

DOI: 10.19666/j.rfld.202405109

流场脉动下引风机叶片断裂 分析与试验研究

臧盛¹, 沈德明², 杨建刚¹

(1.东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 211189;
2.南京科远智慧科技集团股份有限公司, 江苏 南京 211102)

[摘要] 针对某型汽动静叶可调引风机叶片断裂故障开展计算分析和试验研究。通过振动试验和模态实验, 获取不同转速和开度下风机振动信号以及叶片固有频率, 根据相似理论绘制风机不同转速下性能曲线, 求得与流量对应的转速-开度曲线, 由失速线划定风机运行禁区。试验结果表明, 转速一定时, 随着静叶开度增大, 叶片通过频率及其谐波分量幅值增大, 结合模态实验发现风机在796~912 r/min转速区间运行时, 叶片固有频率和叶片通过频率及其谐波分量重合, 引发叶片共振。风机应避开共振转速区间运行并避免在转速禁区内运行。

[关键词] 汽动引风机; 叶片断裂; 气流脉动; 叶片通过频率; 运行特性

[引用本文格式] 臧盛, 沈德明, 杨建刚. 流场脉动下引风机叶片断裂分析与试验研究[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 129-134.
ZANG Sheng, SHEN Deming, YANG Jianguang. Fracture analysis and experimental study of induced draft fan blades under fluctuating flow field[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 129-134.

Fracture analysis and experimental study of induced draft fan blades under fluctuating flow field

ZANG Sheng¹, SHEN Deming², YANG Jianguang¹

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2.Nanjing Sciyou Wisdom Technology Group Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The calculation analysis and experimental study of blade fracture of a certain type of steam and static adjustable induced draft fan are carried out. Vibration signals and blade natural frequencies of fans at different speeds and openings are obtained through vibration tests and modal experiments. Performance curves of fans at different speeds are drawn according to the similarity theory, and the rotation-opening curves corresponding to the flow rate are obtained. The fan operation restricted zone is delimited by the stall line. The test results show that, when the rotation speed is constant, the amplitude of the blade passing frequency and its harmonic component increase with the stator blade opening. Combining with the modal experiment, it is found that the natural frequency of the blade and the blade passing frequency and its harmonic component coincide when the fan runs in the rotation speed range of 796~912 r/min, resulting in blade resonance. The fan should avoid running in the resonance speed range and avoid running in the speed restricted area.

Key words: steam induced draft fan; blade fracture; air pulsation; blade passing frequency; operation characteristics

为节能减排, 许多电厂对电机驱动引风机进行了汽动改造^[1-3]。引风机采用变频驱动后, 出现了振动增大、叶片断裂等故障^[4-9], 对引风机安全稳定运行产生了影响。

加厚叶片和调频是减少叶片断裂故障的主要措施。风机通过对叶片改型设计, 增加叶根部到叶顶部厚度能够减少叶片断裂故障^[10-13]。电厂在静叶可调轴流式引风机叶轮进气侧设置调频环, 改变叶

收稿日期: 2024-05-29

第一作者简介: 臧盛(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为动力机械振动, 13866675358@163.com。

通信作者简介: 杨建刚(1970), 男, 教授, 主要研究方向为旋转机械振动和转子动力学, Jgyang@seu.edu.cn。

片共振频率,可以避免发生共振^[14-16]。加厚叶片可以提高叶片强度,加调频环能够改变叶片固有频率,但是风机运行时作用在叶片上的气流脉动力则是导致叶片断裂的根本原因^[17-20]。陈庆光等^[21]分析了气流脉动对叶片稳定性的影响,指出不稳定气流引起的激振力对叶片造成疲劳破坏致使叶片断裂。郭航^[22]指出周期性压力波动作用在叶片上,当叶片固有频率与气流脉动频率耦合时,会引发叶片断裂。这些研究分析了气流脉动对叶片断裂的影响,但在实际机组上开展的试验研究较少,对叶片断裂的认识不够深入。

本文针对某电厂引风机叶片断裂事故,通过计算和试验分析叶片断裂原因,提出叶片断裂防治措施。

1 叶片通过频率分析

偏离设计工况运行时,气流冲角的改变及失速的形成如图 1 所示。由图 1 可知,叶背尾端出现涡流区^[23],涡流从尾部扩展至整个叶背区间,气流在叶道内发生阻塞,引发脱流现象^[24-25]。流道内每个位置压力和速度不同,形成了间隔排列的“气柱流”^[26],产生环向的气流速度、压力分布凹坑,导致流场在叶盘出口截面产生周向畸变,即环向速度和压力并非恒定值,而呈多周期性沿环向增大又减小的变化状,形成周期性叶片尾流激振力,流道内产生较大的压力脉动,引发叶片通过频率振动。

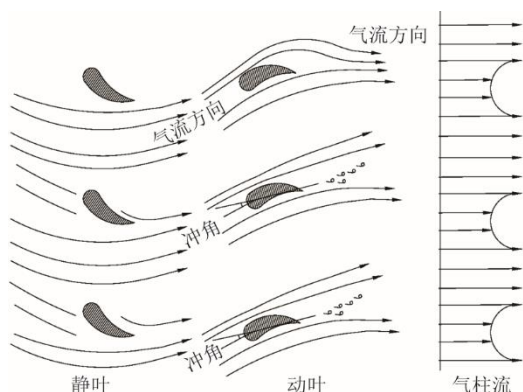


图 1 气流冲角的改变及失速形成

Fig.1 The change of airflow angle of attack and stall formation

叶片通过频率定义为:

$$f = \frac{n \cdot z}{60} \quad (1)$$

式中: f 为叶片通过频率, Hz; n 为转速, r/min; z 为叶片数。

2 风机振动试验研究

2.1 概况

引风机为静叶可调轴流风机,型号为 HA47048-Z,风机转速为 1 000 r/min,叶轮材质为 Naxtra 700,叶片厚度为 24 mm。采用小汽轮机驱动,通过齿轮箱减速(速比为 6.037),调速运行。引风机设计参数见表 1。表 1 中 TB 工况是风机设计工况,B-MCR 工况是锅炉最大连续蒸发量工况。

表 1 风机设计参数
Tab.1 Design parameters of the fan

项目	设计值	
类型	轴流引风机	
型号	HA47048-8Z	
介质	烟气/煤	
平均大气压/Pa	85 910	
平均海拔高度/m	1 372	
工况	TB 工况	B-MCR 工况
容积流/(m ³ ·s ⁻¹)	820.20	717.90
入口温度/°C	129.8	114.8
出口温度/°C	148.5	129.5
入口密度/(kg·m ⁻³)	0.706 0	0.734 0
入口压力/Pa	-7 410	-6 175
全压/Pa	11 496	9 580
效率/%	84.7	87.1
轴功率/kW	10 811	7 733
转速/(r·min ⁻¹)	920	895

2022 年 6 月风机振动突增并触发跳机,检查发现有一片叶片从叶根处整根断裂,其余叶片有不同程度扭曲,现场叶片断裂情况如图 2 示。



图 2 叶片断裂

Fig.2 Blade fractures

叶片断口可以看到裂纹形成、扩展和快速断裂

3 个区域。叶片断口起裂源位于风机叶片入口叶根与轮毂组焊的封头位置，断口中部表面特征平滑光滑，具有疲劳条带特征。风机出气侧表面具有起伏和粗糙性，属于快速撕裂的瞬断区。叶片断口具有典型的疲劳断口特征。

2.2 不同工况下振动试验

在风机机壳中分面布置振动测点，开展变转速、变开度试验。振动测点位置如图 3 所示。



图 3 振动测点位置
Fig.3 Vibration measuring points locations

汽轮机从 2 000 r/min 开始，逐次增加 50 r/min。先变转速，转速基本稳定后，改变静叶开度为 0%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%、90%、95%、100%（对应开度 $-75^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ）。图 4、图 5、图 6 为具体的振动测试数据。

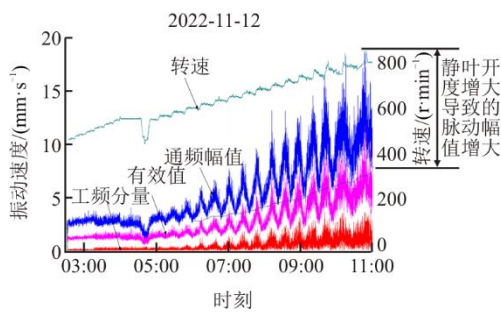


图 4 振动趋势
Fig.4 Vibration trend

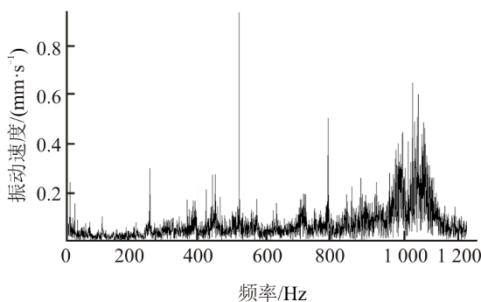


图 5 振动小状态下的频谱
Fig.5 Spectrum diagram of small vibration state

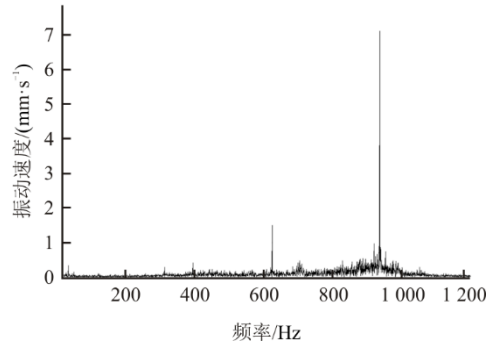


图 6 振动大状态下的频谱
Fig.6 Spectrum diagram of large vibration state

根据振动趋势图、频谱图分析发现。

1) 整个试验过程中，风机工频分量很小，说明风机叶轮不存在不平衡问题。

2) 转速一定，静叶开度越大，振动越大。导叶开度对振动的影响大于转速影响。

3) 引风机叶片数为 19 片。当监测点振动大时，信号中出现工频谐波的 38 倍频和 57 倍频分量，对应叶片通过频率的 2 倍频、3 倍频。叶片通过频率及其倍频分量是由风机内流场脉动引起的。监测振动信号中叶片通过频率及其倍频分量，可以判断风机工作状态。

将不同导叶开度和转速下振动速度列入表 2。结合振动趋势与表 2 中数据可知，转速一定时，开度调节由小到大、再由大到小，振动也是由小到大、再由大到小。计算同一转速下最大和最小开度振动差值，绘制转速振动差值曲线如图 7 所示。

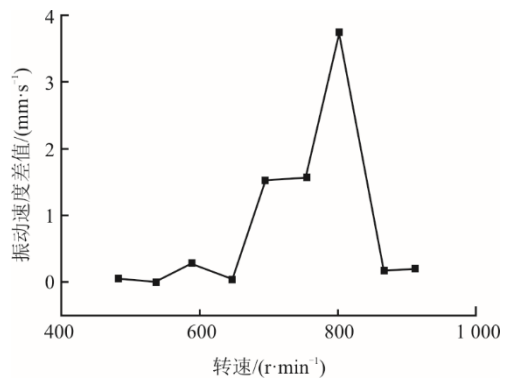


图 7 转速对开度变化的影响
Fig.7 The influence of speed on opening change

由表 2 及图 7 可知，转速越高，导叶开度对振动的影响越大。导叶开度变化相同时，在不同转速下振动速度差值不同，差值越大，说明转速的改变对开度变化的影响越大。高转速下导叶开度微小增大，振动速度相对于低转速会有更大幅度的增长。

表 2 不同转速和导叶开度下振动速度有效值
Tab.2 Effective value of vibration velocity at different speeds and guide vane openings

风机转速/ (r·min ⁻¹)	静叶 开度/ %	轴承箱 水平振动/ (mm·s ⁻¹)	轴承箱 垂直振动/ (mm·s ⁻¹)	后导叶 水平振动/ (mm·s ⁻¹)	后导叶 垂直振动/ (mm·s ⁻¹)
481	65	0.62	0.86	0.81	1.00
	85	0.73	0.76	1.01	1.06
536	65	0.80	0.73	1.06	1.25
	85	0.94	0.86	0.90	1.26
588	55	0.83	0.85	0.90	1.36
	90	1.12	1.38	1.20	1.65
646	55	1.10	1.48	1.39	1.86
	90	1.37	1.77	1.54	1.91
694	55	1.20	1.50	1.70	1.96
	90	1.50	2.38	1.94	3.49
754	55	1.33	1.61	1.55	3.03
	90	1.73	2.26	1.95	4.6
801	55	1.59	2.45	1.74	4.26
	80	1.78	2.87	2.18	7.98
866	55	2.82	2.73	3.10	2.30
	70	3.69	3.99	3.32	2.48
911	55	3.68	3.74	3.58	2.46
	65	3.21	3.36	4.12	2.67

3 叶片断裂原因分析

叶片断口符合高周疲劳断裂特征，可排除外物打伤、异常碰摩、制造缺陷等原因。共振情况下叶片上受到较大的交变应力，会引发叶片疲劳断裂。

采用模态实验方法测试风机叶片各阶固有频率。图 8 给出了模态实验时叶片频响函数曲线。由图 8 可知，500~600 Hz、750~870 Hz 内共振频率点分布密集。表 3 给出了风机叶片模态频率测试值。

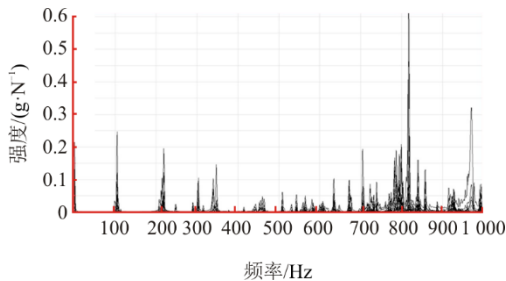


图 8 叶片频响函数曲线

Fig.8 Frequency response function curve of blades

汽轮机常用工作转速区间为 4 800~5 500 r/min，对应风机转速 796~912 r/min，对应叶片通过频率 2 倍频为 504~578 Hz，3 倍频为 756~867 Hz。叶片

通过频率 2 倍频、3 倍频分别与叶片 13—16、24—25 阶固有频率接近。在该转速区间内运行时，叶片存在高频共振风险。

表 3 叶片模态参数
Tab.3 Blade modal parameters

阶次	频率/Hz	阻尼比/%
11	442	0.002 7
12	459	0.006 2
13	508	0.018 8
14	531	0.107 0
15	539	0.030 5
16	562	0.002 1
17	581	0.144 0
18	608	0.273 0
19	635	0.099 1
20	672	0.006 6
21	704	0.046 1
22	718	-0.000 6
23	736	0.023 5
24	785	0.002 3
25	800	0.001 7

4 风机转速开度匹配关系

图 9 给出了风机额定转速、不同静叶开度下特性曲线。由相似理论可知，引风机变转速运行时满足：

$$\frac{q}{q'} = \frac{n}{n'} \quad (2)$$

$$\frac{p}{p'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \quad (3)$$

式中： q 为流量， m^3/s ； n 为转速， r/min ； p 为风压， Pa ； q' 、 n' 、 p' 为流量、转速和风压变化后的量。

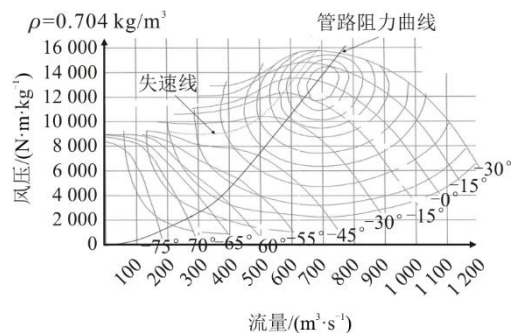


图 9 定转速变开度特性曲线

Fig.9 Variable opening characteristic curve of constant speed

图 10 给出了由相似关系求得的不同转速和开度下引风机特性曲面。

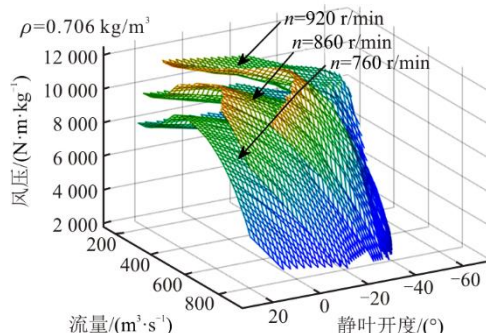


图 10 不同转速与开度引风机特性曲面
Fig.10 Characteristic surface of induced draft fan at different speeds and openings

根据管路阻力曲线和风机特性曲面，可以求得不同流量下转速与开度匹配曲线如图 11 所示。提高转速或增加静叶开度会使特性曲线向右上方移动，运行点接近失速曲线，进入失速区的风险增大。根据失速曲线可以在转速-开度曲线上划定失速边界（图 11），应该尽量避免在失速边界右侧运行，这可能会引起引风机失速。

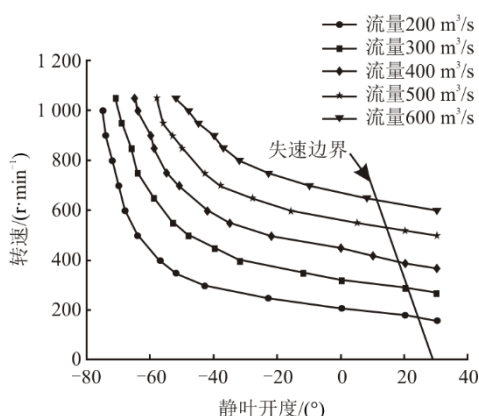


图 11 转速开度匹配曲线安全边界
Fig.11 Safety boundary of speed opening matching curves

5 叶片断裂抑制措施

气流脉动作用在风机壳体上，会激发出较大幅度的叶片通过频率及其高倍谐波分量。通过布置在机壳上的振动传感器监测叶片通过频率及其高倍谐波分量，可以判断风机运行状态，避免风机进入不稳定区工作。

试验表明，静叶开度或转速增大后，振动增大，开度影响更大。从特性曲线可知，开度或转速增大后，运行工况点接近失速区。运行中应该监测转速和静叶开度，避免风机进入失速区。

风机在转速 796~912 r/min 下运行时，如果发生气流脉动，叶片通过频率与叶片固有频率可能重合，激发叶片共振。运行时接近共振转速区间应快速通过，避开共振区，保证风机的安稳运行。

6 结 论

1) 风机在转速 796~912 r/min 运行时，叶片通过频率二倍频、三倍频与叶片 13—16、24—25 阶固有频率重合，可能引发共振导致叶片疲劳断裂，运行中应该避开该转速禁区。

2) 根据风机管路阻力曲线与特性曲线建立转速-开度匹配曲线，并在该曲线上划定失速边界，监测风机运行工况，严禁风机在失速区内运行。

3) 监测风机机壳振动信号中叶片通过频率及其高倍谐波分量，可以判断风机运行状态，避免风机内流场脉动引发叶片断裂。

[参 考 文 献]

- [1] XU S Q, LIU C G, WU J, et al. Economic analysis for steam-driven induced draft fans and application characteristics of different units[J]. Advanced Materials Research, 2014, 2990(889/890): 1574-1577.
- [2] 殷培光, 李秋白, 任子芳, 等. 引风机汽动驱动联合供热系统节能效果分析[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 99-103.
YIN Peiguang, LI Qiubai, REN Zifang, et al. Energy saving analysis of combined heating system of steam driven induced draft fan[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 99-103.
- [3] 李毅杰, 孙宇明, 朱晨亮, 等. 汽动引风机自动启停控制及导叶优化分析[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 126-131.
LI Yijie, SUN Yuming, ZHU Chenliang, et al. Automatic start-up and shutdown control of steam induced fan and optimization of guide vane[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 126-131.
- [4] 谷伟伟, 张永海, 李园, 等. 某电厂 600 MW 机组轴流引风机叶片断裂原因分析[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 129-132.
GU Weiwei, ZHANG Yonghai, LI Yuan, et al. Reason analysis for fracture occurred in axial induced draft fan blade of a 600 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 129-132.
- [5] 张桂彬, 胡志超, 杨鑫, 等. 火力发电机组汽动引风机带负荷轴振大原因分析与处理[J]. 中国设备工程, 2022(23): 196-198.
ZHANG Guibin, HU Zhichao, YANG Xin, et al. Analysis and treatment of large vibration of steam induced draft fan with load shaft of thermal generator set[J]. China Equipment Engineering, 2022(23): 196-198.
- [6] 张吕华, 朱朝阳, 刘川槐. 660 MW 机组汽动引风机叶片断裂原因的分析[J]. 风机技术, 2015, 57(1): 89-92.
ZHANG Lühua, ZHU Chaoyang, LIU Chuanhuai. Analysis of the blade fracture of steam-driven induced-draft fan for 660 MW unit[J]. Fan Technology, 2015, 57(1): 89-92.

- [7] 郭玉杰, 李超, 雷富刚, 等. 引风机变频运行时叶片断裂故障分析[J]. 电站系统工程, 2016, 32(1): 75-77.
GUO Yujie, LI Chao, LEI Fugang, et al. Blade fracture mechanics analysis of IDF working in variable frequency drive mode[J]. Power Station Engineering, 2016, 32(1): 75-77.
- [8] 吴兆香. 动叶调节汽动引风机在 660 MW 超临界燃煤发电机组应用[J]. 能源工程, 2023, 43(6): 104-108.
WU Zhaoxiang. Application of moving-blade regulating steam induced draft fan in supercritical unit[J]. Energy Engineering, 2023, 43(6): 104-108.
- [9] 赵世伟, 胡雪梅, 李焯, 等. 轴流送风机叶片断裂事故分析及对策[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 115-118.
ZHAO Shiwei, HU Xuemei, LI Ye, et al. Analysis and countermeasure on blade fracture of axial flow forced draft fan[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 115-118.
- [10] 江小英, 崔恒兵. 静叶可调轴流风机叶片断裂原因分析及处理[J]. 通用机械, 2019(9): 43-45.
JIANG Xiaoying, CUI Hengbing. Analysis and treatment of blade fracture of axial fan with adjustable stator blade[J]. General Machinery, 2019(9): 43-45.
- [11] 蒋锋, 叶阿曲, 陈得胜, 等. 大型火电机组引风机本体导叶失效分析与治理措施[J]. 风机技术, 2023, 65(增刊 1): 93-96.
JIANG Feng, YE Aqu, CHEN Desheng, et al. Failure analysis and treatment measures of guide vane of induced draft fan for large thermal power unit[J]. Fan Technology, 2023, 65(Suppl.1): 93-96.
- [12] 汤湘杰, 李科军, 应立军. 叶片后缘加厚对轴流风机性能的影响[J]. 流体机械, 2022, 50(1): 45-52.
TANG Xiangjie, LI Kejun, YING Lijun. Influence of blade trailing edge thickening on aerodynamic performance of axial flow fan[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(1): 45-52.
- [13] 贾恩庆, 薛晓波, 李昊燃, 等. 静调引风机变转速运行叶片开裂机理研究及解决方案[J]. 风机技术, 2023, 65(增刊 1): 82-86.
JIA Enqing, XUE Xiaobo, LI Haoran, et al. Research on blade cracking of static blade adjustable induced draft fan at variable speed operation[J]. Journal of Fan Technology, 2023, 65(Suppl.1): 82-86.
- [14] 李永乐, 骆贵兵, 杨辉. 静叶可调轴流式引风机叶片断裂原因分析及对策[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 114-119.
LI Yongle, LUO Guibing, YANG Hui. Cause analysis and countermeasures for blade fracture of static blade adjustable axial flow induced draft fan[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 114-119.
- [15] 董志强, 金立梅, 杨祖旺, 等. 引风机叶片断裂故障处理[J]. 机械, 2023, 50(9): 66-74.
DONG Zhiqiang, JIN Limei, YANG Zuwang, et al. Fault treatment of induced draft fan blade fracture[J]. Machinery, 2023, 50(9): 66-74.
- [16] 朱朝阳, 赵卫正, 刘川槐. 汽动引风机叶片断裂故障分析与处理[J]. 风机技术, 2018, 60(增刊 1): 72-76.
ZHU Zhaoyang, ZHAO Weizheng, LIU Chuanhuai. Diagnosis analysis and treatment of induced-draft fan blade fracture with steam turbine driven[J]. Fan Technology, 2018, 60(Suppl.1): 72-76.
- [17] 阮海亮, 王立塔. 电站轴流风机常见故障及处理策略[J]. 科学技术创新, 2018(19): 43-44.
RUAN Hailiang, WANG Lita. Common faults and treatment strategies of axial fan in power station[J]. Science and Technology Innovation, 2018(19): 43-44.
- [18] 杨海利. 引风机失速、喘振的异常分析及处理措施[J]. 电力设备管理, 2020(5): 90-92.
YANG Haili. Abnormal analysis and treatment measures of stall and surge of induced draft fan[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(5): 90-92.
- [19] 周朋, 刘伟. 600 MW 机组引风机叶片损坏原因分析及改进措施[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2018, 14(3): 223-231.
ZHOU Peng, LIU Wei. Damage cause analysis and improvement measures of induced draft fan blade of 600 MW unit[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2018, 14(3): 223-231.
- [20] 段小云. 锅炉增压风机叶片断裂原因分析及解决对策[J]. 广东电力, 2015, 28(5): 32-35.
DUAN Xiaoyun. Analysis on reason for fracture of blade of boiler booster fan and countermeasures[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(5): 32-35.
- [21] 陈庆光, 郭自超, 王默晗. FB CDZ-10-No36 型通风机进气风道气流稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 155-160.
CHEN Qingguang, GUO Zichao, WANG Mohan. Analysis on stability of air flow in intake air duct of FB CDZ-10-No36 mode ventilator[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 155-160.
- [22] 郭航. 百万机组汽动引风机叶片裂纹原因探讨[J]. 中国电业, 2020(2): 1-5.
GUO Hang. Discussion on the causes of blade cracks in steam induced draft fan of million units[J]. China Electricity Industry, 2020(2): 1-5.
- [23] 王明星. 轴流风机失速与喘振[J]. 中国科技信息, 2013(14): 129-130.
WANG Mingxing. Stall and surge of axial flow fan[J]. China Science and Technology Information, 2013(14): 129-130.
- [24] 陆亚钧. 风机、叶片机中的旋转失速和喘振现象及分离旋涡流动[J]. 水利电力机械, 1992(5): 20-44.
LU Yajun. Rotating stall and surge phenomenon and separation vortex flow in fan and blade machine[J]. Water Conservancy and Electric Machinery, 1992(5): 20-44.
- [25] 刘吉波. 轴流风机的脱流、喘振分析和防范措施[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 60-65.
LIU Jibo. Analysis and prevention measures of deflow and surge of axial flow fan[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science), 2017, 33(6): 60-65.
- [26] 党伟, 胡明辉, 江志农, 等. 燃气轮机压气机叶片断裂故障振动特征及其诊断方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(10): 7-19.
DANG Wei, HU Minghui, JIANG Zhinong, et al. Vibration features and diagnosis methods for rotor blade fracture in a gas turbine's compressor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(10): 7-19.

(责任编辑 邓玲惠)