注锌对 316L 不锈钢焊接接头应力腐蚀 开裂行为影响研究

贺韶¹,韩姚磊^{2*},李玉龙¹,明庭云²,尚建路²,汪家梅³, 梅金娜²,朱平²,张乐福³,彭群家²

(1.中广核研究院有限公司,广东 深圳 518000; 2.苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 3.上海交通大学 核科学与工程学院,上海 200240)

摘要:目的研究 316L 不锈钢焊接接头在不同注锌含量高温高压水中的应力腐蚀开裂(SCC)行为,为核 电站注锌技术应用提供支撑。方法 利用慢应变速率拉伸试验研究不锈钢焊接接头的 SCC 裂纹萌生行为,利 用直流电压降技术研究 SCC 裂纹扩展行为。通过扫描电子显微镜、能谱分析和电子背散射电子衍射技术研 究焊接接头 SCC 裂纹萌生位置和扩展路径的微观组织结构特征。结果 SCC 裂纹萌生试验结果表明,在高 温高压水环境中,所有注锌浓度下,焊接接头的熔覆金属区裂纹最多,热影响区次之,融合线未开裂。裂 纹扩展试验结果显示,注锌对不锈钢焊接接头熔覆金属区域和热影响区应力腐蚀裂纹扩展行为的影响不显 著,裂纹扩展速率均低于 8.0×10⁻⁸ mm/s (1.6 mm/a)。结论 316L 不锈钢焊接接头在不同注锌浓度环境中的 应力腐蚀开裂敏感性均较低。

关键词:应力腐蚀开裂;裂纹萌生;裂纹扩展;焊接接头;注锌;高温高压水;核电站 中图分类号:TG172 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2025)03-0127-09 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.015

Effect of Zinc Injection on Stress Corrosion Cracking Behavior of 316L Stainless Steel Welded Joint

HE Shao¹, HAN Yaolei^{2*}, LI Yulong¹, MING Tingyun², SHANG Jianlu², WANG Jiamei³, MEI Jinna², ZHU ping², ZHANG Lefu³, PENG Qunjia²

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215004, China; 3. School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The work aims to study the stress corrosion cracking (SCC) behavior of 316L stainless steel welded joints in high temperature and high pressure water with different Zn injection concentrations, to provide a technical support for Zn injection

收稿日期: 2024-10-24; 修订日期: 2024-12-11

Received: 2024-10-24; Revised: 2024-12-11

基金项目:中国广核集团科研项目(3100129119);姑苏创新创业领军人才专项(ZXL2017112)

*通信作者(Corresponding author)

Fund: Scientific Research and Innovation Project of China General Nuclear Power Group (3100129119); Gusu Innovation Leader Talents Program (ZXL2017112)

引文格式: 賀韶, 韩姚磊, 李玉龙, 等. 注锌对 316L 不锈钢焊接接头应力腐蚀开裂行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 127-135. HE Shao, HAN Yaolei, LI Yulong, et al. Effect of Zinc Injection on Stress Corrosion Cracking Behavior of 316L Stainless Steel Welded Joint[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 127-135.

technology of nuclear power plants. The SCC initiation behavior of a stainless steel welded joint was studied by slow strain rate tensile tests. The SCC propagation behavior in the zinc injection water was compared according to the direct current potential drop (DCPD). Microstructure characteristics of SCC crack initiation locations and propagation paths of welded joints were observed and analyzed by scanning electron microscopy, energy spectrum analysis and electron backscatter diffraction. The SCC crack initiation test results showed that under all zinc injection concentrations in high temperature and high pressure water environments, the cladding metal zone had the most cracks, followed by the heat affected zone, and the fusion line was not cracked. The crack propagation test results showed that the effect of zinc injection on the SCC initiation behavior and propagation behavior of the stainless steel welded joint is insignificant. The crack propagation rate was lower than 8.0×10^{-8} mm/s (1.6 mm/a). In conclusion, 316L stainless steel welded joints have low stress corrosion cracking sensitivity in different zinc injection concentrations.

KEY WORDS: stress corrosion cracking; crack initiation; crack propagation; welded joint; zinc injection; high temperature high pressure water; nuclear power plant

应力腐蚀开裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 是核电站主回路部件的主要失效形式之一,严重时导 致反应堆非计划停堆。反应堆建造过程中, 主回路关 键结构的连接广泛采用焊接方式,如反应堆中压力容 器出口接管、蒸汽发生器一回路侧接管以及稳压器波 动管接管与安全接管的连接。由于焊接接头内部存在 化学成分过渡区及焊接过程引入的变形和应力,且其 长期服役在高温高压水环境, 使得压力容器、蒸汽发 生器等关键部件的接管嘴和安全端的焊接部位发生 SCC 破坏的可能性极大,国际上已发生多起由于焊接 接头发生 SCC 导致泄漏的事件^[1-5]。由于不锈钢具有 良好的综合应用性能,如耐高温腐蚀、较好的高温力 学性能、成本低等, 而被国内核电站用作主回路焊接 部件的主要焊接用合金材料。研究不锈钢焊接接头 SCC 行为及其缓解技术可以为国内核电站运行管理 工作和运行许可证延续论证工作提供技术支撑。

注锌是一种基于水化学控制的 SCC 缓解技术^[6-8]. 可以通过改变氧化膜结构影响材料在高温高压水环 境中的 SCC 行为。核电站主回路金属结构材料在注 锌高温高压水环境中会发生转变反应,形成更薄、更 稳定和更具有保护性的氧化膜^[9-14], 主要由 Zn²⁺代替 氧化膜中 AB₂O₄类正尖晶石结构中的二价阳离子(如 Fe²⁺、Co²⁺、Ni²⁺等),生成ZnCr₂O₄、ZnFe₂O₄。氧 化膜为双层结构,内层相对致密、少孔、富铬,主要 由 ZnCr₂O₄尖晶石构成, 外层多孔主要由 ZnFe₂O₄尖 晶石构成,注锌后氧化物颗粒更加细小。关于注锌对 不锈钢高温高压水环境中的 SCC 行为影响,目前学 者一般认为这种具有保护性的氧化膜会对提高抗 SCC 能力。部分学者采用敏化不锈钢研究注锌对 SCC 行为影响, Wu 等^[15-17]研究发现, 敏化不锈钢在无锌 条件下, SCC 的平均生长速率约为 2.3×10⁻⁶ mm/s, 当注入 10 μg/L 的锌时, SCC 的生长速率降低为 9.2× 10⁻⁷ mm/s。当注入 50 µg/L 锌后, SCC 生长速率进一 步降至 2.6×10^{-7} mm/s,注锌明显降低了敏化不锈钢在 高温高压水中的 SCC 生长速率。在 Andresen 等^[18]

对敏化 304 不锈钢的研究中,发现将 5~10 µg/L 的锌 注入 288 ℃除氧或含 200 µg/L 溶解氧的纯水中时, 不锈钢的裂纹扩展速率降低了约 20%。这种敏化状态 与实际核电站采用材料的性能有较大差异,其晶界贫 铬具有较高的晶界腐蚀和 SCC 敏感性。上述研究结 果表明, 注锌可以提高敏化不锈钢的抗 SCC 性能。 另有较多学者采用非敏化状态不锈钢开展注锌对 SCC 裂纹萌生和扩展行为影响的研究, Arjmand 等^[14] 发现,长期浸泡于含锌高温高压水环境中,注锌使冷 加工 316L 不锈钢的腐蚀电位向更正的电势转变,并 降低其腐蚀速率,明显提高了其电化学腐蚀性能,并 使不锈钢的 SCC 裂纹扩展速率降低了 90%以上。 Zhang 等^[19]研究发现, 20%冷加工 316L 不锈钢在含 有 60 μg/L 锌的 325 ℃高温高压水环境(1.6 mg/L 溶 解氢)中,SCC裂纹扩展速率比未注锌环境降低了 60%以上,并在裂纹尖端及其附近扩展路径上发现存 在 ZnCr₂O₄尖晶石氧化物。Morra 等^[20]报道了 20%冷 加工 316L 不锈钢在含有 20 µg/L 锌的 288 ℃高温高 压纯水(2mg/L 溶解氧)中,裂纹扩展速率下降了 30%左右。Chen 等^[21]研究发现,在注锌质量浓度为 40 µg/L 高温高压水环境中, 20%冷加工 316L 不锈钢 SCC 萌生应力阈值较高,认为注锌提高了其抗 SCC 性能。同时发现,当先在不含锌的高温高压水环境中 预氧化处理后,注锌对 316L 不锈钢 SCC 萌生行为无 显著影响。但也有学者发现,随注锌浓度增加,SCC 敏感性并非呈单一增加趋势。Huang 等^[9]研究了 316LN 不锈钢在两种应变速率 9.26×10⁻⁷ /s 和 4.63× 10⁻⁷/s下的 SCC 敏感性,发现应变速率较高时, SCC 敏感性随注锌浓度增加先降低、后升高,而应变速率 较低时,应力腐蚀敏感性先升高、后降低、再升高。 杜东海等[22]对比了不同浓度乙酸锌对 316 不锈钢裂 纹扩展速率的影响,发现在含10 µg/L 乙酸锌的高温 高压水环境中,316不锈钢裂纹扩展速率降低约80%, 而含 20、40 ug/L 乙酸锌的高温高压水环境中,裂纹 扩展速率上升,分析认为是乙酸根离子浓度增加导致

裂纹扩展速率增大。通过上述分析可以看出,注锌对 非敏化状态不锈钢的影响结论不一致,有的认为注锌 可以提高抗 SCC 性能,有的结果显示部分试验条件 下注锌会降低抗 SCC 性能。综上所述,目前注锌研 究对象多集中于敏化或非敏化不锈钢母材的研究,而 对于焊接接头位置研究较少,关于注锌对不锈钢焊接 接头的 SCC 行为影响规律不明。本文针对 316L 不锈 钢焊接接头开展不同注 Zn 浓度高温高压水环境中应 力腐蚀开裂萌生和扩展行为研究,揭示注锌浓度对 316L 不锈钢焊接接头应力腐蚀行为影响规律。

1 试验

1.1 材料及试样

试验材料是母材为 Z3CN20.09M 不锈钢、熔覆金 属为 316L 不锈钢的焊接接头,结构如图 1 所述。裂 纹萌生试验中,所用试样为棒状拉伸试样,试样总长 60 mm,其中平行段长度为 25 mm,直径为 3 mm, 横跨焊接接头,夹持段为 *M*6 mm 螺纹。其中,平行 段及过渡段进行抛光处理,达到镜面效果。裂纹扩展 试验中,所用试样是厚度为 12.7 mm 的紧凑拉伸 (Compact Tension, CT)试样。





1.2 裂纹萌生试验

参照 GB/T 15970.7—2017,通过慢应变速率拉伸 (Slow Strain Rate Tensile, SSRT)试验在苏州热工 研究院有限公司的应力腐蚀试验平台开展不锈钢焊 接接头裂纹萌生试验。SSRT 试验在高温高压水中进 行,试验温度为 320 ℃,试验压力为 15.5 MPa。水溶 液中硼(以硼酸形式加入)的质量浓度为1 200 mg/kg, 锂(以一水合氢氧化锂形式加入)的质量浓度为 2.2 mg/kg, 溶解氧质量浓度低于 5 μ g/L, 溶解氢体积 浓度为 30 mL/kg。为研究不同注锌浓度对焊接接头裂 纹萌生行为的影响, 在锌质量浓度(以醋酸锌形式加入)分别为 0、10、40、100 μ g/L 的溶液中进行 SSRT 试验, 应变速率为 4×10⁻⁷/s。试样拉断后, 待冷却后 取出, 通过型号为 ZEISS Sigma 300 的场发射扫描电 子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和 能谱(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)等分析 试样断口及剖面裂纹形貌, 采用电压为 20 kV, 并测 量相关的性能数据(如断后伸长率等)。

1.3 裂纹扩展试验

分别对热影响区和熔覆金属区域材料进行裂纹 扩展试验。裂纹扩展试验首先需要在室温空气中对 CT 试样进行疲劳裂纹预制。对于 12.7 mm CT 试样, 一般采用 25 MPa·m^{1/2} 的恒定 K 值(本文中 K 值指的 是张开型 K₁值),依次以载荷比 R=0.3、0.5、0.7 和 频率 *f*=1 Hz 的交变载荷交替加载,获得空气中的预 制疲劳裂纹,通常为 1~1.5 mm。预制疲劳裂纹后的 试样转入高压釜内,在 320 ℃、15.5 MPa 的水溶液中 进行裂纹扩展试验。裂纹扩展整体试验流程及水化学 参数如图 2 和表 1 所示。应力腐蚀裂纹扩展试验后, 在裂纹扩展曲线上对不同的阶段进行拟合,进而得到 各个不同试验条件下的裂纹扩展速率。通过比较不同 条件下的裂纹扩展速率可以得到试验条件对裂纹扩 展速率的影响规律。采用电子背散射衍射(Electron



Fig.2 Crack propagation experiment process

表 1 裂纹扩展试验水化学参数

Tab 1	Water	chemical	narameters	of crack	propagation	experiment
140.1	water	cincinical	parameters	OI CIACK	propagation	experiment

序号	溶液成分	$K/(MPa \cdot m^{1/2})$
1	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li, DO<5 μg/L, DH=30 mL/kg, 锌质量浓度为 100 μg/L	25
2	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li, DO<5 μg/L, DH=30 mL/kg, 锌质量浓度为 100 μg/L	30
3	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li, DO<5 μg/L, DH=30 mL/kg, 锌质量浓度为 100 μg/L	35
4	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li,DO<5 μg/L,DH=30 mL/kg,锌质量浓度为 40 μg/L	35
5	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li,DO<5 μg/L,DH=30 mL/kg,锌质量浓度为 10 μg/L	35
6	1 200 mg/kg B+2.2 mg/kg Li,DO<5 μg/L,DH=30 mL/kg,锌质量浓度为 0	35

Backscatter Diffraction, EBSD)对扩展路径进行研究 分析。采用型号为 JEM-2100F 的透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM)对裂纹尖 端进行微观组织结构分析,电压为 200 kV。

2 结果及分析

2.1 裂纹萌生试验

不同注锌浓度下,焊接接头的慢应变速率拉伸试

验应力-应变曲线及断后伸长率如图 3 所示。在 4 种 注锌浓度下,焊接接头拉伸曲线的变化规律基本一 致,均在 325 MPa 左右发生屈服(如图 3a 所示), 断后伸长率随注锌浓度增加先有所下降、后有所上升 (如图 3b 所示)。

不锈钢焊接接头在不同注锌浓度下的表面裂纹 形貌及元素分布如图 4 所示。图 4a、d、g、j为熔覆 金属区域低倍 SEM 照片,图 4b、e、h、k 为熔覆金 属区域裂纹高倍放大图。图 4c、f、i、l 中虚线左侧



图 3 焊接接头在不同注锌浓度中的载荷-位移曲线及断后伸长率

Fig.3 Stress-strain curves of SSRT tests under different Zn concentrations and elongation: a) stress-strain curves; b) elongation



图 4 不锈钢焊接接头在不同 Zn 含量高温高压水环境 SSRT 试验后的表面 SEM-EDS 观察(a,d,g,j 为熔覆金属区域低倍 SEM 照片; b、e、h、k 为熔覆金属区域裂纹高倍 SEM 照片; c、f、i、l 左侧为融合线附近 SEM 照片,右侧为 EDS 成分分布图) Fig.4 Surface SEM-EDS observation of stainless steel welded joint after SSRT tests in high temperature water with different Zn concentrations (a, d, g, j are low magnification SEM images of weld metal; b, e, h, k are high magnification SEM images of cracks in weld metal; c, f, i, l are SEM images near the fusion line on the left, and EDS composition distribution maps on the right)

为熔覆金属区域,右侧为基体金属区域。从图 4 中可 以发现,表面裂纹均集中于熔覆金属区域,裂纹平直, 无沿晶开裂特征,裂纹数量多且长度大。通过图 4 右 侧的成分分布可以鉴别融合线位置,从图 4c、f、i、 1 的 SEM 照片可以看出,融合线和母材热影响区未发 生开裂或有少量裂纹,SCC 敏感性低,熔覆金属裂纹 数量多、尺寸大,SCC 敏感性高。锌的加入没有明显 改变表面裂纹数量。

2.2 裂纹扩展试验

2.2.1 熔覆金属区域 SCC 裂纹扩展行为

不锈钢焊接接头熔覆金属区域在模拟一回路高 温高压水环境中的 SCC 裂纹扩展曲线如图 5 所示。 锌质量浓度为 100 μ g/L、K=25 MPa·m^{1/2}时, SCC 裂 纹扩展速率为 3.21×10⁻⁹ mm/s。之后,将 K 升至 30 MPa·m^{1/2}, SCC 裂纹扩展速率为 3.49×10⁻⁹ mm/s, 裂纹扩展基本停滞。经过疲劳启动裂纹后,K 为 35 MPa·m^{1/2}时,SCC 裂纹扩展速率为 3.06×10⁻⁹ mm/s, 裂纹仍然基本没有扩展。保持 K=35 MPa·m^{1/2}, 锌质 量浓度从 100 μ g/L 降至 40 μ g/L 时, SCC 裂纹扩展速 率为 7.32×10⁻⁹ mm/s。锌浓质量度降到 10 μ g/L 时, SCC 裂纹扩展速率为 2.47×10⁻⁹ mm/s。锌浓度完全去 除,SCC 裂纹扩展速率为 4.02×10⁻⁹ mm/s。由此可见, 不锈钢焊接接头熔覆金属区域在模拟压水堆一回路 高温水环境中具有很低的 SCC 敏感性,裂纹扩展速 率均小于 1.0×10⁻⁸ mm/s (0.32 mm/a)。

不锈钢焊接接头熔覆金属区域内裂纹整体分布 如图 6 所示。可以看出,裂纹整体呈穿晶特征,裂纹 扩展区域晶粒取向接近(001)面,熔覆金属区域内部存 在较多残余应变,且残余应变分布方向与裂纹扩展方 向接近。







图 6 不锈钢焊接接头熔覆金属区域裂纹 EBSD 分析 Fig.6 EBSD analysis of crack in weld zone of stainless steel welded joint: a) crack morphology; b) grain orientation; c) residual strain

2.2.2 热影响区 SCC 裂纹扩展行为

不锈钢焊接接头热影响区在模拟一回路高温高 压水环境中的 SCC 裂纹扩展曲线如图 7 所示。锌质 量浓度为 100 μg/L、*K*=25 MPa·m^{1/2}时, SCC 裂纹扩 展速率为负值,裂纹停滞。之后,将 K 升至 30、 35 MPa·m^{1/2} 时, SCC 裂纹扩展速率仍为负值,裂纹 仍然没有扩展。经过再次疲劳激活裂纹后,保持 K=35 MPa·m^{1/2},锌质量浓度从 100 μ g/L 降至 40 μ g/L





时, SCC 裂纹扩展速率为 3.88×10⁻⁹ mm/s。锌质量浓度 降到 10 µg/L 时, SCC 裂纹扩展速率为 8.95×10⁻¹⁰ mm/s, 锌质量浓度为0ug/L时, SCC裂纹扩展速率为负值, 裂纹停滞。

裂纹扩展整体形貌如图 8a 所示,裂纹整体处于 热影响区内部,距离融合线 0.3~1 mm。EBSD 分析晶 粒取向结果如图 8b 所示, 白色是铁素体相, 彩色是 奥氏体相。裂纹呈穿晶特征,整体扩展了数个晶粒, 包括铁素体相。区域面积统计结果表明,铁素体相约 占 15%。残余应变分布图(图 8c)显示,残余应变 较高,且在融合线附近的母材区域内,残余应变较大。 裂纹尖端放大分析如图 9 所示,裂纹尖端附近仍呈穿 晶特征。从晶粒取向分析结果可以看出,裂纹尖端位 于接近(111)面的晶粒内部。从残余应变分布可以看 出,裂纹附近残余应变较高。



a 裂纹SEM形貌

b 晶粒取向

c 残余应变分布

不锈钢焊接接头热影响区裂纹 SEM-EBSD 分析 图 8

Fig.8 SEM-EBSD analysis of crack in heat affected zone of stainless steel welded joint: a) SEM morphology of crack; b) grain orientation; c) residual strain distribution



a 相分布

b 晶粒取向



Fig.9 EBSD analysis of crack tip in heat affected zone of stainless steel welded joint: a) phase distribution; b) grain orientation; c) residual strain distribution

对图 9 中裂纹尖端制备 TEM 样品并进行成分分 析,元素面分布结果如图 10 所示。图 10b~f 依次显 示了裂纹尖端附近氧、铬、铁、镍和锌元素的分布情 况。从图 10b 可以看出,裂纹内有较为明显氧化物,

图 9

没有观察到氧在裂纹尖端向前渗透。从图 10c~f 中可 以看出,氧化物中含有铁、铬、镍和锌元素。根据文 献[19]可知, Zn²⁺通过替代尖晶石氧化物中的 Ni²⁺或 Fe²⁺形成 ZnCr₂O₄, 在裂纹尖端锌主要以 ZnCr₂O₄ 的

形式存在于富 Cr 氧化物中。图 10a 中红色线扫结果 如图 11 所示,可以看出,裂纹内氧化物中存在少量

的锌元素, 说明锌可能已经通过替代部分 Ni^{2+} 或 Fe^{2+} 形成了 $ZnCr_2O_4$ 氧化物。



图 10 裂纹尖端 TEM 成像及氧、铬、铁、镍和锌元素的分布 Fig.10 TEM figure of crack tip and elemental distribution maps of oxygen, chromium, iron, nickel and zinc





将不同注锌和不同应力条件下热影响区和熔覆 金属区域材料的 SCC 裂纹扩展速率汇总于图 12。根 据文献[23-25],高温高压水环境下核电结构材料的应 力腐蚀裂纹扩展速率大小可分为4个档次:低、中等、 高、非常高,区分这4个档次的裂纹扩展速率界限分 别为:5×10⁻⁹、5×10⁻⁸、3×10⁻⁷ mm/s,如图 12 右侧所 示。裂纹扩展速率在 5×10⁻⁹ mm/s 以下时,材料的应 力腐蚀敏感性极低,在模拟核电厂高温高压水环境 中,假设裂纹在服役早期已经萌生,则裂纹扩展速率



图 12 316L 不锈钢焊接接头裂纹扩展速率汇总 Fig.12 Summary of crack growth rates of 316L stainless steel welded joint

低于 5×10⁻⁹ mm/s 时,其裂纹扩展不足以在 80~100 a 的寿命周期内使结构部件失效。在 5×10⁻⁹~5×10⁻⁸ mm/s 的中等速率区时,材料的应力腐蚀敏感性有所提高。 若将裂纹萌生时间考虑在内的话,预期可以服役 60 a,一般认为低于该数值应力腐蚀敏感性低。在高 区和极高速率区,材料的应力腐蚀敏感性高,可能在 数月或数年时间内即造成结构材料的失效。图 12 中 向下箭头标记的数据点表示极低的裂纹扩展速率或裂 纹扩展停滞,可以看出,在不同注锌浓度和不同应力 强度因子下,裂纹扩展速率基本均低于 5×10⁻⁹ mm/s, 在核电站正常服役期间发生应力腐蚀开裂失效的可 能性低。

2.3.3 不锈钢焊接接头裂纹扩展分析

根据文献[19,22]可知,注锌可能会改变裂纹尖端 的化学环境。本文所采用的乙酸锌在高温高压水中可 以完全电离为 Zn²⁺和(CH₃COO)⁻。Zn²⁺可以与水反应 生成 Zn(OH)⁺、Zn(OH)₂与 H⁺。在浓度梯度作用下, $Zn(OH)^{+}$ 、 $Zn(OH)_{2}$ 可以向裂尖扩散。同时,在电势 驱动力和浓度驱动力作用下,(CH₃COO)⁻可能在裂尖 聚集,增加裂纹尖端溶液的酸性,这种化学环境的改 变会影响 SCC 行为。文中所发现的随注锌浓度增加, SCC 抗性先略有下降,这可能与醋酸根离子浓度有 关。有文献指出,由于醋酸根离子的引入,导致裂纹 尖端溶液酸性增强,其抗 SCC 能力下降^[22]。随注锌 浓度增加, SCC 抗性随后有所上升, 这可能跟锌浓度 已经足够充分置换(Fe, Ni)Cr2O4氧化物中的铁和镍形 成稳定的 ZnCr₂O₄氧化物有关。该氧化物比其他尖晶 石结构氧化物更稳定,缺陷更少,因此氧气通过氧化 膜向基体的扩散速率及阳离子通过氧化膜从基体向 外迁移的速率都降低,这可以降低裂纹尖端的氧化速 率^[19]。Angeliu 等^[26]结合滑移氧化溶解膜破裂模型指 出了锌注入抑制 SCC 的相关机理, 注锌一方面增加 了高温高压水中表面氧化膜破裂的应变量,使氧化膜 更具延展性;另一方面,金属表面钝化动力学的增速, 也提高了金属对 SCC 的抵抗力,降低 SCC 的扩展速 率。虽然有如此变化,但从本文所获得慢应变拉伸速 率试验结果和裂纹扩展试验结果可以看出, 316L 不 锈钢焊接接头的应力腐蚀敏感性较低, 注锌对其抗 SCC 性能的影响不显著。

3 结论

1)注锌对不锈钢焊接接头应力腐蚀裂纹萌生行 为的影响较小,屈服强度无显著差异,断后伸长率随 注锌浓度增加先有所下降、后有所上升。所有注锌浓 度下,焊接接头的熔覆金属区 SCC 敏感性最高,热 影响区次之,融合线最低。

2)注锌对不同区域不锈钢焊接接头的应力腐蚀裂纹扩展行为的影响较小,裂纹扩展速率随注锌浓度增加先有所升高、后降低。其中,在熔覆金属区域,不同锌浓度下裂纹扩展速率均为正值,40 μg/L 时裂纹扩展速率最快;在热影响区,注锌质量浓度为0、100 μg/L 时,裂纹扩展速率为负值,裂纹停滞,40 μg/L 时裂纹扩展速率最快。在不同条件下,热影响区裂纹扩展速率均小于熔覆金属区域。

3)316L 不锈钢焊接接头在不同注锌浓度高温高 压水环境中的应力腐蚀敏感性较低,注锌对其抗 SCC 性能影响不显著。未来需从不锈钢微观成分分布和组 织结构角度进一步研究注锌对不锈钢 SCC 行为的影 响机制,例如结合晶界贫铬程度分析揭示注锌对敏化 与非敏化不锈钢 SCC 行为影响的差异,再如通过对 比原始态与冷加工组织结构区别研究注锌对不同冷 加工程度焊接接头 SCC 行为的影响。

参考文献:

- 韩恩厚,王俭秋.表面状态对核电关键材料腐蚀和应 力腐蚀的影响[J]. 金属学报, 2023, 59(4): 513-522.
 HAN E H, WANG J Q. Effect of Surface State on Corrosion and Stress Corrosion for Nuclear Materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(4): 513-522.
- [2] 常立涛. 压水堆主回路高温水中奥氏体不锈钢加工表面的腐蚀与应力腐蚀裂纹萌生:研究进展及展望[J]. 金属学报, 2023, 59(2): 191-204.
 CHANG L T. Corrosion and Stress Corrosion Crack Initiation in the Machined Surfaces of Austenitic Stainless Steels in Pressurized Water Reactor Primary Water: Research Progress and Perspective[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(2): 191-204.
- [3] 刘保平,张志明,王俭秋,等.核用结构材料在高温高 压水中应力腐蚀裂纹萌生研究进展[J].中国腐蚀与防 护学报,2022,42(4):513-522.
 LIU B P, ZHANG Z M, WANG J Q, et al. Review of Stress Corrosion Crack Initiation of Nuclear Structural Materials in High Temperature and High Pressure Water[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(4): 513-522.
- [4] 王宇欣,郭城湘,胡月飞,等. 核电站不锈钢焊接接头的应力腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2022, 43(5): 25-29.
 WANG Y X, GUO C X, HU Y F, et al. Stress Corrosion Behavior of Welded Joints of Stainless Steel in Nuclear Power Plants[J]. Corrosion & Protection, 2022, 43(5): 25-29.
- [5] 梅金娜, 王鹏, 韩姚磊, 等. 基于 TPE-XGBoost 算法的 镍基 600 合金应力腐蚀裂纹扩展速率预测模型[J]. 稀 有金属材料与工程, 2021, 50(7): 2399-2408. MEI J N, WANG P, HAN Y L, et al. Prediction of Stress Corrosion Crack Growth Rate of Ni-Base Alloy 600 Based on TPE-XGBoost Algorithm[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(7): 2399-2408.
- [6] GOLD B. Effect of Zinc Addition on Mitigation of primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 600[R]. Palo Alto: EPRI, 2002.
- [7] MARKS C, MORONEY V, GORMAN J. Evaluation of Plant Data to Determine Effects of Zinc on PWSCC[R]. Palo Alto: EPRI, 2008.
- [8] 付亚茹,梅其良,张嘉康,等. 压水堆一回路注锌应用 技术方案研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(4): 881-887.

FU Y R, MEI Q L, ZHANG J K, et al. Study on the Application Technology of Zinc Injection in the Primary Coolant of PWR[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(4): 881-887.

- [9] HUANG Y, WU W S, CONG S, et al. Stress Corrosion Behaviors of 316LN Stainless Steel in a Simulated PWR Primary Water Environment[J]. Materials, 2018, 11(9): 1509.
- [10] 焦洋,张胜寒,檀玉.核电站用不锈钢在高温高压水中应力腐蚀开裂行为的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2021,41(4):417-428.
 JIAO Y, ZHANG S H, TAN Y. Research Progress on Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel for Nuclear Power Plant in High-Temperature and High-Pressure Water[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(4): 417-428.
- [11] LIN C C. A Review of Corrosion Product Transport and Radiation Field Buildup in Boiling Water Reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 2009, 51(2): 207-224.
- [12] LISTER D H. Mechanisms of Zinc Interaction with Oxide Films in High-Temperature Water[C]// Proceedings of Presentation at EPRI Meeting. Toronto: EPRI, 2004.
- [13] KAWAMURA H, HIRANO H, SHIRAI S, et al. Inhibitory Effect of Zinc Addition to High-Temperature Hydrogenated Water on Mill-Annealed and Prefilmed Alloy 600[J]. Corrosion, 2000, 56(6): 623-637.
- [14] ARJMAND F, ZHANG L F, ZHANG Y T, et al. Effect of Zinc Injection on the Electrochemical Behavior and Crack Growth Rate of a 316 L Stainless Steel in Simulated Primary Coolant of Pressurized Water Reactors[J]. Materials Characterization, 2021, 177: 111177.
- [15] WU X Q, LIU X H, ZHANG Z Y, et al. Some Fundamental Understandings of Zn-Injection Water Chemistry on Material Corrosion in Pressurized Water Reactor Primary Circuit[J]. Corrosion Communications, 2022, 6: 52-61.
- [16] WU X Q, LIU X H, HAN E H, et al. Effects of Zinc Injection on Electrochemical Corrosion and Cracking Behavior of Stainless Steels in Borated and Lithiated High Temperature Water[C]// Proceedings of International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems-NPC 2014. Sapporo: NPC, 2014.
- [17] WU X Q, LIU X H, HAN E H, et al. Status of PWR Nuclear Power Plants in China and Some Fundamental Understandings of Zn-Injection Water Chemistry on Material

Corrosion[C]// Proceedings of the Joint EUROCORR 2017 & 20th ICC Congress. Praque: ICC, 2017.

- [18] ANDRESEN P L, DIAZ T P. Effects of Zinc Additions on the Crack Growth Rate of Sensitized Stainless Steel and Alloys 600 and 182 in 288 °C Water[C]// Proceedings of Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 6. London: BNES, 1992.
- [19] ZHANG L F, CHEN K, WANG J M, et al. Effects of Zinc Injection on Stress Corrosion Cracking of Cold Worked Austenitic Stainless Steel in High-Temperature Water Environments[J]. Scripta Materialia, 2017, 140: 50-54.
- [20] MORRA M M, ANDRESEN P L, POLLICK M. The Effects of Zn and Low Energy Grain Boundaries on SCC of Stainless Steel[C]// Proceedings of Presented at the Annual Meeting of the International Cooperative Group on Environmentally-Assisted Cracking. Yumebutai: ICG-EAC, 2004.
- [21] CHEN K, MACKIEWICZ A, VIRTANEN S, et al. Effect of Zinc Injection on Mitigating Stress Corrosion Cracking Initiation of Structural Materials in Light Water Reactor Primary Water[J]. Corrosion Reviews, 2023, 41(3): 387-398.
- [22] 杜东海,陈凯,张乐福,等. 注锌对 316 不锈钢应力腐 蚀裂纹扩展速率的影响[J]. 核动力工程, 2017, 38(2): 78-83.
 DU D H, CHEN K, ZHANG L F, et al. Effect of Zinc on Stress Corrosion Crack Growth Rate of Type 316 Stainless Steel[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(2): 78-83.
- [23] AHLUWALIA K, Overview and Perspective on Stress Corrosion Cracking of Alloy 690 and Alloy 152/52 Weld Metals[R]. Palo Alto: EPRI, 2017.
- [24] WANG J M, ZHU T Y, CHEN K, et al. Effect of Dissolved Oxygen and Hydrogen on the Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloy 600 in High Temperature Water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 543: 152603.
- [25] WANG J M, ZHU T Y, HAN Y L, et al. Environment Assisted Cracking of 308L Weld Metal in High Temperature Water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 557: 153275.
- [26] ANGELIU T M, ANDRESEN P L. Effect of Zinc Additions on Oxide Rupture Strain and Repassivation Kinetics of Iron-Based Alloys in 288 °C Water[J]. Corrosion, 1996, 52(1): 28-35.