

某风力发电机组螺栓断裂原因试验分析

冯标 张华

(华能新能源股份有限公司云南分公司生产部 云南 昆明 671000)

摘要: 某风电场安装 1.5 MW 风力发电机组 33 台, 运行 3 年后, 叶片连接螺栓频繁发生断裂。为了更好地了解原因, 风电场通过化学成分分析、金相分析及断口分析等方法, 对其中一台风力发电机组的叶片连接螺栓断裂原因进行了分析。结果表明: 断裂螺栓的组织性能试验结果正常, 断面干净、有少量附着物, 断口有明显平行弧线, 由源区向终端区扩展, 呈现典型的疲劳特征, 可判断断口的形成是疲劳所致。

关键词: 风电机组; 螺栓; 螺栓试验; 变桨螺栓

0 引言

某风电场由 1.5 MW 的变速恒频、变桨距控制、陆上型风力发电机组组成, 风力发电机组型号为 FD93H。该风机轮毂中心高度为 69 m, 风轮直径为 93 m, 钢制锥形塔筒。某天登机检查发现叶片 3 的连接螺栓断裂 1 根 (在六角头螺母处折断)。本文通过对机组叶片螺栓试验分析, 断裂和未断裂进行对比, 简单判断叶片螺栓断裂原因。

1 试验分析样品情况

某风电场提供断裂螺栓 1 根、未断裂螺栓 2 根, 试验螺栓宏观形貌具体如图 1。螺栓编号为 1 ~ 3 号 (1 号为断裂螺栓)。螺栓规格为 M30 × 400mm, 螺栓强度级别为 10.9 级。



图 1 试验螺栓宏观形貌

2 螺栓非破坏性检测

2.1 宏观观察及几何尺寸测量

螺栓断裂位置在螺牙底部, 如图 1 中 1 号所示。具体断口的宏观观察将在后面断口分析中详述; 2 号和 3 号 2 根完整螺栓表面均未见毛刺、凹陷、锈蚀、裂纹等缺陷。

对 3 根螺栓进行几何尺寸测量, 结果显示 3 根样品螺栓的尺寸正常, 断裂螺栓尺寸与其它螺栓的尺寸没有明显差异。

2.2 超声波探伤检验

执行参考 DL/T 694-1999《高温紧固螺栓超声波检验技术导则》, 两端为平面的刚性无中心孔螺栓, 采用纵波探头在端面扫查对侧。检验结果表明: 2 根完整螺栓均未发现缺陷。

3 螺栓材料质量解剖试验

3.1 化学成分分析

在 1、2 号螺栓上制取粉末样进行化学成份分析。取样螺栓的化学成份符合 GB3098.1-2010 标准对 10.9 级螺栓的要求。

3.2 硬度检验

对 3 根螺栓均取硬度样进行维氏硬度检验, 检验位置按照 GB/3098.1-2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》要求, 检验结果 (硬度值 (HV30)) 为 1 号 337、338、343; 2 号 337、335、341; 3 号 351、348、347。由结果可知: 各螺栓硬度均满足标准要求, 断裂螺栓硬度与其它螺栓硬度差别不大。(GB/3098.1-2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》要求 10.9 级螺栓硬度值为 320 ~ 380HV。)

3.3 金相分析

对 1 ~ 3 号螺栓取样 (包括横向、纵向) 进行金相检验, 金相样经砂纸粗磨、细磨和抛光后, 用 4% 硝酸酒精溶液进行浸蚀, 浸蚀后在 OLYMPUS GX71 型光学显微镜下进行金相观察分析。由分析可知:

(1) 试验螺栓均未见明显脱碳形貌, 基体组织均为贝氏体, 断裂螺栓组织与其它螺栓组织没有明显差异。

(2) 在试验螺栓的螺牙顶部均发现有折叠形貌, 最深度 0.31mm, GB/T 5779.3-2000《紧固件表面缺陷 螺栓、螺钉和螺柱 特殊要求》中对 M30 的螺栓折叠深度最大值限为 0.47mm, 故试验螺栓螺牙顶部上的折叠深度满足要求。

3.4 拉伸性能试验

对 1 ~ 3 号螺栓按照标准 GB/T 3098.1-2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》及 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行常温拉伸试验, 拉伸试验机型号为 CMT5205。3 根螺栓常温下的抗拉强度、规定塑性延伸强度、断后延伸率、断面收缩率均满足 GB/T 3098.1-2010 标准对 10.9 级螺栓的要求。

3.5 冲击试验

对 1 ~ 3 号螺栓加工冲击试样进行 -40℃ 的冲击试验。取样位置及尺寸依据标准为 GB/T 3098.1-2010《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》、GB/T 229《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》。试验在 JBC - 300 电子测力冲击试验机上进行。冲击性能试验结果见表 1。参考西安热工研究院有限公司《风力发电场金属监督技术标准》对于 10.9 级

螺柱在 -40℃ 冲击吸收能量要 表 冲击试验结果

求平均值应不小于 27J，一组试件中允许有 1 件冲击吸收能量小于 19J，但不得小于平均值的 70%。由试验结果可知：1 ~ 3 号螺柱的冲击吸收能量合格。（GB/T 3098.1-2010《紧固件机械性能 螺柱、螺钉和螺柱》对 10.9 级螺柱的冲击吸收能量要求为在 -20℃ 下不小于 27J。本次试验选取更为严格的试验环境 -40℃。）

螺柱号	KV2 (J, -40℃)		
1	43	36	36
2	35	36	40
3	41	40	41

4 断口分析

4.1 宏观观察

螺柱断裂在螺牙底部。断面较为平整、光洁，断面大部分存在平行弧线扩展痕迹，为扩展区，弧线以源区为起始，向终断区扩展。源区、扩展区为一个平面，与螺柱轴线垂直，部分区域有较明显的碰磨痕迹；终断区与螺柱断面呈 45°，较为粗糙。

对螺柱断口取纵向样进行观察分析，金相样经砂纸粗磨、细磨和抛光后，用 4% 硝酸酒精溶液进行浸蚀，浸蚀后在 OLYMPUS GX71 型光学显微镜下进行金相观察分析。由金相分析可知：

(1) 断口处组织均为贝氏体，未见明显脱碳形貌，断口处组织未见明显差异。

(2) 断口上存在垂直于主断。

4.2 维氏硬度试验

对断口金相样进行维氏硬度试验。试验仪器为 HVS-50 维氏硬度计，试验载荷为 10kg，加载时间为 15s。试样紧挨断口及距断口较远处硬度值未见明显差别，均满足标准要求。（GB/3098.1-2010《紧固件机械性能 螺柱、螺钉和螺柱》要求 10.9 级螺柱硬度值为 320-380HV。）

4.3 扫描电镜分析

用 Fei Quanta 400HV 型扫描电子显微镜对断口进行微观形貌观察。对断口表面清洗后，断口形貌如图 2 所示，可以看到断口低倍下有明显平行弧线，由源区向终断区扩展。

4.4 X 射线能谱分析

用 Fei Quanta 400HV 型扫描电子显微镜和 EDAX 能谱仪对断口上源区的垢层进行微区成分的半定量分析。由能谱结果可以看出：断口上主要是 Fe 的氧化物，少量的 S、Na

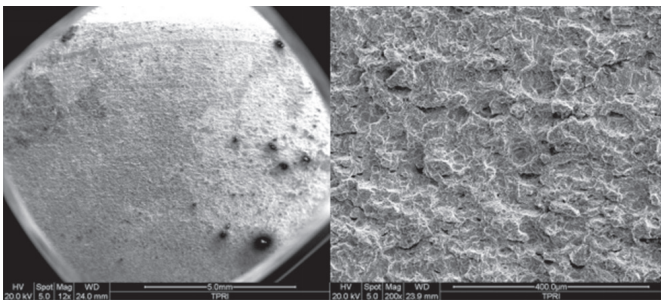


图 2 低倍形貌和高倍形貌
疑为后期运输、加工污染所致。

5 结语

(1) 螺柱材料质量综合分析评价。

断裂螺柱的化学成分、拉伸性能、硬度值、冲击吸收能量符合标准要求，基体组织正常，螺牙顶部存在折叠，但尺寸满足标准要求，可认为断裂螺柱材料质量合格。

与它同批次螺柱几何尺寸正常，超声波探伤未见缺陷，化学成分、硬度值、拉伸性能、冲击吸收能量等试验结果满足标准要求；组织正常，未见明显脱碳；螺牙顶部存在折叠，但尺寸满足标准要求。故可以判断其它螺柱材料质量合格。

(2) 螺柱断裂原因分析。

断裂螺柱的组织性能试验结果正常，断面干净、有少量附着物，断口有明显平行弧线，由源区向终断区扩展，呈现典型的疲劳特征，可判断断口的形成是疲劳所致。螺牙底部本身就是应力集中区域，容易萌生裂纹源，在较大循环载荷作用下易形成疲劳裂纹，并逐渐扩展直至断裂。建议控制好叶片的装配工艺，检修时注意检查螺栓是否松动。

参考文献：

[1] 杨国法, 余瑾, 裴义林, 杨兵, 晁悠扬. 风机基座螺栓断裂失效分析 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(02).
[2] 李宝明, 刘建斌, 田家彬, 徐璇. 基于 ANSYS 的风机轮毂与主轴连接螺栓的强度分析 [J]. 机械工程师, 2016(10).
[3] 姚兵印, 张志博, 马剑民, 等. 风力发电机组叶片连接高强螺栓的断裂原因分析 [J]. 理化检验: 物理分册, 2016, 52(5).
[4] 齐涛, 董妹言, 苏凤宇. MW 级风机变桨轴承与轮毂连接螺栓的强度分析 [J]. 机电工程, 2014, 31.

作者简介：冯标 (1992.04-)，男，彝族，云南大理人，助理工程师，研究方向：电力生产技术管理（新能源）。