

· 试验研究 ·

## 方坯直接轧制工艺铸-轧界面连铸坯排队过程的衔接优化

张宏亮 冯光宏 刘鑫 陈继林 王宝山 马健

(钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081)

**摘要** 通过排队论的方法,构建了方坯直接轧制工艺铸-轧界面的连铸坯排队的数学模型,并对钢厂 $2 \times 70$  t EAF-6流 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 方坯直接轧制生产线进行排队论的案例优化分析。在保证直接轧制率的情况下,钢水量由 $1.88 \text{ t/min}$ 提高到了 $2.3 \text{ t/min}$ ,直接轧制优化工艺提高了生产线的产量。在方坯直接轧制生产系统中,连铸坯的平均等待时间越短,生产线的直接轧制率越高;当连铸工序与轧钢工序的通钢量相同时,直接轧制工艺的产量达到最大;当排队系统中连铸坯的平均等待时间小于铸坯的极限等待时间时,直接轧制工艺的效率最高;只有同时具备以上两个条件时,方坯直接轧制工艺的铸-轧衔接匹配达到最优。

**关键词** 直接轧制工艺 排队论 铸坯衔接优化 数学模型

## Optimization of Conveying Connection of Continuous Casting Billet Queuing Process in Direct Rolling Process of Billet at Casting-Rolling Interface

Zhang Hongliang, Feng Guanghong, Liu Xin, Chen Jilin, Wang Baoshan and Ma Jian  
(Metallurgy Process Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** Through the method of queuing theory, a mathematical model of the queuing of continuous casting billets at cast-rolling interface of the billet straight rolling process is constructed, and a case analysis of the queuing theory is carried out on the billet straight rolling production line of  $2 \times 70$  t EAF-6 strand  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  billet at a steel mill. On the premise of ensuring the direct rolling rate, the output of the production line increases by optimizing the direct rolling process, and the liquid steel quantity increases from  $1.88 \text{ t/min}$  to  $2.3 \text{ t/min}$ . In the billet direct rolling production system, the shorter the average waiting time of continuous casting billet, the higher the efficiency of direct rolling production at the production line; In order to maximize the output of the straight rolling process, it is necessary to satisfy the same amount of steel in the continuous casting process and the rolling process. In order to achieve the highest straight rolling efficiency, that is, the largest straight rolling rate, the average waiting time of the continuous casting slab in the queuing system needs to be less than the limit waiting time of the casting slab. Only when the above two conditions are met at the same time, the casting-rolling connection matching of the billet straight rolling process is optimal.

**Material Index** Direct Rolling Process, Queuing Theory, Billet Conveying Connection Optimization, Mathematical Model

我国钢材总产量2019年达到12.05亿吨,棒线材产品总量大约5亿吨,约占整个钢材总产量的42%。因此,棒线材企业高效生产和节能减排显得尤为重要,尤其是新的流程界面技术,对于降低全行业的能耗,减少二氧化碳的排放,加快钢铁行业的绿色转型升级,有着重要的意义。方坯直接轧制工艺技术就是一项典型的流程界面技术<sup>[1]</sup>。

传统长型材的生产流程是一种连续-间歇交替出现的运行方式,连铸坯的加热炉在不同程度上起着连铸机-热轧机之间“缓冲-协调”的角色<sup>[2]</sup>。方坯直接轧制工艺是典型的铸-轧界面的界面技术,取消了传统加热炉,充分利用了连铸坯连铸过程的显热,显著降低了长型材生产过程轧钢工序的能耗。但是,直接轧制工艺没有了加热炉的缓冲作用,连铸坯在铸-轧界面的衔接过程出现了很多问题,如连铸坯直接轧制率偏低、送坯节奏与轧钢不匹配、低温铸坯

剔坯较多、铸坯头尾温差等问题<sup>[3-4]</sup>。

铸-轧界面的衔接效率包括两个方面:(1)连铸工序与轧钢工序的产能匹配,(2)生产节奏的控制。现场直接轧制工艺生产线大多是由原加热炉工艺改进形成的,连铸工序产能大于轧钢工序产能,工序间的生产节奏也明显加快。如何在保证原有生产量的基础上提高直接轧制工艺的生产效率已经成为限制直接轧制技术发展的主要瓶颈。

排队论是运筹学的一个重要分支,是研究系统随机聚散现象和随机服务系统工作过程的一门学科。通过排队论可以解决很多工程上的问题<sup>[5-12]</sup>,也包括一些钢铁流程领域界面衔接的问题<sup>[13-14]</sup>,虽然关于炼钢-连铸-热轧工序调度衔接的研究较多<sup>[15-18]</sup>,但是针对长型材直接轧制工艺的铸-轧衔接效率问题还未见报道。根据排队论,长型材直接轧制工艺铸-轧界面的连铸坯衔接问题,可以近似的看

成多个连铸坯在单个服务台进行排队服务的数学问题。本文通过排队论构建长型材直接轧制工艺生产铸-轧界面连铸坯的数学模型,研究铸-轧界面连铸坯的衔接规律,找到提高长型材直接轧制工艺的直接轧制率的方法。

### 1 铸-轧界面的连铸坯输送衔接的排队模型

长型材直接轧制生产线铸-轧界面的连铸坯衔接过程是铸坯从切割开始,到进入粗轧机为止,其中所经历时间的过程主要包括:连铸坯的切断、连铸坯多流输送、连铸坯的并流、连铸坯等待、连铸坯快速输送、粗轧机轧制等,每个企业由于生产工艺布置不同,各段的时间也各不相同。

已知连铸坯到达轧机前的时间规律服从参数为  $\lambda$  的泊松过程,满足其平稳性、无后效性、普通性的要求。连铸坯粗轧时间从参数为  $\mu$  的负指数分布,所以在  $[t, t + \Delta t)$  时间区间内分为:

(1) 仅有一个铸坯到达的概率为  $\lambda\Delta t + o(\Delta t)$ , 没有铸坯到达的概率就是  $1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)$ 。

(2) 当一个铸坯正在接受轧制区服务时,一个铸坯被服务完的概率是  $\mu\Delta t + o(\Delta t)$ , 没有被服务完的概率就是  $1 - \mu\Delta t + o(\Delta t)$ 。

(3) 多于一个铸坯的被服务或服务完的概率是  $o(\Delta t)$ 。

建立排队系统的数学模型之前,需求出任意时刻  $t$  的排队中有  $n$  个铸坯的概率  $P_n(t)$ , 它决定了系统运行的特征。在该排队系统中,现场不能同时到达和离开两个以上的铸坯,因此在  $[t, t + \Delta t)$  的时间内,系统中有  $n$  个铸坯 ( $0 < n \leq N$ ) 存在 4 种情况,分别是:  $P_n(t)(1 - \lambda\Delta t)(1 - \mu\Delta t)$ ;  $P_{n+1}(t)(1 - \lambda\Delta t)\mu\Delta t$ ;  $P_{n-1}(t)\lambda\Delta t(1 - \mu\Delta t)$ ;  $P_n(t) \cdot \lambda\Delta t \cdot \mu\Delta t$ 。

这 4 种状态是独立存在的,因此  $P_n(t + \Delta t)$  应是四项之和,存在如下关系:

$$P_n(t + \Delta t) = P_n(t)(1 - \lambda\Delta t - \mu\Delta t) + P_{n+1}(t)\mu\Delta t + P_{n-1}(t)\lambda\Delta t + o(\Delta t) \tag{1}$$

此外,有容量的排队系统还存在以下关系:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = 1 \tag{2}$$

令  $\rho = \lambda/\mu$ , 由上面求导可得到稳定状态下的方程为:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{n+1}}, \rho \neq 1 \\ P_n = \frac{(1 - \rho)\rho^n}{1 - \rho^{n+1}}, n \leq N \end{cases} \tag{3}$$

式中:  $P_n$ - 系统中存在  $n$  个铸坯的概率;  $N$ - 排队系统的最大容量;  $\rho$ - 排队系统的服务率; 等于系统中铸坯的到达时间除以铸坯的轧制时间。

该排队系统中,连铸坯的平均排队长和平均队长为:

$$\begin{cases} L_s = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=1}^{\infty} n(1 - \rho)\rho^n \\ L_q = \sum_{n=1}^{\infty} (n - 1)P_n = \sum_{n=1}^{\infty} nP_n - \sum_{n=1}^{\infty} P_n \end{cases} \tag{4}$$

根据排队论中的利特尔法则,铸-轧界面的连铸坯平均等待时间和平均逗留时间分别如下:

$$\begin{cases} W_s = \frac{\rho}{\mu - \lambda} - \frac{n\rho^{n+1}}{\lambda(1 - \rho^n)} \\ W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{n\rho^{n+1}}{\lambda(1 - \rho^n)} \end{cases} \tag{5}$$

### 2 现有直接轧制生产线的案例分析

#### 2.1 现场直接轧制生产工艺参数和模型计算条件

钢厂现有电弧炉短流程炼钢的方坯直接轧制工艺生产线一条,70 t 电弧炉 2 座,1 台六机六流的连铸机,棒材和线材生产线两条。生产钢种主要为 HRB400E,铸坯断面尺寸为 150 mm × 150 mm。其中,连铸段末端设置移钢并流区,完成铸坯并流或者下线,连铸机向两条轧线交替送坯,送坯量各占 50%, 然后进入不同轧线的快速输送辊道,最后轧制生产。整个铸轧衔接过程如图 1 所示。本文针对其中一条轧钢线进行连铸坯排队模型的计算分析。

钢厂连铸机钢水量的统计如表 1 所示,电弧炉出钢时间为 30 ~ 35 min。连铸生产过程中的拉速为 2 ~ 2.3 m/min,连铸坯定尺长度为 6 m,现场直接轧制工艺生产时,连铸机保持四流或五流生产,并对应两条轧线。该生产线连铸坯切断到输送到轧机的最短时间为 1.34 min,单根连铸粗轧第一道次的轧制时间为 42 s,因此该铸坯排队系统的平均服务率为 1.42 支/min。整个输送过程中所容纳的铸坯最多为 6 支,因

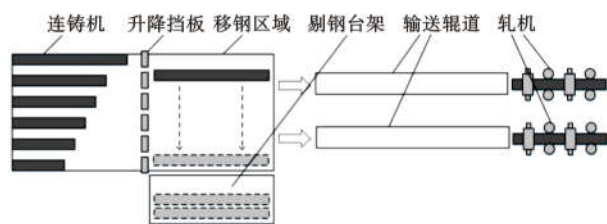


图 1 钢厂铸坯在铸-轧衔接过程的示意图  
Fig.1 Schematic diagram of continuous casting billet at casting-rolling conveying process in a factory

表1 现场生产钢水量统计数据

Table 1 Statistics data of steel liquid amount in situ

编号	生产时间/h	钢水总量/t	钢水传输量/(t·min <sup>-1</sup> )
1	12.5	1 173	1.56
2	11.5	1 221	1.77
3	12.0	1 350	1.88

表2 钢厂直接轧制工艺铸坯的排队模型参数

Table 2 Billet queuing model parameters of direct casting process in steelwork

排队系统	服务台数	系统容量	平均达到率/(支·min <sup>-1</sup> )	平均服务率/(支·min <sup>-1</sup> )
1	1	6	1.88	1.42

此系统容量为6。本案例只选择其中1条轧线进行分析,因此,铸坯排队模型的服务台数为1。

现场连铸坯切断后头部表面温度为950~960℃,铸坯开轧温度为920~950℃。该生产线粗轧速度较低,电机功率比较大,因此可以实现920℃以上的铸坯轧制。因此,钢厂的直接轧制工艺连铸坯排队模型的参数如表2所示。

2.2 现场直接轧制工艺参数的排队优化分析

首先,当拉速2.3 m/min时,对不同流数生产的情况进行排队论数学模型计算,排队系统的各项指标如表3所示。随着连铸机生产流数的增加,单个铸坯在系统中的平均等待时间增加,系统中铸坯排队的队长也逐渐增加。该排队系统计算得出,当连铸机三流生产时,铸坯的等待时间与铸坯的必需输送时间相等,铸坯输送过程中不需要等钢,与现场实际生产情况一致。并且钢坯平均到达量大约现场生产的钢水量的一半,明显存在着钢坯供应不足的问题。现场2.3 m/min生产时,铸坯切断时头部温度为960℃,按照连铸高温段33℃/s的温降,系统允许的连铸坯平均等待时间为1.5 min,与现场1.34 min的输送时间接近。

其次,当拉速2.8m/min时,排队系统的各项指标如表4所示。连铸机三流生产时,可以在连铸坯

表3 连铸机不同流数生产时排队系统的各项指标(2.3 m/min)

Table 3 Various indexes of queuing system for continuous casting machine with different strand, 2.3 m/min

项目	3流	4流	5流	6流
平均到达量( $\lambda$ )/(支·min <sup>-1</sup> )	1.15	1.53	1.91	2.3
平均服务量( $\mu$ )/(支·min <sup>-1</sup> )	1.42	1.42	1.42	1.42
服务台服务强度( $\rho$ )/支	0.81	1.08	1.35	1.62
平均队长( $L_s$ )/支	2.19	3.30	4.11	4.63
平均排队长( $L_q$ )/支	1.43	2.41	3.16	3.66
平均逗留时间( $t_s$ )/min	2.04	2.62	3.04	3.34
平均等待时间( $t_q$ )/min	1.34	1.91	2.34	2.63

表4 连铸机不同流数生产时排队系统的各项指标(2.8 m/min)

Table 4 Various indexes of queuing system for continuous casting machine with different strand, 2.8 m/min

项目	3流	4流	5流	6流
平均到达量( $\lambda$ )/(支·min <sup>-1</sup> )	1.4	1.87	2.33	2.8
平均服务量( $\mu$ )/(支·min <sup>-1</sup> )	1.42	1.42	1.42	1.42
服务台服务强度( $\rho$ )/支	0.99	1.32	1.64	1.97
平均队长( $L_s$ )/支	2.94	4.04	4.67	5.03
平均排队长( $L_q$ )/支	2.09	3.09	3.69	4.04
平均逗留时间( $t_s$ )/min	2.44	3.01	3.35	3.57
平均等待时间( $t_q$ )/min	1.73	2.30	2.65	2.87

平均等待时间增加不大的前提下,显著提高了连铸坯的平均达到量,即钢水量。当拉速提高后,连铸坯的切坯时头部的温度提高,系统允许的连铸坯平均等待时间增大。有文献[18]表明150 mm×150 mm方连铸坯生产时,拉速每升高0.4 m/min,铸坯切断时表面温度升高大约50℃。当拉速由2.3 m/min升高到2.8 m/min时,连铸坯的表面温度950℃升高到1 010℃。根据经验连铸坯输送段的温降大约33℃/min,因此,为了满足920℃的最低开轧条件,连铸坯的最长等待时间为2.6 min,远大于现场1.34 min的输送时间。因此,钢厂可以将拉速由2.3 m/min提高到2.8 m/min,连铸机采用四流进行直接轧制生产,可以对应一条轧线;连铸机采用六流生产,可以对应两条轧线生产,钢水量由1.88 t/min提高到了2.3 t/min,在保证直接轧制率前提下,提高了直接轧制工艺生产的产量。

该直接轧制排队系统中,当铸机拉速保持不变,连铸坯定尺长度、不同流数与其平均等待时间的关系如图2所示。连铸机相同流数生产时,随着连铸坯的定尺长度的增加,连铸坯平均等待时间显著增加。当连铸机生产流数增加,连铸坯平均等待时间

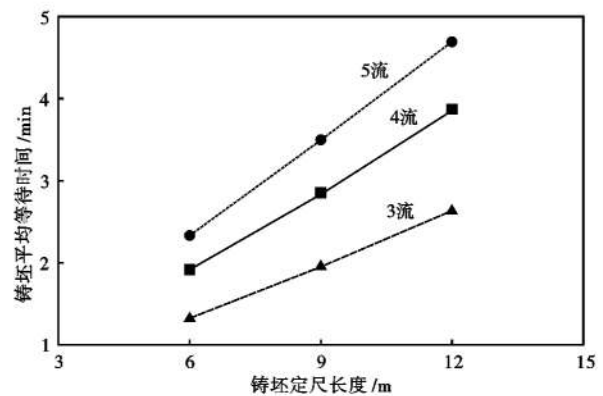


图2 铸坯定尺长度、流数与其平均等待时间的关系  
Fig.2 Relationship between given length of billet, strand number and average waiting time

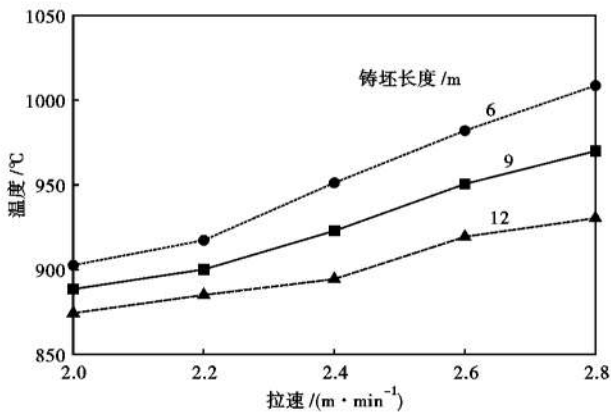


图 3 拉速对铸坯切断时头部的表面温度的影响

Fig.3 Effect of casting speed on temperature of head surface during billet cutting

的增加趋势更加明显。因此,在直接轧制排队系统中,当连铸坯的平均等待时间显著大于铸坯输送时间时,才考虑增加连铸坯的定尺长度。利用有限元方法计算得到不同定尺长度的 150 mm × 150 mm 方连铸坯在不同拉速条件下铸坯切断时头部的表面温度如图 3 所示,连铸坯切断时的头部表面温度随着拉速的增加逐渐增大,但是随着铸坯定尺长度的增加,头部温度增加的幅度明显降低。这是因为连铸坯在切断过程,连铸坯的头部一直处于控冷状态,虽然拉速的提升提高了铸坯头部温度,但是较长的停顿时间也带来明显的降温。

此外,当钢水量为 1.88 t/min 的条件下,对铸坯不同定尺长度情况进行排队论数学模型计算,排队系统各项指标如表 5 所示。在钢水量固定的情况下,随着连铸坯定尺的增加,单个铸坯在系统中的平均等待时间显著增加,系统中铸坯排队的队长也逐渐增加。因此,在钢水量不变的情况下,通过减小连铸坯的定尺长,可以缩短单个铸坯在系统中的平均等待时间,提高直接轧制率。

### 3 铸坯输送过程的衔接优化讨论

为了实现方坯直接轧制工艺产量最大化和直接

表 5 连铸机不同定尺生产时排队系统的各项指标

Table 5 Various indexes of queuing system for continuous casting machine with different given length

项目	定尺 6 m	定尺 9 m	定尺 12 m
平均到达量( $\lambda$ )/(支 · min <sup>-1</sup> )	1.88	1.88	1.88
平均服务量( $\mu$ )/(支 · min <sup>-1</sup> )	1.42	0.95	0.71
服务台服务强度( $\rho$ )/支	1.32	1.98	2.65
平均队长( $L_s$ )/支	4.05	5.04	5.40
平均排队长( $L_q$ )/支	3.11	4.05	4.40
平均逗留时间( $t_s$ )/min	3.01	5.35	7.62
平均等待时间( $t_q$ )/min	2.31	4.29	6.21

轧制率最大化,是本文研究方坯直接轧制工艺铸轧衔接过程的最主要目的。为了实现方坯直接轧制工艺产量的最大化,首先要求连铸工序的通钢量与轧制工序的通钢量相当,即钢坯总质量相等;而要实现铸坯直接轧制工艺直接轧制率的最大化,需要实现连铸坯在输送过程的等待时间小于极限等钢时间,即连铸坯输送到轧机前的温度满足最低开轧条件。只有同时满足以上两个条件,才能实现方坯直接轧制工艺产量最大化和直接轧制率最大化,到达最佳的工艺状态。

### 3.1 连铸工序与轧钢工序的产能匹配问题

原加热炉生产线,连铸工序的产量明显大于轧钢工序,因为有加热炉在两个工序之间进行缓冲,多余的钢坯可以堆垛冷却。方坯直接轧制工序取消加热炉,需要重新匹配连铸工序与轧钢工序的产能。

假设生产线的轧钢工序的轧制节奏为  $\Delta t$ , 单位 min; 连铸坯的定尺长度为  $l$ , 单位 m; 连铸机的流数为  $n$ ; 连铸机的拉速为  $\nu$ , 单位 m/min。根据前后工序通钢量相等原则,可以得到关系式(6):

$$n \cdot \Delta t \cdot \nu = l \tag{6}$$

为了满足连铸与轧钢两工序通钢量相等,铸坯输送距离无论长短,铸坯的输送节奏都要满足粗轧机的轧制节奏。目前,国内钢铁企业生产 150 mm × 150 mm 的轧钢粗轧第一架的线速度是 0.2 ~ 0.3 m/s, 轧钢节奏的间隔时间为 45 ~ 50 s, 铸坯直接轧制工艺生产的最低开轧温度大于 950 °C。因此,为了实现直接轧制生产线的产量最大化,考虑到铸坯不同定尺长度和轧制节奏,利用式(6)求解出连铸机不同流数直接轧制生产的所匹配的拉速,如表 6 所示。

表 6 不同定尺的连铸坯直接轧制生产时匹配的拉速/(m · min<sup>-1</sup>)

Table 6 Matching casting speed of continuous casting billet with different given length during direct rolling / (m · min<sup>-1</sup>)

铸坯定尺/m	6 流	5 流	4 流	3 流
9	1.9	2.3	2.8	3.8
10	2.1	2.5	3.1	4.2
12	2.5	3.0	3.8	5.0

从表 6 中可以看出,为了匹配轧钢的生产节奏,连铸机多流生产时的拉速必须慢下来,但是此时铸坯的温度无法满足直接轧制生产的要求。随着连铸坯定尺长度的增加,为了匹配轧钢的生产能力,连铸机的拉速也需要增加。连铸坯定尺长度的增加还增

加了铸坯轧前的头尾温差,显著影响产品质量的稳定性。因此,连铸机直接轧制生产时,工艺参数优先选择的是少流数、短定尺、高拉速。在一定条件下,这种工艺选择可以在匹配轧钢生产能力的同时,保证铸坯温度满足开轧条件。

### 3.2 连铸坯输送过程的极限等待时间

当连铸工序与轧钢工序的通钢量相同时,拉速和送坯节奏都稳定,生产线的产量达到最大。当拉速或者送坯节奏出现了一定范围的波动,就会出现连铸坯的等钢现象,即使前后工序通钢量相同也没办法避免。而且连铸坯最长等钢时间取决于连铸坯的最低开轧温度,连铸坯的最大等钢时间等于连铸坯切断后的温度降低至最低开轧温度所经历的冷却时间。当排队系统的铸坯平均等待时间小于该极限冷却时间,整个直接轧制生产的直接轧制率才能达到最大。

因此,在直接轧制工艺方案制定时,除了要满足上下游工序通钢量的相等,还需要随时考虑铸坯的温度是否满足最低开轧温度要求,排队过程需要随时监控铸坯输送过程的等待时间,保证低温铸坯的随时下线,减少对直接轧制生产的影响。

## 4 结论

(1)通过排队论方法构建了方坯直接轧制生产

过程的铸坯的排队模型,计算得到了铸轧界面的排队系统中铸坯的平均等待时间为  $W_s = \frac{\rho}{\mu - \lambda} - \frac{\eta\rho^{n+1}}{\lambda(1-\rho^n)}$ ,在直接轧制系统中铸坯平均等待时间越短,方坯直接轧制生产的效率越高。

(2)当连铸机的拉速恒定时,随着连铸机生产流数增加,单个铸坯在系统中的平均等待时间增加;当连铸机钢水量恒定时,可以适当减小连铸坯的定尺长,来缩短单个铸坯在系统中的平均等待时间,提高系统直接轧制效率。

(3)连铸机相同流数生产时,随着铸坯的定尺长度的增加,排队系统中连铸坯平均等待时间显著增加。当生产流数增加,连铸坯平均等待时间的增加趋势更加明显。在直接轧制排队系统中,当连铸坯平均等待时间显著大于铸坯输送时间时,才考虑增加连铸坯的定尺长度。

(4)连铸机直接轧制生产时,工艺参数优先选择是少流数、短定尺、高拉速,这种工艺选择可以在匹配轧钢生产能力的同时,保证铸坯温度满足开轧条件。

国家科技支撑计划(2013BAE07B04),国家重点研发计划(2017YFB0304000)资助

### 参考文献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学(第二版)[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [2] 殷瑞钰. 新世纪以来中国炼钢-连铸的进步及命题[C]. 2014年全国炼钢-连铸生产技术会论文集. 中国金属学会,2014.
- [3] 刘相华,刘鑫,陈庆安,等. 棒线材免加热直接轧制的特点和关键技术[J]. 轧钢,2016,33(1):3-4.
- [4] 刘相华,马宝国,吴志强,等. 棒线材免加热工艺中的切坯送坯节奏控制[J]. 轧钢,2018,33(4):1-2.
- [5] 于志青. 排队论在交通工程中的应用研究[J]. 中州大学学报,2005(1):118-119.
- [6] Govil M K and Fu M C. Queueing Theory in Manufacturing: A survey[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1999, 18(3): 214-240.
- [7] Chen W, Palmer P and Mackin S, et al. Queueing Theory Application in Imaging Service Analysis for Small Earth Observation Satellites[J]. Acta Astronautica, 2008, 62(10-11): 623-631.
- [8] Liu D and Ge Y E. Modeling Assignment of Quay Cranes Using Queueing Theory for Minimizing CO<sub>2</sub> Emission at a Container Terminal[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 61:140-151.
- [9] Soh A C, Khalid M and Marhaban M H, et al. Modeling of a Multi-lane-Multiple Intersection Based on Queue Theory and Standard Approach Techniques[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009,17(6):1081-1105.
- [10] 岳朝龙,李焕,蔡家磊. 基于排队论的钢材堆场装卸设备数量配置优化[J]. 物流技术,2020,39(9):68-73.
- [11] 王金贺,曾建潮. 排队论在风电场最优成组维修决策中的应用[J]. 太阳能学报,2020,41(8):314-322.
- [12] 梁素梅,陈娜. 排队论在钢铁企业中的应用研究[J]. 价值工程,2020,39(2):105-108.
- [13] 韩伟刚,郇秀萍,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):23-24.
- [14] 石鑫越,韩伟刚,郇秀萍,等. 排队论在连铸-轧钢区段加热炉出坯节奏中的应用[J]. 钢铁,2018,53(5):99-100.
- [15] 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):687-693.
- [16] 彭其春,唐洪华,田乃媛,等. 炼钢-连铸-热轧间的衔接[J]. 钢铁,2003(10):21-22.
- [17] 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[J]. 北京科技大学学报,2008(5):566-570.
- [18] 王学兵,张兴中,仇圣桃,等. 高速连铸直轧工艺的恒温出坯工艺参数研究[J]. 热加工工艺,2017,46(7):128-131.

张宏亮(1985-),男,博士生(钢铁研究总院),高级工程师,2008年武汉科技大学(本科)毕业,金属材料开发和工艺优化。E-mail:154307@163com

收稿日期:2021-02-28