● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.04.022

超临界机组低压转子叶片断裂原因分析

黄桥生[1],章亚林[1],牟申周[1],李秋白[2],刘玉海[2]
(1. 国电科学技术研究院有限公司,湖北 武汉 430066;2. 国电河南电力有限公司,河南 郑州 450000)

摘　要:某超临界 600 MW 机组发生了叶片断裂事故,分别利用光学显微镜、扫描电镜和磁记忆检测仪对叶片的金相组织、叶片表面垢层(腐蚀产物)组成以及叶片应力分布进行分析。结果表明,叶片喷丸质量不佳,在腐蚀环境中产生点腐蚀坑,进汽侧边缘的点腐蚀坑形成微裂纹,在运行中受到离心力及交变汽流力等作用下,产生应力集中,裂纹扩展直至发生疲劳断裂。为了保障该汽轮机安全运行,提出加强汽水品质监督,在大修揭缸检查时,对点腐蚀等微缺陷进行检查以及采取喷涂技术对叶片进行表面防护等措施。

关键词:喷丸检查;磁记忆;腐蚀介质;积盐分析

中图分类号:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)04-0413-04

Analysis of Cause of Low Pressure Rotor Fracture in Supercritical Unit

HUANG Qiaosheng[1], ZHANG Yalin[1], MOU Shenzhou[1], LI Qiubai[2], LIU Yuhai[2]
(1. Guodian Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430066, China; 2. Guodian Henan Electric Power Co., Ltd., Wuhan 450000, China)

Abstract: A blade fracture accident occurred in a supercritical 600 MW unit. Optical microscopy, scanning electron microscopy and magnetic memory detector were used to analyze the metallographic structure of the blade, the composition of the scale layer (corrosion product) on the blade surface and the stress distribution of the blade. The results show that the quality of blade shot peening is poor, pitting corrosion pits are generated in the corrosive environment, and micro-cracks are formed in the pitting corrosion pits on the edge of steam inlet side. Under the action of centrifugal force and alternating steam flow force in operation, stress concentration is generated, and crack propagation occurs until fatigue fracture occurs. In order to ensure the safe operation of the steam turbine, it is proposed to strengthen the quality supervision of aerated water, inspect the micro-defects such as pitting corrosion during the inspection of the cylinder in overhaul, and adopt spraying technology to protect the blade surface.

Key words: pill test; magnetic memory; corrosion medium; salt accumulation analysis

某电厂 #1 机组是某汽轮机厂 2009 年生产,2010 年 11 月投入运行,为 N600-24.2/566/566 型纯凝机组。该机组低压转子第 5 级(次次末级)动叶片材质为 1Cr12Ni2W1Mo1V 马氏体不锈钢,叶型结构为变截面扭曲叶片,自带冠整体围带,菌型叶根,有效叶高 325.7 mm,叶片采用喷丸强化,反向第 5 级(电机侧)整圈有 104 片叶片。2018 年 8 月,B 低压转子动叶片发生叶片断裂事故,断裂叶片为反向第 5 级 #36,断裂位置距叶根 120 mm。

1　宏观检查分析

图 1 为断裂的 #36 叶片断口宏观形貌。可以看出,进汽侧端部外弧面存在明显的裂纹源,裂纹源向外有两圈明暗交错的半圆形贝纹线;从进汽侧向出汽侧一半的宽度断口平整,颜色发暗,中间区域颜色为淡黄色,为裂纹扩展区;出汽侧一半的宽度断口明亮,颜色为灰白色,不平整,呈撕裂状,为瞬时断裂区。从断口形貌分析,为疲劳断裂。裂纹源和扩展区较瞬断区,颜色相对较黄,断口的裂纹源附近有比较明显的贝纹线。叶片背弧面覆盖有沉积物,并有腐蚀的麻点。

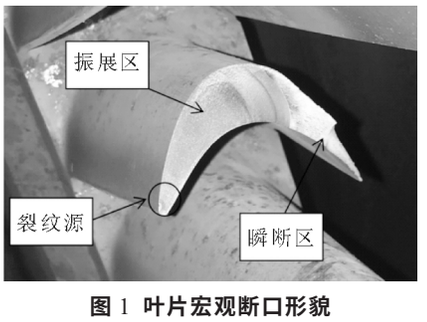


图 1 叶片宏观断口形貌
Fig.1 Fracture morphology of the leaf blade

图 2 为 #36 断裂叶片裂纹源体式显微镜照片。

收稿日期:2018-12-17
作者简介:黄桥生(1980-),湖南衡东人,工程硕士,高级工程师.主要从事电力设备检测与失效分析.
电话:18672357327,E-mail:63292537@qq.com

(a)裂纹源形貌(8倍)　(b)背弧面的腐蚀坑形貌(16倍)　(c)进汽侧边缘腐蚀坑形貌(16倍)

图 2 体式显微镜下的裂纹源形貌

Fig.2 Form of crack source under body microscope

可以看出，裂纹源为较为规则的圆形点腐蚀坑，坑内存在腐蚀产物，腐蚀坑外围有规则的半圆形贝纹线，裂纹的扩展方向垂直于贝纹线向外发散，裂纹源区及扩展区断口较为平整。在背弧面存在较多的点腐蚀坑，并在距叶根 110 mm 处形成腐蚀坑密集区域，该区域腐蚀坑边缘形成明显的微裂纹，并连成一片。在侧边缘发现存在点腐蚀坑，部分腐蚀坑为规则圆形坑，部分腐蚀坑的周边已形成微裂纹，腐蚀坑形状已不再规则。

图 3 为 #36 断裂叶片局部表面喷丸体式显微镜照片。可以看出喷丸处理不到位，进汽侧边缘喷丸未覆盖、喷丸不能密布整个表面，喷丸坑与坑之间存在一定间隔，并发现喷丸坑边缘有多处点腐蚀坑。断裂的原因是叶片喷丸质量不佳，在腐蚀环境中产生点腐蚀坑，进汽侧边缘的点腐蚀坑形成微裂纹，在运行中受到离心力及交变汽流力等作用下[2]，产生应力集中，裂纹扩展直至发生疲劳断裂。

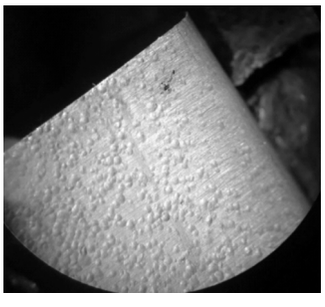


图 3 叶片表面喷丸情况体式显微镜照片

Fig.3 The micro-morphology of the blade surface in shot-peening condition

2 叶片化学成分分析

断裂叶片上取样进行化学成分检验，检测结果如表 1 所示。从检验结果看，断裂叶片的化学成分符合标准值的要求。

3 叶片力学性能

3.1 拉伸力学性能

取断裂叶片进行力学性能试样，结果如表 2 所示，符合东汽厂标准要求。

3.2 硬度结果

取断裂叶片的中间部位横截面检测布氏硬度，结果为 294 HB（标准为 293~331 HB，308~348 HV）；对整个 6 断裂叶片断口附近的横截面进行维氏硬度检测，检测位置示意图如图 4 所示，检测结果见表 3，结果符合标准要求。近表面硬度未明显升高，表面未做强化处理。

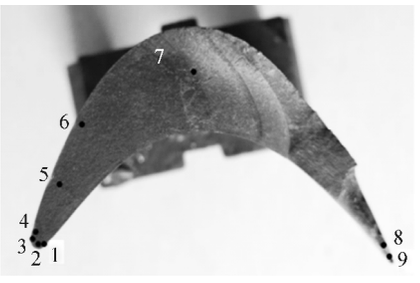


图 4 断口维氏硬度检测位置示意图

Fig.4 Hardness testing locations

4 叶片金相分析

取断裂叶片的断口处的纵截面、进汽侧横截面和进汽侧纵截面进行金相组织检测。进汽侧横截面和纵截面的机械抛光面基体比较干净，无明显的夹杂物。图 5 为断口纵截面金相组织和二次裂纹形貌。可以看出，断口纵截面组织为回火马氏体组织，在断

表 1 断裂叶片化学成分检验结果 w(%)

Tab.1 Testing results of chemical composition of broken blade

元素	S	P	V	Ni	Mo	Cr	W	C
断裂叶片	0.005 7	0.021	0.23	2.47	1.10	11.19	1.05	0.146
东汽厂标准	≤0.025	≤0.025	0.15~0.35	2.2~2.6	1.0~1.4	10.5~12.5	1.00~1.40	0.12~0.16

表 2 断裂叶片力学性能检验结果
Tab.2 Tensile mechanical properties of the broken blade

力学性能	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A(%)	A_{kv}/J
断裂叶片	973	743	13	68
东汽厂标准	≥920	≥735	≥13	≥48

表3 断裂叶片 HV 硬度测试结果
Tab.3 Hardness testing results of the fractured blade

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
HV0.2	339	334	334	327	326	324	320	324	330
东汽厂标准	308~348 HV								

面上有数处二次裂纹。纵截面的背弧面的表面处，半圆黑色区域为体式显微镜下的点腐蚀坑剖面组织，较大坑的直径约 0.3 mm，在腐蚀坑的底部有数条小氧化裂纹，近表面组织无明显细化。

5　扫描电镜分析

图 6 为断裂叶片裂纹源的电子显微镜扫描照片（SEM）。可以看出，裂纹源为一腐蚀坑，坑深约 0.4 mm，坑内有腐蚀产物，裂纹源附近的扩展区断裂为准解理断裂。表 4 为腐蚀坑内和断口扩展区的能谱分析结果。可以看出，腐蚀坑内物质含有较多的氧元素及 Si 元素，推断为氧化腐蚀产物及硅酸盐类垢盐。断口扩展区含有较多的氧元素，表面发生一定程度的氧化，未见 Si 元素。扩展区断裂为准解理断裂，断口平整，为穿晶断裂。

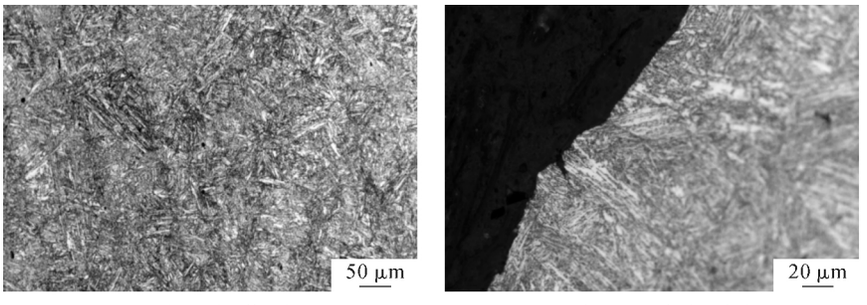
表4 断裂叶片裂纹源区能谱分析结果 w(%)
Tab.4 EDS results at the source zone of the fracture blade

元素	C	O	Na	Si	Cr	Fe	Ni	W
裂纹源区	22.35	32.76	1.12	2.96	2.29	38.51	-	-
扩展区	-	15.1	-	-	10.58	70.93	0.94	2.44

6　磁记忆应力分析

选择 30 片 B 低压转子反向第 5 级动叶片（断裂叶片同级）作为检测对象，采用应力集中指示仪进行检测。检测发现有 1 片叶片存在自有漏磁场强度 H 多次突变的现象，自有漏磁场梯度 dH/dx 值很大。图 7 为存在应力集中叶片的金属磁记忆检测结果。$H_{p\text{-}1}$ 为叶片表面自有漏磁场强度图，观察发现，叶片表面自有漏磁场强度 H 在距离叶根 130、235 和 275 mm 处发生突变且过零点，在 235 mm 处 H 值最大由 +100 A/mm 突变至 -600 A/mm，变化量达 700 A/mm，dH/dx 为叶片漏磁场梯度图，观察发现漏磁场梯度值 dH/dx 在自有漏磁场强度发生突变的位置明显提高，在 235 mm 处 dH/dx 达到 85×10^3 A/m^2，远大于其他部位的 5×10^3 A/m^2。

对叶片应力集中部位进行宏观检查，发现距叶根 130 mm 处有轻微的打伤受损，235 mm、275 mm 处有腐蚀坑。对距叶根 235 mm、275 mm 处进行磁粉检测，发现两处位置各有 2 个腐蚀坑，腐蚀坑长径约 0.3 mm，且 235 mm 处的腐蚀坑已连成线，长约



(a)断口纵截面　　(b)断口二次微裂纹

图 5 断口纵截面金相组织和二次裂纹形貌
Fig.5 The microstructure of the longitudinal section of the fracture and the morphology of the secondary crack

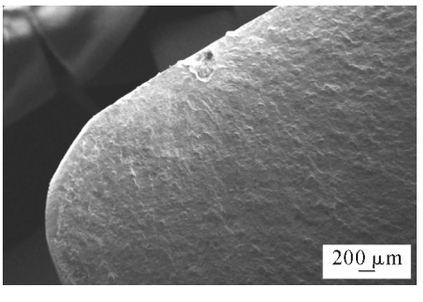


图 6 断裂叶片断口 SEM 形貌
Fig.6 SEM image of the fracture blade

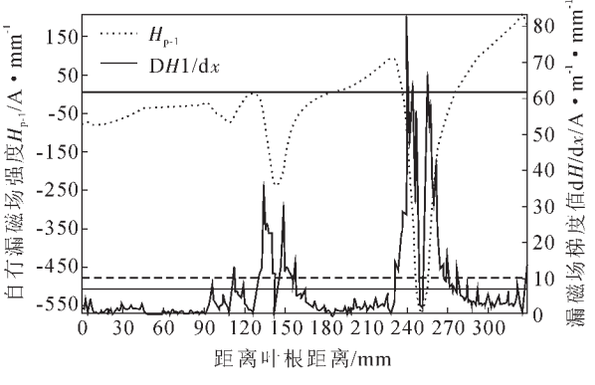


图 7 应力集中叶片磁记忆检测曲线
Fig.7 Magnetic memory detection curve of stress concentration blade

0.4 mm。通过磁记忆检测发现的叶片应力集中区域存在有腐蚀缺陷,缺陷危险性越大的部位(腐蚀坑已连成线的部位)局部应力越大,该部位易产生疲劳裂纹。

7 叶片积盐分析

对 B 低压转子叶片进行化学检查,发现叶片积盐较严重(见图 8)。对汽机叶片积盐取样并进行能谱分析,结果见表 5。

图 8 叶片积盐宏观形貌
Fig.8 Leaf blade salt macroscopic morphology

表5 低压缸第5级叶片积盐能谱分析
Tab.5 Salt EDS results of the 5th stage of low pressure cylinder blade

元素	质量百分比 w(%)	原子百分比 a(%)
O	28.03	55.33
Al	0.51	0.60
Si	3.93	4.42
Cl	3.33	2.97
Cr	8.98	5.45
Fe	55.22	31.23

从分析出的积盐成分来看,发现氯元素这种腐蚀元素含量也较高(化学分析检查结果为第 5 级叶片积盐氯元素质量百分比含量为 1.57%),此外,高压缸叶片、中压缸叶片、小机叶片积盐中也含有少量氯元素。氯元素是造成金属表面盐腐蚀与不锈钢腐蚀的主要原因[1],积盐中的氯元素主要是由溶解在蒸汽中的氯盐因为蒸汽温度压力的变化,在汽机叶片上析出沉积产生的。

8 原因分析

从断裂叶片的宏观形貌可以明显地看出,断裂叶片的断口呈现 3 个不同的区域:裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区。通过体式显微镜观察,发现叶片的进汽侧边缘及背弧面存在大量的点腐蚀坑,部分点腐蚀坑边缘形成微裂纹,并在一定区域内裂纹连接数个腐蚀坑成线,尤其是在进汽侧边缘存在微裂纹的点腐蚀坑,其危害性更大[2]。叶片表面未进行有效喷丸强化处理(大部区域未见喷丸痕迹,局部有喷丸痕迹区域喷丸质量不佳;其近表面组织未细化,硬度未明显升高),进汽侧边缘喷丸未覆盖,喷丸坑覆盖率不高(边缘不能互相压合),在坑边缘形成损伤并形成较大应力集中,易在此处产生点腐蚀。对疲劳源区进行扫描电子显微镜微观形貌观察时发现,断裂源区呈现穿晶断裂特征,并且存在含 Na、Si 等元素的腐蚀产物,可以推断该叶片裂纹源的出现是由于腐蚀造成的。通过磁记忆检测发现存在微裂纹的点腐蚀坑是应力集中区,点腐蚀坑形成的微裂纹,易在运行时发生扩展,产生疲劳裂纹,最终发生断裂。对叶片积盐成分进行分析,发现了腐蚀介质氯元素,含量也较高,此外,高压缸、中压缸、小机积盐中也含有少量氯元素。氯元素是造成金属表面腐蚀的主要原因。

9 结论与建议

断裂的原因是叶片喷丸质量不佳,在腐蚀环境中产生点腐蚀坑,进汽侧边缘的点腐蚀坑形成微裂纹,在运行中受到离心力及交变汽流力等作用下,产生应力集中,裂纹扩展直至发生疲劳断裂。加强汽水品质监督,确保汽水品质合格。在大修揭缸检查时,重视对点腐蚀等微缺陷的检查处理[3]。更换的新叶片出汽侧在局部热处理时,应保证加热均匀,并进行喷丸处理,以改善残余应力分布[4]。为防止腐蚀介质对叶片的腐蚀,可采取喷涂技术对叶片进行表面防护[5]。

参考文献:

[1] 黄桥生. 奥氏体不锈钢新管腐蚀泄漏原因分析 [J]. 电力科技与环保,2016,32(6): 40-42.
[2] 黄桥生,章亚林,牟申周. 超临界机组低压转子叶片裂纹形成机理[J]. 湖北电力,2014,38(8): 61-63.
[3] 牛玉静,冯文吉,蒋成虎,等. 汽轮机低压转子叶片断裂原因分析[J]. 上海金属,2017,39(1): 65-69.
[4] 王永芳,冉广,周敬恩,等. 喷丸对汽轮机叶片残余内应力影响的研究[J]. 汽轮机技术,2005,47(5):397-399.
[5] 李太江,刘庆伏,李巍,等. 汽轮机动叶片水蚀防护技术研究及应用[J]. 热加工工艺,2011,40(16):109-113.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志
国内邮发代号:52-64 国外发行号:M855 国内定价:18 元/本 海外定价:18 美元/本