

动叶可调轴流式风机叶片断裂的原因分析

大型轴流引风机是火力发电厂的主要辅机，它的安全可靠性直接关系到电厂的安全经济运行。广州珠江电厂（4×300 MW）国产汽轮发电机组的每台锅炉蒸发量为 1 021 t / h，配有 ASN—2880 / 1600 型动叶可调轴流式引风机。1993 年 4 月 4 台机组相继投产以来，多次发生引风机叶片断裂事故，给电厂的安全生产和经济运行造成了极大的威胁和损失，为此，就引风机叶片断裂原因进行分析。

1 引风机设备概况

ASN—2880 / 1600 型轴流式引风机的作用是将锅炉炉膛中燃烧所产生的烟气吸出，通过烟囱排至大气。每台锅炉配备 2 台 ASN—2880 / 1600 型引风机，其叶轮直径为 2 880 mm，轮毂直径为 1 600mm，设计叶片材料是 ZL402 铸铝合金，牌号为 ZA1Zn6 Mg，叶片头部设有可更换的不锈钢（1Cr18Ni9Ti）耐磨鼻，叶片表面镀硬铬，用于防磨。动叶角度的调节是由风机外部的伺服马达带动调节驱动装置，经调节拉叉使液压机构动作，推动轮毂内的调节盘做轴向移动来传动叶片。

2 叶片断裂损坏的主要情况

从 1994 年 2 月 1 日 1 号炉 A 引风机在运行中发生叶片全断开始，至 2001 年 6 月止，珠江电厂先后共发生 11 次引风机叶片全断事故，累计停机时间达 1 317 h；9 次停机检查，发现叶片根部 6 个螺栓的连接筋有裂纹或出现螺栓松动、断裂情况，累计停机时间 114 h。

2.1 引风机叶片全断情况

在全厂引风机叶片全断的情况中，1 号炉 A 引风机共占了 8 次（其中 1997 年以前 7 次，1998 年 1 次），3 号炉 B 引风机占 1 次，4 号炉 A 引风机占 2 次，2 号炉引风机从未发现过断叶片事故。叶片全断前的运行工况中，引风机轴振值有的在 30~50 μ m 之间；引风机轴振值有的在正常范围；有的还发生在机组变负荷工况下，引风机振动突变，发出巨响并跳机。

引风机叶片全断的主要特征是：26 片动叶全部折断，部份平衡锤断裂；轴承箱地脚螺栓断裂，严重的有调节油缸、旋转油封损坏，主体风筒和风箱导叶变形。

2.3 叶片裂纹损坏情况

在停机检查中，发现4号炉A、B引风机占了6次之多，2~3号炉B引风机各占一次。停机前，风机轴振值在50~75 μ m之间，只有一次轴振是正常的，叶片断裂主要发生在叶片根部底盘，并贯串3个螺丝裂开。

3 叶片断裂的原因分析

3.1 叶片材料存在质量问题叶片材料存在质量问题是叶片断裂的主要原因，我们可以从以下几个方面的分析可知。

3.1.1 叶片化学成分分析

叶片化学成分分析见表1。

表1 引风机断裂叶片各元素的质量分数
与GB 1173—86标准对比

项目	w(Zn)	w(Mg)	w(Ti)	w(Cr)	w(Fe)
断裂叶片	8.58	0.52	0.23	0.60	0.21
GB 1173—86	5.0~6.55	0.5~0.65	0.15~0.25	0.4~0.6	≤0.5

项目	w(Si)	w(Cu)	w(Mn)	w(Al)
断裂叶片	0.21	0.02	0.01	余量
GB 1173—86	≤0.3	≤0.25	≤0.1	

能融信息网
www.BAPIAFB.COM

从表1可知，断裂叶片合金元素Zn的质量分数超过了国标规定的技术条件上限的2.03%。铸铝合金ZL402的主要特点有自硬倾向，这种特性可避免工件因淬火产生较大内应力而引起开裂和变形问题，叶片在自然状态使用，可保证尺寸稳定，但是，随着锌质量分数的增加，合金的百分比上升，铸造性能下降，从而造成热裂、针孔和疏松的倾向增大，导致合金的塑性急剧下降，这是引风机叶片极易断裂的原因之一。

3.1.2 叶片机械性能分析

从叶片的拉伸、冲击和硬度试验结果看，断裂叶片材料的延伸率 δ_5 仅为1.5%~2.0%，比国标GB1173—86规定的 $\delta_5 \geq 4\%$ 小了1/2以上，其冲击能和冲击韧性低，均为沿晶脆性断口，叶盘、叶型底部、叶型顶部的硬度（平均）分别为HB110，HB108，HB106，符合国标规定硬度不小于HB65的要求，但

叶型的硬度比叶盘的硬度低，这与该类型铸件的壁厚越薄则硬度越高的规律相反。因此，叶片延伸率低于技术条件要求也是叶片断裂的原因之一。

3. 1. 3 叶片金相检验分析

叶片金相检验确认，在未侵蚀状态下，检查金相抛光面的枝晶间疏松程度，叶型顶部最轻、叶型底部次之，叶盘最严重，当枝晶间的疏松连贯一起就成为细裂缝。叶型顶部、叶型底部和叶盘处的金相组织均为 α 基本相 + Zn 粒子 + 晶界析出物，其枝晶间组织存在严重疏松，从 X 射线能谱的试验结果可知，杂质元素铁和硅富集晶界，它使叶片在运行中处于脆性状态而极易断裂。

3. 1. 4 叶片断裂性质分析

用 OPTON 高分辨立体显微镜和 JSM-840 扫描电子显微镜进行断口的微特征分析，确认叶片属于沿晶脆性断裂，裂纹扩展路程不是沿最小截面而是沿垂直于主应力的方向。在运行中叶片承受的作用力由离心力引起的拉应力、弯曲应力、烟气弯曲应力和振动应力组成。工作面侧叶盘螺丝孔外表面的综合应力较大，由于该处应力集中的存在，在表面缺陷处，存在疏松和微裂纹晶界脆性相开裂，因材料的塑性变形能力差，裂纹尖端的应力集中不能通过塑性变形而松弛，应力达到名义应力的 3 倍，而且叶片材料的屈强比高达 96.5%~98.2%，裂纹尖端的材料达到屈服应力后即会开裂。

从叶片材料的分析可知，叶片制造存在严重的质量问题。正是由于叶片锌的质量分数和延伸率均达不到国标规定的技术要求，导致叶片沿晶脆性扩展裂纹，塑性急剧下降，叶盘处枝晶间疏松，杂质元素铁和硅富集晶界，使叶片在运行中处于脆性状态，烟温过高时，叶片的工作温度可能超过材料的极限温度而发生时效，使叶片性能进一步恶化，这也说明了为什么叶片在运行中会多次出现裂纹，甚至全部断裂的恶性事故。

3. 2 风机长期处于失速边缘和在失速区运行

风机长期处于失速边缘和在失速区运行是叶片断裂的重要原因。鉴于 1 号炉 B 引风机一直能保持正常运行，因此，我们对 A 引风机的特性和实际运行工况进行了试验和分析。

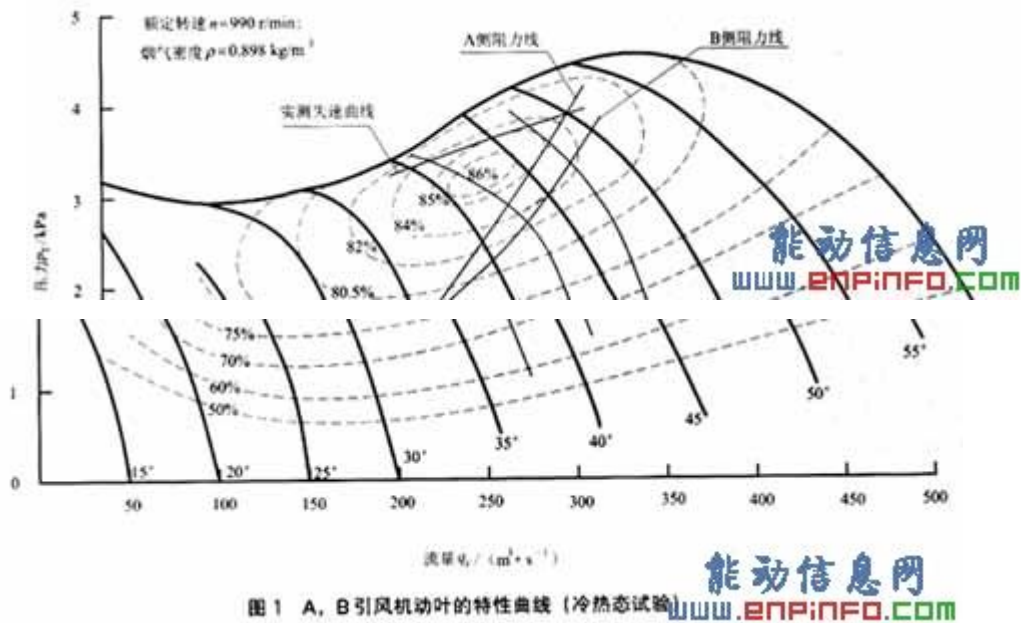


图 1 A, B 引风机动叶的特性曲线 (冷热态试验)

3. 2. 1 试验结果及其分析

对 A, B 引风机动叶就地 30° 和 35° 角的性能进行了冷热态试验, 试验结果见图 1。

从图 1 可知:

a) A 引风机试验的性能曲线与厂家提供的不符, 动叶 30° 和 35° 角时的性能曲线分别与厂家提供的 37° 和 42° 性能相当, 动叶的实际角度比控制室的指示值约大 7° 。

b) A 引风机失速区域比制造厂家提供的大, 实测的风机失速界限线位于厂家提供的风机性能曲线失速界限线的右下方, 当风机流量为 $250\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 其不失速的最高全压为 4.4 kPa 降至 3.85 kPa , 降低了 550 Pa ; 当风机全压为 3.6 kPa 时, 其不失速的最小风量由 $173\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $206.7\text{ m}^3/\text{s}$ 。

c) 当 1 号炉两台引风机在机组负荷 290 MW 以下运行时, 处于该型风机的稳定运行区域, 而实际上 A 引风机的运行已非常接近失速区。

3. 3 1 号炉引风机的运行特殊性

从 1 号炉引风机实际运行工况的试验可知, 当引风机在靠近失速区域运行时, 气流压力脉动幅值明显增加且频率减小, 当动叶角度为 30° , 脉动频率为 139 Hz 时, 其幅值达 1.6 kPa , 这不仅使叶片的作用力增加了 1 倍, 重要的是 139 Hz 的频率恰好为叶片固有频率的 2 倍, 它可以使叶片共振而损坏叶片, 当风机失速时, 气流压力脉动幅值达 2 kPa 以上, 叶片的动力值明显增加, 局部

应力集中，最终导致叶片薄弱处（如根部）疲劳折断或叶片固定螺钉松动，在叶片力作用下螺钉本身疲劳而被扭、剪断，导致叶片损坏。因此，轴流风机在这样的状况下运行势必会导致叶片的断裂。通过对 1 号炉 A、B 引风机的运行数据分析，由于 A 引风机流量比 B 引风机小，A 侧烟气系统阻力又高于 B 侧达 300 Pa 以上，其本身实际失速区域又大于设计值，使 A 引风机更接近失速区运行，形成了 A 引风机运行的特殊性。

4 防止引风机叶片断裂的对策

从分析叶片断裂的原因可知，要防止叶片断裂，首先要解决叶片的材料问题，其次是防止引风机长期在失速区运行。

4.1 对叶片进行改造改造叶片，以提高风机整体抗振能力。改造的新叶片需满足以下两点要求：

- a) 必须满足原设计和实际运行工况要求；
- b) 在 150~170° C 温度下长期运行，叶片组织性能稳定。

根据这两点，通过对国内同类引风机叶片的调研后，采取了双管齐下的攻关战略，既选用锻铝叶片，又选用优质铝—铜系铸铝叶片。新叶片与原设计的 ZL402 叶片的主要性能对比见表 2。从 1998 年 10 月开始，使用新型叶片后，出现过 ZL201 A 叶片防磨层脱落情况，但没发生叶片断裂事故。从使用效果看，锻铝叶片无论在外观、制造工艺、表面线型、平衡性和耐磨性等综合性能均优于铸铝合金叶片。

现从它们的主要特征和使用效果来分析：

a) 锻铝合金

热态下塑性较高，易锻造、冲压，叶片的外观、表面线型最好。延伸率和冲击韧性高，针孔和疏松可消除，强度较高，但有晶间腐蚀倾向。抗拉、抗振、耐磨，外观、表面线性好，安装后丹麦进口叶片不用做动平衡，风机运行中稳定性好，未发生叶片断裂。

b) 铸铝—铜合金

耐热性好，塑性和韧性好，焊接、加工性能好，但铸造和耐蚀性差，疏松倾向性大，叶片的外观、表面线型较差。抗振性好，使用 2 年后防磨鼻有磨穿，

防磨层有脱落，抗磨性不强。安装后需做动平衡调试，风机运行中振动易漂移，未发生叶片断裂。

c) 铸铝-锌合金

铸造性能好，耐蚀性良好，但具“自硬”倾向，随着锌的质量分数的增加，铸造性能下降时形成热裂，针孔和疏松倾向增大。抗振性差，抗磨性一般，根部容易产生裂纹，运行中多次出现叶片断裂。

4. 2 防止风机失速喘振的技术措施

4. 2. 1 降低烟气系统阻力

对 1 号炉尾部烟道进行模拟试验后，采取以下的技术措施：

a) 将电除尘器出口由 2 个并行烟道经 90° 转弯水平汇合改为 30° 水平汇合的三通部件。

b) 将两处 90° 弯头和收缩段的截面改变，并加分隔板，将直角弯头外角由锐角改为圆角。

c) 在三处弯头烟道内重新设计布置导向板。

烟道改进后经验证，尾部烟道阻力共降低 340 Pa，引风机电流降低 4 A 以上，降阻后引风机运行点距离失速线远了。

表 2 新叶片与原设计的 ZL402 铸铝合金
叶片主要性能对比

叶片材料	材料代号	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ_5 /%	硬度
锻铝 合金	A0111 (丹麦), 305-2H (沈阳)	≥ 167	> 2 (叶片根部)	$> HB65$
铸铝-铜 合金	ZL201A	≥ 382	8	$< HB100$
铸铝-锌 合金	ZL402	≥ 222		

能动信息网
www.ENTINFO.COM

4. 2. 2 减少空预器积灰和漏风

运行中控制空气预热器阻力在 -1. 0 ~ -1. 2kPa 之间（其设计值为 -0. 92 kPa），加强空预器的阻力监视，做好空预器的吹灰工作，只要阻力大于

—1.2 kPa, 即进行吹灰, 平时坚持定期吹灰。在每次机组大小修时, 清洗空预器受热面, 主要措施是用 TJ-4 和 RJ-5 型空预器清洗剂, 采用润渗—乳化—松散—退静电—防锈蚀—预膜—整套空预器受热元件不拆卸的化学清洗新工艺, 同时, 对空气预热器密封进行改造, 将冷端径向密封由 24 片改为 48 片, 另外将冷端静态密封及热端中心筒密封进行改造, 将原来空预器入口烟道伸缩节由二波伸缩节改为三波伸缩节, 材料由 CORTEN 钢改为 SUS304 钢。经过密封改造后, 空预器漏风率控制在 12% 以下, 将系统效应损失降到尽可能低的程度。

4.2.3 加装风机失速报警装置

针对 1 号炉 A 引风机的特殊情况, 在风机就地装差压表, 进行跟踪巡视校验, 发现不正常情况及时分析和调整, 使差压值不大于 137.3 kPa。

4.2.4 金属探伤处理

对购进的叶片螺钉备件进行 100% 的金属探伤处理, 同时在停炉期间对叶片及其螺钉进行着色检查, 并建立检查档案, 每次检修后都对风机进行动平衡试验, 将风机振动值控制在最小范围。

4.2.5 改变锅炉引风机振动报警值

根据风机的支撑特性, 风机扩散器刚度不够, 完全靠自重设置在滑轨上, 因此其水平方向的振动值最大, 将风机轴振测点全部统一布置, 以水平方向的轴振值作为运行监视控制值。同时, 鉴于新叶片抗振能力有了较大的提高, 根据国标 JB / TP334—87 引风机振动值不大于 6.3 mm / s 以及制造厂推荐的报警值为 4 mm / s 的规定 (相当于振幅 109 μ m), 结合珠江电厂的实际情况, 将锅炉引风机振动报警值由 50 μ m 改为 80 μ m, 跳机保护值由 125 μ m 改为 150 μ m。

5 结束语引风机叶片经过选型改造并采取减少风机失速机结构布置及其系统运行特性原因, 个别引风机在运行中还会出现振动漂移现象, 为此, 在日常工作中, 应做好风机的治理工作, 确保引风机长期安全经济运行。

参考文献

[1] 刘家钰, 陈健英. 锅炉引风机多次断叶片事故分析 [J]. 中国电力, 1997, 30 (7) : 10—15.

[2] 国家电力热工院. 广州珠江电厂 4 号炉引风机支叶片材质检查和断裂原因分析 [R]. 西安: 国家电力热工院, 1998.

本文引用地址: <http://www.fanxp.com/Article/Tech/TDoc/200707/378.html>