

双馈式风力发电机齿轮故障振动诊断与失效分析

王子顺, 汪韵朗

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528400)

摘要: 针对双馈风力发电机组常见的齿轮故障问题, 采用振动分析及失效分析检测进行了深入研究。通过搭建的风电机组传动链监测系统, 首先对齿轮断裂和开裂两种典型故障进行了时域信号预处理及对比分析, 提取出啮合频率及其边带成分的特征。随后, 利用扫描电镜和能谱仪等对失效部位进行了详细的失效分析, 揭示了失效的形成机理, 特别是在开裂失效中, 发现了夹杂物对裂纹形成的影响。通过金相和化学成分分析验证了失效性质和原因。研究表明, 该综合诊断方法有效提高了风力发电机的可靠性和运行效率, 降低了维护成本, 对风电行业的设备管理具有重要意义。

关键词: 双馈式风力发电机组齿轮箱; 断齿; 开裂; 振动分析; 失效分析

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025020

引用格式: 王子顺, 汪韵朗. 双馈式风力发电机齿轮故障振动诊断与失效分析[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 190-210.

WANG Zishun, WANG Yunlang. Vibration diagnosis and failure analysis of doubly-fed wind turbine gear faults [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 190-210.

Vibration Diagnosis and Failure Analysis of Doubly-Fed Wind Turbine Gear Faults

WANG Zishun, WANG Yunlang

(Mingyang Smart Energy Group Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

Abstract: Aiming at the common gear failure problems of doubly-fed wind turbines, this study adopts vibration analysis and failure analysis detection for in-depth research. By constructing a wind turbine drive chain monitoring system, the two typical failures of broken and cracked gears were firstly pre-processed and comparatively analyzed in time domain signals, and the characteristics of the meshing frequency and its side-band components were extracted. Subsequently, detailed failure analysis of the failure site was carried out using tools such as a scanning electron microscope and energy spectrometer, which revealed the formation mechanism of the failure, especially in the case of cracking failure. The influence of inclusions on crack formation was found. The nature and cause of failure were verified by metallographic and chemical composition analysis. The results show that the comprehensive diagnostic method effectively improves the reliability and operational efficiency of wind turbines, reduces maintenance costs, and has important significance for equipment management in the wind power industry.

Key words: doubly-fed wind turbine gearbox; broken teeth; cracking; vibration analysis; failure analysis

收稿日期: 2024-06-20

作者简介: 王子顺(1990—), 男, 工程师, 主要从事旋转机械故障诊断研究。E-mail: wzs20201018@aliyun.com。

0 引言

当前,国内风电装机主要采用三种机型:双馈式、直驱式和半直驱式。其中,双馈式机型是保有量最多的,约占总装机容量的55%。传动链是双馈式机型的关键组成部分,通常由主轴承、齿轮箱和发电机构成。由于受到低速重载和复杂工况环境的影响,风电机组的齿轮箱常常出现严重磨损、疲劳点蚀等故障,甚至可能发生断齿现象。据不完全统计,传动链故障在风电机组故障中占比高达40%,其中齿轮箱的齿面点蚀和轮齿断齿问题最为常见,占故障总量的60%左右。分析传动链故障问题对于提高风力发电机组的可靠性和运行效率具有重要意义。然而,面对传动链故障的挑战,存在着诸多技术难题需要克服。首先,传统的故障诊断方法难以满足复杂工况下齿轮箱故障的准确诊断需求,导致诊断效率低下和误报率高。其次,齿轮箱内部的振动信号受到多种因素的影响,如风速变化、载荷变化等,传统的信号处理方法难以有效提取出故障特征信息。此外,齿轮箱的结构复杂,内部零部件受力复杂,使得故障原因难以准确定位和分析。因此,如何有效提高传动链故障的诊断准确率和故障分析效率,成为当前亟待解决的技术难题。

针对齿轮箱齿轮的故障诊断与失效分析,姜春雷等^[1]实验表明,当齿轮发生断齿故障时,调制脉冲使啮合频率的幅值和边带能量增加,可以从边带成分中提取到与故障齿轮的行星轮和轴频成分相符的特征。程晓涵等^[2]研究发现,旋转频率对啮合力的频率分布有显著影响,包括强度、倍数和调制边带,表明励磁机轮齿受到更复杂的交替激励。罗召霞等^[3]研究指出,行星齿轮传动的边频带主要由物理变形、传递路径的影响和激振力旋转引起的频移造成。雷淑梅等^[4]通过扫面电镜和能谱仪对断裂齿轮的裂纹源进行分析,发现粗大的夹杂物是导致齿轮断齿的主要原因。黄桥生等^[5]通过断口观察、化学成分分析和显微金相分析,发现材料基体中的夹杂物使应力集中位置产生裂纹,从而导致轴承开裂。邵肖静等^[6]研究了非金属夹杂物对钢材疲劳性能的影响,阐述了夹杂物的类型、形状、尺寸和位置对钢铁疲劳寿命的影响,并发现脆性夹杂物比塑性夹杂物更容易导致疲劳裂纹。

在旋转机械中,冲击故障的比例相对较高,如

滚动轴承或齿轮的损坏会导致损伤点与其他部位周期性碰撞,形成周期性的冲击振动信号^[7]。通过跟踪边带数量和能量,可以准确反映复杂齿轮箱内部齿轮的损伤状态和发展趋势,简化问题的分析。对于健康的齿轮啮合,边频带的幅值相对于中心啮合频率的幅值较小,甚至可以忽略。然而,随着齿轮损伤的发展,边频带的幅值逐渐增大^[8],边带能量也随之增加。因此,分析和简化处理振动信号对评估齿轮和轴承的健康状况至关重要。

现有研究主要集中在特定故障类型的特征提取和分析,缺乏对不同故障类型的系统化比较和统一处理方法。同时,许多研究缺乏在实际工况下的验证。不同研究中使用的诊断方法和特征提取手段存在较大差异,导致结果难以通用和比较。尤其在处理复杂齿轮箱振动信号时,现有研究面临特征提取方法繁琐、诊断效率低下的问题。在实际工况中,传统方法难以快速、准确地识别和分类各种故障类型。

本文结合快速故障特征提取和深入的失效分析手段,对齿轮断裂和开裂等故障进行了多层次、多角度的分析。通过实际案例验证,证明了这种方法在齿轮故障检测和分析中的有效性,为提升风力发电机组的可靠性和运行效率提供了技术支持。

1 在线振动监测系统

本文针对双馈式机型的两点式支撑结构和三点式支撑结构^[9-11],对风电机组的增速结构形式进行了故障诊断研究。根据齿轮箱内部齿轮的布置,主要分为二级行星一级平行和一级行星两级平行两种形式,如图1所示。



(a) 二级行星一级平行 (b) 一级行星两级平行

图1 某机型齿轮箱内部布置

Fig. 1 Internal layout of a megawatt model gearbox

综合考虑经济性和传动链监测的需求,制定了一套适用于通用传动链的传感器配置方案,并为在线振动装置设定了技术要求和完整的振动信号采集和处理过程^[12-13],为网络通讯配置了主要结构,旨在提供有效的传感器监测和数据传输,以实现传动链状态的实时监测和分析。具体配置详情如表1、表2、图2、图3所示。

表 1 传动链大部件传感器配置清单

Tab. 1 List of sensor configurations for large parts of drive chain

通道	测点名称	数量	安装方向	加速度传感器 灵敏度/(mV·g ⁻¹)
AN1	前主轴轴承	1	水平/径向	500
AN2	后主轴轴承	1	水平/径向	500
AN3	齿轮箱一级行星轮 系内齿圈	1	水平/径向	500
AN4	齿轮箱低速轴	1	垂直	100
AN5	齿轮箱中间级	1	水平/垂直	100
AN6	齿轮箱高速轴	1	水平/径向	100
AN7	发电机驱动端	1	径向	100
AN8	发电机非驱动端	1	径向	100

根据奈奎特采样定理(香农采样定律),风力发电机组传动链振动信号的监测和诊断需求指导了两种通用采样频率的选择,详细见表3。采样频率必须是信号最高频率的2.56倍,以确保准确捕捉信号,这样的选择是为了在准确性和资源消耗之间取得平衡。适当的采样频率能够捕获传动链振动信号

中的重要特征,从而进行故障诊断和预测分析。

表 2 在线振动监测装置基本信息

Tab. 2 Online vibration monitoring device basic information

信号类型	通道数	模拟通道特性	数据采集	A/D 转换精度
4~20 mA 或 2~10 V	16路振动通道 4路工艺量输入 2路转速输入	多通道同步	所有振动 通道同步 采集	不低于 24位
谱线数	通讯接口	防护等级	其他	其他
1 600~6 400 谱线/通道	TCP/IP、 RS485、 ModBus	IP65	电磁兼容 认证	自动断电 重启

表 3 通用的采集定义

Tab. 3 Generic acquisition definition

采样率 F_s /Hz	采样时间/s	谱线数 $Line$	分辨率 Δf /Hz
12 800	10.24	51 200	0.098
25 600	5.12	51 200	0.195

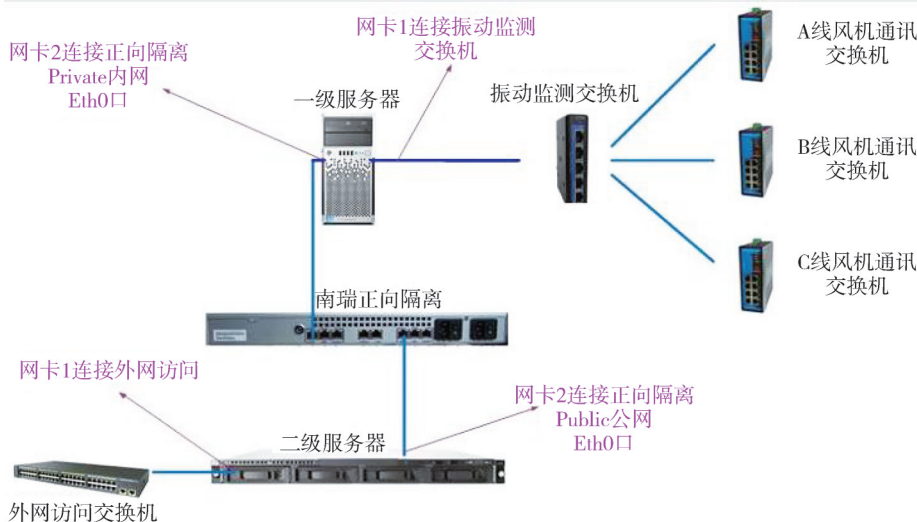


图 2 风电场网络拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of wind farm network

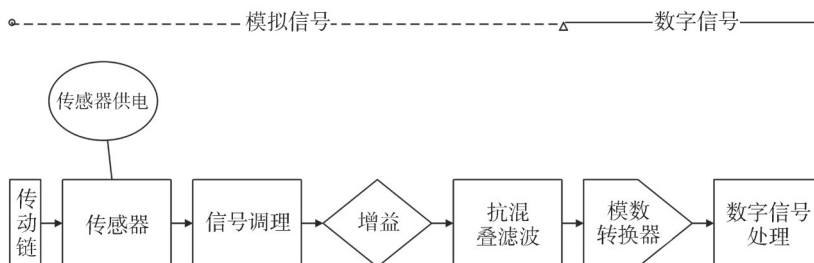


图 3 完整的振动信号采集链

Fig. 3 Complete vibration signal acquisition chain

对采集到的时域信号进行数字信号处理得到频域结果^[14-15], 计算为

$$T = T_s \times N = \frac{N}{F_s} = \frac{N}{2.56 \times F_{\max}} = \frac{Line}{F_{\max}}, \quad (1)$$

$$\frac{F_{\max}}{Line} = \frac{1}{T} = \Delta f, \quad (2)$$

式中: T 为采样时间; T_s 为每个采样点之间的间隔; N 为采样点数, 为1 024/2 048/4 096等; F_s 为

采样频率; F_{max} 为最大分析频率; $Line$ 为谱线数; Δf 为谱线分辨率。

2 齿轮故障诊断基本原理

2.1 故障机理

齿轮传动系统是一个弹性的机械系统。由于其结构和运动关系, 齿轮传动中存在运动和力的非平稳性。图 4 展示了齿轮的啮入啮出过程。主动轮(标识 2)和从动轮(标识 1)在啮合时, 通过齿槽的互相

对齐和脱离来保持连续的力传递和转动运动。

通常情况下, 啮合齿轮副的重合度不是整数, 导致在啮合过程中参与的齿对数不断变化。因此, 轮齿的综合啮合刚度会呈现周期性变化。如图 4 所示, 主动轮 2 的齿根与从动轮 1 的齿顶开始接触啮合, 此时, 主动轮 2 的弹性变形相对较小, 而从动轮 1 的轮齿弹性变形较大。随着主动轮 2 和从动轮 1 完成一次啮合过程, 主动轮 2 的弹性变形逐渐增大, 而从动轮 1 的弹性变形逐渐减小。



图 4 齿轮啮合的变化过程

Fig. 4 Process of changing the meshing of gears

在整个啮合过程中, 主动轮 2 和从动轮 1 通过单齿或双齿的交替变换来实现啮合。这引起了啮合位置、啮合刚度和载荷的周期性变化, 表现为“加载”和“卸载”的过程, 同时产生啮合冲击和节线冲击等振动现象。因此, 啮合过程中的各参数都具有周期性变化的特征, 反映这一周期性特征的主要是啮合频率 (GMF) 及其高次谐波 (2XGMF、3XGMF)。齿轮的啮合频率和谐波成分由下式计算

$$GMF = z \times f, f = \frac{N}{60}, \quad (3)$$

式中: GMF 为啮合频率, Hz; z 为齿轮的齿数; f 为齿轮的转频, Hz; N 为齿轮的转速, r/min。

行星系轮系的啮合频率^[16-18]为

$$f_{pm} = f_c \times Z_r, \quad (4)$$

行星轮转频通常为

$$f_p = \left(\frac{f_{in} \times Z_r}{Z_p} \right) / 60, \quad (5)$$

式中: f_{pm} 为行星轮系啮合频率; f_c 为行星架转频; f_{in} 为输入的转速 ($f_c \times 60$); Z_p 为行星轮的齿数; Z_r 为齿圈的齿轮齿数。

齿轮的各种故障在运行过程中表现为传动误差, 即在恒定扭矩下, 输出轴的实际角位置与理想状态下的角位置之间的差异是齿轮振动和噪音的主要来源。当传动误差增大时, 齿轮在啮合和脱离时的碰撞会加剧, 导致更高的振动峰值, 并引发短暂的幅

值和相位变化。幅值变化导致幅值调制, 相位变化则引起频率调制^[19-20]。

假设载波信号为正弦波, 则幅值调制信号可视为载波信号与调制信号在时域上的乘积, 转换到频域则为两个信号的卷积。若载波信号与调制信号均为简谐正弦波, 齿轮啮合频率作为载波信号为

$$g(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi), \quad (6)$$

作为调制信号的齿轮旋转信号为

$$e(t) = 1 + \beta \cos(2\pi f_e t), \quad (7)$$

利用积化和差公式展开已调信号为

$$x(t) = g(t)e(t) = A(1 + \beta \cos(2\pi f_e t)) \cos(2\pi f_c t + \varphi), \quad (8)$$

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi) + \frac{A\beta}{2} \cos[2\pi(f_c + f_e)t + \varphi] + \frac{A\beta}{2} \cos[2\pi(f_c - f_e)t + \varphi], \quad (9)$$

频率调制信号可描述为

$$x(t) = A \cos(2\pi f_c t + \beta \cos(2\pi f_e t) + \varphi), \quad (10)$$

已调信号的相位为 $\phi(t) = 2\pi f_c t + \beta \cos(2\pi f_e t) + \varphi$, 其频率为

$$f(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \left(\frac{d\phi}{dt} \right) = f_c - \beta f_e \sin(2\pi f_e t), \quad (11)$$

式中: βf_e 为频率调制的频率偏移范围, 频率调制中应有 $f_c > \beta f_e$; A 为载波信号的幅值; β 为幅值调

制指数; f_c 为载波频率(齿轮的啮合频率或其谐波); f_e 为调制信号的频率(齿轮的旋转频率); φ 为初相角。

幅值调制和频率调制会导致齿轮振动信号中的谐波成分发生变化, 进而影响边频带的形成和特征。在实际工程中, 关于载波频率对称的边频带的幅值可能会有所不同。这种幅值差异取决于幅值调制信号和相位调制信号之间的相位偏移。如果两者的相位相同, 则对称分量的幅值相等, 如果两者的相位相反, 则载波频率两侧的边频带的幅值会不同。需要注意的是, 相位调制理论上可以导致无限多的边频带分量。

2.2 齿轮参数变化对故障诊断的影响及规律分析

常见的双馈式风力发电机组通常采用一级行星和二级平行齿轮结构, 其中所有齿轮的齿数都是整数。齿轮箱迎风面为输入端, 各级齿轮的转速逐级递增, 齿轮按照从大齿到小齿的顺序啮合, 形成3组啮合齿轮副, 涉及6个齿轮, 其中太阳轮和大齿圈与传动比相关。在齿轮齿数未知的情况下, 可以通过频谱中提取的高速轴转频和啮合频率等数据进行推算, 并分析齿数变化对故障诊断的影响和规律。

假设齿轮箱的传动比为131.584。首先基于已知的总传动比及特定频率下的1X(高速轴转频)和3XGMF(各级齿轮的三倍齿轮啮合频率), 通过嵌套循环搜索可能的齿轮组合。根据MATLAB代码, 制定齿轮箱各齿数的计算规则: 嵌套循环用于确定大齿圈齿数、低速轴齿数、太阳轮齿数和中速轴齿数。此外, 太阳轮和大齿圈的齿数之比加一, 再乘以中速轴大小齿轮齿数比, 最后乘以高速级啮合频率与中间级啮合频率之比, 应接近目标传动比。具体来说, 采用嵌套循环遍历, 太阳轮的齿数范围为15~43, 而大齿圈的齿数由

行星级啮合频率除以输入轴转频计算得出。低速轴齿数范围为40~160, 中速轴齿数范围为13~40, 并计算第2个中速轴齿轮的齿数, 验证条件包括: 第2个齿轮的齿数大于2倍于高速轴的齿数、小于6倍于高速轴的齿数, 且与其四舍五入后的值相差不超过0.2。最终的齿轮组合应满足计算传动比与目标传动比的差值小于0.005, 并且不允许存在整除关系的齿数, 筛选出满足要求的齿轮组合, 包括行星级、中间级和高速级上齿轮的组合, 具体详见表4。

表4 最优齿轮齿数组合

Tab. 4 Optimal gear tooth combinations

项目	名称	齿数					传动比
行星级	太阳轮	23	23	23	23	23	131.584
	大齿圈	109	109	109	109	109	131.584
中间级	小齿轮	15	18	21	24	27	131.584
	大齿轮	113	113	113	113	113	131.584
高速级	小齿轮	23	23	23	23	23	131.584
	大齿轮	70	84	98	112	126	131.584

由表4可知, 同一传动比存在5组齿数组合, 而根据式(3)计算齿轮啮合频率, 考虑啮合频率与齿数和转速成因数关系。中间级小齿或高速级大齿的浮动将改变中间级、行星级和两组齿轮的齿轮啮合频率和转频(自转频率), 故齿轮参数的变化将直接影响振动信号诊断结果。

综上, 齿轮齿数变化会影响齿轮系统的啮合频率和传动比, 进而影响振动信号频谱特征, 使故障特征诊断变得复杂。在首次诊断分析中, 需要通过实际振动信号校核齿轮齿数, 确保诊断的准确性。

3 低速轴大齿轮振动分析

依据式(3)~式(5), 计算得到表5所示的各轴系故障特征频率。根据这些参数, 可以调整齿轮箱的工作转速以计算和分析不同案例中的故障特征频率。

表5 齿轮箱故障特征频率计算表

Tab. 5 Gearbox fault characteristic frequency calculation table

级别	部件名称	齿轮齿数	自转转速/(r·min ⁻¹)	自转频率/Hz	公转转速/(r·min ⁻¹)	公转频率/Hz	啮合频率/Hz
高速级	小齿轮	23	1750.0	29.17	0.00	0.00	670.83
	大齿轮	112	359.4	5.99	0.00	0.00	
中间级	小齿轮	24	359.4	5.99	0.00	0.00	143.75
	大齿轮	113	76.3	1.27	0.00	0.00	
行星级	太阳轮	23	63.0	1.05	13.3	0.22	24.16
	行星轮	43	33.7	0.56	13.3	0.22	
	内齿圈(固定)	109	0.0	0.00	0.0	0.00	
	行星架	0.00	13.3	0.22	0.0	0.00	

3.1 断齿与开裂振动分析

针对齿轮箱低速轴大齿轮断齿和开裂故障，

发现了以下可以快速诊断和分辨的频率特征。以某项目中出现的低速轴大齿轮断齿和开裂故障为例进行详细说明(见图 5 和图 6)。

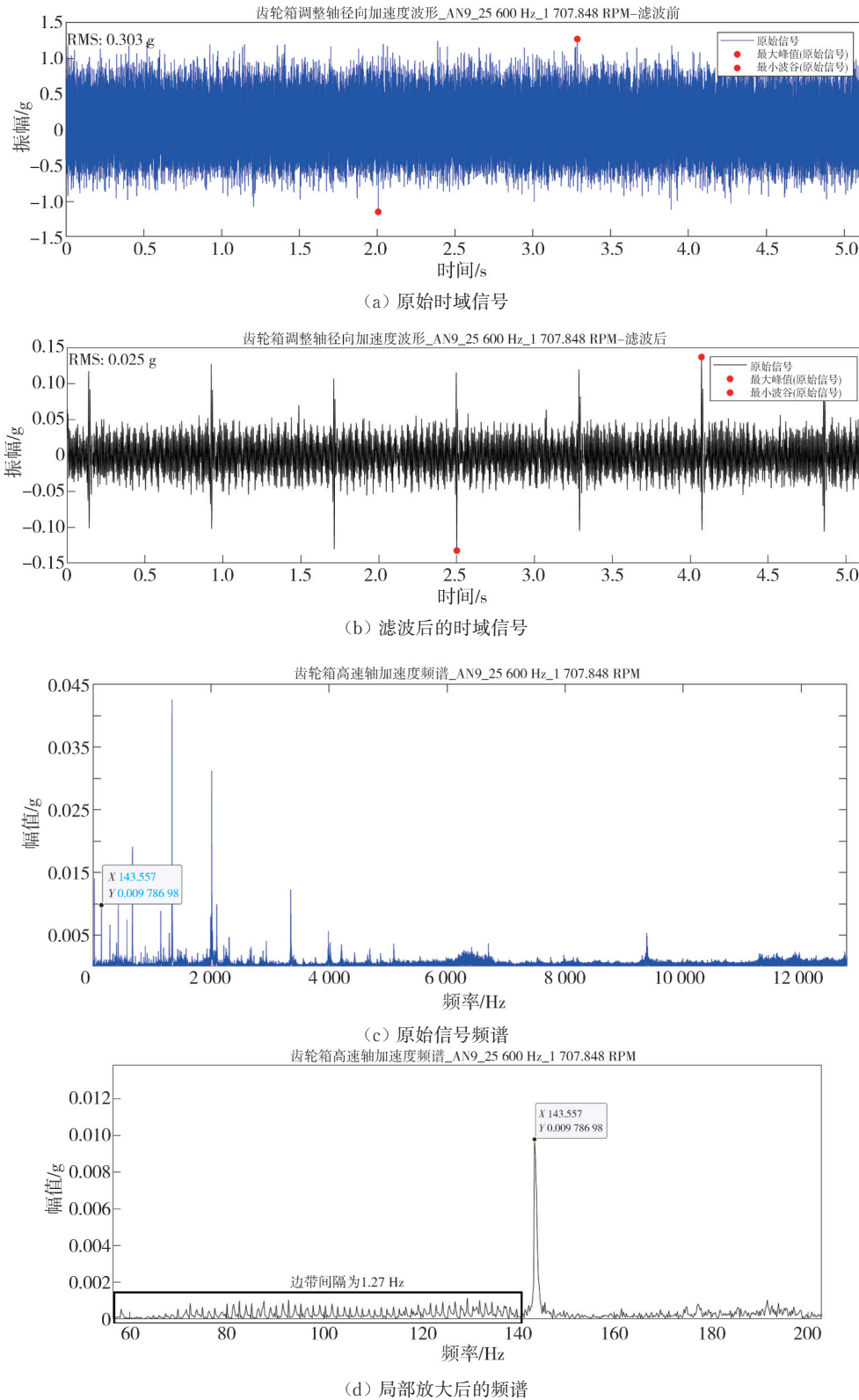


图 5 齿轮箱低速轴断齿故障时域波形/频谱

Fig. 5 Gearbox low-speed shaft broken tooth fault time domain waveform/spectrum

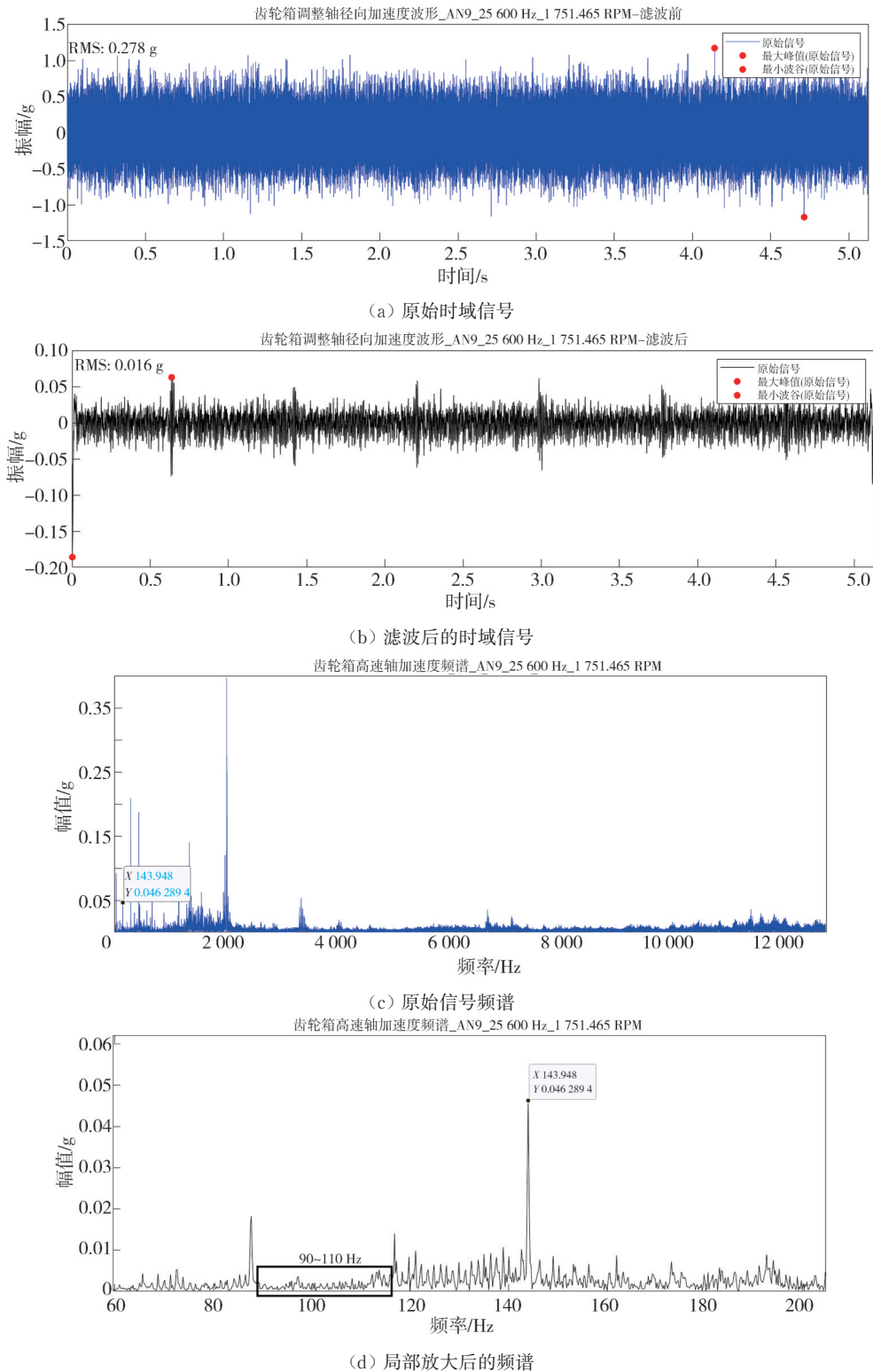


图6 齿轮箱低速轴开裂故障-齿轮箱高速轴径向加速度时域波形/频谱

Fig. 6 Gearbox low-speed shaft cracking fault time domain waveform/frequency spectrum

图5(a)和图6(a)显示了断齿和开裂的原始时域信号。经过滤波处理后，如图5(b)和图6(b)所示，以一倍中间级啮合频率为中心，以85 Hz为滤波带宽处理断齿和开裂的原始波形，结果在时域波形中可以看到显著的等间隔冲击信

号。其冲击间隔分别为1.27 Hz和1.284 Hz，根据采样时间计算理论可捕捉到的冲击次数分别为7次和6次，这与实际情况一致。

如图5(c)和图6(c)所示，断齿和开裂故障的原始信号频谱特征基本相似，但总体上无法明

确识别故障特征。

如图 5(d) 和图 6(d) 所示, 对断齿和开裂的原始频谱进行细化分析后, 发现齿轮断齿故障的边带分布平坦且均匀, 从两倍行星轮系啮合频率附近开始, 延伸至一倍中间级啮合频率, 有时甚至延伸至两倍。而在齿轮开裂故障的边带 90~100 Hz 范围内存在明显的间断, 边带能量和组成较为稀疏。因此, 在分析低速轴大齿故障时, 首先需要对频谱进行细化, 然后对比其边带组成。同时确认滤波的中心频率和带宽。综上所述, 低速轴大齿断齿和开裂故障类型和程度的诊断主要在于分析频谱中边带的组成。

3.2 失效原因分析

该机组运行四年零八个月时, 发生低速轴大轮齿面断裂的故障。齿轮材质为 18CrNiMo7-6, 表面渗碳处理, 对失效部位进行分析, 齿面开裂形式如图 7 所示。



图 7 低速轴大齿齿面裂纹

Fig. 7 Low speed shaft large tooth surface crack

宏观分析: 将样品从裂纹位置打开, 可见断口表面有明显的疲劳裂纹, 裂纹源区、裂纹扩展区、瞬断区形貌清晰可见, 如图 8 所示。

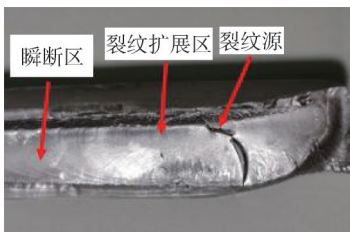


图 8 断面形态

Fig. 8 Cross-section shape

SEM-EDS 分析: 对断口的疲劳源区、疲劳扩展区、瞬断区进行 SEM(扫描电镜)微观形貌观察以及 EDS(能谱仪)成分分析。

SEM 检测结果表明: 疲劳源区呈现带状, 表面较为平整, 放大后可见柱状晶结构, 疲劳扩展区以及瞬断区无明显塑性变形, 可见脆性疲劳辉纹。具体如图 9、图 10 所示。

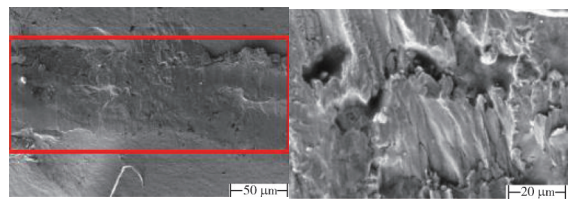
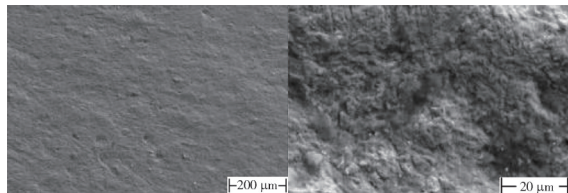


图 9 疲劳源区 SEM 形貌

Fig. 9 SEM morphology of fatigue source region



(a) 疲劳扩展区 (b) 瞬断区

图 10 扩展区及瞬断区 SEM 形貌

Fig. 10 SEM morphology of extended zone and transient zone

EDS 检测结果表明: 疲劳源区除基体元素外, 还存在一些 F 元素及 Co 元素。

裂纹源区测试位置及测试结果如图 11 及表 6 所示。

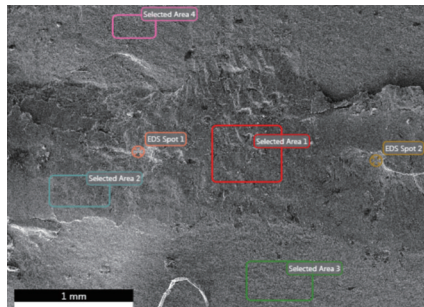


图 11 测试位置

Fig. 11 Test location

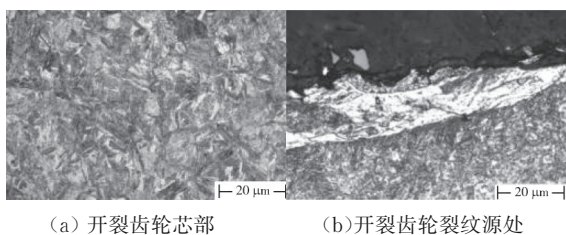
表 6 裂纹源区 EDS 测试结果

Tab. 6 Crack source area EDS test results

元素	wt/%				
	区域 1	区域 2	区域 3	点 1	点 2
C	7.93	7.70	5.91	15.83	8.40
O	1.36	1.27	2.93	3.97	1.07
F	/	1.88	/	/	2.41
Si	0.22	0.31	0.14	0.34	0.13
Mo	0.39	/	/	/	0.63
Cr	2.11	1.19	1.59	1.46	2.04
Mn	1.19	0.64	0.67	0.59	1.05
Fe	84.21	86.22	87.23	76.05	81.87
Co	1.32	1.12	0.48	1.12	1.24
Ni	1.26	/	1.04	/	1.33

金相分析: 对开裂齿轮及其附近完好齿轮进行分析, 利用金相显微镜对研磨、抛光、腐蚀后的样品进行观察。完好齿轮附近未见明显夹杂物, 开裂齿轮裂纹源处与腐蚀后可见一条长约 500 μm 的白亮色物质, 长度与扫描电镜下的裂纹源宽度基本一致,

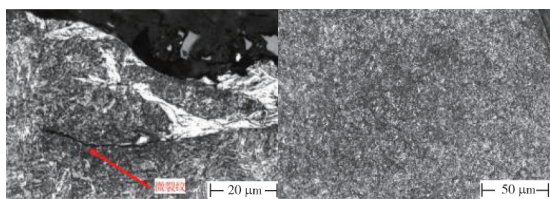
可见一处微裂纹延伸到基体中去。开裂齿轮及其完好齿轮芯部的显微组织为低碳马氏体,表面组织为马氏体+残余奥氏体,如图12、图13所示。



(a) 开裂齿轮芯部 (b) 开裂齿轮裂纹源处

图12 芯部及裂纹源处金相组织分析

Fig. 12 Metallographic structure analysis of the core and crack source



(a) 开裂齿轮裂纹源处 (b) 完好齿轮节圆处

图13 裂纹源处及完好齿轮节圆处金相组织分析

Fig. 13 Metallographic analysis of crack source and intact gear pitch source

化学成分分析:采用直读光谱仪,根据GB/T4336—2016^[21]对开裂齿轮进行化学成分分析,测试结果表明断裂齿轮的化学成分符合DIN EN 10084—2008中对牌号为18CrNiMo7-6的各成分要求,如表7所示。

表7 低速轴大轮化学成分检测结果

Tab. 7 Chemical composition testing results low-speed shaft

	wt/%			
	C	Si	Mn	P
要求	0.15~0.21	≤0.04	0.50~0.90	≤0.025
测试结果	0.19	0.24	0.67	0.016
	S	Cr	Mo	Ni
要求	≤0.035	1.50~1.80	0.25~0.35	1.40~1.70
测试结果	0.001	1.73	0.27	1.44

基于以上检测结果可见齿轮的开裂方式为疲劳开裂,裂纹源位于齿轮内部,经过金相显微镜观察可见裂纹源有一块约500 μm的白亮色物质,比基体耐腐蚀,该区域并有一处裂纹延伸到基体中。白亮色物质经过EDS分析确定为Co元素,晶体结构为柱状晶。由于疲劳源存在含Co的金属未溶固体,该位置存在应力集中,易成为疲劳裂纹萌生区。因Co有很好的耐腐蚀性,所以在做显微组织腐蚀时,其他位置已经腐蚀变色,含Co的金属未溶粉末仍然呈亮色。未在断口附近发现其

他类似含Co的金属未溶粉末,说明该未溶固体含量微小,未对样品整体化学成分造成影响。由于齿轮箱在运行中长期受到载荷作用,在含Co的金属未溶固体处产生裂纹并沿已产生的裂纹扩展,导致该齿轮轴从该位置开裂。

该夹杂物的来源属于外来夹杂物,可能在钢水的冶炼、运送、浇筑等过程中掉入,并随着钢水的冷却停留在钢中。非金属夹杂物的存在会使材料的疲劳强度下降,使得材料的寿命大幅度下降,同时夹杂物存在的位置更易萌生裂纹,造成齿轮断齿^[22-24]。

4 中间级小齿轮振动分析

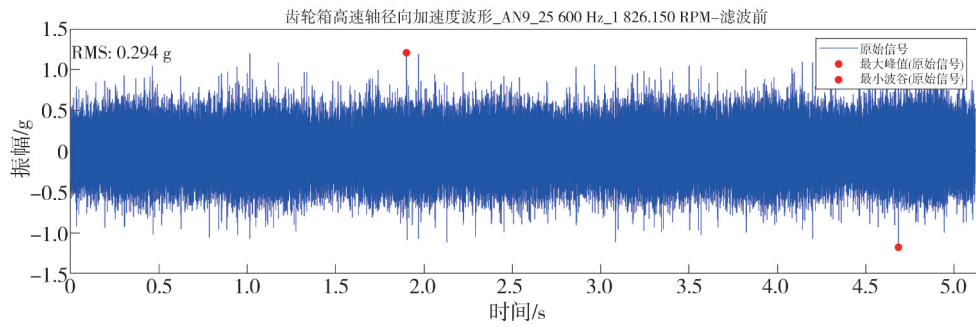
4.1 断齿与开裂振动分析

针对齿轮箱中间级小齿轮断齿和开裂故障,发现了以下可以快速诊断和分辨的频率特征。以某项目中出现的中间级小齿轮断齿和开裂故障为例进行详细说明(见图14和图15)。

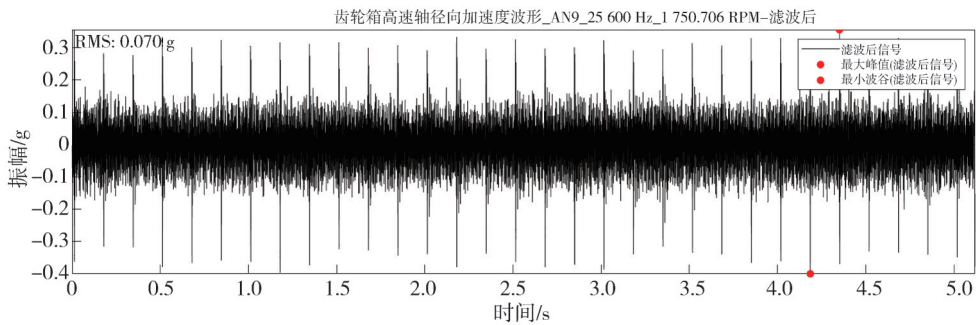
图14(a)和图15(a)显示了断齿和开裂的原始时域信号。经过滤波处理后,如图14(b)和图15(b)所示,以二倍中间级啮合频率为中心,以300 Hz为滤波带宽处理断齿和开裂的原始波形,在时域波形中可以看到显著的等间隔冲击信号。其冲击间隔分别为6.25 Hz和6 Hz,根据采样时间计算理论可捕捉到的冲击次数分别为32次和30次,这与实际情况一致。此外,还可以通过中速轴的转频计算,即每转大约需要0.167 s。已知采样时间为5.12 s,即时域波形可以显示32转(5.12 s/0.160 s)的振动信号数据,该计算方式与计算理论冲击次数一致。

如图14(c)和图15(c)所示,断齿和开裂故障的原始信号频谱特征基本相似,振动以中间级和高速级啮合频率为主,总体上无法明确识别故障特征。

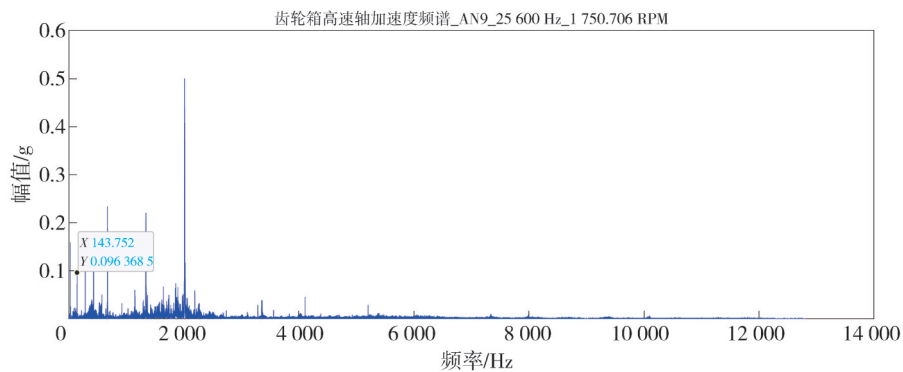
如图14(d)和图15(d)所示,对断齿和开裂的原始频谱进行细化分析后,发现断齿故障的幅值能量主要集中在多个且广泛分布的边带上,这些边带的分布较为均匀。而开裂故障的能量则主要集中在啮合频率及其高次谐波上,边带分布较为平坦,呈现伞状形状。此外,与断齿故障相比,齿面开裂故障的频谱在一倍至二倍中间级啮合频率的边带分布存在间断现象,在三倍至四倍中间级啮合频率则出现不连续现象。因此,中间级小齿与低速轴大齿的故障信号处理方法相同,其故障类型和程度的诊断均通过边带的组成进行判断。



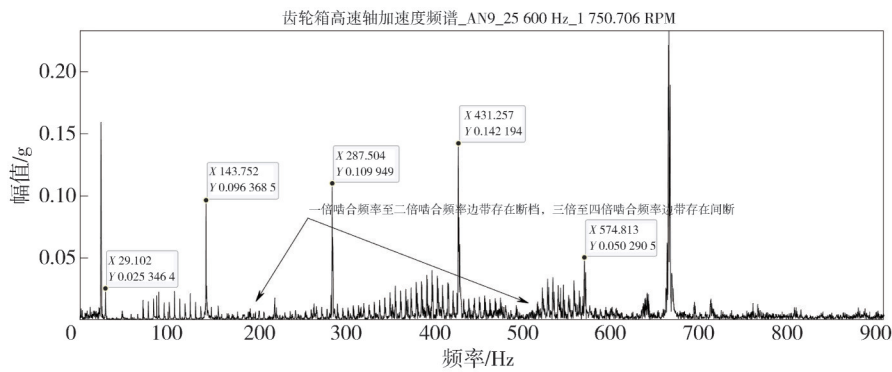
(a) 原始时域信号



(b) 滤波后的时域信号



(c) 原始信号频谱



(d) 局部放大后的频谱

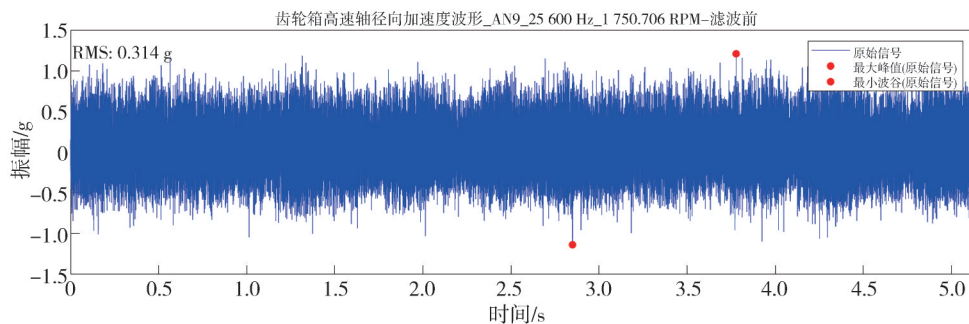
图 14 齿轮箱中间级小齿轮断齿故障时域波形/频谱

Fig. 14 Gearbox intermediate pinion failure time domain waveform/frequency spectrum

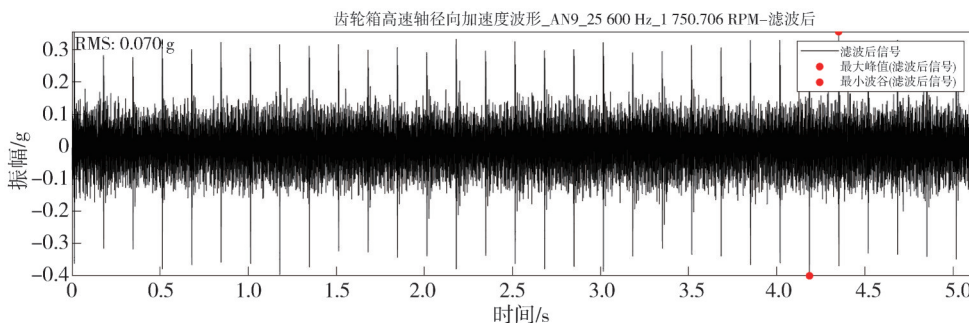
4.2 失效原因分析

该机组运行四年零两个月时,发生中间级小

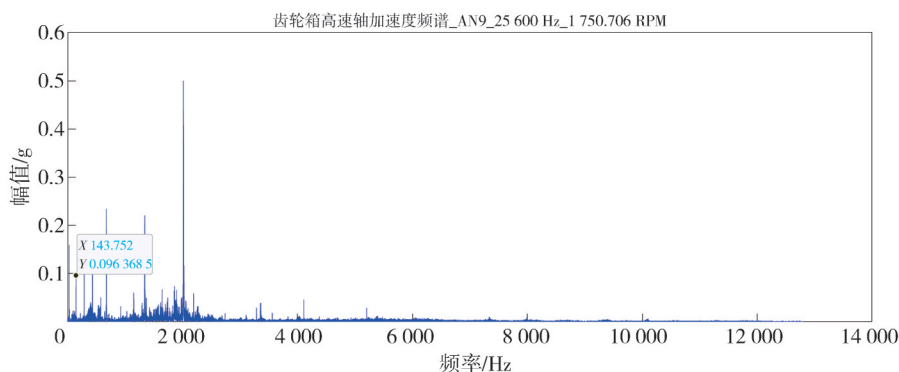
轮齿面断裂的故障。材质为 18CrNiMo7-6, 表面渗碳处理, 对失效件进行分析, 齿面开裂形式如图 16 所示。



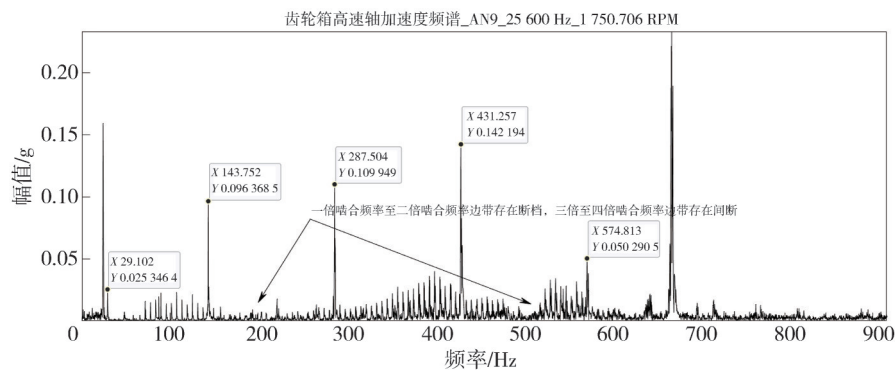
(a) 原始时域信号



(b) 滤波后的时域信号



(c) 原始信号频谱



(d) 局部放大后的频谱

图 15 齿轮箱中间级小齿轮开裂故障时域波形/频谱

Fig. 15 Gearbox intermediate pinion cracking fault time domain waveform/frequency spectrum

打开齿面断口, 可见齿轮的断裂形式为疲劳断裂, 裂纹源、扩展区、瞬断区清晰可见; 扩展区可见明显疲劳贝纹线和放射棱线, 扩展较为充

分, 宏观检测结果如图 17 所示。

SEM-EDS 分析: 使用 SEM 对断口处进行分析, 可见裂纹源起始于靠近齿轮工作面的近表

层,同时在该区域发现一处夹杂物的密集区,该区域长约 5.558 μm,宽为 548.9 μm,扩展区和瞬断区疲劳纹较为明显,如图 18、图 19 所示。

内有较多 Al 的氧化物聚集(Al₂O₃),EDS 检测区域与结果如图 20、表 8~表 10 所示。



图 16 中间级小齿轮齿面裂纹

Fig. 16 Intermediate pinion teeth cracked

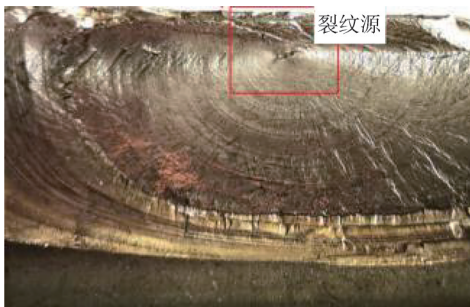


图 17 断齿宏观形态

Fig. 17 Macroscopic shape of broken tooth

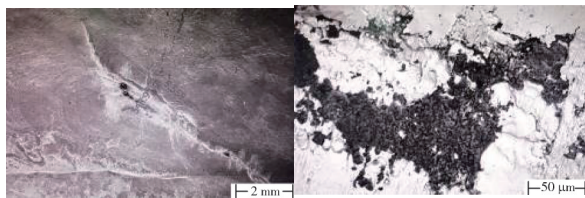


图 18 裂纹源处夹杂物

Fig. 18 Inclusions at the crack source



图 19 扩展区疲劳形貌

Fig. 19 Extended zone fatigue morphology

对此夹杂物区域进行 EDS 分析,发现该区域

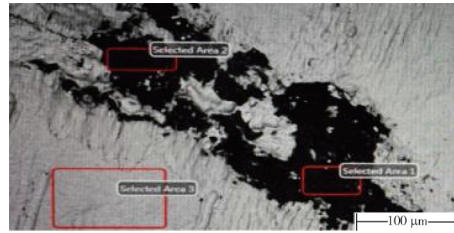


图 20 中间级小齿轮 EDS 检测位置

Fig. 20 EDS detection position of intermediate small gear

表 8 中间级小齿轮 EDS 检测结果

Tab. 8 EDS test results of intermediate small gear

元素	质量比/%	原子比/%
O	35.68	52.26
Mg	3.28	3.16
Al	40.95	35.57
Mo	0.64	0.16
S	0.37	0.27
Ca	3.39	1.98
Cr	0.46	0.21
Mn	0.31	0.13
Fe	14.92	6.26

表 9 区域 2EDS 检测结果

Tab. 9 EDS test results of region 2

元素	质量比/%	原子比/%
O	36.84	52.39
Mg	3.83	3.58
Al	44.01	37.11
Ca	4.24	2.4
Fe	11.08	4.51

表 10 区域 3EDS 检测结果

Tab. 10 Region 3 EDS test results

元素	质量比/%	原子比/%
Cr	2.42	2.6
Fe	97.58	97.4

金相分析:取完好齿进行非金属夹杂物、晶粒度、显微组织检测,检测结果如图 21~22 和表 11~12 所示。

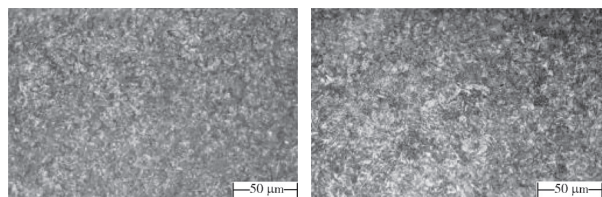
化学成分分析:采用直读光谱仪,根据 GB/T4336—2016 对开裂齿轮进行化学成分分析,测试结果表明断裂齿轮的化学成分符合 DIN EN 10084—2008 中对牌号为 18CrNiMo7-6 的各成分要求,如表 13 所示。

表 11 中间级小齿轮非金属夹杂物检测结果

Tab. 11 Non-metallic inclusions test results of intermediate small gear

种类	A类		B类		C类		D类		DS类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
夹杂物含量	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0

对裂纹源的多个区域进行EDS分析,发现此处有较多Al氧化物聚集(以 Al_2O_3 氧化物为主),同时

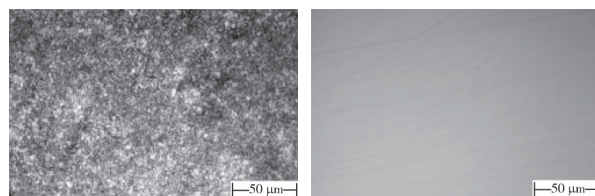


(a) 节圆 (b) 芯部

图 21 中间级小齿轮金相组织检测结果

Fig. 21 Metallographic organization test results of intermediate small gear

含有少量Mg、Ca等元素,属于外源性夹杂物。



(a) 晶粒度 (b) 非金属夹杂

图 22 晶粒度及非金属夹杂检测

Fig. 22 Grain size and non-metallic inclusions detection

表 12 显微组织及晶粒度检查结果

Tab. 12 Microstructure and grain size inspection results

位置	马氏体/级	残余奥氏体/级	碳化物/级	芯部铁素体/级	晶粒度
节圆	3	10%	1	1	8
齿根	3	10%	1	1	8

表 13 中间级小齿轮化学成分检测结果

Tab. 13 Chemical composition testing results of intermediate small gears

元素	质量比/%				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
18CrNiMo7-6	0.16~0.20	0.20~0.40	0.55~0.75	1.55~1.75	0.26~0.35
检测结果	0.16	0.29	0.68	1.63	0.28
元素	质量比/%				
	Ni	Al	Cu	P	S
18CrNiMo7-6	1.50~1.70	0.02~0.04	≤0.20	≤0.010	≤0.008
检测结果	1.57	0.033	0.049	0.006	0.002

以 Al_2O_3 夹杂物为主的氧化物属于脆性不变形夹杂物,在压力加工时不易变形,从而破坏了钢基体的均匀性、连续性,并损伤基体出现空隙及微裂纹,在该处造成应力集中而成为疲劳源,在表面应力的作用下沿齿形、齿向方向扩展,进而发展为开裂掉块。 Al_2O_3 夹杂物属于脆性夹杂物,相较于塑性夹杂物更易产生疲劳裂纹,成为疲劳源导致齿轮的疲劳失效。同时,由于部分齿轮箱的结构特性,单齿疲劳失效后由于断裂的齿轮在箱体的不断碾压也会导致其余齿轮之间发生不同的失效形式^[25]。

5 高速级小齿振动分析

5.1 断齿与开裂振动分析

针对齿轮箱高速级小齿轮断齿和开裂故障,发现了以下可以快速诊断和分辨的频率特征。以某项目中出现的高速级小齿轮断齿和开裂故障为例进行详细说明(见图 23和图 24)。

图 23(a)和图 24(a)为高速级小齿轮断齿故障的原始时域信号。在该信号中,清晰可见到等

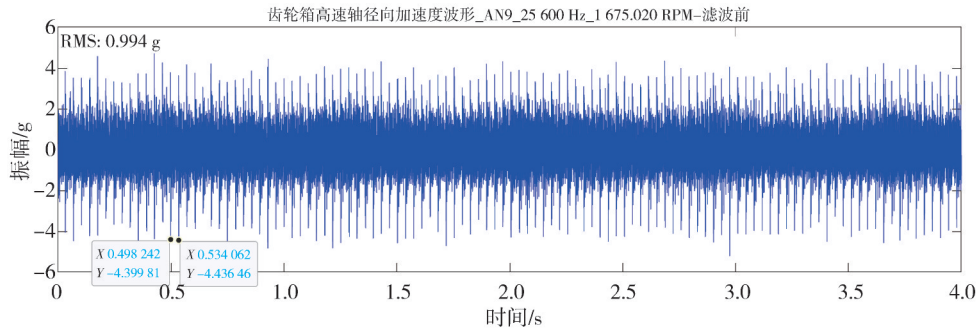
间隔的冲击。两类故障信号中标注的X: 0.498 s和X: 0.534 s、X: 3.969 s和X: 4.005 s的位置,计算得到冲击间隔为27.777 Hz。已知采样时间为4 s,可捕捉111次等间隔冲击,经核实实际与理论的冲击次数相符。两类故障的冲击特征基本一致,均以高速轴转频为主。然而,开裂故障的波形冲击形貌明显减弱,有效值仅为断齿故障的三分之一。

如图 23(b)和图 24(b)所示,断齿和开裂故障的原始信号频谱特征基本相似,振动以高速级啮合频率为主,总体上无法明确识别故障特征。

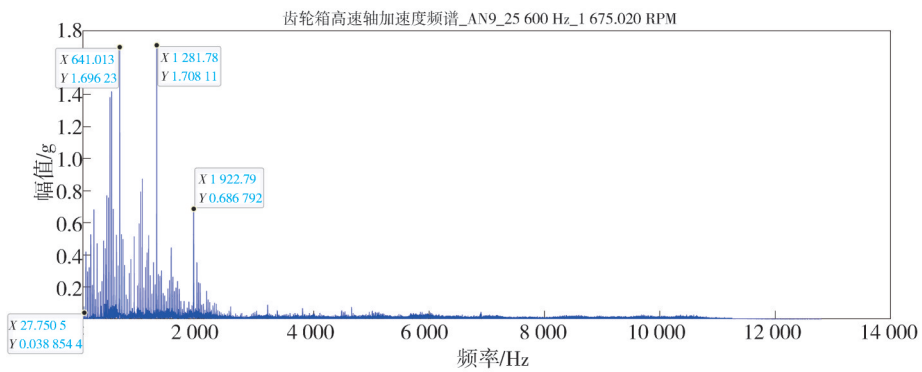
如图 23(c)和图 24(c)所示,对断齿和开裂的原始频谱进行细化分析后,可以发现两类故障的频率构成基本一致,均以一倍至三倍啮合频率振动为主,且伴随高速轴转频的边带,其边带分别为27.750 Hz和27.539 Hz,与时域波形中的冲击间隔27.777 Hz相差分别为0.09%和0.85%。此外,从频谱中边带的能量对比可知,开裂故障明显小于断齿故障。开裂故障的二倍至三倍高速级啮合边带族群能量明显减弱,在低频30~120 Hz和1 550~1 900 Hz边带族群的分布存在空档期,

底部噪声占据主导。因此,故障类型和程度与低速轴大齿和中间轴小齿的判断一致,均以频谱边

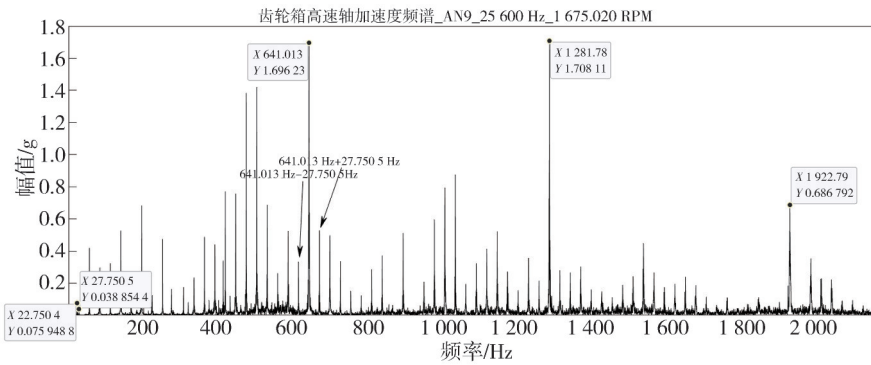
带的分布作为诊断依据。同时,可参考时域波形的指标参量作为辅助判断的手段。



(a) 原始时域信号



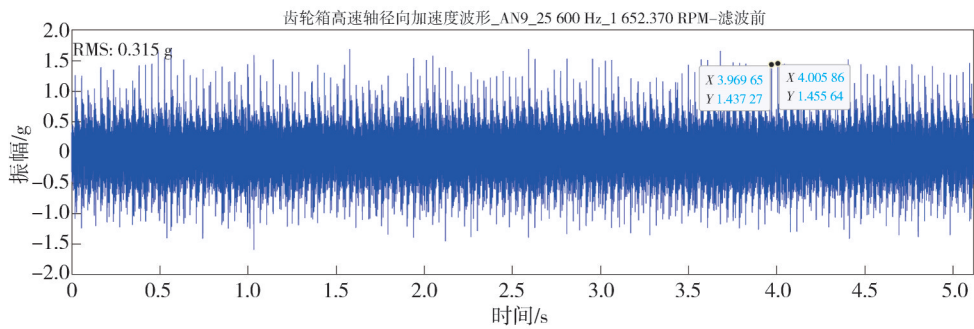
(b) 原始信号频谱



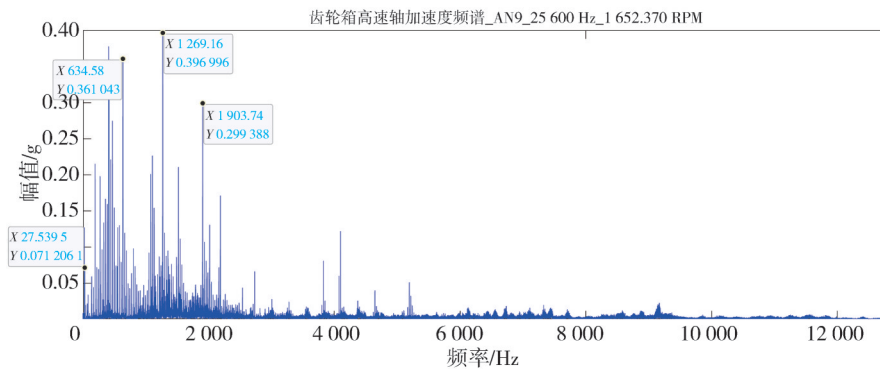
(c) 局部放大后的频谱

图 23 齿轮箱高速级小齿轮断齿故障时域波形/频谱

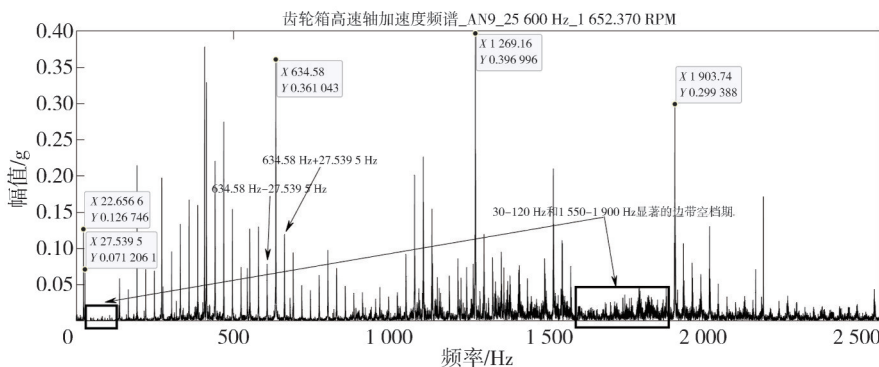
Fig. 23 Time domain waveform/frequency spectrum of gearbox high-speed stage pinion gear broken teeth



(a) 原始时域信号



(b) 原始信号频谱



(c) 局部放大后的频谱

图 24 齿轮箱高速级小齿轮断裂故障时域波形/频谱

Fig. 24 Time-domain waveform/frequency spectrum of gearbox high-speed stage pinion breakage faults

5.2 失效原因分析

以该机组运行四年零一个月时发生的高速级小齿轮断齿的故障为例。材质为18CrNiMo7-6，表面渗碳处理，对失效部位进行分析，齿面断裂形式如图25所示。



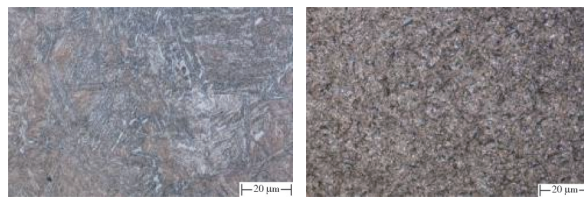
图 25 高速级小齿轮断齿宏观形貌

Fig. 25 Macroscopic morphology of broken tooth of high-speed pinion gears

化学成分检测：采用直读光谱仪对高速轴的完好齿及断裂齿进行化学成分分析，测试结果表明断裂齿轮的化学成分符合DIN EN 10084-20中对牌号为18CrNiMo7-6的各成分要求，如表14所示。

金相测试：在断裂齿横截面制取金相试样，断裂齿的表面金相组织为回火马氏体+残余奥氏

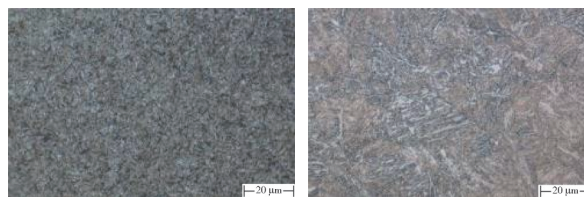
体+颗粒状碳化物，芯部组织为低碳板条马氏体，如图26所示。取完好齿的横截面制取金相试样，完整齿的表面金相组织为马氏体+残余奥氏体+颗粒状碳化物，芯部组织为低碳板条马氏体，如图27所示。



(a) 断齿表面 (b) 断齿芯部

图 26 高速级小齿轮金相组织检测结果

Fig. 26 Metallographic examination results of high-speed small gears



(a) 完整齿表面 (b) 完整齿芯部

图 27 高速级小齿金相组织检测结果

Fig. 27 Metallographic examination results of high-speed small teeth

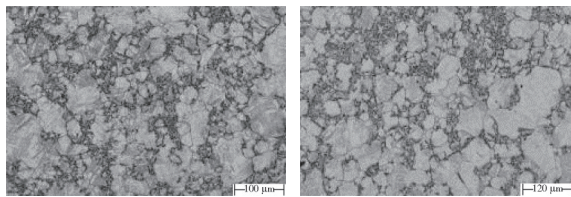
对断裂齿及完好齿进行晶粒度检测,晶粒度均为6级,略低于技术要求,如图28所示。对于风电机组,齿轮工作在高速重载环境中,芯部晶粒度的大小将影响芯部的塑性,影响材料的使用寿命。影响渗碳钢奥氏体晶粒度的原因主要有加

热温度、保温时间、加热速度、含碳量、合金元素含量等。合适的加热温度及淬火方式能显著改善晶粒度,反之易出现混晶、晶粒度粗大等不良现象,同时合金元素的含量也可影响奥氏体晶粒度,对晶粒的生长促进或抑制作用^[26-28]。

表 14 高速级小齿化学成分检测结果

Tab. 14 Chemical composition testing results of high-speed small teeth

	wt/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
18CrNiMo7-6	0.16~0.20	0.20~0.40	0.55~0.75	≤0.010	≤0.008	1.55~1.75	0.26~0.35	1.50~1.70
断裂齿	0.16	0.22	0.68	0.014	0.004	1.62	0.30	1.5
完好齿	0.17	0.22	0.69	0.015	0.005	1.66	0.31	1.5

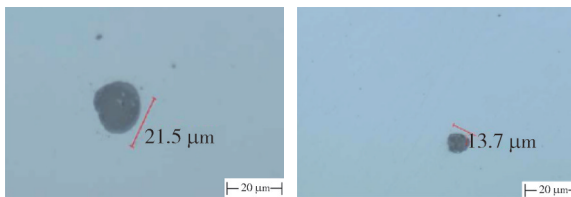


(a) 断裂齿 (b) 完整齿

图 28 晶粒度检测结果

Fig. 28 Grain size test results

非金属夹杂物检测:从断裂齿及完整齿上制取试样,在金相显微镜下进行非金属夹杂物的评定,测试结果表明断裂齿及完好齿的非金属夹杂物均符合技术要求,如图29、表15所示。



(a) 断裂齿 (b) 完好齿

图 29 非金属夹杂物检测结果

Fig. 29 Non-metallic inclusions test results

表 15 高速级小齿非金属夹杂物检测结果

Tab. 15 Non-metallic inclusions detection results in high-speed small gears

种类	A类		B类		C类		D类		DS类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
完好齿	0	0	0	0.5	0	0.5	1.0	0.5	1.0
断裂齿	0	0	0	0	0	0	1.0	0.5	

SEM-EDS分析:采用SEM断口进行观察分析,判断该断口为疲劳断口,如下图所示,A、B、C区均表现出疲劳特征,同时在断口处可明显观察到存在一处异物,具体如图30~32所示。

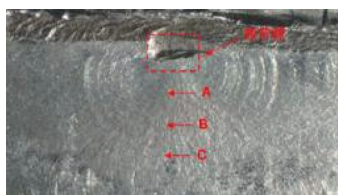
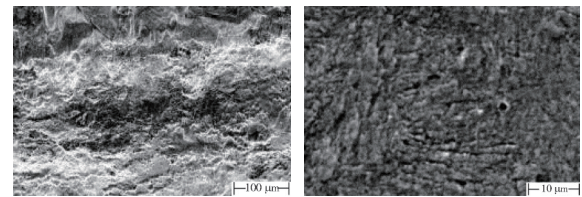


图 30 断口宏观形貌

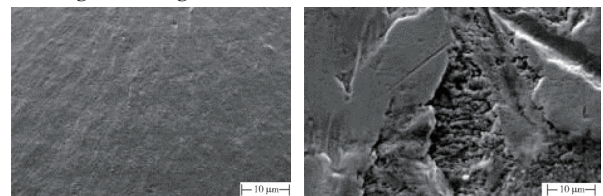
Fig. 30 Macro morphology of fracture surface



(a) 疲劳源区 (b) A区

图 31 疲劳源及A区微观形貌

Fig. 31 Fatigue source and microstructure of Zone A



(a) B区 (b) C区

图 32 B区及C区微观形貌

Fig. 32 Microscopic morphology of Zone B and Zone C

对裂纹源处采用能谱仪进行化学元素分析,可见疲劳源处Al、O元素含量异常,远高于基体中的元素,如图33、表16所示。

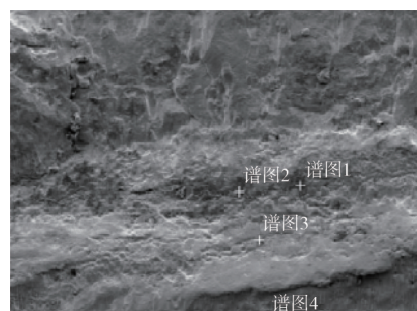


图 33 疲劳源处EDS检测位置

Fig. 33 EDS detection location at fatigue source

基于以上测试结果,高速级小齿的断齿为疲劳断裂,断裂的小齿轮晶粒度偏低,对材料的屈服强度可能造成一定的影响。高速级中的非金属夹杂物由于割裂齿部基体会增加齿轴的脆性,当非金属夹杂物所处的位置正处于高速级上承受较大疲劳应力的部位时,则对齿轴的疲劳性能有较大的影响,导

致在疲劳应力的作用下于该非金属夹杂物所在区域萌生疲劳裂纹并不断扩展直至断齿。

表 16 高速级小齿 EDS 检测结果

Tab. 16 Results of EDS testing in high-speed small teeth

	wt/%													
	O	Al	Ca	Cl	K	Cr	Mn	Ti	Fe	Mg	S	Ni	Si	Mo
谱图 1	51.71	33.58	1.14	0.12	/	0.53	0.49	/	11.28	0.70	0.23	/	0.22	/
谱图 2	44.56	30.24	0.84	/	/	0.75	0.58	0.19	21.17	0.44	/	0.34	/	0.71
谱图 3	6.39	0.73	/	0.20	/	1.90	0.65	/	87.34	/	/	1.31	0.48	0.94
谱图 4	/	/	/	/	/	1.74	0.94	/	95.34	/	/	1.73	0.25	/

6 齿轮箱行星轮系振动分析

6.1 行星轮断齿振动分析

针对齿轮箱行星轮系行星轮断齿,发现了以下可以快速诊断和分辨的频率特征。以某项目中出现的行星轮断齿故障为例进行详细说明(见图 34)。

该案例机组行星轮系齿轮采用直齿齿轮,通过图 34(c)获取到了高速轴两倍的啮合频率为 1 346.31 Hz,通过反推计算输出转速为 1 756.057 r/mim,与故障记录的转速 1 758.260 r/mim 偏差为 0.126%,基本可以忽略。按照振动信号反推计算出来的转速,基于式(5)和式(6),可以得到相应的太阳轮、行星轮、齿圈转频分别为 1.054、0.564 和 0 Hz,即各个齿轮的分布式故障特征频率^[29-30]。

图 34(a)为行星轮系的行星轮断齿故障的原始时域信号。通过 125~500 Hz 带通滤波后,观察到图 34(b)呈现等间隔冲击,该频率为 0.568 Hz,对应齿轮箱行星轮转频,与理论转频偏差为 0.706%。通过计算理论可捕捉到的冲击次数,即采样时间乘以行星轮转频结果为 6 次,经核实实际与理论的冲击次数相符。

此外,滤波前原始信号的有效值是滤波后振动信号有效值的 6.6 倍。基于实际工程经验,处理低频信号故障时,若滤波后振动信号有效值相差超过 10 倍,建议重新调整滤波频段或重新评估振动信号的有效性。这种差异主要由滤波器引入的非线性失真或信号丢失所导致。

如图 34(c)所示,与其他故障类型一样,在未采取任何手段的情况下难以定位行星轮系故障。然而,通过对频谱细化(如图 34(d)所示),可以观察到振动主要集中在 23.500 2 Hz 的行星轮系啮合频率及其高次谐波振动,与理论的行星轮系啮合频率 24.224 Hz 存在 3.08% 的偏差。同时,峰值

间隔为 0.568 Hz 的行星轮转频边带主要伴随在二倍和三倍啮合频率左右。对于齿轮箱行星轮断齿故障的边带族群分布区域与低速轴大齿断齿和开裂故障相似,尽管边带成分不同,但在诊断分析过程中仍需提取峰值间隔。

值得注意的是,在分析行星轮系的障时,若采样时间和采样率未能满足要求,将无法有效捕捉到故障信号记录。在频谱分析中,行星轮系故障与低速轴大齿轮故障的边带成分存在一定的交叉,相比中、高速级故障频率成分并不显著。因此,在进行行星轮系的诊断分析时,更倾向于依赖时域信号的特征。

基于多案例发现,行星轮故障可分为 4 类故障特征。首先是常见的行星轮转频的等间隔冲击,然后是二倍行星轮转频的等间隔冲击,即行星轮局部缺陷故障特征频率。以图 35 为例,展示了行星轮的“马蹄形”断齿故障,通过滤芯可以发现大量金属碎屑,但振动信号及时域模拟听诊均没有可疑之处。在分析马蹄形断齿时,需要考虑以下因素:

1) 直齿轮沿着齿宽同时进入和退出啮合,斜齿轮的啮合是渐入渐出的。直齿轮的轮齿受力均布于全齿宽,斜齿轮的受力区沿齿宽不断偏移。

2) 若直齿齿轮仅局部断齿,其余未断齿部位齿面无损伤时,齿轮副仍能维持平稳啮合,因此不会产生明显的啮合振动冲击。

3) 若齿轮啮合存在异常振动冲击,说明齿面损伤或啮合异常;反之,即使齿面损伤,未必会产生异常振动冲击。最后一类问题涉及齿轮之间存在某个公约数值的情况,也称为“齿轮互质问题”。当其中一个齿轮出现剥落或点蚀等故障时,会对所有与其互质的齿轮产生持续影响。这类故障在加速度频谱中主要表现为振动信号出现在(1/公约数)乘以行星轮系啮合频率的高次谐波位置,并伴随着行星轮转频的边带群。在时域信号中,主要特征是行星轮转频的冲击信号。

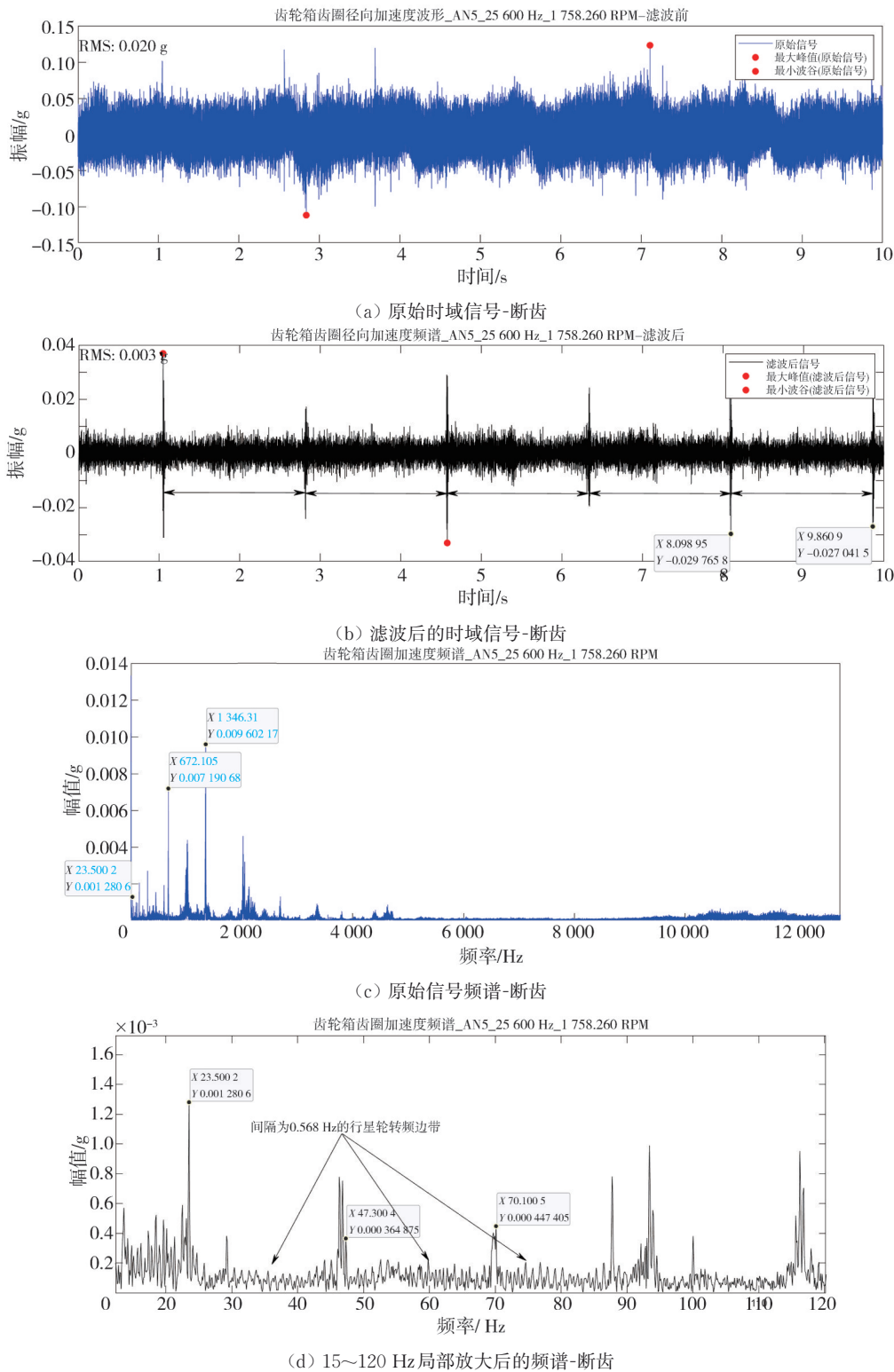


图 34 齿轮箱齿圈径向加速度时域波形/频谱

Fig. 34 Time waveform/frequency spectrum of radial acceleration of gearbox gear

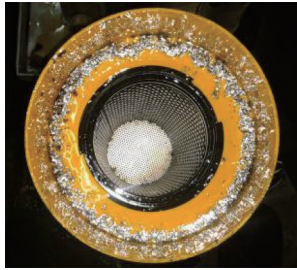
6.2 失效原因分析

该机组运行五年零三个月时，发生行星轮断裂的故障。行星轮材质为 18CrNiMo7-6，表面渗碳处理。观察此断口可见断口起源于齿根处，并

向芯部扩展，贯穿整个齿部最终发生断裂，如图 36 所示。

SEM 分析：使用扫描电镜观察此断口，可见断口呈显微状，起源于齿根圆弧渗碳层表面，表面呈现准解理特征，次表层为准解理+韧窝，往

芯部呈现全韧窝，如图37、图38所示。



(a) 滤芯大量金属碎削



(b) 行星轮“马蹄形”断齿

图35 齿轮箱行星轮断齿故障

Fig. 35 Gear planetary wheel broken teeth fail



图36 行星轮断齿形貌

Fig. 36 Broken tooth morphology of planetary wheel

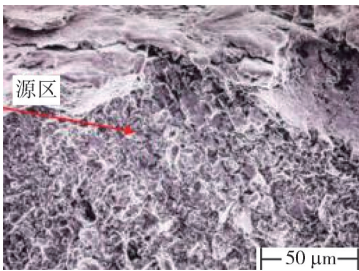
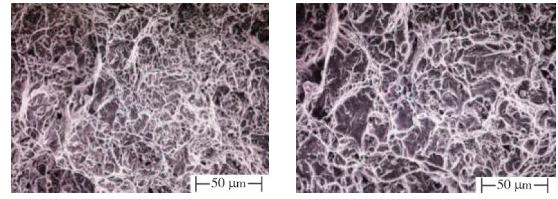


图37 源区形貌(1 000X)

Fig. 37 Source area topography (1 000X)



(a) 1 000× (b) 2 000×

图38 扩展区形貌

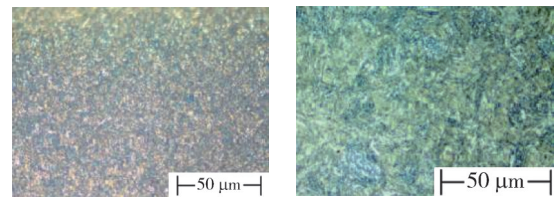
Fig. 38 Extended area morphology

金相检测：在该齿条上制取金相测试试样，对非金属夹杂、晶粒度、金相组织进行测试，均符合技术要求，表17、图39所示。

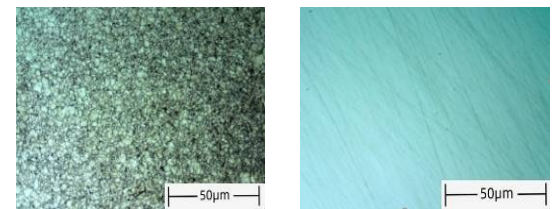
表17 非金属夹杂物检测结果

Tab. 17 Results of non-metallic inclusion detection

种类	A类		B类		C类		D类		DS类
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
夹杂物含量/%	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0



(a) 节圆表面组织 (b) 芯部组织



(c) 晶粒度 (d) 非金属夹杂

图39 行星轮金相组织检测结果

Fig. 39 Metallographic examination results of planetary gears

化学成分检测：采用直读光谱仪对高速轴的完好齿及断裂齿进行化学成分分析，测试结果表明断裂齿轮的化学成分符合DIN EN 10084-20中对牌号为18CrNiMo7-6的各成分要求，如表18所示。

表18 化学成分检测结果

Tab. 18 Results of chemical composition testing

	wt/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
18CrNiMo7-6	0.16~0.20	0.20~0.40	0.55~0.75	≤0.010	≤0.008	1.55~1.75	0.26~0.35	1.50~1.70
断裂齿	0.16	0.25	0.63	0.001	0.001	1.63	0.28	1.60

对完好齿轮的芯部及其表面硬度进行检测，测试结果表明硬度均符合技术要求，测试结果如表19所示。

采用显微维氏硬度计对齿面的硬化层深度进行测量，硬化层深度为2.75 mm，符合技术要求。

基于以上测试结果，可判断行星轮的断裂为

过载断裂, 裂纹起源于行星轮与太阳轮啮合面的齿根处, 过载断裂的原因与齿轮箱在工作时突然受到较大的外载有关。

表 19 硬度检测结果

Tab. 19 Results of the hardness test

位置	表面硬度/HRC	芯部硬度/HRC
左节圆	60.6	36.5
右节圆	59.0	36
标准	59~62	35~45

7 结 论

1) 断齿和开裂故障在振动频谱中表现出显著区别, 主要体现在边带的分布和振幅上。通过对频谱的局部细化分析, 可以快速识别边带分布特征, 并采用带通滤波的方法, 对 1~3.25 倍的啮合频率范围内进行滤波后, 在时域波形中可以观察到显著的等间隔冲击现象。

2) 在失效分析方面, 宏观观察可以初步明确断裂形式, 从而判断齿轮是否为疲劳断齿或其他形式的断裂。此外, 通过 SEM-EDS 分析可以详细了解裂纹源的微观形貌和成分, SEM 技术能够清晰显示裂纹源区的具体形态, 进一步帮助判断齿轮的断裂类型。

通过融合振动分析、故障诊断和失效分析的多种技术, 能够快速识别故障并确认其原因, 从而优化风力发电机组在全寿命周期内的可靠性维护策略。

参 考 文 献:

[1] 姜春雷, 韩加明. 基于自混合干涉的齿轮箱故障诊断技术[J]. 中国机械工程, 2015, 26(19): 2619-2624. JIANG Chunlei, HAN Jiaming. Gearbox fault diagnosis technology based on mixed interference [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(19): 2619-2624. (in Chinese)

[2] CHENG X, LI Z, CAO C, et al. Dynamic analysis and fault diagnosis for gear transmission of a vibration exciter of a mine-used vibrating screen under different conditions [J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12970.

[3] 罗召霞, 王新超, 张冰冰. 基于 RomaxDESIGNER 的行星传动边频带分析[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 35-42. LUO Zhaoxia, WANG Xinchao, ZHANG Bingbing. Analysis on the sidebands in the process of planetary transmission based on RomaxDESIGNER[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 35-42. (in Chinese)

[4] 雷淑梅, 匡同春, 陈丽凤, 等. 20CrMnTi 钢渗碳齿轮断齿失效分析[J]. 金属热处理, 2009, 34(10): 88-91. LEI Shumei, KUANG Tongchun, CHEN Lifeng, et al. Tooth fracture failure analysis of carburized 20CrMnTi steel gear [J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(10): 88-91. (in Chinese)

[5] 黄桥生, 彭碧草, 沈丁杰, 等. 汽轮机主油泵轴承断裂分析及预防措施[J]. 铸造技术, 2013, 34(9): 1163-1164. HUANG Qiaosheng, PENG Bicao, SHEN Dingjie, et al. Fracture analysis on bearing of main oil pump in steam turbine and preventive measures [J]. Foundry Technology, 2013, 34(9): 1163-1164. (in Chinese)

[6] 邵肖静, 季晨曦, 崔阳, 等. 钢中非金属夹杂物对钢材疲劳性能的影响概述[C]//第十八届(2014年)全国炼钢学术会议论文集, 西安: 2014: 92-99.

[7] 王侃伟, 方宗德, 钱学香. 基于小波分析的故障系统在旋转机械中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(8): 207-209. WANG Kanwei, FANG Zongde, QIAN Xuexiang. Study on application of wavelet transform technique to fault diagnosis of rotary machine [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(8): 207-209. (in Chinese)

[8] 汪超, 吴吉瑞, 张健. 基于边频带分析的齿轮故障诊断研究[J]. 湖北工业职业技术学院学报, 2015, 28(3): 107-109. WANG Chao, WU Jirui, ZHANG Jian. Study on gear fault diagnosis based on sideband analysis [J]. Journal of Hubei Industrial Polytechnic, 2015, 28(3): 107-109. (in Chinese)

[9] 申屠东华, 何先照, 卢江跃, 等. 大型风电机组传动系统支撑方式特性分析[J]. 装备制造技术, 2019(1): 129-133. SHENTU Donghua, HE Xianzhao, LU Jiangyue, et al. Analysis of characteristics of transmission system support of large wind turbine [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(1): 129-133. (in Chinese)

[10] 李稳. 大型风电机组传动链动力学特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[11] 张盛林, 宋朝省, 翟洪飞, 等. 兆瓦级风电机组传动链动态特性分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(1): 12-19. ZHANG Shenglin, SONG Chaosheng, ZHAI Hongfei, et al. Dynamic characteristics analysis of megawatt wind turbine drive train [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(1): 12-19. (in Chinese)

[12] XU Z, YANG P, ZHAO Z, et al. Fault diagnosis approach of main drive chain in wind turbine based on data

- fusion[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(13): 5804.
- [13] ROMANSSINI M, DE AGUIRRE P C C, COMPASSI-SEVERO L, et al. A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery [J]. *Eng*, 2023, 4(3): 1797-1817.
- [14] 杨福生, 戴先中. 带通信号的采样定理[J]. *信号处理*, 1986, 2(1): 58-62.
YANG Fusheng, DAI Xianzhong. Sampling theorem for bandpass signals [J]. *Signal Processing*, 1986, 2(1): 58-62. (in Chinese)
- [15] 潘乐炳, 肖世良, 刘建坡, 等. 一种基于欠奈奎斯特采样的宽带信号检测识别方法: CN104270234A [P]. 2015-01-07.
- [16] ZOU M, MA J, XIONG X, et al. Analysis of vibration characteristics of planetary gearbox with broken Sun gear based on phenomenological model [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(16): 9413.
- [17] REN Y, LI G, LI X, et al. Compound fault characteristic analysis for fault diagnosis of a planetary gear train [J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 927.
- [18] ZHI S, WU H, SHEN H, et al. Entropy-aided meshing-order modulation analysis for wind turbine planetary gear weak fault detection under variable rotational speed[J]. *Entropy*, 2024, 26(5): 409.
- [19] WANG P, LEE C M. Fault diagnosis of a helical gearbox based on an adaptive empirical wavelet transform in combination with a spectral subtraction method [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1696.
- [20] HUANG L T, CHANG J Y. Vibration characterization and fault diagnosis of a planetary gearbox with a wireless embedded sensor [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(2): 729.
- [21] 梅坛, 陶美娟. 关于新版GB/T4336-2016标准的理解和实施建议[J]. *理化检验-化学分册*, 2017, 53(7): 800-804.
MEI Tan, TAO Meijuan. Understanding and implementation suggestions on the new GB/T4336-2016 standard [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2017, 53(7): 800-804. (in Chinese)
- [22] 孙乾. 钢材中非金属夹杂物的来源、分类、检验及其对母体性能影响的宏观概述[J]. *山西冶金*, 2022, 45(9): 60-62.
SUN Qian. Summary on the origin, classification and inspection of non-metallic inclusions in steel and their influence on matrix properties [J]. *Shanxi Metallurgy*, 2022, 45(9): 60-62. (in Chinese)
- [23] 张春富. 钢中非金属夹杂物及对性能的影响[J]. *冶金与材料*, 2020, 12(4): 34-35.
ZHANG Chunfu. Non-metallic inclusions in steel and their effects on properties [J]. *Metallurgy and Materials*, 2020, 12(4): 34-35. (in Chinese)
- [24] 刘寅隼. 钢铁材料中非金属夹杂物对产品质量的影响与控制研究[J]. *冶金与材料*, 2023, 43(8): 172-174.
LIU Yincong. Study on the influence and control of nonmetallic inclusions in iron and steel materials on product quality [J]. *Metallurgy and Materials*, 2023, 43(8): 172-174. (in Chinese)
- [25] 张文博. 非金属夹杂物对齿轮接触疲劳性能的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [26] 顾晓明, 刘俊伟, 李康康, 等. 热处理工艺对18CrNiMo7-6渗碳钢奥氏体晶粒度的影响[J]. *金属加工(热加工)*, 2015(7): 16-18.
GU Xiaoming, LIU Junwei, LI Kangkang, et al. Effect of heat treatment process on austenite grain size of 18CrNiMo7-6 carburized steel [J]. *MW Metal Forming*, 2015(7): 16-18. (in Chinese)
- [27] 杨少朋, 尉文超, 胡芳忠, 等. 低碳齿轮钢18CrNiMo7-6奥氏体晶粒度长大规律[J]. *材料导报*, 2021, 35(8): 8179-8183.
YANG Shaopeng, WEI Wenchao, HU Fangzhong, et al. The austenite grain growth behavior of low-carbon gear steel 18CrNiMo7-6 [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(8): 8179-8183. (in Chinese)
- [28] 黄道龙, 吴翔云, 侯清宇, 等. 加热工艺对16MnCr5H钢奥氏体晶粒度的影响[J]. *热处理*, 2022, 37(2): 46-49.
HUANG Daolong, WU Xiangyun, HOU Qingyu, et al. Effect of heating process on austenite grain size of 16MnCr5H steel [J]. *Heat Treatment*, 2022, 37(2): 46-49. (in Chinese)
- [29] 冯志鹏, 褚福磊. 行星齿轮箱齿轮分布式故障振动频谱特征[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(2): 118-125.
FENG Zhipeng, CHU Fulei. Vibration spectral characteristics of distributed gear fault of planetary gearboxes [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(2): 118-125. (in Chinese)
- [30] 冯志鹏, 赵镭镭, 褚福磊. 行星齿轮箱齿轮局部故障振动频谱特征[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 119-127.
FENG Zhipeng, ZHAO Leilei, CHU Fulei. Vibration spectral characteristics of localized gear fault of planetary gearboxes [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5): 119-127. (in Chinese)