

无取向硅钢热轧工作辊磨损预报模型

曹建国¹⁾ 张杰¹⁾ 甘健斌¹⁾ 苏毅²⁾ 唐本立²⁾ 鄢檀力²⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083

摘要 根据 1700 mm 热连轧机采集的现场数据分析了硅钢轧制工作辊磨损的规律和其磨损轮廓曲线. 采用中部磨损和边部磨损分别建立磨损计算函数的方式, 建立了无取向硅钢轧制的工作辊磨损预报模型. 采用遗传算法优化计算了模型参数. 现场实测数据验证表明, 模型预报精度可靠实用, 可用于指导生产实践.

关键词 热连轧机; 硅钢; 轧辊; 磨损; 数学模型; 遗传算法

分类号 TG333.71

宽带钢热连轧机是冷轧无取向硅钢板形控制的关键工序. 无取向硅钢板形质量要求日趋严苛, 而轧辊磨损作为当前热轧带钢生产中难以定量控制的因素, 不仅直接影响着带钢的板形质量、弯辊力的合理施加和轧机板形板厚控制数学模型的完善^[1], 而且热轧轧辊磨损造成的辊形变化易导致轧辊剥落, 成为轧辊早期报废的主要原因^[2-3]. 低牌号无取向硅钢是目前国内产量最大、用途广泛的优秀软磁功能材料, 因此有必要研究无取向硅钢轧制工作辊磨损预报模型, 以利于提高无取向硅钢板形板厚自动控制水平和产品质量.

1 硅钢轧制工作辊磨损型式和机理

1.1 磨损型式

目前国内主要有武钢、宝钢、太钢和鞍钢等可大规模生产冷轧无取向硅钢. 世界上硅钢生产技术专利多集中在日本钢铁企业中, 各大生产企业对这些专利技术都采取了相对严格的保密措施, 因此关于硅钢轧制过程工艺可供参考的资料并不多. 而且, 不同生产厂家有不同的实际工艺流程、设备和技术, 所采用的工艺过程数学模型也各不相同, 少有公开发布研究成果, 因此没有完整的硅钢工作辊磨损模型可供参考. 为了研究低牌号无取向硅钢轧制的工作辊磨损模型, 采用系统跟踪测试方法在 1700 mm 热连轧机进行了综合辊形

及配套辊温测量, 工作辊的磨损辊形可以通过下机后的辊形减去上机前的辊形求得. 但由于测量工作辊辊形时, 辊身方向存在较大的温度差. 因此, 在利用实测的辊形数据来估计磨损模型参数时, 必须减去由于温差而带来的热辊形^[4]. 图 1 为 1700 mm 热连轧机无取向硅钢轧制工作辊磨损辊形.

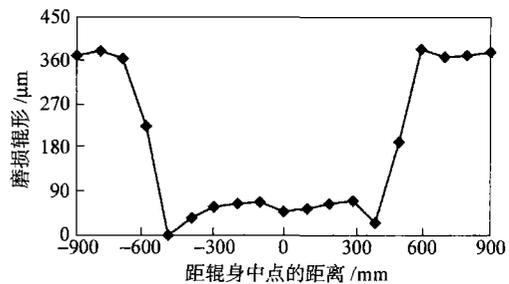


图 1 1700 热连轧机无取向硅钢轧制工作辊磨损辊形(F6)

Fig.1 Work roll wear contour of non-oriented electrical steel sheets in a 1700 mm hot strip mill (F6)

通过对 167 支常规单位工作辊^[4]和 37 支硅钢单位工作辊上机前和下机后工作辊的测量辊形进行比较分析表明:(1)硅钢轧制时, 热连轧机 F1~F3 机架的磨损辊形没有出现较明显的“猫耳朵”磨损形状, 而 F4~F7 机架的磨损辊形在带钢边部附近(即约 -500 mm 和 500 mm 辊面上)出现了非常明显的“猫耳朵”磨损形状. (2)F1~F3 机架的工作辊磨损量较小, F4~F7 机架的磨损量较大, 特别是 F4 机架的磨损量最大. (3)和普通钢相比, 无取向硅钢轧制工作辊磨损量较大, 甚至达到 2~3 倍以上.

1.2 磨损机理

从金属的磨损机理来看, 磨损主要可分为磨

收稿日期: 2005-01-18 修回日期: 2005-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 59835170)及北京科技大学科技发展专项基金资助课题(No. 20040311890)

作者简介: 曹建国(1971—), 男, 副教授, 博士

粒磨损、疲劳磨损(接触疲劳、热疲劳等)、粘着磨损和腐蚀磨损四类^[5-9]。在热轧轧辊磨损中,以上四类磨损均会发生,只是主次、程度的差别。几类磨损在轧辊的磨损过程中均存在,共同或交替为轧辊的磨损做出贡献。一方面,由于在初始的轧制道次中轧件的温度高,自然在上游机架中,轧辊的热疲劳磨损大;另一方面,轧制速度和轧制材料的硬度随轧制道次增加,下游机架的轧辊会经受更大的机械疲劳磨损和磨粒磨损。

通常认为轧辊磨损的两种形式为总体磨损和局部磨损。工作辊总体磨损是指沿与轧件相接触的整个辊身长度方向的轧辊磨损。引起这种磨损的因素包括热力学和机械疲劳共同作用引起的研磨及影响较小的腐蚀磨损。工作辊的总体磨损主要受轧制不同宽度带钢时的总吨位的影响。当沿辊身的磨损长度远小于带钢的宽度时,用局部磨损来描述这类磨损。在热轧带钢轧机上,有以下两类经典的工作辊局部磨损。

(1) 带钢边部附近的轧辊局部磨损。在带材边部附近工作辊的变形量(压扁)迅速下降,这会在辊身的过渡带产生局部的张应力,而在辊身的过渡带同时又有剪切应力的作用,使得与轧辊其余部分的磨损相比,在带材边部的磨损更大。

(2) 带钢边部之间的轧辊局部磨损。此类磨损因带钢上下表面在高压水除鳞时的不均匀冷却引起,在高压水除鳞后带钢表面有明显的条带状。在不同的条带中,晶粒尺寸有着明显的差别。细晶粒要硬得多,因而细晶粒带比粗晶粒带更磨损轧辊。结合图1所示大量生产实测数据可以发现第一类局部磨损更显著,并明显影响硅钢凸度和边降等板形质量。

2 工作辊磨损预报模型

2.1 模型的建立

轧辊磨损机理复杂,迄今为止还没有一个从理论上推导的磨损模型可准确预报轧辊磨损,只能通过大量的实测与分析,建立半经验半理论的预报模型。目前多认为磨损主要受轧制力、轧制长度、轧辊材质、磨损距离(接触弧长)等主要因素影响,通常采用统计回归模型^[5-9]。结合文献资料并在大量分析热轧精轧机组工作辊磨损特性的基础上,可以认为沿工作辊磨损曲线,主要围绕着轧制力、轧制长度、磨损距离(接触弧长)三个主要影响因数。综合考虑各种影响因素,建立工作辊磨损模型具体形式为:

$$\Delta W(i) = \alpha \left(\frac{P(i)}{Bl_d H_R} \right)^\alpha \left(\frac{H_{in} - H_{out}}{H_{out}} l_d \right)^\beta \frac{L}{\pi D (1+f)} \quad (1)$$

式中, $\Delta W(i)$ 为工作辊磨损增量, μm ; i 为沿辊身长度方向的切片位置数; α 为与轧辊材质等相关的回归影响系数; $P(i)$ 为轧制力,N; B 为带钢宽度,mm; l_d 为接触弧长,mm; H_R 为工作辊硬度(肖氏硬度); α 为负荷影响指数; H_{in} 和 H_{out} 为轧制带钢入口和出口厚度,mm; β 为接触弧长影响指数; L 为带钢轧制长度,mm; D 为轧辊直径,mm; f 为前滑值。

通过分析测量的热轧工作辊磨损辊形可看出,工作辊在带钢宽度范围内磨损不均匀,分析时可将其分为带钢中部工作辊的总体磨损和带钢边部工作辊的局部磨损两部分分别考虑。对各机架而言,带钢边部与带钢中部工作辊磨损的差值是不同的。对于具有七个机架的热连轧机来讲,F4机架的差值最大,越往前部机架或是越往后部机架,这个差值越小。式(1)中轧制力 $P(i)$ 就是考虑沿带钢宽度上由于轧制力的不均匀分布引起的局部不均匀磨损而引入的参数,结合工作辊磨损的轮廓曲线特点,把磨损轮廓曲线分为三段:第一段用来表示工作辊的中部磨损,即以工作辊中点向两端,磨损量变化相对较小的一段;第二段是工作辊对应带钢宽度边部位置所产生的边部磨损;第三段是考虑到窜辊的因素所进行的边部磨损的补充。具体计算如下:

$$P(i) = \begin{cases} P & 0 \leq X_w(i) \leq (B/2 - d_w) \\ \left[1 + (k_w - 1) \left(1 + \frac{X_w(i) - B/2}{d_w} \right) \right] P & (B/2 - d_w) < X_w(i) \leq B/2 \\ \frac{1800}{[X_w(i) - B/2]^2} P & B/2 < X_w(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X_w(i)$ 为磨损计算位置坐标, $X_w(i) = \Delta X(i-1)$; d_w 为边部负荷宽度,mm; k_w 为边部负荷倍率; ΔX 为计算分割宽度,mm。

2.2 模型参数分析与计算

参数计算的准确性直接决定预报模型计算出来的磨损辊形的准确程度。有的参数不一定根据公式推导得出,可根据生产的实际,由经验给出参数值。前述模型计算中有三类参数:第一类是已知参数,这些参数可以从工程记录表中直接获取,如 D , B , H_R , H_{in} 和 H_{out} ;第二类参数也是已知参数,但需通过其他工程记录表中已知的数据,根据

一定的公式进行计算,如 f, l_d, L, d_w 和 k_w ; 第三类是待定参数,即需要优化确定的参数,如 a, α 和 β .

第二类参数的 f, l_d 和 L 可方便利用有关公式计算求得. 由图 1 知,硅钢边部效应在磨损变化中表现得非常明显,可看出边部磨损取决于边部载荷宽度 d_w 和边部载荷倍率 k_w 两个参数. 为进行边部磨损调整,需对测量得到工作辊磨损辊形进行选择,解析符合条件的数据. 选择的原则为选择最小宽度时的段差磨损量较大、且边部磨损形态明显的数据. 分析需测量的数据如图 2 所示. 图中 W_B 为定常部分磨损量, W_{E1} 和 W_{E2} 分别为工作侧(WS)和驱动侧(DS)的边部磨损量, d_1 和 d_2 分别为 WS 和 DS 的边部宽度.

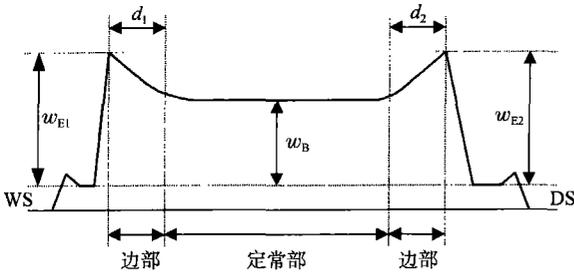


图 2 热轧工作辊磨损分段示意图

Fig. 2 Segment wear contour of a work roll in hot rolling

在工作辊材质和机架相同的条件下,对获得的多组数据进行处理,按下式解析可求得适当的 d_w 和 k_w 的值:

$$k_w = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \frac{W_{E1} + W_{E2}}{2}}{\sum_{i=1}^N W_B} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$d_w = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (d_1 + d_2) \quad (3)$$

式中, N 为相同轧制条件的工作辊辊形数据对数目. 经过对多组磨损辊形进行选择和分析后,根据上式可求得 $d_w = 223, k_w = 1.082$.

3 模型参数优化与验证

预报模型待优化的为第三类参数,即 a, α 和 β . 遗传算法^[10-11]以其鲁棒性强、适用于并行处理及高效实用等显著特点,在各个领域得到了广泛应用,取得了良好的效果. 因此利用 MATLAB 语言采用遗传算法对模型参数进行优化. 本问题采用的适应度函数的算法思想是,通过计算出来的磨损量和实测磨损量的比较,取其两者之间的差值,差值的绝对值越小,说明计算值越接近最优

值. 其中,目标函数 $f(x)$ 为磨损量计算值和实测值的差值. 这即为求目标函数的最小值问题,变换方法如下:

$$F(x) = \begin{cases} C_{\max} - f(x) & f(x) < C_{\max} \\ 0 & f(x) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, C_{\max} 为预先指定的一个适当的相对比较大的数,取 1000.

通过试算可确定 a, α 和 β 的初始取值范围,本文取 $a \in [2200, 2700], \alpha \in [1.1, 1.7], \beta \in [1.0, 1.4]$. 采用遗传算法对模型参数进行优化,可求得参数如下: $a = 2615.20, \alpha = 1.4103, \beta = 1.2052$. 利用现场数据将以上参数代入式(1)和(2)可求得低牌号无取向硅钢磨损辊形的预报值. 为了验证优化后参数的准确性,采用新的现场实测数据和工艺参数代入磨损模型中,模型预报的磨损量和对应的实测磨损量比较见图 3. 可知该模型具有较高精度,可较好地反映工作辊磨损的状况,可用于指导生产实践.

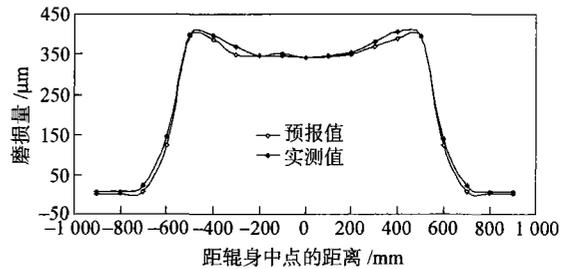


图 3 硅钢热轧工作辊磨损预报值和实测值比较(F4)

Fig. 3 Comparison of the predicted and measured wear contours of a work roll in hot rolling (F4)

4 结论

低牌号无取向硅钢热轧工作辊磨损辊形变化显著且存在明显的不均匀磨损. 考虑低牌号无取向硅钢轧制的温度高和等宽轧制的轧制单位特点,采用中部磨损和边部磨损分别建立磨损计算函数的方式,建立了完整的硅钢轧制工作辊磨损模型. 根据磨损模型结构,分类确定了磨损模型三类参数的计算与优化方法. 利用遗传算法可方便完成磨损模型中的第三类待定参数的优化取值,最终确定了完善工作辊磨损模型. 本模型磨损预报值与实测磨损量吻合较好,可用于指导实际生产.

参考文献

- [1] 曹建国,陈先霖,张清东,等. 宽带钢热轧机轧辊磨损与辊形评价. 北京科技大学学报,1999,21(2):188

- [2] 曹建国, 陈先霖, 何安瑞. 宽带钢热轧机轧辊剥落及其解决方案. *冶金设备*, 1998(4):5
- [3] Colás R, Ramírez J, Sandoval I, et al. Damage in hot rolling work rolls. *Wear*, 1999, 230:56
- [4] Cao J G, Zhang J, Chen X L, et al. Control of roll contour for strip profile and flatness in hot rolling // 44th Mechanical Working and Steel Processing Conference Proceedings. Orlando, 2002: 1001
- [5] 何安瑞, 张清东, 曹建国. 热轧精轧机组工作辊磨损分析及预报. *冶金设备*, 1999(3):23
- [6] 夏兆所, 辛建卿, 姜世勇. 精轧机组工作辊磨损的预报模型. *特殊钢*, 2000, 21(1):44
- [7] 陈连生, 连家创. 热带钢轧机轧辊磨损研究. *钢铁*, 2001, 36(1):66
- [8] 朱洪涛, 王哲, 刘相华, 等. 轧辊磨损模型研究. *钢铁研究*, 1999, 27(3):38
- [9] Tahir M, Widell B. Roll wear evaluation of HSS, HiCr and IC work rolls in hot strip mill. *Steel Res*, 2003, 74(10): 624
- [10] Wang Q J. Using genetic algorithms to optimize model parameters. *Environ Modelling Software*, 1997, 12(1):27
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

Work roll wear prediction model of non-oriented electrical steel sheets in hot strip mills

CAO Jianguo¹⁾, ZHANG Jie¹⁾, GAN Jianbin¹⁾, SU Yi²⁾, TANG Benli²⁾, YAN Tanli²⁾

1) Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Wuhan Iron and Steel Company, Wuhan 430083, China

ABSTRACT Work roll wear contours and wear profiles were analyzed on the basis of large amount of measured work roll contour patterns and processing parameters. The method of building wear calculation functions for center portion abrasion and marginal abrasion respectively was used to develop a work roll wear prediction mathematical model for the 1700 mm hot strip mill of Wuhan Iron and Steel (Group) Co. by using genetic algorithm. The calculated results of the prediction model are in good agreement with the measured ones and can be applied to guide production in practice.

KEY WORDS hot rolling mills; silicon steel; rolls; wear; mathematical models; genetic algorithms