

电站汽轮机中压调节汽阀阀杆断裂原因分析

Fracture Analysis of Medium Pressure Regulating Valve Stem of Power Plant Steam Turbine

供稿|史海燕 / SHI Haiyan

内容导读

对某电厂 1#机组右侧中压调节汽阀进行解体检查时,发现调节汽阀阀杆断裂。为查明原因,从阀杆宏观形貌、微观组织、化学成分、力学性能和阀杆受力情况进行综合分析。结果表明,阀杆自身材质与设计材质不符,力学性能满足要求但阀杆自身具有脆化特征;阀杆渗氮时未对排气孔壁与中心平衡孔壁进行保护,导致中心平衡孔壁形成了硬度较高的渗氮层,阀杆在服役过程中,裂纹逐渐于应力集中程度较高的中心平衡孔表面的渗氮层处形成,并在交变应力作用下不断扩展最终引发疲劳断裂。

电站汽轮发电机是一种以蒸汽为动力的旋转式动力装置,是现代火力发电厂的主要设备。来自锅炉的高温高压蒸汽依次穿过汽轮机固定喷嘴和动叶,使装有叶片排的转子旋转,将蒸汽的热能转化为汽轮机转子旋转的机械能。同时,汽轮机作为原动机拖动发电机转子旋转,利用电磁感应原理把机械能转换成电能。目前,火力发电厂汽轮发电机采用卧式结构布置。中压调节阀安装在汽轮机的中压进汽管道上,蒸汽出口通过中压导汽管与汽缸进汽室连接,中压调节阀用来调节蒸汽通往中压和低压汽轮机,从而限制再热器去中、低压汽轮机的蒸汽流量^[1]。某电厂汽轮发电机组检修时对 1#机的中压调节汽阀进行解体检查,发现右侧中压调节汽阀阀杆排气孔处断裂。1#机组截止到本次检修已累计运行

约 85000 h。目前,火力发电机组用以控制中压调节阀蒸汽流量的阀杆结构发生多起断裂案例,李建军^[2]、苏利辉^[3]、张涛等^[4]对断裂阀杆失效原因分别从阀杆微观组织、力学性能、运行操作、表面渗氮工艺等方面进行了分析研究,并提出了指导性意见。本文针对失效的中压调节阀杆从阀杆宏观形貌、微观组织、化学成分、力学性能和阀杆受力情况进行了分析,确定了阀杆失效原因,提出了预防建议,旨在降低阀杆在使用过程中发生断裂的概率。

设备概况

1#机组汽轮机系哈尔滨汽轮机厂有限责任公司生产的型号为 CZK350/292-16.7/538/538 的亚临界参数、一次再热、直接空冷、单轴双排汽抽汽供热凝

作者单位:内蒙古磴口金牛煤电有限公司,内蒙古 巴彦淖尔 015200

汽式汽轮机组。中压蒸汽调节阀安装在汽轮机左右两侧,经锅炉再热后的蒸汽通过再热热段管道进入汽轮机再热汽调节联合阀,由每侧中压调节阀流出,经过两根中压导汽管由中部下半缸进入中压缸。中压调节阀为双座活塞式结构,每一个阀门都有独立的执行机构,工作过程中用以限制再热器去中、低压汽轮机的蒸汽流量。中压调节阀出口通过中压导汽管与汽缸进汽室连接,主阀碟通过阀杆和连接件与油动机的活塞连接,油动机活塞向上、向下移动可分别打开和关闭阀门,这些阀门的开度均由各自的油动机来控制。油动机又由数字电液调节系统控制,按照控制单元的指令来调节进入汽轮机的蒸汽流量大小,使机组运行参数符合要求^[2,5]。本次阀杆断裂部位在阀杆“十字”排气孔处,如图1所示,整条阀杆根据不同功能区域进行加工,阀杆表面有光杆和螺纹型式,核查阀杆说明书其规格显示为 $\phi 82.7\text{ mm} \times 1365\text{ mm}$ (直径最大处),断裂部位为螺纹结构,公称直径为 $\phi 48\text{ mm}$,材质为2Cr12NiMoWV。查阅机组检修记录,该部位中压调节阀阀杆曾于2015年8月更换,更换后的新阀杆至本次发现断裂共运行44622.17 h,通常此类阀杆运行周期不低于100000 h或两个机组大修期。

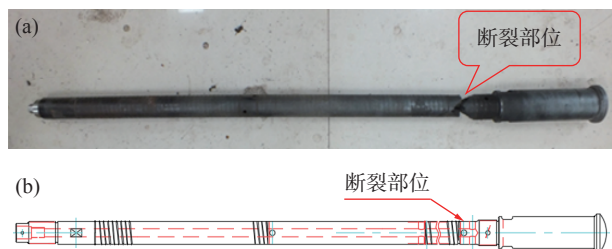


图1 中压调节汽阀阀杆形貌: (a) 阀杆断裂部位形貌; (b) 阀杆断裂部位示意图

失效原因分析

为了避免类似阀杆断裂事件再次发生,确保发电机组可靠运行,对断裂的中压调节汽阀阀杆从宏观形貌、微观组织、化学成分、力学性能进行检验与分析,确定该阀杆断裂的原因。

宏观形貌检验

对断裂的中压调节汽阀阀杆进行宏观形貌检查,阀杆表面存在一定厚度的氧化层,未见磨损、

机械损伤、腐蚀及其它原始缺陷等痕迹。阀杆断裂于“十字”排气孔处,断口表面呈深灰色,具有明显的氧化特征。该部位由于“十字”型通孔的存在,是阀杆承载面积最小的部位。机械截取后发现断面阀杆中心平衡孔存在明显的偏心,见图2(a)和2(b)。此外,断口处侧面可以观察到较为明显的平行疲劳裂纹,见图2(c)。

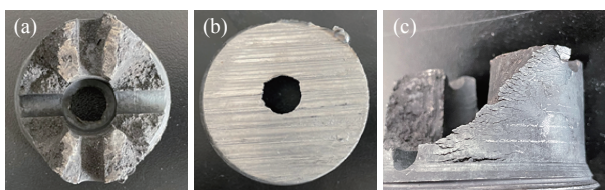


图2 阀杆断裂位置各部位形貌: (a) 断面; (b) 阀杆中心平衡孔偏心; (c) 侧面

显微组织检测与分析

利用Axio Observer.A1m型金相显微镜对断裂的中压调节汽阀阀杆样品进行显微组织检测。分析结果显示阀杆基体部位组织为回火马氏体,阀杆外表面存在渗氮层。通常为提高阀杆的强度、耐磨性和整体抗疲劳性能,制造厂家会对成型阀杆表面进行渗氮处理^[4,6]。实测断裂阀杆渗氮层厚度为 $300\text{ }\mu\text{m}$,见图3(a)。阀杆中心平衡孔内表面也存在渗氮层,渗氮层厚度为 $272\text{ }\mu\text{m}$,见图3(b)。渗氮层疏松级别为2级,氮化物级别为2级,均能达到标准要求,故确定其金相组织无异常。此外,在断裂阀杆外表面的螺旋纹根部圆弧过渡处可以看到长约 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的裂纹向内延伸,裂纹由外向内逐渐变细,阀杆外壁的渗氮层也能看到数条平行的微裂纹由外向内延伸,如图3(c)和3(d)所示。

化学成分检测

用SPECTROMAXx型台式直读光谱仪对断裂的中压调节汽阀阀杆进行化学成分分析,检测结果如表1所示。可以发现,中压调节汽阀阀杆C、Si、Mn、Ni、W、V元素含量不符合GB/T 8732—2014《汽轮机叶片用钢》标准中对2Cr12NiMoWV的元素含量要求^[7]。2Cr12NiMoWV钢是一种强化的铬质量分数为12%的马氏体耐热不锈钢,该钢化学成分设计合理,常温和高温力学性能、工艺性能及耐腐蚀性能良好,缺口敏感性小,具有良好的减振性

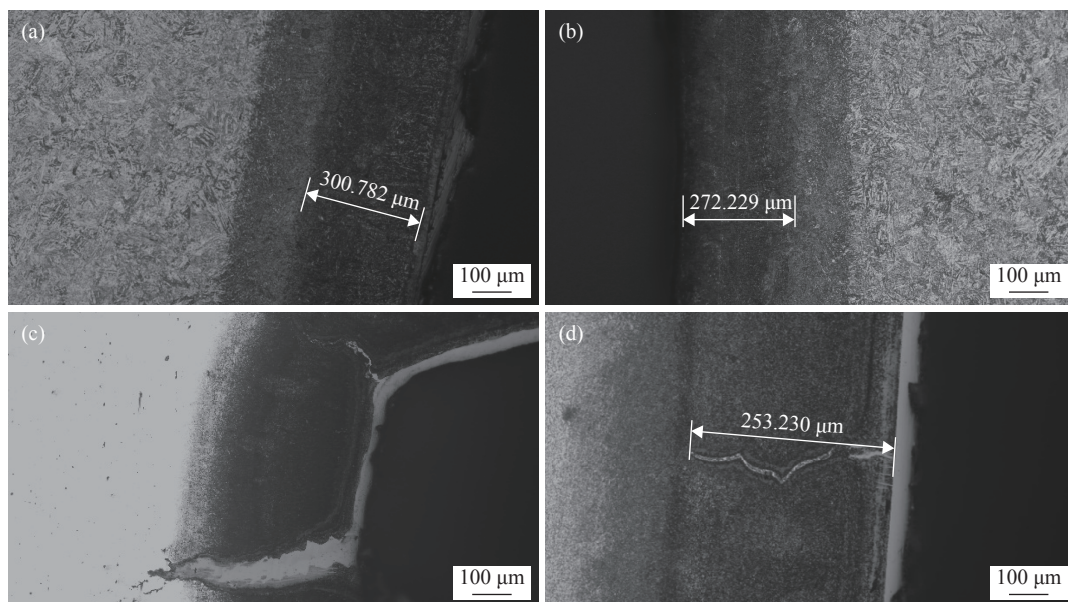


图3 断裂阀杆显微组织: (a) 阀杆外层; (b) 阀杆中心平衡孔内表面; (c) 阀杆外表面螺旋纹根部圆弧过渡处裂纹; (d) 阀杆外表面渗氮层微裂纹

能、抗松弛性能和工艺性能, 常用于生产汽轮机阀杆及高温紧固螺栓等部件^[8-9]。而断裂阀杆的 Ni、W 元素含量明显高于标准要求, 与原供货说明书不符,

实测断裂阀杆合金元素含量接近于 GB/T 1221—2007《耐热钢棒》标准中 1Cr11Ni2W2MoV 的元素含量^[10], 经分析应为材质错用。

表1 阀杆样品主要化学成分和相关耐热钢棒标准成分 (质量分数)

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	V
本文样品	0.17	0.67	0.40	0.025	0.009	11.24	1.79	1.41	0.28	0.22
2Cr12NiMoWV	0.20~0.25	≤0.50	0.50~1.00	≤0.030	≤0.020	11.00~12.50	0.50~1.00	0.90~1.25	0.90~1.25	0.20~0.30
1Cr11Ni2W2MoV	0.10~0.16	0.60	0.60	0.035	0.030	10.50~12.00	1.40~1.80	1.50~2.00	0.35~0.50	0.18~0.30

扫描形貌分析

利用扫描电子显微镜对中压调节汽阀阀杆的微观形貌进行分析, 如图 4(a) 所示。可以看出阀杆外表面的螺旋纹根部圆弧过渡处裂纹向内延伸并已扩展至基体, 裂纹内部存在较厚的覆盖层。如

图 4(b) 所示为使用能谱仪对覆盖层元素分析结果, 覆盖层的主要化学元素为铁、铬和氧, 说明覆盖层主要是铁、铬的氧化物, 为汽轮机运行中在裂纹内生成的氧化腐蚀产物, 可判断该裂纹为陈旧性裂纹。

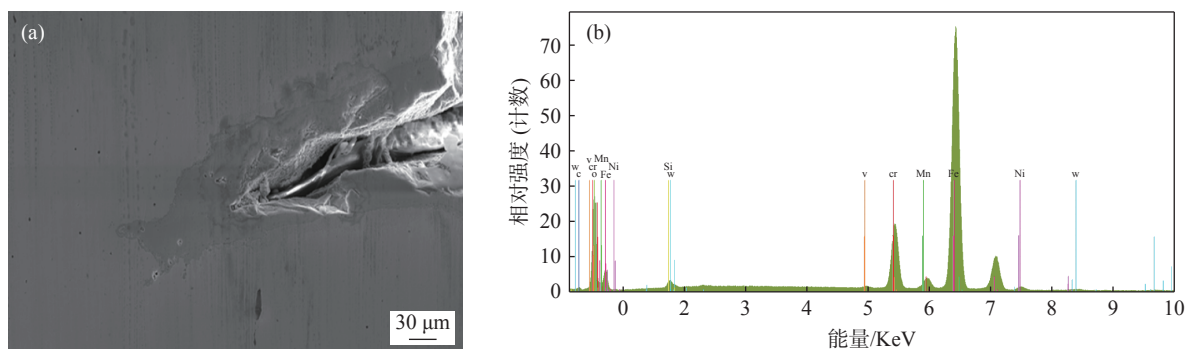


图4 断裂中压调速汽阀阀杆扫描电镜微观形貌: (a) 裂纹形貌; (b) 裂纹内氧化层能谱

力学性能检测与分析

对中压调节汽阀阀杆进行力学性能检测,按照 GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》要求,利用 ZBC-300B 型数字冲击试验机对阀杆进行冲击性能测试,核定其抗冲击性能是否合格。

按照 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分:试验方法》要求,利用全自动 TUKON-2500 型显微维氏硬度计对阀杆进行维氏硬度测试。按照 GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》^[1]换算出对应的布氏硬度值低于 GB/T 8732—2014 标准要求,检测结果见表 2。结果显示,断裂的中压调节汽阀阀杆虽然实测冲击吸收能量满足阀杆要求牌号 2Cr12NiMoWV 的性能指标,但是远低于材质 1Cr11Ni2W2MoV 的冲击吸收能量,且硬度也低于标准要求下限。根据成分分析可以判断所研究阀杆材质更接近 1Cr11Ni2W2MoV,说明该阀杆用钢在生产过程中,可能由于夹杂物缺陷、杂质含量以及微裂纹萌生等因素导致了明显的脆化。

表 2 阀杆样品力学性能

试样	冲击吸收能量/J	硬度, HBW
研究阀杆	14	255
2Cr12NiMoWV*	≥11	277~311
1Cr11Ni2W2MoV**	≥71	269~321

注: *采用 GB/T 8732—2014 标准; **采用 GB/T 1221—2007 标准。

实验结果分析

实验从宏观形貌、裂纹扩展、微观组织以及渗氮层厚度等方面详细分析了断裂阀杆的性能。从宏观形貌角度分析,阀杆中心平衡孔存在明显的偏心,在使用过程中应力集中程度高,十字孔内壁存在平行于孔径的轴向裂纹。

阀杆的基体组织为回火马氏体,内外表面渗氮层厚度分别为 272 和 300 μm,与阀杆的常规组织和渗氮层厚度一致,未见到明显差别。此外,在断裂阀杆外表面的螺旋纹根部圆弧过渡处有由外向内延伸的裂纹,且裂纹内部由氧化物填充,外壁也能观察到数条平行的微裂纹,经观察主要为陈旧性裂

纹,说明阀杆在某次启闭过程中发生断裂后而再进行过操作,停留在某一位置且未影响到机组正常运行。

化学成分分析显示,阀杆所选用的钢种更接近于 1Cr11Ni2W2MoV 材质,而非常用的 2Cr12NiMoWV 合金,阀杆硬度及冲击吸收功明显低于 1Cr11Ni2W2MoV 标准,表明该阀杆材质具有明显的脆化倾向。

另外从机组运行情况来看,在机组启停和变负荷条件下,通过操纵弹簧促使阀门快速启闭,阀杆本身会承受汽流变化带来的冲击载荷。因此,阀杆断裂与其承受较大应力有关^[6]。

结束语

(1) 造成本次中压调节汽阀阀杆断裂主要原因:

(a) 阀杆渗氮时未对排气孔壁与中心平衡孔壁进行保护,也进行了渗氮处理。由于阀杆“十字”排气孔承载面积小且偏心,应力集中程度较高,运行过程中裂纹逐渐于中心平衡孔表面的渗氮层萌生并不断扩展;

(b) 阀杆自身材质与设计材质不符,冲击性能虽然满足使用要求但阀杆自身已出现脆化特征,进一步促进了裂纹的扩展;

(c) 阀杆在服役时承受冲击载荷变化产生交变应力,随着机组运行时间增加,裂纹不断扩展,最终发生疲劳断裂。

(2) 近年来,受火电机组深度调峰逐步加大影响,电网系统对发电机组一次调频的要求日益提高。为满足电网一次调频规定,汽轮发电机组采用数字式电液控制系统(DEH)频繁控制调节阀开度以实现机组负荷快速微调,导致蒸汽调节阀进汽系统的调整频率及幅度大幅增加,对承受冲击载荷的阀杆可靠性提出了更高的要求。因此只有使用性能优良的金属部件、采用科学规范的操作方式及正确的日常检查防范措施,方可实现机组运行的本质安全。建议如下:

(a) 对库存阀杆进行全面检测,发现不满足设计要求的及时标记处理。阀杆采购时须严格按照原厂家设计要求进行,并审核制造厂产品质量检验等相关资料。确保阀杆性能指标满足设计要求,使用

前全部进行光谱复核,防止错用。

(b) 运行期间做好定期汽门活动实验,个别实验尽量集中进行。同时加强阀门力矩保护等装置的日常巡检力度。

(c) 开展规范调节汽阀操作培训,运行人员应了解结构工装,能够精准操作,重视阀门开度指示数值变化。

(d) 每次检修时对阀杆进行全面的金属检测,及时发现并消除存在的质量隐患。

参考文献

- [1] 马明明. 火力发电厂三大主要设备的认识. 现代商贸工业, 2011, 23(15): 277
- [2] 李建军. 国产超临界 600 MW 汽轮机再热调节阀杆断裂原因分析. 黑龙江科技信息, 2014(23): 60
- [3] 苏利辉. 600 MW 汽轮机主机汽门杆断裂原因分析. 科学技术创新, 2017(27): 4
- [4] 张涛, 田峰, 陈浩, 等. 超临界汽轮机中压调速汽阀 2Cr12NiMo1W1V 钢阀杆断裂原因分析. 理化检验 (物理分册), 2015, 51(4): 278
- [5] 孙强, 陈国星, 付鑫, 等. 汽轮机调节阀杆断裂的原因分析. 中国设备工程, 2022(3): 178
- [6] 句光宇. 汽轮机主汽门 2Cr12NiMo1W1V 门杆断裂原因. 热加工工艺, 2020, 49(22): 162
- [7] 中国钢铁工业协会. GB/T 8732—2014 汽轮机叶片用钢. 北京: 中国标准出版社, 2014
- [8] 中国电力企业联合会. DL/T 715—2015 火力发电厂金属材料选用导则. 北京: 中国电力出版社, 2016
- [9] 张洲全, 涂湛, 何可龙, 等. 汽轮机高压主汽阀杆断裂原因分析. 汽轮机技术, 2016, 58(1): 78
- [10] 中国钢铁工业协会. GB/T 1221—2007 耐热钢棒. 北京: 中国标准出版社, 2007
- [11] 中国计量科学研究院. GB/T 1172—1999 黑色金属硬度及强度换算值. 北京: 中国标准出版社, 1999

作者简介: 史海燕 (1974—), 男, 山西应县人, 本科, 高级工程师; 研究方向: 火电厂金属技术监督管理及无损探伤。通信地址: 内蒙古磴口金牛煤电有限公司; E-mail: shihaiyan6@163.com。