

# 循环氢压缩机组主汽轮机轴失效分析

董超芳<sup>1</sup> 李晓刚<sup>1</sup> 陈华<sup>1</sup> 杨力<sup>2</sup> 王汉军<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学表面科学与腐蚀工程系 北京 100083)

(2. 锦西炼油化工总厂 锦西 125001)

**摘要** 通过硬度检测、金相检验、宏观及微观断口分析,结合力学分析证实了汽轮机轴失效是由于轴肩变径处加工刀痕导致应力集中,造成多条疲劳裂纹萌生、扩展及最终的断裂,提出了防止汽轮机轴疲劳断裂的措施。

**关键词** 汽轮机轴 疲劳 断裂 失效分析

中图分类号 TG172.9 文献标识码 A 文章编号 1002-6495(2001)01-0060-03

## FAILURE ANALYSIS OF TURBINE AXES OF A CIRCULATORY HYDROGEN COMPRESSOR

DONG Chaofang<sup>1</sup>, LI Xiaogang<sup>1</sup>, CHEN Hua<sup>1</sup>, YANG Li<sup>2</sup>, WANG Hanjun<sup>2</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

(2. Research Institute of JinXi Refinery, Jinxi 125001)

**ABSTRACT** The failure of a turbine axes was investigated by sclerometer, optical microscopy, SEM, and mechanics analyses. It has been found that the surface-machining nick, which resulted in stress concentration, which induced initiation and grow of fatigue cracks, and finally rupture of the axes. According to the experiment results, measures to prevent the fatigue failure have been suggested.

**KEY WORDS** turbine axes, fatigue, fracture, failure analysis

主汽轮机轴是循环氢压缩机组最重要的部件之一,运行时所临介质为水蒸汽,控制转速为 1581 m/min,主蒸汽温度 370℃,压力 3.2 MPa。在运行中突然发生断裂,导致前轴承箱破裂事故,汽轮机主轴从距轴端 245 mm 轴肩变径(由 120 mm 变至 70 mm)处断裂,图 1 为轴断口的宏观形貌。

本文对事故断口进行了金相及扫描电镜观察,并结合力学分析,确定了失效原因,并提出预防措施。

### 1 失效行为分析

硬度分析采用显微硬度仪随机对轴上所取试样测量硬度值。测得维氏硬度为 3248 MPa,根据材料的硬度与强度之间的关系为<sup>[1]</sup>:

$$HV \approx 0.3 \sigma_s \quad (1)$$

$$\sigma_b (\text{MPa}) \approx 0.34 HV \quad (2)$$

算出轴的  $\sigma_s \approx 970 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_b \approx 1127 \text{ MPa}$ 。

金相显微镜观察浸蚀后的轴材料,为晶粒细小

的淬回火索氏体组织<sup>[2]</sup>,组织均匀,夹杂物含量少,材质组织合格。

能谱分析轴的材料含元素 Cr、Mo、Mn,进一步化学分析表明该轴为日本 SCM22 系列 30CrMoA 钢。

经超声波清洗后,进行宏观断口观察,断裂呈脆性,是典型的疲劳断口。图 1 可见,整个断口分 3 个区域:(a)裂纹萌生区(表现为平滑区)和 45°方向扩展区;(b)90°扩展区(垂直于轴向,快速扩展,表现为粗糙区);(c)瞬断区,表现为多条裂纹汇合撕裂。

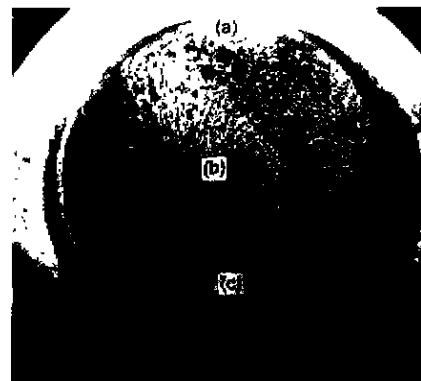


Fig.1 The micrography of failed piston

经宏观观察发现,轴的外缘机加工刀痕明显可见,表明裂纹可能起始于轴肩变径处的刀痕(此处剪应力  $\tau_1$  最大),而且是多条裂纹萌生和扩展过程.汽轮机轴肩变径处的应力状态是最大主应力方向与轴向大约成  $45^\circ$  角,因而造成了(a)区中裂纹沿  $45^\circ$  方向扩展.宏观断口出现的裂纹扩展过程中间歇前进的贝壳状线,也说明汽轮机轴是疲劳断裂<sup>[3]</sup>.图1中的裂纹  $90^\circ$  扩展区域中能够看到断口表面粗糙,裂纹扩展过程中有宏观河流花样以及放射状痕迹,粗糙区的放射条纹表明为裂纹快速扩展区域,也是疲劳破坏宏观断口的特征形貌<sup>[3]</sup>.经宏观断口分析轴的失效为疲劳断裂,且断口呈脆性.

扫描电镜下加工刀痕清晰可见(图2),说明最初的微裂纹起源于加工刀痕处.图3为裂纹扩展时的疲劳条带的电镜照片.a为贝壳状线,b为放射状棱线的电镜照片,这些条纹的较规则排列及条纹间隔比较均匀表明是疲劳载荷所致.a中的条带宽度明显窄于b中的条带宽度,这与疲劳扩展中慢速扩展区条带窄,快速扩展区条带宽的规律一致.在撕

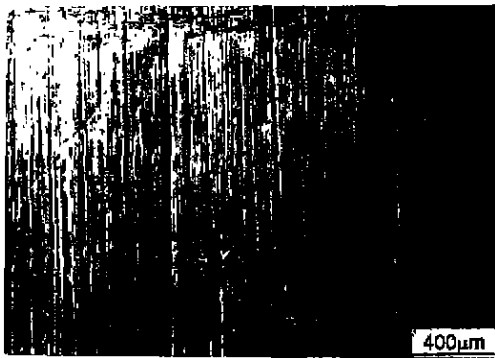


Fig. 2 SEM morphology surface machining nick(46×)



裂区可观察到韧窝形貌,但不是很明显,说明轴的材质具有脆性.微观断口分析进一步证实了轴疲劳断裂的特征.

通过实验可知汽轮机轴肩变径处加工刀痕的存在引起了较高的应力集中,并在汽轮机运行和开停过程中产生的高变载荷作用下,导致了轴肩变径刀痕处的多疲劳裂纹萌生,并沿最大主应力面方向(与轴向约成  $45^\circ$  角)扩展.当裂纹沿  $45^\circ$  方向扩展约 20 mm 时,由于变截面处有效承载半径的减小,拉应力作用效果增大,使主应力方向由原来的  $45^\circ$  变为沿轴向,导致裂纹垂直于轴向扩展.慢速扩展区中明显可见疲劳条带(贝壳纹),快速扩展区中有明显的放射状棱线,撕裂区有韧窝存在,这些均符合疲劳破坏的断口特征形貌.此外,在扩展过程中的宏观河流花样表明驱使裂纹扩展的载荷可能是较高的静载荷水平(相对于疲劳载荷)上迭加小的波动载荷,即高平均应力低循环应力幅值.

## 2 讨论

以上结果可以通过受力分析进行验证.但求受力分析的定量解很困难,因此采用半定量分析.

### 2.1 汽轮机轴轴肩变径处的应力估算

轴的受力如图4所示,包括:蒸汽推动叶片而产生的轴向拉力  $P_1$ ;由于高速旋转轴受到的扭矩  $T$ ;轴瓦的约束力  $P_2$ ,据现场调查,蒸汽推力  $2.94 \times 10^5 N$ ,即  $P_1 = 2.94 \times 10^5 N$ .计算圆盘所受弯矩时简化为臂长  $L = R_2 - R_1$ ,厚为  $H$ ,宽为  $2\pi R_1$  的悬臂梁问题.通过工程力学计算,汽轮机轴断裂处受到剪应力及拉应力为:  $\tau = 51.9 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_1 = 78.4 \text{ MPa}$ .根据第三强度理论<sup>[3]</sup>可计算出断裂处应力为:

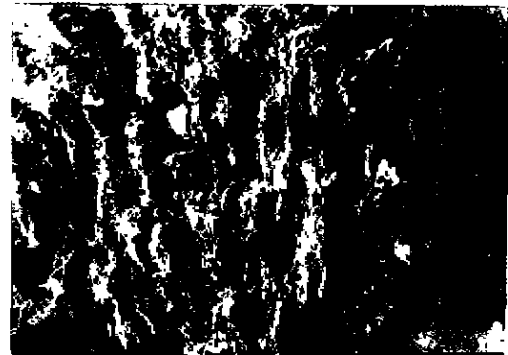


Fig. 3 SEM morphology of fatigue striation in the fracture extended area. (a) 9×, (b) 8×

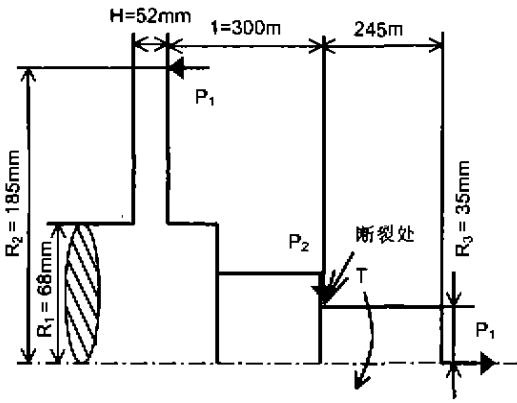


Fig. 4 The stress sketch map of turbine axes

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + 4\tau^2} = 130.3 \text{ MPa} \quad (3)$$

## 2.2 钢疲劳强度的 Goodman 关系<sup>[4]</sup>

考虑到轴肩变径处同时受拉伸载荷和弯曲载荷,对于结构钢对称循环应力的疲劳强度( $\sigma_{-1}$ )与屈服强度( $\sigma_S$ )和抗拉强度( $\sigma_b$ )之间存在以下关系<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_{-1} = 0.25(\sigma_S + \sigma_b) \quad (4)$$

由硬度实验结果可知  $\sigma_S \approx 970 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_b \approx 1127 \text{ MPa}$ ,考虑实验误差的影响,选取  $\sigma_S, \sigma_b$  值时将实验值与查表值综合考虑.其性能指标如下,  $\sigma_S \geq 539 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_b = 784 \sim 931 \text{ MPa}$ .取  $\sigma_S = 833 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_b = 931 \text{ MPa}$ .由此推算出的疲劳极限  $\sigma_{-1} = 441 \text{ MPa}$ .

## 2.3 刀痕的理论应力集中系数及疲劳强度降低系数

加工刀痕处理论应力集中系数( $K_t$ )定义为<sup>[2]</sup>:

$$K_t = \text{最大局部应力/名义应力} \quad (5)$$

有沟槽缺口构件的应力集中系数的计算公式如下<sup>[2]</sup>:

$$K_t = \sqrt{\frac{d}{\rho} \left[ \frac{b}{\pi d} \text{ctg} \left( \frac{d}{\pi d} \right) \right]} \quad (6)$$

其中  $\rho$  - 缺口曲率半径(0.01 mm);  $b$  - 相邻缺口距离(0.04 mm);  $d$  - 缺口深度(0.02 mm).

由上式可得加工刀痕应力集中系数  $K_t \approx 10.7$ .另外,汽轮机轴肩变径处是一个突变截面,因此实际的应力集中系数比上面简化后的值更大.

无缺口光滑构件的疲劳强度( $\sigma_r$ )与有缺口构件的疲劳强度( $\sigma_m$ )之比定义为疲劳强度降低系数( $K_f$ ),即

$$K_f = \sigma_r / \sigma_m^q = 1 + q(K_t - 1) \quad (7)$$

其中,  $q$  为材料的缺口敏感系数,查  $q$  值与钢材强度关系图<sup>[2]</sup>可知  $q = 0.3$ .由此得出的缺口疲劳强度降低系数为:  $K_f = 4.21$ .即由于存在锐缺口使得疲劳极限由原来的 441 MPa 降低到 104.8 MPa.当存在较高的平均应力,如  $\sigma_m$  为 104.8 MPa 时,只要波

动应力超过 30~40 MPa 就发生疲劳断裂.

通过半定量估算表明,加工刀痕的使疲劳强度降低了 74% 左右,且断裂处的应力大于降低后的疲劳极限,因此轴肩变径处刀痕造成的缺口引起应力集中导致了多疲劳裂纹的萌生和扩展,这与实际汽轮机轴的破坏情况是一致的.另外由开、停机,运行过程的机械振动、气流不稳定和谐振等产生的波动载荷的计算是非常困难的,实际工程中常利用传感器对其运行状况进行监控,目前尚无法定量计算.

## 2.4 氢的影响

循环氢压缩机主汽轮机轴断裂处虽然不接触氢气环境,但由于氢在金属中的扩散很快,氢会从轴接触氢的一端扩散至断裂处.循环氢压缩机氢压为 8 MPa,温度为 55°C,断裂处距临氢的一端为 75 cm.根据氢在金属中的溶解度公式<sup>[6]</sup>:

$$C_H = A \sqrt{P_{H_2}} e^{-\Delta H/RT} \quad (8)$$

其中  $A$  通常取值为 1,铁素体的  $\Delta H$  为 5732 cal,故计算出氢在铁中的溶解度为 0.35 相对体积浓度.氢在体心立方的铁素体中的扩散系数  $D_0$  为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,根据扩散距离  $x$  和扩散时间  $t$  的关系式:

$$t = x^2/D_0 \quad (9)$$

可算出氢从临氢端扩散至断裂处的时间需要 33 d,即在汽轮机轴工作一个月后,轴肩变径处就会有较高浓度氢的存在.氢的存在不会对屈服强度和抗拉强度产生很大影响,但却可使材料脆性增加,产生氢脆作用,氢脆将加速疲劳裂纹的萌生与扩展,断口观察表明断口呈现脆性.

## 3 失效原因与预防措施

**失效原因:**汽轮机轴断裂是高平均应力低循环应力幅值的疲劳载荷在较高的应力集中下产生的疲劳断裂,加工刀痕产生的尖锐台阶使轴肩变径处严重的应力集中导致多疲劳裂纹萌生;氢的渗入及扩散使得汽轮机轴脆性增加,氢脆加速疲劳裂纹的萌生与扩展;

**预防措施:**合理的安装以及操作使机组平稳运行可减轻波动载荷作用,改进机加工方法,增加轴件表面精度以消除或减轻应力集中.

### 参考文献:

- [1] 吴培英.金属材料学.北京:国防工业出版社,1987.
- [2] 陈南平,顾守仁,沈万慈等.机械零件失效分析.北京:清华大学出版社,1988.
- [3] 刘鸿文.材料力学.北京:高等教育出版社,1992.
- [4] 徐灏.疲劳强度.北京:高等教育出版社,1988.
- [5] 马安禧,于俊章,周康年等.材料力学.北京:高等教育出版社,1987.
- [6] 褚武扬.氢损伤和滞后断裂.北京:冶金工业出版社,1988.