

文章编号: 1000-582X(2011)03-075-07

应用精准设计原理的全板带型钢厂炉机匹配模型

贺东风, 芦永明, 徐安军, 田乃媛

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要:应用精准设计原理,依据产品大纲,在细分钢种和规格的基础上,提出了全板带型钢厂单条生产线炉机匹配的多目标数学规划模型。模型以投资少、炉机产能差距小、转炉实际作业率高以及连铸机加权平均拉速水平高为优化目标。通过改进的分层序列法对模型进行求解,在单一生产线的基础上进行组合,提出了炼钢厂转炉-连铸区段炉机整体配置方法。基于国内某新建钢厂的产品大纲,利用模型验证了其炼钢车间的设计是较优的设计方案。

关键词:精准设计;产品大纲;板带;炉机匹配;多目标规划;数学模型

中图分类号:TF089

文献标志码:A

BOF-caster matching model in steelmaking plant of all plate and strip using precision design principle

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

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: Using precise design principle, a multi-objective programming mathematical model of the BOF-Caster matched is established for single production line in the steelmaking plant of all plate and strip, according to the segmentation of steel grade and product specification of product mix. Objectives of the model have less investment, less difference between production capacity of the converter and continuous caster, higher operating rate of converter and higher level of weighted average casting speed. The model is solved by the improved delaminating sequence method. Then, the overall configuration method of BOF-continuous casting in the steelmaking plant is proposed through integrating single production lines. According to the production outline of a new large steel plant, the result of the model shows that the configuration scheme of the steelmaking workshop of the steel plant is a better design scheme.

Key words: precision design; production outline; plate and strip; the BOF-caster matching; multi-objective programming; mathematical model

21 世纪的钢铁工业面临的是一种最新形式的综合性挑战,而这些挑战,主要应从钢厂生产流程整体优化来解决。钢厂应朝紧凑、连续、高效和可持续发展的方向演进,新一代钢厂的精准设计理论要求钢厂

设计从以流程内各工序的结构设计、各工序静态能力的粗略估算和简单叠加推进到以流程整体动态—有序—连续运行的集成优化、集成创新的层次上来^[1-3]。

文献[4-7]分别分析了特定流程和转炉、连铸设

收稿日期: 2010-09-21

基金项目: “十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAE03A07)

作者简介: 贺东风(1975-),男,北京科技大学博士,主要从事钢铁制造流程系统仿真和优化方向研究,
(E-mail)hdfcn@163.com。

备条件下炉机匹配情况,文献[8]通过对全板带型钢厂转炉-连铸区段的炉机匹配研究,进而建立全板带型钢厂炉机匹配的多目标数学规划模型,但不足之处是没有考虑产品大纲中不同钢种和规格的情况,笔者在文献[8]的基础上通过细分产品大纲中的钢种和规格,进而建立炉机匹配模型,从而为新建钢厂精准设计提供依据和参考。

1 炉机匹配数学模型

1.1 问题分析

现代钢铁企业要求以连铸为中心,因此目标函数的确立主要考虑在钢厂实际生产能力满足目标产

能的情况下,转炉产能应大于连铸产能,并且考虑到钢厂的紧凑性,转炉产能与连铸产能的差值应尽可能小。转炉实际作业率尽可能高、连铸机拉速水平在保证产品质量的前提下尽可能高。另外,在以上条件都满足的情况下,设备的投资、占地面积应尽可能少,这就要求转炉个数和连铸机台数尽可能少,转炉公称容量尽可能小。

1.2 单条生产线炉机匹配数学模型

1) 参数定义。

参数定义如表 1。

表 1 参数列表

变量	含义	变量	含义
T_z	单条生产线转炉、连铸设备投资系数	$Q_{CC,ij}$	钢种 i 规格 j 连铸机年需钢水量, t
ΔQ	单条生产线冗余产能, t	Y_{ij}	钢种为 i 浇注规格为 j 钢水的连铸收得率
$\overline{\eta}_{BOF}$	转炉实际平均作业率	$T_{CC,ij}$	连铸机浇注一炉钢种为 i 规格为 j 钢水的浇注周期, min
\bar{V}	连铸机加权平均拉速	r_{ij}	产品大纲中钢种为 i 规格为 j 钢水年产比例
N	钢种种类	N_{CC}	连铸机总流数
M	钢种浇注的规格集合	N_s	连铸机流数
k_1	实际产能与目标产能差值的权重	B_{ij}	钢种 i 规格 j 的铸坯宽度, m
k_2	转炉产能与连铸产能差值的权重	D_{ij}	钢种 i 规格 j 的铸坯厚度, m
k_{BOF}	转炉个数的设备投资系数, 亦即惩罚系数	ρ	铸坯密度, t/m ³
k_C	转炉公称容量的设备投资系数, 亦即惩罚系数	v_{ij}	钢种 i 规格 j 的拉速, m/min
k_{CC}	连铸机个数的设备投资系数, 亦即惩罚系数	t_0	浇铸间隔时间, min
T_{BOF}	每炉钢平均冶炼时间, min	n_i	生产钢种 i 的连浇炉数
N_{BOF}	转炉座数	η_{BOF}	转炉设计作业率
C_{BOF}	转炉公称容量, t	η_{CC}	连铸机作业率
N_{Caster}	连铸机台数	t_{CCmax}	钢包允许的最大浇注时间, min
Q_{Tar}	生产线目标产能, t	f_c	质量系数(主要取决于对浇注温度控制的要求)
Q_{Act}	生产线实际产能, t	v_{ij}^{min}	钢种 i 规格 j 的铸坯的最小工作拉速, m/min
$Q_{BOF,ij}$	钢种 i 规格 j 转炉年产钢水量, t	v_{ij}^{max}	钢种 i 规格 j 的铸坯的最大工作拉速, m/min

2) 数学模型。

$$\text{Min } T_z = k_{\text{BOF}} \times N_{\text{BOF}} \times k_c + k_{\text{CC}} \times N_{\text{Caster}}, \quad (1)$$

$$\text{Min } \Delta Q = k_1 \times (Q_{\text{Act}} - Q_{\text{Tar}}) + k_2 \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (Q_{\text{BOF},ij} \times Y_{ij} - Q_{\text{CC},ij}), \quad (2)$$

$$\text{Max } \bar{\eta}_{\text{BOF}} = \eta_{\text{BOF}} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(T_{\text{CC},ij} - T_{\text{BOF}}) \times Q_{\text{Act}} \times r_{ij}}{C_{\text{BOF}} \times 365 \times 1440}, \quad (3)$$

$$\text{Max } \bar{V} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (v_{ij} \times r_{ij}), \quad (4)$$

$$\text{式中: } Q_{\text{Act}} = N_{\text{Caster}} \times \frac{365 \times 1440 \times C_{\text{BOF}} \times \eta_{\text{CC}}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{r_{ij} \times (T_{\text{CC},ij} \times n_i + t_0)}{Y_{ij} \times n_i}};$$

$$Q_{\text{CC},ij} = Q_{\text{Act}} \times r_{ij}; Q_{\text{BOF},ij} = N_{\text{BOF}} \times C_{\text{BOF}} \times \frac{1440 \times 365 \times \eta_{\text{BOF}}}{T_{\text{BOF}}} \times r_{ij}; T_{\text{CC},ij} = \frac{C_{\text{BOF}}}{N_s \times B_j \times D_j \times \rho \times v_j}.$$

Subject to:

$$100t \leq C_{\text{BOF}} \leq 400t, C_{\text{BOF}} \in \{100, 110, \dots, 400\},$$

脱碳转炉冶炼周期小于常规转炉冶炼周期^[9],不同公称容量下专用脱碳转炉的平均冶炼周期设定如下: $100t \leq C_{\text{BOF}} < 150t, T_{\text{BOF}} = 25$; $150t \leq C_{\text{BOF}} < 200t, T_{\text{BOF}} = 26$; $200t \leq C_{\text{BOF}} < 250t, T_{\text{BOF}} = 27$; $250t \leq C_{\text{BOF}} \leq 260t, T_{\text{BOF}} = 28$; $270t \leq C_{\text{BOF}} \leq 280t, T_{\text{BOF}} = 29$; $290t \leq C_{\text{BOF}} \leq 300t, T_{\text{BOF}} = 30$; $310t \leq C_{\text{BOF}} \leq 320t, T_{\text{BOF}} = 31$; $330t \leq C_{\text{BOF}} \leq 340t, T_{\text{BOF}} = 32$; $350t \leq C_{\text{BOF}} \leq 360t, T_{\text{BOF}} = 33$; $370t \leq C_{\text{BOF}} \leq 380t, T_{\text{BOF}} = 34$; $390t \leq C_{\text{BOF}} \leq 400t, T_{\text{BOF}} = 35$ 。 (5)

$$N_{\text{BOF}}, N_{\text{Caster}} \in N \text{ 且 } 1 \leq N_{\text{BOF}} = N_{\text{Caster}} \leq 4, \quad (6)$$

$$N_{\text{CC}} \in N \text{ 且 } 1 \leq N_{\text{CC}} = N_s \times N_{\text{Caster}} \leq 6, \quad (7)$$

$$Q_{\text{Act}} \geq Q_{\text{Tar}}, \quad (8)$$

$$Q_{\text{BOF},ij} \times Y_{ij} \geq Q_{\text{CC},ij}, \quad (9)$$

$$T_{\text{CC},ij} \geq T_{\text{BOF}}, \quad (10)$$

$T_{\text{CC},ij} \leq t_{\text{CCMax}}$, 且由克伦纳及塔尔曼经验公

$$\text{式}^{[10]}: t_{\text{CCMax}} = \frac{\lg C_{\text{BOF}} - 0.2}{0.3} \times f_c, f_c \in [10, 12], \quad (11)$$

$$v_{ij}^{\min} \leq v_{ij} \leq v_{ij}^{\max}. \quad (12)$$

式(1)为最小化转炉和连铸机设备投资;式(2)为最小化生产线实际产能与目标产能的差值以及最小化转炉产能与连铸产能的差值;式(3)为最大化转

炉实际平均作业率;式(4)为最大化加权平均拉速;约束条件(5)为转炉大小相等,公称容量设置为100~400 t,且选择不同公称容量下的平均冶炼周期;式(6)为转炉和连铸机个数,设置为1~4,且满足“一一对应”^[1]关系;式(7)为连铸机的总流数,设置为1~6流;式(8)为实际产能大于目标产能;式(9)为对于一定钢种和规格的钢水转炉产能大于连铸产能;式(10)为转炉出钢节奏满足连铸机连浇要求;式(11)为单包钢水平均浇注周期小于或等于钢包允许的最大浇注时间;式(12)为生产钢种*i*、规格*j*的铸坯,其实际拉速必须在其工作拉速范围内。

3) 权重和惩罚系数的确定。

目标函数中的权重 k_1 、 k_2 以及投资系数 k_{BOF} 、 k_{CC} 和 k_c 的确定应充分考虑产能匹配、占地以及投资等情况。综合考虑以上情况,设定 $k_1 = 1$, $k_2 = 2$; 设定 $k_{\text{BOF}} = 1$, $k_{\text{CC}} = 1.5$; 以400 t转炉为基准,设定转炉大小的投资系数 $k_c = \frac{C_{\text{BOF}}}{400}$ 。

1.3 炼钢厂转炉-连铸区段炉机整体配置

在同一炼钢厂内的不同生产线设计应该遵循以下原则:1)为了达到物质流“层流”的目的,不同生产线的钢水原则上不应该交叉供应;2)同一炼钢厂不同生产线的转炉公称容量设计为相等;3)同一炼钢厂不同生产线的连铸机流数设计为相等。因此,将所计算出的两条或多条生产线进行组合,取相同公称容量的转炉,即为炼钢厂转炉-连铸区段炉机整体配置。

2 炉机匹配数学模型的求解方法

因所建数学模型为多目标规划模型^[11],求解方法很多^[12-15]。笔者对分层序列表^[16]进行改进,求解步骤如下,首先把目标函数按重要程度排成一个次序,然后在设计允许范围内,求得前一个目标函数较优解集的基础上求后一个目标函数的较优解集,依次求解,从而不断缩小求解集合,最终求出单一生产线炉机配置的较优解集。由于同一炼钢厂内应将不同生产线的转炉公称容量和连铸机流数设计为相等,因此应将所求出的所有生产线的较优解进行组合,取相同的转炉公称容量和连铸机流数,进而确定整个炼钢厂转炉-连铸区段炉机匹配的供选方案。具体求解过程如图1所示。

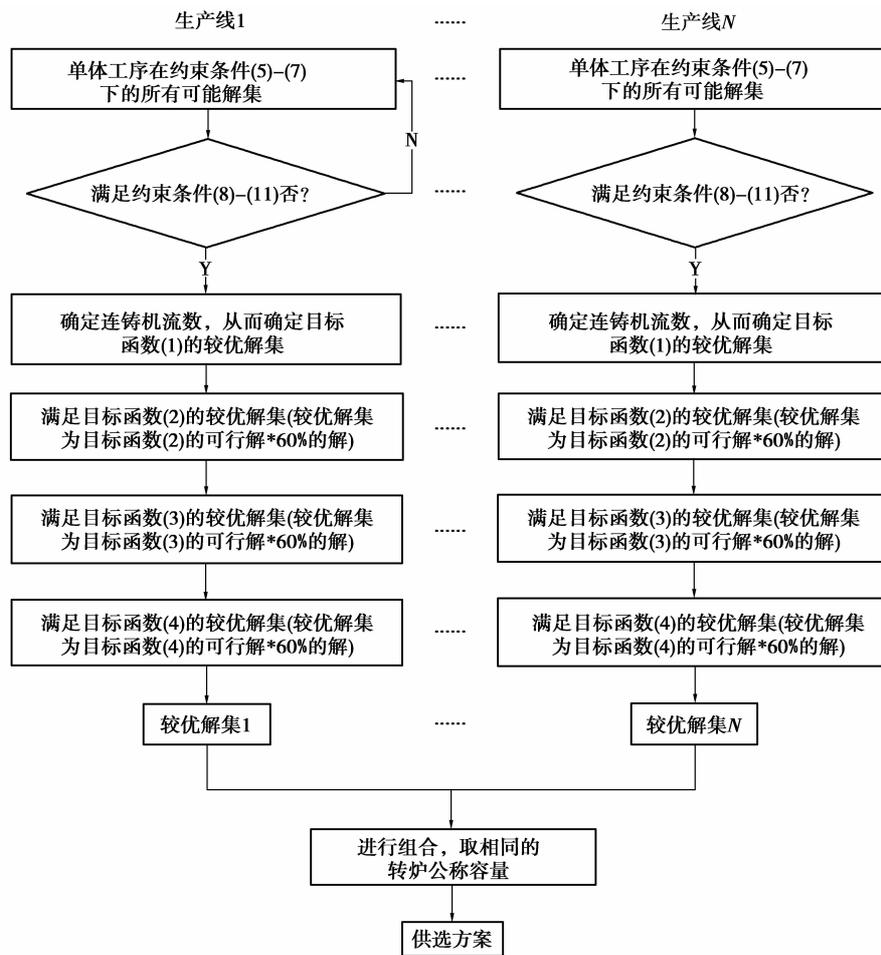


图 1 炼钢厂炉机匹配数学模型求解方法

3 模型应用和结果分析

3.1 参数设定和产品大纲

设铸坯密度 $\rho = 7.6 \text{ t/m}^3$, 浇铸间隔时间 $t_0 = 35 \text{ min}$, 转炉设计作业率 $\eta_{\text{BOF}} = 85\%$ 。以国内新建某大型钢厂为例, 其目标产能为年产 $6 \times 10^6 \text{ t}$ 连铸坯的

2250 热连轧生产线对应的连铸机产品大纲包括造船板等 12 类钢种, 以深冲及超深冲带卷(含 IF)为例, 具体产品大纲如表 2 所示; 目标产能为年产 $2.7 \times 10^6 \text{ t}$ 连铸坯的 1580 热连轧生产线对应的连铸机产品大纲包括硅钢等 11 类钢种, 以深冲带卷(含 IF)为例, 具体产品大纲如表 3 所示。

表 2 2250 轧线连铸机产品大纲

钢种	断面/mm		工作拉速 /($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)		比例/%	连浇炉数	连铸作业率/%	收得率/%
	宽	厚	最大	最小				
深冲及超深 冲带卷(含 IF)	1 100	230	2.3	0.8	3.65	10	85	97.5
	1 300	230	2.3	0.8	6.32			
	1 500	230	2.3	0.8	7.33			
	1 700	230	2.3	0.8	7.37			
	1 900	230	2.3	0.8	3.22			
	2 150	230	2.3	0.8	0.80			

表3 1580 轧线连铸机产品大纲

钢种	断面/mm		工作拉速范围/(m·min ⁻¹)		比例/%	连浇炉数	连铸作业率/%	收得率/%
	宽	厚	最大	最小				
深冲及超深冲带卷(含IF)	900	230	2.3	0.8	3.22	0	85	97.5
	1 100	230	2.3	0.8	5.11			
	1 300	230	2.3	0.8	5.62			
	1 500	230	2.3	0.8	5.66			
	1 650	230	2.3	0.8	0.83			

3.2 结果分析

2250 生产线满足条件的炉机匹配模式投资系数变化情况如图 2 所示。从图 2 中可见,2 转炉+2 台 2 流连铸机投资系数低于 4 转炉+4 台 1 流连铸机,因此 2250 生产线应该选择 2 转炉+2 台 2 流连铸机。

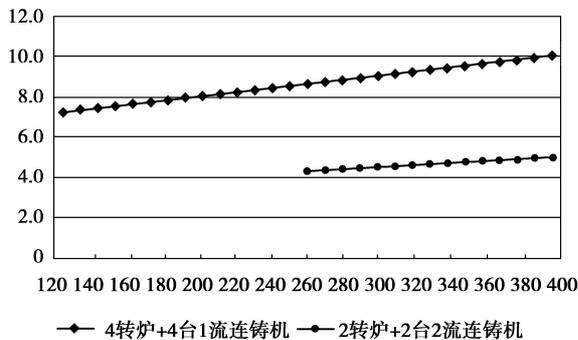


图2 2250 轧线炉机匹配模式投资系数分析

1580 生产线满足条件的炉机匹配模式投资系数

变化情况如图 3 所示。从图 3 中可见,1 转炉+1 台 2 流连铸机投资系数低于 2 转炉+2 台 1 流连铸机,因此 1580 生产线应该选择 1 转炉+1 台 2 流连铸机。

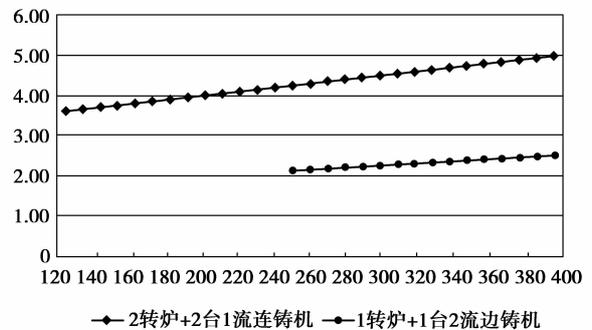


图3 1580 轧线炉机匹配模式投资系数分析

2250 和 1580 生产线在目标函数(1)、(2)、(3)下的较优解集分别如表 4、表 5 所示。

表4 2250 轧线在目标函数(1)、(2)、(3)下的较优解集

转炉配置	连铸机配置	ΔQ	转炉实际作业率/%	加权平均拉速/(m·min ⁻¹)	生产线实际产能/t
260×2	2 台 2 流连铸机	416.78	84.50	1.499	6011 300
270×2	2 台 2 流连铸机	418.89	84.49	1.499	6033 100
280×2	2 台 2 流连铸机	472.68	84.41	1.516	6096 000
290×2	2 台 2 流连铸机	472.84	84.40	1.516	6114 400
300×2	2 台 2 流连铸机	525.29	84.33	1.532	6170 800

表5 1580 生产线在目标函数(1)、(2)、(3)下的较优解集

转炉配置	连铸机配置	ΔQ	转炉实际作业率/%	加权平均拉速/(m·min ⁻¹)	生产线实际产能/t
250×1	1 台 2 流连铸机	237.01	84.55	1.630	2708 300
260×1	1 台 2 流连铸机	266.00	84.49	1.641	2729 500
270×1	1 台 2 流连铸机	267.28	84.49	1.642	2738 300
280×1	1 台 2 流连铸机	295.58	84.43	1.651	2755 600
290×1	1 台 2 流连铸机	295.82	84.43	1.651	2763 200
300×1	1 台 2 流连铸机	323.38	84.38	1.660	2778 100

2250 和 1580 生产线在目标函数(4)下的较优解集分别如表 6、表 7 所示。

表6 2250 轧线在目标函数(4)下的较优解集

转炉配置	连铸机配置	ΔQ	转炉实际作业率/%	加权平均拉速/($m \cdot \min^{-1}$)	生产线实际产能/t
300×2	2台2流连铸机	525.29	84.33	1.532	6 170 800
290×2	2台2流连铸机	472.84	84.40	1.516	6 114 400
280×2	2台2流连铸机	472.68	84.41	1.516	6 096 000

表7 1580 轧线在目标函数(4)下的较优解集

转炉配置	连铸机配置	ΔQ	转炉实际作业率/%	加权平均拉速/($m \cdot \min^{-1}$)	生产线实际产能/t
300×1	1台2流连铸机	323.38	84.38	1.660	2 778 100
290×1	1台2流连铸机	295.82	84.43	1.651	2 763 200
280×1	1台2流连铸机	295.58	84.43	1.651	2 755 600
270×1	1台2流连铸机	267.28	84.49	1.642	2 738 300

将以上两条生产线的较优解集进行组合,得到供选的炼钢厂炉机整体配置方案如表8所示。

表8 炼钢厂炉机整体配置供选方案

供选方案	转炉配置	生产线1连铸机配置	生产线2连铸机配置	炼钢厂实际产能/t
1	300×3	2台2流连铸机	1台2流连铸机	8 948 900
2	290×3	2台2流连铸机	1台2流连铸机	8 877 600
3	280×3	2台2流连铸机	1台2流连铸机	8 851 700

在以上3种供选方案中,供选方案1是投资适当、产能和时间节奏满足要求、炉机配置较紧凑、转炉实际平均作业率较高、加权平均拉速最大的方案。另外,考虑到设备故障、工艺扰动等情况,供选方案1的生产组织灵活性优于供选方案2。如当2250轧线对应的两台连铸机生产宽度为1 100 mm、厚度为230 mm的汽车结构用钢时,280 t转炉的最快供钢节奏为29 min、浇铸周期为56 min,300 t转炉的最快供钢节奏为30 min、浇铸周期为60.47 min。此时,当一座转炉发生故障无法生产时,其中一座300 t转炉完全可以供应两台连铸机生产而不断浇铸,但一座280 t转炉却无法完成生产。而国内新建的某大型钢厂炉机配置所采用的正是此方案,由此验证了此钢厂炼钢车间的炉机配置是一种较优的设计方案。

4 结论

1)根据新建钢厂产品大纲,在细分钢种和规格的基础上提出了基于投资小和炉机匹配紧凑、转炉实际

平均作业率高以及加权平均拉速水平高的全板带型钢厂单条生产线转炉-连铸区段炉机匹配的多目标数学规划模型,并在单一生产线的基础上进行组合,提出了炼钢厂转炉-连铸区段炉机整体配置方法。

2)通过改进后的分层序列法给出了所建模型的求解方法,并采用JAVA语言,借助Eclipse软件,运用面向对象的编程方法对模型进行了求解。

3)基于国内某新建钢厂的产品大纲,通过所建模型验证了其炼钢车间的设计是较优的设计方案。

4)此模型对于全板带型钢厂具有通用性,对我国新建全板带型钢厂具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.
 - [2] 殷瑞钰. 关于钢铁制造流程的研究[J]. 金属学报,2007,43(11):1121-1128.
- YIN RUI-YU. Some science problems about steel[J].

- Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(11):1121-1128
- [3] 李传民, 韩冰, 王双全, 等. 新一代钢厂精准设计理论研究[J]. 中国冶金, 2010, 20(3): 1-6.
LI CHUAN-MING, HAN BING, WANG SHUANG-QUAN, et al. Research about design theory of low dissipative process for new generation steel Mill[J]. China Metallurgy, 2010, 20(3): 1-6.
- [4] 刘青, 尹佳, 田新中, 等. 转炉炼钢厂工序产能和品种钢铸机配置[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 845-849.
LIU QING, YIN JIA, TIAN XIN-ZHONG, et al. Matching of productive capacity among working procedures and allocating of continuous casting machines for quality steel in a converter plant [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(8): 845-849.
- [5] 顾飞, 李建国, 刘哲. 武钢二炼钢厂炉机匹配系统算法研究[J]. 冶金自动化, 2005, 29(6): 15-18.
GU FEI, LIU JIAN-GUO, LIU ZHE. Algorithm research on converter-casting machine match system of the second steelmaking plant in Wuhan Iron and Steel Corporation [J]. Metallurgical Industry Automation, 2005, 29(6): 15-18.
- [6] 张龙强, 田乃媛. 基于炉机匹配的新一代大型钢厂配置研究[J]. 冶金自动化, 2008, 32(3): 34-38.
ZHANG LONG-QIANG, TIAN NAI-YUAN. Research on configuration of new and large-scale steel plant based on matching between BOF and caster [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(3): 34-38.
- [7] ZHANG L Q, TIAN N Y, ZHANG J, et al. Output model of steel plant [J]. Journal of Iron and Steel Research; International, 2008, 15(3):27-30,46.
- [8] 芦永明, 王锋, 贺东风, 等. 全板带型钢厂炉机匹配模型的建立[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(9): 1189-1194.
LU YONG -MING, WANG FENG, HE DONG -
- FENG, et al. Establishment of the BOF-caster matching model for the steelmaking plant producing plates and strips[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(9): 1189-1194.
- [9] TOSHIYUKI U, KIYOHITO F, NORIAKI Y, et al. High productivity operation technologies of Wakayama Steelmaking Shop [C]//The Tenth Japan-China symposium on Science and Technology of Iron and Steel, November 18-19, 2004, Chiba, Japan. [S. l.]: [s. n.], 2004.
- [10] 万真雅, 薛立基. 钢铁冶金设计原理:下册[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1991.
- [11] LIN C T, CHEN C B, CHEN P T. On the modified interior point algorithm for solving multi-objective linear programming problems[J]. International Journal of Information and Management Sciences, 2006, 17(1): 107-127.
- [12] JUNIOR H V, LINS M P E. A WIN-WIN approach to multiple objective linear programming problems [J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60(5): 728-733.
- [13] LI X Q, ZHANG B, LI H. Computing efficient solutions to fuzzy multiple objective linear programming problems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157(10): 1328-1332.
- [14] ARMAND P. Finding all maximal efficient faces in multiobjective linear programming [J]. Mathematical Programming, 1993, 61(3): 357-375.
- [15] LIN J G. Maximal vectors and multi-objective optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1976, 18(1): 41-46.
- [16] LIU F H, HUI L H. The voting analytic hierarchy process method for selecting supplier[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 97(3): 308-318.

(编辑 王维朗)