

冷轧带钢轧制压力分布计算

白金兰^{1,2} 张睿¹ 刘红¹ 李东辉² 王国栋²

(1 沈阳航空工业学院, 沈阳 110034; 2 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:利用经典轧制力模型和轧辊压扁模型,考虑二者的耦合推导出考虑轧辊压扁半径的轧制力显示计算公式,在此基础上开发了基于影响函数法的冷轧带钢轧制压力分布计算程序,并用该程序结合实际生产中的采样数据模拟计算了 HC 冷轧机各道次的轧制压力分布和总轧制力,将所得计算结果与现场实测数据进行比较。结果表明:所得轧制力计算结果与现场实测数据平均值相近,轧制压力分布与实际相符,为 HC 轧机板形控制提供了一种计算轧制压力分布的有效方法。

关键词:冷轧,带钢,轧制压力分布,影响函数法,轧制力,HC 轧机

中图分类号:TG333.7

文献标识码:A

板形和板厚是带钢的重要质量指标。近年来,AGC 厚度控制技术的完善和广泛应用,带材的纵向厚差已得到较好控制,纵向精度越来越高,相比之下板形控制的研究比较薄弱,因此板形控制的研究越来越引起人们的注意。而轧辊的弹性变形是板形控制研究的一项重要内容。轧制压力横向分布直接影响轧辊的弹性变形,从而影响轧件出口处的厚度分布。因此,采用合适的计算方法,准确地计算轧制压力分布对实现板带材的高精度轧制具有重要意义。本文采用影响函数法计算了 HC 单机架可逆冷轧机各道次的轧制压力分布和总轧制力,为计算 HC 轧机轧辊弹性变形提供了一种计算轧制压力分布的有效方法。

1 轧制力显示计算公式

对于冷轧带钢轧制而言,金属不仅发生塑性变形而且还存在着弹性变形,冷轧带钢轧制力模型中 Bland - Ford 公式是考虑轧件弹性变形的工程计算公式,是目前冷轧过程控制常用的经典轧制力计算模型^[1]:

$$F = F^p + F^e \quad (1)$$

式中: $F^p = Q_F (k_m - \xi) W \sqrt{R' (h_{in} - h_{out})}$;

$$\xi = \alpha \cdot t_{in} + \beta \cdot t_{out}$$

$$Q_F = 1.08 - 1.02r + 1.79r\mu\sqrt{1-r}\sqrt{\frac{R'}{h_{out}}}$$

$$F^e = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1-v^2}{E} k_m \frac{h_{out}}{h_{in} - h_{out}}} (k_m - \xi) W \sqrt{R' (h_{in} - h_{out})}$$

式中: F —轧制力; F^p, F^e —塑性、弹性区轧制力; h_{in}, h_{out} —入口、出口厚度; W —带钢宽度; t_{in}, t_{out} —入口、出口单位张力; K_m —平均变形抗力; μ —摩擦系数; R' —轧辊压扁半径; Q_F —轧制力外摩擦影响系数; r —压下率; v —泊松比; E —杨氏模量; α, β —入口、出口张力影响系数。

轧辊压扁采用 Hitchcock 公式来计算。

$$R' = R \left(1 + \frac{C_R \bar{p}}{\Delta h_{eq}} \right) \quad (2)$$

$$\text{式中: } C_R = \frac{16(1-v^2)}{\pi E}; \bar{p} = \frac{F}{W}$$

$$\Delta h_{eq} = \left(\sqrt{\frac{1-v^2}{E} h_{out} (k_{out} - t_{out})} + \sqrt{h_{in} - h_{out} + \frac{1-v^2}{E} h_{out} (k_{out} - t_{out})} \right)^2$$

\bar{p} —轧制压力,并假定单元内轧制压力均布;
 R —工作辊半径

由于轧制力计算模型与轧辊压扁模型互相耦合,可将轧制力模型进行显式化处理,以求计算过程的简化。将公式(1)用只含有轧辊压扁半径的形式描述得:

$$F = (A_3 + A_4 \sqrt{R'}) \cdot A_1 \cdot \sqrt{R'} + A_2 \sqrt{R'} \quad (3)$$

式中:参数 A_1, A_2, A_3, A_4 与轧辊压扁无关

$$A_1 = (k_m - \xi) W \sqrt{(h_{in} - h_{out})};$$

$$A_2 = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1-v^2}{E} k_m \frac{h_{out}}{h_{in} - h_{out}}} (k_m - \xi) \cdot W \sqrt{(h_{in} - h_{out})}$$

$$A_3 = 1.08 - 1.02r; A_4 = \frac{1.79\eta\mu\sqrt{1-r}}{\sqrt{h_{out}}}$$

将公式(2)用含有轧制力的形式描述

$$R' = B_1 + B_2 F \quad (4)$$

$$\text{式中: } B_1 = R; \quad B_2 = \frac{C_R \cdot R}{\Delta h_{eq} W}$$

式(4)变化得到 $F = \frac{R' - B_1}{B_2}$, 代入式(1)整理后得:

$$(A_1 A_4 B_2 - 1)(\sqrt{R'})^2 + (A_1 A_3 B_2 + A_2 B_2) \sqrt{R'} + B_1 = 0 \quad (5)$$

求解该方程得轧辊压扁半径的解为:

$$\sqrt{R'} = \frac{-(A_1 A_3 B_2 + A_2 B_2) \pm \sqrt{(A_1 A_3 B_2 + A_2 B_2)^2 - 4(A_1 A_4 B_2 - 1)B_1}}{2(A_1 A_4 B_2 - 1)} \quad (6)$$

式中各参数均为正值, 必有 $(A_1 A_4 B_2 - 1) < 0$, 则轧辊压扁半径显示公式为:

$$\sqrt{R'} = \frac{-(A_1 A_3 B_2 + A_2 B_2) - \sqrt{(A_1 A_3 B_2 + A_2 B_2)^2 - 4(A_1 A_4 B_2 - 1)B_1}}{2(A_1 A_4 B_2 - 1)} \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式, 即可得到考虑轧辊压扁半径的轧制力显式计算公式。

2 轧制压力分布计算模型的建立

影响函数法是一种离散化的方法。它的基本思想是, 将轧辊离散成若干单元, 将轧辊所承受的载荷及轧辊弹性变形也按相同单元离散化, 应用数学物理中关于影响函数的概念先确定对各单元施加单位力时在辊身各点引起的变形叠加, 就得出各单元的变形值, 从而可以确定出口处的厚度分布和张力分布等。影响函数矩阵法是在影响函数法基础上发展起来的一种数值方法, 用矩阵和向量来表示轧辊弹性变形时的复杂关系, 用辊间压扁影响函数处理辊间接触压扁, 排除了将轧辊视为无限长圆柱体的假定, 可给出更符合实际的结果^[2]。本文就是采用影响函数矩阵法计算了 HC 轧机的辊系变形, 求出各单元轧制力, 从而确定了各道次的轧制压力的横向分布和总轧制力。

2.1 分割模型的建立

由于 HC 轧机具有一对可轴向移动的中间辊, 因而上下辊系不是以轧机中心线为对称轴左右对称, 其受力和变形及轧件轧后的断面形状均以轧件中心 O 点为中心, 呈点对称状态^[3]。从断面厚度角度来看, 轧后断面仍以轧机中心线为对称轴左右对称, 因此, 我们只需研究轧机上半部辊系的变形, 求出过 O 点水平线以上的轧件断面高度, 就可以确定整个轧件的断面形状和轧制压力分布。用文[2]提供的影响函数法, 建立 HC 机轧制压力分布计算模型。

2.2 影响函数法计算程序的开发

影响函数矩阵法计算 HC 轧机轧制压力分布共 11 个方程, 其中 6 个力—变形关系方程, 2 个平衡方程, 3 个变形协调关系方程。这些方程以矩阵和向量的形式表达文献[1]提供了具体表达形式。为避免采用半无限体修正模型计算轧辊压扁影响函数时常出现的浮点数被零除的现象, 压扁影响函数计算采用文献[4]提供的方法。用上述模型开发了辊间压力分布计算程序, 流程图如图 1 所示。

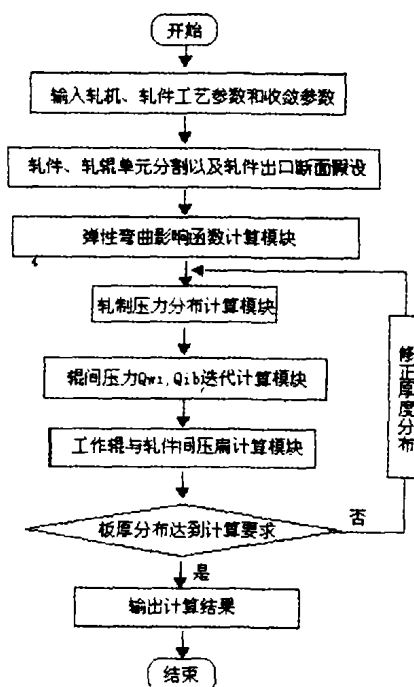


图 1 影响函数法计算轧制压力分布流程图

3 模拟计算

3.1 计算使用数据

为验证算法的有效性, 根据实际生产中的采样数据模拟计算了 1250HC 轧机各道次的轧制力

分布和总轧制力。

(1) 设备参数: 工作辊 $\Phi 420\text{mm}$, 中间辊直径 $\Phi 450\text{mm}$, 支撑辊直径 $\Phi 1180\text{mm}$

(2) 产品规格和工艺参数: 原料厚度: 2.2mm; 宽度 1002mm; 中间辊横移量 $\delta = 50\text{mm}$; 各道次工艺参数见表 1。

表 1 主要工艺参数

道次	出口厚度 mm	入口张力 KN	出口张力 KN	弯辊力 KN
1	1.48	148	105	100
2	0.95	98.5	102	110
3	0.65	73.5	65.5	120
4	0.46	65.5	64	130
5	0.33	62.5	24	140

3.2 模拟计算结果

模拟计算各道次的轧制压力分布如图 2 所示。各道次的轧件边部的轧制压力均大于中心的压力, 原因是由于轧辊的弯曲使得边部的压下量比较大; 各道次的轧件边部与中心的轧制压力差值随着道次的增加而明显增加, 原因是随着道次的增加, 轧件越来越薄, 轧件边部的三维流动减少, 由三维变形趋于二维变形^[5]; 第一道次轧制压力最小, 之后逐道次增加, 原因是变形抗力逐道次增加; 第五道次轧制压力较前几道次明显增加, 原因是工作辊端部在轧件范围外接触, 所得计算结果与实际相符。

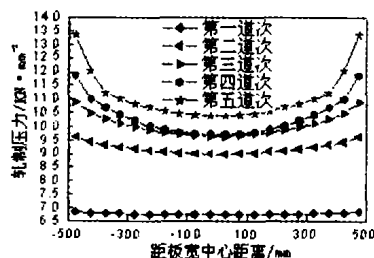


图 2 轧制压力分布计算结果

模拟计算了各道次的总轧制力, 模拟计算结果与现场实测轧制力平均值相近, 结果对比如图 3 所示。

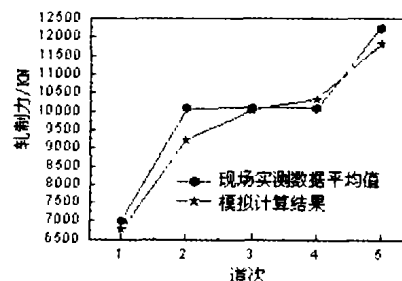


图 3 计算轧制力与现场实测轧制力对比

4 结论

采用由经典轧制力模型和轧辊压扁模型推导出的轧制力显式计算公式, 通过影响函数法计算冷轧带钢轧制压力分布和轧制力, 所得轧制压力分布结果与实际相符, 轧制力与实测值相近, 是计算轧制压力分布的一种有效理论方法, 为计算轧机弹性变形, 辊间压力分布以及进一步计算轧辊热凸度及磨损奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986
- [2] J. Chakrabarty. On the Estimation of Roll Force and Torque in Hot and Cold Rolling, Advanced Technology of Plasticity[J], 1990(2): 607-612
- [3] Guo R. M. Characteristics of Rolling Mills With Roll Shift[J]. Iron and Steel Engineer, 1988, 65(12): 45-54
- [4] 徐建忠, 张凤琴, 龚殿尧, 等. 四辊轧机轧辊弹性变形解析模块的开发[J]. 轧钢, 2003, 20(2): 8-11
- [5] Anon. Schedule Free Rolling and Flatness from the HC-mill[J]. Steel Times International, 1989, 13(5): 32-33

Calculation of rolling pressure distribution in strip cold rolling

BAI Jin-lan^{1,2} ZHANG Rui LIU Hong¹ LI Dong-hui² WANG Guo-dong

(1. Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Liaoning Shenyang 110034; 2. The State Key Lab. of Rolling and Automation of Northeastern University, Liaoning Shenyang 110004)

Abstract: Rolling force formula is deduced using classical rolling force model and roll flattening model, which is used to develop rolling pressure calculation software of strip cold rolling based on influence function method. With the software rolling force and pressure distribution of every pass in HC mill are calculated using sample data from actual rolling. Compared to measured value, the calculation results of rolling force are almost same. Pressure distribution matches the practice condition well, thus introduce an effective calculation method of rolling pressure distribution for shape control of HC mill.

Keywords: cold rolling; strip; rolling pressure distribution; influence function method; rolling force; HC mill