

DOI: 10.3901/JME.2023.13.228

再制造工作辊热轧退化脉冲涡流在线 监测方法研究*

宋守许^{1,2} 蔚辰^{1,2} 李想^{1,2} 徐瑞^{1,2}

(1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009;

2. 合肥工业大学机械工业绿色设计与制造重点实验室 合肥 230009)

摘要: 再制造工作辊熔覆层在高温潮湿的工作环境中易发生复杂的氧化退化行为, 而其辊面性能的下降对轧件质量会产生巨大影响。通过热轧模拟试验揭示了工业热轧条件下的再制造工作辊辊面退化过程, 发现热轧过程中高速钢熔覆层发生马氏体基体碳析出以及合金碳化物的分解与析出, 引发熔覆层硬度下降和马氏体基体磁性软化。基于熔覆层马氏体基体磁性软化现象, 构建了一套高速钢再制造氧化退化过程的脉冲涡流监测方法与系统, 并提出一种变分模态分解-希尔伯特(Variational mode decomposition-Hilbert, VMD-Hilbert)方法, 该方法可在脉冲涡流相应信号中有效提取再制造高速钢工作辊熔覆层的退化信息。最后, 以 0~5 000 Hz 频率内脉冲涡流信号的边际谱加权和为新特征, 实现再制造高速钢工作辊热轧退化状态的定量表征。所构建的脉冲涡流在线监测方法可适用于监测各类再制造工作辊的高温退化过程, 具有广阔应用前景。

关键词: 在线监测; 再制造; 工作辊; 脉冲涡流; VMD-Hilbert 变换

中图分类号: TG156

A Novel On-Line Monitoring Method of Remanufacturing HSS Work Roll Degeneration Based on Pulsed Eddy Current Testing

SONG Shouxu^{1,2} WEI Chen^{1,2} LI Xiang^{1,2} XU Rui^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Key Laboratory for Green Design and Manufacturing of Machinery Industry, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: The cladding layer of remanufacturing roll is prone to complex oxidation degradation in high temperature and humid working environment, and the degradation of roll surface have a great impact on the quality of products. The degradation mechanism of remanufacturing work roll under industrial hot rolling condition is revealed by hot rolling simulation test. It is found that martensite carbon precipitates and alloy carbides decompose and precipitate in HSS cladding layer during hot rolling, which leads to the decrease of hardness and magnetic softening of martensite matrix. Based on the magnetic softening of martensite matrix in cladding layer, a set of pulse eddy current monitoring method and system for oxidation degradation process of remanufacturing work roll is established. Variational mode decomposition- Hilbert (VMD-Hilbert) Transform was proposed to extract information of pulse eddy current response signal effectively, and the problem of mode mixing in Hilbert-Huang Transform (HHT) is solved. Finally, the marginal spectrum weighted sum of pulsed eddy current signals within the frequency range of 0-5 000 Hz was presented as a new feature, degradation state of remanufactured HSS work roll is quantitatively characterized. The pulsed eddy current online monitoring method constructed in this paper can be used to monitor the high temperature degradation process of all kinds of remanufacturing work rolls and has broad application prospects.

Key words: on-line monitoring; remanufacturing; work roll pulsed; eddy current; VMD-Hilbert transformation

* 国家自然科学基金资助项目(51975176)。20220428 收到初稿, 20220816 收到修改稿

0 前言

工作辊通常为双金属结构，芯部由高韧性材料制成，表面为具有高硬度特性的工作层，其中工作层约占工作辊的 10%~15%，其往往因工作层失效而退役，芯部以及部分工作层仍可再利用。因此，通过先进的再制造工艺对退役工作辊进行再制造修复具有良好的经济、环境和社会效益^[1]。热轧生产过程中，工作辊与高温带钢接触，距表面约 3 mm 区域被迅速加热，据相关研究报道，在接触区工作辊表面可在瞬间被加热超过 500 ℃^[2-4]。此外，热轧过程中需通过喷射冷却液对轧辊进行冷却，在高温潮湿环境下辊面会形成一层约 0.4 μm 的氧化层^[5]，近表面区域则会在长期的高温工作环境下逐步发生微观结构变化和碳析出等退化行为，导致辊面的硬度、耐磨性以及抗热裂性能的下降，加速工作辊消耗，降低轧制产品的质量^[6-8]。因此，再制造工作辊热轧退化过程必须进行有效监控。

工作辊的退化行为受温度、轧制力、外界环境等因素影响，退化过程复杂且难以预测^[9-10]。此外，新工艺生产的再制造轧辊缺乏充足的工业使用数据极大增加预测的难度，利用无损检测技术对工作辊表面氧化状态进行监测是解决这一问题的有效途径之一。高速钢工作辊由于具有优异的抗氧化性能、耐磨性、硬度，本世纪以来快速发展并广泛应用^[11-12]，因此本研究聚焦再制造高速钢工作辊。无损检测方法多种多样，如电磁检测、超声检测、射线检测、机器视觉检测等。其中，射线检测通常适用于检测静态结构中的裂纹等缺陷检测。超声检测的穿透深度大和偶联剂的需求，适合于检测物体内部缺陷，监测在役工作辊的难度较大^[13]。机器视觉检测则适合检测宏观缺陷，难以准确识别氧化引起的辊面退化^[14]。再制造工作辊在高温工作环境中的微观结构变化和碳析出等行为将引起磁导率变化^[15]，涡流电磁无损检测技术可以在一定提高高度

下有效提取一定物体深度区域的磁导率变化信息，无需耦合剂，易实现在线监测的自动化^[16]。而脉冲涡流检测作为一种新型的涡流检测技术具快速、备频率成分丰富和检测面积大的优点，完美契合工作辊高温退化行为在线监测需求^[17-19]。

本文通过热轧模拟试验机对工业热轧制条件下再制造高速钢工作辊退化行为展开研究，揭示再制造高速钢工作辊高温退化机制。构建工作辊高温退化脉冲涡流监测平台，提出一种 VMD-Hilbert 方法解决脉冲涡流响应信号时频变换的混叠模态问题。提取边际谱能量加权和新特征，定量表征再制造高速钢工作辊热轧退化状态。

1 热轧模拟试验与退化状态监测

1.1 再制造试样制备与处理

试验辊基体采用牌号为 QT700-2 的球墨铸铁，熔覆层粉末采用高碳高速钢粉末，粉末粒度为 45~100 μm，加载辊则采用 45 钢。试验辊基体、熔覆层粉末以及加载辊的主要化学成分如表 1 所示。试验辊基体和加载辊分别使用直径为 35 毫米和 65 mm 的退火棒料作为毛坯，并采用高精度车床、磨床以及镗床对外圆、内孔、键槽以及端面进行加工。熔覆前试验辊基体使用无水乙醇清洗干净，熔覆粉末进行烘干处理。采用 ND-YAG 激光器进行侧向送粉单道熔覆加工。熔覆参数如下：电压 $U=380\text{ V}$ ，电流 $I=210\text{ A}$ ，激光平均功率 $P=900\text{ W}$ ，扫描速度 $v=120\text{ mm/min}$ ，送粉速率为 7 g/min ，激光束光斑直径 $d=2\text{ mm}$ ，采用氩气同轴保护，保护气体流量为 $Q=10\text{ L/min}$ 。熔覆层与基体结合层的显微组织如图 1 所示。熔覆后采用真空炉中对试验辊进行热处理，具体步骤如下：首先在 1 050 ℃下充分奥氏体化，随后采用空气淬火，并进行 2 次 550 ℃高温回火。最后所有试样被加工到所需的尺寸，且所有试验辊外圆粗糙度达到相同水平($Ra=6.4\text{ }\mu\text{m}$)。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数, wt%)

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Cu	P	S
熔覆层粉末	1.36	0.35	0.33	3.98	4.55	3.92	6.31	≤0.10	≤0.03	≤0.02
试验辊基体	3.08~3.30	2.49~3.13	0.55~0.61	—	—	—	—	≤0.25	≤0.05	≤0.03
加载辊	0.45~0.45	0.17~0.37	0.50-0.80	≤0.25	—	—	—	≤0.25	≤0.03	≤0.03

模拟试验前，试验辊与加载辊均利用无水乙醇为清洗剂在超声清洗机中充分清洗，以去除表面的

污物。试验完成后试验辊样品采用中速线切割电火花机(GF+ AgieCharmilles FW 2UP)切割，P4000 级

砂纸研磨样品进行微观组织观察,最后利用 $0.5\ \mu\text{m}$ 金刚石抛光液完成抛光。观察前,采用 4% 硝酸酒精溶液进行样品腐蚀。

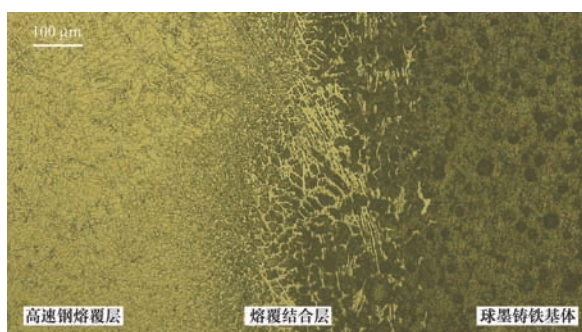


图1 高速钢熔覆层与 QT700-2 基材结合层显微组织

1.2 热轧模拟试验

热轧过程中影响工作辊辊面退化的因素非常复杂,包括轧件温度、接触压力、轧制速度和环境湿度等,在模拟中很难完美地满足所有的条件。为有效模拟工业轧制中工作辊的氧化退化过程,模拟试验提取了关键条件,设计并搭建了用于模拟工作辊热轧过程中辊面氧化退化过程的试验装置。图2所示为本实验所用的热轧模拟试验装置,图中试验辊模拟热轧过程中的工作辊,加载辊模拟被轧制的热轧轧件,试验辊与加载辊分别由两台伺服电机独立控制。采用一台 25 kW 高频感应加热设备加热加载辊,5 min 内最高温度可达 $1\ 200\ ^\circ\text{C}$,加载辊的上方设置温度传感器监测加热温度,高频感应加热器-温度传感器-功率调节器共同构成闭环控制的加热系统。试验力的加载由一套滚珠丝杠伺服加载系统实现,最大加载力可达 6 000 N。冷却系统设置与工业热轧相同,试验辊与高温加载辊接触后,位于接触区逆时针 120° 位置的喷嘴喷洒乳化液,乳化液同时具备冷却和润滑作用。

表2所示为本研究所采用的实验条件。每个试验循环周期等效一台 1 780 mm 精轧机架轧制 2.513 m 轧件。在一组完整测试过程中,加载辊每 5 000 次循环进行一次更换。

表2 热轧模拟试验条件

参数	数值
试验力/N	2500
赫兹接触应力/N	750
加载辊温度/ $^\circ\text{C}$	950
试验辊转速/(r/min)	10
滑差率(%)	5
转数	10 000, 20 000, 30 000, 40 000, 50 000, 60 000

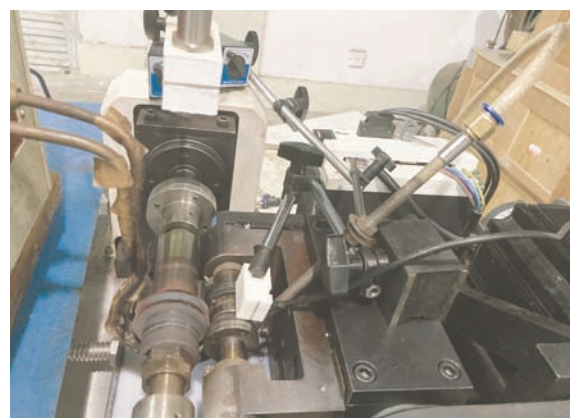


图2 热轧模拟试验装置

1.3 工作辊退化状态监测

本研究为实现再制造工作辊高温退化过程监测,搭建了一套脉冲涡流检测系统,该系统由三个主要模块构成:信号发生模块,数据采集模块和专用的脉冲涡流探头。为保证脉冲涡流探头在检测过程中既能提供足够的磁场能量又能有效接收涡流响应,基于 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件的电磁仿真模块辅助确定探头的最佳设计参数。脉冲涡流探头采用互感式线圈,其支撑部分由 3D 打印制作,磁芯采用镍锌铁氧体材料,磁芯高 14 mm,直径 4 mm。探头的激励线圈匝数为 250 匝,检测线圈匝数为 500 匝。信号发生模块负责产生 100 Hz 方波作为激励信号,激励电流占空比为 50%,最大电压为 6V,上升时间和下降时间均为 20 μs 。响应信号则由 ADLINK PCIe-9852 采集,采样速率为 1 MS/s,采集之后送入计算机,最后通过编写程序进行数据处理与特征提取。

此外,脉冲涡流检测信号从产生、传输到接收的过程中,具有退化特征的价值信号容易受到偶然因素引起的脉冲噪声、检测系统发出的电子噪声、机械振动噪声等噪声信号的干扰。因此线圈绕制完成后,激励线圈外侧包覆一层屏蔽铜箔并接地,以屏蔽环境中的电磁干扰。

1.4 试样分析方法

试验设定每 10 000 次循环进行对试验辊进行表

面状态测量与分析,并由脉冲涡流检测系统采集试验辊辊面的脉冲涡流信号。当试验达到预定的循环次数或表面出现剥落时,用电火花线切割机对试验盘进行切割,并进行显微组织观察。最后,对试样的显微组织和元素含量进行观察和分析。分析测试采用的仪器设备如下:利用 ZEISS Gemini 500 型扫描电子显微镜和 Optika B-500MET/XDS-3MET 光学显微镜表征试验辊辊面形貌和微观结构。采用 Aztec UltimMax 100 型能谱仪(EDS)分析试验辊辊面的元素含量。硬度测量由显微硬度计完成。

2 热轧模拟试验结果分析

2.1 试验辊辊面 SEM 和 EDS 分析

60 000 次试验循环后,试验辊辊面的 SEM 显微结构和 EDS 元素含量分析如图 3 所示。在热轧模拟试验之后,试验辊高速钢熔覆层出现明显的表面氧化现象,由 EDS 图谱可知辊面大部分氧化区域 Fe 元素明显下降,并基本无 V 元素与 W 元素分布,其边缘伴随着出现大量的 C 元素分布,这说明辊面该区域的氧化物主要为 Fe 氧化物,基体中的碳元素随试验发生析出现象。此外,在少部分氧化区域发现较高含量 V 元素与 W 元素,该区域存在除 Fe 氧化物的其他氧化物。

EDS 能谱对物质进行定量分析存在一定误差,

含量大于 20% 的元素允许小于 5% 的相对误差,含量介于 3%~20% 的元素允许小于 10% 的相对误差,含量介于 1%~3% 的元素允许小于 30% 的相对误差,而含量介于 0.5%~1% 的元素允许小于 50% 的相对误差,因此仅对元素含量大于 1% 的元素进行分析,试验辊辊面主要元素含量变化如表 3 所示。依据 EDS 能量谱中元素的质量百分比,在点 1 处 Fe 元素与 O 元素质量之比为 2.625,接近 Fe_3O_4 中 2.615 的 Fe、O 元素质量之比,在点 2 处 Fe 元素与 O 元素之比为 2.841,高于 FeO 、 Fe_2O_3 与 Fe_3O_4 种任意一种 Fe 氧化物的 Fe、O 元素质量之比,此外该点 2 处 V 元素达到 8.6%。由此可知,高速钢熔覆层在热轧高温下不断发生氧化并生成铁氧化物以及其他合金氧化物,并伴随 V 元素等合金碳化物的分解与析出。

表 3 试验辊高速钢熔覆层辊面主要元素含量变化
(质量分数%)

元素	Fe	C	O	W	V	Mo	Cr
图 5a	59.74	9.8	16.57	5.29	1.88	3.62	3.11
点 1	51.2	12.3	19.5	5.5	2.5	4.5	4.4
点 2	42.9	18.9	15.1	5.6	8.6	5.3	3.5

依据上述检测结果,可知高速钢熔覆层在热轧高温下马氏体基体的氧化与碳析出以及合金碳化物的分解与析出是轧辊辊面退化的关键因素。

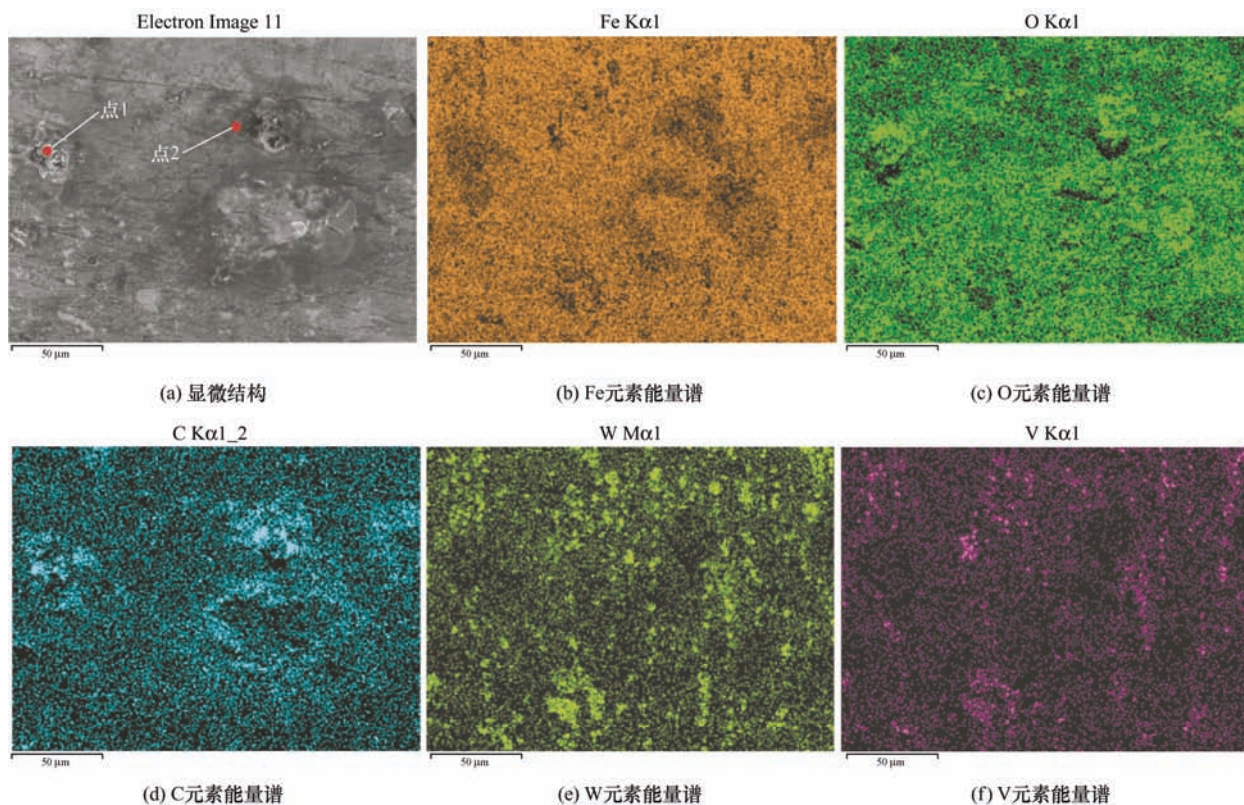


图 3 60 000 次后高速钢熔覆层辊面 EDS 图谱分析

2.2 显微硬度与摩擦因数分析

试验过程中试验辊的硬度变化如图 4 所示。试验辊的硬度由 865.8 HV 不断下降至 643.0 HV, 其中试验初期硬度大幅下降, 随后硬度程稳定下降趋势, 结合 SEM 和 EDS 分析结果, 试验初期辊面高速钢熔覆层在高温快速形成一层 Fe_3O_4 (约 450 HV) 导致熔覆层表面硬度下降, 随后的试验过程中熔覆层马氏体基体中碳元素的析出以及合金碳化物的分解与析出使硬度不断下降。高温下形成的致密 Fe_3O_4 氧化层和析出的碳元素具有一定润滑效果, 因此试验中的摩擦因数远小于未形成 Fe_3O_4 氧化层的初始时刻, 如表 4 所示。

表 4 摩擦因数变化

转数	滑动摩擦因数
0	0.28±0.03
10 000	0.16±0.01
20 000	0.17±0.01
30 000	0.16±0.02
40 000	0.18±0.02
50 000	0.18±0.01
60 000	0.19±0.02

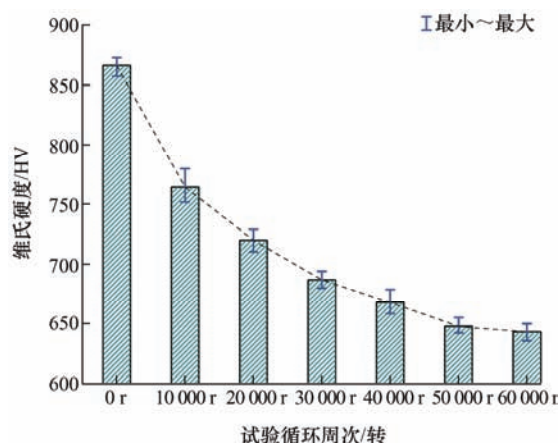


图 4 试验辊高速钢熔覆层硬度变化曲线

3 脉冲涡流响应信号分析

3.1 试验辊脉冲涡流响应信号

脉冲涡流激励采用的方波信号上升沿与下降沿处电压发生突变, 引起检测区域电场和磁场的变化, 继而产生脉冲响应信号, 图 5 所示为试验辊脉冲涡流响应信号。响应信号在上升沿和下降沿处的波形是对称的, 即所含信息是对称的。此外, 检测非铁磁性材料时响应信号在达到峰值后会穿过零点, 检测铁磁性材料时则几乎不存在过零点。

由于 HSS 材料属于铁磁性材料, 如图 5 所示, 其脉冲涡流响应信号不存在过零点, 因此响应信号在时域中的特征主要包括: 峰值、峰值时间、上升

时间。时域特征中包含了试验对象的马氏体基体中碳元素的析出以及合金碳化物的分解与析出等退化信息, 理论上可以利用时域特征识别不同热轧退化状态, 以实现再制造工作辊高温退化过程在线监测。

时域特征虽具有提取速度快、特征直观的特点, 但容易受到噪声影响, 在实际工业环境中准确性和有效性难以保障。脉冲涡流的响应信号与激励方波相同, 两者均由 n 次谐波分量构成 ($n=1, 3, \dots$), 对其进行频域分析并提取合适的频域特征能减小噪声对有效信号的影响, 提高脉冲涡流监测方法的有效性。

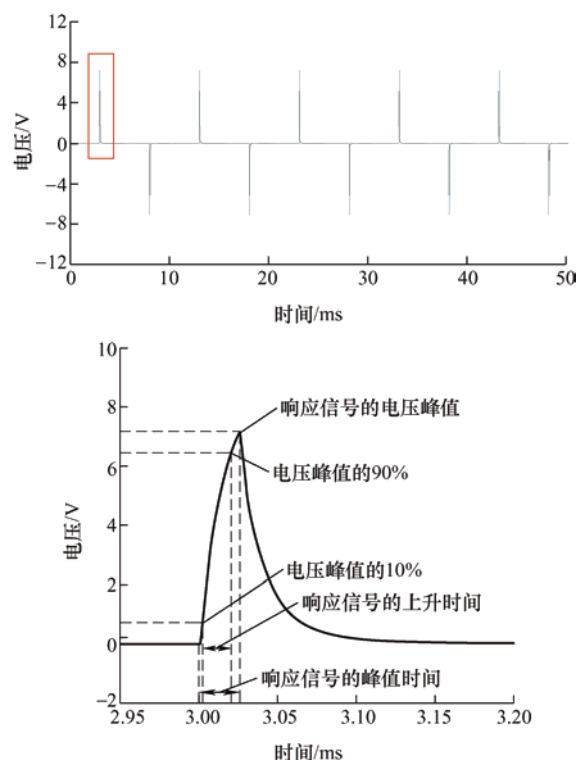


图 5 试验辊熔覆层表面脉冲涡流响应信号

3.2 脉冲涡流响应信号的频域特征提取方法

希尔伯特-黄(HHT)变换作为一种新型时频分析方法适合处理复杂的非平稳信号。传统的 HHT 变换首先采用对原始信号进行经验模态分解, 将信号分为若干固有模态函数, 随后再进行希尔伯特变换, 该方法具有完全的自适应性, 且不受测不准原理的制约, 在具有高时间分辨率的同时, 具有高频率分辨率。但经验模态分解所得的固有模态分量容易出现相同的频率成分, 出现模态混叠。为解决上述问题, 本研究采用一种改进方法, 即变分模态分解-希尔伯特(VMD-Hilbert)变换方法, 该方法通过构造变分问题, 寻求变分最优解以确定每个固有模态函数的中心频率和带宽^[20]。通过变分模态分解替换经验模态分解可有效解决模态混叠问题, 图 6 与图 7 分别为 60 000 时刻脉冲涡流响应信号的经验模态分解与变分模态分解结果。

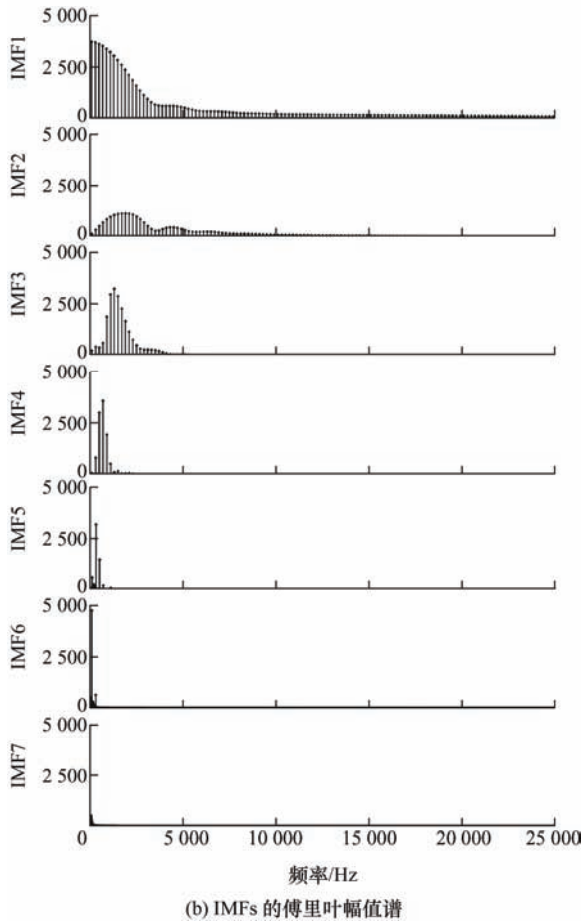
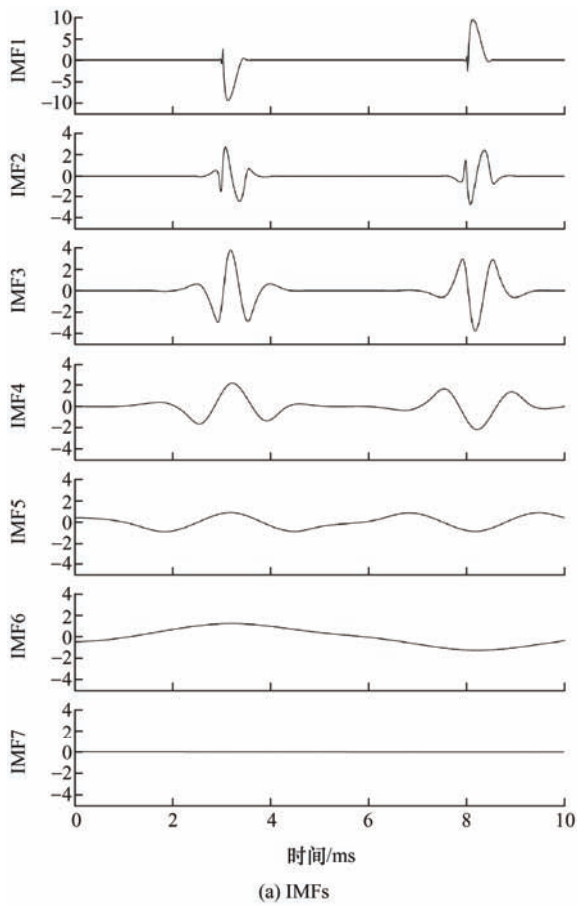


图 6 经验模态分解结果

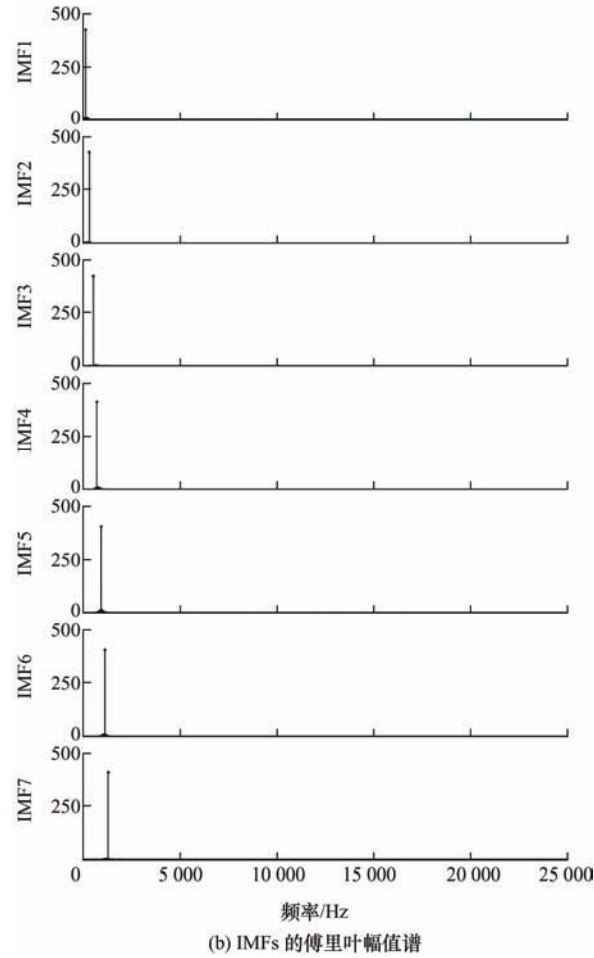
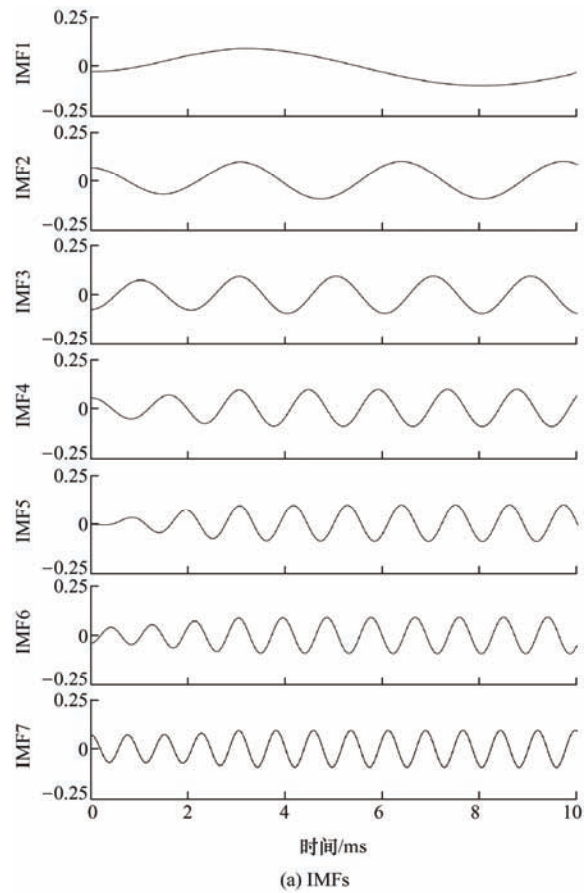


图 7 变分模态分解结果

VMD-Hilbert 方法的具体过程如下所述。设变分模态分解得到的自然模态函数个数 K , 构建约束变分模型

$$\min_{\{\mu_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^K \left[\partial_t \left(\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * \mu_i(t) \right) e^{-j\omega_i t} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K \mu_i(t) = f(t)$$

式中, $\{\mu_i\} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K\}$ 为固有模态函数分量; $\{\omega_i\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 为 $\{\mu_i\}$ 的固有模态函数的中心频率; $\delta(t)$ 为狄拉克分布; $f(t)$ 为原始响应信号; ∂_t 为梯度计算; $*$ 为卷积计算。

$\mu_i(t)$ 对应的解析信号为

$$\dot{\mu}_i(t) = \mu_i(t) + i\tilde{\mu}_i(t) = A_i(t)e^{i\varphi_i(t)} \quad (2)$$

$$\tilde{\mu}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

$$A_i(t) = \sqrt{\mu_i^2(t) + \tilde{\mu}_i^2(t)} \quad (4)$$

式中, $\tilde{\mu}_i(t)$ 为固有模态函数 $\mu_i(t)$ 希尔伯特变; $A_i(t)$ 为瞬时幅值; $\varphi_i(t)$ 为 $\mu_i(t)$ 瞬时相位。

固有模态函数 $\mu_i(t)$ 的希尔伯特谱可以表示为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t) e^{i\int \omega_i(t) dt} \quad (5)$$

$$\omega_i(t) = 2\pi f_i = \frac{d\varphi_i(t)}{dt} \quad (6)$$

式中, $\omega_i(t)$ 为瞬时角频率; Re 表示取复数的实部。

与希尔伯特谱不同, 边际谱是希尔伯特谱频率成分在整个时域内进行叠加, 描述了信号瞬时频率的总幅值, 既能反映真实频率分量, 又能反映瞬时频率分量, 更适合分析脉冲涡流这类非平稳信号。边际谱可表示为

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (7)$$

3.3 脉冲涡流响应信号分析结果

图 8 所示为变分模态分解-希尔伯特变换方法求得试验辊面脉冲涡流响应信号的边际谱, 图中的边际谱是 24 次测量的平均值。边际谱表达脉冲涡

流响应信号每个频率的能量分布, 响应信号的能量从低频向高频递减, 主要分布于 0~15 000 Hz, 高于 15 000 Hz 频段的信号能量小。因此能量小的频段的有效信息易受环境和系统噪声影响, 边际谱的 0~15 000 Hz 频段更适于表征再制造工作辊马氏体基体中碳元素的析出以及合金碳化物的分解与析出引起的退化过程。

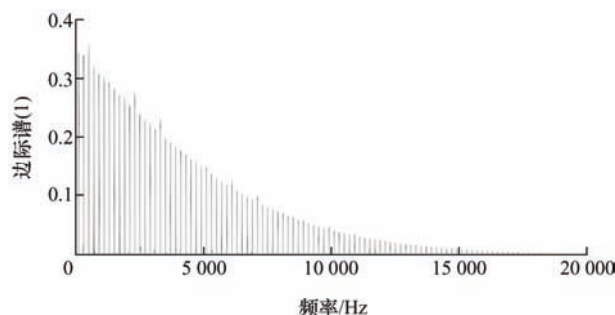


图 8 热轧模拟实验前试验辊面脉冲涡流响应信号的边际谱

由于退化监测过程中脉冲涡流响应信号的变化较小, 通常用将新试样测得的响应信号与不同试验时刻下的响应信号进行差分处理, 图 9 所示为变分模态分解-希尔伯特变换方法求得的差分信号边际谱。结合 EDS 和显微硬度分析结果可知, 在热轧过程中, 工作辊近表面不断发生碳化物的析出, 近表面材料基体中的碳含量不断降低, 降低了由碳间隙引起的 BCC 晶格的残余应力, 从而导致基体的磁性软化^[15]。基体的磁性软化使工作辊近表面的磁导率增加(或矫顽力降低), 对比图 8 中的差分信号边际谱验证了热轧过程中工作辊近表面的磁导率不断增加和矫顽力不断降低。

脉冲涡流响应信号的边际谱能量主要集中在 $f_i=100(2i-1)(i \in \mathbf{N}^*)$ 部分, 图 10 对比了不同循环周期的边际谱 $f_n=100(2n-1)(n \in \mathbf{N}^*)$ 部分。图中 0~5 000 Hz 频率部分能有效识别高温氧化脱碳过程, 5 000~10 000 Hz 则出现交叉现象。理论上较深层的脱碳会影响脉冲涡流响应信号的低频分量, 而表面的氧化层会影响高频分量。热轧过程中表面的氧化层会保持在 0.4 μm , 响应信号的高频分量由于渗透深度小, 更易受表面的氧化层影响, 叠加高频分量的低能量现象。因此 0~5 000 Hz 频率部分适用于定量表征再制造工作辊马氏体基体中碳元素的析出以及合金碳化物的分解与析出引起的退化过程。

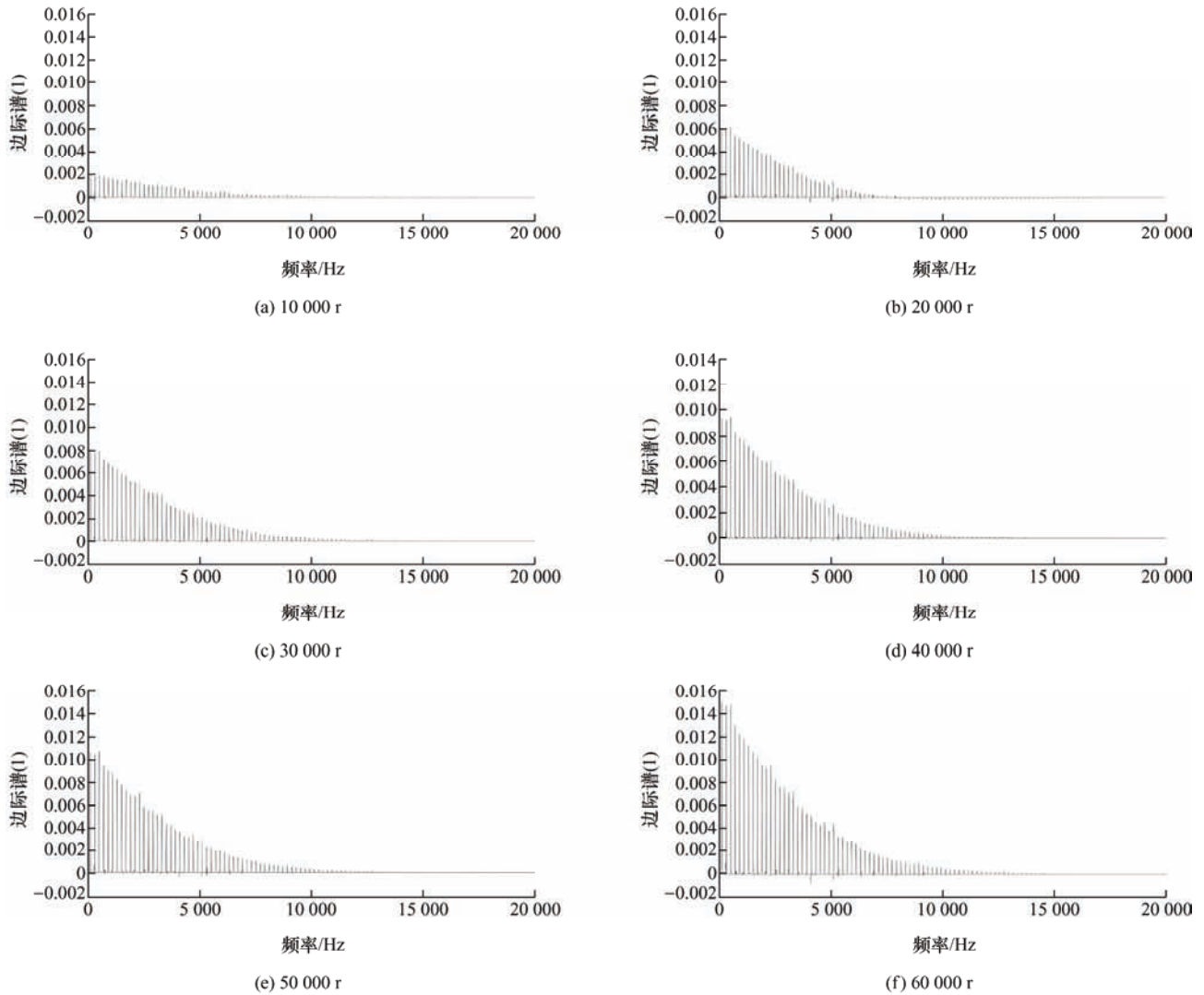


图9 不同试验周期试验辊辊面脉冲涡流响应差分信号的边际谱

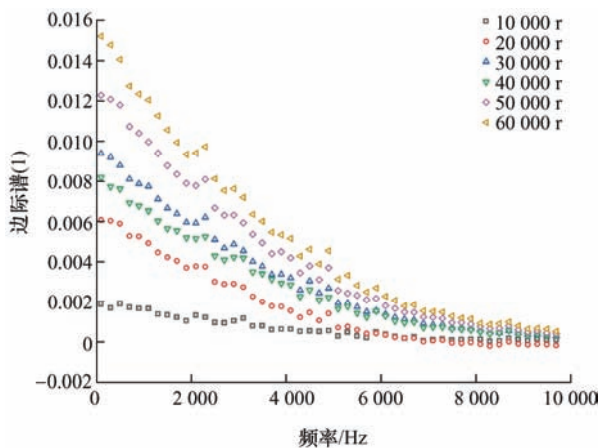


图10 脉冲涡流响应信号在测试后的边际频谱对比图

为量化热轧过程中再制造工作辊辊面氧化脱碳引起的退化过程,需提取新的特征。结合对响应信号和差分信号边际谱的分析,定义 $f_i=100(2i-1)(i \in \{1, 2, \dots, 25\})$, 并提取边际谱能量加权和(MSEWA)为退化表征特征, 边际谱能量加权和为

$$MSEMA = \sum_{i=1}^n \frac{f_i^{-0.5} E_i}{\sum_{j=1}^n E_j} (n=25) \quad (8)$$

图11所示为热轧模拟过程中高速钢熔覆层显微硬度和边际谱能量加权和的变化, 氧化脱碳引起

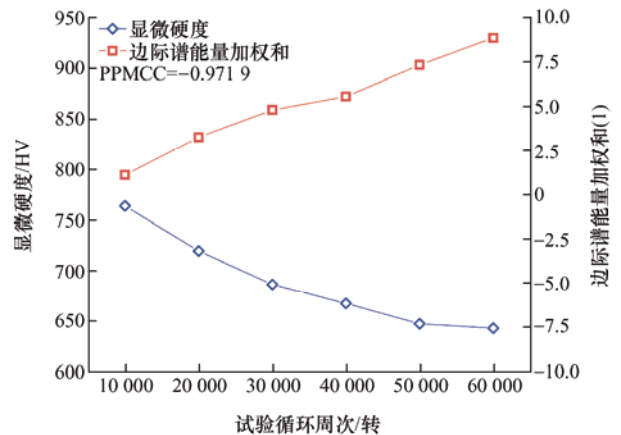


图11 热轧模拟过程中辊面显微硬度和边际谱能量加权和的变化

的硬度下降与边际谱能量加权和呈负相关关系,其 Pearson 相关系数(PPMCC)为-0.971 9,因此两者间具有强线性关系,本文构建的脉冲涡流在线监测方法以及提取的边际谱能量加权和具备优异的监测和表征效果。

4 结论

(1) 热轧模拟试验中发现再制造高速钢工作辊熔覆层近表面产生的高温使其发生马氏体基体碳析出以及合金碳化物的分解与析出,导致熔覆层发生硬度下降和马氏体基体磁性软化,并引起磁导率增加与矫顽力的降低。

(2) 基于再制造高速钢工作辊退化机理研究,构建了一套高速钢再制造氧化退化过程的脉冲涡流监测方法与系统。提出一种 VMD-Hilbert 方法有效提取脉冲涡流响应信号的有效信息,解决了传统的 HHT 方法在处理不同高温退化状态信号时会发生较严重的模态混叠问题。并通过信号差分以及提取边际谱的方法,有效增强脉冲涡流响应信号中退化的特征。

(3) 试验信号的时频分析结果表明,高于 5 000 Hz 频率边际谱的能量和材料穿透深度较小,受表面氧化层和环境噪声影响较大,难以有效表征再制造熔覆层的由基体碳析出以及合金碳化物的分解与析出引起的退化,0~5 000 Hz 频率边际谱的能量和材料穿透深度较大,退化表征效果好。

(4) 最后,提取 0~5000 Hz 频率边际谱能量加权和为新特征,该特征与显微硬度 Pearson 相关系数为-0.9719,两者间具有强线性关系,实现再制造高速钢工作辊高温退化状态的定量表征,证明本文提出的方法可有效监测再制造工作辊热轧退化过程。

本文构建的脉冲涡流在线监测方法以及提取的边际谱能量加权和具备优异的监测和表征效果。由于脉冲涡流的非接触测量方式、较高的精度以及无需去除表面氧化物的特点,其在监测各类再制造工作辊的高温退化过程具有广阔前景,对降低工作辊消耗、优化轧制生规划、提高轧件质量具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] 徐滨士,董世运,朱胜,等.再制造成形技术发展及展望[J].机械工程学报,2012,48(15):96-105.
XU Binshi, DONG Shiyun, ZHU Sheng, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 96-105.
- [2] RAUDENSKY M, HORSKY J, ONDROUSKOVA J, et al. Measurement of thermal load on working rolls during hot rolling[J]. Steel Research International, 2013, 84(3): 269-275.
- [3] 李维刚,刘相华,郭朝晖.带钢热连轧工作辊温度场与热凸度的数值模拟[J].中国有色金属学报,2012,22(11):3176-3184.
LI Weigang, LIU Xianghua, GUO Zhaozhui. Numerical simulation of temperature field and thermal crown of work roll during hot strip rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3176-3184.
- [4] HU K J, XIA Y M, ZHU F X, et al. Evaluation of thermal breakage in bimetallic work roll considering heat treated residual stress combined with thermal stress during hot rolling[J]. Steel Research International, 2018, 89: 1-8.
- [5] DENG G Y, ZHU Q, TIEU K, et al. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling: Experiment and modelling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 200-208.
- [6] GARZA-MONTES-DE-OCA N F, R COLÁS, RAINFORTH W M. On the damage of a work roll grade high speed steel by thermal cycling[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(6): 1576-1583.
- [7] DELAUNOIS F, STANCIU V I, MEGRET A, et al. Oxidation and wear behavior of high-speed steel and semi-high-speed steel used in hot strip mill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 119(1-2): 677-689.
- [8] YIN Y, SUN J, TENG S, et al. Oxidation behavior of high-speed steel used for hot rolls[J]. Oxidation of Metals, 2016, 86(1-2): 45-57.
- [9] GARZA-MONTES-DE-OCA N F, RAMÍREZ-RAMÍREZ J H, ALVAREZ-ELCORO I, et al. Oxide structures formed during the high temperature oxidation of hot mill work rolls[J]. Oxidation of Metals, 2013, 80(1-2): 191-203.
- [10] BENASCIUTTI D. On thermal stress and fatigue life evaluation in work rolls of hot rolling mill[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2012, 47(5): 297-312.
- [11] 徐流杰,魏世忠,邢建东,等.碳化物对冷轧条件下轧辊中裂纹行为的影响[J].机械工程学报,2008,44(9):50-55.

- XU Liujie, WEI Shizhong, XING Jiandong, et al. Effect of carbides on crack behavior within rolls under cold rolling condition[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 50-55.
- [12] PHAN H T, TIEU A K, ZHU H, et al. A study of abrasive wear on high speed steel surface in hot rolling by discrete element method[J]. *Tribology International*, 2017, 110: 66-76.
- [13] ACEVEDO R, SEDLAK P, KOLMAN R, et al. Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: State of the art review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 9457-9477.
- [14] 徐科, 周鹏, 杨朝霖. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 25-29.
- XU Ke, ZHOU Peng, YANG Chaolin. On-line detection technique of tiny surface defects for metal plates and strips based on photometric stereo[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 25-29.
- [15] RYU K S, NAHM S H, KIM Y B, et al. Dependence of magnetic properties on isothermal heat treatment time for 1Cr1Mo0.25V steel[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2000, 222: 128-132.
- [16] RENTALA V K, MYLAVARAPU P, KUMAR A, et al. POD of NDT techniques using high temperature oxidized fatigue cracks in an aero-engine alloy[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40(2): 1-22.
- [17] YAN B, LI Y, LIU Z, et al. Pulse-modulation eddy current imaging and evaluation of subsurface corrosion via the improved small sub-domain filtering method[J]. *NDT & E International*, 2021, 119: 1-9.
- [18] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1698-1712.
- WU Xinjun, ZHANG Qing, SHEN Gongtian. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [19] ZERBST U, BRUNO G, BUFFIERE J, et al. Damage tolerant design of additively manufactured metallic components subjected to cyclic loading: state of the art and challenges[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 121: 1-73.
- [20] 李建, 武新军, 孙鹏飞. 基于实 Laplace 小波的脉冲涡流检测系统特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(11): 2506-2512.
- LI Jian, WU Xinjun, SUN Pengfei. Characteristic analysis of pulsed eddy current testing system based on real Laplace wavelet[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 2506-2512.
-
- 作者简介: 宋守许, 男, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机电产品绿色设计与绿色制造、再制造理论与技术、产品再资源化技术与装备。
E-mail: shouxus@163.com
蔚辰(通信作者), 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电产品绿色设计与再制造, 热轧在线监测技术。
E-mail: wee_chen@163.com