

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.08.009

基于有限容量排队论的铁水包个数计算模型

谷宗喜,徐安军,贺东风,冯 凯

(北京科技大学 冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要:将“一包到底”模式下的铁水包周转过程抽象为有系统容量限制的3个串联接近闭合的排队系统,即高炉出铁、铁水脱硫以及转炉兑铁排队系统。在此基础上,提出基于有限系统容量排队论的铁水包理论周转个数计算模型。应用该模型,对重钢新区铁水包理论周转个数进行计算,结果表明:铁水包周转到达统计平衡的时间为294 min,理论周转个数为17个。研究表明,减少铁水包周转个数的关键在于优化系统容量值,实际生产中主要从改进高炉配罐制度、加强炼铁炼钢工序协调等方面采取措施,并应用模型计算相关参数为:铁水包周转时间为260 min,理论周转个数为15个。

关键词:“一包到底”模式;有限系统容量排队论;铁水包包包;理论周转个数;配罐制度

中图分类号:TF741.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)08-070-08

A calculation model for determining number of hot metal ladle based on queuing theory with constraints of system capacity

GU Zongxi, XU Anjun, HE Dongfeng, FENG Kai

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

Abstract: The process of ladle turnover in “one ladle to an end” mode was abstracted as three serial and nearly closed queuing systems with system capacity constraints, i.e. BF iron tapping, desulfurization and BOF iron charging queuing system. A calculation model of theoretical turnaround number of hot metal ladle based on the queuing theory with limited system capacity was proposed. Theoretical turnaround number of Chongqing Iron and Steel Co., Ltd. was calculated by adopting proposed model, and the results are: 294 min for turnaround time of ladle reaching statistical balance; 17 theoretical turnaround number of ladle. Research shows that optimizing the system capacity should be a crucial step to reduce the turnaround number of ladle. The main measures of practical production lie in improving the distribution strategy of empty ladle and strengthening the coordination between iron-making and steelmaking process, et al. Corresponding parameters are obtained by adopting the calculation model, i.e. 260min for l turnaround time of ladle; 15 theoretical turnaround number of ladle.

Keywords: “one ladle to an end” mode; queuing theory with constraints of system capacity; hot metal ladle preparation; theoretical turnaround number of ladle; distribution strategy of unloaded ladle

收稿日期:2017-03-24

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFB0601301);国家自然科学基金资助项目(51674030)。

Supported by Major State Research Development Program (2016YFB0601301) and National Natural Science Foundation of China (51674030).

作者简介:谷宗喜(1989-),男,博士,主要从事冶金流程工程学与生产运行管控等方面的研究。

徐安军(联系人),男,北京科技大学教授,博士生导师,(Tel)010-62334145;(E-mail)anjunxu@126.com。

铁水包周转频率和铁水包使用个数合理化研究是铁水包多功能集成技术包的重要研究内容^[1],首钢京唐^[2]、重钢新区^[3]已经在实际生产过程中采用多功能铁水包集成技术,显示出良好的经济技术效果,然而其生产运行中均存在铁水包周转个数较多、铁水包理论周转个数不明确等问题,影响炼铁-炼钢界面动态稳定运行。

铁水包周转个数归属于运输设备运行过程控制范畴^[4],以往学者对于运输设备的运行过程控制方面的研究主要集中在天车和台车调度^[5]、钢包周转运行控制方面^[6-7],对于铁水包理论周转个数及其运行控制方面的研究则较少。铁水包周转过程受到多重因素的约束,必须要考虑备包生产组织模式及空包配罐制度,其周转过程的控制必须要满足高炉出铁安全以及连铸连浇。以往学者对铁水装载容器数量如铁水包或者鱼雷罐周转个数的研究主要采用数学建模^[9-11]和仿真模拟^[12-13]的方法,以下阐述研究现状:基于供需平衡的方法^[9]由于受到鱼雷罐实际周转时间的影响,而鱼雷罐周转时间本身就受到在线鱼雷罐数量的影响,因此,该方法只能作为现场鱼雷罐在线个数的核算;基于排队论的方法^[10]将排队系统的容量设定为无限,且未考虑铁水包备包因素^[14],所建排队论系统要素构建亦不合理;基于生产计划的方法^[11]侧重于设计层面,未考虑生产运行过程中备包空包配罐制度的影响;仿真方法^[12-13]亦未考虑铁水包备包生产及配罐制度对铁水包周转运行的影响。由于“一包到底”模式下铁水包周转过程较为复杂,以往鱼雷罐模式下依据转炉兑铁次数及铁水包周转时间来计算铁水包在线个数的传统方法已不适用,目前尚没有一种合适的方法用来计算铁水包理论周转个数^[15]。

笔者在充分考虑铁水包备包及配罐制度等约束条件的基础上,提出基于有限系统容量排队论的铁水包理论周转个数计算模型,应用模型对重钢新区铁水包理论周转个数进行计算,并对铁水包理论周转个数进行优化。研究结果对减少“一包到底”模式下铁水包在线个数、提高铁水运转效率等具有重要的指导意义。

1 铁水包周转过程排队系统

“一包到底”模式是指高炉出铁、铁水运输、铁水预处理及向转炉兑铁均使用同一个铁水包,中途不倒包。“一包到底”模式下的铁水包周转过程可以认为是铁水包在“铁钢界面”排队等待服务及完成服务的过程,即铁水包周转过程可视为典型的排队问题。针对该问题,韩伟刚等^[10]将铁水包周转过程分为高炉出铁、重包运输、铁水脱硫、转炉兑铁以及空包运输排队系统,而实际生产表明,铁水包周转运行主要受到生产计划约束,若将铁水包周转过程分为重包周转过程和空包周转过程,可知重包在脱硫以及转炉前的等待过程主要受炼钢生产计划约束;空包在高炉出铁口前等待时间主要受到高炉出铁计划约束。因此,考虑实际生产过程,应将铁水包周转过程缩减为 3 个串联的排队系统,即高炉出铁、铁水脱硫、转炉兑铁排队系统,表 1 为基于改进排队论下铁水包周转过程各排队系统要素。此外,韩伟刚等^[10]所建排队论系统将系统容量设定为无限,而在实际生产过程中,为避免铁水温降过大以及保证连浇,铁水包备包个数有最大个数限定,超过限定个数后,现场会采取铸铁或者连铸机提前开浇等措施,从而使备包个数恢复正常,基于此,铁水包周转排队系统应有系统容量限制。

表 1 铁水包周转过程各排队系统要素

Table 1 Queuing system elements for ladle turnover process

项目	顾客	服务台	服务过程
高炉出铁排队系统	铁水包空包	高炉	高炉出满一包铁水
铁水脱硫排队系统	铁水包重包	脱硫站	铁水包经预处理后吊离脱硫站
转炉兑铁排队系统	铁水包重包	转炉	将重包铁水兑入转炉

分析铁水包周转过程可知,铁水包热修寿命一般为 15~20 次,而其周转率一般在 2.5~5 次/d,即某一铁水包一旦进入在线循环,一般历经 3~8 d 才需要热修,因此,可以认为铁水包周转过程的 3 个串联排队系统接近闭环^[16-17],而在闭环的串联排队网络中,前后工序相互影响^[18],为实现 3 个排队系统动态平衡,需结合生产实际设定合理的容量值,以保证生产运行稳定。

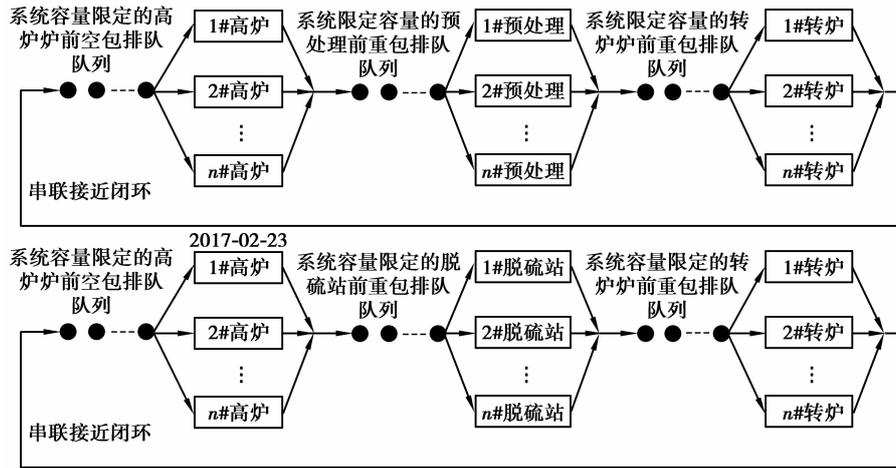


图 1 为“一包到底”模式下铁水包周转过程排队系统

Fig.1 Queuing system for ladle turnover process in “one ladle to an end” mode

2 基于有限容量排队论的铁水包理论周转个数计算模型

基于上述分析,铁水包周转过程中各个排队系统可以认定为各个系统容量有限地接近闭合的串联排队系统。针对该类排队系统,做出如下假设:1)假定铁水包在时间 t 内到达 n 个顾客并服从泊松分布,则铁水包到达间隔时间服从负指数分布,平均达到率为 λ ;2)排队规则设定为混合制,服务台为 c 个;3)服务时间服从负指数分布,平均服务率为 μ ;4)系统容量有限,最大容量为 N ;5)服务规则设定为先到先服务(FCFS)。依据排队模型的表达方式,结合以上假设,系统容量有限的排队模型可以表示为 $M/M/c/N$,其中 M 表示负指数分布。

对于系统容量有限的排队模型 $M/M/c/N(N \geq c)$,其状态平衡方程^[18]如下:

$$\begin{cases} \lambda P_0 = \mu P_1, \\ \lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1} = (\lambda + n\mu)P_n (1 \leq n < c), \\ c\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} = (\lambda + c\mu)P_n (c \leq n \leq N), \\ c\mu P_N = \lambda P_{N-1}; \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_0, P_1, P_{n-1}, P_n, P_{n+1}, P_{N-1}, P_N$ 为排队系统中分别有 $0, 1, n-1, n, n+1, N-1, N$ 个顾客的概率。

其中 $\sum_{n=0}^N P_n = 1$,令 $\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$ 为系统的服务强度,由式(1)可得到当系统达到统计平衡时的状态概率^[18]为

$$\begin{cases} P_0 = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=0}^c \frac{(c\rho)^k}{k!} + \frac{c^c}{c!} \cdot \frac{\rho(\rho^c - \rho^N)}{1-\rho}} (\rho \neq 1), \\ \sum_{k=0}^c \frac{(c)^k}{k!} + \frac{c^c}{c!} \cdot (N-c+1) (\rho = 1), \end{cases} \\ P_n = \begin{cases} \frac{(c\rho)^n}{n!} P_0 (0 \leq n \leq c), (0 < n \leq c), \\ \frac{c^c}{c!} \rho^n P_0 (c \leq n \leq N), (c < n \leq N). \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)及 Little 公式,可得系统的运行指标^[18]如下:

$$L_q = \begin{cases} \frac{(c\rho)^c \rho}{c! (1-\rho)^2} P_0 [1 - \rho^{N-c} - (N-c)(1-\rho)\rho^{N-c}] (\rho \neq 1), \\ \frac{(c)^c}{2c!} P_0 (N-c)(N-c+1), (\rho = 1), \end{cases} \quad (3)$$

$$L_s = L_q + c\rho(1 - P_N), \quad (4)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda(1 - P_N)}, \quad (5)$$

$$W_s = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (6)$$

式中: L_q 为平均排队长,包; L_s 为平均队长,包; W_q 为平均逗留时间,min; W_s 为平均等待时间,min。

基于铁水包周转过程 $M/M/c/N$ 排队模型,给出铁水包理论周转个数计算模型:

$$T_{\text{ladle}} = \sum_{i=1}^e W_{s,i} + \sum_{j=1}^f S_{f,j}, \quad (7)$$

$$n_{\text{ladle}} = \frac{P_{\text{BF}} \cdot T_{\text{ladle}}}{1440 \cdot q_{\text{ladle}}}, \quad (8)$$

式中: T_{ladle} 为铁水包周转时间,min; $W_{s,i}$ 为第 i 个排队系统平均等待时间,min; e 为排队系统总数; $S_{f,j}$ 为铁水包周转过程第 j 个辅助工序时间,min; f 为辅助操作总数; n_{ladle} 为铁水包在线个数,包; P_{BF} 为高炉产能,t; q_{ladle} 为铁水包每包铁水量,t。

该模型是一个有系统容量限制的排队模型,模型的关键在于确定铁水包周转过程各个排队系统容量值及到达间隔时间等参数,相关参数的确定需综合考虑工序运行参数、“铁钢界面”铁水包备包生产及配罐制度等实际生产因素,最后依据上述模型便可计算铁水包的理论周转个数。

3 案例应用与分析

下面以重钢新区“铁钢界面”为案例,应用所建的基于有限系统容量铁水包排队模型对重钢新区的铁水包理论周转个数进行计算,并对计算结果展开分析与讨论。

3.1 计算参数确定

重钢新区“铁钢界面”设备配置如下:3座 2 500 m³ 高炉,3座预处理站(采用机械搅拌法脱硫,即 KR 法)、3座公称容量为 210 t 的转炉。主体工序运行参数如下:高炉按设计利用系数 2.3t/(d·m³)生产,3座高炉每天产铁 17 250 t,平均出铁量 210 t,共 82 包,平均 17.6 min 一包;KR 脱硫时间 35 min,3个脱硫工位平均 11.7 min 一包;每座转炉冶炼周期为 42 min/炉,3座转炉平均每 14.0 min 炼完一炉;重钢铁水包周转运行辅助时间如表 2 所示,其中表 2 的运行时间考虑天车干扰、尾包处理等因素。

表 2 高炉—转炉区段铁水包周转过程辅助时间参数

Table 2 Auxiliary time parameters for ladle turnaround process in BF-BOF section

项目	辅助事件	时间/min
T_1	高炉吊运铁水包至 KR 站	10
T_2	铁水包从 KR 站运至转运跨	5
T_3	铁水包从转运跨运到加料跨	8
T_4	铁水包从加料跨到兑铁运输	5
T_5	转炉兑铁结束运至加料跨	5
T_6	从加料跨运送到高炉出铁位	40

依据提出的有限系统容量排队论模型,其关键在于确定各个排队系统的铁水包到达平均间隔时间及系统容量值,以下讨论其确定方法。

到达平均间隔时间确定方法:由于铁水包周转过程中 3 个排队系统串联且接近闭合,根据 Burke 定理^[19],铁水包到达以及离开 3 个排队系统的时间相同,且由于高炉连续生产,转炉所需铁水完全取决于高炉铁水供应,因此,3 个排队系统的铁水包到达平均间隔时间均取决于高炉出铁节奏,即为 17.6 min。

系统容量值确定方法:对于高炉排队系统而言,考虑重钢新区当前高炉炉下配罐制度为“3+1+X”,其中“3”指 3 个铁水包空包,“1”为尾包个数,X 为依据实际铁水量波动需投入的个数,即在相邻出铁口打开之

前需保证有3个空包等待,鉴于正在出铁的出铁口至少有1个尾包,根据此制度可知,在某一时刻每个高炉炉下至多5个空包,因此,确定高炉排队系统容量值为15包;对于脱硫排队系统,由于每个脱硫处理站至多只有1个在处理,2个在等待,因此,设定其系统容量为6包;对于转炉排队系统,依据现场铁水包运行管理方案,炼钢厂积压铁水超过12包必须安排3条线同时生产,若超过13包必须安排铸铁机铸铁,据此设定其系统容量设定为12包。综上,给出高炉-转炉区段铁水包周转过程3个排队系统的计算参数如表3所示。

表3 高炉-转炉区段铁水包周转排队系统计算参数

Table 3 Calculation parameters of queuing system for ladle turnaround process in BF-BOF section

排队系统	铁水包到达平均 间隔/min	服务台数	平均服务 周期/min	系统容量
高炉出铁排队系统	17.6	3	52.8	15
铁水脱硫排队系统	17.6	3	35.0	6
转炉兑铁排队系统	17.6	3	42.0	12

3.2 模型计算及分析

将表3中设定的计算参数代入式(2)-(6),可得重钢新区高炉-转炉区段3个排队系统的相关指标如表4所示。

表4 高炉-转炉区段铁水包周转排队系统相关指标

Table 4 Relevant indicators of queuing system for ladle turnaround process in BF-BOF section

项目	高炉出铁排队系统	铁水脱硫排队系统	转炉兑铁排队系统
平均到达率 $\lambda/(\text{个} \cdot \text{h}^{-1})$	3.40	3.40	3.40
平均服务率 $\mu/(\text{个} \cdot \text{h}^{-1})$	1.14	1.71	1.42
系统服务强度 ρ	1.00	0.66	0.80
系统空闲概率 P_0	0.014	0.125	0.060
平均排队长 $L_q/\text{个}$	4.909	0.387	1.726
平均队长 $L_s/\text{个}$	7.720	2.275	4.093
平均等待时间 W_q/min	92.20	7.16	31.23
平均逗留时间 W_s/min	145.00	42.16	73.23

由表4可知,高炉出铁系统、铁水脱硫系统、转炉兑铁系统平均等待时间分别为92.20、7.16、31.23 min,可知由本排队论模型计算的参数基本符合生产实际,因此,本文建立的有限容量排队模型可以很好地描述铁水包实际周转过程。对于铁水包而言,转炉兑铁完毕后即运往高炉,其处理时间为转炉兑铁时间而非冶炼时间,因此,其逗留时间需修正。将表2和表4中相关参数及转炉兑铁时间(3 min)代入式(7),可知重钢高炉-转炉区段铁水包周转时间为

$$T_{\text{ladle}} = \sum_{i=1}^e W_{s,i} + \sum_{j=1}^f S_{f,j} = \{145.00 + 42.16 + (31.23 + 3)\} + (10 + 5 + 8 + 5 + 5 + 40) = 294 \text{ min}。 \quad (9)$$

依据统计数值,三高炉-三转炉生产模式下,重钢新区每天高炉日产铁量为17 250 t,铁水包每包装铁量为210t,且由式(9)得到铁水包周转时间为294 min,将以上参数代入式(8),得到三高炉-三转炉生产模式下,重钢高炉-转炉区段铁水包理论周转个数为

$$n_{\text{ladle}} = \frac{P_{\text{BF}} \cdot T_{\text{ladle}}}{1\,440 \cdot q_{\text{ladle}}} = \frac{17\,250 \times 294}{1\,440 \times 210} = 16.77 \approx 17。 \quad (10)$$

由于重钢铁钢配置为2 500 m³高炉-230 t转炉,即中高炉对应大型转炉,导致其“一包到底”模式运行

中存在的最大问题即是高炉出铁速度与炼钢厂铁水消化速度不均衡,加之生产运行管理存在问题,导致现场铁水包周转个数多达 28 个,而由有限系统容量排队论计算的铁水包理论周转个数为 17 个,可见重钢新区铁水包周转个数还有较大的缩减潜力。

统计显示,重钢现场铁水包重包周转时间为 176 min,空包周转时间为 338 min,铁水包周转总时间为 514 min,三高炉-三转炉模式下铁水包在线个数约为 28 个,铁水包周转率约为 2.9 次/d,通过有限容量排队论模型计算出铁水包重包理论周转时间为 157 min,空包理论周转时间为 137 min,铁水包理论周转时间为 294 min,铁水包理论周转个数为 17 个,铁水包周转率为 4.8 次/d。对比分析可知,铁水包重包实际周转时间(176 min)与理论重包时间(157 min)比较接近,说明重包运行控制水平较高,这主要是由于重包周转过程直接关系到生产运行稳定,现场人员对重包管理较为重视,但重包时间依然偏长,表明炼铁炼钢工序协调还有待加强;铁水包空包实际时间(338 min)则远大于理论空包时间(137 min),主要因为高炉炉下空包配罐过于富裕,表明现场人员对空包管理有待加强。综合以上分析,欲缩短铁水包周转时间,重钢应主要从改进空包配罐制度,减少高炉炉下多余空包个数,加强炼铁炼钢工序协调等方面采取措施。

3.3 铁水包理论周转个数优化

依据本文建立的有限容量排队论模型,在设备配置无法改变的情况下,减少铁水包周转个数的关键在于优化系统容量值,而优化系统容量值可通过改进高炉炉下空包配罐制度及加强炼铁炼钢工序协调等措施实现。通过对当前高炉配罐制度进行分析,可以将当前高炉炉下配罐制度改进为“2+1+X”以进一步减少高炉排队系统容量,其中“2”指 2 个铁水包空包,“1”为尾包个数,X 为依据实际铁水量波动需投入的个数,即在相邻出铁口打开之前需保证有 2 个空包等待,鉴于正在出铁的出铁口至少有 1 个尾包,根据此制度可知,在某一时刻每个高炉炉下至多 4 个空包,因此,可以确定改进的配罐制度下高炉排队系统容量值为 12 包。通过对重钢当前炼铁炼钢工序协调现状进行分析,可以合理制定生产计划,综合选择合理的连铸机浇注周期和连浇炉数,加强生产组织等方式以进一步减少转炉排队系统容量。现场当前控制目标为保证三高炉-三转炉模式下铁水包备包个数不得多于 10 包,因此,将优化的转炉排队系统容量值确定为 10 包。基于以上分析,给出配罐制度改进及加强炼铁炼钢协调下有限系统容量排队系统计算参数和相关指标计算结果分别如表 5 和表 6 所示。

表 5 铁水包周转排队系统计算参数优化

Table 5 Optimized calculation parameters of queuing system for ladle turnaround process

排队系统	铁水包到达平均 间隔/min	服务台数	平均服务 周期/min	系统容量
高炉出铁排队系统	17.6	3	52.8	12
铁水脱硫排队系统	17.6	3	35.0	6
转炉兑铁排队系统	17.6	3	42.0	10

表 6 铁水包周转过程排队系统相关指标优化

Table 6 Optimized relevant indicators of queuing system for ladle turnaround process

项目	高炉出铁排队系统	铁水脱硫排队系统	转炉兑铁排队系统
平均到达率 $\lambda / (\text{个} \cdot \text{h}^{-1})$	3.40	3.40	3.40
平均服务率 $\mu / (\text{个} \cdot \text{h}^{-1})$	1.14	1.71	1.42
系统服务强度 ρ	1.00	0.66	0.80
系统空闲概率 P_0	0.017	0.125	0.061
平均排队长 $L_q / \text{个}$	3.491	0.387	1.396
平均队长 $L_s / \text{个}$	5.100	2.275	3.789
平均等待时间 W_q / min	63.92	7.16	24.71
平均逗留时间 W_s / min	116.72	42.16	66.71

依据表3和表6中相关参数,计算得到优化的铁水包周转时间为

$$T_{\text{ladle}}^{\text{optimized}} = \sum_{i=1}^e W_{s,i} + \sum_{j=1}^f S_{f,j} = \{116.72 + 42.16 + (24.71 + 3)\} + (10 + 5 + 8 + 5 + 5 + 40) = 260 \text{ min}, \quad (11)$$

优化的铁水包理论周转个数为

$$n_{\text{ladle}}^{\text{optimized}} = \frac{P_{\text{BF}} \cdot T_{\text{ladle}}}{1440 \cdot q_{\text{ladle}}} = \frac{17250 \times 260}{1440 \times 210} = 14.83 \approx 15. \quad (12)$$

优化后铁水包重包理论周转时间为151 min,空包时间为109 min,优化前后空包时间减少了28 min,重包时间减少了6 min。在铁水包周转辅助时间不变的情况下,配罐制度优化及加强生产调度后,重包等待时间减少了6 min,高炉炉下空包等待时间减少了28 min。由此计算得到优化的铁水包理论周转个数为15个,优化的铁水包周转率为5.4次/d。因此,在改进空包配罐制度和加强炼铁炼钢生产协调后,铁水包理论周转个数可从17个减少到15个。

4 结 论

1) 将“一包到底”模式下的铁水包周转过程抽象为3个串联且接近闭环的排队系统,即高炉出铁、铁水脱硫、转炉兑铁排队系统,考虑铁水包备包生产及配罐制度等因素,将铁水包周转过程的3个排队系统归结为有系统容量限制的排队系统。

2) 建立了基于有限系统容量排队论的铁水包理论周转个数计算模型,并应用所建立的有限容量排队论模型计算了重钢新区三高炉-三高炉模式下的铁水包理论周转个数,结果显示,达到统计平衡的铁水包周转时间为294 min,铁水包的合理理论周转个数为17个,周转率为4.8次/d。

3) 研究表明,减少铁水包在线个数应主要从改进空包配罐制度,加强炼铁炼钢协调等方面采取措施,以减少系统容量值,并依据模型计算出到达统计平衡的优化的铁水包周转时间为260 min,铁水包理论周转个数为15个,周转率为5.4次/d。

参考文献:

- [1] 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.
YIN Ruiyu. Theory and method of metallurgical process integration[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2013.(in Chinese)
- [2] 李金柱,王飞,杨春政.首钢京唐铁水包多功能化应用实践[J].炼钢,2014,30(4):61-64.
LI Jinzhu, WANG Fei, YANG Chunzheng. Practice of multi-functional hot metal ladle technology in Shougang Jingtang[J]. Steelmaking,2014,30(4):61-64.(in Chinese)
- [3] 杨玻,董荣华,刘浏,等.重钢铁钢界面“一罐制”技术的研究与应用[J].中国冶金,2013,23(10):17-21.
YANG Bo, DONG Ronghua, LIU Liu, et al. Research and application of 'one ladle system' technology on iron steel interface in CISC[J]. China Metallurgy,2013,23(10):17-21.(in Chinese)
- [4] 郑忠,龙建宇,高小强,等.钢铁企业以计划调度为核心的生产运行控制技术现状与展望[J].计算机集成制造系统,2014,20(11):2660-2674.
ZHENG Zhong, LONG Jianyu, GAO Xiaoqiang, et al. Present situation and prospect of production control technology focusing on planning and scheduling in iron and steel enterprise[J]. Computer Integrated Manufacturing System,2014,20(11):2660-2674.(in Chinese)
- [5] 陈开,郑忠,周超.面向炼钢厂多机多任务天车调度的仿真方法[J].重庆大学学报,2011,34(7):39-45.
CHEN Kai, ZHENG Zhong, ZHOU Chao. Simulation method for multi-machine and multi-task crane scheduling in steelmaking plant[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(7):39-45.(in Chinese)
- [6] 蔡峻,汪红兵,贺东风,等.炼钢厂钢包周转率的影响因素[J].北京科技大学学报,2013,35(8):1072-1079.

- CAI Jun, WANG Hongbing, HE Dongfeng, et al. Affecting factors of the turnover rate of steel ladle in steelmaking plants[J]. Journal of University of Science and Technology, 2013, 35(8): 1072-1079. (in Chinese)
- [7] 蔡峻, 贺东风, 汪红兵, 等. 基于浇次计划的钢包周转数量计算模型[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(11): 59-65.
CAI Jun, HE Dongfeng, WANG Hongbing, et al. Calculation model for the turnover number of steel ladle based on casting schedule[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(11): 59-65. (in Chinese)
- [8] 黄帮福, 贺东风, 田乃媛, 等. 鱼雷罐的运行控制[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(7): 933-937.
HUANG Bangfu, HE Dongfeng, TIAN Naiyuan, et al. Operational control of torpedo ladles[J]. Journal of University of Science and Technology, 2010, 32(7): 933-937. (in Chinese)
- [9] 韩伟刚, 酆秀萍, 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): 21-24.
HAN Weigang, LI Xiuping, SHI Yixin, et al. Online ladle quantity of “one-open-ladle-from-BF-to-BOF” route by using queuing theory[J]. Iron and Steel, 2013, 48(5): 21-24. (in Chinese)
- [10] 王峰. 高炉-连铸机区段的精准设计和生产调控[D]. 北京: 北京科技大学, 2011.
WANG Feng. Precise design and production control of blast furnace-continuous caster section. Beijing: University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] Liang S, Wang J, Wang H, et al. Simulation and optimization of material flow system for ‘the mode of one open ladle’ in BF-BOF region[C]//2012 7th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE), July 14-17, 2012, Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2012: 716-720.
- [12] 肖鹏, 何腊梅. 物流仿真技术在紧凑型钢铁界面中的应用[J]. 炼钢, 2014, 30(4): 70-74.
XIAO Peng, HE Lamei. Application of logistical simulation to one-ladle-mode iron-making/steel-making interface[J]. Steelmaking, 2014, 30(4): 70-74. (in Chinese)
- [13] 芦永明, 王丽娜, 陈宏志, 等. 面向钢铁制造流程的合同计划组合优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(Z1): 168-172.
LU Yongming, WANG Li'na, CHEN Hongzhi, et al. Combinatorial optimization of order planning for steel manufacturing process[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(Sup1): 168-172. (in Chinese)
- [14] 杨楚荣. “一罐到底”铁水运输工艺铁水罐配置的优化分析[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集. 北京: 冶金工业出版社发行部, 2015: 1-5.
YANG Churong. Quantity optimization and analysis of hot metal ladle for ‘common ladle system’ hot metal transportation[C]//Proceedings of the 10th CSMS steel congress & 6th Baosteel biennial academic conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 1-5. (in Chinese)
- [15] Lin C, Ding J R, Yeh J M. A closed queuing maintenance network for automated manufacturing systems[J]. Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(10): 1121-1129.
- [16] Canonaco P, Legato P, Mazza R M, et al. A queuing network model for the management of berth crane operations[J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(8): 2432-2446.
- [17] 刘心远. 基于闭环排队网络的维修系统建模和组合优化[D]. 北京: 清华大学, 2011.
LIU Xinyuan. Modeling and joint optimization of a maintenance system based on closed queuing network theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [18] 董婧. 基于 WITNESS 的集装箱码头串联排队网络系统资源配置研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
DONG Jing. Research on container terminal system of tandem open queuing network simulation based on WITNESS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. (in Chinese)
- [19] Burke P J. The output of a queuing system[J]. Operations Research, 1956, 4(6): 699-704.