

RH 旋流喷吹精炼多相流及脱氢行为研究

王家昊¹, 谢清华¹, 倪培远^{1*}, 陈超², 厉英¹

(1. 东北大学冶金学院, 沈阳 110819

2. 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 针对本文作者提出的旋流喷吹创新技术, 开展了 RH 多相流及反应行为研究, 建立了 RH 精炼过程三维数学模型, 利用水模型实验混匀时间验证了数值模拟的可靠性, 研究了喷嘴水平旋转角度及喷吹气体流量对 RH 精炼过程中多相流动及传质行为的影响, 进一步耦合了 RH 精炼过程脱氢反应模型, 分析了喷嘴水平旋转角度及气体流量对 RH 脱氢效率的影响。

关键词: RH 旋流喷吹精炼; 循环流量; 混匀时间; 脱氢; 数值模拟

Study on Multiphase Flow and Dehydrogenation Behavior during RH

Swirling-Flow Injection Refining Process

Jiahao Wang¹, Peiyuan Ni^{1*}, Chao Chen², Ying Li¹

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

2. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China)

Abstract: The study on multiphase flow and reaction behavior in RH with a novel swirl injection technique was carried out. Mathematical model has been confirmed to be reliable by comparing the measured and simulated mixing times. The effect of nozzle angles and gas flow rate on multiphase flow and mass transfer behavior in RH refining process was studied. Furthermore, a coupled model with dehydrogenation reactions and fluid flow was developed to investigate the effect of nozzle angles and gas flow rate on dehydrogenation efficiency.

Key words: RH refining with swirl flow injection; circulation flow rate; mixing time; dehydrogenation; numerical simulation

1. 前言

RH 精炼是高品质钢生产中的重要工艺之一。目前, RH 精炼设备已由单一的脱气设备发展成为具有脱碳、脱气、脱硫、去除固体夹杂物、调整钢液温度等多功能的炉外精炼设备。钢液的混匀时间和循环流量是关系到精炼过程效率的重要参数, 增加喷嘴数量^[1]、降低真空室压力^[2]、增加上升/下降管数量^[3]、钢包底吹^[4]等手段可以提高循环流量、缩短混匀时间。另外, 利用机械搅拌技术^[5]和电磁旋流技术^[6]可在上升管内形成钢液旋转流动, 提高 RH 精炼循环流量。本文提出并研究了 RH 旋流喷吹高效精炼新技术, 通过在上升管开展旋流喷吹, 产生钢水旋流, 促进气泡弥散分布, 从而提升精炼效率。

2. 模型描述

1/4 比例水模型尺寸、示踪剂添加位置及混匀时间监测点位置如图 1 (a)所示; 图 1 (b)和(c)分别为传统喷嘴和具有一定水平旋转角度(非径向)喷嘴的排布方式; 图 1 (d)为 RH 水模型实物图。

钢水流场通过求解连续性方程、动量方程以及 standard $k-\varepsilon$ 湍流模型方程获得; 气泡轨迹采用 Euler-Lagrange 多相流模型求解, 考虑曳力、虚拟质量力、压力梯度力、重力和浮力五种气液相间力; RH 精炼

过程混匀现象通过求解示踪剂的输运方程获得；脱氢行为通过求解溶解氢的传质方程获得，脱氢模型主要考虑了氩气泡表面、真空室钢液面以及真空室钢液内部三种脱氢机制。

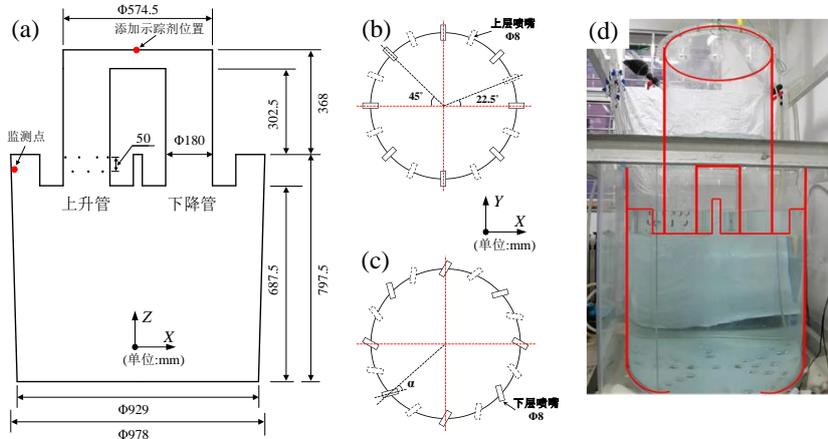


图 1 RH 几何模型：(a) RH 水模型参数；(b) 传统喷嘴排布方式；(c) 非径向喷嘴排布方式；(d) RH 水模型示意图

Fig. 1 Geometry of RH: (a) parameters of RH water model (b) conventional nozzle arrangement (c) non-radial nozzle arrangement (d) schematic of RH water model

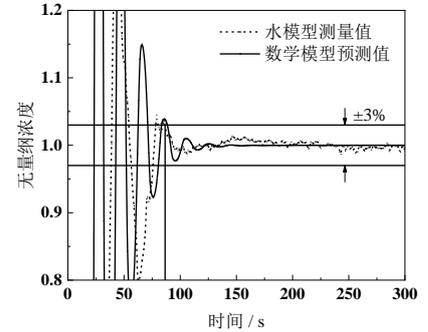


图 2 水模型及数值模拟混匀时间对比

Fig. 2 Comparison of mixing time between water model and simulation

3. 结果与分析

3.1. 模型验证

为验证模型的可靠性，建立了 1/4 比例的水模型，采用混匀时间进行验证，实验工况为 40 L/min，喷嘴角度为 0°。混匀时间对比结果如图 2 所示。通过对比可知，当前所建立的数学模型能够较好的模拟 RH 精炼过程中的流体流动。

3.2. RH 水模型数学模拟研究

本节首先研究了 RH 水模型不同非径向喷嘴角度对其多相流动及传质行为的影响，计算工况为：气体流量为 40 L/min，喷嘴角度为 0°、30°、45°，计算得到的循环流量及监测点混匀时间如图 3 (a)和(b)所示。结果表明，随着喷嘴角度的增大，循环流量增大，当喷嘴角度由 0°增加至 30°，循环流量由 9 kg/s 提高至 10.3 kg/s，随着喷嘴角度进一步增大至 45°，循环流量仅增加 0.1 kg/s。同时，随着喷嘴角度的增加，混匀时间也随之缩短，当采用 30°和 45°非径向喷嘴时，混匀时间由原来的 87.6 s 分别缩短至 62.8 s 和 61.0 s。

图 3 (c)和(d)分别为采用 0°传统喷嘴排布时，不同气体流量（40 L/min 和 80 L/min）下 RH 水模型的循环流量及监测点混匀时间。可以看出，当气体流量从 40 L/min 提升至 80 L/min 时，循环流量提高约 22.2%，混匀时间缩短 30.28%。

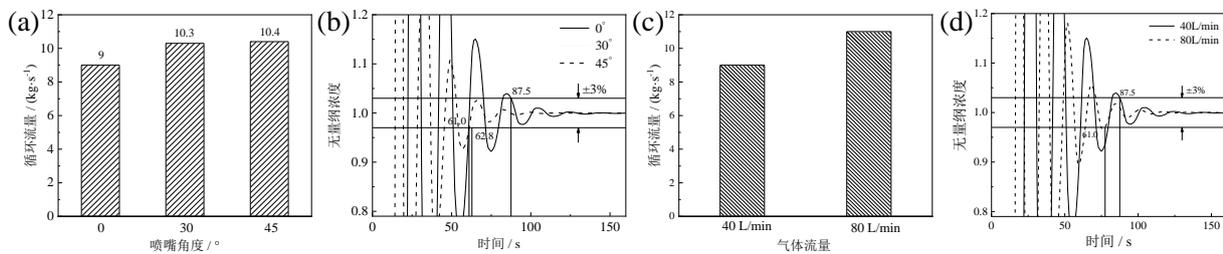


图 3 不同喷嘴角度下 (a) 循环流量和 (b) 混匀时间；不同气体流量下 (c) 循环流量和 (d) 混匀时间

Fig. 3 (a) circulation flow rate and (b) mixing time with different nozzle angles; (c) circulation flow rate and (d) mixing time with different gas flow rates

3.3. RH 原型数学模拟研究

图 4 为不同喷嘴角度下 (0° 、 30°) RH 原型循环流量、利用体积评估方法^[7]得到的混匀时间以及夹杂物去除率, 气体流量为 $144 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。可以看出相同气体流量下, 喷嘴角度由 0° 增加至 30° 后, 循环流量提升 18.0%, 混匀时间缩短 31.4%。采用 30° 非径向排布喷嘴精炼 200 s 后, 20、50、 $100 \mu\text{m}$ 夹杂物去除率分别由 25.4%、28.3% 和 32.3% 提高至 25.9%、34.1% 和 43.5%。

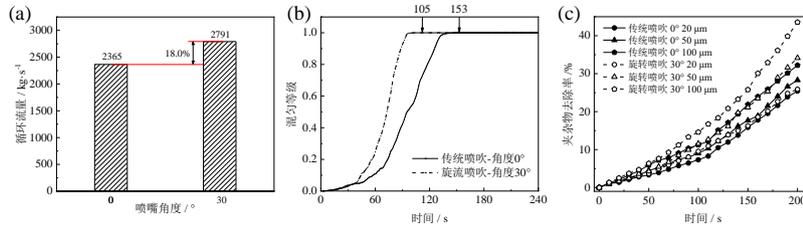


图 4 不同喷嘴角度下的 (a) 循环流量 (b) 混匀时间 (c) 夹杂物去除率

Fig. 4 (a) Circulation flow rate (b) mixing time (c) inclusion removal rate under different nozzle angles

图 5 为采用不同喷嘴排布方式条件下, RH 原型内钢液流线图。可以看出, 采用传统喷吹方式时, 上升管内的钢水垂直运动, 而当采用旋转喷吹时上升管内钢液发生了旋转流动, 这说明吹入的气体提供了上升管内流体水平方向运动的动量, 从而使得流体发生旋转流动。同时, 喷嘴采用非径向排布时, 下降管内的钢液流速增加, 促进了循环流量的提高。

图 6 为采用 30° 非径向喷嘴排布的原型 RH, 不同气体流量下的循环流量及利用体积评估方法得到的混匀时间。可以看出, 采用相同角度的非径向喷嘴时, 将气体流量从 $144 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 提升至 $288 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 后, 循环流量提高约 35.4%, 混匀时间缩短 12.4%。

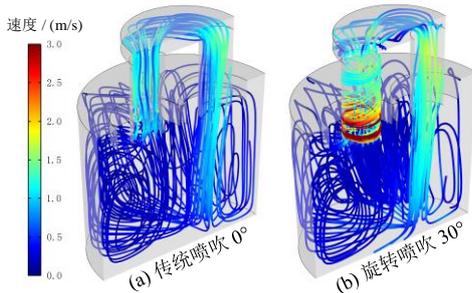


图 5 不同喷嘴排布方式下钢液流线

Fig. 5 Steel streamline distribution with different nozzle arrangements

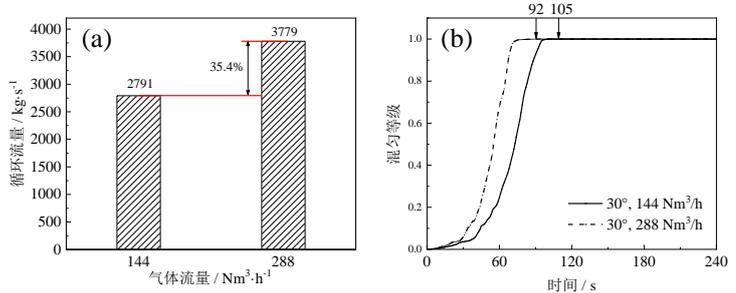


图 6 不同气体流量下的 (a) 循环流量 (b) 混匀时间

Fig. 6 (a) Circulation flow rate and (b) mixing time with different gas flow rates

3.4. RH 精炼脱氢行为

本部分按文献中^[8]的几何尺寸建立 RH 三维数学模型, 并在计算获得稳定的流场后耦合氢传质方程, 计算得到监测点氢含量随时间的变化曲线, 并与文献中工业试验数据^[8]进行对比, 如图 7 所示。监测点位于 RH 钢包内浸渍管和钢包壁面之间, 钢包钢液面以下 30~40 mm 的位置。通过对比可知, 模拟结果与文献中工业试验值吻合较好, 表明当前脱氢反应模型能较好的模拟实际 RH 真空精炼过程钢液的脱氢行为。

图 8 为 RH 主截面钢液中氢浓度分布, 计算工况为: $144 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 喷嘴角度 0° 。可以看出, 氢浓度的降低首先发生在真空室内, 之后随着脱氢反应的进行以及氢元素随钢液流动及浓度差引起的传质运动, 整个钢包内的氢含量逐渐减低。

图 9 为不同工况下钢包内平均氢含量随时间的变化, 曲线越低, 表示脱氢反应速率越快。相同气体流量下, 随着喷嘴角度的增加, 脱氢反应速率逐渐增加。在相同非径向喷嘴角度条件下, 随着气体流量由 $144 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 提高至 $288 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 脱氢反应 900 s 后, 钢包内平均氢含量减少约 22.5%。

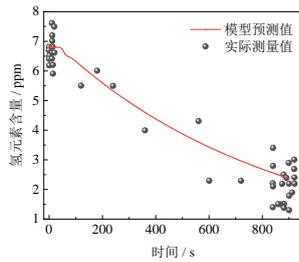


图 7 模型计算监测点氢含量变化与工业测量值对比

Fig. 7 Comparison of hydrogen content variation at monitor between numerical calculation and industrial measurements

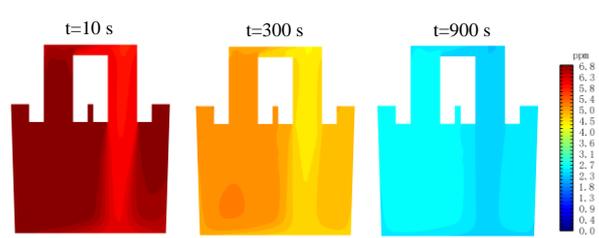


图 8 RH 主截面钢液中氢浓度分布云图
Fig. 8 Distribution of hydrogen concentration in the molten steel on the main plane

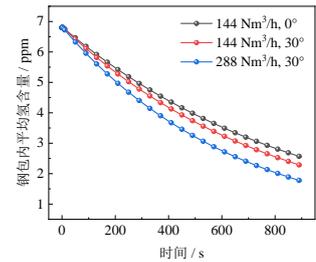


图 9 不同工况下钢包内平均氢含量随时间的变化

Fig. 9 The change of the average hydrogen content in the ladle with time under different conditions

4. 结论

(1) 建立的 RH 精炼过程多相流模型和脱氢反应耦合模型与实测值吻合较好，能够准确地预测 RH 精炼过程多相流动和脱氢反应过程；

(2) 相同气体流量下，采用非径向喷嘴可使上升管内钢液产生旋转流动，提高循环流量、缩短混匀时间；随着喷嘴角度的增加，循环流量提高，混匀时间缩短。

(3) 相同非径向喷嘴角度下，随喷吹气体流量增加，循环流量提高，混匀时间缩短；

(4) 采用非径向排布的喷嘴，有利于脱氢反应的进行，当气体流量由 $144 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 增加至 $288 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时，钢包内平均氢含量可进一步降低。

致谢

感谢国家自然科学基金项目资助项目（项目号：51704062）的支持。

参考文献

- [1] Park Y-G, Yi K-W, Ahn S-B. The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations[J]. ISIJ international, 2001, 41(5): 403-409.
- [2] Seshadri V, Cost S L D S. Cold model studies of RH degassing process[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1986, 26(2): 133-138.
- [3] Li B, Tsukihashi F. Modeling of circulating flow in RH degassing vessel water model designed for two-and multi-legs operations[J]. ISIJ international, 2000, 40(12): 1203-1209.
- [4] Chen G, He S. Mixing behavior in the RH degasser with bottom gas injection[J]. Vacuum, 2016, 130: 48-55.
- [5] 李宝宽, 栾叶君, 齐凤升, et al. 带有旋流的 RH 精炼系统循环流动的实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(8): 759-762.
- [6] Li B, Tsukihashi F. Effect of rotating magnetic field on two-phase flow in RH vacuum degassing vessel[J]. ISIJ international, 2005, 45(7): 972-978.
- [7] Zhou X, Zhang Y, He Q, et al. Novel Evaluation Method to Determine the Mixing Time in a Ladle Refining Process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022: 1-10.
- [8] 朱博洪. RH 真空精炼过程的气液两相流动及脱氢行为研究[D]重庆大学, 2017.