

炼钢中的计算流体力学应用及发展

刘中秋*, 李宝宽

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Application and Development of Computational Fluid Dynamics in Steelmaking Process

Liu Zhongqiu*, Li Baokuan

School of Metallurgy, Northeastern University, Shengyang, 110819, China

1. 前言

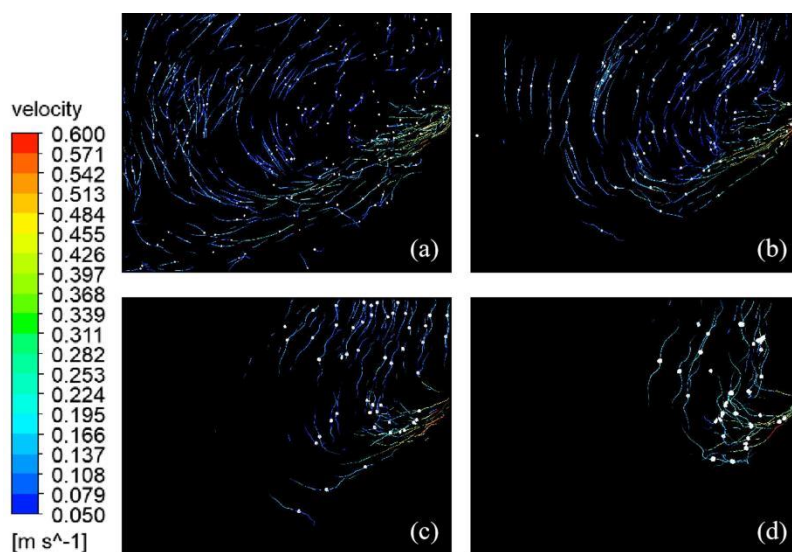
炼钢装置内的高温熔体多相流的运动状态密切地影响高品质钢的洁净化、均匀化和精细化。该高温熔体多相流为非稳态湍流,同时耦合传热、传质、相变、反应、电磁力、多相流等诸多过程形成了十分复杂的非稳态、非线性、非平衡多物理场,很难通过现场测试对其内部的各种物理量进行在线测量。在确保流动和凝固过程相似的情况下,开展物理实验与数值模拟,已成为阐述各类冶金缺陷形成机理的重要手段。然而,与传统流体力学问题相比,冶金高温熔体多相流的突出特点是物性变化大、本构关系式复杂、相界面影响因素多及边界物理量梯度大等,且炼钢装置内的多物理场存在连续相大界面变形、离散相颗粒输运以及连续相-离散相转变等复杂多变的多尺度界面结构,以及多尺度的湍流涡结构,这些都给高温熔体多相流模型化研究带来极大困难。

相比于单相流,相界面拓扑形状变化是多相流的独具特征,本文从离散流界面尺度分布性、混合流界面跨尺度性、凝固界面多尺度性、以及湍流在揭示多尺度相界面结构中的作用等四方面回顾连铸结晶器内高温熔体多相流模型化的研究进展^[1]。

2. 计算流体力学在炼钢中的应用

2.1. 离散流界面尺度分布性问题

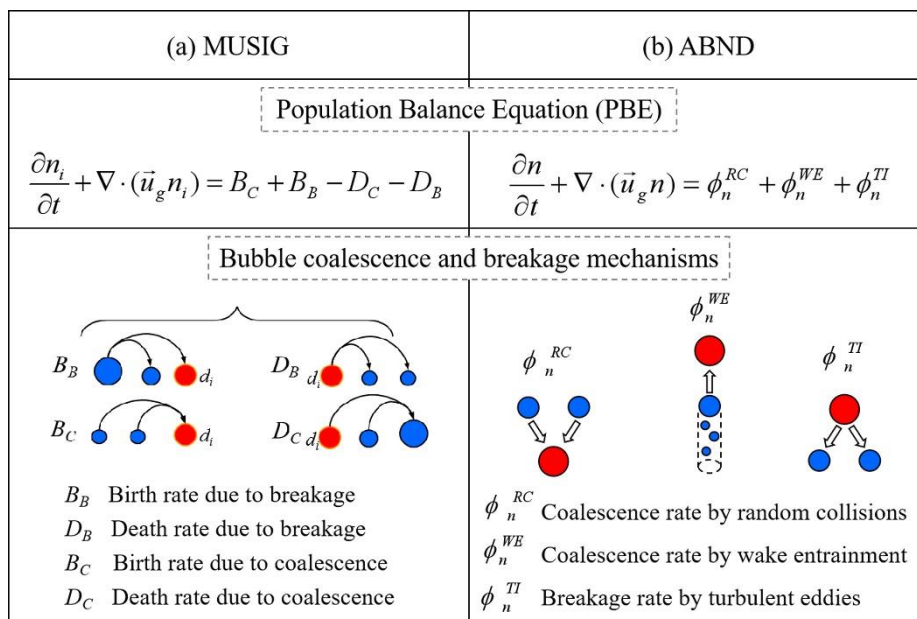
离散流界面尺度分布性问题源于离散气泡或非金属夹杂物的聚并和破碎效应,造成离散气泡或非金属夹杂物具有较大的尺度范围,并表现为小尺度相界面的不连续性。例如,初始均一粒径(近似)氩气泡经上水口弥散砖或塞棒进入水口后,由于受到钢液湍流的作用,气泡间会发生强烈的聚并和破碎现象,造成进入结晶器内的氩气泡具有较广的粒径范围,在结晶器内形成复杂的多尺度泡状流。近期,作者采用高速摄像机和 ImageJ 软件识别并成功提取了不同粒径气泡的运动轨迹,如图 1 所示^[2]。近年来,基于群数密度函数的群体平衡模型(Population Balance Model, PBM)得到了快速发展,该方法根据弥散相气泡的微观行为机制建立气泡相群数密度平衡方程,将气泡的微观现象(破碎、聚并、长大等)与其宏观属性(粒径、表面积等)联系起来,是目前研究弥散相系统的有效工具。近期,作者将 PBM 与欧拉-欧拉双流体模型相结合分别构建了多气泡组质量传递模型(Multiple Size Group, MUSIG)^[3-5]和平均气泡数密度模型(Average Bubble Number Density, ABND)^[6],考虑了不同的气泡聚并、破碎机制,如图 2 所示。两种模型的预测结果均能够较好地揭示结晶器内多尺寸泡状流的动力学行为在空间、时间上的变化规律及气泡尺寸变化规律。



(a) 1-1.5 mm; (b) 1.5-2 mm; (c) 2-2.5 mm; (d) > 2.5 mm

图 1 不同粒径气泡的运动轨迹^[2]

Fig.1 Trajectory of bubbles with different sizes



(a) MUSIG model, (b) ABND model

图 2 两种模型的聚并、破碎示意图^[1]

Fig.2 Schematic diagram of coalescence and breakage mechanisms in two models

2.2. 混合流界面跨尺度性问题

混合流界面跨尺度性现象源于流动形态的转化，即连续相大尺度界面与离散相小尺度界面的相互转变。在连铸结晶器内，当渣/金界面钢水流速过快、剧烈波动或出现漩涡时，保护渣会被卷入钢液形成渣滴（即卷渣），造成了从连续相渣/金界面向离散相渣滴的转变；反之，渣滴在钢液流场的影响下会上浮，当再次到达渣/金界面后很容易与原渣层融合，实现离散相渣滴到连续相渣/金界面的转变。大量的冷态实验被用于研究结晶器内的卷渣现象和卷渣机理。近期，作者采用水模型实验观察到了渣金界面附近的乳化现象，发现主要是由气泡聚集造成的，或可称为气-渣乳化现象^[1]，如图 3 所示。多尺度相界面共存及不连续性的

数学描述一直是多相流数值模拟面临的重大困难。近期，作者等发展了多尺度气泡桥接模型，实现了界面捕捉模型和 DPM 两种方法的耦合，即欧拉和拉格朗日体系下的混合气泡共存及相互转变，并将其应用到电解铝领域，如图 4 所示^[7]，期待未来将其应用到炼钢领域。

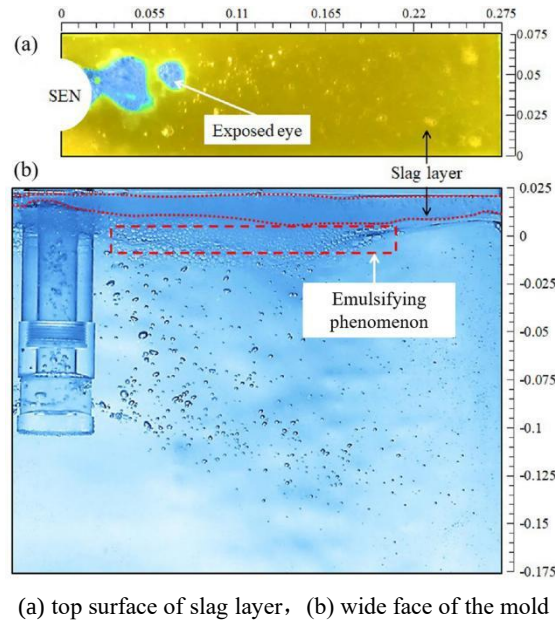


图 3 水模型实验中的乳化现象^[1]

Fig.3 Emulsifying phenomenon observed in water model experiment

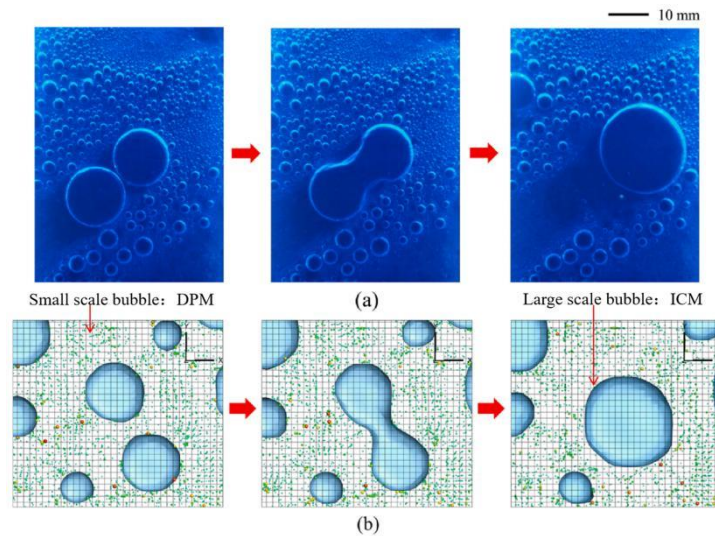


图 4 ICM 和 DPM 两种方法的耦合计算^[7]

Fig. 4 Transient dumbbell coalescence process from a bottom view

2.3. 凝固界面多尺度性问题

合金凝固过程是相界面热和溶质传输的过程，也是一个耦合扩散、热力学非平衡、结晶各向异性和对流多物理场作用的科学问题，涉及宏观（热溶质对流、外场强迫对流、夹杂物漂浮等）和微观（溶质析出/扩散、局部溶质再分配、晶粒形核和生长等）不同尺度间的传输，直接导致连铸坯的内部缺陷。在确保凝固过程相似的情况下，开展凝固过程的热模拟实验，是一种阐述铸坯凝固组织及内部缺陷形成机理的有效办法。作者等^[8]搭建了一套水冷凝固可视化实验系统，采用氯化铵、硫代硫酸钠等有机溶液考察了结晶器

内晶粒微观结构及宏观凝固组织演化,发现中心加入冷源(模拟喂钢带)能显著降低结晶器内部温度和横向温度梯度,从中心发展的结晶雨促发柱状晶向等轴晶转变,有效阻碍冷却壁面柱状晶的生长,显著提升最终凝固组织中等轴晶比例,如图 5 所示。由于合金凝固过程的复杂性,对其多尺度传输现象的模型化已经成为研究凝固传输过程的主要手段^[8-13]。近期,作者等^[8-13]利用三相 VAM 等模型研究了有/无内部冷源情况下的凝固组织演变行为,发现内部冷源通过加速形核、增强对流和促进柱状晶向等轴晶转变等作用机制可提高凝固组织中等轴晶的比率,并建立了喂入冷源参数与等轴晶率的数学关系式,如图 6 所示。

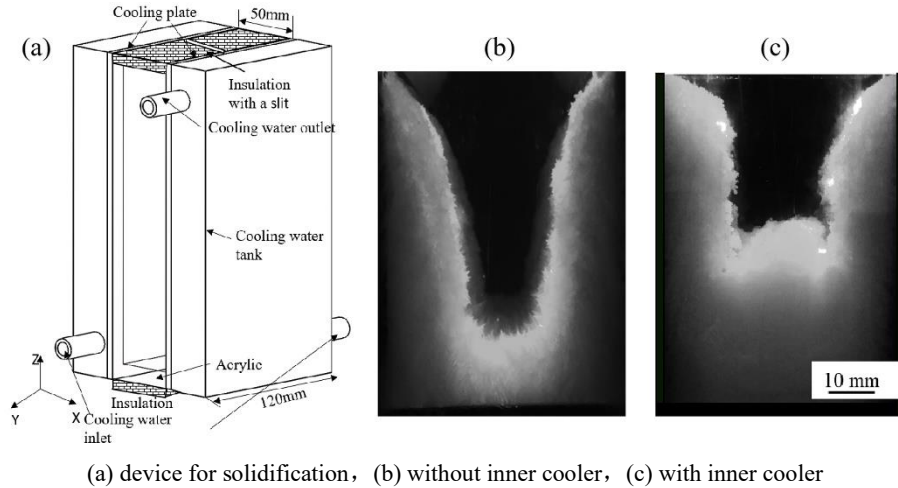


图 5 凝固实验捕捉到的宏观凝固组织演化^[8]

Fig.5 Evolution of macroscopic solidification structure observed in solidification experiment

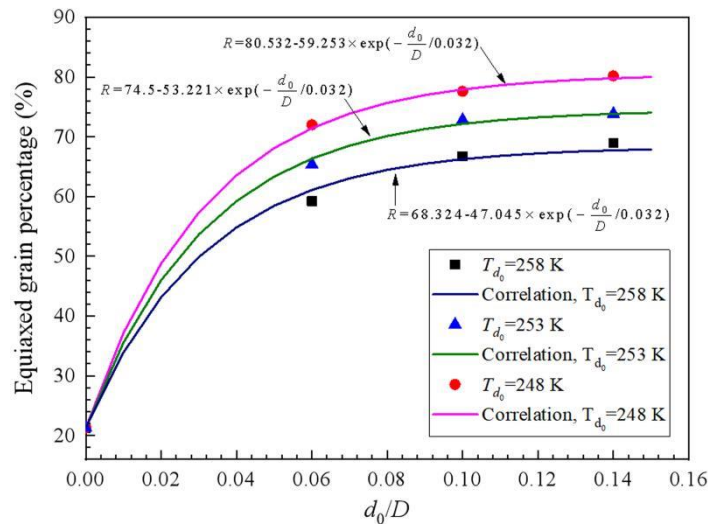


图 6 喂入的冷源参数与等轴晶率的关系^[8]

Fig.6 Relation between ratio of equiaxed zone and different cooler parameters

2.4. 湍流在揭示多尺度界面结构中的作用

连铸结晶器内的高温熔体流动处于强烈的非稳态湍动状态,相界面结构受各相物理量的湍流脉动及多尺度涡的控制,因此湍流模型的有效性也是多尺度相界面描述的关键。目前大涡模拟(LES)已成功地应用于结晶器内的单相流动计算,获得了钢液的瞬态非对称流场特征。最近作者^[14-20]分别将 LES 与 VOF 或欧拉-欧拉双流模型耦合,获得了结晶器内的气液两相瞬态流动特征,如图 7 所示,解决了以往湍流模型

无法捕捉气相对液相造成的湍流脉动压力的难题，改善了局部湍流、气液运动参数的预测精度，与实验测量结果吻合较好。

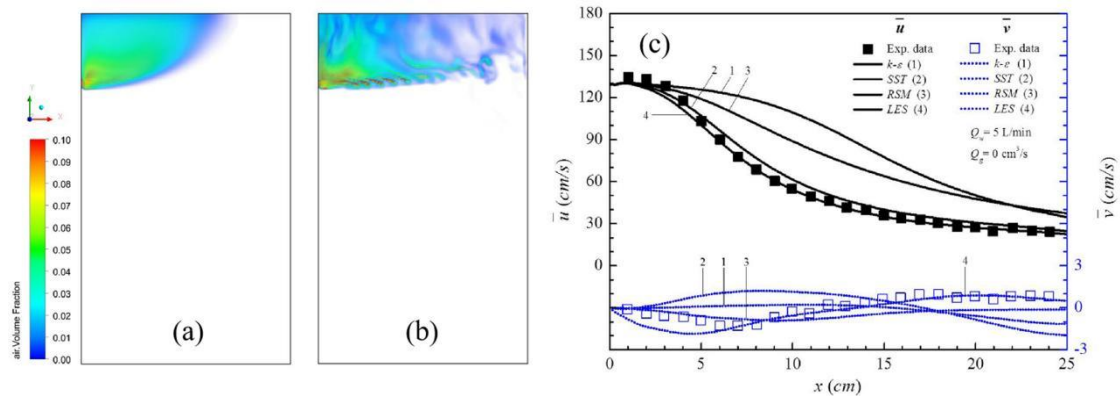


图 7 结晶器内钢液-氩气两相瞬态流场特征^[17]

Fig.7 Characteristics of molten steel-argon gas two-phase transient flow field in the mold

(a) RANS, (b) LES, (c) comparison of numerical simulation with experiment

3. 结论

面对炼钢过程复杂的高温动态环境，采用直接的实验研究既不经济、难度又极大。因此，计算流体力学方法就显得极为重要。多年来，国内外研究人员围绕炼钢中的高温熔体多相流模型化开展了大量的研究工作，推动了炼钢技术的快速进步。为了满足冶金产品日益严格的洁净化、均匀化和精细化要求，仍需从基础层面继续深入开展炼钢过程高温熔体多相流模型化研究，主要包括以下几个方面：1) 气泡聚并和破碎模型的研究。2) 混合流界面跨尺度性问题的研究。3) 凝固过程多相宏-微观跨尺度传输模型的研究。4) 大涡模拟亚格子模型的研究。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：51974071）和中央高校基本科研业务费（项目号：N2225011）、重大工程材料服役安全研究评价设施国家重大科技基础设施开放课题基金（项目号：MSAF-2021-009）的支持。

参考文献

- [1] 刘中秋, 李宝宽, 肖丽俊, 干勇. 连铸结晶器内高温熔体多相流模型化研究进展[J]. 金属学报, 2022, 58(10): 1236-1252..
- [2] Wu Y D, Liu Z Q, Wang F, Li B K, Gan Y. Experimental investigation of trajectories, velocities and size distributions of bubbles in a continuous-casting mold[J]. Powder Technology, 2021, 387: 325-335.
- [3] Liu Z Q, Li L M, Qi F S, et al. Population balance modeling of polydispersed bubbly flow in continuous-casting using multiple-size-group approach[J]. Metall. Mater. Trans. B, 2015, 46(1): 406-420.
- [4] Liu Z Q, Qi F S, Li B K, et al. Multiple size group modeling of polydispersed bubbly flow in the mold: an analysis of turbulence and interfacial force models[J]. Metall. Mater. Trans. B, 2015, 46 (2): 933-952.

- [5] Liu Z Q, Qi F S, Li B K, et al. Modeling of bubble behaviors and size distribution in a slab continuous casting mold[J]. *Int. J. Multiphas. Flow*, 2016, 79: 190-201.
- [6] Liu Z Q, Li B K, Qi F S, et al. Population balance modeling of polydispersed bubbly flow in continuous casting using average bubble number density approach[J]. *Powder Technol.*, 2017, 319: 139-147.
- [7] Sun M J, Li B K, Liu Z Q, et al. Experimental and numerical investigations on transient multiscale bubble behaviors in CuSO₄ aqueous solution electrolysis cell[J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 428(6):131182.
- [8] Liu Z Q, Niu R, Wu Y D, et al. Physical and numerical simulation of mixed columnar-equiaxed solidification during cold strip feeding in continuous casting[J]. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2021, 173: 121237.
- [9] 李维彪, 王芳, 齐凤升, 李宝宽. 结晶器喂钢带连铸坯凝固过程的数学模拟[J]. *金属学报*, 2007, 43(11): 1191-1194.
- [10] Niu R, Li B K, Liu Z Q, et al. Melting of moving strip during steel strip feeding in continuous casting process[J]. *Steel Res. Int.*, 2018, 89(5): 1700407.
- [11] Niu R, Li B K, Liu Z Q, et al. Effect of strip feeding into mold on fluid flow and heat transfer in continuous casting process[J]. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2020, 27: 295-309.
- [12] Niu R, Li B K, Liu Z Q, et al. Experimental Investigation of Solidification in the Cast Mold with a Consumable Cooler Introduced Inside. *Metals*, 2019, 9(1):55.
- [13] Yao Y C, Liu Z Q, Li B K, Xiao L J, Gan Y. Effect of steel strip feeding on the columnar equiaxed solidification in a large continuous casting round bloom [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20, 1770-1785.
- [14] Liu Z Q, Li B K. Large-eddy simulation of transient horizontal gas-liquid flow in continuous casting using dynamic subgrid-scale model [J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2017, 48B: 1833-1849.
- [15] 刘中秋, 李宝宽, 姜茂发, 等. 连铸结晶器内氩气/钢液两相非稳态湍流特性的大涡模拟研究[J]. *金属学报*, 2013, 49(5): 513-522.
- [16] Liu Z Q, Li B K, Jiang M F, et al. Modeling of transient two phase flow in a continuous-casting mold using Euler-Euler large eddy simulation scheme[J]. *ISIJ Int.*, 2013, 53(3): 484-492.
- [17] Liu Z Q, Li B K. Large eddy simulation of transient horizontal gas-liquid flow in continuous casting using dynamic sub-grid scale model[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2017, 48(3): 1833-1849.
- [18] Liu Z Q, Li B K. Scale-adaptive analysis of Euler-Euler large eddy simulation for laboratory scale dispersed bubbly flows[J]. *Chem. Eng. J.*, 2018, 338: 465-477.
- [19] Liu Z Q, Vakhrushev A, Wu M H, et al. Scale adaptive simulation of transient two-phase flow in continuous-casting mold[J]. *Metall. Mater. Trans. B*. 2019, 50(1): 543-554.
- [20] Liu Z Q, Wu Y D, Li B K, et al. An assessment on the performance of sub-grid scale models of large eddy simulation in modeling bubbly flows[J]. *Powder Technol.*, 2020, 374: 470-481.