

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20250081

大型金属坯料制备电磁调控关键共性 技术开发和应用

王强, 乐启炽, 王向杰

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 大型高性能金属产品是高端装备制造业发展的基础和先导,但我国大型铸坯传统制备方法普遍存在夹杂、偏析、晶粒粗大以及裂纹等铸造缺陷,导致坯料冶金质量和成材率低等问题,无法满足大规格高端金属产品加工制造要求。因此,研发大型铸坯冶金质量调控新技术,攻克坯料净化、均质化、细晶化和低应力铸造难题是突破困境的有效途径。东北大学历经二十余年产学研用协同攻关,在大型坯料制备过程中利用电磁场独特效应,精准调控坯料制备过程凝固行为,完成了电磁调控技术全链条创新,构建了大型金属坯料制备电磁调控理论,研发出了电磁调控核心技术和装备,成功制备了系列大型高品质钢、镁合金和铝合金坯料,推动了高端材料制备技术的进步。

关键词: 大型铸坯;冶金;电磁场;净化;细晶化;均质化

中图分类号: TG 113; TG 249 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)07-0131-08

Development and Application of Key Generic Technologies for Electromagnetic Regulation in Large-Sized Metal Billet Preparation

WANG Qiang, LE Qi-chi, WANG Xiang-jie

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LE Qi-chi, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Large-sized high-performance metal products serve as the foundation and precursor for the development of high-end equipment manufacturing industries. However, traditional preparation methods for large-sized casting billets in China commonly suffer from casting defects such as inclusions, segregation, coarse grains, and cracks, leading to issues like low metallurgical quality and poor yield. These problems render the billets unable to meet the processing and manufacturing requirements of large-sized high-end metal products. Therefore, developing new metallurgical quality control technologies for large-sized casting billets and overcoming challenges in achieving purification, homogenization, grain refinement structure, and low-stress casting are effective pathways to break through these bottlenecks. After over two decades of collaborative research, industry, and academia cooperation and practical application, by utilizing the unique effects of electromagnetic fields during large-sized billet preparation, Northeastern University has precisely controlled the solidification behavior during the preparation process and accomplished a full-chain innovation in electromagnetic control technologies. It has established an electromagnetic control theory for large-sized metal billet preparation and developed core electromagnetic control technologies and equipment. These advancements have successfully produced a series of large-sized and high-quality steel and magnesium alloy, as well as aluminum alloy billets, driving progress in the preparation technologies of high-end materials.

收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 王强(1971—),男,山东烟台人,东北大学教授,博士生导师;乐启炽(1968—),男,福建大田人,东北大学教授,博士生导师;王向杰(1982—),男,山东栖霞人,东北大学研究员,博士生导师。

Key words: large-sized billet; metallurgy; electromagnetic field; cleaning; grain refinement; homogenization

高端装备制造能力是我国从制造大国向制造强国转型发展的战略保障,而大规格、高性能金属材料作为高端装备制造的核心基础,正朝着尺寸大型化、结构一体化、性能稳定化的方向快速发展。为满足国家重大战略需求,亟须突破大型钢、铝、镁等关键材料的制备技术瓶颈。在本研究开展前,我国高端装备制造领域面临严峻挑战:大型高纯铝靶材完全依赖进口,大型镁铸锭成材率不足 30%,大规格风电用钢坯的组织偏析问题频发导致重大安全事故。究其根源,在于国外对核心技术的严格封锁,使我国长期处于受制于人的被动局面。因此,开发具有自主知识产权的大型铸坯冶金质量调控技术,攻克材料净化、组织均质化、晶粒细化和低应力铸造等关键技术难题,成为打破国外垄断的必由之路。

由于大型金属坯料在凝固过程中存在凝固时间长、冷却速率低、传输距离远、温度梯度大等突出特点,目前利用连铸或半连铸等传统工艺生产的大型金属坯料普遍存在夹杂、偏析、晶粒粗大以及裂纹等铸造缺陷,已无法满足高端大规格金属产品的加工需求^[1-2]。因此,需要引进新的技术手段。电磁场具有“制动、驱动和振荡”的独特效应,可以以非接触、无污染的方式,从液相到固相、从宏观到微观,精准调控大型金属坯料的凝固过程,从根源上消除大型金属坯料的冶金质量问题^[3-6]。为了利用电磁调控实现大型高品质金属坯料的高效制备,必须突破以下关键问题:大型金属坯料凝固电磁调控机制不清,大型金属坯料净化、均质化、细晶化、低应力铸造困难,电磁调控装备自主研发及坯料生产评价体系缺失。据此,本文提出开展大型金属坯料制备电磁调控关键共性技术开发和应用研究。

东北大学研究团队经过二十余年的产学研协同创新,构建了“基础理论-核心技术-装备研发-工程应用-绿色评价”的完整创新链,重点突破了三大关键技术:创立了大型金属坯料多物理场耦合凝固理论,开发了具有完全自主知识产权的电磁调控技术体系,研制了系列化大型电磁调控装备并建立了绿色制造评价标准^[7-8]。通过技术成果的产业化应用,成功制备出大型高品质钢、镁、铝等系列坯料,部分产品性能指标达到国际领先水平,实现了进口替代,有力支撑了我国

能源电力、轨道交通、电子信息、国防军工等关键领域的发展需求。

1 大型金属坯料电磁调控新理论

针对金属凝固过程中电磁调控物理机制不明确这一关键科学问题,本文采用“数学解析建模-多尺度数值模拟-调控理论构建”的递进式研究方法,系统揭示了电磁场-流场-温度场-溶质场多物理场耦合作用机制。通过建立电磁力作用下枝晶生长动力学模型、熔体流动与传质耦合方程等理论体系,创新性地提出了电磁振荡抑制偏析理论、行波磁场细晶调控准则和复合电磁净化机理,形成了具有自主知识产权的金属凝固电磁调控理论体系^[9-11]。研究成果不仅实现了大型金属坯料净化(夹杂物质量分数降低 50%以上)、均质化(宏观偏析指数下降 60%)和细晶化(等轴晶比例提升至 80%)的精准调控,还推动了我国电磁冶金学科跻身国际领先行列,为后续电磁调控工艺优化和核心装备研发提供了坚实的理论支撑。

1.1 电磁场下凝固理论建模及多物理场耦合数值模拟

针对电磁场下金属凝固过程中数值模拟的复杂性,在全面考虑熔体、熔渣、气体和夹杂物多相耦合,以及电磁、流动、温度、溶质以及应力与应变等多物理场耦合的基础上,系统构建了电磁作用下复杂凝固过程的流动、传热、传质等传输理论和金属凝固理论模型,进而实现了大型坯料复杂凝固过程与组织演变的多物理场耦合三维瞬态数值模拟。明确了电磁驱动、制动和振荡效应随磁场类型、坯型和材料体系的变化特征,揭示了电磁场-传输行为-冶金质量之间的关联,奠定了电磁调控的理论基础。

在多相多场耦合建模方面,建立了考虑相间相互作用的多相流控制方程,引入 Maxwell 方程组描述电磁场分布,耦合 Navier-Stokes 方程表征熔体流动,结合能量方程和溶质传输方程,构建了完整的电磁-流动-传热-传质-应力多物理场耦合数学模型^[12]。特别地,本文针对电磁场与金属熔体的相互作用,提出了基于 Lorentz 力密度和焦耳热效应的耦合计算方法^[12];开发了多尺度模拟技术,实现了宏观传输过程与微观组织演变的

跨尺度模拟^[13].在宏观尺度上采用有限体积法求解传输方程,在介观尺度上引入相场模型描述枝晶生长,在微观尺度上采用元胞自动机方法模拟晶粒形核与长大,实现了从毫米级流场到微米级枝晶的多尺度耦合计算^[13].在数值求解方面,创新性地提出了分区迭代求解策略,以解决电磁场与流场强耦合带来的数值求解难题^[14].采用磁矢量势法求解电磁场,压力修正法求解流场,显式-

隐式混合格式处理温度场和溶质场,显著提高了计算效率和稳定性^[14].通过系统构建电磁作用下复杂凝固过程的流动传热、传质等传输行为和金属凝固理论模型,实现了大型坯料复杂凝固过程与组织演变的多物理场耦合三维瞬态数值模拟^[15],如图1所示.模拟结果与实验数据的对比验证表明,温度场预测误差小于3%,流场速度分布吻合度达90%以上,枝晶形貌模拟与实验结果高度一致.

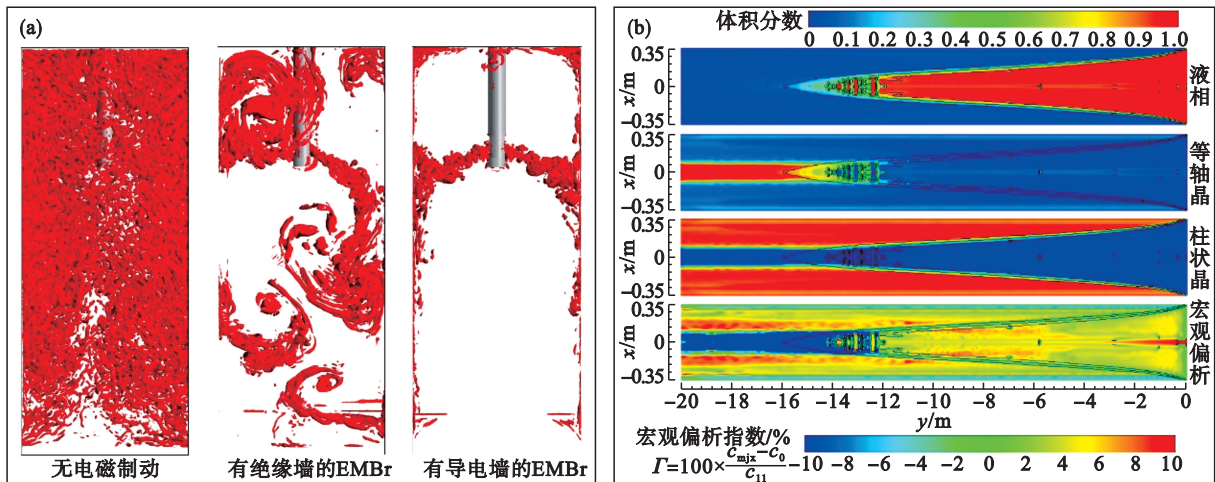


图1 大型坯料多相多尺度多场耦合三维数值模拟^[16-17]

Fig. 1 Three-dimensional numerical simulation of multiphase, multiscale, and multifield coupling for large-sized billets^[16-17]

(a)—Q准则瞬时等值面(500 s⁻²); (b)—相体积分数及宏观偏析指数.

本文明确了电磁驱动、制动和振荡效应随磁场类型、坯型和材料体系的变化规律.研究表明,低频磁场更有利于熔体整体驱动,而高频磁场可产生显著振荡效应;对于不同尺寸坯料,存在最佳磁场强度与频率匹配关系;钢、铝、镁等材料因电磁特性差异表现出不同的响应特征^[15].研究揭示了电磁场-传输行为-冶金质量之间的内在关联:电磁力引起的二次流可促进温度均匀化,溶质传输系数提高2~3个数量级;电磁振荡可使枝晶尖端破碎尺寸减小至50~100 μm,显著增加形核率^[15].这些发现为电磁调控提供了重要的理论基础和技术指导.

1.2 净化、均质和细晶电磁调控理论

如图2所示,基于数值模拟结果,创新性提出大型金属坯料电磁净化、均质和细晶理论,阐明了钢、镁和铝不同体系电磁调控的共性和个性差异.研究发现,各类合金在电磁调控方面存在以下共性特征:熔体净化、组织细化、成分均质化、铸造应力调控与裂纹抑制、成材率提高以及节能低碳制备等^[15,18,19].同时,不同合金体系在电磁调控方面表现出显著差异.力学性能和密度差异:轻合金绝对强度仅为钢铁的30%~50%,杨氏模量

为钢铁的20%~25%;镁合金强度相当于中低强度铝合金水平,刚度约为铝合金的60%;轻合金密度仅为钢铁的20%~35%,镁合金密度约为铝合金的2/3.热物性差异:轻合金导热系数为钢铁的3~5倍,比定容热容仅为钢铁的50%~70%,凝固传热调控要求显著不同;轻合金具有较高的氢溶解度,镁、铝在气孔和疏松控制方面存在明显差异;膨胀系数和凝固收缩系数差异导致固态收缩行为不同,轻合金更易产生凝固裂纹.电磁特征差异:3种类型合金的电导率、磁导率和固态磁性质明显不同,导致这些金属合金熔体对电磁响应的敏感性和难易程度不同;通过电磁施加对流和振荡作用以及随后的凝固行为的调控作用不同,电磁铸造工艺与装备都各具特殊性.合金晶体结构与凝固行为差异:三类合金bcc(体心立方)、hcp(密排六方)和fcc(面心立方)晶体结构的凝固形核与长大机制、溶质迁移特征及析出行为各不相同,外场调控要求存在本质区别.影响熔体质量的因素与净化要求不同:轻合金易氧化且氢溶解度大,钢铁主要面临氧、硫等问题,不同体系的净化方法和二次污染抑制策略需差异化设计.

针对大型坯料夹杂物控制的难题,基于电磁驱动和制动效应,提出了电磁净化理论^[20].通过在连铸前端水口内施加电磁驱动效应、在结晶器内施加电磁制动效应,系统优化了金属熔体流场,有效地抑制熔体的二次污染.针对大型坯料偏析问题,建立了电磁均质化理论,利用电磁驱动效应实现水口内熔体旋转和结晶器内熔体搅

拌,显著促进溶质元素迁移并提高温度均匀性.针对大型坯料晶粒粗大的问题,基于电磁驱动和振荡效应,提出了电磁细晶理论^[21].利用振荡效应在柱状晶尖端形成“千锤百锻”的效果,实现枝晶破碎,并通过电磁驱动弥散于熔体中,增加形核质点,实现晶粒细化.这些创新理论为电磁调控技术的研发和装备的研制提供了重要的科学依据.

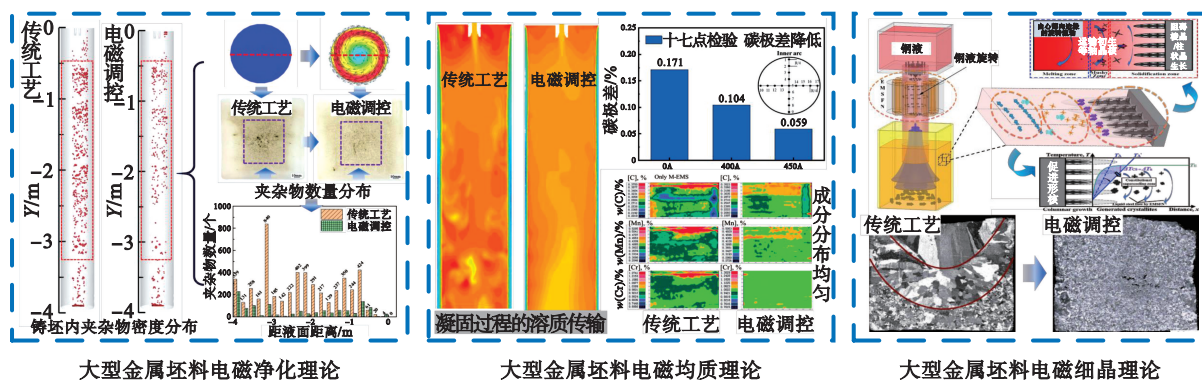


图2 大型金属坯料电磁调控理论的实际效果

Fig. 2 Practical effects of electromagnetic control theory for large-sized metal billets

2 大型金属坯料电磁调控技术

大型金属坯料的洁净化、均质化和细晶化组织调控一直是国际公认的技术难题.本文针对大型金属坯料制备过程中由于金属凝固时间长、区域大、散热困难,极易产生夹杂、偏析和晶粒粗大以及裂纹等组织缺陷问题,在理论研究成果支撑下,通过国产化升级和自主创新两种途径,研发了“智能电磁制动、新型电磁驱动和复合电磁振荡”三大类核心技术,攻克了大型金属坯料组织调控的国际难题,制备了系列大型高品质钢、镁和铝坯料,部分产品全面替代进口,满足了我国能源、电子信息、轨道交通等领域的急需.

2.1 智能电磁制动技术

智能电磁制动技术是钢铁冶金领域的一项重大创新成果,主要应用于大型钢坯连铸生产过程.该技术针对传统连铸工艺中存在的钢坯夹杂物含量高、尺寸大等质量问题,基于电磁流体力学理论和金属凝固原理,通过自主研发的智能控制系统,在连铸结晶器区域精准施加可调电磁场^[22].技术核心在于采用国产化电磁制动装置,配合先进的在线监测系统,实现了对钢液流动行为的智能化调控.通过电磁力的精确作用,可有效抑制结晶器内钢液的湍流和冲击深度,形成理想的双涡流流场结构^[22].这种优化的流场条件不

仅显著促进了非金属夹杂物的上浮分离,使夹杂物去除效率提升50%以上,同时还能改善铸坯表面质量和内部组织均匀性.在实际工业应用中,该技术展现出多重优势(见图3):首先,通过夹杂物的高效去除,使汽车钢板坯的洁净度达到国际先进水平,产品缺陷率降低60%;其次,电磁制动作用可稳定弯月面波动,允许将拉坯速度提高15%~20%,显著提升连铸机生产效率;最后,智能控制系统能根据钢种成分、断面规格等工艺参数自动调节电磁参数,实现不同工况下的最优制动效果.

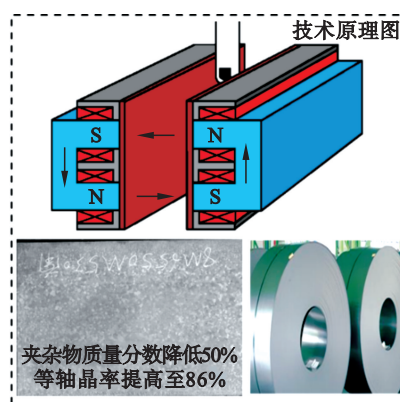


图3 智能电磁制动技术^[22]

Fig. 3 Intelligent electromagnetic braking technology^[22]

目前,该技术已成功应用在国内多家大型钢铁企业,特别在一汽、通用等高端汽车用钢生产中,产品性能稳定性得到显著提升.经第三方检

测,应用该技术生产的汽车板连铸坯,其氧化物夹杂尺寸普遍控制在 $50\ \mu\text{m}$ 以下, B 类夹杂物评级 ≤ 1.0 级, 完全满足高端汽车面板的严苛要求. 该技术的推广应用不仅提升了我国特殊钢的制造水平, 还为后续开发超纯净钢、高强钢等高端产品提供了重要技术支撑, 具有显著的经济效益和社会效益.

2.2 新型电磁驱动技术

新型电磁驱动技术是 1 种基于电磁驱动效应的先进冶金工艺控制技术, 根据材料体系和应用场景的不同, 已成功衍生出电磁旋流水口技术和多级电磁搅拌技术两大核心分支. 针对大型钢坯生产过程中普遍存在的偏析严重这一行业难题, 本文基于电磁均质理论开展自主创新, 突破性地开发了电磁旋流水口技术^[23-24]. 该技术的核心创新点在于: 通过在钢水浇注系统的水口部位施加特定构型的电磁场, 有效克服了传统工艺中钢坯尺寸和形状对流动调控的技术限制; 其作用机理是通过电磁力驱动钢液产生受控的旋转流动, 实现对结晶器内流场与温度场的精准调控(见图 4 和图 5), 进而优化溶质元素的分布状态并引导夹杂物的定向迁移, 最终达到显著抑制宏观偏析的效果, 同时还能实现一定程度的夹杂物去除^[23]. 该技术的工业化应用取得了显著成效, 在直径 800 mm 大规格轴承钢圆坯的生产中, 碳极差可稳定控制在 $\leq 0.04\%$ 的高水平, 产品质量完全满足高端装备制造要求. 这一突破性成果使我国成功实现了风电轴承钢的进口替代, 特别是在超大型海上风电机组关键部件的制造领域实现了示范应用和规模化推广, 为清洁能源装备的国产化提供了重要的材料保障. 该技术目前正进一步向特厚板坯、超大断面矩形坯等更多产品领域拓展应用, 展现出广阔的发展前景.

针对大型铝合金坯料晶粒粗大问题, 作者团队依据电磁细晶理论, 自主创新研发了多级电磁搅拌技术(见图 6)^[25]. 利用多级磁场施加分级搅拌, 对金属熔体施加一级搅拌预处理, 均匀温度场降低过热度, 对凝固前沿施加二级搅拌破碎柱状晶, 进而显著细化晶粒. 应用该技术生产 $380\ \text{mm} \times 1\ 300\ \text{mm}$ 大型超高纯铝扁铸锭, 平均晶粒细化至 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下, 攻克了超高纯铝铸锭晶粒粗大这一制约半导体靶材生产的行业难题, 全面替代了进口半导体溅射铝靶. 生产直径 $582\ \text{mm}$ 的 6005A、7N01 铝合金铸锭, 平均晶粒细化至 $100\sim 120\ \mu\text{m}$, 挤压高铁型材性能超过日本进口产品.

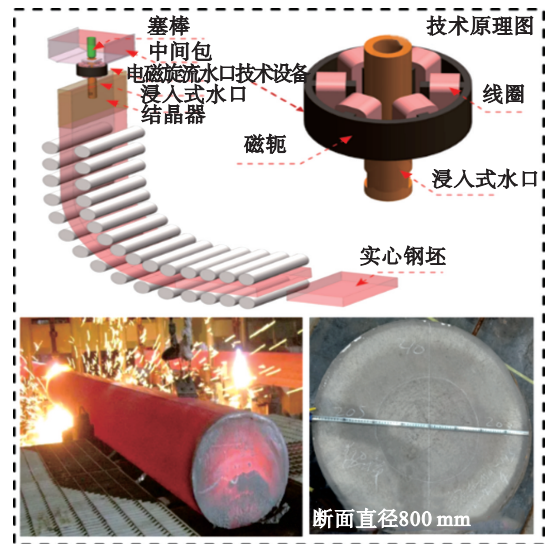


图 4 电磁旋流水口技术^[23-24]

Fig. 4 Electromagnetic swirling flow nozzle technology^[23-24]

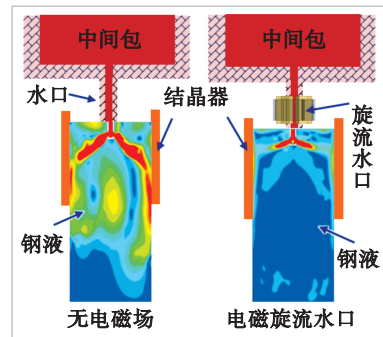


图 5 有无电磁半连铸温度场分布^[23-24]

Fig. 5 Temperature field distribution in semi-continuous casting with and without electromagnetic field^[23-24]

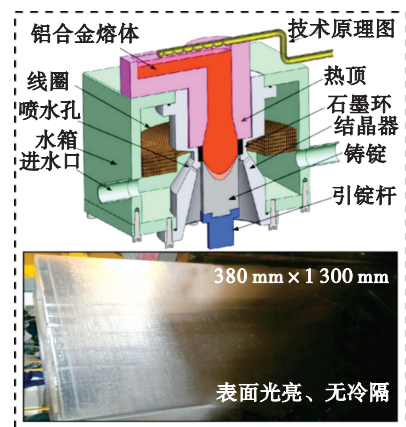


图 6 多级电磁搅拌技术^[25]

Fig. 6 Multistage electromagnetic stirring technology^[25]

2.3 复合电磁振荡技术

复合电磁振荡技术创新性地将电磁振荡和电磁搅拌效应叠加, 使电磁效果加倍. 依据材料

体系又衍生出差相和调制两类电磁振荡技术^[26-27]。如图 7 所示,针对大型镁合金坯料偏析严重、晶粒粗大以及裂纹等问题,依据电磁均质和细晶理论,自主创新研发了差相电磁振荡技术^[26-27]。通过布置多组线圈、精确匹配电磁频率、占空比、相位差和励磁电流,对坯料同时施加振荡和搅拌效应,实现对大型或特殊形状坯料全域或多部位精细调控。图 8 为有无电磁场半连铸的流场分布示意图,利用电磁场在金属熔体中具有高穿透深度的特点,通过感应电磁场产生的洛仑兹力竖直分量的梯度变化形成旋转力矩,实现镁液的电磁振荡和强制对流,改变镁合金熔体凝固过程中的流场与温度场^[26-27],改善凝固行为,极大优化半连铸凝固组织,显著降低凝固热收缩形成的显微疏松。同时利用洛仑兹力的水平分量对金属熔液的约束力形成弯液面,实现熔液与结晶器内套内壁的软接触,连续或脉冲利用弯液面和软接触效应形成的楔形间隙构成润滑膜层,显著降低滑动摩擦,有效避免熔液与金属内套的粘连,提高铸坯的表面质量。

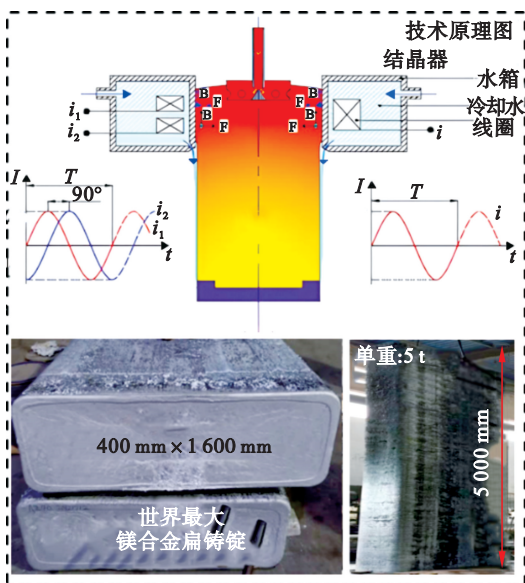


图 7 差相电磁振荡技术^[26-27]

Fig. 7 Differential phase electromagnetic oscillation technology^[26-27]

电磁振荡对坯料“千锤百锻”进而细化晶粒,电磁场通过强制对流加速熔体热量散失,降低液相线附近的温度波动,使凝固前沿过冷度更均匀,有利于细小等轴晶形成。同时,这可以促进溶质迁移、抑制偏析、降低铸造应力。应用该技术生产了单重 5 t、尺寸 1 600 mm×400 mm×5 000 mm 的世界最大宽厚比和最大单重的特大镁合金扁

铸锭,支撑了宽幅大卷重镁合金板卷轧制。生产的镁合金棒材晶粒尺寸降低 20%~30%,主元素偏析降至 16% 以下,超声探伤 A 级以上合格率提升了 15%,首次实现了镁合金型材在高铁上的应用突破。

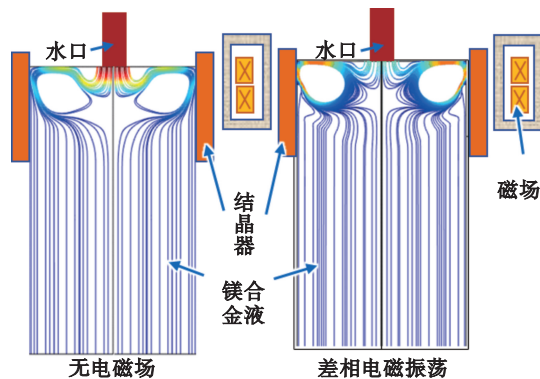


图 8 有无电磁场半连铸流场分布^[26-27]

Fig. 8 Flow field distribution in semi-continuous casting with and without electromagnetic field^[26-27]

针对大型钢坯晶粒粗大问题,依据电磁细晶理论,借助国产化升级研发了调制电磁振荡技术。通过优化电磁线圈结构和布置方式,结合自主研发的电磁场自动控制系统,使电流和频率周期振荡变化,对连铸过程同时施加振荡和搅拌效应。振荡效应随钢种和坯型变化自动调节,细化晶粒的同时,精确控制凝固前沿速度,进而显著降低传统电磁搅拌引起的白亮带缺陷。应用该技术生产无取向硅钢板坯,等轴晶率提升至 86%,达到国际领先水平,产品出口至日本。

3 电磁调控装备与绿色生产评价

3.1 电磁调控装备

针对大型金属坯料的制备工艺流程烦琐,冶金装备结构复杂、操作空间受限,对电磁冶金装备的设计、安装和使用要求严苛,以及我国传统电磁冶金技术和设备绝大多数依赖引进,且存在冶金效果不理想和不稳定、维护周期长等问题,本文通过将国产化升级和自主创新 2 种途径相结合,突破了电磁线圈的组合与高效水冷及长效磁屏蔽、多模式电源与智能集成控制、电磁系统高稳定连接等多项关键技术,开发了智能电磁制动、电磁旋流水口、多级电磁搅拌、调制与差相电磁振荡 5 大类成套核心装备(见图 9),实现了电磁调控技术同大型坯料生产工序和流程的精准匹配,可针对不同材料种类、坯型和尺寸进行定制式调控。技术和装备的持续迭代升级,实现了

磁场装置小型化、技术装备模块化、系统操控智能化、安装维修流程化,显著提高了坯料质量、成材率和生产效率.相较于传统电磁冶金装备,电磁参数实现了实时动态调节,解决了电磁干扰液

位检测的行业难题,装备稳定使用周期提高6倍,检修时间缩短50%.该装备已经在宝武、新疆众和、闻喜银光等50余家钢、镁和铝企业应用,全面保障了大型高品质金属坯料的高效且稳定生产.

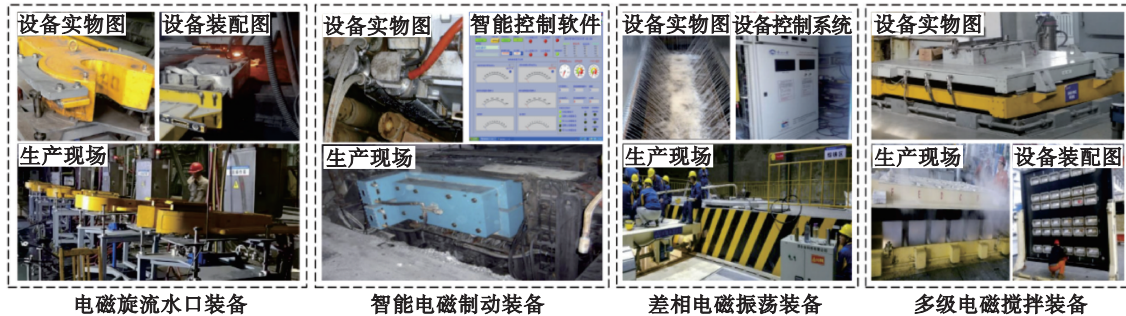


图9 大型金属坯料电磁调控装备

Fig. 9 Electromagnetic control equipment for large-sized metal billets

3.2 电磁调控技术增效降碳

我国制定的中远期“双碳”战略对钢铁和有色金属产业的节能减排提出了极为严格的要求.电磁调控技术在成功生产大型高品质金属坯料的同时,也具有明显的增效降碳效果.电磁调控技术可以显著提高金属坯料的生产效率和成材率,并改善表面质量,从而实现节能减碳效果.典型效果:智能电磁制动技术生产汽车钢坯,拉坯速率提高了近40%,成材率提高约10%;差相电磁振荡技术生产镁合金坯,头尾和表皮切削量减少25%~30%,大幅节约了能源.据估算,项目实施以来电磁调控技术累计节电10.46亿kW·h,折合标煤42.03万t,减少CO₂排放103.36万t,减碳效果显著.在绿色生产评价体系建立方面,本研究解决了工业制造关键基础材料纯度与尺寸匹配难题,提升了装备绿色制造水平;突破了铸锭纯净度与锭型等级限制,实现了半导体用溅射铝靶替代进口;增加了氧含量指标,改进了原材料的纯净度评价指标与方法;明确了铸造缺陷超声检测判定标准,提高了高纯铝铸坯成品合格率与性能水平评价的精准性.

4 结 语

围绕大型高端金属产品支撑性原料洁净、均质、细晶等调控难题,本研究提出电磁净化、均质、细晶三大理论,形成三大类5项核心电磁调控技术,推动了行业技术变革,实现了科技自主.该成果已经应用于50余家钢、镁、铝合金等行业的头部企业,实现了大型金属坯料的高端制造;有

效推动了大型金属坯料制造过程节能降碳,促进了绿色发展.大型金属坯料制备电磁调控技术总体达到国际领先水平,满足了我国能源、交通、电子、国防等重点领域对大型高端金属产品的迫切需求.

参考文献:

- [1] Guo S J, Le Q C, Zhao Z H, et al. Microstructural refinement of DC cast AZ80 Mg billets by low frequency electromagnetic vibration [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 404(1/2): 323-329.
- [2] 冯士超,王艳红,丁瑞锋.国内外电磁连铸技术应用研究进展[J].上海金属,2014,36(3):47-50,55. (Feng Shi-chao, Wang Yan-hong, Ding Rui-feng. Progress in investigation of electromagnetic technology application in continuous casting both at home and abroad [J]. *Shanghai Metals*, 2014, 36(3): 47-50,55.)
- [3] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: part II. specific practical problems and their solutions[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1989, 20(5): 631-643.
- [4] Le Q C, Zhang Z Q, Cui J Z. Effects of electromagnetic field and lubricate condition on the surface quality of magnesium alloy billet during LFEC processing[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(1): 180-185.
- [5] 和玉晓,张志强,宝磊,等.低频电磁半连续铸造AC52锭坯[J].特种铸造及有色合金,2013,33(4):357-360. (He Yu-xiao, Zhang Zhi-qiang, Bao Lei, et al. Low frequency electromagnetic semi-continuous casting AC52 magnesium alloy billets [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2013, 33(4): 357-360.)
- [6] 吴春雷,刘晓明,李德伟,等.电磁旋流水口连铸技术研究进展[J].连铸,2022,47(4):8-15. (Wu Chun-lei, Liu Xiao-ming, Li De-wei, et al. Study and development on electromagnetic nozzle swirling flow technology in continuous casting [J]. *Continuous Casting*, 2022, 47(4): 8-15.)
- [7] 贾永辉.镁合金新型电磁半连铸的瞬态耦合数值模拟及大扁坯制备研究[D].沈阳:东北大学,2022.

- (Jia Yong-hui. Transient coupled numerical simulation of novel electromagnetic semi-continuous casting for magnesium alloy and research on large flat billet preparation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.)
- [8] Liao Q Y, Le Q C, Zhao D Z, et al. Research progress on semi-continuous casting of magnesium alloys under external field[J]. *China Foundry*, 2024, 21(5): 516–524.
- [9] Jia Y H, Chen X R, Le Q C, et al. Numerical study on action of HMF, PMF, DHMF, and DPMF on molten metal during electromagnetic casting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(1): 201–217.
- [10] Jia Y H, Hou J, Wang H, et al. Effects of an oscillation electromagnetic field on grain refinement and Al_8Mn_5 phase formation during direct-chill casting of AZ31B magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116542.
- [11] 孙延文, 刘晓明, 牟望重, 等. 应用电磁旋流水口技术调控连铸板坯流场的研究[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一). 赣州, 2024: 219.
(Sun Yan-wen, Liu Xiao-ming, Mu Wang-zhong, et al. Research on regulating the flow field of continuous casting slabs by applying electromagnetic rotary water inlet technology [C]// Proceedings of the 12th China Metallurgical Society Youth Academic Annual Conference and the First “Carbon Neutrality” Metallurgical Young Scientists’ Salon (1). Ganzhou, 2024: 219.)
- [12] Li G J, Wang H M, Wang Q, et al. Structure and properties of Co-doped ZnO films prepared by thermal oxidation under a high magnetic field [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 112.
- [13] 刘晓明, 刘泽熠, 张思远, 等. 电磁旋流及其多级耦合电磁驱动技术研发与应用[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一). 赣州, 2024: 220.
(Liu Xiao-ming, Liu Ze-yi, Zhang Si-yuan, et al. Research and application of electromagnetic swirl and its multi-stage coupled electromagnetic drive technology[C]// Proceedings of the 12th China Metallurgical Society Youth Academic Annual Conference and the First “Carbon Neutrality” Metallurgical Young Scientists’ Salon (1). Ganzhou, 2024: 220.)
- [14] Wu C L, Li D W, Zhu X W, et al. Experimental study of macrostructure and segregation by a novel electromagnetic nozzle swirling flow combined with electromagnetic stirring in continuous casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(3): 1207–1212.
- [15] Yuan S, Zhao Y, Chen W B, et al. Self-assembled 3D hierarchical porous Bi_2MoO_6 microspheres toward high capacity and ultra-long-life anode material for Li-ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(26): 21781–21790.
- [16] Liu Z Q, Vakhruhev A, Wu M H, et al. Effect of an electrically-conducting wall on transient magnetohydrodynamic flow in a continuous-casting mold with an electromagnetic brake [J]. *Metals*, 2018, 8(8): 609.
- [17] 姚毓超, 刘中秋, 荣文杰, 等. 喂钢带碳浓度对连铸大圆坯宏观偏析的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版). 2024, 45(4): 499–506.
(Yao Yu-chao, Liu Zhong-qiu, Rong Wen-jie, et al. Effect of feeding steel strip carbon content on macrosegregation distribution in large continuous casting round bloom [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* 2024, 45(4): 499–506.)
- [18] Hou J, Le Q C, Chen L, et al. Domination and effect of multi-parameters in direct chill casting based on establishment of thermo model by numerical simulation and experiment [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 6619–6644.
- [19] 徐大召, 孟令刚, 杨春峰, 等. 高性能铝合金外场辅助半连续铸造研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 880–890.
(Xu Da-zhao, Meng Ling-gang, Yang Chun-feng, et al. Research progress of external field assisted semi-continuous casting for high performance aluminum alloys[J]. *Materials China*, 2022, 41(11): 880–890.)
- [20] Liu T, Wang Q, Gao A, et al. Fabrication of functionally graded materials by a semi-solid forming process under magnetic field gradients[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(11): 992–995.
- [21] Jia Y H, Le Q C, Liao Q Y, et al. The effect of frequency on solidification characteristics of AZ80 alloy during electromagnetic DC casting [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 126549.
- [22] Wang Q, Liu Y, Liu T, et al. Magnetostriction of $TbFe_2$ -based alloy treated in a semi-solid state with a high magnetic field [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(13): 132406.
- [23] Li D W, Su Z J, Chen J, et al. Effects of electromagnetic swirling flow in submerged entry nozzle on square billet continuous casting of steel process [J]. *ISIJ International*, 2013, 53(7): 1187–1194.
- [24] 石红燕, 吴春雷, 刘利, 等. 电磁旋流水口对圆坯结晶器液面波动的控制[J]. 连铸, 2021, 46(6): 24–28.
(Shi Hong-yan, Wu Chun-lei, Liu Li, et al. Liquid level fluctuation in mold controlled by electromagnetic nozzle swirling flow in continuous casting of round bloom [J]. *Continuous Casting*, 2021, 46(6): 24–28.)
- [25] Zhu Q F, Zhao Z H, Zuo Y B, et al. The effect of grain refiner and combined electro-magnetic field on grain evolution of horizontal direct chill casting 7075 aluminum alloy [J]. *International Journal of Materials Research*, 2010, 101(3): 380–385.
- [26] Jia Y H, Chen X R, Le Q C, et al. Macro-physical field of large diameter magnesium alloy billet electromagnetic direct-chill casting: a comparative study [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(3): 716–730.
- [27] Jia Y H, Wang H, Le Q C. Transient coupling simulation of multi-physical field during pulse electromagnetic direct-chill casting of AZ80 magnesium alloy[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 143: 118524.