

# 核电厂二回路金属管道流动加速腐蚀与防护的研究进展

乔睿鑫<sup>1,2</sup>, 董亮<sup>1</sup>, 陈建栋<sup>3</sup>, 邱晓波<sup>3</sup>

(1. 常州大学江苏省油气储运技术重点实验室, 常州 213164; 2. 青岛雅合科技发展有限公司, 青岛 266000;  
3. 无锡纽思铁科能源科技有限公司, 无锡 214187)

**摘要:** 综述了核电厂二回路管线的流动加速腐蚀研究现状。介绍了流体动力学因素、环境因素、材料因素对流动加速腐蚀的影响机理及规律,总结了流动加速腐蚀常用的研究方法和防护措施,最后对存在的问题及未来研究的方向进行了探讨。

**关键词:** 流动加速腐蚀; 影响因素; 研究方法; 防护措施

**中图分类号:** TG172 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2024)02-0010-08

截至 2020 年 8 月,全球可运行核电机组共 441 台<sup>[1]</sup>。核电厂二回路系统是发电系统的核心部分,碳钢、不锈钢、耐蚀镍合金、铜镍合金、钛合金等是二回路常用的金属材料。二回路给水管线、凝结水管线、疏水管线等不可避免地会发生流动加速腐蚀(FAC)。统计数据表明,FAC引起的管道失效量占管道失效总量的 33%,在所有管道失效因素中位列第一名<sup>[2]</sup>。为预防和减少 FAC 导致的事故,技术人员从 1970 年前后就开始对 FAC 进行了研究。这些研究主要集中在 FAC 的机理、影响因素、预防及缓解措施等三个方面。作者围绕核电厂金属管道的流动腐蚀、流动腐蚀影响因素、流动腐蚀的常用研究方法和有效的防护措施对前人的研究工作进行梳理和总结。

## 1 流动加速腐蚀的概念与机理

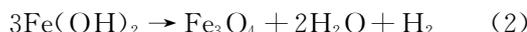
### 1.1 FAC 的概念

碳钢、不锈钢以及 Cr 合金等材料表面的氧化膜能够有效降低材料基体直接与外界接触造成的腐蚀。但表面的氧化膜与溶液接触会发生溶解,若溶液是流动的,还会加速溶解过程,该现象称为 FAC<sup>[3]</sup>。氧化膜溶解会导致金属基体暴露发生腐蚀,从而使材料厚度减薄,产生安全隐患。FAC 现

象在核电、石油和天然气行业都较为常见。

### 1.2 FAC 的机理

FAC 过程是基体-氧化膜界面和氧化膜-溶液界面的微观溶解(传质)过程。以碳钢为例,对 FAC 机理进行阐述。如图 1 所示,在基体-氧化膜界面处,基体中的铁通过氧化反应转变为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,反应如式(1)~(2)所示;在氧化膜-溶液界面处,主要发生氧化膜溶解产生可溶性  $\text{Fe}^{2+}$  这一过程, $\text{Fe}^{2+}$  通过流体边界层向主流区域扩散。因此,FAC 的整个过程可以视为金属氧化膜和基体的溶解引起了金属的减薄<sup>[4]</sup>。



## 2 FAC 的影响因素

FAC 的发生可以看作是两个相互影响过程<sup>[5]</sup>,即化学溶解和传质过程。当这两个过程的影响因素发生变化时,FAC 会随之产生偏移。这些影响因素可归结为流体动力学因素、化学环境因素、材料因素<sup>[6]</sup>。

### 2.1 流体动力学因素

流体在管道中的流动状态受流体流速、管路几何形状、流体各相比等影响。二回路系统中的主要介质为化学处理过的碱性水,在不同管段以过热干蒸汽、湿蒸汽、饱和液等形态存在。流动状态与流体形态都会影响 FAC 的传质过程,以下章节将对其进行展开说明。

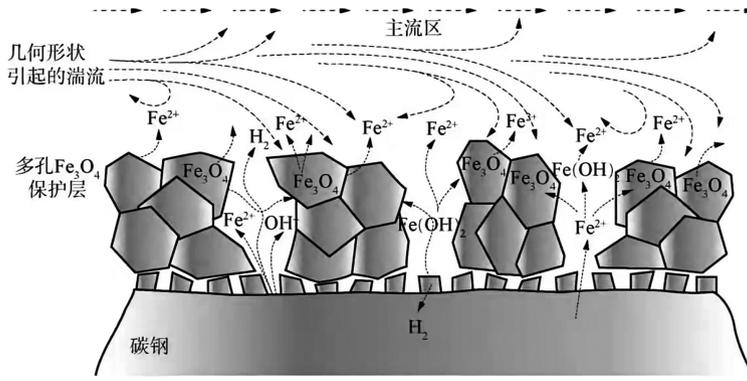
#### 2.1.1 流速

流动边界层是金属氧化膜溶解产生的铁离子向主流区域扩散的通道,其扩散速率(传质速率)与边

收稿日期:2022-03-17

基金项目:国家自然科学基金(51401017)

通信作者:董亮(1983—),副教授,博士,主要研究方向为腐蚀与防护,18911027127,dongliang@cczu.edu.cn

图1 碳钢 FAC 机理示意<sup>[2]</sup>Fig. 1 Schematic diagram of FAC process of carbon steel<sup>[2]</sup>

边界厚度成反比,流速越大,边界层厚度越小,则传质速率越快;伊成龙<sup>[7]</sup>测定了内径为 2.0、2.2、2.4 mm 的 P11 钢管在温度 273 °C 下的 FAC 速率,结果发现内径为 2.0 mm 的钢管减薄最严重。UTANOHARA 等<sup>[8]</sup>研究发现,90°弯头的 FAC 速率随着流速增加而增加,当流速为 0.39~5.74 m/s 时,对应的 FAC 速率为 0.1~0.35 mm/a,流速与 FAC 速率之间的关系是非线性的。SUBRAMANIAN 等<sup>[9]</sup>和 YONEDA 等<sup>[10]</sup>的研究得到了相似的结论,即 FAC 的速率与流速的 1.0~1.5 次幂成正比。SATO 等<sup>[11]</sup>通过数据拟合得到 FAC 速率与流速的 1.7 次幂成正比的结论。试验条件不同是导致幂指数存在差异的原因。

### 2.1.2 管道几何形状

当流道(孔板、变径、弯头、三通等)的几何形状发生突变时,会产生涡流、回流等现象,内部的传质过程发生变化。AHMED<sup>[12]</sup>分析了弯头、孔板等部件上下游流场及 FAC 速率的变化,发现流体流经管道部件会产生邻近效应,导致下游临近管线 FAC 减薄率上升近 70%;同时明确了受邻近效应影响的下游管线长度约为管道直径的 5 倍。马娜等<sup>[13]</sup>将某核电厂由于减薄而更换下来的弯头进行了 X 射线衍射分析,结合弯头先前的工作参数,发现弯头曲率过小是导致其减薄的主要原因。SINGH 等<sup>[14]</sup>通过试验研究发现流体流经管道连接焊缝时,会在焊缝下游产生涡流,导致焊缝处材料 FAC 加重。

### 2.1.3 流体各相比

二回路中的流体主要涉及气液两相流。FERNG 等<sup>[15]</sup>使用台湾核电站低压汽轮机进行了气液两相流 FAC 试验,并指出气液两相流系统中的腐蚀主要由液滴撞击氧化膜产生,重力、离心力、两相分离等是影响腐蚀的关键因素。AHMED 等<sup>[16]</sup>研

究发现,在雷诺数相同情况下,当入口流体中气相质量分数由 0.001% 增加至 0.003% 时,孔板下游管段的 FAC 速率峰值下降约 34.2%。李鹏<sup>[17]</sup>通过计算流体力学(CFD)软件模拟得到流速为 0.58 m/s 条件下,入口流体含气率(质量分数)在 0.1%~1.0% 范围逐渐增加时,弯头 FAC 速率从 0.37 mm/a 逐渐减小至 0.13 mm/a。

## 2.2 环境因素

环境因素是影响 FAC 的众多因素中不可忽视的因素,包括流体温度、pH、溶解氧含量等,以下将逐一对这些因素进行讨论。

### 2.2.1 温度

REMY 等<sup>[18]</sup>认为温度对 FAC 产生的影响是间接的,且具体表现在两个方面。一方面,随着温度的升高,溶液中亚铁离子含量降低;另一方面,温度对流体黏度和控制传质过程的亚铁离子扩散速率的影响非常大。对于单相流,最大腐蚀速率出现在温度为 130~150 °C 时<sup>[19]</sup>;对于两相流,最大腐蚀速率则出现在 100~250 °C 时<sup>[20]</sup>。在温度为 125、180、225 °C 时,碳钢表面氧化膜的厚度稳定在 1 μm 左右,125 °C 时氧化膜比较疏松,180、225 °C 时氧化膜变得比较致密,在温度超过 130 °C 时,碳钢表面氧化膜的孔隙率随温度升高而变小<sup>[21]</sup>。

### 2.2.2 pH

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的溶解与 FAC 速率有直接关系,当 pH<9.8 时,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的溶解度随温度升高而增大,当 pH 为 9.8~10.3 时,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的溶解度随着温度升高而降低<sup>[4]</sup>。这是因为温度影响了 Fe(OH)<sub>2</sub> 与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 转换的反应平衡常数<sup>[22]</sup>。王柱等<sup>[23]</sup>研究发现,在气液两相条件下,当某电厂二回路的给水 pH 由 9.0 提高至 9.6,给水中铁离子质量分数由 2.2 μg/kg 降至 1.0 μg/kg 时,管壁减薄速率下降约 100 倍。

### 2.2.3 溶解氧含量

JIANG 等<sup>[24]</sup>发现对蒸汽发电回路进行微氧处理后,管道内亚铁离子质量分数下降约 80%。这是由于加氧处理后,氧化膜表面的  $\text{FeOOH}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  更易转化为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。WOOLSEY 等<sup>[25]</sup>分别在 115 °C、pH 9.1 和 150 °C、pH 7.8 条件下对碳钢进行了腐蚀减薄试验。结果发现:当二回路中氧气质量分数为 2.1~3.0  $\mu\text{g}/\text{kg}$  时,碳钢的减薄速率保持在 0.99 mm/a,氧气质量分数达到 3.8  $\mu\text{g}/\text{kg}$  后,减薄速率迅速下降;在两种试验条件下,碳钢减薄速率的变化趋势相同,但在后一种试验条件下,减薄速率整体更大。SATO 等<sup>[11]</sup>通过试验发现:当溶解氧质量分数大于 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  时,碳钢几乎不发生 FAC,在氧气质量分数小于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$  的环境中,其 FAC 减薄速率约为 2.7 mm/a;表面已形成良好氧化膜的碳钢,在氧气质量分数小于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、流速为 6.3 m/s 的环境中腐蚀约 10 d 后,氧化膜会完全溶解。

### 2.2.4 腐蚀电位

由于氧含量对电极反应有很大影响,因此腐蚀电位对 FAC 的影响多与氧含量相关。SATO 等<sup>[11]</sup>在试验回路中先通入氮气除氧(0~30 d),使溶液中氧气质量分数小于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,再通入  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合物(30~70 d),使溶液中氧气质量分数大于 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,最后通入氩气除氧(70~90 d),使氧气质量分数小于 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。在此过程中,腐蚀电位、内径的变化如图 2 所示。

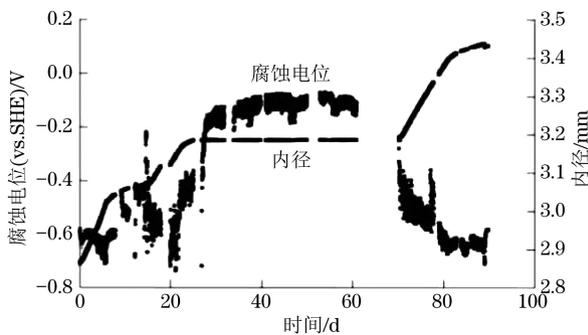


图 2 腐蚀电位、内径随时间的变化

Fig. 2 Change of corrosion potential and inner diameter with time

### 2.3 材料因素

材料因素主要指钢的化学成分。这是由于氧化膜的稳定性和溶解度受材料化学成分的控制。铬元素具有抑制钢材腐蚀的作用。通常 1% (质量分数) 的铬就能使钢材的 FAC 速率降至很低。铬元素可以提高钢材抗 FAC 能力的主要原因是铬在碳钢表面形成了  $\text{Fe}_3\text{XCrO}_4$  尖晶石氧化膜,该物质在高温

时的溶解度比  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  低很多<sup>[26]</sup>;另外,铬元素的添加使氧化膜不会形成大颗粒的晶体,从而降低了氧化膜的孔隙率,提高了其对基体的保护作用<sup>[27-28]</sup>。

王亮亮<sup>[29]</sup>在模拟二回路工况下对 A335P11 合金钢、20 碳钢、A106B 碳钢等管材制作的弯头、三通、变径管进行了 1 200 h 的 FAC 模拟试验,结果表明铬含量最高的 A335P11 合金钢的抗 FAC 效果最好。伊成龙<sup>[7]</sup>则在相似的条件对 SA335-P11 (Cr 质量分数 1.09%)、SA106B-0.2Cr (Cr 质量分数 0.2%)、SA106B-0Cr (Cr 质量分数 0.066%) 进行了 1 500 h 的 FAC 模拟试验,结果发现 SA335-P11 的点蚀较严重。其原因可能是试样中硫离子和氯离子含量以及流速影响了 SA335-P11 材料表面氧化膜的形成。

## 3 FAC 的研究方法

目前,国内外研究 FAC 的方法主要包括试验测试和数值模拟两大类。试验测试需要搭载试验平台,尽可能还原二回路的运行工况,并通过观察材料表面的变化测得 FAC 速率。数值模拟相对于试验测试效率更高,但其结果较理想化,多用于辅助试验结果分析以及现场管路减薄预测。

### 3.1 试验测试

实验室多采用搭载流动回路的方法对 FAC 进行研究,常用的 FAC 试验装置有旋转式、管流式和冲击式。旋转式和冲击式装置多用于固液两相冲刷腐蚀试验。管流式装置更适用于核电厂二回路流动加速腐蚀的研究。田钰等<sup>[30]</sup>和王力等<sup>[31]</sup>搭载管流式试验台,测试了不同材料的 FAC 速率。管流式试验装置主要包括蒸汽发生器、热交换器、稳压罐、背压阀、流量计、温度计、循环泵、高压釜、储液罐,相当于建立了核电厂二回路的等效模型。MADASAMY 等<sup>[32]</sup>使用  $\gamma$  射线对钢制管道内壁的氧化膜进行辐照,利用放射性同位素捕捉方法研究了管道的 FAC,并取得了不错效果。试验结果对核电厂二回路 FAC 的研究具有很好的参考价值。FAC 试验所需周期长(大部分单次试验的时间在 7 d 以上),装置长期无间歇运行,因此对阀门、管件以及密封的可靠性要求较高。

测试结束后,常使用扫描电镜 (SEM)、光学显微镜、立体显微镜等观察 FAC 后试样的表面形貌,包括氧化膜溶解情况、钙质层沉积,使用 X 射线衍射 (XRD) 和等离子体-原子光谱法分析试样表面物

质的化学成分,推算其物相<sup>[33-34]</sup>。

失重法<sup>[35]</sup>是常用的 FAC 速率评价方法。该方法较为简单,但在连续试验过程中无法进行称量,因此只能得到整个试验周期的 FAC 速率。直流电压法<sup>[36]</sup>是借助材料壁厚减薄引起的电阻变化来反映 FAC 速率,能够实现对 FAC 速率的连续监测;超声波壁厚测量方法多用于电厂在役管道及设备减薄测量。YUN 等<sup>[37]</sup>综述了电厂使用的现役壁厚减薄估算方法(总分法、连续变量均匀性试验方差分析法)和局部减薄估算方法(位置偏差法、二项变量一致性检验法、连续变量均匀性试验法)。

### 3.2 数值模拟

用于 FAC 模拟的软件可分为两大类。一类是根据核电厂长期运行积累的数据与经验开发的用于评价核电厂 FAC 的软件如 CHECWORK,这类软件能够预测部件的壁厚减薄率及使用寿命<sup>[38]</sup>,为核电厂的检修方案制定提供一定参考,指导修改 FAC 老化管理大纲,实现零部件寿命最大化。另一类是商业化的计算流体力学(CFD)软件,如 Fluent、CFX、Comsol 等。这些模拟软件都离不开腐蚀数学模型的建立。

#### 3.2.1 FAC 模拟的理论依据

碳钢直管段常用的 FAC 速率计算公式如式(3)所示<sup>[39]</sup>。

$$v_{\text{FAC}} = \frac{c_{\text{eq}} - c_{\text{b}}}{\frac{1}{K^*} + \frac{1}{k} + \frac{\delta}{2\theta \cdot D}} \quad (3)$$

式中: $v_{\text{FAC}}$ 为 FAC 速率,mm/a; $c_{\text{eq}}$ 为可溶性含铁组分的溶解度,mol/L; $c_{\text{b}}$ 为主流区域中可溶性含铁组分的浓度,mol/L; $K^*$ 为生成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  反应速率常数,m/s; $k$ 为传质系数,m/s; $\theta$ 为氧化膜的孔隙率; $D$ 为可溶性含铁组分的扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $\delta$ 为氧化膜厚度,m。

直角弯头、孔板下游 FAC 速率的计算公式如式(4)所示<sup>[16,40]</sup>。

$$v_{\text{FAC}} = K(c_{\text{w}} - c_{\text{b}}) = \left(\frac{\tau}{\rho U}\right) Sc^{-2/3} \quad (4)$$

式中: $c_{\text{w}}$ 为氧化膜-水界面可溶性含铁组分的溶解度,mol/L; $\tau$ 为壁面剪切力,N; $\rho$ 为介质密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $U$ 为主流区域流速,m/s; $Sc$ 为施密特数。

两相液滴冲击引起的 FAC 减薄速率计算公式如式(5)所示<sup>[15]</sup>。

$$m_{\text{FAC}} = C_{\text{s}} N F_{\theta}(\theta) \frac{\rho U^2}{HV} \quad (5)$$

式中: $m_{\text{FAC}}$ 为 FAC 减薄速率, $\text{kg}/\text{s}$ ; $C_{\text{s}}$ 为由管道制造和安装决定的系统常数; $N$ 为频率,Hz; $F_{\theta}(\theta)$ 为特征函数; $H$ 为壁面硬度,HB。

#### 3.2.2 模拟研究

刘忠等<sup>[21]</sup>建立了碳钢在单相流中的 FAC 数学模型,并用模型计算了直管的 FAC 情况,结果与前人的研究结果吻合较好;刘景军等<sup>[41]</sup>详细介绍了固液两相流动的数值模拟模型与方程,通过比较数值计算结果与实测结果,说明了模型的正确性。KESHTKAR 等<sup>[40]</sup>和 RANI 等<sup>[42]</sup>用 Fluent 软件模拟了双弯头管路的 FAC 传质系数,结果发现:沿流动方向第二个弯头内侧的 FAC 速率最大,且随着雷诺数的增大,FAC 速率也随之增加。LIN 等<sup>[43]</sup>使用 CFD 软件模拟了不同角度碳钢弯管在不同雷诺数下的 FAC。结果发现,流体沿管壁流动产生的二次流和流动分离会导致弯头内壁边界层厚度发生变化,传质系数与边界层厚度成反比。

PRASAD 等<sup>[44]</sup>以随机 Hougaard 为原理,结合  $58^\circ$ 弯管的 FAC 试验数据对核电站高温高流量管道的壁厚减薄进行了预测,其预测值的绝对误差在 8%左右。SANAMA 等<sup>[45]</sup>对前人提出的孔板下游 FAC 速率预测模型进行了修正,当孔板比为 0.25 和 0.5 时修改后模型预测的最大 FAC 磨损位置误差分别由 30% 和 11% 降低至 3% 和 2%。JYRKAMA 等<sup>[46]</sup>使用 Kriging 曲面拟合方法获得了核电金属管道部件的预测寿命,该方法克服了传统网格点到点值方法的不确定性和局限性。

相较于试验测试,数值模拟的周期更短,成本更低,能实现变量的稳定控制(温度,流速,pH 等),但由于数值模拟过程中对几何模型、流体物性等进行了简化,因此模拟结果为理想状况,与实际情况存在差异。数值模拟结果可以为已有管路的改进提供一定的参考依据。

## 4 FAC 的防护措施

### 4.1 碱化剂

使用碱化剂提高二回路的 pH 从而降低 FAC 的速率是一种较为常用且有效预防 FAC 的方法。国内压水堆核电厂多用氨和联氨的全挥发处理法<sup>[47]</sup>。在使用该方法处理时,由于氨的挥发性极强,其在气相中的分压远大于凝水中的,导致凝水的 pH 下降,下部管段产生腐蚀<sup>[48]</sup>。试验证实,乙醇胺(ETA)在  $150^\circ\text{C}$  和  $300^\circ\text{C}$  下的气水分配系数分别

为 0.26 和 0.66<sup>[49]</sup>,更倾向溶解于水,故可以用 ETA 替代氨和联氨进行二回路水化学处理。王琳等<sup>[50]</sup>使用 Mathcad 软件模拟了 ETA 在二回路系统中的分布,模拟结果表明,若要使主给水 pH 达到 9.5~10.0,ETA 质量分数需达到 3.5~25.1 mg/kg。蔡金平等<sup>[51]</sup>和曹松彦等<sup>[52]</sup>通过试验验证了 ETA 在高温下的稳定性,以及它与二回路常用碳钢材料的良好相容性。

近几年来,对复合碱化剂的研究也逐渐深入。赵永福等<sup>[53]</sup>就乙醇胺和氨的复合应用可行性提出了依据,并通过模拟和试验的方法优选出复合碱化剂中 ETA 和氨气的最佳比例。曹林园等<sup>[35]</sup>通过高温高压腐蚀试验考察了压水堆二回路工况下 A106Gr.B 和 A508 III 钢分别在  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、NETA + DMA 和 ETA 碱化剂中的均匀腐蚀和电化学腐蚀性能。结果发现,在复合碱化剂条件下,两种材料腐蚀速率分别下降 42% 和 29.01%。我国秦山二期核电厂采用  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{ETA}$  的联合控制法<sup>[54]</sup>,秦山三期采用吗啉和联氨的全挥发处理方法<sup>[55]</sup>,在设备运行期间,这些复合碱化剂均表现出不错的防腐蚀效果。

#### 4.2 合金材料

铬可以在合金表面形成钝化膜<sup>[56]</sup>,且腐蚀介质 pH 越小,铬在钝化膜中富集就越多<sup>[57]</sup>,因此含铬合金多表现出良好的耐蚀性。含铬金属管道内锈层中的铬含量要高于外锈层中的铬含量,使内锈层具有更好的韧性及致密性<sup>[28]</sup>。由于贫铬效应,镍铬合金中的铬质量分数通常要在 10% 以上才能确保合金表面有效且准确地形成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜,但提高铬元素含量会使合金在高温下的强度降低。

#### 4.3 涂层

核电站中易发生 FAC 的部位多使用碳钢管,所以提升碳钢管的电化学性能可有效抑制 FAC 的发生。刘云平<sup>[58]</sup>在碳钢表面制得了以硅烷为主体、硝酸铈和正硅酸乙酯为添加物的杂化膜。结果表明,相对于单一的硅烷膜,杂化膜对碳钢具有更好的保护作用。董会等<sup>[59]</sup>在 Q235 钢表面沉积了 NiCrAl 涂层,结果发现:在 3.5% NaCl 溶液中 NiCrAl 涂层具有较好的耐蚀性,其腐蚀电流密度约为 Q235 钢的三分之一,但在高温高压试验中,NiCrAl 涂层对基体的保护作用较小。

#### 4.4 表面热处理

WANG 等<sup>[34]</sup>对碳钢进行了电镀铬,并在 200 °C

温度下对其进行热处理。结果表明:表面热处理后,碳钢表面的  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  含量降低, $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和铬的含量上升;相较于未进行热处理的镀铬碳钢,其耐 FAC 性能更好;相比于同条件下的裸碳钢,FAC 质量损失下降 88% 以上。GHAZIOF 等<sup>[60]</sup>研究了金属表面 Cr-C 合金涂层经不同退火温度处理后的性能变化,发现:经 300 °C 退火处理后,涂层的硬度提升,但耐蚀性下降;经 600 °C 退火后,涂层中部分碳会析出,使得涂层硬度上升,耐蚀性提升。

## 5 结束语

对于核电厂二回路 FAC 研究多为实验室或理论研究,这些研究虽然不能代替实际情况,但其研究方法及结论为核电厂实际运行维护提供了很大的帮助。FAC 受温度、流速、pH、管路几何形状等影响,其中温度和 pH 对 FAC 的影响研究较为成熟。数值模拟是 FAC 最常用的研究方法,模拟结果十分明确,且周期短,可以根据需求自由设置试验工况。数值模拟的结果需要结合实际工况进行合理性判断。但由于实际工况的复杂性,在机组的日常运行中,碳钢管不单会出现 FAC,而且常伴随出现应力腐蚀和液滴冲击腐蚀等,当多种腐蚀同时发生时,用于单一腐蚀的预测手段不能有效预测管件的剩余寿命及安全性。使用合金材料和水化学处理是预防 FAC 常用和较为有效的方法,秦山二期与三期工程是我国使用复合碱化剂技术较为成熟的核电站。

在设计模拟 FAC 搭载的试验平台时,为了测试温度对 FAC 的影响,除了满足工况及基本的安全、密封性等要求外,还应考虑管路中液体的流动状态以及模型的缩放问题。核电厂对于二回路中介质化学性质的监测技术已较为成熟,管道在使用过程中不断损耗,也应逐步加大对管道的保护,如碱化剂使用可在一个运行周期内参照介质参数的变化进行动态调整。

#### 参考文献:

- [1] World Nuclear Association. World nuclear industry status report 2020[R]. London: WNA, 2020.
- [2] 邓宏伟. 核电厂二回路管道应对流动加速腐蚀机理研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(1): 51-54, 61.
- [3] 王贵利, 马娜, 陈勇. 碳钢管道流动加速腐蚀与冲刷腐蚀的差异分析[J]. 核动力工程, 2012, 33(S2): 75-78.
- [4] KAIN V. Flow accelerated corrosion: forms, mechanisms and case studies[J]. Procedia Engineering,

- 2014,86:576-588.
- [5] CHEXAL B, HOROWITZ J, DOOLEY B. EPRITR 10661 R1 flow-accelerated corrosion in power plants [R]. [S. l.]: United States Electric Power Research Institute,1998.
- [6] 束国刚,薛飞,遆文新,等.核电厂管道的流体加速腐蚀及其老化管理[J].腐蚀与防护,2006,27(2):72-76.
- [7] 伊成龙.核电厂二回路管道流动加速腐蚀性能研究[D].上海:上海交通大学,2012.
- [8] UTANOHARA Y, KAMAHORI K, NAKAMURA A, et al. Measurement of flow accelerated corrosion rate at an elbow pipe and combination effect of an upstream orifice [J]. E-Journal of Advantage Maintenance,2016,8(1):1-12.
- [9] SUBRAMANIAN H, MADASAMY P, KUMAWAT H, et al. Thin layer activation for probing flow accelerated corrosion of carbon steel [J]. Corrosion Science,2012,54:45-51.
- [10] YONEDA K, MORITA R, FUJIWARA K, et al. Development of flow-accelerated corrosion prediction method (1) acquisition of basic experimental data including low temperature condition [J]. Mechanical Engineering Journal,2016,3(1):15-232.
- [11] SATOH T, SHAO Y, COOK W G, et al. Flow-assisted corrosion of carbon steel under neutral water conditions [J]. Corrosion,2007,63(8):770-780.
- [12] AHMED W H. Evaluation of the proximity effect on flow-accelerated corrosion [J]. Annals of Nuclear Energy,2010,37(4):598-605.
- [13] 马娜,尹昌耕,秦金光.核电厂碳钢管道壁厚减薄原因分析[J].核动力工程,2013,34(2):123-125.
- [14] SINGH J L, KUMAR U, KUMAWAT N, et al. Flow accelerated corrosion of carbon steel feeder pipes from pressurized heavy water reactors [J]. Journal of Nuclear Materials,2012,429(1/2/3):226-232.
- [15] FERNG Y M, TSENG Y S, PEI B S, et al. A two-phase methodology to predict FAC wear sites in the piping system of a BWR [J]. Nuclear Engineering and Design,2008,238(9):2189-2196.
- [16] AHMED W H, BELLO M M, EL NAKLA M, et al. Experimental investigation of flow accelerated corrosion under two-phase flow conditions [J]. Nuclear Engineering and Design,2014,267:34-43.
- [17] 李鹏.气液两相流动加速腐蚀的研究与CFD模拟[J].化工管理,2014(2):163-165.
- [18] REMY F N, BOUCHACOURT M. Flow-assisted corrosion: a method to avoid damage [J]. Nuclear Engineering and Design,1992,133(1):23-30.
- [19] KAIN V. Flow accelerated corrosion: forms, mechanisms and case studies [J]. Procedia Engineering,2014,86:576-588.
- [20] 张桂英,顾宇,邵杰.核电站汽水管道的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):170-176.
- [21] 刘忠,刘春波,郑玉贵.碳钢在单相流中流动加速腐蚀的数值模拟[J].核动力工程,2009,30(5):48-53.
- [22] HEITMAN H G, KSATNER W. Erosion-corrosion in water-steam cycles, cause and counter measures [J]. VGB Kraftwerks Technik, 1982, 3 (62): 211-219.
- [23] 王柱,韩会娟,李鹏,等.压水堆核电机组二回路流动加速腐蚀的原因及处理措施[J].黑龙江电力,2015,37(6):551-553,556.
- [24] JIANG D F, XU H, KHAN H I, et al. Transport of corrosion products in the steam-water cycle of supercritical power plant [J]. Applied Thermal Engineering,2017,113:1164-1169.
- [25] WOOLSEY I S, BICNOLD G J, DE WHALLEY C H, et al. Paper 96. The influence of oxygen and hydrazine on the erosion-corrosion behaviour and electrochemical potentials of carbon steel under boiler feedwater conditions [J]. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems,1986:377-346.
- [26] 孟龙,黄万启,孙本达,等.空冷凝汽器流动加速腐蚀的影响因素[J].腐蚀与防护,2017,38(1):65-68.
- [27] 沈嘉年,周龙江,李铁藩.水蒸气加速 Fe-Cr 合金高温氧化的作用[J].材料研究学报,1998,12(2):128-132.
- [28] CHAI F, JIANG S, YANG C F. Effect of Cr on characteristic of rust layer formed on low alloy steel in flow-accelerated corrosion environment [J]. Journal of Iron and Steel Research International,2016,23(6):602-607.
- [29] 王亮亮.核电厂二回路主要管道流动加速腐蚀研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [30] 田珏,王辉,李新民.高温高压动水回路中 A106Gr. B 和 A672Gr. B60 耐冲蚀作用的研究 [J]. 原子能科学技术,2014,48(增1):517-522.
- [31] 王力,罗坤杰,方可伟,等.在不同碱化剂溶液中 TU48C 钢的均匀腐蚀及流动加速腐蚀速率 [J]. 机械工程材料,2017,41(8):80-83.
- [32] MADASAMY P, CHANDRAMOHAN P, MUKUNTHAN M, et al. Flow accelerated corrosion rate on carbon steel pipe bend by thin layer activation technique and computational modeling: under PHWR operating conditions [J]. Engineering Failure Analysis,2021,121:105125.

- [33] 赵亮,罗坤杰,李光福. 核电厂二回路管道腐蚀降级特征分析与敏感点识别[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(7): 579-585.
- [34] WANG Y, LIU Y H, LI G B, et al. Microstructure and flow accelerated corrosion resistance of Cr coatings electrodeposited in a trivalent chromium bath [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 422: 127527.
- [35] 曹林园,王辉,杨明馨,等. 压水堆二回路工况下碱化剂对结构材料腐蚀的影响[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(5): 842-849.
- [36] 赖平,张乐福,潘向烽,等. 在线测试碳钢流动加速腐蚀减薄速率的直流电压法[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(1): 17-21.
- [37] YUN H, MOON S J, OH Y J. Development of wall-thinning evaluation procedure for nuclear power plant piping—part 2: local wall-thinning estimation method [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(9): 2119-2129.
- [38] 龚巍,徐雪莲. 流动加速腐蚀评价程序 CHECWORKS 及其核电厂老化管理应用[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(5): 401-406.
- [39] SANCHEZ-CALDERA L E, GRIFFITH P, RABINOWICZ E. The mechanism of corrosion-erosion in steam extraction lines of power stations [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 110(2): 180-184.
- [40] KESHTKAR K, NEMATOLLAHI M, ERFANINIA A. CFX study of flow accelerated corrosion via mass transfer coefficient calculation in a double elbow[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(17): 7036-7046.
- [41] 刘景军,林玉珍,田兴玲,等. 双相不锈钢管固液两相流动腐蚀的数值模拟[J]. 化工学报, 2004, 55(3): 408-413.
- [42] RANI H P, DIVYA T, SAHAYA R R, et al. CFD study of flow accelerated corrosion in 3D elbows[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 69: 344-351.
- [43] LIN C H, FERNG Y M. Predictions of hydrodynamic characteristics and corrosion rates using CFD in the piping systems of pressurized-water reactor power plant[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 65: 214-222.
- [44] PRASAD M, GOPIKA V, SRIDHARAN A, et al. Hougard process stochastic model to predict wall thickness in flow accelerated corrosion[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 117: 247-258.
- [45] SANAMA C, SHARIFPUR M, MEYER J P. Mathematical modeling of orifice downstream flow under flow-accelerated corrosion [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 326: 285-289.
- [46] JYRKAMA M I, PANDEY M D. Methodology for predicting flow-accelerated corrosion wear using unreferenced multiple inspection data [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 250: 317-325.
- [47] 郭亭山,赵永福,梁志远,等. 压水堆核电站二回路水化学处理用碱化剂研究进展[J]. 热力发电, 2021, 50(5): 1-9.
- [48] 张孟琴,陆玉成,张宾永,等. ETA 对 PWR 二回路设备材料抗蚀作用研究[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2002(2): 98.
- [49] 曹松彦,王今芳,孙本达,等. 采用乙醇胺抑制核电站二回路系统的流动加速腐蚀[J]. 热力发电, 2011, 40(1): 73-75.
- [50] 王琳,谢杨,崔怀明. 乙醇胺在核电厂二回路水处理中的应用研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(2): 137-140.
- [51] 蔡金平,田民顺,何艳红,等. 乙醇胺与核电厂二回路材料的相容性[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(7): 485-489.
- [52] 曹松彦,孙本达,黄万启,等. 乙醇胺的热稳定性试验及其在核电站二回路系统的应用[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(11): 1019-1021.
- [53] 赵永福,姜峨,龚宾,等. 核电站二回路乙醇胺与氨复合应用可行性研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 127-132.
- [54] ZHU Z P, YANG L, QIAO Y, et al. Experimental study on gas-liquid partition coefficient and thermal decomposition characteristics of ethanolanmine in high-temperature aqueous systems[J]. China Power, 2018, 55(5): 128-133.
- [55] 方岚. 秦山三期重水堆核电站二回路水化学优化[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 246-253.
- [56] 朱日彰,何业东,齐慧滨. 高温腐蚀及耐高温腐蚀材料[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1995.
- [57] 徐文东. 镍基 800 合金腐蚀电化学性能和影响因素研究[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [58] 刘云平. 碳钢表面杂化膜的制备及防腐性能研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
- [59] 董会,张鹏辉,姚建洮,等. 碳钢表面等离子喷涂 NiCrAl 涂层的耐腐蚀性能研究[C]//2016 陕西省焊接学术会议. [出版地不详]:[出版者不详], 2016: 64-68.
- [60] GHAZIOF S, GOLOZAR M A, RAEISSI K. Characterization of as-deposited and annealed Cr-C alloy coatings produced from a trivalent chromium bath[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 496(1/2): 164-168.

## Research Progress on Flow Accelerated Corrosion and Protection of Secondary Circuit Metal Pipelines in Nuclear Power Plants

QIAO Ruixin<sup>1,2</sup>, DONG Liang<sup>1</sup>, CHEN Jiandong<sup>3</sup>, QIU Xiaobo<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology,

Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. Qingdao Yahe Technology Development Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3. Wuxi Neostec Energy Technology Co., Ltd., Wuxi 214187, China)

**Abstract:** The research status of flow accelerated corrosion of secondary circuit pipelines in nuclear power plants is reviewed. The influence mechanism and rule of fluid dynamics factors, environmental factors and material factors on flow accelerated corrosion are introduced. The common research methods and protective measures for flow accelerated corrosion are summarized. Finally, the existing problems and the directions of future research are proposed.

**Key words:** flow acceleration corrosion; influencing factor; research method; protective measure

### 《腐蚀与防护》杂志 2024 年征订启事

《腐蚀与防护》杂志属应用技术类期刊,创办于 1980 年。本刊是国内最早的腐蚀专业学会——上海市腐蚀科学技术学会的会刊,也是国内创办最早的腐蚀专业杂志之一,为领域内的学术交流和科技成果推广作出了重要贡献。

本刊是中文核心期刊,并被多种国内外数据库收录。

本刊作者和读者主要包括:大学及科研单位的研发人员、防腐工程技术人员、建筑工程技术人员,油田、石油化工、化工厂、电镀厂、发电厂、矿山的工程技术人员和工程管理、设备管理人员。

本刊提供针对广大读者、作者单位应用的有关腐蚀控制与防护的各种仪器设备及缓蚀、防锈技术、表面技术、电化学保护、工程防腐蚀等广告宣传业

务,欢迎联系刊登。

本刊为大 16 开,120 页,月刊,各地邮局均可订阅,订阅代号:4-593,也可向本刊发行部订阅;每册定价:30.00 元,360 元/年。刊号 ISSN 1005-748X, CN 31-1456/TQ。

地址:上海市虹口区邯郸路 99 号

邮编:200437

编辑电话:021-65556775-290;021-65559079

E-mail:cp@mat-test.com

广告电话:021-65544943

广告联系人:陈哲森

发行电话:021-65527634

E-mail:wm@mat-test.com

投稿网址:www.mat-test.com