

# 核电厂二回路管道应对流动加速腐蚀机理研究

邓宏伟

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 针对核电厂二回路管道的流动加速腐蚀现象, 对其产生的机理进行了探讨, 对流动加速腐蚀的在役检查措施在西方发达国家和中国的发展历程以及现状进行了介绍, 重点对工程设计过程中应对流动加速腐蚀所采用的方案进行了分析和论述, 并对在役检查所能采取的方案和措施进行了探讨, 可供同类核电厂的二回路管道在工程设计过程和检查措施的制定方面提供参考。

**关键词:** 核电厂; 流动加速腐蚀; 二回路管道

中图分类号: TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)01-0051-04

## Research on Flow Accelerated Corrosion Discussion for Secondary Loop Piping of Nuclear Power Plant

DENG Hongwei

(Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Based on the flow Accelerated Corrosion on the Secondary loop Piping of Nuclear Power Plant, this Paper Discussed About the Mechanism, Introduce the in Service Inspection Development in Different Country and also in China. To deal with FAC, this Paper Discussed the ways that can be Applied in the Design Process and Present the Available Scheme to Minimize it During the in Service Inspection, Which can be a Reference for such kind of Nuclear Power Plant.

**Key words:** nuclear power plant; flow accelerated corrosion; 2nd loop piping

流动加速腐蚀(Flow Accelerated Corrosion, 简称 FAC)现象, 在核电厂二回路汽水管道系统(如抽汽、疏水、给水、汽水分离再热器管道等)中普遍存在。根据全世界超过 12 000 堆·年的统计数据表明, FAC 约占据核电站管道失效的 33%, 在所有管道失效因素中名列第一位<sup>[1]</sup>。

为确保核电站二回路管道安全, 预防和减少因 FAC 导致事故的发生, 有必要从工程设计、安装、在线监督等方面加强管理。本文重点探讨在设计过程中考虑减缓流动加速腐蚀所采取的措施, 以及建立管道的监督检查制度, 以预防和减小这类管道的失效, 为同类核电厂的二回路管理工程设计和在役检查提供参考。

### 1 流动加速腐蚀发生的机理及危害

流动加速腐蚀是指承载流体介质的碳钢或者低合金钢管道, 其内壁保护性的氧化膜被水流或多相混合流体溶解腐蚀, 并在流体流动和冲刷作用下, 溶解的成分被带走, 加速了管道腐蚀过程的进行, 导致管道内壁腐蚀和减薄加快并最终失效的一个过程。

流动加速腐蚀发生的机理, 可由图 1 来说明: 钢管的内表面覆盖了一层  $Fe_3O_4$  保护膜, 在远离保护膜区域的主流区的流体流速较快, 靠近氧化膜流体边界层的流速较慢; 如果主流区中溶解的铁离子未达到饱和, 则边界层中已经溶解的铁离子会不断向主流区中迁移, 因而在边界层中溶解的铁也处于不饱和状态, 故氧化膜中的铁就会溶解到未饱和的边界层中, 使  $Fe_3O_4$  氧化膜以一定的速率溶解。另外, 氧化膜的孔隙内充填有水, 金属基体腐蚀产生的铁离子可通过这个通道直接扩散到氧化膜外的边界层。这

收稿日期: 2014-10-01

作者简介: 邓宏伟(1974), 男, 四川射洪人, 高级工程师, 学士, 主要从事电厂热能动力工程设计工作(e-mail)denghongwei@gedi.com.cn。

3个区域(主流区、边界层、氧化膜)不断发生溶解铁的迁移,而高速流动的水又将迁移于水中的溶解铁带走,从而导致钢铁表面的不断腐蚀<sup>[2]</sup>。

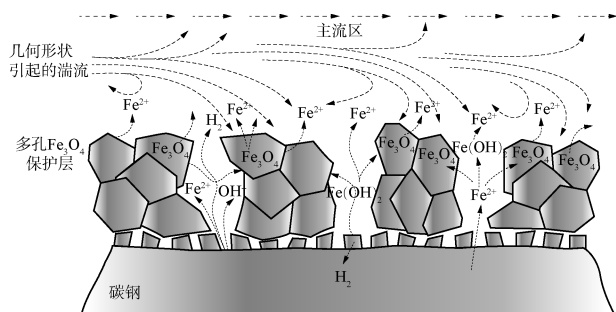


图1 流动加速腐蚀机理示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of FAC

流动加速腐蚀的发生与管道内的介质特点密切相关。在常规火电站中,主汽、再热、抽汽等大多数蒸汽管道都是过热蒸汽, FAC现象并不明显,很少有报告因FAC导致的事故发生。在核电厂中,由于工质的特点,比如由蒸汽发生器产生并进入汽轮机的主蒸汽为湿蒸汽,流动加速腐蚀现象就比较明显;另外凝结水系统具有一定温度的水介质也容易导致流动加速腐蚀。

流动加速腐蚀轻则导致管道局部破裂,工质泄漏;严重事故时将导致核电站停机停堆、财产损失和人员伤亡。从美国Surry核电站和日本Mihama核电站的事故教训就可以充分看到FAC所造成的损失和危害:1986年美国Surry核电站一根公标直径18 in的钢管破裂,导致4死4伤事故;2004年日本Mihama核电站一根公标直径22 in的钢管破裂,损失高达100亿日元;我国目前的在役核电站,虽然运行年限尚短,也有因FAC导致管道破裂而引起机组停堆的事故发生<sup>[1]</sup>。

## 2 FAC在役检查的发展历程及现状

美国、日本等发达国家对FAC在役检查的发展历程,可以作为我国核电站开展FAC在役检查的经验借鉴<sup>[1]</sup>:

美国核管会(NRC)的资料表明,早期建设的核电站,机组投运3~5年后就会发生汽水管道因FAC减薄和泄漏现象。经过多年的发展,美国对于FAC的管理过程经历了初步认识阶段、重视阶段和管理完善阶段,开发出了CHECWORKS软件,供用户进行管线筛选、测点筛选、腐蚀速率预测和修

正、检测数据管理和利用等工作。采用加强水质管理或通过更换材料等设计变更来控制 and 缓解FAC。在1993年颁布的ASME B31.3非强制性附录IV“动力管道系统的腐蚀控制”中,分别为核安全级和非核安全级壁厚减薄的管道提供了结构完整性评价和验收准则。美国核管会在1998年通过的49001号审查程序“冲蚀-腐蚀/流动加速腐蚀监测大纲的审查”,NUREG-1801, VOL2 Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report中规定应建立管道FAC老化的管理大纲。

日本在1990年5月发布了“压水堆核电站二回路管道壁厚管理指南”,要求各核电站自主的依据该指南建立管理大纲、编制检测计划、进行二回路管道壁厚管理;2003年10月,二回路管道壁厚管理工作成为日本定期安全审查的内容之一。2004年Mihama核电站事故发生之后,日本成立了壁厚减薄特殊安全工作组,壁厚的测量及管理成为核安全监管要求的范围。2006年结合其收集的20多万测厚数据和国外的经验反馈,制定了“PWR管道壁厚减薄管理技术要求JSME S NG1-2006”。

我国核电技术的发展起步较晚,因此对于FAC的危害性认识和经验的积累也是在机组的运行过程中逐步积累和提高的,主要是借鉴常规火电工程和日本的相应管理导则,并参考火电工程的金属技术监督规程在开展工作<sup>[3]</sup>。

目前国家能源局标准《压水堆核电厂常规岛流动加速腐蚀敏感管线筛选导则》(NB/T 25033-2014)已经于2014年8月颁布实施,这将成为我国压水堆核电厂常规岛开展流动加速腐蚀敏感管线的判别、敏感管件的筛选方法、检测评估以及敏感管线、敏感管件的调整要求及预防性管理要求的指导性文件。国核电站运行服务技术公司开发了核电厂二回路管道壁厚减薄管理信息交流平台,可实现各核电站的信息共享,有助于提高各运行核电站的FAC管理水平。

## 3 应对FAC过程的探讨

### 3.1 设计过程采取措施的探讨

从电站设计开始时就充分考虑流动加速腐蚀的影响因素并将其减小到最低,无疑是最可靠的手段。

国内外多年的经验表明,FAC的影响因素包括水化学、蒸汽干度、介质流速、介质温度、管道材

质及几何形状等方面<sup>[4]</sup>。

对于压水堆核电站来说, 由于蒸汽发生器产生的蒸汽是具有一定湿度的饱和蒸汽, 通常只能通过汽水分离再热器(MSR)进行再热, 提高蒸汽的干度, 减缓湿蒸汽对汽轮机中、低压缸叶片的腐蚀。

从电站工艺设计的角度来看, 重点探讨在管道材质、介质流速及几何形状等方面如何减缓 FAC。

### 3.1.1 选择合适的管道材料

在岭澳核电二期工程的初步设计阶段, 对由法国 ALSTOM 公司总包的大亚湾核电站、岭澳核电一期工程项目中使用过的各种管道材料进行了充分研究论证, 经过比选, 在下列敏感管线系统中选用了含 Cr 的碳钢材料和低合金钢材料管道, 最大程度的实现了管道材料的国产化和减缓了 FAC 的影响:

1) 凝结水抽取系统(CEX)和低压给水加热器系统(ABP)上的主凝结水管路道, 采用了 20 控 Cr 的碳钢材料(即普通 20 钢, 添加了质量分数 0.2% 的 Cr 元素)。

2) 抽汽系统管线(AHP), 在进入汽水分离再热器(MSR)之前, 介质属于湿蒸汽, 管道选用了 Cr 的质量分数为 2.25% 的材料 ASME A335P22。

3) 在疏水管道调节阀后, 由于介质为汽水两相流, 采用了国产的不锈钢材料 022Cr19Ni10。

国内某高校和科研院所的实验研究表明, 当管道材料中的 Cr 含量大于 0.1% 时, 管道壁厚的相对减薄速率大大降低, 如图 2 所示<sup>[5]</sup>:

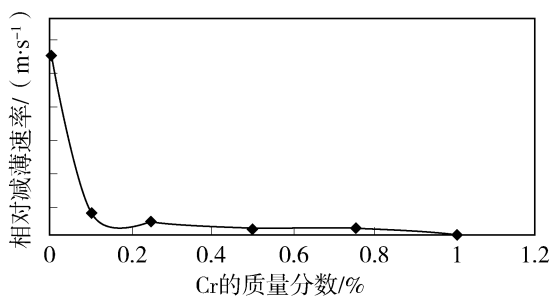


图2 Cr 含量与减薄速率的关系曲线

Fig. 2 Relation Between Cr Content and Pipe Wall Thickness Decreasing

上述研究结果也充分证明了在常规岛设计中选择含 Cr 的管道材料, 对于减缓 FAC 的影响是正确和有效的措施。

### 3.1.2 控制介质流速

管道流速对流动加速腐蚀的影响很明显。在常

规火电设计中, 对于类似调节阀后的疏水管道, 由于介质为汽水两相流, 流速很高, 通常采用合金钢并加大和加厚调阀后管道的手段来应对腐蚀。

阿海珐技术中心的研究人员曾经做过壁面减薄与流速关系的试验, 其试验数据如图 3 所示<sup>[2]</sup>。

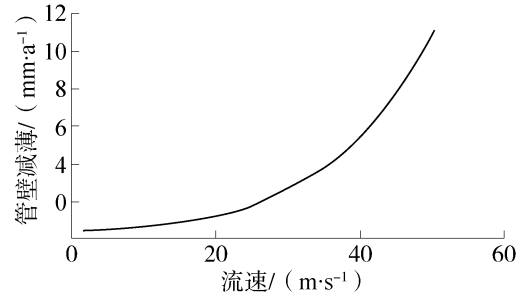


图3 壁面减薄与流速的关系

Fig. 3 Relation Between Pipe Wall Thinning and the Fluid Flow Rate

从上图可以看出: 在低流速和高流速时, 管壁减薄的速率与流速成线性关系; 在中等流速时, 管壁减薄的速率与流速的立方成线性关系。因此可以看出: 随着流体流速的不断增大, 对 FAC 的影响也在不断增大。

在《火力发电厂汽水管道设计技术规定》及美国 EBASCO 公司的设计导则中, 对湿蒸汽的流速规定都比较苛刻, 通常在 20 ~ 35 m/s 之间, 远远低于饱和蒸汽和过热蒸汽所允许的流速。因此设计中在管道规格的选取时, 通常以介质流速的下限作为管道规格选择的基本原则。虽然采用该方案会使管道的规格稍微偏大, 成本有所增加; 但是管道的流速低、流阻小, 对抑制 FAC 有利。

### 3.1.3 布置设计优化

从布置设计的角度来看, 通过优化管道的布置和改进部件的结构, 也可以有效的减少、抑止或缓解 FAC 的发生。

大量的统计数据表明, 在节流孔板的下游管道, 流体冲刷腐蚀现象十分严重<sup>[6]</sup>, 因此在布置的时候将孔板靠近接受的容器或设备布置, 将大大减缓 FAC 对管道的冲蚀。

另外管壁的粗糙度和管道的几何形状(如管道连接处、阀门和弯头处)等也对 FAC 有较大的影响。在设计加热器疏水、凝结水再循环等管道时, 调节阀的布置尽可能靠近下游的接收容器, 如果条件许可, 调节阀或者疏水阀应直接与容器连接; 条

件不许可时在调节阀后的第一个转向弯头采用三通加堵头的组合型式,能有效的减小因汽水两相流导致的管道冲刷腐蚀和振动。

### 3.1.4 水化学

对于碳钢, pH 值对 FAC 有影响。由于  $H^+$  参与 FAC 氧化还原反应和输运过程,这决定着它对 FAC 过程有重要的作用。研究表明,当 pH 值控制在 8~9 时, FAC 速率随着 pH 值的增加而逐渐减小;当 pH 值控制在 9.5 以上时, FAC 速率随着 pH 值的增加而急剧减小<sup>[2]</sup>。

水化学主要是在给水管道中加入合适的化学物质,控制给水的 pH 值,在管道内壁形成保护膜,达到减缓腐蚀的目的,该方法广泛应用于核电厂和常规电厂的给水系统中,也是核电站能通过合理的化学控制来达到有效地抑制二回路管道材料发生 FAC 的几个重要参数之一。

### 3.2 增加管道壁厚应对 FAC 的探讨

有些观点认为,既然流动加速腐蚀这么厉害,为何不考虑在管道设计选型时将壁厚取更大的裕量?

《火力发电厂汽水管设计技术规定》(DL/T 5054—1996)中对管道壁厚的计算公式如下<sup>[7]</sup>:

按直管外径确定时:

$$S_n = \frac{pD_2}{2|\sigma|'n|2Yp} \quad (1)$$

按直管内径确定时:

$$S_m = \frac{pD_i + 2[\sigma]\eta\alpha = 2Yp\alpha}{2|\sigma|'n - 2p(1 - Y)} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为考虑腐蚀、磨损和机械强度要求的附加厚度, mm。

相关条文说明如下:对于一般的蒸汽管道和水管道,可不考虑腐蚀和磨损的影响;对于高压加热器疏水管道、给水再循环管道、排污管道和工业水管道,腐蚀和磨损裕度可取用 2 mm;对于腐蚀和磨损较严重的管道,如果估计到管子在使用中腐蚀和磨损的速度超过 0.06 mm/a,则腐蚀和磨损裕度应为管道运行年限内的总腐蚀和磨损量;机械强度要求的附加裕度,视具体情况确定。

在 ASME B31.1 动力管道标准中,管道的壁厚计算公式也相同,腐蚀裕量的选取也同样需要考虑各种因素。

对于 FAC 现象导致壁厚减薄重点发生的部位,

主要发生在一些如弯头、法兰、孔板后和调阀后管道等地方,如果考虑在管道壁厚计算时提高腐蚀裕量,将整条管道壁厚加厚,所带来的结果将是:

1)管道的重量大大增加,导致相关管道和支吊架采购成本及土建费用的增加。例如一根  $\phi 508 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的无缝钢管,管道壁厚每增加 1 mm,管道重量增加约 10%;

2)设备的接口推力、力矩数值超出设备所允许的数值;如果要满足设备的允许值,则管道布置走向必须修改,增加更多的  $\pi$  型以减小对设备接口的影响,进一步增加了管道的长度和成本。

3)由于难于确定各管道的流动加速腐蚀速度,且核电站的设计寿命达 40~60 年,若采取加厚措施,管道的设计壁厚将会太大。

所以采取加大腐蚀裕量,即选取壁厚更大的管道的方法既不经济也不现实。

综合 3.1 及 3.2 所述,在设计过程应对流动加速腐蚀,重点还是应该选取合适的管道材料及规格,在布置上关注重点部位,并采取合适的水化学手段,可以达到减缓或抑制 FAC 的目的。

### 3.3 在役过程应对 FAC 的探讨

通过统计分析发现,流动加速腐蚀的敏感部位通常在碳钢制作的汽水管线中的阀门、节流孔板、弯头、三通、大小头、弯后直管段等结构突变区域。

从运行监督的角度来说,加强在役核电站上述重点敏感部位管道的监督,需及时更换掉不合格的管段。

核电厂运行单位应结合国际和国内相关规范的指引,建立长期、完整、有效的管理体系。在 FAC 监督管理体系中下述内容需予以考虑<sup>[8]</sup>:

1)如何有效的进行系统筛选和管线重要程度分级,以避免在 FAC 监督管理中过于保守或者出现疏漏。

2)对重点部位管道壁厚的检测与监测,做到测点的选择和分布满足 FAC 管理的需要。

3)检测计划的制定和细化,要考虑到部位敏感性排序情况,又要对监测计划进行系统合理的安排。

4)FAC 敏感部位管道剩余寿命的评价与管理,通过分析获得管道壁厚减薄的趋势,并动态的调整和优化所制定的检测计划。

(下转第 61 页 Continued on Page 61)

## 参考文献:

- [1] 彭兴虎, 张爱舟. 新疆兵团农三师图木舒克  $2 \times 50$  MW 热电联产工程 EPC 总承包主厂房布置优化专题 [R]. 2012.  
PENG Xinghu, ZHANG Aizhou. The Main Power Building Arrangement Optimization Special Report of Xinjiang Corps Nong-sanshi Tumushuke  $2 \times 350$  MW Cogeneration EPC Project [R]. 2012.
- [2] 王坚. 火力发电厂布置技术与信息化手段的运用 [J]. 电力建设, 2010, 31(4): 82 - 85.  
WANG Jian. Application of Layout Engineering and Information-based Method for Fossil-Fueled Power Plant Design [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 82 - 85.
- [3] 张爱舟, 杨蒨. 华能轮台  $2 \times 350$  MW 热电联产主厂房布置优化专题 [R]. 2011.  
ZHANG Aizhou, YANG Shou. The Main Power Building Arrangement Optimization Special Report of Huaneng Luntai  $2 \times 350$  MW Cogeneration Project [R]. 2012.
- [4] 黄军军, 李欣. 华能荆门一期 ( $2 \times 350$  MW) 热电联产工程主厂房布置优化专题 [R]. 2012.  
HUANG Junjun, LI Xin. The Main Power Building Arrangement Optimization Special Report of Huaneng Jingmen ( $2 \times 350$  MW) Cogeneration Project [R]. 2012.
- [5] 王君, 严志勇. 某热电厂  $2 \times 300$  MW 机组工程设计优化 [J]. 中国勘察设计, 2011(1): 118 - 120.  
WANG JUN, YAN Zhiyong. The Design Optimization for a  $2 \times 330$  MW Cogeneration Project [J]. China Investigation Design, 2011(1): 118 - 120.
- [6] GB 50660—2011, 大中型火力发电厂设计规范 [S].  
GB 50660—2011, Code for Design of Fossil Fired Power Plant [S].
- [7] 徐传海. 600 MW 级机组汽机房布置优化建议 [J]. 热机技术, 2009(2): 22 - 24.  
Xu Chuanhai. The Main Power Building Arrangement Optimization Suggestion for 600 MW Units of Power Plant [J]. Heat Power Technics, 2009(2): 22 - 24.
- [8] GB 50041—2008, 锅炉房设计规范 [S].  
GB 50041—2008, Code for Design of Boiler Plant [S].
- [9] 魏光军, 张凤玲.  $2 \times 330$  MW 机组侧煤仓设计特点的探讨 [J]. 新疆电力技术, 2010(4): 106 - 108.  
WEI Guangjun, ZHANG Fengling. The Discussion of Side Bunker Bay Arrangement Design Features About  $2 \times 330$  MW Units of Power Plant [J]. Xinjiang Electric Power Tech, 2010(4): 106 - 108.
- [10] 电力规划总院. 火电工程限额设计参考造价指标(2012年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.  
Electrical Planning and Design Institute. Quota Design Reference Cost Index of Thermal Power Project (2012 standard) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

(责任编辑 林希平)

(上接第 54 页 Continued from Page 54)

## 4 结论

作为工程设计单位, 在应对流动加速腐蚀的源头可以采用下列措施:

- 1) 对 FAC 敏感的管线选取合适的管道材料, 减缓流动加速腐蚀的发生。
- 2) 尽可能采用较低的管道的流速。
- 3) 优化管道、管件等的布置方案。
- 4) 采用合适的水化学方案。

作为业主运行单位, 可以在机组运行、维护和信息交流方面作下列工作:

- 1) 定期跟踪国外及国内的经验反馈, 形成一种长期有效的工作机制。
- 2) 对管道壁厚管理工程师进行定期培训, 提高监督和检测的技能。
- 3) 对电厂的管理大纲、检测计划、检测、监督程序要定期进行审查、评估和改进。

通过采用上述方法, 核电站二回路管道因 FAC 导致事故的几率将大大减少, 有利于我国核电站的

长期安全稳定运行。

## 参考文献:

- [1] 钟志民, 李劲松, 李锐. 核电厂二回路汽水管壁厚度管理的历史和进展 [C]. 中国核能行业协会, 上海, 2011.
- [2] 张桂英, 顾宇, 邵杰. 核电站汽水管壁流动加速腐蚀的影响因素分析及对策 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(2): 171 - 175.
- [3] DL/T 438 — 2009 火力发电厂金属技术监督规程 [S].
- [4] 尹成龙, 张乐福, 徐雪莲, 等. P11 钢在湿蒸汽中流动加速腐蚀性能的模拟与试验研究 [C]. 中国核能行业协会, 上海, 2011.
- [5] 石秀强, 刘晓强, 徐雪莲, 等. 核电厂设计过程中主蒸汽管道壁厚减薄问题的考虑 [C]. 中国核能行业协会, 上海, 2011.
- [6] 郑会. 核电厂二回路汽水管壁流动加速腐蚀管理的工程实践 [C]. 中国核能行业协会, 上海, 2011.
- [7] DL/T 5054 — 1996, 火力发电厂汽水管壁设计技术规定 [S].
- [8] NB/T 25033 — 2014, 压水堆核电厂常规岛流动加速腐蚀敏感管线筛选导则 [S].

(责任编辑 郑文棠)