

核电厂截止阀阀杆微裂纹老化检测技术研究

王鹏¹, 张彦召², 朱伟强¹, 王宝亮², 张松², 程真²

1. 广西防城港核电有限公司 广西防城港 538000

2. 苏州热工研究院有限公司材料工程技术中心 江苏苏州 215001

摘要: 由于截止阀阀杆材料、热处理不当、应力集中、点蚀及晶间腐蚀等因素,加之在阀门开关过程中受力过载,因此导致断裂事件时常发生,影响核电机组安全运行。针对核电厂截止阀维修工作量大、拆装检查后无法重复使用的问题,开发截止阀阀杆微裂纹专用老化检测技术,实现了对阀杆断裂敏感部位微裂纹的有效探测,减少了阀门维修过程的工作量。

关键词: 截止阀; 阀杆; 微裂纹

Research on aging detection technology of micro-cracks in globe valve rod of nuclear power plant

WANG Peng¹, ZHANG Yanzhao², ZHU Weiqiang¹, WANG Baoliang², ZHANG Song², CHENG Zhen²

1. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, Guangxi, China

2. Shouzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Materials Engineering Technology Center, Shouzhou 215001, Jiangsu, China

Abstract: Due to the valve stem material, improper heat treatment, stress concentration, pitting, intergranular corrosion and other factors in the valve opening and closing process, the fracture event often occurs, which affects the safe operation of nuclear power units. In order to solve the problem that the maintenance workload of the stop valve in nuclear power plant is large and it can't be reused after disassembly and inspection, this paper develops a special aging detection technology for micro-cracks in the stop valve stem, realizes the effective detection of micro-cracks in the sensitive parts of the valve stem fracture, and reduces the workload in the valve maintenance process.

Keywords: globe valve; valve rod; micro-cracks

1 研究背景和必要性

截止阀属于强制密封式阀门,通过对阀杆施加扭矩,阀杆在轴向对阀瓣施加压力,使阀瓣和阀座密封面紧密贴合,阻止介质流通,实现介质输送、截止、调节功能,其密封性能直接影响核电厂设备安全可靠运行。由于截止阀阀杆材料、热处理不当、应力集中、点蚀及晶间腐蚀等因素,加之在阀门开关过程中受力过载,因此导致断裂事件时常发生,影响核电机组安全运行。阀杆作为阀门的标

准配件之一,连接阀芯和操作机构,控制阀门的开启和关闭,同时还起到密封作用,可以防止阀门受到介质冲击和腐蚀影响。一旦出现裂纹等缺陷,将会加大阀杆断裂风险,进而影响机组安全运行^[1]。为防止该类事件再次发生,影响核电机组安全稳定运行,有必要对同类型阀门进行全面检查,查找缺陷,及时发现隐患。

本文研究的阀杆广泛应用于核电厂手动截止阀,阀门结构如图1所示。阀杆为图1中标红色部

分,其中阀杆材质分为碳素钢和不锈钢两种材质,不锈钢是沉淀硬化马氏体不锈钢,该不锈钢因在马氏体基体上析出第三相而强化。阀杆直径为10~30mm;手轮直径为300~600mm。手轮带动阀杆转动,阀杆和手轮采用螺纹联接,阀杆上的防转动装置保证了阀杆螺栓的转动变为阀杆的升降活动,进而实现阀门的开关控制。

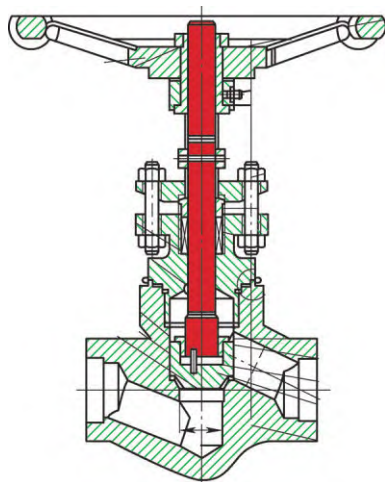


图1 核电厂手动截止阀阀门结构

通过对群厂服役阀杆断裂事件综合分析,阀杆发生断裂的主要原因如下。

1) 阀杆材料力学性能不满足标准要求、有氢脆倾向,以及表面加工质量不高。

2) 热处理工艺控制不当,存在晶界粗化现象,导致材料的塑韧性和耐蚀性降低,并易引发晶间腐蚀。

3) 阀杆机械加工退刀槽直角过渡,存在较大应力集中效应。

4) 海水介质下阀杆出现点蚀、晶间腐蚀现象。以上这些因素直接或间接导致阀杆内部出现微裂纹,进而在外力作用下引发断裂。断裂位置多数集中在阀杆的根部,而根部位于阀体中,无法通过目视检查发现阀杆断裂情况,需要每次大修拆解阀门才能检查阀杆断裂情况(见图2)。

该截止阀阀杆受力主要来自系统启动和停止过程中流体介质对阀杆的冲击力、阀门开起和关闭过程中受到的剪切力,以及其他可能经受的外部应力。阀杆上有防转动装置,仅做升降动作,扭矩作用力在转动机构以上阀杆部位,轴向力在阀杆螺纹区域,其中第二至第三个螺纹处为应力集中部位,



图2 阀杆断裂图片

阀杆盘根密封处以下的轴向力转化为盘根的摩擦力。阀杆受到的拉应力远小于阀杆材料的许用应力,因此正常操作阀杆不会导致阀杆发生断裂,微裂纹主要来自阀杆长期服役过程中腐蚀介质的影响,开发阀杆微裂纹在线检测技术应重点关注阀门自身受力及其失效机理。

2 试验方法

截止阀阀杆微裂纹在线检测受阀杆材质、结构形式、规格尺寸、服役受力状态,以及现场可进行检测的位置等多方面因素制约。本文结合核电现场阀杆可检测的部位,应用无损超声波技术开展阀杆微裂纹在线老化检测技术的研究。图3所示为阀杆可用于检测的部位,有以下两种。

第一种:在阀杆端面实施纵波扇扫检测。

第二种:在阀杆光杆圆柱面实施横波扇扫检测。

本文选取的阀杆直径为12mm,长度为200mm,

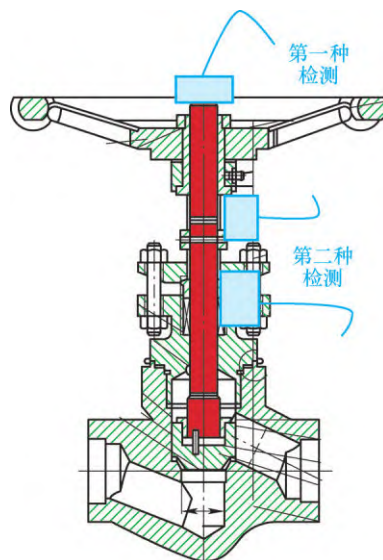


图3 阀杆可用于检测的部位

该阀杆结构形式复杂,杆部带有挡销孔、螺纹端面有孔,且端面直径较小,对超声波的传播能量衰减很大,目前的探头制作工艺还无法满足,因此第一种端面检测部位不适用本次选取的截止阀阀杆。在不对阀门进行全部解体、仅松开填料压板和填料压套的情况下,对在阀杆光杆圆柱面实施检测,能够实现对阀杆微裂纹的老化检测。阀杆最容易出现缺陷的位置为倒密封处,被安装在阀门内部且在最远端,无法直接进行目视检查,因此倒密封处的缺陷能够检测,也就能够实现整根阀杆的微裂纹老化检测。

阀杆可达位置距倒密封的距离最小为50mm,最大距离为100mm,阀杆表面呈圆面状,普通平直探头无法开展缺陷检测,因此需采用相控阵扇扫描方式进行缺陷的全面检测,该技术利用计算机控制探头来实现超声波发射与接收的检测,通过调整阵列换能器各阵元发射与接收的相位延迟,合成在一定范围内有聚焦、偏转等效果的声束,以达到识别缺陷的目的。换能器由多个晶片组合而成,每个晶片的激发时间均由主机单独控制,一个换能器可形成多种声场,可提供比单个或多个换能器系统更大的检测范围和更强的检测能力。缺陷检测过程中探头前后位置不动,通过软件调节参数可形成需要的声束,检测过程实时成像。因此,采用特制探头同时应用相控阵技术即可完成若干角度的扫查,解决倒密封部位难以检测的问题,进而实现整根阀杆微裂纹的老化检测。综上所述,本次试验老化探测技术选用第二种方案,即在阀杆光杆圆柱面实施横波扇扫描检测。

2.1 检测装置的设计

由于阀杆为细长状,需首先考虑超声波在阀杆中的穿透能力,而影响超声波在螺栓中穿透能力的关键参数是探头的有效面积与探头频率的选取,因此相控阵探头的选取及优化极为关键,根据阀杆的规格、现场检测空间、探头的扫查位置,以及所需波形和角度范围等综合因素,在满足信噪比的情况下,为提高小缺陷的分辨率,选择探头频率为7.5MHz,为使探头与工件接触面直径相匹配,制造合适的楔块,设置横波扇扫描检测,通过计算或声束仿真模拟,以尽可能地覆盖需检测阀杆的检测区域^[2]。

2.2 检测试样的设计

为保证试块材质和结构与被检阀杆一致,采用新阀杆备件和拆卸下的阀杆进行制作,且与倒密封部位尺寸保持一致。在倒密封处加工矩形电火花槽模拟裂纹缺陷^[3]。由于不同角度超声波在杆体内多次反射也会有声程差异,可能造成不同角度的超声波信号检测到同一个刻槽时,在仪器屏幕上会产生多个不同声程的回波信号,所以一根阀杆只加工一个缺陷,为模拟倒密封处的裂纹缺陷,机械加工槽的宽度尽可能窄,加工深度为1mm、宽度为0.2mm的直切槽,另外增加两根倒密封处有腐蚀缺陷的两根阀杆进行对比,验证是否可以实现对阀杆微裂纹缺陷和腐蚀缺陷的检出。

2.3 检测方法的制定

在测试超声波相控阵技术的声束可达性时,采用相控阵探头,对阀杆备件和新拆卸的阀杆进行测试。首先将阀杆进行拆卸并缺陷加工,然后将阀门进行重装,分别测试探头距倒密封50mm、100mm时的结构信号;通过评估结构信号的反射幅度、信噪比等情况来评价相控阵在位检测的可行性。测试结果表明,阀杆上距倒密封处50mm、80mm、100mm位置,信号分辨力均较高,结构信号容易分辨,不会产生明显的干扰缺陷判断的信号。现以距越程槽100mm处检测为重点,制定相应的检测工艺^[4]。根据对所需声束覆盖范围进行的理论计算结果,将探头分别置于距越程槽100mm位置,使探头作周向线性扫查,找出反射体的最高信号;探头不需作前后移动,并调节增益使信号高度为80%FSH(满屏波高度)。在对比试块上进行扫查,将检出的反射体最高回波调节到80%FSH,得到相应增益读数。

3 结果与讨论

本文选取7根不同类型截止阀阀杆开展验证试验,如图4所示。7根阀杆具体信息见表1。

根据试验阀杆样品实际特点,选用满足老化检测要求的电气性能和声波性能的特殊设计探头,同时结合便携式相控阵检测仪器,达到阀杆整体老化检测全覆盖。1#和2#样品是材质和规格尺寸相同的阀杆,1#样品人为进行了缺陷裂纹的加工,分别对两个阀杆进行老化检测。结果表明,检测效果良

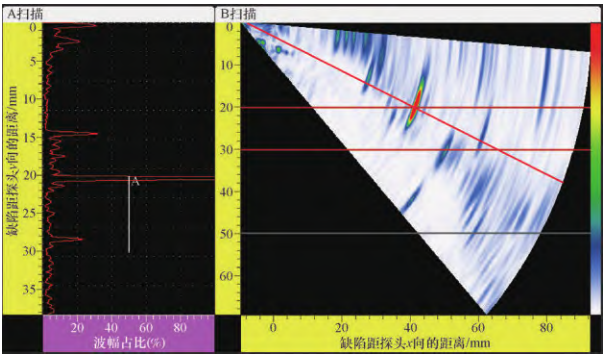
好，能够清晰检测到阀杆裂纹的存在，如图5所示。



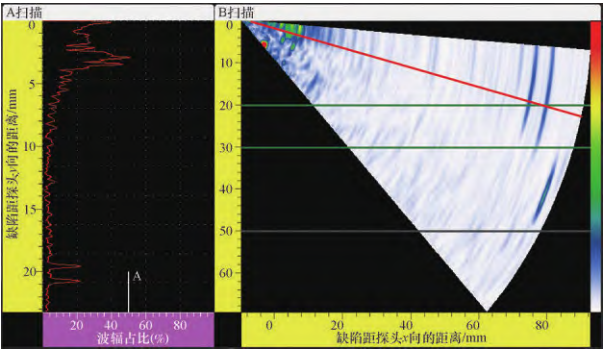
图4 试验阀杆样品编号

表1 试验用阀杆具体信息 (mm)

样品	阀杆材质	阀杆直径	阀杆长度	销孔距螺纹端距离	距离螺纹端缺陷最远距离	距离螺纹端缺陷最近距离
1#	不锈钢	16	230	77.3	110	104
2#	不锈钢	16	230	77.3	无缺陷	无缺陷
3#	不锈钢	21	235	90	155	115
4#	不锈钢	13	210	70	150	无缺陷
5#	不锈钢	13	150	70	105	85
6#	碳素钢	13	200	无孔	无腐蚀	无腐蚀
7#	碳素钢	13	200	无孔	150 (腐蚀)	135 (腐蚀)



a) 1#有缺陷阀杆老化检测结果



b) 2#无缺陷阀杆老化检测结果

图5 相同阀杆老化检测结果对比

本文对其他试验阀杆同样开展了微裂纹老化检测试验，结果见表2。

表2 试验阀杆缺陷老化检测结果

样品	探测结果	结果评价
3# (近螺纹端)	见图6	结果清晰，与阀杆实际情况相符，具备检测能力
3# (远螺纹端)	见图7	检测能量能够满足远端阀杆检测要求，缺陷清晰可见
4# (远螺纹端)	见图8	检测能量能够满足远端阀杆检测要求，缺陷清晰可见
5# (近螺纹端)	见图9	结果清晰，与阀杆实际情况相符，具备检测能力
6# (无缺陷)	见图10	检测界面干净，无缺陷显示，与阀杆实际情况相符
7# (腐蚀缺陷)	见图11	缺陷显示清晰，但无法区分缺陷类型 (裂纹、腐蚀)

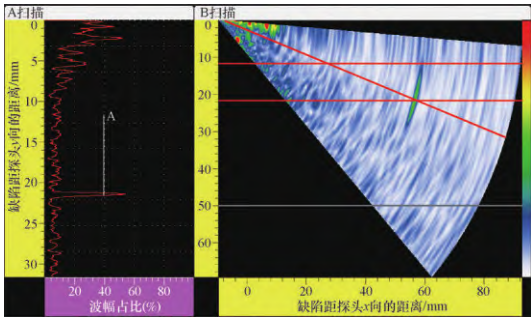


图6 3# (近螺纹端)

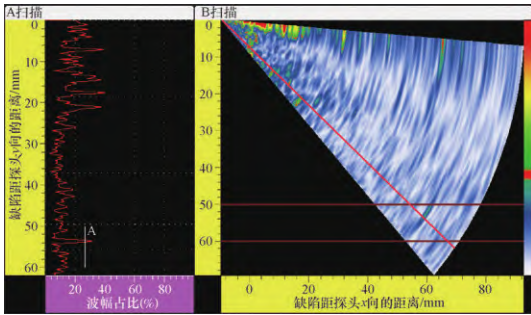


图7 3# (远螺纹端)

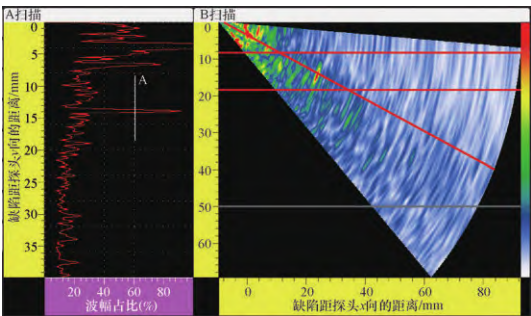


图8 4# (远螺纹端)

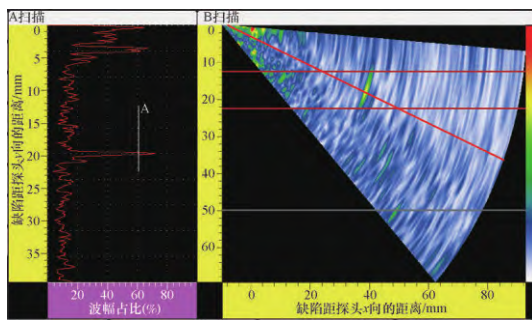


图9 5# (近螺纹端)

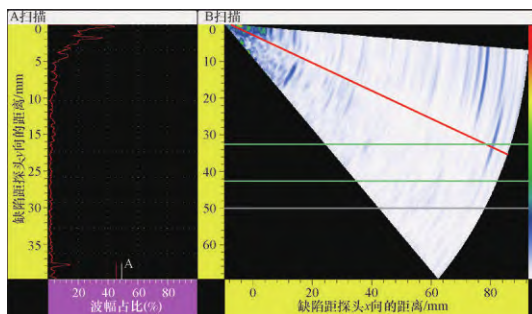


图10 6# (无缺陷)

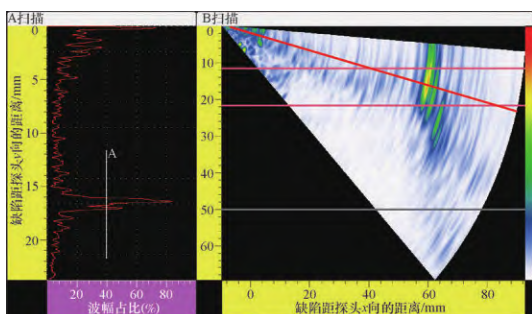


图11 7# (腐蚀缺陷)

综合上述试验阀杆老化检测结果,得出以下结论。

- 1) 阀杆老化探测结果与阀杆实际情况相符,能够有效探测阀杆微裂纹缺陷,缺陷显示清晰。
- 2) 距离螺纹近端缺陷检测效果强于远端缺陷,说明阀杆长度越短,检测效果越好。
- 3) 该老化检测技术能够检测出阀杆缺陷,但无法区分缺陷类型,如无法区分裂纹和腐蚀^[5, 6]。

4 结束语

通过结合截止阀阀杆现场服役环境和维修更换过程中的实际难点,开发出截止阀阀杆微裂纹专用老化检测技术,实现了对阀杆断裂敏感部位的微裂纹有效检测,减少了阀门维修过程中大量的工作量。该技术能够实现在阀门免拆装情况下对整根阀

杆内部缺陷进行老化检测,可在线实施内部缺陷检测工作。

本文只针对阀杆缺陷的老化检测可行性进行初步研究,后续将结合不同类型阀杆缺陷开发专门老化检测工艺,建立检测指标,明确不同阀杆的老化检测精准度。随着现代精密制造技术逐步发展,特别是晶片加工制造技术的进步,阀杆微裂纹老化检测技术将不断发展,能够实现核电截止阀阀杆微裂纹大规模老化检测应用。

参考文献:

- [1] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器, 2014, 28: 925-927.
- [2] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1993.
- [3] 李衍. 焊缝超声检测相控阵参数与缺陷显示的相关性[J]. 中国特种设备安全, 2009, 25 (12): 37-41.
- [4] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49 (6): 89-95.
- [5] 邹龙江, 高路斯, 侯晓多. M12奥氏体不锈钢螺栓断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2011, 36 (9): 165-168.
- [6] 闫敬明, 张骏, 郑准备. 350MW超临界直流锅炉高旁阀阀杆断裂原因分析[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (6): 65-68.

MW 20240709