

热带钢轧机平坦度控制补偿策略

孙克文¹⁾ 何安瑞¹⁾ 杨荃¹⁾ 张清东²⁾ 赵林³⁾ 郭晓波³⁾

1)北京科技大学高效轧制国家工程研究中心,北京 100083 2)北京科技大学机械工程学院,北京 100083
3)鞍山钢铁集团公司,鞍山 114021

摘要 在带钢热连轧平坦度控制系统中,平坦度实测信号通常包含精轧后带钢横向温差引起的附加干扰.针对鞍山 ASP1700 热连轧机组,利用红外热像仪测量精轧后带钢横向温度场.通过具体分析温差附加干扰对带钢平坦度控制的影响,采用最小二乘法拟合得到带钢横向温度场分布规律,建立了平坦度控制目标设定的温差补偿模型.

关键词 热带轧机; 温度场; 平坦度; 最小二乘法

分类号 TG 333.7¹; TP 271

平坦度精度是热轧带钢生产一项主要的的质量指标和决定其市场竞争力的主要因素.在平坦度闭环反馈控制系统中,通过目标平坦度与平坦度实测信号的偏差确定执行机构的调节动作方向和调节量.可见,热轧带钢平坦度控制的效果在很大程度上依赖于平坦度信号的检测精度.

然而,热轧带钢从精轧末机架F6出口处经过层流冷却进入卷取机的过程中,由于其横向散热条件的不同,导致横向温度分布不均匀和内部的热延伸不同,从而产生对带钢平坦度测量的附加干扰信号^[1,2].这种附加干扰信号在带钢离线后会自动消除,并不表征当前带钢的真实平坦度状况.因此,精确测量带钢横向温度分布形式及大小,确定恰当的温度补偿量及补偿形式,消除温度分布不均所带来的影响,在热连轧平坦度闭环控制过程中显得尤为重要.

1 平坦度闭环控制系统

热连轧带钢平坦度闭环控制系统包括目标平坦度的设定、平坦度的测量、平坦度缺陷的模式识别以及平坦度控制执行机构的调整,如图1所示.

在平坦度闭环控制系统中,一项很重要的工作是制定目标平坦度曲线,所谓目标平坦度曲线即平坦度控制系统调节带钢平坦度所要达到的

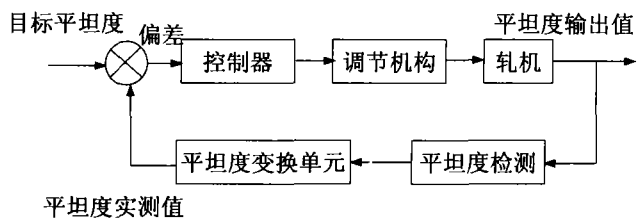


图1 带钢平坦度闭环控制示意图

Fig.1 Sketch map of the closed loop control system of strip flatness

目标. 目标平坦度曲线是平坦度在线控制的标准,通过目标平坦度曲线与实测平坦度的偏差确定平坦度控制各执行机构的控制量.目标平坦度曲线在理论上应是一条直线,但实际控制时,由于带钢精轧后横向散热条件不同,其横向温度分布不均匀,导致沿横向出现不均匀的热延伸^[3,4].如果不能对此进行修正,尽管平坦度控制系统将平坦度偏差调整到零,仍然不能获得良好平坦度的带钢.因此,目标平坦度设定应考虑对带钢精轧后横向温度分布不均的温度补偿.

平坦度仪通常安装在精轧机组出口处,对带钢平坦度进行测量.平坦度信号的模式识别是整个平坦度控制系统中最关键的一环,必须建立一个能准确反映当前所轧制带钢平坦度状况的平坦度缺陷识别模型^[6,7].平坦度控制系统通过工作辊的倾斜,构成楔形辊缝,从而控制非对称的平坦度缺陷;通过调整弯辊力改变辊缝的凸度,实现对称平坦度缺陷的控制^[6].

2 层流冷却

鞍钢 ASP1700 热带轧钢厂层流冷却系统由上下冷却系统及侧喷嘴系统三部分组成. 上部和下部冷却系统各分成 60 个冷却控制段, 每段由一个阀进行冷却水的开关控制. 上部每 2 根集管为一段, 共 120 根集管, 每根集管设有多个鹅颈喷水管. 下部每 4 根集管为一段, 共 240 根集管, 每根集管上有 11 或 12 个喷嘴. 侧喷系统分布在输出辊道两侧, 交叉布置, 共有 9 个侧喷嘴.

层流冷却系统通常由上部层流、下部喷射、侧喷和侧吹几部分构成. 上部层流为大流量的低压水, 下部喷射为高压水, 侧喷为中压水. 侧喷的主要作用是把带钢表面的冷却水吹走, 形成层流, 以提高冷却效果, 侧吹的作用是吹掉带钢表面的氧化铁皮和积水, 以便于准确地测量带钢厚度和温度^[9].

在层流冷却区入口, 使用终轧温度计来测量带钢进入层流冷却区的温度; 在层流冷却后, 使用卷取温度计来检测层流冷却系统的冷却效果; 在层流冷却区中后部还设置了一个中间温度计, 用来检测带钢的中间冷却效果. 三个温度计检测的实际带钢温度由仪表微机经计算机通信传给上级计算机.

3 测量原理

带钢横向温度分布规律直接影响着平坦度控制目标的设定精度. 为了掌握鞍钢 ASP 精轧后带钢的横向温度分布规律及层流冷却对带钢横向温度分布的影响, 以便分析轧后冷却对带钢平坦度的影响, 为 ASP 平坦度控制补偿策略的提出积累数据, 在精轧机的出口和卷取机的入口处分别利用两台 THV550 手持式红外热像仪对多种轧制规格的带钢表面的温度进行了跟踪测量, 测试图片如图 2 所示.

由近似计算, 带钢横向两点间存在 1℃ 的温度差可导致 1.05×10^{-5} 延伸差, 相当于 1 IU 板形平坦度差, 由此产生 2.205 MPa 的应力差. 通过对不同规格的带钢横向温度的跟踪测量所获得的数据进行分析可知, 从精轧末机架经由层流冷却到卷取机入口的过程中, 由中部到边部的温度差最高可达 60~80℃. 因此, 带钢在精轧后温度阶梯效应很大, 一定要对精轧出口板形平坦度控制目标进行温度补偿, 以使带钢获得良好的平坦度.

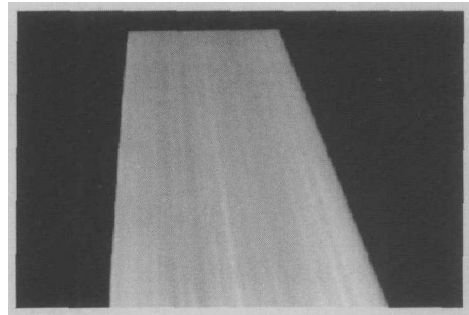


图 2 热轧带钢测试图片

Fig.2 Measured picture of hot strip

4 平坦度控制目标设定的温差补偿模型

在平坦度闭环反馈控制系统中, 通过设定的控制目标与平坦度实测信号的偏差确定执行机构的调节动作方向和调节量, 使得平坦度评价函数 J 达到最小, 从而完成平坦度控制过程^[2]. 其中, 评价函数 J 为:

$$\begin{cases} J = f(\Delta\rho) \\ \Delta\rho = \rho_t - \rho_m \end{cases} \quad (1)$$

式中, ρ_t 为设定的平坦度值, ρ_m 为平坦度仪实测的平坦度值.

对于热轧带钢, 离开精轧末机架 F6 后, 由于横向散热条件不同, 其横向温度分布不均匀, 通常中间温度高, 两边温度低. 由于不同的温度将引起不同的热膨胀, 即不同的热伸长. 所以轧后带钢横向各点的纵向延伸必然不同, 从而产生附加温差平坦度信号 ρ_r . 这些附加信号的存在使得平坦度的实际测量值由 ρ_m 转化为 ρ_m^* . 这里,

$$\rho_m^* = \rho_m + \rho_r \quad (2)$$

因为横向温差的存在 (中间高, 两边低), 对已经平直的带钢而言, 其平坦度检测信号将表征为中间松弛, 两边拉紧的板形缺陷; 相反, 对平坦度检测信号表征为平直的热轧带钢, 当其冷却至室温时, 其真实平坦度将呈现为中间拉紧, 两边松弛的板形缺陷. 为避免带钢平坦度测控过程中上述假象的存在, 对带钢横向温差所致的附加平坦度干扰信号必须在平坦度闭环控制过程中予以补偿.

一般而言, 在平坦度测量系统中进行补偿比较困难, 能够实施的补偿形状较为单一, 且不易调整, 而通过控制目标设定模型进行补偿可与附加温差平坦度干扰信号相吻合, 且调整灵活, 所以对附加温差平坦度干扰信号的补偿度放在平

平坦度控制目标中进行,即在原设定的目标平坦度 ρ_0 的基础上加上对附加温差平坦度 ρ_1 的补偿量 ρ_1^* , 将式(2)代入式(1), 此时:

$$\Delta\rho = (\rho_0 - \rho_m) + (\rho_1^* - \rho_1) \quad (3)$$

当补偿量设定准确时, 上式最后一项为零, 平坦度评价函数 J 才能反映真正的平坦度偏差值, 从而进行有效的平坦度闭环控制.

设 $f_i(x)$ 为带钢横向温度差分布, 则:

$$\rho_1 = \alpha \cdot f_i(x) \quad (4)$$

式中, α 为线膨胀系数. 其中, 温差分布规律 $f_i(x)$ 由带钢速度和冷却条件决定, 呈近似抛物线分布, 即

$$f_i(x) = \lambda_0 + \lambda_1 x + \lambda_2 x^2 + \lambda_3 x^3 + \lambda_4 x^4 \quad (5)$$

式中, $x \in [-1, 1]$ 为沿带钢宽度方向各测量点距中心的归一化坐标, $\lambda_0 \sim \lambda_4$ 为横向温度分布函数系数, 可通过实测数据回归得到. 由最小二乘法可求得关于回归系数的方程组, 其矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} m+1 & \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 \\ \sum_{i=0}^m x_i & \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 & \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 & \sum_{i=0}^m x_i^6 \\ \sum_{i=0}^m x_i^3 & \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 & \sum_{i=0}^m x_i^6 & \sum_{i=0}^m x_i^7 \\ \sum_{i=0}^m x_i^4 & \sum_{i=0}^m x_i^5 & \sum_{i=0}^m x_i^6 & \sum_{i=0}^m x_i^7 & \sum_{i=0}^m x_i^8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m f_i(x_i) \\ \sum_{i=0}^m x_i f_i(x_i) \\ \sum_{i=0}^m x_i^2 f_i(x_i) \\ \sum_{i=0}^m x_i^3 f_i(x_i) \\ \sum_{i=0}^m x_i^4 f_i(x_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, x_i 为测量点的横向坐标, $f_i(x_i)$ 为对应测量点的温度值, $m+1$ 为总的测量点数. 方程组(6)可采用高斯消元法求解.

为了消除温度场实测数据的偶然误差, 在采用最小二乘法对精轧后带钢横向温度分布进行拟合的过程中, 利用同一轧制规格的多块带钢的温度数据样本进行回归计算. 将带钢横向温度分布实测结果与温度拟合计算结果绘于同一图中进行对比分析, 如图3所示. 结果表明, 采用最小二乘法的计算温度值与实测温度值基本吻合, 能够反映带钢横向温度变化的趋势, 较好地揭示了带钢横向温度分布规律, 为平坦度控制目标设定的温度补偿奠定了理论基础. 为了验证所提出的平坦度补偿策略的正确性, 笔者对不同规格的位于精轧机组末机架出口处和相对应的经过层流冷却区后到达卷取入口处的带钢平坦度进行了比较. 结果表明, 精轧机组末机架出口处平坦度很好的带钢经过层流冷却后产生了边浪; 而采取微中浪轧制的带钢经过层流冷却后到达卷取入

口处其平坦度却比较好. 这表明, 带钢经过层流冷却区时的横向温差对其平坦度有明显影响, 因此, 在平坦度闭环控制系统中对带钢平坦度控制目标进行补偿显得尤为重要.

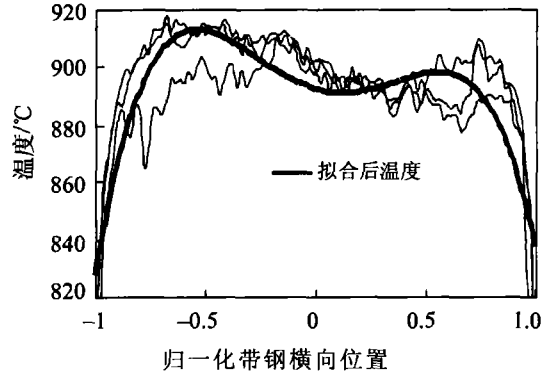


图3 带钢横向拟合温度分布与实测温度分布比较
Fig.3 Comparison between the lateral temperature distributions of hot strip by fitting and measurement

5 结束语

用最小二乘法对带钢精轧后横向温度进行拟合, 处理方法简单, 真实反映了带钢横向温度分布规律. 将温度补偿用于平坦度控制目标的设定中, 采用与温度影响趋势方向相反且幅值相等的平坦度目标曲线参与平坦度闭环控制可以抵消带钢横向温差对平坦度的附加影响, 提高了平坦度控制的精度, 使带钢平坦度指标达到了较高水平.

参考文献

- 1 卿伟杰. 武钢 1700 冷连轧机组板形控制目标的设定[D]. 北京:北京科技大学, 2000
- 2 卿伟杰, 杨荃. 冷连轧机带钢在线温度场的测量及其对板形的影响[J]. 冶金设备, 2000, 6(3): 10
- 3 王文明, 梁涛. 铝带坯铸轧板形测控的补偿模型[J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 17(2): 35
- 4 欧阳金明. 板形自动检测及闭环控制技术的应用[J]. 轧钢, 1999, 6(3): 57
- 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
- 6 Fabian W, Wladika H, Tappe W, et al. On-line flatness measurement and control of hot wide strip [J]. Metall Plant Technol, 1985, 8(4): 68
- 7 Shohet K N, Towensend N A. Flatness control in plate rolling [J]. J Iron Steel Inst, 1971, 10:770

