

## 轧制力参数优化对冷轧厚度控制影响的研究

王彦辉<sup>1</sup> 刘海超<sup>2</sup> 高雷<sup>1</sup> 郭立伟<sup>1</sup> 李书昌<sup>1</sup>

(1 北京首钢自动化信息技术有限公司 自动化研究所, 北京 100041,

首钢迁钢公司 硅钢事业部, 河北 迁安 064400)

**摘 要:**基于对轧机弹跳方程和轧机 AGC 控制原理的分析, 轧制力是影响冷轧带钢厚度精度的关键因素。通过优化变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数来提高冷轧轧制力模型计算精度, 保证高精度冷轧带钢厚度控制的目的。通过在首钢迁钢的森基米尔产线进行 S12 硅钢钢种冷轧带钢优化试验, 使冷轧带钢的轧制力偏差由 12% 提高到 6%, 带钢的厚度超差长度由 32.99 米减少到 15.6 米。该优化方法不仅提高了轧制力的设定精度, 而且减少了冷轧带钢的厚度超差长度, 提高了冷轧带钢的成材率。

**关键词:**轧制力 变形抗力 摩擦系数 森基米尔二十辊轧机 厚度超差

### Study on Rolling Force Parameter Optimization Effect on Cold-rolled Thickness Control

Yanhui Wang<sup>1</sup>, Haichao Liu<sup>2</sup>, Lei Gao<sup>1</sup>, Liwei Guo<sup>1</sup>, Shuchang Li<sup>1</sup>

(1. Beijing Shougang Automation Information Technology Co., Ltd.

2. Shougang Qiansteel Co.)

**Abstract:** Based on the analysis of mill spring equation and Mill AGC control principle, rolling force is the key factor of the accuracy of cold-rolled strip thickness. By optimizing the deformation resistance model parameters and friction coefficient model parameters to improve the precision cold rolling force model to ensure that the purpose of high precision cold-rolled strip thickness control. In Shougang Qiangang Sendzimir twenty rolls Mill single stand production line, S12 silicon steel's Optimization experiments were conducted. By optimizing the cold strip rolling force variation from 12 % to 6%, the length of the strip thickness tolerance decreased from 32.99 m to 15.6 m. The optimization method not only improves the accuracy of rolling force setting, and reduces the thickness of the ultra-poor length of cold rolled strip, cold rolled strip improves the yield.

**Key word:** Roll force, Deforming resistance, Friction coefficient, Sendzimir twenty rolls Mill, Gauge deviation

## 1. 引言

策划和编辑：北京金属学会办公室

厚度是冷轧带钢的基本尺寸指标，是冷轧产品重要的质量指标之一，轧制力模型是决定单机架冷轧带钢厚度控制精度的核心模型，对带钢的厚度控制起着决定性作用。

首钢迁钢公司在 2011 年从日本日立公司引进三条森基米尔单机架轧机生产线进行高牌号无取向硅钢和取向硅钢生产。在产线投产初期，由于生产线 L2 过程控制系统的轧制力模型设定精度较低，增加了 AGC 厚度控制系统的控制调整时间，增加了带钢的厚度超差长度。北京首钢自动化信息技术有限公司(简称：首自信)自动化研究所，通过对现场生产情况调研，开发出提高轧制力精度的优化方案，通过对变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数调整优化来提高轧制力设定精度，减少带钢的厚度超差长度。

## 2. 轧制力对厚度控制影响及冷轧轧制力模型分析

### 2.1 轧制力精度对厚度控制的影响分析

首先，轧制力是设定辊缝的依据<sup>[1]</sup>，辊缝设定主要用轧机弹跳方程： $h = S_0 + \frac{P - P_0}{K}$ ， $h$ ：带钢的出口厚度； $S_0$ ：考虑预压变形的空载辊缝； $P$ ：轧制力； $P_0$ ：预设定轧制力； $K$ ：轧机刚度。从式中可知要想获得精确的带钢厚度  $h$  值，就要设定好辊缝  $S_0$  值，而  $S_0$  值的精度是由轧制力的精度直接决定的(如图 1a 所示)。

其次，轧制力是轧机厚度自动控制系统 (AGC) 的主要依据<sup>[1]</sup>，在 AGC 系统中有前馈控制和反馈控制，在前馈控制系统中辊缝调节量： $\Delta S = \frac{M}{K_m} \Delta H$ 。 $M$ ：是轧件的

塑性系数， $\Delta H$  是来料厚度差；在反馈控制系统中辊缝的调节量为  $\Delta S = \frac{M + K_m}{K_m} \Delta h$ 。

同一台轧机和轧制工艺条件一致时， $K_m$  被认为是一个常数，而塑性系数  $M$  是塑性曲线各点上的斜率，即  $M = \tan \beta$ ，在塑性曲线工作段（即，线性段）做切线，由三角形关系可求出  $M$  值（见图 1b）， $\beta = \arctan \frac{P}{\Delta h + \Delta H}$  所以在  $M$  的确定中必须要有轧制力的计算。

策划和编辑：北京金属学会办公室

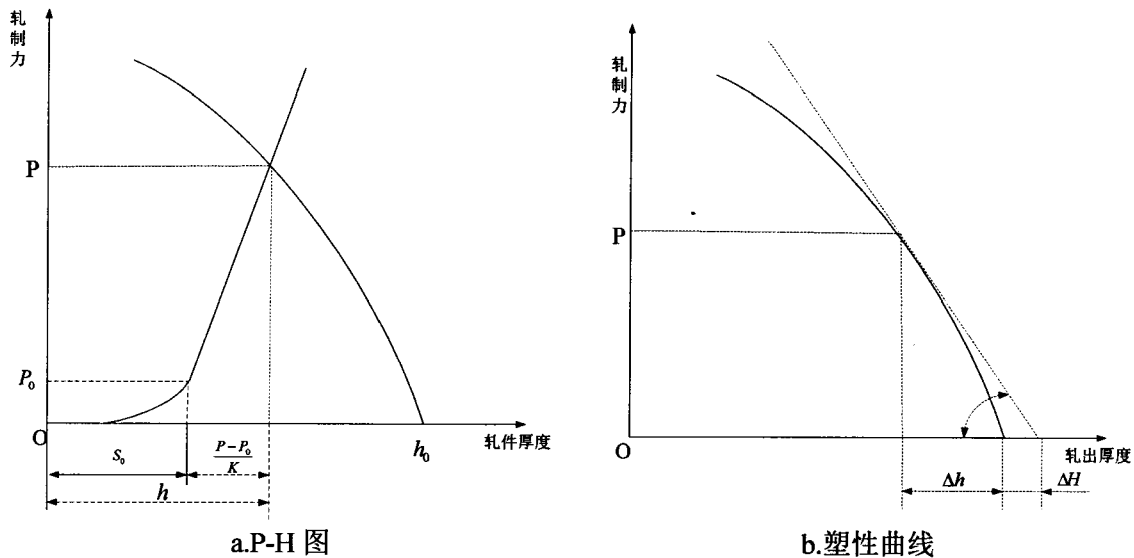


图 1 轧制力与厚度控制的关系

## 2.2 冷轧轧制力模型分析

在冷轧实际生产中普遍采用的轧制力模型有斯通模型和 Bland-Ford-Hill 模型<sup>[1]</sup>, 这里采用 Bland-Ford-Hill 轧制力模型进行设定计算, 在应用中忽略了占轧制力比例非常小的弹性区轧制力的计算降低了计算的难度适宜在线控制, 模型计算当中的采用简化的 Hitchcock 公式计算的轧辊压扁半径与实际情况比较接近。具体模型如式 1 所示。

### 2.2.1 轧制力模型

$$P = b \cdot kp \cdot te \cdot Dp \cdot \sqrt{R' \cdot (H - h)} \cdot zp \quad (1)$$

$$Dp = 1.08 + 1.79 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{R'}{h}} - 1.02 \cdot \varepsilon$$

$$te = 1.05 \times \left(1 - \frac{tb}{kp}\right) + 0.1 \times \left(1 - \frac{tf}{kp}\right) - 0.15 \times \frac{\left(1 - \frac{tb}{kp}\right)^2}{\left(1 - \frac{tf}{kp}\right)}$$

$$R' = R \times \left[1 + \frac{ch \times P}{b \times (H - h)}\right]$$

式中:  $P$ : 轧制力;  $b$ : 带钢的宽度;  $kp$ : 轧件的动态变形抗力;  $te$ : 张力影响系数;  $Dp$ : 轧制过程的平面影响系数;  $\varepsilon$ : 轧件的道次压下率;  $\mu$ : 摩擦系数;  $tf$ : 轧件的道次前张力;  $tb$ : 轧件的道次后张力;  $H$ : 轧件的入口厚度;  $h$ : 轧件的出口

策划和编辑：北京金属学会办公室

厚度；  $ch$ ：在模型当中取常值 0.000214，由  $ch = \frac{16 \times (1 - \nu^2)}{\pi E}$  计算得出。

在 Bland-Ford-Hill 模型当中，变形抗力和摩擦系数是影响轧制力的两个最主要的因素，轧制力的计算精度依赖于变形抗力和摩擦系数的计算精度<sup>[4]</sup>。具体的计算子模型如下：

### 2.2.2 变形抗力模型：

在冷轧过程中，由于加工硬化的作用变形抗力随变形程度的增加而强烈增加，主要与相应的累计变形程度有关，同时，在模型中考虑了轧制速度的变化对变形抗力的影响。因此变形抗力模型采用如下的形式进行计算

$$kp = k \times (1000 \times ramd)^{\frac{5}{k+23}-0.046} \quad (2)$$

$$ramd = \frac{1000}{60} \times \frac{2}{\left(2 - \frac{H-h}{H}\right)} \times \sqrt{\frac{H-h}{R \times H^2}} \times v$$

$$k = l \times (eps + m)^n$$

式中： $kp$ ：轧件的动态变形抗力； $k$ ：轧件的变形抗力； $H$ ：轧件入口厚度； $h$ ：轧件的出口厚度； $v$ ：轧制速度； $l$ 、 $m$ 、 $n$ ：轧件静态变形抗力计算系数； $eps$ ：轧件累积真应变； $ramd$ 、 $nk$ ：轧件动态变形抗力计算过程的中间变量。

### 2.2.3 摩擦系数模型：

轧制过程中工作辊的粗糙度和轧制速度对摩擦系数至关重要，同时，带钢的变形程度也对摩擦系数的计算产生较大影响，综合考虑以上几方面的影响因素，摩擦系数模型采用如下的形式：

$$\mu = \mu_0 \times \left( \mu_1 + \frac{\mu_2}{\mu_3 + v} + \mu_4 \times \varepsilon \right) \times \left( \frac{1}{1 + \mu_5 \times nr} \right) \quad (3)$$

式中： $\mu$ ：基本模型计算的摩擦系数； $v$ ：当前轧制过程中，轧制速度； $\varepsilon$ ：当前轧制道次的压下率； $nr$ ：当前使用的工作辊轧制的钢卷数； $\mu_0$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$ 、 $\mu_4$ 、 $\mu_5$ ：计算摩擦系数模型当中的系数。

首自信自动化研究所根据轧制过程的实际过程数据提出优化轧制力的优化方案，通过调整优化变形抗力模型当中的模型参数  $l$ 、 $m$ 、 $n$  和摩擦系数模型当中的模型参数

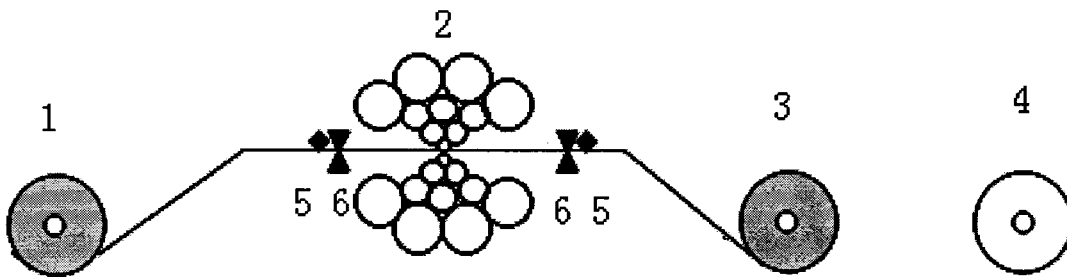
策划和编辑：北京金属学会办公室

$\mu_0$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$ 、 $\mu_4$ 、 $\mu_5$ 来提高变形抗力子模型和摩擦系数子模型的计算精度，进而进行轧制力优化。

### 3. 轧制力模型参数优化及优化实验前后结果分析说明

#### 3.1 森基米尔轧制生产工艺说明

这里取首钢迁钢的森基米尔二十辊轧机产线进行优化实验。森基米尔是生产高牌号无取向硅钢和取向硅钢的关键设备<sup>[5]</sup>。首钢迁钢公司的森基米尔采用的是单机架可逆布置，主要设备有：主轧机、开卷机、左卷取机、右卷取机等，设备平面布置简图如图2所示。运行的最高速度为800mpm，能够将2~2.6mm的已经退火和酸洗热轧硅钢原料经过4~6个道次的可逆轧制，生产出厚度为0.18mm~0.5mm的硅钢产品，然后进行后续生产工序的加工。



1.左卷取机 2.主轧机 3.右卷取机 4.开卷机 5.板形仪 6.x射线测厚仪

图2 二十辊森基米尔轧机结构简图

这里以轧制的S12无取向硅钢为实验钢种进行优化实验。S12钢种由2.3mm的原料经过5个道次的轧制，轧出0.35mm的成品。

#### 3.2 优化试验实施过程和模型参数优化前后对比

在同一批次轧制的53卷S12钢种的带钢钢卷中前33卷带钢为实验前钢卷，然后根据轧制过程中存储的实际过程数据（包括：带钢的原料厚度、宽度、道次入口厚度、道次出口厚度、轧制速度、工作辊半径，前张力、后张力等实际过程数据）进行模型参数优化计算（随着轧制过程的进行，轧机工况会发生变化，因此需要最新的轧制数据进行优化参数计算）。计算得出新的模型参数投入到森基米尔的过程控制系统中，进行接下来的20卷带钢的轧制实验，同时将这20卷的轧制过程的轧制过程数据进行存储。当轧制结束以后，根据存储的实际过程数据统计分析带钢的轧制精度和厚度超差。

在森基米尔的过程系统中，同一台轧机所有道次的摩擦系数一样，那么优化前后的变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数如下：。

策划和编辑：北京金属学会办公室

### (1) 变形抗力模型参数

表 1：优化前后变形抗力参数对比

|           | $l$ | $m$  | $n$  |
|-----------|-----|------|------|
| 优化前变形抗力参数 | 120 | 0.01 | 0.19 |
| 优化后变形抗力参数 | 122 | 0.01 | 0.18 |

### (2) 摩擦系数模型参数

表 2：优化前后摩擦系数模型参数对比

|             | my0 | my1 | my2 | my3 | my4 | my5 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 优化前摩擦系数模型参数 | 1   | 2.5 | 4   | 200 | 0   | 0   |
| 优化后摩擦系数模型参数 | 1   | 2.7 | 5   | 200 | 0   | 0   |

## 3.3 优化前后轧制力设定计算精度对比

为了能够清晰的表示轧制力数学模型的计算精度，采用以下的方法对轧制力精度进行计算说明：

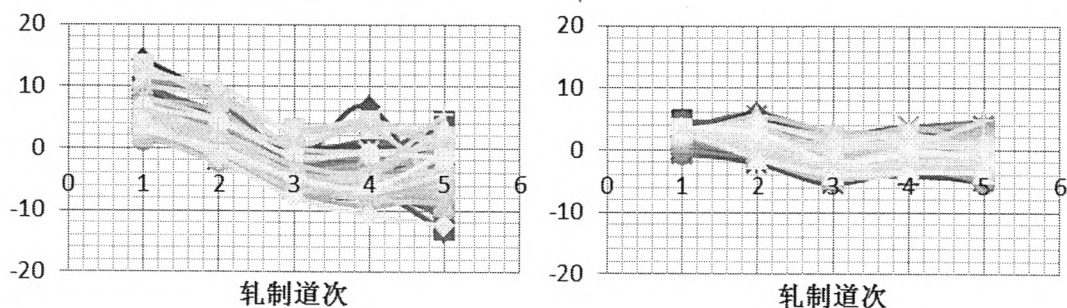
$$ZP = \frac{(P_{cal} - P_{act})}{P_{act}} \times 100\% \quad (4)$$

式中：ZP：轧制力模型计算的轧制力偏差； $P_{cal}$ ：轧制力模型计算的轧制力； $P_{act}$ ：实际的轧制力；

ZP是轧制力数学模型计算的轧制力的相对偏差，当ZP的绝对值越小，轧制力数学模型设定精度越高。根据轧制力模型的设定精度的计算方法，如果ZP大于0时，表示轧制力模型计算的轧制力大于实际轧制力；如果ZP小于0时，表示轧制力模型计算的轧制力小于实际轧制力。

分别对实验的 S12 钢种钢卷分头部、中部、尾部三种位置对优化前后的轧制力精度情况进行说明。

#### (1) 带钢头部轧制力精度对比



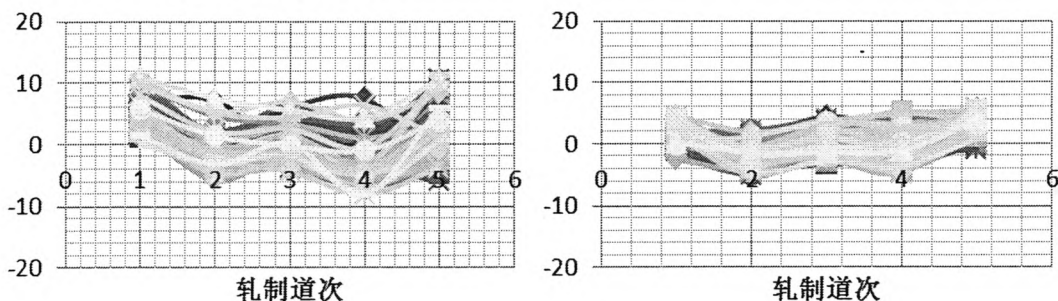
策划和编辑：北京金属学会办公室

优化前带钢的头部轧制力相对偏差 (%)

优化后带钢的头部轧制力相对偏差 (%)

图 3 优化前后带钢头部轧制力精度对比

## (2) 带钢尾部轧制力精度对比

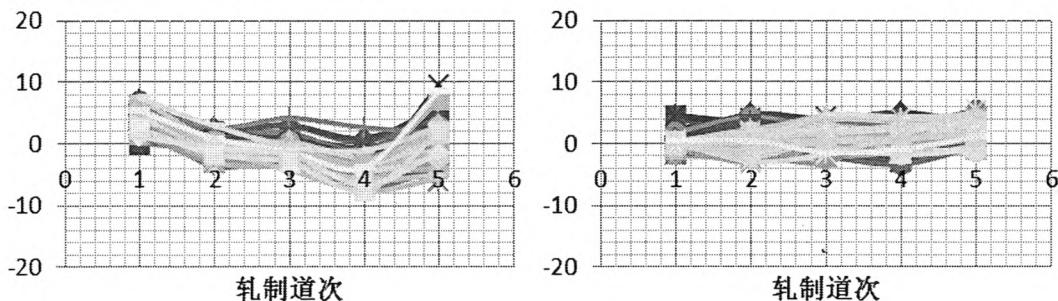


优化前带钢的尾部轧制力相对偏差 (%)

优化后带钢的尾部轧制力相对偏差 (%)

图 4 优化前后带钢尾部轧制力精度对比

## (3) 带钢中部轧制力精度对比



优化前带钢的中部轧制力相对偏差 (%)

优化后带钢的中部轧制力相对偏差 (%)

图 5 优化前后带钢中部轧制力精度对比

从以上的图 3、图 4、图 5 的对比过程中可以看出通过轧制力的优化，可以将带钢的轧制力精度由偏差在 12% 以内提高到 6% 以内。

### 3.4 带钢纵向厚度超差长度对比

以  $3\mu\text{m}$  为评价指标，根据存储的钢卷的实际产品厚度数据统计 20 辊轧机进行轧制力优化前的 33 卷带钢的轧制产品的头部（头部 50m）、尾部（尾部 30m）和中部（除去头部 50 米和尾部 30 米的中间部分）的厚度超差长度。同时，根据存储的钢卷的实际产品厚度数据对优化后 20 卷带钢的轧制产品的头部、尾部和中部的厚度超差长度进行统计。将优化前后的厚度超差长度数据进行对比如下图所示：

策划和编辑：北京金属学会办公室

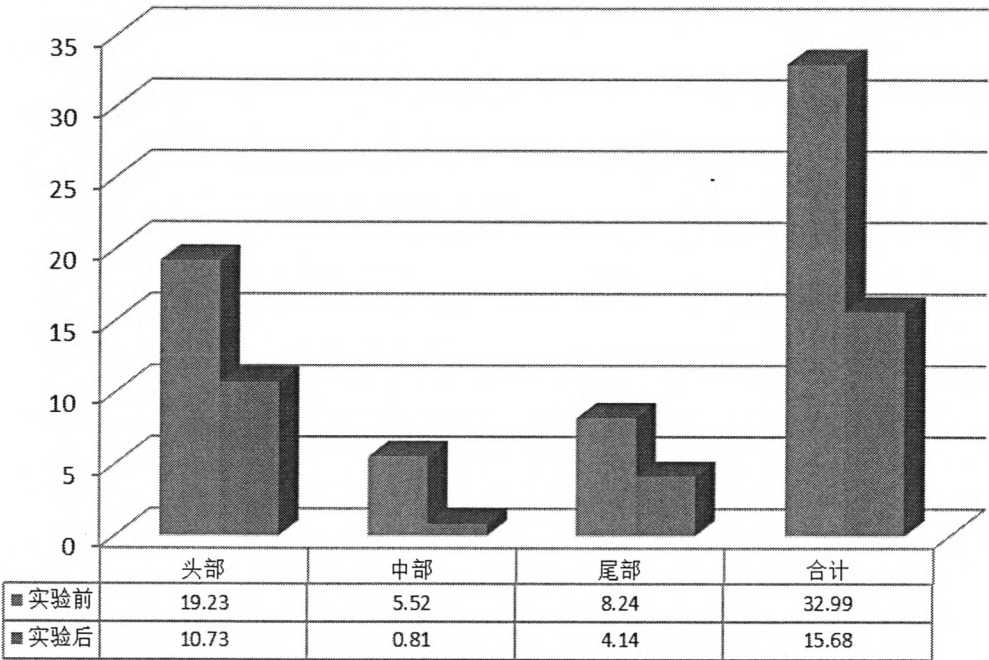


图 6 优化前后带钢厚度超差长度对比

由上图可知带钢的头部、尾部和中部的厚度超差长度平均值也得到了明显改善。其中头部由 19.23 米提高到 10.73 米，中部由 5.52 米提高到 0.81 米，尾部由 8.24 米提高到 4.14 米。

通过对本次实验的对比分析可知，优化参数投入以后，带钢的轧制力精度得到由 12%提高到 6%；带钢的厚度超差长度由 32.99 米减少 15.68 米。可以认为本次实验通过优化轧制力参数实现了提高带钢厚度控制精度的目的。

4. 结论

轧制力通过轧机弹跳确定辊缝和厚度自动控制 AGC 系统对冷轧带钢的纵向厚度产生重要影响，而轧制力的计算精度依赖于变形抗力和摩擦系数的精度，通过调整优化变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数，来提高轧制力的计算精度，实现带钢厚度的高精度控制。

并将该优化思想应用到现场生产实践当中，在首钢迁钢的森基米尔产线生产的 S12 钢种进行试验，通过优化将带钢的轧制力精度由 12%提高到 6%；厚度超差长度由 32.99 米提高到 15.68 米，提高了森基米尔轧机产线生产带钢的成材率。

策划和编辑：北京金属学会办公室

该方法能够向其它冷轧带钢产线进行推广。

**参考文献:**

- [1]丁修堃,张殿华,王贞祥,等.高精度板带刚厚度控制的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [2]刘相华,胡贤磊,杜林秀,等.轧制参数计算模型及其应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [3]杨 节.轧制过程数学模型[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [4]孙一康.冷热轧板带轧机的模型与控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [5]潘纯久.二十辊轧机及高精度冷轧带钢生产[M].北京:冶金工业出版社,2007.