# 冷变形和溶解氧对 308L 不锈钢焊材 应力腐蚀开裂的影响规律

# 朱天语、汪家梅、张乐福

(上海交通大学 核科学与工程学院,上海 200240)

**摘要:目的**探究冷变形和溶解氧(DO)对 308L 不锈钢焊材在高温高压水环境中应力腐蚀开裂(SCC)行 为的影响规律。**方法**采用直流电压降法对 308L 试样裂纹扩展速率(CGR)进行在线测量,对比原始态、 冷变形态 308L 焊材在 DO 和氢气除氧两种水环境中的 SCC 性能。参照 F-A 模型,结合冷变形前后材料微 观组织和试样的断口形貌及裂纹扩展路径分析,给出冷变形和 DO 对 308L 焊材 SCC 影响规律的机理性解释。 结果 原始态 308L 焊材具有较低的 SCC 敏感性,且在恒载荷下裂纹扩展容易停滞,断口主要呈现穿晶开裂 形貌。20%冷变形可显著提高其 CGR 达1个数量级,断口呈现沿晶开裂形貌,且二次裂纹倾向于沿着δ-铁 素体和 γ-奥氏体相界面扩展。对于 20%冷变形 308L, DO 可提高其 CGR 近 2 个数量级。结论 冷变形和 DO 均能显著提高 308L 的 SCC 敏感性。冷变形通过提高奥氏体枝晶的晶界和奥氏体-铁素体相界的残余应变而 提高 308L 焊材的 SCC 敏感性;DO 通过在尖端和基体间形成电势差,促进尖端微区水化学的酸化或碱化, 加剧尖端金属溶解而加速裂纹扩展。

关键词: 308L; 冷变形; 溶解氧; 高温高压水; 应力腐蚀开裂; 裂纹扩展速率 中图分类号: TG172; TL341 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)01-0081-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.012

# Effects of Cold Work and Dissolved Oxygen on Stress Corrosion Cracking of 308L Weld Metal

#### ZHU Tian-yu, WANG Jia-mei, ZHANG Le-fu

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to study the influence laws of cold work and dissolve oxygen (DO) on the stress corrosion cracking (SCC) behavior of 308 L weld metal in high temperature water. SCC performance of 308L welding consumables in the original state and cold work state in DO and hydrogen deoxidized water environments are compared by using direct current potential drop (DCPD) to achieve on-line measurement of Crack Growth Rate (CGR) of 308 L Specimen. Referring to the F-A model, combined with the analysis of the microstructure of the material before and after cold work, and the fracture and crack

收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-06-18

Received: 2021-05-18; Revised: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0702203)

Fund: National Key Research and Development Projects (2017YFB0702203)

作者简介:朱天语(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为反应堆结构材料应力腐蚀开裂研究。

**Biography**: ZHU Tian-yu (1997—), Male, Master student, Research focus: stress corrosion cracking of structural materials in nuclear power plants. **引文格式:** 朱天语, 汪家梅, 张乐福. 冷变形和溶解氧对 308L 不锈钢焊材应力腐蚀开裂的影响规律[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 081-088.

ZHU Tian-yu, WANG Jia-mei, ZHANG Le-fu. Effects of Cold Work and Dissolved Oxygen on Stress Corrosion Cracking of 308L Weld Metal[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 081-088.

propagation path analysis of the sample, the mechanical explanation of the influence of cold work and DO on the SCC of 308L welding consumables is given. The original 308 L welding material has low SCC sensitivity, and the crack growth is easy to stagnate under constant load, and the fracture mainly presents a transgranular cracking morphology. 20% cold work can significantly increase its CGR by an order of magnitude; the fracture exhibits an intergranular cracking morphology, and secondary cracks tend to propagate along with the interface of  $\delta$ -ferrite and  $\gamma$ -austenite. For 20% cold work 308L, DO can improve its CGR by nearly 2 orders of magnitude. Both cold work and DO can significantly improve the SCC susceptibility of 308L. cold work improves the SCC sensitivity of 308L welding consumables by increasing the residual strain at the grain boundaries of austenite dendrites and austenite-ferrite phase boundaries; DO promotes the formation of a potential difference between the tip and the matrix to promote water in the tip micro-region. Chemical acidification or alkalization aggravates the dissolution of the tip metal and accelerates crack propagation.

**KEY WORDS:** 308L; cold work; dissolved oxygen; high temperature high pressure water; stress corrosion cracking; crack growth rate

308L 类不锈钢焊材因具有 5%~10%的 δ-铁素 体,能在提高焊接强度的同时,抑制焊接热裂纹的 出现<sup>[1-2]</sup>。相较于镍基焊材,具有更优异的焊接性能, 成为轻水堆核电站中管道以及反应堆压力容器和主 管道不锈钢接管-安全端最常用的焊接材料。其作为 核岛一回路管道的主要焊材,分布广,暴露面积大, 在高温高压水腐蚀的长期作用下,会难以避免地发生 腐蚀疲劳或应力腐蚀开裂(SCC)<sup>[2]</sup>。

由于 308L 相较于早期 82 和 182 等镍基焊材有着 更低的 SCC 敏感性,鲜有其发生开裂的现场报道, 使得目前关于 308L 定量化的试验数据报道并不充 分。δ-铁素体虽能提高其强度和焊接性能,但关于δ-铁素体对其在高温水环境下的 SCC 行为的影响规律 却尚存争议。早期,Manning<sup>[3]</sup>和 Shalaby<sup>[4]</sup>等学者针 对 316L 焊材 SCC 行为的研究发现,裂纹倾向于沿着 奥氏体-铁素体(γ/δ)相界萌生和扩展,并将其归因 于 γ/δ相界处的 P、S 等有害元素偏析或 γ/δ异相间形 成的局部电偶腐蚀。Du 等<sup>[5]</sup>研究发现,相较于 316L 母材,具有较高 γ/δ相界分布比的 316L 焊材具有更快 的 SCC 开裂速率,与 γ/δ相界具有更高的点蚀敏感性<sup>[3]</sup> 这一结论相吻合。Edwards<sup>[6]</sup>和日本东北大学的 Abe<sup>[7]</sup> 等学者指出,相同环境中,相较于纯奥氏体组织的 316L 母材,具有一定含量δ-铁素体的 316L 焊材具 有更低的应力腐蚀敏感性。林晓东等学者<sup>[8]</sup>更是指 出,具有 10%~15% δ-铁素体的 308L 焊材,在除氧和 含氧的一回路水中均具有极低的 SCC 裂纹扩展速率 (CGR)。

从工程角度考虑,随着材料成分改进和水化学条件提升,反应堆结构材料因敏化和恶劣水化学环境发生 SCC 的概率逐渐减小,但组装运输过程中意外引入的冷变形,以及焊接不当引入的残余应力/应变等材料缺陷,成为材料发生 SCC 的主要原因,而目前关于冷变形对焊材 SCC 的加速作用规律尚无清晰的报道。基于此,文中将对比研究冷变形和 DO 对 308L 焊材 SCC 裂纹扩展行为的影响规律。试验主要利用直流电压降法(DCPD)在线测量 308L 的 SCC CGR,结合冷变形前后材料的微观组织和断口形貌,分析讨论冷变形和 DO 作用机理。

## 1 试验

#### 1.1 材料

试验材料为铸态 308L 焊材,取自未经焊后退火处理的国产反应堆压力容器接管安全端 508-III-308L-316L 不锈钢异种焊接接头模拟件,其化学成分见表 1。

0/\_

表 1 308L 的化学成分(质量分数) Tab.1 chemical composition of the 308L weld metal (mass fraction)

									/0
С	Mn	Si	Р	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Fe
0.014	1.73	0.36	0.02	< 0.005	10.13	19.44	0.077	0.41	Bal.

为模拟运输或现场组装中意外引入的冷变形以 及焊接残余应变对裂纹扩展的加速机理,部分材料在 试验前沿着焊接接头的 T-L 方向<sup>[9]</sup>进行冷压处理,获 得 20%的冷变形量。冷变形前后,试样在 360 ℃空气 中的屈服强度分别为 313、546 MPa。308L 焊材的微 观组织如图 1 所示,呈现典型的奥氏体-铁素体双相 组织。根据相分析结果可知,δ-铁素体质量分数约为 10%。冷变形前后,材料中δ-铁素体的分布和含量均 无显著变化,但冷变形后奥氏体晶粒内部和奥氏体/δ-铁素体相界处的残余应变均显著提高。



图 1 冷变形前后 308L 焊材的微观组织 Fig.1 Microstructure of (a) as-welded and (b) 20%CW 308L

# 1.2 模拟核电一回路高温高压水中的 CGR 测试

采用 DCPD 技术,在模拟核电一回路高温高压水 中在线连续测量 SCC CGR。试样为 12.7 mm 厚的标 准紧凑拉伸(CT)试样<sup>[10]</sup>。完整的测量实验系统包 括力加载单元、循环水回路单元、高温高压釜、软件 控制和数据采集部分,具体的试验装置、测量方法和 水化学控制等参见文献[9,11-13]。

循环水回路通过添加 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、LiOH·H<sub>2</sub>O 和氩气 除氧,模拟压水堆一回路正常工况下的水化学环境, 使得 B 的质量浓度维持在 1200 µg/L, Li 的质量浓度 维持在 2 µg/L。CGR 测量过程中,采用在线改变水 化学的方式,在保持载荷、温度和水化学等其他条件 不变的前提下,只改变溶解气体单一变量,并在试验 过程中实现不同溶解气体的快速反复切换,获得多次 重复的试验数据。采用内置式高温参比电极<sup>[13]</sup>测量不 同溶解气体环境下试样和铂片的腐蚀电位(ECP), 并根据溶液温度和 pH 值,校正至相对于标准氢电极 (SHE)的电位。

CGR 的测量通常分为 4 个阶段: 空气中预制疲 劳裂纹阶段、水中疲劳扩展向恒载荷 SCC 过渡阶段、 恒载荷 SCC 阶段和试验后疲劳拉断阶段<sup>[9,11-12]</sup>。首先, 在空气中依次采用频率 *f*=1 Hz,载荷比 *R* 为 0.3、0.5、 0.7 的正弦波加载方式,预制约 1 mm 的尖锐裂纹。 之后在高温高压水环境中,根据试验材料每个阶段的 CGR,依次降低加载频率至 0.001 Hz 后,使用梯形 波加载,并在最大载荷处引入 3 000~84 000 s 甚至更 长的保载时间,以确保成功过渡到 IGSCC。完成裂纹 扩展的过渡后,转变为恒 *K* 加载的 SCC 测量阶段。

## 2 试验结果

## 2.1 原始态 308L 的 CGR

原始态 308L 在模拟一回路高温高压含氧水环境 中的裂纹扩展曲线如图 2a 所示。在进行预开裂和连 续多步的缓慢过渡后,在 772 h 引入恒 K,测得 K= 20 MPa·m<sup>1/2</sup>下的 SCC CGR 为 7.78×10<sup>-9</sup> mm/s。随后, 将  $K_{max}$ 升至 30 MPa·m<sup>1/2</sup>,并通过引入循环载荷激活 裂纹。转为 30 MPa·m<sup>1/2</sup>恒 K 加载后,SCC CGR 仅为 1.68×10<sup>-9</sup> mm/s,并逐渐呈现停止扩展的趋势。

为进一步研究溶解氧对原始态 308L SCC 裂纹扩 展行为的影响规律,提高试验温度至 360 °C,DO 和 氢气除氧环境下的 CGR 曲线如图 2b 所示。由图 3 可 知,其在 2  $\mu$ g/L 的 DO 环境中,经过缓慢过渡后,恒 *K*=40 MPa·m<sup>1/2</sup>下的 SCC CGR 为 6.4×10<sup>-8</sup> mm/s。但 裂纹扩展一段时间后,也逐渐出现停滞现象。随后, 持续通入 H<sub>2</sub>进行除氧,快速切换至 H<sub>2</sub>除氧状态,并 引入一系列的循环载荷,以激活裂纹。引入恒 *K*= 40 MPa·m<sup>1/2</sup>后,SCC CGR 再次停止扩展。

由此可见,原始态 308L 在不同温度和溶解气体 的高温高压水环境中,均具有较低的 SCC 敏感性, CGR 处于较低水平。恒载荷下,极易出现裂纹停滞 现象。

## 2.2 20%CW308L的CGR

与原始态 308L 不同,冷变形处理后的 308L 展现出较高的 SCC 敏感性。20%CW308L 在高温高压水中的裂纹扩展曲线如图 3 所示。在 K=35 MPa·m<sup>1/2</sup>的加载条件下,向水环境中通入 2 μg/L DO,待裂纹扩



图 2 原始态 308L 在不同温度水环境(B 1000 μg/L, Li 2.2 μg/L, DO 2 μg/L) 中的 CGR 曲线 Fig.2 SCC growth response of AR 308L in water (B 1000 μg/L, Li 2.2 μg/L, DO 2 μg/L) at different temperature



图 3 冷变形 308L(20CW30802)在 360 ℃、DO/DH 纯 水环境中的 CGR 曲线

Fig.3 SCC growth response of cold work 308L (20CW30802) in 360  $^\circ C$  , DO/DH pure water

展速度稳定后,在线切换水化学条件,使环境保持溶 解氢(DH)的除氧状态,并测得对应的 CGR。为了 验证试验数据的可靠性,设计了重复试验,得到2组 不同溶解气体环境中的 CGR 数据。由图3可知,2次 通入溶解氧后,试样腐蚀电位均显著升高,CGR分别 为8.1×10<sup>-7</sup> mm/s和5.4×10<sup>-7</sup> mm/s。通入H<sub>2</sub>除氧后, 随着腐蚀电位的降低,CGR 随之显著降低,分别降低 至5.0×10<sup>-9</sup> mm/s和3.8×10<sup>-8</sup> mm/s。目前对于具有双相 组织的 308L 不锈钢焊材在不同溶解氧环境下的应力 腐蚀裂纹扩展行为研究较少,但对比同系列的 316L 不锈钢及焊材的 SCC CGR 结果<sup>[14-22]</sup>表明,溶解氧对 308L 等不锈钢应力腐蚀具有显著的促进作用,而这 一加速作用程度因材料自身状态的改变而有所不同。 对具有较低 SCC 敏感性的原始态 308L 焊材,当裂纹 出现停滞后,溶解氧的加速作用不显著;但对于 20% 冷变形处理后的 308L, DO 可提高其 CGR 近 2 个数 量级。

#### 2.3 试样断口形貌及裂纹扩展路径观察分析

原始态和 20%冷变形 308L 在高温高压水环境中 CGR 试验后的断口形貌如图 4 和图 5 所示。由原始 态 SEM 图可见,断口分为 4 个区域,分别为预制裂 纹区、过渡区、应力腐蚀区和疲劳断裂区。不同加载 阶段的断口呈现明显的分界线,且相对平直。冷变形 前后,材料的预制裂纹和过渡区均呈现典型的"片层 状"和"河流花样"的穿晶开裂形貌。当过渡完成后, 裂纹进入沿晶开裂区。对于原始态 308L, 在 325 ℃ 高温水中试验后,裂纹前端区域并未发现显著的沿晶 (树枝晶)断口形貌,断口表面形貌粗糙,在放大的 应力腐蚀区仅可观察到少许二次裂纹(见图 4a)。 提高试验温度至 360 ℃后,在恒载荷的应力腐蚀区 域,断口整体上一致表现为穿晶形貌,但局部区域观 察到显著的二次沿晶裂纹(见图 4b)。这表明其呈 现一定的沿晶 SCC 敏感性, 但由于焊材组织结构的 不均匀性,不同区域的沿晶 SCC 敏感性也有所不同。



a 325 °C

b 360 ℃ 图 4 原始态 308L 的断口 SEM 形貌 Fig.4 SEM images of the fracture surface AR308L



图 5 20%冷变形 308L 断口 SEM 形貌 Fig.5 SEM images of the fracture surface of 20%CW308L

冷变形 308L 的应力腐蚀区域呈"鳞片状",表现为穿晶和沿晶的混合形貌。对局部区域放大观察可 发现,裂纹沿着铁素体沿晶断裂(见图 5),但铁素 体周围的奥氏体呈现出穿晶断裂特征。此外,由图 6 可见,在扩展路径前端,裂纹出现了分叉,主裂纹向 前扩展,二次裂纹沿着 δ-铁素体和 γ-奥氏体相界面扩 展。这与 Lucas 等<sup>[23]</sup>报道的在模拟反应堆高温高压水 环境中,316L 焊接接头的应力腐蚀裂纹沿 δ/γ 相界面 生长的现象一致。典型的沿晶(奥氏体树枝晶和铁素 体晶界)开裂特征表明,与冷变形后材料在模拟 PWR 一回路高温水环境中具有较高 SCC 敏感性的试验结 果相吻合。



图 6 20%冷变形 308L 的裂纹扩展路径 Fig.6 SEM images of the crack paths of 20%CW308L

# 3 分析与讨论

### 3.1 CGR 数据分析

冷变形前后,308L 焊材在360 ℃ DO 和 DH 环 境下的 CGR 数据对比如图 7 所示。20%冷变形将显 著提高308L 焊材的 SCC CGR,冷变形后,CGR 提 高了 1 个数量级。这与 Andresen<sup>[14]</sup>、Shoji<sup>[15-16]</sup>、 Arioka<sup>[17]</sup>、Zhang<sup>[19]</sup>、Lu<sup>[20]</sup>和 Du<sup>[21-22]</sup>等对冷变形 316L 不锈钢 SCC 的研究结果相吻合。



图 7 冷变形前后 308L 焊材在 360 ℃高温水环境中的裂纹 扩展速率数据对比

Fig.7 Data comparing of CGRs of as-welded and 20%CW 308L weld metal in 360  $^\circ\!\!C$  high temperature water

对于原始态 308L,对比数据可见,DO 能一定程 度提高其 CGR,但因焊材微观组织(树枝晶尺寸、 铁素体分布与生长方向等)差异较大,同种环境下测 得的 CGR 偏差较大,且即使在 DO 环境中,裂纹扩 展过程中也极易出现停滞,从而掩盖 DO 对原始态 308L 焊材的加速作用。对于 20%冷变形处理后的 308L,DO 可显著提高其 CGR 近 2 个数量级,与传 统 316L 等奥氏体不锈钢<sup>[14-22]</sup>的结果相符。

### 3.2 冷变形对 308L SCC 的影响

Andresen<sup>[14]</sup>和 Shoji<sup>[15-16]</sup>等对冷变形 316L 的应力 腐蚀研究发现,相对于原始态,适当冷变形的 316L, 其 CGR 提高了 10~20 倍。根据其提出的 Ford-Andresen 模型<sup>[24]</sup>, CGR 大小主要由裂纹尖端应变速 率和尖端金属氧化-溶解-再钝化的动力学过程共同决 定。冷变形首先会提高材料的屈服强度和硬度<sup>[14-22]</sup>, 在晶界和相界附近引入较高的残余应变,这些都将强 化裂纹尖端的应力/应变场,提高裂纹尖端的应变速 率,加快裂纹扩展。此外,杜等学者<sup>[25]</sup>指出,冷变形 的材料易在晶界处堆积大量的位错,进而为金属元素 及氧的扩散提供快速通道,使得扩散速率增加,晶界 氧化速率增加,从而 CGR 随之增加。

## 3.3 DO 对 308L SCC 的影响

DO 对 308L 应力腐蚀的促进作用,可以通过裂 纹尖端金属氧化动力学<sup>[24,26-27]</sup>解释。在应力腐蚀过程 中,裂纹尖端与金属基体形成腐蚀原电池结构,裂纹 尖端金属氧化,发生阳极反应,裂纹外氧元素还原为 O<sup>2-</sup>,发生还原反应。裂纹尖端与基体形成电势差, 侵蚀性阴离子(如 OH<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等)自发地向裂 纹深处扩散。这些阴离子进入裂纹尖端后,会使尖端 的水化学 pH 减小,进一步促进金属的溶解,降低已 生成氧化膜的保护性,促进裂纹扩展。

本试验环境为硼锂缓冲液或超纯水,不存在 CF、  $SO_4^{2-}$ 等外部引入的侵蚀性阴离子,尖端金属酸化溶 解不显著。但由于裂纹狭长,水的流动性低,水质交 换较少,裂纹内外部水环境差异显著。在 DO 条件下, O元素沿着浓度梯度进入裂纹深处,在抵达裂纹尖端 前,与尖端金属反应,被消耗殆尽,而裂纹外部环境 中含有大量的氧,这使得裂纹尖端与基体之间的电势 差增大。OH<sup>-</sup>在电势差驱动下向尖端聚集,尖端附近 形成局部碱性环境,金属溶解度增加<sup>[26-27]</sup>,钝化膜稳 定性降低,最终导致阳极电流密度增加。根据 Ford-Andresen 模型, SCC CGR 与阳极电流密度呈正 相关,阳极电流密度增加势必导致 CGR 增加。相反, 在 DH 条件下,裂纹尖端与基体水化学环境相似,基 体与裂纹尖端不存在显著的电势差,尖端不存在酸化 或碱化。同时,水中的 H2可以抑制金属的氧化,延 缓尖端金属溶解,使得 CGR 降低。

第19卷 第1期

## 4 结论

1)冷变形通过提高奥氏体枝晶的晶界和奥氏体-铁素体相界的残余应变而提高 308L 焊材的 SCC 敏感性。20%冷变形后, CGR 将提高约 1 个数量级。

2)溶解氧对 308L 焊材 SCC 的促进作用与裂 纹尖端金属腐蚀速率密切相关,溶解氧通过在尖端 和基体间形成电势差,促进尖端微区水化学的酸化 或碱化,加剧尖端金属溶解而加速裂纹扩展。对于 20%冷变形的 308L,溶解氧可提高其 CGR 近 2 个 数量级。

#### 参考文献:

[1] 明洪亮.核电安全端异种金属焊接件的微观结构及局 域力学性能、腐蚀与应力腐蚀研究[D].北京:中国科 学院大学,2017.

> MING Hong-liang. Study on Microstructure, Local Mechanical Properties and Stress Corrosion of Nuclear Safe-end Dissimilar Metal Weld[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

 [2] 李光福. 压水堆压力容器接管-主管安全端焊接件在高 温水中失效案例和相关研究[J].核技术, 2013, 36(4):
 232-237.

> LI Guang-fu. Failure Cases of Welds between Pressure Vessel Nozzle and Main Pipe Safe-end in High Temperature Water Environments and Relevant Research[J]. Nuclear Techniques, 2013,36(4): 232-237.

- [3] MANNING P E, DUQUETTE D, SAVAGE W F. Technical Note: The Effect of Retained Ferrite on Localized Corrosion in Duplex 304L Stainless Steel[J]. Welding Journal, 1980, 59(9): 260.
- [4] SHALABY H M. Failure Investigation of 321 Stainless Steel Pipe to Flange Weld Joint[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 80: 290-298.
- [5] DU Dong-hai, WANG Jia-mei, CHEN Kai, et al. Environmentally Assisted Cracking of Forged 316LN Stainless Steel and Its Weld in High Temperature Water[J]. Corrosion Science, 2019, 147: 69-80.
- [6] EDWARDS D J, THOMAS L E, ASANO K, et al. Microstructure, Microchemistry and Stress Corrosion Crack Characteristics in a BWR 316LSS Core Shroud Weld[C]//13th Int Conf on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. Whistler, Canada: [s. n.], 2007.
- [7] ABE H, WATANABE Y. Role of Δ-Ferrite in Stress Corrosion Cracking Retardation near Fusion Boundary of 316NG Welds[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 424(1-3): 57-61.
- [8] DONG Li-jin, HAN En-hou, PENG Qun-jia, et al. Envi-

ronmentally Assisted Crack Growth in 308L Stainless Steel Weld Metal in Simulated Primary Water[J]. Corrosion Science, 2017, 117: 1-10.

- [9] WANG Jia-mei, SU Hao-zhan, CHEN Kai, et al. Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior of Alloy 52 M in High-Temperature Water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 528: 151848.
- [10] ASTM E399-20, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials[S].
- [11] 杜东海, 陆辉, 陈凯, 等. 冷变形 316 不锈钢在高温水中的应力腐蚀开裂行为[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(11): 1977-1983.
  DU Dong-hai, LU Hui, CHEN Kai, et al. Stress Corrosion Cracking Behavior of Cold-Deformed 316 Stainless Steel in High Temperature Water[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(11): 1977-1983.
- [12] CHEN Kai, WANG Jia-mei, DU Dong-hai, et al. DK/Da Effects on the SCC Growth Rates of Nickel Base Alloys in High-Temperature Water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 503: 13-21.
- [13] KIM Y J, ANDRESEN P L. Data Quality, Issues, and Guidelines for Electrochemical Corrosion Potential Measurement in High-Temperature Water[J]. Corrosion, 2003, 59(7): 584-596.
- [14] ANDRESEN P, ANGELIU T, HORN R, et al. Effect of Deformation on SCC of Unsensitized Stainless Steel[C]// Corrosion 2000. [s. 1.]: NACE, 2000
- [15] SHOJI T, LU Zhan-peng, MURAKAMI H. Formulating Stress Corrosion Cracking Growth Rates by Combination of Crack Tip Mechanics and Crack Tip Oxidation Kinetics[J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 769-779.
- [16] SHOJI T, LI G F, KWON J, et al. Quantification of Yield Strength Effects on IGSCC of Austenitic Stainless Steels in High Temperature Water[C]// Proceedings of the 11th Conference of Environmental Degradation of Materials in Materials in Nuclear Systems. Stevenson: [s. n.], 2003: 834-844.
- [17] ARIOKA K, YAMADA T, TERACHI T, et al. Cold Work and Temperature Dependence of Stress Corrosion Crack Growth of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated and Oxygenated High-Temperature Water[J]. Corrosion, 2007, 63(12): 1114-1123.
- [18] DONG Li-jin, PENG Qun-jia, ZHANG Zhi-ming, et al. Effect of Dissolved Hydrogen on Corrosion of 316NG Stainless Steel in High Temperature Water[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 295: 403-414.
- [19] ZHANG Li-tao, WANG Jian-qiu. Effect of Dissolved Oxygen Content on Stress Corrosion Cracking of a Cold Worked 316L Stainless Steel in Simulated Pressurized Water Reactor Primary Water Environment[J]. Journal of

Nuclear Materials, 2014, 446(1-3): 15-26.

- [20] LU Zhan-peng, SHOJI T, MENG Fan-jiang, et al. Effects of Water Chemistry and Loading Conditions on Stress Corrosion Cracking of Cold-Rolled 316NG Stainless Steel in High Temperature Water[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 247-262.
- [21] DU Dong-hai, CHEN Kai, LU Hui, et al. Effects of Chloride and Oxygen on Stress Corrosion Cracking of Cold Worked 316/316L Austenitic Stainless Steel in High Temperature Water[J]. Corrosion Science, 2016, 110: 134-142.
- [22] DU Dong-hai, CHEN Kai, YU Lun, et al. SCC Crack Growth Rate of Cold Worked 316L Stainless Steel in PWR Environment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 456: 228-234.
- [23] LUCAS T, FORSSTRÖM A, SAUKKONEN T, et al. Effects of Thermal Aging on Material Properties, Stress Corrosion Cracking, and Fracture Toughness of AISI 316L Weld Metal[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(8): 3956-3970.
- [24] ANDRESEN P L, FORD F P. Life Prediction by Mecha-

nistic Modeling and System Monitoring of Environmental Cracking of Iron and Nickel Alloys in Aqueous Systems[J]. Materials Science and Engineering: A, 1988, 103(1): 167-184.

- [25] 杜东海. 压水堆一回路冷变形 316L 不锈钢应力腐蚀开裂行为与机理及裂纹扩展速率预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
  DU Dong-hai. Stress Corrosion Cracking Behavior and Crack Growth Rate Prediction of Cold Worked 316L Stainless Steel in Pressurized Water Reactor Primary Environments[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
  - [26] AIREY G, ANDRESEN P, BROWN J. Characterization of the Roles of Electrochemistry, Convection and Crack Chemistry in Stress Corrosion Cracking[C]//Seventh International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems., 1995.
  - [27] ANDRESEN P L, YOUNG L M. Crack Tip Microsampling and Growth Rate Measurements in Low-Alloy Steel in High-Temperature Water[J]. Corrosion, 1995, 51(3): 223-233.