DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.003

屈服强度对304不锈钢SCC裂尖蠕变场及扩展速率的影响分析

崔英浩[1],张建龙[2,3],李晓磊[1]

(1. 中原工学院 机电学院,河南 郑州 450007;2. 西安科技大学 机械工程学院,陕西 西安 710054;3. 西安特种设备检验检测院,陕西 西安 710065)

摘　要:为探讨材料塑性对SCC裂尖蠕变场的影响规律,以核电常用的奥氏体304不锈钢为研究对象,采用紧凑拉伸试样建立了SCC裂尖蠕变场的有限元模型。通过材料屈服强度表征材料塑性的变化,研究了不同材料屈服强度对裂尖蠕变及蠕变率的影响规律,运用ABAQUS数值模拟软件进行分析计算。结果表明,高蠕变量区域主要集中分布在近裂尖区域内,屈服强度对SCC裂尖蠕变场的影响较大;随着屈服强度的不断增加,裂尖蠕变量以及蠕变率也在不断增加;随着蠕变的持续推进,蠕变率均趋向于同一水平;随时间的继续增加,蠕变率变化较小,同时裂纹扩展速率随着裂纹长度呈现出近似线性的增加规律。

关键词:304不锈钢;应力腐蚀开裂;裂尖蠕变;蠕变率

中图分类号:TG142　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1117-05

Influence of Yield Stress on the SCC Creep Mechanical Field and Growth Rate at the Tip of 304 Stainless Steel

CUI Yinghao[1], ZHANG Jianlong[2,3], LI Xiaolei[1]

(1. School of Mechanical & Electronic Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to investigate the influence of material plasticity on the creep field of SCC crack tip, a finite element model of SCC crack tip creep field was established by using compact tensile specimens of 304 austenite stainless steel. The influence of yield strength of different materials on crack tip creep and creep rate was studied by ABAQUS numerical simulation software and by using yield strength to characterize the plastic change of materials. The results show that the high creep variable area is mainly distributed in the near crack tip area, and the yield strength has a great influence on the creep field of SCC crack tip. With the increase of yield strength, the creep variable and creep rate of crack tip also increase. With the continuous advance of creep, the creep rate tends to the same level. With the continuous increase of time, the creep rate changed little, and the crack growth rate increased linearly with the crack length.

Key words: 304 stainless steel; stress corrosion cracking; creep at crack tip; creep rate

核电一回路及其异种金属焊接接头长期服役于高温、高压及辐射等严苛水环境中,极易产生应力腐蚀开裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)现象[1,2]。SCC是压水堆核电站结构材料的重要失效形式之一[3],它的存在将严重威胁压力容器管道设备的安全运行及服役寿命[4]。

304奥氏体不锈钢作为核电安全端焊接接头基体金属以及蒸汽发生器等压力容器及管道常用材料之一[5],在受到表面冷加工以及焊接收缩应变等因素的作用下,会对SCC扩展速率造成影响,进而对核电的安全稳定运行造成威胁。相关研究已经表明冷加工会促进应力腐蚀开裂,加速SCC裂纹扩展的速率[6,7]。相关针对管线钢的应力腐蚀行为研究表明,塑性变形对腐蚀速率有明显的影响[8,9]。有实验研究分析了温度、预形变和水化学等因素对SCC裂纹的影响,结果表明预形变增加了不锈钢在高温水环境中的SCC裂纹敏感性,同时SCC裂纹扩展速

收稿日期:2020-08-03

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(2020JM-523);国家市场监督管理总局科技计划项目(2019MK071)

作者简介:崔英浩(1989-),河南南阳人,博士,讲师.研究方向:机械结构完整性评价.电话:0371-62506846,E-mail:c_yh@foxmail.com

通讯作者:张建龙(1989-),陕西榆林人,博士生,工程师.研究方向:结构完整性分析,电话:029-88763550,E-mail:527449153@.qq.com

率大小与裂尖应力强度因子及材料的屈服强度有关[10,11]。国外学者研究发现核电工况下奥氏体不锈钢材料表面喷丸等加工硬化行为强烈影响着应力腐蚀开裂的敏感性，同时常见的 304 以及 316 奥氏体不锈钢的 SCC 敏感性随着冷加工程度的增加而增大[12,13]。

上述的研究均表明材料的表面塑性性能对 SCC 扩展速率有着很大的影响。为了探讨材料塑性变化引起 SCC 裂纹扩展和裂尖蠕变场之间的关系，本文以屈服强度作为材料塑性的表征参量，通过 ABAQUS 建立含裂纹材料的蠕变应变场有限元模型，从而定量研究屈服强度变化对 304 奥氏体不锈钢 SCC 裂尖蠕变场的影响，同时预测了不同屈服强度下 SCC 扩展速率的变化规律。

1 基于裂尖蠕变率的 SCC 定量预测模型

根据高温水环境下 SCC 扩展速率预测常用的 F-A 模型[14]，SCC 扩展速率 da/dt 的计算公式为：

$$\frac{da}{dt}=\frac{M}{Z\cdot\rho\cdot F}\times\frac{i_0}{1-m}\times\left(\frac{t_0}{\varepsilon_f}\right)^m\times(\varepsilon_{cr})^m \tag{1}$$

式中，M 和 ρ 分别是金属的原子量和密度，单位分别为 g/mol 和 g/mm^3；Z 是电荷的变化量；F 是法拉第常数，C/mol；m 是电流密度衰减指数；i_0 是裸露金属表面氧化电流密度，A/mm^2；t_0 是电流衰减的起始时间，s；ε_f 是氧化膜的破裂应变；ε_{cr} 是裂尖的应变率。

由于裂尖的应力集中性，使得核电环境中常用的镍基合金和奥氏体不锈钢在服役工况下裂尖承受很大的应力，使得蠕变的发生成为可能。在 337 ℃和 360 ℃的高温高压水环境下镍基合金 600 等材料的蠕变已为试验所证实[15]。Hall 在针对恒定应力强度因子条件下 SCC 裂尖应变率的分析中也指出了蠕变的主导作用[16]。SCC 裂尖高应力区在核电高温水环境中会产生蠕变现象，而裂尖金属的蠕变是造成裂尖氧化膜应变的主要原因，因此采用蠕变率代替应变率，如公式(2)所示。

$$\varepsilon_{ct}=\varepsilon_{cr} \tag{2}$$

研究表明，镍基合金以及低合金钢等核电常用材料第二阶段的稳态蠕变速率与试验应力呈指数变化关系[17]，同时幂律模型也能够较好表达高应力下的蠕变本构规律，便于工程应用。因此本文选择与应力成指数关系的幂律模型，如公式(3)所示。

$$\varepsilon'_{cr}=A\sigma^n \tag{3}$$

式中，A 为调整量级使用的一个常数；n 为应力指数；σ 为真实应力，单位为 MPa。

结合公式(1)和(2)，可得出基于裂尖蠕变考虑的高温水环境中奥氏体不锈钢的 SCC 扩展速率计算模型，如公式(4)所示。

$$\frac{da}{dt}=\frac{M}{Z\cdot\rho\cdot F}\times\frac{i_0}{1-m}\times\left(\frac{t_0}{\varepsilon_f}\right)^m\times(\varepsilon_{cr})^m \tag{4}$$

2 有限元模型的建立

2.1 几何和材料模型

应力腐蚀问题的多数研究对象均采用标准紧凑拉伸(0.5T-CT)试样进行结构选材和安全性评定研究[18]，其试样尺寸形状符合 ASTM-E399 标准[19]，试样的几何及具体尺寸如图 1 所示，其中裂纹长度为 11.25 mm。

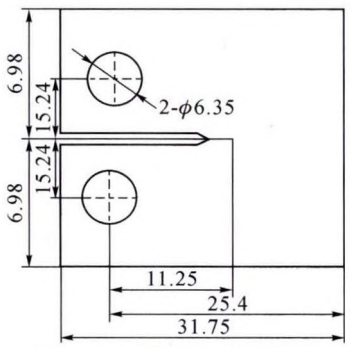


图 1 CT 试样几何模型尺寸

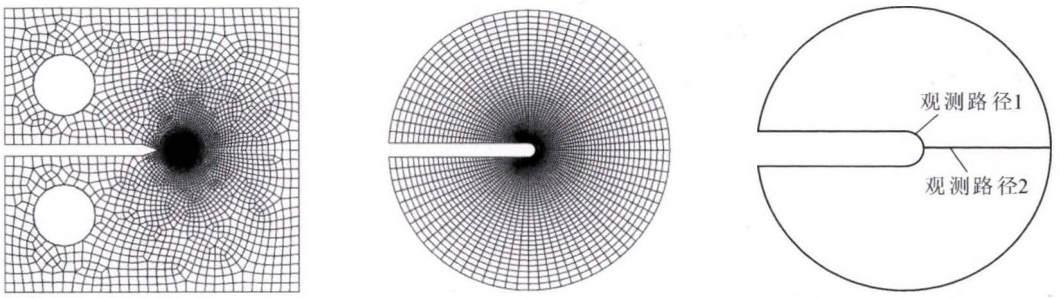
Fig.1 Geometry model size of compact tensile specimen

研究对象选用一回路安全端焊接接头常用的 304 奥氏体不锈钢，利用 YYF-30 慢应变速率应力腐蚀试验机对 304 奥氏体不锈钢以恒位移速率(0.01 mm/min) 的加载方式在高压釜内进行拉伸直至试样断裂，测得的 304 奥氏体不锈钢在 288 ℃下的力学本构关系曲线，分析可以获知该工况下 304 的屈服强度为 260 MPa，杨氏模量为 180 GPa，抗拉极限为 850 MPa，伸长率为 38 %。材料的蠕变模型采用理论分析中得出的幂律模型，通过对 304 奥氏体不锈钢进行不同应力下的蠕变实验，并利用幂律模型对结果进行最小二乘法拟合，得出幂律模型中的幂律乘数 A 和应力指数 n 的值，如式(5)所示。

$$\varepsilon'_{cr}=1.153\times10^{-15}\times\sigma^{3.99} \tag{5}$$

2.2 有限元网格模型

由断裂力学可知，当试样厚度足够大时，在该方向上将会产生充分约束，从而使厚度方向的应力分量接近于零，此时相当于平面应变状态，因此单元类型选择二维平面应变单元。有限元全局网格模型及裂尖处细化后的网格模型如图 2(a)所示，其中有限元全局模型的网格数量为 13 516，单元类型为 CPE4R。采用子模型技术来准确分析裂尖处蠕变力学状态，子模型网格类型与主模型保持一致，其中子



(a)全局网格模型　(b)裂尖网格细化模型　(c)裂尖蠕变场观测路径

图 2 CT 试样有限元网格模型及观测路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of finite element mesh model and observation path of CT specimen

模型网格数目为 15 027 个，如图 2(b)所示。在沿裂尖周向方向和裂纹扩展方向分别设置了观测路径 1 和 2，如图 2(c)所示。

2.3 载荷及边界条件设定

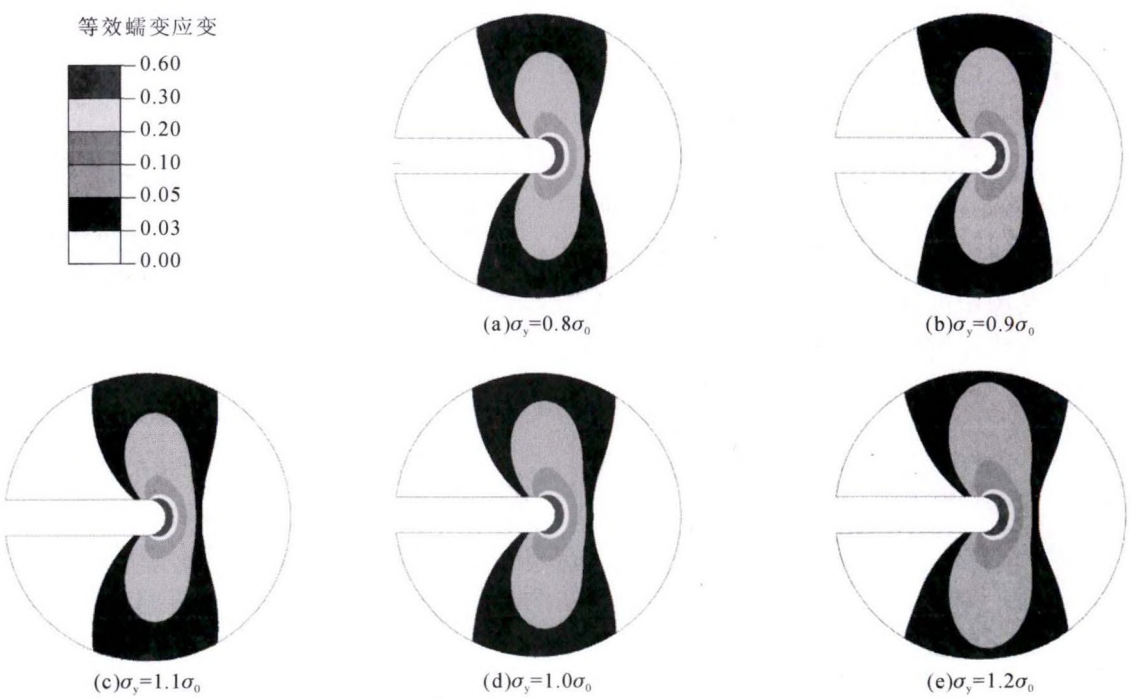
通常采用应力强度因子表征裂纹尖端应力场的大小[20]，本部分模拟计算试样承受的外载荷用裂尖应力强度因子 K 来表征。研究表明核电结构材料在应力腐蚀开裂试验中 K 一般选择范围为 10~50 MPa·m$^{0.5}$，本文设置 K=20 MPa·m$^{0.5}$ 的载荷作为施加载荷。为了防止试样在拉伸过程中发生刚体位移，采用加载孔的中心点与上下受力孔相耦合的形式，同时约束中心点沿 X 方向的移动和沿 Z 方向的转动。

3 计算结果及分析

在分析材料屈服强度对裂尖蠕变的影响规律时，在保证其他影响裂尖蠕变的参数不变的情况下，将基体金属的屈服强度设定为初始屈服强度 σ_0 的±10 %和±20 %，来对比分析屈服强度对裂尖蠕变以及蠕变率的影响规律。

(1)屈服强度变化对裂尖蠕变量分析　图3 为材料具有不同屈服强度时，裂尖的等效蠕变量的分布云图，蠕变时间相同且设置为 500 h。从图中可以看出，高蠕变量区域主要分布在近裂尖区域内；在相同的蠕变时间下，裂尖高蠕变量的区域面积随材料屈服强度的增大而略微增加，增加比例在 5%以内；在蠕变量小于 0.03 的相对较小的蠕变区域下，屈服强度对蠕变量的影响相对较小。

相同裂尖载荷时，不同屈服强度下沿裂尖路径 2 的蠕变量变化曲线如图 4 所示。可以看出，在裂尖距离 r=0 处蠕变量最大；随着裂尖距离 r 的增大，不同屈服强度下的裂尖蠕变量均呈现出减小的趋势；



(a)σ_y=0.8σ_0　(b)σ_y=0.9σ_0

(c)σ_y=1.1σ_0　(d)σ_y=1.0σ_0　(e)σ_y=1.2σ_0

图 3 不同屈服强度下裂尖蠕变量的分布云图

Fig.3 Distribution cloud diagram of crack tip creep variable under different yield strength

以 r=1 μm 为分界点，在 r<1 μm 时蠕变量随着裂尖距离的增大而急剧降低，同时屈服强度与裂尖蠕变量呈现出正相关的关系。在 r>1 μm 的距离下，蠕变量呈现出平稳的变化趋势，蠕变应变数值均在 0.02 以下，且变化范围不大。

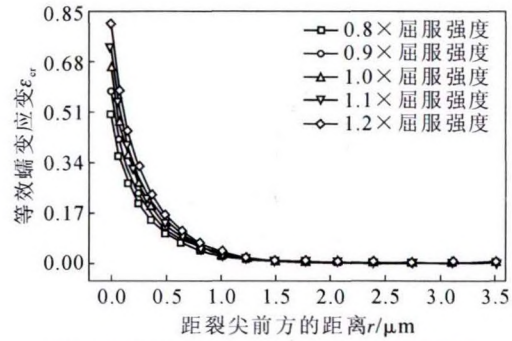


图 4 屈服强度对扩展方向蠕变量的影响

Fig.4 Effect of yield stress on creep in growth direction

图 5 为不同屈服强度下沿路径 1 的蠕变量变化分布。可以看出蠕变量呈现出对称分布，且蠕变量随着屈服强度的增大呈现出增大的趋势。从分布规律上来看，在屈服强度增加相同的比例范围内，蠕变量的增长幅度则越来越大，屈服强度对裂尖蠕变的敏感度随着屈服强度的增加而增大，增长幅度从 0.8σ_0 时的 2.9 %增加到 1.2σ_0 时的 4.2 %。

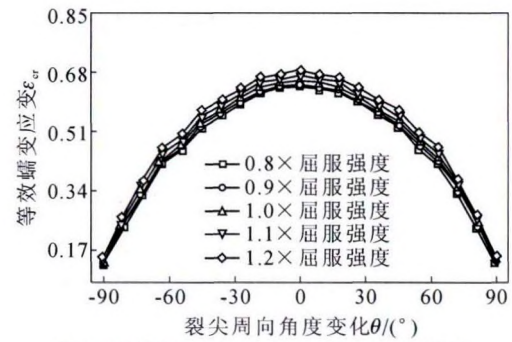


图 5 屈服强度对圆周方向蠕变量的影响

Fig.5 Effect of yield stress on creep in circumferential direction

不同材料屈服极限情况下裂尖蠕变分布曲线如图 6 所示。从图中可以看出，在蠕变第一阶段过程中裂尖蠕变量快速增加；随着蠕变时间的延长，蠕变速率逐渐趋于稳定，同时屈服强度的变化对裂尖蠕变量的影响不大。

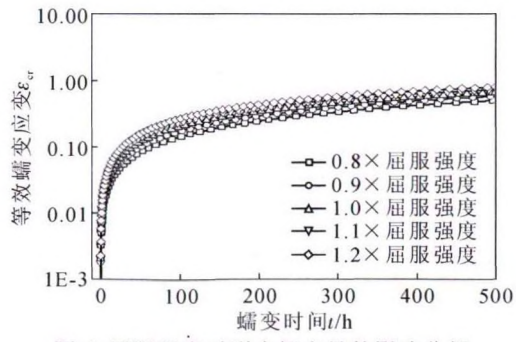


图 6 屈服强度对裂尖蠕变量的影响分析

Fig.6 Effect of yield stress on creep at crack tip

(2)屈服强度变化对裂尖蠕变率的影响　图7 为不同屈服极限下裂尖的蠕变率分布曲线。可以看出屈服强度在蠕变第一阶段对裂尖蠕变率的影响大于蠕变第二阶段，裂尖蠕变率随着屈服极限增加而增大；同时不同屈服强度下的裂尖蠕变率随着蠕变时间的延长均会减小，且屈服强度数值越大，蠕变率减小的速度越快，最终导致不同屈服极限数值下的蠕变率基本降低至近似相同数值。

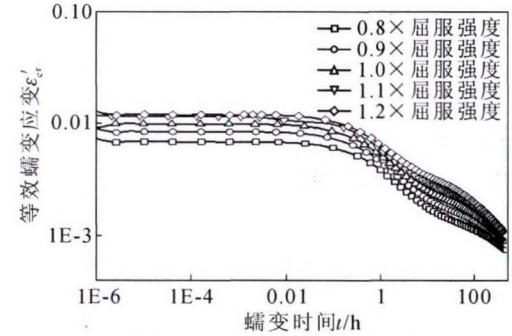


图 7 服强度对裂尖蠕变率的影响分析

Fig.7 Effect of yield stress on creep rate at crack tip

(3)屈服强度与裂尖蠕变率及 SCC 扩展速率之间的关系　图 8 所示为不同屈服强度下裂尖的蠕变率的变化曲线。随着屈服强度的增大，裂尖蠕变率呈线性增大。即在屈服强度增加 20%的区间内，裂尖蠕变率的数值与屈服强度减小 20%的区间内裂尖蠕变率变化量基本相同，说明了材料的屈服强度越大，裂纹扩展速率也越大。

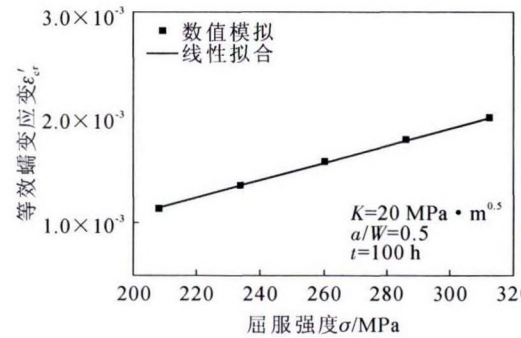


图 8 屈服极限与裂尖蠕变率之间的关系

Fig.8 Relationship between yield stress and crack tip creep rate

通过对裂尖蠕变率 ε_{cr} 与 $\sigma_{0.2}$ 屈服强度变化关系的线性拟合，并对拟合结果进行拟合优度判断，其中表征优度的判定系数 R^2=0.999 7，表明拟合结果良好，由此可以获得两者之间的关系表达式：

$$\varepsilon_{cr}=-5.93\times10^{-4}\times\sigma_{0.2}+8.3\times10^{-6} \quad (6)$$

根据 SCC 裂纹扩展速率计算模型可知，裂纹扩展速率与裂尖蠕变率密切相关。利用不同屈服强度

下的裂尖蠕变速率的数值，并结合304不锈钢在高温水环境下的水化学参数[21]，带入公式(4)中可以得出SCC扩展速率随着材料屈服强度的变化关系图(图9)。从图9中可以看出在不同的屈服强度下SCC扩展速率同样呈现出线性变化规律。

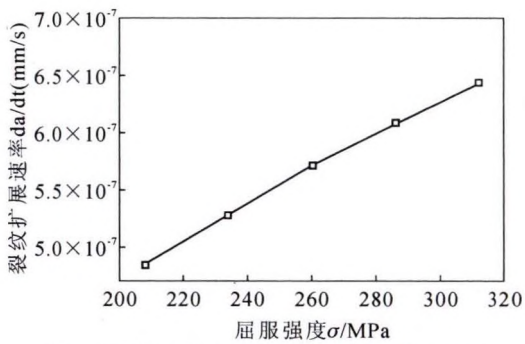


图9 屈服极限与裂纹扩展速率之间的关系

Fig.9 Relationship between the yield stress and the crack growth rate

4 结论

(1)在蠕变起始阶段，304奥氏体不锈钢的屈服强度与裂尖蠕变以及蠕变率呈现出正相关；当处于稳态蠕变阶段时，不同材料塑性参数下的裂尖蠕变率均减小；随着蠕变的推进，蠕变率都趋向于同一水平，且随时间的继续增加，蠕变率变化不大。

(2)304奥氏体不锈钢的力学性能变化会对裂尖蠕变产生影响，随着屈服强度的增大，裂尖蠕变量与蠕变率随之增大，裂尖在蠕变变形的主导下更易于扩展，同时扩展速率随着材料屈服强度呈现出近似线性的增加规律。

(3)以屈服强度为代表的材料塑性性能对裂尖蠕变有重要影响，其通过对裂尖蠕变的影响进而对SCC扩展速率产生了很大的作用。

参考文献：

[1] Zhang J L, Cui Y H, Xue H, et al. Research on SCC crack growth behavior of nickel-based alloy 600 in safe-end welded joints[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(05):1496-1502.

[2] 倪陈强，薛河，方秀荣，等. 裂纹扩展试验中Johnson公式适用性研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(12):2877-2880.

[3] 郭瑞，薛河，崔英浩. 安全端焊接残余应力对裂纹尖端力学参量的影响[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(3):479-483.

[4] Peng Q J, Hou J, Yonezawa T, et al. Environmentally assisted crack growth in one-dimensionally cold worked Alloy 690TT in primary water[J]. Corrosion Science, 2012, 57(8.):81-88.

[5] 王帅，薛河，崔英浩，等. 冷加工塑性硬化对304不锈钢力学参数的影响[J]. 西安科技大学学报, 2019(04):131-137.

[6] J Hou, Q J Peng, T Shoji, et al. Effects of cold working path on strain concentration, grain boundary microstructure and stress corrosion cracking in Alloy 600 [J]. Corrosion Science, 2011, 53(9): 2956-2962.

[7] 张建龙，薛河，崔英浩，等. 加工硬化对304不锈钢应力腐蚀裂纹裂尖力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4147-4151.

[8] Lu B T, Luo J L, Norton P R, et al. Effects of dissolved hydrogen and elastic and plastic deformation on active dissolution of pipeline steel in anaerobic groundwater of near-neutral pH[J]. Acta Materialia, 2009, 57(1): 41-49.

[9] Xu L Y, Cheng Y F. An experimental investigation of corrosion of X100 pipeline steel under uniaxial elastic stress in a near-neutral pH solution[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 0-109.

[10] 吕战鹏，陈俊劼. 温度对高温水中奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂速率的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(09): 803-809.

[11] 吕战鹏，陈俊劼，夏爽，等. 预形变与水化学对核电站用不锈钢应力腐蚀开裂的影响 [C]// 中国核科学技术进展报告, 2013.

[12] O Raquet, E Herms, F Vaillant, et al. SCC of cold-worked austenitic stainless steels in PWR conditions[J]. Advances in Materials Science, 2007, 7(1): 33-46.

[13] K Arioka, T Yamada, T Terachi, 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.

[14] 赵凌燕，崔英浩，杨富强，等. 划痕诱发的镍基合金应力腐蚀裂尖扩展驱动力分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(05): 79-85.

[15] Yi Y, Was G. Stress and temperature dependence of creep in Alloy 600 in primary water, Metallurgical & Materials Transactions A, 2001, 32(10): 2553-2560.

[16] M M Hall. Film rupture model for aqueous stress corrosion cracking under constant and variable stress intensity factor[J]. Corrosion Science, 2009,51(2):225-233.

[17] R Wu, M R Sandstr, F Seitisleam. Low temperature creep crack growth in low alloy reactor pressure vessel steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 336(3): 279-290.

[18] reactor pressure vessel steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 336(3): 279-290.

[19] 薛河，赵丹，彭群家，等. 镍基合金材料塑性对应力腐蚀裂纹尖端应力应变场影响的研究[J]. 材料工程(5): 21-24, 29.

[20] G SAID. Study on ASTM E399 and ASTM E1921 standards[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2006, 29(8): 606-614.

[21] 马家升. 三维复合型裂纹应力强度因子有限元分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2008.

[22] H Xue, T Shoji. Quantitative prediction of EAC crack growth rate of sensitized type 304 stainless steel in boiling water reactor environments based on EPFEM[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(3): 460-467.