

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190510

## 二次冷轧机组带钢下表面润滑工艺补偿技术

刘亚星<sup>1</sup>, 张佳胜<sup>1</sup>, 白振华<sup>1,2</sup>, 崔亚亚<sup>3</sup>, 李秀军<sup>1</sup>

(1. 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 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, 河北 秦皇岛 066004; 3. 河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** 为了解决二次冷轧机组轧制过程中带钢上、下表面油膜厚度存在差异的问题,通过分析油膜厚度形成与演变机理,建立了二次冷轧机组带钢上、下表面析出油膜厚度计算模型。在此基础上,采用增加带钢下表面乳化液流量和乳化液配比浓度的方法,开发出一套二次冷轧机组带钢下表面润滑工艺补偿技术。通过该技术实现了二次冷轧机组带钢上、下表面轧制变形区油膜厚度均等的目标,同时,最大程度降低了带钢表面条状斑迹缺陷的发生率。并将该技术应用到国内某钢厂1 220二次冷轧机组,应用效果显著,典型钢种带钢上、下表面条状斑迹缺陷发生率大大降低,降低程度均在50%以上。

**关键词:** 二次冷轧; 乳化液; 流量; 配比浓度; 油膜厚度

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2020)07-0085-07

## Compensation technology of lubrication process for bottom of strip in double cold rolling unit

LIU Ya-xing<sup>1</sup>, ZHANG Jia-sheng<sup>1</sup>, BAI Zhen-hua<sup>1,2</sup>, CUI Ya-ya<sup>3</sup>, LI Xiu-jun<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the difference of oil film thickness between the upper and bottom surfaces of the strip in the double cold rolling, the calculation model of oil film thickness on the upper and bottom surfaces of the strip was established by analyzing the formation and evolution mechanism of oil film thickness. Then, according to the idea of increasing emulsion flow and emulsion ratio concentration on the bottom of strip, compensation technology for the lubrication process for bottom of strip in double cold rolling unit was developed. Through this technology, the thickness of the oil film in the deformation zone of the upper and bottom surfaces of the strip in double cold rolling is equal, and, maximum reduce the incidence of the strip speck defects. The technology is applied to a domestic 1 220 double cold rolling unit, the application effect is remarkable, typical strip surface patches defect rate is reduced greatly, reduce degree above 50%.

**Key words:** double cold rolling; emulsion; flow; ratio concentration; oil film thickness

二次冷轧产品能够以较薄的厚度满足金属包装产品的力学性能需求,有利于降低材料消耗、减轻成品自重、减少环境污染,可以在保证用户使用要求的前提下有效降低材料消耗与使用成本。与一次冷轧产品相比<sup>[1-5]</sup>,二次冷轧产品具有厚度更薄、强度更高、加工性能更好、表面质量更高的优点,较好地适应了冷轧包装用镀锡、镀铬板带产品的发展方向<sup>[6-9]</sup>。由于二次冷轧镀锡镀铬产品主要用于包装行业,因此对产品表面质量具有较高要求。与此同

时,轧制润滑在二次冷轧过程中对产品表面质量起着至关重要的作用,乳化液直喷系统可以在带钢进入辊缝之前在带钢表面形成较厚的润滑油膜,其润滑性能相对循环系统要好很多,被广泛应用于二次冷轧机组的轧制润滑,尤其用于高速、高强度的薄带钢轧制。但从现场实际生产中发现,二次冷轧之后的带钢上、下表面的表面粗糙度与光泽度存在很大差异,带钢表面条状斑迹缺陷时有发生,且带钢下表面缺陷发生率远远高于上表面。通过理论与试

**基金项目:** 河北省自然科学基金资助项目(E2016203385); 重型机械协同创新计划课题资助项目(ZX01-20140400-05)

**作者简介:** 刘亚星(1990—),男,博士生; **E-mail:** 315720257@qq.com; **收稿日期:** 2019-11-25

**通讯作者:** 白振华(1975—),男,博士,教授; **E-mail:** bai\_zhenhua@aliyun.com

验跟踪得知,造成二次冷轧带钢上、下表面差异性的根本原因是带钢上、下表面乳化液受力状态的差异而造成的轧制变形区油膜厚度的差异。对于带钢上表面,乳化液流量的损失主要来自乳化液从带钢两侧溢流。对于带钢下表面,由于重力作用,乳化液流量的损失主要来自乳化液喷射在带钢下表面的反射飞溅与滴落。

国内外研究学者针对二次冷轧轧制润滑已有较多的研究,比较典型的有, Azushima A 等<sup>[10-11]</sup>与 Nakanishi H 等<sup>[12]</sup>分析了乳化液粒径、乳化液浓度、轧制速度对轧制变形区油膜厚度、润滑性能、带钢表面质量的影响; Kimura Y 等<sup>[13]</sup>与 Fujita N 等<sup>[14-15]</sup>开发了混合润滑系统提高冷连轧高速轧制润滑性能,提高了冷连轧高速轧制润滑能力,通过动态控制混合润滑系统中直喷高浓度乳化液的流量,解决了薄带钢高速轧制时的振动问题; 崔亚亚等<sup>[16]</sup>与白振华等<sup>[17]</sup>研究了乳化液流量、浓度等润滑工艺参数对轧制润滑性能的影响,开发了二次冷轧机组乳化液流量与浓度综合优化设定技术,实现了在不发生打滑与热滑伤缺陷的前提下高速稳定轧制。但上述研究均没有考虑二次冷轧过程带钢上、下表面轧制润滑的差异性,并且,在二次冷轧生产领域内,对带钢表面条状斑迹缺陷的研究很少,现场缺乏有效的治理手段。本文在此背景下,对带钢上、下表面油膜状态的差异性进行研究,通过对带钢下表面乳化液流量与配比浓度设定值的合理补偿,达到带钢上、下表面轧制变形区油膜厚度一致的目的。

## 1 二次冷轧过程带钢上、下表面油膜厚度形成与演变机理分析

二次冷轧机组轧制过程中,在轧机入口侧采用直喷系统向进入辊缝前的带钢上、下表面分别喷淋一定配比浓度(5%~15%)的乳化液,形成厚度均匀的润滑油膜,实现轧制润滑。二次冷轧过程带钢上、下表面油膜厚度形成与演变机理如图 1 所示,并做如下定义: 辊缝前带钢上、下表面油膜厚度分别为  $\xi_{2Ss}$ 、 $\xi_{2Sx}$ , 轧制前区带钢上、下表面油膜厚度分别为  $\xi_{2s}$ 、 $\xi_{2x}$ , 变形区入口带钢上、下表面油膜厚度分别为  $\xi_{0s}$ 、 $\xi_{0x}$ , 变形区出口带钢上、下表面油膜厚度分别为  $\xi_{1s}$ 、 $\xi_{1x}$ , 轧机出口带钢上、下表面油膜厚度分别为  $\xi_{1Ss}$ 、 $\xi_{1Sx}$ , 轧机入口上、下工作辊表面油膜厚度分别为  $\xi_{2Rs}$ 、 $\xi_{2Rx}$ , 轧机出口上、下工作辊表面油膜厚度分别为  $\xi_{1Rs}$ 、 $\xi_{1Rx}$ 。

油膜厚度演变过程分析如图 2 所示,乳化液喷

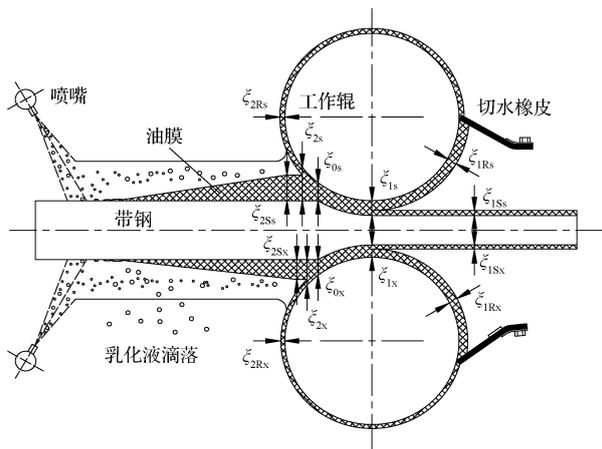


图 1 二次冷轧过程带钢上、下表面油膜厚度形成与演变  
Fig. 1 Schematic diagram of oil film formation and evolution on top and bottom strip surface in double cold rolling

淋到带钢上、下表面后,逐渐析出一定厚度的润滑油膜  $\xi_{2Ss}$ 、 $\xi_{2Sx}$ , 在轧制前区分别与轧机入口上、下工作辊表面油膜  $\xi_{2Rs}$ 、 $\xi_{2Rx}$  汇合叠加,形成轧制前区带钢上、下表面油膜  $\xi_{2s}$ 、 $\xi_{2x}$ ; 由于润滑油膜压力上升、厚度减薄,轧制变形区入口带钢上、下表面油膜厚度演变为  $\xi_{0s}$ 、 $\xi_{0x}$ ; 在轧制变形区,带钢厚度减薄、表面积增加,润滑油膜厚度减薄,轧制变形区出口带钢上、下表面油膜厚度演变为  $\xi_{1s}$ 、 $\xi_{1x}$ ; 在轧机出口侧,轧制变形区出口油膜厚度分为两部分:一部分为附着在带钢上、下表面的  $\xi_{1Ss}$ 、 $\xi_{1Sx}$ ,另一部分为附着在上、下工作辊表面的  $\xi_{1Rs}$ 、 $\xi_{1Rx}$ ; 随着轧辊的旋转,轧机出口侧工作辊表面油膜经由切水橡皮刮擦、冷却水冲刷以及中间辊挤压,部分油膜破坏损失,形成轧机入口带钢上、下表面油膜  $\xi_{2Rs}$ 、 $\xi_{2Rx}$ ,再次与辊缝前带钢表面析出的润滑油膜叠加,进入轧制辊缝润滑。

## 2 二次冷轧机组带钢上、下表面析出油膜厚度计算模型

设定轧制变形区带钢上、下表面平均油膜厚度分别为  $\xi_{aves}$ 、 $\xi_{avex}$ , 根据轧制变形区油膜秒流量不变条件,轧制变形区入口带钢上、下油膜厚度  $\xi_{0s}$ 、 $\xi_{0x}$  与轧制变形区出口带钢上、下油膜厚度  $\xi_{1s}$ 、 $\xi_{1x}$  见式(1)。

$$\begin{aligned} \xi_{0s} &= \frac{2(v_1 + v_R)}{v_0 + 2v_R + v_1} \xi_{aves} \\ \xi_{0x} &= \frac{2(v_1 + v_R)}{v_0 + 2v_R + v_1} \xi_{avex} \\ \xi_{1s} &= \frac{2(v_0 + v_R)}{v_0 + 2v_R + v_1} \xi_{aves} \\ \xi_{1x} &= \frac{2(v_0 + v_R)}{v_0 + 2v_R + v_1} \xi_{avex} \end{aligned} \quad (1)$$

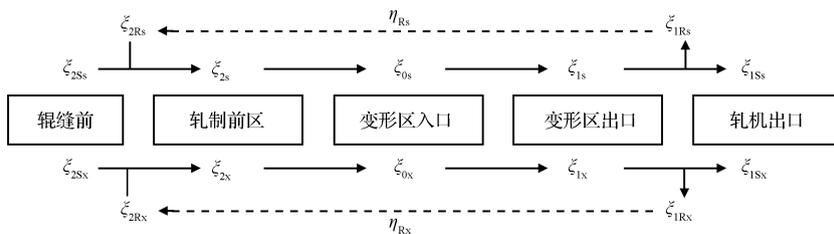


图2 油膜厚度变化分析

Fig. 2 Analysis chart of oil film thickness

式中:  $v_R$  为轧辊线速度, m;  $v_0$  为入口轧制速度,  $v_0 = v_1 h/h_0$ , m/min;  $v_1$  为出口轧制速度, m/min。

根据轧制前区润滑油膜流体动力学原理, 轧制前区入口带钢上、下表面油膜厚度  $\xi_{2s}$ 、 $\xi_{2x}$  可用式(2)表示。

$$\xi_{2s} = \frac{\xi_{0s}}{1 - \sqrt{\frac{20\beta\{1 - \exp[-\gamma(K - \sigma_0)]\}}{\gamma\eta_0(v_0 + v_R)}}} \xi_{0s} \quad (2)$$

$$\xi_{2x} = \frac{\xi_{0x}}{1 - \sqrt{\frac{20\beta\{1 - \exp[-\gamma(K - \sigma_0)]\}}{\gamma\eta_0(v_0 + v_R)}}} \xi_{0x}$$

式中:  $\beta$  为咬入角, rad;  $\gamma$  为压力黏度系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $K$  为带钢入口变形抗力, MPa;  $\sigma_0$  为后张应力, MPa;  $\eta_0$  为初始动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

根据轧制变形区出口带钢下表面油膜厚度在带钢与工作辊表面的分配比例, 轧机出口侧上、下工作辊表面油膜厚度  $\xi_{1Rs}$ 、 $\xi_{1Rx}$  见式(3)。

$$\xi_{1Rs} = \frac{Ra_{Rs}}{Ra_{Ss} + Ra_{Rs}} \xi_{1s} \quad (3)$$

$$\xi_{1Rx} = \frac{Ra_{Rx}}{Ra_{Sx} + Ra_{Rx}} \xi_{1x}$$

式中:  $Ra_{Ss}$ 、 $Ra_{Sx}$  分别为带钢上、下表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ ;  $Ra_{Rs}$ 、 $Ra_{Rx}$  分别为上、下工作辊表面粗糙度,  $\mu\text{m}$ 。

根据上、下工作辊从轧机出口侧旋转到轧机入口侧过程中工作辊表面油膜厚度剩余比例, 轧机入口侧上、下工作辊表面油膜厚度  $\xi_{2Rs}$ 、 $\xi_{2Rx}$  见式(4)。

$$\xi_{2Rs} = \eta_{Rs} \xi_{1Rs} \quad (4)$$

$$\xi_{2Rx} = \eta_{Rx} \xi_{1Rx}$$

式中:  $\eta_{Rs}$ 、 $\eta_{Rx}$  分别为上、下工作辊表面油膜厚度剩余率。

根据轧制前区与轧机入口侧上、下工作辊表面油膜叠加关系, 辊缝前带钢上、下表面析出油膜厚度  $\xi_{2Ss}$ 、 $\xi_{2Sx}$  见式(5)。

$$\xi_{2Ss} = \xi_{2s} - \xi_{2Rs} \quad (5)$$

$$\xi_{2Sx} = \xi_{2x} - \xi_{2Rx}$$

由式(1)~式(5)可知, 给定轧制变形区带钢上、下表面平均油膜厚度, 在轧制线速度、入口轧制速度、出口轧制速度、咬入角、压力黏度系数带钢入口变形抗力、后张应力、初始动力黏度、带钢上下表面粗糙度、上下工作辊表面粗糙度以及上下工作辊表面油膜厚度剩余率等参数已知的前提下, 即可求出辊缝前带钢上下表面析出油膜厚度。

### 3 二次冷轧机组带钢下表面乳化液流量与浓度补偿技术

#### 3.1 乳化液流量与配比浓度对油膜厚度影响机制分析

二次冷轧过程带钢表面析出油膜厚度主要由乳化液流量、乳化液配比浓度、轧制速度、乳化液流量剩余率、乳化液配比浓度析出率所决定。其中, 乳化液的流量与配比浓度决定了喷淋在带钢表面的乳化液中轧制油的总量, 轧制速度决定了单位时间内乳化液流量覆盖的带钢长度, 乳化液配比浓度析出率决定了喷淋在带钢表面乳化液中轧制油析出的比例, 乳化液流量剩余率决定了实际留存在带钢表面参与油膜析出的乳化液流量的比例。这样, 在大量理论与试验研究的基础上, 得出了乳化液流量与配比浓度对带钢上、下表面析出油膜厚度的影响机制模型, 见式(6)。

$$\xi_{2Ss} = 1000 \frac{QC}{Bv_0} \eta_c \eta_{Qs} \quad (6)$$

$$\xi_{2Sx} = 1000 \frac{QC}{Bv_0} \eta_c \eta_{Qx}$$

$$\eta_c = \eta_{c0} + \lambda_w \tanh\left(\lambda_t \frac{L_p}{v_0}\right) \exp(-\lambda_c C)$$

$$\eta_{Qs} = \exp\left(-\delta_{Qs} \frac{Q}{Bv_0} - \delta_{ts} \frac{L_p}{v_0}\right)$$

$$\eta_{Qx} = \exp\left(-\delta_{Qx} \frac{Q}{Bv_0} - \delta_{tx} \frac{L_p}{v_0}\right)$$

式中:  $Q$  为乳化液流量,  $L/\text{min}$ ;  $C$  为乳化液配比浓度, %;  $\eta_c$  为乳化液配比浓度析出率;  $\eta_{qs}$ 、 $\eta_{qx}$  分别为带钢上、下表面乳化液流量剩余率;  $B$  为带钢宽度,  $m$ ;  $\eta_{c0}$  为乳化液与带钢撞击配比浓度析出率;  $\lambda_w$  为乳化液配比浓度析出率润湿性影响系数;  $\lambda_t$  为乳化液配比浓度析出率时间影响系数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $\lambda_c$  为乳化液配比浓度析出率配比浓度影响系数;  $L_p$  为乳化液析出距离,  $m$ ;  $\delta_{qs}$ 、 $\delta_{qx}$  分别为带钢上、下表面乳化液流量剩余率流量影响系数,  $\text{mm}^{-1}$ ;  $\delta_{ts}$ 、 $\delta_{tx}$  分别为带钢上、下表面乳化液流量剩余率时间影响系数,  $\text{min}^{-1}$ 。

在此基础上,为进一步分析乳化液流量与配比浓度对轧制变形区平均油膜厚度的影响,选择典型规格 DR9 钢种产品,带钢轧制基本工艺参数见表 1,带钢表面析出油膜厚度模型相关计算系数见表 2。根据二次冷轧过程带钢表面析出油膜厚度影响机制模型与各区域油膜厚度之间的关系,分别模拟出带钢上、下表面乳化液流量与配比浓度随轧制变形区平均油膜厚度的变化趋势,如图 3 与图 4 所示。

表 1 带钢轧制基本工艺参数

Table 1 Basic parameters of strip rolling

参数名称	数值
入口厚度 $h_0/\text{mm}$	0.237
出口厚度 $h_1/\text{mm}$	0.160
乳化液流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	10.0
乳化液配比浓度 $C/\%$	8.0
乳化液析出距离 $L_p/\text{m}$	0.5
入口轧制速度 $v_0/(m \cdot \text{min}^{-1})$	540
出口轧制速度 $v_1/(m \cdot \text{min}^{-1})$	800

表 2 带钢表面析出油膜厚度模型计算系数

Table 2 Model calculation coefficients of plate out oil film thickness on strip surface

参数名称	数值
乳化液与带钢撞击配比浓度析出率 $\eta_{c0}$	0.136
乳化液配比浓度析出率润湿性影响系数 $\lambda_w$	0.785
乳化液浓度析出率时间影响系数 $\lambda_t/\text{min}^{-1}$	218.5
乳化液配比浓度析出率配比浓度影响系数 $\lambda_c$	6.243
带钢上表面乳化液流量剩余率流量影响系数 $\delta_{qs}/\text{mm}^{-1}$	9.56
带钢上表面乳化液流量剩余率时间影响系数 $\delta_{ts}/\text{min}^{-1}$	21.96
带钢下表面乳化液流量剩余率流量影响系数 $\delta_{qx}/\text{mm}^{-1}$	16.28
带钢下表面乳化液流量剩余率时间影响系数 $\delta_{tx}/\text{min}^{-1}$	31.54

由图 3 可以看出,随着轧制变形区平均油膜厚

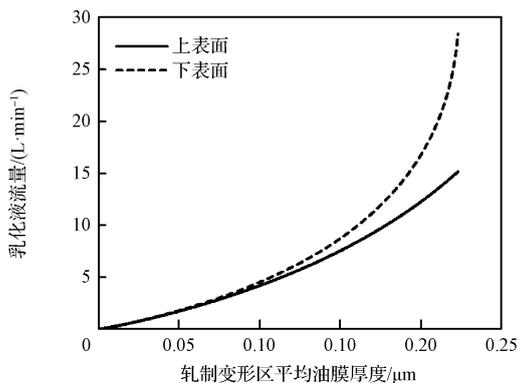


图 3 乳化液流量随轧制变形区油膜厚度的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of emulsion flow with oil film thickness in rolling deformation zone

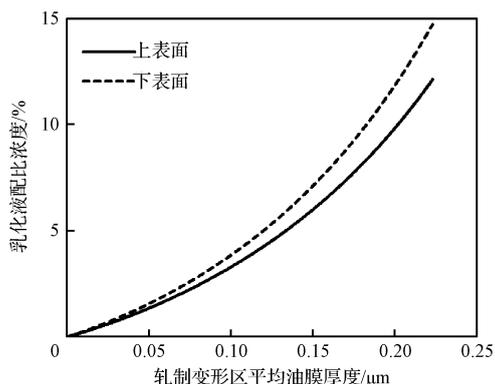


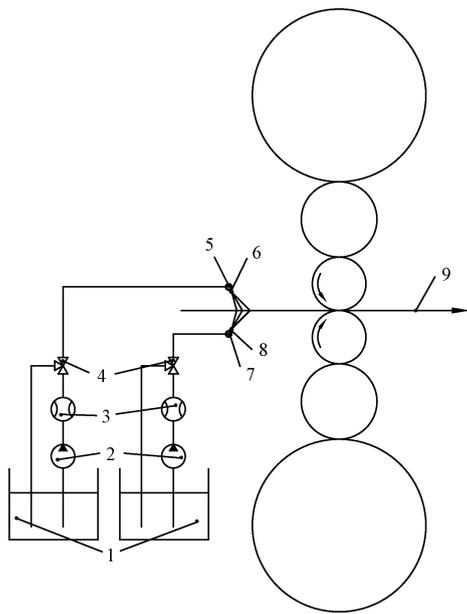
图 4 乳化液配比浓度随轧制变形区油膜厚度的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of emulsion ratio concentration with oil film thickness in rolling deformation zone

度的增加,带钢上、下表面乳化液流量变化曲线呈上升趋势,且曲率逐渐增大,同时,带钢上、下表面乳化液流量的差值也逐渐增大,图 4 中乳化液配比浓度的变化规律与图 3 相同。因此,为最大程度减小轧制变形区带钢上、下表面的油膜厚度差异性,保证成品带钢的表面质量,可对二次冷轧机组带钢下表面乳化液的流量与配比浓度进行一定程度的补偿。

### 3.2 二次冷轧机组带钢下表面润滑工艺补偿技术

带钢下表面润滑工艺补偿技术是通过合理地增加带钢下表面乳化液流量与配比浓度来弥补下表面较多的乳化液滴落损失。就现场实际生产而言,对于乳化液流量的控制,可通过流量计进行设定;而乳化液配比浓度大小取决于乳化液混合箱中的油水配比,考虑到乳化液混合箱体积较小,约为  $1 \text{ m}^3$ ,设置了 2 个乳化液混合箱用于调制不同配比浓度的乳化液,分别供应于带钢上、下表面,二次冷轧机组直喷系统布置如图 5 所示。



1—乳化液混合箱; 2—泵; 3—流量计;  
4—三通; 5—上喷淋架; 6—上喷嘴; 7—下喷淋架;  
8—下喷嘴; 9—带钢。

图 5 二次冷轧机组直喷系统布置

Fig. 5 Layout of direct injection system of double cold rolling unit

二次冷轧过程中带钢上表面的轧制润滑是比较良好的,为此,根据当前带钢上表面乳化液的流量与配比浓度计算出带钢上表面轧制变形区平均油膜厚度,再通过合理补偿带钢下表面的乳化液流量与配比浓度,使得下表面轧制变形区平均油膜厚度等于上表面轧制变形区平均油膜厚度。联立式(1)~式(6),在带钢轧制基本工艺参数与带钢表面析出油膜厚度模型计算系数已知的前提下,带钢上、下表面轧制变形区平均油膜厚度可表示成乳化液流量与配比浓度的函数,见式(7)。

$$\begin{aligned} \xi_{aves} &= f_s(Q, C) \\ \xi_{avex} &= f_x(Q + \Delta Q, C + \Delta C) \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\Delta Q$  为带钢下表面乳化液流量补偿量, L/min;  $\Delta C$  为带钢下表面乳化液配比浓度补偿量, %。

为此,以带钢上、下表面轧制变形区平均油膜厚度差异性最小为优化目标,同时考虑到带钢下表面轧制油的消耗尽可能最小,以带钢下表面乳化液流量补偿量  $\Delta Q$  与带钢下表面乳化液配比浓度补偿量  $\Delta C$  为优化变量,以乳化液流量与配比浓度的现场最大允许值为约束条件,建立目标函数,见式(8)。

$$\begin{aligned} G(X) &= \alpha_1 \frac{|\xi_{aves} - \xi_{avex}|}{\xi_{aves}} + \\ &\alpha_2 \frac{(Q + \Delta Q)(C + \Delta C) - QC}{QC} \end{aligned} \quad (8)$$

$$X = (\Delta Q, \Delta C)$$

$$\Delta Q \leq Q_{max} - Q$$

$$\Delta C \leq C_{max} - C$$

式中:  $\alpha_1$  为带钢上、下表面轧制变形区平均油膜厚度差异性控制系数;  $\alpha_2$  为带钢下表面轧制油消耗控制系数;  $Q_{max}$  为乳化液流量最大允许值, L/min;  $C_{max}$  为乳化液配比浓度最大允许值, %。

这样,二次冷轧机组带钢下表面润滑工艺补偿问题就转化为寻找合适的  $X = (\Delta Q, \Delta C)$ , 使得目标函数  $G(X)$  最小,具体技术流程如图 6 所示。

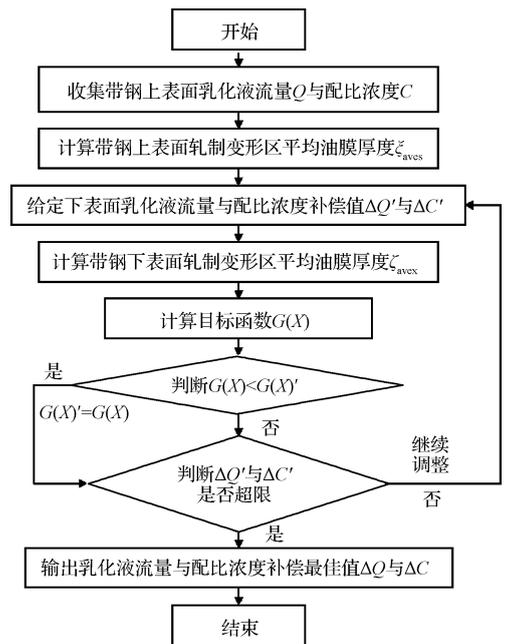


图 6 技术流程图

Fig. 6 Technique flow chart

需要说明的是,如果现场二次冷轧机组仅能配置 1 个乳化液混合箱,也就是说供应带钢上、下表面乳化液浓度是相等的,则令  $\Delta C = 0$ , 依然按照该方法寻优计算带钢下表面乳化液流量最佳值即可。

### 4 现场应用及效果分析

国内某钢厂 1 220 二次冷轧机组轧制过程中,成品带钢上、下表面质量存在严重差异性,且带钢表面条状斑迹缺陷时常发生,严重影响到成品质量与生产效益。为解决该问题,特选择 DR7M、DR7、DR8M、DR9 等 4 种典型钢种带钢,采用本文所述二

次冷轧机组带钢下表面润滑工艺补偿技术,对带钢下表面乳化液流量与配比浓度进行优化补偿,相应补偿值见表 3。由表 3 可以看出,带钢上、下表面乳化液流量与配比浓度差值从小到大排序依次为 DR7M、DR8、DR8M、DR9,也就是说,随着钢种强度的增加,轧制变形区平均油膜厚度增加,带钢

上、下表面乳化液流量与配比浓度差值增加。与之对应的补偿前后带钢上、下表面油膜厚度值见表 4。由表 4 可以看出,补偿前带钢上、下表面油膜厚度相差较大;补偿后带钢上、下表面油膜厚度基本相等。进一步验证了该模型的准确性与可行性。

表 3 典型钢种带钢下表面乳化液流量与配比浓度补偿值

Table 3 Compensation of emulsion flow and ratio concentration of bottom strip surface of typical steels

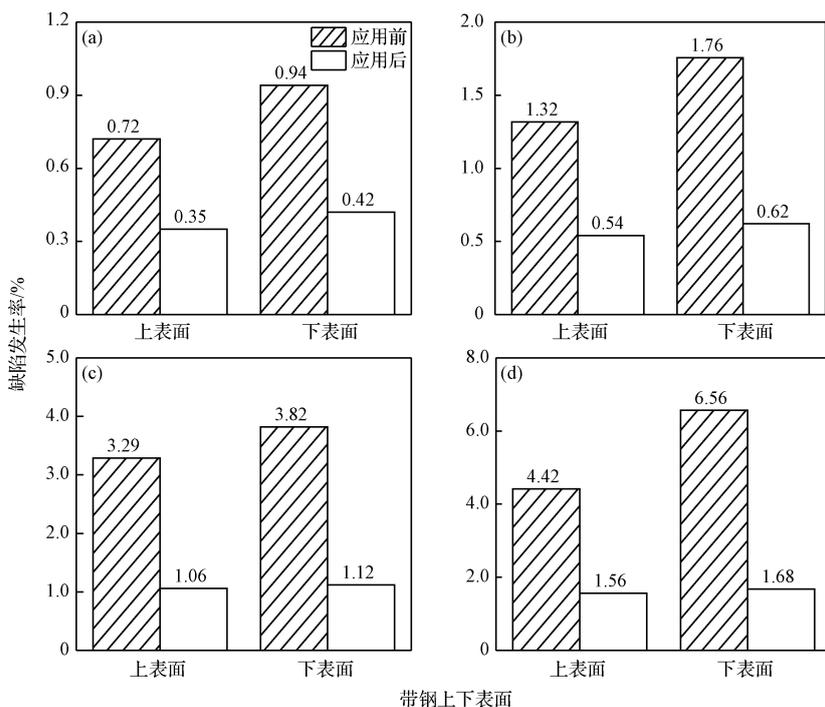
钢种	DR7M	DR7	DR8M	DR9
上表面乳化液流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	10.5	9.3	10.9	11.2
下表面乳化液流量 $Q+\Delta Q/(L \cdot \min^{-1})$	11.8	10.8	13.0	14.9
上、下表面乳化液流量差值 $\Delta Q/(L \cdot \min^{-1})$	1.3	1.5	2.1	3.7
上表面乳化液配比浓度设定值 $C/\%$	4.3	5.	7.1	9.6
下表面乳化液配比浓度设定值 $C+\Delta C/\%$	4.8	6.5	8.3	11.9
上、下表面乳化液配比浓度差值 $\Delta C/\%$	0.3	0.8	1.2	2.3

表 4 补偿前后带钢上、下表面油膜厚度值

Table 4 Oil film thickness values of upper and bottom strips before and after compensation

油膜厚度	DR7M	DR7	DR8M	DR9
上表面平均油膜厚度	0.093	0.129	0.160	0.214
补偿前下表面平均油膜厚度	0.081	0.105	0.142	0.183
补偿后下表面平均油膜厚度	0.091	0.128	0.157	0.210

通过该技术的应用,1 220 二次冷轧机组成品带钢上、下表面质量均得到了大幅度改善,经过 1 年的现场跟踪与数据统计,技术应用前后带钢上、下表面条状斑迹缺陷的发生率统计结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,典型钢种带钢上、下表面条状斑迹缺陷发生率大大降低,降低程度均在 50% 以上。



(a) DR7M 钢种; (b) DR8 钢种; (c) DR8M 钢种; (d) DR9 钢种。

图 7 典型钢种带钢表面条状斑迹缺陷发生率统计结果

Fig. 7 Statistical results of strip speck defect incidence of typical steels

## 5 结论

(1)二次冷轧过程带钢表面析出油膜厚度主要由乳化液流量、乳化液配比浓度、轧制速度、乳化液流量剩余率、乳化液配比浓度析出率所决定,并通过演变直接影响轧制变形区的油膜厚度,轧制变形区带钢上、下表面油膜厚度的差异性造成成品带钢上、下表面质量的差异性。

(2)轧制变形区带钢上、下表面油膜厚度与乳化液流量与配比浓度分别呈一一对应关系,具有不同的函数表达式,为使得轧制变形区带钢上、下表面油膜厚度相等,可通过补偿带钢下表面乳化液流量与配比浓度的方法增加带钢下表面的油膜厚度。

(3)合理补偿带钢下表面乳化液流量与配比浓度能够消除二次冷轧过程带钢上、下表面轧制润滑的差异性,起到改善带钢表面质量的作用,同时,该方法也是治理二次冷轧过程带钢条状斑迹缺陷的重要手段。

### 参考文献:

[1] 徐冬,张杰,李洪波,等. 冷轧带钢表面粗糙度影响因素及控制策略[J]. 中南大学学报:自然科学版,2017,48(1):112. (XU Dong,ZHANG Jie,LI Hong-bo,et al. Influence factors and control strategy of cold rolled strip surface roughness[J]. Journal of Central South University:Natural Science,2017,48(1):112.)

[2] 白振华,韩林芳,高健,等. 干平整中工作辊与带钢表面粗糙度对摩擦系数影响的研究[J]. 燕山大学学报,2012,36(1):18. (BAI Zhen-hua,HAN Lin-fang,GAO Jian,et al. Research on influence mechanism of roughness of working roll and strip surface on friction coefficient in process of dry temper rolling[J]. Journal of Yanshan University,2012,36(1):18.)

[3] 陈金山,李长生,曹勇. 轧辊粗糙度对不锈钢板带表面和工艺参数的影响[J]. 机械工程学报,2013,49(4):30. (CHEN Jin-shan,LI Chang-sheng,CAO Yong. Effects of roll roughness on surface and process parameters for stainless-steel strip[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013,49(4):30.)

[4] 徐冬,杨荃,王晓晨,等. 冷轧界面油膜厚度对表面形貌转印过程的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(1):160. (XU Dong,YANG Quan,WANG Xiao-chen,et al. Influence of lubrication film thickness on transfer of surface topography at cold rolling interface[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017,49(1):160.)

[5] 计江,胡洪,尤磊,等. 超薄镀锡原板平整及二次冷轧工艺装备的研发应用[J]. 轧钢,2018,35(1):49. (JI Jiang,HU

Hong,YOU Lei,et al. Development and application of skin pass and double cold-reduced mill processing for high quality ultra-thin uncoated tin-plated sheet[J]. Steel Rolling,2018,35(1):49.)

- [6] 张洪波,冯晓勇,李梦英. 镀锡用二次冷轧材(DR材)的研究进展与应用现状[J]. 河北冶金,2017(4):1. (ZHANG Hong-bo,FENG Xiao-yong,LI Meng-ying. Research progress and application status of double reduced materials for tin-plate[J]. Hebei Metallurgy,2017(4):1.)
- [7] 白振华,宋和川,钱承,等. 二次冷轧设备及工艺研究进展[J]. 塑性工程学报,2016,23(6):87. (BAI Zhen-hua,SONG He-chuan,QIAN Cheng,et al. Research development of double cold reduction equipment and process[J]. Journal of Plasticity Engineering,2016,23(6):87.)
- [8] 李秀军. 宝钢1220二次冷轧机组极薄镀锡板核心生产工艺的开发[J]. 上海金属,2007,29(5):41. (LI Xiu-jun. Exploitation of double cold reduction thin plate core production technology of baosteel 1 220 mm cold tandem mill[J]. Shanghai Metals,2007,29(5):41.)
- [9] 胡建军,文杰,于孟,等. DR9镀锡板板形控制技术研究与应 用[J]. 中国冶金,2018,28(6):37. (HU Jian-jun,WEN Jie,YU Meng,et al. Research and application of flatness control on DR9 tinplate[J]. China Metallurgy,2018,28(6):37.)
- [10] Azushima A,Inagaki S. Measurement and analysis of inlet oil film thickness in cold sheet rolling with oil-in-water emulsion[J]. Tribology Transactions,2009,52(4):427.
- [11] Azushima A,Inagaki S,Ohta H. Plating out oil film thickness on roll and workpiece during cold rolling with O/W emulsion[J]. Tribology Transactions,2011,54(2):275.
- [12] Nakanishi H,Saiki K,Hirayama T. Variation of oil introduction behaviour during oil-in-water emulsion rolling[J]. Materials Transactions,2013,54(8):1408.
- [13] Kimura Y,Fujita N,Matsubara Y,et al. High-speed rolling by hybrid-lubrication system in tandem cold rolling mills[J]. Journal of Materials Processing Technology,2015,216:357.
- [14] Fujita N,Kimura Y,Kobayashi K,et al. Estimation model of plate-out oil film in high-speed tandem cold rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology,2015,219:295.
- [15] Fujita N,Kimura Y,Kobayashi K,et al. Dynamic control of lubrication characteristics in high speed tandem cold rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology,2016,229:407.
- [16] 崔亚亚,李柏阳,白振华,等. 二次冷轧机组乳化液流量与浓度综合优化设定[J]. 钢铁,2018,53(2):40. (CUI Ya-ya,LI Bo-yang,BAI Zhen-hua,et al. Comprehensive optimization setting of emulsion flowrate and concentration for double cold reduction mill[J]. Iron and Steel,2018,53(2):40.)
- [17] 白振华,侯彬,宋和川,等. 冷连轧过程乳化液流量综合优化设定技术[J]. 钢铁,2017,52(3):58. (BAI Zhen-hua,HOU Bin,SONG He-chuan,et al. Comprehensive optimization setting technology of emulsion flow in cold rolling process[J]. Iron and Steel,2017,52(3):58.)