

连退机组直火加热工艺与控制技术的开发

杨永辉¹ 祁奔¹ 王浩宇¹ 白振华^{1,2*}

1.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛,066004

2.燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室,秦皇岛,066004

摘要:基于高斯分布的直接火焰冲击热流密度模型,结合直接火焰冲击加热烧嘴的特性、烧嘴的布置情况及其与带钢的位置关系,将空烧补偿热量以类侧墙辐射的方式作用到带钢上,建立了带钢横向线热流量分布模型。根据此模型分析边部烧嘴天然气流量折减变化对带钢横向线热流量的影响。以线热流量在带钢宽度方向上分布均匀度为优化目标,开发出直火加热段边部烧嘴天然气流量控制技术。将该技术应用于生产实践,根据最优折减系数调节天然气流量,可得到适合于不同宽度带钢加热时的边部喷嘴与中部喷嘴的天然气流量设定值。以典型带宽1300 mm、1100 mm、900 mm为例,中部单个烧嘴流量分别为12.6 m³/h、12.1 m³/h、11.8 m³/h时,最优折减系数分别为0.89、0.78、0.65,边部单个烧嘴流量分别取11.21 m³/h、9.44 m³/h、7.67 m³/h。此时,炉内带钢横向受热均匀,带钢在宽度方向上的温度分布满足生产需求,直火加热炉内带钢运行的稳定性大大提高。

关键词:连退机组;直接火焰冲击加热;横向受热;热流密度;天然气流量

中图分类号: TG142.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.029

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development of Direct Flame Impingement Heating Processes and Control Technology for Continuous Annealing Units

YANG Yonghui¹ QI Ben¹ WANG Haoyu¹ BAI Zhenhua^{1,2*}

1.National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: Based on flame direct impact heat flux model with Gaussian distribution, combined with characteristics of direct flame impingement heating burner, the arrangement of the burner and the position relationship with strip steel, the air burning compensation heat was applied to strip steel in a sidewall-like radiation, and the transverse line heat flow distribution model of the strip was established. According to this model, the influences of natural gas flow reduction changes of the edge burner on heat flow rate of transverse line of the strip were analyzed. With the optimization goal of the uniformity of the distribution of linear heat flow in width direction of the strip steels, the natural gas flow control technology of the burner at the edge of direct fire heating sections was developed. By applying this technology to production practice, the natural gas flow rate may be adjusted according to the optimal reduction factor, and the natural gas flow rate setting value suitable for the edge nozzle and the middle nozzle when the strip steels were heated with different widths may be obtained. Taking the typical widths of 1300 mm, 1100 mm and 900 mm as examples, when the flow rate of a single burner in the middle is as 12.6 m³/h, 12.1 m³/h and 11.8 m³/h, the optimal reduction coefficients are as 0.89, 0.78 and 0.65, respectively, and the flow rate of a single burner at the edge is as 11.21 m³/h, 9.44 m³/h and 7.67 m³/h, respectively. Thus, the strip steels in the furnace are evenly heated laterally, the temperature distributions of the strip steels in width direction meet the production demands, and the stability of the strip operation in direct fire heating furnace is greatly improved.

Key words: continuous annealing unit; direct flame impingement heating; transverse heating; heat flux; natural gas flow rate

收稿日期:2024-07-29

基金项目:河北省自然科学基金(E2024203125);河北省科学技术研究与发展计划-科技支撑计划(23280101Z);河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2023012);河北省重大科技成果转化专项(22281001Z);辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKZZ20220040);中央引导地方科技发展资金(236Z1024G)

0 引言

近年来,随着国内自主汽车品牌的不断崛起、高端家电以及运输等行业的不断发展,所需冷轧带钢的产量以及产品质量都在不断提高^[1-2],相关

研究层出不穷^[3-5]。连续退火工艺作为冷轧板带生产过程中不可缺少的环节,对带钢的产品质量有重大影响^[6-8]。连退机组退火过程通常包括预热段、加热段、均热段、缓冷段、快冷段、过时效段、终冷段、水冷段等。在连续退火加热段中,直接火焰冲击加热技术因加热速率快、效率高等优点被广泛应用^[9-12]。直火加热炉内,特殊的烧嘴将高温高速的火焰直接冲击到带钢表面对带钢进行加热,带钢横向温度分布是否均匀将直接决定其在炉内运行的稳定性,影响成品带钢的质量^[13-15]。但由于炉内带钢温度不便测量,加之炉内传热复杂难以计算,带钢横向温度分布难以得到反馈^[16-18]。花福安等^[19]对直接火焰冲击加热技术进行了深入探究,设计了一种三重同心管逆扩散燃烧烧嘴,系统研究了空气过剩系数、燃气流量、氧化剂分配比例以及氧含量等燃烧工艺参数对燃烧特性和火焰形态的影响。武斌等^[20]从炉温、炉内尺寸结构、热平衡以及加热能力计算等方面入手,给出了确定无氧化炉加热能力的过程。孙文权等^[21]基于热平衡法,对宽带钢边部进行网格划分并修正,同时以时间参量为迭代步长,建立了宽带钢连退温度场预测模型。LISIENKO等^[22]通过对单通道分段炉的改造,完成多喷嘴燃烧器进行侧向喷射火焰加热的三通道炉设计、分段式三通道DFI炉带换热式喷射燃烧器(RJB)设计,主要考虑热工性能,此技术的应用侧重于提高炉子的生产率、降低燃料消耗,并未过多关注温度分布均匀性。

在上述研究的基础上,本文通过建立带钢横向线热流量模型,研究了直火加热炉内边部烧嘴天然气流量折减变化对带钢横向受热的影响,制定了加热不同规格带钢时的天然气流量调节机制。

1 连退机组直火加热工艺段简介

国内某连退机组加热段配有立式直火加热炉,采用短火焰冲击加热烧嘴正对带钢进行喷射加热,直接火焰冲击加热具有加热速率快、效率高、能耗少等优点。炉壁四周为保温棉,燃烧气体为天然气,保护气体为氮气。炉内有多个加热区,带钢从上向下运行且双面受热,如图1所示。优先使用下方的加热区,负荷不足时从下向上顺次增加加热区投入使用,不投入的加热区通入氮气进行冷却保护。

炉内所有烧嘴规格相同,并在炉膛内以特定规律均匀、交错、互补布置。每个加热区内烧嘴的

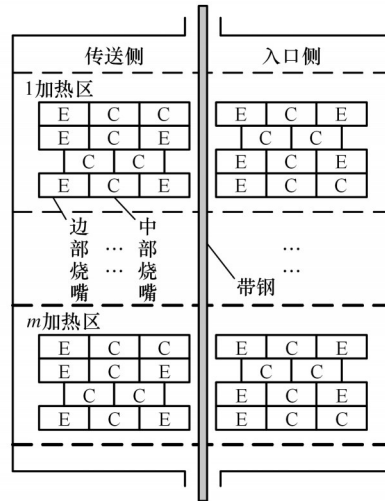


图1 炉内带钢与烧嘴总体布置图

Fig. 1 General arrangement of strip and burners in heating furnace

布置相同,具体位置如图2所示,其中DS为传动侧、WS为操作侧。从控制上将烧嘴分为边部烧嘴(E烧嘴)和中部烧嘴(C烧嘴)两类。通常情况下,中部烧嘴为满负荷状态,而边部烧嘴的天然气流量需要根据带宽来调节。当带钢宽度减小时,若不适当减少边部烧嘴的天然气流量,则带钢边部温度将会较高,导致带钢产生双边浪,引起带钢运行不稳,易使带钢出现划伤等缺陷。

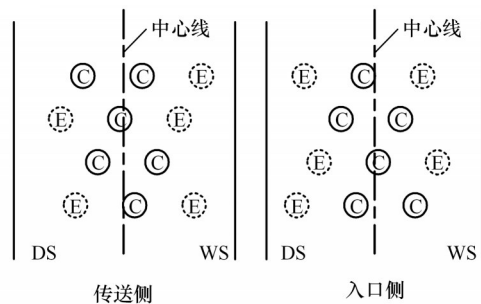


图2 单加热区烧嘴位置图

Fig. 2 Single heating zone burners position arrangement

2 连退机组直火加热工艺与控制技术的开发

机组稳定运行时,直火加热炉内参与热交换的物质有炉气、炉壁以及带钢,三者之间通过辐射和对流的方式进行复杂的热交换,常规方法难以研究带钢宽度方向上的温度分布。在炉温稳定的情况下,炉壁为中间物体,它将得到的热量全部以辐射的形式散出,炉内净能量流动仅是高温炉气对带钢传送热量。此外,在直火加热炉内,烧嘴以直接火焰冲击方式对带钢传递的热量占绝大部分,并且该烧嘴的加热区域集中、加热速率快,因而本文从直接火焰冲击加热带钢的角度出发研究

带钢横向受热情况。

2.1 带钢横向线热流量模型的建立

在直接火焰冲击加热的研究中,当烧嘴直接冲击加热带钢时,面积热流量沿半径方向近似呈高斯分布^[23-25],如图3所示。若将加热中心点固定在坐标原点,则任意一点到加热中心的面积热流量为

$$q(r) = \frac{3}{\pi r_0^2} \varphi q_v A \eta \exp(-3(r/r_0)) \quad (1)$$

式中: $q(r)$ 为面积热流量, W/mm^2 ; q_v 为烧嘴天然气流量, m^3/s ; A 为天然气燃烧热值, J/m^3 ; η 为天然气过剩系数; φ 为热吸收率,%; r 为距加热中心点的距离, mm ; r_0 为有效加热半径, mm ,与烧嘴和带钢的距离有关,由现场模拟分析单个烧嘴对带钢加热时的温度变化情况得到。

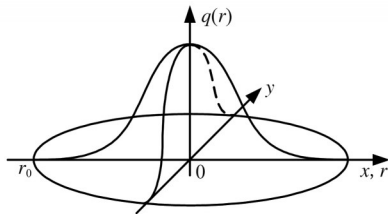


图3 高斯分布的热流密度模型

Fig. 3 Heat flux model of Gaussian distribution

对于加热区域天然气流量 q_v ,考虑到带钢规格、带钢运行速度、出口设定温度等参数,需要设置合适的烧嘴流量来满足不同参数的需求。加热区域天然气流量如下所示:

$$q_v = f(B, H, \theta_{fcs}, v) \quad (2)$$

式中: B 为带钢宽度, mm ; H 为带钢厚度, mm ; θ_{fcs} 为加热段出口设定温度, $^{\circ}C$; v 为加热区域带钢运行速度, m/min 。具体表达形式可根据现场详细设定。

以单个加热区为研究对象,为方便研究直火加热炉内带钢宽度方向上的受热情况,在图2的基础上将两侧烧嘴沿带钢运行方向移到同一截面,并对其从左至右依次编号,记为烧嘴 $j(j=1, 2, \dots, 22)$,其中烧嘴 $1, 2, \dots, 5$ 以及 $18, 19, \dots, 22$ 为边部烧嘴,烧嘴 $6, 7, \dots, 17$ 为中部烧嘴,相邻两烧嘴的横向间距相同,如图4所示。各个烧嘴与带钢的横向相对位置并未发生变化,不影响带钢的横向受热分析。接着,将带钢沿宽度方向划分为 $2n+1$ 个单元,从左至右依次编号,记为单元 i 。则第 j 个烧嘴中心的坐标 x'_j 、每个带钢单元中心的坐标 x_i 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -\frac{B}{2} + \frac{B}{2n+1} \left(i - \frac{1}{2}\right) \\ x'_j &= -(10d + \frac{d}{2}) + d(j-1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, 2n+1 \quad j = 1, 2, \dots, 22$$

式中: d 为相邻烧嘴中心的横向间距, mm 。

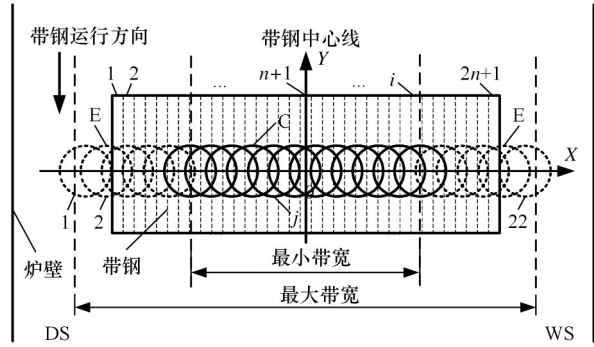


图4 带钢与烧嘴横向位置关系图

Fig. 4 Transverse position relationship of strip and burners

考虑到机组实际,只能整体控制中部和边部的烧嘴流量,以中部烧嘴的天然气流量为基准,对边部烧嘴引入一个折减系数 α_{NG} ,用其表示边部烧嘴相对于中部烧嘴的天然气流量折减力度,数值上等于边部烧嘴与中部喷嘴的天然气流量之比。任一烧嘴的天然气流量为

$$q_{vNGj} = \begin{cases} q_{vNG} & j = 6, 7, \dots, 17 \\ \alpha_{NG} q_{vNG} & j = 1, \dots, 5, 18, \dots, 22 \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_{vNGj} 为第 j 个烧嘴的天然气流量, m^3/s 。

对面积热流量 $q(r)$ 进行 y 方向上的积分,即可得到 x 方向上的线热流量,则在 x 方向上单个烧嘴以直接火焰冲击的方式作用在带钢上的线热流量为

$$q_j(x) = \int \frac{3}{\pi r_0^2} \varphi q_{vNGj} A \eta \exp(-3(\sqrt{(x^2 + y^2)}/r_0)^2) dy \quad (5)$$

式中: $q_j(x)$ 为 x 方向上第 j 个烧嘴以直接火焰冲击的方式作用在带钢上的线热流量, W/mm 。

以单元中心处的线热流量表示该单元的线热流量,则22个烧嘴以直接火焰冲击的方式共同作用时,带钢每个单元的线热流量为

$$\left. \begin{aligned} q_{li} &= \sum_{j=1}^{22} q_j(x_{ij}) \\ x_{ij} &= |x_i - x'_j| \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: q_{li} 为所有烧嘴以直接火焰冲击的方式作用在第 i 个带钢单元上的线热流量, W/mm ; x_{ij} 为第 i 个单元中心与第 j 个烧嘴对带钢冲击点中心的距离, mm 。

由图4可知,存在边部烧嘴处于完全空烧或部分空烧状态,其有效加热范围内并未有受热带钢,但依然在带钢以外释放热量,并且空烧烧嘴的数量、状态随加热带钢的宽度而变化。由于烧嘴以直接火焰冲击的方式对带钢传递的热量在有效加热范围 r_0 内的占比达到95%以上,再结合烧嘴的有效加热边界与带钢宽度边界的位置关系,则任一烧嘴在单位时间内的空烧热量均可按下式近似计算:

$$q_{l2j} = \begin{cases} \int_{-r_0}^{x'_i - x'_j} q_j(x) dx & x'_j - r_0 < x_1 \text{ 且 } j \leq 11 \\ 0 & \text{其他} \\ \int_{-(x'_j - x'_{2n+1})}^{r_0} q_j(x) dx & x'_j + r_0 > x_{2n+1} \text{ 且 } j \geq 12 \end{cases} \quad (7)$$

式中： q_{l2j} 为烧嘴 j 在单位时间内由直接火焰冲击作用在带钢宽度以外的热量，W； x_1 为带钢宽度上第一个小单元坐标。

空烧热量 q_{l2j} 以非火焰直冲的方式影响着带钢，将其称为补偿热量，则总补偿热量为

$$q_{l2}^* = \beta \sum_{j=1}^{22} q_{l2j} \quad (8)$$

式中： β 为补偿热量系数。

总补偿热量在宽度方向上对带钢的影响与侧墙炉壁以辐射的方式对带钢的影响相似，将总补偿热量以类侧墙辐射的方式作用到带钢上，如图5所示。

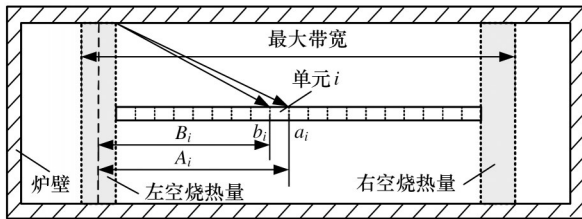


图5 炉内空烧热量影响模型

Fig.5 Furnace empty burning heat influence model

结合传热学中辐射传热二维垂直结构角系数的计算公式^[26]，左空烧热量对带钢的传热占比为

$$\left. \begin{aligned} \chi_{L,A_i} &= 1 + (A_i/l) - [1 + (A_i/l)^2]^{1/2} \\ \chi_{L,B_i} &= 1 + (B_i/l) - [1 + (B_i/l)^2]^{1/2} \\ A_i &= x_i + \frac{B}{2(2n+1)} - \left(-\frac{B_{\max}}{2} + \frac{B_{\max} - B}{4} \right) \\ B_i &= A_i - \frac{B}{(2n+1)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： χ_{L,A_i} 为左空烧热量对 a_i 点左侧带钢的传热占比； χ_{L,B_i} 为左空烧热量对 b_i 点左侧带钢的传热占比； A_i 为单元 i 右端点到左空烧热量中心线的距离，mm； B_i 为单元 i 左端点到左空烧热量中心线的距离，mm； l 为带钢表面到炉壁的距离，mm； B_{\max} 为直火加热炉可加热的最大带宽，mm。

根据角系数的可加性可知，左空烧热量对带钢单元 i 的传热占比为

$$\chi_{Li} = \chi_{L,A_i} - \chi_{L,B_i} \quad (10)$$

再根据对称性，可知右空烧热量对带钢单元 i 的传热占比为

$$\chi_{Ri} = \chi_{L,(2n+2-i)} \quad (11)$$

式中： $\chi_{L,(2n+2-i)}$ 为左空烧热量对 $2n+2-i$ 点左侧带钢的传热占比。

总补偿热量在带钢宽度方向上的分配趋势为

$$\chi_i = \chi_{Li} + \chi_{Ri} \quad (12)$$

带钢每个单元的补偿线热流量为

$$q_{2i} = \frac{(2n+1)\chi_i q_{l2}^*}{B \sum_{i=1}^{2n+1} \chi_i} \quad (13)$$

式中： q_{2i} 为第 i 个带钢单元得到的补偿线热流量，W/mm。

将热流量 q_{1i} 与 q_{2i} 相加，得到直接火焰冲击影响的横向总线热流量：

$$q_i = q_{1i} + q_{2i} \quad (14)$$

2.2 折减系数对线热流量的影响

为研究边部烧嘴天然气流量折减变化对带钢横向总线热流量的影响，采用上述模型，在中部烧嘴天然气流量相同的情况下，对不同宽度的带钢选用不同的折减系数，模拟计算该直火加热炉单区加热时带钢的横向总线热流量。直接火焰冲击影响下，不同宽度的带钢在不同折减系数下的横向总线热流量如图6所示。

由图6a可知，带钢宽度为1430 mm时两端的线热流量直线减小，这是由于所有烧嘴都在加热范围没有出现空烧情况且烧嘴排列呈现中间密集、边部稀疏所致。由图6b可知，带钢宽度为1300 mm时喷嘴均不处于完全空烧状态，只有最外侧两个喷嘴为部分空烧状态，因此两端的线热流量也会出现减小的情况。图6c、图6d中，边部喷嘴均有处于完全空烧状态的，两端的线热流量不存在直线减小情况。除最大宽度的带钢外，当折减系数为1时，带钢边部线热流量明显高于中部，这是空烧热量影响的结果；通过折减边部烧嘴天然气流量，可降低边部带钢的线热流量，使带钢边部与中部的线热流量之差减小，边部烧嘴天然气流量折减后线热流量会发生突变，突变位于半空烧边部喷嘴处。

通过对比图6可知，要使带钢宽度方向上的线热流量趋于均匀分布，越窄的带钢要越小的折减系数，即对边部烧嘴天然气流量折减力度越大。当折减系数相同时，不同宽度下线热流量相差较大，且呈现出宽度越小，线热流量整体越大，不同宽度下折减系数对带钢中线热流量的影响不同。这都是由于带钢宽度越窄，空烧喷嘴越多，产生的空烧热量增大，在此热量的影响下越窄规格的带钢线热流量越大。由图6可知，带钢宽度为1430 mm取折减系数为1、宽度为1300 mm取折减系数为0.9、宽度为1100 mm取折减系数为0.8、宽度为900 mm取折减系数为0.7时横向线热流量较为均匀，即沿带钢宽度方向线热流量较为均匀，使带钢在宽度方向的温度分布更加均匀。

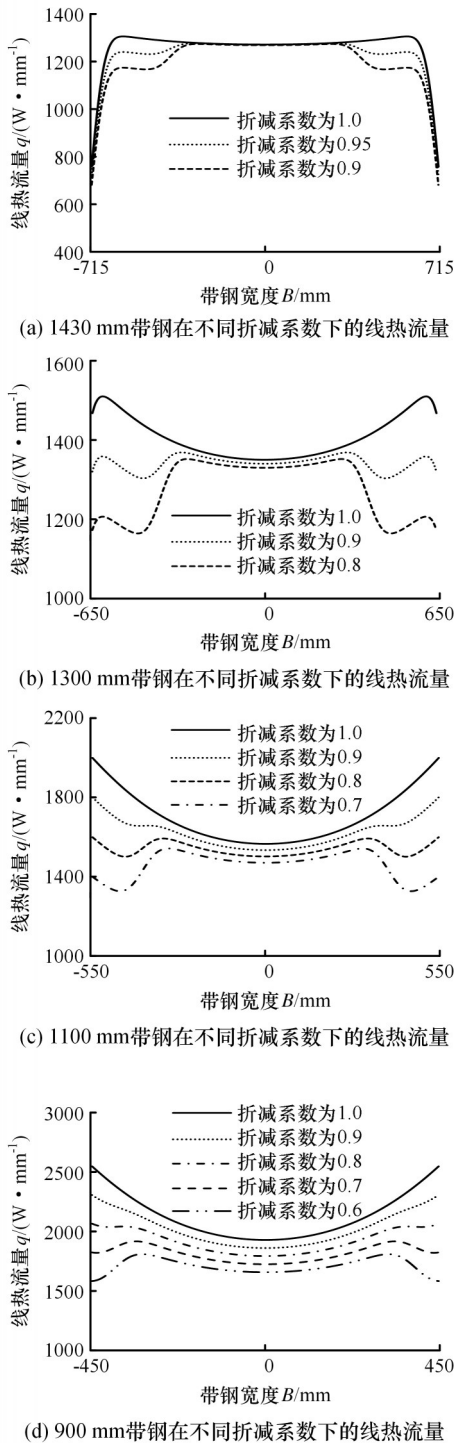


图6 不同折减系数和带钢宽度的线热流量
Fig.6 Heoct flow rate with different reduction coefficients and strip steel widths

2.3 直火加热段天然气流量控制技术的开发

线热流量 q_i 在带钢宽度方向上的分布表征着带钢在宽度方向上的受热情况,若带钢受热更加均匀,则带钢的温度分布必然更加均匀。不同折减系数 q_i 下带钢线热流量横向分布的均匀度系数为

$$G(\alpha_{NG}) = \frac{2n+1}{\sum_{i=1}^{2n+1} q_i} \sqrt{\sum_{i=1}^{2n+1} \left(q_i - \frac{1}{2n+1} \sum_{i=1}^{2n+1} q_i \right)^2} \quad (15)$$

这样,对于不同宽度的带钢,只需寻找一个适当的折减系数 α_{NG} ,通过调控边部烧嘴的天然气流量,使 q_i 在带钢宽度方向上尽可能均匀分布、使 $G(\alpha_{NG})$ 尽可能小,即可使带钢在宽度方向的温度分布更均匀。不同带宽下的折减系数具体求解流程如图7所示。在机组正常工作时收集带钢规格参数、物理参数等。为方便计算将带钢在横向划分为 $2n+1$ 个小微元,取 n 为80、折减系数变化步长为0.001。

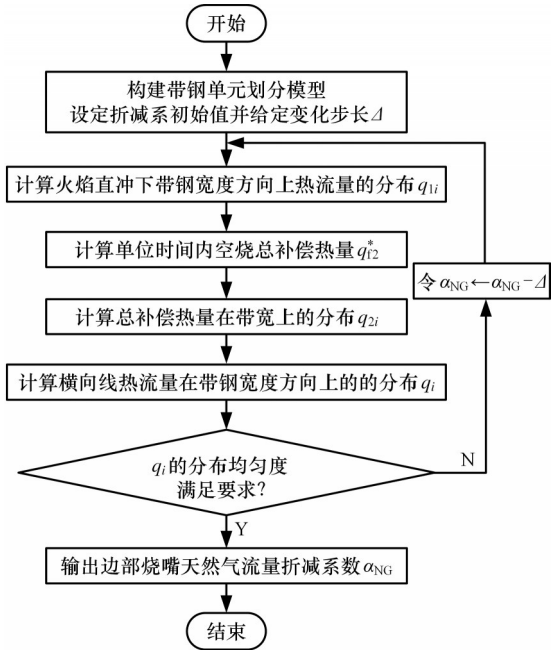


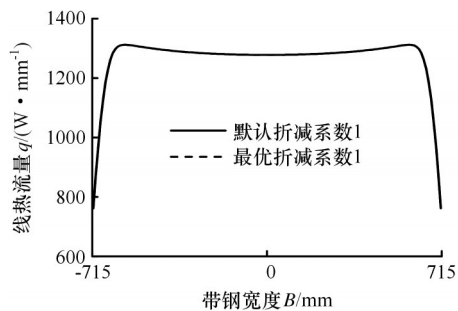
图7 天然气流量折减系数求解流程图

Fig.7 Natural gas flow reduction coefficient solution process

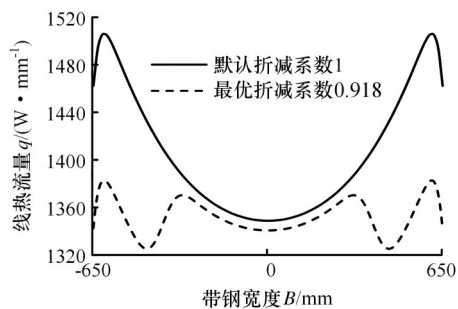
为了方便计算直火加热炉内带钢的横向温度分布与边部天然气喷嘴的最优折减系数,基于上述求解模型编制出一套直火加炉天然气流量控制软件,可以快速得出带钢的横向温度分布与边部天然气喷嘴的最优折减系数。当带钢宽度为1430 mm、1300 mm、1100 mm、900 mm,中部流量为12 m³/h时,最优折减系数分别为1、0.918、0.8、0.649,如图8所示,此时符合2.2节中的分析,且与现场实际生产相符。

3 连退机组直火加热工艺与控制技术的现场应用

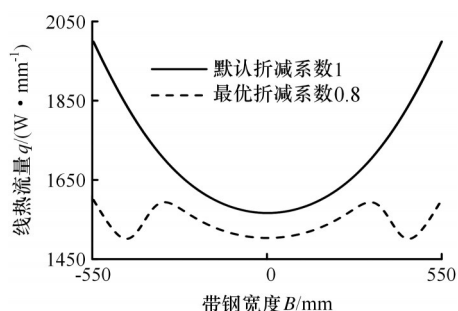
国内某连退机组加热工艺段采用直接火焰冲击加热技术,虽然在设计上烧嘴的布置可满足多种规格带钢的生产需求,但对于不同宽度的带钢,其边部的受热情况总是不同的。由于缺乏相应的天然气流量调整机制,在生产中容易导致带钢横向受热不均,使带钢在直火加热炉内运行不稳。



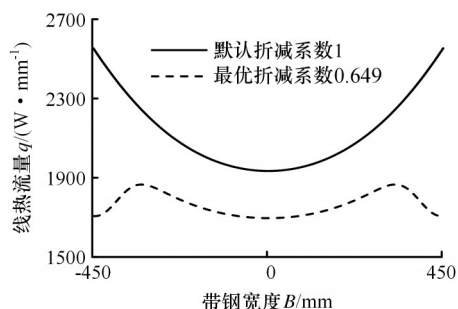
(a) 带宽为1430 mm带钢的最优折减系数



(b) 带宽为1300 mm带钢的最优折减系数



(c) 带宽为1100 mm带钢的最优折减系数



(d) 带宽为900 mm带钢的最优折减系数

图8 不同宽度带钢的最优折减系数

Fig.8 The optimal reduction coefficient of different strip steel widths

为解决这一问题,将直火加热工艺控制技术应用到该连退生产线,针对不同宽度规格的带钢,求取其适当的折减系数,以此来调节边部烧嘴的天然气流量,极大地提高了机组成品带钢的质量。以现场3种典型规格带钢的应用为例,生产过程中,中部烧嘴、边部烧嘴的天然气流量具体设定值以及折减系数如表1所示。

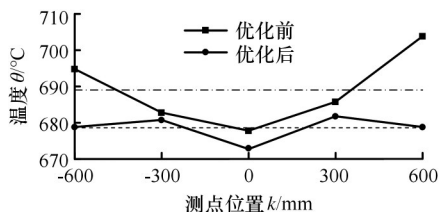
现场实际生产中,带钢平面上方布置有5个测温装置以便获取带钢实时温度。在未引入折减

表1 烧嘴天然气流量与折减系数

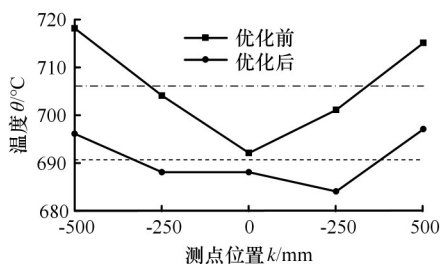
Tab.1 Burners natural gas flow and reduction coefficient

钢种	带宽/mm	单个烧嘴天然气流量/(m ³ ·h ⁻¹)		折减系数
		中部	边部	
1180DP	1300	12.6	11.21	0.89
1180DP	1100	12.1	9.44	0.78
1180DP	900	11.8	7.67	0.65

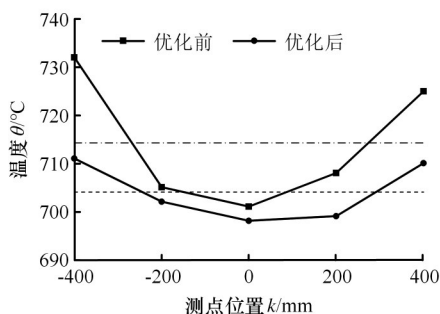
系数前,工人通过手动调节边部烧嘴开度控制烧嘴负荷。从图9中可以看出,这种方法调节烧嘴开度带钢横向温度分布均匀性差。引入折减系数后,通过天然气喷嘴的流量控制烧嘴负荷,测量其在直火加热炉出口处的温度。边部烧嘴天然气流量折减优化前后不同规格带钢的横向温度如图9所示。由图9可知,边部天然气流量未折减时,带钢边部温度较高且窄规格带钢最为明显,而经折减优化后带钢温度的横向分布更加均匀。同时,现场观测到直火加热炉出口处带钢的双边浪得到了明显改善,边部折减系数根据带钢宽度不同控制天然气流量,使得带钢横向温度分布趋于均匀,减少带钢因边部温度较高产生的双边浪,从而使



(a) 1300 mm带钢横向温度分布



(b) 1100 mm带钢横向温度分布



(c) 900 mm带钢横向温度分布

图9 折减优化前后不同规格的带钢横向温度

Fig.9 Different specification strip transverse temperature before and after reduction

带钢运行稳定性明显提高,减少了带钢与炉辊划伤的可能性。成品带钢的表面质量因此也得到了提高,且窄规格带钢的改善效果更佳,优化后的温度分布有助于提高成品合格率。

4 结论

1)根据直接火焰冲击加热带钢的特性,结合烧嘴与带钢的横向位置关系,基于高斯分布的直接火焰冲击热流密度模型建立了带钢横向线热流量模型,以此表征带钢宽度方向上的受热情况。

2)分析了不同宽度下折减系数对带钢横向线热流量的影响,发现要使不同规格的带钢横向均匀受热,边部烧嘴天然气流量需要进行不同程度的折减,进而以线热流量在带钢宽度方向上分布均匀度为优化目标,开发了一套直火加热段边部烧嘴天然气流量控制技术。

3)将此控制技术应用于现场机组,制定了加热不同规格带钢时的天然气流量调节机制,以典型带宽 1300 mm、1100 mm、900 mm 为例,折减系数分别取 0.89、0.78、0.65 时,带钢横向温度均匀分布,且直火加热炉出口处的双边浪现象得以明显改善,带钢在炉内运行的稳定性大大提高。

参考文献:

- [1] 刘宏民,于华鑫,王东城,等.冷轧带钢板形测控技术的发展状况和关键问题[J].钢铁,2022,57(11):22-32.
LIU Hongmin, YU Huaxin, WANG Dongcheng, et al. Development State and Key Problems on Flatness Measurement and Control Technology of Cold Strip Steel Rolling[J]. Iron & Steel, 2022, 57(11): 22-32.
- [2] 王军伟,黎红恒,蒋妍彦,等.首道次压下量对430带钢冷轧过程和表面质量影响[J].塑性工程学报,2020,27(8):92-97.
WANG Junwei, LI Hongheng, JIANG Yanyan, et al. Effect of the First Pass Reduction on Cold Rolling Process and Surface Quality of 430 Strip [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(8): 92-97.
- [3] 宋沙沙,桑圣峰,闻杨,等.1420 mm酸轧机组带钢板形分析与控制研究[J].轧钢,2022,39(5):108-112.
SONG Shasha, SANG Shengfeng, WEN Yang, et al. Analysis and Control Research on Strip Shape of 1420 mm PL-TCM[J]. Steel Rolling, 2022, 39(5):108-112.
- [4] 白振华,林威,王伟,等.热镀锌机组圆盘剪工艺参数优化技术的开发[J].钢铁,2022,57(1):159-166.
BAI Zhenhua, LIN Wei, WANG Wei, et al. Development of Optimization Technology for Disc Shear Process Parameters of Hot-dip Galvanizing Line[J]. Iron & Steel, 2022, 57(1):159-166.
- [5] 孙杰,陈树宗,王云龙,等.冷连轧关键质量指标与轧制稳定性智能优化控制技术[J].钢铁研究学报,2022,34(12):1387-1397.
SUN Jie, CHEN Shuzong, WANG Yunlong, et al. Intelligent Optimization Control Technology for Key Quality Indexes and Rolling Stability of Tandem Cold Rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(12):1387-1397.
- [6] 张理扬,万照堂,张文军.冷轧超高强钢退火板形优化技术研究进展[J].金属热处理,2022,47(11):230-237.
ZHANG Liyang, WAN Zhaotang, ZHANG Wenjun. Research Progress of Annealed Strip Flatness Optimization Technology for Cold-rolled Ultra-high-strength Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(11):230-237.
- [7] 齐海峰,李靖,唐伟,等.极薄规格退火板羽痕缺陷影响因素与控制措施[J].轧钢,2021,38(2):86-89.
QI Haifeng, LI Jing, TANG Wei, et al. Influence Factors and Control Measures of Feather Mark Defects on the Surface of Ultra-thin Gauge Annealed Sheet[J]. Steel Rolling, 2021, 38(2):86-89.
- [8] 刘亚星,方永,滕华湘,等.带钢退火关键工艺与产品质量综合控制技术概述[J].轧钢,2022,39(4):27-34.
LIU Yaxing, FANG Yong, TENG Huaxiang, et al. Overview of Key Process and Product Quality Comprehensive Control Technology of Strip Annealing[J]. Steel Rolling, 2022, 39(4):27-34.
- [9] LINDELL D, EKMAN T, PETTERSSON R. Fast and Efficient Annealing of Stainless Steel Strip Using Oxyfuel Burners[J]. Steel Research International, 2015, 86(5):557-566.
- [10] GRIPENBERG H, EICHLER R. Direct Flame Impingement: a New Oxy-fuel Based Technology for Continuous Annealing of Aluminium Strip [M] // Light Metals 2015. Cham: Springer International Publishing, 2015:423-425.
- [11] GRIPENBERG H, LODIN J. Preheating and Annealing of Cold Rolled Metal Strip: US20150275326 [P]. 2015-10-01.
- [12] 董芳尧,王道安.快速对流加热技术及其在锻造炉中的应用[J].工业炉,2011,33(2):19-20.

- DONG Fangyao, WANG Daoan. Rapid Convection Heating and Its Application in Forge Furnace[J]. Industrial Furnace, 2011, 33(2):19-20.
- [13] MALIKOV G K, LOBANOV D L, MALIKOV K Y, et al. Direct Flame Impingement Heating for Rapid Thermal Materials Processing [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(9):1751-1758.
- [14] CHANDER S, RAY A. Flame Impingement Heat Transfer: a Review[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(18/19):2803-2837.
- [15] RANGMARK L, EKMAN T. Direct Flame Impingement Burner:US8057222[P]. 2011-11-15.
- [16] 伍成波, 梁小平, 王雨. 金属冲击加热炉内流动及传热的数值模拟[J]. 钢铁, 1995, 30(3):58-62.
WU Chengbo, LIANG Xiaoping, WANG Yu. Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in Impinging Heating Furnace[J]. Iron and Steel, 1995, 30(3):58-62.
- [17] 朱梅, 刘峰, 谢安国, 等. 高速烧嘴退火炉炉温均匀性数值研究[J]. 冶金能源, 2009, 28(3):27-31.
ZHU Mei, LIU Feng, XIE Anguo, et al. Numerical Study on Furnace Temperature Uniformity of Annealing Furnace with High Speed Burners[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2009, 28(3):27-31.
- [18] BAUKAL C E. Heat Transfer in Industrial Combustion[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [19] 花福安, 张政, 李建平, 等. 直接火焰冲击加热技术的研究与开发[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2):168-173.
HUA Fuan, ZHANG Zheng, LI Jianping, et al. Research and Development of Direct Flame Impingement Heating Technology [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2):168-173.
- [20] 武斌, 姜希伟, 秦风华. 硅钢连退机组无氧化炉加热能力计算[J]. 工业炉, 2022, 44(1):41-45.
WU Bin, JIANG Xiwei, QIN Fenghua. Calculation of Heating Capacity of Non-oxidation Furnace of Silicon Steel Continuous Annealing Unit [J]. Industrial Furnace, 2022, 44(1):41-45.
- [21] 孙文权, 韩应锐, 袁铁衡. 基于变步长策略的宽带钢连续退火温度场预测模型研究[J]. 轧钢, 2022, 39(4):35-40.
SUN Wenquan, HAN Yingrui, YUAN Tieheng. Research on Prediction Model of Continuous Annealing Temperature Field of Wide Strip Based on Variable Step Size Strategy [J]. Steel Rolling, 2022, 39(4):35-40.
- [22] LISIENKO V G, SHLEIMOVICH E M. Improving the Thermal Characteristics of Furnaces and the Operating Conditions of the Lining by Improving Direct-flame-impingement Methods for Intensifying the Heating of Metal [J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2013, 54(3):188-195.
- [23] 高瑞宇. 薄带铸轧一温轧过程采用火焰直喷加热的带钢温度模型研究[D]. 沈阳:东北大学, 2018.
GAO Ruiyu. Research of Strip Temperature Model for Strip Casting-warm Rolling Process with Direct Flame Impingement [D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [24] WANG Ji, LIU Yujun, JI Zhuoshang, et al. Study on the Automatic Process of Line Heating for Pillow Shape Plate [J]. Journal of Marine Science and Application, 2006, 5(1):31-38.
- [25] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1990:145-147.
WU Chuansong. Numerical Analysis of Welding Thermal Process [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1990:145-147.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006:397-401.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006:397-401.

(编辑 王旻玥)

作者简介:杨永辉,男,1997年生,博士研究生。研究方向为平整、退火领域工艺参数优化及质量控制。E-mail: 2636981928@qq.com。白振华(通信作者),男,1975年生,教授。研究方向为冷轧、热轧、退火、平整、二次冷轧、涂镀过程产品质量控制等。E-mail: bai_zhenhua@aliyun.com。

本文引用格式:

杨永辉, 祁奔, 王浩宇, 等. 连退机组直火加热工艺与控制技术的开发[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2397-2404.

YANG Yonghui, QI Ben, WANG Haoyu, et al. Development of Direct Flame Impingement Heating Processes and Control Technology for Continuous Annealing Units [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2397-2404.