电磁场对金属凝固影响机制研究进展

钱晓明[1] 张向阳[1] 徐艺菲[1] 王昭东[2] 许光明[2] 孟龙宙[1] 汤宏群[3] 李 勇[2] 白清领[4,5] 王浩宇[1]
（1. 燕山大学冷带轧制装备与技术国家工程研究中心，秦皇岛 066004；2. 东北大学轧制技术及自动化国家重点实验室，沈阳 110819；3. 广西大学特色金属材料与组合材料结构全生命周期安全国家重点实验室，南宁 530004；4. 滨州铝产业先进制造山东省实验室，滨州 256606；5. 滨州魏桥国科高等技术研究院，滨州 256606）

摘 要 目前优化凝固过程以改善合金性能是材料研究首要突破点。电磁外场的引入为调控凝固过程提供了新的途径，通过影响熔体的流动、传热和相变行为，实现对凝固过程的精确控制，从而改善产品质量。对不同种类电磁外场影响金属凝固组织的机理进行了系统性分析，综述了国内外电磁场对凝固过程的研究进展。从金属凝固本质、电磁场参数出发，分析了电磁场干预金属凝固的影响规律及作用机理，综述了电磁场引入金属凝固相关技术的作用。

关键词 电磁场；金属凝固；晶粒细化
中图分类号 TF802；TG244；TG391 **文献标志码** A DOI：10.15980/j.tzzz.T20250382

Research Progress in Influence Mechanism of Electromagnetic Field on Metal Solidification

QIAN Xiaoming[1], ZHANG Xiangyang[1], XU Yifei[1], WANG Zhaodong[2], XU Guangming[2], MENG Longzhou[1], TANG Hongqun[3], LI Yong[2], BAI Qingling[4,5], WANG Haoyu[1]
（1. The National Cold Rolling Plate and Strip Equipment and Process Engineering Technology Research Center, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819; 3. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-cycle Safety for Composite Structures, Guangxi University, Nanning 530004; 4. Binzhou Advanced Manufacturing Laboratory for Aluminum Industry of Shandong Province, Binzhou 256606; 5. Weiqiao Guoke High-Tech Research Institute, Binzhou 256606）

Abstract: Optimizing the solidification process to enhance alloy properties has become a key breakthrough point in contemporary research. Inducing external electromagnetic fields offers a novel approach to regulating solidification processes, and precise control over solidification can be achieved through influencing melt flow, heat transfer, and phase transformation behaviors, thereby improving product quality. Influence mechanisms of various types of electromagnetic fields on solidification microstructure were analyzed systematically, and impact mechanisms of electromagnetic field on solidification process were reviewed domestically and abroad. The influence law and action mechanisms of electromagnetic field intervening solidification were examined based on the essence of metal solidification and parameters for electromagnetic field, and relevant technologies of metal solidification involving electromagnetic fields were reviewed.

Key Words: **Electromagnetic Field**, **Metal Solidification**, **Grain Refining**

凝固是合金材料制备的关键环节，凝固过程中形成的晶粒组织直接影响材料的力学性能、加工性能和耐腐蚀性，对凝固过程进行干预会显著影响合金的宏观性能。研究者不断探索新的晶粒细化技术，以优化金属凝固组织。通过添加晶粒细化剂促进异质形核，结合外场辅助手段如电磁搅拌、超声振动、脉冲电流等进一步调控凝固过程，抑制柱状晶生长，促进等轴晶形成。相较于晶粒细化剂，外场辅助手段不会引入杂质

收稿日期：2025-10-22；**修订日期**：2026-04-08
基金项目：省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室开放基金资助项目（MMCS2023OF09）；广西科技重大专项资助项目（AA23073019）；轧制技术及连轧自动化国家重点实验室（东北大学）开放课题基金资助项目（2023RALKFKT004）；南宁市科技重大专项资助项目（20231037）；魏桥国科高等技术研究院资助项目（SSYS-CL-2025-ST-010）；基础创新科研培育资助项目（2022LGQN015）
第一作者：钱晓明，男，1987年出生，讲师，E-mail：qxm@ysu.edu.cn
通信作者：汤宏群，女，1972年出生，教授，E-mail：hqtang@gxu.edu.cn
引用格式：钱晓明，张向阳，徐艺菲，等. 电磁场对金属凝固影响机制研究进展[J]. 特种铸造及有色合金，2026，46（10）：1 470-1 478.
QIAN X M, ZHANG X Y, XU Y F, et al. Research progress in influence mechanism of electromagnetic field on metal solidification[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1 470-1 478.

且更加均匀，可以避免细化剂密度差异造成的颗粒聚集，从而提高材料组织的均匀性。外场辅助手段的绿色环保特点更符合我国现代制造业高质量发展战略指标。自20世纪末以来，以电磁场为主的外加辅助场被广泛应用于金属凝固过程调控，提高了合金力学、加工性能以及组织均匀性。外场辅助手段对凝固过程干预研究经历了从基础试验到机理研究，再到工业应用，最后到高质量绿色生产制造的逐步发展过程[1-4]。

1　电流对金属凝固的影响

在金属凝固过程中通过电极直接将电流引入到金属熔体中，从而改善金属凝固组织，提升合金的力学性能。根据引入的波形以及电流特性将电流对金属凝固过程的作用分为直流电流处理和脉冲电流处理。

1.1　直流电流处理

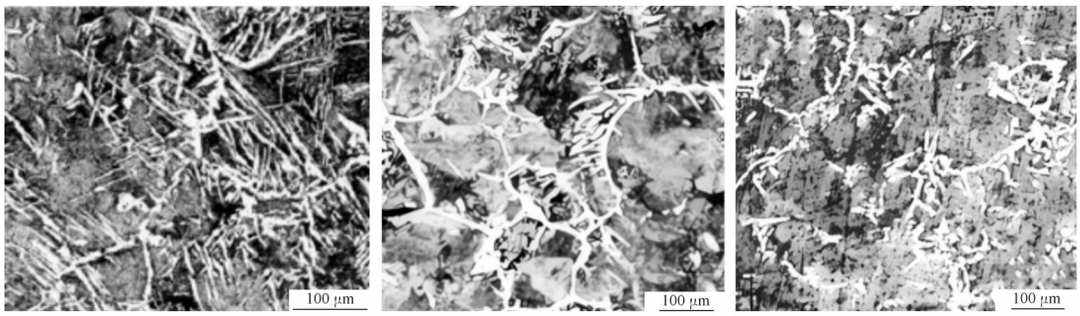
直流电流调控金属凝固会产生强烈的电迁移效应，其本质是电子风驱动溶质原子定向迁移，是一种原子尺度的传输现象，为主动、精确地控制凝固过程中的溶质分布和偏析提供了强有力的物理手段。直流电流和脉冲电流在金属凝固过程中都会产生焦耳热效应，通过非接触式的电效应对金属凝固进行调控，避免了机械搅拌可能带来的污染。LI D L等[5]在电流作用下对Pb-Sn中的原子电迁移与电传输现象进行研究，促进并完善了原子在电场中的迁移理论。ZHU X等[6]系统研究了金属材料中的电迁移现象。WANG X L等[7]研究了电流对金属材料中位错运动迁移率的影响。MISRA A K[8]发现直流和交流电流能够细化PbSbSn共晶和亚共晶合金组织，造成固液界面失稳。AHMED S等[9]发现在高温合金凝固过程中施加直流电流能有效改善其微观组织，具体表现为晶粒与γ'相的细化与均匀化，同时显著抑制了宏观偏析和气孔等缺陷的形成。

近年来，利用电流处理低熔点二元或三元合金的凝固过程，以调控其组织与性能，已成为研究热点。顾根大[10]在Al-Si、Al-Cu、Sn-Bi等合金的电流辅助定向凝固研究中发现，电流能有效促进共晶相的形核与协同生长，并细化其片层间距。从机理上分析，这主要归因于电流改变了凝固界面处的溶质分布，增大了有效平衡分配系数，从而降低了成分过冷程度，减小了相变驱动力。此外，随着电流密度增加，晶粒尺寸呈增大趋势。王劲等[11]发现在ZA27合金凝固过程中施加直流电流，增大电流密度会显著细化枝晶间距并增加共晶相含量（质量分数，下同）。其内在机理为电流产生的焦耳热效应促进了形核，导致晶粒细化。当电流密度超过临界值时，强烈的焦耳热与电磁搅拌作用促使富Al枝晶由柱状晶向等轴晶转变。李万锋等[12]发现直流电流显著改变了K417G高温合金的凝固路径与组织形貌。宏观上，电流增强了熔体对流，提高了形核率，促使凝固模式由枝晶生长向胞状晶转变，提升了组织均匀性；微观上，则促进了碳化物的球化与细化。JEE S C等[13]发现电流通过焦耳热效应显著影响纯铝的凝固结构。在适度条件下，表现为晶粒由柱状晶向等轴晶的转变，但当电流密度过高时，过强的焦耳热会阻碍晶核稳定甚至引发重熔，导致细化效果消失，这揭示了电流作用存在一个优化窗口。JIA P F等[14-15]在7050和7B04铝合金凝固过程中施加直流电流，可促进合金元素形成扩散网状形貌并使第二相分布更为均匀，这归因于电流促进了液态合金中溶质原子的扩散与空位迁移，从而增强了凝固过程的均质化程度，使合金获得更高的硬度。JIANG H X等[16]利用直流电流通过改变少数相液滴运动与界面温度场，调控了Al-Pb难混溶合金的凝固过程，为最终形成均匀弥散结构或壳/核结构提供了机理解释。YANG F F等[17]发现直流电流可调控Sn-Pb/Sn-10Cu合金的凝固组织，但其细化作用存在临界电流密度。合适大小的电流通过促进形核、抑制晶粒生长并改变相变顺序以实现细化；电流过大则因抑制形核而导致晶粒粗化。

1.2　脉冲电流处理

直流电源和交流电源所产生的电流均可以细化金属凝固组织，但所需能量较大，不利于工业应用和推广。脉冲电源具有瞬时释放能量高、功耗小等特点而被广泛应用，其电流输出形式的非连续性对材料产生的作用与直流电流不同，核心机制涉及电场对熔体物理化学行为的多尺度调控。电场参数中电场强度（即电压）、脉冲频率、电流强度以及占空比、施加时机等对金属凝固具有较大影响。脉宽、波形也会对凝固产生相应影响。在脉冲电流调控凝固过程中，电压参数与晶粒细化效应呈现非线性耦合特征。当脉冲电压尚未达到某一临界值时，晶粒细化的程度会随电压的增高而呈现出增强趋势。丘永福等[18]通过调控脉冲电场的峰值电压参数，系统探究了电压对AZ91镁合金凝固组织演变规律及力学性能的影响机制。电脉冲峰值电压与AZ91镁合金凝固组织细化效果及材料力学性能呈正相关，当脉冲电压达到2 kV时，AZ91镁合金各方面性能达到最优，抗拉强度达到178 MPa，相较未经历电脉冲调控的凝固试样增长了约25%，伸长率增长了128%。张西锋等[19]研究了不同脉冲电压对45钢凝固组织、微观组织及成分偏析的影响，见图1。结果发现，电脉冲对

45钢的晶粒细化作用明显。当电压为1 170 V时，柱状晶区域明显缩小，等轴晶比例增加，残余次级晶粒细化。当电压为2 600 V时，柱状晶几乎消失，整体呈细小均匀的等轴晶结构。电脉冲处理后，珠光体含量增加且珠光体片层间距细化，改善了S、C、P等元素的偏析现象以及微观组织，提高了材料的宏观性能。



(a) 未处理　(b) 经1 170 V电脉冲处理　(c) 经2 600 V电脉冲处理

图1　不同电压的电脉冲处理下45钢的显微组织[19]

Fig.1　Microstructure of 45 steel treated with various pulse voltages[19]

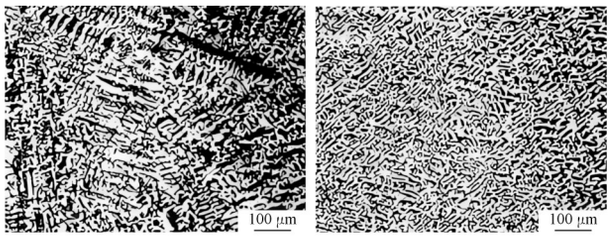
脉冲电场辅助金属凝固过程中，不同的材料最佳处理电压不同。若电压超过材料临界阈值，由热力学效应、机械应力及电化学等多场耦合作用反而会破坏材料凝固的稳定性，导致晶粒粗化、诱发组织缺陷，进而影响材料性能。YANG S Y等[20]在半固态AZ91D镁合金制备试验中发现，随着电压从100 V增至400 V，晶粒细化效果呈现从增强到减弱的趋势，300 V时已经达到最佳效果，而400 V时细化作用已经达到饱和。脉冲电压对金属凝固过程中不同合金的晶粒细化具有最优区间，过高的电压参数造成资源浪费，同时还会击穿材料，影响凝固稳定性。

电流频率对金属凝固具有较大影响。陈越[21]对304钢分别施加了不同频率的脉冲电流，发现在较低频率（0～250 Hz）下晶粒尺寸无明显改善，而脉冲电流达到20 kHz后有效改善了材料的微观性能，晶粒得到细化，促使晶体取向发生重组，有效消除枝晶结构，同时提高了材料的宏观物理性能，改善电导率，夹杂物受到高频脉冲电流影响从而弥散分布，有效减小了夹杂物聚集尺寸。此弥散机制进一步强化材料性能，有效提高了材料硬度。刘建芳等[22]分析了不同频率对6181铝合金铸态晶粒尺寸的影响，发现随着频率升高，6181铝合金铸锭的晶粒尺寸减小，但频率升高到200 Hz后，材料已达到最佳细化效果，继续增加脉冲电流频率会降低晶粒细化效果。GUO J J等[23]研究了不同脉冲频率对Al-9Si合金显微组织、晶粒尺寸和固溶度的影响。将Al-9Si合金熔体暴露在电流密度为300 A/cm^2、频率为0～2 000 Hz高频电流脉冲下。当脉冲频率为1 000 Hz时，凝固后Al-9Si合金中共晶组织晶粒细化效果最好，固溶度高并且力学性能较强。庞松[24]在Mg-10Gd-3Y合金熔融试验中加入了脉冲电流进行处理，发现随着脉冲频率自0增到500 Hz，合金的晶粒尺寸减小了33.5%。这是由于随着脉冲电流频率的增加，电流对熔体的电磁作用效应增强，促进了熔体内物质传输，降低了熔体冷却时温度下降的不均匀性，抑制了晶核的重熔，从而提高了形核率。同时高频率电流还会对晶体枝晶进行剪切，从而破坏枝晶生长。脉冲频率持续增加，焦耳热效应与洛伦兹力联合作用扩展熔体区域，促使晶粒尺寸增大。从能量角度分析，高频率脉冲为原子迁移提供了额外能量，降低了形核壁垒，相较于液态金属波动自发形核机制，这种依赖能量输入促进的原子结合路径可促使形核更高效。

控制其他参数不变的情况下，脉冲电流占空比随着脉冲电流脉宽的增大而增大，在一定范围内，适当提高占空比可使凝固组织得到改善，硬度增加。但当占空比超过一个临界值时，由于产生过多的焦耳热，反而不利于组织细化和力学性能的提升，而不同成分的金属临界值也不同。针对不同材料选择合适范围的占空比非常重要。低占空比或高占空比对材料凝固具有不同的影响效果。

脉冲电流强度可以改变脉冲电流流经熔体的电流密度，从而影响金属凝固过程的效果。对金属凝固过程的施加方式分为正脉冲、负脉冲以及正负比例脉冲。陈越[21]研究了不同电流强度对304不锈钢微观组织的调控作用，重点分析了单向正脉冲和正负脉冲不同施加方式对微观组织性能的影响。结果表明，施加3 A正负脉冲电流可显著促进晶粒细化，相较于未处理的试样晶粒密度增加且平均晶粒尺寸减小。10和20 A处理时，材料仍保持晶粒均匀细化效果，但晶粒尺寸会出现较3 A处理的粗化现象。这表明，过高脉冲电流可能引发晶粒反向长大效应。图2为不同脉冲电流方式处理试样的显微组织[21]。可以看出，相比于正向脉冲电流，经负向脉冲电流处理后试样微观结构更均匀，晶粒细

小且分布趋于一致，同时夹杂物颗粒更加微细化。这表明在不同的施加电流方式中正负比例脉冲电流在改善材料微观结构与性能上效果更好。



(a) 正向脉冲电流　(b) 负向脉冲电流

图2　不同脉冲电流方式处理试样的显微组织[21]

Fig.2　Microstructure of specimens treated with different pulse current methods[21]

BARANK J P等[25]对不同成分的Pb-Sb合金施加脉冲电流，发现脉冲电流造成冷却过程中合金熔体过冷度增大，随脉冲电流密度增大，合金晶粒度呈指数递减，这是因为脉冲电流造成液-固相界面能和凝固体系中的Gibbs自由能发生变化，以及形核功降低造成的形核率增大。鄢红春等[26]将脉冲电流作用于亚共晶Pb-Sn合金的凝固过程，合金熔体被脉冲电流产生的瞬态磁压强反复压缩，增大了熔体过冷度，树枝晶被细化为等轴晶，从热力学与电动力学理论角度上解释了脉冲电流作用于合金熔体的形核与晶粒细化，并从理论上预测用电流制备纳米晶的可行性。秦荣山等[27]推导出了脉冲电流作用下熔体的形核率，凝固过程中的金属熔体在形核阶段受脉冲电流影响作用最大，随着凝固过程进行，电流的影响作用减弱。电流密度越大，对形核势垒的作用也越强，过冷度越大。

1.3　电磁铸造

电磁铸造在钢铁连铸、铝合金半连续铸造中得到广泛应用，结晶雨是其主要细化机理之一。图3为结晶雨现象示意图。结晶雨细化机制是指在凝固过程中，在外部强制对流或强烈的自然对流作用下，已形成的枝晶臂（主要是初级枝晶臂）发生溶断、折断或脱落，形成尺寸细小、成分接近熔体的游离晶体颗粒。这些游离颗粒随熔体流动被输送到熔体其他区域，在合适的过冷条件下作为有效形核质点，从而显著增加晶粒数量，实现晶粒细化的过程。

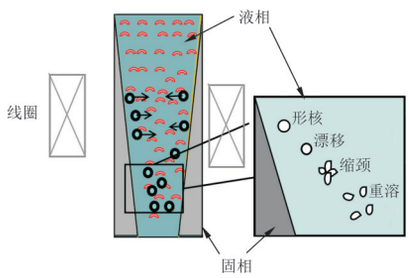


图3　结晶雨现象示意图

Fig.3　Schematic diagram of crystal rain phenomenon

ZHAI Q J等[28]将直流、交流或脉冲电流施加于凝固过程中的纯Al及其合金、钢铁等金属或合金，通过改变电极的放置位置和施加方式等手段，发现在形核阶段对熔体施加电流的效果最佳。脉冲电流产生电致过冷，促进形核和凝固组织细化，提出脉冲电流作用下的“细晶雨机制”。LIAO X L等[29]也通过试验观察到了显著的“结晶雨”现象。在电磁搅拌作用下产生的大量游离晶核，随熔体对流被输运至熔池其他区域，这些晶核作为形核核心，有效促进了周边熔体的异质形核。这种由结晶雨引发的强制对流，不仅抑制了枝晶的定向生长，还通过增加形核率显著细化了晶粒，最终促进了等轴晶组织的形成。RABIGER D等[30]发现在Al-7Si合金凝固过程中施加直流电流或矩形脉冲电流均能促进细小等轴晶的形成。当两种电流的有效电流密度相等时，其对平均晶粒尺寸和等轴晶区面积的细化效果无显著差异。这表明电流的细化作用主要源于洛伦兹力所驱动的熔体对流，而与电流的具体波形（直流或脉冲）关系不大。

2　磁场对金属凝固过程影响

2.1　稳恒磁场

稳恒磁场通过两种机理影响凝固过程：①热电磁力，源于凝固界面处的热电电流与磁场的相互作用。②电磁制动力，由磁场抑制熔体的自然对流所引起。二者在凝固过程中并存，磁感应强度是调控何者主导，从而决定宏观流动与微观结构的关键因素。

2.1.1　热电磁流体效应

在金属凝固过程中引入磁场，由于温度耦合场热能通过热电效应产生电能，电能与磁能相互作用产生洛伦磁力，进而对熔体产生热电磁力推动熔体流动。熔体受到的作用力F为：

$$F=J\times B=\frac{1}{\mu}(B\cdot\nabla)B-\frac{\nabla B^2}{2\mu} \tag{1}$$

式中，J为电流密度；μ为磁导系数；B为磁感应强度；∇为哈密顿算子。

熔体固、液相间由磁场作用产生热电磁力，热电磁力折断细小枝晶并带动细小枝晶做等轴运动同时促进等轴晶形成并细化晶粒，此为热电磁流体效应，图4为熔体中热电电流流动和热电磁对流运动轨迹[31]。可以看出，在定向凝固过程中，固液界面存在明显的温度梯度。温度梯度诱导产生热电流，热电流在外加磁场中

受到洛伦兹力作用，从而驱动糊状区及邻近熔体产生热电磁对流。因此，温度梯度通过影响热电流密度进一步影响洛伦兹力及熔体对流强度。

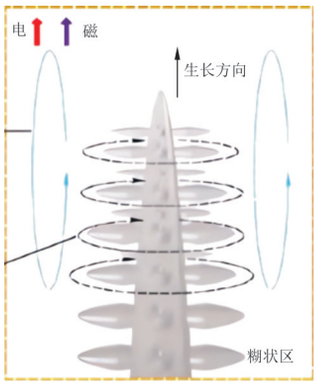


图 4　熔体中热电电流流动和热电磁对流运动轨迹[31]

Fig.4　Movement trajectories of thermoelectric current flow and thermoelectromagnetic convection in the melt[31]

轴向稳恒磁场，即方向沿固定轴线且强度恒定的磁场，通常由稳恒电流或永磁体生成，具有高度的对称性，其核心作用机制在于与凝固过程中自发产生的热电电流相耦合，生成热电磁力（TEMF），其能够有效干预柱状晶的生长，不仅改变传统的择优生长取向，还能提升最终凝固组织的均匀性，计算为：

$$F_{\mathrm{L}}=\frac{\sigma_{\mathrm{l}}\sigma_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{l}}}{\sigma_{\mathrm{l}}+\sigma_{\mathrm{s}}}(S_{\mathrm{s}}-S_{\mathrm{l}})GB \tag{2}$$

式中，σ_{l}和σ_{s}分别为液相和固相的电导率；f_{l}为液相分数；S_{l}和S_{s}分别为液相和固相的电磁热功率系数；G为固液面温度梯度。

从作用机理与尺度上看，强磁场与弱磁场对凝固过程的影响存在显著差异。强磁场在宏观尺度上通过强大的洛伦兹力影响熔体流动，有效控制宏观偏析，而弱磁场则在微观尺度上显现其作用，热电磁效应（TEMC）成为主导机制，通过驱动枝晶间的局部对流与碎片迁移来调控微观组织。DU D F 等[32]发现电磁场通过热电磁力驱动枝晶间的热电对流与传热过程，共同主导了锡铅合金的组织演变，具体表现为初生枝晶间距和糊状区的减小，最终达成枝晶细化效果。

横向稳恒磁场，即方向垂直于凝固前沿的生长方向或温度梯度方向。在该磁场中，流动的熔体会受到洛伦兹力的作用，该力会诱导熔体产生旋转对流，增强了熔体内部的物质传输，从而促进了杂质元素的均匀分布，并抑制了其在凝固界面的聚集，最终改善金属相的沉积均匀性。ZHU L 等[33]发现横向磁场产生的热电磁力促使 Cu 元素在糊状区聚集，液固界面发生倾斜。LI X 等[34]对 6 种合金进行定向凝固试验，发现弱横向磁场通过产生热电磁力驱动了枝晶间的熔体对流，这是导致枝晶细化、糊状区缩小以及液固界面发生倾斜的根本原因。

综上，横向稳恒磁场的引入，通过热电效应在凝固的金属内部激发了感应电流，从而产生洛伦兹力，诱导热电磁对流。这种微观流动一方面调控着枝晶间的传质，造成溶质在糊状区的再分配，改变偏析模式；另一方面，其施加的力会重塑液固界面形态，不仅使界面发生倾斜、细化枝晶，还强化了熔体对晶粒的冲刷作用，有利于等轴晶的形成。

2.1.2　电磁制动效应

金属凝固中加入静磁场或低频交变磁场后，通过人为干预使熔体粒子所受洛伦兹力与流动方向相反，进而达到阻碍熔体流动的技术称为电磁制动。此时金属粒子运动承受洛伦兹力，电磁制动可以抑制熔体对流，进而缓解温度和溶质扰动对金属凝固的干扰。该技术有助于改变晶粒的生长速度与方向，影响晶界形状和形貌。贺晨[35]研究了不同的外部物理场对亚快速凝固处理的 Al-Mg-Si 合金的微观组织和力学性能的影响，发现静态磁场和脉冲电流场产生的电磁制动效应和冲击波效应提高了组织和成分分布的均匀性以及合金元素在基体中的混合能力和固溶度。ZHANG Y M 等[36]在铋锡合金凝固时引入静磁场，使金属粒子在凝固过程中受到的洛伦兹力与流动方向相反，从而达到电磁制动效果。结果发现，无磁场和施加高强度磁场时，熔体表现出磁各向同性，而在低磁场强度时熔体却表现出磁各向异性，且测得在一定范围磁感应强度会带动过冷度升高，因此金属凝固时引入电磁场会对其过冷度有调控作用。电磁制动效应在金属凝固时可以起到增大液固界面能量壁垒同时阻碍金属粒子运动，最终改变材料的微观组织结构和宏观性能。

磁感应强度是影响磁场制备合金宏观性能的重要因素之一。在金属凝固时引入稳恒磁场，熔体内部会同时产生热电磁流体效应和电磁制动效应，前者促进熔体流动，后者阻碍运动。当磁场强度较小时，热电磁流体效应占主导，其会促进熔体流动；当磁感应强度大于临界磁场强度时，电磁制动效应增强，抑制熔体流动。

2.2　脉冲磁场

脉冲磁场是一种极短时间内施加的高强度非稳态磁场，强度和方向快速变化，通常由脉冲线圈产生。在工业金属凝固中采用脉冲磁场干扰是一种常用手段，脉冲磁场会产生瞬态电磁力效应调控凝固组织，改善材料性能。其在铝镁合金、钢铁生产以及高温合金中应用广泛。脉冲磁场干扰金属凝固主要通过电磁振荡、熔体流动、枝晶破碎等方式实现。金属凝固过程引

入脉冲磁场可有效抑制宏观偏析、促进晶粒细化、消除缩松气孔等。

2.2.1　电磁振荡效应

在熔体凝固过程中，为稳定流场一般会采用电磁振荡技术。凝固过程施加低频或脉冲磁场在金属熔体中感应周期变化的电磁力，熔体在电磁力作用下周期往返振动的效果称为电磁振荡。生长的枝晶在电磁振荡内会受到非稳定的剪切应力τ_{xx}：

$$\tau_{xx}=2\mu\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}-\frac{1}{3}\mathrm{div}v\right) \tag{3}$$

式中，η为熔体动力黏度；v为枝晶周围熔体的流动速度矢量；v_x为熔体流动速度在x方向上的分量；div$v$为熔体速度场的散度。

枝晶因剪切力断裂破碎，形成细小颗粒分散在熔体内部，称为额外形核核心，能提高形核率。振荡提高溶质流动速度，并通过不断振荡产生涡流，提高熔体冷却速率，从而提升形核率，细化晶粒组织。LI S J等[37]研究了不同外场对其微观结构和性能及其作用机理的影响，发现在双辊铸轧过程中施加电磁振荡场时，中心偏析带消除，被等轴晶取代，铸轧板的质量显著提高。电磁振荡场（EOF）不仅提高了合金的过冷，增加了溶质的有效分布系数Ke，且提高了溶质原子的混合能力和扩散能力，抑制了变形组织的再结晶。电磁场的加入还降低了凝固过程中的宏观偏析，细化了合金凝固的微观结构，同时分析了双辊铸轧过程中的偏析产生机理及电磁振荡场的作用机制。

2.2.2　焦耳热效应

在金属凝固中引入磁场时，金属熔体内部因磁场会产生感应电流，感应电流在具有电阻率的金属熔体中流过时因焦耳定律产生焦耳热，焦耳热功率密度q为：

$$q=\sigma E^2 \tag{4}$$

式中，E为电场强度；σ为熔体电导率。

热能会导致熔体局部温度升高，在凝固过程中焦耳热效应可以抑制熔体过冷，延缓凝固前沿的推进速度进而影响溶质元素分布。焦耳热产生的温度波动会促进枝晶断裂，游离枝晶促进形核，提高形核率。在Mg-Al-Zn合金凝固中焦耳热效应影响较为明显，焦耳热效应会在枝晶尖端富集，导致枝晶尖端温度升高并重溶，抑制其继续生长，进而达到晶粒细化的目的。宏观上焦耳热效应会使镁铝锌合金屈服强度上升、抗拉强度下降，主要原因是焦耳热效应使枝晶形态由粗大晶粒转变为细小近球状晶粒。ZHANG Y M等[36]发现焦耳热效应下磁场强度增加有利于凝固晶粒的规则排列，经过磁场处理后，合金组织形貌发生明显变化，并形成大量微通道结构，表现出较高的比表面积。

2.3　交变磁场

单一物理场中交变/旋转磁场主要分为两类：①基于电磁感应原理，在圆柱形空间外围布置多相感应线圈，通入相位互差的多相交流电，生成行波磁场。②采用具有高磁能积与热稳定的磁体，通过机械旋转装置驱动该磁体旋转以形成旋转磁场。相较于前者，后者通常能获得更高的磁通密度，从而在熔融金属内部诱发出更为强烈的对流。磁场驱动产生的熔体强迫对流主要表现为两种形态：一是水平截面内的旋转变形流动，二是在径向纵截面上形成的双涡旋环流结构。前者使熔体整体旋转，后者则驱动流体沿轴向和径向进行混合。交变/旋转磁场在金属凝固过程中对凝固组织有较好的控制效果，在工业上有着广泛的应用[38]。目前，对交变/旋转磁场的研究主要集中于枝晶破碎理论促进凝固组织的细化，对结晶温度区间的影响、溶质元素晶内含量的影响，以及抑制宏观偏析等方面[39]。研究表明，在金属熔体凝固过程中施加交流磁场可以有效细化金属凝固组织并且对溶质元素晶内含量有明显影响[40]。班春燕等[41]发现，7075铝合金熔体凝固过程中施加交流磁场对其合金熔体结晶间隔及熔点有影响。于盛睿等[42]发现，交流电场使Al-Si共晶合金表现为亚共晶的生长方式，并且Si相的生长得到有效抑制，共晶Si的形态从较长的针片状转变为细小的针片状及较少的颗粒状。韩逸等[43]发现通过对Al-Fe合金熔体凝固过程中施加交流磁场，发现Al_3Fe相均向试样的中心处富集。

2.3.1　电磁搅拌

金属凝固时利用交变磁场或低频旋转磁场在熔体内部形成单向或旋转的洛伦兹力，其可以驱动熔体定向移动。在Mg-Al-Zn合金中电磁搅拌技术常被用来提供强制对流减少宏观偏析，提高流动性打碎枝晶提高等轴晶形成，提高熔体流动速度同时还可以提高补缩能力。在实际铸造生产中，电磁搅拌可以扩大等轴晶区以及使定向凝固效果显著。添加对熔体的电磁搅拌有助于破碎枝晶，细化晶粒；同时强烈的流动和搅拌效果使熔体内各相的分布更加均匀，抑制成分偏析、减小温度梯度、避免粗大枝晶的出现。

脉冲磁场作用于凝固中的合金熔体，其产生的振荡与搅拌效应源于洛伦兹力的时空分布，该分布对最终凝固组织的优化至关重要。陈红等[44]、JI H M等[45]通过试验与数值模拟相结合的方法，系统考察了改变脉冲磁控发生器（PMFG）与熔体的相对位置对洛伦兹力（包含旋转与非旋转分量）分布的影响，进而影响微观结构演变、溶质偏析及凝固均匀性。结果表明，通过

调整 PMFG 位置来调控强制对流模式，可有效抑制铸锭顶部的缩孔缺陷并控制溶质元素的偏析行为。梅国宏等[46]认为，磁场作用下晶粒细化的主要原因是电磁搅拌使枝晶破碎，电磁搅拌的核心机制在于其机械剪切力对枝晶的破碎作用。该过程同时显著改善了固液混合物的流动性，进而促使枝晶碎屑脱落，形成游离晶。这些游离碎晶成为新的结晶核心，增加了晶核的数目，使得凝固前期的柱状晶转化为等轴晶，从而显著细化晶粒。HU C J 等[47]在进行激光焊接钢缝时发现添加交变磁场辅助可以使晶粒面积显著减小。这是因为交变磁场对熔融金属池具有搅拌作用。由微观组织观察到电磁搅拌生成大量的等轴晶，晶粒细化使强度提高。CARMEN S 等[48]在进行交变磁场改善 Sn-Sb 合金结构试验中，采用瞬态建模分析了电磁搅拌对溶质分布和界面偏转的影响。发现当使用交变磁场产生的电磁搅拌后，熔体对流的阻尼作用减小。在凝固过程中磁场强度增加，轴向和径向偏析会保持在较低水平，界面偏转也稳定在合理范围，可见电磁搅拌对改善偏析有积极作用。

2.3.2　强制对流

在金属凝固过程中，温度梯度、浓度梯度的存在会使熔体产生对流现象，从而影响传热、传质，改变合金微观组织。引入电磁场后熔体对流更为复杂。李宁等[49]在进行交流电脉冲调控 Al-7Si 合金中初生 α-Al 相形态演化试验中，利用了数值模拟与模型嵌入金属网格仿真，来解释熔体对流对晶粒细化的现象。肖蕴华等[50]发现在凝固时引入脉冲电场，可以使熔体内部产生熔体对流促使细小枝晶断裂，阻碍了枝晶的进一步发展，得到更为细小的凝固组织，熔体对流使凝固界面前沿的熔体温度和成分均匀化，提高了材料的性能。

3　电磁复合场的研究进展和作用机理

康凯娇[51]在 Al-Zn-Mg-Cu 合金凝固过程中加入电脉冲＋旋转磁场复合场，发现将合金熔体浇入铸型中，随着凝固时间增加，首先在铸型型壁处形成晶胚，然后逐渐长大成为形核核心，枝晶由型壁向中心生长，见图 5。可以看到，在熔体径向产生涡流以及轴向产生 4 个小的环流区域。当对 Al-Zn-Mg-Cu 合金凝固时施加电脉冲，熔体内快速变化的脉冲电场产生洛伦兹力，使熔体在铸型内往复运动。一方面，由于脉冲电流的作用将熔体顶部的形核核心带入到熔体底部；另一方面，由于旋转磁场内感生电流的作用产生涡流，使固液界面处的枝晶发生断裂，抑制了柱状晶的生长，在熔体流动时将更多的细小形核核心带入熔体心部，导致熔体内形核核心数量增加，形成更多的等轴晶，显著改善了组织的均匀性。

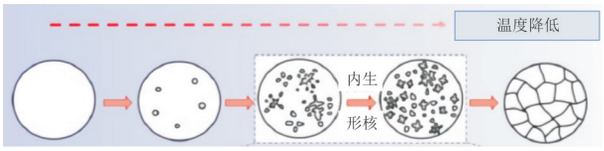


图 5　复合场下晶粒形核长大示意图[51]

Fig.5　Schematic diagram of nucleation and growth under composite field [51]

余挺等[52]发现在强脉冲电流和微重力复合场下制备的偏晶合金的组织主要由 α-Cu 和 β-Pb 两相组成，晶粒呈等轴状，相较于常规条件下制备的偏晶合金组织均匀性更好。刘稳[53]以 5 系铝合金为研究对象，分析了电磁场条件对 5025 铝合金铸轧带坯显微组织、中心偏析的影响，得出铝合金铸轧过程施加静磁场可以抑制枝晶长大，并通过铸轧的板材宏观性能分析出铸轧时合适的电磁参数。GUO S J 等[54]研究了交变磁场对微观结构、物理性能和热撕裂倾向的影响。发现在铸造过程中采用低频交变磁场时，坯料横截面微观组织由树枝晶转变为等轴晶，板坯材料硬度增加。JIA Y H 等[55]通过建立数值计算模型评估铸造中熔池受洛伦兹力、流场、温度场对熔体凝固的影响，其中磁场强度与频率作为重要参数对凝固组织影响最大。赵冠中[56]建立了电磁场二维模型，对电磁铸轧中电磁场进行了仿真分析，得到了在电磁导引装置上下盖板空间上的磁力分布，建立了电磁铸轧温度场仿真模型，获得了铸嘴型腔中电磁力的分布情况。李文琪[57]将电磁及超声能场引入到铅合金的连续铸轧工艺，开发了电磁超声铸轧技术，研究了不同工艺参数（温度、速度和电磁、超声能场）对铅合金铸轧组织的影响。发现电磁、超声能场能够细化铅合金板带的晶粒组织，且随着电磁、超声能场强度的增加细化效果增强。管付如[58]分析了超声电磁处理对 1235 工业纯铝连续铸轧的作用机制。发现施加超声外场提高了 1235 工业纯铝的凝固速度，增大了其过冷度。从理论上分析了超声的声流作用和空化作用对 1235 合金凝固过程中过冷度的影响，进一步发现超声场降低了凝固过程中的形核功，减小了形核过程中的临界形核半径，减少了形核所需要的原子数目，提高了凝固过程中的形核速率。研究者从不同角度分析了电磁复合场对金属材料凝固的影响，但电磁复合场是一个较为复杂的外部场，其对金属凝固过程的影响不是简单机理的叠加，详细解释其中磁流体力学与材料加工过程中本质的凝固机理，阐明电磁场对相变形核和生长的内在机制，对于发展电磁场控制冶金相变技术还需要深入探索。

各类外部场因其特定的优点与局限性，分别适用于不同的合金体系与工艺场景，共同构成了外部场调控材料组织与性能的重要技术体系。表1为直流电、脉冲电流、稳恒磁场、脉冲磁场及交变磁场等5种外部物理场在金属凝固或热处理中的应用。各类技术通过独特的作用机理（如焦耳热、电子风力、洛伦兹力、磁化力及电磁搅拌力）对金属的凝固过程或固态相变产生截然不同的影响。其中，直流电以热效应为主导，适用于均匀化退火；脉冲电流凭借其非热“电子风力”效应，在晶粒细化和固态相变调控方面优势显著；稳恒磁场通过抑制对流和控制晶粒取向，被广泛应用于定向凝固；脉冲磁场利用高强度瞬态力实现晶粒超细化，但对工艺控制要求严苛；交变磁场则通过持续电磁搅拌，成为改善连铸坯宏观偏析的关键技术。

表1　各类电磁场在金属凝固中的应用

Tab.1　Application of various electromagnetic fields in metal solidification

外场	作用机理	优点	局限性	应用合金/场景
直流电	电致迁移、焦耳热	设备简单、加热均匀	热效应为主，可能产生粗大组织	铝合金均匀化退火
脉冲电流	电子风力、非热效应、促进形核	细化晶粒、降低能耗、可处理微区	参数复杂、设备昂贵	高强钢、钛合金的固态相变调控
稳恒磁场	洛伦兹力（抑制对流）、磁化力（柱状晶向等轴晶转变）	接触式、能量效率高、组织取向可控	对非导电流体作用弱、强场设备大	铝合金、硅钢的定向凝固
脉冲磁场	强洛伦兹力冲击、诱发剧烈强迫对流	晶粒超细化、作用强度高	控制难度大、可能引入冲击缺陷	钢铁、铝合金的大体积熔体处理
交变磁场	感应涡流、连续电磁搅拌	非接触、搅拌效果均匀	集肤效应、能耗较高	连铸坯的宏观偏析控制

4　未来展望

（1）金属凝固时加入脉冲电场，其中的电场参数不宜过高或过低，当参数过高超过材料对应临界范围时，热、力、电化学等多物理场的耦合作用会破坏凝固过程的稳定性，反而减弱了晶粒细化的效果，导致微观缺陷和性能下降，而参数过低时电场又无法对金属凝固过程的调控起到影响。

（2）在金属凝固过程中加入磁场，稳恒磁场和温度梯度引起的热电流共同作用下形成的热电磁流体效应会在枝晶上产生磁转矩，促进枝晶破碎和转动，引起熔体内部的晶粒细化和对流增强，改善合金性能。

（3）交变磁场驱动熔体强制对流，通过剪切应力破碎枝晶、加速溶质扩散，抑制成分偏析。过强磁场引发温度梯度增大与热应力风险，需精准控制磁感应强度。

（4）电磁场技术的广泛应用和发展仍面临一些技术挑战，发展电磁场控制冶金相变技术还需要深入探索。当前研究多集中于单一参数影响，复合场多物理场耦合的定量模型缺乏；试验条件（场强、频率、波形）差异大，数据可比性差；多数机理尚停留在定性或假说阶段，缺乏原位试验直接验证；工程应用研究多于基础理论突破。未来研究方向可开展多场耦合、多尺度的模拟与试验研究；开发在线、原位的微观组织与缺陷监测技术；探索电磁场与新型加工技术（如增材制造）的结合；深入研究电磁场对非晶合金、高熵合金等新材料体系的作用机理等。

参　考　文　献

[1] 王芳，张世杰，周一帆，等．物理外场对合金组织及力学性能影响研究现状及进展[J]．特种铸造及有色合金，2024，44(2)：158-164.

[2] 李跃，王子铭，孙本辰，等．电磁冶金对凝固组织特性影响的研究进展[J]．材料热处理学报，2023，44(12)：16-34.

[3] EDR Y，FRAGE N，HAYUN S. The effect of pulse magneto-oscillation treatment on the structure of aluminum solidified under controlled convection[J]. Mater. Lett.，2016，182：118-120.

[4] 胡世平，陈乐平，周全．物理场对金属凝固组织影响的研究进展[J]．特种铸造及有色合金，2018，38(7)：717-720.

[5] LI D L，YU E L，LIU Z T. Mechanism research and progress of metal's pure electroplastic effect[J]. Applied Mechanics and Materials Trans. Tech. Publications，2012，184：1 060-1 063.

[6] ZHU X，KOTADIA H，XU S，et al. Modeling electromigration for microelectronics design[J]. Journal of Computational Science and Technology，2013，7(2)：251-264.

[7] WANG X L，WU N，LIU M S，et al. Effect of electric current densities on microstructure and mechanical properties of Cu-Zn alloy [C]//8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials. Cannes：France，2015.

[8] MISRA A K. A novel solidification technique of metals and alloys：Under the influence of applied potential[J]. Metallurgical Transactions. 1985，A16：1 354-1 355.

[9] AHMED S，BOND R，MCKNAAN E C. Solidification processing superalloys in an electric field[J]. Advanced Materials and Processes，1991，140：30-32.

[10] 顾根大．电场作用下金属定向凝固行为的研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，1989.

[11] 王劲，尹建军，丁雨田，等．ZA27合金在直流电流作用下的凝固行为[J]．甘肃工业大学学报，2003(3)：36-38.

[12] 李万锋，杨院生，于力，等．直流电场作用对K417G镍基高温合金凝固组织的影响[J]．材料工程，2001(9)：7-9，13.

[13] JEE S C，LA M，KIM D E，et al. Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum[J]. Journal of Materials Research and Technology，2021，12：818-830.

[14] JIA P F，CAO Y H，GENG Y D，et al. Effects of dc current on the phase transformation in 7050 alloy during homogenization[J]. Materials Characterization，2014，96：21-27.

[15] HE L，JIA P F，ZHANG L，et al. Evolution of secondary phases and properties of 7B04 aluminum alloy during DC homogenization [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2016，26 (2)：319-327.

[16] JIANG H X, ZHAO J Z, HE J. Solidification behavior of immiscible alloys under the effect of a direct current[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2014, 30(10): 1 027-1 035.
[17] YANG F F, CHEN Z N, CAO F, et al. Grain nucleation and growth behavior of a Sn-Pb alloy affected by direct current: An in-situ investigation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(10): 1 134-1 140.
[18] 丘永福,高德民,陈磊,等.脉冲电流对AZ91镁合金凝固组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2007,27(8):633-635.
[19] 张西锋,袁守谦,谷坤文,等.不同脉冲电压对45钢凝固组织的影响[J].铸造技术,2009, 30(9):1 125-1 128.
[20] YANG S Y, ZHOU Q, HU Q Z. The influence of electric current pulses on the microstructure of magnesium alloy AZ91D[J]. Materials Science Forum,2005,518(488-489):201-204.
[21] 陈越.脉冲电流处理参数对304不锈钢微观组织的影响[D].沈阳:东北大学,2019.
[22] 刘建芳,张零兮,吴红爽,等.脉冲电场对6181铝合金凝固组织的影响[J].轻合金加工技术,2020,48(9):18-21,37.
[23] GUO J J, WANG F, ZHANG S J, et al. Effect of high-frequency electric pulse on the solidification microstructure and properties of hypoeutectic Al-Si alloy[J]. Materials,2024,17(2):468.
[24] 庞松.砂型铸造Mg-Gd-Y合金凝固行为与晶粒细化机制研究[D].上海:上海交通大学,2015.
[25] BARANK J P, SPRECHER A F, CONRAD H. Colony (grain) size reduction in eutectic Pb-Sn castings by electropulsing [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995, 32(6): 879-884.
[26] 鄢红春,何冠虎,周本濂,等.脉冲电流对Sn-Pb合金凝固组织的影响[J].金属学报, 1997(4): 352-358.
[27] 秦荣山,周本濂.直接晶化法制备块状纳米材料的探索Ⅱ:脉冲电流作用下金属熔体结晶晶粒尺寸的理论估算[J].材料研究学报, 1997(1): 69-72.
[28] ZHAI Q J, GONG Y Y, LI R X, et al. Solidification process and grain refinement technology [J]. Journal of Materials and Metallurgy,2015, 14(2):81-82.
[29] LIAO X L,ZHAI Q J,LUO J,et al. Refining mechanism of the electric current pulseon the solidification structure of purealuminum[J]. Acta Materialia,2007,55(9):3 103-3 109.
[30] RABIGER D, ZHANG Y H, GALINDO V, et al. The relevance of melt convection to grain refinement in Al-Si alloys solidified under the impact of electric currents[J]. Acta Materialia, 2014,79: 327-338.
[31] WANG P C, SHUAI S S, HUANG C L, et al. Revealing the influence of high magnetic field on the solute distribution during directional solidification of Al-Cu alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021,88:226-232.
[32] DU D F, LU Z Y, GAGNOUD A, et al. Effect of a transverse magnetic field on solidification structure in directionally solidified Sn-Pb hypoeutectic alloys[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 402: 319-324.
[33] ZHU L, HAN C, HOU L, et al. Influence of a static magnetic field on the distribution of solute Cu and interdendritic constitutional undercooling in directionally solidified Al-4.5Cu alloy [J]. Mater. Lett., 2019, 248: 73-77.
[34] LI X, FAUTRELLE Y, GAGNOUD A, et al. Effect of a weak transverse magnetic field on solidification structure during directional solidification[J]. Acta Materialia, 2014, 64: 367-381.
[35] 贺晨.基于电磁铸轧亚快速凝固的AA 6022铝合金组织性能研究[D].沈阳:东北大学, 2020.
[36] ZHANG Y M, YUAN B Y, LI L, et al. Edge electrodeposition effect of cobalt under an external magnetic field[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2020, 865: 114 143.
[37] LI S J, JIANG T, LI Y, et al. Effects of different external fields on the microstructure and mechanical properties of novel AlCuLi alloy during twin-roll casting [J]. Materials Science and Engineering, 2019, A757: 14-22.
[38] 班春燕. 电磁场作用下铝合金凝固理论基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2002.
[39] 牛海山,王春蓉. 交流电磁场对AZ80镁合金组织结构的影响[J].热加工工艺,2010, 39(1):61-63.
[40] 赵锟,王立强. 交流磁场下镁合金热处理实验研究[J].热加工工艺,2009, 38(18):135-137.
[41] 班春燕,巴启先,朱丽颖,等. 交流磁场下7075铝合金液相线和固相线温度变化[J].东北大学学报,2003(5):482-484.
[42] 于盛睿,曾义和,冯浩,等. 交流电场作用下铝硅共晶合金凝固组织和力学性能的变化[J].热加工工艺,2010,39(9):47-50.
[43] 韩逸,班春燕,巴启先,等. 交流磁场对Al-Fe合金凝固组织的影响[J].东北大学学报, 2006(9):991-994.
[44] 陈红,孙昕,邢志辉,等.电脉冲频率对AZ80-4Sn镁合金显微组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2019,39(11):1 169-1 172.
[45] JI H M,LUO T J,WANG C,et al. Direct chill casting of magnesium alloy under pulsed magnetic field [J]. Materials Science and Technology,2017,33(1):33-39.
[46] 梅国宏,朱立光,张庆军,等.脉冲磁场细晶化技术的研究现状[J].铸造技术,2015,36(2):403-406.
[47] HU C J, YAN F, ZHU Z W, et al. Effects on microstructural refinement of mechanical properties in steel-copper joints laser welded with alternating magnetic field augmentation[J]. Materials Characterization, 2021,175:111 059.
[48] CARMEN S, YVES D, YVES F, et al. Bridgman growth of concentrated GaInSb alloys with improved compositional uniformity under alternating magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 2005,275(1-2):1 571-1 578.
[49] 李宁,张利民,邢辉,等.交流电脉冲调控Al-7Si合金中α-Al相形态演化机制[J].材料导报,2018,32(22): 3 919-3 924.
[50] 肖蕴华,高明,杨菲,等.电脉冲时间对铸造ZA12合金凝固组织和性能的影响[J].热加工工艺,2004(1):38-40.
[51] 康凯娇.电脉冲及旋转磁场处理对Al-Zn-Mg-Cu合金组织和性能的影响及作用机理[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
[52] 余挺,耿桂宏,郝维新,等.电磁复合场对Cu-Pb偏晶合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5):575-578.
[53] 刘稳.电磁组合场下5052铝合金铸轧坯组织及板材性能研究[D].沈阳:东北大学,2012.
[54] GUO S J, CUI J Z, LE Q C, et al. The effect of alternating magnetic field on the process of semi-continuous casting for AZ91 billets [J]. Mater. Lett., 2005, 59(14): 1 841-1 844.
[55] JIA Y H, WANG H, LE Q C, et al. Transient coupling simulation of electromagnetic field multi-physics during pulse direct-chill casting of AZ80 magnesium alloy[J]. Int. J. Heat Mass. Tran., 2019, 143: 118 524.
[56] 赵冠中.电磁场对AZ31B镁合金铸轧影响的研究[D].长沙:中南大学,2011.
[57] 李文琪.电磁/超声复合能场铸轧铝合金组织演变模拟及实验研究[D].长沙:中南大学,2012.
[58] 管付如.1235工业纯铝超声电磁连续铸轧机理分析与工业实验[D].长沙:中南大学,2011.

(编辑:彭瑾)