

电弧炉炼钢过程的跨尺度能量集成理论研究

郁 健^{1,2)} 李士琦¹⁾ 朱 荣¹⁾ 孙开明³⁾ 王惠斌³⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 北京科大中冶技术发展有限公司, 北京 100029

3) 天津钢管集团股份有限公司, 天津 300301

摘 要 研究分析了电弧炉炼钢过程的冶金学特征, 指出供应能量对电弧炉炼钢的物质转化过程起到了决定性的作用. 观察、认识到在炼钢过程中存在着微观、介观、单元操作级和工位级等尺度级的时空多尺度结构. 在工位级按能量将供氧、供电两项功率单元进行跨尺度集成, 形成了工位级跨尺度能量集成的一般方法, 并用数学公式进行了描述. 工业试验和工业生产表明: 跨尺度集成的理念和方法与炼钢生产相结合可取得较好的生产效果, 平均冶炼电耗为 $271.1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$, 氧气消耗为 $40.4 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, 冶炼周期为 52.9 min .

关键词 电弧炉; 炼钢; 时空结构; 多尺度; 能量集成

分类号 TF741.5

Theoretical research on trans-scale energy integration in the electric arc furnace steelmaking process

YU Jian²⁾, LI Shi-qi¹⁾, ZHU Rong¹⁾, SUN Kai-ming³⁾, WANG Hui-bin³⁾

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

2) Sinomet Technologies Co., Ltd., University of Science and Technology Beijing, Beijing 100029, China

3) Tianjin Pipe Group Co., Ltd., Tianjin 300301, China

ABSTRACT Metallurgical characteristics in the electric arc furnace steelmaking process were analyzed. The result showed that energy supply played a decisive role on material transformation. On the basis of the realization of space-time multi-scale structures which contained microscale, mesoscale, unit operation and working operation scale, trans-scale integration on two units of oxygen supplying and power supplying was realized according to energy in working operation scale and a general method of energy integration was formed. Its mathematical and physical expressions could be described. Industrial test and industrial production indicated that great production efficiency was made in combination with the idea and method of trans-scale integration. The smelting electricity consumption was $271.1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$, the oxygen consumption $40.4 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, and the smelting period 52.9 min on average.

KEY WORDS electric arc furnace (EAF); steelmaking; space-time structures; multi-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^[1-5]. 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^[6], 而对于电弧炉炼钢过程的

时空多尺度结构的研究, 目前尚未有人研究.

本文旨在研究、认识电弧炉炼钢的物质转化过程中存在着什么样的时空多尺度结构, 每个尺度级的过程各自具有什么样独特的数学物理特征, 并进一步在单元操作级和工位级这两个相邻尺度之间进行跨尺度能量集成研究. 选择天津钢管公司 150 t 电弧炉炼钢过程为对象进行工业生产试验, 力争取得高效、节能的效果.

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2008AF33B01)

作者简介: 郁 健 (1979-), 男, 博士研究生; 李士琦 (1942-), 男, 教授, E-mail: lishiqi@metall.ustb.edu.cn

1 电弧炉炼钢过程的冶金学特征

将传统电弧炉炼钢与普通氧气转炉炼钢过程的物质转化特征对比结果列于表 1。可以看出,在典型工况下^[7],氧气转炉炼钢过程的物质转化速率大约是电弧炉炼钢的 2.5 倍,其中氧气转炉炼钢过程的脱碳速率等化学反应强度是电弧炉炼钢的 5 倍以上。在电弧炉炼钢过程中,要将温度为 25℃的冷炉料(废钢和生铁)加热至 1600℃,元素氧化放热、铁

水物理热以及辅助能源提供的化学能远远不能满足热量的需求量,还需补充 359 kW·h⁻¹的热量,约占总能量的 64%。氧气转炉炼钢过程则是将 1200℃(配加部分冷废钢,温度有所降低)的铁水,经过吹氧去除铁熔池中 C、S 和 Mn 等元素,其中以脱碳为主,元素氧化放出的热量足以使钢水温度升至 1640℃,且还有 29 kW·h⁻¹的富余热量。综上所述,可认为供应能量对电弧炉炼钢的物质转化过程起决定性的作用。

表 1 电弧炉炼钢与氧气转炉炼钢过程的冶金学特征

Table 1 Metallurgical characteristics in the electric arc furnace steelmaking process and the oxygen converter steelmaking process

冶炼过程	物质转化 时间 /min	物质转速 率 / (t h ⁻¹)	平均脱碳速率		平均脱硅速率		能量需求 / (kW·h t ⁻¹)	能量供应 / (kW·h t ⁻¹)	补加热量 / (kW·h t ⁻¹)
			%·min ⁻¹	kg min ⁻¹	%·min ⁻¹	kg min ⁻¹			
电炉 EAF	50	180	0.014	21.4	0.006	10.1	559	200	359
转炉 BOF	20	450	0.185	299.0	0.037	59.4	548	577	-29
EAF+BOF	1:0.4	1:2.5	1:13.2	1:14.0	1:6.1	1:5.9	1:1	1:2.9	-

2 时空多尺度结构

电弧炉炼钢是一类关于铁元素的物质转化的过程。通过观察、研究和分析其过程的冶金学特征,可以认识到存在着微观、介观、单元操作级和工位级等多个时空尺度的结构,每个尺度级的过程具有各自独特的数学物理特征。

2.1 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,促使物质转化的主导过程是热量的供应,其中核心的过程是金属炉料的升温、熔化和过热。

升温过程中不同温度下纯铁的热容及相变热焓值见文献[8]。纯铁从室温 25℃至 1640℃的升温过程中,共经历了四次相变,即 α 铁→β 铁→γ 铁→δ 铁→液态铁。计算可得出纯铁经过升温、熔化和过热,其整个过程的总焓变约为 400.2 kW·h⁻¹。

在实际生产中,不同碳含量的铁碳合金加热至 1640℃左右所需的热量或 1640℃的铁碳合金所具有的热焓值可按式(1)计算:

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

式中, H 为热焓, kJ kg⁻¹; C_{q,s}、C_{q,l} 分别为物体固态、液态时的定压热容, kJ (kg K)⁻¹; T^{*}、T₀ 和 T 分别为铁碳合金的熔点温度、初始温度和目标温度, K; H_f 为熔化潜热, kJ kg⁻¹。

可以认为,平均的微观尺度效应是铁的晶格常数约为 3 Å (1 Å = 10⁻¹⁰ m)。每吨 1640℃的成品钢液具有的热焓值为 390~400 kW·h⁻¹。

2.2 介观尺度

为了以足够的速率完成原料向合格钢水的转化,必须由外部提供足够的热量。热传递遍及整个炉膛,包括固态炉料内传导传热、电弧和炉壁辐射给热、炉气和火焰对流给热、相变及熔化前沿的推进、液体内部对流传热和化学反应热等,其数学物理描述表达式可见文献[9]。在此仅以固态炉料内传导传热为例,其数学物理表达式可用式(2)所示:

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

式中, ρ 为固体炉料密度, kg m⁻³; C_p 为定压热容, kJ (kg K)⁻¹; λ 为固体的热导率, W (m K)⁻¹; T 为温度, K; τ 为时间, s; x、y 和 z 为空间坐标, m。

综上所述,介观尺度现象中热量的传递涉及的几何空间为整个电弧炉炉膛,数量级为 10⁰ m³。

2.3 单元操作级尺度

电弧炉炼钢过程的两项主要功率单元是交流电弧和集束射流供氧。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,以拟合谐波的影响。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^[10-11]。在供氧单元操作中,研究分析电弧炉炼钢的供氧单元特性^[12],进行超音速氧枪设计,并对超音速氧气射流进行了数值模拟。根据理论计算,对于普通铁水吹入 1 m³的氧气,所含元素在 1600℃时反应理论发热值约为 4~5 kW·h⁻¹^[13],故可

估算出不同氧气流吹入熔池后化学能的输入功率.

单元操作级空间尺度的数量级为 10^{-1} m

2.4 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：(1)质——化学成分合格的钢水，出钢温度为 1640°C 左右；(2)量——生产出一定量的钢水；(3)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 m 与介观尺度相同。

2.5 尺度之间的关系

电弧炉炼钢过程的时空多尺度结构见图 1。从上述研究可以看出，尺度的结构是通过其效应表现出来的，而尺度的结构及其效应又是在物质转化过程中展现的。假如固体炉料熔化非常慢，慢到与传热同步，即认为受热与散热等量同步进行，则单元操作级尺度的效应就表现不出来，也就是说不能观测到单元操作级尺度结构的存在。在某一个特定尺度级别中得到的规律，放大到更大尺度级别中去是不适用的，同样缩小到更小尺度级别中也是不适用的。

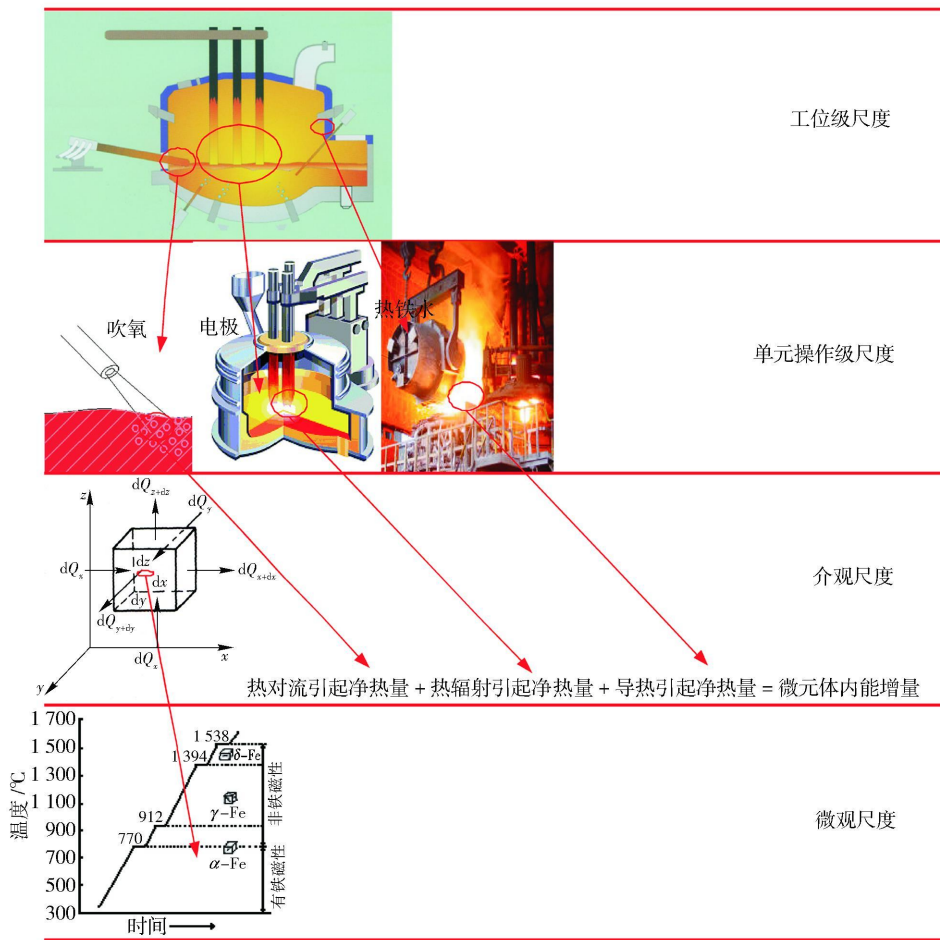


图 1 电弧炉炼钢过程中存在的时空多尺度结构

Fig 1 Space-time multi-scale structure existing in the EAF steelmaking process

对于整个电弧炉炼钢过程而言，仅仅研究一个微观尺度的物料熔化是没有意义的，只有各个尺度之间相互影响、相互协调才能够达到整体的优化。本文在认识到时空多尺度结构及其效应的基础上，观察到电弧炉炼钢过程的物质转化主要是通过热量的供应来实现，对于微观尺度的物料熔化和介观尺度的热传递效应已有著作予以阐述^[9-14]，这里暂且

不讨论。本文重点研究炼钢过程中单元操作级和工位级尺度之间的跨尺度能量集成。

3 跨尺度能量集成

基于上述认识，试探性地进行相邻两个尺度之间的集成研究，即在工位级按能量将较低一级尺度的两项功率单元进行有效集成。

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.

工位级跨尺度能量集成的一般步骤如下.

(1) 分时段. 按冶金操作将有效供能时间 t_n 分为 n 个时段, 开始通电时刻记为零时刻, 第 i 时段的结束时刻记为 t_i ($i=1, 2, \dots, n$), 其时间长度记为 t_i 则有

$$t_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

(2) 低一级的单元操作. 第 i 时段内共有 m 个功率单元, 先确定第 i 时段第 j 个功率单元, 可表示为 P_{ij}^j ($j=1, 2, \dots, m-1, j \neq m$), 最后确定的是电弧功率, 记为 P_i^n .

(3) 第 i 时段的能量需求. 根据炉料结构及有效供能时间, 可确定达到冶炼要求的总能量需求, 记为 E_i^r . 其中第 i 时段的能量需求 E_{ij} 可表示为

$$E_{ij} = \sum_{j=1}^m \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_{ij}^j dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_i^n dt \quad (4)$$

(4) 工位级跨尺度能量集成. 工位级总能量集成的数学物理描述可表示成

$$E_s^r = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_{ij}^j dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_i^n dt \right) \geq E_i^r \quad (5)$$

($i=1, 2, \dots, n$)

式中, E_s^r 为累计能量供应值, kW·h; E_i^r 为能量总需求值, kW·h; t 为时间, s.

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.

4 工业试验

4.1 模型应用思路

研究中建立了电弧炉炼钢过程能量集成模型(命名为 EAF SEM), 其中包括炼钢过程的冶金模型和热模型. 在此基础上采用“先氧后电”的供能决策顺序, 即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(即化学能的输入), 再确定电弧功率, 进而使能量供应满足该时段的能量需求, 最终达到各时段的能量供应之和与总能量需求的匹配.

为了便于理解和掌握, 给出电弧炉冶炼过程的跨尺度能量集成的逻辑框图绘于图 2.

4.2 工业试验

2009年3月8日, 在天津钢管公司 150 电弧炉炼钢进行工业试验. 连续炉号 091472 ~ 091491, 共 20 炉, 均为三元炉料结构(废钢 + 生铁 + 热铁水)工况, 共计生产钢水 2 694 t. 其平均炉料结构为: 废钢配入量 95.6 t, 占 63.8%; 生铁配入量 14.4 t, 占 9.6%; 铁水配入量 39.8 t, 占 26.6%; 总装入量 149.8 t.

150 电弧炉炼钢使用三元炉料的工况下, 采用两篮装料制度, 故按炼钢工艺要求和冶金操作, 整个冶炼过程由四个供能时段和三个非供能时段组成.

一次装料: 补炉后装入第一篮料, 废钢 50.2 和生铁 7.5 t, 时间长度 $t_1=5$ min.

供能时段 I: 第一篮料装炉完毕, 开始通电直至“穿井”结束, 时间长度 $t_2=8$ min.

供能时段 II: 由炉门向炉内兑入铁水 39.8 t, 铁水可认为是瞬间加入的, 至炉料熔化 70% 左右, 停电, 时间长度 $t_3=9$ min.

二次装料: 装入第二篮料, 废钢 45.4 和生铁 6.9 t, 时间长度 $t_4=3$ min.

供能时段 III: 第二篮料装料完毕通电, 至熔化期结束, 时间长度 $t_5=11$ min.

供能时段 IV: 氧化期开始, 同时喷入碳粉造泡沫渣, 至氧化期结束, 时间长度 $t_6=15$ min.

出钢: 直至出钢完毕, 时间长度 $t_7=3$ min.

冶炼过程中各时段内选择合理的供氧和供电参数列于表 2.

在以往的炼钢生产过程中, 未采用能量集成的思想, 其供电单元与供氧单元的操作参数是独立控制的, 而且采用的是固化的计算机供电曲线(图 3)和供氧曲线(图 4)进行炼钢生产. 炼钢生产过程中一般优先考虑电能的强化输入, 再考虑化学反应任务, 往往不易控制钢水成分和温度, 最终需人工不断进行调节工艺参数方可达到出钢要求.

对比表 2、图 3 和图 4 可知, 采用能量集成的思想指导电弧炉炼钢生产, 可借助于辅助软件工具(EAF SEM)计算出冶炼进程中各时段的能量需求, 从而指导供氧和供电参数的及时调整, 达到按需供能. 采用此方法比以往固化的供氧和供电曲线更具灵活操作性, 易实现炼钢终点控制, 满足炼钢高效、节电的目的.

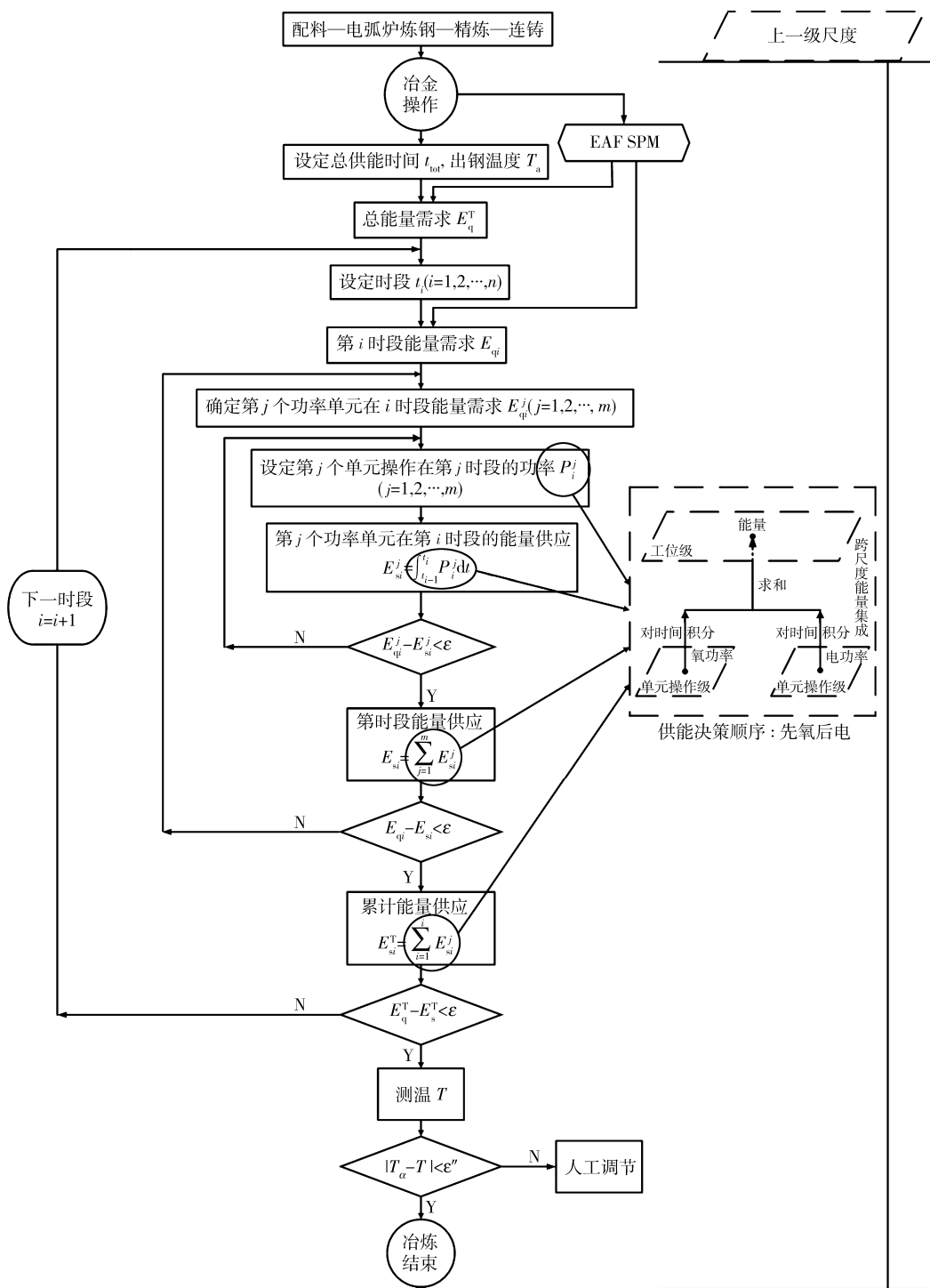


图 2 能量集成逻辑框图

Fig 2 Logical diagram of energy integration

4.3 生产指标对比

在三元炉料结构工况下,原工况、工业试验和现工况之间的生产指标作了比较分析,结果列于表 3 可以看出炼钢生产过程中由于炉料结构参数不同,无法给出统一、精确的定论。但是,综合各项生产指

标以工业试验为最佳,其平均钢铁料消耗为 $1126.2 \text{ kg } \tau^{-1}$,冶炼电耗为 $271.1 \text{ kW} \cdot \text{hr } \tau^{-1}$,氧气消耗为 $40.4 \text{ m}^3 \cdot \tau^{-1}$,平均冶炼周期为 52.9 min 。上述结果充分说明了电弧炉炼钢过程能量集成理念与炼钢实际相结合,可以达到高效、节电的效果。

表 2 各时段选择合理的供氧和供电参数

Table 2 Reasonable parameters of oxygen supply and power supply in various time intervals

冶炼过程	时间长度 / min	总需氧量 / m ³	设定总氧气流量 / (m ³ · h ⁻¹)	总能量需求 / (kW · h)	物理热 / (kW · h)	化学热 / (kW · h)	供电工作点
一次装料	4	—	弱吹	—	—	—	—
时段 I	8	160	1200	6 442	0	836	U ₂ = 811 V, I ₂ = 62 kA P _{arc1} = 67.27 MW
时段 II	9	1502	10000	35 894	12 644	11 945	U ₂ = 865 V, I ₂ = 66 kA P _{arc2} = 75.44 MW
二次装料	3	—	弱吹	—	—	—	—
时段 III	11	1874	10400	28 062	0	14 512	U ₂ = 811 V, I ₂ = 62 kA P _{arc3} = 67.27 MW (2 min); U ₂ = 865 V, I ₂ = 66 kA P _{arc2} = 75.44 MW (9 min)
时段 IV	15	1965	8000	20 502	0	4 358	U ₂ = 811 V, I ₂ = 58 kA P _{arc4} = 64.66 MW
出钢	3	—	弱吹	—	—	—	—

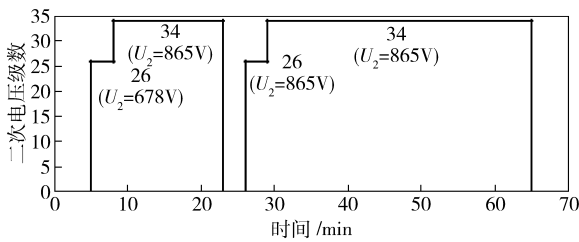


图 3 供电曲线

Fig 3 Power supply curve

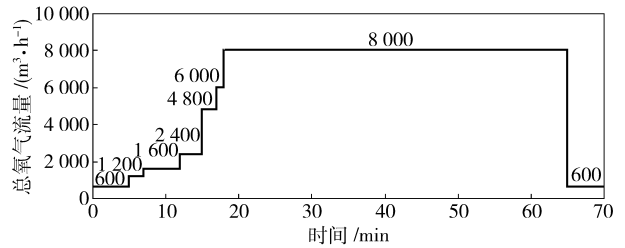


图 4 供氧曲线

Fig 4 Oxygen supply curve

表 3 三元炉料结构工况下的生产指标对比结果

Table 3 Production index contrast of three kinds of furnace charge

工况	冶金操作区别	统计时间	钢铁料消耗 / (kg · t ⁻¹)	冶炼电耗 / (kW · h · t ⁻¹)	冶炼氧耗 / (m ³ · t ⁻¹)	冶炼周期 / min
原工况	供氧供电单独控制	2002 年全年	1195.9	499.0	51.6	69.7
工业试验	计算机离线指导	2009 年 3 月 8 日	1126.2	271.1	40.4	52.9
现工况	供氧供电综合考虑	2009 年 4 月	1129.4	275.8	41.9	54.0

5 结论

(1) 通过对电弧炉炼钢过程的冶金学特征的分析研究, 与转炉炼钢过程相比, 可认为供应能量对电弧炉炼钢的物质转化过程起到了决定性的作用. 电弧炉炼钢过程中存在着微观、介观、单元操作级和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) 指出了工位级跨尺度能量集成的一般方法: 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, 供能决策顺序为“先氧后电”.

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) 通过对比分析原工况、工业试验和现工况的各项生产指标, 充分说明了电弧炉炼钢过程跨尺度能量集成理念与炼钢实际相结合, 可以达到高效、节电的效果, 为今后电弧炉炼钢高效、节能发展提供了研究思路.

参 考 文 献

[1] Guo M S, Hu Y, Wang X, et al. Multi-scale Effects in Material Transformation Process. Harbin: Heilongjiang Education Press, 2000
(郭慕孙, 胡英, 王夔, 等. 物质转化过程中的多尺度效应. 哈

- 尔滨: 黑龙江教育出版社, 2000)
- [2] Li J H, Guo M S. Process engineering quantification: a scientific way method of multi-scale. *Prog Nat Sci*, 1999, 9(12): 19
(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)
- [3] Li J. Compromise and resolution: exploring the multi-scale nature of gas-solid fluidization. *Powder Technol*, 2000, 111(1): 50
- [4] Sun H W. Focus of chemical engineering: Understanding space-time multi-scale structure. *Chem Ind Eng Prog*, 2003, 22(3): 224
(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)
- [5] Monien B, Karsch F, Satz H. Multi-scale Phenomena and their simulation// *Proceedings of International Conference*. Singapore: World Scientific, 1996
- [6] Liu M Z, Wang X F, Li S Q. Space-time multi-scale structure and its effect in metallurgical process. *J Iron Steel Res*, 2005, 7(1): 10
(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, 7(1): 10)
- [7] Li C X. *Iron and Steel Plant Principle of Design* (Final Volume). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997
(李传薪. 钢铁厂设计原理 (下册). 北京: 冶金工业出版社, 1997)
- [8] Лившиц В Г. *Metal and Alloy Physical Property*. Beijing: Chinese Industry Press, 1958
(李夫希茨 В Г. 金属与合金的物理性能. 北京: 中国工业出版社, 1958)
- [9] Shen Y S, Li B W, Wu M L. *Metallurgy Transmission Principle Foundation*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000
(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)
- [10] Sun Y H. Study on Electric Operating of High Impedance EAF Steelmaking Process. Dissertation, Beijing University of Science and Technology, 2002, 100
(孙彦辉. 高阻抗电弧炉炼钢过程电气运行研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2002, 100)
- [11] Li S Q, Li W L, Liu R G. *Modern Electric Arc Furnace Steelmaking*. Beijing: Atomic Energy Press, 1995
(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)
- [12] Yuan Z F, Pan Y F. *Steelmaking Oxygen Lance Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
(袁章福, 潘贻芳. 炼钢氧枪技术. 北京: 冶金工业出版社, 2007)
- [13] Zhao P, Jiang H H. *Iron and Steel Energy Saving Technical Analysis*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999
(赵沛, 蒋汉华. 钢铁节能技术分析. 北京: 冶金工业出版社, 1999)
- [14] Oeters F. *Steel Metallurgy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997
(奥特斯. 钢冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 1997)