

带钢表面振纹的工业试验与发现^①

钟 掘¹, 严珩志¹, 段吉安¹, 徐乐江², 王文海², 陈培林²

(1. 中南工业大学 冶金机械研究所, 长沙 410083; 2. 宝山钢铁集团公司, 上海 201900)

摘 要: 对某平整机生产的带钢表面横振纹进行了一系列试验研究, 发现带钢表面振纹与系统的自激振动强相关, 此种振动源于部分流体润滑与粘滑兼存的辊缝界面。

关键词: 平整机; 自激振动; 辊缝界面

中图分类号: TH113

文献标识码: A

平整带钢表面横振纹缺陷是世界范围普遍存在的问题^[1~3], 不少学者从不同角度做过多种研究工作, 如 Nessier 等人研究了辊系的弯曲振动特性以及平整机的 5 倍频程颤振^[1], Bollinger 和 Rapsinski 研究发现了开卷与卷取传动系统的齿轮啮合激励引起平整机振动的现象^[3], 奥钢联研制了一套平整机振动监测系统等。但至今对平整机的振动仍缺乏可形成有效对策的认识, 表面振纹仍然是影响钢板表面质量的重要问题。

平整机是一个复杂机电系统, 由各子系统间的多种耦合所决定的平整机动力学状态, 表现出一些奇异行为, 为钢铁产业界长期困惑的板面振纹就被称之为“幽灵振动”。中南工业大学冶金机械研究所与宝山钢铁集团公司合作, 对平整机运动进行系统试验研究, 以期对板面振纹问题有所发现。

1 平整带材表面横振纹特征分析

1.1 振纹板面宏观特征

1.1.1 振纹间距

从宝山钢铁集团公司 CM04 平整机生产的带钢中取样, 观察、测试其表面横振纹, 发现有如下特征: 横振纹沿钢带表面长度方向明暗相间、间距不等、边界不明确、条纹或直或曲, 如图 1 所示。明暗条纹间距有多种, 在 5~ 40 mm 之间, 以 20~ 30 mm 间距为多。

1.1.2 振纹板厚度特征

采用铝箔测厚仪(精度为 0.1 μm)测试振纹板厚度, 其中几个试样沿带钢轧制方向厚度变化如图

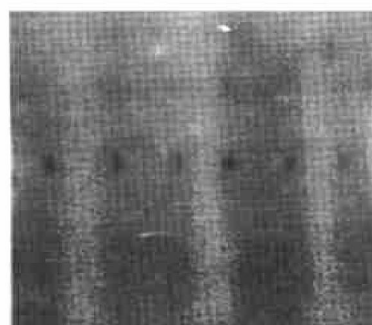


图 1 钢带表面横振纹形状

Fig. 1 Shape of chatter marks on surface of steel strip

2 所示。从图可见振纹板面沿轧制方向有较明显的厚度起伏, 最大厚差可达 10 μm 。

1.1.3 振纹板硬度特征

采用 HV-10A 型轻负荷硬度计, 对 ST14 钢板明、暗条纹处分别进行硬度测试(使用负荷 9.8N)。测试结果表明, 明暗条纹处无统计规律的硬度差异。

1.2 振纹板表面微观形貌

用光学显微镜拍摄观察平整钢带表面微观形貌, 明暗条纹的边界较难捕捉, 但板面被轧辊粘着与犁削的痕迹明显, 如图 3 所示。

据板面状态与振纹的以上现象, 可以推断:

1) 板面上间距不等的振纹表明工作辊有模态丰富的微幅振动;

2) 上、下工作辊存在某种方向相反的微幅振动, 使带材产生周期厚差;

3) 工作辊与带钢在轧制界面处于粘着与相对滑动并存的运动状态, 即粘滑运动。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 59835170

收稿日期: 1999- 12- 09; 修订日期: 2000- 01- 18

作者简介: 钟 掘(1936-), 女, 教授, 中国工程院院士

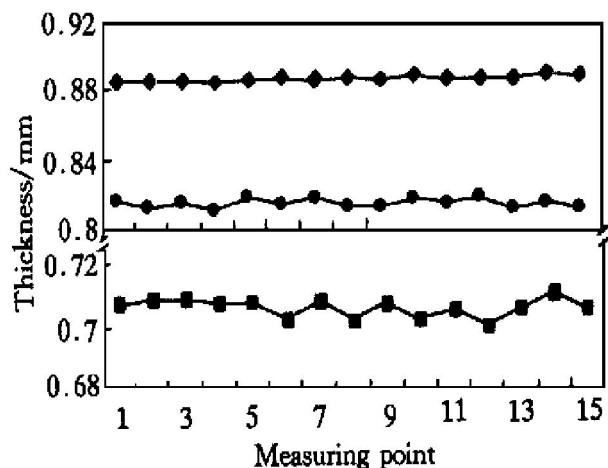


图 2 振纹板沿轧制方向厚度变化

Fig. 2 Thickness variation of steel strip in rolling direction

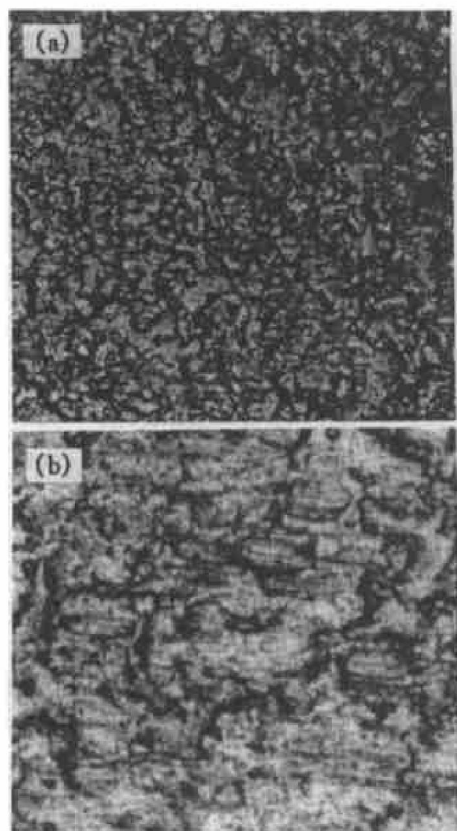


图 3 板面的微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of steel strip surface
(a) $\times 32$; (b) $\times 64$

2 平整机振动试验研究

2.1 振动测试系统

平整机是典型的复杂机电系统,其动力学状态与各子系统间的耦合作用密切相关。因此要考察平整机的动力学状态,则必须在平整机的机、电、液各子系统均布置多个测点采集信号,其中包括主机座(含辊系与机架)垂直和水平振动信号,传动系统

扭振信号,电源、电控和液压信号。垂振与水平振动采用加速度传感器测试,扭振采用应力应变电测法测试。

2.2 振动特征提取

1) 能量最大、持续率最高的振动模式

测试结果表明,在平整机垂振中振动能量最大、持续率最高的振动为 570~610 Hz 频段的振动。图 4~9 分别为该频段在各部件振动中的反映,表明其核心频率为 584 Hz。

在更多的谱图中查找各部件的振动特征,发现该频率的振动在工作辊上最突出、集中,可以推论振动的源发地为上、下工作辊,该频率的振动在其

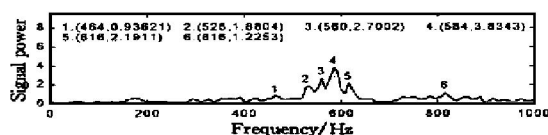


图 4 上工作辊垂振功率谱

Fig. 4 Power spectrum of vertical vibration of upper working roll

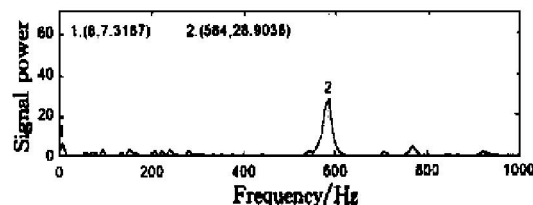


图 5 下工作辊垂振功率谱

Fig. 5 Power spectrum of vertical vibration of lower working roll

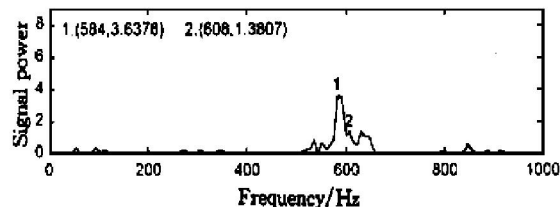


图 6 下支承辊垂振功率谱

Fig. 6 Power spectrum of vertical vibration of lower backing roll

他部件上的反映是振动传递所致。

振动信号表明,在不同辊径、辊面状态、张力等条件下,核心频率 584 Hz 可产生频移,常见在 580~590 Hz 范围,由轧辊直径变化引起的核心频率的改变在 5 Hz 以内,显然工作辊在该频率的振动与其自身参数和轧制界面的运动及动力状态密切相关。

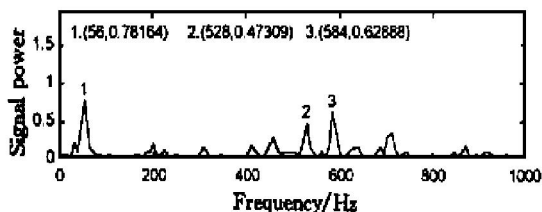


图 7 机架垂振功率谱

Fig. 7 Power spectrum of vertical vibration of stand

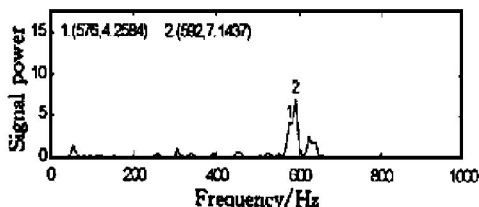


图 8 压下活塞杆垂振功率谱

Fig. 8 Power spectrum of vertical vibration of piston rod

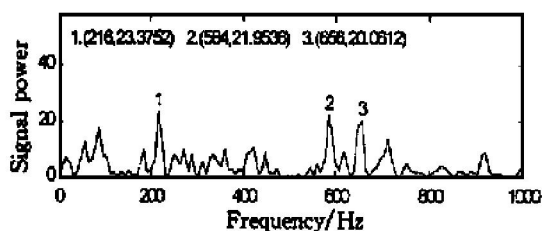


图 9 上支承辊垂振功率谱

Fig. 9 Power spectrum of vertical vibration of upper backing roll

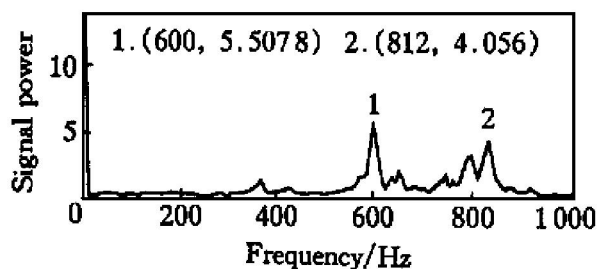


图 10 工作辊谐波振动

Fig. 10 Harmonic vibration of working roll

2) 谐波振动

在平整机振动中也出现了谐波振动, 较多出现的谐波频率为 300, 600 和 900 Hz, 如图 10 是工作辊的 600 Hz 谐波振动。

3) 随机瞬态振动

在平整机上述两类振动的同时, 总是伴随着丰富的随机瞬态振动, 图 11 为工作辊振动的瀑布图之一。

2.3 振动类型判断

分析上述三种振动类型的依据是查明外激励频

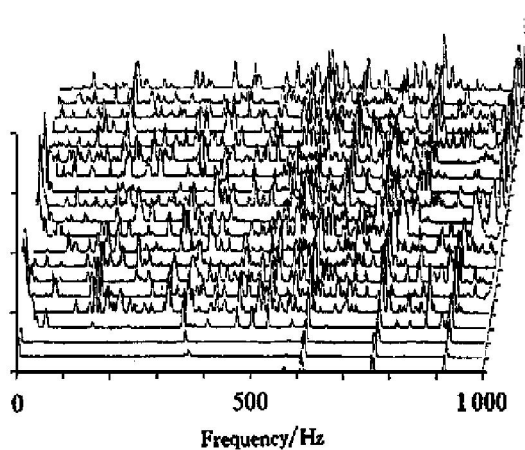


图 11 工作辊随机振动瀑布图

Fig. 11 Waterfall picture of random vibration of working roll

率与系统固有频率。

2.3.1 外激励频率

1) 驱动电源

平整机的主传动、开卷、卷取等系统的驱动装置均为 SCR-D 组成的直流电气系统, 产生的转矩中存在 300, 600, 900 Hz 等谐波频率。

2) 液压系统

实测信号表明, 液压系统的压力十分平稳, 未发现可测的动态成分, 无明显外激励。

2.3.2 系统固有频率

运用混合有限元方法, 对平整机系统进行了动力学特性分析。其中机架用梁单元模拟; 液压油缸、楔块等用杆单元模拟, 并叠加油膜刚度; 工作辊与支承辊、工作辊与轧件间的动力特性用弹性元模拟; 轧辊用等效集中质量元模拟^[4]。对系统前 25 阶的固有频率计算结果如表 1 所示。

由固有频率的分析结果可见, 系统振动的核心频率 584 Hz 与系统的第 17 阶固有频率有良好的一致性。

考察系统第 17 阶固有频率与轧制界面的关系。系统该阶振型如图 12 所示, 实线表示系统的平衡状态(亦即系统的有限元模型), 虚线所示为该阶振型; 表明在该阶振动中, 上下工作辊位移值最大且方向相反。可见该阶振动与实测板面振纹周期厚差这一特征状态一致。

为了进一步确认系统在 584 Hz 处的固有特性, 采用平整机系统的另一 6 自由度集中质量模型进行了分析。该模型中, 辊系用 4 个等效质量模拟, 机架与上、下横梁用 2 个等效质量模拟。该模型对辊系有充分的重视, 而对其他部件作了较大简化。对固有频率的计算结果如表 2 所示。

表 1 平整机固有频率(Hz)

Table 1 Natural frequencies of temper mill (Hz)

Mode number	1	2	3	4	5
Frequency	33.4	48.1	72.1	88.5	117.8
Mode number	6	7	8	9	10
Frequency	149.6	204.5	232.3	247.9	330.3
Mode number	11	12	13	14	15
Frequency	376.1	415.8	448.5	471.4	513.3
Mode number	16	17	18	19	20
Frequency	552.1	592.4	658.6	722.6	764.6
Mode number	21	22	23	24	25
Frequency	860	909	1 038	1 072	1 159

型一致。

用参数摄动法对集中质量模型进行仿真分析,得到轧制界面的等效刚度减小到 10% 时系统的固有频率如表 3 所示。可见系统的第 6 阶固有频率与轧制界面刚度相关性最强,表明该阶固有频率直接决定于轧制界面的动力参数。

参数摄动法对有限元模型的仿真分析得到了同样的结果。

表 3 轧制界面等效刚度减小到 10% 时平整机的固有频率(Hz)

Table 3 Natural frequency of temper mill when the equal stiffness of rolling interface reduced to 10% (Hz)

Mode number	1	2	3	4	5	6
Original frequency	85.9	131.8	179.3	363.7	446.4	591.6
Changed frequency	81.9	154.9	168.1	352.1	383.4	505.5
Variation	4.0	- 23.1	11.2	11.6	63.0	86.1

由上述事实推理:

- 1) 工作辊持续振动的频率 584 Hz 是系统的某阶固有频率;
- 2) 此阶固有频率的振型所确定的上、下工作辊的位移方向相反,与板面振纹的厚差现象对应;
- 3) 系统各阶固有特性中,584Hz 对应的这阶频率对辊缝刚度的改变最为敏感,可以确定工作辊持续振动的频率是与辊缝动力学特性密切相关的那阶固有频率。

上述现象和推理,形成本文的一个重要发现:

平整机微幅振动中一个能量消耗最大的主导模态是系统在 584Hz 处的固有特性,该阶特性与工作辊的运动状态特别是轧制界面的动力特性直接相关,是一种与外激励频率无关的自激振动。

3 平整机振动状态与条件

3.1 辊缝动力学的特殊条件与自激振动

- 1) 表面粗糙度大,对应滑动摩擦系数大
工作辊面经喷丸处理,粗糙度大于 5.0 μm,辊面与带钢表面间的滑动摩擦系数达 0.17~ 0.25,辊缝处于大摩擦状态。
- 2) 小变形量下的辊-板相对运动
平整机工作辊与钢带表面的相对运动为牵引滚动与微滑共存,平整过程的小延伸率(1%~ 2%)决定了其间的相对滑动速度很小,约 0.1 m/min。

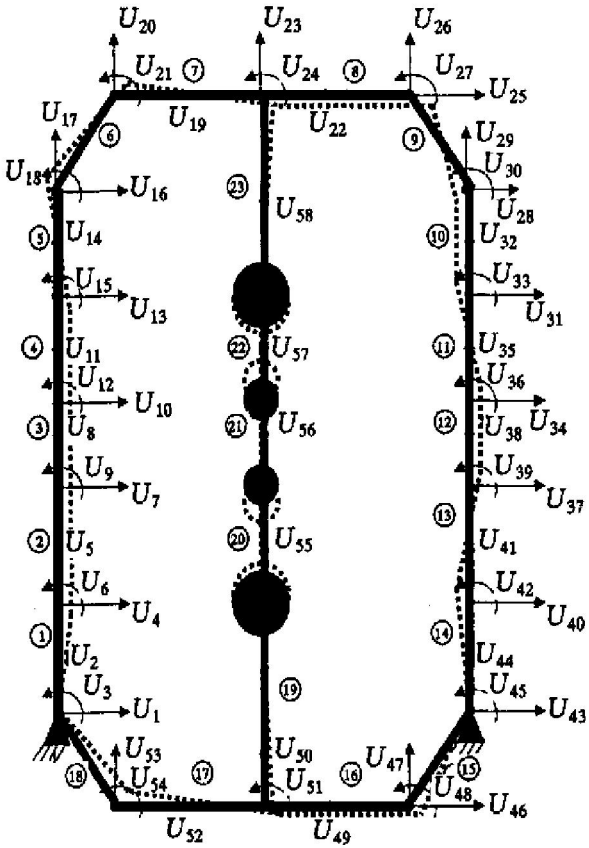


图 12 平整机的第 17 阶振型

Fig. 12 17th mode shape of temper mill

表 2 平整机固有频率

Table 2 Natural frequencies of temper mill

Mode number	1	2	3	4	5	6
Frequency/Hz	85.9	131.8	179.3	363.7	446.4	591.6

比较表 1 与表 2 可见,有限元模型的第 17 阶固有频率(592.4Hz)与集中质量模型的第 6 阶固有频率(591.6Hz)一致。

由集中质量模型的振型得到,系统的第 6 阶振动在工作辊处振幅最大,且振动位移反向,使辊缝一开一合;该振型特征与有限元模型的第 17 阶振

3) 平整液的润滑功效

平整液主要起清洗作用, 其粘度为 $1.01 \text{ mm}^2/\text{s}$, 与水接近, 边界与动力润滑性能均很差。

4) 摩擦状态在辊面一个工作周期的稳定性

工作辊面粗糙峰在轧制界面被磨削, 辊面粗糙度在一个工作周期中(约 8 h)变化较快, 由新辊的 $5.0 \mu\text{m}$ 到磨辊时的 $3.0 \mu\text{m}$ 。这种变化加剧了界面的不稳定性。

综上可以推断辊缝界面呈粘-滑运动与部分膜弹流润滑共存的欠润滑、大摩擦特性, 图 3 所示的平整钢带犁削和粘着混合的表面特征即为例证。

根据摩擦磨损原理^[5]和摩擦学数据库, 大摩擦、重载条件下, 摩擦系数与相对滑动速度间具有图 13 所示关系(其中 v_0 约为 25 m/s), 平整机轧辊辊面与带材表面间的摩擦特性处于曲线的左部陡峭区, 也同时表明平整机的轧制界面具有负阻尼特性, 系统存在在各种随机激励下产生持续振动的能量反馈机制, 即具有产生自激振动的必要条件。

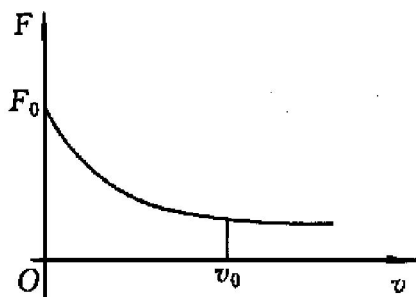


图 13 摩擦力与相对滑动速度的关系

Fig. 13 Relationship between friction and relative sliding speed

3.2 机电耦合-谐波振动的激励源

平整机组的开卷机、主传动和卷取机等驱动装置都采用 SCR-D 组成的直流电气传动系统, 主传动、卷取均为双电机同轴驱动, 开卷机通过钢卷耦合亦为两电机同轴驱动。平整机组电机整流变压器为三绕组变压器, 其接线方式为 D/y_5 和 d_0 , 两套整流器的输入电压互差 30° (电角度)。当磁场的磁通为常数时, 两台电动机的 6 次谐波(300 Hz)转矩恰好方向相反, 而 12 次谐波(600 Hz)转矩方向相同(如图 14 所示), 平整机驱动电机的谐波转矩通过机电耦合成为平整机主机座谐波振动的激励源^[4]。

3.3 平整机丰富的随机激励源导致系统随机响应

平整机许多传动件的运动频率在工作过程中连续变化, 如开卷、卷取等子系统, 这种特性对系统构成频率扫描激励, 平整机系统则表现为不同时间以不同阶固有频率响应的瞬态振动。此外钢带开卷

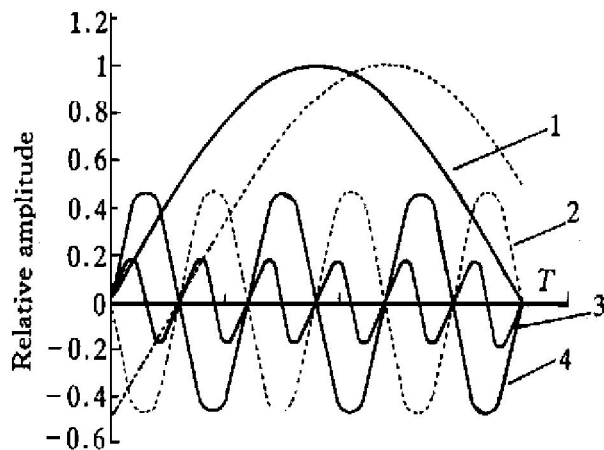


图 14 平整机整流变压器接线方式对谐波分量的影响

Fig. 14 Influence of connection mode of the transformer on sub-harmonic

- 1—First harmonic, 50 Hz;
- 2—Sextuple frequency harmonic under d/y_5 condition, 300 Hz;
- 3—Twelve fold frequency harmonic under D/y_5 or d_0 condition, 600 Hz;
- 4—Sextuple frequency harmonic under d_0 condition, 300 Hz

过程的不稳定性也是系统随机激励源之一。这些随机振动表现为钢带表面振痕间距存在多样性和不确定性。

4 高板面质量与平整机技术的发展

以无振痕高板面质量为目标, 在平整技术中可进行如下方向的探索。

4.1 辊缝状态——工艺设计

通过工艺设计, 改善辊缝特性是减小平整机振动的根本措施。

工艺设计的首要问题是平整方式的选择, 须综合考虑设备性能与产品的表面功能性形貌的要求。

对于湿平整工艺, 在保证产品表面形貌要求的前提下, 通过工艺条件的适当匹配, 减小或消除轧制界面的负阻尼特性是一个带根本性的技术进步方向。平整液合适的润滑性能、轧辊表面形貌的微观设计与硬度的匹配、平整工艺参数与机电参数的全局优化等都将对板面质量产生积极的效果。

4.2 工况在线监测网络

对平整机工况实行全面在线监测(包括机内监测和磨辊等相关监测), 实时调整平整规程和各环节的技术匹配, 是保证表面质量的有效技术措施。

5 本文的发现与认识

1) 现有湿平整工艺与设备, 其多元参数融合于辊缝, 产生一种辊缝负阻尼。

2) 现有结构的平整机系统存在一种对工作辊辊缝动力状态最敏感的模式, 在负阻尼条件下, 系统出现以此阶特性表现的自激振动。

3) 这阶自激振动与板面振纹最相关。

说明:

同时参加本文研究工作的同志还有中南工业大学的肖刚、易幼平、蔡敢为、李旭宇、贺尚红、唐华平、贺地求、朱志华、张友旺、陈杰、谭怀亮、喻寿益、贺建军、梁薇, 宝山钢铁集团公司的陈在根、王泽济。

REFERENCES

- [1] Nessier G L and Cory J F Jr. Cause and solution of fifth octave backup roll chatter on 4-h cold mills and temper mills [J]. AISE Year Book, 1989(12): 33~ 37.
- [2] Gasparic J J. Vibration analysis identifies the cause of mill chatter [J]. AISE Year Book, 1991(2): 27~ 29.
- [3] Bollinger L A. Winding reel involvement in temper mill chatter [J]. AISE Year Book, 1994(11): 27~ 29.
- [4] LIANG Wei(梁 薇), HE Jian-jun(贺建军) and YU Suo-yi(喻寿益). 谐波电流分量对平整机工作的影响 [J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 31(1): 78~ 80
- [5] QUAN Yong-xin(全永昕) and SHI Gao-yi(施高义). The Principle of Friction and Wear(摩擦磨损原理) [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1988, 11.

Industrial experiments and findings on chatter marks of steel strip

ZHONG Jue¹, YAN Hong-zhi¹, DUAN Jī-an¹, XU Le-jiang², WANG Wen-hai², CHEN Pei-ling²

1. Metallurgical Mechanism Research Institute,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China;

2. Baoshan Steel Group Corporation, Shanghai 201900, P. R. China

Abstract: Based on experimental researches on chatter marks of steel strip of a temper mill, it was discovered that the chatter marks is closely related to self-excited vibration of the system. This kind of vibration originates from rolling interface, where partial fluid lubrication and viscous-slip coexist.

Key words: temper mill; self-excited vibration; rolling interface

(编辑 何学锋)