

基于能量中值等效原理的液压鼓胀 毫微测试技术研究

向文欣¹, 祁爽^{1,2,3}, 刘晓坤², 范敏郁³, 宁方卯¹, 蔡力勋²

(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** 基于液压鼓胀毫微测试技术获取材料单轴拉伸力学性能参数。**方法** 借助能量中值等效原理和有限元辅助测试方法, 提出了获取材料单轴拉伸力学性能的液压鼓胀毫微测试理论。结合小圆片试样液压鼓胀试验, 获取了压水反应堆机组蒸汽发生器接管材料 20MND5 的屈服应力和应变强化指数。将其输入有限元, 进而模拟小圆片试样液压鼓胀加载的全过程。**结果** 有限元分析获得的液压鼓胀加载压力-位移曲线与试验获得的压力-位移曲线基本吻合。**结论** 基于能量等效理论的液压鼓胀毫微测试技术可获得材料单轴拉伸力学性能参数, 且无需进行大量试验, 试验方法和试验原理相对简单, 十分便于工程应用。

关键词: 能量等效理论; 液压鼓胀测试; 应力应变关系; 有限元分析

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)01-0113-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.01.017

Research on Nano Measurement Technology of Hydraulic Bulging Based on Mean-Value Energy Equivalence

XIANG Wen-xin¹, QI Shuang^{1,2,3}, LIU Xiao-kun², FAN Min-yu³, NING Fang-mao¹, CAI Li-xun²

(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 215008, China)

ABSTRACT: The uniaxial tensile mechanical properties of materials were obtained based on the hydraulic bulging test technology. In this paper, based on mean-value energy equivalence and finite element aided testing method, a hydraulic bulging test technology is proposed to obtain the mechanical properties of materials under uniaxial tension. The yield stress and strain strengthening index of 20MnD5 pipe material in the Steam Generator (SG) was obtained based on the hydraulic bulging test of

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-07-21

Received: 2021-06-29; Revised: 2021-07-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0702200); 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 the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0702200), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20181177), the National Nature Science Foundation of China (U1867215), 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, 刘晓坤, 等. 基于能量中值等效原理的液压鼓胀毫微测试技术研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 113-117.

XIANG Wen-xin, QI Shuang, LIU Xiao-kun, et al. Research on Nano Measurement Technology of Hydraulic Bulging Based on Mean-value Energy Equivalence[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 113-117.

small wafer samples. It is input into the finite element to simulate the whole process of hydraulic bulging loading of small wafer sample. The pressure - displacement curve of hydraulic bulging obtained by finite element analysis is basically consistent with the pressure - displacement curve obtained by test. Based on the energy equivalence theory, the hydraulic bulging nanotechnology can obtain the mechanical property parameters of materials in uniaxial tension without a lot of tests, and the test method and principle are relatively simple, which is very convenient for engineering application.

KEY WORDS: mean-value energy equivalence; hydraulic bulging test; stress-strain relationship; finite element analysis

在核电领域中,有大量的构件在高温、辐照等复杂环境下服役。随着时间的推移,材料必然会发生热老化、氧化、腐蚀等,导致材料的劣化和损伤^[1-4],如何评定材料的可靠性和安全性,具有重要意义。为了解决核承压设备结构完整性评估的问题,毫微测试与评价技术应运而生^[5-7]。毫微测试技术主要包括按比例缩小标准试样进行试验、小冲杆试验^[8-12]、局部压入法^[13-16]等。比例缩小标准试样需考虑约束问题;小冲杆试验结果受钢珠尺寸、刚性、加载对中度及钢珠与试样间摩擦系数等因素的影响^[17-19];通过球压入和锥压入获取材料力学性能的过程中,存在敏感性和唯一性的问题^[13-16]。基于此,一种液压鼓胀微试样测试技术应运而生^[19],该技术在小冲杆技术的基础上借鉴了爆破片原理,利用液压加载方式对圆形薄片进行加压,并记录试验过程中小圆片试样压力-中心挠度试验曲线($p-h$)曲线。相比小冲杆技术^[20-21],液压鼓胀微试样测试技术具有试样受载均匀,便于理论分析,不受偏心、摩擦等因素影响的优势^[22-25]。因此,基于液压鼓胀微试样测试技术获取核电承压设备材料单轴应力-应变关系具有重要理论价值和工程意义。

文中提出液压鼓胀微试样测试技术获取材料单轴应力-应变关系的方法,对试验获取的压力-中心挠度试验曲线进行简单的分析计算,即可获取高精度材料单轴应力-应变关系曲线。该方法无需进行大量试验,试验方法和试验原理相对简单,在不影响重要设备继续使用的前提下,对设备进行微损取样测试,以获得在役设备的材料力学性能,用于安全评估、寿命预测等。

1 研究条件

1.1 试验条件

液压鼓胀微试样测试技术包括取样技术、制样技术、测试技术和数据解算四部分。试验采用 SG 一次侧管嘴试块,材料为低合金钢 20MND5,其化学成分(质量分数)为: C 0.150%, Si 0.260%, Mn 1.290%, Mo 0.490%, Ni 0.720%, Cr 0.026%, V<0.010%, P<0.010%, S<0.010%, Cu 0.092%。加工 4 个直径 d 为 10 mm、厚度 b 为 0.8 mm 的小圆片,采用的试样

抛光装置如图 1 和图 2 所示。添加研磨液,对试样进行抛光,使试样最终厚度为 0.5 mm(见图 3)。



图 1 液压鼓胀试样的抛光设备

Fig.1 The polishing equipment for hydraulic bulging specimen



图 2 液压鼓胀试样及抛光设备

Fig.2 The hydraulic bulging specimen and polishing equipment

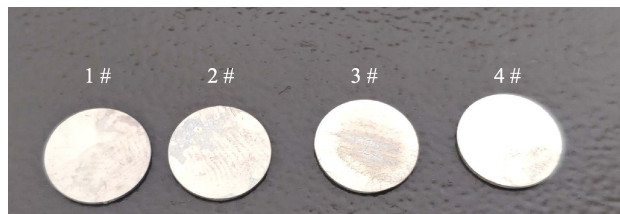


图 3 液压鼓胀试样

Fig.3 The hydraulic bulging specimen

液压鼓胀试验夹具包括底座、压盖和夹持螺母。它们以螺纹的形式相连接,通过螺纹之间产生的预紧力来夹持试样。螺纹设计为粗螺纹,且为自锁性能较好的三角形螺纹。

亿威仕液压鼓胀试样测试设备如图 4 所示,试验过程中使用增压缸匀速加载,液压鼓胀圆片试样受压

圆形区域的直径 $D=6\text{ mm}$ (见图 5)。液压鼓胀试验中需要测量高压油的压力和试样中心挠度。选用压力传感器测量油压,同时选用非接触位移传感器测量试样变形,两者测量信号由计算机同步采集绘制成压力-中心挠度试验曲线 ($p-h$) 曲线。高压油压力测量采用常规压力测量方式,采用传统的压力传感器进行测量,压力传感器的精度为 $0.05\% \text{ FS}$ 。试样在破坏时,高压油以极大的速度快速冲出,传统接触式传感器受此冲击极易变形损坏,导致无法继续使用。因此,这里采用非接触式位移传感器。

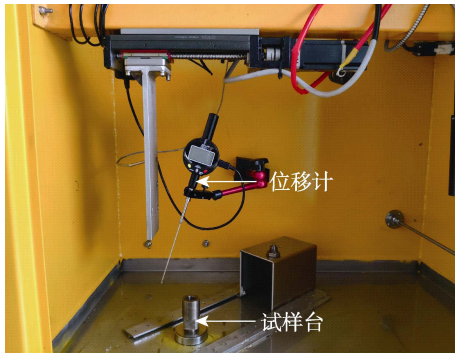


图 4 液压鼓胀试验设备
Fig.4 The equipment of hydraulic bulging test

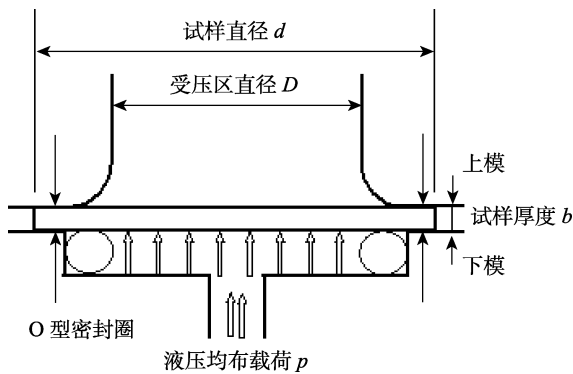


图 5 液压鼓胀毫微测试加载示意
Fig.5 Assembly drawing of the hydraulic bulging nanotube test specimen loading device

1.2 有限元分析条件

采用 ANSYS 18.2 对液压鼓胀试样开展有限元模拟,将单轴拉伸试验获得的材料拉伸应力-应变关系输入有限元软件,建立液压鼓胀试样有限元网格模型。如图 6 所示,模型直径为 10 mm 、厚度为 0.5 mm 。采用 2D 轴对称有限元网格模型对液压鼓胀试样进行数值模拟,试样网格采用轴对称 Plane 182 单元,单元共 1625 个,单元节点共 1764 个;液压鼓胀上模、下模均采用 Target 169 刚体单元,所有接触均为面面接触,摩擦系数取为 0.1。

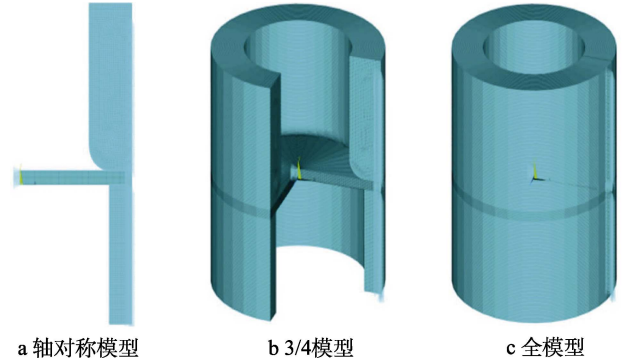


图 6 液压鼓胀试样有限元网格模型

Fig.6 Finite element model of a hydraulic bulging specimen: a) axisymmetric model; b) three quarters of the model; c) the overall model

2 理论公式

基于液压鼓胀微试样测试方法,获取材料单轴应力-应变关系,用于严苛条件下核承压设备局部力学性能的微创圆片力学性能测试。通过测量毫微尺寸小圆片试样液压鼓胀试验压力-中心挠度关系,以获取材料单轴应力-应变关系。液压鼓胀试验获取小圆片试样压力-中心挠度试验曲线 ($p-h$) 曲线,通过式 (1) 获取外力功-中心挠度曲线 ($W-h$) 曲线。

$$W = \frac{\pi D^2}{8} \int_0^h p dh + \frac{\pi}{6} \int_0^h p dh^3 \quad (1)$$

基于能量中值等效原理^[13-16], $W-h$ 曲线可以通过幂律拟合得到:

$$\begin{cases} \frac{W}{W^*} = \left(\frac{h}{D}\right)^m \\ W^* = \frac{k_1 k_2^{1+n} K \pi D^2 b}{4(1+n)} \\ m = k_4 n + k_4 + k_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为材料弹性模量; k_1-k_4 为模型常数,依次为 1.1936 、 2.0489 、 6.0001×10^{-3} 、 1.8967 。 D 为液压鼓胀圆片试样受压的圆形区域的直径; b 为试样厚度; W^* 为特征能量; m 为挠度指数,可由试验获取的 $W-h$ 试验数据回归得到。如此,便可获取材料屈服强度 σ_y 和应变硬化指数 n 。

将 σ_y 和 n 代入 Hollomon 方程:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \sigma \leq \sigma_y \\ E^n \sigma_y^{1-n} \varepsilon^n = K \varepsilon^n & \sigma \geq \sigma_y, \text{ 其中 } K = E^n \sigma_y^{1-n} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E 为材料弹性模量 (20MND5 材料取 204 GPa); n 为应变强化指数; K 为应力强化系数; σ 为应力; ε 为应变; σ_y 为屈服应力。通过上述方程,即可获取材料的单轴应力-应变关系。

3 结果与讨论

3.1 液压鼓胀试验

液压鼓胀试验是一种非标准试验,所需的试验装置必须定制或者进行开发。液压鼓胀试验装置主要目的是对液压鼓胀试样进行测试,获得微试样受外压的压力-中心挠度试验曲线($p-h$)曲线装置。液压鼓胀试验装置包括高压油路、微试样夹具和测量与数据采集系统等。计算机同步采集压力传感器和非接触式位移传感器信号,测试获得试验过程中压力-中心挠度试验曲线($p-h$)曲线。试样1#—4#的 $p-h$ 曲线如图7所示。

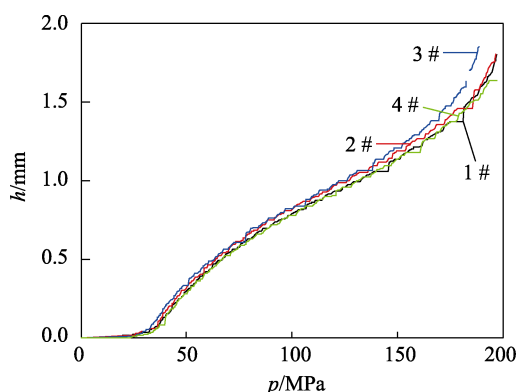


图7 20MND5 压力-位移曲线
Fig.7 The $p-h$ relations of 20MND5

3.2 有限元分析

依据图6所示的液压鼓胀微试样试验装置和试样尺寸,在ANSYS18.2商用软件中建立有限元仿真模型。对同一屈服强度、不同硬化指数,以及同一硬化指数、不同屈服强度的多种工况进行了有限元模拟,获取其对应的压力-试样中心挠度曲线,进而得到其外力功-中心挠度曲线($W-h$)曲线。将曲线进行幂律拟合,得到特征能量和挠度指数,带入式(2)进行联立方程求解,即可获得材料或构件的力学性能参数 σ_y 与 n 。借助式(3)的Hollomon本构关系模型,即可得到材料的应力-应变曲线。 $\sigma_y=400$ MPa,应变强化指数 n 得到的有限元输入本构关系与依据仿真压力反求得到的本构关系的对比结果如图8所示。从图8中可以看出,通过液压鼓胀理论获得的应力-应变曲线具有较高的精度,且实验操作和计算方法都比较简单,便于在实际工程中应用。

将液压鼓胀理论获取的材料单轴拉伸力学性能作为有限元输入,进而模拟小圆片试样液压鼓胀加载的全过程,结果如图9所示。有限元分析获得的液压鼓胀加载压力-位移曲线与试验获得的压力-位移曲线基本吻合。进一步验证了该理论模型的精确性。

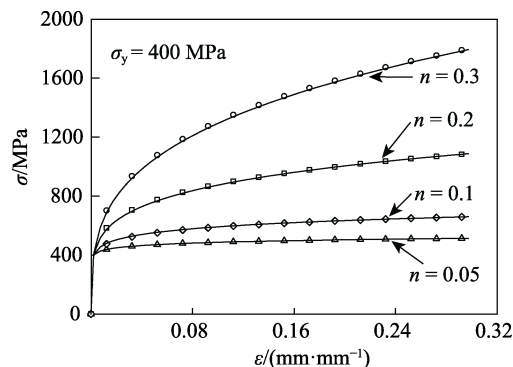


图8 20MND5 单轴应力-应变关系曲线
Fig.8 Uniaxial tension stress-strain curves of 20MND5

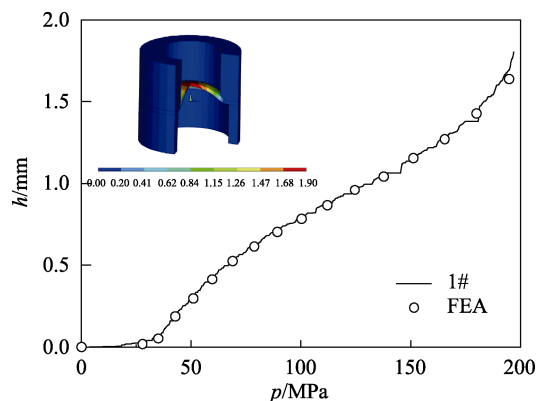


图9 试验与FEA获得20MND5 压力-位移结果
Fig.9 The $p-h$ curves of 20MND5 obtained using FEA and experimental methods

4 结论

1) 基于能量中值等效原理,提出了获取材料单轴拉伸力学性能的液压鼓胀毫微测试理论。

2) 对同一屈服强度、不同硬化指数,以及同一硬化指数、不同屈服强度的多种工况进行了有限元模拟,获取其对应的压力-试样中心挠度曲线,反向验证了该理论的正确性。

3) 将液压鼓胀毫微测试理论获取的材料单轴拉伸力学性能作为有限元输入,进而模拟小圆片试样液压鼓胀加载的全过程。结果表明,有限元分析获得的液压鼓胀加载压力-位移曲线与试验获得的压力-位移曲线基本吻合,进一步验证了该理论的精确性。

4) 对试验获取的压力-中心挠度试验曲线进行了简单的分析计算,获取了材料单轴应力-应变关系曲线的材料参数,所得的结果精度较高。该方法无需进行大量试验,试验方法和试验原理相对简单,十分便于工程应用。

参考文献:

- [1] 李光福,李冠军,方可伟,等. 异材焊接件A508/52M/

- 316L 在高温水环境中的应力腐蚀破裂[J]. 金属学报, 2011, 47(7): 797-803.
- LI Guang-fu, LI Guan-jun, FANG Ke-wei, et al. Stress Corrosion Cracking Behavior of Dissimilar Metal Weld A508/52M/316L in High Temperature Water Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(7): 797-803.
- [2] RIESS R, ODAR S, KYSELA J. Decontamination and Steam Generator Chemical Cleaning[C]// Advanced Nuclear Technology International. Krongjutarvägen C, 2009.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] BLOUIN A, CHAPULIOT S, MARIE S. A Method to Characterize the Fracture Resistance of Dissimilar Metal Welds[C]//Proceedings of ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto, Ontario, Canada. 2013: 243-251.
- [6] 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.
- [7] TAYLOR N, FAIDY C, Gilles P. Assessment of Dissimilar Weld Integrity: Final Report of the NESC-III Project[C]// Network for Evaluating Structural Components. Netherlands: Institute for Energy, 2006, 22510.
- [8] PENG Yun-qiang, CAI Li-xun, CHEN Hui, et al. A New Method Based on Energy Principle to Predict Uniaxial Stress-Strain Relations of Ductile Materials by Small Punch Testing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138-139: 244-249.
- [9] PENG Yun-qiang, CAI Li-xun, YAO Di, et al. A Novel Method to Predict the Stress-Strain Curves and J Resistance Curves of Ductile Materials by Small Samples[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 172: 48-55.
- [10] PENG Yun-qiang, CAI Li-xun, CHEN Hui, et al. A Theoretical Model for Predicting Uniaxial Stress-Strain Relations of Ductile Materials by Small Disk Experiments Based on Equivalent Energy Method[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(1): 133-141.
- [11] 杨镇, 王志文. 小冲杆试验法及其在评定材料韧性方面的应用[J]. 华东理工大学学报, 2002, 28(1): 83-87.
- YANG Zhen, WANG Zhi-wen. Small Punch Test Technique and Its Application in Evaluating Toughness of Materials[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2002, 28(1): 83-87.
- [12] FOULDS J, VISWANATHAN R. Small Punch Testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1994, 116(4): 457-464.
- [13] CHEN Hui, CAI Li-xun. Theoretical Model for Predicting Uniaxial Stress-Strain Relation by Dual Conical Indentation Based on Equivalent Energy Principle[J]. Acta Materialia, 2016, 121: 181-189.
- [14] CHEN Hui, CAI Li-xun. Unified Elastoplastic Model Based on a Strain Energy Equivalence Principle[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 52: 664-671.
- [15] CHEN Hui, CAI Li-xun. An Elastoplastic Energy Model for Predicting the Deformation Behaviors of Various Structural Components[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 68: 405-421.
- [16] LIU Xiao-kun, CAI Li-xun, CHEN Hui, et al. Semi-Analytical Model for Flat Indentation of Metal Materials and Its Applications[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3266-3277.
- [17] 马昀晟. 微型试样液压鼓胀法测试材料力学性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- MA Yun-sheng. The Research on Mechanical Properties of Materials by Miniature-Specimen Hydraulic Bulge Method[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.[知网硕士中文][知网硕士英文]
- [18] BULLOCH J H. A Study Concerning Material Fracture Toughness and some Small Punch Test Data for Low Alloy Steels[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(4): 635-653.
- [19] MAO X, SAITO M, TAKAHASHI H. Small Punch Test to Predict Ductile Fracture Toughness JIC and Brittle Fracture Toughness KIC[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25(11): 2481-2485.
- [20] LIU Hai-ting, CHEN Ran, WEN Mao, et al. Optimizing Parallel Section Length for Small Tensile Specimen with Fabrication Non-Uniformity in Thickness[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 147: 111244.
- [21] ZHENG Peng-fei, CHEN Ran, LIU Hai-ting, et al. On the Standards and Practices for Miniaturized Tensile Test - a Review[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 161: 112006.
- [22] BARNWAL V K, LEE S Y, CHOI J, et al. On the Fracture Characteristics of Advanced High Strength Steels during Hydraulic Bulge Test[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 190: 106032.
- [23] LENZEN M, SCHMID H, MERKLEIN M. Characterization of Kinematic Hardening with a Hydraulic Bulge Test[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 696-701.
- [24] 邹建胜, 王汉奎, 凌祥, 等. 液压鼓胀试验技术和小冲孔试验技术对比研究[J]. 石油化工设备, 2018, 47(6): 1-8.
- ZOU Jian-sheng, WANG Han-kui, LING Xiang, et al. Technical Comparative Study of Hydraulic Bulge Test and the Small Punch Test[J]. Petro-Chemical Equipment, 2018, 47(6): 1-8.
- [25] GUI Le-le, XU Tong, SHOU Bi-nan, et al. Estimation of Fracture Toughness J_{IC} by Miniature Specimen Hydraulic Bulge Test[J]. Materials Science Forum, 2017, 898: 753-757.