

2001 年上海大学博士学位论文

1

多功能RH精炼过程的 数学和物理模拟

作者：郁能文

专业：钢铁冶金

导师：魏季和



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

多功能 RH 精炼过程的数学和物理模拟

作 者: 郁能文
专 业: 钢铁冶金
导 师: 魏季和

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2001)

Mathematical and Physical Modeling of Multifunction RH Refining Process

Candidate: Yu Nengwen

Major: Ferrometallurgy

Supervisor: Prof. Wei Jihe

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

- | | | |
|--------|------------------|--------|
| 主任：李正邦 | 教授，工程院院士，钢铁研究总院 | 100081 |
| 委员：李大经 | 教授，上海应用技术学院 | 200072 |
| 康 复 | 教授级高工，上海宝钢(集团)公司 | 201900 |
| 叶舜发 | 教授级高工，上海钢铁工艺技术研究 | 200050 |
| 翟启杰 | 教授，上海大学 | 200072 |
| 导师：魏季和 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

邵象华	中科院、工程院院士, 钢铁研究总院	100081
曲 英	教授, 北京科技大学	100083
蔡志鹏	教授, 中科院化工冶金研究所	100080

评议人名单:

李正邦	工程院院士, 钢铁研究总院	100081
叶舜发	教授级高工, 上海钢铁工艺技术研究	200050
李士琦	教授, 北京科技大学	100083
董元兢	教授, 华东冶金学院	243002

答辩委员会对论文的评语

自第一台真空循环精炼(RH)装置于 1959 年问世至今, 由于其适应性强, 效率高, 效果好, 精炼操作简单等一系列优点, RH 精炼技术在世界范围内获得了广泛应用和迅速发展, 已由原先单一的脱气精炼技术扩展成为一种同时还能脱除碳, 氧, 硫和夹杂, 以及升温和调整成分等的多功能精炼技术, 在众多炉外精炼技术中占据了主导地位, 具有广阔的应用前景。目前, 世界各国都在为进一步发展此项技术而努力。三十年来, 国内外对 RH 精炼工艺作了大量研究, 包括数学和物理模拟研究。但是, 都在不同程度上存在这样那样的不足, 特别是对八十年代以来发展起来的多功能 RH 精炼技术, 国内外有关的研究为数极少。

多功能 RH 精炼技术属典型的异形、复杂、多相的火法冶金过程, 涉及多种操作, 可控变量多, 精炼反应杂而且同时发生。如何控制这些变量, 控制反应器内的物理和化学变化, 从而实现高产、优质、低消耗, 达到最优的效果, 是发展 RH 精炼技术的关键问题。按照冶金反应工程学的观点, 精炼效果的好坏, 在诸多因素中最重要的是传质过程。这是一个综合传质过程, 十分复杂。从这个意义上说, 精炼反应器内的传输现象决定着 RH 精炼过程的最终效果。探索和搞清多功能 RH 精炼过程的内在规律, 宏观机理和本质, 不同操作条件, 工艺及几何参数下钢液的流动和综合传质特性, 并在此基础上研制多功能 RH 精炼过程的新一代数学模型, 既有重要的理论意义, 又有重大的实用价值。

都能文同学的博士学位论文全面、系统、简洁和扼要地回顾了 RH 精炼技术的发展历程和取得的进展,分析和综述了有关 RH 精炼过程数学和物理模拟已有的成果,现状和不足。在此基础上,对多功能 RH 精炼过程作了全面、系统的数学和物理模拟研究。

以 90t 多功能 RH 装置为原型,合理设计、加工和建成了几何全相似比为 1: 5 的 RH-KTB-KPB 水模型装置,设计和采用新的、简单而可靠的方法直接测定了钢液的循环特性,考察了工艺和几何因素,包括顶吹氧(KTB)操作,对环流量的影响,与数学模拟相结合,得到了更为精确和可靠的环流量计算式;显示、观察和分析了 RH 钢包内液体的流动状态,指出了 RH 钢包内钢液并非处于全混状态,在下降管液流及其周围液体间存在一液-液两相流;测定了相应工况下的混合时间,并测定了相应的停留时间分布,得到了更精确的混合时间与搅拌能密度的关系。

在国内外首次设计和进行了 RH-PTB 条件下精炼过程中钢液和粉剂颗粒间的传质特性,测定了液体侧的传质系数;从理论上分析了颗粒群在紊流流场中的传质特性,应用实验数据计算得 RH-PTB 过程中颗粒附近的局部雷诺数 Re_s ,进而得到了表征 RH-PTB 条件下熔池传质特性的一系列无量纲(Sh 和 Re_s)关系式,说明了脉动速度对颗粒传质的作用,并应用于随后的对 RH 和 RH-KTB 精炼过程的数学模拟,取得了相当好的效果,也表明了该项结果的可靠性和适用性。

分析了 RH 精炼过程中喷粉脱硫的过程及机理,充分考虑 RH 精炼喷粉脱硫的实际情况,从双膜理论和硫的质量衡算出发,在国内外首次建立了 RH 喷粉脱硫的动力学模型,并首次合理确定了喷粉脱硫过程中钢液内参与脱硫反应的有效粉剂量;计算了 300t RH 装置内不同初始含硫量和不同喷粉量下的脱硫反应过程,结果与工业试验和生产数据相符,对改进 RH 喷粉脱硫工艺和操作提

出了十分有用的信息和指明了方向,为 RH 喷粉脱硫工艺的优化和过程控制提供了可靠的数学模型基础。

以速率现象的理论、观点和方法,仔细分析了 RH 精炼过程中脱碳反应可能发生的区域,基于动量和质量守恒原理,考虑钢液在体系各部位的流动阻力,建立了钢液 RH 和 RH-KTB 精炼过程的数学模型,摒弃了文献中一直采用的表观速率常数,应用理论和实验数据分别推算了 RH 和 RH-KTB 过程中上升管内两相流区,真空室液滴和真空室熔池三个反应区的传质系数。应用该数学模型计算了 RH 和 RH-KTB 精炼过程的脱碳、脱气反应过程。计算结果与工业数据基本吻合。推算出了三个精炼反应区在总的脱碳效果中所占的比例和贡献。这把国内外已有的有关研究向前推进了一大步,也加深了对 RH 和 RH-KTB 精炼过程中脱碳反应的机理的理解和认识。与物理模拟相结合,为获得精确的环流量计算式提供了可靠的环流量数据。所有这些,都有较高的理论价值,对生产实践有重要的指导意义,也为实际过程的计算机控制提供了坚实的数学模型基础。

作者选题方向正确,工作量大,成果显著,有明显的创新性。论文结构完整,思路明确,条理清晰,层次分明,文字简洁、流畅,逻辑性强,理论分析正确,实验及数据的可靠度、可信度高,分析、讨论合理,结论贴切,具有相当高的学术水平和很好的实际应用价值,是一篇优秀的博士学位论文。

整个工作表明,郁能文同学具有宽广、坚实的理论基础和系统、深入的专门知识,较强的科研能力,已达到博士学位所要求的水平。答辩时表述清楚,回答问题正确。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决，全票同意通过郁能文同学的博士学位论文答辩，建议授予博士学位。

答辩委员会主席：**李正邦**

2000 年 11 月 16 日

摘 要

对多功能 RH 精炼过程中钢液的流动和混合特性作了水模拟研究. 以 90t 多功能 RH 精炼装置为原型, 设计、加工和建成了几何相似比为 1:5 的 RH 水力学模拟系统. 用一新的方法直接测定了钢液的循环流量; 采用电导法测定了 RH 钢包内钢液的混合时间; 考察了一些主要工艺和结构参数对流动、混合和传质的影响; 显示并分析了钢包内液体的流动状态和流场; 采用刺激—响应实验测定了下降管出口处示踪剂浓度随时间的变化, 得到了相应的停留时间分布. 由此得出以下结论: 该精炼装置的环流量计算式为: $Q_i = 0.0333 Q_g^{0.26} D_u^{0.69} D_d^{0.80}$ (t/min); 钢包内钢液的混合时间与搅拌能密度关系为: $\tau_m \propto \varepsilon^{-0.50}$ (s); 钢包内钢液至少需经 3 次以上循环才能混合均匀.

研究了 RH-PTB(顶喷粉)精炼过程中钢液和粉剂颗粒间的传质特性. 以分析纯氯化钠粉作粉剂, 测定了液体侧的传质系数 k . 结果表明, 在本工作条件下, 液体侧的传质系数随驱动气体吹入量、上升管内径、环流量和粉剂粒度的增大而增大, 随下降管内径增大而减小, 其值在 $(1.36 \sim 7.30) \times 10^{-4}$ m/s 范围内. 得到了相应的无量纲关系. 考虑颗粒与液流的相对速度, RH-PTB 条件下熔池传质特性可由下式表征:

$$Sh = 2 + 0.073 Re_s^{0.777} Sc^{1/3}$$

考虑紊流中脉动速度引起的能量耗散, RH-PTB 条件下熔池传质过程服从如下关系:

$$\text{Sh} = 2 + 0.073 \left[\frac{\varepsilon_{1s} d_p^4}{\nu_1^3} \right]^{0.259} \text{Sc}^{1/3}$$

将粉剂颗粒与钢液间的传质当作刚性的气泡与钢液间的传质处理, 对 RH-PTB 过程有:

$$\text{Sh} = 2 + 0.026 \left[\text{Re}_s^{0.48} \text{Sc}^{0.339} \left(\frac{g^{1/3} d_p}{D^{2/3}} \right)^{0.072} \right]^{1.455}$$

考察和分析了 RH 喷粉脱硫过程及机理, 基于双重阻力传质理论和体系内硫的质量衡算, 建立了 RH 喷粉脱硫过程的动力学模型, 确定了模型各有关参数, 包括各传质系数和脱硫处理过程中钢液内参与脱硫反应的粉剂量等. 以该模型对 300t RH 装置内设定的不同工况 (初始硫含量和喷粉量) 下喷吹石灰基粉剂的脱硫过程作了计算和模拟, 相应的钢液环流量和喷粉速率分别取为 100t/min 和 150kg/min; 设定的初始硫含量和喷粉量分别为 70, 60, 50, 40, 30, $20 \times 10^{-4} \text{mass\%}$ 和 10, 8, 6, 5, 4, 3kg/t-钢; 对每种工况计算了 8 个循环, 相应的总脱硫处理时间为 24min. 结果表明, 由该模型所作的估计与一些工业实验和生产数据相当吻合; 在 $(60 \sim 80) \times 10^{-4} \text{mass\%}$ 的初始硫含量下, 喷吹 3~5kg/t-钢石灰基粉剂 (85% 石灰 (CaO) + 15% 萤石 (CaF₂)), 总处理时间为 12~20min, 有可能使钢液达到 $(5 \sim 10) \times 10^{-4} \text{mass\%}$ 以下的超低硫水平; 强化喷粉操作, 增大钢液环流量可有效地提高喷粉脱硫过程的速率. 该模型可望为确定合理的喷粉脱硫工艺和参数, 控制喷粉脱硫过程提供有用的信息和依据.

基于质量和动量衡算, 同时考虑 RH 上升管、真空室液滴及真空室熔池对钢液脱碳精炼的贡献, 建立了多功能 RH 精炼过程的数学模型, 用以分析和模拟了 90t RH 及 RH-KTB (顶吹

氧) 过程中的脱碳和脱气精炼. 模型计算结果与一些工业实验和生产数据完全相符. 六个循环的计算结果表明, RH 上升管内的脱碳量占总脱碳量的 10.47%~11.62%, 在真空室液滴位置可占 37.44%~137.97%, 真空室熔池的贡献为 50.52%~152.09%. 在初始碳含量 $\leq 400 \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 的情况下, 利用 RH 精炼条件可自然脱碳, 经 10~16min 的处理, 可使钢液含碳量 $\leq 20 \times 10^{-4}\text{mass\%}$; 若初始碳含量达 $(400\sim500) \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 以上, 则在 RH 精炼的条件下难以进行自然脱碳. 采用 RH-KTB ($Q_{O_2}=600 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 吹氧时间~6min) 操作, 在同样的初始含碳量 ($400 \times 10^{-4}\text{mass\%}$) 下, 将碳降低至 $\leq 20 \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 的时间需 12~13min, 比常规 RH 脱碳所需时间可缩短 3~4min; 顶吹氧量从 $Q_{O_2}=600\text{Nm}^3/\text{h}$ 增加到 $Q_{O_2}=1000\text{Nm}^3/\text{h}$, 由初始含碳量 $550 \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 降至 $\leq 20 \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 的时间需 15~16min, 对 $700 \times 10^{-4}\text{mass\%}$ 的初始含碳量约需 18~19min 左右. 只要转炉、RH、连铸机的生产周期允许, 转炉终点含碳量可以提高到 $(550\sim700) \times 10^{-4}\text{mass\%}$. 在所考察的工况下, 驱动气体 (氩) 吹入量由 600NL/min 增加到 900NL/min, 对脱碳和脱气效果影响不大.

关键词 RH 精炼过程, RH-PTB (顶喷粉) 过程, RH-KTB(顶吹氧)过程, 数学和物理模拟

Abstract

Using water modeling method, the fluid and mixing characteristics under the different operating modes in RH process have been investigated. A water model of 1/5 linear scale for a 90t multifunction RH degasser has been designed, fabricated and established. The circulation rate has been determined directly with a new method. The mixing time of molten steel in the ladle has been measured with conductivity method. The influence of the main technological and structural parameters was examined. The fluid flow pattern and flow field in the ladle were demonstrated, observed and analyzed. The results indicated that the circulation rate of molten steel in the unit can be estimated by the following equation: $Q_l = 0.0333 Q_g^{0.26} D_u^{0.69} D_d^{0.80}$ (t/min), where Q_g —gas flow rate (NL/min), D_u and D_d —up- and down-snorkel inner diameter(cm); the relation between mixing time and stirring power density is obtained to be $\tau_m \propto \varepsilon^{0.50}$. The residence time distribution curve in the RH model obtained by tracer response showed that three circulation cycles are at least needed for complete mixing of the liquid steel in the RH unit.

The mass transfer characteristics between powder particles and liquid steel in the RH-PTB (Powder Top Blowing) refining have been investigated on this model. The sodium chloride powder with analytical purity was used as the flux for blowing. The mass transfer coefficient in liquid steel (k) was determined under the conditions of RH-PTB. The effects of the main technological and structural parameters were examined. It may be concluded that under the conditions of the present work, k increases with increasing Q_g , D_u , Q_l and d_p , and decreases with an increase of D_d . Its value is in the range of $(1.36 \sim 7.30) \times 10^{-4}$ m/s. The

following dimensionless relationships were obtained:

$$Sh = 2 + 0.073 Re_s^{0.777} Sc^{1/3}$$

$$Sh = 2 + 0.073 \left[\frac{\epsilon_s d_p^4}{\nu_l^3} \right]^{0.259} Sc^{1/3}$$

$$Sh = 2 + 0.026 \left[Re_s^{0.48} Sc^{0.339} \left(\frac{g^{1/3} d_p}{D^{2/3}} \right)^{0.072} \right]^{1.455}$$

The desulphurization process by powder injection and blowing in RH refining of molten steel and its mechanism have been considered and analyzed. Based on the two-resistance mass transfer theory and the mass balance of sulphur in the system, a kinetic model for the process has been developed. The related parameters of the model have been reasonably determined. Modeling and calculations for the process by injecting and blowing the lime based powder flux under the assumed operating modes in a RH degasser of 300t capacity have been carried out using the model. The corresponding circulation rate and the powder injection and blowing rate were taken as 100t/min and 150kg/min, respectively. The initial contents of sulphur and the amounts of powder injection and blowing were respectively assumed to be 70, 60, 50, 40, 30, 20×10^{-4} mass % and 10, 8, 6, 5, 4, 3kg/t-steel. The total treatment time for desulphurization under each mode was set up to be 24min that is equivalent to eight circulation cycles of liquid steel to be treated. The results showed that the predictions made by this model are in good agreement with some data from industrial experiments and production practice. By injecting and blowing the lime-based powder flux (85%lime(CaO)+15% fluorite(CaF₂)) of 3~5kg/t-steel with the total

treatment time of 12~20min, it is possible to decrease the sulphur content in molten steel to an ultra-low level below $(5\sim10)\times10^{-4}\text{mass\%}$ from $(60\sim80)\times10^{-4}\text{mass\%}$. Intensifying the powder injection and blowing operation and increasing the circulation rate of liquid steel may effectively raise the rate of the process in RH refining.

On the basis of mass and momentum balance, a mathematical model to simulate the refining process in a 90t multifunction RH unit has been proposed and presented. The contributions of three decarburization sites (the up-snorkel zone, the droplets and molten steel bath in the vacuum chamber) were simultaneously considered. It is demonstrated that for the RH and RH-KTB refining processes, the calculated results agree well with some plant data. The contribution of up-snorkel zone is 10.47%~1.62% of the overall amount of decarburization, 37.44%~37.92% for the droplets in the vacuum chamber and 50.52%~52.09% for the vacuum chamber bath. The effectiveness of decarburization and degassing is not obviously improved with increasing Ar blowing rate from 600NL/min to 900NL/min. The carbon content in molten steel can be decreased from $400\times10^{-4}\text{mass\%}$ to $20\times10^{-4}\text{mass\%}$ within 16min by the conventional RH refining. At the same initial carbon content of $400\times10^{-4}\text{mass\%}$, the decarburization treatment time may be shortened by 3~4min with RH-KTB ($Q_{O_2}=600\text{Nm}^3/\text{h}$) than with the conventional RH refining. Using RH-KTB ($Q_{O_2}=600\text{Nm}^3/\text{h}$) process, the initial carbon content of liquid steel for the RH refining can be increased from $400\times10^{-4}\text{mass\%}$ to $550\times10^{-4}\text{mass\%}$ and it is also possible to raise it to $700\times10^{-4}\text{mass\%}$ under the conditions of RH-KTB ($Q_{O_2}=1000\text{Nm}^3/\text{h}$) with a treatment time of 18~19min.

Keywords RH refining process, RH-KTB (Kawasaki Top Blowing) process, RH-PTB (Powder Top Blowing) process, mathematical and physical modeling

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 RH 精炼过程	1
1.2 数学和物理模拟在冶金反应器研究中的作用	16
第二章 RH 精炼过程的数学和物理模拟	19
2.1 RH 精炼过程的物理模拟	19
2.2 RH 精炼过程的数学模拟	30
第三章 RH 喷粉脱硫	47
3.1 脱硫的热力学条件	47
3.2 渣金反应的动力学分析	48
3.3 脱硫粉剂的选择	52
3.4 RH 喷粉过程中钢包内的传质特点	54
3.5 本工作的研究目的和内容	62
第四章 RH 和 RH-KTB 精炼过程中钢液流动和混合 特性的水模拟研究	65
4.1 模型设计与模型装置	65
4.2 测试方法	67
4.3 实验结果与讨论	69
4.4 本章小结	74
第五章 RH-PTB (顶喷粉) 精炼过程中钢液传质 特性的水模拟研究	76
5.1 实验原理及方法	76
5.2 实验结果	79

5.3	结果分析与讨论	83
5.4	本章小结	95
第六章	RH 精炼过程中喷粉脱硫的动力学模型	99
6.1	过程及机理分析	99
6.2	过程动力学模型	101
6.3	模拟结果及分析	107
6.4	本章小结	115
第七章	多功能 RH 装置中钢液精炼过程数学模拟的研究	118
7.1	基本假设	119
7.2	过程的数学描述	120
7.3	有关参数的确定	127
7.4	计算方法和程序	133
7.5	计算结果	134
7.6	结果分析与讨论	138
7.7	本章小结	143
第八章	全文总结	148
参考文献		152
致 谢		160