面向钒钛磁铁矿绿色高效熔分的电炉数值模拟:研究进展综述与展望

王禹键[1,2,3],陈麒岗[1],余万权[1],刘孟霞[1],李玉磊[1],党 杰[1*]

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 成都 610000; 3. 钒钛资源高质化利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 在钢铁行业绿色低碳转型发展背景下,钒钛磁铁矿的非高炉冶炼技术,特别是“直接还原-电炉熔分”短流程工艺,成为实现资源高效综合利用与节能减排的重要路径。电炉(包括矿热炉 SAF、电弧炉 EAF 及新兴的电熔炉 ESF)作为该工艺的核心熔炼装备,其内部涉及电磁、传热、流动、化学反应等多物理场强耦合过程。由于极端高温环境难以直接原位观测,因此计算流体力学(CFD)与磁流体动力学(MHD)等数值模拟方法已成为揭示电炉内部机理、优化工艺参数和进行装备放大的关键手段。系统梳理并综述了近年来电炉数值模拟领域的研究进展:重点探讨了矿热炉(SAF)多物理场耦合建模、电弧炉(EAF)电弧等离子体 MHD 模拟、废钢与直接还原铁(DRI)熔化过程及精炼期脱碳反应等关键环节的数值模拟成果。在此基础上,结合钒钛磁铁矿熔分工艺特点,对电熔炉(ESF)数值仿真技术的未来发展方向进行了展望。可为钒钛磁铁矿绿色高效熔分技术的研发与产业化发展提供参考。

关键词: 钒钛磁铁矿; 电熔炉; 矿热炉; 电弧炉; 数值模拟; 多物理场耦合

中图分类号: TF823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004−7638(2026)05−0030−11

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.05.004 **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

听语音 聊科研 与作者互动

Numerical simulation of electric furnaces for green and efficient melting separation of vanadium-titanium magnetite: A review of research progress and future perspectives

WANG Yujian[1,2,3], CHEN Qigang[1], YU Wanquan[1], LIU Mengxia[1], LI Yulei[1], DANG Jie[1*]

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory for High-Value Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Against the backdrop of the green and low-carbon transition of the steel industry, non-blast-furnace smelting technologies for vanadium-titanium magnetite, particularly the short-flow process of direct reduction electric furnace melting/separation, has emerged as an important route for achieving efficient comprehensive resource utilization, energy conservation, and emission reduction. Electric furnaces, including the submerged arc furnace (SAF), electric arc furnace (EAF), and the emerging electro-smelting furnace (ESF), serve as the core smelting units in this process. Their internal operation in-

收稿日期: 2026−04−23; **修回日期:** 2026−05−07; **接受日期:** 2026−05−18

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC2910900); 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-LZX0045)。

作者简介: 王禹键, 1987 年出生, 男, 四川宜宾人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 矿物加工及高炉炼铁研究, E-mail: wang2262039@126.com; *通信作者: 党杰, 1988 年出生, 男, 甘肃白银人, 博士, 教授, 研究方向: 钒钛资源高值利用、氢冶金、电解水制氢研究, E-mail: jiedang@cqu.edu.cn。

volves strongly coupled multi-physical-field phenomena, including electromagnetics, heat transfer, fluid flow, and chemical reactions. Owing to the extremely high-temperature environment, direct in situ observation remains highly challenging. Consequently, numerical simulation approaches such as computational fluid dynamics (CFD) and magnetohydrodynamics (MHD) have become essential tools for elucidating furnace-internal mechanisms, optimizing process parameters, and scaling up equipment design. This paper systematically reviewed recent advances in numerical simulation of electric furnaces, with particular emphasis on multi-physics coupled modeling of SAF, MHD simulation of arc plasma in EAF, and numerical studies on key stages such as scrap and direct reduced iron (DRI) melting as well as decarburization during the refining period. On this basis, and in light of the specific characteristics of vanadium-titanium magnetite melting/separation processes, future development directions for numerical simulation technologies of ESF were further discussed. This study is expected to provide useful references for the development and industrial application of green and efficient melting/separation technologies for vanadium-titanium magnetite.

Key words: vanadium-titanium magnetite; electric smelting furnace; submerged arc furnace; electric arc furnace; numerical simulation; multi-physics coupling

0　引言

钢铁工业是全球 CO_2 排放的主要来源之一, 约占全球碳排放总量的 7% ~ 9%。在“双碳”目标的驱动下, 钢铁行业的低碳转型已成为全球共识[1]。钒钛磁铁矿作为一种铁、钒、钛等多种有价元素共生的特色多金属矿产资源, 在我国攀西和承德地区储量极为丰富, 是重要的战略性矿产[2]。然而, 传统的“高炉-转炉”长流程工艺在处理钒钛磁铁矿时面临严峻挑战: 一方面碳排放强度高, 与绿色发展要求相悖; 另一方面钛资源主要以弥散状态富集于高炉渣中, 回收利用极为困难, 且高炉操作过程中易出现炉缸发粘和钛渣变稠等问题, 严重制约了钒钛资源的综合利用效率[3]。为突破上述技术瓶颈, 以气基竖炉或回转窑直接还原配合电炉熔分的短流程工艺受到广泛关注[4-5]。该工艺通过预还原将铁矿石中的铁氧化物还原为直接还原铁(DRI), 再经电炉高温熔分实现铁、钒、钛的有效分离, 产出含钒生铁和高品位富钛渣或生铁与钒钛渣。随着氢冶金技术的突破, 以纯氢或富氢气体为还原剂的竖炉直接还原与电熔炉(Electric Smelting Furnace, ESF)的结合, 被认为是未来实现低碳乃至零碳炼铁最具潜力的过渡路径之一[6-7]。

电炉是短流程熔分的核心装备, 无论是传统的矿热炉(Submerged Arc Furnace, SAF)、电弧炉(Electric Arc Furnace, EAF), 还是面向未来的 ESF, 其内部均存在着复杂的多物理场强耦合过程: 电极通入强大电流产生焦耳热或高温电弧等离子体, 驱动熔池内熔渣和金属液的传热与流动; 同时伴随着固态炉料(DRI、废钢、熔剂)的相变熔化、渣金界面化学反应以及气泡的生成与逸出[8-9]。由于炉内温度通常高达 1 500 ~ 2000 ℃(电弧区可达 10 000 ~ 20 000 K), 且存在强电磁辐射和腐蚀性熔渣, 传统的试验测量手段极难获取炉内多物理场的三维空间分布及动态演化规律[10]。随着计算机算力的提升和数值算法的进步, 计算流体力学(CFD)和磁流体动力学(MHD)等数值模拟技术在冶金工程领域的应用日益成熟[11-12]。数值仿真能够以较低成本、非侵入式地揭示电炉内部的“黑箱”过程, 为电炉的结构设计、工艺优化、能耗降低及规模化放大提供科学依据。因此, 根据钒钛磁铁矿“直接还原—电炉熔分”短流程工艺需求, 重点聚焦 SAF、EAF 及 ESF 相关研究。主要围绕电磁场、传热与流动、相变熔化、多相流及反应动力学等多物理场耦合问题展开综述, 并在总结 SAF 与 EAF 代表性研究成果的基础上, 分析其对 ESF 建模与工艺优化的借鉴意义, 为钒钛磁铁矿绿色高效熔分过程的数值仿真研究提供更具针对性的理论参考。

1　钒钛磁铁矿熔分工艺与电炉发展现状

1.1　钒钛磁铁矿非高炉熔分工艺路线

钒钛磁铁矿的非高炉冶炼主要分为预还原和电炉熔分两个阶段。根据预还原反应器的不同, 主要形成了三条技术路线, 其主要特征对比如表 1 所示。回转窑-电炉工艺(RK-EF)是目前商业化应用最为成熟的工艺路线, 南非 Highveld 公司及新西兰的铁砂冶炼均采用此法。该工艺以煤为还原剂, 在回转窑内将钒钛磁铁矿还原为金属化率约 60% ~ 80% 的固态海绵铁, 随后热装入 SAF 进行熔分[13]。转底

炉-电炉工艺(RHF-EF)将钒钛磁铁矿与煤粉混合制成含碳球团,在转底炉内快速还原,随后热送至电炉熔分。该工艺具有原料适应性广、还原速度快的优点,但对球团强度和转底炉耐火材料要求较高[14]。气基竖炉-电炉工艺(SF-EF)以天然气裂解气、氢气或焦炉煤气为还原剂,在竖炉内实现钒钛磁铁矿球团的高效还原,金属化率可达 85% ~ 95%。还原后的高品质 DRI 进入电炉进行熔分,碳排放低。特别是与纯氢冶金结合时,是实现绿色钒钛资源开发的前沿技术[15-16]。在电炉熔分阶段,钒大部分被还原进入铁水,钛则氧化富集于炉渣中。通过精确控制熔分温度、炉渣碱度及还原剂配比,可实现含钛渣及铁水的良好分离,获得优质的含钒生铁(用于后续转炉提钒)和富钛渣(TiO_2 含量可达 40% 以上)[17]。

表 1 钒钛磁铁矿非高炉熔分主要工艺路线对比

Table 1 Comparison of the main process routes for non-blast-furnace smelting separation of vanadium-titanium magnetite

Process route	Reductant	Reduction temperature/℃	Metallization degree/%	Main advantages	Main challenges
Rotary kiln-electric furnace route (RK-EF)	Solid coal	1 000 ~ 1 100	60 ~ 80	Mature technology and relatively high level of industrial application	High carbonemissions, relatively low reduction efficiency
Rotary hearth furnace-electric furnace route (RHF-EF)	Solid carbonaceous reductant	1 200 ~ 1 350	70 ~ 85	Rapid reduction and broad adaptability to raw materials	High pellet-strength requirement, severe refractory wear
Hydrogen-based shaft furnace-electric furnace route (SFEF)	Natural gas/ hydrogen	850 ~ 1 050	85 ~ 95	Low carbon emissions and high-quality DRI	Dependence onclean gas supply, relatively high capital cost

1.2 电熔炉(ESF)的技术特点与应用前景

传统的 EAF 主要用于废钢熔炼,要求炉料具有较高的金属化率和较低的脉石含量。然而,对于钒钛磁铁矿直接还原产出的 DRI,往往含有较高的 TiO_2、SiO_2 等脉石成分,导致熔分过程中渣量极大(吨铁渣量可达 300 ~ 600 kg)。在处理高渣量、低碳含量的 DRI 时,传统 EAF 面临电弧稳定性差、耐火材料侵蚀严重、能耗极高等问题[18]。SAF 主要依靠电极插入渣层,利用熔渣的电阻产生焦耳热进行熔炼。SAF 适合处理高渣量物料,但其熔池温度较低且梯度大,难以满足低碳 DRI 快速熔化及渣金深度分离的高温需求。为此 ESF 作为一种结合了 SAF 和 EAF 特点的新型熔炼装备应运而生。ESF 通常采用封闭炉顶设计以回收富 CO 尾气,电极可根据炉况在渣层内埋弧操作(类似 SAF)或在渣面起弧操作(类似 EAF)[19]。ESF 具备以下显著优势:①:原料适应性强,能够高效处理低品位、高渣量、低碳含量的 DRI,对原料质量要求宽松,特别适合处理氢基竖炉产出的高金属化率 DRI;②:热效率高,通过深熔池设计和优化的电极控制,实现焦耳热与电弧热的协同供能,能量利用效率显著高于传统 SAF;③:低碳环保,与氢基竖炉紧密衔接,可直接热装 DRI,大幅降低熔炼电耗,且密闭结构利于气体回收和粉尘控制,显著提升 CO_2 减排潜力[20]。目前,全球多家大型钢铁企业及工程公司(如 BHP、Hatch、Primetals Technologies 等)正积极推进 ESF 中试与工业化应用。Dong 等[16] 系统综述了 ESF 的工艺特点和数值建模进展,指出 ESF 是从传统高炉向全废钢 EAF 过渡期间实现低碳炼铁的“桥梁”技术,具有重要的战略意义。笔者团队前期也提出了一种基于氢冶金的低品位钒钛磁铁矿中有价组元全回收方法,熔分阶段采用多电极电熔炉实现铁、钒、钛的有效分离[21]。尽管 ESF 在处理钒钛磁铁矿直接还原产物方面展现出广阔的应用前景,但目前该技术仍处于研发与中试阶段,尚未实现大规模工业化生产[16]。由于缺乏实际生产数据,加之极端高温、强电磁辐射及腐蚀性熔渣等恶劣环境,导致炉内多物理场原位观测极为困难,因此在工业化应用前期开展系统的数值模拟研究,对于揭示炉内复杂机理、优化反应器结构设计及指导生产实践具有不可替代的重要作用。鉴于目前针对 ESF 的专属数值模拟研究相对匮乏,而其在工作原理上兼具 SAF 与 EAF 的特征,笔者旨在系统总结和归纳近年来 SAF 与 EAF 在多物理场耦合数值模拟领域的研究进展。通过梳理现有电炉模拟的建模方法与关键成果,为未来 ESF 的数值仿真技术发展及钒钛磁铁矿绿色高效熔分工艺的优化提供理论参考与借鉴。

2 数值模拟基本方程与方法

为便于理解后续 SAF、EAF 及未来 ESF 数值模拟研究中常见的建模思路与参数耦合关系,首先对电炉多物理场模拟所涉及的基本控制方程、典型湍流模型及多相流处理方法进行简要归纳。电炉熔分过程涉及复杂的电磁学、流体力学、传热学及化学反应多学科交叉。由于电极通入强大电流(交流或直流),在炉内产生强电磁场,其欧姆损耗(焦耳热)和洛伦兹力分别作为能量源和动量源,驱动熔渣和金属液的传热与流动,电炉内多物理场耦合关系如图 1 所示。数值模拟的核心在于建立并求解描述上述物理过程的控制方程组[22-23]。

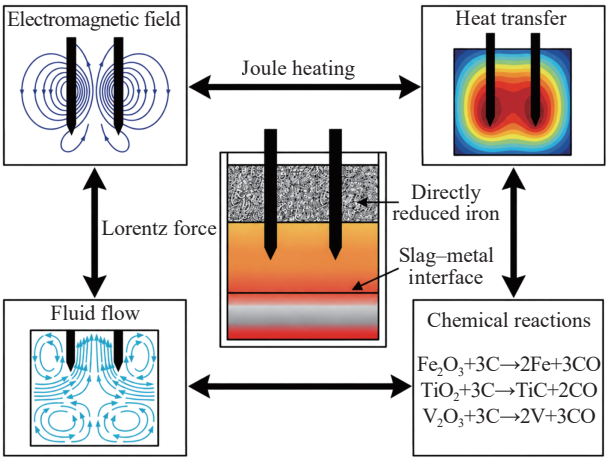


图 1　电炉内多物理场耦合关系示意

Fig. 1　Schematic diagram of the multiphysics coupling relationships in the electric furnace

2.1　电磁场方程

在电炉内部, 电磁场主要由电极通入的交流或直流电流引起, 其分布遵循麦克斯韦方程组。在低频(50/60 Hz 工频交流或直流)且导电介质(熔渣、钢液)中, 位移电流通常可忽略不计, 方程组简化为准稳态形式。根据欧姆定律, 电流密度满足公式(1)。

$$J=\sigma(E+v\times B) \tag{1}$$

式中, J为电流密度(A/m^2), σ为电导率(S/m), v为流体速度(m/s), E为电场强度(V/m), B为磁感应强度(T)。电磁场求解后, 可获得两个关键的源项: 焦耳热(式(2))作为能量方程的热源项和洛伦兹力(式(3))作为动量方程的体积力源项[24]。

$$Q_j=|J|^2/\sigma \tag{2}$$

$$F_L=J\times B \tag{3}$$

式中, Q_j为焦耳热(W/m^3), F_L为洛伦兹力(N/m^3)。对于交流电场, 通常采用时均化处理或相量法求解, 以避免对每个电周期进行瞬态计算。Tesfahunegn 等[24] 对比了交流和直流求解器在 SAF 中电流和功率分布计算上的差异, 发现两种方法在稳态结果上具有较好的一致性, 但交流求解器能更准确地捕捉三相电极间的电流不平衡现象。

2.2　流体流动与传热方程

流体流动和传热通过求解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程组实现, 主要包括: 连续性方程(质量守恒)(式(4)), 动量守恒(式(5))以及能量守恒方程(式(6))。

$$\partial\rho/\partial t+\nabla\cdot(\rho v)=S_m \tag{4}$$

$$\partial(\rho v)/\partial t+\nabla\cdot(\rho vv)=-\nabla P+\nabla\cdot\tau+\rho g+F_L+S_u \tag{5}$$

$$\partial(\rho C_pT)/\partial t+\nabla\cdot(\rho C_pTv)=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q_j+S_h \tag{6}$$

式中, ρ为密度(kg/m^3), P为压力(Pa), τ为黏性应力张量(Pa), g为重力加速度(m/s^2), C_p为比热容(J/kg·K), T为温度(K), k为热导率(W/m·K)。S_m、S_u、S_h分别为相变、化学反应等引起的质量、动量和能量源项, 其单位分别为 kg/(m^3·s)、N/m^3 和 W/m^3。洛伦兹力和焦耳热实现了电磁场与流场、温度场的耦合[22]。对于炉料(如废钢、DRI)的熔化过程, 通常采用焓-多孔介质法, 将固液糊状区视为多孔介质, 通过引入液相体积分数来衰减固相区域的流体速度, 从而模拟固液相变过程[25]。

2.3　湍流模型

在电炉熔池中, 由于洛伦兹力驱动的电磁搅拌和热浮力作用, 熔体流动通常呈现湍流特征。常用的湍流模型包括标准 k-ε 模型、RNG k-ε 模型和 k-ω SST 模型。Karalis 等[22] 的研究表明, 在镍铁 SAF 中, 渣层流速极低(平均约 0.1 mm/s), 计算出的 Reynolds 数远小于临界值, 流动实际呈现层流特征, 因此无需引入湍流模型。然而, 在 EAF 熔池中, 由于电弧射流的强烈冲击和氧气吹入的搅拌作用, 湍流效应显著, 标准 k-ε 模型被广泛采用[23]。

2.4　多相流处理方法

电炉内存在固态炉料、液态熔渣、液态金属和气态产物等多相共存的复杂状态。常用的多相流处理方法主要有以下几种, 其适用场景对比如表 2 所示。其中, VOF 法已被成功应用于电弧炉中电弧-熔渣界面的追踪模拟[26]; 焓-多孔介质法广泛用于废钢和 DRI 的固液相变模拟[25]; 欧拉-拉格朗日法可有效追踪 DRI 颗粒在熔池中的熔化轨迹[27]; DEM-CFD 耦合方法则适用于模拟固态炉料在炉内的堆积、坍塌及其对电阻分布的影响[28]。由上述分析可见, 不同数值方法在电炉模拟中的适用对象存在明显差异。电磁场模型主要用于描述电流分布、焦耳热生成及洛伦兹力驱动的熔池流动, 是 SAF 和 ESF 渣层电阻加热模拟的基础; MHD 模型则更适合描述 EAF 及 ESF 起弧工况下的电弧等离子体行为。对钒钛磁铁矿熔分而言, 模型选择不能仅依据一般电炉冶炼过程, 还必须考虑高渣量、复杂脉石组成、钒钛元素分配、TiO_2 富集、TiC 生成及渣黏度变化等特征。因此, 未来面向 ESF 的数值模拟应在传统电磁-热-流动耦合模型基础上, 进一步引入相变熔化、反应动力学、热力学数据库及渣金界面传质模型, 实现对熔分全过程的综合描述。

3　矿热炉（SAF）数值模拟研究进展

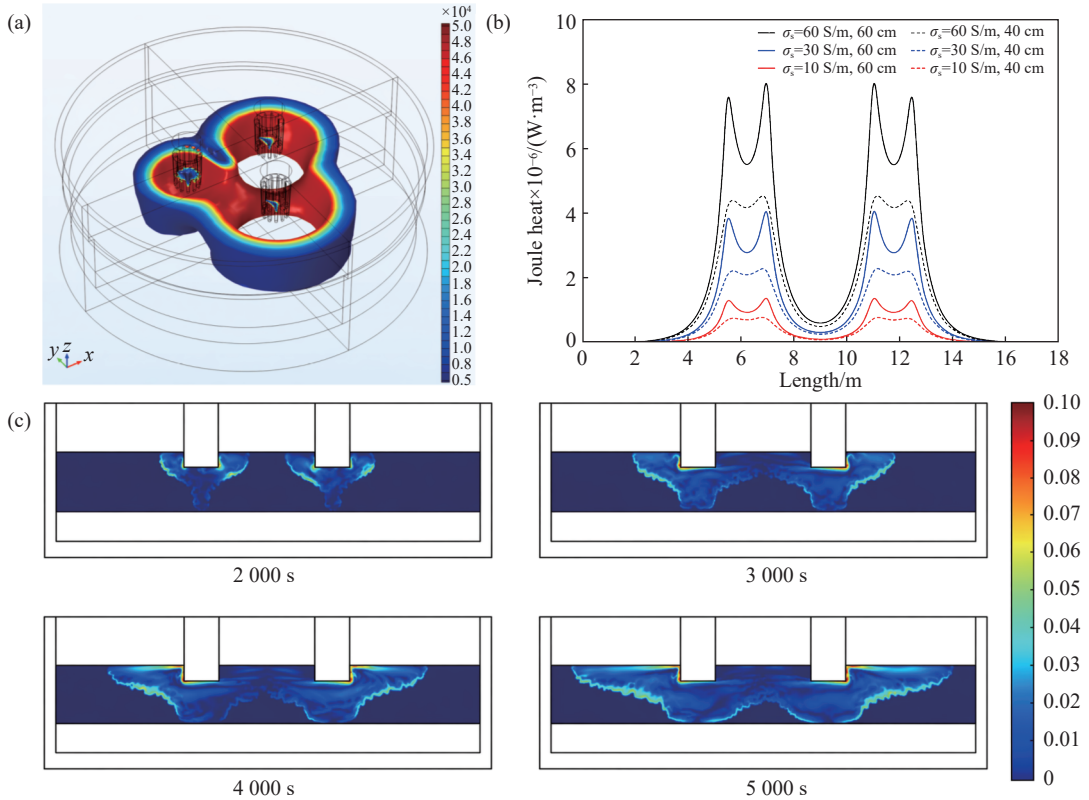
SAF 主要用于铁合金(如镍铁、硅铁、锰铁)及钛渣的冶炼。电极埋入炉料或渣层中, 依靠渣层电阻发热熔炼物料, 同时电极末端可能产生微电弧。SAF 数值模拟的核心挑战在于准确描述电极-渣层-金属层的多区域电磁热流耦合, 以及三相交流电引起的时变电磁场[24]。SAF 的数值模拟经历了从简化二维轴对称模型到全三维瞬态多物理场耦合模型的

发展历程。早期研究受限于计算资源，多采用二维轴对称稳态模型，仅能描述单电极附近的局部场分布。近年来，全三维瞬态多物理场耦合模型已成为主流。Karalis 等[22] 建立了一个三维瞬态数学模型，用于分析镍铁 SAF 中的流体流动、传热和电磁现象。该研究采用分子动力学模拟预先确定了渣层的物性参数(密度、黏度、电导率)，并将其作为输入量。如图 2 所示，模拟结果表明，渣层的高电导率有利于通过焦耳热促进熔化，而计算出的 Péclet 数和 Reynolds 数揭示了渣层流速(平均约 0.1 mm/s)在传热中起决定性作用，且流动呈现层流特征。焦耳热等温面分析显示，热量主要集中在电极附近的渣层区域，与工业观测中电极附近熔体剧烈搅拌的现象高度吻合。Zhao 等[29] 针对三相交流 SAF 建立了三维数值模拟模型，分析了炉内多物理场的分布规律。研究发现，电流密度主要受趋肤效应影响集中在电极表面；焦耳热最大值出现在电极底部的料层；磁通密度集中在电极极心圆区域；熔池流动受洛伦兹力和重力共同作用。温度场分布与电流密度和焦耳热相似，最高温度(2 500 ℃)位于电极底部，并随电极直径增大而降低。这一发现对于理解 SAF 内部的“热区”和“冷区”分布，以及指导电极布置优化具有重要意义。

表 2　电炉数值模拟中常用多相流处理方法对比

Table 2　Comparison of common multiphase flow treatment methods used in electric furnace numerical simulations

Method	Key features	Typical applications
Volume of Fluid (VOF) method	Captures interfaces between immiscible phases by solving the phase volume-fraction equations; particularly suitable for well-defined free surfaces and phase interfaces	Slag-metal interfaces, free surfaces, jet-induced cavities, and large-scale interfacial deformation
Enthalpy-porosity method	Models solid-liquid phase change based on the enthalpy balance and liquid fraction, without explicitly tracking the melting/solidification front	Local melting of scrap, DRI/HBI melting, and solid–liquid phase-change regions
Euler-Lagrange approach	Treats the continuous phase in an Eulerian framework while tracking dispersed particles or bubbles individually in a Lagrangian framework; most suitable for relatively dilute dispersed phases	Transport of dispersed DRI particles, injected particles/droplets, and trajectories of dispersed gas bubbles
CFD-DEM coupling	Couples continuum fluid-flow calculations with discrete particle dynamics, allowing particle–particle and particle-wall contact, collision, and packing to be resolved	Solid burden or scrap packing, charging, settling, collapse, and particle-contact processes



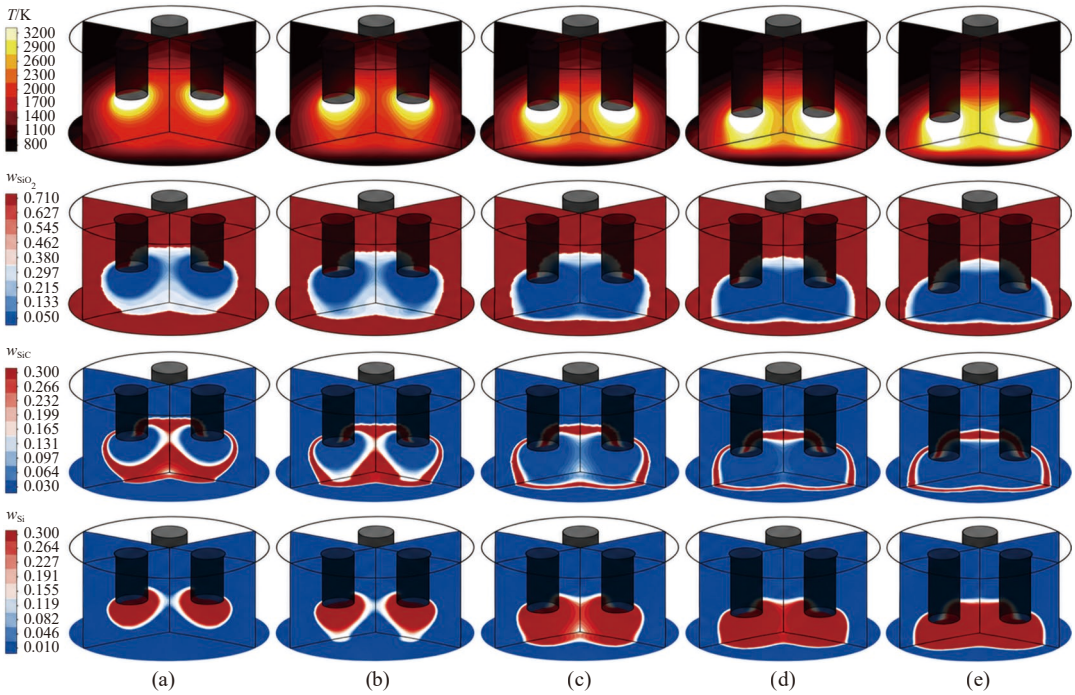
(a) 0.007 s 时刻的焦耳热等值面(W/m³)；(b) 焦耳热分布随电极浸入深度和炉渣电导率的变化；(c) 2 000、3 000、4 000 s 和 5 000 s 时刻炉渣区域的速度分布(m/s)[22]

图 2　电炉内焦耳热分布及熔池流动演化的典型数值模拟

Fig. 2　Typical numerical simulation of Joule-heating distribution and melt-flow evolution in electric furnaces

电极插入深度是 SAF 操作中最重要的控制参数之一, 直接影响焦耳热的分布区域和电弧的稳定性。Tang 等[30] 建立了电磁—流动—温度—组分多物理场模型, 系统分析了电极插入深度对 SAF 传热传质行为的影响, 结果表明, 减小电极插入深度可改善传热性能, 但当插入深度过大时会加剧温度分布不均匀性, 如图 3 所示。因此, 存在一个最优的电极插入深度范围, 使焦耳热均匀分布于渣层中部, 实现最佳的熔炼效率。渣层电导率是影响 SAF 传热的另一关键参数。Karalis 等[31] 的研究表明, 焦耳热随炉渣电导率升高而增加, 并在其研究范围内于电导率约 3 S/m 时达到峰值; 同时, 电极形状和浸入深度也会显著影响热量分布。因此, 合理优化炉渣电学性质及操作参数, 对改善 SAF 热场组织和加热效率具有重要意义。

相比交流矿热炉, 直流矿热炉(DC-SAF)在电能利用与热源组织方面显示出一定优势。Yu 等[32] 以铁铬冶炼为对象, 建立了新型直流矿热炉的三维瞬态多物理场模型, 系统分析了电极插入深度、操作电压、炉料孔隙率及金属氧化物含量对电能消耗和熔炼过程的影响。研究结果表明, 该直流矿热炉相较于交流矿热炉能够更有效地降低电能消耗, 说明直流供电方式在炉内能量输入和热量利用方面具有进一步优化的潜力。另一方面, Tesfahunegn 等[24] 基于工业三相矿热炉建立了交流与直流两种求解框架, 对炉内电流分布和功率分布进行了比较。结果表明, 尽管采用直流近似会忽略趋肤效应和邻近效应, 但其预测的能量耗散位置与交流求解结果的差异控制在约 6% 以内, 说明在以炉内热源分布和整体能量耗散为关注重点时, 直流求解在工程上具有较好的适用性。因此, 从数值模拟角度看, 直流矿热炉的潜在优势主要体现在电能消耗降低以及热源组织方式的优化, 而其具体工艺优势仍需结合矿种、炉料结构及操作制度进行进一步研究。



(a) l_1 = 1.6 m，(b) l_2 = 1.8 m，(c) l_3 = 2.0 m，(d) l_4 = 2.2 m，(e) l_5 = 2.4 m[30]

图 3　不同电极插入深度条件下的温度场与炉芯组分场

Fig. 3　Temperature field and core components field at different electrode immersion depth

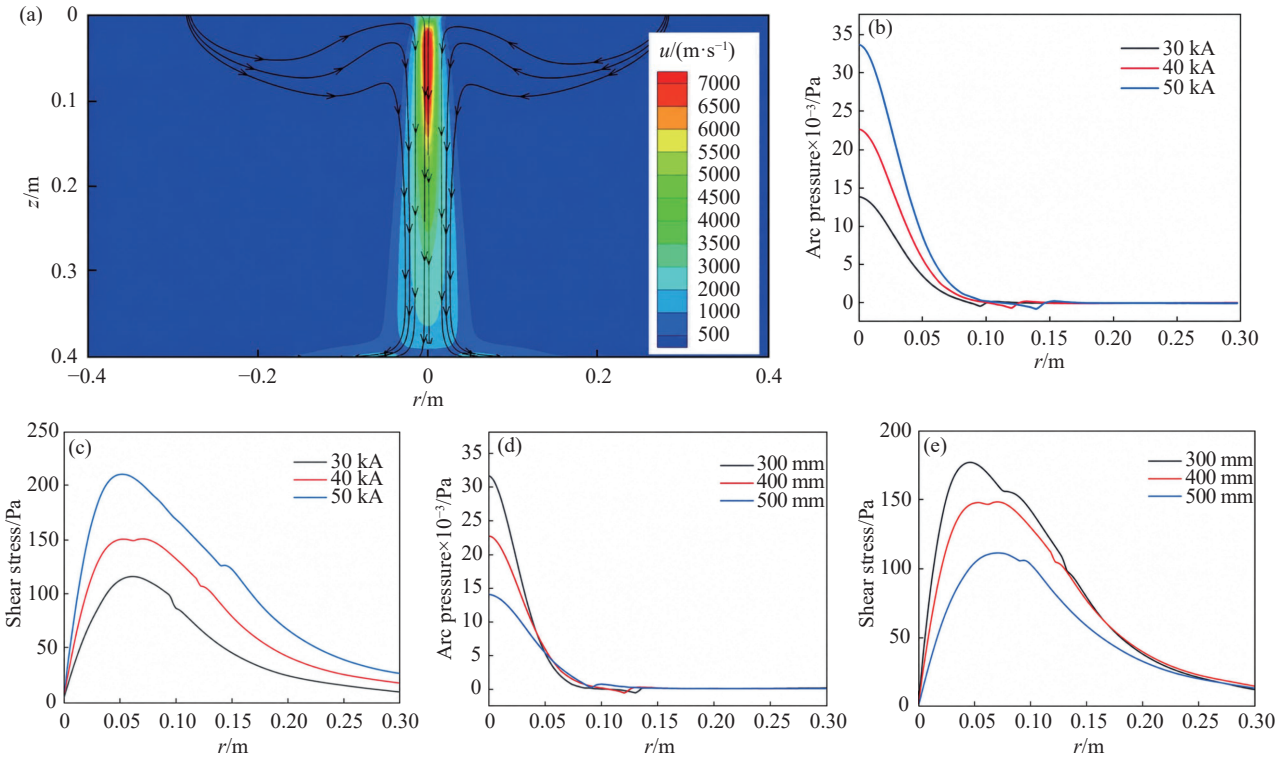
针对钒钛磁铁矿的电炉熔分, 数值模拟不仅需要考虑常规的传热流动, 还必须耦合钒、钛的还原动力学。高建军等[2] 探讨了钒钛磁铁矿金属化球团电炉熔分过程中钒、钛氧化物与碳的竞争还原机理。热力学分析表明, 在熔分温度高于 1 500 ℃ 且还原剂碳充足的条件下, TiO_2 被进一步还原并生成 TiC 不可避免; 尽管熔渣中的钒氧化物对 TiC 生成具有一定抑制作用, 但由于 TiO_2 活度较高, 仍难以有效避免 TiC 的形成, 从而导致炉渣变稠并加大排渣难度。从钒钛磁铁矿熔分角度看, SAF 数值模拟研究的主要价值在于揭示高渣量体系中电极—渣层—金属层之间的电磁、热和流动耦合规律。炉渣电导率、电极插入深度和电极结构直接影响焦耳热分布和熔池温度场, 从而进一步影响 DRI 熔化、渣金分离和

炉内能量利用效率。对于含 TiO_2 较高的钒钛磁铁矿熔分渣系而言，渣层物性变化更加复杂，TiO_2 富集、TiC 生成和渣黏度升高会显著改变传热传质行为。因此，常规铁合金 SAF 模型虽然可为热源组织和电极参数优化提供借鉴，但难以直接描述钒钛磁铁矿熔分过程中的元素分配和渣相演变。未来面向钒钛磁铁矿的 ESF 建模应进一步耦合钒、钛氧化物还原动力学、TiC 生成动力学和渣黏度演化模型。具体而言，可通过用户自定义函数或反应源项形式，将 TiO_2 还原、TiC 生成、V_2O_5/V_2O_3 还原及钒进入铁水等过程引入 CFD 模型；同时结合热力学数据库或经验相平衡模型，预测不同温度、碳势和渣成分条件下钒、钛元素在金属相和渣相中的分配行为。这样才能使模型由单纯的热流场预测，进一步发展为能够服务于钒钛资源高效分离的过程优化工具。

4 电弧炉（EAF）数值模拟研究进展

EAF 利用石墨电极与炉料间产生的高温电弧等离子体进行熔炼，主要用于废钢再生及 DRI 熔炼。其数值模拟的难点在于电弧等离子体（温度高达 10 000 ~ 20 000 K）与固态炉料/液态熔池的强相互作用，以及熔炼过程中炉料几何形态的大尺度动态变化[8]。电弧等离子体是 EAF 的主要热源，其特性直接决定了炉内的能量分布和熔化效率。采用 MHD 模型结合局部热力学平衡假设，是模拟电弧特性的主流方法。姚聪林等[10]采用磁矢量势的 MHD 方法建立了电弧炉内长电弧的二维轴对称稳态模型，揭示了电弧等离子体的温度场和速度场分布。研究表明，电弧中心温度极高，最大轴向速度可达约 7 600 m/s，形成强烈的“等离子体射流”冲击熔池表面，产生凹坑。电流大小和弧长对电弧热效率有显著影响，合理控制这两个参数能有效提升废钢熔化速率，如图 4 所示。

Huang 等[33]针对等离子体熔化炉中的电弧进行了二维数值模拟，研究了等离子体弧的传热和流动特性。研究发现，等离子体弧的最高速度可达 2 116 m/s，峰值温度接近 20 000 K。电弧向熔池表面的传热效率约为 28%，其余热量通过辐射和对流散失。该研究还验证了模型的准确性，为等离子体熔化炉的优化设计提供了依据。为降低计算复杂度，Fathi 等[34]提出了一种低计算复杂度的电弧热分布模型，通过将复杂的 MHD 计算结果提炼为经验公式，快速估算电弧能量在传导、对流和辐射三种方式间的分配比例，为 EAF 整体过程的快速仿真提供了可能。该模型在保持较高精度的同时，将计算时间缩短了数个量级，具有重要的工程应用价值。

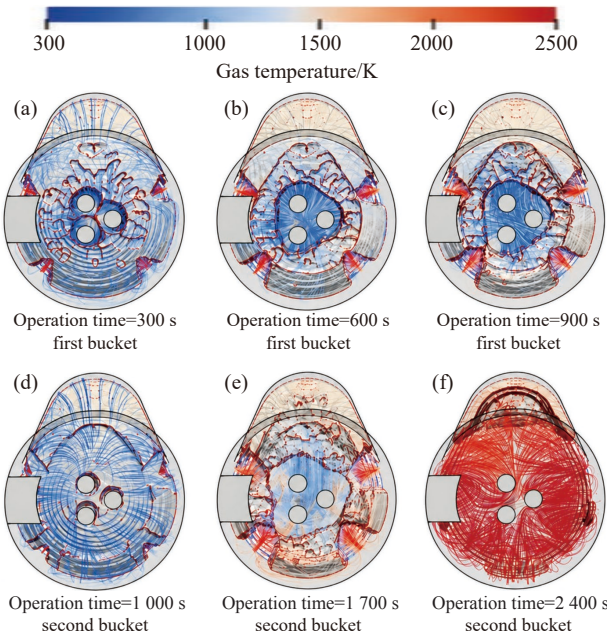


(a) 40 kA-400 mm 工艺条件下电弧速度分布；(b)(c) 不同电流大小对电弧压力和气体剪切力的影响；(d)(e) 不同弧长对电弧压力和气体剪切力的影响[10]

图 4 电弧等离子体流动及电弧压力和气体剪切应力的数值模拟

Fig. 4 Numerical simulation of arc-plasma flow, arc pressure, and gas shear stress

EAF 内炉料的熔化是一个伴随固液相变、大尺度几何变形的复杂瞬态过程, 是 EAF 数值模拟中最具挑战性的环节之一。Chen 等[25] 建立了一个集成的三维 CFD 模型, 模拟了交流 EAF 中废钢的熔化过程。该模型综合考虑了电弧加热、相干射流烧嘴加热以及动态废钢坍塌行为, 其中采用 dual-cell 和 stack 方法描述废钢在熔化过程中因底部支撑不足而发生的垂直坍塌。模型通过工业尺度 150 t EAF 的试验数据进行了验证, 在电极下降过程和最终电极坑尺寸方面与现场结果吻合较好。进一步的模拟结果如图 5 所示, 废钢熔化总体呈现由内向外、由下向上的演化特征, 烧嘴主要作用于炉内周边冷区; 随着烧嘴熔化腔扩大, 烧嘴效率逐步下降, 因此可为 EAF 熔化阶段的烧嘴运行策略优化提供参考。Chen 等[35] 进一步将该模型扩展至废钢预热阶段, 模拟了烧嘴预热和熔化过程, 系统研究了烧嘴功率、初始废钢温度及废钢孔隙率对预热效果的影响。结果表明, 提高烧嘴功率可加速废钢升温与熔化, 但会降低烧嘴效率; 采用高孔隙率废钢有利于提升气-固传热速率和烧嘴效率, 综合优化可使废钢温升提高 29%、熔化比例提高 63%。



(a)(b)(c) 第一批炉料冶炼过程中 300、600 s 和 900 s 时的气体流线分布; (d)(e)(f) 第二批炉料冶炼过程中 1 000、1 700 s 和 2 400 s 时的气体流线分布, 流线颜色表示气体温度[25]

图 5　烧嘴流线分布

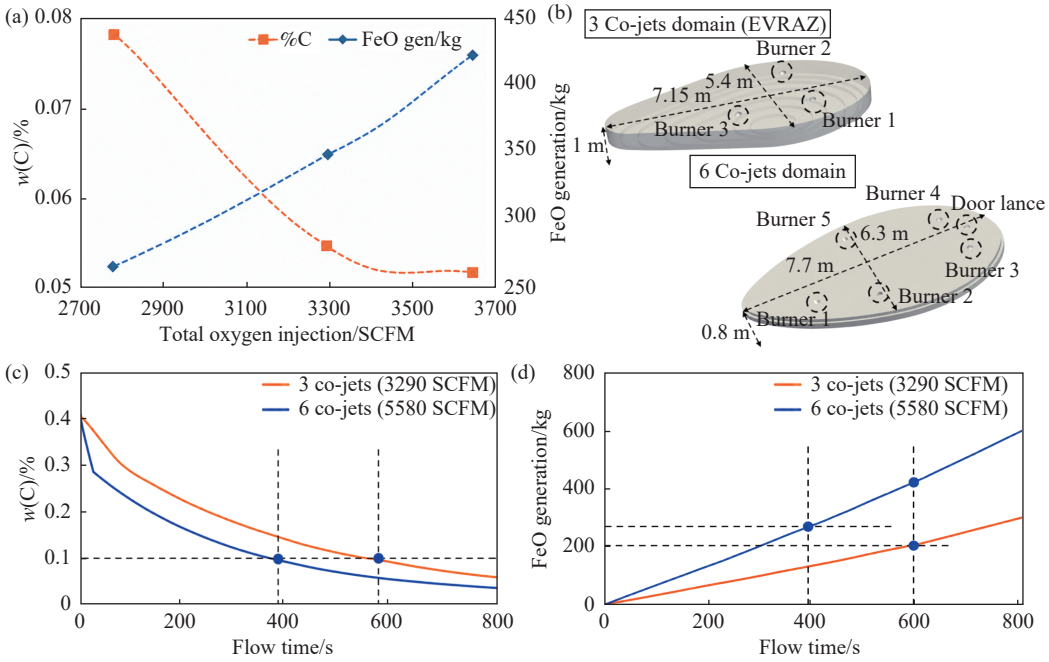
Fig. 5　Streamlines from burners

对于 HBI/DRI 的熔化, Ugarte 等[36] 开发了先进的三维 CFD 模型, 研究了炉料分层布置对熔化性能的影响。该模型综合考虑了电弧加热、废钢/HBI 熔化过程和固体坍塌机制, 并使用真实 EAF 操作的装料方案和功率曲线进行验证。模型准确预测了精炼初期固液比(32.5%/67.5%), 与实际操作的 30%/70% 高度一致, 熔化率误差仅为 8.3%。研究发现, 将第一批料分布为更多层可使熔化率提高 12%; 但若在炉底放置高密度物料, 则会恶化熔化性能。Wang 等[23] 采用 CFD 方法对工业级 150 t 交流 EAF 的全炉役操作进行了模拟, 涵盖了从加料到出钢的完整过程。该研究特别关注了不同阶段(预热、熔化、精炼)的能量分配和温度场演变, 为工业 EAF 的操作优化提供了全面的数值依据。此外, DRI 中碳的存在可通过与残余氧化铁(FeO)反应产生 CO, 促进局部搅拌并加快熔化过程; 同时, 较高碳含量有利于降低 EAF 的电能需求。Prakash 等[37] 从能量动态角度分析了 DRI 加入电炉后的能耗变化, 表明 DRI 成分尤其是碳含量对能耗具有重要影响。

在 EAF 精炼期, 通过氧枪吹入高速氧气进行脱碳反应是控制钢液成分和温度的关键。精炼期的数值模拟需要考虑超音速氧气射流的动力学特性、钢液中的脱碳反应动力学以及 CO 气泡的生成与逸出。Kottapalli 等[38] 采用 CFD 模拟了工业级 EAF 精炼期的吹氧脱碳过程, 重点分析了氧气流量和烧嘴布置对脱碳效率及 FeO 生成的影响。结果表明, 提高氧气流量有利于加快脱碳, 但也会增加 FeO 生成; 增加烧嘴数量则可缩短达到目标碳含量的时间, 但同时会加剧氧化损失, 如图 6 所示。因此, 合理优化氧气喷吹强度与喷吹布置, 是兼顾脱碳效率与铁损控制的关键。Ramirez-argaez 等[39] 的研究证实, 氧枪倾角对 EAF 熔池流动行为和脱碳动力学具有显著影响。随着喷吹角相对于水平线减小, 氧气射流对熔池的冲击和搅拌作用增强, 脱碳速率提高; 但过小倾角也会加剧飞溅。因此, 氧枪倾角优化的关键在于兼顾脱碳强化与飞溅控制。

EAF 数值模拟研究对 ESF 模型构建具有重要借鉴意义。首先, 电弧等离子体 MHD 模型能够为 ESF 起弧工况下的热输入、弧柱压力、等离子体射流冲击和熔池表面变形提供理论基础。其次, 废钢、HBI 和 DRI 熔化模型可为高金属化率 DRI 热装入 ESF 后的升温、熔化和坍塌行为提供参考。再次, 精炼期脱碳及吹氧反应模型可为 ESF 中炉气演化、碳氧反应和气泡搅拌行为的模拟提供方法支持。但需要注意的是, ESF 并不能简单等同于传统 EAF。常规 EAF 主要面向废钢或较低渣量炉料, 而钒钛磁铁矿直接还原产物通常具有更高渣量、更复杂脉石

组成和更强的渣金分离需求。与此同时，ESF 可能同时存在渣层焦耳热和电弧热两种供能方式，电极工作状态也可能在埋弧和起弧之间转换。因此，EAF 模型向 ESF 迁移时，需要重点解决电弧传热、渣层电阻加热、DRI 熔化、多相界面演化和钒钛反应动力学之间的多场耦合问题。



(a) 在 900 s 时脱碳与 FeO 生成随氧气注入量的变化; (b) 具有三个集束射流烧嘴和六个集束射流烧嘴、显示相似几何构型的 CFD 计算域; (c) 在碳含量为 0.1% 时评估的脱碳与 FeO 生成情况[38]

图 6　氧气喷吹方式对电炉脱碳与 FeO 生成行为的数值模拟

Fig. 6　Numerical simulation of the effects of oxygen-jet configuration on decarburization and FeO generation in electric furnaces

5　结论与展望

5.1　结论

综述了近年来电炉（SAF、EAF）多物理场耦合数值模拟的研究进展，主要结论如下：

1）SAF 数值模拟已由二维稳态简化模型逐步发展为三维瞬态多物理场耦合模型。现有研究表明，炉渣电导率、电极插入深度及电极结构是影响焦耳热分布、熔池温度场和流场组织的关键因素；三相交流条件下的电流不平衡、趋肤效应及其导致的非对称热场，是形成炉内“热区—冷区”结构的重要原因。数值模拟可有效揭示操作参数对热源分布及能量利用效率的影响，为电极布置优化和熔炼强化提供理论依据。

2）EAF 数值模拟主要集中于电弧等离子体行为、炉料熔化及精炼期吹氧反应。MHD 模型能够较好描述电弧等离子体的高温、高速及强冲击特征，并揭示电流和弧长对热效率及熔池受力的影响；结合焓-多孔介质法和动态坍塌模型的三维 CFD 模型，可进一步描述废钢、HBI/DRI 的传热、熔化和形态演化，为加料制度及烧嘴布置优化提供支撑。同时，精炼期模拟表明，氧气流量、喷吹布置和氧枪倾角会显著影响脱碳速率、FeO 生成及飞溅行为。

3）钒钛磁铁矿电炉熔分模拟需由常规热流耦合进一步拓展至多组分反应与元素迁移耦合。除温度场、流场和电磁场外，还应考虑钒、钛等组分的竞争还原动力学及相间传质行为。相关模型可用于预测不同操作条件下的元素分配和熔分行为，对优化“直接还原—电炉熔分”短流程具有重要指导意义。

4）ESF 是连接直接还原与电炉炼钢的重要桥梁装备，但其数值模拟研究仍处于起步阶段。ESF 在处理高渣量、低碳 DRI 方面具有明显优势，是绿色低碳炼铁的重要发展方向。未来应重点加强电磁、传热、流动、相变和化学反应的全耦合建模，并结合真实炉料、渣系及连续运行工况，提高模型对工业过程的预测能力。

5.2　未来研究重点

尽管电炉数值模拟取得了丰硕成果，但面对日益严苛的环保要求和工艺复杂性，仍面临诸多挑战，

未来研究应重点关注以下方向:

1)ESF 多尺度全流程仿真。针对新兴的 ESF, 目前尚缺乏成熟的综合性数值模型。未来需开发涵盖电弧起弧/埋弧切换、渣层焦耳热、DRI 大颗粒快速熔化及渣金界面复杂反应的多尺度耦合模型, 以指导 ESF 的工业化设计与操作优化。

2)氢冶金耦合模拟。随着氢基竖炉直接还原技术的发展, 高金属化率、富含氢/水分的 DRI 热装入电炉将成为常态。模拟氢气参与下的电弧特性演变、熔池传热及还原反应动力学, 是未来研究的重要热点。

3)数字孪生与实时优化。将高精度的离线 CFD/MHD 模型降阶, 结合机器学习算法与现场传感器数据, 构建电炉的数字孪生系统, 实现熔炼过程的实时监测、在线诊断与智能控制, 是推动电炉智能化的关键技术方向。

4)多相流与界面反应的精细化建模。提高对炉料坍塌、气泡驱动搅拌、渣-金-气三相界面演化及夹杂物运动等微观现象的捕捉精度, 进一步提升宏观工艺仿真的准确性, 是数值模拟方法论层面的重要发展方向。

参考文献

[1] Rippy K, Bell R T, Leick N. Chemical and electrochemical pathways to low-carbon iron and steel[J]. npj Materials Sustainability, 2024, 2: 33.

[2] 高建军, 迪林, 王彬, 等. 钒钛磁铁矿金属化球团电炉熔分钒钛竞争还原机理[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(2): 112-117.
Gao Jianjun, Di Lin, Wang Bin, et al. Competitive reduction mechanism of vanadium and titanium of vanadium-titanium magnetite metallized pellets smelted by electric arc furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(2): 112-117.

[3] Zhang Shiqiu, Yang Han, Xu Geng, et al. Review on utilization of Ti-bearing blast furnace slag from the past decade: Whole-component utilization and Ti component recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 514: 163115.

[4] Chen Liang, Deng Guozhi, Wang Zhenghao, et al. Hydrogen-based direct reduction of vanadium-titanium magnetite raw ore: Process optimization and mechanism insights[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 505: 159152.

[5] Huang Yun, Tang Jue, Chu Mansheng, et al. Modeling and carbon emission assessment of novel low-carbon smelting process for vanadium-titanium magnetite[J]. Metals, 2025, 15(4): 461.

[6] Liu Hongqiang, Manojlovic V, Wang Shiwei, et al. An integrated hydrogen metallurgy route of vanadium-titanium magnetite for efficient recovery of Fe, V and Ti[J]. Minerals, 2026, 16(2): 177.

[7] Souza Filho I R, Springer H, Ma Yan, et al. Green steel at its crossroads: Hybrid hydrogen-based reduction of iron ores[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 340: 130805.

[8] Abadi M M, Tang H, Rashidi M M, et al. A review of simulation and numerical modeling of electric arc furnace (EAF) and its processes[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e32157.

[9] Visuri V V, Echterhof T. Electric arc furnace steelmaking[J]. Metals, 2025, 15(12): 1285.

[10] 姚聪林, 朱红春, 姜周华, 等. 电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(S): 60-67.
Yao Conglin, Zhu Hongchun, Jiang Zhouhua, et al. Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(S): 60-67.

[11] Odenthal H J, Kemminger A, Krause F, et al. Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (EAF)[J]. Steel Research International, 2018, 89(1): 1700098.

[12] Hay T, Visuri V V, Aula M, et al. A review of mathematical process models for the electric arc furnace process[J]. Steel Research International, 2021, 92(3): 2000395.

[13] Liu Zhaoyang, Wang Bo, Ding Xueyong, et al. Optimizing pre-reduction of vanadium-titanium magnetite through recycling and integrating of top gas from melting furnace and tail gas from rotary kiln[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 86-95.

[14] 陈双印, 郭鹏辉, 吴祥龙, 等. 钒钛磁铁矿金属化还原-选分-电热熔分新工艺[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 34(3): 378-382.
Chen Shuangyin, Guo Penghui, Wu Xianglong, et al. New process of metallization reduction-magnetic concentration-electroheat melting separation for vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(3): 378-382.

[15] Zhang Jinghua, Guo Haoyu, Yang Gaiyan, et al. Sustainable transition pathways for steel manufacturing: Low-carbon steelmaking technologies in enterprises[J]. Sustainability, 2025, 17(12): 5329.

[16] Dong Xuefeng, Longbottom R, Guo Baoyu, et al. Transitional path to low-carbon steel production: A review of current pathways and modeling of the electric smelting furnace process[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2026, 12(2): 1128-1145.

[17] Wang Shuai, Li Guang, Guo Yufeng, et al. Effects of MnO on the smelting process of vanadium titanomagnetite pre-reduced pellets in an electric furnace[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 2262-2270.
[18] Mendoza S, Garlick C, Singh T, et al. Melting behavior of hydrogen-reduced vanadium-bearing titanomagnetite ironsand pellets in a laboratory-scale electrode smelter[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2026, 12(2): 1176-1188.
[19] Schnalzger M, Spanring A, Kirschen M, *et al*. Electric melting furnaces for green steel transformation of integrated steel plants-requirements, challenges and solutions from a refractory perspective[J]. RHI Magnesita Bulletin, 2023: 10-17.
[20] Garlick C, Singh T, Paymooni K, et al. Electrode smelting of hydrogen-reduced hematite–goethite at laboratory scale[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2026, 12(2): 1114-1127.
[21] 党杰, 谭钞文, 余万权, 等. 基于氢冶金的低品位钒钛磁铁矿中有价组元全回收方法: CN121518786A[P]. 2026-02-13.
Dang Jie, Tan Chaowen, Yu Wanquan, *et al*. Method for completely recovering valuable components in low-grade vanadium titano-magnetite based on hydrogen metallurgy: CN121518786A[P]. 2026-02-13.
[22] Karalis K, Karalis N, Karkalos N, et al. Three-dimensional computational fluid dynamics analysis of an electric submerged arc furnace[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 17637.
[23] Wang Shiyu, Ugarte O, Ryan S, et al. Computational fluid dynamics simulation of industrial electric arc furnace operation: Validation and performance of melting phenomena[J]. Steel Research International, 2025, 96(7): 2400509.
[24] Tesfahunegn Y A, Magnusson T, Tangstad M, et al. Comparative study of AC and DC solvers based on current and power distributions in a submerged arc furnace[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(2): 510-518.
[25] Chen Yuchao, Ryan S, Silaen A K, et al. Simulation of scrap melting process in an AC electric arc furnace: CFD model development and experimental validation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(4): 2675-2694.
[26] Cui Henan, Li Tao, Bai Chenguang, et al. Numerical simulation of the interaction between arc plasma and molten slag in electric arc furnace for high-titania slag smelting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(4): 1687-1704.
[27] González O J P, Ramírez-argáez M A, Conejo A N. Mathematical modeling of the melting rate of metallic particles in the electric arc furnace[J]. ISIJ International, 2010, 50(1): 9-16.
[28] Baumgartner S J, Reynolds Q G, Akdogan G. Prediction of burden distribution and electrical resistance in submerged arc furnaces using discrete element method modelling[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2024, 124(3): 123-132.
[29] Zhao Jincheng, Zhang Xiuheng. Numerical simulation analysis of three-phase submerged arc furnace using the multi-field method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2541(1): 012018.
[30] Tang Xiaoqing, Li Baokuan, Yu Yang, et al. Analysis and optimization about heat and mass transfer in silicon submerged arc furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 281: 128737.
[31] Karalis K T, Karkalos N, Cheimarios N, et al. A CFD analysis of slag properties, electrode shape and immersion depth effects on electric submerged arc furnace heating in ferronickel processing[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(21-22): 9052-9066.
[32] Yu Yang, Li Baokuan, Liu Zhongqiu, et al. Analysis of electrical energy consumption in a novel direct current submerged arc furnace for ferrochrome production[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(5): 2370-2382.
[33] Huang Zhengzong, Liu Liu, Zhao Ting, et al. Investigation on heat transfer and fluid flow of a plasma arc in a plasma melting furnace: Model validation and parameter effects[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124301.
[34] Fathi A, Saboohi Y, Škrjanc I, et al. Low computational-complexity model of EAF arc-heat distribution[J]. ISIJ International, 2015, 55(7): 1353-1360.
[35] Chen Yuchao, Ryan S, Silaen A K, et al. An investigation into EAF burner preheating and melting characteristics: CFD model development and experimental validation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(3): 1068-1087.
[36] Ugarte O, Li Jianghua, Haeberle J, et al. CFD modeling of HBI/scrap melting in industrial EAF and the impact of charge layering on melting performance[J]. Materials, 2024, 17(21): 5139.
[37] Prakash S, Mukherjee K, Singh S, et al. Simulation of energy dynamics of electric furnace steelmaking using DRI[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2007, 34(1): 61-70.
[38] Kottapalli S, Ugarte O, Konar B, et al. CFD modelling of refining behaviour in EAF: Influence of burner arrangement and oxygen flow rates[J]. Metals, 2025, 15(7): 775.
[39] Ramírez-argáez M A, Conejo A N. CFD study on the effect of the oxygen lance inclination angle on the decarburization kinetics of liquid steel in the EAF[J]. Metallurgical Research & Technology, 2021, 118(5): 516.

编辑 唐肖