

# 轧制负荷分析与轧制工艺优化

邬星根

(上海第二工业大学经济管理学院, 上海 201209)

**摘要:** 随着生产量的上升, 生产中由于超载引起的设备故障也不断增加。通过对某钢铁集团公司 630 轧机轧制负荷的计算分析, 得到了轧机的实际生产负荷数据。为保证设备的正常安全运行, 对轧机现有负荷和轧制工艺进行了分析, 找到引起问题的原因并在此基础上提出了轧制工艺优化的必要性和优化方案。

**关键词:** 轧制力; 轧制负荷图; 同时过钢; 过载; 轧制工艺优化

**中图分类号:** TG333 **文献标识码:** B

## 0 前言

某钢厂 630 轧机从投产到现在已有近 40 多年的历史了。从投产开始的年产量 20 万吨到最高产量近 80 多万吨, 在同类轧钢厂中产量名列全国前茅。随生产率的提高, 轧制负荷也不断提高, 生产中出现了零部件如轧辊断辊等现象。中小型轧机在我国钢铁厂中拥有相当的数量和规模, 掌握轧制负荷的实际情况对于合理安排生产工艺以达到安全生产具有实际的意义, 但目前对于具有针对性的轧制负荷分析与优化少有研究。本文通过对 630 轧机轧制力与轧制力矩等计算, 绘制轧制负荷图, 得到生产中的实际轧制负荷情况。此外, 通过对轧机轧制负荷的分析提出断辊等问题的原因及优化轧制工艺方案。

## 1 轧制负荷计算

### 1.1 630 轧机系列概况

630 轧机系列是由二列四架轧机组成, 其主要设备的各参数情况表 1 所示。

表1 630 轧机各主要设备的参数情况

Table 1 Major parameters of 630 rolling machine

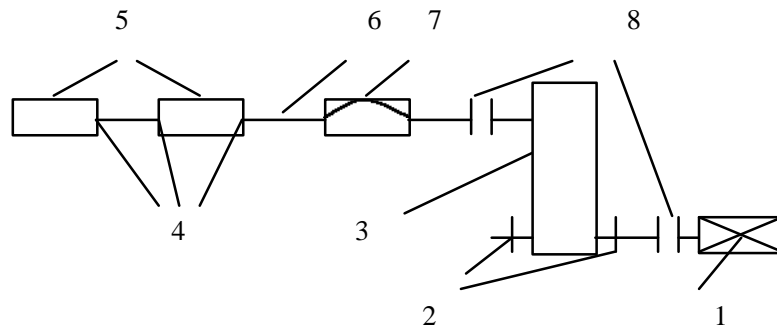
主电机	型号	JZR3200—12	减速机	传动比	$i = 6.071$
	功率	3200 KW		模数	$m_n = 16 \text{ mm}$
	电压	6000 V(定)		中心距	$A = 1800 \text{ mm}$
	转速	495 r / min		飞轮	$G_D^2 = 246 (\text{KN} \cdot \text{m}^2)$
齿轮座	模数	$m_n = 30 \text{ mm}$	轧机	轧辊直径	$D = 630 \text{ mm}$
	齿数	$Z = 18$		辊身长度	$L = 1800 \text{ mm}$
	中心距	$A = 630 \text{ mm}$		转速	$n = 82 \text{ r / min}$

630 轧机系列各设备配置情况, 如图 1 所示。

计算轧件品种和规格的选择: 630 轧机生产的品种和规格较多, 现选择生产中较典型并结合负荷的实际情况, 选择以下六种品种规格进行轧制力的计算, 如表 2 所示。

收稿日期: 2005-02-24; 修回日期: 2005-05-30

作者简介: 邬星根(1959—), 男, 高级讲师, 从事冶金设备、物流管理研究。



1—主机 2—飞轮 3—主减速器 4—梅花接轴 5—轧机  
6—万向接轴 7—人字齿轮座 8—联轴节

图 1 630 轧机系列组成

Fig. 1 Components of 630 rolling machine

表 2 典型轧件品种规格、钢种与轧制道次

Tab. 2 Typical rolling products dimensions, steel types and rolling times

坯料	成品规格	钢种	轧制道次
225 × 225 / 255 × 255 × 1200	90 × 120	B2—3	9
225 × 225 / 255 × 255 × 1200	67 × 67	B2—3	12
连铸坯 160 × 220 × 3050	67 × 67	20MnSi	10
225 × 225 / 255 × 255 × 1200	11.4 × 240	BY08	12
100 × 210 × 2800	26.4 × 240	1Gr18Ni9Ti	4
连铸坯 150 × 280 × 3000	12.3 × 290	B1—2	8

## 1.2 轧制力 P 计算

轧制力  $P$  计算公式为  $P = p_c \times F$ , 公式中  $p_c$  是平均单位压力,  $F$  是轧件与轧辊的接触面积。

接触面积计算公式为  $F = (b_0 + b_1) \times \sqrt{R\Delta h}$  ②, 公式中  $b_0$ ,  $b_1$  是轧件轧制前后的宽度;  $\Delta h$  是绝对压下量;  $R$  是轧辊半径。

现以 BY08 轧件为例, 将各道次的接触面积  $F$  计算值列于表 3 中, 其余轧件的计算方法和过程与 BY08 轧件相同。

平均单位压力  $p_c$  计算采用采列柯夫、爱克隆德、西姆斯、恰克如夫四个公式<sup>[1]</sup>进行理论计算。计算过程以 BY08 材料为例, 其余材料的平均单位压力计算方法和过程与 BY08 轧件类同, 一并将计算结果汇总于图 2~图 6。

爱克隆德公式为  $p_c = (1+m)(K + \zeta u)$ , 公式中  $m$  是外摩擦对单位压力的影响系数;  $K$  是静压缩时单位变形阻力;  $\eta$  是粘度系数;  $u$  是变形速度。

西姆斯公式为  $p_c = n_s \times b \times S$ , 公式中  $n_s$  是外摩擦影响系数<sup>[4]</sup>,  $n_s = (0.78 - 0.26 \varepsilon) + (0.25 + 0.065 \varepsilon) \times \frac{1}{h_c}$ ;  $S$  是变形阻力。

采列柯夫公式为  $p_c = n'_s \times n''_s \times n'''_s \times b \times S$ , 公式中  $b$  是横向应力  $S_2$  的影响系数  $b = 1.15$ ;  $S$  为变形阻力;  $n'_s$  是外摩擦影响系数;  $n''_s$  是外区影响系数,  $n''_s = (\frac{1}{h_c})^{-0.4}$ ,  $n'''_s$  是张力影响系数, 无张力取  $n'''_s = 1$ 。

表 3 各道次接触面积计算汇总表  
Tab. 3 Summary of the contacted area of each rolling time

道次 \ 参数	$\Delta h$ (mm)	$R$ (mm)	$l$ (mm)	$F$ (mm <sup>2</sup> )
1	39.00	336.00	93.93	23 408.74
2	13.00	242.50	55.77	14 149.08
3	54.00	244.00	111.57	22 957.35
4	36.00	262.00	95.44	19 812.17
5	34.00	279.00	95.90	20 428.83
6	37.00	279.50	103.27	22 478.39
7	23.00	309.00	83.51	18 378.06
8	26.00	321.00	90.63	20 509.52
9	14.00	328.00	56.81	15 856.85
10	10.60	330.50	58.95	14 234.88
11	6.00	336.50	44.93	10 754.21
12	6.00	336.50	44.93	10 798.74

恰古诺夫公式为  $p_c = k_t \times k_f \times s_b$ ，公式中  $k_t$  是温度系数； $k_f$  是外摩擦系数； $s_b$  是轧件退火后的强度极限。

根据上述四个平均单位压力计算公式，我们根据所选的四种轧件材料进行各道次的平均单位压力计算，然后再进行轧制力  $P$  和轧制力矩  $M$  计算。

## 2 轧制负荷汇总比较

通过轧制负荷的计算，将 BY08 材料计算轧制力  $P$  与轧制力矩  $M$  汇总于表 4。

### 2.1 轧制力汇总比较

根据所选各轧件的轧制力与轧制力矩计算，现将所选择的全部品种轧件的理论计算值及实测值<sup>[3]</sup>一起汇总画图，由图 2~图 6 所示。

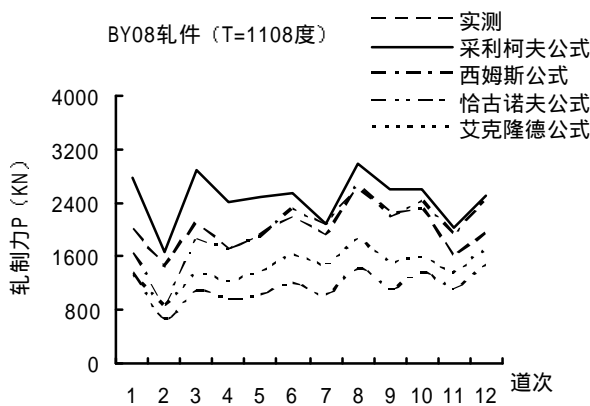


图 2 BY08 轧件  
Fig. 2 BY08 rolling product

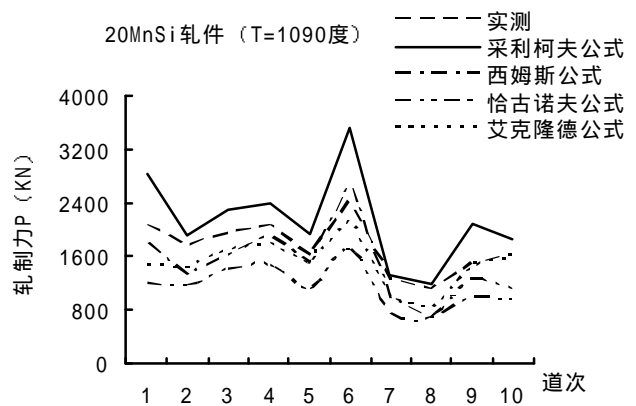


图 3 20MnSi 轧件  
Fig. 3 20MnSi rolling product

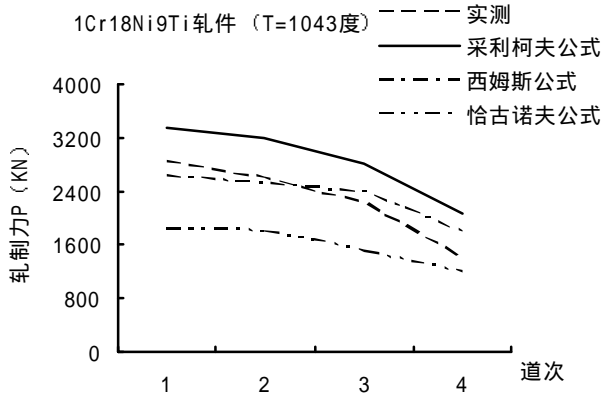


图4 1Cr18Ni9Ti 轧件  
Fig.4 1Cr18Ni9Ti rolling product

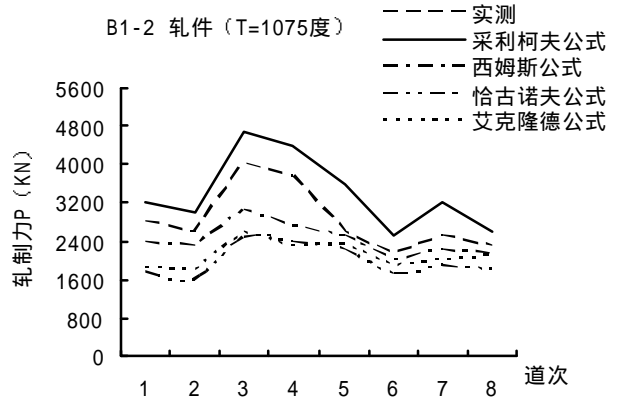


图5 B1-2 轧件  
Fig.5 B1-2 rolling product

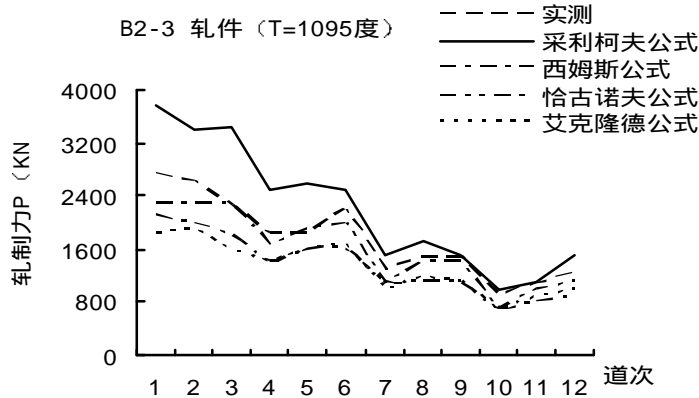


图6 B2-3 轧件  
Fig. 6 B2-3 rolling product

2.2 绘制电机轧制负荷图

2.2.1 绘制静轧制负荷图

根据生产现场实际测得的轧制时间、间隙时间、节奏时间和静力矩值绘制轧制静负荷图，如图7所示。

2.2.2 绘制动力矩负荷图

电机动力矩曲线方程<sup>[1]</sup>为  $M_D = M_j (1 - e^{-t/T})$ ，公式中  $M_D$  是电机轴上动力矩； $M_j$  是静负荷图中最大静力矩； $T$  是电气机械时间常数。

所有转动零件换算到电机轴上的飞轮力矩为

$$G_D^2 = (G_D^2_{\text{大齿}} + G_D^2_{\text{轧辊总}} + G_D^2_{\text{齿轮辊总}} + G_D^2_{\text{接轴总}} + G_D^2_{\text{主联}}) / i^2 + G_D^2_{\text{飞轮}} + G_D^2_{\text{电机}} + G_D^2_{\text{小齿}} + G_D^2_{\text{电联}} = 451 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{mm}^2)$$

再将  $n_0 = 500 \text{ r/min}$ ;  $M_H = 63 (\text{MN} \cdot \text{mm})$ ;  $S_H = 1\%$ ;  $S_H' = 6\%$  代入  $T$  公式

最后，求得

表 4 BY08 材料各公式轧制力和轧制力矩计算汇总表

Tab. 4 Summary of rolling force and rolling moment calculated with each formula for material BY08

参数 道次	爱克隆德公式		西姆斯公式		采列柯夫公式		恰古诺夫公式	
	$P(\text{kN})$	$M$ (MN · mm)	$P(\text{kN})$	$M$ (MN · mm)	$P(\text{kN})$	$M$ (MN · mm)	$P(\text{kN})$	$M$ (MN · mm)
1	1 326.2	124.0	1 645.3	154.5	2 762.3	259.5	1 030.02	97.0
2	823.3	45.9	807.8	45.1	1 683.2	93.9	644.5	36.0
3	1 333.6	148.8	1 838.9	205.6	2 890.3	322.5	1 070.3	120.0
4	1 218.7	116.3	1 697.9	162.1	2 423.0	231.3	956.9	101.1
5	1 337.9	128.3	1 867.2	179.1	2 478.0	237.6	1 025.5	98.4
6	1 609.5	166.2	2 309.4	238.5	2 524.3	260.7	1 195.9	123.5
7	1 437.9	120.1	2 060.2	172.1	2 096.9	175.1	1 020.0	85.2
8	1 850.0	167.7	2 670.3	242.0	2 971.8	269.3	1 404.9	127.3
9	1 500.5	85.3	2 191.3	124.5	2 606.9	148.1	1 100.5	71.4
10	1 588.6	93.7	2 405.7	141.8	2 590.7	152.7	1 337.4	81.4
11	1 345.1	60.4	1 916.4	86.1	2 032.6	91.3	1 110.3	50.2
12	1 688.2	75.9	2 444.8	109.9	2 505.4	112.6	1 464.3	65.8

$$T=0.0956(\text{S})$$

$$T'=0.57(\text{S})$$

选择不同的时间  $t$  就可得到对应的电机力矩  $M_D$ , 并绘制模板曲线。再利用模板在静负荷图上画出电机的动负荷曲线, 电机轧制负荷图曲线, 如图 7 所示。

### 3 轧制负荷分析

#### 3.1 最大电机轧制负荷计算及电机校核

##### 3.1.1 最大电动力矩计算 $M_{\text{DMAX}}$

由图 7 电机轧制负荷图所示, 可得到最大电机轧制负荷  $M_{\text{DMAX}}$  为

$$M_{\text{DMAX}}=110(\text{MN} \cdot \text{mm})$$

##### 3.1.2 电机校核

电机过载校核公式为

$$M_{\text{DMAX}}/K$$

代入已知数值

$$M_{\text{DMAX}}/K=110/1.75=62.8(\text{MN} \cdot \text{mm})<M_H$$

因此, 电机过载校核通过(但基本处于满载状态)。

电机发热校核: 根据电动机负荷曲线, 计算均方根力矩  $M_{\text{ju}}$ <sup>[2]</sup>:

$$M_{\text{ju}}=\sqrt{\frac{\sum M_{\text{de}}^2 \times t_j}{\sum t}}$$

公式中  $M_{dc}$  是每段折线的等效力矩, 代入已知数值求得  $M_{ju}$

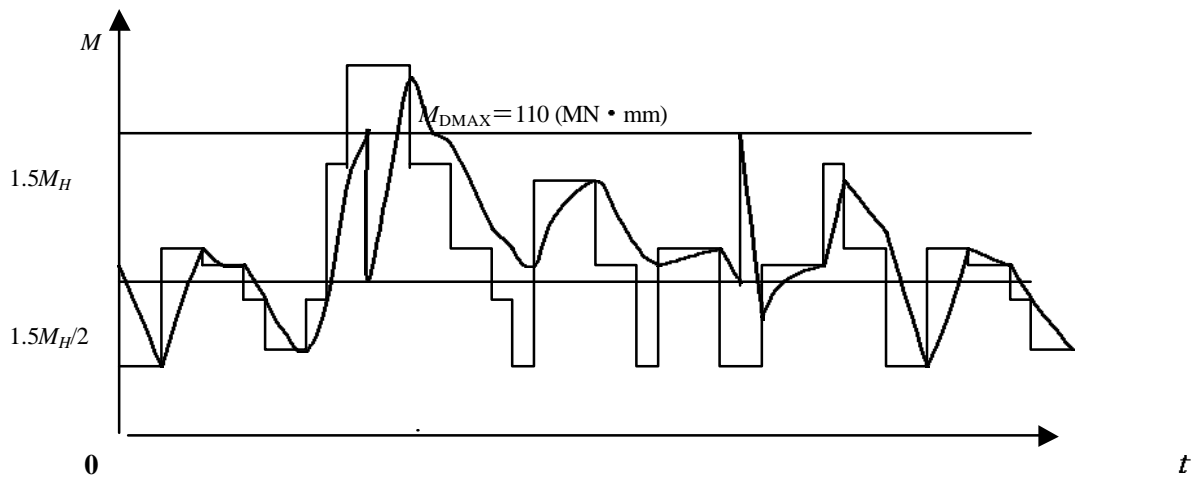


图7 电机轧制负荷图

Fig. 7 Electro motor's rolling load

$$M_{ju} = 66.5(\text{MN} \cdot \text{mm}) > M_H = 63(\text{MN} \cdot \text{mm})$$

因此, 电机发热不通过。

### 3.2 轧制力实测值与理论计算值比较

从上面轧制理论计算值与实测值汇总图上来看, 轧制力沿各道次分布的趋势基本相似, 实测值低于采列柯夫计算值而高于其余三公式计算值。相对来说, 西姆斯和爱克隆德公式计算更接近实际。因此, 西姆斯和爱克隆德公式可作为该轧机今后需进行轧制力理论计算时的选择公式。

### 3.3 主电机校核分析

通过对主电机校核结果来看, 过载校核通过(但余量不多), 而发热校核不论从均方根理论方法还是从等值电流实测方法<sup>[3]</sup>, 其结果都不能通过。理论计算结果与实际测试值接近, 并且与生产中实际现象也较为相似, 都反映出轧机处于超负荷的工作状态。

### 3.4 主要零部件的校核

对轧机一些主要零部件, 如轧辊、接轴、齿轮座等强度校核来看<sup>[1, 5, 6]</sup>, 有些也不能通过。如轧辊安全系数计算不通过与实际生产中经常出现断辊现象一致等, 这将直接影响正常生产及安全。

## 4 轧制工艺的优化分析

通过轧机轧制负荷的分析, 可以得到原生产中的轧制工艺是产生超负荷轧制的直接原因。由于轧制节奏时间太短和不合理的压下量的生产工艺等而造成轧辊断辊等生产故障。因此, 应该对原生产轧制工艺进行必要的优化, 具体优化方案如下:

### 4.1 减少同时轧制过钢根数

从BY08和B1-2二轧件在生产中产生的最大轧制力和轧制力矩 5.87(MN), 6.180(MN)和 850(MN · mm), 880(MN · mm)来看, 都是在较多的同时过钢状态下而产生的。而同时过钢根数多引起的超载是与轧制工艺中的轧制节奏时间设计得太短是相关的, 这就是造成轧辊经常出现断辊的主要原因。

因此, 本文认为必须进行合理的轧制工艺安排, 通过修正轧制节奏时间  $t$  以减少轧机同时过钢根数等方法来降低生产中的尖峰负荷。最大轧制负荷的降低以使轧辊等一些零部件在生产中能满足强度的要求。

#### 4.2 减少绝对压下量

为提高轧辊的安全系数, 应重新设计轧制孔型图, 采用适当减少绝对压下量的方法以提高抗弯断面系数达到降低轧辊辊身和辊颈的应力, 从而消除轧辊断辊等生产故障。

#### 4.3 有效的设备过载保护措施

由于主电机的发热不通过, 主电机基本上处于满负荷的工作状态。对主电机可采用有效的冷却措施及有效的过载保护措施(机械和电气方面的结合), 改善主电机的工作状况, 使电机能处于正常的工作状态, 或在超载时起到过载保护作用。

从本文的轧制负荷分析和优化方案所得到的效果来看, 原本影响生产与安全现象已消失, 取得了较好的效益。

### 5 结束语

电机轧制负荷的分析计算, 反映出该轧机系列已处于满负荷(或超负荷)工作状态, 这种情况都不利于设备及生产的正常运行。通过对轧机现有负荷和轧制工艺的分析, 找到引起问题的原因, 并在此基础上提出轧制工艺优化分析和优化方案。

本文的轧制负荷分析及优化方案对该轧钢厂以及全国其它同类型轧钢机设备有关技术人员都具有实际参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄华清. 轧钢机械[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- [2] 马鞍山钢铁设计院. 中小型轧钢机械设计与计算[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981.
- [3] 上海应用技术学院测试技术教研室编写. 630 轧机测试报告[R]. 1994.
- [4] 蒋维兴. 轧钢机械设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [5] 吴宗泽. 机械零件设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 北京钢铁学院. 机械零件[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.

## Analyzing of the Rolling Load and Optimizing of the Rolling Process

WU Xing-gen

(School of Economy and Management, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, P. R. China)

**Abstract:** As the output increasing, the malfunctions of the rolling machine caused by overload are also increasing. The actual load data in production is collected by calculating and analyzing the rolling load of a 630 rolling machine in a iron & steel company. To ensure the safe and normal operating of the machine, the actual work load has been analyzed and the malfunction causes have been rooted, and based on this, the necessary of optimizing the rolling process and optimizing solution have been presented.

**Keywords:** rolling force; rolling load graph; overload, rolling process optimize