

2250 mm 宽带热连轧层流冷却模型的参数优化

周正军¹ 张 扬¹ 张云祥²

(1 武汉钢铁(集团)公司热轧厂, 武汉 430083; 2 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘 要 武钢 2250 mm 热连轧机组在生产 X60 管线钢等新钢种时, 原有的层流冷却系统不能适应冷却要求, 影响了卷取温度的控制, 导致产品组织和性能不稳定。通过层流冷却系统控制模型的优化和冷却系统相关参数的调整, 使卷取温度控制命中率由原来的 60% 提高到 89.3%, 保证了产品目标组织和性能。

关键词 热连轧 层流冷却 模型 参数优化

Parameters Optimization of Laminar Flow Cooling Model for 2250 mm Wide-Strip Hot Continuous Rolling

Zhou Zhenjun¹, Zhang Yang¹ and Zhang Yunxiang²

(1 Hot Rolling Mill, Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083;

2 Faculty of Materials & Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract As new steel grades such as X60 pipeline steel etc. were produced by 2250 hot rolling mill at Wuhan Steel, the original laminar flow cooling system could not meet the needs of steel cooling to effect the control of coiling temperature led to un-constant structure and properties of products. With optimization of control model for laminar flow cooling system and adjustment of relative parameters of cooling system, the percentage of hits of coiling control temperature increased to 89.3% from original 60% to insure the aim structure and properties of products.

Material Index Hot Continuous Rolling, Laminar Flow Cooling, Model, Parameters Optimization

热轧生产中通过层流冷却系统^[1-5]控制带钢出精轧机组后轧件的卷取温度, 从而得到所需要的组织和性能。武钢二热轧原有层流冷却模型不能完全适应于新钢种的冷却控制, 要求优化层流冷却模型相关参数。

1 层流冷却系统装置和存在问题

2250 mm 热连轧机层流冷却装置由 80 组粗调集管和 16 组精调集管组成。可使终轧温度为 900 °C 的钢板在长度为 143 m 的输送辊道上迅速冷却至所需卷取温度。冷却长度约为 102.6 m, 冷却宽度为 2 173 mm。上集管采用鹅颈层流集管, 每支集管有 54 个水嘴; 下集管采用带一定喷射角的直喷集管, 粗冷区、精冷区每支集管分别有 44 个和 33 个水嘴。冷却区还设有 23 个侧喷水管, 同时全长等分为 4 段辊道水控制区。

层流冷却大系统由过程控制机(二级)、基础自动化(一级)、电气驱动(0 级)和机械系统构成。

二级机层流冷却控制模型的核心部分是传热模型, 该模型中的一些参数, 已经不能满足新钢种的生产要求。由此产生了一系列问题, 如卷取温度(CT)

平均命中率偏低, 特别是轧件较厚时, 命中率更低。某些新品种 CT 控制精度不高, 例如 17.6 mm 的 X70 管线钢的 CT 平均命中率不到 60%, 其他钢种厚度大于 15 mm 的产品平均命中率也较低。

2 层流冷却系统控制模型及优化

2.1 温降模型

层流冷却温降模型的计算精度直接影响到卷取温度的控制精度, 主要包括空气冷却模型和喷水冷却模型两部分。

(1) 带钢在辊道上运送时的温降模型。由于在高温时的辐射热量远远超过对流热量。因此, 只考虑辐射热量损失, 而把其它影响都包括在根据实测数据确定的辐射系数 ε 中。其辐射温降公式为:

$$\text{heat-rad} = K\varepsilon(T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

式中: heat-rad- 某一时刻的热辐射密度/(kW · m⁻²); K- 波茨曼常数(5.67 e⁻¹¹); ε - 表面热辐射系数(0.85); T₂- 带钢表面绝对温度/K; T₁- 带钢表面空气绝对温度/K。

(2) 带钢冷却段的喷水冷却模型。带钢在冷却

段与冷却水直接接触,冷却过程产生以下换热作用:

①冷却水与带钢表面直接碰撞发生强制换热,热交换密度至少为 20 MW/m²;②带钢通过表面与水流层之间的蒸汽层进行热交换,换热密度可达 200~600 kW/m²;③随着越来越多的水离开带钢表面,水层出现断层,出现了裸露的带钢与空气的对流换热,这时的热流密度为 10~50 kW/m²;④带钢与层冷区的运输辊道存在接触,热流密度达到 100 kW/m²;⑤侧喷冷却水的换热作用;⑥带钢表面与冷空气接触发生热交换。

以上可以看出,强制换热作用巨大,虽然换热时间相对较短,但仍占换热的大半比重。同时,第⑤、⑥两种情况产生的热交换占很小比例,所以在本次层流冷却系统优化改造项目中,通过调整模型中计算强制热交换区域的换热计算参数来进行优化。

强制换热模型:为了处理不同状态的热交换机制,使用了一个基于热力学的、用统计方法逼近实现的传热模型,即强制换热模型为一个统计模型:

$$q_i = f_i \cdot f_{i/water} \cdot f_{i/flow} \cdot f_p \cdot Q_i \cdot c_i \quad (2)$$

式中: q_i - 某一时刻的热流密度/(kW·m⁻²); f_i - 二元样条插值函数,受带钢温度与速度影响,是主要的修正参数; $f_{i/water}$ - 水温修正函数; $f_{i/flow}$ - 流量修正函数,表示不同水流量的影响; f_p - 水压修正函数; Q_i - 理想化指定参照系下的标准热流密度/(kW·m⁻²); c_i - 人工调节系数,起修正模型的作用。

模型计算 Q_i 的具体公式如下:

$$Q_i = F \times C \quad (3)$$

式中: F - 优化常量,与集管的上下位置、粗/精段分布有关,例如对于粗冷段的上集管, $F=1.0$,而对于精冷段的下集管, $F=0.5$; C - 参考热流密度。

公式(2)中水温的修正函数 $f_{i/water}$ 、流量的修正函数 $f_{i/flow}$ 、水压的修正函数 f_p 的计算方法类似,以 $f_{i/water}$ 为例,计算公式为:

$$f_{i/water} = 0.5 \times (\text{UNo} + \sqrt{\text{UNo}^2 + 0.01}) \quad (4)$$

$$\text{公式(4)中:UNo} = 1.0 + \left[pF \times \frac{(\text{Tvalue} - rV)}{100} \right] \quad (5)$$

式中: pF - 水温预设优化参数(-0.63687); Tvalue - 冷却水的实测温度/°C; rV - 冷却水温参考值(25 °C)。

公式(4)为一平滑函数,确保 $f_{i/water}$ 为正数,而公式(4)反映了当前水温对参考值的偏移程度。公式(2)的修正系数 c_i 为:

$$C_i = wd/wd_{max} \quad (6)$$

式中: wd - 集管实际流量/(m³·h⁻¹); wd_{max} - 集管最大流量/(m³·h⁻¹)。

公式(2)中, f_i 为一个二元三次的 B 样条插值函数,入口参数为带钢速度与温度:

$$f_i = f(\text{strip speed}, \text{strip temperature}) \quad (7)$$

而 $f_{i/flow}$ 与 f_p 均可由类似于以上的算法算出。

插值函数的基本思想是,在给出被拟合函数节点值的基础上,分段给出不同的插值区间上的表达式(本程序中是三次函数)。设二元三次 B 样条函数的插值基函数为 M ,则 $S(X,Y)$ 的基本形式是:

$$S(X,Y) = \sum_{j=0}^{n_1+m_1} \sum_{i=0}^{n_2+m_2} F(X_i, Y_j) M\left(\frac{x-x_i}{h_1}, \frac{y-y_j}{h_2}\right) \quad (8)$$

实际程序中的二元三次 B 插值中的 $S(X,Y)$, X 为 strip speed,指带钢速度 $V_{带钢}$; Y 为 strip temperature,指带钢温度 $T_{温度}$ 。两者给定的范围区间是 $V_{带钢}:(1, 20)$ 、 $T_{温度}:(100, 1000)$ 。步长分别为 3.3333 与 100。即 $V_0=1, V_7=20; T_0=100, T_{10}=1000; h_1=3.3333, h_2=100; n_1=9, n_2=6$ 。插值时扩展后, m_1, m_2 均为 1, n_1+m_1, n_2+m_2 分别为 10 与 7,这时取值范围变为 $T_{温度}:(0, 1100)$, $V_{带钢}:(-2.16667, 23.16667)$ 。即 $T_{温度}$ 在集合 $\{0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100\}$ 中取值, $V_{带钢}$ 在集合 $\{-2.1666666667, 1, 4.1666666667, 7.3333333333, 10.5, 13.6666666667, 16.8333333333, 20, 23.1666666667\}$ 中取值。于是公式(8)就变为:

$$S(V,T) = \sum_{j=0}^{10} \sum_{i=0}^7 F(V_i, T_j) M\left(\frac{V-V_j}{3.3333}, \frac{T-T_i}{100}\right) \quad (9)$$

分别求解各个区间的 $S(v,t)$ 表达式系数后就可将模型中的 B 样条插值表达式求出。系数矩阵为 8×11 二维形式,矩阵中的每一个元素都对应与一个节点处的值。本次层流冷却改造项目实施前,其表达式见矩阵(1)。现场收集了 10 000 多块钢的数据,对系数矩阵进行了修改,使计算精度得到改善。修改后的系数矩阵见矩阵(2)。

2.2 设定系数自学习

模型的设计考虑了自学习功能,通过学习可获得用于修正热流密度的自学习系数。自学习的基本原理是根据当前钢板温度实测值和计算值的偏差,对模型中的热流密度进行修正。取最近 49 块钢的自学习系数,并根据它们冷却的时间先后顺序对自

2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 74177004388, 0. 79740238065, 0. 896586560754, 1. 008859168820, 1. 120681523440, 1. 230996267990, 1. 33892962647, 1. 44754068482
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 34225692811, 0. 48411877766, 0. 672102797203, 0. 853994897765, 1. 025386545040, 1. 186260765080, 1. 33798567576, 1. 48734612473
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 34735479870, 1. 51596377709, 0. 761286758771, 0. 987385520671, 1. 175988736730, 1. 325758402980, 1. 46387486141, 1. 60088420618
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 30000000000, 1. 30000000000, 0. 424824431809, 0. 626345412758, 0. 810305278161, 0. 971166514609, 1. 10986767714, 1. 25148994490
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 33840608269, 1. 45883139966, 0. 591190767828, 0. 745659373076, 0. 886895870208, 1. 024632852370, 1. 15004394238, 1. 27545400550
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 62956739679, 1. 74164146897, 0. 856094073990, 0. 967283465041, 1. 074158560070, 1. 173915568960, 1. 26955783223, 1. 36549952396
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 67311496142, 1. 84953822293, 0. 966129682228, 1. 067627884790, 1. 163161283660, 1. 257905068720, 1. 35005512320, 1. 43984374733
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 61904937449, 1. 75225193083, 0. 871634091128, 0. 985890986636, 1. 094002256120, 1. 198110363550, 1. 29756675612, 1. 39636581000

矩阵(1)

2. 09401649460, 2. 15686295797, 2. 28540652933, 2. 47948038896, 1. 18834065763, 0. 912311731638, 1. 008458938770, 1. 080978099860, 1. 192829897420, 1. 297856049980, 1. 451037707400
 2. 07341632163, 2. 13041991652, 2. 24701272501, 2. 42304343670, 0. 87475477791, 0. 676223948739, 0. 823681642847, 1. 004449220580, 1. 161765305120, 1. 285168829740, 1. 43728998980
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 43146993971, 0. 77040445814, 0. 649660490662, 0. 837379136590, 0. 878372952850, 1. 021330479100, 1. 118160754100, 1. 500220522170
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 43146993971, 0. 81653793748, 0. 533982748193, 0. 672758982719, 0. 800729073202, 0. 905977050472, 1. 022431041570, 1. 081859466090
 2. 09849173489, 2. 15278087288, 2. 26382164287, 2. 43146993971, 0. 86562174848, 0. 536139258242, 0. 640875937538, 0. 696775357975, 0. 793499779930, 0. 908862269830, 1. 067407702980
 2. 06999623716, 2. 10857851396, 2. 18749311607, 2. 30663763067, 0. 81267500988, 0. 496210139217, 0. 575883729370, 0. 626620762016, 0. 717219047988, 0. 806370006124, 0. 932663649600
 2. 06999623716, 2. 10857851396, 2. 18749311607, 2. 30663763067, 1. 00983036848, 0. 670201939028, 0. 720937294687, 0. 728218231557, 0. 765671553788, 0. 798190034272, 0. 869951121657
 2. 06999623716, 2. 10857851396, 2. 18749311607, 2. 30663763067, 0. 92612679857, 0. 590135087447, 0. 656102036177, 0. 690860869827, 0. 757038567809, 0. 810514755735, 0. 909800951090

矩阵(2)

学习系数取权重,将这 49 块钢取权(含第一支喷嘴的编号、喷水方式、带钢化学成分、规格尺寸、速度、FT7 温度、CT 温度等)后的加权平均值作为当前钢板的短期自学习系数。

块与块之间的自学习参数按钢种、规格的不同分成 5 个级别分别存放。依据控制钢种数目和控制效果的好坏分为 15 000 行、5 000 行等。

模型在计算换热系数时将学习后的短期自学习系数代入到式(2)中,优化换热系数计算模型,提高换热系数计算精度。

3 层流冷却攻关的修正项目

在轧后层流冷却项目的攻关过程中,项目组对以下内容进行了修正或者优化:

(1)上、下集管口径、水流量、到带钢表面距离;
 (2)传热系数矩阵相关值;(3)校准 CT 温度计,使两个温度值测量值保持在 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内;(4)在自学习文件中,删除由于外部硬件设备故障造成 CT 控制不好的记录,比如由 CT 温度计、厚度计等引起的异常波动;(5)上集管玻璃示瓶中的液位调试在 1/3 ~ 2/3,下喷高度在 230 ~ 280 mm,两者过高和太低都要将相应阀设为故障阀;(6)改变侧喷方向,由顺着抛钢方向改为逆向,提高吹扫效率;(7)由于水量过多,增大热传导系数 heat transfer factor;(8)优化系数矩阵(1),使模型计算水量逼近实际所需水量。

4 实施效果

在项目攻关进行的两个月内,通过取得工程记录-修改参数-再取得工程记录-再模型参数这一循

环,二热轧所生产的带钢的卷取温度(CT)命中率有了明显的提高,特别是对于厚板,效果很好。只要保证外部条件不发生大幅度变化,优化后的新参数可以很好在 CT 控制中发挥作用。2007 年 12 月 3 日至 12 月 17 日之间的 CT 控制情况统计表明,全部 CT 命中率 89.3%, $\geq 15\text{ mm}$ 板 CT 命中率 76.5%,X70 管线钢板 CT 命中率 81.7%。与参数优化前的 60% 命中率相比,控制精度有了明显的改善。

5 结论

对 2250 mm 宽带热连轧机轧后层流冷却系统进行了冷却设备调节和冷却控制模型的优化改造。采取优化措施后,卷取温度(CT)控制命中率由原来的 60% 提高到 89.3%,轧后温度控制精度有了明显改善,保证了产品组织和性能满足用户的要求。

参考文献

- 1 谢海波,彭良贵,韩 斌. 热轧带钢层流冷却过程数学模型参数化调优. 材料与冶金学报,2004,3(4):303
- 2 谢海波,张中平,刘相华,等. 热轧层流冷却系统优化与模型参数自适应. 中南大学学报自然科学版,2006,37(2):317
- 3 梁艳春,王彦忠. 热轧带钢层流冷却系统的设计. 鞍钢技术,1998(5):33
- 4 余驰斌,梁伟刚. 热连轧带钢水幕冷却控制技术的研究. 钢铁,1993,28(1):27
- 5 程铁华,卢仁军,林 航. 层流冷却装置自控系统. 基础自动化,1991(1):12

周正军(1974-),男,工程师,金属加工工艺和新产品开发等。

收稿日期:2008-09-08