

# 高强度带钢表面粗糙度轧制转印规律及预测模型

张清东,张勃洋,马磊<sup>✉</sup>,李瑞,张雍

北京科技大学机械工程学院,北京 100083  
✉ 通信作者, E-mail: ustbmalei@sina.com

**摘要** 针对高强度带钢表面粗糙度的特殊要求和控制难题,采取批量工业生产实验和数理统计的方法,研究高强度带钢表面粗糙度的轧制转印及变化规律,以及轧机工作辊表面粗糙度的变化规律.确定了高强度带钢表面微观形貌由末机架决定,分别建立了高强度带钢表面粗糙度预测模型、轧制转印率模型和轧机工作辊表面粗糙度预测模型.比较了高强度带钢与普通强度带钢的轧制转印行为.研究结果可用于工业生产过程中预测高强度带钢表面粗糙度,合理安排冷轧轧制顺序和轧制计划,以及预测确定工作辊上下机时间节点.

**关键词** 高强度;带钢;轧制;表面质量;粗糙度;逐步回归分析  
**分类号** TG335

## Surface roughness rolling-transfer regularity and prediction model of high strength steel strips

ZHANG Qing-dong, ZHANG Bo-yang, MA Lei<sup>✉</sup>, LI Rui, ZHANG Yong

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
✉ Corresponding author, E-mail: ustbmalei@sina.com

**ABSTRACT** The surface roughness rolling-transfer and change law of high strength steel strips and the surface roughness change law of working rolls are studied through a batch of field experiments and analyzed by a statistical method to find out a control method of producing high strength steel strips with especially required roughness. Experimental results show that the surface morphology of high strength steel strips is determined by the end of the continuous rolling mill. A surface roughness prediction model and a rolling-transfer rate model of high strength steel strips and a surface roughness prediction model of working rolls are established in this paper. The rolling-transfer behaviors of high strength steel strips are compared with those of normal strength steel strips. These models can be used to predict the surface roughness of high strength steel strips during industrial production, help to order the cold rolling sequence and make a rolling plan more efficiently, and determine the roll replacing time.

**KEY WORDS** high strength steel; strip steel; rolling; surface quality; roughness; stepwise regression analysis

高强度钢板是钢铁工业的新产品,用于交通运输和工程机械装备机械零构件制造,具有显著的减重节材与节能减排效果.钢板表面微观形貌是其表面所具有的微观几何形状的统称,它通过轧制转印原理制备,也即在减薄或平整轧制工艺过程中,将工作辊表面微观形貌通过有/无润滑介质界面轧制塑性变形转印到带钢上而形成.钢板表面微观形貌的储油性是评价在

冲压成形时钢板表面微观形貌对于施以润滑剂后板料与模具表面之间的摩擦行为改善影响的指标,它对于板料成形工艺和成形质量有重要影响.因此,高强度钢板用于冲压成形制造机械零构件,对于钢板表面微观形貌提出更高要求.

目前,冲压成形用高强度钢板对于表面微观形貌的要求主要以粗糙度参数 Ra 值描述,因此粗糙度 Ra

值成为高强度钢板的主要质量控制指标之一<sup>[1]</sup>。在机械零部件冲压成形过程中,板料保持适当的粗糙度及峰值密度,能形成众多“微油池”,有利于润滑降低摩擦,防止如图1所示的擦伤、拉毛等缺陷的发生,提高钢板的冲压成形性和成形质量<sup>[2]</sup>,粗糙度Ra值较高的钢板有更宽的成形空间范围<sup>[3]</sup>。针对高强度钢板表面微观形貌储油性的研究刚刚开始,但在机械密封及发动机制造等领域<sup>[4-5]</sup>,通过改变摩擦副表面微观形貌进而降低摩擦副之间的摩擦磨损或增大密封部件密封性的研究已开展几十年并取得丰富成果。这些研究因其问题与钢板表面微观形貌储油性具有类似物理机制而很有参考价值。



图1 RP153-980B 冷轧高强度钢板冲压拉毛缺陷

Fig. 1 Stamping galling of RP153-980B cold-rolled high-strength steel

钢板表面粗糙度的轧制转印生成,涉及轧制中宏观和介观尺度下的弹塑性变形和弹塑接触界面摩擦磨损润滑行为,与钢板及轧辊的材质与硬度密切相关,因此有关研究首先针对轧制过程展开。实验和基于实测数据的数理统计方法是研究轧制过程带钢表面微观形貌转印的主要手段,文献[6-19]都曾对工作辊表面粗糙度的轧制转印传递进行了研究,定义反映粗糙度传递规律的转印率,建立带钢表面粗糙度预测模型和工作辊粗糙度衰减模型,并用于指导生产。近年来,钢板表面微观形貌轧制转印研究不断深化,开始从微观尺度粗糙峰弹塑性接触角度进行建模。文献[20-40]都曾应用粗糙峰接触模型分析表面粗糙度的轧制转印问题,建立带钢粗糙度预测模型。

因此,为了探索高强度钢板表面微观形貌轧制转印控制技术,满足成形用高强度钢板对于粗糙度的特殊要求,在国内外已取得针对普通强度级别钢板表面

微观形貌轧制转印的丰富研究成果的基础上,从高强度钢板表面微观形貌轧制转印入手,研究高强度带钢表面粗糙度的轧制转印规律和预测模型。

## 1 冷轧高强度带钢表面粗糙度转印规律的实验研究

在冷连轧退火生产工艺流程中,需要在冷连轧末机架或冷连轧末道次控制高强度带钢表面粗糙度,使其在退火平整之前已具有高的表面粗糙度。已知某厂五连轧机组生产成形用高强/超高强钢板时,1#~4#机架工作辊为磨削工作辊,5#机架工作辊为电火花毛化工作辊。因此需首先明确决定钢板表面微观形貌的生产机架,并在此基础上进行数理统计建模分析。

### 1.1 带钢表面微观形貌轧制转印的实验研究

针对此生产机组开展生产实验研究,通过现场取样,并采用美国Rtec公司生产的WLI1000白光干涉三维形貌仪(测量精度达纳米级别),实测取样钢板表面微观形貌。将取样钢板表面微观形貌与磨削工作辊生产带钢表面微观形貌进行对比分析,如图2~图4所示。

由图2和图3可知,对比取样电火花毛化钢板和磨削钢板三维表面微观形貌,发现两者的三维表面微观形貌差别很大。取样钢板表面微观形貌存在明显的凸峰和凹谷,磨削钢板表面存在明显的磨削纹理。对比两者二维表面轮廓,发现取样电火花毛化钢板表面二维轮廓沿轧制向和板宽向差别不大,而磨削钢板表面轧制向和板宽向表面二维轮廓差别很大。同时,分别将上述两种钢板表面二维轮廓曲线进行快速傅里叶(FFT)变换和计算其功率谱密度,并进行对比分析,如图4所示,发现电火花毛化钢板在低频时振幅比较大,且二者的频率范围集中在 $40 \text{ mm}^{-1}$ 以下,对应二维表面轮廓波长范围为 $25 \mu\text{m}$ 以上,对比磨削钢板发现,磨削钢板表面频率衰减很快,其频率范围集中在 $10 \text{ mm}^{-1}$ 以下,对应二维表面轮廓波长范围在 $100 \mu\text{m}$ 以上,这与实测观察到磨削轧辊生产钢板表面三维形貌存在明显的磨削纹理一致。针对两种钢板表面x方向和y方

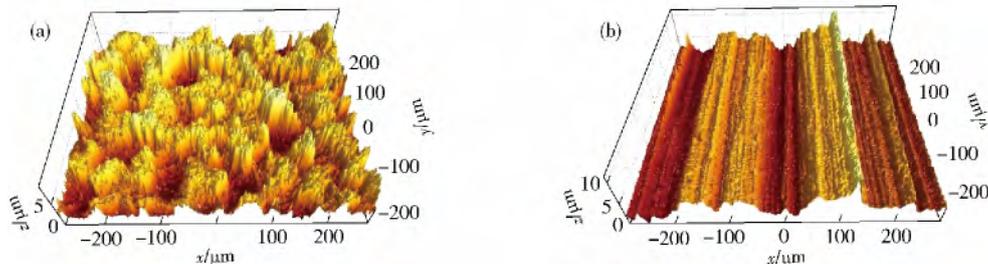


图2 电火花毛化(a)和砂轮磨削工作辊(b)轧制钢板三维表面微观形貌对比

Fig. 2 3D surface micro-morphologies of steel strips made with the electro-discharge textured work roll (a) and the grinding work roll (b)

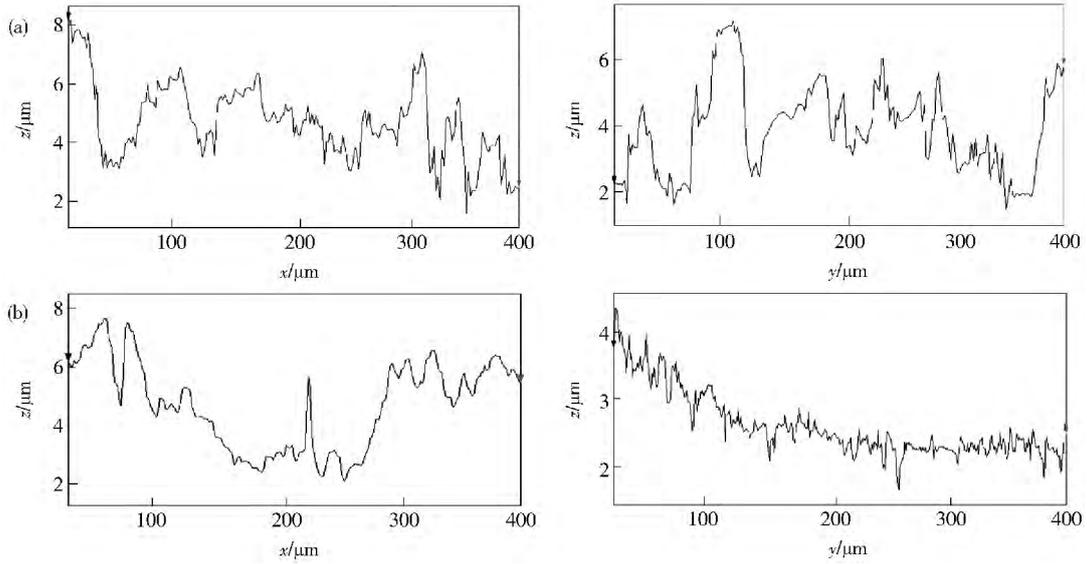


图 3 电火花毛化 (a) 和砂轮磨削工作辊 (b) 轧制钢板二维表面轮廓对比

Fig. 3 2D surface profiles of steel strips made with the electro-discharge textured work roll (a) and the grinding work roll (b)

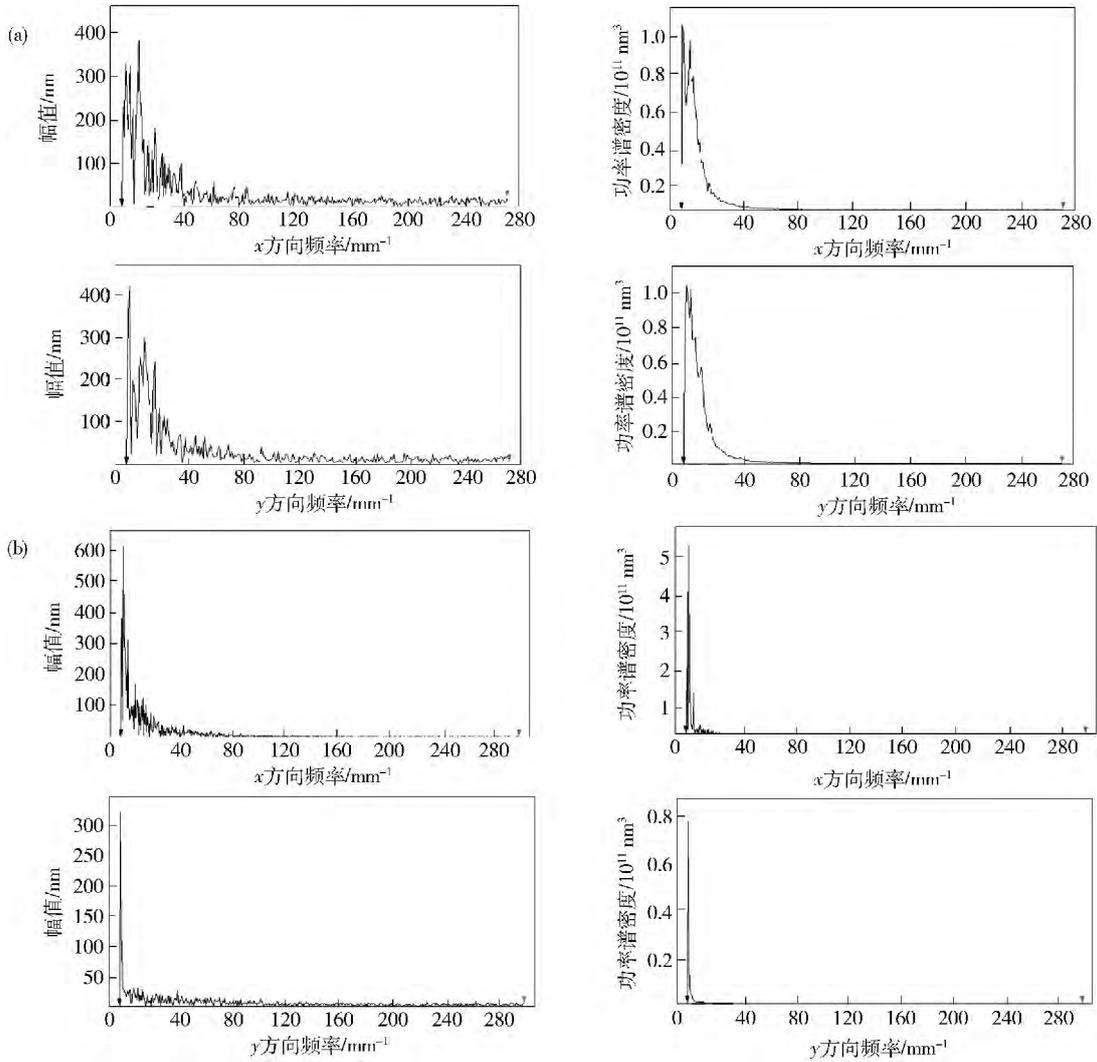


图 4 电火花毛化 (a) 和砂轮磨削工作辊 (b) 轧制钢板频域特性对比

Fig. 4 Frequency-domain characteristics of steel strips made with the electro-discharge textured work roll (a) and the grinding work roll (b)

向频率特性进行分析,发现电火花毛化钢板表面不存在明显的差异,而磨削钢板表面  $x$  方向和  $y$  方向表面频率特性差异十分显著,这与三维表面形貌和二维轮廓对比所得结论一致。

由此可知,冷连轧机组 5<sup>#</sup> 机架电火花毛化工作辊,可完全破坏前四架轧机砂轮磨削工作辊表面轧制生成的具有磨削纹理的带钢表面微观形貌,并形成新的具有电火花毛化织构特征的钢板表面微观形貌。在冷连轧过程中,当仅第 5 机架采用电火花毛化工作辊,前面机架采用砂轮磨削工作辊时,决定轧后带钢表面微观形貌的是第 5 机架工作辊表面。

## 1.2 轧制工艺参数对钢板表面粗糙度的影响规律

实测选用的粗糙度测量仪器是时代公司 TR201 手持式粗糙度仪,能够显示的最小粗糙度  $R_a$  值为  $0.001 \mu\text{m}$ 。按照工业生产的节奏,在生产过程中每隔

3~5 卷抽查一卷采集数据。测量分别在展开钢卷尾部的上下表面、驱动侧 200 mm 位置、中部和离操作侧 200 mm 位置多次进行。

实测以一对工作辊的一个服役周期为一个批次,完成 5 个批次的带钢表面粗糙度数据的跟踪实测,共测量了 122 卷带钢的表面粗糙度和其他数据,包括带钢表面粗糙度、工作辊初始辊面粗糙度、轧制带钢长度即轧制里程、钢卷号、高强钢的规格、第 5 机架轧制力、第 5 机架压下量、高强钢变形抗力等数据。为了研究粗糙度随各影响因素变化的宏观规律,运用 Origin Pro 建立了如图 5 的散点图,分析高强钢表面粗糙度与各影响因素之间的关系。它们分别反映带钢宽度  $B$ 、轧制带钢长度  $L$ 、第 5 机架单位板宽轧制力  $f$ 、第 5 机架出口带钢厚度  $h$ 、第 5 机架压下量  $\Delta h$  等因素变化与带钢表面粗糙度变化的关系。

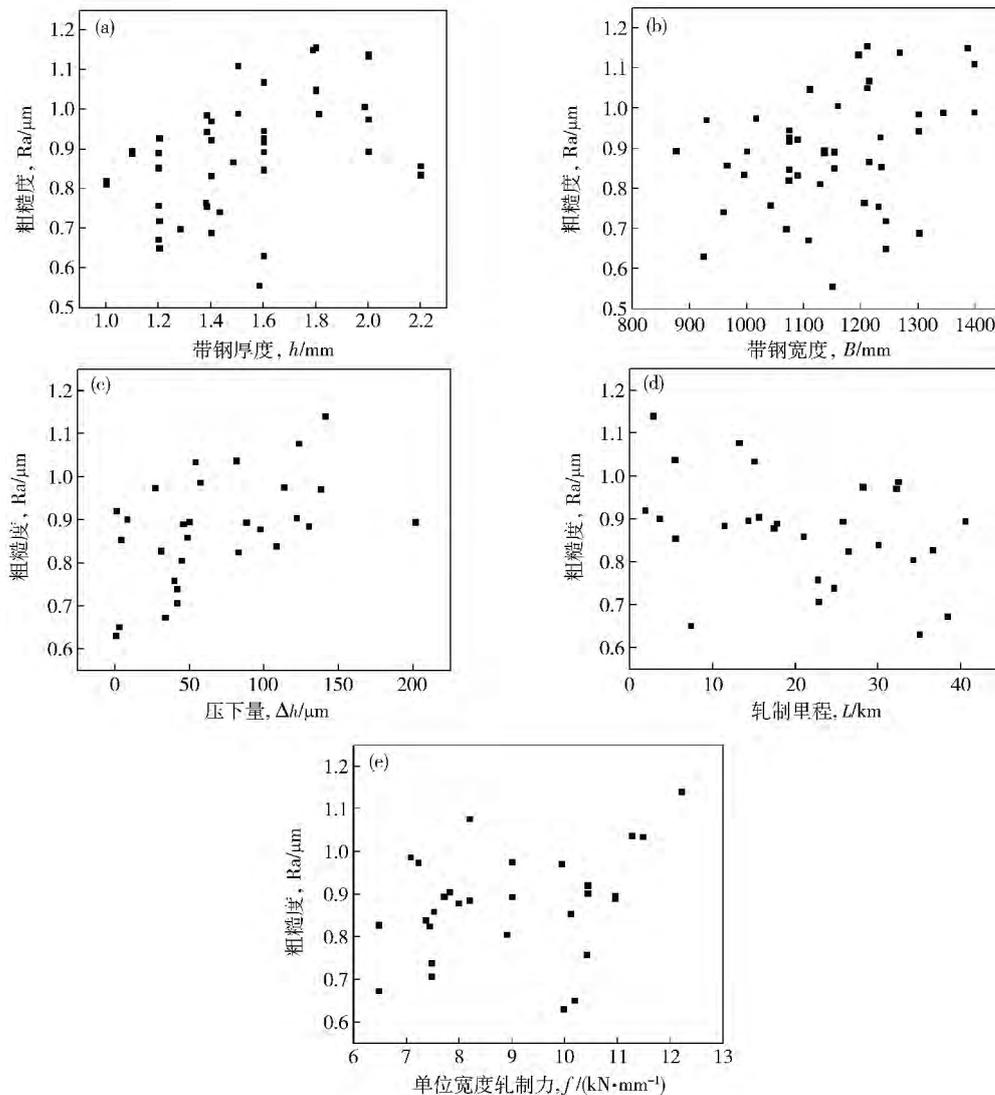


图 5 高强度带钢表面粗糙度随轧制工艺参数的变化。(a) 出口厚度;(b) 带钢宽度;(c) 轧制压下量;(d) 带钢轧制长度;(e) 轧制力

Fig. 5 Variation of high-strength steel surface roughness with rolling process parameters: (a) exit thickness; (b) strip width; (c) rolling reduction; (d) strip rolling length; (e) rolling force

由图 5 可见,高强度带钢表面粗糙度轧制转印与这 5 个因素都相关且存在一定的规律性,但随其变化的规律不一致,数据分布较为分散.其次,相对而言,压下量、轧制带钢长度和出口厚度对带钢表面粗糙度轧制转印的影响规律较为明显,压下量及厚度越大则粗糙度越大,轧制里程越长则粗糙度越小.第三,单位宽度轧制力对于粗糙度的影响没有表现出像压下量那样明显的规律,可能与带尾降速轧制时轧制力波动以及带钢强度加工硬化后仍在一定范围内变化有关.第四,带钢宽度对于轧制转印的影响似无明显规律.第五,分析认为实验数据分散可能与轧制过程乳化液波动,尤其是带尾降速轧制导致辊缝润滑状态不稳定有关,但目前无法针对乳化液和轧制速度进行粗糙度实验研究.

## 2 高强度带钢表面粗糙度轧制转印过程建模

### 2.1 高强度带钢表面粗糙度预测模型

基于批量工业生产实验数据,采用逐步回归分析方法建立粗糙度与各影响因素之间的关系模型.

根据逐步回归分析的基本原理,首先确定逐步回归分析的因变量和自变量.因变量为所要预测的带钢表面粗糙度  $Ra^S$  的某种量化表示  $Ra^S/Ra_0^R$ ,其中  $Ra_0^R$  为工作辊的初始粗糙度.自变量为带钢表面粗糙度影响因素(带钢的厚度  $h$ ,mm;第 5 机架压下量  $\Delta h$ , $\mu\text{m}$ ;单位宽度轧制力  $f$ , $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;轧制带钢长度  $L$ ,km;带钢的变形抗力  $q$ ,MPa)的某种量化表示,分别为  $h$ 、 $h^2$ 、 $h^3$ 、 $\Delta h$ 、 $\Delta h^2$ 、 $\Delta h^3$ 、 $f$ 、 $f^2$ 、 $f^3$ 、 $\ln(L+1)$ 、 $[\ln(L+1)]^2$ 、 $[\ln(L+1)]^3$ 、 $\ln(1+\Delta h)$ 、 $[\ln(1+\Delta h)]^2$ 、 $[\ln(1+\Delta h)]^3$ 、 $\ln h$ 、 $(\ln h)^2$ 、 $(\ln h)^3$ 、 $h\Delta h$ 、 $(h\Delta h)^2$ 、 $(h\Delta h)^3$ 、 $(1000f/q)$ 、 $(1000f/q)^2$ 和 $(1000f/q)^3$ 共计 24 个.

其次准备数据,确定回归分析模型的数学表达式.取实测数据中 30 组数据带入计算,则粗糙度逐步回归分析的数学模型为:

$$x_{\alpha n} = \beta_0 + \beta_1 x_{\alpha 1} + \beta_2 x_{\alpha 2} + \dots + \beta_{n-1} x_{\alpha(n-1)} + \varepsilon_{\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, 30, n = 25. \quad (1)$$

式中  $x_{\alpha n}$  为因变量  $Ra^S/Ra_0^R$ ,  $x_{\alpha 1}$ ,  $x_{\alpha 2}$ ,  $\dots$ ,  $x_{\alpha(n-1)}$  等依次代表上面确定的 24 个自变量,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\dots$ ,  $\beta_{n-1}$  是 25 个待估计参数,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\dots$ ,  $\varepsilon_{\alpha}$  是 30 个相互独立且服从同一正态  $N(0, \sigma)$  的随机变量.

最终建立如下的带钢表面粗糙度变化预测数学模型:

$$\begin{aligned} Ra^S = & a_0 Ra_0^R + a_1 \Delta h^2 Ra_0^R + a_2 L Ra_0^R + \\ & a_3 \ln(L+1) Ra_0^R + a_4 q_k Ra_0^R + a_5 (\ln h) Ra_0^R + \\ & a_6 [\ln h]^3 Ra_0^R + a_7 [\ln(1+\Delta h)] Ra_0^R + \\ & a_8 [\ln(1+\Delta h)]^3 Ra_0^R. \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $Ra^S$  为第 5 机架出口带钢表面粗糙度预测

值,  $\mu\text{m}$ ;  $Ra_0^R$  为第 5 机架工作辊初始粗糙度,  $\mu\text{m}$ ;  $h$  为入口带钢厚度, mm;  $L$  为轧制里程, km;  $q_k$  为单位宽度轧制力与变形抗力的比值 ( $1000f/q$ );  $\Delta h$  为第 5 机架压下量,  $\mu\text{m}$ .  $a_0 = 1.64097$ ,  $a_1 = -1.84601 \times 10^{-5}$ ,  $a_2 = 3.47153 \times 10^{-5}$ ,  $a_3 = -0.498963$ ,  $a_4 = -0.0658482$ ,  $a_5 = -0.710724$ ,  $a_6 = 0.631229$ ,  $a_7 = -0.0664079$ ,  $a_8 = 0.00623496$ . 该模型的相关性指标  $R^2$  值为 0.997235, 可较准确预测高强钢表面粗糙度, 预测结果如表 1 所示.

表 1 粗糙度预测模型预测结果和实测值及误差率

Table 1 Model predicted and measured roughness and the corresponding error rate

钢卷序号	实测值/ $\mu\text{m}$	计算值/ $\mu\text{m}$	误差率/%
1	0.921	0.908	-1.43
2	0.901	0.884	-1.91
3	1.037	1.018	-1.87
4	0.885	0.870	-1.68
5	1.077	1.048	-2.70
6	1.034	1.018	-1.57
7	0.904	0.887	-1.85
8	0.878	0.859	-2.21
9	0.859	0.844	-1.75
10	0.707	0.708	0.19
11	0.824	0.814	-1.16
12	0.974	0.961	-1.33
13	0.839	0.809	-3.50
14	0.987	0.970	-1.72
15	0.805	0.783	-2.65
16	0.827	0.818	-1.10
17	0.673	0.660	-1.87

### 2.2 高强度带钢表面粗糙度转印率预测模型

同建立粗糙度预测模型一样,首先确定逐步回归分析的因变量和自变量.因变量为所要预测的转印率  $\lambda$ ;自变量为前面分析过的转印率影响因素(带钢的厚度  $h$ ,mm;压下量  $\Delta h$ , $\mu\text{m}$ ;单位宽度轧制力  $f$ , $\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;变形抗力  $q$ ,MPa)的某种量化表示,分别为  $\ln(1+\Delta h)$ 、 $[\ln(1+\Delta h)]^2$ 、 $[\ln(1+\Delta h)]^3$ 、 $\ln h$ 、 $(\ln h)^2$ 、 $(\ln h)^3$ 、 $1000f/q$ 、 $(1000f/q)^2$ 和 $(1000f/q)^3$ ,共计 9 个.

其次,准备数据,确定回归分析模型的数学表达式.取 12 组实测数据带入计算,则数学模型为:

$$x_{\alpha n} = \beta_0 + \beta_1 x_{\alpha 1} + \beta_2 x_{\alpha 2} + \dots + \beta_{n-1} x_{\alpha(n-1)} + \varepsilon_{\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, 12, n = 10. \quad (3)$$

式中:  $x_{\alpha n}$  为因变量  $\lambda$ ;  $x_{\alpha 1}$ ,  $x_{\alpha 2}$ ,  $\dots$ ,  $x_{\alpha(n-1)}$  为前述 9 个自变量;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\dots$ ,  $\beta_{n-1}$  为 10 个待估计参数;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\dots$ ,  $\varepsilon_{\alpha}$

为 12 个相互独立且服从同一正态  $N(0, \sigma)$  的随机变量。

建立如下能够预测表面粗糙度的转印率的数学模型:

$$\lambda = b_0 + b_1 \ln(1 + \Delta h) + b_2 q_k^2. \quad (4)$$

式中  $b_0 = 0.207147$ ,  $b_1 = 0.00102798$ ,  $b_2 = 0.162203$ . 该模型的相关性指标  $R^2$  值为 0.872019, 可较准确预测转印率。

### 2.3 轧机工作辊表面粗糙度磨损衰减的预测模型

由前面的分析可以知道, 第 5 机架出口表面粗糙度可以表示为

$$Ra^S = \lambda \cdot Ra^R. \quad (5)$$

式中  $Ra^S$  为第 5 机架出口表面粗糙度,  $\lambda$  为第 5 机架带钢表面粗糙度转印率,  $Ra^R$  为第 5 机架工作辊表面粗糙度. 则  $Ra^R$  可表示为

$$Ra^R = \frac{Ra^S}{\lambda}. \quad (6)$$

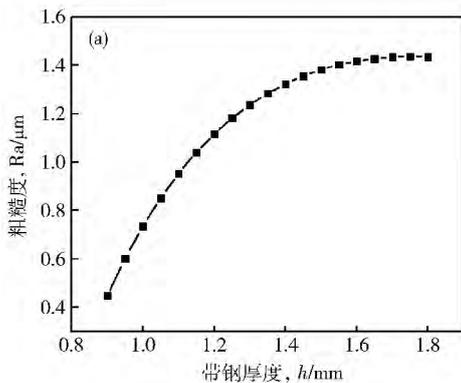
$Ra^S$  和  $\lambda$  均可由前述模型获得. 最终可得第五机架工作辊表面粗糙度磨损演变的预测模型为

$$Ra^R = \{ a_0 Ra_0^R + a_1 \Delta h^2 Ra_0^R + a_2 L Ra_0^R + a_3 \ln(L + 1) Ra_0^R + a_4 q_k Ra_0^R + a_5 \ln h Ra_0^R + a_6 (\ln h)^3 Ra_0^R + a_7 [\ln(1 + \Delta h)] Ra_0^R + a_8 [\ln(1 + \Delta h)]^3 Ra_0^R \} / [b_0 + b_1 \ln(1 + \Delta h) + b_2 q_k^2]. \quad (7)$$

其中  $a_0 = 1.64097$ ,  $a_1 = -1.84601 \times 10^{-5}$ ,  $a_2 = 3.47153 \times 10^{-5}$ ,  $a_3 = -0.498963$ ,  $a_4 = -0.0658482$ ,  $a_5 = -0.710724$ ,  $a_6 = 0.631229$ ,  $a_7 = -0.0664079$ ,  $a_8 = 0.00623496$ ,  $b_0 = 0.207147$ ,  $b_1 = 0.00102798$ ,  $b_2 = 0.162203$ .

## 3 高强度带钢与普通强度带钢的轧制转印行为比较

将本文建立的高强度带钢表面粗糙度轧制转印规律与文献 [14] 中普通强度(以汽车用 IF 钢为主)带钢



表面粗糙度轧制转印规律进行对比, 研究带钢强度增加引起的粗糙度转印规律的差异。

### 3.1 带钢表面粗糙度变化规律的比较

通过与文献 [14] 对比可知:

(1) 宽度和厚度对带钢表面粗糙度的影响规律相似, 即宽度和厚度增加, 带钢表面粗糙度增加;

(2) 轧制带钢长度对高强度带钢表面粗糙度的影响更为显著, 即随着高强带钢轧制里程的增加, 高强钢表面粗糙度明显降低, 且同一工作辊服役期内高强钢的轧制里程明显短于普通强度带钢;

(3) 当改变轧制力和轧制压下量时, 发现高强钢表面粗糙度的变化没有普通强度带钢表面粗糙度的变化显著, 可知强度的增加弱化了轧制力等参数对表面粗糙度的调控能力。

### 3.2 带钢表面粗糙度预测模型比较

文献 [14] 的普通强度带钢表面粗糙度预测模型:

$$Ra^S = a_0 Ra_0^R + a_1 h Ra_0^R + a_2 \Delta h^2 Ra_0^R + a_3 \ln(L + 1) Ra_0^R + a_4 h \Delta h Ra_0^R + a_5 q_k Ra_0^R. \quad (8)$$

其中  $a_0 = 0.21307$ ,  $a_1 = 0.05765$ ,  $a_2 = -27.92686$ ,  $a_3 = -0.0228$ ,  $a_4 = 2.46483$ ,  $a_5 = 0.0606$ .

由回归模型可知影响普通强度带钢和高强钢表面粗糙度的主要因素相同, 都是带钢厚度  $h$ 、压下量  $\Delta h$ 、带钢轧制长度  $L$ 、单位宽度轧制力和变形抗力的比值  $q_k$ , 其余因素在回归过程中被剔除.  $h$ 、 $\Delta h$ 、 $L$ 、 $q_k$  与高强度带钢和普通强度带钢表面粗糙度的关系曲线分别如图 6 ~ 图 8 所示。

如图 6 所示: 随着带钢厚度  $h$  的增加, 高强度带钢和普通强度带钢表面粗糙度都随之增大; 高强度带钢表面粗糙度变化规律呈抛物线趋势, 且随着厚度的增加其对表面粗糙度的影响越来越弱, 而普通强度带钢表面粗糙度随带钢厚度增大呈线性增加. 带钢强度的增加使带钢厚度与带钢表面粗糙度之间的简单线性关系变为较复杂的抛物线关系。

如图 7 所示, 随着轧制带钢长度  $L$  的增加, 高强

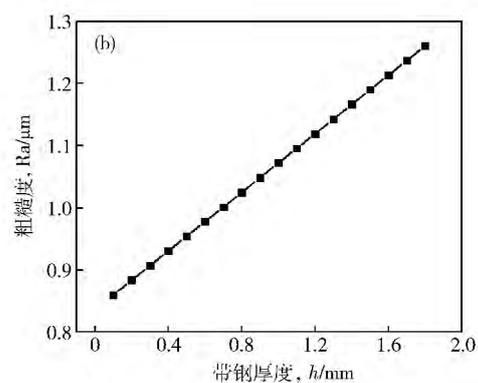


图 6 高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 表面粗糙度与带钢厚度的关系

Fig. 6 Relations of surface roughness with exit thickness for high strength steel (a) and normal strength steel (b)

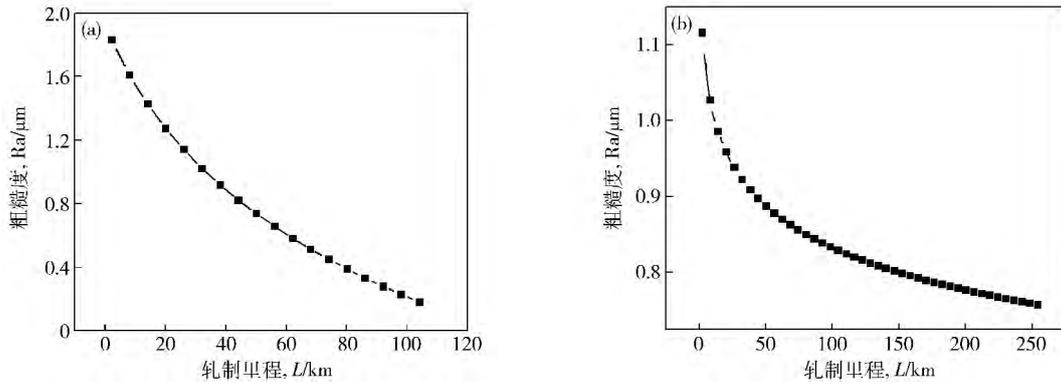


图 7 高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 表面粗糙度与轧制带钢长度的关系

Fig. 7 Relations of surface roughness with strip rolling length for high strength steel ( a ) and normal strength steel ( b )

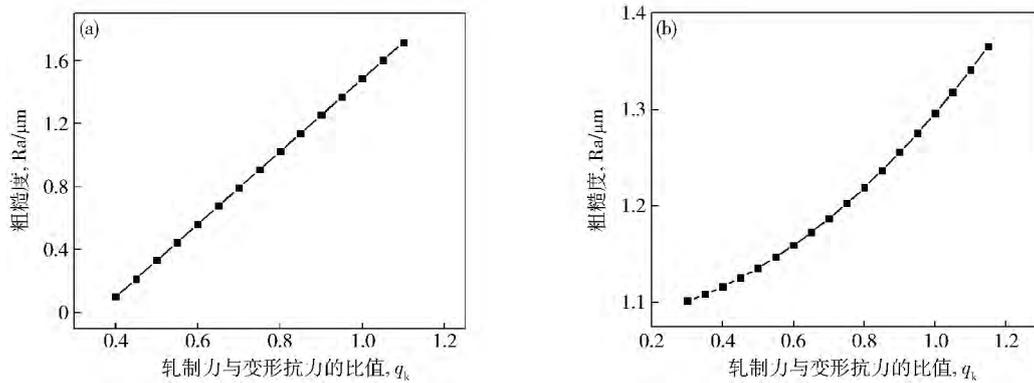


图 8 高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 表面粗糙度随单位宽度轧制力与变形抗力比值变化曲线

Fig. 8 Relations of surface roughness with the ratio of rolling force per width to deforming resistance for high strength steel ( a ) and normal strength steel ( b )

度和普通强度带钢表面粗糙度都随之衰减,并且衰减速率都呈现逐渐减慢的趋势.不同的是高强度钢表面粗糙度衰减速率减慢的趋势较弱,而普通强度带钢表面粗糙度衰减速率减慢很快.究其原因,高强度钢强度远大于普通强度带钢,与工作辊强度更为相近,同时高强度钢生产过程轧制力普遍大于普通强度带钢生产过程轧制力,上述原因引起高强度钢生产时工作辊表面微观形貌磨损加剧,从而导致高强度钢生产过程中其表面粗糙度衰减速率一直维持在较高的水平;而普通强度带钢表面粗糙度的衰减则会随着轧制里程的增加逐渐减慢,最终导致普通强度带钢同一工作辊轧制里程较长而高强度钢的轧制里程较短,这与生产实际相符.

如图 8 所示,随着单位宽度轧制力与变形抗力的比值  $q_k$  的增加,高强度钢和普通强度带钢表面粗糙度都随之增大.不同的是高强度钢表面粗糙度呈线性增加,而普通强度带钢表面粗糙度呈抛物线增加,其增加速率越来越快,由此可知强度的增加导致轧制力对钢板表面粗糙度的影响能力减弱.

### 3.3 表面粗糙度转印率预测模型的比较

文献 [14] 的普通强度带钢表面粗糙度转印率预

测模型:

$$\lambda = b_0 + b_1 \Delta h + b_2 q_k^3 \tag{9}$$

其中  $b_0 = 0.209$   $b_1 = 3.498$   $b_2 = 0.04834$ .

影响表面粗糙度转印率的主要因素相同,都是压下量和单位宽度轧制力与变形抗力的比值  $q_k$ ,其余因素在回归过程中被剔除.  $\Delta h$  和  $q_k$  与高强度带钢和普通强度带钢表面粗糙度转印率的关系曲线分别如图 9 和图 10 所示.

如图 9 所示,随着压下量的增加,高强度带钢和普通强度带钢表面粗糙度轧制转印率都随之增加.不同的是,高强度带钢呈抛物线增加且增加速率逐渐减慢,普通强度带钢呈线性增加且增加速率不变,可见强度增高导致转印率随压下量的增加逐渐减慢.同时发现高强度带钢表面粗糙度轧制转印率随压下量的变化很小.这都表明带钢强度的增加削弱了压下量对带钢表面粗糙度转印率的影响.

如图 10 所示,随着  $q_k$  的增加,高强度带钢和普通强度带钢表面粗糙度转印率都呈抛物线增加,但高强度带钢为二次抛物线变化,普通强度带钢为三次曲线变化,且可以看出两者达到相同粗糙度转印率时,高强度钢需要更高的  $q_k$  值.同时对比两图后发现,高强度带

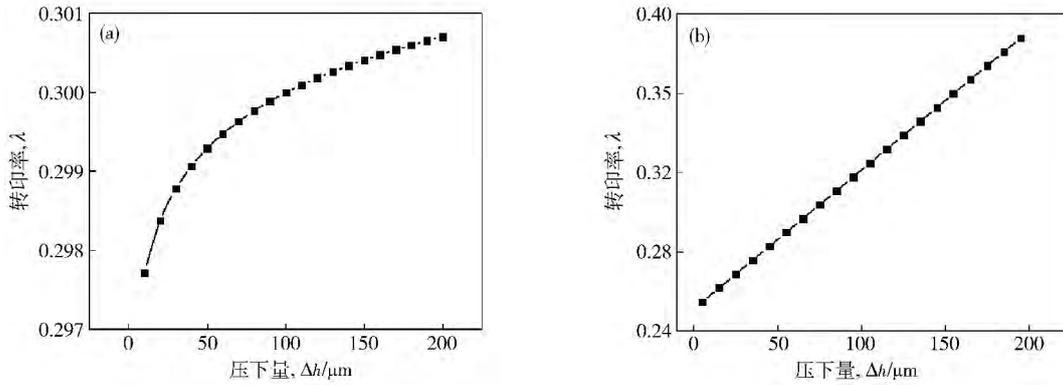


图9 高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 表面转印率与压下量的关系

Fig. 9 Relations of rolling - transfer rate with rolling reduction for high strength steel ( a ) and normal strength steel ( b )

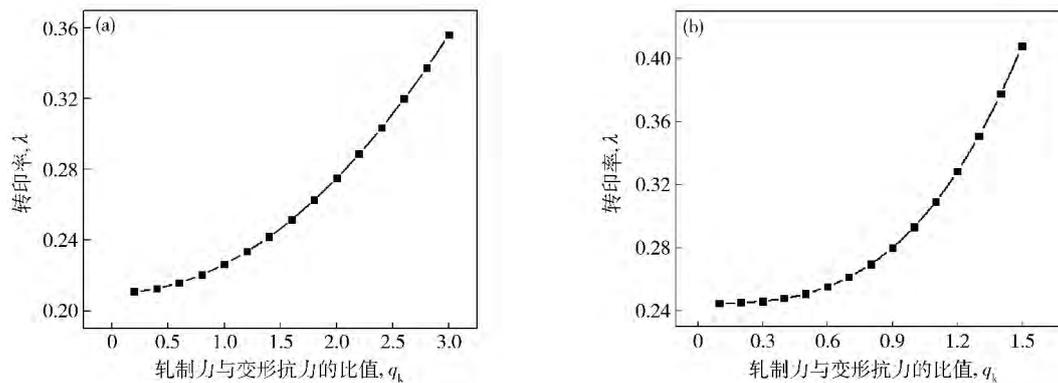


图10 高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 表面转印率随单位宽度轧制力与变形抗力比值变化曲线

Fig. 10 Relations of rolling - transfer rate with the ratio of rolling force per width to deforming resistance for high strength steel ( a ) and normal strength steel ( b )

钢表面粗糙度转印率随着  $q_k$  值的增大其增长速率小于普通强度带钢表面粗糙度转印率的增长速率,表明带钢强度的增加降低了  $q_k$  对带钢表面粗糙度转印率的影响,也揭示了带钢强度的增加对粗糙度的轧制转

印行为的影响是非线性的且复杂的。

### 3.4 工作辊表面粗糙度磨损演变预测模型的比较

文献 [14] 的普通强度带钢对应的工作辊表面粗糙度预测模型:

$$Ra^R = \frac{a_0 Ra_0^R + a_1 h Ra_0^R + a_2 \Delta h^2 Ra_0^R + a_3 \ln(L+1) Ra_0^R + a_4 h \Delta h Ra_0^R + a_5 q_k Ra_0^R}{b_0 + b_1 \Delta h + b_2 q_k^3} \quad (10)$$

其中  $a_0 = 0.21307$   $a_1 = 0.05765$   $a_2 = -27.92686$   $a_3 = -0.0228$   $a_4 = 2.46483$   $a_5 = 0.0606$   $b_0 = 0.209$   $b_1 = 3.498$   $b_2 = 0.04834$ 。

轧制力普遍大于普通强度带钢生产过程轧制力,上述两方面的原因加剧工作辊表面微观形貌的磨损,从而导致生产高强度工作辊表面粗糙度衰减较生产普通强度钢工作辊表面粗糙度衰减更为迅速。这与工业生产中高强度带钢生产用工作辊的可轧制里程更短的生产实际情况相吻合。

结合文献 [17-18] 的研究成果可知,工作辊表面粗糙度磨损衰减主要与轧制带钢长度相关。当固定其他参数,可计算出随着轧制带钢长度  $L$  增加对应的工作辊表面粗糙度的变化,得到轧制高强度带钢和普通强度带钢对应的工作辊表面粗糙度随轧制带钢长度  $L$  增加的磨损衰减趋势,见图 11。

## 4 结论

由图 11 可知,随着轧制带钢长度  $L$  的增加,工作辊表面粗糙度值都随之衰减且衰减速率逐渐减慢。不同的是轧制普通强度带钢用工作辊表面粗糙度衰减速率减慢得更快,更早趋于稳定。究其原因,带钢强度高即与轧辊表面强度更为接近,同时高强度生产过程

本文通过工业生产实测和数理统计建模,研究带钢强度对带钢表面粗糙度轧制转印生成和工作辊表面形貌磨损演变衰减行为的影响,得到对工业生产有参考价值的结果和结论。

首先,采用逐步回归分析方法,针对第 5 机架出口高强度带钢表面粗糙度工业实验数据进行建模分析,

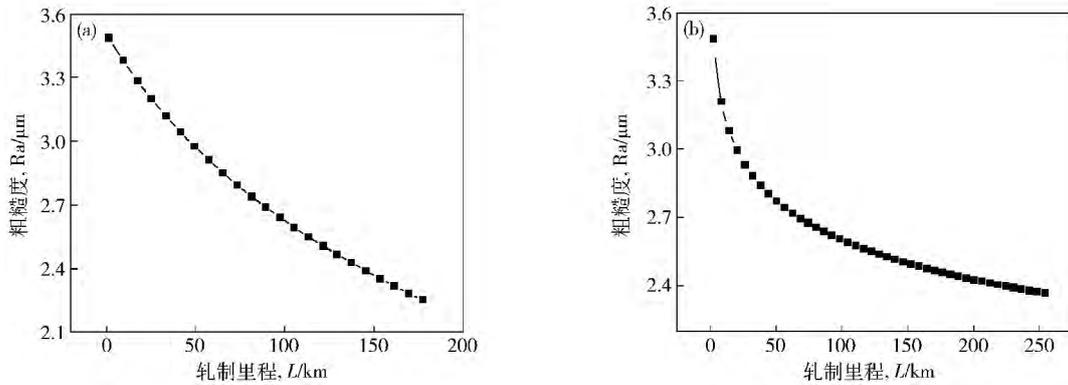


图 11 生产高强度钢 (a) 和普通强度钢 (b) 时工作辊表面粗糙度与轧制带钢长度的关系

Fig. 11 Relations of work roll roughness with strip rolling length in high strength steel production (a) and normal strength steel production (b)

得到高强度带钢表面粗糙度轧制转印的变化规律, 建立轧制出口高强度带钢表面粗糙度的预测模型; 通过实测生产过程中首卷和末卷带钢与上下机工作辊表面的粗糙度值, 并采用逐步回归法建立轧制过程中高强度带钢表面粗糙度转印率的预测模型; 利用所建立的高强度带钢表面粗糙度预测模型和高强度带钢表面粗糙度的转印率模型, 得到第 5 机架工作辊在一个服役期内表面粗糙度磨损演变的预测模型, 获得工作辊粗糙度的磨损衰减规律。

其次, 比较研究了带钢强度对于轧制转印和工作辊粗糙度磨损衰减行为的影响, 发现带钢强度的增加导致带钢表面粗糙度的轧制转印行为明显不同。随着带钢强度的增加, 轧制工艺参数, 如厚度和轧制力, 对带钢表面粗糙度的影响减弱, 而工作辊表面粗糙度的磨损衰减更为迅速, 缩短工作辊服役期。

上述研究结果对于企业高强度带钢冷轧生产中控制高强度带钢表面粗糙度, 安排轧制顺序, 以及确定轧辊上下机时间等具有参考价值。

参 考 文 献

[1] Podgornik B, Hogmark S, Sandberg O. Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel. *Surf Coat Technol*, 2004, 184(2-3): 338

[2] Abotani K, Hirohata K, Kiyasu T. Hot-dip galvanized sheet steel with excellent press formability and surface quality for the automotive panels. *Kawaski Steel Tech Rep*, 2003(48): 17

[3] Llizuka E, Fujinaga C, Hira T, et al. Effect of surface roughness on galling behavior // *Sheet Metal Forming Beyond 2000: Proceedings of the 20th Biennial Congress*. Belgium, 1998, 239

[4] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribol Int*, 2009, 42(4): 542

[5] Schreck S, Zum Gahr K H. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties. *Appl Surf Sci*, 2005, 247(1): 616

[6] Plouraboué F, Boehm M. Multi-scale roughness transfer in cold metal rolling. *Tribology International*, 1999, 32(1): 45

[7] Dick K, Lenard J G. The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips. *J Mater Process Technol*, 2005, 168(1): 16

[8] Lenard J G. The effect of roll roughness on the rolling parameters during cold rolling of an aluminium alloy. *J Mater Process Technol*, 2004, 152(2): 144

[9] Ahmed R, Sutcliffe M P F. Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*, 2000, 244(1-2): 60

[10] Li H C, Jiang Z Y, Tieu K A. Analysis of premature failure of work rolls in a cold strip plant. *Wear*, 2007, 263(7-12): 1442

[11] Jiang Z Y, Tieu K A. Contact mechanism and work roll wear in cold rolling thin strip. *Wear*, 2007, 263(7-12): 1447

[12] Chen J S, Li C S, Cao Y. Effects of roll roughness on surface and process parameters for stainless-steel strip. *J Mech Eng*, 2013, 49(4), 30  
(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. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 30)

[13] Ma B, Tieu A K, Lu C. An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *J Mater Process Technol*, 2002, 125-126: 657

[14] Zhang X P, Zhang Q D, Bai J, et al. Research on prediction model for surface roughness of cold rolled strip. *Metall Equip*, 2008(5): 42  
(张新鹏, 张清东, 白剑, 等. 冷轧带钢表面粗糙度预测模型研究. *冶金设备*, 2008(5): 42)

[15] Wu Y, Zhang Q D, Liu J. Test and statistical research of surface roughness of work roll in cold tandem mills. *Chin J Mech Eng*, 2003, 39(11): 90  
(吴越, 张清东, 刘军. 带钢冷轧机工作辊表面粗糙度实测研究. *机械工程学报*, 2003, 39(11): 90)

[16] Zhang Q D, Wang W G, Wu Y. Coordinated control of flatness and surface roughness of strip on 2030 mm cold tandem mills. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 27(2): 232  
(张清东, 王文广, 吴越. 冷轧带钢板形和表面粗糙度协同控制. *北京科技大学学报*, 2005, 27(2): 232)

[17] Zhou Q T, Bai Z H, Wang J F. Research and application of strip surface roughness model about tandem cold mill. *Chin Mech Eng*, 2007, 18(14): 1743  
(周庆田, 白振华, 王骏飞. 冷连轧过程板面粗糙度模型及

- 其应用的研究. 中国机械工程, 2007, 18(14): 1743)
- [18] Li X J, Huang Y G, Kang X P, et al. Researching of working roll surface roughness attenuation model in temper rolling process. *Metall Equip*, 2008(6): 48  
(李秀军, 黄业钢, 康晓鹏, 等. 平整轧制过程中轧辊表面粗糙度衰减模型研究. 冶金设备, 2008(6): 48)
- [19] Bai Z H, Wang J F. Control technique for surface roughness of strip in cold tandem rolling. *Iron Steel*, 2006, 41(11): 46  
(白振华, 王骏飞. 冷连轧机成品板面粗糙度控制技术研究. 钢铁, 2006, 41(11): 46)
- [20] Sutcliffe M P F. Surface asperity deformation in metal forming processes. *Int J Mech Sci*, 1988, 30(11): 847
- [21] Domanti S, Edwards J. Interactions between roll surface and cold rolling parameters // *2nd International Conference on Modeling of Metal Rolling Process*, 1996: 584
- [22] Ike H. Elasto-plastic FE analysis of temper rolling approximated by multiple punch indentation // *Proceedings of 148th ISIJ Meeting*, 2004: 1009
- [23] Mishra M, Egberts P, Bennewitz R, et al. Friction model for single-asperity elastic-plastic contacts. *Physical Review B*, 2012, 86(4): 045452
- [24] Peng H, Liu Z S, Huang F L, et al. A study of elastic-plastic contact of statistical rough surfaces // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013: 1350650112474399
- [25] Poullos K, Klit P. Implementation and applications of a finite-element model for the contact between rough surfaces. *Wear*, 2013, 303(1-2): 1
- [26] Yang N. *Study of Lubrication and Thermal Behavior in Cold Rolling Process* [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2000  
(杨楠. 钢板冷轧过程中润滑及热效应的研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2000)
- [27] Liu Y. *Design of Laser-textured Topography on Roller and Research of Its Duplication Characteristics during Skin Pass* [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2002  
(刘莹. 轧辊激光毛化形貌设计与冷轧钢板平整复印关系研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2002)
- [28] Bay N, Wanheim T. Real area of contact between a rough tool and a smooth workpiece at high normal pressures. *Wear*, 1976, 38(2): 225
- [29] Shi J, McElwain D L S, Domanti S A. Some surface profiles of a strip after plane-strain indentation by rigid bodies with serrated surfaces. *J Mater Process Technol*, 2002, 124(1-2): 227
- [30] Cheng L, Tieu A K, Jiang Z Y. Modeling of the inlet zone in the mixed lubrication situation of cold strip rolling. *J Mater Process Technol*, 2003, 140(1): 569
- [31] Huat S, Dubar M, Deltombe R. Asperity deformation, lubricant trapping and iron fines formation mechanism in cold rolling processes. *Wear*, 2004, 257(5-6): 471
- [32] Le H R, Sutcliffe M P F. Finite element modelling of the evolution of surface pits in metal forming processes. *J Mater Process Technol*, 2004, 145(3): 391
- [33] Wu C C. *Research on Accessing and Controlling the Surface of Rolls and Steel Sheets* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006  
(吴长春. 轧辊与钢板表面形貌及其控制的研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2006)
- [34] Saniei M, Salimi M. Development of a mixed film lubrication model in cold rolling. *J Mater Process Technol*, 2006, 177(1-3): 575
- [35] Kijima H, Bay N. Skin-pass rolling I: studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading. *Int J Mach Tools Manuf*, 2008, 48(12-13): 1313
- [36] Belotserkovets A, Deltombe R, Dubar M. Roughness prediction during cold rolling of stainless steel strip: fluid structure approach. *Int J Mater Form*, 2009, 2(1): 21
- [37] Mulvihill D M, Kartal M E, Nowell D. An elastic-plastic asperity interaction model for sliding friction. *Tribol Int*, 2011, 44(12): 1679
- [38] Yu M. *Theory and Application of Surface Topography Control in Steel Strip Temper Rolling* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010  
(于孟. 板带平整轧制表面形貌控制理论及应用研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2010)
- [39] Zhang X F, Li R, Zhang B Y, et al. Model for the generation of surface topography in steel strip temper rolling. *J Mech Eng*, 2013, 49(14): 38  
(张晓峰, 李瑞, 张勃洋, 等. 平整轧制过程中带钢表面形貌的生成模型. 机械工程学报, 2013, 49(14): 38)
- [40] Li H. *The Lubrication Behavior of Rough Interface in Cold Strip Rolling Zone* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2011  
(李慧. 带钢冷轧过程轧制区粗糙界面间润滑行为研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2011)