影响

刘 政¹, 陈 涛², 陈志平¹

(1. 江西理工大学 机电工程学院, 赣州 341000;
2. 江西理工大学 材料科学与工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 采用自行设计的电磁调控装置对结晶器内的铝熔体施加双向电磁搅拌处理, 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, 分析在电磁搅拌时间恒定 12 s 时磁场频率、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: 随着磁场频率的增加, 初生固相晶粒的生长形态由树枝状、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 $\alpha(\text{Al})$ 的平均等积圆直径为 38.2 μm , 形状因子为 0.75。此外, 双向连续电磁搅拌作用于液态熔体形成强烈的紊流和惯性冲击, 加快凝固体系的质量传输热量传递, 合金浆料组织相较于单向连续电磁搅拌、双向间歇电磁搅拌更加细小圆整。

关键词: 半固态; A356 铝合金; 双向电磁搅拌; 凝固组织

文章编号: 1004-0609(2018)-01-0031-08

中图分类号: TG146; TG244

文献标志码: A

凝固组织的细化和均一化是制备优质合金材料的关键环节, 对材料的力学性能和加工工艺性能有着显著的影响^[1-3]。液态合金铸造过程中晶粒组织的细化, 即细晶铸造能够有效地控制铸件的品质使其满足高性能要求。其中铝合金半固态低频电磁铸造加工是一项高性能精确成形制造范畴的技术, 在改善合金的显微组织方面具有明显的适用性^[4-6]。通过对熔体施加搅拌处理引起液相的强制流动, 加快熔体内部热量的散失速率, 使凝固系统的温度场、溶质场、流场变得均匀^[7-8]。但仅依靠电磁场对熔体进行单一处理, 所制备的浆料还难以满足优质半固态浆料流变成形的需要。

近年来, 研究者对电磁场作用下凝固组织的细化机制进行了深入研究, 对液态合金的凝固行为和其中蕴含的工艺信息有了比较深入的认知。合金熔体施加电磁搅拌处理引起金属液的快速流动, 加快了溶质的扩散速率、延长了扩散距离, 晶粒尺寸得到明显细化^[9]。系列研究指出: 对 Pb-Sn 合金施加电磁搅拌时, 合金熔体的流动特性可改善合金的偏析以及有效地细化晶粒尺寸^[10]; 对金属浆料施加脉冲电磁搅拌时, 熔

体形成强制对流, 较单向连续搅拌可获得晶粒尺寸更加细小和表面更平整的合金铸锭^[11]; 当利用环缝式电磁搅拌作用熔体时, 发现在大搅拌力和高磁场频率作用下获得了非枝晶组织^[12]; 当利用低过热度电磁搅拌制备铝合金浆料时, 凝固组织中的初生相 $\alpha(\text{Al})$ 和共晶组织的形态发生了显著改变^[13]。另外, 通过分析连续电磁铸造过程中铝熔体内部的运输现象, 探明了熔体强制流动的流动特性以及仿真预测熔体温度的可行性^[14]。由此可知: 电磁场作用于熔体引起强制对流促进了晶粒细化, 提升了材料的力学性能^[15]。目前对于液固两相区的金属熔体所施加的电磁搅拌处理方式大多数是一种连续单向式的, 虽然也有研究人员提出了分级搅拌的方式^[16], 但也是在单向搅拌过程中实施不同电磁频率搅拌, 仍属于单向搅拌方式。关于电磁结晶器内对合金熔体施加双向电磁搅拌的研究报道还不多见, 而且在双向电磁搅拌作用下熔体的流动规律、凝固行为以及初生相的形核与长大等值得探究。

因此, 本文作者以 A356 铝合金为实验对象, 对其熔体施加双向电磁搅拌, 探究电磁搅拌方式及其工

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51144009, 51361012); 江西省自然科学基金资助项目(20142bab206012); 江西省教育厅科技资助项目(GJJ14407)

收稿日期: 2016-09-02; **修订日期:** 2017-12-21

通信作者: 刘 政, 教授, 博士; 电话: 0797-8312137; E-mail: liukk66@163.com

艺参数对半固态 A356 铝合金初生相组织的影响,以期能够制备出优质的半固态铝合金浆料,获知其最佳的制备工艺参数,并进一步认知电磁场在合金凝固过程中的物理机制及在金属改性方面的作用。

1 实验

试验原料为 A356 铝合金, X 荧光光谱仪分析其化学成分(质量分数)为 Si 7.14%、Mg 0.33%、Fe 0.135%、Al 余量。合金经预热后置于设定温度为 720 °C 的 SG2-5-12 电阻坩埚炉内进行熔炼,在合金充分熔化后加入覆盖剂(50%NaCl+50%KCl)防止熔体在加热过程中被氧化,保温 10 min 处理后进行 2~3 次除气除渣精炼。随后将熔体温度降至 620 °C 并迅速浇注到内径为 55 mm、高度约为 100 mm 且预热至 360 °C 的不锈钢铸型内,铸型安放于自行研制的电磁搅拌器中。接通电源开启电磁搅拌装置,搅拌终了后将铸型置于 590 °C 的箱式电阻炉内进行等温保温 10 min 处理。保温结束后取出铸型浸入水中对熔体进行快速水淬处理,以保存高温时合金浆料的组织形态,然后及时脱模取出铸锭。

由于低频电磁场具有磁感应线密集、贯穿能力强和肌肤效应不明显等特点^[17],且熔体只需施加短时电磁搅拌处理即可获得优质的半固态合金浆料^[18];另外,当电磁搅拌时间过长时初生晶粒有团聚的趋势,形成尺寸较大的树枝晶,故设置试验电磁搅拌时间恒定为 12 s。为探究电磁频率对组织的影响,分别设置双向连续搅拌频率为 10、20、30、40 Hz。在获得最佳电磁搅拌频率的基础上进一步探讨了熔体施加不同电磁搅拌方式对凝固组织的影响。如单向连续搅拌、双向连续搅拌、双向间歇搅拌(中间停留 2 s)。电磁搅拌方式如图 1 所示。在铸锭的轴向距底部 10 mm 处截取一个圆片,并从中切取一个过圆心的扇形圆片作为金相试样。试样经粗磨、细磨、抛光并利用 0.5%HF 水溶液进行腐蚀处理。在 ZEISS AXIOSKOP2 型光学显微镜观察凝固组织,使用相关软件 Image-pro-plus、Excel 对凝固组织中初生相的平均等积圆直径 D 和平均形状因子 F 进行测量计算,并依据 D 和 F 的数值对合金的凝固组织形貌进行判断与描述。平均等积圆直径和平均形状因子计算公式分别为 $D=2(A/\pi)^{1/2}$ 和 $F=4\pi A/P^2$,其中 P 为凝固组织中初生相的平均周长, A 为初生相的平均面积。若 F 的数值越趋近或者等于

1 则表明组织中初生相晶粒外形轮廓呈现近球形或球形,此时合金的凝固组织形貌最佳、性能最优。

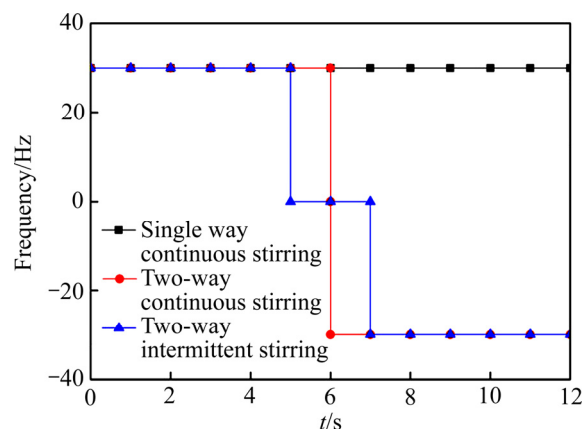


图 1 不同电磁搅拌方式的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different electromagnetic stirring ways

2 结果与分析

2.1 磁场频率对合金凝固组织的影响

图 2 所示为不同磁场频率、相同搅拌时间、双向连续电磁搅拌下铝合金浆料的凝固显微组织。从图 2 可以看出,铝熔体经双向连续电磁搅拌处理后,显微组织相较于传统条件下的铸态组织发生了显著的变化。图 2(a)所示为熔体施加 10 Hz 双向电磁连续搅拌时,初生相的形貌主要为少数发达的树枝晶,一次枝晶主轴较长、二次枝晶臂粗大;在组织的边缘处存在少量形貌不太规整的长条形和粗颗粒状晶粒。合金浆料整体组织形态与分布均匀性差异较大,难以满足合格流变成形浆料的要求。通过图像分析软件测量显示,此时其平均等积圆直径 46.5 μm ,形状因子 0.61。图 2(b)所示为初生 $\alpha(\text{Al})$ 相在磁场频率 20 Hz 作用下的组织形态。由 10 Hz 时发达的树枝状向长条状、棒状和近球状转变,并且由于电磁力增大使得枝晶碎断、游离剪切,浆料中粗大的树枝晶已消失殆尽。因此,晶粒的尺寸、形貌得以改善。平均等积圆直径减小为 42.3 μm ,形状因子增至 0.69。当磁场频率进一步增至 30 Hz 时,初生相的组织形貌如图 2(c)所示。此时组织中长条状和近球状的初生相 $\alpha(\text{Al})$ 在强烈的双向搅拌作用下受到合金液流的冲刷向球状转变。合金液流的快速流动使得固相晶粒之间的碰撞、剪切概率进一步增大。因此,初生相的形态主要为球状和近似球状,晶粒圆

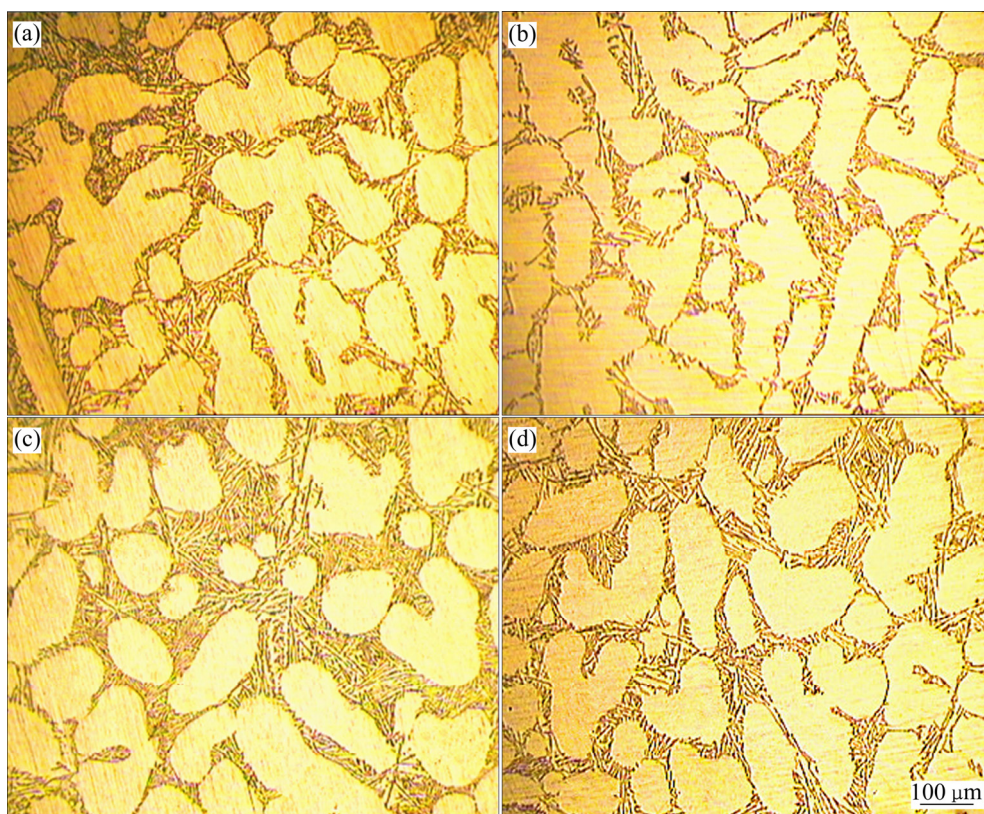


图 2 不同磁场频率双向连续电磁搅拌下半固态 A356 铝合金的初生相形貌

Fig. 2 Morphologies of primary α phase in semisolid A356 aluminum alloy at different magnetic field frequency of two-way continuous electromagnetic stirring: (a) 10 Hz; (b) 20 Hz; (c) 30 Hz; (d) 40 Hz

整、弥散分布, 平均等积圆直径降至 $38.2 \mu\text{m}$, 形状因子增大到 0.75。当磁场频率增至 40 Hz 时, 磁场频率增大使搅拌器内的液态合金在双向搅拌力作用下, 晶粒之间以及与铸型型壁的碰撞强度增强, 晶粒间接触概率增大, 形成大尺寸晶粒(如图 2(d)所示), 初生晶粒产生了明显的粗化现象。此时初生相的组织形貌没有进一步优化, 长条状和粗颗粒状晶粒再次出现。平均等积圆直径增加至 $45.7 \mu\text{m}$, 形状因子降至 0.67。

图 3 所示为铝合金熔体在双向连续恒定电磁搅拌时间、不同磁场频率作用下显微组织中初生固相颗粒的平均等积圆直径(D)和平均形状因子(F)的变化关系曲线。结合图 2 和 3 可以看出, 电磁结晶器内的合金熔体在双向连续电磁搅拌环境下随磁场频率的线性增加, 流动状态的改变使得浆料显微组织中 $\alpha(\text{Al})$ 的平均等积圆直径由 $46.5 \mu\text{m}$ 急剧减小至 $38.2 \mu\text{m}$ 。在磁场频率为 40 Hz 时, 初生相的尺寸出现大幅增长。形状因子相较于平均晶粒直径在磁场频率线性变化的过程中呈现出相反的变化规律: 在磁场频率 30 Hz 时, 形状因子达到了极大值 0.75。进一步增大磁场频率时, 形状因子减小。因此, 最佳磁场频率为 30 Hz。

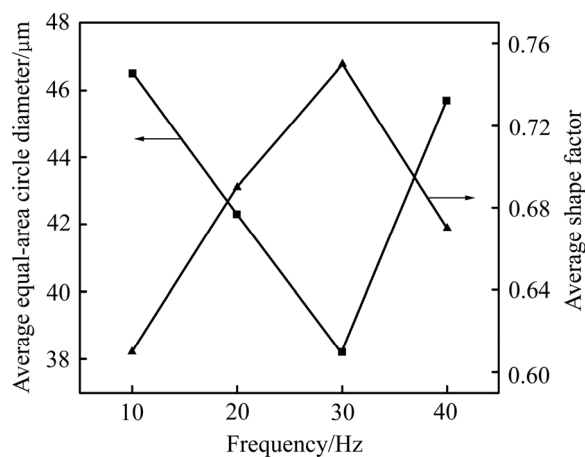


图 3 不同磁场频率双向连续电磁搅拌下半固态 A356 铝合金初生相的平均等积圆直径和形状因子

Fig. 3 Average equal-area circle diameter and average shape factor of primary α phase in semisolid A356 aluminum alloy at different magnetic field frequencies of two-way continuous electromagnetic stirring

2.2 电磁搅拌方式对合金凝固组织的影响

在液态金属凝固相变过程中, 熔体的流动形式以及所处状态可以影响初生相、共晶组织的形貌和尺寸,

从而对合金的性能产生影响。特别是熔体在电磁场作用下的流动状态因搅拌方式不同而不同。为此,在磁场频率为 30 Hz 时,分析不同电磁搅拌方式对凝固组织中 $\alpha(\text{Al})$ 相的作用。图 4 所示为铝熔体施加单向连续电磁搅拌、双向间歇电磁搅拌和双向连续电磁搅拌时合金凝固组织。图 5 所示为不同电磁搅拌方式下铝合金浆料中初生相的平均等积圆直径和形状因子柱状图。由图 4 可见,随着电磁搅拌方式的变化,初生相

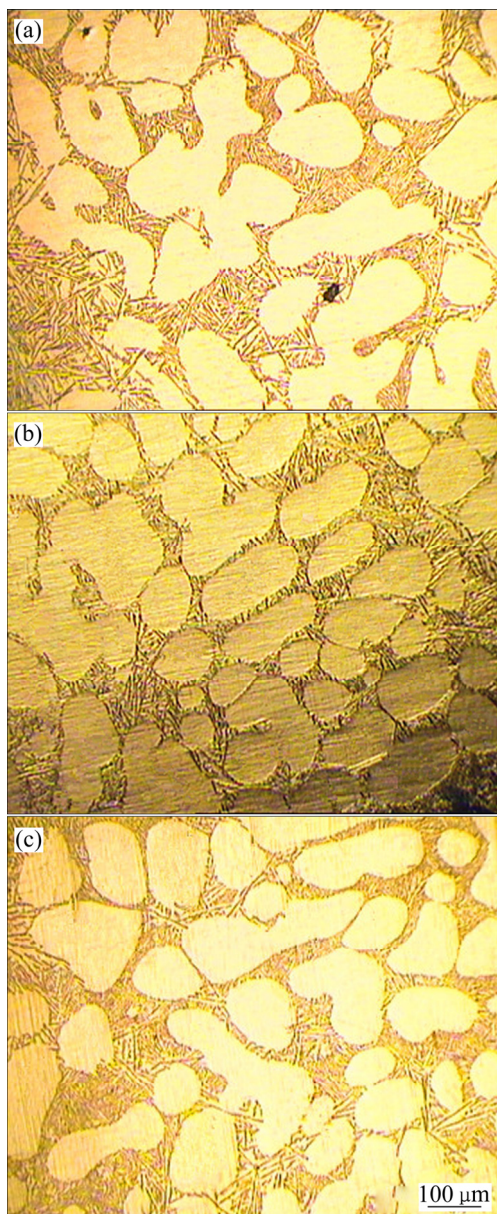


图 4 不同电磁搅拌方式下半固态 A356 铝合金初生相的形貌
Fig. 4 Morphologies of primary α phase in semisolid A356 aluminum alloy at different electromagnetic stirring ways: (a) Single way continuous electromagnetic stirring; (b) Two-way intermittent electromagnetic stirring; (c) Two-way continuous electromagnetic stirring

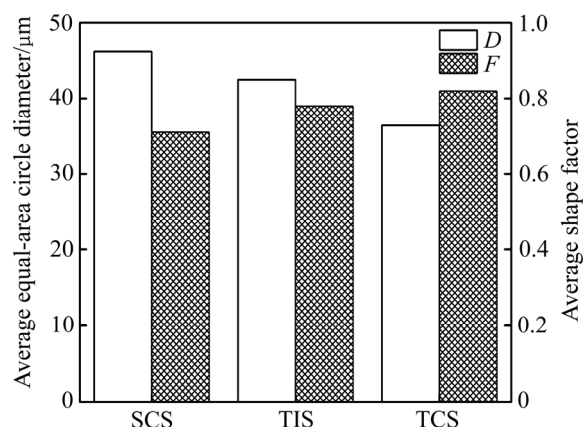


图 5 单向连续电磁搅拌、双向间歇电磁搅拌和双向连续电磁搅拌下半固态 A356 铝合金初生相的平均等积圆直径和形状因子

Fig. 5 Average equal-area circle diameter(D)and average shape factor(F) of primary α phase in semisolid A356 aluminum alloy at single way continuous electromagnetic stirring(SCS), two-way intermittent electromagnetic stirring(TIS) and two-way continuous electromagnetic stirring(TCS)

的形貌特征和尺寸不断优化。固液两相熔体施加连续单向电磁搅拌处理时,在电磁体积力搅拌作用下,熔体内部凝固初期形成的发达树枝晶受到液流的强力冲刷和折断,枝晶断裂、破碎成长条状,此时初生相的平均等积圆直径为 46.2 μm 、形状因子 0.71(如图 4(a)所示)。图 4(b)所示为半固态初生相 $\alpha(\text{Al})$ 在双向间歇电磁搅拌下的形貌。凝固组织中尺寸较大的粒状初生相转变为细小的球状以及椭圆状,发达的树枝晶基本消失,此时初生相的平均晶粒直径为 42.5 μm 、形状因子为 0.78。图 4(c)所示为双向连续电磁搅拌下初生 α 相的形貌,此时初生相的形貌以及尺寸相较于单向连续搅拌、双向间歇搅拌得到了不同程度的改善,主要以细小圆整的球晶为主,晶粒的均一性增强。平均晶粒直径为 36.4 μm 、形状因子为 0.82。从图 4 中可看出:双向连续电磁搅拌获得的初生相的形貌和尺寸相比于其他两种电磁搅拌方式更加圆整、细小。其原因在于:一方面,单向连续电磁搅拌时,结晶器内液固两相熔体随磁场一起同向运动,熔体和磁场间相对运动强度较小;双向连续电磁搅拌时,磁场和熔体间存在剧烈的相对运动,使得熔体中固相之间的碰撞、剪切概率增大,可促进初生相的细化。另一方面,双向连续电磁搅拌时,熔体的流动方向发生了周期性的变化,熔体的热量散失过程能够在较短的时间内进行,

稳定的热环境有利于晶粒组织的球化。此外, 双向间歇电磁搅拌时, 铝熔体的流动状态存在短时停留, 凝固组织的细化程度有所降低。因此, 在本研究考察电磁搅拌方式对合金浆料凝固组织的影响时, 对比实验结果可知, 双向连续电磁搅拌更加有利于获得初生相细小的优质半固态浆料。

3 讨论

3.1 电磁场在铝熔体中产生的流动对初生相的影响

研究表明^[19]合金熔体凝固过程中主要存在 3 种流动方式: 自然对流、强迫对流和亚传输过程的流动。当熔体流动方式不同时, 将对溶质、微粒扩散、迁移和分布规律以及凝固界面的稳定性产生显著影响, 由此可对凝固组织的形貌、尺寸进行调控, 最终控制合金材料的性能。

目前, 由于凝固理论的不完善与研究手段的欠缺, 人们对于固液共存、具有高黏性的半固态合金的流动规律及其溶质传输的认识与控制还受到一些限制。已有研究指出, 电磁场作用下液态金属的流动呈现为剧烈的强制对流, 而且在较低频率的电磁场扰动下, 铝合金熔体中可以产生混沌流动^[20]。这意味着在利用电磁搅拌工艺制备半固态 A356 合金浆料的过程中, 施加适当频率电磁场能使 A356 铝熔液发生混沌对流。这种混沌流动可以有效地改善结晶器内流体的混合效果^[21-22], 尤其是高黏性的半固态合金熔体在电磁场作用下产生的混沌流动, 可使熔体的流线紊乱、交织、重叠, 有利于合金熔体中的溶质扩散且分布均匀, 从而改善合金凝固组织^[23]。

电磁搅拌使得晶粒细化的主要原因是: 电磁场可在合金熔体内部产生强烈的紊流流动。依据电磁搅拌原理可知, 当电磁场连续单向旋转时, 熔体内每一处产生的感应电动势可使熔体中产生感应电流, 感应电流与磁场相互作用使熔体受到 Lorentz 力。由于 Lorentz 力有径向、切向和轴向 3 个分量, 在这 3 个分力的作用下, 使熔体中每个微粒都在电磁场内做三维运动, 并形成混沌对流, 使得流场内的温度和浓度趋于均匀。另外, 当合金凝固时, 初生相从熔体中逐渐析出, 初生相与熔体的物理性能(如电导率)有很大差异, 这样使得初生相与周围熔体受到的 Lorentz 力有所不同, 加速了初生相与周围熔体的相对运动。随着电磁场频率的适当增加, 混沌程度越大, 相对运动会

越大。液相流动时, 特别是紊流流动, 加剧了固/液界面的温度起伏, 凝固区域的局部温度可能超过固相的熔点, 使初生相枝晶臂发生局部熔化而从界面分离。同时, 黏性熔体流动时的粘滞力可对初生相枝晶臂产生剪切作用, 除了诱发再结晶, 使熔体沿新晶界渗透使枝晶臂熔断, 或许可加速这些枝晶臂根部的溶质扩散和重熔。这些熔断的枝晶臂随熔体一起流动并被熔体冲刷, 同时熔体中的枝晶之间互相碰撞等, 这些都有利于细化初生相。

3.2 不同电磁搅拌方式下铝熔体流动特性对细化初生相的影响

从 3.1 节的讨论结果可知, 电磁场下铝熔体流动对合金浆料中初生相的细化具有显著影响。具体到本研究中对结晶器内的半固态 A356 合金熔体施加不同的电磁搅拌方式搅拌处理时, 合金熔体的流动特性因电磁搅拌方式不同将出现新特征。

单向连续电磁搅拌时, 由于熔体与磁场间的同向运动特性, 合金液流的流动方式由铸型中心较为平缓的层流和边缘区域电磁力诱导的紊流构成。溶质的扩散迁移路径为沿着流体的流线或者流面, 结晶器内熔体流动的紊乱程度较弱、溶质以及热量的交换速率小。因此, 凝固系统的温度场、流场的均匀化有待进一步的提升, 初生相呈现为图 4(a)所示的粗大长条状形貌以及零散分布的类球状形貌。然而, 当合金熔体在双向连续电磁搅拌作用下时, 由于双向电磁搅拌力周期性变化的缘故, 熔体的流动呈现为强烈紊流, 这就使得熔体内部的溶质扩散分布更加均匀, 从而改善了凝固组织。双向连续电磁搅拌使熔体的流动方式以紊流为主, 层流基本消失。结晶器内的熔体处于混沌态, 正是由于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^[20]。

在双向连续搅拌作用下, 熔体中起初相互靠近的流体轨迹将按指数分离并进入到能量完全不同的流场结构部分, 从而实现结晶器内部不同尺度的流体间物质和能量的传递, 促使凝固系统的能量在宏观上均匀化。另外, 当合金熔体流动呈混沌状态时, 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。一个相对稳定的热环境是保证晶粒组织球化、细化和均匀化的重要途径。合金浆料中初生相在双向连续电磁搅拌作用下, 由于溶质原子扩散传输能力的提升和稳定的热环境双重作用, 促进了凝固组织的细化, 此时初生相呈现为如图 4(c)所示的细小圆整的球形。

双向间歇电磁搅拌时,熔体的流动混乱程度较弱。与双向连续搅拌的强紊流相比,由于搅拌过程中熔体流动状态存在短暂停留,从而导致流体间的剪切强度、熔体的动量和热量交换有所衰减。因而,熔体内的溶质可能存在富集现象,不利于获得优质半固态合金浆料。如图4(b)所示,双向间歇电磁搅拌时初生相的形貌为细小的球晶以及椭圆状晶粒和少量的枝晶。

综上所述,在液态合金凝固过程中施加不同的电磁搅拌方式时,熔体的流动状态将形成不同的混乱程度。合适的电磁搅拌方式将使得合金熔体流动混乱程度适中,可以避免在合金铸锭中出现因熔体流动混乱程度过于剧烈而导致的吸气和卷入夹杂物等缺陷。因此,通过对比试验结果可知,对于半固态A356合金熔体来说,最佳的电磁搅拌方式为双向连续电磁搅拌。此电磁搅拌方式能够制备出初生相尺寸细小、形貌较圆整的半固态合金浆料。

4 结论

1) 采用双向连续电磁搅拌工艺可制备出优质的半固态A356合金浆料。通过实验研究,获得了合适的双向连续电磁搅拌工艺参数:在620℃低过热度浇注、磁场频率30 Hz、双向连续电磁搅拌12 s和590℃等温保温10 min等工艺条件下,初生相的形貌和尺寸达到最优。

2) 在磁场频率30 Hz的条件下,比较了铝合金熔体施加单向连续电磁搅拌、双向间歇电磁搅拌、双向连续电磁搅拌制备半固态A356合金浆料的效果。结果表明:双向连续电磁搅拌相较于其他两种电磁搅拌方式,可使铝熔体处于强烈的紊流状态,熔体中初生相碰撞剪切的强度和概率增大。另外,铝熔体的运动惯性形成惯性冲击,促进了凝固体系的传质传热,改善了初生相的形貌和尺寸,其平均等积圆直径和形状因子分别为36.4 μm和0.82。

REFERENCES

- [1] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. Metallurgical Transaction A, 1991, 22(5): 957-981.
- [2] CHEN Z Z. Preparation of semisolid A356 Al-alloy slurry by introducing grain process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1307-1312.
- [3] DONG J, CUI J Z, DING W J. Theoretical discussion of the effect of a low-frequency electromagnetic vibrating field on the as-cast microstructures of DC Al-Zn-Mg-Cu-Zr ingots[J]. Crystal Growth, 2006, 295: 179-187.
- [4] ZUO Y B, CUI J Z, MOU D, ZHU Q F, WANG X J, LI L. Effect of electromagnetic field on microstructure and macrosegregation of flat ingot of 2524 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2408-2413.
- [5] OH S W, BAE J W, KANG C G. Effect of electromagnetic stirring conditions on grain size characteristic of wrought aluminum for rheo-forging [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(1): 57-63.
- [6] ECKERT S, NIKRITYUK P A, WILLERS B, RÄBINGER D, SHEVCHENKO N, NEUMANN-HEYME H, TRAVNIKOV V, ODENBACH S, VOIGT A, ECKERT K. Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys[J]. Eur Phys J Special Topics, 2013, 220: 123-137.
- [7] JI S, FAN Z. Solidification behavior of Sn-15 wt pct Pb alloy under a high shear rate and high intensity of turbulence during semisolid processing[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 33(11): 3511-3520.
- [8] 陈兴润, 张志峰, 徐 骏, 石力开. 电磁搅拌法制备半固态浆料过程电磁场、流场和温度场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 937-945.
CHEN Xing-run, ZHANG Zhi-feng, XU Jun, SHI Li-kai. Numerical simulation of electromagnetic field, flow field and temperature field in semi-solid slurry preparation by electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 937-945.
- [9] NAFISI S, GHOMASHCHI R. Microstructural evolution of electromagnetically stirred feedstock SSM billets during reheating process[J]. Metallogr Microstruct Anal, 2013, 2: 96-106.
- [10] 陈 志, 陈长乐, 陈翔燕, 郝丽梅, 洪振宇, 王康宁. 旋转磁场作用下的 Pb-Sn 合金组织研究[J]. 稀有金属材料与工程. 2007, 36(11): 2012-2015.
CHEN Zhi, CHEN Chang-le, CHEN Xiang-yan, HAO Li-mei, HONG Zhen-yu, WANG Kang-ning. Microstructures of Pb-Sn alloys in rotating magnetic field[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(11): 2012-2015.
- [11] MUSAEVA D A., BAAKE E, ILIN V K. Experimental investigation of Al-Alloy directional solidification in pulsed electromagnetic field[J]. Materials Science Forum, 2016, 870: 471-476.
- [12] BAI Y L, XU J, ZHANG Z F. The Research on the annulus electromagnetic stirring for preparing the semisolid A356 aluminum alloy slurry[J]. Solid State Phenomena, 2014, 217/218: 241-246.

- [13] 王 晶, 李培杰, 何良菊, 弭光宝, 钟约先. 电磁搅拌对 A356 合金熔体结构及其凝固行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2090–2098.
- WANG Jing, LI Pei-jie, HE Liang-ju, MI Guang-bao, ZHONG Yue-xian. Influence of electromagnetic stirring on structure of A356 melt and its solidification behavior[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2090–2098.
- [14] SIMLANDI S, BARMAN N, CHATTOPADHYAY H. Studies on transport phenomena during continuous casting of an Al-Alloy in presence of electromagnetic stirring[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2013, 66(2): 141–146.
- [15] DWIVEDI S P, SHARMA S, MISHRA R K. Microstructure and mechanical behavior of A356/SiC/Fly-ash hybrid composites produced by electromagnetic stir casting[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2015, 37(1): 57–67.
- [16] 刘 政, 周翔宇. 分级电磁搅拌对半固态 Al-Cu 合金凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 49–57.
- LIU Zheng, ZHOU Xiang-yu. Effects of stepped electromagnetic stirring on solidification microstructure in semisolid Al-Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 49–57.
- [17] 赵君文, 郭 安, 徐 超, 李 微, 戴光泽, 吴树森. 弱电磁搅拌制备 Al-Zn-Mg-Cu 大体积铝合金半固态浆料[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(12): 2499–2505.
- ZHAO Jun-wen, GUO An, XU Chao, LI Wei, DAI Guang-zhe, WU Shu-sen. Preparation of large-volume semi-solid slurry of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy by weak electromagnetic stirring[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(12): 2499–2505.
- [18] 王少华, 杨守杰, 房灿峰, 王剑钊, 戴圣龙, 张兴国. 电磁铸造对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金微观组织及晶内固溶度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(12): 2083–2089.
- WANG Shao-hua, YANG Shou-jie, FANG Can-feng, WANG Jian-zhao, DAI Sheng-long, ZHANG Xing-guo. Effects of electromagnetic casting on as-cast microstructures and solid solubility inside crystals of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(12): 2083–2089.
- [19] SUKHRAM M, ARGYROPOULOS S A. Solidification and melting of aluminum onto circular cylinders under forced convection: experimental measurements and numerical modeling[J]. Metall Mater Trans, 2014, 45B: 1723–1738.
- [20] 刘 政, 张嘉艺, 余昭福. 电磁场作用下铝合金熔体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): 3026–3032.
- LIU Zheng, ZHANG Jia-yi, YU Zhao-fu. Simulation and analysis on chaotic characteristic of flow in Al alloy melt under electromagnetic field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3026–3032.
- [21] ARRATIC P E, MUZZIO F J. Planar laser-induced fluorescence method for analysis of mixing in laminar flows[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(20): 6557–6568.
- [22] BRESLER L, SHINBROT T, METCALFE G. Isolated mixing regions: Origin, robustness and control[J]. Chem Eng Sci, 1997, 52(10): 1623–1636.
- [23] 刘 政, 张嘉艺, 罗浩林, 邓可月. 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.
- LIU Zheng, ZHANG Jia-yi, LUO Hao-lin, DENG Ke-yue. Research on morphology evolution of primary phase semisolid A356 alloy under chaotic advection[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(2): 177–183.

Effects of two-way electromagnetic stirring on solidified microstructure of semisolid A356 aluminum alloy

LIU Zheng¹, CHEN Tao², CHEN Zhi-ping¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A semi-solid slurry with solidified structure of spherical or spheroid primary solid particles was obtained by using a self-designed electromagnetic control device to two-way electromagnetic stirring the aluminum melt in the mold. The influences of magnetic field frequency and electromagnetic stirring ways (single way continuous electromagnetic stirring, two-way continuous electromagnetic stirring, two-way intermittent electromagnetic stirring) on the morphological evolution of the primary phase were analyzed when the electromagnetic stirring time was constant at 12s. The results show that, with the increase of the magnetic field frequency, the morphologies of primary solid phase grains change from dendritic, long strip, coarse granular to spherical shape, the grain size first decreases and then increases, the optimum magnetic field frequency is 30 Hz. In this case, the average equal-area circle diameter of primary $\alpha(\text{Al})$ is 38.2 μm , and the average shape factor is 0.75. In addition, when two-way continuous electromagnetic stirring are applied on the liquid melt to form strong turbulence and inertial impact, the mass transfer and heat transfer of the solidified system are accelerated. The slurry structure of alloy is more compact and rounded than those by the single-way continuous electromagnetic stirring and two-way intermittent electromagnetic stirring.

Key words: semisolid; A356 aluminum; two-way electromagnetic stirring; solidification microstructure

Foundation item: Projects(51144009, 51361012) supported by the National Natural Science Foundation; Project (20142bab206012) supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China; Project (GJJ14407) supported by the Science and Technology of Jiangxi Provincial Education Department, China

Received date: 2016-09-02; **Accepted date:** 2017-12-21

Corresponding author: LIU Zheng; Tel: +86-797-8312137; E-mail: liukk66@163.com

(编辑 何学锋)