

GUZHANGANLIFENXI

石油化工企业生产装置 设备动力事故及故障案例分析

SHIYOU HUAGONG QIYE SHENGCHAN ZHUANGZHI
SHEBEI DONGLISHIGU JI GUZHANG ANLI FENXI

DONGLISHIGU

项汉银 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油化工企业生产装置 设备动力事故及故障案例分析

项汉银 主编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

石油化工企业生产装置设备动力事故及故障案例分析 /
项汉银主编. —北京: 中国石化出版社, 2012. 7
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1622 - 3

I. ①石… II. ①项… III. ①石油化工设备 - 动力装置 -
事故分析 - 文集 IV. ①TE687 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 120093 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式
或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 28.25 印张 715 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定价: 98.00 元

前 言

设备是进行生产的物质技术基础。石油化工生产具有高温、高压、易燃、易爆、易腐蚀、易中毒的特点，其设备多系大型精密，结构复杂，类型繁多，且生产连续性强，自动化水平高，往往一台设备发生故障或事故，就会造成一条生产线、一套生产装置，乃至全厂停工，甚至还会导致火灾、爆炸、人身伤亡等重大事故的发生。因而，加强石油化工生产装置设备的管理，从发生过的事件或故障中吸取教训，举一反三，防止类似问题的重复发生，是搞好石油化工生产的重要基础。

中国石油化工股份有限公司化工事业部为了更好地为企业做好服务，督促企业进一步加强设备管理，不断提高设备的可靠度，确保装置的“安、稳、长、满、优”生产，组织企业总结分析以往发生过的事故或故障，汇集编成这本《石油化工企业生产装置设备动力事故及故障案例分析》，以使读者便于从中得到经验。本书的出版，希望能为石化企业进一步加强设备管理，及时消除设备故障或事故隐患，不断提高设备可靠度，确保设备长周期安全运行，起到积极的作用。

本书在汇编过程中得到了各分(子)公司的大力支持和协助，在此表示衷心地感谢。

对于本书编制不足之处，敬请读者给予指正。

2012 年 7 月

目 录

动 设 备

尿素装置粉尘洗涤塔引风机振动高故障判断及处理对策	华迪冠(3)
50MW 汽轮机组叶片断裂分析及改造	张 弼(7)
DCP 装置 SGZ - 1250 离心机产生异常振动故障分析和解决方法	陆万新(14)
聚丙烯造粒模板故障分析	王建斌(19)
聚酯装置终聚釜减速机故障分析及处理	张文全(23)
聚酯装置终聚釜轴封泄漏分析与处理	江广军(27)
循环气压缩机(K1301) 存在的问题及改进措施	王金贵, 付宏图(32)
PTA 二装置空压机组叶片断裂故障分析及处理	李 华, 杨福雅(36)
QF - 125 - 2 汽轮发电机事故原因分析及建议	景永伟(41)
丁二烯螺杆压缩机泄漏分析与改造	刘铁汉, 蒋利军, 游 艺(48)
芳烃苯塔回流泵的故障分析	方 成(53)
腈纶真空转鼓过滤机轴颈磨损原因分析与修复	汪艳阳, 申孝羽(57)
漂粉精卧式螺旋卸料沉降离心机故障分析与处理	李 斌, 刘 慧(63)
高压装置一次压缩机气缸裂纹原因分析	黎景宏(67)
汽轮机发电机组振动分析与处理	任雄雄(71)
水下切粒机切刀磨损的原因分析	曹万军(75)
关于提高合成气压缩机 103J 供油系统稳定性的探讨	丁 凡, 汪 斌(79)
尾气回收压缩机润滑油黏度下降原因分析	王玉红(83)
应用状态监测技术, 分析烟机故障, 避免重大事故	陈建荣(88)
P303 转子主轴断裂的修复和改进	陈法祥(92)
PTA 精制干燥机滚圈表面损坏原因分析及对策	刘 洁(98)
PTA 装置第一结晶器搅拌器故障现象及分析处理	杨 超(106)
PTA 装置压力离心机机械密封改造	蒋维宏(112)
空压机组尾气透平入口过滤器故障分析	欧阳联炜(120)
减压塔底泵失效原因分析及对策	常 青(127)
空分空压机组增压机第五级转子轴振动波动故障	何伟纪(135)
空气压缩机叶片断裂失效分析与措施	常 青(138)
4112 - P3 激冷水泵机械密封失效原因分析及对策	顾中华(144)
气液分离器故障原因分析与处理	赵志强(150)
透平膨胀机轴瓦烧损事故分析及处理	张 森, 尹光耀(156)
聚丙烯装置活塞式压缩机振动故障诊断与处理	黄勇辉(161)

应用激光熔覆技术修复裂解气压缩机转子	游 艺(165)
重力式给煤机故障原因分析与处理方法	张根生(168)
聚合釜搅拌器齿轮箱故障原因与整改措施	朱贤文(172)

静 设 备

CFB 锅炉膨胀节变形故障的原因分析及处理	毛洪涛(179)
CFB 锅炉水冷壁管泄漏原因分析	朱 强, 潘小明(185)
加氢裂化反应器出口管线法兰外侧焊缝裂纹泄漏原因分析	黄卫民, 王道祥(190)
苯乙烯装置乙苯脱氢反应器失效分析及对策	蒋利军, 马小明, 徐 钢(197)
德士古烧嘴烧损原因分析与对策	顾中华(207)
钢制储油罐底板腐蚀分析及修复	张 虎(213)
加氢高压空冷器的腐蚀失效分析	谭金龙(221)
乙烯装置辐射段炉管开裂原因分析及预防	唐 华(229)
T403 脱水塔接管腐蚀原因分析及处理建议	龚天寿(237)
氨合成回路低压废热锅炉裂纹原因分析及处理措施	王雪峰, 胡 彬, 李海根(243)
苯乙烯反应器进料再热器裂纹失效分析及对策	黄向阳(247)
合成氨装置变换单元减温器开裂失效分析	周群群(256)
环氧乙烷反应器泄漏故障分析与处理	邹立群, 王建英(262)
循环流化床锅炉水冷壁管磨损失效原因分析及对策	朱 强(272)
烷烃酸水分离器(V505)腐蚀机理分析与对策	邹 强(277)
气化炉工艺气管线爆裂原因分析	李海英, 王路军, 王 新, 雷英明, 任广义(283)
硝酸重沸器的腐蚀失效分析和防护对策	王 博(289)
尾气洗涤塔的腐蚀与防护	叶中华(295)
氧化反应空气管线爆管原因分析及防范措施	张晓辉, 徐建明, 周袁煜, 陈长庚(300)

电 气 设 备

自耦变压器降压起动常见故障的分析与处理	张玉冰, 崔 成(309)
一起 380V 系统谐振过电压事故分析	唐震艳, 朱林松, 吴敏青(313)
2 号给水泵 6kV 开关误动故障分析	林孝东, 许瑜才(318)
镇海炼化“11·24”大面积停电事故分析	贺建平(322)
35kV 系统异地相间接地短路故障分析	虞友林(326)
低压抽屉柜插件故障的原因分析及改进措施	和晓婷, 陈 玲, 刘建波(330)
电动机不常见故障的诊断及处理方法	高广盛(334)
发电机励磁变压器故障分析	蒋国祥, 凌培清(338)
风机电缆故障越级跳闸事故分析与处理	王 震(343)
化肥气化 K1301 中压变频器故障分析与处理	王鸿章(346)
纺丝机计量泵变频器接地故障分析与处理	何宏, 赵廷东(350)
236B1 鼓风机电机接地故障诊断分析与处理	于丽娟(354)

聚合釜搅拌电动机与油泵电机联锁改造	朱贤文(358)
1#高压 L-4203 热熔挤压机变频器故障诊断及处理	陈福荣(362)
35kV 电缆终端击穿事故分析与处理	张维民(369)

仪 表

合成压缩机组状态监测系统设备干扰故障排除	张万平(375)
压缩机吸入罐液位控制波动事故分析与处理	李桂芝(378)
15PDT0002 差压表故障原因分析及处理	胡圩富(380)
MODICON 984PLC I/O 通讯网络噪音大的原因分析	张 哲(385)
冰机 C-911 负载调节机构故障分析	肖向东(390)
国产大空压机组透平调速故障诊断分析与处理	娄贞锋(393)
介质密度变化造成仪表指示异常的分析与处理	焦守平(400)
氯气透平压缩机停车联锁故障分析与处理	李建新(402)
上海石化联锁控制系统典型故障案例分析	于世恒, 秦仲雄(405)
塑料厂 1PP 装置 DCS HPM 电源模块故障原因分析与处理	余文荣(411)
压缩机联锁仪表故障分析及改造	王继蓬(415)

公用工程

低磷配方在 PTA 装置循环水系统的应用	孙稳山, 张 维(419)
化工物料泄漏循环水系统水质变化与处理	许子瑜(424)
供水管网腐蚀泄漏故障诊断分析与处理	付秀峰, 严治祥, 王晶晶, 张 昕(431)
中水回用循环水系统水质波动分析与处理	唐安中, 雷云光(438)

动 设 备

尿素装置粉尘洗涤塔引风机 振动高故障判断及处理对策

华迪冠

(镇海炼化分公司化工部, 浙江宁波, 315207)

摘 要 简要介绍了应用频谱分析确定镇海炼化化工部尿素装置造粒塔粉尘洗涤塔引风机振动大的原因, 并针对该引风机振动高的运行状态提出整改措施。

关键词 频谱; 分析; 故障; 振动; 防粘接; 冲洗

镇海炼化化工部尿素装置造粒塔粉尘洗涤塔引风机是尿素粉尘治理项目的设备之一, 其作用是把尿素造粒塔顶部尾气(含氨及尿素粉尘)收集加压送至洗涤塔进行洗涤后排放, 由于现场安装条件所限, 该风机安装于 14m 高的平台上, 为防止风机振动, 初步设计时采用共用底座加隔振垫的措施来保证风机的平稳运行, 同时对风机前后轴承座加装六个加速度探头(前轴承座水平、垂直、轴向各一只, 后轴承座水平、垂直、轴向各一只), 可对风机的实际运行有一个实时监控, 根据制造厂出厂要求, 风机实际运行中各点振动均应小于 7mm/s, 在整体设计中考虑风量及投资成本在工艺上采用两台风机并联运行的方式, 现场两台风机呈左右对称布置(除转向刚好相反外其余性能均一致, 风机由沈阳鼓风机厂生产, 主要参数见表 1)。

表 1 风机主要参数

风机型号	进口流量	叶轮直径	介质
SFY26F - C4A	120m ³ /s	2600mm	空气/尿素粉尘
风机型式	入口温度	风机转速	全压
单吸离心式双支撑	90℃	740r/min	3.5kPa

1 存在问题

该风机安装后试运行(试运行采用空气), 前后轴承座六个点的振动值及底座各点振动在 2mm/s 左右均符合设计要求, 刚投入生产运行时前后轴承座各点的振动也在 2mm/s 左右, 但运行 1 天后发现风机振动呈快速上升趋势, 具体如图 1 所示, 投入运行 2 天后发现风机前后轴承座个别点振动值在 5mm/s 左右, 为确保风机的安全运行, 同时利用 CSI - 2130 专家诊断系统对该引风机两端轴承座及风机底座进行振动测试, 从测试结果来看, 各点的振动值均与前后轴承座上的加速度计测得的数据相吻合, 进一步对振动频谱数据进行分析, 确认各方向振动基本上以工频成分为主, 根据频谱中的主导频率成分和各向振动值大小对比, 以及风机振动由开机初期的较小值快速增长现象, 可以判断风机转子的动平衡遭到了破坏, 而风机转子动平衡遭到破坏的原因可能有: ①由于入口尾气(含氨及尿素粉尘)温度较高造成转子部件受热不均产生变形, 导致风机转子动平衡遭到变化; ②风机转子在运行中叶片与轮毂间的联接出现松动, 或者轮毂在铸造时产生疏松; ③风机转

子在运转过程中自身产生的偏心, 应力释放、零件与轴的配合过松高速运转使转子内孔扩大造成的偏心导致转子动平衡破坏; ④同时在介质为尿素粉尘的情况, 很大可能是尿素粉尘在风机叶轮上结存不均匀, 导致风机转子动平衡遭到破坏; ⑤转子在运转时叶片突然破裂或叶片某一部位产生裂纹等; ⑥尿素粉尘介质对叶轮产生腐蚀脱落等因素使转子的动平衡遭到破坏。

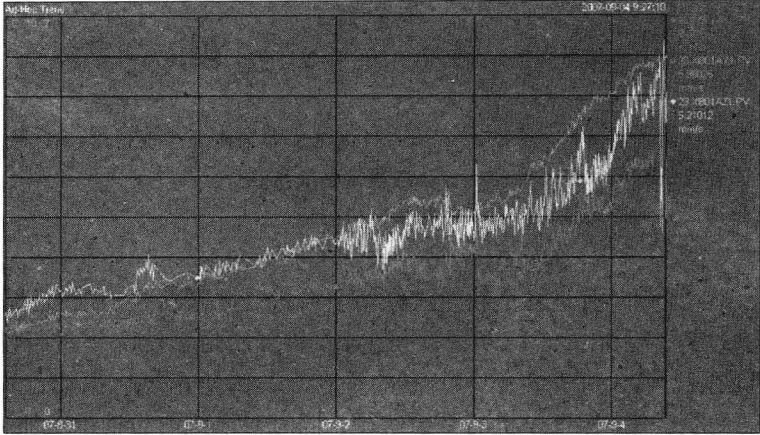


图1 振动趋势图

对以上几种情况进行分析: ①风机入口尾气(含氨及尿素粉尘)温度也就在 90℃ 左右, 温度不是很高, 应不致于产生大的变形; ②因该风机转子为组合件, 叶轮与轮毂间采用螺栓联接, 风机运转后联接螺栓有可能出现松动, 但安装时加了防松措施, 再说运行 2 天左右产生松动的可能性不大; ③同时叶片损坏及腐蚀情况也不会发生(风机在设计时已考虑到腐蚀问题: 叶片及轮毂采用 0Cr18Ni9 不锈钢, 主轴由于强度问题采用 45# 钢但在轴表面喷涂镍 60AA 防腐材料); ④因此引风机振动上升的最大原因可能为: 风机叶片尿素粉尘不均匀结存, 导致风机叶轮的动平衡遭到严重破坏。

2 对策和措施

风机第一次运行不到 4 天, 前后轴承座及底板上的振动值最大已超过 8mm/s(风机所能承受的最大振动值), 风机被迫停运, 拆开风机人孔发现, 叶轮上已结满厚薄不均的尿素粉尘(图 2), 最厚处高达 50mm, 严重破坏了转子的动平衡, 导致振动上升, 正好验证了上述分析, 用冷凝液对转子上堆积的尿素粉尘进行冲洗后, 重新试运行风机, 振动及各项参数又回复到初次开车状态。

对此, 我们首先考虑在风机叶片上涂防粘接涂料, 先后试用了两家科研所的涂料, 均无明显效果, 同时发现随着季节改变(主要是空气湿度改变), 风机运行时间相对有所变化, 在同样的工艺条件下, 气候干燥相比雨天风机振动速度上升要缓慢, 但也不会超过半个月, 需停运风机拆除人孔门对风机叶片进行冲洗(有时由于风机出口蝶阀因尿素粉尘结晶, 关得不是很严的情况下风机叶片清洗难度较大), 费时费力影响装置稳定运行; 在风机转子上喷涂防粘接涂料无效的情况下, 为确保风机叶片顺利冲洗, 决定在风机内部安装自冲洗装置, 初步决定采用以下两个措施:

第一种: 从风机转子内部加一根冲洗管, 如图 3 所示。

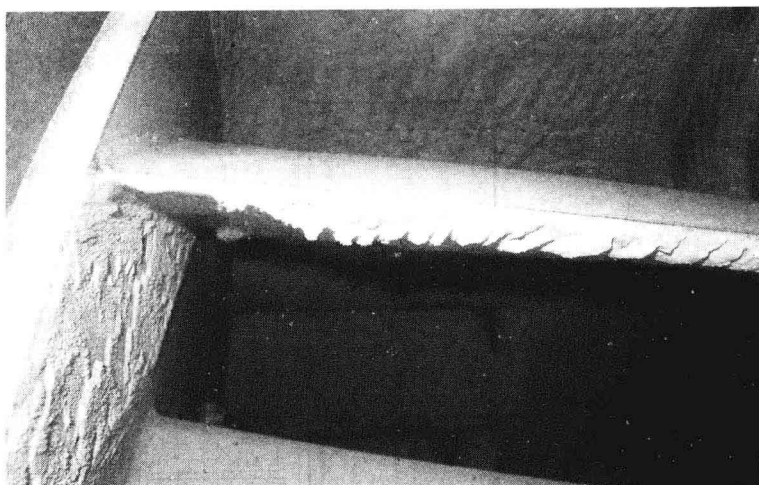


图2 叶轮结垢照片

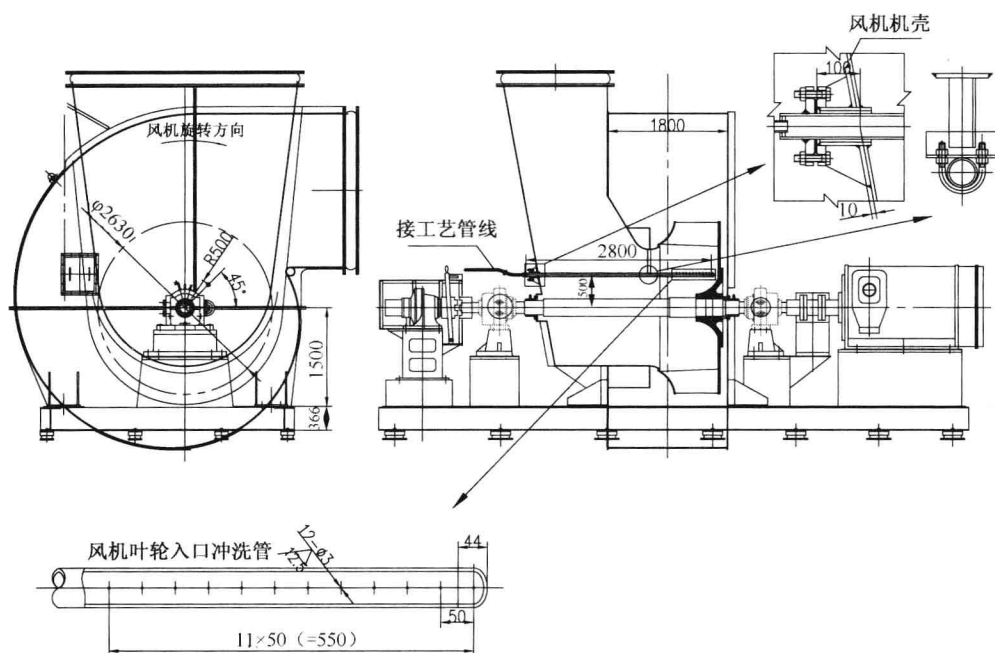


图3 引风机叶轮入口加冲洗水管线示意图

第二种：从风机出口加一根冲洗管，如图4所示。

对以上两种方案进行比较：第一种方案对风机叶片内部结存尿素的冲洗比较有效，且有可能实现在线冲洗（只要控制冲洗量，在保证风机电流不超的情况下在风机正常运行时加冷凝液冲洗），但考虑到冲洗不均匀反而会加速破坏转子的动平衡，且对风机外侧的结存尿素无法清洗也会导致风机转子的动平衡遭到破坏从而导致风机振动急剧上升；而第二种方案是从风机叶片外部加冲洗管，从五个方向（风机叶片盖板内外侧、风机叶片及风机轮盘内外侧）对风机转子进行冲洗，冲洗水量较大，如果在风机运行中冲洗，有可能出现风机出口气流阻止冷凝液的均匀冲洗，风机电机也有可能过载，但可利用风机一停运在惰走期间进行冲洗，同时出口蝶阀关不严也不会导致冲洗不均匀，故决定采用第二种冲洗方案。

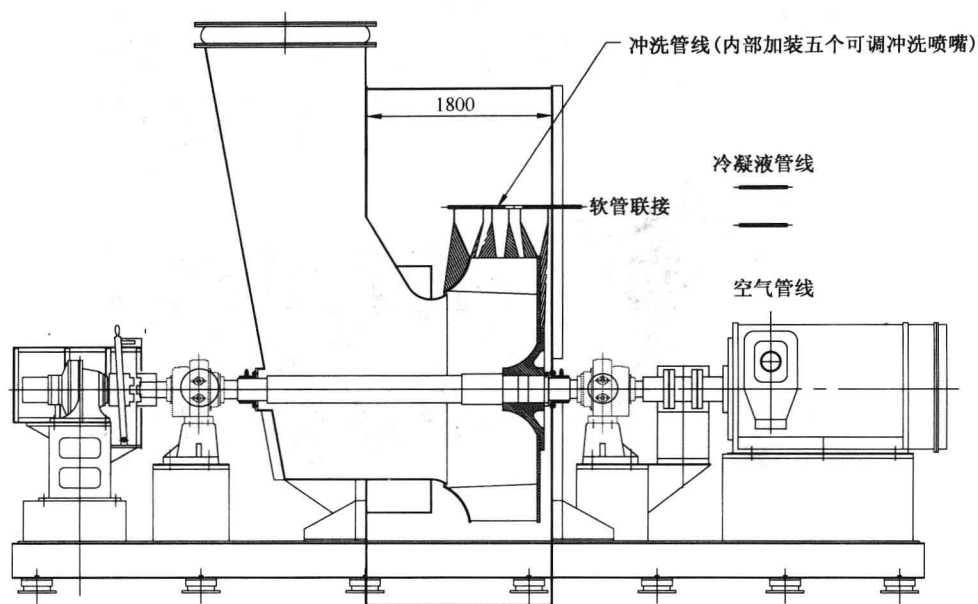


图4 引风机叶片出口加冲洗水管线示意图

在风机出口壳体内安装冲洗管线且根据冲洗角度及冲洗量调整冲洗管方向及出水量，第一次冲洗时打开人孔计时并检查冲洗效果作为以后每次冲洗的依据（根据多次冲洗情况基本上冲洗十五分钟左右），且每次在用冷凝液冲洗后马上改用空气管线对叶片进行吹干处理，确保风机叶片表面干燥防止粉尘快速粘接。

3 结束语

通过对尿素粉尘洗涤装置引风机振动高的原因分析，确定是风机转子上粘有不均匀尿素粉尘面使风机转子的同平衡遭到破坏，继而提出改进措施，在目前状况下只能采用间隙停运，加冷凝液冲洗的方法来确保风机的安稳运行，经过实际应用效果还是比较明显且能符合生产所需，但要想彻底解决风机的振动，应从降低风机入口中尿素粉尘含量，或改变工艺流程，把收集后尿素尾气先引进洗涤塔洗涤后再引出至风机入口，就可以消除尿素粉尘在引风机转子上的粘接，这样能彻底消除该引风机振动高的因素确保装置的安稳运行。通过对镇海炼化化工部尿素粉尘洗涤装置引风机振动高的原因分析及处理，可以给同类型的风机的设计、选型及工艺流程的配制有一定的启示作用。

50MW 汽轮机组叶片断裂分析及改造

张 弼

(镇海炼化分公司机动处, 浙江宁波, 315207)

摘 要 此文分析了 50MW 汽轮机频繁发生次末级自由叶片断裂事故的原因, 通过叶根改型、频率控制等方法对末两级叶片进行改造, 消除了原先存在的各种隐患, 保证了汽机的长周期运行。

关键词 叶片断裂; 共振; 改造; 机组效率

镇海炼化公司Ⅲ电站 2 台 50MW 汽轮机是 2002 年由上海汽轮机厂设计制造的 C50 - 10.4/4.41 型, 单缸、冲动, 具有一级调整抽汽的抽背机组。转子系采用铬钼钒珠光体钢整体锻造和套装叶轮组合式结构, 一共有 16 级叶片, 其中有 2 级为调节级。末三级叶片采用长扭自由叶片, 叶片材质为 2Cr12MoV。从 2008 年 12 月份开始, 到 2010 年 2 月份, 2 台汽机先后 4 次发生叶片断裂事故, 断口均在叶根过渡区圆角处。频繁的叶片断裂事故给装置和电网的正常运行带来了重大影响, 给公司造成了巨大的经济损失。经多次组织专家分析, 制定了安全性改造的方案, 并于 2010 年初实施了机组改造工作。

1 故障现象

2008 年 12 月 12 日, 1[#]汽机在稳定工况运行, 没有任何先兆的情况下, 汽轮机前、后轴瓦振动突然大幅上升, 30s 内从 60 μ m 升到 200 μ m 以上。前后径向轴瓦温度也略有上升。汽轮机后轴瓦瞬时振动值最高超过 300 μ m, 最终达到振动联锁跳机条件, 机组停机。

经监控系统频谱分析, 认为质量不平衡是振动突然升高的主要原因, 初步判断为叶片断裂。机组冷却揭缸后, 发现次末级(第 15 级, 共 16 级)有一叶片(编号: 44, 整级共 102 片)于叶根处断裂, 断裂面与叶轮轮槽基本齐平, 断口呈明显疲劳断裂特征。

同时断裂叶身在高速状态下对其他叶片及下隔板造成损伤。部分叶片叶顶处弯折严重, 部分叶片叶身处形成撞击缺口。下隔板遭撞击后形成两个较大的缺口, 其中一个缺口长度达 10cm。如图 1 所示。



图 1 叶根断裂及叶片损伤情况

作者简介: 张弼(1982—), 男, 汉族, 浙江舟山人, 2004 年毕业于浙江大学过程装备与控制过程专业, 现在中石化镇海炼化分公司机动处从事热工设备技术管理工作。

考虑到隔板受损后主要影响汽机抽力和热效率，而对缺口补焊后可能会导致隔板热变形，补焊金属脱落等问题，权衡利弊后只对隔板受损表面进行打磨消应力处理。

首次事故发生后采取了更换受损叶片的办法，并对其他叶片进行磁粉探伤、静频率测试以查看叶片质量，检查合格的继续回装使用。由于未从根本上解决问题，其后的一年间两台机组又连续发生了3次次末级叶片断裂的事故，断口位置、形貌基本与第一次相同。

2 叶片断裂原因分析

1#汽机发生叶片断裂后，经过对断裂叶片的材质分析，对次末级自由叶片建数学模型进行动、静强度验算，叶片动应力计算，同时横向了解国内同类型机组运行问题，并组织有关专家分析讨论断裂的原因后，得出如下结论：

(1) 对断裂叶片进行材质及金相分析，材料化学成分符合设计要求(见表1)。金相组织为回火索氏体，晶粒度正常，无夹杂物。该叶片材质良好。

表 1 断裂叶片的材质分析(2Cr12MoV) %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu
规定值	0.18~0.24	0.1~0.5	0.3~0.8	<0.03	<0.025	11.0~12.5	0.8~1.2	0.25~0.35	0.3~0.6	<0.3
实测值	0.21	0.28	0.48	0.029	0.009	11.98	0.94	0.3	0.37	0.13

(2) 断裂部位为叶根过渡区圆角处截面，断口呈现典型的疲劳断裂特征，疲劳裂纹源位于进汽边内弧侧的叶根过渡圆角区域，疲劳裂纹扩展区约占整个断面面积的75%，其余为快速撕裂区。如图2所示。

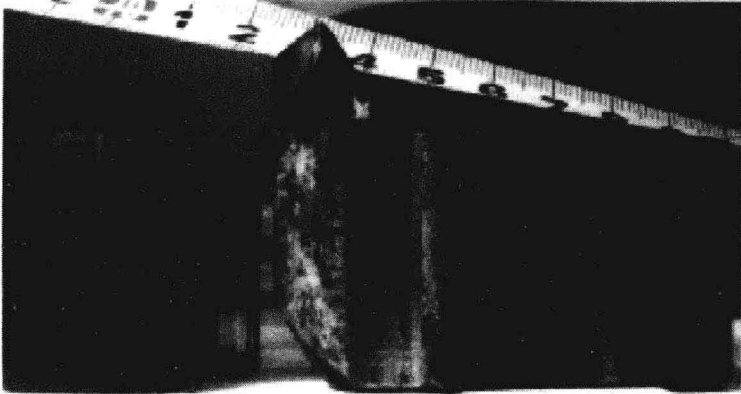


图 2 断裂叶片叶根过渡圆角处的断口形貌

(3) 通过对静强度及动强度的校核，发现静强度能够满足要求，但动强度存在局部不足；部分叶片叶根处圆角较小，造成了应力集中，动应力条件下承载能力较低。总的来讲，整体应力水平不高。

(4) 从叶根疲劳断面的情况看，疲劳源扩展的速度很慢，也说明了应力水平不高，且存在着长期振动。

(5) 断裂叶片的一阶阵型为切向 A0 型振动，是最危险的一种振动。而且由于采用周向埋入法安装叶片，需要极高的叶片加工精度才能达到相邻叶片叶根完全贴合的理想状态，否则容易造成高速运转时叶片颤振。安装在末叶片对称位置的叶片，这种状态显得尤为突出。而在4次次末级叶片断裂事故中，有3次断裂叶片位置在末叶片对称位置30°夹角区域内。

(6) 从计算得到的一阶振型的俯视图观察，如图 3 所示。
再从实物拍摄的叶片叶根断裂面观察，如图 4 所示。

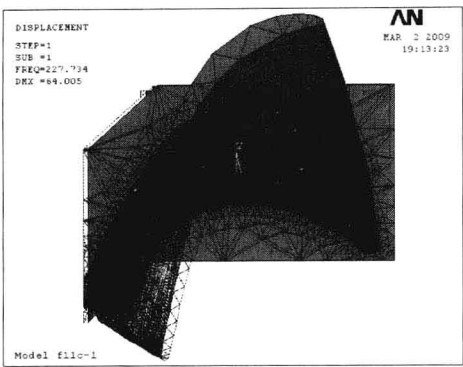


图 3 次末级叶片一阶振型俯视图

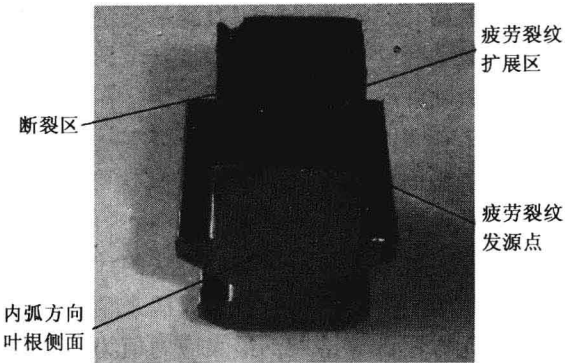


图 4 次末级叶片叶根断裂面

比较图 3 和图 4，可以发现叶片的叶根断裂面疲劳裂纹的扩展方向与计算得到的叶片一阶振型方向一致，疲劳裂纹源位于进汽边内弧侧的叶根过渡圆角处区域也与一阶振型方向相符。

(7) 叶根强度计算验证。次末级叶片是外包双倒 T 型叶根，静强度计算结果如图 5 和表 2 所示。

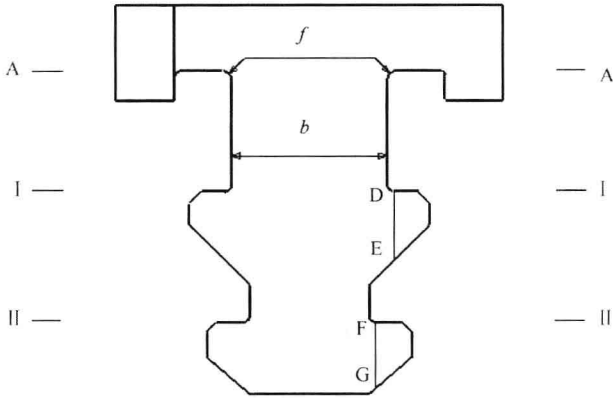


图 5 次末级叶根强度计算示意图

表 2 次末级叶片叶根静强度计算值

计算截面	计算项目 σ	计算应力/MPa	安全系数 K
		$n = 3000\text{r/min}$	$n = 3000\text{r/min}$
A - A 截面	拉应力	157.48	3.74
I - I 截面	拉应力	172.27	3.42
I - I 截面	挤压应力	237.81	2.48
D - E 截面	弯应力	136.95	4.30
D - E 截面	剪应力	104.95	5.63
II - II 截面	拉应力	119.98	4.91
II - II 截面	挤压应力	103.78	5.68
F - G 截面	弯应力	158.43	3.72
F - G 截面	剪应力	115.10	5.12

由表 2 数据知：

次末级动叶叶根的拉应力满足安全系数 $K \geq 2.5$

次末级动叶叶根的挤压应力满足安全系数 $K \geq 1.0$

次末级动叶叶根的剪应力满足安全系数 $K \geq 3.0$

次末级动叶叶根的应力水平较低，在转速 $n = 3000 \text{r/min}$ ，叶根断裂截面 A - A 截面的拉应力为 157.48MPa，这一数据与断口实际情况相符。由叶片材料分析报告知，疲劳裂纹扩展区约占整个断面面积的 75%，而快速撕裂区约占整个断面面积的 25%，也就是说，A - A 截面的面积有足够的承受能力承受因转速离心力产生的应力。

表 2 数据是按材料力学解析方法的计算结果，得到的是截面的平均应力，对于截面圆角处的应力集中，须要采用有限元方法来精确确定。

有限元方法计算结果，最大应力值为 459.72MPa。发生在有限元计算网格的第 15541 号节点，还有在第 15542 号节点的应力值为 434.99MPa。其余节点的应力值明显小于上述应力值，大部分节点的应力值远小于上述应力值。叶片计算材料按 2Cr12MoV，屈服极限为 590 ~ 735MPa。按第四强度理论，有限元方法计算时，叶根应力集中处的应力许用值，一般可取到屈服极限左右。因此，可以认为次末级叶片的静强度是安全的。

有限元方法计算得到的叶片的应力分布如图 6 所示。

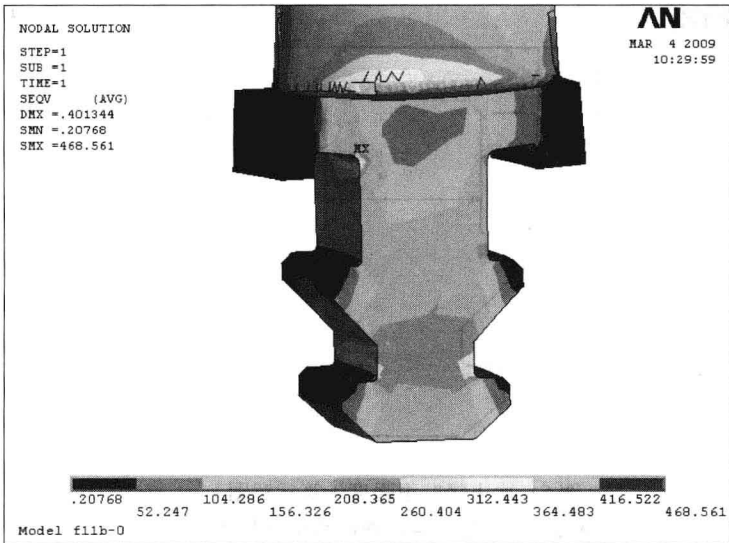


图 6 次末级叶片叶根应力图

根据有限元法计算的叶片静强度计算结果，可以得到应力集中系数用于叶片动强度计算，具体如下。

材料应力集中程度用应力集中系数表示。

$$\alpha = \sigma_{\max} / \sigma_H$$
$$\sigma_H = N / F_{\min}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——应力集中区的最大应力；

σ_H ——名义应力；

N ——截面削弱处的轴向力；

$F_{\min}$ ——截面削弱处的横截面积，称为净面积。