

Cause Analysis and Countermeasures of Steam Turbine Blade Dropping of 650MW Supercritical Unit 2

Chuantang Xu

China Resources Power (Changshu) Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215536, China

Abstract

This paper introduces the situation that the steam turbine blades of our 650MW supercritical unit 2 fall off during the operation process, analyzes the reasons for the blade falling off, and summarizes the methods of analyzing the problems and the ways to deal with the problems through the processing experience of our factory.

Keywords

turbine rotor; analysis of blade dropout; treatment countermeasures

650MW 超临界二号机组汽轮机叶片脱落的原因分析及对策

徐传堂

华润电力(常熟)有限公司, 中国·江苏·苏州 215536

摘要

本文介绍了我厂650MW超临界二号机组汽轮机叶片在运行过程中脱落的情况,分析了叶片脱落的原因,通过我厂的处理经验,总结了分析问题的方法与应对问题的途径。

关键词

汽轮机转子; 叶片脱落原因分析; 处理对策

1 引言

我厂汽轮机是最早引进的日立的冲动式超临界机组,温度参数是538℃,该机组于2005年6月投产运行,为提高机组的经济性,经调研后决定将主汽温度参数提高到566℃(压力参数保持不变),特对汽轮机内部进行全面改造,同时对直流锅炉的主蒸汽相关管道进行更换,结合中国机组汽轮机改造的相关经验,于2016年2月利用207A检修机会,对汽轮机高、中、低压缸内部(除相关外缸及轴承座外)进行改造,对主汽管道进行更换,电科院检测结果表明,改造后发电煤耗降低9g/kWh左右。2019年2月26日,在机组运行过程中突然发生机组1#、2#轴振的振动突增,突增后维持60um(此前振动约20um),第3段抽汽温度突增10℃情况,电厂于4月21日停机进行解体检查,5月9日开缸检查,发现中压第二级两只动叶片从叶根处断裂(如图1所示),断裂的叶片飞出对隔板和相邻的叶片造成了明显损伤。

2 汽轮机产地与型号

华润电力(常熟)有限公司汽轮机为东方汽轮机厂引进日立技术生产制造的超临界压力机组,型号为:CLN600-24.2/538/566,是典型的超临界、一次中间再热、单轴、三缸四排汽、双背压、纯凝汽式汽轮机。

3 汽轮机运行中出现异常的情况的描述

华润常熟2#机组机型为X600C-2T,是首台650MW通流改造的机型,参数由538℃提高到566℃。于2016.2月正式投运。2019年2月26日,发生机组1#、2#轴振振动突增,突增后维持60um(此前振动约20um),第3段抽汽温度突增10℃情况,针对此情况,分析判断认为可能是中压第1-3级动叶片存在断裂、飞脱的情况,为此我司现场技术人员建议电厂尽快对该机组进行解体检查,电厂于4月21日停机进行解体检查,5月9日开缸检查,发现中压第二级两只动叶片从叶根处断裂(如图1所示),断裂的叶片飞出对隔板和

相邻的叶片造成了明显损伤。5月14日~16日对剩余的中压2级动叶片进行喷砂清理后,还发现两只叶片在叶根位置开裂,裂纹位置和断裂叶片部位一致。图1中压转子和叶片断裂叶片材质为2Cr11Mo1VNbN,技术要求为DZ2.11.112。该级叶片一共有102片,从锁口叶片开始编号,顺时针排序(从机头侧看),断裂叶片分别是第27#和第86#号叶片,断裂叶片典型的断口形貌如图2所示。开裂叶片是第5#和第57#叶片,其中开裂的5#叶片的形貌如图3所示,可以看出叶片在叶根内弧侧第一齿的位置开裂,靠叶顶处的出汽边因与断裂飞出的叶片摩擦,产生了明显的塑性变形。断裂和开裂叶片在中压第二级的分布情况如图4所示。汽轮机厂家材料研究中心受电站服务事业部委托,对从电厂取回的5#开裂叶片进行了分析。



图1 中压转子和叶片



图2 27# 叶片断裂位置

86# 叶片断裂位置

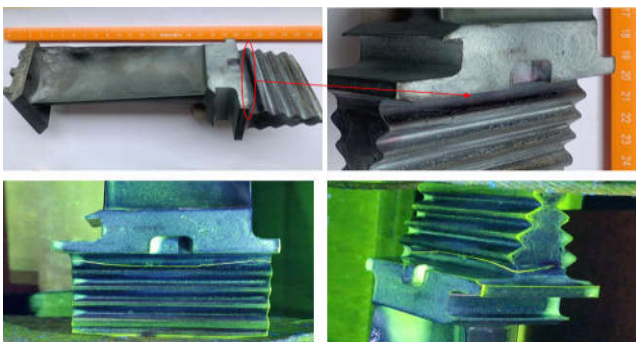


图3 开裂的5#叶片

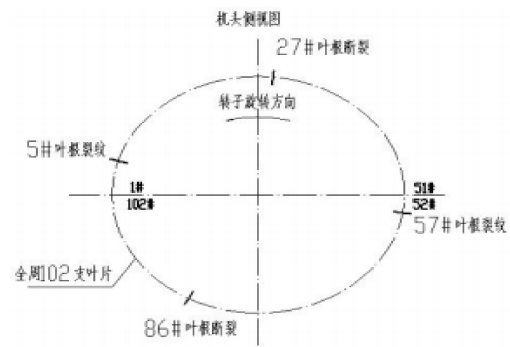


图4 断裂和开裂叶片在整圈在位置图

4 我公司叶片脱落的原因分析

4.1 对叶片常规强度校核

常熟2#机为X600C-2T,其中压第2级动叶片采用斜齿枞树型叶根,叶片结构形式为自带冠预扭成圈(图5)。下面分别从叶片常规强度校核、叶片振动特性分析、有限元强度、氧化皮影响、转子应力释放影响、机组深度调峰影响、转子材质的影响等几方面对该叶片进行复核分析。

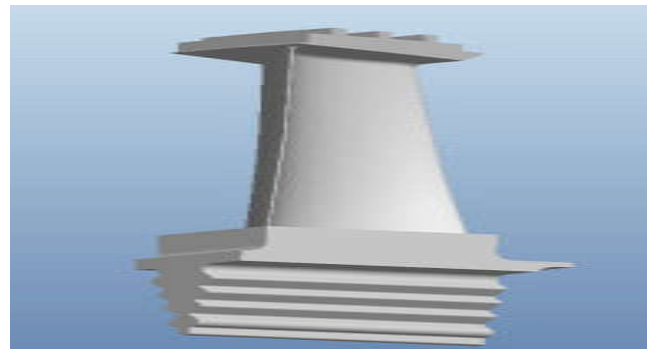


图5 叶片三维模型

4.1.1 设计参数

叶片结构形式为枞树型叶根,自带冠预扭成圈结构,该级次动叶具体设计方案见表1,工作转速为3000r/min。

表1 第2级动叶片设计方案

级次	IP2
根径 Dk	1360
叶高 Ld	132.5
叶片只数 Zd	102
叶根型式	斜直枞树型
材料	2Cr11Mo1VNbN
连结结构	自带冠预扭成圈
叶片离心力	$1.39 \times 105N$
该级静叶片只数	54
设计工作温度	505℃

经复查叶片加工图纸，叶片加工图纸相关尺寸与设计相符。

4.1.2 蒸汽弯应力计算

对强度工况下，叶型根部截面蒸汽弯应力进行了计算，见表2。

表2 叶型根截面蒸汽弯应力计算

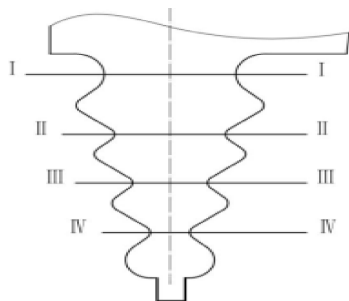
项目	单位	结果
蒸汽弯应力	MPa	36.2
许用值	MPa	53.7
安全判定	合格	

计算结果表明，叶片蒸汽弯应力满足设计要求，安全裕度大。

4.1.3 叶根常规强度校核

表3 叶根常规强度校核结果

级次	单位		
离心拉应力	I-I 截面应力	MPa	81.6
II-II 截面应力	MPa	77.2	
III-III 截面应力	MPa	74.4	
IV-IV 截面应力	MPa	77.0	
第一齿	剪切应力	MPa	33.7
挤压应力	MPa	104.7	
第二齿	剪切应力	MPa	35.1
挤压应力	MPa	119.7	
第三齿	剪切应力	MPa	35.1
挤压应力	MPa	119.7	
第四齿	剪切应力	MPa	29.7
挤压应力	MPa	109.1	
拉应力许用值	MPa	149	
剪切应力许用值	MPa	119.2	
挤压应力许用值	MPa	298	



叶根常规强度计算结果表明，叶根强度设计合格并有足够的强度安全裕度。

4.2 叶片振动特性分析

对该级叶片的成圈频率进行了计算分析，SAFE 图如图6所示：

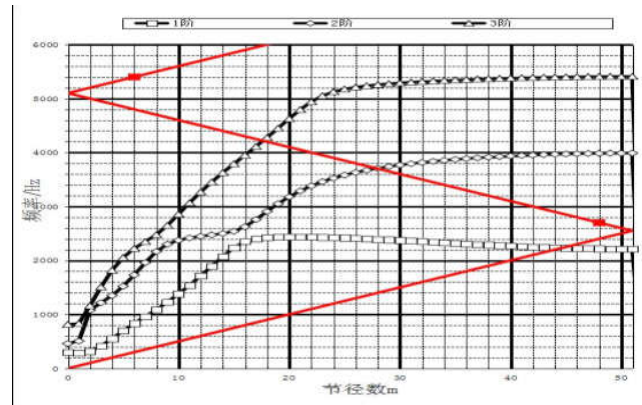


图6 振动 SAFE 图

从以上 SAFE 图分析结果可知：叶片振动特性满足设计规范的要求。

4.3 有限元强度计算

由于叶片断裂部位在叶根第一齿颈部，因此，对该级叶片进行了有限元应力计算分析。从应力云图可以看出，叶根内弧侧第一齿圆角部位的最大等效应力为 249MPa，见图7所示；叶根背弧侧第一齿圆角部位的最大等效应力为 165MPa，见图8所示，最大等效应力远低于叶片材料在工作温度下对应的屈服强度（605MPa）。

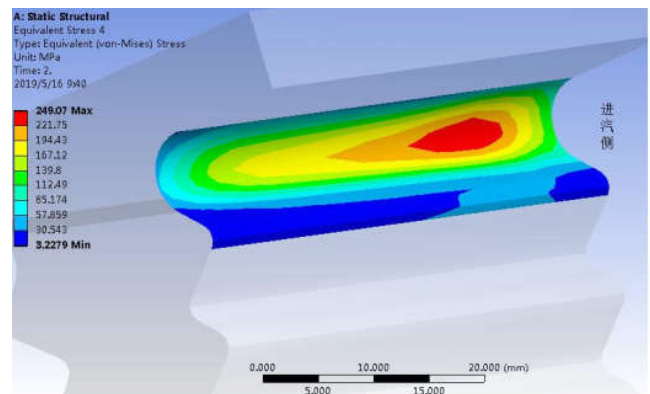


图7 叶根内弧第一齿应力分布

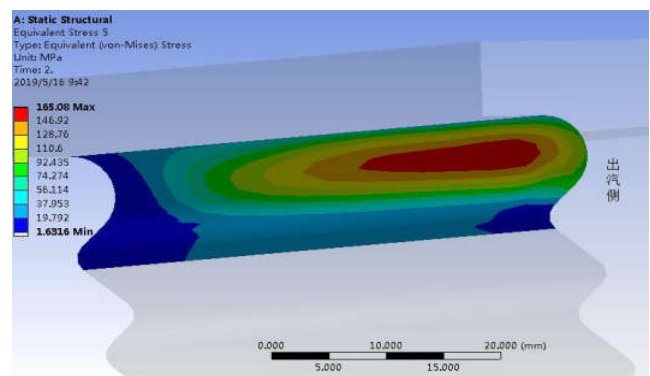


图8 叶根背弧第一齿应力分布

从该级叶片的叶根与轮槽接触有限元分析结果可以看出,在工作转速下该级叶片叶根与轮槽的间隙满足设计要求,见图9所示。

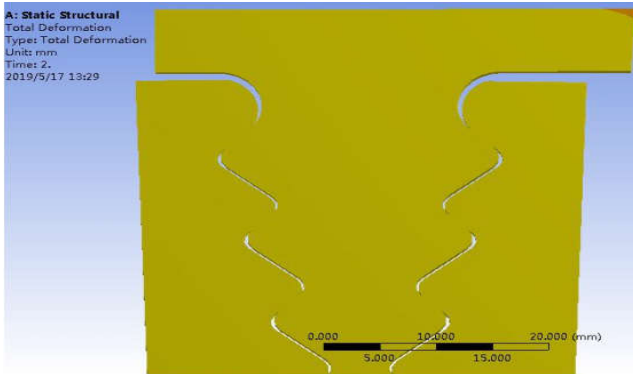


图9 叶根轮槽工作转速间隙情况

4.4 氧化皮影响

转子吊出,就位到转子临时支架上后,发现转子轮毂、叶片上附有很多氧化皮,厚度大于0.3mm(图10)。

为了检查叶片的完好程度,需对各级叶片进行逐一拆除,在拆除过程中,发现各级叶片很难拆除,在用刷子涂刷渗透力较强的煤油后,再配合拆叶片的专用工具,拆除叶片变得容易,说明氧化皮嵌入叶根内部,导致叶片无法正常拆除。



图10 斜齿枞树型叶根叶片结构形式及其氧化皮

4.5 转子应力释放影响

(1)转子制作完成后,若热处理工艺做的不科学、不到位,比如转子的热处理温度高低控制、转子的热处理时间控制等,都会对转子应力的消除形成一定的影响。在切削、加工转子时,伴随着局部高温、高压、高应变和高应变率,在切削区会产生严重的不均匀的热弹塑性变形。其产生的原因通常归于两个方面:一方面是机械应力引起的不均匀弹塑性变形;另一

方面是热应力引起的不均匀热弹塑性变形。实质上残余应力的产生是各种影响因素综合叠加的结果。

(2)通常消除残余应力采用两种方法,自然时效法和热时效法。自然时效法是将工件置于室外,经气候、气温的反复变化,在反复应力温度作用下,使得残余应力松弛、尺寸精度获得稳定,一般认为,经过一年的自然时效的工件,残余应力可下降2%~10%,使得工件松弛度得到较大的提高,因而工件的尺寸稳定性很好;热时效是传统的时效方法,利用热处理中的退火技术,将工件加热到一定温度(不同材质,控制温度不同),进行一定时间的保温后再缓慢冷却至室温。在热作用下通过原子扩散及塑性变形使内应力消除。采用热时效法只要退火温度和控制温度适宜,可以消除残余应力的70%~80%。如果有条件,将自然时效法和热时效法结合起来消除转子的残余应力,势必达到完美的效果,进而有效避免转子部件裂纹等相关缺陷的产生。

4.6 机组深度调峰影响

目前,按照电网的要求,600MW机组要具备深度调峰的能力,且深度调峰至35%。这样一来,原本机组调峰至50%,现在调至35%(最低负荷由原来的300MW,变为210MW),在这个负荷的变化过程中,也会伴有温度的变化,而温度的变化,也会伴有部件应力的变化,应力的变化也会对转子部件造成一定的影响。

4.7 转子材质的影响

根据图纸,断裂叶片的材质为2Cr11Mo1VNbN,技术要求为DZ2.11.112,叶片解体后请电科院对叶片材质进行了检测,从检测的结果看,叶片的氮元素含量偏低,断面韧性低于标准下限。

5 叶片脱落的原因

事件发生后,由控股公司运营管理部组织了《预防汽轮机叶片异常损伤研讨会》在我公司举行,参加会议的有汽轮机厂家、西安热工院、电科院及相关电厂的相关领导和专业人员到会,最后问题主要聚焦两点:一是叶片材质方面,叶片韧性过低,在转子高速运转的情况下,产生了裂纹;二是机组氧化皮过多,怀疑是氧化皮嵌入叶片根部,导致斜齿枞树型叶根间隙变大,产生微动,进而导致叶片更根部出现裂纹、损坏,但结论并没有可靠的证据支持,故尚有待于继续研究、

试验、发现。

6 处理方案

考虑到检修工期与机组运营发电的原因,我厂按既定工期投入机组运行、生产,处理途径有以下几个方面:

(1) 拆除各级叶片,由于叶片根部氧化皮较多,拆除工作比较困难,我们采用煤油渗透的方法,再配合专用工具侧面敲打,进行拆除;

(2) 采用喷丸的方法,清除转子各级叶片的氧化皮;

(3) 对各级叶片逐一进行金属探伤检查。

(4) 更换第二级四只损坏的叶片,同时更换了由于断裂叶片的飞出对相邻的叶片造成了明显损伤的叶片(共十四只);对于断裂叶片飞出造成的个别隔板的损伤,严重的两片返厂处理,其余较轻微的现场处理;

(5) 请汽轮机厂和电科院共同从原材料、设计、制造、安装流程上进行梳理,继续分析此次叶片断裂事件发生的原因机理,找到叶片断裂的根本原因,为汽轮机的长久、安全、稳定运行做好有效的保障。

7 运行对策

在运行过程中,制定下列对策:

(1) 制定应急预案,确保异常情况下,正确、有效的处理、应对;

(2) 加强运行监督,及时发现运行相关参数(轴振、温度、轴向位移、转子偏心等)的异常变化,根据应急预案,及时、有效的妥善处理;

(3) 在运行期间要控制好再热器减温水的投用,防止

再热蒸汽温度的大幅波动,特别要防止再热蒸汽温度超限;

(4) 检查汽轮机振动保护逻辑,将振动突变屏蔽数据恢复为振动突变保留数据。

8 结语

(1) #2 汽轮机中压缸第二级叶片断裂事件是一起严重的主设备损坏事件,其中两支叶片断裂,两支叶片出现裂纹,说明该事件的发生并不是偶然性,而是具有一定的必然性,机组虽然已启动运行,但在未能确定叶片断裂的根本原因的情况下,为了设备的安全、稳定运行,仍要在运行过程中加强监督,要利用检修的机会,继续检查、分析、研究,直到找出叶片损伤的根本原因,才能给企业一个定心丸;

(2) 从电科院检测的结果看,叶片的氮元素含量偏低,断面韧性低于标准下限,这个是叶片断裂的根本原因,汽轮机厂要进一步研究、试验、论证;

(3) 根据历次检修记录和图片,发现本次机组改造后的氧化皮较改造前要多,故要深入试验和分析氧化皮较多的原因,是否与机组加氧有关或与转子材质有关(转子轮毂材料(30Cr1Mo1V)属于低合金钢、本身抗氧化性能较弱)或与改造后新投产的机组运行“磨合期”有关。

参考文献

- [1] 何建军,陈荐,孙清民,等.不同加载速率下汽轮机转子钢的高温低周疲劳断裂特征[J].热加工工艺,2011,40(4):20-23.
- [2] DL/T438-2009,火力发电厂金属技术监督过程[S].
- [3] DL/T1115-2009,火力发电厂机组大修化学检查导则[S].
- [4] 刘志江,袁平.我国大型汽轮机叶片运行状况的研究和对策[J].中国电力,1999(10).