

# 基于钢包运行稳定性的炼钢厂生产计划优化

冯凯<sup>1</sup>, 贺东风<sup>1</sup>, 徐安军<sup>1</sup>, 汪红兵<sup>2</sup>

(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:** 针对炼钢厂在不满负荷生产的情况下, 缺少相应指导原则编排生产计划的问题, 提出一种基于钢包运行稳定性的生产计划优化方法. 首先, 通过对炼钢厂钢包周转过程的分析, 提出在线运行钢包个数的计算方法. 然后, 分别针对单台铸机和两台铸机顺序开浇的两种情况, 分析生产计划对钢包运行状态的影响, 建立计算模型. 以某炼钢厂生产计划为例进行解析, 并以钢包运行稳定性为评价参数, 利用遗传算法对生产计划进行优化. 结果表明, 优化的生产计划可以减少钢包使用个数及其温度波动, 减少烘烤煤气消耗量和降低转炉出钢温度, 提高钢水温度的控制水平.

**关键词:** 生产计划; 优化; 钢包; 遗传算法; 能耗

中图分类号: TF 741.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)11-1619-05

## Optimization of Production Schedule Based on Ladle Running Stability in Steel Plant

FENG Kai<sup>1</sup>, HE Dong-feng<sup>1</sup>, XU An-jun<sup>1</sup>, WANG Hong-bing<sup>2</sup>

(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:** For the problem of the lack of guiding principle of production schedule in the case of non-full production in steelmaking plant, the optimization method of production schedule based on ladle running stability was proposed. First, the computational method of the number of online operation ladle was proposed by analyzing ladle turnaround process. Second, the impact of production schedule on ladle running was analyzed for the production schedule of single casting machine and two casting machine, and the computational model was proposed. Finally, the method was used to optimize actual production schedule of a steelmaking plant. The results showed that using genetic algorithm based on ladle running stability, the fluctuation of the number of ladle is reduced, the fluctuation of ladle thermal state is reduced, baking gas is saved, the temperature of BOF endpoint is reduced and the level of control the temperature of molten steel is improved.

**Key words:** production schedule; optimization; ladle; genetic algorithm; energy consumption

炼钢厂生产计划是炼钢-连铸生产过程管理的核心,其合理性直接影响生产计划的可行性和生产过程的稳定性<sup>[1]</sup>. 如基于可变电价对炼钢-精炼-连铸生产调度模型的研究<sup>[2]</sup>; 利用 Matlab 编写遗传算法程序为实际钢铁企业制定生产计划<sup>[3]</sup>; 通过把生产计划编制过程中的非线性问题转化为线性问题, 实现不锈钢行业大规模

生产计划的制定<sup>[4]</sup>; 通过对批量问题的描述, 建立简单的数学模型便能满足生产计划的制定<sup>[5]</sup>; 利用分支界定算法求解综合生产库存问题, 制定轧机生产计划<sup>[6]</sup>; 运用闭环供应链再造模式解决钢铁企业动态调度能力受到生产计划限制的问题<sup>[7]</sup>.

目前, 关于炼钢厂生产计划的研究, 基本是以

收稿日期: 2014-04-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB720405); 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.

满负荷生产为前提,以最大产能为目标提出的生产计划模型.而对于非满负荷缺少相应的指导原则.本文针对非满负荷生产的情况,通过分析生产计划对钢包运行的影响,对生产计划进行优化,从而提高生产过程的稳定性,并分析调整前后的生产计划对能耗的影响.

## 1 钢包运行稳定性对钢水温度的影响

钢包不但是盛纳钢水的容器,承担钢水的存储、缓冲和运输,并且是钢水精炼的反应器.钢包运行状态的稳定性与炼钢-连铸各工序节点的钢水温度控制密切相关.频繁的周转包下线和离线包上线,一方面会导致钢包热状态变差,增加钢水运输过程的热量损失;另一方面导致钢包热状态波动很大,增大了控制中间包温度的难度.另外,还会导致钢包使用个数的增加,增大生产组织调度的难度,间接地对钢水温度控制造成负面影响.

可见,稳定的钢包运行状态对控制钢水温度至关重要,而钢水温度精准控制不但可以避免不必要的能源消耗,而且可以提高和稳定铸坯质量.钢包运行的稳定性很大程度上是由生产计划决定的,基于钢包运行稳定性的生产计划优化,可以有效地减少钢包使用个数的波动,稳定钢包热状态,提高钢水温度控制水平,为炼钢-连铸生产过程稳定运行提供基础.

## 2 生产计划与钢包使用个数的关系

钢包运行稳定性主要表现为钢包使用个数的波动情况,若要基于钢包运行稳定性对生产计划进行优化,需确定生产计划与钢包使用个数的关系.

### 2.1 钢包使用个数的计算方法

在实际生产过程中,为了保证生产顺行,除在线运行的钢包之外,还需要额外备用 1~2 个钢包,所需备用包的个数一般由具体钢厂的生产 and 调度情况决定,数量比较固定.本文针对需要投入在线运行的钢包个数进行计算.

以碱性氧气转炉(basic oxygen furnace, BOF)-RH 精炼(ruhrstahl heraeus, RH)-连铸(continuous casting, CC)生产流程为例,最长工序时间为

$$T_{\text{MAX}} = \max \{ T_{\text{BOF}}, T_{\text{RH}}, T_{\text{CC}} \}. \quad (1)$$

其中: $T_{\text{BOF}}$ 是转炉工序计划作业时间; $T_{\text{RH}}$ 是精炼

工序计划作业时间; $T_{\text{CC}}$ 是连铸工序计划作业时间; $T_{\text{RX}}$ 是周转包热修工序计划作业时间.对于正常周转包的热修时间,通过对炼钢厂实际数据统计分析得到: $\frac{1}{2}T_{\text{MAX}} \leq T_{\text{RX}} \leq 2T_{\text{MAX}}$ .对于特殊处理的钢包,需要更长的热修时间,存在  $T_{\text{RX}} > 2T_{\text{MAX}}$  的情况.

一个钢包从转炉出钢结束开始,周转一圈后再次回到转炉出钢结束的时间为钢包运转周期,记作  $T_{\text{turnover}}$ ,则周转包合理使用个数为

$$N = \left\lfloor \frac{T_{\text{turnover}}}{T_{\text{MAX}}} \right\rfloor. \quad (2)$$

当各个工序产能匹配(即  $T_{\text{MAX}} = T_{\text{CC}}$ )时,以连铸的生产节奏组织生产,则:

$$T_{\text{turnover}} = 2T_{\text{MAX}} + \sum_{i=1}^4 t_i + T_{\text{RX}}. \quad (3)$$

当各个工序产能不匹配(即  $T_{\text{MAX}} > T_{\text{CC}}$ )时,需要进行备包,则:

$$T_{\text{turnover}} = T_{\text{CC}} + n \times (T_{\text{MAX}} - T_{\text{CC}}) + T_{\text{MAX}} + \sum_{i=1}^4 t_i + T_{\text{RX}}. \quad (4)$$

其中: $t_1$ 是转炉-精炼计划传搁时间; $t_2$ 是精炼-连铸计划传搁时间; $t_3$ 是连铸-热修计划传搁时间; $t_4$ 是热修-转炉计划传搁时间; $n$ 是连浇炉数.

当连浇炉数较少时,即  $n < N$ ,此时该浇次的钢包使用个数取决于连浇炉数;当连浇炉数较多时,即  $n \geq N$ ,此时该浇次的钢包使用个数取决于周转包合理使用个数.

### 2.2 生产计划对钢包使用个数的影响

根据炼钢厂设备配置和使用情况的不同,生产模式可以分为“一炉一机”模式和“两炉两机”模式两种.

对于生产计划对钢包使用个数影响的研究,是以前后浇次的连浇炉次比较多为前提,即  $n \geq N$ ,暂不考虑连浇炉数较少对钢包使用个数的限制.

1) “一炉一机”模式.前一浇次最后一炉转炉出钢结束时刻至后一浇次第一炉转炉出钢结束时刻的时间间隔定义为  $T_d$ .当两浇次间钢包接替使用时,若使前一浇次的钢包顺序被后一浇次使用,则两个浇次的时间间隔需要小于临界值,即后一浇次第一炉出钢开始时,恰好有两个前一浇次的钢包可以投入使用,即  $T_d$  应该满足:

$$T_d < N \times T_{\text{MAX}} - T_{\text{turnover}} + 2T_{\text{MAX}}. \quad (5)$$

2) “两炉两机”模式对钢包使用个数的影

响. 在两台铸机先后开浇的情况下, 若两个浇次存在一定的重叠炉次, 则导致前一浇次的钢包还在使用时, 后一浇次已经需要投入钢包, 这样不得不在后一浇次使用新上线包; 若两个浇次的时间间隔较大, 则会导致前一浇次的部分周转包无法及时地被后一浇次使用, 使其下线.

若使正常周转包不发生下线的情况, 则两个浇次的时间间隔需要处于区间之内. 区间下限为后一浇次第一炉出钢开始时, 恰好有一个前一浇次的钢包可以投入使用; 区间上限为后一浇次第一炉出钢开始时, 恰好有两个前一浇次的钢包可以投入使用. 两个浇次的时间间隔越趋近于区间下限, 两个浇次衔接越紧凑.

若先开浇铸机第一炉转炉出钢结束时刻为 0 时刻, 则后开浇铸机第一炉转炉出钢结束时刻为  $T$  时刻. 则  $T$  的区间下限  $T_1$  和区间上限  $T_2$  分别如下:

$$T_1 = (n - N) \times T_{CC} + T_{turnover}, \quad (6)$$

$$T_2 = (n - N + 1) \times T_{CC} + T_{turnover}, \quad (7)$$

令

$$a = \left| \frac{T - T_{turnover}}{T_{CC}} - (n - N) \right|. \quad (8)$$

则  $a$  越小, 两个浇次衔接越紧凑.

当  $T < T_1$  时, 需要在后开浇浇次中投入  $\lceil a \rceil$  个离线包, 且在周转一次后再次下线; 当  $T_1 \leq T \leq T_2$  时, 在线钢包正常周转, 不会出现周转包下线或离线包上线的情况; 当  $T > T_2$  时, 先开浇浇次所使用的钢包中, 将会有  $\lceil a \rceil - 1$  个周转包下线, 而后再投入后开浇浇次中使用.

### 2.3 钢包使用情况对能耗的影响

在炼钢厂中, 离线包上线运行或周转包烘烤, 都会造成钢包热状态的波动, 同时会有额外的钢水热量损失和烘烤煤气消耗. 离线包由烘烤状态投入在线运行, 即使达到烘烤的最佳状态, 在上线后的第一炉次也需要适当提高转炉出钢温度, 对钢水进行一定的温度补偿. 由生产计划导致的周转包下线, 一般是要进行持续的离线烘烤, 以便随时投入使用.

## 3 生产计划优化

### 3.1 优化生产计划的遗传算法

以钢包运行稳定为目标, 本文采用遗传算法<sup>[8-9]</sup> (genetic algorithm, GA) 对实际生产计划进行优化. 遗传算法主要运算过程包括个体编码、产生初始种群、适应度计算、选择运算、交叉运算、变

异运算等.

为了保证总作业时间、作业率、总产量、连浇炉数等诸多因素保持不变, 优化后的生产计划具有可执行性, 优化过程遵循以下原则:

- 1) 各浇次的生产工艺路径保持不变;
- 2) 各浇次的工序时间和连浇炉数保持不变;
- 3) 各浇次先后开浇的顺序保持不变;
- 4) 生产计划中第一个浇次和最后一个浇次的开浇时间保持不变.

基于以上原则, 设计优化算法如下:

1) 设计变量: 以第  $i$  浇次距第一浇次开始时间  $x_i$  ( $i = 2, 3, \dots$ ) 为设计变量.

2) 目标函数: 以生产计划中各个浇次之间钢包接替使用时衔接最紧凑为目标, 基于公式(8)设计优化目标函数如公式(9)所示:

$$f(x) = \sum_{i=1}^5 \left| \frac{T_{i+1} - T_{turnover,i}}{T_{CC,i}} - (n_i - N_i) \right|. \quad (9)$$

其中:  $T_{i+1}$  为第  $i+1$  浇次第一炉转炉出钢结束时刻;  $T_{turnover,i}$ ,  $T_{CC,i}$ ,  $n_i$  和  $N_i$  分别表示浇次  $i$  的钢包运转周期、浇铸周期、连浇炉数和周转包合理使用个数.

优化目标函数  $f(x)$  越小, 说明生产计划中各浇次衔接越紧凑, 前后浇次接替使用钢包时, 在尽可能地避免钢包上下线的同时, 使钢包等待时间趋于最短.

3) 约束条件: 为了保证各浇次顺序生产, 第  $i$  浇次开始冶炼时间应小于所在冶炼路径前一浇次最后一炉转炉出钢时间, 且不大于第  $i-1$  浇次开始冶炼时间.

本文运用 Java 编写遗传算法程序, 设计变量  $x_i$  的公式为:  $x_i = y_i / 1023 \times \text{区间长度} + \text{区间下限}$ .

本文中选择运算使用比例选择算子, 交叉运算使用单点交叉算子, 变异运算使用基本位变异算子.

算法的参数设置为: 种群大小为 80, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.25, 迭代次数为 10 000.

### 3.2 实际生产计划优化

以某钢铁企业第二炼钢厂为例, 对其生产计划的制定情况进行分析. 该厂主要设备有两座顶底复吹转炉 (编号 4#BOF 和 5#BOF)、两台双工位的 RH (编号 3#RH 和 4#RH)、一台双工位的 LF、两台二流板坯连铸机 (编号 3#CC 和 4#CC) 和 6 座钢包烘烤器. 每日冶炼炉数在 30 ~ 50 炉之间. 每日冶炼炉数越少, 生产计划的制定随意性越大, 同时由于钢种开发的需要, 经常会安排实验炉次

进行生产,因此,生产计划安排波动比较大,造成炼钢厂生产组织困难。

以 2013 年 6 月 1 日的生产计划为例,需要冶炼 6 种不同的钢种,共计 35 炉,具体的生产计划数据如表 1 所示. 其中,周转包热修工序计划作业时间为 25 min,转炉 - 精炼计划传搁时间为

10 min,精炼 - 连铸计划传搁时间为 20 min,连铸 - 热修计划传搁时间为 10 min,热修 - 转炉计划传搁时间为 10 min. 根据表 1 数据,绘制生产计划甘特图,如图 1 所示,图中数值编码代表钢包序号,用颜色区分不同浇次。

表 1 原生产计划数据表  
Table 1 Data table of actual production schedule

浇次序号	钢种	工艺路径	转炉周期	精炼周期	浇铸周期	连浇炉数	距第一浇次开始时间/min
			min	min	min		
1	MR - T2	5#BOF - 4#RH - 4#CC	30	30	35	10	0
2	SPHC - P	4#BOF - 3#RH - 3#CC	30	30	30	5	380
3	SHHC - W2	5#BOF - LF - 4#CC	30	30	40	2	407
4	SDC03	4#BOF - 3#RH - 3#CC	40	35	35	3	541
5	SHPHC - W1	5#BOF - 4#RH - 3#CC	40	30	35	6	647
6	S18	4#BOF - 3#RH - 4#CC	40	50	55	9	871

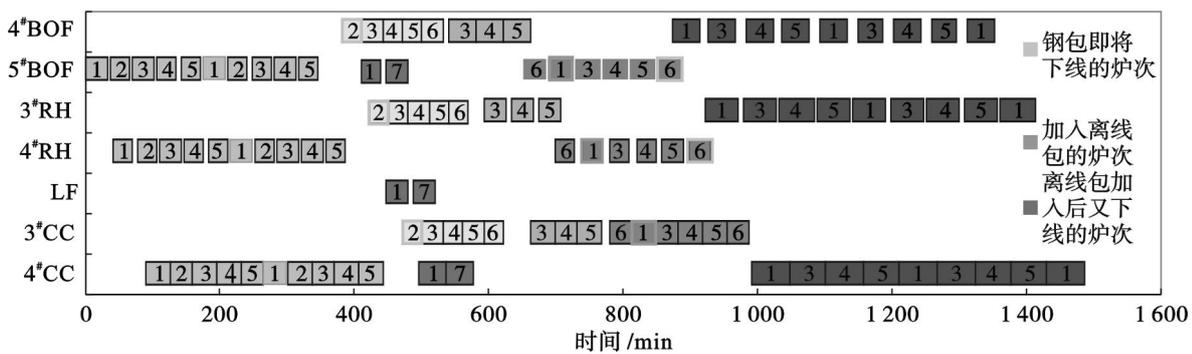


图 1 原生产计划甘特图  
Fig. 1 Gantt graphs of actual production schedule

在生产计划中,冶炼钢种 SHHC - W2 的浇次完全与钢种 SPHC - P 的浇次重合,必然需要投入两个离线包上线运行,冶炼钢种 SHHC - W2 的浇次结束后,这两个钢包再进行离线烘烤,同样,其他浇次也会对钢包使用造成同样影响,导致该日至少需要 7 个钢包投入运行。

运用本文 3.1 设计的遗传算法对原生产计划进行优化. 优化后各浇次开始冶炼时间见表 2,重新绘制生产计划甘特图如图 2 所示,图中数值编码代表钢包序号,用颜色区分不同浇次。

优化结果可以看出,在总作业时间、作业率、总产量、连浇炉数等诸多因素保持不变的前提下,仅存在 1 次周转包下线的操作,无离线包上线的操作. 由于有效地避免了浇次的重叠,该日投入 5 个钢包在线运行即可满足生产需求。

对比原生产计划和优化生产计划数据如表 3 所示. 该厂离线包烘烤的煤气流量为 425 m<sup>3</sup>/h,

对离线包的钢水温度补偿值为 3 ℃,根据优化效果可知,根据优化生产计划组织生产,该日节约烘烤煤气 20 400 m<sup>3</sup>,累计降低转炉出钢温度 12 ℃,同时,稳定的钢包运行不但降低生产组织调度的难度,而且可以提高钢水温度的控制水平,为稳定连铸坯质量提供基础。

表 2 各浇次开始冶炼时间优化结果  
Table 2 Optimization results of smelting starting time

钢种	距第一浇次开始时间/min
MR - T2	0
SPHC - P	323
SHHC - W2	465
SDC03	554
SHPHC - W1	653
S18	871

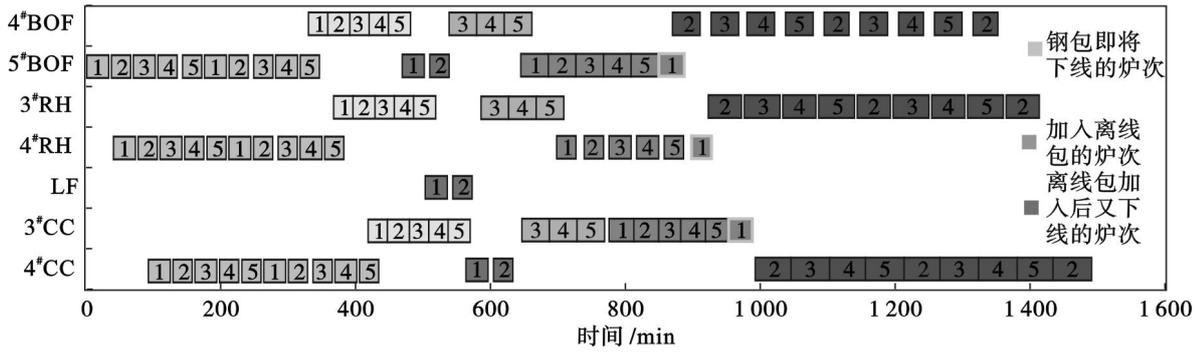


图 2 优化生产计划甘特图

Fig. 2 Gantt graphs of optimal production schedule

表 3 原生产计划和优化生产计划数据的比较

Table 3 Comparison of actual production schedule and optimal production schedule

生产计划	钢包数量	烘烤时间	上线次数	下线次数
	个	min		
优化前	7	4 405	4	5
优化后	5	1 525	0	1
效果	2	2 880	4	4

## 4 结 论

1) 通过对炼钢厂钢包周转过程的分析,针对产能匹配和不匹配两种情况,提出了在线运行钢包个数的计算方法。

2) 通过某炼钢厂原生产计划的解析,以钢包运行稳定性为目标,利用遗传算法对原生产计划进行优化。结果表明,可以有效提高钢包运行的稳定性,减少钢包使用个数的波动,进而减少烘烤煤气消耗量和降低转炉出钢温度,为提高钢水温度控制水平和稳定连铸坯质量提供基础。

### 参考文献:

[1] Yu S P. A prediction method for abnormal condition of scheduling plan with operation time delay in steelmaking and continuous casting production process[J]. *ISIJ International*, 2013, 53(6): 1028 - 1041.

[2] Tan Y Y, Liu S X. Models and optimisation approaches for scheduling steelmaking-refining-continuous casting production under variable electricity price [J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(4): 1032 - 1049.

[3] Jiang G Z, He E Y, Li G F, et al. Production line production planning model of iron and steel enterprise [J]. *Journal of Digital Information Management*, 2013, 11(2): 131 - 135.

[4] Karelahti J, Vainiomäki P, Westerlund T. Large scale production planning in the stainless steel industry [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(9): 4893 - 4906.

[5] Witt A, Vo S. Application of a mathematical model to an intermediate-to long-term real-world steel production planning problem based on standard software [J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2011, 5(1): 81 - 100.

[6] As'Ad R, Demirli K. A bilinear programming model and a modified branch-and-bound algorithm for production planning in steel rolling mills with substitutable demand [J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(12): 3731 - 3749.

[7] Zhang J, Liu X, Tu Y L. A capacitated production planning problem for closed-loop supply chain with remanufacturing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(5/6/7/8): 757 - 766.

[8] 郭辰光, 王鹏家, 田鹏, 等. 基于遗传算法的数控机床主轴优化设计方法[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32(6): 850 - 853.  
( Guo Chen-guang, Wang Peng-jia, Tian Peng, et al. Optimization design of CNC machine tool spindle based on genetic algorithm [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(6): 850 - 853. )

[9] 於春月, 许美蓉, 曲荣霞. 冶铸轧一体化生产合同计划优化问题研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(11): 1548 - 1551.  
( Yu Chun-yue, Xu Mei-rong, Qu Rong-xia. On the production order planning of integrated steel production SM-CC-HR-FF [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2008, 29(11): 1548 - 1551. )