

炼钢高效化中的多尺度结构及其效应探讨

刘明忠 王训富 李士琦

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 炼钢过程是一类物质转化过程, 简略介绍了炼钢生产流程。以新兴铸管股份有限公司近年来的炼钢高效化进程为例, 通过物质转化的主导反应——碳氧反应, 研究探讨高效化过程中表现出的微观尺度、介观尺度、单元操作尺度、装备尺度、工序尺度的多尺度结构及其效应。

关键词: 多尺度结构; 炼钢过程; 高效

中图分类号: TF711

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2004)S2-0128-03

Space-time multiscale and its effect on high-efficiency steelmaking

LIU Ming-zhong, WANG Xun-fu, LI Shi-qi

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The steelmaking process was introduced as a substance transformation process. Taking an example of high-efficiency steelmaking in Xinxing Ductile Iron Pipes Company Limited, the multiscale structure and its effect is discussed, including micro-scale, meso-scale, unit operation scale, equipment scale and procedure scale of the C—O reaction which is the main reaction in the steelmaking process.

Key words: multiscale structure; steelmaking process; high-efficiency

时空多尺度结构^[1]是客观世界中存在的一种现象, 多尺度结构与效应是众多物质转化过程的共同特征。物质转化的基本层次是原子和分子, 但实现物质转化却涉及到从原子、分子到大工业流程不同尺度的化学和物理过程。近年来, 人们逐渐深化了对多尺度结构及其效应的认识, 特别是在以物质转化为特征的过程工业领域, 于 20 世纪末开展了有关的探讨, 认为多尺度的研究是继单元操作、反应工程研究之后的新阶段^[2]。然而在冶金工程领域有关的研究和探讨还很少。

工业化生产的重要特征就是足够高的生产速率, 工程技术进步的重要目标是尽可能地提高生产

速率。物质转化过程的时空多尺度结构及其效应展现于其高效化进程中。

笔者试图通过新兴铸管股份有限公司炼钢过程的高效化为例, 对冶金过程中的多尺度结构及其效应的认识进行初步探讨。

1 工程背景简介

1.1 钢铁冶金过程系统

钢铁生产属过程工业, 铁矿石经钢铁冶金过程系统经历了一系列物理和化学变化转化为合格钢坯, 其单元工序串联结构如图 1 所示。

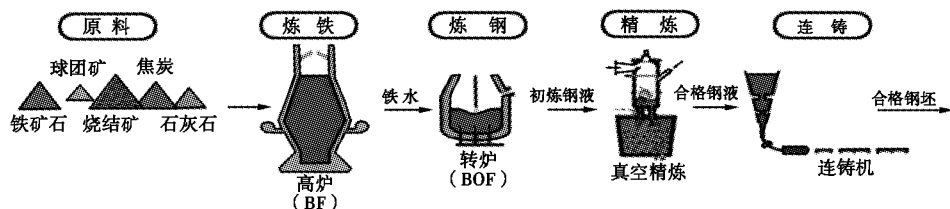


图 1 钢铁冶金工序结构示意图

1.2 炼钢过程中的物质转化过程

本文讨论的是图 1 中的转炉炼钢工序, 炼钢过

程中的物质转化是: 液态生铁(初级产品)经一系列物理化学过程转变成合格的钢坯(成品), 其主导反

应是铁熔体中的碳氧化去除(并将其他有害杂质去除),碳的质量分数由约4.3%降至约0.1%的水平。炼钢的基本操作程序如图2所示,系统的输入为一定温度的液态生铁,输出的为温度和成分合格的钢液。



图2 转炉炼钢基本操作程序

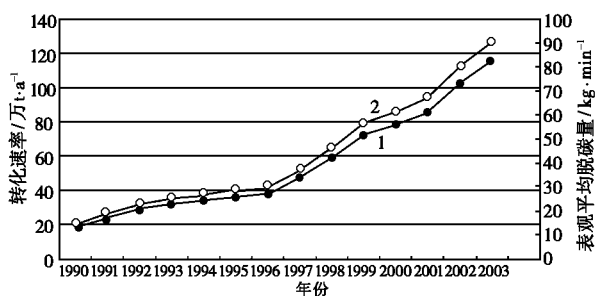
1.3 炼钢过程的高效化

炼钢过程高效化的基本指标是铁水转化为合格钢坯的速率,可用年转化速率表示;或按其主要化学反应——铁基熔体中的脱碳反应,折算得出的平均脱碳速率和以整个冶炼周期为脱碳时间计算的表观平均脱碳量表示。

为了具体地讨论炼钢过程中的多尺度结构及其效应,本研究选择新兴铸管炼钢厂做为实例来讨论。表1和图3是新兴铸管炼钢厂近十余年来与炼钢效率有关的技术指标的变化:

表1 炼钢技术指标

年份	转化速率/ 万 t·a ⁻¹	每炉平均 出钢量/t	每炉平均 冶炼周期/ min	吹炼 时间/ min	平均脱碳 速率/ %·min ⁻¹	表观平均 脱碳量/ kg·min ⁻¹
1990	18.4	10	40	16	0.26	14.7
1996	38.1	12	35	15	0.28	30.5
2003	116.0	19.5	22	12	0.35	92.7

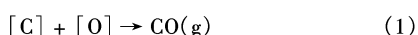


1—转化速率;2—表观平均脱碳量

图3 1990~2003年新兴铸管炼钢厂炼钢高效化进程

2 微观尺度结构

如前所述,炼钢过程的基本化学反应是熔池中的碳被氧化去除,其反应式为:



该式描述的是本征化学反应,可以认为是不考虑传质、边界、操作、工艺等因素的均匀体系的反应,

也可以认为是微观的反应。

在炼钢温度($T = 1827\text{ K}$)下,熔池中碳氧本征化学反应的标准吉布斯自由能变化为 $\Delta G^\circ = -22186 - 38.386T = -92.317\text{ kJ/mol}$,反应具有很好的热力学条件。

研究表明碳氧本征反应为一级反应,反应速率表达式为:

$$dC_{[C]}/d\tau = kC_{[C]} \quad (2)$$

式中, $C_{[C]}$ 为熔池中碳的质量分数,%; τ 为时间,s; k 为本征化学反应的速率常数,遵循阿累尼乌斯方程:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (3)$$

其中: A 为常数; E_a 为活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; T 为熔池温度,K; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

温度 T 越高,反应速率常数 k 越大,碳氧反应速率就越快。在炼钢温度下,碳氧本征化学反应不是控制环节,显示出在当前氧气转炉高效化的情况下,在大于分子、原子尺度(10~100 nm)范围外存在着的结构及其效应。

3 介观尺度结构

长期的研究表明,氧气转炉炼钢脱碳反应速率远大于熔池中的传质速率。吹炼初期铁液中碳的浓度较高,氧的传质是脱碳反应的控制环节;随着炼钢的进行,熔池中碳的浓度逐渐降低,碳的传质随着浓度的降低而减弱,控制环节转向碳的传质^[3]。在反应区附近熔体中的传质速率表征着炼钢过程脱碳速率。相应的脱碳速率(传质)的积分形式为:

$$\ln \frac{C_{[O]} - C_{[O]}^b}{C_{[O]}^0 - C_{[O]}^b} = -k_m \tau \quad (4)$$

其中 $C_{[O]}$ 、 $C_{[O]}^b$ 和 $C_{[O]}^0$ 分别为熔池中氧质量分数、平衡氧的质量分数和初始氧质量分数,%; k_m 为碳氧在熔池中的表观传质系数, s^{-1} 。

式(4)描述了炼钢过程的如下景象:假定在熔体中氧的浓度是均匀的,在反应界面附近有一边界层,在反应界面上本征化学反应速率极高,达到了化学平衡。这种反应边界层的模型体现的是一种介观尺度的结构,在所论现象中大约是 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{ m}$ 的尺度。

4 单元操作尺度结构

研究表明,边界层中的表观传质系数 k_m 取决于熔体中的传质系数 $\beta(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 和单位熔体所具有的反应界面积 $F/V(\text{m}^{-1})$,即:

$$k_m = \beta \cdot (F/V) \quad (5)$$

式(5)表征出炼钢过程中存在着更大尺度的结构及其效应,即反应表面积 F 和熔体的体积 V ,特别是单位体积熔池所具有的反应面积 F/V 的重要影响。

在新兴铸管炼钢厂当前条件下,熔池质量为 19.5 t,熔池体积约为 2.57 m³。考虑平静的钢-渣界面反应中 $F/V = 0.685 \text{ m}^{-1}$,按平均表观脱碳量为 92.7 kg/min 计算,每分钟平均产生 CO 气泡体积为 1 061 m³,是钢液体积的 413 倍。因此,实际的反应和熔池中的搅拌极其强烈,加之高速氧气射流的冲击以及适当的低吹气体搅拌,炼钢脱碳过程中的熔池处于乳化状态,即钢液-气体-炉渣充分混合, F/V 值比平静熔池大数十甚至上百倍。

可以看出,在式(5)中, F/V 的影响远大于 β 的影响,体现出熔池整体乳化的效应,即存在着单元操作尺度结构,其尺度大约是 10⁰ m 数量级。

5 装备级尺度结构

为了提高生产速率,可采取如下 2 种措施:

(1)增大“管径”。如表 1 所列,新兴铸管炼钢厂炉容量由 10 t 扩大至 19.5 t,扩大了近 1 倍。

(2)加快物质转化速率。现代氧气转炉炼钢已达到了很高的生产效率,但仍然采用间歇式操作。如表 1 所列,新兴铸管炼钢厂年平均冶炼周期缩短,生产节奏提高了 1.8 倍。

表 1 数据表明,由生铁转化为钢液的主导反应——脱碳速率并没有与生产速率同步提高,特别是冶炼周期的时间构成中非吹炼时间由 24 min 减至 10 min,所占比例由 60% 减至 45%,这表明在脱碳操作之外还存在着不可忽略的重要效应。

对新兴铸管炼钢厂操作进一步研讨指出,炼钢作业率的改善,机械装备和自动化水平的提高,炉龄的长寿(由 289 炉次提高至 2 420 炉次),管理水平的提高等都有重要的贡献。这显示出装备级结构的效应,其尺度大约是 10¹ m 的数量级。炼钢生产效率的进一步提高,冶炼周期的缩短,该层次结构的效应将更加重要。

6 结论

以新兴铸管炼钢厂近十年的发展为例,说明现代氧气转炉炼钢实现了高效化生产,其中表现出了物质转化过程中的时空多尺度结构:微观尺度、介观尺度、单元操作级尺度、装备级尺度和工序级尺度,概括如图 4。

工序级尺度	10 ² m 炼钢厂
装备级尺度	10 ¹ m 氧气钢转炉
单元操作级尺度	10 ⁰ m 转炉炼钢熔池
介观尺度	10 ⁻¹ m, 边界层传质
微观尺度	10 ⁻¹⁰ m, 本征化学反应

图 4 炼钢高效化过程的时空多尺度结构

参考文献

- [1] Li J, Kwauk M. [J]. Progress in Natural Science, 1999, (9): 1073.
- [2] 李静海, 葛蔚. [J]. 化学进展, 1999, (5): 11 - 15.
- [3] 韩其勇. 冶金过程动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983. 177.
- [4] 李士琦, 高俊山, 王政. 冶金系统工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 13.
- [5] 奥特斯 F. 钢冶金学[M]. 倪端明, 张圣弼, 项长祥, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 316.
- [6] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 140. ■

中国石化公司选择霍尼韦尔高级过程控制、优化系统及操作人员培训模拟系统

霍尼韦尔过程控制部日前宣布,上海 SECCO 石化公司已经与霍尼韦尔签订总额为 600 万美元的合同,实施高级过程控制(Advanced Process Control, APC)和优化解决方案,并为 2005 年投入使用的由 8 个工厂组成的新建综合设施提供操作人员培训模拟系统。

霍尼韦尔高级过程控制(APC)和优化解决方案将帮助 SECCO 监测和管理整个设施中的运作。通过在规划、调度和管理部门之间建立紧密的联系,APC 使得工

厂管理人员和运行人员能够对商业需求中的变化作出响应。

霍尼韦尔将为 SECCO 提供 Shadow Plant™ 操作人员培训模拟系统,为工厂工程师、操作人员和管理人员实现“异常情况管理”(Abnormal Situation Management)提供培训服务。ShadowPlant 会根据实际工厂事件和事故,使用“若-则”(what-if)方案对个人进行培训,为工厂人员创建一个实际高效的学习环境。