

钢包调度评价方法研究

冯 凯¹, 贺东风¹, 徐安军¹, 汪红兵²

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对以钢包周转个数为基础的钢包运行评价难以反映实际调度现状的问题, 提出一种基于生产计划和钢包待用时间解析的钢包调度现状评价方法. 首先, 利用钢包运行过程中重包个数的波动表征生产计划对钢包运行情况的影响. 然后, 通过解析钢包待用时间, 给出额外周转包个数和钢包调度离线率的计算方法, 分别用以表征不同状态钢包的调度, 并通过实际数据确定钢包调度现状的综合评定方法. 最后, 以实际生产数据对该评价方法进行验证. 结果表明, 该评价方法可以准确评价钢包调度现状, 并可为生产实践提供相应的指导.

关 键 词: 生产计划; 钢包调度; 评价方法; 待用时间; 炼钢

中图分类号: TF 741.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1728-05

Study on the Evaluation Method of Ladle Scheduling

FENG Kai¹, HE Dong-feng¹, XU An-jun¹, WANG Hong-bing²

(1. School of Metallurgy and Ecology Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: HE Dong-feng, E-mail: hdfcn@163.com)

Abstract: A new evaluation method of ladle scheduling status based on the production schedule and analysis on the interval stand-by time of ladle turnaround was proposed, due to the previous assessment on the basis of the number of turnaround ladle was difficult to reflect actual scheduling. Firstly, the influence of the production schedule on ladle running process was characterized by the fluctuation in the number of full package ladles. Then, the calculation method for the additional turnover package number and the offline ladle scheduling ratio was put forward through the analysis of ladle stand-by time, which was used to characterize ladle scheduling in different conditions, thus a comprehensive assessment method adopting practice production data was raised. Finally, the evaluation method was verified by the actual production data. The results show that the evaluation method can accurately evaluate the overall status of ladle scheduling and can provide guidance for the practice production process.

Key words: production schedule; ladle scheduling; evaluation method; ladle interval time; steelmaking

钢包作为炼钢-连铸生产过程中钢水的承载、运输和二次冶金的容器, 贯穿整个炼钢过程, 合理使用钢包对提高生产效率和节能降耗有重要作用^[1]. 为此, 相关学者对钢包应用过程开展了大量的研究. Sonoda等^[2]用概率分布表示钢包中钢水温度的不均匀性和不确定性; Song等^[3]用水模型试验的方法研究钢水流动性对钢包透气砖气

道的影响; Okhotskiy^[4]对钢水在钢包中的碳化过程进行分析; Shen等^[5]对钢包底吹氩的控制过程进行研究; Gruber^[6]对钢包内衬的热行为通过有限元方法进行模拟研究. 刘青等^[7]运用钢包运行频率来评价钢包运行效率; 蔡峻等^[8]提出钢包周转率作为钢包运行控制的综合指标. 肖阳^[9]运用UML与Plant Simulation分别针对正常情况和热

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB720405); 国家自然科学基金资助项目(51304053); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-14-047A2).

作者简介: 冯 凯(1988-), 男, 内蒙古赤峰人, 北京科技大学博士研究生; 徐安军(1965-), 男, 湖北松滋人, 北京科技大学教授.

修情况的钢包调度进行仿真优化;Kakogawa 工厂通过改进钢包材质、加强钢包运行监控实现钢包管理优化^[10]。

目前,钢包运行评价方法的研究是以计算钢包周转个数为前提的,而钢包周转个数的计算需要划定时间范围,导致其一定的时间局限性,同时时间起点和终点的钢包是否需要计入钢包周转个数难以界定,并缺乏对钢包出现故障需要临时更换钢包和钢包使用次数极少等情况的处理方法。

钢包运行的状态是生产计划、钢包调度(配包制度、钢包维修)、钢包寿命、钢包故障等多种因素共同作用的结果,若要描述实际生产过程中钢包调度的现状,需要剔除生产计划、钢包寿命等因素对钢包运行的影响,目前未见相关研究。

本文从分析生产计划对钢包运行情况的影响出发,通过钢包待用时间的分类统计,对钢包周转及离线情况进行评价,并给出综合评定结果,旨在提供一种能够反映现场钢包调度现状的评价方法。

1 生产计划对钢包运行情况的影响

在炼钢厂实际生产过程中,生产计划不仅决定了钢包周转过程中的重包阶段和最少的钢包使用个数,而且会直接导致钢包使用个数的波动。评价钢包运行情况主要是:

- 1) 是否存在钢包周转个数偏多的情况,一般是由等待出钢时间或热修时间偏长导致的;
- 2) 是否存在不必要的周转包离线或离线包上线的情况,既包括热修时间偏长导致钢包离线的情况,又包括生产计划和钢包被迫离线维修对钢包上下线的影响。

所以,只有对生产计划的执行过程进行描述,才能明晰生产计划对钢包运行的影响程度,从而有效避免其对钢包调度现状评价的影响,达到反映现场真实调度现状的目的,为生产过程中提升钢包调度水平提供可靠的参考和依据。

2 钢包调度评价方法

2.1 生产计划的评价方法

生产计划对于钢包运行的影响主要体现在对等待出钢时间和钢包上下线情况的影响,反映在钢包运行过程重包个数的波动。参照均衡度(衡量生产过程中实际值与平均值吻合程度的指标)的定义式,定义生产过程中重包个数波动率 B 如

式(1)所示,用于衡量生产过程实际重包个数相对于平均个数的偏离程度,以描述生产计划执行过程对钢包运行的影响。

$$B = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2 \cdot m} / (n \cdot \bar{g}) \right] \times 100\% \quad (1)$$

其中: g_i 为第 i 分钟时的重包个数; \bar{g} 为统计期内的平均重包个数; n 为统计期的时间长度, \min ; m 为统计期内重包个数发生变化的次数。

重包个数波动率是衡量实际重包个数偏离平均值的程度,偏离越多,周转包离线或新包上线的个数越多。

2.2 钢包调度现状的评价方法

在实际生产过程中,对钢包的调度集中在空包阶段,不但要缩短热修时间和等待出钢时间,而且需要尽量避免钢包上下线的操作,这两个方面都会反映在钢包待用时间上。

钢包待用时间是指钢包由上一次浇铸结束到下一次承接钢水的时间,需要进行翻渣、热修、运输、烘烤等操作,其中翻渣、运输的时间相对比较稳定,而烘烤、热修和等待出钢的时间波动较大。

统计多个钢厂的待用时间,结果呈现偏态分布,如图 1 所示,由于不同钢厂的钢包待用时间统计呈相同的分布趋势,采用基于钢包待用时间解析的方法评价钢包调度具有更好的适应性。具体过程如下。

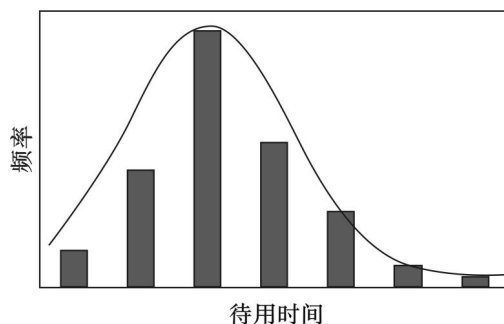


图 1 钢包待用时间分布趋势图

Fig. 1 Distribution trends of ladle standby time

- 1) 获取统计期内所有炉次使用钢包的待用时间,并统计重包阶段的平均运输时间,二者之和为钢包运行过程的“非工序时间”;

- 2) 由于生产过程中最少的钢包使用个数 $N = \left\lceil \frac{T_{\text{所有工序}} + T_{\text{“非工序时间”}}}{T} \right\rceil$, 其中 $T_{\text{所有工序}}$ 为除转炉工序外的所有主体工序时间之和, T 为最长的主体工序周期,而 $T_{\text{所有工序}}$ 为 T 的倍数,则“非工序时间”处于 $[0, T)$ 时,钢包使用个数最少;当处于 $[T, 2T)$ 时,至少需要额外加入一个钢包进行周

转;当处于 $[2T, 3T)$ 时,至少需要额外加入两个钢包进行周转,以此类推.所以以最长主体工序时间 T 为单位划分统计区间,统计各区间炉次占所有炉次的比例如图2所示.

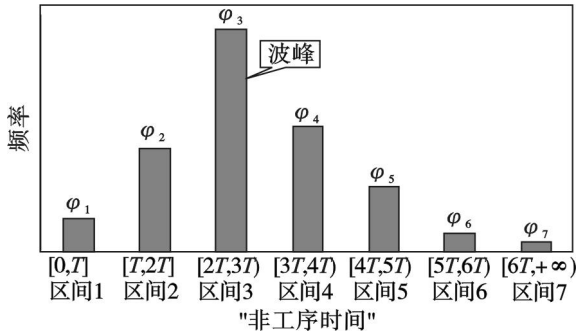


图2 “非工序时间”分布趋势图

Fig. 2 Distribution trends of “non-process time”

3) 基于“非工序时间”统计结果(图2),将统计区间划分为小于等于波峰和大于波峰两部分.小于等于波峰的部分反映周转钢包的运行现状,大于波峰的部分反映离线包或极有可能离线的钢包的运行现状.

4) 对于统计结果中小于等于波峰的部分,用需要额外加入钢包个数的期望值反映周转钢包的调度现状,定义该期望值为额外周转包个数 B_w :

$$B_w = \sum_{j=1}^k [\varphi_j \times (j-1)]. \quad (2)$$

其中: φ_j 为区间 j 内炉次占所有炉次的比例; $(j-$

1)为区间 j 内炉次需要额外加入周转的钢包个数,原因见步骤2);区间 k 为统计结果中波峰所在区间,图2中区间3为波峰所在区间,则 $k=3$.

5) 对于统计结果中大于波峰的部分,用其所有区间所占的比例反映离线钢包的调度现状,定义该比例为钢包离线率 L :

$$L = \sum_{j=k+1}^m \varphi_j. \quad (3)$$

其中 m 为区间总数,图2中区间总数为7,则 $m=7$.

导致钢包离线的原因除了钢包运行过程中的调度问题,还包括被迫离线和生产计划等原因.为了避免其他因素的影响,定义钢包调度离线率 L_c :

$$L_c = L - B - \frac{1}{A} - \eta. \quad (4)$$

其中: A 为钢包小修包龄; η 为钢包故障率,表示由于故障导致被迫离线维修的比例.

2.3 钢包调度现状的综合评定及优化

以实际炼钢厂为例,选取典型的板坯生产流程的实际生产数据进行分析,该统计期内,生产工艺及设备运行稳定,冶炼钢种及操作规程没有变化,操作人员及考核指标等均保持不变,可以认为该统计期内的钢包调度处于同一水平,对该统计期内数个时间段的钢包运行指标进行统计,结果见表1.同样,选取典型方坯生产流程进行统计,结果汇总于表1.

表1 典型流程钢包运行情况
Table 1 The results of ladle running of typical scheduling processes

典型流程时段	板坯生产流程							方坯生产流程						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
生产炉次	63	89	47	93	58	71	78	51	93	88	76	69	82	62
$B/\%$	7.41	6.45	6.92	7.16	6.85	7.26	6.52	13.90	16.05	16.17	14.65	14.92	15.14	14.17
k	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$B_w/\%$	63.49	75.28	70.21	69.89	72.41	73.24	66.67	37.25	27.96	20.45	23.68	31.88	34.15	25.81
$L/\%$	65.08	60.67	63.83	62.37	62.07	61.97	64.10	80.39	86.02	89.77	86.84	84.06	82.93	85.48
$L_c/\%$	55.29	51.85	54.53	52.83	52.83	52.33	55.20	64.68	68.15	71.78	70.37	67.32	65.97	69.50

从表1可以看出,在同样的钢包调度水平下,额外周转包个数和钢包调度离线率 L_c 的评价结果并不一致,并且呈现相反的特征,若要对钢包调度现状做出总体评价,就需要对两项评价指标进行综合评定.

从额外周转包个数 B_w 和钢包调度离线率 L_c

的定义式出发,考虑到 $\frac{B_w}{k}$ 与 L_c 属于同一尺度内,且具有相同的单位,初步拟定钢包调度的综合评定结果 R 为

$$R = \frac{B_w}{k} + L_c. \quad (5)$$

以表 1 数据为基础,对式(5)进行验证,计算综合评定结果如表 2 所示.

表 2 典型流程钢包调度综合评定结果
Table 2 The comprehensive assessment results of the ladle scheduling of typical processes

典型流程及时段	钢包调度综合评定结果/%	
板坯生产流程	时段 1	76.45
	时段 2	76.94
	时段 3	77.93
	时段 4	76.13
	时段 5	76.97
	时段 6	76.74
	时段 7	77.42
方坯生产流程	时段 1	77.10
	时段 2	77.47
	时段 3	78.60
	时段 4	78.26
	时段 5	77.95
	时段 6	77.35
	时段 7	78.10

从表 2 可以看出,对于两种典型流程,该综合评定方法都可以反映出钢包调度处于同一水平,说明式(5)可以用于钢包调度现状的综合评价.

3 实例应用

以某钢厂的实际生产数据为例,对其不同时期的钢包调度现状进行系统评价.该厂主要设备有两座 210 t 转炉、两座双工位 RH、一座双工位 LF 和两台两流板坯连铸机,其中最長主要工序时间为 40 min,每日生产 35 炉~55 炉不等.

分别取该厂“2011 年 2 月 7 日 15 时~12 日 21 时”(情景 1)、“2011 年 5 月 4 日 22 时~10 日 9 时”(情景 2)、“2013 年 1 月 12 日 1 时~15 日 20 时”(情景 3)和“2013 年 3 月 17 日 3 时~20 日 23 时”(情景 4)的实际生产数据进行分析.

情景 1:该统计期内重包个数波动情况见图 3.统计期内平均重包个数为 4.06 个,统计期的时间长度为 7 523 min,统计期内重包个数发生变化次数为 427 次,由式(1)计算得到重包个数波动率为 8.04%.该统计期内“非工序时间”以最长主要工序时间为区间的统计结果见图 4.

根据式(2)可以求得额外周转包个数 B_w 为 82.81%.根据式(3)可以求得钢包离线率 L 为 53.85%,统计期内钢包的平均小修包龄为 42 次,

钢包故障率为 0,根据式(4)可以求得钢包调度离线率 L_c 为 43.42%,根据式(5)可以求得情景 1 的统计期内钢包调度现状的评价结果为 71.02%.

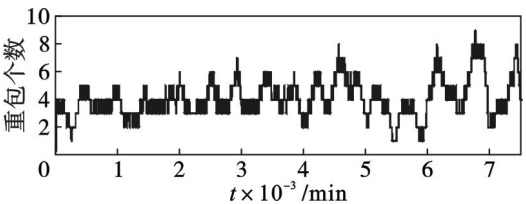


图 3 情景 1 的时间范围内重包个数的波动情况
Fig. 3 Fluctuations of the number of full packages in the time range of scenario 1

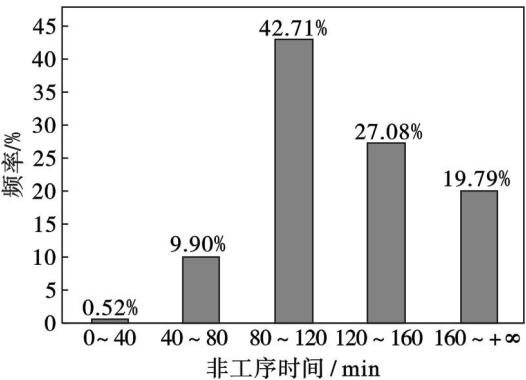


图 4 情景 1 的“非工序时间”统计结果
Fig. 4 The statistical results of “non-process time” of scenario 1

同理,可以得到情景 2,情景 3 和情景 4 的钢包调度评价结果汇总见表 3,其中情景 2 的小修包龄为 42 次,情景 3,4 的小修包龄均为 45 次.

表 3 四种情景下的钢包评价结果
Table 3 The ladle evaluation results of four scenarios

参数	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
时间跨度/min	7 523	7 861	5 419	5 585
重包个数变化/次	427	463	339	315
平均重包个数	4.06	3.95	4.36	3.84
B /%	8.04	6.90	7.51	7.60
B_w /%	82.81	98.35	126.20	118.79
L /%	53.85	48.76	32.62	36.97
L_c /%	43.42	39.48	22.89	27.15
R /%	71.02	72.27	64.95	66.74

情景 1 和情景 2 在钢包评价的结果上显示出一致性,期间钢包离线的比例较高是造成钢包调度现状综合评定结果偏大的主要原因;情景 3 和情景 4 在钢包评价的结果上也显示出一致性,钢包离线情况相对前者有了明显改善,这是由于该

厂经过两年钢包管理的信息化改造,实现了有计划地使用钢包,但其对热修操作的时间控制水平仍有待提高。

针对该 4 种情景,用已有的方法对钢包调度情况进行评价,如文献[8]给出的钢包周转率的方法,时间范围取建议的 24 h,结果如表 4 所示。

表 4 四种情景下的钢包周转率
Table 4 The ladle turnover rates of four scenarios

情景	时间段	冶炼炉 次数/炉	钢包周 转数/个	钢包周转 率/(炉·个 ⁻¹)
情景 1	7 日~8 日	37	8	4.63
	8 日~9 日	40	10	4.00
	9 日~10 日	48	9	5.33
	10 日~11 日	40	11	3.64
	11 日~12 日	43	12	3.58
情景 2	4 日~5 日	47	11	4.27
	5 日~6 日	39	9	4.33
	6 日~7 日	46	10	4.60
	7 日~8 日	45	10	4.50
	8 日~9 日	44	10	4.40
情景 3	12 日~13 日	45	8	5.63
	13 日~14 日	50	10	5.00
	14 日~15 日	50	10	5.00
情景 4	17 日~18 日	41	9	4.56
	18 日~19 日	46	10	4.60
	19 日~20 日	35	10	3.50

从表 4 可以看出,钢包周转率的评价方法无法区分 4 种情景下钢包调度的差异,甚至相邻两天的钢包周转率都会出现很大波动。这是由于该方法严重受到冶炼炉数和钢包离线维修等因素的影响。而基于钢包待用时间解析的钢包调度评价方法不但可以准确评价钢包调度的整体水平,而且可以分析钢包调度过程的主要问题,为生产实践提供相应的指导。

4 结 论

1) 参照均衡度的概念,定义重包个数波动率用以反映生产计划对钢包上下线的影响程度,并给出计算方法。

2) 通过对待用时间的解析,定义额外周转包个数和钢包调度离线率以反映周转和离线钢包的调度现状,并给出计算方法,通过实际数据确定钢

包调度现状的综合评定方法。

3) 用实际生产数据对钢包调度评价方法进行验证,结果表明,该评价方法可以准确评价钢包调度的整体水平,为生产实践提供相应的指导。

参考文献:

- [1] Kabakov Z K, Pakholkova M A. Reducing the loss of heat from steel in steel-pouring ladles [J]. *Metallurgist*, 2013, 56 (9/10): 670 – 671.
- [2] Sonoda S, Murata N, Hino H, et al. A statistical model for predicting the liquid steel temperature in ladle and tundish by bootstrap filter [J]. *ISIJ International*, 2012, 52 (6): 1086 – 1091.
- [3] Song Y Y, Liu G Q, Li H X, et al. Influence of ladle purging plug airway on flow properties of liquid steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 472/475: 2581 – 2587.
- [4] Okhotskiy V B. Carbonization of steel in the ladle (dedicated to the 120th anniversary of Darby process) [J]. *Metallurgical and Mining Industry*, 2011, 3 (5): 197 – 201.
- [5] Shen J D, Zhao Y, Han G J. Design on optimization of argon bottom blowing of molten steel ladle [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 16: 284 – 290.
- [6] Dietmar G, Harald H. Thermomechanical behavior of steel ladle linings and the influence of insulations [J]. *Steel Research International*, 2014, 85 (4): 512 – 518.
- [7] 刘青, 赵平, 吴晓东, 等. 钢包的运行控制 [J]. 北京科技大学学报, 2005, 27 (2): 235 – 239.
(Liu Qing, Zhao Ping, Wu Xiao-dong, et al. Control strategy for ladle running [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27 (2): 235 – 239.)
- [8] 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 Hong-bing, He Dong-feng, et al. Affecting factors of the turnover rate of steel ladle in steelmaking plants [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35 (8): 1072 – 1079.)
- [9] 肖阳. 基于 UML 与 Plant Simulation 的钢包周转调度研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
(Xiao Yang. Research on ladle scheduling based on UML and plant simulation in steel plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012)
- [10] Yoshimoto T, Sakaguchi N, Tokonami T, et al. Online monitoring system of refractories for improvement of steel ladle heats at Kakogawa works [C] // Proceedings UNITECR 2011 Congress; 12th Biennial Worldwide Conference on Refractories—Refractories Technology to Sustain the Global Environment. Kyoto, 2011: 105 – 108.