

# 316L奥氏体不锈钢在氟硅酸中腐蚀失重研究

赵英刚<sup>1</sup>, 夏飞龙<sup>2,3</sup>

(1. 贵州瓮福开磷氟硅新材料有限公司, 贵州 开阳 550300; 2. 贵州瓮福蓝天氟化工股份有限公司, 贵州 福泉 550501;  
3. 磷矿及其伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室氟硅新材料成果转化基地, 贵州 福泉 550501)

**[摘要]** 为探究316L奥氏体不锈钢在氟硅酸( $H_2SiF_6$ )介质中的腐蚀失重行为规律, 通过失重法系统考察腐蚀温度(25~75℃)、腐蚀时间(0.5~2.5 h)及氟硅酸质量分数(5%~30%)对材料腐蚀失重的影响规律。结果表明: 腐蚀失重随温度、氟硅酸浓度及时间增加而增长, 呈现正相关; 在氟硅酸质量分数30%、时间1 h、温度75℃条件下材料腐蚀失重为352 mg; 通过数学拟合建立腐蚀动力学模型, 拟合模型符合要求, 为化工装备选材及腐蚀防护策略制定提供理论依据。

**[关键词]** 316L奥氏体不锈钢; 氟硅酸; 腐蚀失重; 动力学方程

**[中图分类号]** TQ124.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 02-0073-05

## Study on corrosion mass loss of 316L austenitic stainless steel in fluorosilicic acid

ZHAO Yinggang<sup>1</sup>, XIA Feilong<sup>2,3</sup>

(1. Guizhou Wengfu Kailin Fluorosilicon New Materials Co., Ltd., Kaiyang 550300, China; 2. Guizhou Wengfu Lantian Fluorchem Co., Ltd., Fuquan 550501, China; 3. Fluorosilicon New Materials Achievement Transformation Base of State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Fuquan 550501, China)

**Abstract:** To investigate the corrosion mass loss behavior of 316L austenitic stainless steel in fluorosilicic acid ( $H_2SiF_6$ ) medium, the effects of corrosion temperature (25 - 75 °C), corrosion time (0.5 - 2.5 h), and fluorosilicic acid mass fraction (5% - 30%) on material corrosion are studied using the weight loss method. The results indicate that: Corrosion mass loss exhibits a positive correlation with increasing temperature, fluorosilicic acid concentration, and exposure time. A maximum corrosion mass loss of 352 mg is recorded under the conditions of fluorosilicic acid concentration of 30%, temperature of 75 °C, and corrosion time of 1 h. A mathematically fitted corrosion kinetics model is successfully established, demonstrating good agreement with the experimental data. These findings provide a theoretical basis for material selection in chemical processing equipment and the formulation of corrosion protection strategies.

**Key words:** 316L austenitic stainless steel; fluorosilicic acid; corrosion mass loss; kinetic equation

## 0 引言

氟硅酸( $H_2SiF_6$ )作为电镀工业、木材防腐处理、啤酒生产消毒及氟硅酸盐制备等精细化工领域的关键原料, 其应用范围已从传统化工延伸至新能源材料、半导体制造等高新技术产业。然而, 这种强酸性介质的腐蚀特性对设备材料的耐蚀性能提出了严峻挑战。在复杂的酸性环境中, 氟硅酸不仅本身具有强腐蚀性, 更易通过热力学不稳定分解过程释放出具有超强侵蚀能力的氟离子( $F^-$ )以及结构

复杂的氟硅络合物体系。这些活性组分能够协同作用, 有效破坏金属表面形成的钝化保护膜, 诱发多种形式的局部腐蚀现象, 包括点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀等, 甚至在特定应力条件下可能引发应力腐蚀开裂(SCC), 导致关键设备过早失效、材料非预期损耗, 同时伴随严重的泄漏风险与环境污染隐患<sup>[1-3]</sup>。316L奥氏体不锈钢凭借其优异的综合力学性能、良好的加工成形性能以及相对出色的耐腐蚀性能, 已成为现代化工设备、高压管道系统、反应

收稿日期: 2026-01-10

作者简介: 赵英刚(1985—), 男, 云南鲁甸人, 工程师, 研究方向为磷矿伴生氟硅资源综合利用。

通信作者: 夏飞龙(1993—), 男, 贵州长顺人, 工程师, 研究方向为磷矿伴生氟硅资源综合利用。

容器及储罐等关键承压部件的首选材料。目前,学术界和工程界针对316L不锈钢在氢氟酸(HF)中的腐蚀行为已开展了较为系统的研究,建立了相应的腐蚀速率预测模型和防护策略<sup>[4-7]</sup>。

然而,工业氟硅酸环境具有显著的特殊性与复杂性,主要体现在以下几个方面:首先,氟硅酸的热稳定性较差,在温度波动或局部过热条件下极易分解产生剧毒且强腐蚀性的气态产物(如HF、SiF<sub>4</sub>),这些气态腐蚀介质不仅加剧了液相腐蚀的严苛程度,还可能引发气相腐蚀和大气腐蚀的耦合效应;其次,氟硅酸腐蚀介质中同时存在高活性的F<sup>-</sup>和结构稳定的SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>等复杂离子组分,这些离子之间可能形成动态平衡体系,其协同腐蚀作用机制可能迥异于传统的单一酸性环境或含氯离子环境;最后,工业实际工况中往往存在杂质离子、流速变化、温度梯度等多因素耦合作用,进一步增加了腐蚀行为的不可预测性。设备一旦因腐蚀失效,不仅会造成生产中断和重大经济损失,而且可能引发灾难性安全事故,严重威胁人员健康与生态环境安全。现有研究多聚焦于316L奥氏体不锈钢在常规酸性或氯化物环境中的腐蚀行为<sup>[8-11]</sup>,针对氟硅酸这一特殊且高危工业介质中316L奥氏体不锈钢的系统性腐蚀研究,尤其是氟硅酸浓度、腐蚀温度、腐蚀时间对腐蚀行为的影响规律尚存在研究空白。

基于上述关键工程问题与知识缺口,本研究结合氟硅酸工业应用的实际工况,探究不同氟硅酸浓度、腐蚀温度、腐蚀时间对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重行为的影响规律。通过建立多因素耦合作用下的腐蚀动力学模型,阐明氟硅酸环境中316L奥氏体不锈钢的腐蚀规律,评估材料在长期服役条件下的寿命。该研究成果可为氟硅酸相关设备与设施的选材设计提供科学依据,为高性能防护涂层的开发优化指明技术方向,为设备全生命周期安全运行与寿命预测建立理论基础,同时为制定相应的腐蚀防护标准和操作规程提供数据支撑。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

无水乙醇,分析纯,质量分数大于99.7%,国药集团化学试剂有限公司;氟硅酸,分析纯,质量分数30%,阿拉丁化学试剂有限公司;去离子水,自制。316L奥氏体不锈钢材料,化学成分如表1所示。

表1 316L奥氏体不锈钢材料的化学成分

stainless steel					%
<i>w</i> (C)	<i>w</i> (Mn)	<i>w</i> (P)	<i>w</i> (Mo)	<i>w</i> (S)	
0.02	0.46	0.03	2.01	0.005	
<i>w</i> (Si)	<i>w</i> (Cr)	<i>w</i> (Ni)	<i>w</i> (N)	<i>w</i> (Fe)	
0.518	16.38	10.39	0.056	70.131	

### 1.2 实验方法

本研究以316L奥氏体不锈钢为实验材料,采用线切割技术将其加工成直径为5 cm(厚度1 mm)的圆形试样。试样表面依次经6.5~38.0 μm(400~2 000目)碳化硅砂纸逐级打磨后,使用无水乙醇进行超声清洗(15 min×3次)以去除表面污染物。腐蚀实验在密闭聚四氟乙烯反应釜中进行,将试样完全浸没于不同浓度的氟硅酸溶液中,通过恒温水浴槽精确控制反应温度(25±0.5)~(75±0.5)℃,并设置不同时间梯度(0.5~2.5 h)。实验完成后取出试样,立即使用去离子水冲洗终止反应,经无水乙醇脱水后于50℃真空干燥箱中干燥至恒质量。采用精密电子天平测量试样失重量,通过失重法计算腐蚀速率,系统研究溶液浓度、温度及腐蚀时间对材料腐蚀的影响。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 腐蚀时间对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响

在固定氟硅酸质量分数30%、腐蚀温度25℃实验条件下,考察不同腐蚀时间对316L奥氏体不锈钢试样腐蚀失重的影响,实验结果见图1。

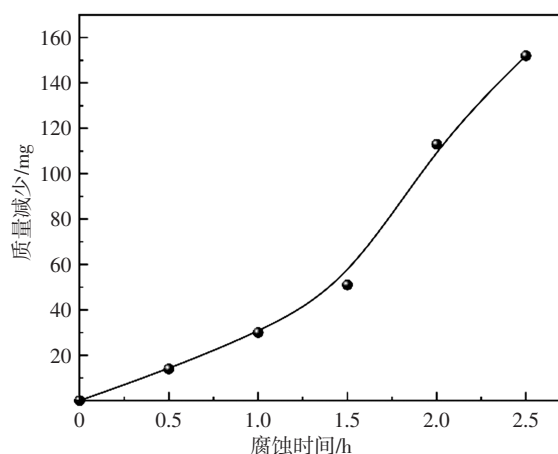


图1 腐蚀时间对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响

Fig. 1 The effect of different time on corrosion mass loss of 316L austenitic stainless steel

由图1可知,在腐蚀初始阶段(腐蚀时间0~1.5 h),316L奥氏体不锈钢试样质量减少由0 mg逐渐增加至51 mg,腐蚀速率相对缓慢;而当腐蚀时

间延长至1.5~2.5 h, 质量减少迅速增大至152 mg, 呈现明显的加速腐蚀特征。腐蚀过程在约1.5 h处存在一个关键的动力学转折点, 即从以均匀腐蚀为主的初始阶段, 转变为以局部腐蚀为主导的加速腐蚀阶段。在腐蚀初期(腐蚀时间 $\leq 1.5$  h), 材料表面预先形成的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 钝化膜与含F<sup>-</sup>的腐蚀介质接触, F<sup>-</sup>凭借其强配位能力与膜层发生相互作用, 同时介质中的H<sup>+</sup>协同作用, 引发膜层局部阳极溶解反应。此阶段钝化膜层整体仍具有一定保护性, 腐蚀以均匀、缓慢的界面反应为主, 新鲜金属基底逐步暴露, 316L奥氏体不锈钢材料质量减少随时间的延长近似呈线性趋势。F<sup>-</sup>通过吸附、渗透作用逐渐侵入膜层缺陷处(如晶界、位错等), 与Cr<sup>3+</sup>等金属离子形成可溶性络合物, 导致钝化膜局部化学溶解, 基底金属活性面积逐步扩大, 为后续局部腐蚀的萌生创造了条件。当腐蚀时间超过1.5 h后, 体系进入腐蚀加速阶段。此时, F<sup>-</sup>在膜层缺陷处显著富集, 形成局部高活性区域, 腐蚀形态从均匀腐蚀转向局部腐蚀。在电化学驱动下, 点蚀核在膜层薄弱处优先形成并稳定生长, 同时材料微观组织中的晶界、第二相(如Cr、Mo的碳化物)由于成分与基体存在差异, 发生选择性溶解, 进一步促进腐蚀通道的形成与发展。

## 2.2 腐蚀温度对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响

在固定氟硅酸质量分数30%、腐蚀时间1.0 h实验条件下, 考察腐蚀温度对316L奥氏体不锈钢试样腐蚀失重的影响, 实验结果如图2所示。

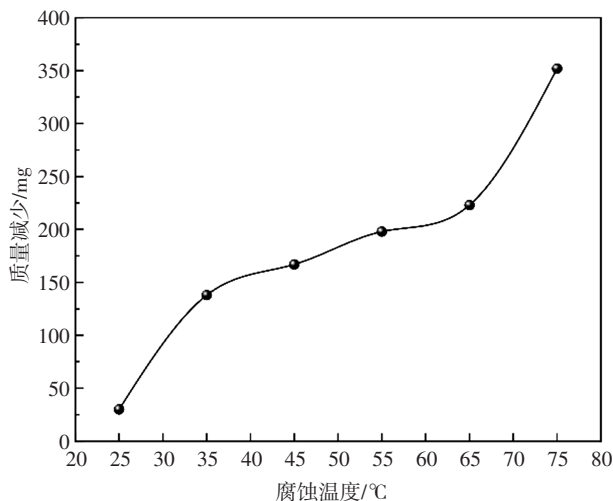


图2 腐蚀温度对316L奥氏体不锈钢材料腐蚀失重的影响  
Fig. 2 The effect of temperatures on corrosion mass loss of 316L austenitic stainless steel

由图2可知, 316L奥氏体不锈钢在质量分数

30%的氟硅酸溶液中的腐蚀失重随温度升高呈现显著的3阶段非线性变化特征。在低温区间(25~35 °C), 316L不锈钢材料质量减少从30 mg急剧增加至138 mg, 增幅高达360%, 表现出强烈的温度敏感性。这一阶段主要受钝化膜稳定性控制, 随着温度升高,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 钝化膜的热稳定性下降, F<sup>-</sup>的扩散速率提高, 导致钝化膜局部溶解加剧。同时, 温度升高促进了H<sup>+</sup>/F<sup>-</sup>对的协同吸附作用, 增强了阳极溶解反应的动力学过程。在中温区间(35~65 °C), 316L不锈钢材料质量减少从138 mg平缓上升至223 mg, 增长趋势相对缓和。此阶段腐蚀过程主要受界面反应速率控制, 温度对反应速率的促进作用与腐蚀产物层的保护作用达到动态平衡。在高温区间(65~75 °C), 316L不锈钢材料质量减少从223 mg跃升至352 mg, 增幅达58%, 显示出明显的腐蚀加速现象。这一转变主要归因于 $\text{SiF}_6^{2-}$ 的水解反应加剧, 导致腐蚀介质中HF浓度显著升高。HF作为一种强腐蚀性介质, 能够直接与不锈钢基体发生剧烈反应, 破坏腐蚀产物层, 引发全面腐蚀加速。

## 2.3 氟硅酸初始浓度对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响

在固定腐蚀温度65 °C、腐蚀时间1.0 h实验条件下, 考察氟硅酸初始质量分数对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响, 实验结果如图3所示。

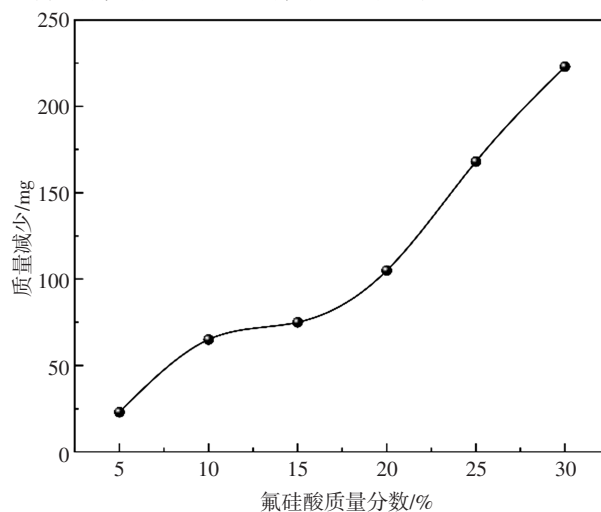


图3 氟硅酸初始质量分数对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重的影响

Fig. 3 The effect of different fluorosilicic acid initial mass fraction on corrosion mass loss of 316L austenitic stainless steel

由图3可知, 316L奥氏体不锈钢在65 °C、1.0 h暴露条件下的腐蚀失重随氟硅酸浓度升高呈现出典型的3阶段非线性增长特征。在低浓度区间(质量分数5%~10%), 316L不锈钢材料质量减少从23

mg急剧增加至65 mg,增幅高达182.6%,表现出极高的浓度敏感性。这一阶段主要受F浓度控制,随着氟硅酸质量分数从5%提升至10%,溶液中游离F浓度呈指数增长,显著增强了F对Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>钝化膜的渗透破坏能力。F通过与Cr<sup>3+</sup>形成可溶性[CrF<sub>6</sub>]<sup>3-</sup>络合物,导致钝化膜局部溶解,新鲜金属基体暴露面积迅速扩大。在中浓度区间(质量分数10%~15%),316L奥氏体不锈钢质量减少从65 mg平缓上升至75 mg,增幅仅为15.4%,增长趋势明显放缓。此阶段腐蚀过程主要受界面反应动力学与扩散传质双重控制:一方面,F浓度继续增加促进了腐蚀反应;另一方面,腐蚀产物层在较高浓度下形成更为致密的保护层,部分阻隔了腐蚀介质的进一步渗透。同时,溶液黏度的增加降低了离子扩散速率,形成了动态平衡。在高浓度区间(质量分数15%~30%),316L奥氏体不锈钢质量减少从75 mg跃升至223 mg,增幅达197.3%,显示出明显的腐蚀加速现象。这一转变主要归因于氟硅酸的自分解反应加剧,随着浓度升高,自分解平衡向右移动,导致溶液中HF浓度显著增加。

2.4 腐蚀动力学研究

基于腐蚀电化学原理,316L奥氏体不锈钢在氟硅酸中的腐蚀失重遵循广义动力学方程:

$$W = k \cdot w^a \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot t^b \cdot \exp(\gamma T) \tag{1}$$

式中:*k*为反应速率常数;*w*为氟硅酸质量分数,%;*E<sub>a</sub>*为活化能,J/mol;*R*为气体常数,8.314 J/(mol·K);*T*为绝对温度,K;*t*为时间,h;*a*、*b*为氟硅酸质量分数与时间指数;*γ*为高温加速因子。

以上述实验数据为基础,对氟硅酸质量分数、时间及温度进行拟合计算。基于单因素分析参数初值估计计算,取*k*=0.05, *a*=1.2, *E<sub>a</sub>*=45 kJ/mol, *b*=0.9; *γ*=0.015。使用Levenberg-Marquardt算法进行非线性最小二乘拟合,目标是最小化残差平方和,目标函数如式(2)所示。

$$R_{ss} = \sum_{i=1}^n (w_i - \hat{w}_i)^2 \tag{2}$$

其中收敛判断条件为参数变化率<0.01%或*R<sub>ss</sub>*变化<0.1。以非线性最小二乘拟合计算,拟合得到参数值后计算协方差矩阵,进而得到各参数的标准误差和置信区间,其计算结果如表2所示。

由表2可知,基于非线性最小二乘拟合结果,模型已稳定收敛,主要动力学参数估计精确可靠。总体而言,模型对核心动力学参数的识别效果好,结果具有可靠的统计学意义。

表2 拟合结果

Table 2 Fitting results

参数	拟合值	置信区间(95%)
<i>k</i>	1.82 × 10 <sup>-2</sup>	[1.45×10 <sup>-2</sup> , 2.19×10 <sup>-2</sup> ]
<i>a</i>	1.317	[1.25, 1.38]
<i>E<sub>a</sub></i>	42.185 kJ/mol	[40.2, 44.17]
<i>b</i>	0.874	[0.82, 0.93]
<i>γ</i>	0.013 2	[0.011, 0.045]

模型参数拟合检验以协方差矩阵分析计算,其中计算公式如下:  $cov\theta = \sigma^2 (J^T J)^{-1}$ ,  $\sigma^2 = R_{ss} / (n - p)$ , 结果见表3。

表3 参数显著性分析

Table 3 Parameter significance analysis

参数	标准误差	统计结果	<i>P</i>
<i>k</i>	0.018 2	10.11	<0.001
<i>a</i>	0.032	41.16	<0.001
<i>E<sub>a</sub></i>	1.012	41.68	<0.001
<i>b</i>	0.028	31.21	<0.001
<i>γ</i>	0.001 0	13.20	<0.001

所有参数*P*<0.001,模型高度显著(*F*=86.7, *P*<0.001)。

计算预测值和残差,平均绝对误差(MAE)及均方根误差(RMSE)。

$$MAE = \frac{1}{18} \sum |w_i - \hat{w}_i| \tag{3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \hat{w}_i)^2}{18}} \tag{4}$$

标准化残差计算如下式所示:

$$e_i^* = (w_i - \hat{w}_i) / \sqrt{\sigma^2} \tag{5}$$

经计算误差指标MAE为6.22 mg, RMSE为6.24 mg。以氟硅酸质量分数30%、25℃及2.5 h数据计算,验证模型。通过计算模型预测值 $\hat{w}_{18}$ 为143.1 mg,实验测得值为152 mg,计算验证如下所示:

$$e_i^* = (w_i - \hat{w}_i) / \sqrt{\sigma^2} = (152 - 143.1) / 734 = 1.21$$

*e<sub>i</sub>*\*小于1.96,检验通过,经过检验所有标准化残差均在[-1.96, 1.96],数据无异常值。

基于上述计算研究,最后得到腐蚀失重动力学方程如下所示:

$$W = 0.018 2 \cdot w^{1.317} \cdot \exp\left(-\frac{42.185}{8.314 T}\right) \cdot t^{0.874} \cdot \exp(0.013 2 T) \tag{6}$$

动力学方程工程意义见表4。基于非线性最小二乘拟合与协方差分析,本模型获得了具有明确物理意义的动力学参数。浓度指数*a*=1.317>1,表明反应速率与浓度呈超线性关系,浓度调控对反应加

表4 动力学方程工程意义

Table 4 Engineering significance of the kinetic equation

参数	值	工程解释
$a$	$>1$	浓度影响超线性
$E_a$	42.185 kJ/mol	混合控制机制
$b$	$<1$	时间累积效应衰减
$\gamma$	$>0$	65 °C以上失重加速

速具有显著增强效应。活化能 $E_a$ 为42.185 kJ/mol处于典型扩散控制与动力学控制之间的过渡区间,揭示该过程受混合控制机制主导,提示工艺优化需兼顾温度调控与传质强化。时间指数 $b=0.874<1$ ,反映转化率随时间呈亚线性累积,符合扩散受限过程的特征,说明延长反应时间带来的边际收益递减。此外,参数 $\gamma>0$ 与模型中温度阈值函数关联,其数值表明在65 °C以上体系出现失重加速机制,标识出关键的过程温度转折点。

### 3 结论

本文研究了氟硅酸对316L奥氏体不锈钢腐蚀失重行为的影响规律,316L奥氏体不锈钢在氟硅酸介质中的腐蚀失重与腐蚀温度、氟硅酸质量分数和腐蚀时间均呈正相关关系,在氟硅酸质量分数30%、75 °C、1.0 h条件下,腐蚀质量损失达到352 mg。腐蚀过程存在明显的动力学转折点,从初始的均匀腐蚀转变为后期的加速局部腐蚀。温度和浓度的影响均呈现3阶段非线性变化特征,在特定区间表现出极强的敏感性。研究建立了腐蚀失重动力学方程,模型验证表明预测精度高,所有参数均高度显著( $P<0.001$ )。该研究量化了多因素对316L不锈钢在氟硅酸中腐蚀行为的影响规律,为相关化工设备的选材设计和腐蚀防护策略制定提供了重要的理论依据。

#### [参考文献]

[1] 金丹丹. 氢氟酸服役环境下Zr-Mo系钛合金的腐蚀疲劳行为研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.  
JIN D D. Study on Corrosion Fatigue Behavior of Zr-Mo Titanium Alloys in Hydrofluoric Acid Service Environment[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022.

[2] 梁平, 郑森, 梁禹财. 2205双相不锈钢单相的制备及其在氢氟酸溶液中的腐蚀行为[J]. 当代化工, 2023, 52(11): 2602-2605.  
LIANG P, ZHEN S, LIANG Y C. Preparation of Single Phase in 2205 Duplex Stainless Steel and Its Corrosion Behavior in

Hydrofluoric Acid Solution[J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(11): 2602-2605.

[3] 石维, 蒋如意, 樊开伦, 等. 表层受损的氮化904L不锈钢在氢氟酸中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(6): 20-24.  
SHI W, JIANG R Y, FAN K L, et al. Corrosion Behaviour of Nitrided 904L Stainless Steel with Damaged Surface in Hydrofluoric Acid[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(6): 20-24.

[4] 逢旭光, 梁平, 张云霞, 等. 2205和316L不锈钢在氢氟酸中的电化学腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(6): 537-542.  
PANG X G, LIANG P, ZHANG Y X, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Stainless Steels 2205 and 316L in Hydrofluoric Acid [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(6): 537-542.

[5] JENNINGS H S. Materials for hydrofluoric acid service in the new millennium[J]. NACE-International Corrosion Conference Series, 2001: 01345.

[6] PAWEL S J. Corrosion of high-alloy materials in aqueous hydrofluoric acid environments [J]. Corrosion, 2006, 50 (12) : 963-971.

[7] 于明飞, 向嵩, 马国强, 等. 高温浓硫酸中氟离子掺入对不锈钢耐蚀性能的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 882-888.  
YU M F, XIANG S, MA G Q, et al. Effects of fluoride ions on corrosion resistance of stainless steel in high-temperature concentrated sulfuric acid [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 882-888.

[8] 张宁, 杜华云, 贾建文, 等. 硫酸盐环境中奥氏体耐热钢的高温腐蚀行为及机理[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(2): 35-42.  
ZHANG N, DU H Y, JIA J W, et al. High Temperature Corrosion Behavior and Mechanism of Austenitic Heat Resistant Steels in Sulfate Environment [J]. Corrosion & Protection, 2025, 46(2): 35-42.

[9] 杨伟芳, 郭宇, 朱承飞, 等. 不同预处理工艺下316L不锈钢在高浓度氯化物环境中的腐蚀行为[J]. 钢管, 2024, 53(6): 6-12.  
YANG W F, GUO Y, ZHU C F, et al. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel with Different Pretreatment Processes in a High-concentration Chloride Environment [J]. Steel Pipe, 2024, 53 (6): 6-12.

[10] 张若曦, 刘旭霞, 任重, 等. 氯离子对316L在FCC烟气氨法脱硫环境中腐蚀的影响研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2024, 41(4): 20-25.  
ZHANG R X, LIU X X, REN Z, et al. Impact research of chloride ions on 316L corrosion in FCC flue gas ammonia desulfurization environment [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2024, 41(4): 20-25.

[11] 张颀利, 戴海龙, 张喆, 等. HF溶液中316L应力腐蚀开裂行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(6): 1633-1640.  
ZHANG Z L, DAI H L, ZHANG Z, et al. Stress Corrosion Cracking Behavior of 316L in Hydrofluoric Acid Solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44 (6): 1633-1640.