

Research on gear breaking of wind power growth box

Fujun Zhang¹ Bin Jin²

1. Shanghai College of Science & Technology, Shanghai, 201899, China

2. Jiangsu Tianding Testing Technology Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract

In the endoscope maintenance of a wind turbine gear growth box, found that the high speed axle system and medium speed axle system are broken, and the tooth surface of low speed level peels off, and the shutdown treatment was immediately taken. In order to find out the cause of broken tooth loss and tooth surface peeling and prevent the recurrence of similar accidents, the failure analysis of broken gear box was taken. Through macroscopic observation fracture tooth surface, has obvious fatigue bed lines, after the analysis of the chemical composition, metallographic organization, hardness, fatigue crack originated from the teeth, after the action of periodic alternating load force, the fatigue crack expanding lead to the final gear tooth. The partial load of gear shaft is the cause of the local stress of tooth surface and the peeling of tooth surface. The analysis method used in this paper helps technicians to analyze the appearance of the failure mode, and identify the specific causes of failure, and propose effective preventive measures to prevent similar failure problems.

Keywords

Wind power growth box; gear; fatigue crack; partial load

风电增速箱齿轮断齿研究

张福军¹ 金斌²

1. 上海科学技术职业学院, 中国·上海 201899

2. 江苏天鼎检测科技有限公司, 中国·江苏 苏州 215000

摘要

某风电齿轮增速箱在内窥镜检修时发现增速箱高速轴系、中速轴系出现断齿, 低速级齿面出现剥落现象。为查明断齿及齿面剥落原因, 预防后续类似事故发生, 对失效增速箱断齿进行失效分析。通过宏观观察断裂齿面, 具有明显的疲劳贝纹线, 经过化学成分、金相组织、硬度分析, 综发现齿轮断齿属于多源疲劳断裂, 疲劳裂纹起源于齿面的点蚀剥落凹坑处, 经过周期性的交变载荷的作用力, 疲劳裂纹不断扩展导致最终齿轮的断齿。齿轮轴的偏载是导致齿面局部应力增大, 出现齿面剥落的原因之一。本文所用的分析方法有助于科技人员根据失效模式的表象分析, 最终查明具体的失效原因, 提出有效的预防措施, 预防类似失效问题。

关键词

风电增速箱; 齿轮; 疲劳; 偏载

1 引言

增速箱作为风力发电机组中的关键零部件, 其运行的稳定性和可靠性直接影响风力发电机组的性能。由于风力发电机通常安装在高山、荒野、海岛等风口处, 致使风电增速箱经常承受无规律变向载荷的风力作用。在强冲击、变载荷的恶劣条件下, 导致行星排各路行星轮传递的功率分配不均匀, 齿间载荷波动剧烈, 偏载现象严重, 致使系统产生振动、噪声, 传动不平稳, 极大地影响了传动系统的使用寿命^[1]。

某风电增速箱型号为 FD1660-01-00R9, 2022 年某天, 风电场检修人员登机进行增速箱内窥镜检查时发现风机增

速箱高速轴系、中速轴系断齿, 低速级齿面剥落, 随即采取停机处理。

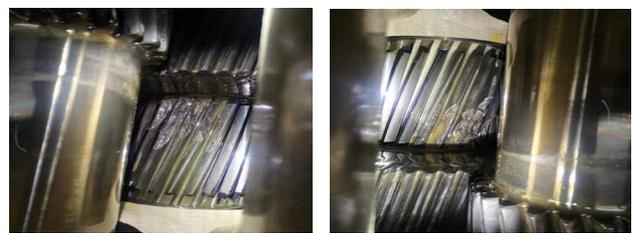


图 1 内窥镜检查照片

2 理化检验及结果

对断裂的齿轮进行宏观观察(见图 1), 对齿轮原材料进行化学成分、力学性能分析, 以确定其是否符合相关标准。

【作者简介】张福军(1982-), 男, 中国安徽宿州人, 硕士, 高级工程师, 从事可靠性, 优化设计, 失效分析研究。

了解到增速箱为一级行星两级平行轴结构，发生断齿部位主要位于高速中间轴的小齿轮部位。整个齿轮啮合面均出现了不同程度的点蚀剥落痕迹，且主要集中于齿宽一端约整个齿宽的 1/3~1/2 处，整个齿面点蚀剥落沿齿宽方向有明显的不均匀现象，呈现明显的偏载痕迹，断齿主要集中于连续的 4 个齿面上，属于典型的多源疲劳断裂^[2]。



图 1 齿轮宏观外貌

2.1 断口分析

对检材断口进行宏观观察，整齿轮轴多数齿面位于齿宽方向一端约 1/3~1/2 处有明显的点蚀剥落痕迹（见图 1），断齿主要集中于 4 个齿面上的一端，断口未见明显塑性变形，



图 3.1 断裂源区

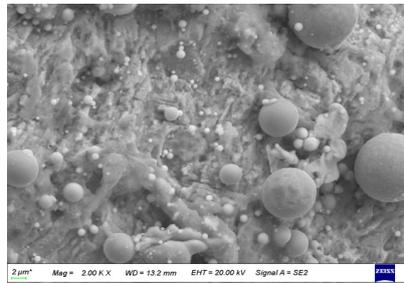


图 3.2 扩展区疲劳条带

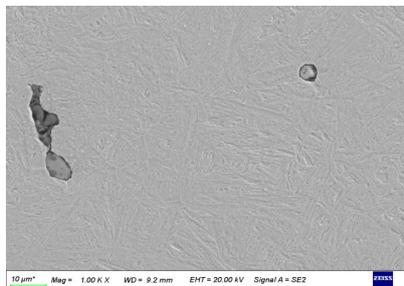


图 3.3 断齿表面夹杂物

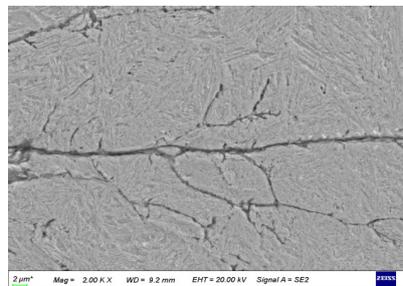


图 3.4 断齿齿面裂纹走向

2.2 成分分析

依据 GB/T 4336-2016《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法（常规法）》对检材 1 的成分进行现场检测，检测结果见表 1。

表 1: 检材化学成分检测结果（ω%）

检测项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
实测值	0.21	0.30	0.73	0.006	0.004	1.66	1.46	0.27	0.07

备注：齿轮的材质为 18CrNiMo7-6，为常用的风电齿轮渗碳用钢。

断口表面具有清晰的宏观疲劳弧线，疲劳裂纹扩展区占据了整个断裂面的绝大多数面积，瞬断区面积相对较少，属于疲劳断裂。通过比较辐射棱线及相互平行的弧线的曲率半径大小，判断疲劳源主要位于啮合面中间的节圆部位的点蚀剥落凹坑处靠近齿根一侧，属于多源疲劳断裂。

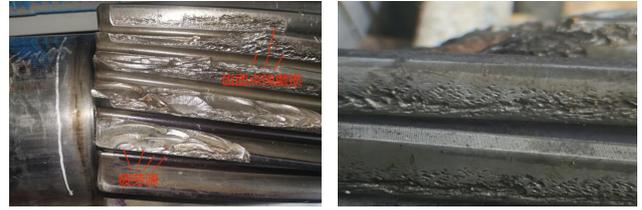


图 2 断口宏观形貌

对检材断口进行微观形貌观察（见图 3.1、3.2、3.3、3.4），断口疲劳源区存在表面凹坑，扩展区的微观形貌为疲劳辉纹，齿轮边缘存在较多未扩展疲劳微裂纹；断口附近截面裂纹呈树枝状向内扩展，其中一区域有两个明显夹杂物，但夹杂物附近未见裂纹。

2.3 金相分析

依据 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》对检材 1 的断齿以及正常齿进行金相检测，检测结果显示断齿和正常齿渗碳层金相组织为马氏体 + 残余奥氏体 + 碳化物（见图 4）。马氏体级别均为 1 级，为隐针及细针马氏体，马氏体针长 ≤ 3μm；残留奥氏体级别均为 1 级，含量 ≤ 5%；齿尖碳化物级别均为 2 级，为细颗粒状碳化物加稍粗的粒状碳化物；齿根内氧化层均为 4 级，表层可见沿晶界分布的灰色氧化物，内氧化层深度约为 12~20μm；心部组织均为贝氏体 + 低碳马氏体。按照 GB/T 10561-2005《钢中非金属夹杂

物含量的测定标准评级图显微检验法》A法对检材1中非金属夹杂物进行评级,检测结果显示夹杂物为D类,细系1.5级,粗系0.5级,具体见表2所示。在断齿以及正常齿表面均发现有锯齿状的疲劳微裂纹,其中有的微裂纹向内扩展,此类微裂纹源区存在表面凹坑。

表 2: 钢中非金属夹杂物检测结果 (A 法)

	A 类	B 类	C 类	D 类	DS 类
细系	0	0	0	1.5	
粗系	0	0	0	0.5	0

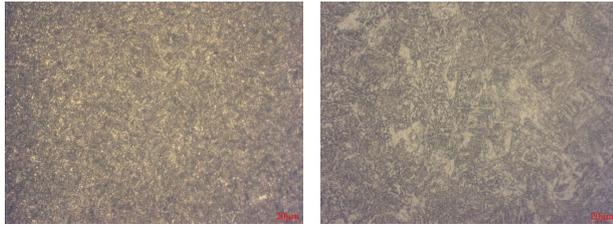


图 4 断齿边部和芯部金相组织

2.4 硬度检测

依据 GB/T4340.1-2009《金属材料 维氏硬度试验 第1部分: 试验方法》对检材1节圆处0.5mm、齿尖0.2mm以及心部进行硬度检测,检测结果显示如表3、4所示,检材1断齿有效硬化层(≥550HV1)深度分别为2.17mm和2.19mm,平均为2.18mm,正常齿有效硬化层(≥550HV1)深度分别为2.23mm和2.20mm,平均为2.22mm。

表 3: 检材 1 距离齿面 0.2mm 硬度检测结果 (HV1)

	检测点 1	检测点 2	检测点 3	平均值	平均值 (HRC)
断裂齿 (节圆0.2mm)	650	655	653	652	58.3
正常齿 (节圆0.2mm)	652	655	654	654	58.5
断裂齿 (齿尖0.2mm)	678	673	673	675	59.5
正常齿 (齿尖0.2mm)	681	687	684	684	59.8

表 4: 检材心部硬度检测结果 (HV1)

	检测点 1	检测点 2	检测点 3	平均值	平均值 (HRC)
断裂齿	353	361	359	358	36.40
正常齿	327	340	362	342	34.77

3 分析讨论

理化分析结果显示风机增速箱中间高速轴的齿轮轴断齿为多源疲劳断裂,呈点状的疲劳源产生于齿轮的最大接触

应力的啮合线部位,断口疲劳扩展区占据面积较大,疲劳断裂源头为点蚀坑及剥落凹坑;断口微观形貌局部可见疲劳辉纹,表明齿轮的断裂具有疲劳断裂的微观特征。成分检测和金相分析可知,齿轮的材质为18CrNiMo7-6,为常用的风电齿轮渗碳用钢,钢中非金属夹杂物主要为D类细系1.5级,满足GB/T3480.5-2021《直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第5部分: 材料的强度和质量》中ME级齿轮对于材料夹杂物的要求,排除齿轮选材不当以及原材料中夹杂物缺陷导致的断齿。

由硬度检测可知,断齿和正常齿节圆处硬度约为58.3和58.5HRC,齿尖硬度为59.5和59.8HRC,均满足齿面硬度要求,考虑到齿轮已使用十二年,不排除齿面磨损导致节圆处齿面硬度降低的可能;同时齿轮有效硬化层厚度达到了2.2mm以上,满足行业内一般重载渗碳齿轮对于硬化层的要求,心部硬度满足渗碳齿轮最高级别ME中硬度≥30HRC的要求,齿轮齿面硬度并非导致齿轮断齿的原因。

4 讨论

增速箱的断齿属于多源疲劳断裂,疲劳裂纹起源于齿面的点蚀剥落凹坑处,经过周期性的交变载荷的作用力,疲劳裂纹不断扩展导致最终齿轮的断齿。齿轮轴的偏载导致齿面局部应力增大,超过材料的许用应力,导致齿面先行出现点蚀,并进一步扩展成剥落凹坑成为疲劳断裂的裂纹源区。

5 结论及建议

结论:通过对对断裂增速箱齿轮的理化检验、断口分析、金相分析及硬度检测等手段的综合分析,得出齿轮断齿为疲劳断裂所致,疲劳起源于齿面接触疲劳的剥落凹坑处;齿轮轴的偏载导致齿面局部应力过高,齿面先行出现点蚀,进一步齿面剥落成为疲劳断裂的裂纹源区。

建议:

对现有风电场的增速箱进行定期的全面检查,特别是对齿轮的磨损和裂纹进行重点监控。

对于已经发现疲劳裂纹的齿轮,建议及时更换,避免因小问题引发大故障。

在设计和制造过程中,应考虑齿轮的偏载问题,优化齿轮设计,减少应力集中现象。

建议对风电场的维护保养流程进行审查和优化,确保维护保养工作的有效性。

参考文献

- [1] 王辉, 李晓龙, 王罡等. 大型风电齿轮箱的失效分体及其设计制造技术的国内外现状分析[J]. 中国齿轮箱工程. 2013.24(11): 1542-1549.
- [2] 王荣. 失效分析应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.