

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200124

考虑铸轧协调的炼钢-连铸-热轧一体化生产计划

郑 忠¹, 王永周¹, 卢 义¹, 高小强²

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘 要: 炼钢-连铸-热轧生产计划编制是一个多目标、多约束的复杂组合优化问题。从有利于多工序生产组织的角度,提出了一种可分工序独立编制工序计划,并且按铸轧衔接关系进行系统协调的一体化生产计划编制方法。即首先以铸坯作为热轧与炼钢-连铸不同工序生产阶段统一的生产计划对象,并将炼钢、连铸与热轧的生产目标和约束进行归类抽象,使得炼钢炉次计划、连铸浇次计划和热轧单元计划的制定模型具有内在的逻辑相关性;以缩小铸轧时间差作为铸轧界面衔接关系的协调控制目标,来优化连铸与热轧之间的生产衔接,进而获得一体化生产计划。采用某钢厂的生产订单数据和生产计划目标、约束条件,通过模型仿真计算与生产实绩数据的对比检验了该一体化生产计划编制方法的有效性。

关键词: 炼钢-连铸-热轧; 生产计划; 一体化方法; 协调模型; 铸轧时间差

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)12-0107-07

Integrated production planning of steelmaking-continuous casting-hot rolling considering coordination between casting and rolling

ZHENG Zhong¹, WANG Yong-zhou¹, LU Yi¹, GAO Xiao-qiang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Integrated production planning of steelmaking-continuous casting-hot rolling is a complex combinatorial optimization problem with multi-objectives and multi-constraints. From the perspective of facilitating a multi-process production organization, an integrated production planning strategy that is planned separately by sub-process and coordinated by casting and rolling is proposed. From the strategy, charge plan, casting plan, and hot rolling plan are respectively made according to the production targets and constraints of steel-making, continuous casting and hot rolling with the slab as the basic unit. Then, the casting and rolling coordination optimization is carried out to obtain an integrated production plan from the casting and rolling connection relationship. In the coordination of casting and rolling, the goal of reducing the time difference between casting and rolling, which would increase the hot charging ratio, is used to optimize and coordinate the interface between continuous casting and hot rolling. According to the production order data, production plan objectives, and constraints of a steel plant, the effectiveness of the integrated production planning method is verified by comparing model simulation calculation and production performance data.

Key words: steelmaking-continuous casting-hot rolling; production planning; integrated method; coordination model; time difference between casting and rolling

钢铁企业的生产工序复杂、设备众多,生产运行的精准控制具有很大的难度。随着钢铁产品的市场需求迅速朝着多品种、小批量、个性化、定制化的趋势发展,与钢铁企业装备大型化的规模化制造模式之间的矛盾日渐凸显,对钢铁企业及时响应生产订单要求的生产计划制定能力有了更高的要求。

钢铁生产的多工序流程式制造,不但涉及连续、离散、准连续等多形式特征的制造过程衔接,也有不

同设备产能、工艺、生产组织模式等多制造约束间的协调。这些都需要一体化的生产计划来保证,有效的一体化生产计划是保证生产稳定、有序,高效率、降成本的重要途径。炼钢-连铸-热轧生产计划包括炉次计划、浇次计划和热轧单元计划,生产对象分别为炉次、浇次和铸坯,各工序生产计划的生产目标和工艺约束存在差异,同时又相互联系甚至相互制约,既要满足各工序生产目标和约束条件编制生产计划

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51734004, 51474044)

作者简介: 郑 忠(1963—), 女, 博士, 教授; E-mail: zhengzh@cqu.edu.cn; 收稿日期: 2020-03-19

任务编排,更要进行各阶段生产计划的协调,从而确保钢铁生产物流的连续、高效运行,一体化生产计划编制是钢铁企业智能制造的关键核心技术^[1-4]。

关于炼钢-连铸-热轧生产计划的一体化编制问题的相关研究受到越来越多的关注。唐立新等^[5]针对炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题特征进行分析,提供了一体化批量生产计划建模的基础,其问题建模主要有两类方式,其一是考虑铸坯的上下线、出入库等铸轧界面操作,从全工序的整体层面进行一体化生产计划编制^[6-11];其二是分工序进行炼钢、连铸、热轧生产计划编制,然后考虑铸坯在浇次计划和热轧单元计划中的一致性,通过连铸和热轧之间的协调完成一体化计划编制^[12-17]。从有利于生产组织与方便适应性调整的角度来看,第一类方式太刚性,生产计划一旦编制完成难以进行局部调整;第二类方式具备一定的柔性,但目前的分工序计划的目标、约束,特别是铸轧协调关系固化,难以适应现场生产环境的变化。现实的炼钢-连铸-热轧生产的各工序阶段既相对独立又紧密联系,同时生产环境、设备、工艺条件等动态多变,对一体化生产计划的灵活性提出更高要求。为此,从有利于多工序生产组织与及时调整的角度,提出一种分工序编制计划再进行铸轧关系协调的一体化计划方法,面向生产订单,以铸坯为炼钢、连铸、热轧生产的统一对象,建立炉次计划、浇次计划和热轧单元计划编制的逻辑关系类似的组合优化模型,以连铸与热轧的衔接关系构建铸轧协调优化模型,实现促进热送热装的一体化生产计划的整体优化。

1 炼钢-连铸-热轧一体化批量计划问题描述

1.1 钢铁生产工艺流程

当前典型的钢铁生产工艺流程如图 1 所示。炼钢-连铸-热轧过程将一般性质的铁水转变成特定钢铁品种、质量、规格的产品,这是钢铁生产流程中最重要的 3 大工序,对整个钢铁生产的质量、成本、效率、效益起着重要作用。炼钢-连铸-热轧过程的生产物流处于高温运行状态,其中连铸与热轧工序的衔接模式包括冷装、温装、直接热装和直接热轧,由于直接热轧一般需要专门化的设备及工艺,不在本文考虑范围,其余 3 种衔接模式决定了铸坯的 3 种去向,同时也决定了热轧单元计划铸坯的来源,如图 1 所示,不同的铸坯去向和来源决定了铸坯的下线和上线操作。

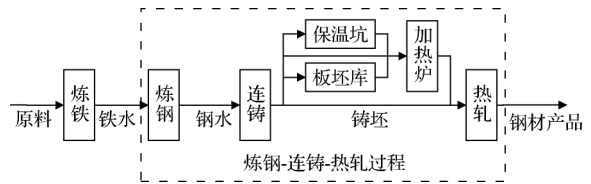


图 1 钢铁生产工艺流程

Fig. 1 Iron and steel production process

1.2 一体化批量计划问题分析及解决思路

炼钢-连铸-热轧各阶段的生产对象、生产目标和约束条件见表 1。面向生产订单制定的各生产计划是批量生产计划,即需要把待生产的热轧产品转

表 1 不同生产阶段的生产对象、生产目标和约束条件

Table 1 Production objects, objectives and constraints in different production stages

工序阶段	生产对象	生产目标	约束条件
炼钢阶段	炉次 (铸坯组合)	最小化无委材量; 最小化炉次数	设备产能约束:炉容约束 工艺约束:同一炉次内铸坯的宽度、厚度、钢种相同
连铸阶段	浇次 (炉次组合或铸坯组合)	最大化同一浇次内炉次数; 最小化浇次数	设备产能约束:同一浇次内炉次数量约束 工艺约束:同一浇次内铸坯厚度相同;同一浇次内宽度满足变化范围约束;同一浇次内不同炉次的钢种连浇约束
热轧阶段 (主体材)	铸坯 (铸坯组合)	最大化轧制公里数; 最小化规格变化惩罚	设备产能约束:轧辊最大轧制长度 工艺约束:主体材同宽最大轧制长度;相邻轧制的铸坯在宽度、厚度和硬度变化方面的约束

换成连铸机的铸坯(另文讨论),然后可以按顺流程或逆流程方向制定炼钢的炉次计划、连铸的浇次计划与热轧的单元计划。

炼钢-连铸阶段的批量计划的对象是炉次与浇次,炉次由铸坯组合而成,浇次由炉次组合而成^[18],

进而也可视为铸坯的组合;热轧单元计划包括烫辊材和主体材部分,因烫辊材量小,不涉及热送热装的衔接问题,故可不在主计划编制时考虑,仅针对主体材部分进行铸坯的组合优化。炼钢-连铸阶段的主要约束是冶炼钢种、钢级和铸坯规格,涉及铸坯的规

格断面组合;热轧阶段主要约束在于宽度和厚度等的组合,同宽有要求且宽度由宽向窄变化,厚度、硬度等必须平滑变化;而铸轧间的衔接则必须考虑有利于热送热装,即尽可能使铸坯下线的少、下线时间短,铸轧衔接关系是一体化计划优化的关键。因此,炼钢-连铸-热轧的生产对象可以统一为铸坯,这样多阶段的生产计划编制问题可以看做是铸坯的组合优化(炉次计划、浇次计划、热轧单元计划)过程。

为了实现生产计划一体化编制,需要实现浇次计划和热轧单元计划在生产物流及时间方面的衔接协调。连铸和热轧工序通过铸坯的上下线以及铸坯在板坯库、保温坑和加热炉内的停留实现连铸出坯序列和热轧轧制序列的尽可能匹配,从而实现工序之间的衔接协调。因此将连铸和热轧之间的物流进行简化,直接通过当前可用的铸坯集合作为浇次计划与热轧单元计划的衔接桥梁,每块铸坯除固有的属性之外,增加出坯时间和热轧时间等属性,通过出坯时间与热轧时间的协调来实现浇次计划与热轧单元计划的衔接协调。为了提高钢铁生产过程中铸坯的“热装率”,要求出坯时间与热轧时间的间隔越小越好。

综上,考虑工序衔接协调的炼钢-连铸-热轧一体化批量计划问题是在满足各工序设备、生产组织等约束的前提下,以铸坯为研究对象,分别编制炉次计划、浇次计划和热轧单元计划,然后考虑铸坯在连铸和热轧工序之间的时间和物流衔接关系,确定铸坯的下线和上线操作,实现工序间的协调,进而获得优化的一体化生产计划。这种一体化生产计划编制方法既可满足生产计划的一体化优化,也有利于在生产计划实施时的局部调整。

2 炼钢-连铸-热轧生产计划一体化模型方法

2.1 各工序的组合优化模型

为了便于描述模型,首先给出符号的定义。

(1)铸坯。 i 为铸坯编号, $i = \{1, 2, \dots, I\}$; w_i 为铸坯 i 的质量; G_i^b 为铸坯 i 的钢级; W_i^b 为铸坯 i 的宽度; H_i^b 为铸坯 i 的厚度; L_i^b 为铸坯 i 的长度; W_i^{hr} 为铸坯 i 的轧制宽度; H_i^{hr} 为铸坯 i 的轧制厚度; L_i^{hr} 为铸坯 i 的轧制长度。根据质量守恒以及考虑到热轧损失,可作如下计算: $L_i^b \times W_i^b \times H_i^b \times \rho_i^c \times \eta_i = L_i^{hr} \times W_i^{hr} \times H_i^{hr} \times \rho_i^r$, 其中 η_i 为铸坯 i 的热轧成材率; ρ_i^c 和 ρ_i^r 分别为铸坯和热轧板卷的密度; T_i^{cc} 为铸坯 i 的出坯时间; T_i^{hr} 为铸坯 i 的热轧时间。

(2)炉次计划。 n 为炉次编号, $n = \{1, 2, \dots, N\}$; M 为炉容量; G_n^{cc} 为炉次 n 的钢级; W_n^{cc} 为炉次 n 的浇铸宽度; H_n^{cc} 为炉次 n 的浇铸厚度。

(3)浇次计划。 j 为浇次编号, $j = \{1, 2, \dots, J\}$; L^{cc} 为中间包寿命,即浇次计划最大可包含的炉次数。

(4)热轧单元计划。 k 为热轧单元计划编号, $k = \{1, 2, \dots, K\}$; L_k^{\max} 为热轧单元计划 k 的最大轧制长度; L_{SW}^{\max} 为热轧板卷同宽最大轧制长度。

(5)决策变量。 $u_{i,n}$ 为 0/1 变量,当且仅当铸坯被分配到炉次 n 时为 1; $\eta_{n,j}$ 为 0/1 变量,当且仅当炉次 n 被分配到浇次计划 j 进行浇铸时为 1; $x_{i,k}$ 为 0/1 变量,当且仅当铸坯 i 被分配到热轧单元计划 k 内轧制时为 1。

(6)辅助变量。 $u_{i,i',n}$ 为 0/1 变量,当且仅当铸坯 i 和铸坯 i' 同时被分配到炉次 n 时为 1; $\eta_{n,n',j}$ 为 0/1 变量,当且仅当炉次 n 和炉次 n' 同时被分配到浇次 j 时为 1; $x_{i,i',k}$ 为 0/1 变量,当且仅当铸坯 i 和铸坯 i' 同时被分配到热轧单元计划 k 内,且铸坯 i' 被安排到铸坯 i 后轧制时为 1; $\xi_{i,i'}$ 为 0/1 变量,当且仅当铸坯 i 和铸坯 i' 的热轧宽度相同时为 1。

通过表 1 对不同生产阶段的生产目标和约束条件的分析,各阶段的生产目标均为最大化计划容量和最小化不满足工艺约束的惩罚,可以统一表述式(1)和式(2)的目标函数。目标函数为

$$f_1 = \min \sum_{h=1}^D (U - \sum_{d=1}^D X_{d,h} \cdot Z_d) \quad (1)$$

$$f_2 = \min \sum_{h=1}^D \sum_{d=1}^D \sum_{d'=1, d' \neq d}^D Y_{d,d',h} \cdot C_{d,d'} \quad (2)$$

式中: $d, h, U, X_{d,h}, Z_d, Y_{d,d',h}, C_{d,d'}$ 为炉次计划、浇次计划和热轧单元计划的通用模型符号。

对于炉次计划,式(1)为最小化无委材量(即无订单对应的铸坯量),式(2)为最小化不满足组炉工艺约束的惩罚,此时 $d = i, h = n, U = M, X_{d,h} = u_{i,n}, Z_d = w_i, Y_{d,d',h} = u_{i,i',n}, C_{d,d'}$ 为不满足组炉约束的惩罚值;对于浇次计划,式(1)为最小化中间包寿命和浇次内实际炉次数与的差值,式(2)为最小化不满足组浇工艺约束的惩罚,此时 $d = n, h = j, U = L^{cc}, X_{d,h} = \eta_{n,j}, Z_d = 1, Y_{d,d',h} = \eta_{n,n',j}, C_{d,d'}$ 为不满足组浇约束的惩罚值;对于热轧单元计划,式(1)为最小化轧辊最大轧制长度与热轧单元计划实际轧制长度的差值,式(2)为最小化热轧单元计划内相邻铸坯规格跳跃惩罚,此时 $d = i, h = k, U = L_k^{\max}, X_{d,h} = x_{i,k}, Z_d = L_i^{hr}, Y_{d,d',h} =$

$x_{i,i',k}$, $C_{d,d'}$ 为热轧单元计划规格跳跃的惩罚值。

约束条件如下。首先,不同生产工序计划的设备产能约束可以统一表述为式(3)。

$$\sum_{d=1}^D X_{d,h} \cdot Z_d \leq U \quad (3)$$

对于炉次计划,式(3)为炉容量约束,此时, $d = i$, $h = n$, $U = M$, $X_{d,h} = u_{i,n}$, $Z_d = w_i$;对于浇次计划,式(3)为中间包最大可浇铸炉次数约束,此时 $d = n$, $h = j$, $U = L^{\text{cc}}$, $X_{d,h} = \eta_{n,j}$, $Z_d = 1$;对于热轧单元计划,式(3)为轧辊最大可轧制长度约束,此时, $d = i$, $h = k$, $U = L_k^{\text{max}}$, $X_{d,h} = x_{i,k}$, $Z_d = L_i^{\text{hr}}$ 。

此外,各工序计划还需要满足相应工序的工艺约束,各工序具体的工艺约束条件如下。

(1) 炉次计划的工艺约束条件为

$$H_i^b \cdot u_{i,n} = H_i^b \cdot u_{i',n}, u_{i,n} \cdot u_{i',n} = 1 \quad (4)$$

$$G_i^b \cdot u_{i,n} = G_i^b \cdot u_{i',n}, u_{i,n} \cdot u_{i',n} = 1 \quad (5)$$

式(4)和式(5)分别为同一炉次中铸坯厚度、钢级相同。

(2) 浇次计划的工艺约束条件为

$$H_n^{\text{cc}} \cdot \eta_{n,j} = H_n^{\text{cc}} \cdot \eta_{n',j}, \eta_{n,j} \cdot \eta_{n',j} = 1 \quad (6)$$

$$\eta_{n,n',j} \cdot |W_n^{\text{cc}} - W_{n'}^{\text{cc}}| \leq C \quad (7)$$

$$\eta_{n,n',j} \cdot |G_n^{\text{cc}} - G_{n'}^{\text{cc}}| < gC \quad (8)$$

式(6)为浇次内每个炉次浇铸厚度相同;式(7)为浇次内不同炉次浇铸宽度变化范围,其中 C 为最大调宽范围;式(8)为浇次内不同炉次钢级连浇约束, gC 为钢级跳跃范围。

(3) 热轧单元计划的工艺约束条件为

$$\sum_{i=1}^I \sum_{i' \neq i, i'=1}^I x_{i,i',k} \cdot \xi_{i,i'} \cdot L_i^{\text{hr}} \leq L_{\text{SW}}^{\text{max}} \quad (9)$$

$$x_{i,i',k} \cdot VW_{i,i'} \leq W^{\text{max}}(jp) \quad (10)$$

$$x_{i,i',k} \cdot VH_{i,i'} \leq H^{\text{max}}(jp) \quad (11)$$

$$x_{i,i',k} \cdot VS_{i,i'} \leq S^{\text{max}}(jp) \quad (12)$$

$$x_{i,i',k} \cdot (W_i^{\text{hr}} - W_{i'}^{\text{hr}}) \leq 0 \quad (13)$$

式(9)为热轧单元计划内同宽最大轧制长度;式(10)~式(12)分别为热轧单元计划内相邻铸坯轧制宽度、厚度和硬度跳跃限制,其中 $W^{\text{max}}(jp)$ 、 $H^{\text{max}}(jp)$ 、 $S^{\text{max}}(jp)$ 分别为热轧单元计划内相邻铸坯的最大轧制宽度、厚度和硬度跳跃值, $VW_{i,i'}$ 、 $VH_{i,i'}$ 、 $VS_{i,i'}$ 分别为热轧单元计划内相邻铸坯在轧制宽度、厚度、硬度方面的跳跃值;式(13)为热轧单元计划内主体材宽度非增变化。

2.2 铸轧界面的协调优化模型

在浇次计划与热轧单元计划模型基础上,根据

铸坯在铸轧界面的不同衔接关系来考虑两者之间的协调。不同的衔接关系对铸坯的出坯时间与轧制时间存在不同程度的影响,同时为了保证热轧生产计划的可行,协调过程还需要保证热轧单元计划的优化目标变化值尽量小。协调模型以最小化铸轧时间差(即铸坯出坯时间与热轧时间的差值)、最小化铸轧协调前后热轧单元计划优化目标 1 和 2 的变化值为目标构建,即

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^I |\Delta T_i| \quad (14)$$

$$f_4 = \min \Delta E_1 \quad (15)$$

$$f_5 = \min \Delta E_2 \quad (16)$$

式(14)为最小化铸轧时间差, $\Delta T_i = T_i^{\text{hr}} - T_i^{\text{cc}}$;式(15)和式(16)为最小化热轧单元计划优化目标变化值, ΔE_1 、 ΔE_2 分别为热轧单元计划优化目标 1 和 2 的变化值。协调模型需要满足的约束条件为连铸、热轧工序的生产约束。

2.3 一体化计划方法

炼钢-连铸-热轧生产计划一体化编制,是以生产周期内订单池内的铸坯为对象,利用组合优化模型得到炉次计划、浇次计划及热轧单元计划,再利用铸轧协调模型进行铸轧界面的协同优化,最后制定出一体化生产计划方案,其流程如图 2 所示。基于该流程,设计了多目标蚁群算法^[19]求解炉次计划和浇次计划模型,设计了多目标遗传算法^[19]求解热轧单元计划模型,并采用启发式方法求解铸轧协调模型,模型算法的主要步骤如下。

Step1: 读取计划周期内的铸坯。

Step2: 由多目标蚁群算法求解炉次计划和浇次计划模型,获得可行的炼钢-连铸生产计划,根据每台连铸机的开浇时间计算浇次计划中每块铸坯的出坯时间,并将其作为属性加入到铸坯中。

Step3: 由多目标遗传算法求解热轧单元计划模型,获得可行的热轧单元计划,根据热轧机的开始轧制时间计算每块铸坯的开始轧制时间,并将其作为属性加入到铸坯中。

Step4: 计算当前计划的铸轧时间差,检测当前生产计划中对铸轧时间差影响最大的铸坯,即出坯时间和轧制时间差值最大的铸坯,在满足各阶段约束的条件下进行位置调整,包括调整铸坯在浇次计划和热轧单元计划中的位置,计算调整后的铸轧时间差,若降低且对计划可执行性没有影响则进行调整,否则不进行调整。若未达到终止条件,继续执行 Step4。

Step5:若通过调整铸坯位置仍然无法降低铸轧时间差,返回 Step2 和 Step3,调整各算法的参数,重新获取可执行的炉次计划、浇次计划和热轧单元计划,执行 Step4。若到达终止条件,执行 Step6。

Step6:输出满足各工序生产组织约束的炼钢-连铸-热轧一体化生产计划。

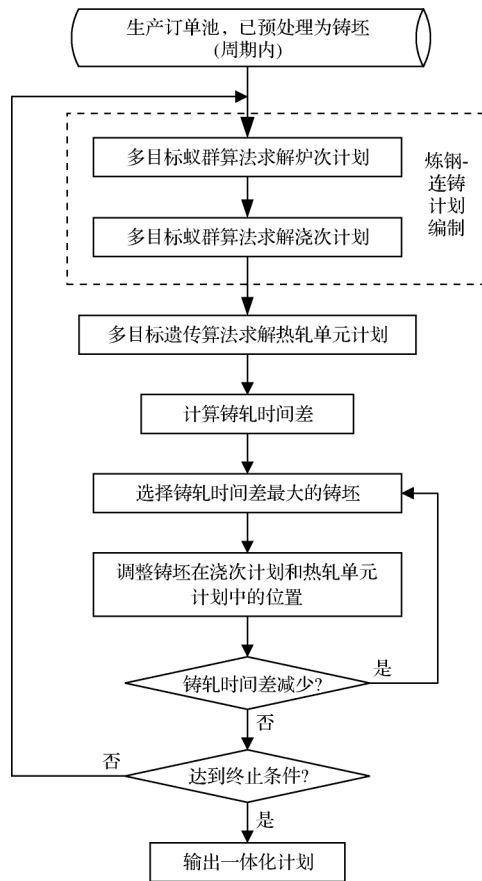


图 2 一体化生产计划编制流程

Fig. 2 Integrated production planning process

3 案例测试

3.1 测试对象

为了验证模型和方法的有效性,以某钢铁企业中厚板的炼钢-连铸-热轧生产计划编制为对象进行模型和方法测试。以某一天的 3 个浇次计划数据为对象,铸坯信息见表 2,共 504 块铸坯,炉容量上限为 250 t。以表 2 内铸坯数据为模型输入对象,进行炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制。分别采用多目标蚁群算法和多目标遗传算法进行炼钢-连铸生产计划和热轧单元计划编制,然后进行工序计划协调。其中,多目标蚁群算法参数为:蚂蚁个数由铸坯质量和炉次容量确定,初始化种群个数为 10,循环迭代进化 10 代;多目标遗传算法参数为:初始化各子群数目为 80,循环迭代进化 60 代,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.15。

3.2 测试结果

如表 3 所示,模型编制出相应的 3 个浇次和 59 个炉次,最大连浇炉数为 40 炉。同时,模型运行得出 2 个热轧单元计划,每个热轧单元计划内主体材宽度满足从宽到窄的要求。企业生产实绩和模型运行结果比较见表 4,通过模型组合优化,炉次数量减少 3 个,轧制热装率提高 18%(依据测试钢铁企业热装规定,出坯之后 24 h 内轧制均认为热装,铸坯温度符合企业热装标准,轧制热装率=热装铸坯数/轧制铸坯总数),同时相同时间段内生产订单的铸坯是全部生产完成,因此炉次数量减少不会降低钢铁企业产量。论文模型方法能够提升生产计划质量,为企业改善生产组织、降本增效、节约能源提供条件。模型仿真计算的结果优于生产实绩的原因:一方

表 2 铸坯信息

Table 2 Slab information

序号	钢种	铸坯数量/个	铸坯断面/(mm×mm)	轧制厚度/mm	轧制宽度/mm	硬度等级	质量/t
1	A	134	230×1 530	14~25	1 930~2 000	2	2 804.26
2	A	235	200×2 200	14~20	2 200	2	6 373.08
3	B	55	230×1 530	8~12	1 880~2 200	2	1 330.57
4	C	77	200×2 200	10~20	2 200~2 910	1	2 382.68
5	D	3	200×2 200	16~20	2 200~2 300	1	91.5

面因为现实生产是按照人工经验编制的生产计划在实施,人工经验和计算能力有限,面对大量的铸坯难以优化排程,并实现设备资源最大化利用,而论文建立的模型方法可以尝试不同铸坯的组合,从而达到

优化目标;另一方面,本文提出的生产计划一体化方法还可以通过铸轧时间差进行铸轧界面协调,来有效减少铸坯下线数量和下线时间,从而提高热装率。此外,模型运行所得数据均满足实际生产中各

表 3 炉次计划和浇次计划结果

Table 3 Partial results of charge plan and cast plan

浇次序号	炉次序号	钢种	铸坯厚度/mm	铸坯宽度/mm	平均炉容量/t
1	1~6	B	230	1 530	217.53
2	7~19	A	230	1 530	213.9
3	20~47	A	200	2 200	215.36
3	48	D	200	2 200	91.5
3	49~59	C	200	2 200	216.61

表 4 企业生产实绩和模型运行结果比较

Table 4 Comparison of production performance and model operation results

项目	炉次数量	浇次数量	轧制热装率/%
企业生产实绩	62	3	63
模型运行结果	59	3	81

工序产能和工艺约束。因此,本文提出的模型和方法可得到合理的中厚板炼钢-连铸-热轧一体化计划,检验了模型和方法的可行性。

4 结语

论文针对炼钢-连铸-热轧一体化批量计划编制问题,将一体化生产计划编制问题分解为炉次计划、浇次计划和热轧单元计划的分工序生产计划编制和铸轧界面协调计划编制,依据各阶段生产对象、生产目标和生产约束,将分工序生产计划模型统一为针对铸坯对象的组合优化问题进行建模;从铸轧界面有利于热送热装的生产物流顺行的角度,提出铸轧时间差概念,并建立铸坯在连铸与热轧间协调优化模型,实现生产计划的一体化编制。这种一体化生产计划方法可提供钢厂应对现实动态场景变化情况下进行计划调整的灵活性。通过针对某具体钢厂炼钢-连铸-热轧生产订单和生产条件的仿真试验,验证了论文构建的一体化生产计划编制方法的有效性。

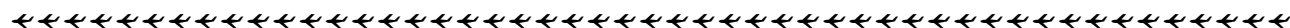
参考文献:

- [1] 顾建新, 张福明. 钢铁制造流程智能制造与智能设计[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 1. (JIE Jian-xin, ZHANG Fu-ming. Intelligent manufacturing and intelligent design of iron and steel manufacturing process[J]. China Metallurgy, 2019, 29(2): 1.)
- [2] 赵振锐, 孙雪娇. 钢铁企业智能制造架构的探索、实践及展望[J]. 冶金自动化, 2019, 43(1): 24. (ZHAO Zhen-rui, SUN Xue-jiao. Exploration, practice and prospect of intelligent manufacturing structure of iron and steel enterprises[J].

Metallurgical Industry Automation, 2019, 43(1): 24.)

- [3] 王国栋. 高质量中厚板生产关键共性技术研发现状和前景[J]. 轧钢, 2019, 36(1): 1. (WANG Guo-dong. Status and prospects of research and development of key common technologies for high-quality heavy and medium plate production[J]. Steel Rolling, 2019, 36(1): 1.)
- [4] 刘文仲. 中国钢铁工业智能制造现状及思考[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 1. (LIU Wen-zhong. Current situation and thinking of intelligent manufacturing in China's iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2020, 30(6): 1.)
- [5] 唐立新, 杨自厚, 沈宏宇, 等. 炼钢-连铸-热轧集成批量计划因素分析[J]. 钢铁, 2000, 35(5): 74. (TANG Li-xin, YANG Zi-hou, SHEN Hong-yu, et al. Analysis of modeling factor of integrated lot planning for SM-CC-HRM[J]. Iron and Steel, 2000, 35(5): 74.)
- [6] 孙福权, 郑秉霖, 崔建江, 等. 炼钢-热轧一体化管理的生产计划编制问题研究[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 409. (SUN Fu-quan, ZHENG Bing-lin, CUI Jian-jiang, et al. The research of production planning of integrated management in steelmaking-hot rolling[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 409.)
- [7] 刘怡, 郑忠, 陈开, 等. 炼钢连铸热轧一体化批量计划编制模型及实现[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 60. (LIU Yi, ZHENG Zhong, CHEN Kai, et al. Modeling and realizing of integrated batch planning for steelmaking-continuous casting and hot strip rolling[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(3): 60.)
- [8] LIN Jian-hua, LIU Min, HAO Jing-hua, et al. A multi-objective optimization approach for integrated production planning under interval uncertainties in the steel industry[J]. Computers and Operations Research, 2016, 72: 189.
- [9] 张春生, 李铁克. 炼钢与热轧批量计划协调优化模型与算法[J]. 信息与控制, 2017, 46(1): 122. (ZHANG Chun-sheng, LI Tie-ke. Optimization model and algorithm for lot planning coordination between steelmaking and hot rolling[J]. Information and control, 2017, 46(1): 122.)
- [10] ZHU Bao-lin, JI Shou-feng. Steelmaking-hot rolling scheduling model and method for integrated management in iron and steel enterprises[J]. Advanced Materials Research, 2013, 860-863: 3094.
- [11] 刘立钧, 温治, 苏福永, 等. 冶铸轧混装一体化调度管理系统研究及应用[J]. 冶金自动化, 2014, 38(1): 28. (LIU Li-

- jun, WEN Zhi, SU Fu-yong, et al. Research and application of hybrid integrated scheduling management system of steel-making-casting-rolling[J]. Metallurgical Industry Automation, 2014,38(1): 28.)
- [12] 孙玲, 李铁克. 炼钢-连铸-热轧批量计划的约束满足算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007,13(5): 940. (SUN Ling, LI Tie-ke. Constraint satisfaction algorithm of batch planning for steel making-continuous casting-hot rolling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007,13(5):940.)
- [13] 张文学, 李铁克. 基于动态约束满足的连铸热轧一体化滚动计划[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2177. (ZHANG Wen-xue, LI Tie-ke. Integration of continuous-casting and hot-rolling rolling plan based on dynamic constraint satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10):2177.)
- [14] 张文学, 李铁克. 面向多种生产工艺的冶铸轧一体化批量计划优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 1296. (ZHANG Wen-xue, LI Tie-ke. Batch plan optimization of steel integrated production with multiple processes[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013,19(6):1296.)
- [15] 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[J]. 控制工程, 2005, 6: 549. (LI Yao-hua, HU Guo-fen, WANG Wei, et al. Research on the method of integrated production planning for steelmaking-continuous casting-hot rolling[J]. Control Engineering of China, 2005, 6:549.)
- [16] GUO Dong-feng, LI Fu-liang, LI Tie-ke. Integrated batch planning model and algorithm for steelmaking-continuous casting-hot rolling:2009[C]//The 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2009). Xi'an: IEEE, 2009.
- [17] 郑忠, 刘怡, 陈开, 等. 炼钢-连铸-热轧生产计划编制的统一模型及智能算法[J]. 北京科技大学学报, 2013,35(5): 687. (ZHENG Zhong, LIU Yi, CHEN Kai, et al. Unified modeling and intelligent algorithm of production planning for the process of steelmaking, continuous casting and hot rolling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013,35(5):687.)
- [18] TANG Li-xin, WANG Gong-shu. Decision support system for the batching problems of steelmaking and continuous-casting production[J]. Omega, 2008,36(6): 976.
- [19] 卢义. 连铸热轧协调的一体化生产计划智能优化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. (LU Yi. Research on Intelligent Optimization Method of Integrated Production Planning for Coordination of Continuous Casting and Hot Rolling[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.)



(上接第 91 页)

- [20] 苏钰, 张梅, 符仁钰, 等. 低碳低硅 600 MPa 级 TRIP-SH 钢的疲劳性能研究[J]. 金属热处理, 2008, 33(8): 25. (SU Yu, ZHANG Mei, FU Ren-yu, et al. Study on fatigue properties of low carbon and low silicon 600 MPa grade TRIP-SH steel[J]. Metal Heat Treatment, 2008,33(8):25.)
- [21] 韩伟钢, 韩顺, 厉勇, 等. 大型客机用 300M 钢疲劳破坏行为[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 83. (HAN Wei-gang, HAN Shun, LI Yong, et al. Behavior of fatigue fracture of 300M steel for large passenger aircraft[J]. Iron and Steel, 2017, 52(10):83.)
- [22] 王存宇. 第三代汽车钢工业生产关键技术研究[R]. 太原: 太原钢铁(集团)有限公司, 2017. (WANG Cun-yu. Investigation on Key Technology of the Third Generation Automobile Steel[R]. Taiyuan: TISCO, 2017.)