

张力波动对热连轧铝板带跑偏影响研究

杨亚楠 马立勇

(河北建筑工程学院 机械工程学院, 河北 张家口 075000)

摘要: 铝板带热连轧过程中, 相邻机架间, 板带在上游机架的出口处与下游机架的入口处沿轧制方向会产生张力, 张力的波动会加剧板带的跑偏。本文构建了张力波动影响下铝板带热连轧跑偏数学模型, 分析了存在横向非对称跑偏诱因存在的情况下, 张力对轧件跑偏的影响规律。进行了轧制实验, 实验结果表明, F3机架中, 在尾部轧制失张阶段, 张力波动对轧件的跑偏影响最大。辊缝差扰动下的轧件跑偏在张力出现波动后会更加剧烈。因在实际生产过程中, 应着重考虑失张后的横向控制, 以改善纠偏效果。

关键词: 铝板带; 热连轧; 张力波动; 横向非对称; 跑偏

在铝板带热连轧过程中, 机架之间的大部分相互作用通过带材的张力传递。在相邻轧机机架之间, 上游机架的出口和下游机架的入口之间的轧制速度存在差异, 使得在两个机架之间沿轧制方向产生张力。速度差越大, 板带在机架间的张力就越大。同一机架(第一机架除外)会同时受到上游后张力和下游前张力的共同作用。前张力加快了轧辊转动, 后张力则阻碍了轧辊的转动, 从而让改变了前后滑。稳定的张力能够保障连轧平稳顺利地进行而不出现跑偏; 若出现张力波动, 或是某两个机架之间板带突然失去张力, 将出现更大幅度的板带跑偏。因此, 研究张力波动对热连轧铝板带跑偏的影响规律, 是指导纠偏过程的重要基础。张力主要影响轧制过程的前后滑和轧件的塑性系数。前滑与后滑改变了入口速度, 影响了板带的跑偏过程。轧件材料塑性系数的变化导致了校正模型的失配。

机架间张力波动的影响可以看作一个马尔科夫过程。也即, 若将某机架受到的上、下游机架的影响看作一个随机过程, 那么相邻机架间张力波动的影响更为明显; 而不相邻机架间的影响十分有限。因此本文只研究相邻机架的影响。

一、张力波动作用下的跑偏数学模型

根据 D.Dresden 前滑公式,

$$f = \frac{\gamma^2}{2} R \quad (1)$$

式中 γ ——中性角, rad;

R ——轧辊压扁半径, mm。

根据 Bland—Ford 带张力压力公式, 有

$$\gamma = \sqrt{\frac{h}{R}} \tan \left(\sqrt{\frac{h}{R}} \cdot \frac{\alpha_\gamma}{2} \right) \quad (2)$$

式中 h ——轧件厚度, mm

α_γ ——前滑角, rad, 其计算公式为

$$\alpha_\gamma = \sqrt{\frac{R}{h}} \arctan \sqrt{\frac{Sh}{h}} - \frac{1}{2\mu} \ln \left[\frac{H}{h} \cdot \frac{1-q_h/K_h}{1-q_H/M} \right] \quad (3)$$

式中 q_h ——前张应力, Mpa;

q_H ——后张应力, Mpa;

H ——入口辊缝, mm;

δh ——轧制方向压下量, mm;

K_h ——出口轧件厚度影响系数;

M ——入口轧件塑性系数;

后滑可表示为

$$g = 1 - \frac{\frac{v_R(1+f)}{\mu \cos \frac{\delta h}{R}}}{v_R} \quad (4)$$

入辊速度可计算为

$$v_m = K_f v_R \quad (5)$$

式中 K_f ——前后张应力系数;

v_R ——轧辊线速度, mm/s

根据横向不对称跑偏扰动诱因影响下的跑偏微分方程, 可得到前张力与后张力波动作用下的跑偏二阶响应动态模型:

$$\ddot{z}_c = \frac{(hK_f v_R)^2}{bH^2} \cdot \left[\frac{2PK_h}{Bh(K_h+M)} \left(\frac{1}{K_h} - \frac{1}{K_f} \right) z_c + \frac{bK_h}{Bh(K_h+M)} \Delta S + \frac{(H-h)M - hK_h}{hH(K_h+M)} \Delta H \right] \quad (6)$$

式中 K_f ——前后张应力系数;

b ——板带横向宽度, mm;

B ——轧辊横向宽度, mm;

K_f ——轧辊与轧件间的压扁刚度;

z_c ——轧件跑偏量 mm;

ΔS ——轧辊两端横向辊缝差, mm;

ΔH ——轧件横向厚度差, mm。

入口速度主要取决于前张应力 q_h 、后张应力 q_H 。较小的前张力和较大的后张力有利于轧制稳定运行而不发生跑偏。但是如果后张力与前张力差值过大, 将极大地影响轧制速度。因此前后张应力必须在一个合理的范围内。根据某铝板带轧制生产企业现场生产数据及相关研究, 1235 铝合金前后张应力范围如表 1 所示。

表 1 各机架间的合理张力范围

机架编号	后张应力 q_H 范围 (MPa)	前张应力 q_h 范围 (MPa)
F1	0~0.05	3.8~4.2
F2	3.8~4.2	5.3~6.7
F3	5.3~6.7	6.5~8.5
F4	6.5~8.5	9.8~14.6

在轧制末期, 当板带尾部离开第 i ($i=1, 2, 3$) 机架时, 第 $i+1$ 机架的入辊后张应力 $q_H=0$, 前滑迅速增大, 而后滑迅速减小, 入辊速度出现突变。若此时存在非对称诱因, 其影响将急剧增大, 那么轧件将出现严重甩尾跑偏现象。

二、张力波动下的跑偏实验

对于“1+4”连轧机来说, 张力主要存在于四个精轧机架之间。张力先通过影响轧辊速度的变化, 进而对横向非对称扰动起到放大或减弱的作用影响轧件的横向偏移。张力在以下两个条件下会对轧件跑偏产生影响: (a) 张力超出合理范围; (b) 存在横向非对称扰动。由于 F3 架为尾部机架, 跑偏趋势更为明显, 因此本

文只对 F3 架在两个条件均存在的状况进行实验分析。

(一) 实验设备

实验设备为某铝板带生产企业连轧生产设备，图 1 为精轧机组，轧件从粗轧机出来后，进入精轧机，经过四连机架的一次性精轧后，轧件厚度减小至 5.5mm 左右，并送进卷取机收卷。

“1 + 4”热连轧机的主要数据检测和采集装置包括 X 射线轮廓仪 RDP、FDP，张力检测器 TM，厚度检测仪 FDT、负载检测单元 LC、高温检测仪 T 以及金属热检测器 HMD。

(二) 实验过程

对 F3 机架入口处的轧件施加的前张力波动量为最大值 45%；为与前张力波动量进行对比，施加一组后张力波动，其中前张力增加量与后张力减小量相等。另外，轧制末期，因轧件尾部逐渐脱离机架，后张力会逐渐减小为 0，因此需设置后张力为 0 的实验。另外，作为对照，还设置了一组正常张力轧制实验，共 8 组实验。

表 2 为 F3 机架前张应力、后张应力及辊缝差施加量，横向偏移响应见图 2。

表 2 F3 机架前后张力及辊缝差施加量

参数								
q_h		0				0		
q_H	.5	.5	.5		.5	.5		
ΔS	.1	.1	.1	.1	.3	.3	.3	.3

注：前后张应力单位为 Mpa；辊缝差单位为 mm。



图 1 某铝板带生产企业连轧生产设备

辊缝差扰动量分别为 0.1mm 和 0.3mm。作为对照实验，第 1 组和第 5 组均施加正常张力，第 2 组和第 6 组前张力均增大 45%，第 3 组和第 7 组后张力失张量与前组前张力增加量相同，第 4 组和第 8 组则为完全失张。

(三) 实验结果分析

分析图 2，辊缝差扰动在张力波动作用下对轧件横向偏移的影响具体表现为：

(a) 在前张力值 $q_h=7\text{MPa}$ ，后张力值 $q_H=6.5\text{MPa}$ 时，即张力在正常范围内，辊缝差在 $\Delta S=0.1\text{mm}$ 与 $\Delta S=0.3\text{mm}$ 时的轧件跑偏量分别为 6.61mm 和 22.32mm，偏移值均不大，可认为没有发生跑偏。

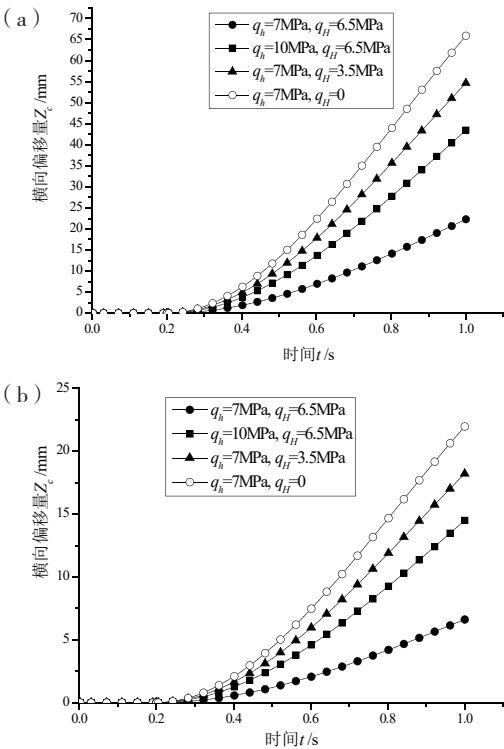


图 2 张力波动下辊缝差扰动对跑偏的影响
(a) $\Delta S=0.1\text{mm}$ (b) $\Delta S=0.3\text{mm}$

(b) 保持后张力不变，前张力增大，取 $q_h=10\text{MPa}$ ，则一秒后， $\Delta S=0.1\text{mm}$ 扰动下的横向偏移为 14.49mm， $\Delta S=0.3\text{mm}$ 扰动下的横向偏移为 43.48mm，跑偏量与正常张力下相比均有所增大；保持前张力不变，后张力减小，取 $q_H=3.5\text{MPa}$ ，轧件横向偏移在两辊缝差扰动一秒后的值分别为 18.21mm 和 54.65mm。就此可说明失张状态比前张力增大对轧件横向偏移的影响要严重。

(c) 取后张力为 0，将前张力保持正常值，则轧件横向偏移在 $\Delta S=0.1\text{mm}$ 和 $\Delta S=0.3\text{mm}$ 扰动一秒响应后跑偏量分别为 21.95mm 和 65.87mm，此数据与正常张力轧制时辊缝差扰动下的横向偏移量相比大幅增加。由此可见，失张状态下更加容易出现跑偏，可能很小的横向非对称扰动都会产生大幅甩尾现象。

三、结论

本文构建了张力波动影响下铝板带热连轧跑偏数学模型，并进行了轧制实验。实验结果表明，F3 机架中，在尾部轧制失张阶段，张力波动对轧件的跑偏影响最大。辊缝差扰动下的轧件跑偏比正常张力轧制下的轧件跑偏更加严重，因此为补偿张力损失带来的轧件入辊速度突变，F3 机架应考虑将入辊张力作为前馈加以控制，以改善纠偏效果。

参考文献：

[1] 董鹰. 多变量张力控制技术在三机架铝板带冷连轧机的应用[J]. 冶金自动化, 2018, 42 (02): 34-39+48.
[2] VB 金兹伯格. 高精度板带材轧制理论与实践[M]. 姜明东, 王国栋, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
[3] 刘义伦, 廖伟, 时圣鹏, 付卓. 宽幅铝板带热连轧跑偏控制的张力调节模型与仿真[J]. 锻压技术, 2011, 36 (02): 152-155.

基金项目：2021 年河北省教育厅自筹经费项目 (ZC2021225)。

作者简介：杨亚楠 (1991-)，女，硕士，讲师，主要研究方向为铝合金板带轧制、铝合金材料力学行为。