

热轧带钢终轧温度控制数学模型

张正全
(攀钢热轧板厂)

【摘要】 根据生产现场工艺和设备实际情况,确定了热轧带钢终轧温度的控制策略。基于带钢在机架间温度变化的精确预报模型,通过调节轧制速度或机架间冷却水流量,有效地将带钢温度控制到目标范围内。

【关键词】 终轧温度 轧制速度 冷却水流量 数学模型

MATHEMATIC MODELS FOR CONTROLLING STRIP TEMPERATURE AT EXIT OF FINISH MILL

Zhang Zhengquan
(hot strip mill of panzhihua iron and steel company)

【Abstract】 The control policy of strip temperature is based on the fact of production and equipment, based on precise prediction of mathematic models to the temperature of strip in stands, strip temperature at exit of finish mill is effectively controlled through regulating rolling speed and flux of cooling water between stands.

【Key words】 strip temperature at exit of finish mill, rolling speed, flux of cooling water, mathematic model

1 前言

攀钢热轧板厂精轧控制系统中的终轧温度控制系统是攀钢热轧板厂和澳大利亚 IAS 公司联合开发的,其目的是实现终轧温度自动控制,提高精轧温度控制精度。该系统的开发考虑了热轧板厂工艺和设备特点,其控制模型有一定的特色。

2 终轧温度控制系统的构成

2.1 机架间冷却水系统

机架间冷却水系统结构如图 1 所示。

2.1.1 冷却水温降系数的确定

1) 在热负荷试轧期间,选取不同厚度、钢种的带钢进行生产试验,过程机运行在线数据采集软件 TRACE,采集各种冷却水流量和压力情况下的带钢温度等数据。

2) 利用过程机离线设定计算工具进行拟合,初步计算出冷却水温降系数。

3) 使用离线计算出的冷却水温降系数,投用终轧温度自动控制功能,根据下游机架轧制力的设定精度和终轧温度的变化情况,修正冷却水温降系数。

2.1.2 控制逻辑

精轧过程机(L2)机架间冷却水设定组态的输出条件:(1)0次设定结束,精轧区无钢。(2)换规格后的1次设定结束。(3)2次设定结束。

当上述情况之一出现,机架间冷却水设定组态输出到一级。如果终轧温度控制功能(终轧温度自动控制功能)投入,则 PLC 控制采用过程机设定的组态。由一级的 PLC305 读入设定组态,精轧首架咬钢后,PLC305 锁定当前组态并保持至精轧机抛钢。

统计分析表明,对于 6.0 mm 以上的带钢(尤其是大梁板等低合金钢),带钢头部温度比中后部一般低 30~50℃。为了减少带钢终轧时的同板温差以及避免带钢在轧制过程中出现翘头现象,经过多次试验,机架开、关水时序见表 1。

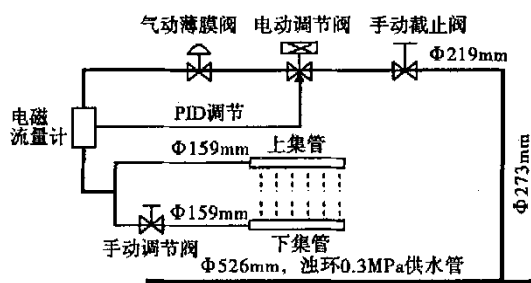


图1 机架间冷却水结构示意图

表1 机架间冷却水开、关时序

冷却水序号	开水信号	关水信号
F1~F2	PY301 检得 + 7.3s	F1 检失
F2~F3	F1 检得 + 1.9s	F2 检失
F3~F4	F2 检得 + 1.2s	F3 检失
F4~F5	F3 检得 + 1.0s	F4 检失

2.2 终轧温度控制

在终轧温度控制系统开发中,充分考虑了攀钢热轧板厂精轧机组等速轧制工艺、电机额定转速较低、热卷箱有卷取和直通两种工作方式、以及产品规格范围宽、生产钢种多等实情,采用了调节轧制速度和机架间冷却水两种组合控制方式来提高终轧温度命中率、产品合格率和成材率以及轧机产量。

2.2.1 终轧温度自动控制的方式

(1)终轧温度自动控制功能不投入时,系统将采用操作工给定的冷却水流量值进行终轧温度控制,给定值应在最大流量和最小流量限制之间,如果给定的流量值大于最大流量值,模型将取最大值输出;如果给定的流量值小于最小值的一半,模型将输出流量值为0,否则,输出流量为最小流量值。在此情况下,模型不参与温度控制,但会对这种情况下的各机架温降及终轧温度进行计算。因此,这种控制措施不能保证控制温度满足目标温度要求。

(2)终轧温度自动控制功能投入时分为以下2种控制方式:

1)以轧制速度调节为主的方式。如果速度已降至下限,终轧温度仍然高于目标温度,则冷却水调节将自动参与。此时,速度保持不变,对冷却水流量进行设定计算。根据温度偏差反复修正流量设定值,直到计算温度达到目标温度范围内。

2)仅冷却水流量调节的方式。根据攀钢热轧板厂生产实际情况,轧制较厚的带钢,用速度调控的方法无法将终轧温度控制在目标温度范围内。为了减少模型的计算量,提高温度收敛的速度,根据生产实际,确定一个最小厚度(目前此值为6.0 mm)。在

轧制最小厚度及以上厚度的带钢时直接采用机架间冷却水控制方式。此时,穿带速度保持模型表中的平均速度不变,直接对冷却水流量进行设定计算。

2.2.2 轧制速度设定计算

(1)初始速度的确定

精轧机组的末架速度初始值取自带钢的厚度范围模型表中的平均轧制速度。厚度范围模型表是根据不同的钢族和厚度范围制作的。攀钢热轧板厂ALPHA系统将所有钢种分为6个钢族,每个钢族的带钢厚度分为10个厚度范围,并为各钢族和厚度范围制作了对应的模型表,每张模型表都确定了最低轧制速度、最高轧制速度和平均轧制速度。

将初始速度用于带钢在机架出口的温度计算就可得到终轧温度初始估算值,将计算的初始温度值与目标温度值进行比较,根据其差值再修正速度。

(2)轧制速度设定计算

速度用于机架温度计算完成后,必须进行终轧温度的收敛检查。如果需要进行第二次迭代计算,速度修正需要根据温度偏差进行调整。

如果第二次迭代没有达到目标温度范围内,将采用第二次收敛算法估算后续计算的轧机出口速度。再将估算速度用于温度计算,如果温度满足目标要求,则该速度为本块钢的轧制速度;如果温度计算结果没有达到目标范围,就需要对速度进行调整,再用调整后的速度进行温度计算,如此反复迭代计算,直到温度达到目标范围,或速度达到极限为止。

每次计算出来的机架速度必须检查是否在该机架速度限制范围内。最终穿带速度基准取决于模型表中的最大速度与计算速度的小值或与最小速度的大值。

$$V_j \geq V_{\max} \text{ 时, } V_z = V_{\max}$$

$$V_j < V_{\max} \text{ 时, } V_z = V_j$$

$$V_j \leq V_{\min} \text{ 时, } V_z = V_{\min}$$

$$V_j > V_{\min} \text{ 时, } V_z = V_j$$

式中 V_j ——计算出的机架速度;

$V_{\max}$ ——穿带速度最大值;

$V_{\min}$ ——穿带速度最小值;

V_z ——最终穿带速度基准。

速度达到极限,且目标温度仍不能达到,将会产生报警信息,显示穿带速度限制条件。如果达到最小穿带速度,而计算温度仍然高于目标温度,将采用机架间带钢冷却水来进行终轧目标温度控制。

2.2.3 机架间冷却水流量设定计算

(1) 初始流量

终轧温度自动控制功能不投入时,初始冷却水流量为操作工给定的流量。

终轧温度自动控制功能投入时,如果带钢厚度小于 6.0 mm,初始冷却水流量设定值与上一次模型设定值相同。

终轧温度自动控制功能投入时,如果带钢厚度 ≥ 6 mm,则仅采用调节机架间冷却水的方式来控制终轧温度。在此情况下,设置流量初始值为 0。

上述初始流量值都要用于机架间温度降的计算和终轧温度计算,从而得出初始的温度计算值。

(2) 冷却水流量调整计算

在终轧温度自动控制功能投入的情况下,各机架间冷却水流量的调整计算方法是相同的,但所采用的速度和初始流量不同。

如果上述计算的初始温度小于目标温度,而且各机架流量值大于最小流量值的情况下,就将最小流量值作为新的流量基准值,将此基准用于温度计算,将得到新的温度计算值。如果初始温度大于目标温度,而且各机架流量基准小于流量最大值的情况下,就将最大流量值作为新的流量基准值,将此流量基准用于温度计算,将得到新的温度计算值。通过温度变化和相应的流量变化可计算出流量对温度影响的斜率。流量对温度的影响斜率计算式为

$$S = \frac{L_0 - L_1}{T_1 - T_0}$$

式中 S ——流量对温度的影响斜率;

L_0 ——原流量;

L_1 ——新流量;

T_1 ——原计算温度;

T_0 ——新计算温度。

如果上述计算温度与目标温度的差不等于 0,则该温度差乘上斜率就可得到冷却水流量修正量。新的流量基准就等于原流量基准加上流量修正量。

用新的流量基准进行温度计算,如果温度值没有达到目标温度范围内,则反复进行新的流量调整计算,并将每一次计算出的流量基准进行温度收敛检查,直到计算温度值达到目标温度允许范围内,或迭代次数达到规定数,或流量达到极限为止。

2.2.3 精轧温降模型

各机架的入口温度计算为前一架出口温度与热辐射温降、机架间冷却水温降之差,F1 入口温度为

除磷箱入口温度与除磷温降、除磷箱入口到 F1 入口的辐射温降之差。各机架出口温度为入口温度、带钢与轧辊的热传递温降、带钢变形温升以及带钢与轧辊的摩擦温升的代数和。通过沿轧制顺序各架入、出口温度计算,最后可计算出精轧的终轧温度。

(1) 辐射温降模型

$$\Delta T = x_{Cnst} \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{W} \right) \left(\frac{(T + 273)^{1/4} - (T_a + 273)^{1/4}}{C_p \cdot dens} \right) \Delta t$$

式中 T_a ——环境温度;

H ——轧件厚度;

W ——轧件宽度;

C_p ——轧件比热;

$dens$ ——轧件密度;

x_{Cnst} ——热辐射系数;

Δt ——辐射温降时间。

(2) 除鳞温降模型

$$T_s = \frac{T_d K_s F_s P_s}{H V D C_p}$$

式中 T_d ——轧件与冷却水的温差;

K_s ——冷却水温降系数;

F_s ——冷却水流量;

P_s ——冷却水压力;

V ——轧件速度;

D ——轧件密度。

(3) 机架间喷水冷却温降模型

在轧制厚度较大的带钢时,需要采用机架间喷水冷却的方法才能把终轧温度控制到目标范围内,机架间喷水冷却所产生的温降与带钢厚度、温度、冷却水流量、带钢速度、机架间喷水冷却的热传导系数等有关。其计算模型与除鳞温降一样。

(4) 带钢过辊缝温降模型

带钢通过辊缝时的温度变化由三部分组成:向轧辊传导传热温降,与轧辊间摩擦热温升和变形热温升。

1) 向轧辊传导传热温降模型

$$T_{rc} = K_c \frac{T_e - T_r}{H_{avg} DC_p} \cdot \left(\frac{L}{V} \right)^{1/2}$$

式中 K_c ——轧辊接触热流系数;

T_e ——机架入口温度;

T_r ——轧辊温度;

H_{avg} ——轧辊出入口平均厚度;

L ——带钢与轧辊的接触长度。

2) 变形热温升模型

$$T_d = k_d C_{\text{conv}} k_{\text{si}} \ln \frac{H_i}{H_0} \frac{1}{DC_p}$$

式中 k_d ——变形增益系数;
 k_{si} ——带钢变形抗力;
 H_i ——机架入口带钢厚度;
 H_0 ——机架出口带钢厚度;
 C_{conv} ——单位转换系数。

3) 与轧辊摩擦热温升模型

$$T_f = \frac{K_f C_{\text{conv}} F}{WC_p DH_0}$$

式中 K_f ——摩擦系数;
 F ——轧制压力。

3 模型应用效果

3.1 投用效果对比

(1) 终轧温度自动控制功能投入时三个厚度范围的设定精度及控制精度统计情况见表2。

表2 终轧温度自动控制功能投入时终轧温度控制效果统计

厚度 (mm)	平均预报偏差 (℃)	平均控制偏差 (℃)	平均命中率 (%)
$h \leq 3.0$	2	13	95.41
$3.0 < h < 6.0$	3	4	
$h \geq 6.0$	3	5	

注:1) 平均预报偏差计算公式: $\sum |T_{\text{实测}} - T_{\text{预报}}| / n$; 2) 平均控制偏差计算公式: $\sum |T_{\text{实测}} - T_{\text{控制}}| / n$; 3) 控制命中率指在目标温度 $\pm 20^\circ\text{C}$ 范围内。

表2中,厚度小于3.0 mm的平均控制偏差和

控制命中率较差的原因是因为热轧板厂电机速度限制造成的,模型在进行速度计算时,该厚度范围的带钢绝大部分受到了电机最大速度极限的限制,终轧温度大都偏下限。

(2) 未投终轧温度自动控制功能情况下温度控制统计情况见表3。

表3 终轧温度自动控制功能未投入时终轧温度控制效果统计

厚度 (mm)	平均预报偏差 (℃)	平均控制偏差 (℃)	平均命中率 (%)
$h \leq 3.0$	10	22	84
$3.0 < h < 6.0$	12	15	
$h \geq 6.0$	12	18	

从终轧温度自动控制功能投用与不投用的温度控制统计数据可以看出,终轧温度自动控制功能的控制效果十分明显。平均温度命中率提高了11.41%。

4 结论

1. 终轧温度自动控制模型采用了轧制速度调节、冷却水调节以及速度和冷却水的组合调节等方法。

2. 计算过程中温度影响因素考虑全面周到,温度、速度、冷却水流量算法科学合理,温度实测值与目标值非常接近。

3. 终轧温度自动控制模型的开发,提高了攀钢热轧板厂的终轧温度控制精度,从而提高产品的质量。

收稿日期:2006.3.13

(上接第35页)

化和智能化的操作方式能最大限度的发挥人工设计的灵活性和全局综合性,这样扬长避短、相互补充,对于实现高炉炉型设计的高效性和完善性起到了积极作用。本系统在攀钢集团设计研究院有限公司的应用中取得了良好的效果,缩短设计周期六成以上。可以看出,计算机辅助设计技术在高炉炉型设计的应用中具有重要的开发价值和广阔的应用前景。

参考文献

1. Takanobu INADA, 孙永芳. 高炉内型对炉内状态的影响. 鞍钢技

术, 2004, Vol. 3

2. 《炼铁设计参考资料》编写组. 炼铁设计参考资料. 冶金工业出版社, 1975年7月

3. 张清明. CAD/CAM在高炉炉壳制造中的应用. 本溪冶金高等专科学校学报, 2004年3月, Vol. 6, No. 1

4. 张宏星, 赵勇. CAD技术及系统研究概述. 机械工程师, 2004年, Vol. 7

5. 姚进, 彭廷红, 尚利. 知识工程在阀门智能设计中的应用研究. 中国制造业信息化, 2004年, Vol. 8

6. 杜平平, 卫华诚, 李世良等. 高炉炉型CAD软件的开发和应用. 北京科技大学学报, 1994年10月, Vol. 16