

带钢热精轧机组机架间冷却控制数学模型

张 敏, 周旭东, 李长生, 刘相华, 王国栋

(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:为了提高带钢终轧温度的控制精度,对精轧过程中导致带钢温度变化的热交换过程进行了分析,并以此作为建立机架间冷却控制的传热模型和自学习模型的理论依据。给出了热轧机组机架间在线冷却控制传热模型和自学习模型的算法。通过程序开发对精轧机组内带钢的温度分布进行了离线模拟,取得了较高的模拟精度。所用数学模型具有较好的在线应用前景。

关键词:热轧;带钢;机架间冷却;数学模型;终轧温度

中图分类号: TG335. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 100120963(2003)0220019205

Mathematical Model for Temperature Control in Hot Strip Finishing Mill Group

ZHANG Min, ZHOU Xu2dong, LI Chang2sheng, LIU Xiang2hua, WANG Guo2dong
(Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of strip finishing temperature, the heat exchange process that causes hot strip temperature variation during finish rolling was analyzed, which provides the theoretical basis of heat transfer and self2study model for interstand cooling control. The heat transfer and self2study arithmetic of the on2line mathematical model for interstand cooling during hot strip rolling are presented in detail. The temperature distribution of the strip in finishing mill group is off2line simulated by developing programs and higher precision is achieved. The mathematical models can be used on line.

Key words: hot rolling; strip; interstand cooling; mathematical model; finishing temperature

热轧带钢终轧温度对保证产品力学性能和微观组织的均匀性有重要的影响。热轧带钢精轧机组存在辐射散热、带钢与冷却水之间的传热、带钢与轧辊之间的摩擦传热和接触传热以及因带钢塑性变形而产生的变形热等传热问题。

为了提高产品质量,作者针对某热轧厂的实际情况研究了精轧机组机架间复杂的传热问题,并建立了精确的过程预报数学模型,这对于提高温度计算精度,进一步改善产品质量具有十分重要的理论意义和实际指导意义。

1 机架间冷却设备的配置情况

图 1 为某热轧厂机架间冷却设备及其布置示意

图。各机架之间的距离为 6 m。机架间冷却设备布置在精轧机组 F1 ~ F6 之间,共 5 套。每套冷却设备都设有上、下垂直喷射集管和侧喷装置。上、下垂直喷射集管位于各精轧机出口导板后面及活套前面,距轧机中心线 2 000 ~ 2 300 mm。上喷射集管安装在轧制中心线上方 1 000 mm 处,下喷射集管安装在轧制中心线下方 800 mm 处(为不影响导板移动,上喷射集管可以旋转 60°,它与供水管道联接处加回旋接头连接)。侧喷装置由供水管和喷嘴组成,安装在轧制中心线的上方、上喷射集管后方约 500 mm 处。

上喷射集管是一个长径为 473 mm、短径为 300 mm 的椭圆形集管,材质为普碳钢,有效长度为 1 450 mm,共 6 排,每排 11 个喷嘴。下喷射集管是

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59995440)

作者简介:张 敏(1978),男,硕士生; 收稿日期:2002208205; 修订日期:2002209217

图 1 机架间冷却设备及其布置示意图
Fig. 1 Layout of interstand cooling equipment

180 mm ×470 mm 的长方形集管,材质为普通碳素钢,有效长度为 1 450 mm,共 6 排,每排 11 个喷嘴。侧喷装置由一个喷嘴及供水管线和角度调节机构组成。喷嘴由一个不锈钢喷管和一个黄铜喷口组成。上、下喷射集管共用一个气动蝶形控制阀,侧喷装置由一个气动蝶形阀单独控制。上、下喷水集管和侧喷装置的水压均为 1 MPa。

2 机架间冷却控制的数学模型

热连轧过程中,在变形区内,带钢的传热过程主要包括带钢与轧辊的接触传热、带钢与轧辊的摩擦热以及带钢变形热。在变形区外,带钢的传热过程主要包括水冷传热和空冷传热两部分。水冷传热指带钢向喷淋至其表面的冷却水传热的温降过程,其传热方式以对流为主^[1];空冷传热指带钢在空气中向环境散热的温降过程,其传热方式以辐射为主^[2]。

2.1 变形区内传热计算的数学模型

2.1.1 带钢与轧辊接触传热的数学模型

高温带钢通过接触表面的氧化铁皮将热量传递给低温的轧辊。设热传导系数为 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$,则带钢单位时间内散失的热量 $Q_{失}$ 为:

$$Q_{失} = 2 F_{辊} \frac{t - t_0}{S} \tag{1}$$

式中, t 和 t_0 分别为带钢和轧辊的温度; S 为氧化铁皮厚度; $F_{辊}$ 为带钢与轧辊的接触面积 ($F_{辊} = bl$); l 和 b 分别为带钢在变形区内的长度和宽度。

随着热量的散失,带钢的温度下降。设下降的温度为 $t_{传}$,则带钢在单位时间内热量的变化为:

$$Q_{变} = c h_{平} b v t_{传} \tag{2}$$

式中, c 为带钢的比热容; ρ 为带钢的密度; $h_{平}$ 为带钢在变形区中的平均高度; v 为带钢的轧制速度。

由于带钢散失的热量等于其热量的变化,因此,可以得到:

$$t_{传} = \frac{2}{c} \frac{1}{S v h_{平}} (t - t_0) \tag{3}$$

上式中的氧化铁皮厚度和热传导系数较难确定。为了便于计算,一般把它们结合在一起进行考虑,用系数 $K = \frac{1}{S} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ 表示。 K 值可依据实测数据来确定。因此上式可写成:

$$t_{传} = \frac{2K}{c} \frac{1}{v h_{平}} (t - t_0) \tag{4}$$

2.1.2 带钢与轧辊摩擦传热的数学模型

带钢与轧辊相互摩擦产生的热量是由一部分塑性变形功转化来的。假若变形区中粘着区范围很大,则此部分热量可以忽略不计^[3]。但是,如果精轧时滑动区范围很大,克服摩擦的功也增大,则这部分热量不能忽略。摩擦温升 $t_{摩}$ 可用下式来计算^[3]:

$$t_{摩} = c_0 \frac{f}{c} \frac{1}{h_{平}} \ln \frac{H}{h} \tag{5}$$

式中, c_0 为系数,它反映了热功当量和转换效率等一些影响因素的作用; f 为摩擦系数; $h_{平}$ 为平均变形抗力; H 和 h 分别为变形前后带钢的厚度。

2.1.3 带钢塑性变形热的数学模型

塑性变形过程中,轧辊传递给轧件的机械能使轧件发生形状改变的同时,还会使金属产生加工硬化,而且在随后的再结晶过程中,加工硬化组织中累积的机械能会以热能的形式释放出来,使轧件的温度升高。

由轧制原理可知,金属的塑性变形功 W 为:

$$W = h_{平} V \ln \frac{H}{h} \times 10^3 \tag{6}$$

式中, V 为轧件的体积。

在轧制过程中,只有一部分塑性变形功转变为

热能 $Q_{\text{塑}}$, 即:

$$Q_{\text{塑}} = A_{\text{平}} V \ln \frac{H}{h} \times 10^3 \quad (7)$$

式中, A 为热功当量 ($A = 2342$); η 为转换效率 ($0 < \eta < 1$), η 值取决于实际变形条件下加工硬化曲线的形状。

因此, 金属塑性变形热使轧件的温度升高, 其温升值 $t_{\text{塑}}$ 为:

$$t_{\text{塑}} = \frac{Q_{\text{塑}}}{c V} = \frac{A_{\text{平}}}{c} \ln \frac{H}{h} \times 10^3 \quad (8)$$

2.2 变形区外传热计算的数学模型

2.2.1 带钢水冷传热的数学模型

因水冷时带钢沿长度和宽度方向的传热条件均比较一致, 故可认为带钢在长度和宽度方向上的温度分布均匀。因带钢较薄, 在一定的厚度范围内, 可认为带钢厚度方向上的温度相同, 这样带钢的水冷传热过程就可简化为零维非稳态导热问题^[4]。

机架间的冷却实质上属于低压喷水冷却。虽然水的工作压力较小, 但是水流量比较大, 带钢是在层流水中通过, 所以也是强迫对流的一种形式。强迫对流的热交换过程比较复杂, 它不仅与带钢的温度、冷却水的温度以及带钢材质的物理性能有关, 还与冷却水的压力和流速等有关, 因此要从理论上给出反映各种因素影响的方程比较困难, 本文采用牛顿公式的微分形式来计算对流传热散失的热量 $Q_{\text{对}}$, 即:

$$dQ_{\text{对}} = - (t - t_{\text{水}}) 2 F_{\text{水}} d \quad (9)$$

式中, α 为对流散热系数 (表征对流散热的强度); $t_{\text{水}}$ 为冷却水温度; $F_{\text{水}}$ 为带钢与冷却水的接触面积; t 为带钢在冷却水中运行的时间。

由热平衡关系得到:

$$dt = - \frac{2}{c h} (t - t_{\text{水}}) d \quad (10)$$

然后, 用 t_1 和 t_2 分别表示带钢的初始温度和最终温度, τ_1 、 τ_2 分别为冷却的初始时刻和最终时刻, 并以 t_1 和 τ_1 为下限、 t_2 和 τ_2 为上限进行积分, 得到:

$$t_2 - t_1 = \frac{2}{c h} (t_{\text{水}} - t_1) \ln \frac{t_2 - t_{\text{水}}}{t_1 - t_{\text{水}}} \quad (11)$$

经整理, 可得到带钢经水冷却后最终温度的表达式, 即:

$$t_2 = t_{\text{水}} + (t_1 - t_{\text{水}}) \exp \left[1 - \frac{2}{c h} (t_1 - t_{\text{水}}) \right] \quad (12)$$

由此获得水冷传热的温降方程:

$$t_{\text{水}} = t_1 - \left[t_{\text{水}} + (t_1 - t_{\text{水}}) \exp \left(- \frac{2}{c h} (t_1 - t_{\text{水}}) \right) \right] \quad (13)$$

2.2.2 带钢空冷传热的数学模型

处在机架间喷水区之外的带钢的温降主要归因于辐射散热, 同时也存在带钢与空气的自然对流冷却。相关计算表明, 高温条件下的辐射热量损失远大于对流热量损失。在 1000 左右的温度下, 对流传热损失仅占总热量损失的 5%~7%, 因此可以只考虑辐射传热损失, 而把其他影响都包含在根据实测数据确定的辐射率 ϵ 中^[5~7]。与水冷传热过程相似, 可按零维非稳态问题考虑空冷传热过程。

辐射造成的热量损失 $Q_{\text{辐}}$ 可描述为:

$$Q_{\text{辐}} = \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{空}}+273}{100} \right)^4 \right] F_{\text{空}} \quad (14)$$

式中, ϵ 为辐射率 ($\epsilon < 1$); $C_{\text{空}}$ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 其值约为 4.88; $F_{\text{空}}$ 为散热面积; $t_{\text{空}}$ 为空冷时间; $t_{\text{空}}$ 为周围空气的温度。

由于 $t \gg t_{\text{空}}$, 因此在上式中可忽略 $t_{\text{空}}$ 项。此时, 辐射造成的热量损失为:

$$Q_{\text{辐}} = \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{空}}+273}{100} \right)^4 \right] F_{\text{空}} \quad (15)$$

由传热学得到的辐射温降为:

$$t_{\text{空}} = - \frac{F_{\text{空}}}{c b h l} \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{空}}+273}{100} \right)^4 \right] \quad (16)$$

当 $F_{\text{空}} = 2 b l$ 时, 式(16)为:

$$t_{\text{空}} = - \frac{2}{c} \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{空}}+273}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{h} \quad (17)$$

上述空冷传热过程的温降计算式是在带钢厚度很小这一假设条件下得出的。实际上, 带钢在厚度方向上存在热传导, 故应对空冷传热模型进行厚度修正。修正后的空冷传热模型为:

$$\hat{Q}_{\text{空}} = - \frac{2 \hat{U}}{c} \left[\left(\frac{t+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{空}}+273}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{h} \quad (18)$$

式中, $\hat{U} = \hat{U} \times h + \hat{U}_0$ (\hat{U} 和 \hat{U}_0 为修正系数)。可以看出, 在空冷传热过程温降计算式中, 对带钢表面辐射率按与厚度呈线性关系进行了处理, 考虑了带钢内部在厚度方向上的导热过程。线性修正式中的 \hat{U} 和 \hat{U}_0 可通过回归分析获得。

3 模型计算结果及分析

某热轧厂热连轧机组主要生产 1.5~12 mm 的薄带钢。机架间冷却设备采用喷水冷却方式。冷却水压力为 0.3 MPa, 夏季最高水温为 25℃, 精轧入口温度 980~1150℃。粗轧与精轧之间配有热卷取箱, 故常采用恒速轧制。精轧机组的主要技术参

数如表 1 所示。

根据前面所述各换热过程的数学模型,充分考虑该热轧厂的实际生产情况,对同一钢种、3 种规格的带钢的轧制情况做离线模拟。其轧制规程如表 2

所示。

利用 Visual C + + 6.0 编制程序,计算出带钢在精轧机组内经过上述各换热过程后的温度值(见图 2)。图中 A 点是带钢进入精轧机组时的温度点,也

表 1 精轧机组主要技术参数

Table 1 Main technical parameter of finishing mill group

项 目	精 轧 机 组					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
工作辊直径/ mm	620/ 650	620/ 650	600/ 650	600/ 650	600/ 650	600/ 650
工作辊辊身长度/ mm	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450	1 450
工作辊材质	半钢/ 高铬铁	半钢/ 高铬铁	半钢/ 高铬铁	高镍铬离心 铸铁/ 改进型 高镍铬离心铸铁	高镍铬离心 铸铁/ 改进型 高镍铬离心铸铁	高镍铬离心 铸铁/ 改进型 高镍铬离心铸铁
支承辊直径/ mm	1 180/ 1 300	1 180/ 1 300	1 180/ 1 300	1 180/ 1 300	1 180/ 1 300	1 180/ 1 300
支承辊辊身长度/ mm	1 454	1 454	1 454	1 500	1 500	1 500
工作辊转速/(r · min ⁻¹)	30.5 ~ 62.5	50.0 ~ 102.5	75 ~ 150	100 ~ 205	125 ~ 263	147 ~ 323
轧制速度/(m · s ⁻¹)	1.05 ~ 2.35	1.69 ~ 3.49	2.55 ~ 5.10	3.40 ~ 7.31	4.25 ~ 9.82	5.0 ~ 11.0

表 2 3 种规格的 Q235A 带钢的轧制规程

Table 2 Rolling schedule for Q235A

产品规格 mm	轧机号	带钢厚度 mm	相对变形量 %	轧制速度/(m · s ⁻¹)		轧制时间 s	工作辊直径 mm	轧制压力/ kN	
				头部	尾部			最小	最大
1.50 ×1 000		30.00		0.50	0.50	161.10			
	F1	13.41	55.29	1.12	1.12	161.10	636	14 166	14 270
	F2	6.87	48.79	2.19	2.19	161.10	630	13 269	13 343
	F3	3.86	43.80	3.90	3.90	161.10	614	12 913	12 978
	F4	2.40	37.88	6.27	6.27	161.10	602	13 268	13 336
	F5	1.77	26.25	8.51	8.51	161.10	631	12 870	12 933
2.70 ×1 300	F6	1.50	14.95	10.00	10.00	161.10	650	10 275	10 325
		30.00		0.72	0.72	92.54			
	F1	15.60	48.00	1.39	1.39	92.54	636	17 303	17 524
	F2	8.74	44.00	2.48	2.48	92.54	630	16 156	16 330
	F3	5.50	37.00	3.93	3.93	92.54	614	14 527	14 673
	F4	3.91	29.00	5.54	5.54	92.54	602	13 178	13 302
5.00 ×1 300	F5	3.13	20.00	6.92	6.92	92.54	631	11 250	11 335
	F6	2.70	13.50	8.00	8.00	92.54	650	9 098	9 161
		30.00				80.51			
	F1	17.83	40.57	0.71	0.71	80.51	636	20 352	20 901
	F2	13.07	35.00	1.24	1.24	80.51	630	19 081	19 655
	F3	9.28	29.00	1.91	1.91	80.51	614	17 918	18 250
	F4	7.05	24.03	2.70	2.70	80.51	602	16 093	16 307
	F5	5.78	18.01	3.55	3.55	80.51	631	14 059	14 213
	F6	5.00	15.60	5.00	5.00	80.51	650	12 524	12 744

图2 不同规格带钢精轧过程温度变化图

Fig. 2 Variation of strip temperature during finish rolling

是计算开始点,其值为实测值;B点是带钢出第一架精轧机时的温度点;C点是水冷结束时的温度点。D(A)点是空冷结束时的温度点,也是带钢进入下一机架时的温度点。以后依此类推。图中每个递增段表示带钢在轧辊间的温升(如AB段)。每个递减段由两部分组成,前一部分(如BC段)表示带钢出轧辊水冷温降;后一部分(如CD段)表示空冷温降。其余两条曲线各线段的意义与此类似。各温度点之间的曲线仅表示温度变化趋势,不是精确的温度测量曲线。

从图2可看出,利用本文介绍的数学模型得出的3种不同规格带钢的终轧温度计算值与实测值基本相符,带钢的精轧温度分布与实际生产情况总体吻合。通过对计算结果的分析可以看出:随着最终成品厚度的增加,温度的计算误差有增大的趋势。究其原因,以上各数学模型均假设带钢极薄,厚度方

向上不存在热传导,所以当用此模型计算稍厚带钢时,会有模型精度降低的情况。另外还不难发现以下规律:压下量对轧辊之间带钢的温升有直接影响。随着压下量的下降,轧辊间带钢温升逐渐减小。在水冷段和空冷段,带钢温降与带钢在该段的运行时间基本呈线性递增关系。

4 结 论

(1)采用本文所建数学模型对3种不同规格带钢的终轧温度和精轧温度分布进行了模拟计算,计算结果与实际生产数据基本相符。

(2)以零维非稳态热传导模型为基础,采用厚度修正算法描述冷却过程中机架间带钢的温降,计算量小,便于实现在线控制。

(3)对带钢精轧过程的各传热过程进行了探讨,给出了计算终轧温度的一种方法。

参考文献:

- [1] Abel C A. Interstand Cooling during the Processing of Controlled Rolled Plates to Improve Mill Productivity [J]. Iron & Steel Soc of AIME, 1997 :5452554.
- [2] 蔡 正, 王国栋, 刘相华. 层流冷却中带钢温度分布模型的开发[J]. 钢铁, 1998, 33(8) :31234.
- [3] 丁修 . 轧制过程自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [4] Sun C G, Hwang S M. Prediction of Roll Thermal Profile in Hot Strip Rolling by the Finite Element Method [J]. ISIJ Internation2 al, 2000, 40(8) :7942801.
- [5] 刘 , 孙一康. 带钢热连轧计算机控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 许云波, 郑 晖, 刘相华, 等. 400 MPa 级超级钢热连轧过程中温度及 MFS 的预测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(6) :5692572.
- [7] James F E, Lain D R, Howard R W. Numerical Modeling of Hot Strip Mill Runout Table Cooling [J]. Iron and Steel Engineer, 1993, (1) :50254.