

高炉—转炉区段物质流运行优化

郦秀萍¹, 韩伟刚¹, 张春霞¹, 刘建华², 魏志军², 吴重远²

(1. 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081;

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北唐山 063200)

摘要: 高炉-转炉区段是钢铁生产流程中物质流输入输出种类和量最多的区段, 同时又是联接高温物质流运行的重要区段。区段物质流运行优化, 尤其是铁水输送与处理过程的优化是影响铁水预处理铁水到站温度和转炉冶炼节奏的重要因素。在分析三家不同钢厂“一包到底”技术的物质流网络结构的基础上, 提出了高炉-转炉区段物质流网络设计的基本原则。以首钢京唐钢厂为例, 应用排队论理论分析了理想状态下高炉-转炉区段铁水包周转模式, 实际运行模式与理想模式对比分析可知, 理想模式下, 铁水包在线运行个数可以减少1~2个, 高炉出铁至KR铁水脱硫站的铁水温降低20℃以上, 而且铁水包寿命可提高15.5%。高炉-转炉区段物质流运行优化取得了显著的节能和减排效果, 为钢铁生产流程的绿色化提供了重要支撑。

关键词: 高炉-转炉区段; 物质流网络; 排队论; 运行优化

中图分类号: TF4

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2017)01-0053-08

1 高炉-转炉区段界面物质流运行模式的发展

所谓“界面”是相对于钢铁生产流程中烧结、炼铁、炼钢、连铸、热轧、冷轧等主体工序而言的两相邻工序(或区段)之间的链接部分或过渡过程。界面匹配模式包括相邻工序之间的衔接-匹配技术、协调-缓冲技术、物质流的物理和化学性质调控技术, 以及相关装置(装备)的容量、个数及能力匹配等丰富的内容。

就高炉-转炉区段而言, 其“界面”是指存在于炼铁、炼钢这两个相对“刚性”的工序间的一段相对“柔性”的“界面”; 它包含炼铁、炼钢工序之间多维物质流的衔接、传递、匹配和缓冲过程, 还包含完成这些过程所耗费的时间、占有

的空间, 以及其所属工序、装置、容量、运输设备、路线、调度管理和控制程序等多方面的内容^[1]。

高炉-转炉区段界面物质流运行主要是要保证稳定、高质量地提供铁水, 该区段的界面匹配对钢铁生产流程的动态-有序化运行起着重要作用, 尤其是对优化铁水运输节奏、铁水入炉温度起着决定性作用。同时, 高炉-转炉区段工艺技术界面合理与否对减少物料、能源消耗及环境负荷来说, 也具有极其重要的作用。

简单来说, 高炉-转炉区段界面模式是铁水预处理技术与铁水储运设备的不同组织形式^[2]。

模式 I: 受铁罐-混铁炉-兑铁包;

模式 II: 受铁罐-兑铁包;

模式 III: 鱼雷罐脱硫-兑铁包;

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2016-12-28

作者简介: 郦秀萍(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向为冶金流程工程与环境工程。E-mail: xp-li@163.com

韩伟刚(1987-), 男, 博士, 研究方向为钢铁制造流程界面技术与智能化。E-mail: hanweigang1987@163.com

张春霞(1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向为冶金流程工程与环境工程。E-mail: hellenzster@163.com

模式 IV：兑铁包多功能化（“一包到底”）。

模式 I 多用于传统的中小转炉流程，混铁炉作为中间缓冲器，可以起到对时间节奏、铁水温度、铁水成分三大物流因素的缓冲调节，但也存在兑铁频繁、铁水温降大、烟尘污染、能耗增加等缺点。受环保压力和节能减排的约束，除少数企业仍在使用的，该模式正逐步被淘汰。

模式 II 指当受铁罐和转炉容量不匹配时，需要将铁水从受铁罐倒入与转炉容量相适应的兑铁包中。该模式一般是老厂改造的产物，虽然比模式 I 减少一次兑铁过程的温降和污染，但由于缺少缓冲调节，并不适用于过程稳定性差的中小转炉流程，而新建的钢铁生产流程也没必要采用该模式，因此，模式 II 已基本被淘汰。

模式 III 是传统大中型钢铁厂高炉-转炉区段界面较为普遍采用的模式，具有机动性能好、操作连贯、灵活、保温性能好、稳定性好等优点，而且还具有铁水预处理、调整铁水温度、成分、重量以及缓冲等功能，同时取消了混铁炉及其配套设施。但该模式也存在一定缺陷，比如三脱效果较差，效率低，回硫严重，需建设倒罐坑，工序环节多，投资大，生产效率低等。因此，高炉-转炉区段界面采用鱼雷罐储运铁水的合理性开始受到质疑。

模式 IV 是近年来新兴起的铁水包多功能化（“一包到底”）模式，即流程采用具备铁水承接、运输、预处理、转炉兑铁等多功能的铁水包，从出铁场下承接铁水，运到炼钢车间，不经过倒包，铁水在包中进行预处理后，直接兑入转炉^[3]。

2 高炉-转炉区段“一包到底”界面模式的实践

“一包到底”界面模式虽是近年来刚刚发展起来的，但在实践应用中，该模式在提高运行效率、节约运行成本、保障冶金质量及节能减排方面都取得了较好的效果，逐渐被诸多钢铁企业接受，

并根据各厂装置和流程特点开发出了各具特色的“一包到底”模式，进行了进一步实施。

2.1 沙钢 5800m³ 高炉-180t 转炉“一包到底”界面模式

沙钢 5800m³ 高炉-180t 转炉区段“一包到底”界面模式网络结构如图 1 所示。

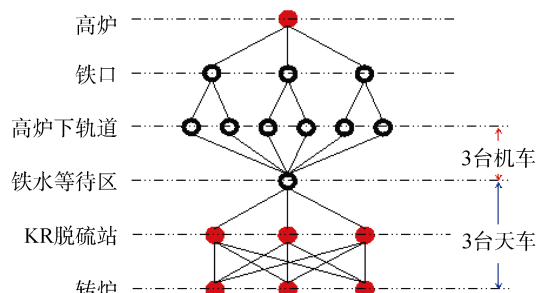


图 1 沙钢 5800m³ 高炉-180t 转炉区段“一包到底”界面模式

由图 1 可见，沙钢 5800m³ 高炉-180t 转炉区段“一包到底”界面模式的特点是：

- (1) 网络节点数 17 个；
- (2) 高炉、KR、转炉是“1-3-3”结构；
- (3) 高炉、铁口、炉下轨道是“1-3-6”结构；
- (4) KR 布置在炼钢厂内，铁水等待区位于 KR 之前；
- (5) 高炉转炉中心距 980m，铁水包实际运输距离为 1268~1370m；
- (6) 铁水采用“机车+天车”运输。

2.2 重钢新区 2500m³ 高炉-210t 转炉“一包到底”界面模式

重钢新区 2500m³ 高炉-210t 转炉区段“一包到底”界面模式网络结构如图 2 所示。

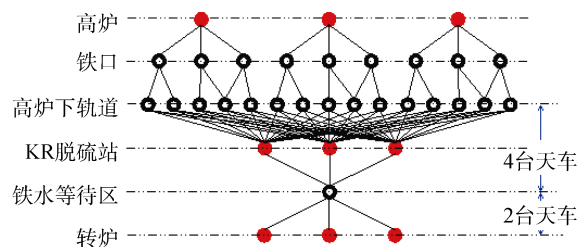


图 2 重钢新区 2500m³ 高炉-210t 转炉区段“一包到底”界面模式

由图 2 可见, 重钢新区 2500m^3 高炉-210t 转炉区段“一包到底”界面模式的特点是:

- (1) 网络节点数 34 个;
- (2) 高炉、KR、转炉是“3-3-3”结构;
- (3) 高炉、铁口、炉下轨道是“3-9-15”结构;
- (4) KR 布置在炼铁厂内, 铁水等待区位于 KR 之后, 解放了炼钢区天车的能力, 同时减少了炼钢区天车的数量;
- (5) 高炉-转炉中间距离为 360m, 取消了厂内运输铁路, 用 4 台天车取待了近 10 台机车, 而且物流供应关系更加灵活;
- (6) 铁水采用“过跨车+天车”运输。

2.3 首钢京唐钢厂 5500m^3 高炉-300t 转炉“一包到底”界面模式

首钢京唐钢厂 5500m^3 高炉-300t 转炉区段“一包到底”界面模式网络结构如图 3 所示。

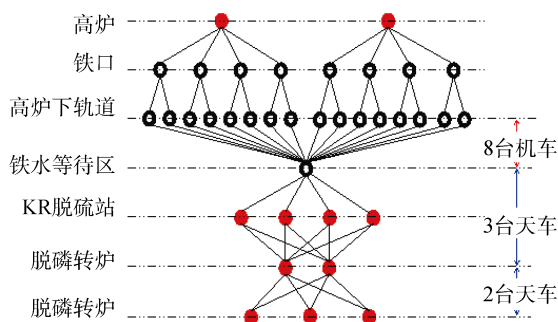


图 3 首钢京唐钢厂 5500m^3 高炉-300t 转炉区段“一包到底”界面模式

由图 3 可见, 首钢京唐钢厂 5500m^3 高炉-300t 转炉区段“一包到底”界面模式的特点是:

- (1) 网络节点数 36 个;
- (2) 高炉、KR、脱磷转炉是“2-4-2”结构;
- (3) 高炉、铁口、炉下轨道是“2-8-16”结构;
- (4) 高炉-转炉中间距离为 910m, 铁水包运距为 981~1680m;
- (5) 铁水采用“过跨车+天车”运输。

由以上分析可见, 从动态-有序运行层次上考虑的高炉-转炉区段界面模式的优化, 在其物质流

网络设计方面应注意以下问题:

(1) 高炉-转炉能力匹配和合理座数

设备大型化为简化流程静态结构和运行结构、减少高炉出铁温降提供了有利条件, 但设备应该是流程结构优化前提下的大型化, 而不是能力越大越好。应根据产品结构和生产规模合理选择装置配置。高炉座数以 2 座为宜, 一个炼钢厂内的转炉数不宜超过 3 座。

(2) 流程物质流运行网络优化与运输方式选择

KR 处理工位和能力、布置位置, 以及铁水包运输及等待区域规划、铁水包运输方式、顺序优化等均应合理配置。

3 高炉-转炉区段界面模式物质流运行数学模型及应用

3.1 高炉-转炉区段界面模式物质流运行过程数学描述

高炉-转炉区段界面的物质流主要是铁水, 铁水的输送由铁水承载容器、铁水输送装置完成。铁水输送的时间、温度变化受到铁水承载容器周转过程的影响, 因此, 高炉-转炉区段物质流运行过程就转化为了铁水承载容器的周转过程。本文以铁水包多功能化(“一包到底”)模式周转过程为研究对象, 其周转过程示意图如图 4 所示。

铁水包周转过程分为重包过程和空包过程, 这两个不同的运行阶段由不同的事件组成, 周转过程的事件解析如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 高炉-转炉区段界面的铁水包周转过程由事件按时间序列组成, 每一个事件的完成时间对应一个时间区间, 在相应的时间区间内, 铁水温度随之而发生变化。高炉-转炉区段界面铁水包周转过程的铁水包作业事件按其发生的特点分析, 可看成是服务排队系统中的顾客接受服务:

- 1) 铁水包空包由机车送至高炉炉下等待受铁服务;



图4 高炉-转炉区段界面铁水包多功能化模式周转过程示意图

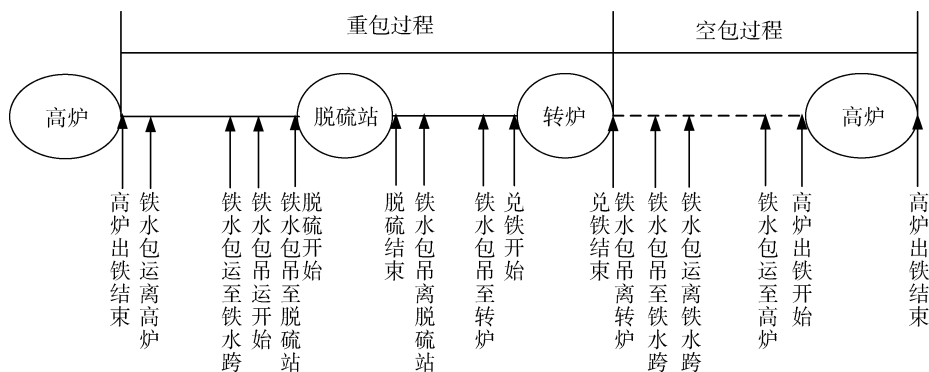


图5 高炉-转炉区段界面铁水包周转过程事件解析

- 2) 铁水包受铁完成后排队等候机车运输服务；
- 3) 机车将重包运送至铁水预处理站排队等待铁水预处理服务；
- 4) 完成铁水预处理的铁水包重包等待吊车输送服务；
- 5) 铁水包重包由吊车吊运至转炉处排队接受兑铁服务；
- 6) 完成兑铁服务的铁水包空包接受检包，检包后的铁水包空包排队等候机车运输服务，准备进入下一次受铁排队循环。

由此可见，高炉-转炉区段界面铁水包周转过程可看成是多重服务台的服务排队系统，其基本结构由输入过程、服务机构和排队规则 3 个部分构成。排队系统的进程和特点取决于这三个主要因素的取值规则。

一般情况下，高炉-转炉区段界面铁水包周转过程排队系统的顾客，即铁水包，是分批到达各个服务站的，批量为固定值，不同批次之间遵循先到先服务（FCFS）规则，同批到达的顾客按一

定规则排队接受服务。铁水包没有受铁或兑铁等作业服务就一直等待下去，所以排队规则为等待制。

根据排队论理论^[4]，若不考虑天车作业系统，可将高炉-转炉区段的铁水包周转过程分为五个串联的排队系统：出铁排队系统、重包运输排队系统、脱硫排队系统、转炉排队系统和空包运输排队系统（图 6）。由排队论理论可以计算得到各个排队系统在达到统计平衡时的等待时间，从而可计算得出铁水包的周转时间。

3.2 高炉-转炉区段界面铁水包周转过程的排队论数学模型

由铁水包周转过程的物理过程分析可知，高炉-转炉区段“一包到底”界面模式的物质流运行过程为多重服务台串联的排队系统。进一步分析可以发现，系统中每个环节的服务台均存在两种排队方式：

- (1) “单队多服务台”的排队方式（见图 7），即 $M/M/1/k$ 队列模型，每个队列对应独立的服务台，有 c 个独立的 $M/M/1/k$ 系统。

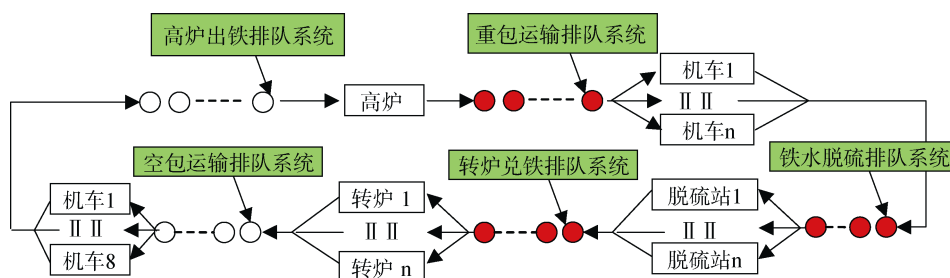


图 6 铁水包周转过程排队系统物理模型

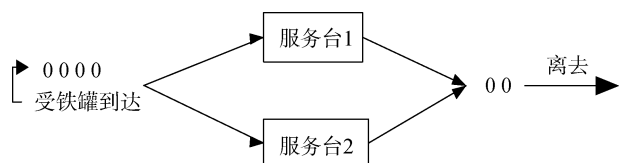


图 7 单队列多服务台排队

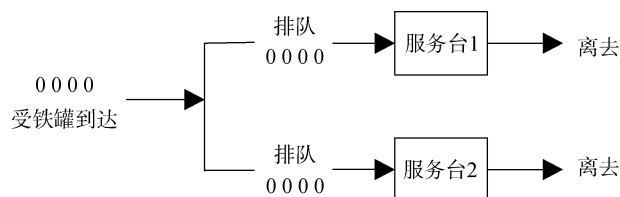


图 8 多队列多服务台排队

(2) “多队多服务台”的排队方式 (见图 8), 即 M/M/c 队列模型。受铁包单个到达, 不同受铁包相继到达时间间隔服从参数为 λ 的负指数分布; 每个服务台的服务时间相互独立, 且服从参数为 μ 的负指数分布; 系统中共有 c 个服务台。其中, $\rho = \lambda / \mu$ 。

由此可推导出本排队系统稳态的主要指标为:

(1) 等待服务的平均受铁包数:

$$L_q = \frac{\rho^n \rho_n p_0}{n!(1 - \rho_n)^2}$$

(2) 总平均受铁包数 (包括等待和正在服务的受铁包):

$$L = \frac{\rho^n \rho_n p_0}{n!(1 - \rho_n)^2} + \rho$$

(3) 每个受铁包的平均等待时间:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$$

(4) 每个受铁包的平均逗留时间:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

(1) ~ (4) 指标越小, 排队系统性能越好。

3.3 铁水包周转过程模型应用案例分析

3.3.1 首钢京唐钢厂铁水包周转过程排队论模型分析

应用所建立的排队论模型对首钢京唐钢厂铁水包周转过程进行实例分析。首钢京唐钢厂铁水包周转过程排队论物理模型如图 9 所示。

其中, 重包运输和空包运输排队系统服务台是流动的机车, 且机车数量充足, 可以随时满足运输系统的需求, 因此将其排队系统简化合并到相关的其他系统中: 重包运输排队系统合并简化

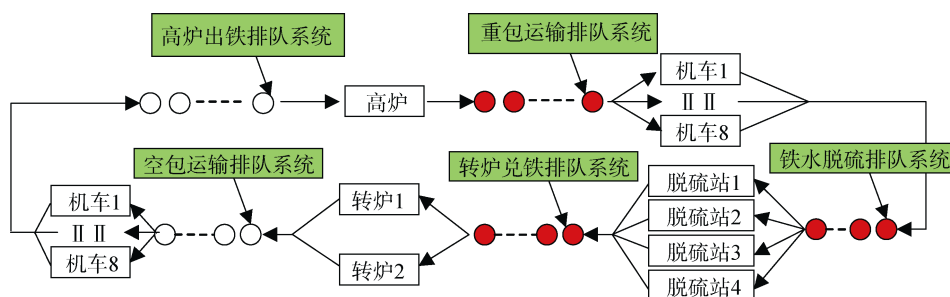


图 9 首钢京唐钢厂铁水包周转过程排队论物理模型

到脱硫排队系统, 即重包运输系统为脱硫排队系统的顾客流; 空包运输排队系统合并简化到出铁排队系统中, 即空包运输排队系统为出铁排队系统的顾客流。

因此, 首钢京唐钢厂高炉-转炉区段界面铁水包运行排队系统物理模型可简化为三个串联的排队系统:

(1) 高炉出铁排队系统

此排队系统的顾客为从转炉车间到达高炉的铁水包空包, 顾客来源可近似认为是无限的, 假定:

1) 顾客到达的间隔时间为负指数分布, 且间隔时间相互独立, 单位时间内达到的顾客数为 λ_1 ; 服务台为高炉及火车;

2) 服务时间为火车将铁水包输送至炼钢车间并返回至高炉铁水包包位之间的时间, 假定服务时间服从参数为 μ_1 的负指数分布, 服务时间相互独立;

3) k 为高炉下铁水包的等待位。

当 2 座高炉同时出铁时, 整个系统可以抽象为 2 个 M/M/1/ k 系统。

(2) 脱硫排队系统

顾客为从高炉运至炼钢车间的铁水包重包, 顾客来源也可认为是无限的, 假定:

1) 顾客到达的间隔时间为负指数分布, 且间隔时间相互独立, 单位时间内达到的顾客数为 λ_2 ;

2) 服务台为脱硫站和天车;

3) 服务时间为从铁水包重包吊运到脱硫站、到铁水脱硫后吊离脱硫站的整个过程的时间, 假定服务时间服从参数为 μ_2 的负指数分布, 服务时间相互独立。

当 4 座 KR 正常生产时, 整个系统可以抽象为 M/M/4 系统。

(3) 脱磷转炉兑铁排队系统

该系统中, 顾客为从脱硫站吊运来的铁水包重包, 顾客来源也可认为是无限的, 假定:

1) 顾客到达的间隔时间为负指数分布, 且间

隔时间相互独立, 单位时间内达到的顾客数为 λ_3 ;

2) 服务台为转炉;

3) 服务时间为从铁水包重包吊运到转炉、转炉兑铁和转炉冶炼的整个过程的时间, 假定服务时间服从参数为 μ_3 的负指数分布, 服务时间相互独立。

当 2 座脱磷转炉正常生产时, 整个系统可以抽象为 M/M/2 系统。

在以上假设和理论前提的条件下, 应用所建立的排队模型进行计算分析, 计算结果指标汇总表 1。

表 1 首钢京唐钢厂高炉-转炉区段界面铁水包周转过程排队系统的指标汇总

	高炉排队系统	KR 排队系统	脱磷转炉排队系统
平均到达率/(个/h)	1.54	3.08	3.08
平均服务率/(个/h)	1.54	2	2.4
平均在忙服务台数	1	1.54	1.28
系统服务强度	1	0.385	0.64
平均空闲率	0	0.21	0.22
平均排队长/个	1.2	0.05	0.89
平均队长/个	2	1.59	2.17
平均等待时间/min	58	1	17
平均逗留时间/min	97	31	42

由排队论计算结果, 得出铁水包运转时间如下^[5]:

$$T = \sum_{i=1}^m (W_{q_i} + T_i) + \sum_{j=1}^n S_j = [(65+43)+(1+29)+(21+5)] + (25+8+8+17+23) = 245(\text{min})$$

由表 1 计算的各项排队论指标, 对应到首钢京唐钢厂实际的生产系统, 则各环节的等待时间汇总如表 2 所示。

应用排队论模型计算结果表明: 铁水包理论周转时间为 245min。由此:

(1) 日周转次数为 5.9 次/天;

(2) 理论上共需 14 个在线铁水包, 加上 1~2 个缓冲铁水包, 则最多 16 个在线铁水包即可满足运行的需要。

表 2 首钢京唐钢厂铁水包周转过程时间指标

项目	时间/min
高炉系统等待	65
高炉出铁	43
炼钢系统等待	22
KR 处理-转炉兑铁	34
空包	148
重包	97
周转时间合计	245

3.3.2 首钢京唐钢厂铁水包周转实际值与理论值的差距比较分析

针对各环节的时间分布情况，寻找实际生产环节与理论分析结果的差距及差距产生的原因，从而制订解决方案，有助于进一步提高铁水包周转率，优化高炉-转炉区段的动态运行。

表 3 基期实际值与理论计算值的比较

项目	理论值	实际平均值 (波动范围)	差值(实际平均值-理论值)
高炉系统等待时间/min	65	111 (30~291)	46
高炉出铁时间/min	43	64 (17~377)	17
炼钢系统等待时间/min	22	38 (3~459)	16
KR 处理-转炉兑铁/min	34	80 (17~299)	46
空包时间/min	148	215 (150~320)	24
重包时间/min	97	145 (100~210)	48
周转时间/min	245	360 (260~480)	115
日周转次数	5.9	4.0(3.9~4.1)	-1.9
在线铁水包个数	16	23 (22~24)	7

由表 3 可见，实际运行与理论结果的差距主要产生在铁水包在线运行个数、炼钢车间的环节、空包时间和重包时间等。

在以上分析结果的基础上，首钢京唐钢厂制定了高炉-转炉区段界面提高铁水包周转的优化方案和措施，包括管理措施、技术措施和设备保障措施等。通过严格控制铁水包在线个数不大于 20 个，细化炼钢厂各环节的周作业时间，缩小空包和重包等待时间，首钢京唐钢厂于 2015 年 10 月达到了铁水包日周转次数平均 4.51 次的水平。随着铁水包周转次数的提高，高炉-转炉区段界面的铁水温降进一步降低，比优化前降低了 20℃，

而且铁水包内衬的寿命大大提高，由原来的 180 次/包，提高至 208 次/包，提高了 15.5%。

此外，与传统模式相比，“一包到底”模式还具有以下优势：

- (1) 减少占地 1150m²；
- (2) 每年减少烟尘排放约 4700t；
- (3) 降低投资 4158 万元；
- (4) 减少定员 108 人；
- (5) 节约电耗 1139 万 kWh/a (387 万 tce/a)；
- (6) 减少铁水温度损失 30~50℃ (0.77~1.29 万 tce/a)。

4 结论

现代钢铁生产流程中，铁水的承接、运输和存储方式以受铁包+兑铁包、鱼雷罐+兑铁包和单独兑铁包为主。铁水承接、运输、储存方式由受铁罐+混铁炉向鱼雷罐或兑铁包的变迁过程，体现了高炉-转炉区段流程的演进,是高炉-转炉区段工艺技术进步（包括生产效率、能耗、环保等指标）的表现。

对首钢京唐钢厂高炉-转炉区段界面“一包到底”模式运行过程的解析及优化实例分析结果表明，高炉-转炉区段界面“一包到底”模式物质流运行优化既可以减少换水温降，又可以取得明显的减排效果，证明了高炉-转炉区段界面“一包到底”模式是钢铁生产流程实现绿色转型的重要技术之一。

参考文献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学（第二版）[M]. 北京：冶金工业出版社, 2009.
- [2] 酈秀萍. 高炉-转炉区段工艺技术界面热能工程分析[D]. 沈阳：东北大学, 2005.
- [3] 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法[M]. 北京：冶金工业出版社, 2013.
- [4] 陆传赓. 排队论[M]. 北京：北京邮电大学出版社, 2009.
- [5] 韩伟刚, 酈秀萍, 施一新, 等. 基于排队论“一包到底”模式的在线铁水包数量[J]. 钢铁, 2013, 48(5): 21-25.

Optimization of Interface Material Flow Operation of BF-BOF Section

Li Xiuping¹, Han Weigang¹, Zhang Chunxia¹, Liu Jianhua²,
Wei Zhijun², Wu Chongyuan²

(1. *Central Iron & Steel Research Institute (CISRI), Beijing 100081, China;*

2. *Shougang Jingtang Iron & Steel Co. Ltd., Tangshan, Hebei 063200, China)*

Abstract: BF-BOF section is the process with the most kinds and quantities of material-flow input and output, and also the important connecting process for the preceding and the following processes. Optimization of the material operation, especially HM transportation, is an important factor that affects the operation schedule of BOF and HM temperature to the KR. Based on the analysis and comparison of material flow network with “One Ladle Technology” of three enterprises, difference between operation schedule and ladle management is put forward. The queuing theory has been applied to analyze the ideal mode of the HM ladle among the BF-BOF sections. It shows that with the ideal mode, ladles in operation on line can be reduced by 1~2, temperature drop of HM can be reduced by 20℃, and the service life of ladles can be increased by 15.5%. The optimization of the BF-BOF section can gain remarkably energy saving and emission reduction, and it is an important support for the green development of steel manufactory process.

Keywords: BF-BOF section; material flow network; queuing theory; operation optimization