

冷轧平整过程振动纹产生机理研究

王泽济^① 陈培林 汪 晨

(宝山钢铁股份有限公司 上海 201900)

摘要 冷轧平整带钢表面的振动纹严重影响了产品的质量。结合理论计算和现场测试,初步查明了宝钢 2030 冷轧平整机组振动纹产生的原因,为下一阶段彻底解决振动纹问题提供了有力的依据。

关键词 冷轧 振动纹 固有频率 振动频谱

中图分类号 TG331

文献标识码 A

Study on Forming Mechanism of Chatter Mark During Cold Rolled Tempor

Wang Zeji Chen Peilin Wang Chen

(Baoshan Iron & Steel Co., Ltd.)

ABSTRACT Chatter mark on the surface of the cold rolled or skin passed steel strips will seriously depress the product quality. By the field measurement on the skin passing mill in 2030mm cold rolling plant, the causes of the formation of chatter marks have been preliminarily discovered and some measures have been taken to suppress the chatter mark.

KEYWORDS Cold rolling Chatter mark Eigenfrequency Vibration spectrum

1 前言

在轧制和平整过程中,轧机的振动会在带钢表面产生振动纹,不仅降低了劳动生产率,而且严重影响产品的质量^[1]。振动纹的产生比较普遍,它是一个世界性的难题,特别是对于冷轧家电板和汽车板等表面质量要求高的产品,显得尤为突出。世界知名钢铁企业都曾受到这方面的困扰,因此关于振动纹的研究成果基本上都产生在国外和台湾省的中钢公司。宝钢作为国内第一家有能力提供汽车板和家电板的钢铁企业,对振动纹的危害体会也是最早和最深刻的。随着中国加入 WTO,国内钢铁行业面临全方位的竞争,为了在未来的竞争中立于不败之地,就需要生产高附加值的钢铁产品。

宝钢从 1998 年开始研究振动纹,借鉴国内外的成功经验,从冷轧 2030 平整机组入手,经过理论分析和现场测试,分析振动纹产生的机制,在此基础上建立了一套具有国际先进水平的、拥有自主知识产权的平整过程振动纹在线监测系统。

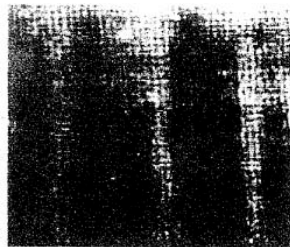


图 1 带钢表面振动纹

^① 作者简介:王泽济,男,1968 年出生,工程师,硕士,从事设备诊断研究及系统开发工作

目前已初步查明了振动纹的产生机理,并提出一些具体对策,对抑制振动纹具有明显的效果。

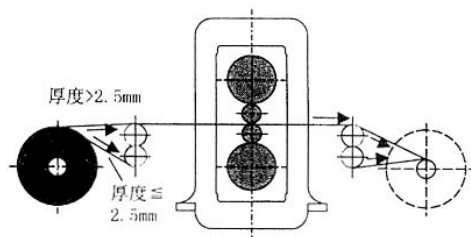


图2 平整机示意图

振动是普遍存在的。轧机的振动大致可分为三类:扭转振动、三倍频振动和五倍频振动,最常发生振动纹的是三倍频振动和五倍频振动^[2]。以正常轧制线速度 900~1300m/min 考虑,三倍频振动产生的振动纹的变化周期为 60~120mm 左右,并且带钢的表面会有明显的厚度变化;五倍频振动是一种微幅振动,带钢表面厚度没有明显的变化,产生的振动纹的变化周期为 20~40mm 左右。通过对宝钢 2030 平整后的有振动纹的带钢表面形貌和厚度进行测量,振动纹明暗条纹的变化周期在 20~30mm 左右,平整机振动具有典型的五倍频振动特征。图 1 为宝钢 2030 带钢平整后表面振动纹的形状。

2 平整机系统固有动态特性理论分析

2.1 机架垂直系统固有频率计算

固有频率是系统的重要动力学特性,对于判别系统振动的类型和采取何种抑制振动措施都是必不可少的。2030 冷轧单机架平整机是四辊轧机(图 2),利用集中质量法可以将机架和轧辊部分简化为一个六自由度的弹簧—质量系统

(图 3)。

图 3 中: M_1 :机架立柱及上横梁的等效质量; M_2 :上支承辊及其轴承、轴承座的等效质量; M_3 :上工作辊及其轴承座的等效质量; M_4 :下工作辊及其轴承座的等效质量; M_5 :下支承辊及其轴承座的等效质量; M_6 :机架下横梁的等效质量; K_1 :机架立柱及上横梁的等效刚度; K_2 :上支承辊中部至上横梁中部的等效刚度; K_3 :上工作辊与支承辊之间的接触刚度; K_4 :上下工作辊以及带材之间在轧制力作用下的等效刚度; K_5 :下工作辊与下支承辊之间的接触刚度; K_6 :下支承辊中部至下横梁中部的等效刚度; K_7 :下横梁的弯曲等效刚度。

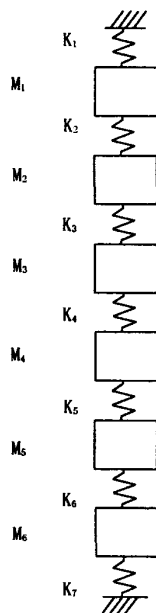


图3 机架集中质量模型

系统的自由振动方程如下:

$$\begin{bmatrix} M_1 & & & & & \\ & M_2 & & & & \\ & & M_3 & & & \\ & & & M_4 & & \\ & & & & M_5 & \\ & & & & & M_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \\ \ddot{x}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1+K_2 & -K_2 & & & & \\ -K_2 & K_2+K_3 & -K_3 & & & \\ & -K_3 & K_3+K_4 & -K_4 & & \\ & & -K_4 & K_4+K_5 & -K_5 & \\ & & & -K_5 & K_5+K_6 & -K_6 \\ & & & & -K_6 & K_6+K_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

简记为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

设(1)的解具有下述形式

$$x_i = A_i \sin(pt + \varphi)$$

则有:

$$[K]\{A\} - p^2[M]\{A\} = \{0\} \quad (4)$$

其中 $\{A\}$ 是 n 列阵

$$(i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$\{A\} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{bmatrix}$$

根据能量守恒定律—最大势能和最大动能相等,求出等效质量 M_i 和等效刚度 K_i ^[3]。结果如表 1、2。

表 1 等效质量计算结果(10³ kg)

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
100.2	71.1	8.9	8.9	71.1	30.05

表 2 等效刚度计算结果(100MN/mm)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
7.198	3.209	6.16	2.86	6.16	4.49	10.67

根据特征方程

$$|[K]-p^2[M]| = 0 \tag{5}$$

求出各阶固有频率 $f_i = \frac{p_i}{2\pi}$, 结果如表 3。

表 3 固有频率计算结果(Hz)

阶数	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
频率	85.9	131.8	179.3	363.7	446.4	591.6

2.2 主传动系统扭振固有频率分析

平整机主传动系统是轧制过程中动力传递的主要途径,其动力学行为直接影响各系统的动力学状态。

2.2.1 模型简化

宝钢 2030 平整机采用下工作辊驱动方式,因此可以将其简化为一典型的链状结构模型,如图 4。

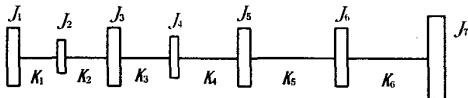


图 4 平整机主传动扭振模型

J_1 ——第一台电机惯量; J_2 ——电机联轴节惯量;
 J_3 ——第二电机惯量; J_4 ——电机出轴联轴节惯量; J_5 ——中间轴惯量; J_6 ——接轴惯量;
 J_7 ——辊系惯量; $K_1 \sim K_7$ ——相应出轴的扭转刚度

转动惯量 J_i 的计算公式为: $J = \frac{1}{2}mr^2$, 对于

辊系惯量的计算则按能量守恒原理将下支承辊、上工作辊和上支承辊折算到下工作辊。计算结果如表 4, J_7 为最小辊径组合与最大辊径组合下的计算范围。

表 4 转动惯量计算值(单位: $N \cdot s^2 \cdot m$)

J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7
956.0	25.2	956.0	74.9	18.9	10.2	2537.7~3628.4

扭转刚度的计算公式为: GI_p/L , K_6 为最小工作辊直径与最大工作辊直径下的扭转刚度, 计算结果如表 5。

表 5 扭转刚度计算结果(单位: $N \cdot m/rad$)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1.11e8	1.11e8	8.86e7	3.5e7	1.26e7	4.48e7~4.72e7

2.2.2 计算结果

利用传递矩阵法, 根据边界条件可以求出主传动扭振固有频率^[3,4], 结果如表 6。

表 6 平整机主传动扭振固有频率计算结果(单位: Hz)

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
最小辊径组合	12.46	54.03	164.08	271.53	386.62	476.13
最大辊径组合	11.65	54.03	164.28	272.18	393.57	476.13

电机出轴扭振实测在 $f = 12.5\text{Hz}$ 处出现稳定的振动峰值, 这与计算的一阶固有频率一致。

3 平整过程振动测试

3.1 测试原理

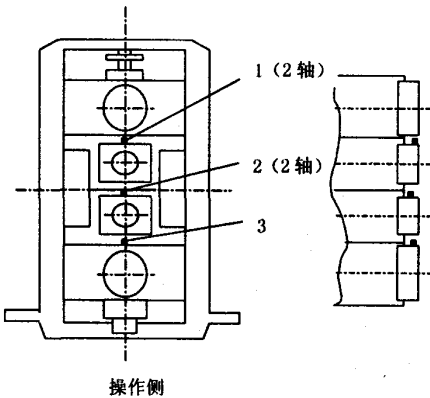


图 5 辊系传感器布置图

平整过程中振动纹是由轧机振动引起的, 其

直接影响是轧辊的振动,尤其是上下工作辊的振动。因此,为了研究平整机振动以及振动纹产生的规律,在上下工作辊上安装了振动传感器。根据不同材质、规格、工艺等组合设计了相应的测量工况。对比分析轧辊振动与带钢表面质量,初步查明了振动纹的产生机理,在此基础上提出抑制和消除振动纹的相应对策。

3.2 测点布置

在上下工作辊和下支承辊上安装了磁座式ICP(内置电荷放大器)振动加速度传感器,其中上下工作辊均采用2轴(水平和垂直)传感器,其余用来测量垂直振动(图5)。

3.3 测试系统组成

测试系统由ICP振动加速度传感器、信号调

理器、A/D采集卡、计算机等部分组成(图6)。ICP加速度传感器内装集成电路放大器,信号调理器提供传感器24VDC电源并对信号具有增益放大功能,计算机具有显示报警和分析功能。

4 现场数据分析

在不同工况条件下进行现场测试,经频谱分析得到功率谱曲线。

其中包括:1)冲击激励下主传动扭振的频谱,2)稳定轧制时主传动扭振的频谱,3)上工作辊垂直振动典型频谱,4)上工作辊垂直振动频谱,5)下工作辊垂直振动典型频谱,6)下工作辊垂直振动特征频率,7)上工作辊水平振动特征频率,8)机电耦合对工作辊垂振的作用,9)上支承辊的振动频谱,10)下支承辊的振动频谱。

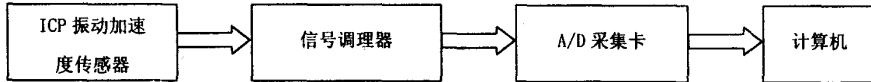


图6 测试系统组成

5 结论

(1) 实测结果表面,平整机固有频率计算模型简化比较符合实际情况。

(2) 在稳定轧制条件下,主传动系统的扭振响应中出现300Hz、600Hz成分,是主电机中电磁转矩的谐波分量通过机电耦合对主传动系统强迫激励导致辊系振动的结果。

(3) 工作辊的垂直振动造成工作辊与带钢表面接触周期性变化是平整过程振动纹产生的主要原因。振动的主要频段为550~650Hz,对应于机架垂振系统的第六阶固有频率。振动模式是外激励导致的系统共振。

(4) 机电耦合导致传动系统扭振,并与机架垂振及水平振动产生耦合作用,是激起机架对应固有频率产生共振的振源。这种振动只是在电参数300Hz、600Hz的峰值很大的情况下出现。

(5) 接手磨损间隙会产生冲击,导致机架垂振系统多阶固有频率共振。

(6) 改变轧制速度对抑制平整过程振动纹具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] Wilhelm Hofmann, Heinrich Aigner. Reduction of chatter marks during skin pass rolling of steel strips. MPT international, 1998, 22(1): 98~100, 102
- [2] 林振华, 彭伟业. 冷轧产品振动辊痕的成因分析及改善. 技术与训练, 1999, 24(5): 80~87
- [3] 清华大学工程力学系固体力学教研组振动组. 机械振动(上册). 北京: 清华大学, 1978. 188~310
- [4] 钟一谔, 何衍宗, 王正等. 转子动力学. 北京: 清华大学出版社, 1987. 143~175

(收稿日期:2002-10-14)

· 设备调剂 ·

鞍山东安不锈钢制品有限公司

本公司现有:新的九辊矫直机,功率22kW,矫直辊直径350mm,可矫直各种型钢,带一套矫直辊,低于成本价转让。

地址:鞍山高新区(西区)双台路9号 联系人:张先生 电话:0412-8231009 8231043