

# 基于 EXCEL 规划求解器的轧制规程优化设计

王敬忠<sup>1</sup> 段亚东<sup>2</sup> 杨西荣<sup>1</sup> 赵西成<sup>1</sup>

(1 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055; 2 武汉钢铁(集团)有限责任公司硅钢厂, 武汉 430080)

**摘要** 介绍了如何利用 EXCEL 规划求解器在多约束和多目标函数条件下对轧制规程进行优化, 对优化设计的流程进行了图解分析; 研究了优化计算中涉及的主要数学模型, 通过实例说明了该优化规程的良好效果。计算过程表明, 利用 EXCEL 规划求解器可以快速进行计算, 使轧制规程得到优化, 起到节能降耗、充分发挥轧机能力的作用。

**关键词** 压下规程 EXCEL 规划求解器 优化设计

## Optimizing Design for Rolling Schedule Based on EXCEL Calculator

Wang Jingzhong<sup>1</sup>, Duan Yadong<sup>2</sup>, Yang Xirong<sup>1</sup> and Zhao Xicheng<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;  
2 Silicon Steel Mill, Wuhan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Wuhan 430080)

**Abstract** The optimization of rolling schedule using EXCEL calculator in conditions of multi-goals and multiple restrictions has been presented in this paper. The optimizing design program was analyzed by diagrams, the main mathematical models for optimizing calculating were studied and the excellent effect of the optimizing schedule was illustrated by production example. Calculation process indicated that the calculation speed was fast by using EXCEL calculator to optimize rolling schedule, decrease energy consumption and bring the ability of mill into full play.

**Material Index** Rolling Schedule, EXCEL Calculator, Optimizing Design

热轧带钢的压下规程优化设计方法很多, 比如使用计算机高级语言编写程序进行优化计算, 而且在现实生产中应用也较多。但利用 EXCEL 规划求解器<sup>[1]</sup>进行压下规程优化的报道不多, 本文介绍了如何使用 EXCEL 规划求解器进行热轧带钢的压下规程优化设计。

### 1 计算流程与优化方法

使用 EXCEL 进行热轧带钢的压下规程制定及优化的基本步骤如下: (1) 确定轧制过程中的数学模型, 如温降、轧制压力、轧制力矩模型等; (2) 将各种数学模型列于电子表格中, 对各道次压下量进行初排; (3) 设定目标函数及限制条件; (4) 利用 EXCEL 规划求解器, 优化轧制规程。

图 1 中在“设置目标单元格”指定能耗最低、负荷均匀等目标函数, 在“可变单元格”指定板厚、压下量等变量, 在“约束”列表框添加必要的约束条件。

以半连续轧制带钢压下规程设计为例说明 EXCEL 规划求解器的使用方法及效果(图 2)。轧机组成为: 粗轧机由 2 辊可逆式、4 辊可逆式轧机各 1 架组成; 精轧机组由 7 架 4 辊连续式布置轧机组成。

### 2 数学模型

#### 2.1 目标函数



图 1 EXCEL 规划求解界面  
Fig. 1 Interface of finding the solution by EXCEL calculator

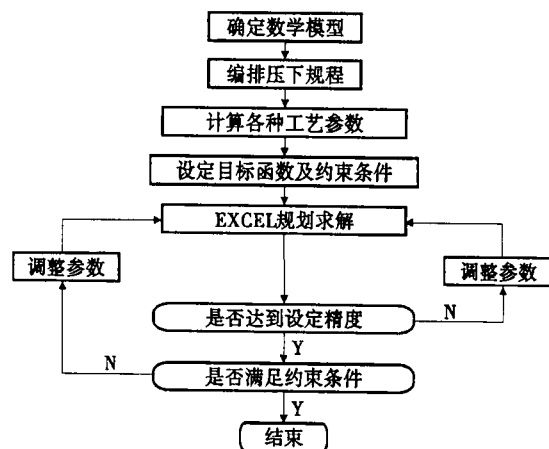


图 2 计算流程图  
Fig. 2 Flow chart of EXCEL calculator

(1) 轧制能耗最低的优化目标

$$\min N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (1)$$

式中:  $N_i$ - 第  $i$  架的轧制功率。

每一道次的压下量有多个选择, 其中准有一个值使各轧机轧制功率之和最小。

(2) 等负荷压下规程。带钢精轧机组以各机架的轧制负荷相等为最优目标。目标函数取各机架的轧制功率之差的和最小<sup>[1]</sup>。即

$$\min S = \sum_{i=1}^k S_i^2 \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{2}j(j+1), j = n-1$$

式中:  $S_i$ - 各轧制道次间的轧制功率之差;  $n$ - 轧制道次。

(3) 等相对负荷压下规程<sup>[1]</sup>。当连轧机各机架的主电机功率不相等时, 若按等负荷分配原则会造成主电机容量小则能力不足, 而主电机容量大则得不到充分利用。此时可按各主电机的相对负荷相等来制定压下规程。等相对负荷的目标函数为:

$$\min S = \sum_{i=1}^n (N_i - N'_i)^2 \quad (3)$$

式中:  $N_i$ - 第  $i$  架主电机的额定功率;  $N'_i$ - 第  $i$  架主电机的轧制功率。

## 2.2 约束条件

约束条件一般选有: (1) 保证带钢顺利咬入。(2) 为保证轧辊强度条件, 限制最大轧制压力和轧制力矩。(3) 保证主电机在轧制周期内不过载、不发热。(4) 在原始辊形和热凸度值一定的情况下, 控制精轧最后一道次的压下量, 保证板形良好。

## 2.3 轧制过程数学模型

(1) 采用轧制中厚板时的温降模型<sup>[2]</sup>:

$$\Delta t = 12.9 \frac{Z}{h} \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 \quad (4)$$

式中:  $T_1$ - 前一道次轧件的绝对温度/K;  $Z$ - 道次周期 (即前一道次的轧制时间与轧后间隙时间之和)/s;  $h$ - 该轧件轧后厚度/mm。

(2) 各道次的温降大致相同, 先计算精轧机组总温降, 然后平均分配到各个机架上面, 温降模型<sup>[2]</sup>:

$$\sum \Delta t = 17.2 \times \frac{S_0(n-1)}{v_n h_n} \left[ \frac{T_{F1}}{1000} \right]^4 \quad (5)$$

式中:  $S_0$ - 精轧机之间的距离/m;  $n$ - 机组数;  $v_n$ - 终轧

速度/( $m \cdot s^{-1}$ );  $h_n$ - 成品厚度/mm;  $T_{F1}$ - 精轧机组的开轧温度/K。

另外, 精轧机组开轧温度的温降公式为<sup>[2]</sup>:

$$t_{F1} = \frac{T_c}{\sqrt[3]{1 + 0.0386 \frac{Z}{h} \left( \frac{T_c}{1000} \right)^4}} - 273 \quad (6)$$

式中:  $t_{F1}$ - 进入精轧  $F_1$  的温度/°C;  $T_c$ - 粗轧末机架出口温度/K;  $Z$ - 中间辊道停留时间/s;  $h$ - 粗轧末机架出口厚度/mm。

轧制力计算采用公式<sup>[3]</sup>:

$$P = \bar{P}bl \quad (7)$$

$$l = \sqrt{\Delta h R}$$

式中:  $\bar{P}$ - 平均单位压力/( $N \cdot mm^{-2}$ );  $b$ - 轧件宽度/mm;  $l$ - 变形区长度/mm;  $\Delta h$ - 压下量/mm;  $R$ - 轧辊半径/mm。

精轧阶段的轧制压力计算亦可采用采利可夫公式、西姆斯公式的简化式-志田茂公式。

根据末机架主电机调速范围、秒流量相等原则确定其他各机架速度, 即:

$$v_1 \times h_1(1 + s_1) = v_2 \times h_2(1 + s_2) = \dots = v_n \times h_n(1 + s_n) = c \quad (8)$$

式中:  $h_n$ - 末机架带钢出口厚度/mm;  $v_n$ - 末机架带钢出口速度/( $m \cdot s^{-1}$ );  $s_n$ - 末机架带钢前滑值。

前滑值计算采用公式<sup>[3]</sup>:

$$s_i = \frac{r_i^2}{2} \left( \frac{D_g}{h_i} - 1 \right) \quad (9)$$

式中:  $s_i$ - 第  $i$  机架前滑值;  $r_i$ - 第  $i$  机架轧制中性角/°;  $D_g$ - 工作辊辊身直径/mm;  $h_i$ - 第  $i$  机架板带出口厚度/mm。

中性角计算采用公式<sup>[3]</sup>:

$$r_i = \frac{\alpha_i}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_i}{2f_i} \right) \quad (10)$$

式中:  $r_i$ - 第  $i$  道次的中性角/°;  $\alpha_i$ - 第  $i$  道次的咬入角 ( $\alpha_i = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$ )/°;  $f_i$ - 第  $i$  道次轧件和轧辊的摩擦系数。

轧件和轧辊的摩擦系数计算采用公式:

$$f_i = 1.05 - 0.005 t_i \quad (11)$$

式中:  $t_i$ - 第  $i$  道次的轧制温度/°C。

根据上述公式, 计算出连轧常数, 求得每道次的轧制速度。

$$M_z = 2P\phi l \quad (12)$$

式中： $P$ - 轧制压力； $\phi$ - 合压力作用角，热轧板带时取 0.42 ~ 0.50； $l$ - 变形区长度/mm。

$$P_z = M_z \frac{\pi n}{30} \quad (13)$$

式中： $P_z$ - 轧制功率/kW； $M_z$ - 轧制力矩/(kN·m)； $n$ - 工作辊的转速/(r·min<sup>-1</sup>)。

### 3 应用举例

材料为 Q235，板坯尺寸 230 mm × 1 450 mm × 8 000 mm，中间板坯 35 mm × 1 400 mm × L，成品尺寸 1.5 mm × 1 400 mm × L，粗轧机组 2 辊可逆式轧机、4 辊可逆式轧机、精轧机组前 3 架、第 4 至第 6 架、第 7 架电机额定功率分别为 2 × 8 000，2 × 5 600，1 × 8 000，2 × 4 000，2 × 3 200 kW。

粗轧部分的变形量约占总变形量的 80% ~ 85%，能耗比较集中，因此，粗轧部分以能耗最小为目标。精轧机组，其主电机功率相等，以轧制功率相等(或差值最小)为目标。为保证产品精度，成品机架可另作考虑<sup>[1,4,5]</sup>。

(1)粗轧部分的优化计算。设置目标单元格：道次轧制功率之和。设置可变单元格：各道次的压下量。约束：①粗轧部分压下量之和  $\sum \nabla h = 195$  mm；②各道次压下率  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{i\max}$ ；③各道次咬入角  $\alpha_i \leq 20^\circ$ ；④轧辊强度条件  $\sigma_i \leq [\sigma]$ ， $[\sigma] = 120$  MPa；⑤电机过载条件  $KM_H - M_{\max} \geq 0$ ；⑥电机温升条件  $M_H - M_{j\max} \geq 0$ 。由图 3 可见，优化后各道次轧制功率变化更加平缓，从曲线下的面积看，优化设计能够起到节能作用。

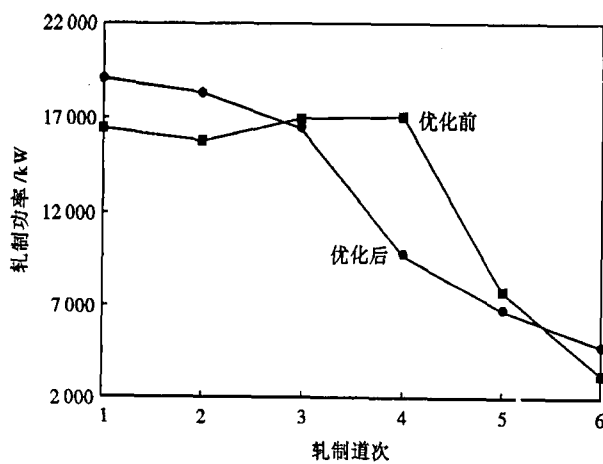


图 3 轧制规程优化前后的粗轧轧制功率

Fig. 3 Rough-down rolling power by initial and optimized rolling schedule

(2)精轧部分的优化计算。设置目标单元格：前 6 道次的轧制功率之差绝对值的和。设置可变单元格：每道次的压下量。约束：①精轧部分压下量之和  $\sum \nabla h = 33.5$  mm；②各道次压下率  $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{i\max}$ ， $0.10 \leq \varepsilon_7 \leq 0.16$ ；③轧辊强度条件  $\sigma_i \leq [\sigma]$ ， $[\sigma] = 120$  MPa；④电机过载条件  $KM_H - M_{\max} \geq 0$ ；⑤电机温升条件  $M_H - M_{j\max} \geq 0$ 。

通过对比可以看出(图 4)，优化后的轧制规程，除最后一道出于产品性能的考虑，人为地限制了变形率，其它各道次的轧制功率变化趋缓，能够充分发挥各轧机的潜力。

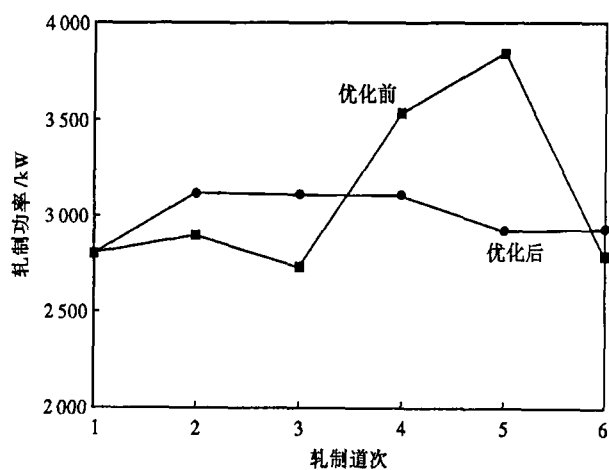


图 4 轧制规程优化前后的精轧轧制功率

Fig. 4 Finishing rolling power by initial and optimized rolling schedule

### 4 结论

经过 EXCEL 规划求解器优化的压下规程使轧制能耗降低，并能够促使轧制负荷在精轧平均分配，充分发挥轧机能力。

西安建筑科技大学学科建设项目资助(YJ1046)

### 参考文献

- 1 刘战英. 轧制变形规程优化设计. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- 2 冯光纯. 板带钢生产工艺学. 重庆: 重庆大学出版社, 1990
- 3 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论(第二版). 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 4 许章泽. 用 EXCEL 优化设计热连轧带钢轧制规程. 安徽工业大学学报, 2001, 18(4): 300
- 5 吕立华. 基于 EXCEL 规划求解器的带钢压下规程制定. 钢铁钒钛, 2005, 26(3): 48

王敬忠(1974-), 男, 硕士, 讲师, 2004 年西安建筑科技大学毕业, 金属材料属性加工的研究。

收稿日期: 2007-11-26