综 述

电渣重熔技术发展现状及趋势

李纪[1,2],曲泰安[1,2],陈妍[1,2],李会敏[1,2],徐克[1,2],满锐[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009)

摘要: 电渣重熔是制备高端特种钢的核心冶金技术,对保障高端装备材料自主化、推动钢铁工业高质量发展具有重要战略意义。基于国内外电渣重熔技术发展现状及企业实践案例,系统综述了电渣重熔技术的演进历程。根据电渣重熔各分支技术迭代特征,明晰了技术迭代瓶颈与未来发展主攻方向。未来,应聚焦高温合金、高端轴承钢等高端增量市场,以"真空电渣重熔+旋转电极"复合工艺构建技术壁垒,推动行业向绿色化、智能化、高端化转型。

关键词: 电渣重熔;技术演进;气氛保护;旋转电极
中图分类号: TF14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)05-0009-09
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.002

Development Status and Trend of Electroslag Remelting Technology

LI Ji[1,2], QU Taian[1,2], CHEN Yan[1,2], LI Huimin[1,2], XU Ke[1,2], MAN Rui[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: Electroslag remelting is a core metallurgical technology for preparing high-end special steels, which is of great strategic significance to ensure the autonomy of high-end equipment materials and promoting the high-quality development of the steel industry. The evolution of electroslag remelting technology is systematically reviewed based on its domestic and international development status and practical industrial cases. According to the iteration characteristics of each branch technology of electroslag remelting, the bottlenecks of technological iteration and the main development directions in the future are clarified. Efforts should be focused on high-end incremental markets such as superalloys and high-end bearing steels in the future, . A technological barrier should be estabilished through the combined process of vacuum electroslag remelting and rotating electrodes to promote the transition of the industry towards green, intelligent and high-end development.

Key words: electroslag remelting; technological evolution; atmosphere protection; rotating electrode

自20世纪40年代霍普金斯取得发明专利以来,电渣重熔作为特种冶金领域的关键技术历经从理论认知偏差导致的发展停滞,到巴顿电焊研究院基于电渣焊衍生出工业化技术的突破,已成为制备高纯净度、高性能金属材料的核心手段[1-3]。1985年,世界首台工业电渣重熔炉在乌克兰投产,加之冷战时期航空航天与军备竞赛的需求驱

李纪,硕士,工程师,2022年毕业于辽宁科技大学冶金工程专业。E-mail: 1175974734@qq.com

动，电渣重熔技术在欧美国家完成了与真空电弧重熔技术路线的竞争验证，其在结晶组织、脱硫除杂、钢锭表面质量等方面的优势，使其成为高端关键材料核心工艺。我国自1960年起实现电渣重熔工业化应用，六十余年来伴随高端制造业的升级需求，电渣钢以高纯净度、低各向异性、高成材率等特性，在航空航天、汽车制造、核设施建设等领域展现出不可替代的应用价值[4-6]。

当前，电渣重熔技术已形成保护性气氛、旋转电极、导电结晶器、低频供电等多技术分支并行发展的格局，国内外企业在大型化、智能化、绿色化方向持续突破——抚顺特钢、宝武特冶等国内企业实现加压电渣重熔、大型空心钢锭制备的产业化应用，日本大同特钢、德国蒂森克虏伯等外企则在真空电渣重熔、低频电源控制等领域形成技术壁垒[7]。“十四五”时期，我国钢铁工业高质量发展战略的落地，为电渣重熔技术带来新的发展契机，政策层面明确提出突破高品质特殊钢材、高性能合金制备技术，推动电炉钢占比提升15%以上，且超低排放、碳达峰等要求倒逼行业向绿色低碳转型。市场层面，航空航天“两机专项”、新能源汽车、风电装备等领域的快速发展，对高温合金、模具钢、轴承钢等电渣重熔产品的需求持续扩容，仅2023年我国高温合金产量达4.9万t、轴承产量突破275亿套，高端材料进口替代空间显著。在此背景下，厘清电渣重熔技术演进脉络，探索技术创新、绿色转型、智能化升级的路径，不仅是电渣重熔技术突破发展瓶颈的关键，更是我国实现高端装备材料自主可控，推动钢铁工业从规模扩张向质量提升转型的必然要求[8]。

因此，系统梳理了电渣重熔技术发展现状，提出发展趋势，并聚焦节能降碳、低氟环保、智能转型等核心方向，为铸钢企业及电渣重熔行业的高质量发展提供理论参考与实践路径。

1 电渣重熔技术研发现状

电渣重熔经历八十多年的发展，随着产品质量要求越来越高，其技术水平有了显著提升，依托设备发展以及重熔渣系变化，形成了一系列先进电渣重熔技术。涵盖气氛控制、电极优化、电源改进、智能调控等多个维度。电渣重熔主要技术研发现状如图1所示。

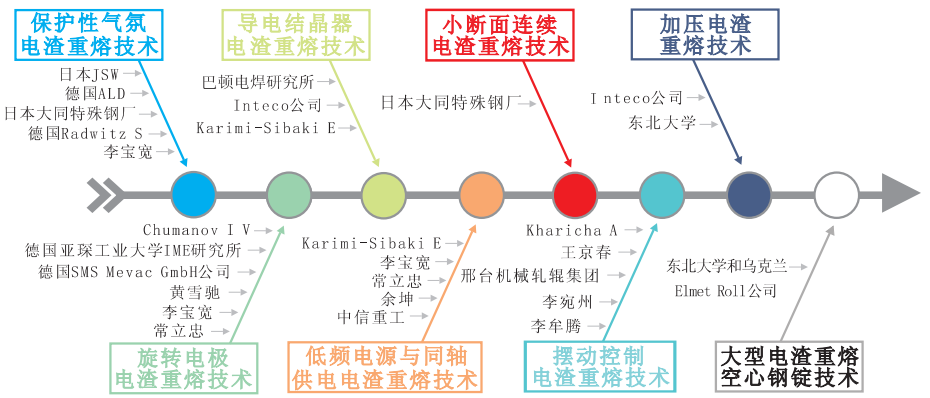


图1 电渣重熔主要技术研发现状

Fig. 1 Research and Development Status of Main Electroslag Remelting Technologies

1.1 保护性气氛电渣重熔技术

气氛保护是提升电渣重熔钢锭洁净度、避免合金元素烧损的关键技术方向，目前已形成真空密封保护、真空电渣重熔（V-ESR）两大核心分支。日本JSW企业为完全隔绝气体保护罩内部的氧气环境，选用真空密封式保护结构，借助反复抽真空与填充惰性气体的工艺手段，使铸锭在重熔处理全过程中氧含量维持稳定。由于常规惰性气体保护模式难以满足深度脱氧所需的热力学与动力学条件，德国ALD企业率先结合电渣重熔、真空电弧重熔两类工艺的技术优势，研制出真空电渣重熔专用设备。该工艺采用无氟熔渣冶炼Inco-

nel718合金，在保障脱硫效果的同时，有效避免铝、钛等合金元素在重熔过程中出现氧化烧蚀问题[9]。日本大同特殊钢企业自主研发V-ESR特种冶炼工艺用于不锈钢生产，工艺运行压力控制在6.7~20.0 kPa，可稳定制取低氧高纯电渣钢锭。经多轮真空电渣重熔循环处理后，成品钢锭全氧质量分数可控制至0.000 5%的极低水平[10]。Radwitz S等[11]围绕冶炼压力参数、熔渣体系类型两大变量，探究其对V-ESR精炼作用的影响规律。研究发现，真空环境会加速氟化钙、氟化铝等氟化物组分挥发，进而弱化重熔过程稳定性，而改用无氟渣体系开展冶炼时，提升真空度可有效削减铸锭内部氧、氮杂质元素含量。

国内方面，李宝宽等率先研制出国内首套真空耦合气氛保护式电渣重熔装备。真空电渣重熔示意图如图2所示。实际冶炼结果表明，真空环境下制备的电渣锭杂质含量更少、整体洁净度显著提升。依托热力学理论推演，该团队进一步阐明，碳质脱氧反应是真空电渣重熔实现深度脱氧的核心机制[12-16]，该结果为此项技术产业化落地与推广提供了充足理论支撑。

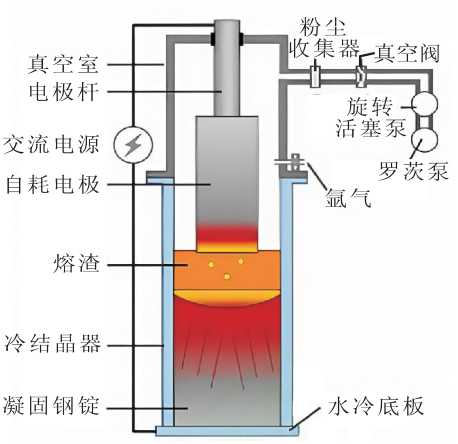


图2 真空电渣重熔示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Vacuum Electroslag Remelting

相较于常规大气电渣重熔，V-ESR更适合高温合金、高纯不锈钢等高端材料，但设备真空密封系统造价高，同时真空工况会加速传统氟渣挥发，配套无氟渣系冶炼还会小幅增加能耗。

1.2 旋转电极电渣重熔技术

随着装备制造业发展，高端特厚板钢材需求增加，采用电渣重熔技术制备生产优质大型钢锭成为重要发展趋势。常规电渣重熔技术普遍存在能耗偏大、生产成本高昂和生产效率不足等短板，该技术的电能消耗可达电弧炉炼钢的四倍多，这严重制约了电渣重熔技术的规模化推广与工业化普及。针对这一痛点，Chumanov I V等[17-18]提出旋转电极电渣重熔改进方案，可有效削减电渣锭的制备成本，同步提升冶炼工艺的精炼处理能力。区别于传统工艺电极仅做垂直方向运动的模式，改良装置借助外置电机带动自耗电极，以恒定角速度完成轴向旋转运动。在输入功率保持恒定的前提下，电极熔化效率得到显著提升，整体生产效率增幅超25%，同时还能够进一步优化铸锭内部纯净度。鉴于气密式旋转电极电渣炉的新建与改造工程难度较高，德国亚琛工业大学IME研究所对传统小型电渣炉进行结构优化，为其增设电极旋转功能，并设计出两种电极连接结构，分别为碳刷集流结构与液态金属镓集流结构。在此研究基础上，德国SMS Mevac GmbH公司完成技术迭代优化，将改良后的旋转电极电渣技术应用于ST37结构钢、H13模具钢的小批量工业化生产。生产实践数据表明，提升电极旋转速度可最大降低86%铸锭熔池深度，大幅优化熔池成型状态，改善冶炼质量[19-20]。

国内科研人员也针对旋转电极电渣重熔技术开展了大量系统性研究。黄雪驰等[21]依托数值模拟技术，精准还原了该技术冶炼过程中的多场耦合变化规律，以及钢材内部夹杂物的运动演变特征。李宝宽等[22]创新性地提出将电极旋转技术与真空冶炼环境相结合的复合型电渣重熔新技术。常立忠等[23]则研发出配备旋转结晶器的新型电渣炉设备，经试验验证，该设备可有效提升电渣锭的致密程度，抑制钢材宏观偏析缺陷，同时细化内部夹杂物与碳化物的粒径尺寸，显著提升钢材综合性能。

对比固定电极常规电渣技术，旋转电极通过电极旋转优化熔池流动，熔化效率提升25%，可有效抑制大断面钢锭宏观偏析、促进夹杂物上浮，适合偏析倾向高的厚板坯，但需配套旋转传动机构，从而导致电极损耗加快。

1.3 导电结晶器电渣重熔技术

传统电渣重熔设备供电线路布局较长，易引

发短网电压损失与线路感抗损耗,增加冶炼能耗。巴顿电焊研究所与Inteco公司为改善该问题,联合开发了导电结晶器技术,通过精准调控渣池与金属熔池的热量分配规律,削弱输入功率与熔池深度之间的耦合关系,能够在保证高效熔化的同时获得浅而平缓的优质熔池。导电结晶器示意图如图3所示,在此基础上,Inteco公司依托导电结晶器结构与双回路供电原理,成功研制出快速电渣重熔(ESRR)技术,融合了电渣冶金精炼质量优异和连铸生产高效化的双重技术优势。该工艺采用T型结晶器对大断面电极进行重熔处理,借助双回路调控方式优化结晶器内部热场分布,可实现钢坯连续抽拉成型,并通过空气对流方式完成冷却凝固过程[24-25]。Karimi-Sibaki E等[26]建立了适配工业生产条件的快速电渣重熔多物理场数值模型,精准预测了冶炼过程中的熔池形貌演变规律。

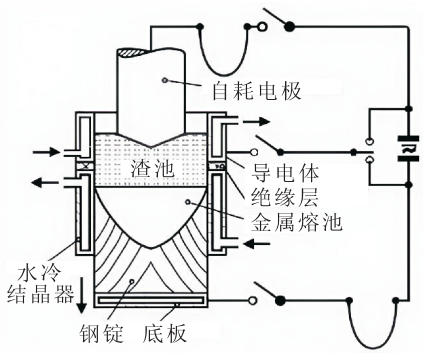


图3 导电结晶器示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the Conductive Mold

相比传统外置供电电渣炉,导电结晶器能够缩短供电短网、降低线路损耗,依托快速电渣重熔技术实现钢坯连续抽拉,适配大批量、大断面长材的生产。但缺点是导电结晶器损耗速度快、设备维护工作量大。

1.4 低频电源与同轴供电电渣重熔技术

低频电源可有效改善电网三相不平衡问题,具备感应损耗低、运行稳定性好、节能降耗等优势。目前日本等发达国家已将0.5~5.0 Hz低频电源技术广泛应用于电渣重熔设备中[27-28]。莱奥本大学Karimi-Sibaki E等[29-30]针对0.2 Hz与50.0 Hz开展对比试验,结果表明频率变小可小幅度缩减熔池深度,改变焦耳热与电磁力的空间分布特征,且该作用在渣池与金属熔池交界面处表现尤为显著。

国内相关研究同样取得诸多成果。李宝宽等采用有限元数值模拟手段,探究供电频率对电渣重熔电磁场分布的影响规律,研究发现当供电频率高于40.0 Hz时,自耗电极与铸锭内部会产生明显涡流效应;同时,通过仿真模拟证实,同轴式电渣重熔结构可有效优化并矫正电极内部的电流密度分布不均问题[31-32]。常立忠等开展多组不同电源频率的电渣重熔对比实验,验证了低频冶炼能够有效减小熔池深度、优化重熔铸锭的结晶组织结构,但也会造成钢锭氧含量小幅上升的问题[33]。余坤等分别在2.5 Hz、5.0 Hz、7.5 Hz、10.0 Hz的频率完成NO. 8367电渣重熔制备试验,并得到在7.5 Hz频率下内部夹杂物数量最少的结论。近年来,中信重工等企业积极吸收整合国内外先进冶炼技术,将1.0~3.0 Hz低频电源工艺成功应用于80 t大型电渣炉生产中,实现了良好的工业冶炼效果[34]。

与50.0 Hz常规工频供电相比,0.5~7.5 Hz低频电源可改善电网三相不平衡、减小熔池深度的问题,大幅缓解大吨位钢锭中心偏析,不过专用低频电源设备投入更高。其中,0.2~2.5 Hz低频抑偏析效果最优,但会小幅抬升钢中氧含量,5.0~7.5 Hz可兼顾洁净度与凝固质量,10.0 Hz以上电磁搅拌效果显著衰减,工业优选2.5~7.5 Hz频率区间。

1.5 小断面连续电渣重熔技术

针对小断面高速工具钢生产效率低、质量稳定性差的问题,日本大同特殊钢开发了小断面连续电渣重熔技术,实现了小断面电渣重熔的长时间稳定运行。在渣系方面,关键点是维持低水平的氧化物和提高碱度。通过开发结晶器驱动技术解决了电流路径引起的结晶器损耗问题,实现了连续长时间的重熔。通过连续重熔,生产效率提高了50%,成品收得率提高了5%[35],为小断面高端工具钢的高效生产提供了新路径。

对比间歇式常规小断面电渣冶炼,该连续工艺可长期稳定生产,生产效率提升50%、成品收得率提高5%,仅适用于小型精密工模具钢型材,设备专用化程度高,无法生产大规格钢坯。

1.6 摆动控制电渣重熔技术

电渣重熔的控制方式历经多次技术迭代，由最初纯人工操作的手摇式控制模式，逐步发展为恒电流、恒功率半自动控制模式，现阶段已升级为具备摆幅调控功能的全自动恒熔速控制体系。Kharicha A等[36]通过试验研究证实，当电极截面约70%区域与熔池接触时，渣料消耗更低、电能利用效率更高，且电极端部熔化状态均匀稳定，该工况下电路电流与电压波动幅度极小，可保障电渣重熔全过程平稳运行。

国内企业及科研院所针对电渣炉摆动控制技术开展了大量工程实践与优化研究。王京春等[37]对比分析了美国康萨克设备与国产电渣炉的摆动控制工作原理，工业应用结果表明，康萨克电渣炉的控制精度更优，制备的铸锭表面成型质量更好。邢台机械轧辊集团对10 t国产电渣炉升级改造，引入PID算法实现熔炼工艺曲线的精准追踪，通过对二次电流实施摆动调控，显著提升了电渣锭成品质量。在此基础上，李宛州等[38-40]对康萨克电渣重熔炉的自动控制系统进行深度优化，并将改良系统应用于邢台机械轧辊集团15 t康萨克电渣重熔设备，部分控制性能指标超越原装电控系统。同时，该团队提出基于电极位移数据的熔速估算与调控方法，完成时变参数控制系统的优化设计，有效保障了电渣重熔过程熔化速率的稳定性。李牟腾等[41]则创新设计出搭载组合积分控制器的电压摆动控制系统，调控效果优于传统PID控制设备。

相较于早期人工、恒功率半自动电渣控制，全自动摆动调控可稳定维持恒定熔速，减小冶炼电流电压波动，钢锭表面成型质量更佳，适配全规格电渣锭生产。但控制系统参数调试难度高，国产设备控制精度弱于进口成套设备。

1.7 加压电渣重熔技术

加压电渣重熔(PESR)技术是制备高氮合金、高强度无磁钢等特种钢材的关键工艺，能够满足高端装备制造领域对特种金属材料的高性能使用需求，该设备装置图示意图见图4。1980年，奥地利Inteco公司在埃森地区正式投产首台可用于工业化量产的加压电渣重熔炉，生产钢锭直径1 m、单重14 t，工作氮气压力可达4.2 MPa。该设备的研发投产主要为适配新一代核电站发电设备的生产需求。

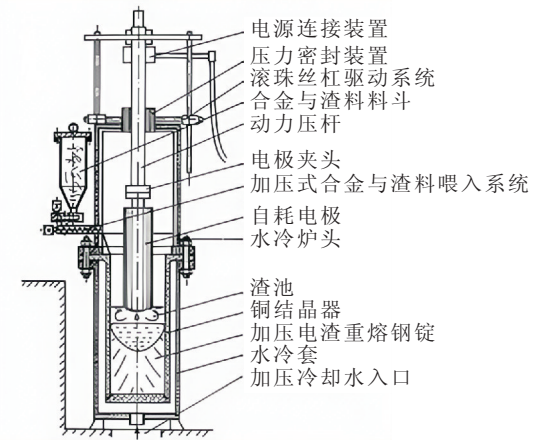


图4 加压电渣重熔装置示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of the Pressurized Electroslag Remelting Device

国内方面，2007年东北大学自主研发100 kg级加压电渣炉，额定压力7 MPa，成功制备出0.8%~1.2%氮含量(质量分数，以下同)的P900N、P900NMo、P200系列高氮奥氏体不锈钢，所得钢材成分均匀、组织结构致密，具备优良的力学强度与耐蚀性能。抚顺特钢加压电渣技术针对传统电渣重熔无法解决的氮化物夹杂问题，引进并消化吸收国外加压电渣炉技术，开发了具有自主知识产权的高压电渣重熔工艺，可在0.5~1.0 MPa氩气压力下实现电渣重熔，钢中氮含量控制在30ppm以下，氧含量控制在10ppm以下，产品质量达到国际同类进口设备水平，已实现航空发动机用高温合金电渣锭的国产化批量生产，替代原依赖进口的高端电渣锭产品，市场占有率位居国内前列。

常规常压电渣重熔技术难以制备高氮特种钢材，PESR依靠高压氮气完成钢液增氮，显著提升钢材强度与耐蚀性，多用于核电无磁护环部件。高压炉体加工难度大，冶炼持续消耗高纯氮气。

1.8 大型电渣重熔空心钢锭技术

大型空心钢锭是高端厚壁管材、筒体类锻件等重大装备的核心基础原料，传统制备工艺普遍存在成品品质不佳、成材率偏低等技术弊端，难以满足高端装备的制造标准。2012年，东北大学与乌克兰Elmet Roll展开产学研合作，研发出适配工业化生产的大型电渣重熔空心钢锭成套装备与配套冶炼工艺。该电渣炉采用短结晶器抽锭式生产工艺，可制备最大规格为Φ1 100 mm×6 000 mm的钢锭，

满足灵活适配空心钢锭与实心钢锭的多元化生产需求。经该工艺冶炼制备的空心钢锭内外质量优良,是高端厚壁管与筒体锻件制备的优质原料,成功攻克了大型空心钢锭国产化制备的技术瓶颈。东北大学联合国内特钢企业,攻克了大型空心电渣锭生产过程中的芯轴变形、熔池稳定控制、偏析抑制等关键技术,用奥氏体不锈钢空心钢锭成功生产出核电主管道,打破了此前国内该类产品完全依赖进口的局面,相关成果已实现工业化应用。

传统实心钢锭锻打通孔工艺工序繁杂、成材率偏低,本工艺可直接成型空心钢坯,适配核电筒体、厚壁无缝管坯原料生产。但芯轴高温易变形,熔池液面稳定控制难度大。

2 电渣重熔技术应用情况

电渣重熔技术在国内外企业得到了广泛应用,如抚顺特钢、舞阳钢铁、济源钢铁、宝武特冶、兴澄特钢、日本山阳钢铁、日本神户制钢、日本制钢、日本不二越、日本大同特钢等,各企业不仅拥有先进的电渣重熔生产线,而且在轴承钢、模具钢以及高温合金等高端材料的生产上也取得了突破。电渣重熔技术在企业应用情况如表1所示。由表1可知,国内外电渣重熔技术装备和品种规格呈现明显差异化特征。

国内以抚顺特钢、宝武特冶、兴澄特钢、舞阳钢铁、济源钢铁为行业主力。抚顺特钢装备谱系最全,覆盖普通、气氛、加压多类型电渣炉,专攻高温合金与超高强钢;舞钢聚焦40 t大板坯电渣坯生产,主打压力容器、模具用宽厚钢板;济源钢铁特长电极不交换抽锭式保护气氛电渣重熔炉侧重大截面超长钢坯。国内企业发展重心集中在大型化、多品种国产化等方面,仅少数头部企业注重电渣重熔产品连续式量产。国外日系企业(山阳、神户制钢、不二越、大同特钢)侧重小断面精密型材与连续化生产。日本制钢依托150 t超大电渣炉实现大规格沉淀硬化不锈钢量产;大同特钢小断面连续电渣技术成熟,适配工模具钢精细化制造。整体来看,国内企业优势在大吨位、厚壁或空心钢锭制备,日本企业在小型精品连续冶炼领先。在国内高端装备需求拉动下,国内特钢企业正逐步与日本先进企业进行行业对标。

表1 电渣重熔技术在企业应用情况

Table 1 Enterprise Application Status of Electroslag Remelting Technology

企业	技术装备	品种规格
抚顺特钢	1~30 t普通电渣重熔炉、保护气氛电渣重熔炉、加压电渣重熔炉,恒熔速、同轴导电、高精度称重	高温合金、超高强钢、不锈钢、工模具钢等
舞阳钢铁	三台40 t级板坯电渣重熔炉,该设备采用低频电源制式、双极串联结构、移动式抽锭结晶器设计,同时配备电极称量与熔化速度精准控制模块,以及干燥空气保护系统与二次冷却装置	厚度为640 mm、760 mm、960 mm三种规格的P20、WSM718R、980、2.25Cr1Mo、16MnR(HIC)、20MnNiMo等20多个品种,最大断面尺寸为960 mm×2 000 mm
济源钢铁	特长电极不交换抽锭式保护气氛电渣重熔炉	6 m以上断面尺寸为430 mm×500 mm方坯和Φ600 mm圆坯
宝武特冶	1~20 t电渣重熔炉,保护气氛	不锈钢、结构钢、高合金钢长材等
兴澄特钢	双极串联、T型导电结晶器和电流信号液面检测技术集成的半连续电渣重熔实心和空心钢锭成套设备	高档轴承钢、齿轮钢、弹簧钢等
日本山阳钢铁	保护气氛电渣重熔炉,同轴供电技术	QD61(SKD61),160 mm×655 mm
神户制钢	10 t、74 t电渣重熔炉	12Cr钢
日本制钢	150 t电渣重熔炉	沉淀硬化不锈钢17-4PH/SUS 630
日本不二越	保护性气氛电渣重熔炉	FN合金
日本大同特钢	连续电渣重熔炉,抽锭式双电极,变压器最大电压70 V,最大电流7 500 A;单项交流电源,电流频率50 Hz;水冷铜结晶器,直径130~250 mm,长度800 mm;有结晶器驱动电机及铸锭切割、提升装置	工模具钢

3 电渣重熔技术发展趋势

基于全球电渣重熔技术的演进脉络与企业实践，未来该领域将沿着绿色化、智能化、高端化三大核心维度深化发展，通过革新低碳绿色冶金工艺体系，实现无害化渣系与低碳生产技术的深度耦合，依托数字孪生技术搭建全流程参数智能化精准调控平台，突破高端真空+旋转复合加工工艺与专用特种装备技术壁垒，从绿色工艺、智能控制、高端装备多维度赋能行业核心技术迭代，驱动产业高质量升级转型。

3.1 无氟渣系与低碳工艺深度融合

随着“双碳”战略的深入实施，电渣重熔技术的绿色转型已成为行业共识。传统电渣工艺中广泛使用的含氟熔渣（如氟化钙、氟化铝）在重熔过程中易挥发产生有害气体，不仅污染环境，还会削弱工艺稳定性。未来发展趋势是全面替代传统氟化物渣系，研发无氟环保渣系。在无氟渣体系下，结合真空环境实施冶炼，不仅能有效削减铸锭内部的氧、氮杂质含量，还能从源头解决氟化物挥发问题，实现深度脱氧与环保冶炼的双重目标。

无氟渣系是实现电渣重熔绿色化的关键方向，目前国内外研究与工业化应用的主流无氟渣系以氧化钙-氧化铝-氧化镁三元体系为基础，调整组分配比控制渣系的熔点、黏度和脱硫能力。典型配比为40%~50%氧化钙+40%~50%氧化铝+5%~10%氧化镁，该渣系熔点约1 500~1 550 ℃，具有黏度低、脱硫能力较强等特点，适合碳钢、低合金钢的电渣重熔。针对高温合金开发的氧化钙-氧化铝-氧化钇渣系，通过添加氧化钇调整渣系与合金的界面张力，控制夹杂生成，配比35%~45%氧化钙+35%~45%氧化铝+10%~20%氧化钇。

工业化应用难点主要包括：①渣系熔点偏高，易导致电耗上升、电极熔速不稳定；②无氟渣系的脱硫能力弱于传统氟化钙基渣系，对钢中硫含量的控制难度较大；③渣系的黏度受温度影响敏感，熔池温度波动易导致渣钢界面不稳定，影响钢锭表面质量；④无氟渣系的工业生产经验不足，渣料的制备、储存与回收工艺尚未完全成熟，制约了大规模推广应用。此外，在碳减排方面，针对现有炉型，通过优化热场分布、提升能量利用率以及推广全参数过程稳定技术，将显著降低单位产品的能耗与碳排放，推动行业向超低排放的绿色低碳模式转型。

3.2 全参数过程精准控制与数字孪生

高端特种钢对冶金一致性的严苛要求，倒逼电渣重熔控制由传统恒流、恒功率、单目标恒熔速模式，向多变量协同的全参数自适应智能调控转变。现有全自动摆动控制仅实现熔化速率管控，熔池形貌、渣-钢界面反应、夹杂物演变等内部冶金状态仍依靠经验判断，难以满足大吨位、高合金钢锭的生产稳定性需求。数字孪生是智能化升级的核心载体，并非简单复用离线多物理场仿真，而是建立“多源传感采集-模型在线修正-工艺决策-现场执行”闭环链路。依托电压、称重、炉况多源实测数据实时校正仿真边界，推演熔池形态、元素烧损与偏析演化趋势，动态协同调控低频电源、同轴供电、电极摆动、冷却强度等工艺参数，克服固定工艺参数在冶炼中后期渣池、热场漂移带来的质量波动，实现由经验驱动向数据驱动冶炼转变。

目前，全参数过程精准控制与数字孪生技术在工业化应用仍存在突出瓶颈，高温密闭条件下熔池、渣钢界面缺少直接检测手段，多依靠间接信号反演易造成模型漂移；不同钢种、炉型工况差异大，高质量工业数据集不足，通用孪生模型构建困难；传感、仿真、执行时序匹配及执行机构响应滞后制约闭环调控实效。未来，重点发展电渣内部状态间接感知技术，开发适配多工况轻量化数字孪生模型，优化多机构协同控制算法，推动数字孪生从离线模拟走向工业在线闭环应用，保障大规格电渣钢锭组织与纯净度的批次一致性。

3.3 真空-旋转复合工艺与特种装备突破

航空航天、核电领域高端装备对材料纯净度、组织均匀性的双重严苛要求，单一真空电渣重熔或旋转电极技术已难以同时解决大型钢锭氧氮控制、宏观偏析与冶炼能耗之间的固有矛盾，真空-旋转电极复合工艺成为突破现有性能天花板、构筑国内特种冶金技术壁垒的重要方向。该复合工艺并非两项成熟技术的简单叠加，二者存在工况耦合约束：真空条件下熔渣挥发行为改变，而电极旋转会强化渣池搅动，进一步加剧氟化物挥发损耗，传统氟渣体系已无法适配该复合工况，必须与无氟环保渣系协同匹配，才能充分释放复合工艺的冶金潜力。其核心冶金增益体现在两方面：真空密闭体系实现钢液深度脱氧脱氢，抑制Al、Ti活泼合金元素氧化烧损；旋转电极借助离心

作用细化熔滴、强化渣池搅拌,匀化熔池温度场,抑制大断面钢锭宏观偏析,同时提升熔化效率、降低冶炼热损耗。李宝宽团队开发的真空环境旋转自耗电极电渣重熔专利方案,为该复合工艺提供了理论与装备原型支撑。但该工艺工业化落地仍存在显著现实难点:①真空密封结构叠加电极旋转传动机构,装备动密封部位结构复杂,密封失效风险升高;②旋转工况下渣-钢界面扰动加剧,易诱发钢锭表面质量缺陷;③旋转转速、真空度、供电参数之间工艺窗口窄,多参数耦合调控难度大,现有工业数据库积累不足,制约规模化生产。

加压电渣重熔(PESR)继续拓展特种材料制备边界,依靠高压氮气氛围实现可控增氮,是制备高氮奥氏体钢、无磁核电护环等材料不可替代的手段,未来重点不在于单纯提升冶炼压力,而是发展压力-熔速-渣系联动控制策略,缓解高压工况下氮元素分布不均、夹杂物管控困难等问题。在装备大型化、连续化维度,国内已经实现大型空心钢锭、超厚板坯、小断面工模具钢连续电渣重熔装备原型突破,但装备与工艺耦合适配度不足。后续应重点推进复合工艺与无氟渣系的协同工业化试验,攻克旋转-真空耦合动密封、多参数协同调控难题,同步完善加压电渣、大型空心锭成套工艺技术,补齐高端厚壁管材、筒体锻件关键原料短板,实现高端特种电渣产品自主可控。

4 结语

本文系统梳理了电渣重熔技术的发展脉络与前沿进展,明确了国内外技术差异化发展格局。当前国内电渣重熔技术已实现大型钢锭、空心钢锭、加压冶炼等工艺的产业化突破,在大规格特种钢材制备领域形成优势,但在高端精密冶炼、智能精准调控、绿色渣系适配等方面仍与国际先进水平存在差距,存在设备运维成本高、多工艺耦合调控难度大、无氟工艺稳定性不足等短板。随着高端装备制造产业升级与双碳战略持续推进,高端特种钢材的品质与绿色生产要求持续提升,单一工艺技术已难以满足产业发展需求。未来电渣重熔行业需聚焦绿色化、智能化、高端化发展主线,重点推进无氟环保渣系工业化应用、数字孪生智能管控体系搭建,突破真空与旋转电极复合工艺、加压精准冶炼等核心技术瓶颈,完善高端特种材料制备工艺体系,进一步打破国外技术壁垒,助力我国高端特种钢材料自主可控,推动特种冶金产业高质量转型升级。

参考文献

[1] 姜周华,董艳伍,耿鑫,等. 高品质特殊钢电渣重熔技术的开发和应用[J]. 钢铁,2023,58(9):15-25.
[2] 李宝宽,黄雪驰,刘中秋,等. 现代电渣重熔先进技术特征与演进[J]. 钢铁,2022,57(6):1-11.
[3] 郭逸丰,李强,郑天祥,等. 磁控电渣重熔技术研究进展[J]. 自然杂志,2023,45(3):188-206.
[4] 彭龙生,刘春泉,周浩,等. 电渣重熔新技术的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报,2022,36(S1):472-480.
[5] 潘秀兰,王艳红,梁慧智. 国内外电渣重熔技术的发展与展望[J]. 鞍钢技术,2005(2):5-10.
[6] 冯寒,李丰文,赵雷,等. M钢电渣重熔大型板坯表面质量控制研究[J]. 鞍钢技术,2025(5):57-62.
[7] 姜周华,董艳伍,刘福斌,等. 我国特种冶金产品、技术和装备的最新进展与展望[J]. 特殊钢,2024,45(4):1-12..
[8] 中原证券. 航空航天及卫星应用产业链分析之河南概况:国防军工行业专题研究[EB/OL]. (2025-03-27). https://pdf. dfcfw. com/pdf/H3_AP202503281648511181_1. pdf?1743151194000. pdf.
[9] Choudhury A. Recent results of the electroslag remelting process under vacuum[C]//Proceeding of the Tenth International Conference on Vacuum Metallurgy. Beijing: The Chinese Society of Metals,1990:247-251.
[10] Sekiya A, Nakayama S, Taketsuru T. Deoxidation of stainless steel on vacuum electroslag remelting process[J]. Electric Furnace Steel (Denki-Seiko),1995,66:47-53.
[11] Radwitz S,Scholz H,Friedrich B. Investigation of slag compositions and pressure ranges suitable for electroslag remelting under vacuum conditions[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Austin: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2013: 87-93.
[12] HUANG Xuechi, LI Baokuan, LIU Zhongqiu, et al. Oxygen transport behavior and characteristics of nonmetallic inclusions during vacuum electroslag remelting[J]. Vacuum, 2019, 164: 114-120.
[13] HUANG Xuechi, LI Baokuan, LIU Zhongqiu, et al. Numerical study on effect of vacuum on oxygen transfer in electroslag remelting process[J]. Vacuum, 2019, 172(12):109069.
[14] 黄雪驰,李宝宽,李孟臻. 真空对电渣重熔锭氧控制的影响[C]//第十四届国际真空科学与工程应用学术会议. 沈阳:中国真空学会真空冶金专业委员会,2019:189.
[15] LIU Yu, WANG Xijie, LI Guangqiang, et al. Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting[J]. Journal of Materials Research and Technology,2020,9(2):1619-1630.

[16] 李宝宽,王强,荣文杰,等. 真空电渣重熔制备双合金汽轮机转子钢锭的装置及方法:中国,201510444204.9[P]. 2017-03-01.

[17] Chumanov I V, Chumanov V I. Technology for electroslag remelting with rotating of the consumable electrode[J]. Metallurgist,2001,45(3-4):125-128.

[18] Chumanov I V, Chumanov V I. Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating a consumable electrode: part 1[J]. Russian Metallurgy, 2010(6):499-504.

[19] Schwenk M, Friedrich B, Enhancing the electroslag remelting process: development and implementation of a rotating electrode set-up[C]//Proceedings of the 2017 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Philadelphia: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS),2017:225-232.

[20] Demirci C, Mellinghoff B, Schlüter J, et al. Results of the new generation ESR (electro slag remelting) unit with rotating electrode, designed by SMS Mevac GmBH[C]//Proceedings of the 2019 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Birmingham: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS),2019:117-124.

[21] HUANG Xuechi, LI Baokuan, LIU Zhongqiu, et al. Modeling of fluid flow, heat transfer and inclusion removal in electroslag remelting process with a rotating electrode[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,163(6):120473.

[22] 李宝宽,王强,刘鹏,等. 一种基于真空环境下旋转自耗电极的电渣重熔装置及方法:中国,201310614338.1[P]. 2014-12-31.

[23] 常立忠,施晓芳,从俊强,等. 结晶器旋转对电渣重熔钢锭中元素分布的影响[J]. 过程工程学报,2014,14(2):266-272.

[24] Holzgruber W, Holzgruber H. Production of high quality billets with the new electroslag rapid remelting process[J]. Metallurgical Plant and Technology International,1996,19(5):48-50.

[25] 薛正学,郑亚旭,姜方,等. 825合金抽锭式快速电渣重熔锭表面质量和Ti烧损的控制[J]. 特殊钢,2016,37(4):37-40.

[26] Karimi Sibaki E, Kharicha A, Wu M, et al. A multiphysics model of the electroslag rapid remelting (ESRR) process[J]. Applied Thermal Engineering,2018,130:1062-1069.

[27] Choudhury A,刘树模. 大型低铝钢锭的低频电渣重熔[J]. 兵器材料科学与工程,1987,9:71-75.

[28] Schneider R, Mülleder M, Zeller P, et al. Effects of low frequency alternating currents on the electro-slag remelting process[J]. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte,2016,161(s1):20-26.

[29] Karimi Sibaki E, Kharicha A, Wu M, et al. A numerical study on the influence of the frequency of the applied AC current on the electroslag remelting process[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Austin: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2013:13-19.

[30] Kharicha A, Wu M, Ludwig A, et al. Influence of the frequency of the applied AC current on the electroslag remelting process[C]//TMS-CFD Modeling and Simulation in Materials. Orlando: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2012: 139-146.

[31] LI Baokuan, WANG Fang, Tsukihashi F. Current, magnetic field and joule heating in electroslag remelting process[J]. ISIJ International,2012,52(7):1289-1295.

[32] 吴申亚. 双电极电渣重熔多物理场及节能机制研究[D]. 沈阳:东北大学,2018:2-6.

[33] 常立忠,杨海森,李正邦. 电源频率对电渣重熔锭质量的影响[J]. 钢铁,2008,43(9):33-37.

[34] 余坤,吁安山,杨湘杰. 低频电渣重熔对NO8367奥氏体不锈钢组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(2):133-136.

[35] Ishikawa T, Yamamura T, Ohtsuka T, et al. New technology of electroslag remelting process. Denki Seiko, 1989, 60(2): 185-194.

[36] Kharicha A, Wu M, Ludwig A. Variation of the resistance during the electrode movement in the electroslag remelting process[C]//Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. Austin: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS),2013:145-150.

[37] 张莉,王京春,王锦标. 电渣炉的两种摆动控制原理分析与应用[J]. 冶金自动化,2006,30(2):53-55.

[38] 霍振全,常立忠,梁素霞. 10 t电渣炉冶炼工艺与二次电流摆动控制的应用[J]. 特殊钢,2006,27(6):54-56.

[39] 李宛州,贾兴华,王京春,等. 康萨克电渣重熔炉自动控制系统改造[J]. 钢铁研究学报,2007,19(4):99-101,106.

[40] LI Wanzhou, WANG Weiyu, HU Yuechen, et al. The estimation and control of the electroslag remelting melt rate by mechanism-based modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2012,43B:276-289.

[41] 李牟腾,任正云,陈安钢,等. 电渣重熔过程电压摆动的组合积分控制系统研究[J]. 石油化工自动化,2019,55(5):33-38.

(编辑 许营)
修回日期:2026-08-14