

DOI:10.11973/jxgecl230335

# 某核电厂汽轮发电机组末级叶片拉筋凸台的断裂原因

闵济东<sup>1</sup>,罗贤龙<sup>1</sup>,文 学<sup>1</sup>,李祥奎<sup>1</sup>,张 寅<sup>2</sup>,王方方<sup>2</sup>,陈碧强<sup>2</sup>

(1. 福建福清核电有限公司,福州 350318;2. 西安热工研究院有限公司,西安 710032)

**摘要:**某核电厂汽轮发电机组低压缸末级叶片在累积运行约72个月后,在拉筋凸台处发生了断裂,通过宏观形貌观察、化学成分分析、显微组织观察以及硬度测试等方法分析了拉筋凸台的断裂原因。结果表明:末级叶片拉筋凸台断裂性质为疲劳断裂,发生断裂的原因是相邻叶片拉筋凸台的实际配合状态不佳,造成拉筋凸台表面受力不均匀,局部承受的挤压力过大,使得拉筋凸台在汽轮发电机轴转动时承受不均匀的接触摩擦,在交变载荷的作用下,疲劳裂纹在接触面受力最大的粗糙表面处萌生并逐渐扩展,最终导致拉筋凸台的局部断裂。

**关键词:**核电机组;末级叶片;拉筋凸台;疲劳断裂;接触摩擦

中图分类号:TG115.5

文献标志码:B

文章编号:1000-3738(2024)07-0114-05

## 0 引言

叶片作为汽轮机最精细的核心零部件之一,承担着将蒸汽热能转化为机械能的重要任务,其可靠性直接关系整个汽轮发电机组的安全运行<sup>[1-3]</sup>。随着汽轮机不断向高参数、大容量的方向发展<sup>[4]</sup>,开发更长末级叶片以增大末端排气截面的环形面积是降低汽轮机排气损失、提高汽轮机效率的途径之一<sup>[5-6]</sup>。但是,当末级叶片长度增加时,其质量将增大,刚度会降低,扭转恢复变形会增大,同时叶片长期服役在离心力及湿蒸汽交互作用的复杂条件下,易于发生断裂损坏。统计显示,叶片的损坏事故数量约占汽轮发电机事故总量的40%<sup>[7]</sup>,而末级动叶片的损坏数量占叶片故障总量的52.94%<sup>[8-9]</sup>。目前,常通过增设凸台拉筋结构来提高末级动叶片的刚度和减振能力,当汽轮发电机达到一定转速后,在离心力作用下相邻叶片的叶身发生扭转,使得拉筋凸台相互接触,从而加强整级叶片<sup>[10]</sup>。然而,国内核电站汽轮发电机故障叶片断裂经验反馈显示,自2020年以来,多个核电站都出现过低压缸末级叶片拉筋凸台断裂或局部开裂的情况。由此可见,拉筋凸台结构发生磨损开裂及断裂是引起核电站汽轮发电机发生故障的重要原因,应给予重视。

2021年3月,在对某核电机组进行大修时发现,其汽轮发电机低压缸LP2励侧末级49号叶片拉筋凸

台局部发生断裂,该末级叶片已累计运行约72个月,经历机组启停15次左右。该核电机组汽轮发电机为单轴、冲动式凝汽式机组,由1个高中压缸和2个低压缸组成。其中,低压缸为双流双排汽设计,各为5级,低压缸末级叶片为带有拉筋凸台的叉型结构;末级由65只动叶片构成,动叶片是经过整体模锻、消缺和机加工制作而成的,动叶片长度为1430 mm,无叶顶围带,叶身中上部存在拉筋凸台,叶片内弧拉筋凸台表面有涂层,涂层厚度约140 μm;叶片根部依靠定位销与轮盘连接。末级叶片接触的介质为40~50 °C低温低压蒸汽,凝汽器压力为0~5.1 kPa,叶片材料为X12CrNiMoV12-2马氏体不锈钢,相当于国内牌号14Cr12Ni3Mo2VN。为查明该低压缸末级叶片拉筋凸台断裂原因,确保叶片长期安全可靠运行,作者对其进行了失效分析。

## 1 理化检验及结果

### 1.1 宏观形貌

由图1可知:末级叶片拉筋凸台局部区域发生断裂,断口表面粗糙,颜色较暗,可见疲劳弧线;断裂末级叶片内弧拉筋凸台上表面边缘位置存在明显的接触摩擦痕迹,该痕迹应为与上一级叶片背弧拉筋凸台发生接触摩擦后形成的;未断裂末级叶片内弧拉筋凸台上表面的接触摩擦痕迹位于中间位置。由此推测运行时,断裂末级叶片与其上一级叶片背弧拉筋凸台实际的接触位置与设计位置存在一定偏差。由于现场未找到断裂的碎片,故未进行碎片分析。

收稿日期:2023-07-19;修订日期:2024-06-06

作者简介:闵济东(1986—),男,江苏淮安人,高级工程师,学士

通信作者:文学高级工程师

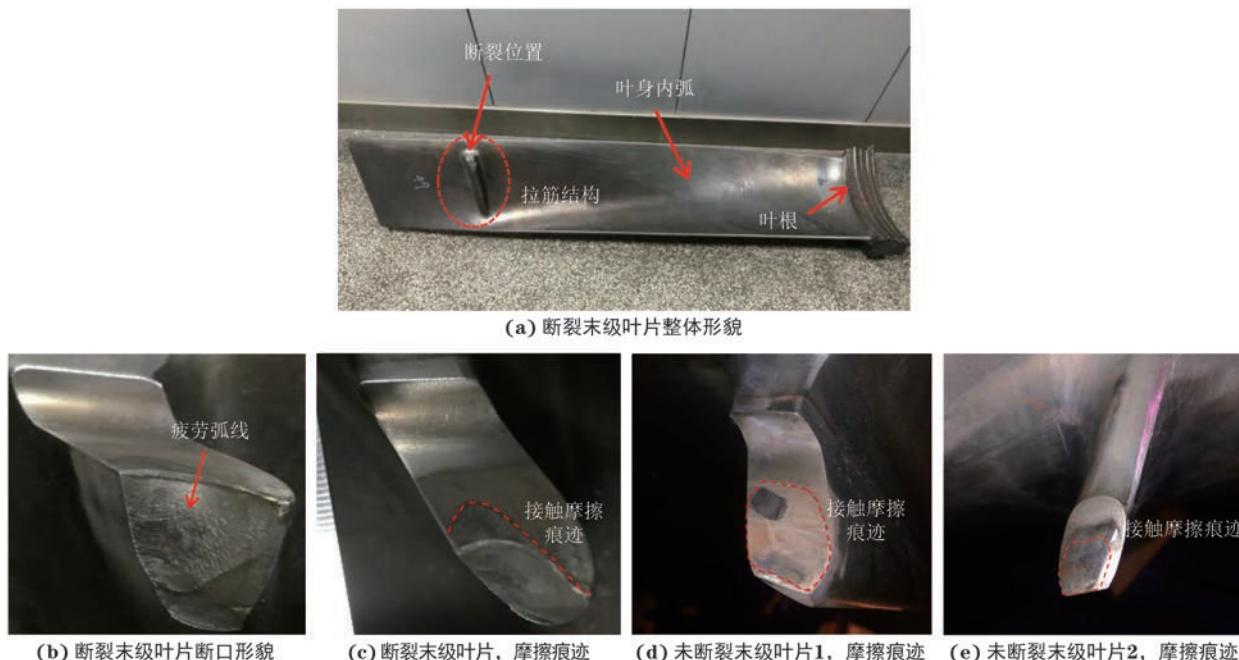


图1 断裂末级叶片拉筋凸台的整体形貌和断口形貌以及断裂和未断裂末级叶片拉筋凸台上表面摩擦痕迹

Fig.1 Macromorphology (a) and fracture morphology (b) of tie piece boss of fractured final stage blade and upper surface friction trace of tie piece boss of fractured (c) and unfractured (d–e) final stage blade

## 1.2 化学成分

在末级叶片断裂位置附近截取试样, 按照GB/T 11170—2008, 采用Belec Vario Lab型原子发射直

读光谱仪分析其化学成分, 结果见表1。由表1可知, 断裂末级叶片的化学成分满足GB/T 8732—2014对14Cr12Ni3Mo2VN钢的成分要求。

表1 断裂末级叶片的化学成分

Table 1 Chemical composition of fractured final stage blade

项目	质量分数/%											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti
测试值	0.14	0.14	0.66	0.012	0.004	2.72	11.57	1.64	0.34	0.10	0.005	0.010
标准值	0.10~ 0.17	≤0.30	0.50~ 0.90	≤0.020	≤0.015	2.00~ 3.00	11.00~ 12.75	1.50~ 2.00	0.25~ 0.40	≤0.15	≤0.04	≤0.02
												0.050

## 1.3 显微组织

在末级叶片拉筋凸台断裂区域附近及未断裂区域各制取1个金相试样, 经研磨、抛光, 用体积分数为10%的硝酸乙醇溶液腐蚀后, 采用Nikon Eclips Ma200型光学显微镜观察显微组织。由图2可知, 末级叶片拉筋凸台断裂区域附近和未断裂区域的组织

无明显差异, 均为回火马氏体, 均为正常组织。

## 1.4 硬 度

在末级叶片拉筋凸台断裂区域附近和未断裂区域取样, 按照GB/T 4340.1—2009, 采用HVS-50Z/LCD型数字式维氏硬度计进行维氏硬度测试, 载荷为49 N, 保载时间为10 s。拉筋凸台断裂区域附近

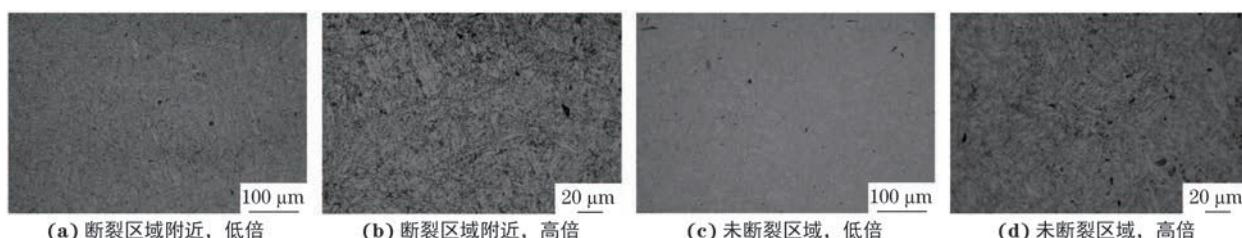


图2 末级叶片拉筋凸台断裂区域附近及未断裂区域的显微组织

Fig.2 Microstructures near fracture area (a–b) and unfractured area (c–d) of tie piece boss of last stage blade: (a, c) at low magnification and (b, d) at high magnification

的硬度测试值分别为332, 234, 318, 334, 319 HV, 未断裂区域的硬度测试值分别为315, 326, 332, 324, 333 HV, 可见2个区域的硬度相差不大, 且均满足材料规格书中硬度的要求(289~335 HV)。

### 1.5 断口微观形貌

采用MIRA3 LMH型扫描电子显微镜(SEM)观察断裂末级叶片拉筋凸台上表面的形貌以及断口形貌。由图3可知, 断裂末级叶片拉筋凸台的上表面粗糙, 存在多条表面微裂纹, 局部可见黑色条状物, 应为接触摩擦掉落的金属薄片挤压到接触面上形成的。

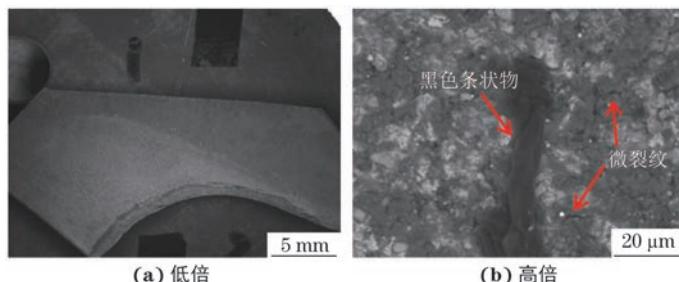


图3 断裂末级叶片拉筋凸台上表面的微观形貌

Fig. 3 Upper surfaces micromorphology of tie piece boss of fractured last stage blade: (a) at low magnification and (b) at high magnification

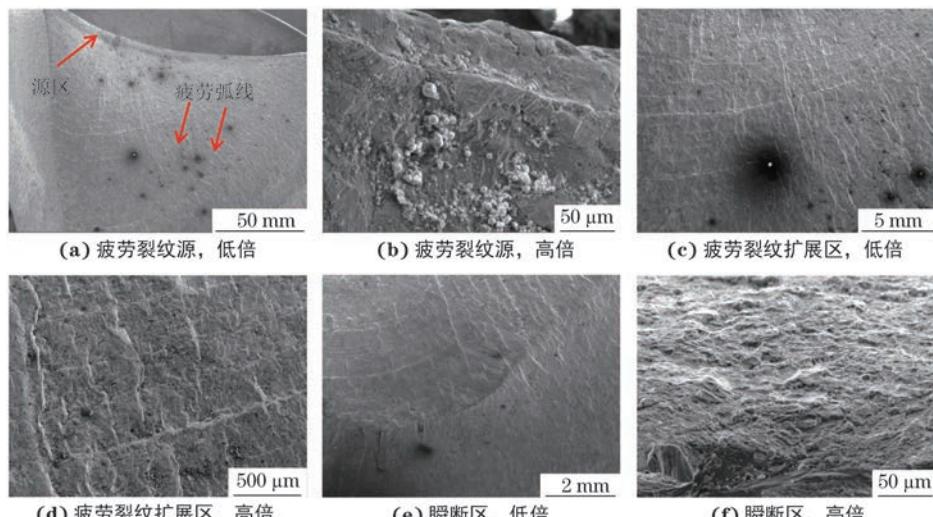


图4 断裂末级叶片拉筋凸台的断口SEM形貌

Fig. 4 SEM morphology of fracture of tie piece boss of fractured last stage blade: (a) fatigue crack initiation, at low magnification; (b) fatigue crack initiation, at high magnification; (c) fatigue crack propagation zone, at low magnification; (d) fatigue crack propagation zone, at high magnification; (e) transient fracture zone, at low magnification and (f) transient fracture zone, at high magnification

## 2 断裂原因分析

由上述理化检验结果可知, 断裂末级叶片拉筋凸台的化学成分满足标准要求, 显微组织和硬度未见异常。因此, 初步分析可知其断裂失效应与材质无关。该汽轮发电机低压缸末级动叶片是经过整体模锻、消除缺陷和机加工制作而成的, 运行时对叶

由图4可见, 末级叶片拉筋凸台断裂区域呈现明显的疲劳断裂特征, 由疲劳裂纹源、疲劳裂纹扩展区和瞬断区组成。其中: 疲劳裂纹源位于拉筋凸台的上表面; 疲劳裂纹扩展区位于断口中部, 面积较大, 低倍下可见疲劳弧线和撕裂痕迹, 高倍下可见疲劳条带; 瞬断区位于断口下部, 该区域表面粗糙。可知, 疲劳裂纹由拉筋凸台上表面向下表面扩展。采用OXFORD INCA X-act型能谱分析仪(EDS)对疲劳裂纹源的微区成分进行分析。由图5和表2可知, 拉筋凸台疲劳裂纹源表面存在颗粒物, 这些颗粒物主要由铁、铬、氧元素组成, 推测其应为氧化物颗粒。

片拉筋凸台的表面质量和拉筋凸台接触面之间的配合要求较高。检验发现末级叶片内弧与上一级叶片背弧拉筋凸台的接触表面粗糙, 表面质量差, 这应为二者接触摩擦造成的。断裂末级叶片内弧拉筋凸台的上表面存在明显接触摩擦痕迹, 该痕迹轮廓不完整且位于拉筋凸台表面边缘位置, 与正常未断裂末级叶片内弧拉筋凸台上表面中间位置形成的接触摩

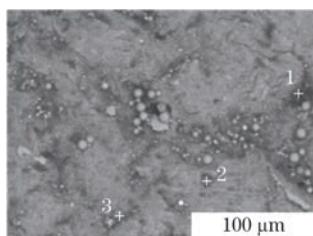


图5 断裂末级叶片拉筋凸台疲劳裂纹源区的EDS分析位置  
Fig. 5 EDS analysis positions of fatigue crack source of tie piece boss of fractured last stage blade

表2 图5中不同位置的EDS分析结果

Table 2 EDS analysis results of different positions shown in Fig. 5

位置	质量分数/%					
	O	Cr	Fe	C	Al	Si
1	36.18	1.71	7.40	49.85	0.97	1.15
2	21.77	17.59	60.63			
3	7.57	12.24	80.20			

擦痕迹不符合,这应为在叶片装配时断裂叶片与上一级叶片背弧拉筋凸台的接触位置与设计位置有偏差,导致二者接触状态不良而形成的。叶片拉筋凸台的作用是在汽轮发电机运行时,在离心力导致相邻叶片叶身发生扭转的作用下相互接触而加强整级叶片,接触状态不良会造成其表面受力不均匀,局部承受的挤压力过大。在不均匀的接触摩擦与交变载荷作用下,拉筋凸台粗糙表面处萌生细小疲劳裂纹,在长时运行过程中细小疲劳裂纹逐渐扩展,最终导致拉筋凸台局部区域发生疲劳断裂。

综上,末级叶片拉筋凸台的断裂性质是疲劳断裂,其断裂原因是该末级叶片拉筋凸台与相邻叶片拉筋凸台的实际配合状态不佳,造成该拉筋凸台局部承受的挤压力过大,使拉筋凸台在汽轮发电机轴转动时承受不均匀的接触摩擦,受力最大的接触面形成粗糙表面,在交变载荷作用下细小疲劳裂纹在粗糙表面处萌生并逐渐扩展,最终导致拉筋凸台局部区域断裂。

叶片拉筋凸台局部开裂与拉筋凸台的表面质量、接触面的磨损和接触面的配合状态有关。在运行过程中,末级叶片最大应力出现在拉筋凸台内弧下侧,接触面积、接触力都会影响拉筋凸台接触面的配合状态,拉筋凸台间的非线性接触对叶片的扭转变形和振动频率影响较大,可通过调整拉筋凸台结构和安装间隙来改变叶片的刚度和振动频率<sup>[11]</sup>。监控并改善叶片的接触配合质量对于提高叶片服役可

靠性是十分重要的<sup>[12]</sup>。

### 3 结论及建议

(1) 汽轮发电机组末级叶片拉筋凸台的断裂性质为疲劳断裂。由于相邻叶片拉筋凸台之间的实际配合状态不佳,造成拉筋凸台表面受力不均匀,局部承受的挤压力过大,导致拉筋凸台在汽轮发电机轴转动时承受不均匀的接触摩擦,受力最大的接触面形成粗糙表面,在交变载荷作用下疲劳裂纹在表面粗糙处萌生并逐渐扩展,最终导致拉筋凸台的局部断裂。

(2) 为避免该类断裂失效的再次发生,应严格按照设计图纸安装叶片,确保叶片拉筋凸台接触面的实际配合状态符合设计要求;加强叶片拉筋凸台表面质量控制,对配合面有机加工痕迹的叶片进行更换,对发生接触摩擦形成磨损区的旧叶片表面进行抛光处理;在机组大修时,需目视检查叶片拉筋凸台的磨损脱落情况,当上级与下级叶片拉筋凸台不能良好接触时,应及时更换或修复叶片。

### 参考文献:

- [1] 王宏星, 葛海华. 650 MW 核电汽轮机低压次末级动叶片根部断裂原因分析与处理[J]. 机械工程师, 2017(12): 166-169.  
WANG H X, GE H H. Treatment and analysis on root fracture causes of low-pressure last stage moving blade in 650 MW nuclear power turbine[J]. Mechanical Engineer, 2017(12): 166-169.
- [2] 张永海, 谷伟伟, 王春燕, 等. 大型汽轮机低压次末级动叶片优化前后典型故障原因分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 158-164.  
ZHANG Y H, GU W W, WANG C Y, et al. Reason analysis on typical failures of low-pressure second last stage moving blades of large scale steam turbine before and after optimization[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 158-164.
- [3] 邓辉, 吴文生, 吴旭良, 等. 低压转子叶片叉型叶根销钉开裂原因[J]. 机械工程材料, 2022, 46(12): 91-97.  
DENG H, WU W S, WU X L, et al. Cause of pin fracture for low pressure rotor blade fork-type blade root[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(12): 91-97.
- [4] 徐志强, 宋英东, 范轶, 等. 国产引进型 600 MW 汽轮机顺序阀投运情况调查及分析[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(5): 374-377.  
XU Z Q, SONG Y D, FAN Y, et al. Research and

- analysis on switching to sequence valve of imported-type 600 MW steam turbine[J]. Turbine Technology, 2008, 50(5): 374-377.
- [5] 刘志林, 马晓峰. 1 200 mm 单只模型叶片强度分析[J]. 黑龙江电力, 2009, 31(1): 39-42.  
LIU Z L, MA X F. Analysis of blade strength of 1 200 mm single model[J]. Heilongjiang Electric Power, 2009, 31(1): 39-42.
- [6] 刘云锋, 杨晓辉, 李宇峰, 等. 大型核电汽轮机末级长叶片开发中若干问题讨论[J]. 热能动力工程, 2022, 37(3): 81-85.  
LIU Y F, YANG X H, LI Y F, et al. Discussion on several issues in the development of last stage long blades of large-scale nuclear power turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 81-85.
- [7] 陈镇南, 卢绪祥, 李录平, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的带冠叶片碰撞振动特性的有限元分析[J]. 动力工程学报, 2013, 33(3): 189-193.  
CHEN Z N, LU X X, LI L P, et al. Finite element analysis on collision-vibration characteristics of shrouded blades based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(3): 189-193.
- [8] 罗剑斌, 谭士森, 袁立平. 大型汽轮机叶片事故原因分析[J]. 电力安全技术, 2002, 4(8): 11-12.  
LUO J B, TAN S S, YUAN L P. Cause analysis of blade accident of large steam turbine[J]. Electric Safety Technology, 2002, 4(8): 11-12.
- [9] 李艳军, 侯家绪, 高秀娜, 等. 12Cr12Mo 马氏体不锈钢叶片断裂原因分析[J]. 上海金属, 2022, 44(3): 49-53.  
LI Y J, HOU J X, GAO X N, et al. Analysis on cause for 12Cr12Mo martensitic steel blade fracturing [J]. Shanghai Metals, 2022, 44(3): 49-53.
- [10] 赵永林, 秦占峰, 范培华, 等. 600 MW 汽轮机调节阀单阀切换顺序阀运行的安全性及经济性[J]. 热力发电, 2007, 36(5): 52-55.  
ZHAO Y L, QIN Z F, FAN P H, et al. Safety and economic behavior of switching the governing valve from single valve control to sequential valve control in operation of 600 MW steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 2007, 36(5): 52-55.
- [11] 陈海燕, 张艳春, 范玮. 超超临界汽轮机末级动叶接触及振动特性分析[J]. 动力工程学报, 2016, 36(3): 185-190.  
CHEN H Y, ZHANG Y C, FAN W. Analysis on contact status and vibration characteristics of last stage rotor blades in ultra-supercritical steam turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(3): 185-190.
- [12] 贾国庆, 姚福军, 赵伯安, 等. 某半速核电汽轮机低压转子末级叶片装配方法探究[J]. 机电信息, 2020(3): 52-53.  
JIA G Q, YAO F J, ZHAO B A, et al. Research on assembly method of last stage blade of low-pressure rotor of a half-speed nuclear power steam turbine[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(3): 52-53.

## Fracture Cause of Tie Piece Boss in Last Stage Blade of Steam Turbine Generator Unit in Nuclear Power Plant

MIN Jidong<sup>1</sup>, LUO Xianlong<sup>1</sup>, WEN Xue<sup>1</sup>, LI Xiangkui<sup>1</sup>, ZHANG Yin<sup>2</sup>, WANG Fangfang<sup>2</sup>, CHEN Biqiang<sup>2</sup>

(1. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd., Fuzhou 350318, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The tie piece boss of the last stage blade of the low-pressure cylinder of a nuclear power plant steam turbine generator unit was fractured after cumulative operation for about 72 months. The reason for the fracture of the tie piece boss of the last stage blade was analyzed by macroscopic morphology observation, chemical composition analysis, microstructure observation and hardness test. The results show that the fracture mechanism of the tie piece boss of the last stage blade was fatigue fracture, and the reason for the fracture was that the poor actual matching state of the tie piece bosses of the adjacent blades, resulting in uneven stress on the surface of the tie piece bosses and excessive local extrusion pressure. This caused the tie piece boss to bear uneven contact friction during the rotation of the steam turbine generator shaft, and under alternating loads, the fatigue cracks were initiated on the rough surface of the contact surface with the maximum stress and propagated gradually, ultimately leading to local fracture of the tie piece boss.

**Key words:** nuclear power unit; last stage blade; tie piece boss; fatigue fracture; contact friction