

UCM 冷连轧机弯辊力设定值优化的研究

梁勋国, 徐建忠, 王国栋, 刘相华

(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:在改进的影响函数法基础上, 采用了现场控制系统中的轧制力模型, 考虑前后张应力的影响, 加入了前张应力迭代环并开发了 UCM 冷轧机最佳弯辊力计算程序。在给定中间辊横移量条件下, 计算了 UCM 冷连轧机轧制不同规格带材时的最佳弯辊力。工业试验表明, 采用最佳弯辊力进行轧制, 板形标准差平均值减少了 22%~56%, 获得了良好的板形控制效果。

关键词:UCM 冷连轧机; 影响函数法; 弯辊力; 板形控制

中图分类号:TG333.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-9996(2008)05-0021-05

Study on Optimizing of Bending Force Preset for UCM Tandem Cold Mill

LIANG Xun guo, XU Jian zhong, WANG Guo dong, LIU Xiang hua

(The State Key Lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A program was developed for calculating the optimum bending force of UCM tandem cold mill based on the modified influence function method. Hill's rolling force model was used, and a front tension stress iteration loop was added in consideration of the effect of front and back tension stress. Optimum bending force for rolling different strip was calculated in the condition of giving a shifting distance of intermediate roll. Industry experiment proved that the average of flatness standard deviation could be reduced by 22%~56% by using the optimum bending force and good shape control result was achieved.

Key words: UCM tandem cold mill; influence function method; bending force; shape control

1 前言

从带钢头部进入轧辊辊缝直到建立稳定轧制的一段时间内, 在反馈控制模块尚不能投入的情况下, 需要预设设定值(弯辊力和中间辊横移量)来保证这一段带钢的板形, 因此设定值的精度关系到每一卷带钢的废弃长度(成材率)。同时, 由于

设定值就是反馈控制的起始点、初始值, 其正确与否将影响反馈控制模块调整板形达到目标值的收敛速度和收敛精度^[1]。而轧辊弯辊是板形控制中最为活跃和有效的因素, 其设定精度直接影响轧后带材的板形, 是冷轧带钢生产中最主要的保证成品板形质量的手段之一。

必须采取综合措施才能使其提高和稳定。通过以上几方面工作, 八钢热轧薄板厂宽度控制能力有所改善, 提高了宽度精度和一次合格率, 宽度精度提高了近 5 个百分点, 达 97% 以上。

参考文献:

- [1] 王国栋, 刘相华. 日本热轧带钢技术的发展和现状——随中国金属学会代表团访问日本观感之一[J]. 轧钢, 2007, 24(1):

1-6

- [2] 李兴田. 提高热轧带钢宽度控制精度的综合措施[J]. 轧钢, 2004, 21(1): 49-51.
[3] 吕长宝. 唐钢 1810mm 热带生产线宽度控制分析[J]. 轧钢, 2007, 24(6): 15-18.
[4] 李子文, 李斌. 八钢 1750mm 热连轧生产线的工艺设备[J]. 轧钢, 2007, 24(3): 37-39.
[5] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

收稿日期: 2008-01-09

作者简介: 梁勋国(1980-), 男(汉族), 广西平男人, 博士研究生。

本文针对国内某 1720mm UCM 冷连轧机板形控制存在的问题,在深入研究其板形控制系统的基础上,采用修正的影响函数法于给定中间辊横移量的条件下,计算了轧制不同规格带材时的最佳中间辊弯辊力和工作辊弯辊力。工业试验表明,使用理论计算的最佳弯辊力进行轧制,轧后带材的平均板形标准差明显减小,从而提高了轧后带材的板形控制效果。

2 最佳弯辊力理论计算模型

2.1 影响函数法计算模型

影响函数法是将轧辊离散成若干个单元,将轧辊所承受的载荷及轧辊弹性变形也按相同的单元离散化。应用影响函数的概念,先确定对各单元施加单位力时在辊身各点处引起的变形,然后将全部载荷作用时在各单元引起的变形叠加,得出各单元的变形值,从而可确定轧后的厚度分布、板凸度和前张应力的分布等参数^[2]。本文采用了文献[3]修正后的轧辊弯曲影响函数,同时为了避免计算过程中发生浮点数被零除的现象,采用文献[4]的方法完善了辊间压扁和轧件与轧辊间压扁影响函数计算模型。对 UCM 轧机进行弹性变形计算共用 11 个方程,其中 6 个为力—变形关系方程,2 个平衡方程和 3 个变形协调方程,具体的计算模型见文献[2]。

2.2 轧制力计算模型

采用现场板形控制系统中使用的轧制力计算模型,包括摩擦系数计算模型、变形抗力计算模型、轧辊压扁计算模型和轧制力计算模型。

(1) 摩擦系数计算模型

$$\mu = \mu_0 + \mu_1 / (\mu_2 + v) + (\mu_3 \times v) \times (\mu_4 / (\mu_5 + n)) \quad n < 20 \quad (1)$$

$$\mu = \mu_0 + \frac{\mu_1}{\mu_2 + v} + \mu_3 \times v \quad n \geq 20 \quad (2)$$

式中, μ 为摩擦系数; $\mu_0 \sim \mu_5$ 为系数; n 为工作辊轧制卷数; v 为带钢的轧制速度。

(2) 变形抗力计算模型

分为静态变形抗力和动态变形抗力的计算:

$$\xi_s = (1 - h_i / h_0) \quad (3)$$

$$\xi_{i+1} = 1 - h_{i+1} / h_0 \quad (4)$$

$$\xi = (1 - \delta) \times \xi_s + \delta \times \xi_{i+1} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \ln(1 / (1 - \xi)) \quad (6)$$

$$k_0 = l \times e^{n \times \ln(\varepsilon + m)} \quad (7)$$

$$\beta = 1 - h_{i+1} / h_i \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{20000}{600 \times (2.0 - \varepsilon)} \times \sqrt{\frac{\varepsilon}{R \times h_i}} \times v \quad (9)$$

$$\begin{cases} nk = 0 & k_0 < 15 \text{ 或 } k_0 > 85 \\ nk = \frac{nk_0}{(k_0 + nk_1) - nk_2} & 15 \leq k_0 \leq 85 \end{cases} \quad (10)$$

$$k = k_0 \times e^{nk \times \ln(1000.0 \times \lambda)} \quad (11)$$

式中, ξ_s 、 ξ_{i+1} 、 ξ 分别为入口、出口和平均总压下率; h_0 为来料厚度; h_i 、 h_{i+1} 为入口、出口厚度; δ 为总压下率系数; ε 为真应变; k_0 为静态变形抗力; l 、 n 、 m 为变形抗力系数; β 为道次压下率; R 为工作辊半径; nk 为动态变形抗力敏感系数; v 为轧制速度; nk_0 、 nk_1 、 nk_2 为常系数; k 为变形抗力。

(3) 工作辊压扁模型

采用 Hitchcock 公式计算工作辊压扁后的半径:

$$R' = R \times \left[1 + \frac{16 \times (1 - \nu^2) \times P}{\pi \times E \times B \times (h_i - h_{i+1})} \right] \quad (12)$$

式中, R' 为工作辊压扁半径; R 为工作辊半径; P 为轧制力; B 为带钢宽度; h_i 为带钢入口厚度; h_{i+1} 为带钢出口厚度; ν 为工作辊的泊松比; E 为工作辊的弹性模量。

(4) 轧制力计算模型

采用修正的 Hill 公式计算轧制力:

$$wk_1 = d_2 \times \mu \times r^{\frac{3}{2}} \times R \quad (13)$$

$$wk_2 = \frac{1}{k \times \xi} - wk_1 \times \frac{c_0}{h_i - h_{i+1}} \quad (14)$$

$$wk_3 = d_0 - d_1 \times r \quad (15)$$

$$wk_4 = \frac{wk_1}{wk_2} + R \times \frac{c_0}{2} \times \left(\frac{wk_3}{wk_2} \right)^2 \quad (16)$$

$$wk_5 = \left(\frac{wk_1}{wk_2} \right)^2 - R \times (h_i - h_{i+1}) \times \left(\frac{wk_3}{wk_2} \right)^2 \quad (17)$$

$$wk_6 = wk_4 \cdot wk_5 - wk_5 \quad (18)$$

$$P = B \times (wk_4 + \sqrt{wk_6}) \times z_p \quad (19)$$

式中, $wk_1 \sim wk_6$ 为临时变量; r 为压下率; μ 为摩擦系数; R 为工作辊半径; k 为变形抗力; c_0 为 Hitchcock 常数; h_i 为带钢入口厚度; h_{i+1} 为带钢出口厚度; $d_0 \sim d_2$ 为常系数; B 为带钢宽度; z_p 为轧制力自适应系数; P 为轧制力计算值; ξ 为张力影响系数。

工作辊压扁计算模型和轧制力的计算模型存在着耦合关系,计算时采用了登山法进行迭代求解。

2.3 前张应力计算模型

前张应力的分布代表了轧后带材的板形情况。前张应力的计算采用变分法求解, 具体计算模型见文献[5], 求解过程考虑了轧件的宽展量。为了简化计算, 使用 Б. И. 巴赫契诺夫公式直接计算带材的宽展量:

$$\Delta B = 1.15 \frac{\Delta h}{2H} \left(\sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{\mu} \right) \quad (20)$$

式中, H 为带材的入口厚度; Δh 为压下量; R 为工作辊半径; μ 为摩擦系数。

2.4 工作辊热凸度计算模型

采用修正的经验公式^[6] 计算工作辊的热凸度:

$$C_i = m D \alpha (T_c - T_e) / 2 \quad (21)$$

式中, m 为修正系数, 一般取 $m = 0.9$; D 为工作辊直径; α 为工作辊的热膨胀系数, 取 $\alpha = 0.000013$; T_c 、 T_e 分别为工作辊中心位置和边部位置的温度, 通过现场实测获得。

3 计算程序的开发

采用上述的计算模型, 开发了 UCM 冷轧机最佳弯辊力计算程序, 程序流程如图 1 所示。其中工作辊的热凸度计算已包含于轧辊弹性变形迭代计算模块中, 板形是否良好以轧后带材前张应力的分布是否良好作为判断条件。

4 理论计算

国内某 1720mm 冷连轧机组采用 4 机架全连续串联式结构, 1[#] ~ 4[#] 轧机均为 UCM 轧机, 具有支撑辊倾斜、中间辊横移、中间辊正弯辊和工作辊正负弯辊功能, 有很强的板形控制能力。其轧辊的主要参数见表 1。

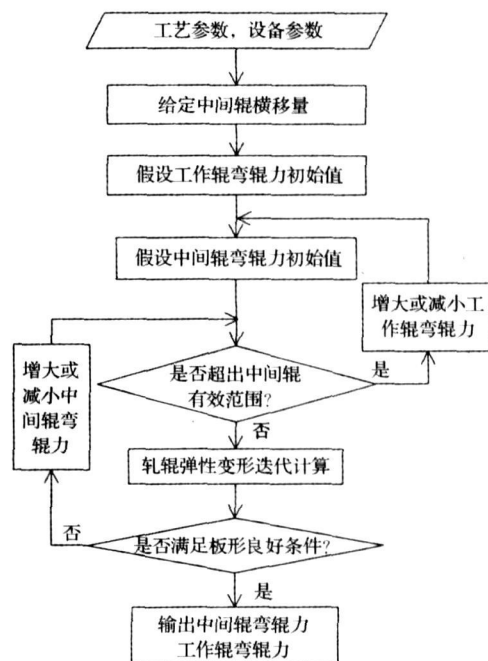


图 1 UCM 冷轧机最佳弯辊力计算程序流程图

表 1 轧辊参数

参 数	工作辊	中间辊	支撑辊
直径/mm	Φ425/Φ385	Φ490/Φ440	Φ1300/Φ1150
长度/mm	1720 0	1757.5	1720 0
液压缸			
中心距/mm	2850	3050	2850

该连轧机组板形控制系统中对弯辊力的设定采用查层别表的方式给出, 按照不同的热轧原料屈服强度、原料宽度和原料厚度给出不同的弯辊力设定值。研究发现 1[#] ~ 3[#] 机架的弯辊力设定值是一致的, 这与实际轧制状况不符, 需对弯辊力的设定值进行修正和优化。在不改动该板形控制

表 2 最佳弯辊力计算值

厚度 /mm	工作辊弯辊力/kN				中间辊弯辊力/kN			
	1 [#] 机架	2 [#] 机架	3 [#] 机架	4 [#] 机架	1 [#] 机架	2 [#] 机架	3 [#] 机架	4 [#] 机架
< 0.30	215.6	219.5	214.6	166.6	238.1	235.2	244.0	210.7
< 0.35	221.5	227.4	221.5	174.4	246.0	242.1	241.1	183.3
< 0.40	254.8	272.4	245.0	166.6	303.8	313.6	286.2	184.2
< 0.50	294.0	245.0	245.0	186.2	343.0	294.0	264.6	183.3
< 0.60	243.0	247.9	243.0	191.1	263.6	258.7	261.7	183.3
< 0.80	245.0	259.7	254.8	187.2	343.0	294.0	254.8	181.3
< 1.00	263.6	266.6	262.6	150.9	282.2	280.3	279.3	183.3
< 1.20	271.5	275.4	270.5	158.8	286.2	286.2	289.1	183.3
< 1.50	280.3	285.2	280.3	145.0	287.1	296.0	296.9	183.3
< 1.80	267.5	271.5	262.6	155.8	298.9	306.7	284.2	183.3
< 2.10	261.7	267.5	269.5	149.9	285.2	310.7	326.3	183.3

系统的基础上,采用编写的最佳弯辊力计算程序计算了轧制不同规格带材时的最佳弯辊力。表2为热轧原料屈服强度为330~360MPa、宽度为1000~1200mm、中间辊横移量(δ 值)给定为50mm时,不同厚度规格的最佳弯辊力理论计算值。

5 应用效果分析

为了验证理论计算的最佳弯辊力板形控制效果,进行了工业试验。由于实际生产对板形的控制是在设定目标板形下进行的,因此采用 Bessel 标准差来衡量板形的控制效果。

$$\zeta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta \sigma_i)^2}{N-1}} \quad (22)$$

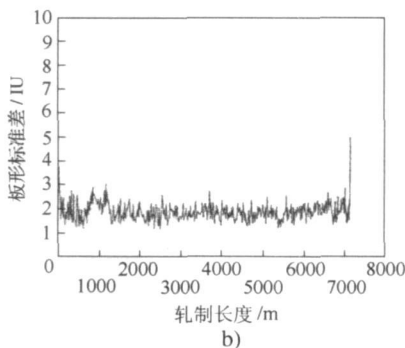
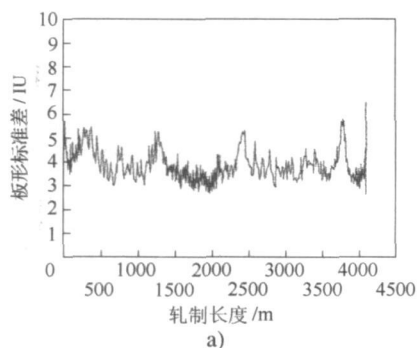


图2 轧制 SPHD 带卷弯辊力优化前后的板形标准差分布比较

(带宽 1000mm, 带钢厚度从 2.60mm 轧至 0.67mm)

a) 优化前; b) 优化后

采用理论计算的最佳弯辊力进行轧制可获得更平稳的板形标准差分布和更小的板形标准差,其中

平均板形标准差由原 2.7406IU 减至 1.9027IU。

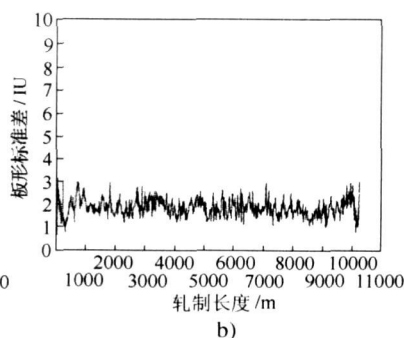
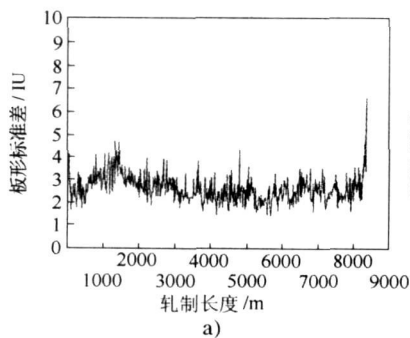


图3 轧制 SPHC 带卷弯辊力优化前后的板形标准差分布比较

(带宽 1000mm, 带钢厚度从 1.90mm 轧至 0.47mm)

a) 优化前; b) 优化后

为了进一步验证最佳弯辊力的板形控制效果,计算了成品厚度小于 1.0mm 的带材使用优

化前后弯辊力轧制时的板形标准差值,取稳定轧制阶段的板形标准差值(200个值)进行加权平

均,图 4 给出了经过加权平均处理后的板形标准差分布。

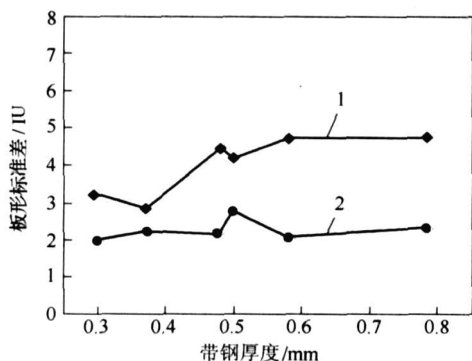


图 4 弯辊力优化前后的平均板形标准差分布

1- 优化前; 2- 优化后

从图 4 可看出,采用理论计算的最佳弯辊力进行轧制时,平均板形标准差为 2.0~2.5IU,比采用原设定弯辊力轧制时的平均板形标准差减少了 22%~56%,并且分布平稳。这说明采用优化后的弯辊力进行轧制可获得更稳定更良好的板形控制效果。

6 结论

(1) 采用修正的弯曲影响函数和压扁影响函数计算模型,使用变分法迭代求解了轧后带材的

前张应力分布,考虑工作辊的热凸度,开发了 UCM 冷轧机最佳弯辊力计算程序。

(2) 计算不同厚度规格带材轧制时的最佳弯辊力,经工业试验表明,成品厚度小于 1.0mm 的带材采用理论计算的最佳弯辊力进行轧制可获得更稳定和良的板形控制效果,轧后带材的平均板形标准差减小了 22%~56%。

(3) 采用优化后的弯辊力进行轧制,轧后带材因板形质量而引起的质量异议率从每月的 0.59% 降至每月 0.30% 以下,取得了良好的经济效益。

参考文献:

- [1] 张清东,陈先霖,何安瑞,等. 宽带钢冷轧机板形自动控制系统模型[J]. 轧钢,1998,(5): 11-15
- [2] 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京:冶金工业出版社,1986 351-361.
- [3] 白金兰. 单机架可逆冷轧机板形控制预设定理论研究[D]. 沈阳:东北大学,2006 37-39.
- [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] 刘宏民. 三维轧制理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1999 4-11.
- [6] 连家创,刘宏民. 板厚板形控制[M]. 北京:兵器工业出版社,1996 44-45.

济钢三炼钢热轧/冷轧生产线 MES 系统投入运行

近日,济南钢铁集团公司自主开发的三炼钢热轧/冷轧生产线 MES 系统(制造执行系统)全面上线运行。这一系统的投用,实现了热轧薄板和冷轧薄板生产线的数字化、自动化生产管理目标,使济钢集团生产信息化管理达到行业领先水平。

热轧薄板和冷轧薄板生产线是济钢 2006 年投产的新项目,装备水平和技术含量较高。济钢自 2007 年 3 月开始,自主开发出三炼钢热轧生产线 MES 系统。自动化部通过建立系统算法模型,完成了炼钢、轧钢工序计划的快速自动编制;以订单为中心,面向市场客户,根据客户的具体要求进行专门的物料设计;通过计划的执行跟踪、监控,协调优化全线作业效

率,提高全线管理水平。生产管制系统将炼钢、热轧的生产现场数据、信息汇总共同管理,构筑整个生产线生产指示体系,协调生产节奏,保证了炼钢、热轧之间的有机结合。生产计划、质量控制、库存管理、信息集成等模块于今年 6 月底全部上线运行,并实现了全线贯通。

冷轧生产线 MES 系统项目组主要解决了拼卷轧制的计划问题,优化了排产模块,项目组还在西马克设计的基础上,补充了作业跟踪与计划相结合的功能;扩展了库管理的功能,使生产线上的钢卷也在库管理的范围内,不丢钢卷信息。针对冷轧厂提出的二次轧制新需求,项目组完成了轧辊管理、按辊期制订轧机计划的开

发。通过一系列的完善与优化,MES 系统能进行物流及库位的优化管理,实现运输组车、出库、转彩板库、库存分析、统计报表等功能。

截至目前,济钢自动化部已先后成功实施了三炼钢中厚板、热轧、冷轧 3 条生产线的 MES 系统。MES 的成功实施,给计划、生产、物料、物流提供了高效的管理,优化和加速了销售和制造等业务过程,提高了产品质量和客户服务水平,降低了运营成本。MES 和 ERP 系统一起,实现了从客户订单到成品入库、发货到客户的全流程数字化管理控制。

本刊讯

中国魔环
 浙江沪环机械有限公司
 TEL:0576-7552101 Fax:0576-7552616