

风机齿轮箱齿轮失效分析

Failure Analysis of Gear in a Wind Power Generator

马海全¹, 于 洋², 姜 涛², 陶春虎^{1,2}, 黎 明¹

(1 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

MA Hai-quan¹, YU Yang², JIANG Tao², TAO Chun-hu^{1,2}, LI Ming¹

(1 Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education),

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 某发电厂的风力发电机在运行中齿轮箱出现故障, 经现场检查发现在风机某一级传动齿轮中有一个齿轮出现断齿现象, 断裂部位在轮齿的中间腰部位置。为了判断风机齿轮箱的断裂性质及原因, 对风机齿轮箱断齿残片进行了宏观观察, 对断齿残片基体及断口源区进行了能谱分析, 测定了断齿表面残余应力, 还对齿轮进行了断口定量分析。结果表明, 风机齿轮箱齿轮断齿失效性质为弯曲疲劳断裂。可基本排除齿轮设计、材质、使用维护方面的异常, 齿轮断裂原因在于断裂部位存在夹渣缺陷。

关键词: 齿轮; 弯曲疲劳; 夹渣缺陷

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2009)11-0088-04

Abstract: The gear case in a wind power generator failed during service, and it was found that a tooth of a gear in the gear case fractured. In order to find out the fracture cause of the gear, macro and micro observation was carried out on the fractured gear, energy spectrum analysis was conducted on the matrix and the fracture source region of the gear, surface residual stress was tested, and finally, fracture quantitative analysis was carried out. The results show that the failure mode of the gear is bending fatigue fracture. The fracture of the gear is caused by slag inclusions at the position of the gear, and has nothing to do with the design, material, and operation of the gear.

Key words: gear; bending fatigue; slag inclusion

风力发电的基本原理是将动能(风在运动中的能量)转化为电能, 这种转化过程分为两个阶段: 第一阶段: 风力推动转子(叶片)低速转动。第二阶段: 转子的低速转动通过三级增速后输出给发电机^[1]。齿轮的使用寿命不仅与材质、热加工及热处理有关, 而且与其运行环境密切相关。齿轮在转动时受高的扭转载荷、弯曲载荷和振动载荷, 因而在实际使用过程中不可避免会发生失效。

齿轮常见的失效模式有疲劳断裂、冲击过载、表面疲劳以及表面磨损。疲劳是齿轮破坏最主要的形式, 裂纹起源于加载一侧根部圆角表面处, 且在正常受载情况下基本处于齿端的中心位置^[2]。某发电厂的风力发电机在运行中出现故障后进行检查发现风机的某一传动齿轮中有一个轮齿出现断齿现象, 与断齿配合的输入轴大齿轮工作面上留下了明显擦痕。断裂的轮齿, 其断裂部位并不在受力最大的齿根, 而在轮齿的中

间腰部位置。齿轮箱内的传动结构分为三级, 断裂发生在二级传动结构, 齿轮箱中所有齿轮均为渐开线圆柱齿轮。

本工作通过对风机齿轮箱断齿残片进行宏观观察, 对断齿残片基体及断口源区进行了能谱分析, 还对齿轮进行了断口定量分析, 确定了齿轮箱齿轮的失效性质, 并对断裂原因进行了分析。

1 试验

1.1 断齿宏观检查

在齿轮箱滑油中找到的断齿主体见图 1。断齿长约 213mm, 断块断齿中部高度最大, 越向轮齿两端断裂高度越小。断齿工作面表面完整, 磨损轻微, 仍可见加工痕迹。断口为斜断口, 宏观痕迹表明裂纹首先产生于断齿主工作面中间位置向内约 4mm 处, 并且源

区距齿顶的垂直距离约 13mm, 随后向次工作面齿根部位以及轮齿两端扩展, 次工作面的断口边缘距齿顶约 25mm, 即次工作面断口边缘位于齿根。断齿主工作面可见加工痕迹清晰完整, 断口边缘未见明显加工缺陷。

断齿分区情况见图 1, 断面呈银灰色, 局部轻微磨损, 未见腐蚀形貌。由图可见, 整个断齿表面密布疲劳弧线, 特别是越靠近断齿两端疲劳弧线越清晰, 断口表

面也较粗糙, 见图中 ①区和 ⑤区, 这种特征应与裂纹扩展后期应力水平升高有关。断面上的疲劳弧线中心收敛于断口中部, 见图中 ③区。虽然整个断口为斜断口, 裂纹扩展路径弯折变化剧烈, 但断面上各区域的疲劳弧线和扩展棱线清晰连贯, 图 2 为主裂纹源局部形貌, 可见由中心源区向外辐射的放射棱线以及向主工作面一侧分散的疲劳弧线。根据这些特征判断, 图 1 断齿的主裂纹源应该位于断齿齿宽中部的轮齿内部。

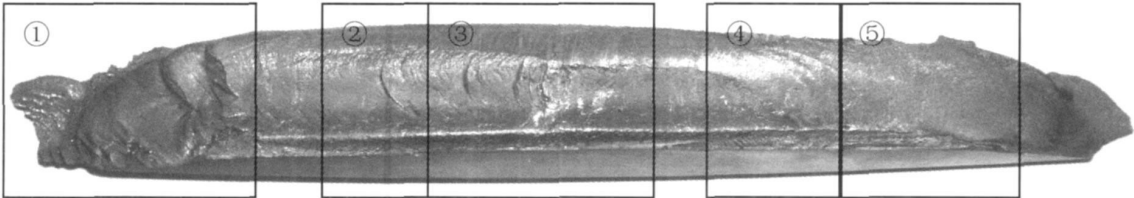


图 1 风机断口宏观形貌及分区情况
Fig. 1 Macro appearance of the fracture surface

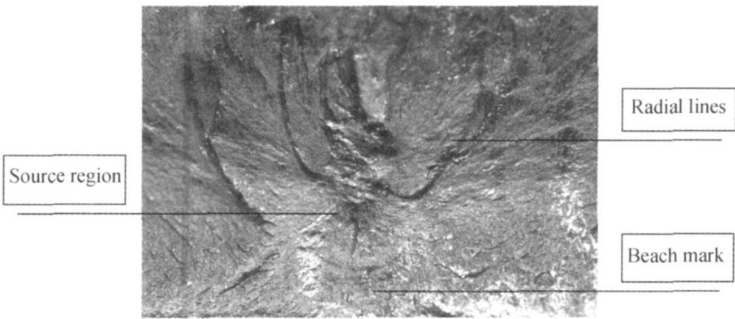


图 2 图 1 中 ③ 区形貌
Fig. 2 Magnification of the No. 3 region in figure 1

1.2 断齿微观观察及能谱分析

将断齿整体超声波清洗后放入 FEI QUOR-TA 600 扫描电子显微镜内进行观察。

断口源区形貌见图 3。可见源区表面较粗糙且大部分磨损, 局部未磨损的区域呈颗粒状。在裂纹扩展区可见疲劳条带, 见图 4。

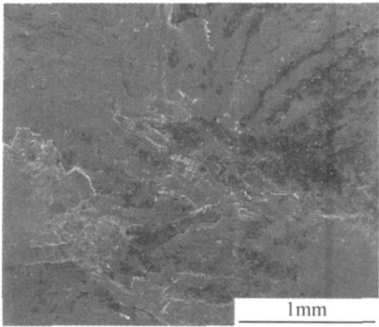


图 3 源区局部形貌
Fig. 3 Micro appearance of the source region

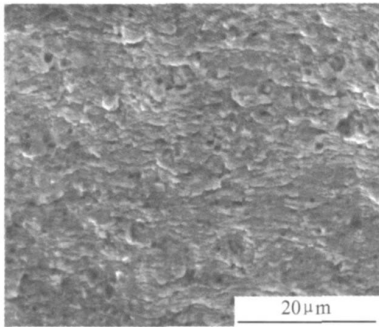


图 4 疲劳扩展区疲劳条带特征
Fig. 4 Fatigue strips at the extension region

断口源区存在一尺寸大致为 $300\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的不规则长方条形区域, 由许多呈块状的颗粒组成, 该区域在扫描电镜下呈白色, 可明显区别于基体颜色, 与基体间存在空隙, 疑似为杂质缺陷。对断口的源区进行能谱成分分析, 结果见表 1。齿轮材料为含 Cr, Mn, Ni

的合金钢, 源区缺陷区域除基体成分, 还含有较多的 Al, O 元素。

表 1 风机轮齿断口微区能谱分析(质量分数/%)
Table 1 EDS results of the fracture surface of the gear(mass fraction/%)

Test location	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Mo	Ni
Source region	24.70	1.37	26.12	0.40	1.28	0.39	0.84	0.44	43.21	1.25	—
Matrix	—	—	—	—	—	—	1.70	0.54	91.61	—	1.37

为了判断 Al, O 元素在断口上的分布情况, 对断口源区元素进行了面分布分析, 结果见图 5, 结果表明 Al 元素集中分布在裂纹源区, O 元素在源区的分布也明显高于其他区域。

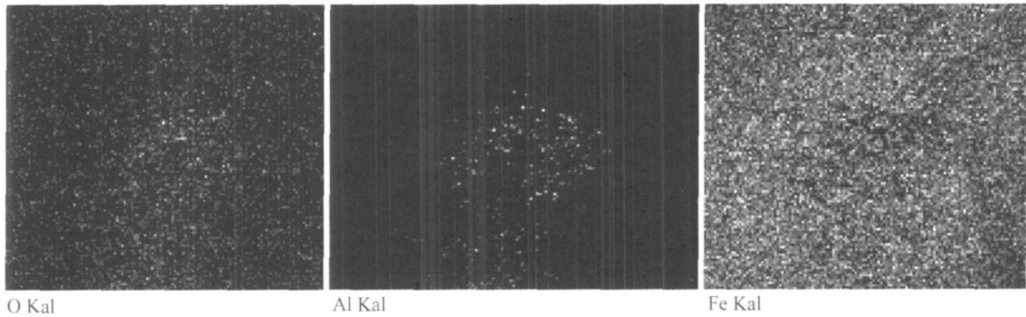


图 5 风机断口源区元素面分布图
Fig. 5 Element distribution at the source region of the fracture surface

2 断口定量分析

裂纹从位于齿轮表面的内表面的夹杂处起源, 在离源区较近的位置即可发现疲劳条带, 断口上的疲劳条带形貌见图 4。断口特征是断裂过程经历的真实记录, 可以用扩展区的疲劳条带对断口受力、寿命等进行定量评估。利用断口疲劳条带间距进行定量分析的理论依据是: 每一条疲劳条带相当于载荷或应变的一次循环, 疲劳条带与载荷谱循环次数有一一对应的关系, 每条疲劳条带的宽度就是载荷谱循环一次造成的裂纹扩展量^[3]。因此, 可以用疲劳条带间距的大小来评估扩展应力幅的大小^[4]。

从断口上对疲劳条带间距进行测量, 得到疲劳裂纹扩展速率随裂纹长度之间的变化数据并绘制曲线, 见图 6。通过图 6 可知, 裂纹扩展速率呈有规律平稳的加速变化, 该曲线表明, 裂纹是在稳定工作载荷下发生扩展的, 载荷幅的变化范围不大。同时通过断口上疲劳条带的测量可知, 在离源区较近的区域($a_0 = 0.2\text{ mm}$)即观察到的疲劳条带, 这也说明由于源区存在缺陷造成应力集中, 加快了疲劳裂纹的开裂和扩展。

3 分析讨论

断齿断口上有明显的源区、扩展区和瞬断区, 该齿

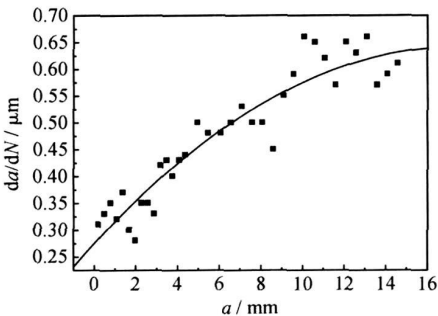


图 6 a 与 da/dN 之间关系
Fig. 6 Relationship between a and da/dN

断裂在齿腰部, 由其裂纹扩展方向可以判断该齿主要是在稳定载荷下发生的断裂, 因此该齿的断裂性质为弯曲疲劳断裂。

现场检查结果表明, 风机减速箱各齿轮表面完整, 除了被断齿及其碎片擦伤痕迹外, 未见其它损伤。断齿表面加工痕迹清晰, 未见偏磨痕迹, 对油料分析表明油料品质良好, 根据这些现象基本可以排除因加工维护失误导致的疲劳失效。对轮齿碎片组织、硬度及齿工作表面的残余应力进行分析, 结果也基本能够证明齿轮的热加工、表面处理没有大的失误。

各种类型的齿轮都是按照抗弯曲疲劳设计的, 而轮齿根部是弯曲应力最大的区域, 也是经常疲劳断裂

失效的部位。风机轮齿疲劳裂纹萌生于轮齿腰部,然而风机减速器齿轮为标准的渐开线圆柱齿轮,虽然缺乏齿轮组件的详细尺寸信息,无法进行受力分析,但是这种类型的齿轮在重载齿轮中经常使用,设计方法和加工工艺也非常成熟,因设计问题或偏载导致疲劳失效的可能性不大,而且断齿侧表面也不存在偏载的痕迹。

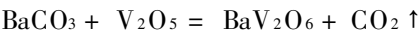
断口宏微观分析结果表明,风机断齿的疲劳源位于断齿中间腰部位置并距工作表面 4mm 处,所处深度已经超出了轮齿硬化层厚度,也就是说,疲劳裂纹并未萌生于弯曲应力最大的表面或次表面。轮齿从腰部发生断裂主要有三种可能:设计应力分布不合理、工作应力严重偏斜,或者轮齿该处材质异常。根据齿轮损伤特征,工作应力严重偏斜的可能性可被排除,设计应力分布不合理在上段论述也基本排除。断齿的主裂纹源为点源,边缘和两侧的小疲劳区只是主裂纹扩展后期应力变大的产物。通过对这个点源的形貌和微区成分分析,初步判断风机的断齿裂纹起源于轮齿内部的一处不规则形状的缺陷处,缺陷中富含 Al、O 等疑似炉渣类元素,由此判断应为夹渣材质缺陷。此缺陷明显降低齿轮材料的疲劳抗力,从而最终导致齿轮疲劳断裂。

(上接第 22 页)

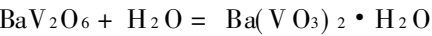
3 结论

利用 BaCO₃、V₂O₅, 采取固相合成方法制备 Ba₃(VO₄)₂ 的过程中, 反应历程如下:

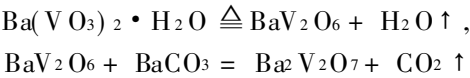
(1) 球磨过程中反应式为:



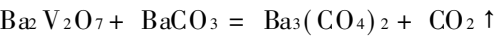
(2) 浆料烘干过程反应式为:



(3) 450℃以前反应式为:



(4) 450℃至 800℃反应式为:



450℃时已有少量 Ba₃(VO₄)₂ 生成, 中间产物 BaV₂O₆ 消耗完全。

800℃即可生成 Ba₃(VO₄)₂。

参考文献

[1] RYOSUKE U, HIROTA KA O, ATSUSHI Y, et al. Low-tem-

4 结论

齿轮常见的弯曲疲劳一般开裂于加载一侧根部圆角表面处,且在正常受载情况下基本处于齿端的中心位置。本风机齿轮断裂于齿腰部距工作表面 4mm 处的弯曲疲劳断裂,导致该风机齿箱齿轮断裂的原因为该部位存在夹渣类材质缺陷。

参考文献

[1] 邱兴克. 风力发电机三维建模与分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006.
[2] 陶春虎, 钟培道, 王仁智, 等. 航空发动机转动部件的失效与预防 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 289- 291.
[3] 章文峰, 闫海. 断口定量分析在评估构件疲劳寿命中的应用 [J]. 材料工程, 2000, (4): 53- 57.
[4] 张峥, 张海英, 田永江, 等. 叶片疲劳应力幅的断口特征形貌判断 [J]. 中国机械工程, 2001, 12(3): 79- 84.

收稿日期: 2009-06-04; 修订日期: 2009-08-30
作者简介: 马海全(1986—), 男, 硕士研究生, 从事图像处理与模式识别研究, 联系地址: 南昌航空大学研究生学院(330063), E-mail: maquan_116@163.com

perature sintering-microwave dielectric property relations in Ba₃(VO₄)₂ [J]. Ceramic Journal of Alloys and Compounds, 2006, (424): 388- 393.
[2] HIROTA KA O, ATSUSHI Y, RYOSUKE U, et al. Microwave dielectric properties of Mg₃(VO₄)₂-xBa₃(VO₄)₂ ceramics for LTCC with near zero temperature coefficient of resonant frequency [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, (27): 3099- 3104.
[3] 徐军, 邓佩珍, 干福熹, 等. Mn²⁺(5+): Ba₃(VO₄)₂ 可调谐激光晶体的生长 [J]. 材料研究学报, 1996, 10(5): 517- 520.
[4] PRAVEEN K, BANARJI B. Structural and dielectric properties of Ba₃(VO₄)₂ ceramics [J]. Current Applied Physics, 2009, (9): 515- 519.
[5] 熊魏. 液相法合成 Ba₃(VO₄)₂ 晶体原料 [J]. 福州大学学报, 2003, 31(5): 618- 621.

基金项目: 湖北省自然科学基金-青年杰出人才项目(2007ABB036)
收稿日期: 2008-10-24; 修订日期: 2009-04-20
作者简介: 周振泽(1979—), 男, 硕士, 主要从事微波介质陶瓷材料的研究, 联系地址: 中国地质大学(武汉)材料科学与化学工程学院(430074), E-mail: liber.zhou@gmail.com
通讯作者: 张德(1955—), 男, 教授, E-mail: zhd8863@163.com