

## 150 t 电弧炉炼钢跨尺度能量集成的工业试验

郁 健<sup>1</sup> 李士琦<sup>1</sup> 孙开明<sup>1,2</sup> 王惠斌<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 天津钢管集团股份有限公司,天津 300301)

**摘 要** 基于冶炼时物质转化过程中的时空多尺度结构及其效应,研究了天津钢管公司 150 t 电弧炉炼钢工艺,以在工位级实现按能量将供氧和供电两项单元进行跨尺度集成,得到工位级跨尺度能量集成的数学模型。20 炉四元炉料结构工况的工业试验表明,跨尺度集成的方法取得了较好的生产效果:平均出钢量 141.2 t;冶炼电耗 314.3 kWh/t;氧气消耗 41.0 m<sup>3</sup>/t,氧气利用率 87.7%;金属收得率 88.5%;冶炼周期 49.5 min。

**关键词** 150 t 电弧炉 炼钢 时空多尺度结构 跨尺度 能量集成

## Industrial Test on Energy Integration by Trans-scale in 150 t Electric Arc Furnace Steelmaking

Yu Jian<sup>1</sup>, Li Shiqi<sup>1</sup>, Sun Kaiming<sup>1,2</sup> and Wang Huibin<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Tianjin Pipe Group Co Ltd, Tianjin 300301)

**Abstract** Based on space-time multi-scale structure during material transformation process in melting and its effects, the 150 t electric arc furnace steelmaking process at Tianjin Pipe Co has been studied to realize the trans-scale energy integration of two unit- electric power supplying and oxygen supplying at working-level and to get math model for trans-scale energy integration at working-level. The results of 20 heats commercial test with quarternary charge structure show that better production effect is got by using the trans-scale energy integration's method, i. e. average tapping liquid amount 141.2 t; electric power consumption for melting 314.3 kWh/t; oxygen consumption 41.0 m<sup>3</sup>/t; oxygen efficiency 87.7%; metal yield 88.5% and tap-to-tap time 49.5 min.

**Material Index** 150 t EAF, Steelmaking, Space-Time Multi-scale Structure, Trans-scale, Energy Integration

钢铁生产是一类关于铁元素的流程工业,其过程是实现由钢铁原料向钢水的转化。当今钢铁生产可分为“从废钢到钢材”和“从矿石到钢材”两类流程,其不同的炼钢方法主要有以废钢为主要原料的电弧炉炼钢和以热铁水为主要原料的氧气转炉炼钢两种。时空多尺度结构是众多物质转化过程的共同特征<sup>[1~4]</sup>。目前,转炉炼钢过程的时空多尺度结构及其效应已有文献报道<sup>[5]</sup>。本文为在认识电弧炉炼钢物质转化过程中存在着时空多尺度结构<sup>[6]</sup>的基础上,进行跨尺度能量集成的工业试验研究。

### 1 时空多尺度结构

#### 1.1 微观尺度

在现代电弧炉炼钢高效化进程中,脱碳和其他冶金任务的强度都相对较弱,其促使物质转化的主导过程是热量的需求和供应,其中核心的过程是金属炉料的升温、熔化和过热。

在实际生产中,不同碳含量的铁碳合金,加热至 1 600 ℃左右所需的热量或 1 600 ℃的铁碳合金所具有的热焓值可按式(1)进行计算<sup>[7]</sup>。

$$H = C_{p(s)}(T^* - T_0) + H_f + C_{p(l)}(T - T^*) \quad (1)$$

式中: $T^*$ 、 $T_0$ 、 $T$  分别表示铁碳合金的熔点温度、初始温度、目标温度/K。

可以认为,先验的、平均的微观尺度是铁的晶格常数约为 3Å(10<sup>-10</sup> m),每吨 1 600 ℃的成品钢液具有的热焓值是 380 ~ 390 kWh/t,这是由 25 ℃的冷金属炉料转化成一吨 1 600 ℃的合格钢水的理论热量需求。

#### 1.2 介观尺度

为了以足够的速率完成原料向合格钢水的转化,必需由外部提供足够的热量。热传递遍及整个炉膛,其数学物理描述可用式(2)~(5)表示<sup>[8]</sup>。

固态炉料内传导传热:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\text{电弧和炉壁辐射传热: } q = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_a^4) \quad (3)$$

$$\text{炉气和火焰对流传热: } q = \alpha \Delta T \quad (4)$$

$$\text{熔化前沿: } \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=S} = H \rho \left( \frac{\partial S}{\partial \tau} \right) \quad (5)$$

式(2)~(5)中: $\rho$ -炉料密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $C_p$ -定压热容/[ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]; $\lambda$ -固体的导热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]; $T$ -温度/K; $\tau$ -时间坐标/s; $x, y, z$ -空间坐标/m; $q$ -热流密度/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ); $\varepsilon$ -辐射系数,是温度的函数; $\sigma$ -波兹曼常数,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ; $T_b$ -炉料表面温度/K; $T_a$ -辐射源温度/K; $\alpha$ -对流给热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ]; $\Delta T$ -外部环境温度与炉料温度之差/K; $H$ -熔化潜热/( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $S$ -熔化界面位置/m。

介观尺度现象中热量的传递涉及到的几何空间为整个电弧炉炉膛,数量级为 $10^0 \text{ m}$ 级。

### 1.3 单元操作级尺度

在供电单元操作中,根据电路的基本原理,研究电弧炉炼钢过程交流电弧稳定燃烧的条件。基于实测大量的炼钢电气运行参数,建立非线性操作电抗模型,以似合谐波的影响,绘制出炼钢电气运行特性曲线,进一步研制出许用电弧功率工作点总表<sup>[9,10]</sup>。

在供氧单元操作中,研究分析电弧炉炼钢的供氧单元特性<sup>[11]</sup>,根据理论计算,对于普通铁水,每吹入 $1 \text{ m}^3$ 的氧气,所含元素在 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时反应理论发热值约为 $4 \text{ kWh}$ <sup>[12]</sup>,故可估算出不同氧气流量吹入熔池后释放化学能的功率。

### 1.4 工位级尺度

上述单元操作是“功率单元”,是时间上的某个“点”,通过对时间积分提供钢铁原料向合格钢水转化所需的能量,认识到这是比单元操作高一级尺度所讨论的范畴,即工位级尺度。其物质转化过程的特征是:质-化学成分合格的钢水,出钢温度为 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右;量-生产出一定量的钢水;时-特定的有效供能时间。工位级的空间尺度可视为整个炉膛尺度,数量级为 $10^0 \text{ m}$ ,与介观尺度相同。

## 2 工位级跨尺度能量集成描述

基于上述认识,在工位级按能量将较低一级尺度的两项功率单元进行跨尺度集成。可认为是,根据炉料结构确定冶炼过程总的能量需求,按冶金操作确定各个时段的能量需求,每一时段内先确定物理热,然后确定氧气流量,再确定电弧功率,进而使两项功率单元对时间的积分之和满足工位级该时段的能量需求,最终使各时段的能量供应之和与实现物质转化的总能量需求相匹配。研究得出工位级总能量集成的数学物理描

述可表示为:

$$E_s^T = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_j^i dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_i^m dt \right) \geq E_q^T \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: $E_s^T$ -总能量供应量; $n$ -分 $n$ 个供能时段; $P_j^i$ -第 $i$ 时段内第 $j$ 个功率单元; $P_i^m$ -第 $i$ 时段内的电弧功率; $t$ -供能时间; $E_q^T$ -总能量需求。

基于上述工位级跨尺度能量集成的研究,体会到跨尺度集成一般的数学物理描述可能是某种物理量对时间的积分。

## 3 工业试验条件

150 t 电弧炉主要技术参数列于表1。工业试验研究连续炉号为084965~087984,共20炉,均为四元炉料结构(废钢+生铁+热铁水+直接还原铁)工况,见表2,共计生产钢水2824 t。

表1 150 t 电弧炉主要技术参数  
Table 1 Main parameters of 150 t electric arc furnace

项目	参数
公称容量/t	150
炉壳外径/mm	7 000
供电方式	三相交流
变压器额定容量/MVA	100
一次侧电压/V	33 000
二次侧电压/V	678~892
最大工作电流/kA	83.7
冷却水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	480
炉壁KT氧枪最大氧气流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$4 \times 2 500$
炉门氧枪最大氧气流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$2 \times 2 500$

## 4 结果讨论与分析

工业试验过程中,借助于自主开发的集成用辅助软件工具(即冶金模型和热模型),按上述工位级跨尺度能量集成的理论指导,在每炉炼钢过程中力争按能量需求做到供氧和供电的合理匹配,对四元炉料结构工况下的工业试验生产数据进行统计分析(表3),得出:

(1)平均出钢量为141.2 t,使用的直接还原铁粒度小,易熔化,并且采用第5孔连续加料方式,速

表2 150 t 电弧炉四元炉料结构工况,20炉

Table 2 Conditions of quarternary charges structure for 150 t electric arc furnace steelmaking, 20 heats

金属炉料	废钢	生铁	铁水	直接还原铁	合计
加入量波动范围/t	59.4~74.55	15~25	32.95~48.2	21~40	155.35~164.65
加入量平均值/t	64.2	23.5	41.1	30.8	159.6
配入比范围/%	36.8~46.8	9.4~15.9	20.8~30.6	13.4~24.3	100.0
配入比平均值/%	40.2	14.7	25.8	19.3	100.0

度快。20 炉工业试验的出钢量结果见图 1(a)。

(2) 冶炼电耗为 264.7 ~ 344.3 kWh/t, 平均 314.3 kWh/t, 比未采用跨尺度能量集成的计算机离线分析方法的生产冶炼电耗 321.2 kWh/t 低 6.9 kWh/t (图 1b)。

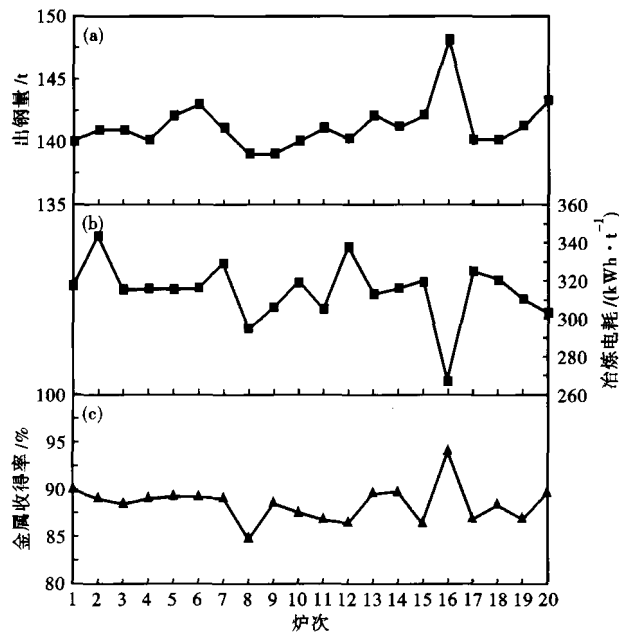


图 1 出钢量(a)、冶炼电耗(b)和金属收得率(c), 20 炉试验  
Fig. 1 Tapping liquid amount (a), electric consumption for melting (b) and metal yield (c), 20 test heats

表 4 氧气消耗及氧气利用率指标

Table 4 Index of oxygen consumption and oxygen efficiency

项目	波动范围	平均值
氧气消耗/( $m^3 \cdot t^{-1}$ )	36.3 ~ 46	41.0
氧气利用率/%	84.2 ~ 90.6	87.7

(3) 平均氧耗  $41.0 m^3/t$  (表 4), 比未采用跨尺度能量集成的计算机离线分析方法的氧耗  $41.6 m^3/t$  低  $0.6 m^3/t$ ; 氧气利用率由原来的 84.6% 提高至 87.7%。

(4) 金属收得率为 84.5% ~ 94.1%, 平均 88.5%, 与实际大生产的金属收得率接近 (图 1c)。

(5) 工业试验稳定生产节奏的能力比实际大生

表 5 工业试验和工业生产冶炼周期对比

Table 5 Comparison of tap-to-tap time between commercial test and common commercial production

冶炼周期	波动范围/min	平均值/min
工业试验	44 ~ 66	49.5
实际生产	40 ~ 81	53.6

表 3 150 t 电弧炉工业试验结果, 20 炉

Table 3 Commercial test results of 150 t electric arc furnace steelmaking, 20 heats

项目	平均值	标准差	最小值	最大值	弯度	峰度
出钢量/t	141.2	1.96	139	148	2.29	7.26
冶炼电耗/( $kWh \cdot t^{-1}$ )	314.3	16.61	264.7	344.3	-1.13	3.64
冶炼氧耗/( $m^3 \cdot t^{-1}$ )	41.0	2.82	36.3	46	0.20	-0.75
金属收得率/%	88.5	2.00	84.5	94.1	0.70	2.60
冶炼周期/min	49.5	5.93	44	66	1.67	2.32

产稍强; 其平均冶炼周期也要缩短 3.9 min (表 5)。

### 5 结论

(1) 电弧炉炼钢过程中存在着微观、介观、单元操作级、工位级等尺度级的时空多尺度结构。在同一尺度内现象的定量规律, 具有相同的数学物理描述; 对于不同尺度, 数学物理描述有所差别。

(2) 工位级跨尺度能量集成的一般方法为在工位级按能量将较低一级尺度的各项功率单元进行跨尺度集成, 其一般的数学物理描述可能是某种物理量对时间的积分。

(3) 工业试验平均出钢量 141.2 t; 冶炼电耗 314.3 kWh/t; 氧耗  $41.0 m^3/t$ , 氧气利用率 87.7%; 金属收得率 88.5%; 冶炼周期 49.5 min。

国家科学技术部支撑计划课题资助 (2008AF33B01)

### 参考文献

- 李静海, 郭慕孙. 过程工程量化的科学途径-多尺度法. 自然科学进展, 1999, 9(12): 19
- Li J. Compromise and Resolution-exploring the Multi-scale Nature of Gas-solid Fluidization. Powder Technology, 2000, 111: 50
- 孙宏伟. 化学工程的发展趋势-认识时空多尺度结构及其效应. 化工进展, 2003, 22(3): 224
- Monien B, Karsch F, Satz H. Multiscale Phenomena and their Simulation. Proceedings of International Conference. Singapore: World Scientific, 1996
- 刘明忠, 王训富, 李士琦. 冶金过程中的时空多尺度结构及其效应. 钢铁研究学报, 2005, 17(1): 10
- 孙开明. 电弧炉炼钢高效化跨尺度能量集成研究: [博士论文]. 北京: 北京科技大学, 2008
- 李夫舍茨 Б Г. 金属与合金的物理性能. 王 润, 译. 北京: 中国工业出版社, 1958
- 沈颐身, 李保卫, 吴懋林. 冶金传输原理基础. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- 孙彦辉. 高阻抗电弧炉炼钢过程电气运行研究: [博士论文]. 北京: 北京科技大学, 2002
- 李士琦, 李伟立, 刘仁刚. 现代电弧炉炼钢. 北京: 原子能出版社, 1995
- 袁章福, 潘怡芳. 炼钢氧枪技术. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- 赵 沛, 蒋汉华. 钢铁节能技术分析. 北京: 冶金工业出版社, 1999

郁 健(1979-), 男, 博士研究生, 高效、节能电弧炉炼钢。

收稿日期: 2009-12-11