

高纯净真空悬浮熔铸装备技术进展

刘志中^{1, 2}, 曹大年¹, 吴 韬¹, 罗 森¹, 王金让¹,
何永亮^{1, 2}, 张鹏程^{1, 2}, 郝学卓¹, 李万青¹

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022;
2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 高纯净真空悬浮熔铸技术通过电磁感应力实现金属熔体的非接触悬浮, 在真空环境下完成加热、熔炼与成形过程, 可从根本上避免坩埚材料对熔体的杂质污染, 显著提高所制备金属材料的纯净度。本文系统介绍了真空悬浮熔铸技术的基本原理、工艺特点及主要装备结构, 梳理了国内外技术发展现状与关键瓶颈, 分析了大容量熔炼中电源匹配、坩埚冷却及悬浮稳定性等核心难题。结合当前研究进展, 重点探讨了装备在数字化仿真、AI优化与多坩埚协同熔炼等方面的创新应用, 阐述了其在高纯金属及新材料制备中的优势与潜力。展望未来, 悬浮熔铸装备将向智能化、精密化、绿色化和多功能方向发展, 通过引入数字孪生与物理信息神经网络等技术, 实现熔炼过程的精准控制与能效优化, 为高端金属材料的自主制备与高性能应用提供重要支撑。

关键词: 真空悬浮熔铸; 高纯金属; 冷坩埚; 感应加热; 数字化优化; 智能制造

中图分类号: TF743; TG232 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0246-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0034

Technological Advances in High-Purity Vacuum Levitation Melting and Casting Equipment

LIU Zhi-zhong^{1, 2}, CAO Da-nian¹, WU Tao¹, LUO Sen¹, WANG Jin-rang¹, HE Yong-liang^{1, 2},
ZHANG Peng-cheng^{1, 2}, HAO Xue-zhuo¹, LI Wan-qing¹

(1. China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract: High-purity vacuum levitation melting and casting technology achieves non-contact suspension of metallic melts through electromagnetic induction forces, and completes heating, melting and forming processes in a vacuum environment, which fundamentally avoiding impurity contamination came from crucible materials for the melt and significantly improving the purity of metallic materials. This paper systematically introduces the basic principles, process characteristics, and main equipment structures of the vacuum levitation melting and casting technology, reviews the technological development status and key bottlenecks at home and abroad, and analyzes core challenges such as power matching, crucible cooling and levitation stability in large-capacity melting. Based on current research progress, the innovative applications of the equipment in digital simulation, AI-based optimization and multi-crucible coordinated melting are explored emphatically, and its advantages and potential in the preparations of high-purity metals and new materials are described. Looking forward to the future, the levitation melting and casting equipment is expected to evolve toward intelligence, precision, greenness and multifunctionality. By integrating digital twins, physics-informed neural networks, it will realize precise process control and energy efficiency optimization, providing strong support for the independent development and high-performance application of advanced metallic materials.

Key words: vacuum levitation melting and casting; high-purity metal; cold crucible; induction heating; digital optimization; intelligent manufacturing

高纯金属材料在航空航天、半导体、核能及新能源等领域具有不可替代的重要作用, 其纯度和组织均匀性直接决定了部件的力学性能、导电导热性能以及

服役可靠性。传统熔炼方法普遍采用石墨、氧化物或陶瓷坩埚, 但它们在高温下易与金属液反应或溶解释放杂质, 难以满足高纯制备要求^[1]。尤其对于钛、锆、

基金项目: 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司技术发展基金 (22012225ZS03)。

收稿日期: 2025-10-20 收到初稿, 2025-11-06 收到修订稿。

作者简介: 刘志中 (1975-), 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向为铸造铝合金材料与装备工艺技术。E-mail: 2719994580@qq.com

引用格式: 刘志中, 曹大年, 吴韬, 等. 高纯净真空悬浮熔铸装备技术进展 [J]. 铸造, 2026, 75 (3): 246-251.

LIU Zhizhong, CAO Danian, WU Tao, et al. Technological advances in high-purity vacuum levitation melting and casting equipment [J]. Foundry, 2026, 75 (3): 246-251.

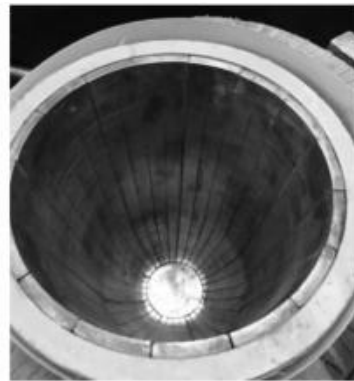
镍、钨等活性或高熔点金属，坩埚污染问题尤为突出，成为制约高端金属材料发展的关键技术瓶颈^[2-3]。

真空悬浮熔铸技术的出现，为解决上述问题提供了全新思路。该技术通过电磁感应力实现金属液的非接触悬浮，在真空或惰性气氛中进行加热和凝固，有效避免了坩埚材料与熔体的化学反应，实现了全程无污染的高纯熔炼过程。悬浮熔铸不仅能够显著提高金属纯度和组织均匀性，还具有温度控制精确及适应性强等优势，为制备高性能合金、非晶合金及高熵合金等新型材料提供了理想条件^[4-5]。

近年来，随着高端制造业和新材料产业的快速发展，高纯金属材料的需求量持续增长，这推动了真空悬浮熔铸装备的加速演进^[6]。从早期的小容量试验装置到当今的多坩埚、智能化、数字化工业装备，悬浮熔铸正成为高纯材料制备的重要方向。本文系统总结了真空悬浮熔铸的技术原理、发展现状与未来趋势，对推动装备技术升级、支撑高端材料自主制备、构建新型制造体系具有重要意义。



(a) 悬浮熔铸装备



(b) 水冷铜坩埚

图1 悬浮熔铸装备及水冷铜坩埚

Fig. 1 Levitation melting and casting equipment and water-cooled copper crucible

在此类装备平台上进行高纯净真空悬浮熔铸，核心原理如下：交变电磁场在金属熔体中产生感应电流，形成向上的电磁力以抵消重力，实现熔体稳定悬浮。该过程兼具加热与支撑双重作用，使金属在无坩埚接触的状态下完成熔化与凝固。感应线圈的电流频率与幅值直接影响磁场分布及悬浮稳定性；坩埚几何形状及线圈间距则调控磁场梯度与熔体形态。通过精确控制线圈电流相位及水冷流量，可实现熔体姿态动态平衡和温度场均匀化。高频电磁感应产生的搅拌效应促进溶质扩散和成分均匀化，显著改善合金组织。与传统耐火坩埚熔炼相比，该技术在真空或惰性气氛下能够获得高纯、致密、低缺陷的金属熔体，适用于钛、锆、镍、钨等活性或高熔点金属，也可扩展至高熵合金、非晶合金及储氢材料的制备^[9-10]。

1 高纯净真空悬浮熔铸技术概述

1.1 主要装备组成与技术原理

高纯净真空悬浮熔铸系统主要由高频感应电源、水冷铜坩埚、真空腔体及智能控制系统构成，形成电磁、热力与真空多场耦合的精密平台。其中，高频感应电源提供加热与悬浮双重功能；水冷铜坩埚承担熔体承载与冷却作用，其多通道微缝设计在维持电磁耦合效率的同时可有效抑制热应力集中，并能够通过可控水流实现冷却速率的分区调节；真空腔体保证低杂质环境；控制系统实时监测温度、真空度及熔体悬浮状态，并自动调节电源功率与冷却参数，实现过程精密控制。各部分协同作用，使悬浮熔铸能够在稳定、可控的条件下完成高纯金属制备，为高性能合金材料的研究与工业化应用提供坚实装备基础^[7-8]。图1展示了悬浮熔铸装备的整体布局和水冷铜坩埚的微缝设计及通道结构，可以直观理解电磁悬浮与冷却的协同工作原理。

1.2 工艺特性

在工艺特性方面，真空悬浮熔铸在熔化、过热到凝固成形过程中显著减少了坩埚材料及环境杂质对熔体的污染，为高活性金属和高温合金等高性能材料的纯净制备提供了关键保障。电磁搅拌与坩埚冷却协同作用能精确调节熔体温度场，避免偏析和气孔缺陷，提高铸件致密度和力学性能^[11-12]。

如图2所示，在真空悬浮熔铸过程中，金属熔体在高频电磁场作用下实现稳定悬浮并完成均匀熔炼。凝固后的合金锭表面平整、组织致密，体现了该工艺在纯净度与成形质量方面的显著优势。真空悬浮熔铸技术具有高度灵活性，可通过调节电源频率、功率及坩埚结构适应不同金属与工艺需求，实现从小批量试验熔炼到工业化生产的平稳过渡。



(a) 合金熔炼状态

(b) 合金锭

图2 合金悬浮熔炼状态及合金锭

Fig. 2 Alloy levitation melting state and alloy ingot

2 国内外发展现状与关键技术

2.1 国外发展现状

悬浮熔铸技术起源于20世纪20年代，研究者在真空环境下通过电磁力支撑金属液，实现非接触熔炼，从而有效避免坩埚材料对熔体的污染。20世纪50年代，美国率先提出冷坩埚悬浮熔铸技术，典型方法为使用单频、多匝电磁线圈对小容量金属液进行熔炼。随后，通过多频线圈组合增强熔体悬浮力与加热均匀性，使大容量金属熔炼成为可能。

目前，美国RETECH、CONSARC及德国ALD Vacuum Technologies等企业在真空感应熔炼（VIM）和冷坩埚悬浮熔铸领域均有成熟装备，典型装置如图3所示。VIM装备主要用于常规合金制备，而冷坩埚悬浮熔铸技术则进一步实现了金属的非接触悬浮熔铸，显著提升了纯度与成形质量。

近几年，国外研究在大容量、数字化控制和高纯

金属制备方面取得了一定进展：

（1）大容量悬浮熔铸探索：德国ALD等企业通过双频电磁系统实现了500 g~2.6 kg钛及高熵合金熔炼，并结合多物理场耦合模型优化设备设计，提高了悬浮稳定性与温控精度。

（2）高纯度金属与新型合金制备：日本研究者利用真空电磁悬浮熔铸制备出高纯Fe-Si合金，其杂质含量低于 100×10^{-6} ，磁损和伸长率显著优于市售材料。

（3）智能化与数字化优化：通过建立电磁-流体耦合模型及数字孪生平台，优化线圈参数、水冷系统和熔体运动，实现熔体位置自动调节与温度均匀化，为大容量工业化应用提供理论基础。

（4）电磁搅拌与微观组织控制：通过数值分析调整线圈电流频率与幅值，有效控制熔体自由液面形态与流动速度，从而改善合金成分均匀性与微观组织。



(a) ALD真空感应熔炼炉



(b) RETECH真空感应熔炼炉

图3 国外典型真空感应熔炼装备

Fig. 3 Typical foreign VIM equipments

2.2 国内发展现状

我国对真空悬浮熔铸技术的研究起步较晚，最初依靠引进吸收国外设备与技术。近年来，随着高纯金属及新材料需求增加，装备容量已从几公斤逐步扩大到上百公斤，部分接近工业化生产水平。沈阳真空技术研究所有限公司研发的VISF50GX型真空冷坩埚感应凝壳炉在关键部件和控制系统上实现自主优化，并已获得国家专利，为国内工业化应用奠定了基础。中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司自主研发的超大容量、多工位悬浮熔铸装备，在国内首次实现了大容量多工位协同控制，为高性能金属材料工业化制备提供了有力支撑。该多工位超大容量悬浮熔铸装备，在单一真空腔体内布置三座水冷铜坩埚，可实现单坩埚熔炼、双坩埚联合熔炼及三坩埚联合熔炼，显著提升了生产效率和熔炼容量。

国内科研机构与企业在悬浮熔铸技术方面已形成以下核心成果：

(1) 多工位联合熔炼：通过布置多个坩埚，实现熔炼容量扩大及多种材料熔炼需求兼顾。

(2) 装备与工艺自主优化：结合多物理场仿真与实验验证，优化坩埚结构、感应电源参数及悬浮控制策略，提高熔炼稳定性和合金纯度。

(3) 工业化应用推进：多家企业部署大容量悬浮熔铸装备，用于航空航天、高纯金属及电子靶材制备，初步实现规模化生产。

2.3 技术挑战与关键技术方向

尽管国内外悬浮熔铸技术已取得一定进展，但在大容量、高纯度工业化应用中仍面临诸多挑战，主要包括：

(1) 悬浮稳定性：熔炼量增加导致坩埚与熔体相互作用增强，需要优化感应电源、多工位协同控制提升稳定性；

(2) 感应电源技术：需兼顾涡流集肤效应、加热

效率及负载匹配，同时控制能耗和磁场干扰；

(3) 多物理场仿真与数字化优化：悬浮熔铸行为复杂，需结合仿真与AI技术，形成“离线优化+在线调控+数据反馈”闭环，实现精确控制；

(4) 坩埚结构及冷却设计：大型水冷铜坩埚需兼顾散热效率、结构强度及微缝精度，保证悬浮稳定，减少杂质污染并延长寿命。

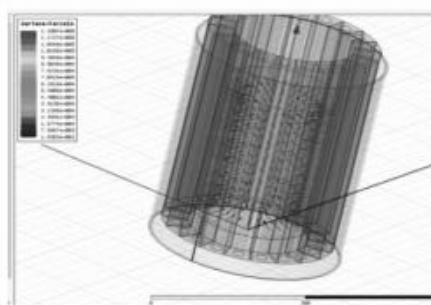
总体而言，国内在装备大容量、多工位设计及工艺优化方面已取得突破，国外在高精度感应电源及中小容量技术方面积累成熟。未来，悬浮熔铸装备的发展将集中在大容量、智能化、精密化、绿色化和多功能方向，以满足高端材料工业化制备的需求。

3 悬浮熔铸装备优化与应用探索

3.1 数字化与AI优化

悬浮熔铸过程中，坩埚结构、电磁线圈参数、负载形式及磁场频率等因素共同影响熔体悬浮效果与化学成分均匀性^[13]。传统设计方法依赖经验和试验，难以精确量化各参数对悬浮行为的影响，优化周期长、效率低^[14]。随着多物理场仿真系统的发展，工程师能够在不同坩埚尺寸、位置、分瓣数量及绝缘层厚度条件下，模拟熔体在电磁场作用下的响应，为设计、制造与装配提供理论依据。如图4所示，仿真系统能够直观呈现熔体在不同工况下的电磁力分布与温度变化，为优化控制策略奠定基础。

以中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司为代表，研究人员提出了“仿真+AI协同”的全流程优化体系。通过建立电磁、热流与流动耦合模型，模拟不同结构参数条件下熔体的悬浮状态，以获得最优设计参数区间；在实际熔炼过程中，AI系统实时采集熔体温度、悬浮偏差、能耗与真空度等关键数据，通过算法自动调整感应电源与冷却参数，实现对悬浮状态的智能化控制。随后工艺数据再反馈至仿真模型，用



(a) 仿真效果图



(b) 过程分析界面

图4 悬浮熔铸仿真与过程分析

Fig. 4 Simulation and process analysis of levitation melting and casting

于修正非线性因素,提高模型预测与控制的精度。该方法在高纯钛、锆等金属的试验与中试生产中表现优异,显著提高了熔体的稳定性与纯净度,同时降低了能耗与调试时间。

3.2 感应电源优化与熔炼容量控制

感应电源是悬浮熔铸装备的核心部件,其输出频

率与功率决定了电磁场的强度与分布,进而影响熔体的悬浮状态、加热效率及成分均匀性。不同频率的电磁场在金属内部形成的涡流与磁感应强度分布存在显著差异^[15]。如图5所示,低频电磁场具有更强的穿透性,可在较大体积熔体内部形成均匀加热区域;而高频电磁场主要集中在金属表层,能产生更强的表面感应力和悬浮效应。

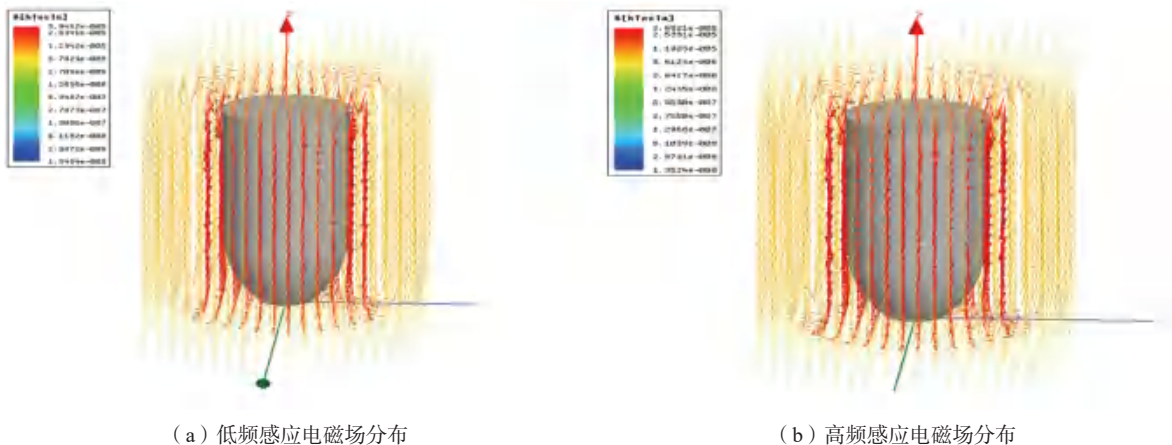


图5 熔炼过程中不同频率下的磁感应强度场

Fig. 5 Magnetic induction intensity fields at different frequencies during melting processes

高频电源通常用于小尺寸或粉末状高熔点金属的精密熔炼,其强表面电磁力有助于形成稳定的非接触悬浮状态;低频电源则更适合大容量工业化生产,可实现深层加热与内部电磁搅拌,提高熔体的温度均匀性与成分一致性。

在实际应用中,通过精确控制感应电源的功率输出曲线与磁场分布,可有效抑制熔体的形变与晃动,实现对熔炼温度与能耗的同步优化。随着可编程电源与智能控制系统的引入,悬浮熔铸装备的电磁加热过程正逐步实现高精度、自动化和自适应调节,为不同金属体系提供了更灵活的熔炼环境。

3.3 多坩埚联合熔炼工艺

多坩埚联合熔炼是在同一真空腔体内布置多个水冷铜坩埚,通过分区感应与独立控制实现多组熔体的同步熔炼与复合操作。针对多个电磁场耦合可能引起的磁场干扰,研究人员通过仿真优化与电源解耦设计,有效消除了互扰效应,保持了熔体的稳定悬浮与均匀加热^[16]。如图6所示,各坩埚在独立磁场作用下形成稳定的悬浮熔池,可同时对不同金属或合金体系进行熔炼与控制。该设计显著提升了单位时间内的总熔炼量,可满足高纯金属与高温合金等的工业化生产需求。同时,不同坩埚可根据工艺需求独立或协同工作,实现从单一熔炼到多种合金合铸的灵活转换,为

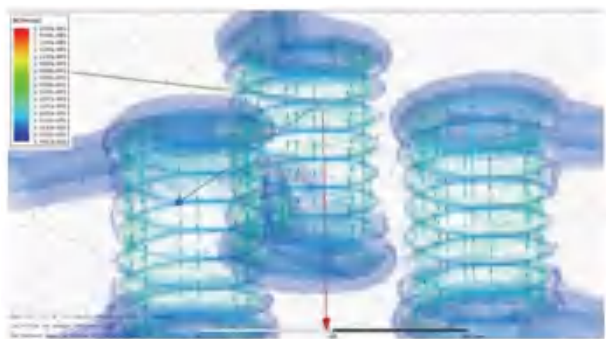


图6 悬浮熔铸多坩埚状态仿真

Fig. 6 Multi-crucible state simulation of levitation melting and casting

高纯钛合金、高熵合金及稀土功能材料的开发提供了高效的试验与生产平台。

3.4 应用探索

真空悬浮熔铸装备在航空航天、电子信息、医疗器械及新能源材料领域均展现出广泛的应用潜力。在航空航天领域,悬浮熔铸技术能够用于制备高纯高温合金,为发动机叶片、燃烧室等关键部件提供优质材料;在电子信息领域,该技术可用于高纯靶材制备,以显著改善薄膜材料的均匀性与致密性;在医疗领域,悬浮熔铸能获得低杂质、组织均匀的生物医用钛合金,有利于提高植入器械的力学性能与生物相容性。

同时,真空悬浮熔铸技术在新材料研究中发挥

了重要作用。高纯高熵合金、非晶合金及储氢材料等新型体系往往要求高温、高洁净度熔炼环境，悬浮熔铸为其提供了理想的制备条件。在此基础上，悬浮连铸、悬浮离心铸造及悬浮差压铸造等工艺的拓展，使装备功能逐步多元化，为高纯金属材料的制备和工业化应用开辟了新的路径。

4 未来发展趋势与展望

高纯净真空悬浮熔铸装备正处于由单一功能向系统智能化、精密化、绿色化和多功能方向加速演进的关键阶段。随着航空航天、半导体、新能源等高端制造领域对高纯金属材料性能提出更高要求，装备的发展趋势将更加注重过程控制的精度与熔炼环境的纯净度。未来，电磁场设计将从经验性布局转向基于多物理场耦合仿真与优化算法的智能设计，通过实时监测与自适应控制，实现熔体形态、温度场与功率输入的动态协调，以提升熔炼材料成分均匀性与组织致密性。

参考文献：

- [1] 严建强, 白志宇, 张志勇, 等. 真空感应悬浮熔炼技术在高纯材料制备中的应用 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 253-256.
- [2] 江涛. 真空感应熔炼技术在材料科学与工程专业实验教学中的研究和应用 [J]. 人力资源管理, 2017 (12): 502-503.
- [3] MOHR M, DONG Y, BRACKER G P, et al. Electromagnetic levitation containerless processing of metallic materials in microgravity: thermophysical properties [J]. npj Microgravity, 2023, 9: 34.
- [4] 兰利娟, 顾莹莹, 濮天娇, 等. 高熵合金性能的研究现状 [J]. 冶金工程, 2018, 5 (1): 17-24.
- [5] FASHU S, LOTOTSKYY M, DAVIDS M W, et al. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108295.
- [6] MCDEVITT E T. Vacuum induction melting and vacuum arc remelting of Co-Al-W-X gamma-prime superalloys [C]// MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2014, 14: 02001.
- [7] PITANS S, BAAKE E, SEHRING B, et al. New method for a large-scale levitation melting and casting of titanium parts [C]// 65th Technical Conference & Expo 2018. Kansas City, Missouri, USA, 2018.
- [8] BOIKOV A, PAYOR V. The present issues of control automation for levitation metal melting [J]. Symmetry, 2022, 14 (10): 1968.
- [9] 宋青竹, 张哲魁, 孙足来, 等. 冷坩埚真空感应熔炼设备进展 [J]. 真空, 2014, 51 (4): 19-21.
- [10] 张永峰, 杨川, 范启超, 等. 冷坩埚感应熔炼对NiTiNb合金成分和组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (6): 2185-2191.
- [11] 宋静思, 赵帅, 陈久强, 等. 搅动式真空细晶铸造炉及其使用方法: CN109719278A [P]. 2019-05-17.
- [12] CHAMORRO X, HERRERO-DORCA N, BERNAL D, et al. Induction skull melting of Ti-6Al-4V: process control and efficiency optimization [J]. Metals, 2019, 9 (5): 539.
- [13] NYCZ B, MALINSKI L, PRZYLUCKI R. Influence of selected model parameters on the electromagnetic levitation melting efficiency [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (9): 3827.
- [14] KERMANPUR A, JAFARI M, VAGHAYENEGAR M. Electromagnetic-thermal coupled simulation of levitation melting of metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (2): 222-229.
- [15] NYCZ B, PRZYLUCKI R, MALIŃSKI U, et al. A simulation model for the inductor of electromagnetic levitation melting and its validation [J]. Materials, 2023, 16 (13): 4634.
- [16] ZHANG C J, ZHANG L Y, CAO F Y, et al. Optimizing energy efficiency in induction skull melting process: investigating the crucial impact of melting system structure [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1): 6303.