

# 基于 DIC 技术获取焊接接头单轴拉伸力学性能

向文欣<sup>1</sup>, 祁爽<sup>1,2,3</sup>, 王永刚<sup>1</sup>, 宁方卯<sup>1</sup>, 祁磊<sup>1</sup>, 薛飞<sup>3</sup>,  
蔡力勋<sup>2</sup>, 余伟炜<sup>3</sup>, 梅金娜<sup>3</sup>, 师金华<sup>3</sup>

(1.台山核电合营有限公司, 广东 江门 529200; 2.西南交通大学, 成都 610031;  
3.苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215008)

**摘要:** **目的** 获取异种金属焊接接头局部拉伸力学性能。**方法** 针对压水堆核电机组蒸汽发生器接管与安全端异种金属焊接接头 (Dissimilar metal weld joint, DMWJ, 其接管材料为 20MND 5 低合金钢, 安全端为 Z2 CND 18.12 控氮奥氏体不锈钢, 焊缝材料为 INCONEL 52 镍基合金), 采用等直圆棒拉伸试验获得蒸汽发生器接管材料 20MND 5 的单轴拉伸应力-应变关系, 基于数字图像相关 (Digital image correlation, DIC) 技术, 采用平板拉伸试验获取 DMWJ 单轴拉伸力学性能。**结果** 20MND 5 的弹性模量和屈服强度分别为 197 GPa 和 498 MPa。与 20MND 5 单轴拉伸应力-应变关系对比, DMWJ 单轴拉伸过程中母材及焊缝位置的全场应变, 及 DMWJ 母材和焊缝位置局部的单轴拉伸力学性能, 二者完全吻合。**结论** DIC 技术可精确测量 DMWJ 局部单轴应力-应变关系, 对于三代压水堆核电站 DMWJ 的设计、安全评定及寿命管理具有重要意义。

**关键词:** 异种金属焊缝; 单轴拉伸; 应力-应变关系; 数字图像相关技术; 全场应变

**中图分类号:** TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)01-0095-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.014

## The Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Welded Joints Obtained Based on the DIC Technology

XIANG Wen-xin<sup>1</sup>, QI Shuang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yong-gang<sup>1</sup>, NING Fang-mao<sup>1</sup>, QI Lei<sup>1</sup>, XUE Fei<sup>3</sup>,  
CAI Li-xun<sup>2</sup>, YU Wei-wei<sup>3</sup>, MEI Jin-na<sup>3</sup>, SHI Jin-hua<sup>3</sup>

(1. Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Jiangmen 529200, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

**ABSTRACT:** The purpose of this paper is to obtain the part of tensile mechanical property of dissimilar metal weld joint. For the Taishan III nuclear power plant steam generator nozzle and the safe end to nozzle dissimilar metal weld joint (DMWJ, which nozzle material is 20MND 5 low-alloy steel, the safety end is Z2 CND 18.12 nitrogen-controlled austenitic stainless steel, and

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-06-23

Received: 2021-05-24; Revised: 2021-06-23

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目(BK20181177); 国家自然科学基金(U1867215); 江苏省政策引导类计划(BZ2020057)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20181177), National Nature Science Foundation of China (U1867215) and Policy Guidance Program of Jiangsu Province (BZ2020057)

作者简介: 向文欣(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为核燃料及材料、无损检测。

Biography: XIANG Wen-xin (1968—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: nuclear fuel and materials, nondestructive testing.

通讯作者: 祁爽(1990—), 女, 博士, 主要研究方向为结构完整性评价。

Corresponding author: QI Shuang (1990—), Female, Doctor, Research focus: structural integrity evaluation.

引文格式: 向文欣, 祁爽, 王永刚, 等. 基于 DIC 技术获取焊接接头单轴拉伸力学性能[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 095-100.

XIANG Wen-xin, QI Shuang, WANG Yong-gang, et al. The Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Welded Joints Obtained Based on the DIC Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 095-100.

the weld material is INCONEL 52 nickel-based alloy), the uniaxial tensile stress-strain relationship of the steam generator nozzle material 20MND 5 was obtained by the isometric round bar tensile test. The DMWJ uniaxial tensile test was obtained by the flat plate tensile test. mechanical properties based on the Digital Image Correlation (DIC) technology. The elastic modulus and yield strength of 20MND 5 are 197 GPa and 498 MPa, respectively. Full-field strain of base metal and weld in DMWJ uniaxial tensile process is consistent with uniaxial tensile properties of DMWJ base metal and local weld positions by comparing with the uniaxial tensile stress-strain relationship of 20MND 5. Therefore, it can be concluded that it is helpful by using the DIC technology to accurately measure the uniaxial stress-strain relationship of the DMWJ, which can be of a great significance for the design, safety assessment and life management of the third-generation pressurized water reactor nuclear power plant.

**KEY WORDS:** dissimilar metal weld; uniaxial tensile; stress-strain relationship; digital image correlation; full-field strain

我国在役和在建的核电站以压水堆型为主,反应堆建造过程中,各种关键结构(如蒸汽发生器、反应堆压力容器等)广泛采用焊接接头进行连接。镍基合金(如 182、82、52 合金等)及奥氏体不锈钢(如 308L、309L 等)由于其良好的耐高温腐蚀、较好的高温力学性能和可焊性等,而被用作主要的焊接用合金材料。根据焊接合金材料及其所连接基体材料的不同,分为同种金属焊接接头与异种金属焊接接头(Dissimilar metal weld joint, DMWJ)。核岛内的大型承压设备(如蒸汽发生器、反应堆压力容器等),由于出口接管材料为具有不锈钢覆层的低合金钢,一回路主管道材料为奥氏体不锈钢,因而在焊接接头中存在镍基合金焊材/不锈钢与镍基合金焊材/低合金钢异种金属焊接结构,以及不锈钢焊材/低合金钢 DMWJ 结构与不锈钢焊材/不锈钢同种金属焊接结构。DMWJ<sup>[1]</sup>制造工艺复杂,制造难度大,材料在焊接时可能产生气孔、裂纹、未熔合等缺陷,且长期服役在高温、高压水腐蚀环境中,由于焊接残余应力的存在,服役过程中设备易产生缺陷。若 DMWJ 失效,将对核电站的安全运行将造成不可估量的损失<sup>[2-5]</sup>。自 20 世纪 90 年代在 DMWJ 接头内发现裂纹起,各国科研人员即将其列为影响设备安全的重要问题,开展大量研究<sup>[6-9]</sup>,并在核电设备安全评估规范中对其进行评估,以确定其是否能够继续安全使用。由于安全端与等直径的主管道不同,其在管嘴处的厚度和半径均发生几何变化,且异种金属焊接接头的母材是由两种不同材料构成,屈服性能差异大。焊接接头包含母材、热影响区、焊缝等<sup>[10-12]</sup>,其组织结构存在材料性能不均匀性、力学性能不均匀性、由焊接缺陷引起的焊接裂纹和几何结构不连续性,给直接利用各种材料的出厂数据预测实际结构中的裂纹扩展历程带来困难<sup>[13]</sup>。因此,获取 DMWJ 的局部力学性能对核安全尤为重要,其中 DMWJ 局部应变测量是获取其局部力学性能的难题。在力学测试领域,常用的应变测量方法在测量方式上可分接触式测量与非接触式测量。其中,接触式测量又称机械测量,即利用传感器弹性元件接触被测物体表面,以获取其坐标数据的测量方法,采用常规电阻应变式的位移或应变引伸计。该技术十分成熟,已广泛应用于工

程测量中。非接触式测量则包括激光测量、电容测量和数字图像相关<sup>[14-17]</sup>(Digital image correlation, DIC)测量等多种方法。其中, DIC 技术具有“非接触”与表面“全场”位移信息的特点,是目前工程界应用中最有发展前途的 3D 数据采集方法。

精确的材料力学性能表征有助于理解 DMWJ 复杂的局部损伤断裂行为,同时与局部组织相关的力学性能是结构完整性分析的基本输入参数<sup>[8,18]</sup>。因此,国内外学者对 DMWJ 的力学性能表征进行了研究。Jang 等<sup>[19-20]</sup>对材料为 SA508-Alloy82/182-TP316 的 DMWJ 进行了力学表征,通过微拉伸、硬度及断裂试验发现, DMWJ 在宽度和厚度方向上力学性能不均匀。Blouin<sup>[21]</sup>指出,做力学表征试验,通常要耗费大量的材料,这些材料通常难以得到或者比较昂贵。Blouin<sup>[21]</sup>、Ancelet<sup>[22]</sup>等从 DMWJ 的各个位置(母材、热影响区、焊缝等)取出一些小拉伸试样,发展了一种采用激光感应器和特定形状试样的方法,用于确定焊接接头局部区域的应力-应变曲线。NESC-III 的 VTT<sup>[23]</sup>从多种焊接接头局部位置加工了小尺寸平板试样,得到了 DMWJ 接头的局部拉伸力学性能。综上所述,对于 DMWJ 材料力学性能表征主要集中在早期的核电材料和结构,对于新一代 EPR 机组 DMWJ 材料和结构的力学性能还缺乏系统的研究。

文中以压水堆核电机组蒸汽发生器一次侧管嘴与安全端 DMWJ 为研究对象,采用等直圆棒拉伸试样(Round-bar-tensile-specimens, RBTS),获得蒸汽发生器接管材料 20MND 5 的单轴拉伸应力-应变关系,以验证基于 DIC 技术获取 DMWJ 平板拉伸试样(Flat-tensile-specimens, FTS)单轴拉伸力学性能的正确性和精确性。为我国三代压水堆核电站 DMWJ 的设计、安全评定及寿命管理提供了更为精确的输入数据。

## 1 研究条件

### 1.1 材料与试样

压水堆核电机组蒸汽发生器一次侧接管和安全端的材料分别为 20MND 5 低合金钢和 Z2 CND 18.12 氮控奥氏体不锈钢。以 INCONEL 52 为焊料,采用全

自动窄间隙钨极氩弧焊制备了 DMWJ。焊缝的宽度为 9.5~11 mm，DMWJ 的厚度约为 97 mm。蒸汽发生器一次侧接管的内表面为 8 mm 厚的 308L/309L 不锈钢堆焊层。

蒸汽发生器接管母材 20MND 5 的 RBTS 的尺寸如图 1a 所示，其等直段直径和长度分别为 6 mm 和 30 mm，共 2 个试样。DMWJ 的 FTS 的尺寸如图 1b 所示，焊缝位于试样中心，其等直段宽度为 8 mm，厚度为 1 mm，长度为 30 mm，共 3 个试样。

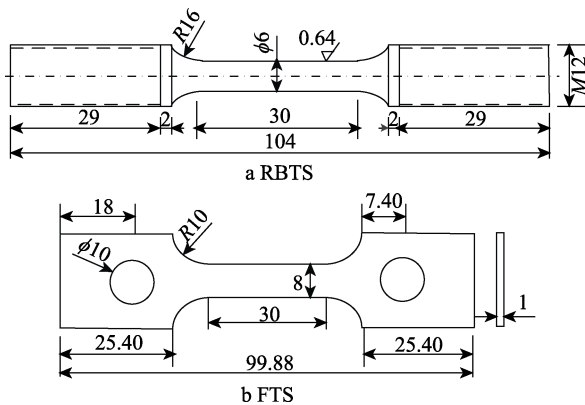


图 1 构型尺寸

Fig.1 The dimensions of configuration

## 1.2 设备与试验

RBTS 单轴拉伸试验设备为 MTS Landmark 370.50 (500 kN) 电液伺服材料试验机，控制系统为 TestStar II。采用标距为 20 mm、量程为-10%~20%的应变引伸计 MTS634.31F-21 测量 RBST 标距段的应变，试验设备精度为 0.5。试验过程中采用位移控制。FTS 拉伸试验设备为 SHIMADZU AG-IS (30 kN) 材料试验机。采用标距为 25 mm、量程为-10%~25%的应变引伸计 3542-025M-025-ST 测量 FTS 标距段的应变，精度为 0.5。试验过程中采用位移控制。同时，采用德国 GOM 公司 4 M 三维光学动态全场应变测试系统 ARAMIS，测量 FTS 表面应变，可实现与拉伸试验设备同步数据采集。

试验前，根据需要测量的视野大小，选用的标定板尺寸为 55 mm×44 mm，并对镜头间距、通光量等进行调节，然后对设备进行标定。标定板及 FTS 试验测试现场如图 2 所示。用白色哑光漆喷涂在 FTS 表面，待其自然风干，再用墨水喷枪在试样表面制作出大小均匀、形状不一、可识别的散斑，如图 3 所示。在试验开始前，先在软件中进行拍照分析，确认变形可识别后，再开始试验。



图 2 标定板及 FTS 试验测试现场

Fig.2 The site of calibration plate and the FTS test



图 3 制作散斑后的 FTS

Fig.3 The FTS after making speckles

## 2 结果及分析

20MND 5 和 DMWJ 的单轴拉伸应力-应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知，通过 2 个 RBTS 获得的低合金钢 20MND5 的应力-应变曲线基本重合，通过 3 个 FTS 获得的 DMWJ 的应力-应变曲线较为接近，故母材及焊缝材料的分散性较小。单轴拉伸结果见表 1。

通过引伸计测量标距段内的平均应变，获得的单轴拉伸应力-应变曲线如图 5 所示。与通过 DIC 技术测量试样标距段表面平均应变获得的单轴拉伸应力-应变曲线进行比对，二者基本重合，进一步验证了 DIC 技术的精确性。

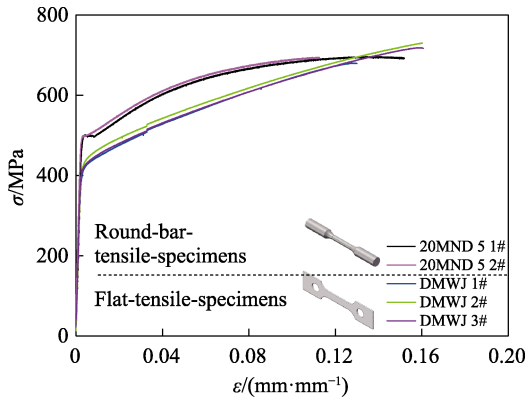


图4 单轴拉伸应力-应变曲线  
Fig.4 The tension stress-strain curves

表1 20MND 5 和 DMWJ 的单轴拉伸结果

Tab.1 The tensile testing results of 20MND 5 and DMWJ

Materials	Specimen	$E/MPa$	$\sigma_y/MPa$	$\sigma_m/MPa$	$A/(mm \cdot mm^{-1})$
20MND 5	1#	197 084	499	618	25.74
	2#	197 348	497	625	25.61
DMWJ	1#	196 276	416	599	19.50
	2#	196 993	427	625	24.00
	3#	196 299	420	592	23.00

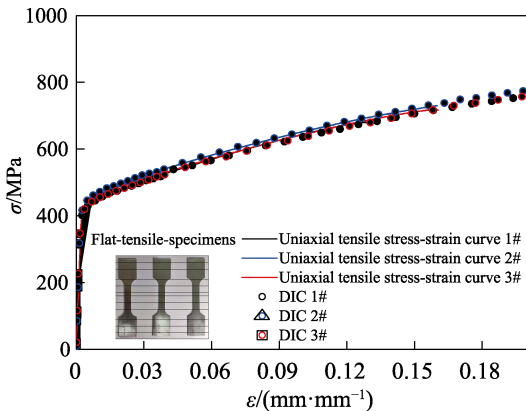


图5 DMWJ 的单轴拉伸应力-应变曲线  
Fig.5 The tension stress-strain curves of DMWJ

通过 DIC 技术的添加截面线功能, 可获得截面上任意点在任意时刻的应变, 然后通过数据后处

理, 可以获得截面上选定点的应变变化。通过 RBTS 试验和基于 DIC 技术的 FTS 试验, 获取的低合金钢 20MND 5 母材应力-应变的关系曲线对比结果如图 6 所示。由图 6 可知, 通过 DIC 技术可精确测量 DMWJ 局部单轴应力-应变关系, 对于三代压水堆核电站 DMWJ 的设计、安全评定及寿命管理具有重要意义。

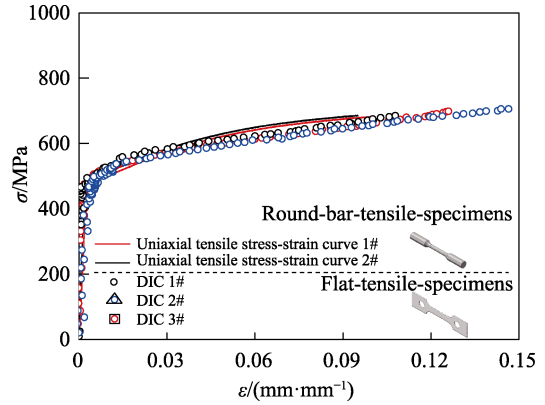


图6 RBTS 试验和 FTS 试验获取的 20MND 5 的应力-应变关系曲线对比结果

Fig.6 The comparison results of 20MND 5 stress-strain curves obtained by RBTS tests and FTS tests

通过 DIC 技术获得单轴拉伸应力-应变曲线和通过引伸计测量获得结果相吻合, 特别地, 通过 DIC 技术可以观测到整个拉伸试验过程中试样的全场应变、产生应力集中的部位、发生破断的整个过程。图 7 为拉伸应变为 10%、开始颈缩和临断时刻的 FTS 表面应变云图, 可以看到, 试样在焊缝位置产生颈缩, 从而失效。

在 ARAMIS 后处理软件中, 在试样中线位置建立截面线, 提取各阶段截面线上各点的应变数据, 通过编程处理, 获取不同应变时刻截面线上应变曲线, 如图 8 所示。拉伸的最初阶段, 试样等直段的应变无显著差异; 但随着拉伸位移的增加, 开始在焊缝中间及焊缝熔合线附近产生应力集中; 位移继续增加, 在焊缝位置发生颈缩, 直至最终破断。

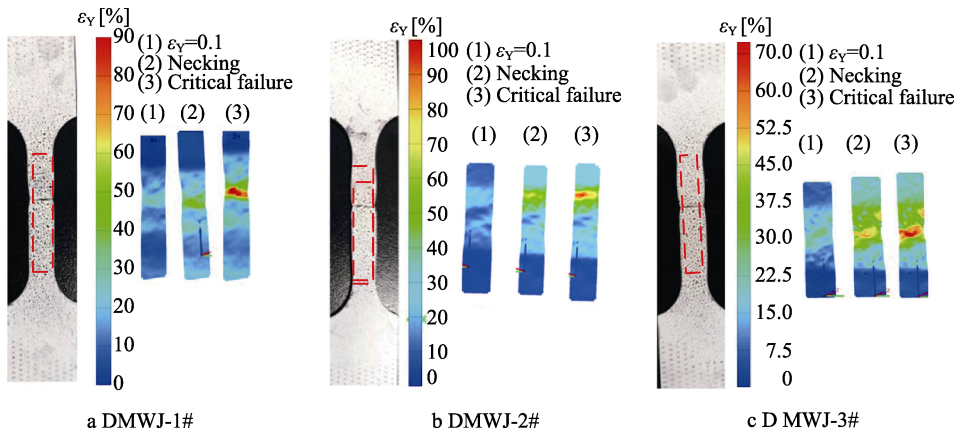


图7 FTS 表面应变云图  
Fig.7 The strain cloud maps of FTS

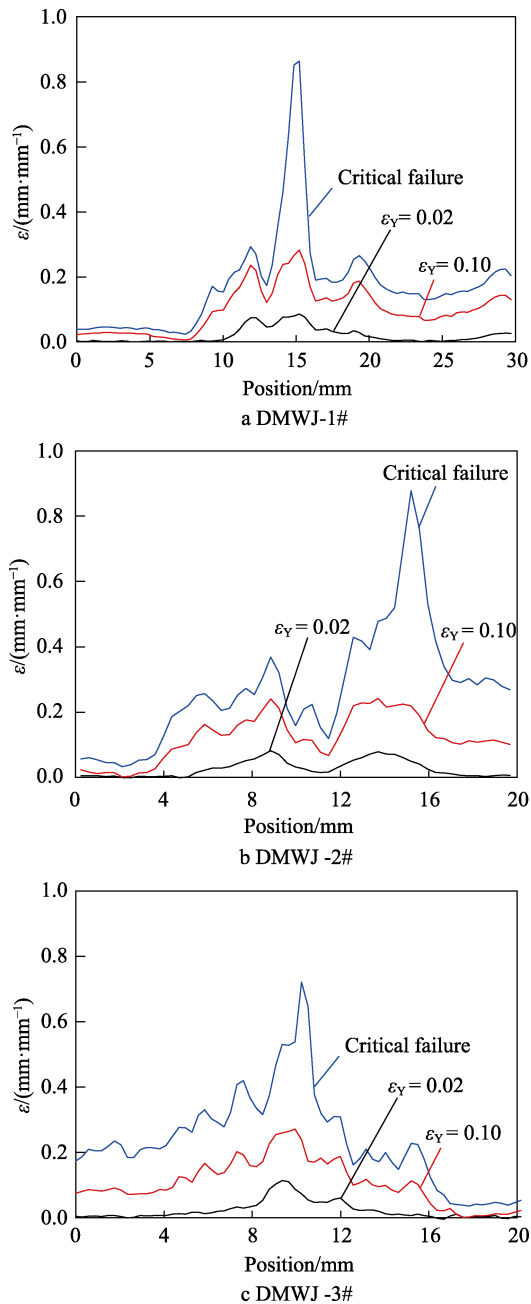


图 8 截面线上的应变趋势

Fig.8 The strain trend of DMWJ -3# section line at different moments

### 3 结论

针对核电站蒸汽发生器接管与安全端异种金属焊接接头,采用等直圆棒拉伸试样,获得蒸汽发生器接管材料 20MND 5 的单轴拉伸应力-应变关系,基于数字图像 (Digital image correlation, DIC) 相关技术,采用平板拉伸试样获取 DMWJ 单轴拉伸力学性能,母材及焊缝材料的分散性较小。采用等直圆棒拉伸试样获得 20MND 5 的单轴拉伸应力-应变关系,验证了基于 DIC 技术获取异种金属焊接接头单轴拉伸应力-应变曲线的正确性和精确性。

文中首次将 DIC 技术成功应用于压水堆核电机组焊接接头的应变测量,获得了蒸汽发生器接管安全端异种金属焊接接头区域不同加载时刻的应变场分布云图。可知随着拉伸位移的增加,在焊缝中间及焊缝熔合线附近产生了应力集中,然后在焊缝位置发生颈缩,最终破断。

DIC 技术对该部件应变测量的成功应用,为后续在役核电设备上焊接接头的安全评估、剩余寿命预测等提供了新的方法和途径。

### 参考文献:

- [1] 杨江. Q345/316L 异种钢焊接温度场及残余应力的数值模拟[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
YANG Jiang. Numerical Simulation of Welding Temperature Field and Residual Stress of Q345/316L Dissimilar Steel[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [2] LI G F, LI G J, FANG K W. Stress Corrosion Cracking Behavior of Dissimilar Metal Weld A508/52M/316L in Simulated PWR Primary Water Environment[C]// 2nd International Symposium on Materials and Reliability in Nuclear Power Plants. Shengyang: [s. n.], 2011.
- [3] RIESS R, ODAR S, KYSELN J. Decontamination and Steam Generator Chemical Cleaning[J]. Advanced Nuclear Technology International, 2009, 2.
- [4] BOWERMAN B S, CZAJKOWSKI C J, ROBERTS T C, et al. Metallurgical Evaluation of a Feedwater Nozzle to Safe-End Weld[J]. Materials Characterization, 1999, 43(5): 347-353.
- [5] RUDLAND D, ZHANG T, WILKOWSKI G, et al. Welding Residual Stress Solutions for Dissimilar Metal Surge Line Nozzles Welds[C]//Proceedings of ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference, Chicago, Illinois, USA. 2009: 353-359.
- [6] 王海涛, 王国珍, 轩福贞, 等. 核压力容器异种金属焊接接头延性断裂行为数值研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(5): 36-40.  
WANG Hai-tao, WANG Guo-zhen, XUAN Fu-zhen, et al. Numerical Research of Ductile Crack Growth Behavior for Dissimilar Metal Welded Joint of Nuclear Pressure Vessel[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(5): 36-40.
- [7] 王海涛. 核电安全端异种金属焊接接头的局部力学性能及断裂行为[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.  
WANG Hai-tao. The Local Mechanical Properties and Fracture Behavior of Nuclear Safe-End Dissimilar Metal Welded Joint[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [8] 王海涛, 王国珍, 轩福贞, 等. 核电 52M 镍基合金异种金属焊接接头的局部断裂行为[J]. 核技术, 2013, 36(4): 142-147.  
WANG Hai-tao, WANG Guo-zhen, XUAN Fu-zhen, et

- al. Local Fracture Behavior in an Alloy 52M Dissimilar Metal Welded Joint in Nuclear Power Plants[J]. *Nuclear Techniques*, 2013, 36(4): 142-147.
- [9] ZHANG Guo-dong, XUE Fei, ZHAO Yan-fen, et al. Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Welding Residual Stress for PWR Safe-End[C]//ASME Pressure Vessels & Piping Conference. Vancouver, British Columbia, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [10] CHUNG W C, HUANG J Y, TSAY L W, et al. Microstructure and Stress Corrosion Cracking Behavior of the Weld Metal in Alloy 52-A508 Dissimilar Welds[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(1): 12-19.
- [11] MING Hong-liang, ZHANG Zhi-ming, WANG Jian-qiu, et al. Microstructure of a Safe-End Dissimilar Metal Weld Joint (SA508-52-316L) Prepared by Narrow-Gap GTAW[J]. *Materials Characterization*, 2017, 123: 233-243.
- [12] ZHU Ruo-lin, WANG Jian-qiu, ZHANG Li-tao, et al. Stress Corrosion Cracking of 316L HAZ for 316L Stainless Steel/Inconel 52M Dissimilar Metal Weld Joint in Simulated Primary Water[J]. *Corrosion Science*, 2016, 112: 373-384.
- [13] SHOJI T, SUZUKI S, BALLINGER R G. Theoretical Prediction of SCC Growth Behavior—Threshold and Plateau Growth Rate[C]//7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. United States: [s. n.], 1995.
- [14] REN S C, MORGENEYER T F, MAZIÈRE M, et al. Effect of Lüders and Portevin-Le Chatelier Localization Bands on Plasticity and Fracture of Notched Steel Specimens Studied by DIC and FE Simulations[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 136: 102880.
- [15] HE Wen-tao, WANG Chang-zi, WANG Shu-qing, et al. Characterizing and Predicting the Tensile Mechanical Behavior and Failure Mechanisms of Notched FMLS—Combined with DIC and Numerical Techniques[J]. *Composite Structures*, 2020, 254: 112893.
- [16] ROMANOWICZ P J, SZYBIŃSKI B, WYGODA M. Application of DIC Method in the Analysis of Stress Concentration and Plastic Zone Development Problems[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(16): 3460.
- [17] QI S, CAI L X, BAO C, et al. Analytical Theory for Fatigue Crack Propagation Rates of Mixed-Mode I-II Cracks and Its Application[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 119: 150-159.
- [18] LIMA L I L. Influência Da Concentração de Hidrogênio Na Suscetibilidade à Corrosão Sob Tensão de Junta Soldada Com Metais Dissimilares Em Ambiente do Circuito Primário de Reator Nuclear[D]. Brazil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [19] LEE H T, JENG S L. Characteristics of Dissimilar Welding of Alloy 690 to 304L Stainless Steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, 6(4): 225-234.
- [20] JANG C, LEE J, SUNG KIM J, et al. Mechanical Property Variation within Inconel 82/182 Dissimilar Metal Weld between Low Alloy Steel and 316 Stainless Steel[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(9): 635-646.
- [21] BLOUIN A, CHAPULIOT S, MARIE S. A Method to Characterize the Fracture Resistance of Dissimilar Metal Welds[C]//Volume 9: Rudy Scavuzzo Student Paper Symposium and Competition. Toronto, Ontario, Canada. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [22] ANCELET O, MATHERON P. Development of a New Measurement System for Tensile Testing[C]//Proceedings of ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference, Bellevue, Washington, USA. 2011: 861-869.
- [23] TAYLOR N, FAIDY C, GILLES P. Assessment of Dissimilar Weld Integrity: Final Report of the NESC-III Project[R]. Petten, The Netherlands: Institute for Energy, 2006.