

一种有利于提高 DHCR 比例的热轧批量计划编制方法

芦永明[✉] 徐安军 贺东风 田乃媛

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: luyongming2001@qq.com

摘要 针对一体化生产过程中连铸出坯顺序与热轧轧制顺序的协调问题, 提出了计划顺序协调因子, 并在此基础上建立了有利于提高直接热装(DHCR)比例的热轧批量计划优化模型。模型在满足热轧轧制工艺的基础上充分考虑了铸坯连铸出坯计划与热轧轧制计划的协调。采用改进遗传算法——两交换启发交叉算法对模型进行了求解。最后, 针对大批量少品种和小批量多品种两组板坯对某钢厂 2 250 mm 和 1 580 mm 轧线进行了仿真, 仿真结果表明模型可以大大减少铸坯因顺序不协调而引起的在进入加热炉前的等待时间, 进而提高板坯 DHCR 比例。

关键词 热轧; 一体化生产; 热装; 计划编制; 遗传算法

分类号 TP 29

Hot-rolling batch planning method available to improve DHCR proportion

LU Yong-ming[✉], XU An-jun, HE Dong-feng, TIAN Nai-yuan

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

[✉] Corresponding author, E-mail: luyongming2001@qq.com

ABSTRACT A coordination factor for the sequence of plans was proposed aimed to coordinating the casting production plan with the hot rolling production plan in an integrated production process. An optimization model of the hot-rolling batch plan available to improve the direct hot charging rolling (DHCR) proportion was established. On the basis of meeting the requirements of the hot rolling process, the model considers well the coordination of the casting production plan and the hot rolling production plan. A modified genetic algorithm, the two-exchange crossover heuristic algorithm, was used to solve the model. Finally, two slab groups which are large batch quantity with seldom types and small batch quantity with multiple types were simulated in the 2250 mm hot rolling line and the 1580 mm hot rolling line in a steel plant. The results show that the model could greatly reduce the waiting time of slabs caused by the casting slab sequence conflicts before entering the reheating furnace, and the DHCR proportion is increased correspondingly.

KEY WORDS hot rolling; integrated production; hot charging; planning; genetic algorithms

在炼钢-连铸-热轧一体化生产中, 由于炼钢-连铸和轧制工艺约束的不同, 炼钢-连铸批量计划和热轧批量计划之间的协调问题对生产过程中的热送热装产生很大的影响。文献[1-5]研究了一体化生产下热轧批量计划问题, 文献[6-9]对热送热装问题进行了研究。目前的研究都没有考虑连铸出坯顺序与热轧轧制顺序的协调, 而连铸出坯顺序与热轧轧制顺序的协调对降低板坯在进入加热炉前的等待时间, 提高板坯热送热装, 特别是直接热装(direct

hot charging rolling, DHCR) 比例影响很大。本文基于一体化生产, 首次提出了协调连铸出坯顺序与热轧轧制顺序的“计划顺序协调因子”, 从而有效地提高了一体化生产中热轧批量计划中的 DHCR 比例。

1 问题分析

1.1 热轧批量计划

直接热装(DHCR)、冷装(cold charging rolling, CCR)和热装(hot charging rolling, HCR)的铸坯被送

往热轧时,首先在加热炉中加热达到轧制所需的温度,之后通过轧机进行轧制,成为带钢或其他规格的轧材。由于轧辊的磨损,轧制一定的板坯量后轧辊被调换,两次换辊的间隔称为一个“轧制单元”。

一个完整的轧制单元包括烫辊材和主体材两部分,其中烫辊材主要用于加热轧辊,所需板坯数量比较少,且产品质量要求较低。主体材是轧制单元的主要部分,也是轧辊的主要生产阶段,因此本文以主体材为研究对象。

在编制热轧批量计划时,不但要考虑产品质量、轧辊更换和轧辊磨损,还要考虑铸坯的热送热装率,特别是 DHCR 比例,尽量使连铸机出坯顺序与热轧轧制顺序协调,从而提高 DHCR 生产比例,以降低能耗、缩短生产周期、降低氧化铁皮损耗、改进产品质量及提高金属收得率。

因此,热轧批量计划优化目标是 minimized 轧制单元数和最小化板坯宽度、厚度、硬度跳跃引起的费用以及最小化连铸机出坯后因计划顺序不协调而引起的板坯在进入加热炉前的等待时间。

1.2 DHCR 生产的基本条件

DHCR 生产通过输送辊道将连铸出坯后的高温铸坯直接送入加热炉,装炉温度都在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,能够兼顾热轧工序产能提升和节能降耗的双重需求,是目前连铸与热轧间的最佳衔接方式。DHCR 生产的基本条件是:

- (1) 具备上下游工序生产能力和生产节奏匹配条件;
- (2) 具备设备和平面布置条件(铸坯输送、连铸和热轧间距离合理等);
- (3) 具备无缺陷铸坯生产技术(铸坯无清理率 $\geq 98\%$);
- (4) 生产适宜的钢种(某些钢种不适宜高温热装轧制);
- (5) 具备炼钢-连铸-热轧一体化生产管理技术。

本文假设以上 DHCR 生产的基本条件已经满足。

1.3 DHCR 生产影响因素分析

目前,影响 DHCR 生产的主要影响因素包括以下几个方面。

1.3.1 生产扰动

DHCR 生产方式中,铸坯不下线,中间没有板坯库或保温坑来缓冲,因此在一体化生产中一旦遇到时间波动类、冶炼工艺类以及产品问题类和设备故障类等扰动都有可能引起 DHCR 计划非正常原因

下线而不能顺利执行。对于生产扰动影响,通过科学的管理可以尽可能减少,甚至避免。

1.3.2 批量计划

DHCR 计划既是热轧计划更是炼钢计划。热轧计划规程主要考虑规格,而炼钢 μ 连铸规程主要考虑成分。DHCR 计划要求在编制炼钢 μ 连铸计划时就充分考虑板坯宽度、厚度等轧制工艺规程的要求,在此基础上还要协调好连铸出坯顺序和轧制顺序,只有板坯轧制顺序与连铸出坯顺序吻合较好才能够有效提高 DHCR 计划比例。

1.3.3 生产调度

在炼钢-连铸-热轧一体化调度中,优化加热炉群调度可以在一定程度上提高板坯热送热装率和 DHCR 比例,但实际生产中加热炉个数往往有限,且每个加热炉内部板坯必须按先进先出排列,再加上板坯在加热炉内停留时间过长会导致氧化铁皮损耗和能源浪费,因此生产调度必须与批量计划优化组织相结合才能有效地提高板坯热送热装率和 DHCR 计划比例。

本文主要研究在一体化生产计划中,如何使热轧批量计划顺序在满足轧制工艺规程的前提下尽可能与连铸出坯顺序保持一致,从而提高 DHCR 比例。

2 计划顺序协调因子

连铸机出坯顺序与热轧轧制顺序不同造成了部分板坯在进入加热炉之前必须下线等待,导致 DHCR 比例降低。因此对连铸出坯顺序和热轧轧制顺序进行协调,减小铸坯因顺序不协调而引起的在进入加热炉之前下线等待时间,可以在一定程度上提高 DHCR 比例。本文将铸坯因顺序不协调而引起的在进入加热炉之前下线等待时间作为“计划顺序协调因子”,以表征连铸出坯顺序与热轧轧制顺序的协调程度。

2.1 DHCR 和 HCR 计划

对于 DHCR 和 HCR 计划,设连铸坯的出坯节奏为 α (即相隔 α 时间,有一块铸坯到达),热轧轧制节奏为 β (即相隔 β 时间,一块铸坯开始轧制),因生产流程具备上下工序生产能力和生产节奏匹配,所以 $\alpha \approx \beta$ 。若铸坯出坯顺序 CC_{seq} 和轧制顺序 $Roll_{seq}$ 已经确定,设 θ_i 为板坯 i 之前轧制的板坯集合, ω 表示 θ_i 中连铸出坯顺序最晚的板坯, $CC_{seq}(i)$ 表示板坯 i 的连铸出坯顺序, $Roll_{seq}(i)$ 表示板坯 i 的轧制顺序。则铸坯 i 在进入加热炉前由于计划顺序不协调而引起的等待时间 T_i 为

$$T_i = \begin{cases} \alpha \times (CC_{seq}(\omega) - CC_{seq}(i)) + \beta \times (Roll_{seq}(i) - Roll_{seq}(\omega)) , & CC_{seq}(i) < CC_{seq}(\omega) \\ 0 , & CC_{seq}(i) > CC_{seq}(\omega) \end{cases} \quad (1)$$

例如, 假设有 10 块坯: $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}$. 连铸出坯顺序 $CC_{seq}: s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}$. 热轧轧制顺序 $Roll_{seq}: s_2, s_4, s_7, s_{10}, s_3, s_6, s_8, s_1, s_5, s_9$.

当板坯 $i = s_8$ 时 $\theta_{s_8} = \{s_2, s_4, s_7, s_{10}, s_3, s_6\}$, $\omega = s_{10}$, $CC_{seq}(s_8) = 8$, $CC_{seq}(s_{10}) = 10$, $Roll_{seq}(s_8) = 7$, $Roll_{seq}(s_{10}) = 4$. 由于 $CC_{seq}(s_8) < CC_{seq}(s_{10})$, 因此 s_8 在连铸出坯后必须等待 s_{10} 连铸出坯之后再等待板坯 s_{10}, s_3, s_6 的轧制, 等待时间 $T_{s_8} = \alpha \times (10 - 8) + \beta \times (7 - 4) = 2\alpha + 3\beta$.

当板坯 $i = s_7$ 时 $\theta_{s_7} = \{s_2, s_4\}$, $\omega = s_4$, $CC_{seq}(s_7) =$

7 , $CC_{seq}(s_4) = 4$, $Roll_{seq}(s_7) = 3$, $Roll_{seq}(s_4) = 2$. 由于 $CC_{seq}(s_7) > CC_{seq}(s_4)$, 因此 s_7 在连铸出坯后即可进入加热炉, 等待时间 $T_{s_7} = 0$.

2.2 CCR 计划

对于 CCR 计划, 由于不存在因计划顺序不协调而引起等待时间, 因此冷坯 i 在进入加热炉前由于计划顺序不协调而引起的等待时间 $T_i = 0$.

设 H 表示 DHCR 和 HCR 计划板坯集合, C 表示 CCR 计划板坯集合, 则混装一体化生产下铸坯 i 在进入加热炉前由于计划顺序不协调而引起的等待时间 T_i 为

$$T_i = \begin{cases} \alpha \times (CC_{seq}(\omega) - CC_{seq}(i)) + \beta \times (Roll_{seq}(i) - Roll_{seq}(\omega)) , & CC_{seq}(i) < CC_{seq}(\omega) \text{ 且 } i \in H \\ 0 , & CC_{seq}(i) > CC_{seq}(\omega) \text{ 且 } i \in H \text{ 或 } i \in C \end{cases} \quad (2)$$

3 数学模型及求解算法

3.1 数学模型

本文根据轧制工艺规程和对热轧批量计划问题的分析, 把问题归结为多旅行商问题.

为了叙述方便, 引入下面的符号: N 为板坯数目; M 为轧制单元数目; W_i 为第 i 块板坯的轧制宽度; D_i 为第 i 块板坯的轧制厚度; H_i 为第 i 块板坯的硬度; L_i 为第 i 块板坯的轧制长度; T_i 为第 i 块板坯从连铸机出坯到加热炉加热之间的等待时间; L_{max}

为一个轧制单元能轧制板坯的总的长度上限值; W_{max} 为一个轧制单元中相邻板坯轧制宽度变化上限值; D_{max} 为一个轧制单元中相邻板坯轧制厚度变化上限值; H_{max} 为一个轧制单元中相邻板坯轧制硬度变化上限值; l_{max} 为每个轧制单元内同宽板坯连续轧制长度限制; δ_{ik} 为第 k 个轧制单元内与板坯 i 连续同宽轧制的板坯集合; P_{ij}^W 为相邻板坯 i, j 轧制宽度跳跃的惩罚值; P_{ij}^D 为相邻板坯 i, j 轧制厚度跳跃的惩罚值; P_{ij}^H 为相邻板坯 i, j 硬度跳跃的惩罚值;

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 , & \text{板坯 } j \text{ 在板坯 } i \text{ 之后, 且板坯 } i, j \text{ 同属于同一个轧制单元 } k , \\ 0 , & \text{否则,} \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\};$$

$$q_{ik} = \begin{cases} 1 , & \text{板坯 } i \text{ 属于第 } k \text{ 个轧制单元,} \\ 0 , & \text{否则,} \end{cases} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\}.$$

热轧批量计划的数学模型可以描述为

$$\min M \quad (3)$$

$$\min E = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C(ijk) \quad (4)$$

$$\min F = \sum_{i=1}^N T_i \quad (5)$$

式中 $C(ijk) = (P_{ij}^W + P_{ij}^D + P_{ij}^H) \times X_{ijk}$.

s. t.:

$$\sum_{i=1}^N (q_{ik} \times L_i) \leq L_{max} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

$$0 \leq X_{ijk} \times (W_i - W_j) \leq W_{max}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

$$X_{ijk} \times |D_i - D_j| \leq D_{max}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (8)$$

$$X_{ijk} \times |H_i - H_j| \leq H_{max}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \delta_{ik}} L_j \leq l_{max} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{ik} \leq 1 \quad k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (11)$$

目标函数 (3) 表示最小化轧制单元数; 式 (4) 表示同一个轧制单元内板坯之间因板坯宽度、厚度和硬度跳跃而引起的惩罚最小; 式 (5) 表示最小化所

有铸坯因计划顺序不协调而引起的等待时间,其计算方法如式(2);约束条件(6)表示一个轧制单元的总长度小于等于轧制单元长度上限;式(7)表示同一轧制单元内相邻两块板坯宽度递减排列,且相邻两块板坯的宽度跳跃不能超过上限;式(8)和式(9)表示同一轧制单元中相邻两块板坯的厚度和硬度跳跃不能超过上限;式(10)表示同一宽度规格轧制公里数不能超过上限;式(11)表示每块板坯最多在批量计划中出现一次。

3.2 求解算法

本文采用改进遗传算法——两交换启发交叉算法^[10]求解此模型。初始种群大小为 20,循环终止条件为 60 代,设 I 为一个个体,其跳跃惩罚值为 $E(I) =$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C(ijk).$$

(1) 个体编码:采用板坯号编码, N 块板坯组成一个板坯序列,一个板坯序列中包括 M 个轧制单元,每个轧制单元内板坯序列顺序表示板坯轧制顺序。

(2) 初始种群生成:初始种群中包括板坯分别按连铸出坯时间、宽度、厚度和硬度大小排列的 4 个必有个体和随机生成的 16 个随机个体。

(3) 父母双亲生成:根据初始种群个数 N ,两两配对,生成 $P_N^2 = N(N-1)$ 个父母对。

(4) 适值函数:将目标函数的倒数作为适值函数。由于所建模型为多目标优化模型,因此适值函数包括表征轧制单元数的函数一 $f_1(I) = 1/M$ 、表征跳跃惩罚的函数二 $f_2(I) = 1/E$ 和表征铸坯因计划顺序不协调而引起的等待时间的函数三 $f_3(I) = 1/F$ 。

(5) 轧制单元数 M 和跳跃惩罚值 $E(I)$ 的确定:首先初始化 $M=0, E(I)=0$,依据约束条件遍历个体,当不满足约束条件时 $M=M+1$,否则 $E(I) = E(I) + C(ijk)$,从而确定 M 和 $E(I)$ 。

(6) 选择:首先选择 $f_1(I)$ 最大的个体,当两个个体 $f_1(I)$ 相同时,则比较 $f_2(I)$,同理若两个个体 $f_2(I)$ 相同时,比较 $f_3(I)$,较大者作为选择对象。每次选择十个最优结果作为新种群,进入下次循环。

(7) 交叉和变异:采用两交换启发交叉,即首先在父母亲序列中随机选择一位,比较其宽度,选出较宽的板坯号,在父母亲板坯序列中分别以此板坯号为中心,右旋转板坯序列,使此板坯成为第 1 块板坯,从而选定此板坯为子代第 1 块板坯,之后比较父母亲中第 2 块板坯与已选定的第 1 块板坯的 $C(ijk)$ 值,选择 $C(ijk)$ 值较小的板坯,在父母亲板坯序列中分别以此板坯号为中心,右旋转板坯序列,使此板坯成为第 2 块板坯,从而选定此板坯为子代第 2 块板坯,以此类推,直至遍历完所有板坯,从而生产子代。

(8) 选择最优结果:当循环结束时,从所有种群中选择满足目标函数值(5)的结果作为最终结果。

4 仿真实验

4.1 参数设定

设置连铸出坯节奏 $\alpha = 2 \text{ min}$,轧制节奏 $\beta = 2 \text{ min}$ 。轧制单元板坯总长度限制为 120 km,同宽轧制板坯长度限制为 40 km,宽度、厚度和硬度的跳跃惩罚如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 宽度跳跃惩罚

Table 1 Penalty of width jump

下跳/mm	0~25	26~55	56~90	91~150
惩罚	1.0	3.0	5.0	7.0

表 2 硬度跳跃惩罚

Table 2 Penalty of hardness jump

因素改变	1	2	3	4	5
惩罚	10	16	20	24	30

表 3 厚度跳跃惩罚

Table 3 Penalty of gauge jump

上跳/mm	0~0.06	0.0601~0.15	0.1501~0.24	0.2401~0.45	0.4501~3.00
惩罚	200.0	300.0	400.0	800.0	1000.0
下跳/mm	0~0.06	0.0601~0.15	0.1501~0.24	0.2401~0.45	0.4501~3.00
惩罚	400.0	600.0	800.0	1000.0	2000.0

4.2 仿真实验及结果

本文采用某钢铁厂的实际生产数据通过自编的“炼钢—连铸—热轧—一体化生产调度仿真系统”进行计算机仿真实验。仿真实验针对此钢厂的 2250 mm 轧线和 1580 mm 轧线进行仿真,其中

2250 mm 轧线对应两台两流板坯连铸机,1580 mm 轧线对应一台两流板坯连铸机。实验分别设置大批量少品种和小批量多品种两组板坯,其中大批量少品种板坯组共 761 块板坯,3 种钢种;小批量多品种板坯组共 536 块板坯,9 种钢种。将

两组板坯分别进行多次仿真实验,取其中任意三次实验结果并对比“不采用计划顺序协调”和“采

用计划顺序协调”两种实验,仿真实验及结果如表 4 所示。

表 4 仿真实验及结果
Table 4 Simulation and results

轧线	板坯类型	板坯量	仿真实验次数	不采用计划顺序协调				采用计划顺序协调			
				M	E	DHCR 数目	DHCR 比例/%	M	E	DHCR 数目	DHCR 比例/%
2 250 mm	大批量,少品种	500	1	5	104 823	95	19.00	5	106 718	173	34.60
			2	5	104 687	155	31.00	5	106 453	229	45.80
			3	5	102 027	159	31.80	5	102 027	180	36.00
	小批量,多品种	380	1	4	78 856	97	25.53	4	78 846	148	38.95
			2	4	78 856	97	25.53	4	78 846	148	38.95
			3	4	79 632	143	37.63	4	78 856	148	38.95
1 580 mm	大批量,少品种	261	1	3	53 468	3	1.15	3	53 470	119	45.59
			2	3	53 470	50	19.16	3	53 468	107	41.00
			3	3	53 470	66	25.29	3	53 470	130	49.81
	小批量,多品种	156	1	2	32 590	51	32.69	2	32 590	58	37.18
			2	2	32 590	42	26.92	2	32 590	58	37.18
			3	2	32 590	58	37.18	2	32 590	58	37.18

由表 4 可以看出,对于 2 250 mm 和 1 580 mm 两条轧线,无论是大批量少品种板坯组还是小批量多品种板坯组,采用计划顺序协调后的 DHCR 比例明显优于不采用计划顺序协调后的 DHCR 比例。

图 1 和图 2 分别为大批量少品种板坯组采用计划顺序协调,针对 2 250 mm 轧线和 1 580 mm 轧线仿真结果,DHCR 数目分别为 229(板坯总量 500)和 130(板坯总量 261)时的轧制单元数和等待时间随计算次数的变化情况。图 3 和图 4 分别为小批量多品种板坯组采用计划顺序协调,针对 2 250 mm 轧线和 1 580 mm 轧线仿真结果,DHCR 数目分别为 148

(板坯总量 380)和 58(板坯总量 156)时的轧制单元数和等待时间随计算次数的变化情况。从图上可以看出,随着计算次数的增加,轧制单元数和等待时间明显得到优化。

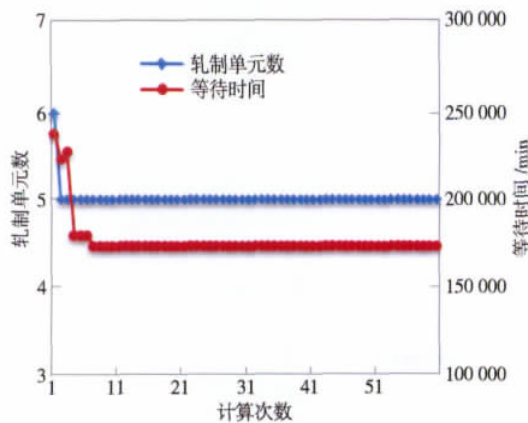


图 1 2 250 mm 轧线大批量少品种(229/500)

Fig. 1 2 250 mm hot rolling line with few varieties and large quantities (229/500)

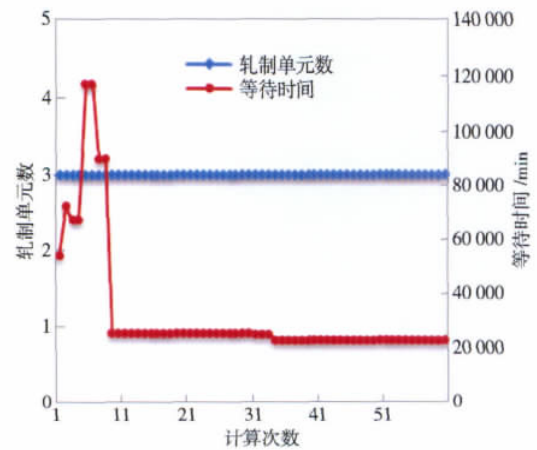


图 2 1 580 mm 轧线大批量少品种(130/261)

Fig. 2 1 580 mm hot rolling line with few varieties and large quantities (130/261)

仿真结果表明,模型和算法能够很好地协调连铸出坯顺序和热轧轧制顺序,从而有效地提高热轧 DHCR 比例。

5 结论

(1) 通过对 DHCR 生产条件以及主要影响因

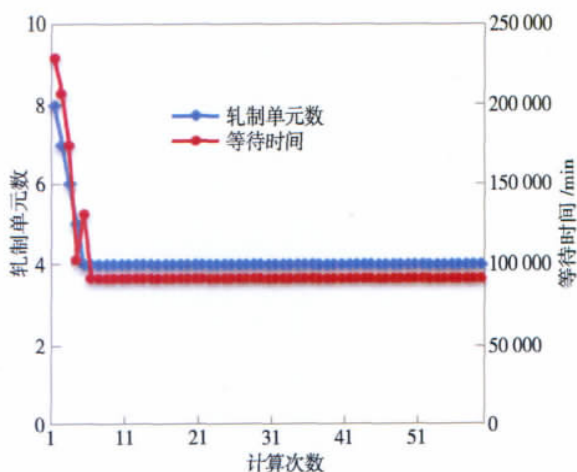


图 3 2250 mm 轧线小批量多品种 (148/380)

Fig. 3 2250 mm hot rolling line with many varieties and small quantities (148/380)

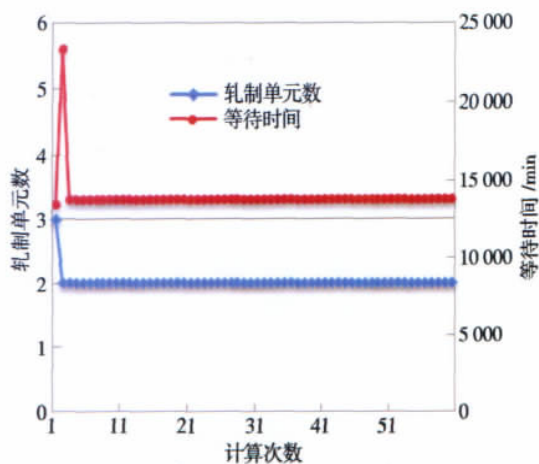


图 4 1580 mm 轧线小批量多品种 (58/156)

Fig. 4 1580 mm hot rolling line with many varieties and small quantities (58/156)

素分析,指出热轧批量计划顺序在满足轧制工艺规程的前提下尽可能与连铸出坯顺序保持一致是提高 DHCR 比的关键,并在此基础上提出了表征计划顺序协调程度的“计划顺序协调因子”。

(2) 基于一体化生产,建立了有利于提高 DHCR 比例的热轧批量计划优化模型,模型在满足热轧轧制工艺的基础上充分考虑了热轧批量计划与连铸出坯计划的协调,并采用改进遗传算法——两交换启发交叉算法对模型进行了求解。

(3) 针对大批量少品种和小批量多品种两组板坯分别对 2250 mm 和 1580 mm 轧线进行了仿真实验,实验对“不采用计划顺序协调”和“采用计划顺序协调”进行了对比。结果表明:模型和算法能够很

好地协调连铸出坯顺序和热轧轧制顺序,有效地提高了热轧 DHCR 比例。

参 考 文 献

[1] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex. *Eur J Oper Res*, 2000, 124(2): 267

[2] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *Eur J Oper Res*, 2001, 133(1): 1

[3] Liu Q, Bai S H, Lu J H, et al. Production plan schedule for the casting-rolling process in BOF special steel plants. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(5): 566
(刘青,白素宏,卢军辉,等. 转炉特钢流程连铸-轧钢生产排产系统. 北京科技大学学报, 2008, 30(5): 566)

[4] Li Y H, Wang W, Xu L J, et al. Rolling plan model and algorithm in hot rolling plant. *Control Decis* 2005, 20(3): 275
(李耀华,王伟,徐乐江,等. 热轧生产轧制计划模型与算法研究. 控制与决策, 2005, 20(3): 275)

[5] Li Y H, Hu G F, Wang W, et al. Research on the method of SM-CC-HR integrated production planning. *Control Eng China*, 2005, 12(6): 549
(李耀华,胡国奋,王伟,等. 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制方法研究. 控制工程, 2005, 12(6): 549)

[6] Lü Z M, Xu J W. Optimization method for hot charge rolling manufacture plan. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2002, 24(6): 675
(吕志民,徐金梧. 一种适用于热送热装生产计划优化的方法. 北京科技大学学报, 2002, 24(6): 675)

[7] Xu J, Lü Z M, Xu J W, et al. Research and application of integrated planning and scheduling framework for DHCR and DR. *Iron Steel*, 2005, 40(12): 55
(徐剑,吕志民,徐金梧,等. DHCR 和 DR 一体化计划调度的体系结构研究及应用. 钢铁, 2005, 40(12): 55)

[8] Lü Z M, Mu W H, Xu J H, et al. Production organization method and simulation of dual-line thin slab continuous casting and hot rolling. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 27(3): 356
(吕志民,牟文恒,许剑桦,等. 两流方式下薄板坯连铸连轧生产组织方法及仿真. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 356)

[9] Lü Z M, Zhang W J, Xu J W. Optimization method for operation planning of special furnace hot charge mode. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(7): 929
(吕志民,张武军,徐金梧. 专用炉混装模式下作业计划优化方法. 北京科技大学学报, 2009, 31(7): 929)

[10] Tang L X. Improved genetic algorithms for TSP. *J Northeast Univ Nat Sci*, 1999, 20(1): 40
(唐立新. 旅行商问题(TSP)的改进遗传算法. 东北大学学报: 自然科学版, 1999, 20(1): 40)