

石化烟机叶片失效断裂分析

刘加佳 范广森 (南京三方化工设备监理有限公司, 江苏 南京 210036)

摘要: 对烟气轮机断裂叶片进行化学成分及机械性能分析、无损探伤、金相分析及断口宏观微观形貌观察, 找出了叶片断裂失效的原因。结果表明, 该烟机叶片的断裂性质为疲劳断裂, 由于叶片制造存在原始缺陷, 加之叶片长时间在高温下运行, 承受热交变载荷, 导致微观裂纹扩展, 引起脆性断裂。

关键词: 烟气轮机; 叶片; 疲劳断裂

1 引言

某石化企业烟机 (型号 YL-29000B, 额定功率 28600kW) 1# 转子运行 861 天后首次发生动叶片断裂事故。更换转子后, 该烟机再一次发生动叶片断裂事故, 导致烟机剧烈振动, 紧急停机, 2# 转子累计运行 463 天。

2 叶片损坏情况

断裂叶片选取三件样品, 详见图 1。



图 1

1# 叶片损伤最为严重, 只剩下榫头部分, 整个断口均有被高温氧化的现象; 2# 叶片榫头部分完整, 叶身剩 2/3, 断口是从叶身上断开的, 整个断口较粗糙, 有明显的放射状条纹, 条纹的汇集处正是断口的启裂部位叶身的进气侧有较薄一层结垢物; 3# 叶片榫头和叶身部分虽无缺损, 但变形较大, 叶身有明显的弯曲变形, 榫头部位变形也相对较大。

3 表面探伤 (PT) 检查

对本次失效动叶片 1#、2# 和 3# 进行 PT 探伤检查, 发现位于 3# 叶片的进气侧榫头第三个榫齿根部有裂纹, 裂纹长约 60mm, 呈断续状。

4 化学成分及机械性能分析

4.1 化学成分分析

对动叶片 1#、3# 动叶片取样进行化学成分分析。试验结果表明, 取样部位化学成分满足相关标准要求。

4.2 高温短时拉伸

对动叶片 3# 样品取样进行高温短时拉伸试验, 试验结果表明, 叶片的抗拉强度靠近标准要求值下限, 断面收缩率低于标准要求值, 但相差不大。

4.3 高温冲击试验

对动叶片 1#、2# 样品的榫头部位取样进行高温冲击试验, 试验温度为 690℃ (接近叶片工作温度), 试验结果满足标准要求。

5 金相分析

分别从动叶片 1# 和 3# 样品上选取金相分析试样, 试样①在 1# 样品的断裂面上截取, 试样②在 2# 样品的裂纹尖端附近截取。试样①位于断裂面的边缘处有沿晶开裂的

裂纹, 试样②上的裂纹主要为沿晶扩展, 金相组织均为奥氏体 + 晶粒不均匀。对动叶片进行电子金相观察, 叶片中的析出项较多, 有在晶界内的, 也有在晶界上的, 能谱分析结果为碳化物和金属化合物。

6 断口分析

断口 1 和断口 2 分别是 1# 和 2# 样品上截取的。

6.1 断口宏观形貌

断口 1 断裂面主要分为三个区域, 第一断裂面较细且较平, 属裂纹启裂与裂纹慢速扩展区; 第二断裂面相对较平且较粗糙, 属相对较快扩展区; 第三区断裂面较粗糙且不在一个平面上, 断裂面呈放射状纹路, 属快速失稳扩展区。

断口 2 是将 3# 样品榫齿底部裂纹打开的断裂面, 断裂面相对较平, 但断裂面较粗糙, 裂纹深度约 6.5mm, 断口呈铁锈红色, 表明该断裂面在高温下有停留。

6.2 断口微观形貌

断口 1 分两块区域, 第一区域可见有明显的启裂部位, 启裂部位的微观形貌有沿晶特征, 同时在启裂部位观察到较密集的脆性夹杂物; 第二区域的腐蚀较严重, 经清洗后明显可观察到沿晶开裂特征, 表面该区域在高温下停留时间相对较长, 断裂面具有高温疲劳特征。断口 2 中有明显的放射性纹路, 启裂部位呈解理脆性断裂; 裂纹扩展部位为沿晶开裂 + 韧窝形貌;

7 开裂原因分析及结论

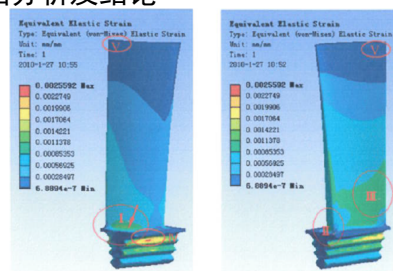


图 2

烟机运行工况具有高温、高负荷和高转速的特点。烟机动叶在工作中承受交变离心力、气动力、振动、腐蚀及氧化等作用, 疲劳 + 蠕变是动叶片最常见的失效形式。影响叶片寿命的主要因素包括: 气动及强度设计、材料高温性能、疲劳强度、表面质量、机加工精度、工艺操作稳定性、催化剂结垢附着及冲刷、机组振动等。从实际发生的叶片失效案例来看, 叶片断裂大多数都起始于图 2 中标识的 I、II、III 及 IV 应力水平相对较高的区域, 并且以疲劳破坏为主。在出现谐振 (一般与设计有关) 的情况下, 疲劳断裂可能早期在叶尖区域 (图 2 中的 V 区) 发生。

本案例 1# 叶片样品开裂部位位于图 2 中的Ⅳ区域（应变云图中呈红色），从断口的陈旧程度及陈旧性断裂面所占面积等现象判断，1# 叶片损伤最为严重，因此可以判定是最早发生断裂。

根据资料，事故烟机 2012 年 11 月 29 日投入使用，2015 年 4 月 9 日（运行近 29 个月）首次发生叶片断裂事故，更换同一厂家提供的备用转子后运行于 2016 年 7 月 31 日（仅运行约 15 个月后）再次发生叶片断裂事故。本案例失效叶片材质为 Waspaloy（美国），与我国 GH864 合金基本相同，是目前烟机叶片最常用的材料。该材料具有良好的高温强韧化匹配，在具有较好的高温高强度的同时也具有足够的高温韧性及高温持久塑性，在使用性能上表现出来较低的疲劳裂纹扩展速率。

叶片疲劳损伤的过程一般包含：孕育、萌生、扩展和瞬断等四个阶段，其中孕育和萌生是决定叶片疲劳寿命的两个主要阶段（占总寿命 80% 以上）。以往的失效案例分析结果显示，烟机叶片高温疲劳损伤容易在高应力部位的原始材料缺陷、机加工损伤、表面蠕变裂纹或局部腐

（上接第 218 页）强化运输人员素质，改进安全意识，从而规范运输机操作行为。值得注意的是，要对职工进行教育，避免出现超载，以此提升运输安全。其次，还要做好运输机平常的维护，对其定期检修，在此期间，检修需要依据检修计划进行执行，并且明确检修任务或者相关范围，然后对检修内容或者规格质量进行记录，最后由专人进行检查验收。

3 结语

对于矿井来说，生产煤是首要作业，而皮带运输机恰恰起到相应作用，其与煤的生产有着联系，所以，应展现皮带运输机效用，关注其运行状况，实行系统管理，这样既能发挥在生产环节功能作用，还能让煤矿达到高效生产。

（上接第 217 页）开度。在机组小负荷工况区域时即起机工况时，采取了 2 号阀提前开启的措施，也就是说为了改善气缸和调节级叶片的受力状况，起机时 1、2 号两个汽阀是都开启的，因此 1、2 阀有较大的重叠度。再加上每只阀的开启次序和升程由衬套的长度决定，每只阀有一定的空行程，如果由于长时间的使用使得衬套端面磨损，也将会影响汽阀的初始开度，并且会影响汽阀阀芯的升程，进而影响中压蒸汽进入汽室的蒸汽量，蒸汽量过低便会导致机组无法正常启动。



在检修过程中，打开机体进汽室侧面堵盖，将调速器发组件取出，发现 5 个调速阀其中 3 个阀芯有不同程度损坏，位于中间的“5”号阀已与发螺栓脱离，经过测量发

蚀凹坑等部位首先萌生裂纹或直接发生疲劳扩展。其中表面裂纹的存在对疲劳寿命的影响最为显著。最早发生断裂的 1# 动叶片运行时间仅约 15 个月，寿命仅正常情况的 1/4~1/6，出现此类情况应重点考虑启裂部位存在原始裂纹的可能性。从分析情况来看，1# 叶片样品启裂部位微观断口形貌呈疲劳断口包围沿晶断口特征，表明疲劳源处存在原始制造表面裂纹。因此推断榫齿根部存在原始制造表面裂纹是导致叶片发生疲劳断裂主要原因。

为预防事故再度发生，应控制叶片材料及制造的质量，从源头上减少材料的影响。同时在烟机正常运转过程中，要尽量降低烟机整机的振动幅度和温度波动，从而减小振动和热交变应力对叶片的影响。

参考文献：

- [1] 王程. 高温烟机转子叶片断裂失效原因 [J]. 广东石油化工学院机电工程学院.
- [2] 姚志浩. 烟气轮机动叶片断裂原因分析 [J]. 北京科技大学.
- [3] 魏鑫. 催化裂化装置烟机叶片断裂原因分析及对策 [J]. 镇海炼化化工股份有限公司.

参考文献：

- [1] 马星星. 煤矿大倾角强力皮带运输机存在的问题及优化改进 [J]. 机械管理开发, 2019, 34(03): 155-156+185.
- [2] 白伟. 煤矿皮带运输机常见故障及其预防措施 [J]. 能源与节能, 2019(04): 170-171.
- [3] 孔林奎. 煤矿皮带运输机跑偏装置设计改进措施 [J]. 能源与节能, 2019(05): 102-103+111.
- [4] 王微. 多条矿井皮带运输机 PLC 控制系统的设计研究 [J]. 机械管理开发, 2019, 34(10): 247-249.

作者简介：

郝建民（1985-），河北井陉人，毕业于太原理工大学，本科，采矿助理工程师。

现 1、2、3 号阀的衬套有磨损情况。如此可判断，调速器在起机过程中跳闸情况是由于汽阀常年使用导致衬套磨损，减小了阀芯初始开度所导致的。

4 结论

综上所述，汽轮机调节器在长时间的使用中，特别是开停机频繁的情况下，调速器阀的磨损是存在的并且是不容忽视的，调汽阀内衬套决定了阀芯的初始开度和空程大小，从而决定了阀芯的实际升程能否与油动机侧面的刻度盘相对应，衬套磨损、阀芯磨损和松动都会减少阀芯的实际升程减少蒸汽的进汽量。虽然在本次检修中通过调节油动机端的活塞杆静止状态下高度进而提高阀芯初始高度的方法来解决，但终归并不能从根本上处理，并且在起机时低负荷工况下会导致转子转速过快的情况。要想根本上解决该问题，还是需要机组常规维护检修时对调节汽阀进行各数据的详细对比和修正，并且储备例如此类易损件。

参考文献：

- [1] 盛虎. 伺服阀运行故障的处理 [J]. 设备管理与维修, 2007 (07).