

文章编号:1000-582X(2011)11-001-06

## 1220HC 六辊冷连轧机振纹实测与抑制

陈平<sup>1</sup>, 樊华<sup>2</sup>, 李俊洪<sup>2</sup>, 王海云<sup>2</sup>, 陈海周<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 攀钢冷轧厂, 四川攀枝花 617062)

**摘要:**针对某1220HC六辊冷连轧机带钢和支撑辊表面振纹问题进行了连续跟踪测试。在对轧机固有特性研究的基础上,通过对支撑辊换辊周期内各阶段振动信号的分析与比较,发现在支撑辊使用早期,轧机以568 Hz的第7阶固有振动为主;在稳定轧制阶段,中间辊对支撑辊的相对运动形成支撑辊表面振纹;在支撑辊使用中后期,辊面振纹反作用于轧机,引起轧机强迫振动,进一步加剧振纹的形成,轧机的振动为共振与强迫振动共存。在振纹形成过程分析的基础上,结合振纹纹距与振源的关系,找到了引起轧机第7阶固有频率振动的原因,提出了振纹抑制措施。

**关键词:**冷连轧机;振纹;固有频率;强迫振动

中图分类号:TH113

文献标志码:A

## Measurement and control of chatter marks for 1220HC six-high tandem cold rolling mill

CHEN Ping<sup>1</sup>, FAN Hua<sup>2</sup>, LI Jun-hong<sup>2</sup>, WANG Hai-yun<sup>2</sup>, CHEN Hai-zhou<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Cold Strip Mill of Panzhihua Iron & Steel Ltd. Co., Panzhihua, Sichuan 617062, P. R. China)

**Abstract:** According to the chatter marks on steel strip and backup roll of 1220HC rolling mill, continuous tracking measurement is carried out. On the basis of researching the mill inherent characteristics, vibration signals in different periods of severing backup rolls are compared, and it is found that, in early stage, the main vibration frequency is 568 Hz which is the 7th natural frequency of the rolling mill, and the relative movement between the middle roll and the backup roll induces chatter marks on the surface of backup rolls in steady rolling stage. In middle and later stage, the backup roll chatter marks react on rolling mill, and the forced vibration is formed. As a result, the vibration model is a coexistence of forced vibration and resonance. Based on the above studies and the relationship of mark spacing and vibration source, the cause of the 7th natural frequency is found and the effective countermeasures are put forward.

**Key words:** cold rolling mills; chatter marks; natural frequencies; forced vibration

在带钢生产过程中,带钢表面经常会出现一种明暗相间、与带钢运动方向垂直的条纹,这种表面缺陷称为振纹<sup>[1-3]</sup>。振纹是世界范围内普遍存在的问

题,许多钢铁生产企业都曾经或正在被这一问题所困扰,为此国内外学者对振纹进行了大量的研究工作<sup>[4-6]</sup>。Bollinger<sup>[3]</sup>发现卷取机故障会在带钢表面

收稿日期:2011-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50974151)

作者简介:陈平(1975-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事振动测试、设备故障诊断、机电一体化技术等方面的研究,  
(E-mail)chempion@126.com。

产生振纹,Hardwick<sup>[4]</sup>研究了轧辊磨床振动对轧辊表面以及带钢表面振纹的影响,Niziol 等<sup>[5]</sup>对轧机垂直振动及其对带钢表面质量的影响进行了数值仿真,侯福祥等<sup>[7]</sup>研究了自激振动在支撑辊表面形成振纹的过程。但是,由于问题的复杂性,至今对振纹仍缺乏普遍可行的抑制方法,只能具体问题具体分析。

某冷轧厂 1220HC 六辊冷轧机出现了振纹现象。新磨轧辊上机轧制后,很快就在轧制出的带钢表面发现振纹。振纹分布在整卷带钢上,从带钢头部、中部和尾部观测,振纹间距均匀,与轧制方向垂直,周期为 20~30 mm,常见的在 25 mm 左右。同时支撑辊表面也发现了同样的明暗相间的条纹,条纹与轧辊轴线平行,且条纹随支撑辊使用时间的增加越来越严重。为此,笔者对 1220HC 六辊轧机进行了连续跟踪测试与分析,研究了轧机振纹产生的机理及其与轧机振动的关系,最终找到振纹形成原因,提出振纹抑制措施。

## 1 轧机振动测试

### 1.1 轧机振动测试方案

采用加速度传感器拾取各机架及辊系的振动信号,以专用振动信号分析系统对各测点的信号进行实时采集、观测和记录。测点包括:上下支撑辊、上下中间辊、上下工作辊轴承座的水平和垂直方向,以及两侧机架牌坊的水平和垂直方向。振动信号通过专用信号电缆进入条理仪,对信号进行降噪、滤波、放大后,由 WS-5921N 数据采集卡进行采集并存入计算机。

测试包括 4 机架单独测试和 4 机架联合测试,测试工况包括不同轧制速度、不同规格、不同乳化液浓度等,测试周期从轧机全部换辊上机轧制开始直至最后更换支撑辊为止,测试过程中随时跟踪观测支撑辊和带钢表面的振纹形态。

### 1.2 振动信号分析

将轧机全部更换新磨轧辊上机轧制开始至最后更换支撑辊为止的时期分为初期、中期和后期 3 个阶段<sup>[7-9]</sup>。在新磨轧辊上机轧制开始,带钢表面没有振纹产生,轧制一天之后,带钢表面可见细小微弱的振纹,如图 1 所示。测试无振纹和出现微弱振纹时,4 个机架各轧辊轴承座垂直和水平方向的振动信号,其中垂直方向的振动信号最具代表性。为便于比较,测试均在轧机稳定轧制速度 850 m/min 左右进行,图 2 所示分别为无振纹和微弱振纹时 3# 机架下工作辊垂直方向的振动信号。

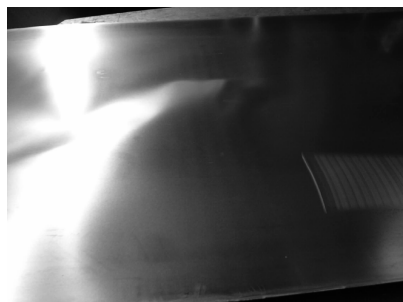
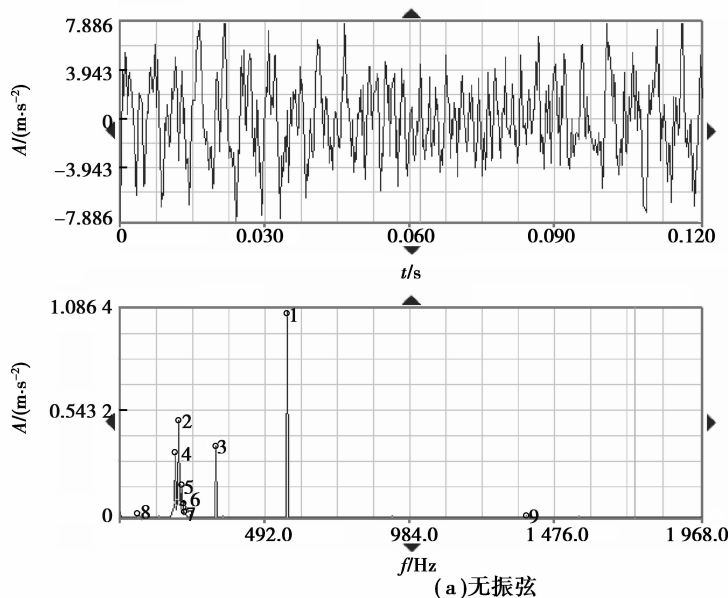


图 1 带钢表面的振纹

从图 2 可以看出,不管是在带钢无振纹还是在出现微弱振纹时,振动能量均主要集中在 568 Hz。



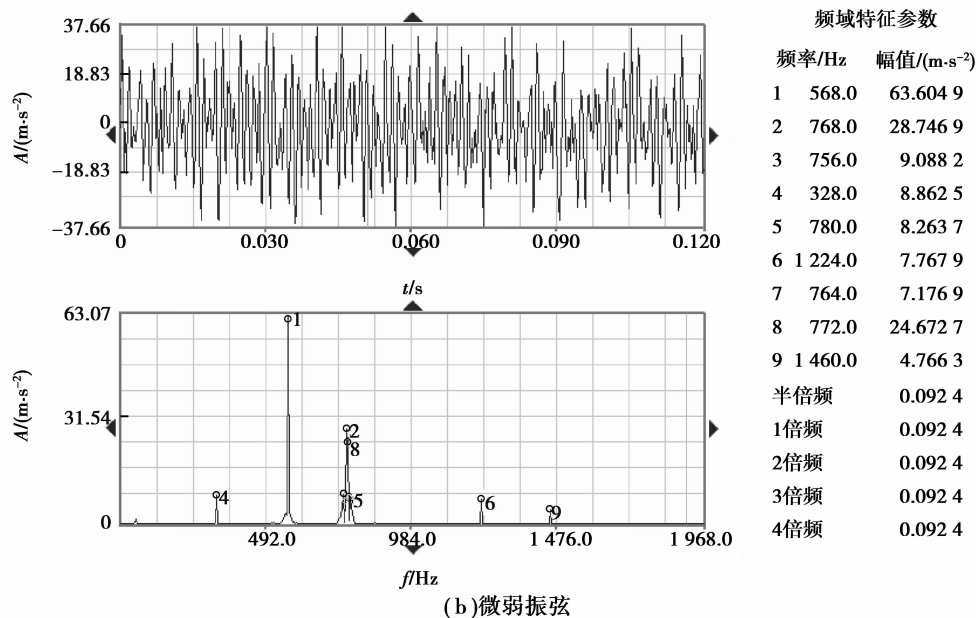


图 2 3# 架下支撑辊垂直方向振动频谱

在支撑辊使用中后期,带钢表面振纹已非常明显,同时支撑辊表面也有非常明显的振纹,如图 3 所示。此时,在不同的稳定轧制速度下,振动峰值频率也不相同。表 1 为 3# 机架下支撑辊振动主要频率成分与轧制速度的关系,图 4 为对应的振动频谱,其中,各机架的振动只与其轧制速度相关,因此表 1 中的轧制速度为 3# 机架的轧制速度。

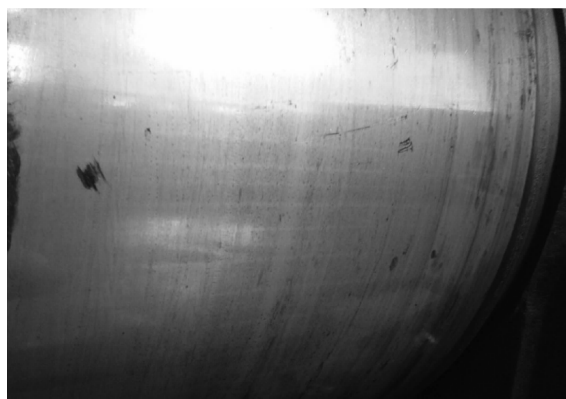
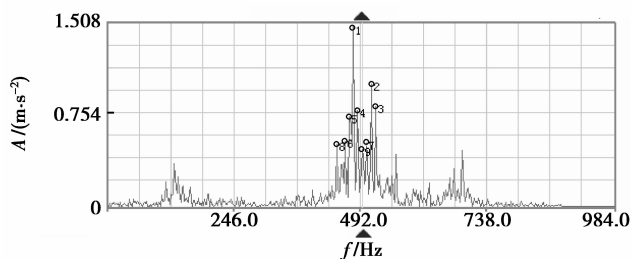


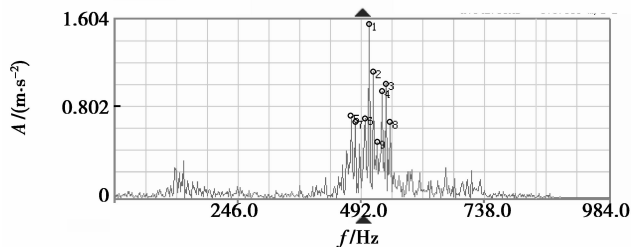
图 3 支撑辊表面的振纹

表 1 振动主要频率成分与轧制速度的关系

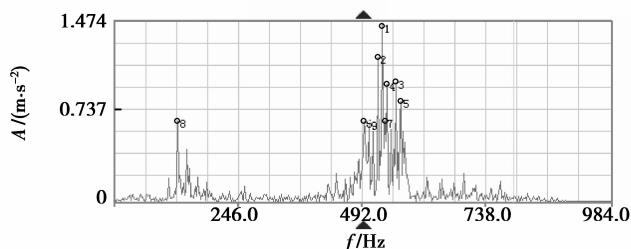
轧制速度 /(m·min <sup>-1</sup> )	主要频率 /Hz	振纹间距 /mm
730	480	25.34
766	508	25.13
805	532	25.22



(a) 轧制速度为 730 m/min



(b) 轧制速度为 766 m/min



(c) 轧制速度为 805 m/min

图 4 3# 机架下支撑辊不同速度时的振动

从表 1 可见,振动特征频率与轧制速度存在良好的线性关系,这种振动峰值频率随轧制速度变化的现象称为“频移”现象,由于频移现象只是在支撑辊表面形成振纹后才出现,因此可以认为是振纹对轧机系统施加的激励所致。

综上所述,在支撑辊上机轧制早期,系统的振动能量集中在 568 Hz 左右,在支撑辊表面出现振纹后频谱图中出现了频移现象。

### 1.3 振纹和振动频率的关系

在正常轧制状态下,振纹间距  $\lambda$ 、轧制速度  $v$ 、振纹频率  $f$  三者之间存在着确定的关系

$$f = v/\lambda. \quad (1)$$

由于轧机常稳定在轧制速度  $v=850$  m/min 左右运行,取  $\lambda=25$  mm,根据式(1)可计算出振纹频率  $f=566.7$  Hz。这一结果与实际测量结果 568 Hz 非常接近。结合以上频谱分析知,该峰值频率在轧制初期就已经存在,故可以认为带钢及支撑辊表面振纹是在稳定阶段由 568 Hz 所对应的振动引起。

## 2 轧机动态特性分析

### 2.1 轧机固有频率

冷连轧机的振动研究涉及到润滑理论、轧制理论还有振动理论等许多方面的内容,相互之间影响关系也很复杂,并且大多数都属于非线性问题,只能借助计算机进行仿真来研究轧机振动的规律。

根据 1220HC 六辊冷轧机的特点,建立了轧机 8 自由度非对称集中质量垂直振动模型<sup>[10-13]</sup>,辊系简化为 6 个等效质量,机架与上、下横梁及压下油缸简化为 2 个等效质量,由该模型计算的固有频率见表 2。

表 2 轧机固有频率

阶数	$f/\text{Hz}$
$f_1$	92.0
$f_2$	120.6
$f_3$	208.8
$f_4$	265.7
$f_5$	324.3
$f_6$	398.1
$f_7$	563.9
$f_8$	682.5

由表 2 可以看出,第 7 阶固有频率与实际测量得到的轧机垂直振动频率 568 Hz 非常接近,其振型如图 5 所示。该阶振型的工作辊同向运动,其中中

间辊振动最大,中间辊不断弹跳碰撞支撑辊和工作辊表面,而支撑辊表面硬度最低(工作辊 > 中间辊 > 支撑辊)且上机轧制时间最长,故可以认为支撑辊表面的振纹是中间辊相对于支撑辊的周期振动引起的。也正因为如此,轧机在轧制一段时间以后,异常振动会在支撑辊表面形成振纹。

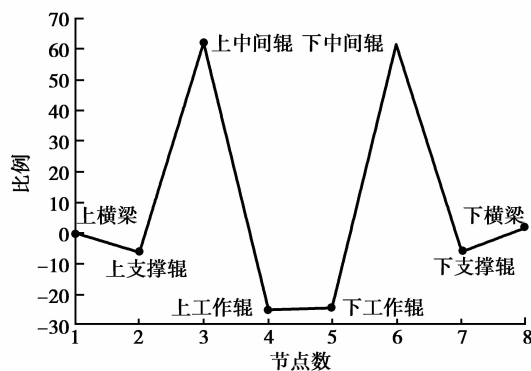


图 5 轧机的第 7 阶振型

### 2.2 频移现象分析

支撑辊表面的振纹一旦形成,支撑辊对中间辊和工作辊的作用会因为振纹的存在而形成一个附加激励。该激励可以表示为<sup>[8,11]</sup>

$$F_m = \xi \sin\left(\frac{2\pi v}{\lambda} t\right), \quad (2)$$

式中: $\xi$  为振纹影响系数; $v$  为轧制速度; $\lambda$  为振纹间距。

根据图 5 仿真模型可知,中间辊的振动远远大于支撑辊,故可将该振动简化为二自由度振动模型,如图 6 所示。

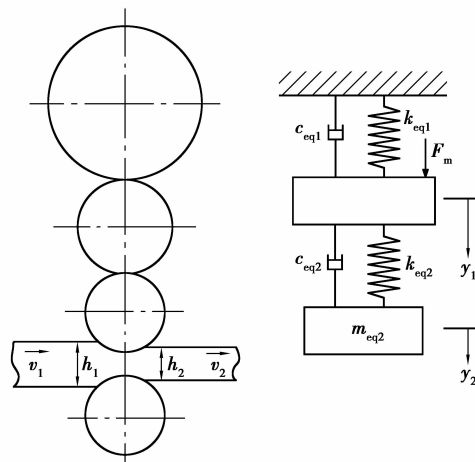


图 6 轧制振动模型

该模型在附加激励作用下的振动方程为

$$\begin{cases} m_{eq1} \ddot{y}_1 + k_{eq1} y_1 - k_{eq2} (y_2 - y_1) = F_m, \\ m_{eq2} \ddot{y}_2 + k_{eq2} (y_2 - y_1) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

由振动理论可知,响应频率和外激励  $F_m$  频率一致, $F_m$  的频率  $f_m$  与轧制速度和振纹间距有关,即  $f_m = v/\lambda$ ,在振纹间距  $\lambda$  一定的情况下, $f_m$  随轧制速度的提高而升高,可见,频移现象是由支撑辊表面振纹引起的强迫振动的反映。

综上所述,在支撑辊上机轧制早期,轧机振动为某种原因引起的系统第 7 阶固有频率的共振,在振纹形成之后,为共振和强迫振动共存。

### 3 振纹抑制措施

#### 3.1 振源分析

根据振纹间距  $\lambda$  的变化与否可以把引起振纹的因素分为两类<sup>[14-15]</sup>。

1) 当轧制速度变化时,若振动频率不变,振纹间距变化。此时可能是轧机机架或轧辊的某阶振动模态被激发所致,这种情况是轧机本身设计的缺陷。只能尽量避免激发其固有频率的振动,这包括加强轧辊轴承座刚性、使用液压衬板、增加橡胶阻尼块、改善辊缝摩擦润滑状态等。

2) 轧制速度变化时,若振动频率变化,振纹间距不变。此时有 2 种原因。

a. 轧制前,轧辊表面上已经有了振纹,轧制过程中使用这样轧辊轧制会使钢带厚度发生平滑性的波动,使用有振纹的轧辊轧制,好比将振纹印到带钢表面上,从而使带钢表面产生振纹。

b. 设备的磨损是主传动系统上产生振动冲击的原因,如轴承缺陷、齿轮磨损和联轴节松动。齿轮表面存在磨损,会使工作辊和带钢的线速度之比产生周期性变化,引起振动,在带钢表面产生振纹。主传动联轴节存在间隙会引起冲击,轧机在冲击作用下产生多种模态振动,会引起振纹;轧辊轴承一般为滚动轴承,长时间运行后出现内外道和滚动体缺陷,会引起轧辊振动。

现场实测带钢表面振纹间距  $\lambda$  恒定,即  $v/f$  的比值为恒定值,且已排除磨削原因导致的轧辊表面振纹,因此将轧机异常振动原因归结为设备原因,即轧机主传动线因设备损耗产生冲击振动。

#### 3.2 人字齿轮冲击对轧机振动的影响

现场检修和测试已证实,轧机主传动线的第 3 和第 4 机架的人字齿轮存在严重的磨损故障,齿轮啮合时除了啮合频率引起的冲击振幅大幅增加以

外,其谐波频率成分的振动也大大增强。

1220HC 轧机主传动系统的人字齿轮座齿数  $Z=29$ ,速比 1:1,设转频为  $f_r$ ,则齿轮啮合频率  $f_z$  及其  $N$  倍谐波频率成分  $f_n$  之间存在下列关系:

$$f_n = N f_z = 29 N f_r. \quad (4)$$

工作辊直径  $D=390\sim 430$  mm,取  $D=420$  mm,则带钢速度

$$v = \pi D f_r = 1\,319.47 f_r. \quad (5)$$

由式(1)可得振纹频率  $f=1.32 f_r/\lambda$ ,所以

$$\frac{f_n}{f} = \frac{29 N f_r}{1\,319.47 f_r/\lambda} = \frac{29 N \lambda}{1\,319.47} = \frac{N \lambda}{45.5}, \quad (6)$$

而纹距  $\lambda=20\sim 30$  mm,当  $\lambda=22.75$  mm 时,

$$\frac{f_n}{f} = \frac{N}{2}. \quad (7)$$

式(7)表明,轧机主传动系统中人字齿轮啮合频率的第 2 阶谐波频率(即  $N=2$ )与振纹频率相等。而轧机的稳定轧制速度常在 850 m/min 左右,此时人字齿轮啮合频率的第 2 阶谐波频率为 567 Hz 左右,与轧机第 7 阶固有频率 568 Hz 非常接近。因此,故障人字齿轮产生的冲击将激起轧机第 7 阶固有振型的振动,从而导致支撑辊表面振纹的形成。

这进一步证实了主传动线因设备损耗产生冲击振动,激起了轧机第 7 阶固有频率的振动。

#### 3.3 振纹抑制措施

综上所述,振纹的形成过程为:轧机主传动线因设备损耗产生冲击振动,在稳定轧制阶段,激起了轧机第 7 阶固有频率的共振,很快就形成支撑辊表面振纹,辊面振纹形成后对中间辊和工作辊产生激励作用,引起轧机强迫振动,进一步加速振纹的形成,使带钢不管是在低速还是高速情况下,表面都有一致的振纹存在。

基于以上分析,对振纹的抑制可以采取以下措施:一是主动控制,即消除或控制振源;另一是设法提高轧机的抗振能力,即被动控制。

主动控制是优化轧机主传动系统,根除振纹发生的基础。现场观测发现由于传动系统齿轮间隙过大造成轧机主传动系统存在明显的振动现象,振动随轧制速度的提高而增强。因而,应加强设备维修,优化主传动系统,严格控制齿轮传动间隙、接轴部件内部间隙以及工作辊扁头与轴套的配合间隙,提高齿轮和轴承精度。另外,降低轧制速度也能缓解带钢振纹的产生,这是因为低轧制速度不能有效激起轧机第 7 阶固有频率的振动,生产实践也证实了这一点,但轧机长期在低轧制速度下生产,会大大降低生产效率。被动控制是从增大系统的阻尼,提高系

统的抗振能力入手。对轧机而言可增大压下油缸阻尼以吸收动能量,增加弯辊力以加大工作辊之间的阻尼。另外,增设液压衬板阻尼器也是一种可行的方法。

## 4 结 论

1) 轧机主传动线因设备损耗产生冲击振动,在稳定轧制阶段,激起了轧机第7阶固有频率的振动,中间辊相对于支撑辊的周期振动导致支撑辊表面形成振纹。

2) 支撑辊表面振纹形成后,由振纹引起的强迫振动进一步加速了支撑辊的磨损。

3) 有效抑制振纹措施包括优化轧机主传动系统和提高轧机系统的抗振能力。

4) 进一步的研究工作包括垂振和扭振的联合研究,以及润滑、工艺参数等对轧机振动的影响。

### 参考文献:

- [1] 侯福祥,张杰,曹建国,等. 带钢冷轧机振动问题的研究进展及评述[J]. 钢铁研究学报,2007,19(10):6-10.  
HOU FU-XIANG, ZHANG JIE, CAO JIAN-GUO, et al. Review of chatter studies in cold rolling [J]. Journal of Iron and Steel Research,2007,19(10):6-10.
- [2] 李峰,王康健,李有元,等. 极薄带钢冷轧过程振动纹成因分析及抑制[J]. 重型机械,2009(1):32-35.  
LI FENG, WANG KANG-JIAN, LI YOU-YUAN, et al. Cause analysis and control of vibration marks on thin strip during cold rolling [J]. Heavy Machinery, 2009(1):32-35.
- [3] BOLLINGER L A. Winding reel involvement in temper mill chatter [J]. AISE Year Book,1994 (11):27-29.
- [4] HARDWICK B R. A technique for detection and measurement of chatter marks on roll surfaces [J]. Iron and Steel Technology,2003,80(4):64-70.
- [5] NIZIOL J, SWIATONIOWSKI A. Numerical analysis of the vertical vibration of rolling mills and their negative effect on the sheet quality [J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,162:546-550.
- [6] ZHONG J, YAN H Z, DUAN J, et al. Industrial experiments and finds on temper rolling chatter[J]. Journal of Materials Processing Technology,2002,120(1/3):275-280.
- [7] 侯福祥,张杰,史小路,等. 冷轧平整机振纹实测研究[J]. 北京科技大学学报,2007,29(6):613-616.  
HOU FU-XIANG, ZHANG JIE, SHI XIAO-LU, et al. Measurement of chatter marks on the backup roll of a cold temper mill [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2007,29(6):613-616.
- [8] 范小彬,臧勇,吴迪平,等. CSP 轧机振动和振纹的试验研究[J]. 钢铁,2006,41(10):54-58.  
FANG XIAO-BIN, ZANG YONG, WU DI-PING, et al. Experimental research on vibration and chatter mark of CSP mill [J]. Iron and Steel,2006,41(10):54-58.
- [9] MONTMITONNET P. Hot and cold strip rolling process [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2006,195(48/49):6604-6625.
- [10] FARLEY T. Rolling mill vibration and its impact on productivity and product quality[J]. Light Metal Age, 2006,64(6):12-14.
- [11] HARDWICK B, BENHAFSI Y. Measurement of chatter marks formed during roll grinding [J]. Aluminium International Today,2006,16(3):10-14.
- [12] ZYGMUNT D, ANDRZEJ A, ADAM B. Non-linear vibrations in cold rolling mills [J]. Mecanique & Industries,2003,4(2):151-158.
- [13] 孟令启,徐如松,王建勋,等. 中厚板轧机非线性参激的振动[J]. 重庆大学学报,2008,31(4):393-396.  
MENG LING-QI, XU RU-SONG, WANG JIAN-XUN, et al. Parametrically excited nonlinear vibrations of medium and heavy plate milling [J]. Journal of Chongqing University,2008,31(4):393-396.
- [14] 王永利,汪友国,郭树宝. 冷轧板振动痕缺陷原因分析[J]. 宝钢技术,2007(3):24-28.  
WANG YONG-LI, WANG YOU-GUO, GUO SHU-BAO. Cause analysis of vibration marks on cold strips [J]. Baosteel Technology,2007(3):24-28.
- [15] 陈培林,王泽济. 带钢表面振动纹的产生及其抑制[J]. 钢铁,2006,41(5):49-52.  
CHEN PEI-LIN, WANG ZE-JI. Cause and control of chatter marks on steel strip surface [J]. Iron and Steel, 2006,41(5):49-52.

(编辑 张 苹)