

DOI: 10.3901/JME.2019.16.085

# 含轴向对称裂纹锆合金包壳管断裂行为

刘肖<sup>1</sup> 王理<sup>1</sup> 包陈<sup>2</sup> 王恺晴<sup>1</sup> 赵宇翔<sup>1</sup> 王浩<sup>1</sup> 徐祺<sup>1</sup>

(1. 中国核动力研究设计院反应堆燃料及材料重点实验室 成都 610213;

2. 西南交通大学力学与工程学院 成都 610031)

**摘要:** 作为装载核燃料的密封外壳, 锆合金包壳管的断裂性能对于反应堆的安全运行至关重要。基于弹塑性有限元分析建立了 TFAC 试样的断裂韧性测试方法, 完成不同氢含量锆合金 TFAC 试样的断裂韧性试验。研究表明, 锆合金包壳管具有优良的抗裂性能, 氢含量低于 200 mg/kg 时, 其对包壳管断裂韧度的影响较小; 当氢含量达到 290 mg/kg 时, 包壳管的断裂韧度显著提高。研究可为锆合金包壳管在服役过程中的安全性评估提供数据支撑。

**关键词:** 锆合金包壳管; TFAC 试样; 断裂韧性; 有限元分析; 氢含量

中图分类号: TV313

## Fracture Behaviour of Zirconium Alloy Cladding Tubes Containing Axial Symmetric Cracks

LIU Xiao<sup>1</sup> WANG Li<sup>1</sup> BAO Chen<sup>2</sup> WANG Kaiqing<sup>1</sup>  
ZHAO Yuxiang<sup>1</sup> WANG Hao<sup>1</sup> XU Qi<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory,

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213;

2. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract:** As the sealing shell of nuclear reactor fuels, the fracture property of Zirconium alloy cladding tubes are of great importance to safe operation of reactor. The method of fracture toughness testing for TFAC specimen is established based on the elastic-plastic finite element analysis. Fracture toughness testing on the TFAC specimens of Zirconium alloy with different concentration of Hydrogen is carried out. The results show that Zirconium alloy cladding tubes have good properties against fracture. Little influence of the concentration of Hydrogen on the fracture toughness of the cladding tubes is observed when the concentration of hydrogen is lower than 200 mg/kg, but the fracture toughness increases remarkably when the concentration of hydrogen reaches to 290 mg/kg. The research results can offer data support for the safety evaluation of Zirconium alloy cladding tubes during operation.

**Key words:** zirconium alloy cladding tubes; TFAC specimen; fracture toughness; finite element analysis; concentration of hydrogen

## 0 前言

反应堆燃料元件包壳是装载核燃料的密封外壳, 其作用是防止裂变产物逸散、避免燃料受冷却剂腐蚀及高效地导出热能, 是核反应堆的第一道安全屏障。在反应堆运行过程中, 燃料元件包壳内有裂变产物释热、外有冷却剂浸蚀, 置身于强烈的中子辐照、冷却剂腐蚀、冲刷、振动、结构应力和热应力作用等复杂的环境中, 包壳管的结构完整性对反应堆安全运行至关重要, 而断裂性能是评价包壳

管抵抗断裂失效的重要指标。因此, 开展锆合金包壳管的断裂行为研究, 可为管材生产中的质量控制和服役中的安全性评价提供直接的量化依据。

对于管材的断裂性能研究, GUPTA 等<sup>[1]</sup>、KIM 等<sup>[2-3]</sup>、SAXENA 等<sup>[4]</sup>均对含周向贯穿裂纹管的  $J$  积分计算方法进行研究, 为该类管试样的断裂韧性测试提供了参考。KIM 等<sup>[5-6]</sup>对含周向非贯穿裂纹管的断裂参量计算方法进行研究。SINGH 等<sup>[7]</sup>采用微小紧凑拉伸试样研究氢含量对 Zr-2.5Nb 管材断裂韧度的影响。BAO 等<sup>[8-9]</sup>提出基于小尺寸 CIET 试样的断裂性能测试方法, 并完成了压力容器钢的断裂行为测试。BERTSCH 等<sup>[10]</sup>提出一种薄壁管断裂韧性的单试样测试方法, 可以用于管材  $J-R$  曲线的直接测试。由于本

文所用锆合金包壳管的尺寸仅为 $\phi 6\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 的薄壁管,已有方法均无法实现其断裂性能测试。

本文针对锆合金包壳管开展断裂韧度的测试方法研究,参照 ASTM E1820—15<sup>[11]</sup>及 GB/T 21143—2014<sup>[12]</sup>完成不同氢含量条件下锆合金包壳管的断裂性能测试,研究了氢含量对锆合金包壳管断裂韧度的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为锆合金成品管材,规格为 $\phi 6\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 。试验前,采用电解+真空炉内退火的方式对锆合金管试样进行渗氢,制备了 A、B 两种渗氢量不同的管试样,并通过真空加热气相色谱法测定了试样的氢含量,检测结果如表 1 所示。图 1、2 给出了 A、B 系列试样的氢化物分布金相图片,图 3 为未渗氢试样(定义为 C 系列)的金相图片。从图中可以看出, B 系列试样的氢化物含量更高,分布更加密集,且 A、B 两个系列试样的氢化物取向因子差异较大,在 B 系列中,出现了较多沿径向分布的氢化物。

表 1 锆合金管试样电解渗氢参数及氢含量检测结果

试样编号	电流密度 $J/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	电解时间 $t/\text{h}$	氢含量 $H/(\text{mg}/\text{kg})$
A 系列	90	2.5	138
B 系列	90	12	290

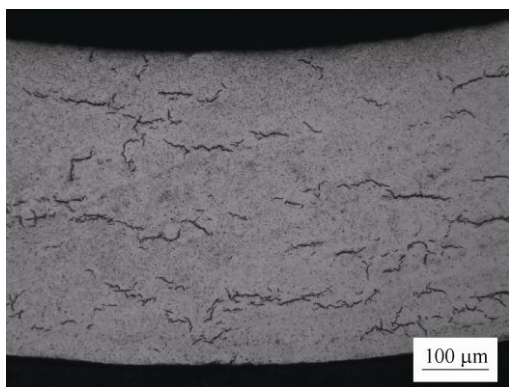


图 1 A 系列管试样氢化物分布金相形貌

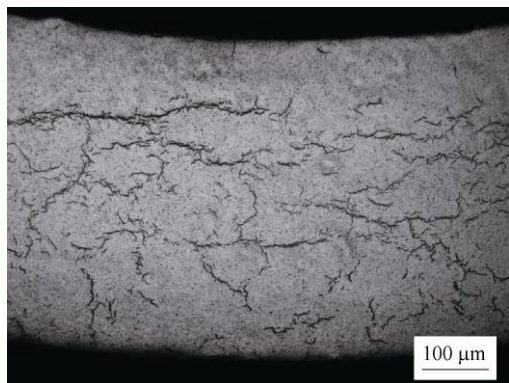


图 2 B 系列管试样氢化物分布金相形貌

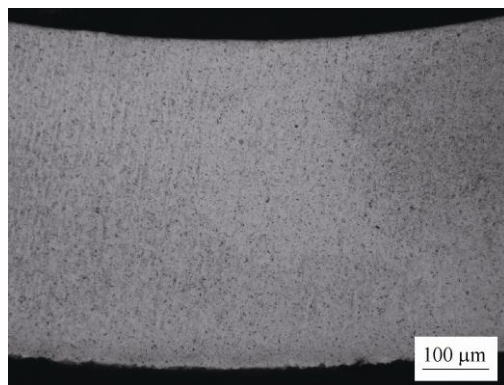


图 3 C 系列管试样金相形貌

对三种材料各采用两个平行试样进行拉伸力学性能测试,结果如表 2 所示。

表 2 锆合金管材(轴向)力学性能测试结果

编号	弹性模量 $E/\text{GPa}$	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$
A 系列	A-1	92.6	330.2
	A-2	94.5	334.6
B 系列	B-1	94.4	351.7
	B-2	94.5	340.8
C 系列	C-1	101.4	358.5
	C-2	102.9	357.2

### 1.2 试样及夹具系统

缺陷沿轴向开裂是锆合金包壳管在服役过程中可能出现的最危险失效方式,因此综合考虑包壳管的失效特征和测试便捷性,本文设计图 4 所示的含轴向对称裂纹的薄壁管试样(Thin-walled tube containing four axial symmetric cracks, TFAC)。该 TFAC 试样包含四条两两对称的轴向裂纹, $a$  为初始裂纹长度, $B$  为试样厚度, $2W$  为试样的长度。对于本文所用锆合金 TFAC 试样, $2W=10\text{ mm}$ , $B=0.5\text{ mm}$ 。

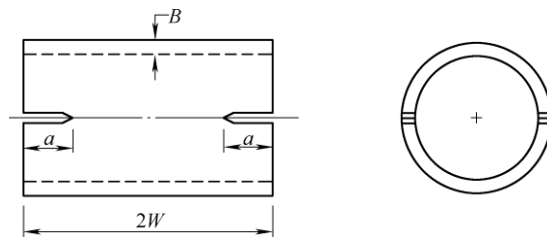


图 4 TFAC 试样构型

为了配合 TFAC 试样的加载,设计如图 5 所示的专用试验夹具系统。夹具系统由两根燕尾型的半圆形加载销、U 型夹具和对中片构成。加载销与 U 型夹具配合实现对 TFAC 试样的拉伸加载。对中片分别安装在 U 型夹具的上下夹头的正反两面上,以确保试样加载的对中性。U 型夹具两侧设计为便于安装引伸计的燕尾型刀口。

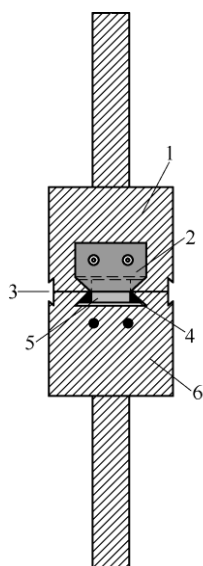


图5 TFAC 试样及夹具系统

1. 上夹头 2. 对中环 3. 引伸计刀口 4. 加载销 5. 试样 6. 下夹头

### 1.3 试验设备

试验设备为 MTS 858 15 kN 电液伺服材料试验机, 其控制系统为 Flex Test60。常温应变引伸计 MTS634.31F-25(标距 20 mm, 轴向测量范围 $\pm 20\%$ ) 用于采集实时应变。MTS632.02F-20 COD 规用于测量外置刀口处的张开位移, 控制试样预制疲劳裂纹扩展量。试验装置见图 6。

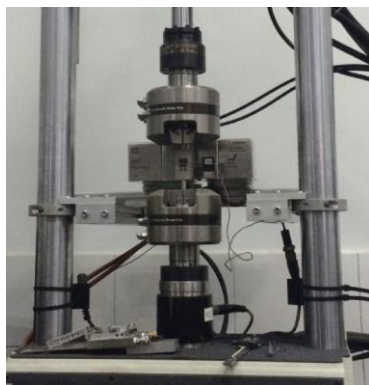


图6 试验装置图

## 2 方法

### 2.1 TFAC 试样的应力强度因子 $K$ 表达式

应力强度因子  $K$  是开展断裂行为研究的必需参量, 本文采用有限元分析方法获得 TFAC 试样的应力强度因子  $K$  表达式。有限元分析借助 Ansys12.1 进行。考虑到 TFAC 试样的对称性, 建立图 7 所示的 1/8 结构有限元模型。模型采用 Solid185 单元划分网格, 加载销与试样之间采用了刚-柔接触算法, 目标单元为 Target170, 接触单元为 Conta174, 加载销设置为解析刚体, 仅建立了其外圆周的一条圆弧

面模型。因裂纹尖端的应力奇异特征, 对裂纹尖端附近区域的网格进行了细化, 网格精度综合考虑了计算成本和结果稳定性。弹性模量  $E$  取为 200 GPa, 泊松比  $\nu$  取为 0.3。模型裂纹面均采用自由边界, 对应的韧带部分设置为  $Y$  向对称约束。图 8 给出 TFAC 试样受力变形后的 VonMises 等效应力云图。

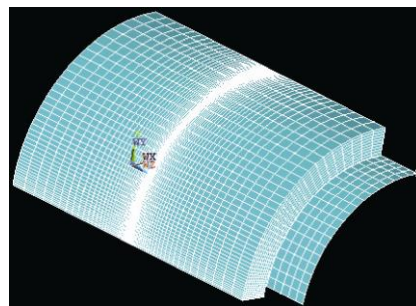


图7 TFAC 试样三维有限元模型

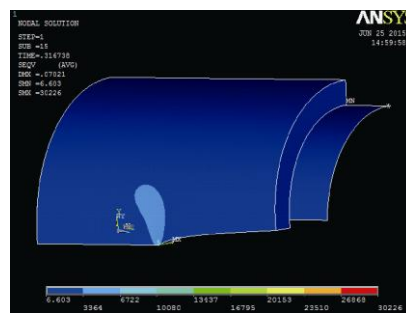
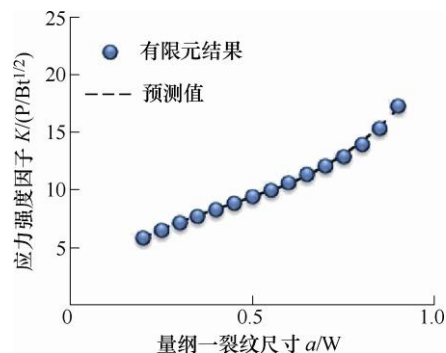


图8 TFAC 试样应力云图

图 9 给出了根据线弹性有限元分析得到的  $K$  因子随量纲一裂纹尺寸  $a/W$  的演化规律。分析表明, TFAC 试样的应力强度因子  $K$  满足如下关系

$$K = \left( \frac{P}{BW^{1/2}} \right) \left[ 2.2796 + 2.9567a/W + 3.2749(a/W)^2 \right] \quad (1)$$

式中,  $P$  为 TFAC 试样所受的拉伸载荷。

图9 TFAC 试样  $K$  因子演化规律

经验算, 式(1)用于 TFAC 试样  $K$  因子计算相对于有限元分析结果的相对误差小于 0.5%, 满足断裂测试的精度要求。

## 2.2 基于柔度法的 TFAC 试样裂纹长度计算

在断裂测试过程中, 可通过柔度法获得 TFAC 试样的实时裂纹长度, 同时  $J$  积分计算时还需要通过裂纹长度反求试样柔度。柔度法的基本原理是通过测试试样在加载中的线弹性载荷  $P$ -位移  $V$  曲线, 获取  $P$ - $V$  曲线斜率的倒数即柔度, 进而通过柔度与裂纹长度的关系式。

采用与前述  $K$  分析相同的有限元模型, 经弹性有限元分析得到的  $a/W$  与  $U$  的函数关系如下

$$\begin{cases} a/W = -119.093 + 288.745 - 173.782U^2 \\ U = \left[ (BEC)^{-0.5} + 1 \right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $E$  为弹性模量。

将式(2)作简单变形即可得柔度的表达式

$$C = \frac{1}{BE} \left\{ \left[ 0.7667 + 0.0068a/W + 0.0632(a/W)^2 \right]^{-1} - 1 \right\}^{-2} \quad (3)$$

## 2.3 TFAC 试样的 $J$ 积分计算

在计算  $J$  积分时, 通常将其分解为弹性和塑性两部分。其中, 弹性部分  $J_e$  由应力强度因子转换获得, 即

$$J_e = \frac{(1-\nu^2)K^2}{E} \quad (4)$$

式中,  $\nu$  为泊松比。

对于塑性部分  $J_p$ , 采用式(5)所示的增量形式,

$$J_{p(i)} = \left[ J_{p(i-1)} + \left( \frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{\Delta U_{p(i)}}{B_N} \right] \left( 1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为塑性因子,  $b$  为剩余韧带长度,  $B_N$  为净厚度,  $\Delta U_p$  为增量塑性功可由式(6)计算<sup>[13]</sup>;  $\gamma$  与  $\eta$  为试样尺寸相关的参量, 可由式(7)计算<sup>[14]</sup>。

$$U_{p(i)} = U_{p(i-1)} + \Delta V_i \frac{P_{(i)} + P_{(i-1)}}{2} - \left( \frac{1}{2} C_{LL(i)} P_{(i)}^2 - \frac{1}{2} C_{LL(i-1)} P_{(i-1)}^2 \right) \quad (6)$$

$$\gamma = \eta - 1 - \frac{b}{W} \frac{\eta'}{\eta} \quad (7)$$

塑性因子  $\eta$  是计算塑性  $J$  积分的关键参量,  $\eta$  值与材料性能及试样几何构形密切相关。采用铝合金的本构曲线作为输入材料来求解塑性因子  $\eta$ 。在加载过程中通过多次卸载, 提取载荷  $P$ 、裂纹嘴位移  $V_0$  及  $J$  积分值, 利用式(8)反求塑性因子  $\eta$

$$J_p = \frac{\eta_p U_p}{B_N b} \quad (8)$$

式中  $U_p$  为塑性功, 由载荷-位移曲线求得。对塑性因子  $\eta$  随裂纹长度  $a/W$  变化情况的研究表明, TFAC 试样塑性因子  $\eta$  符合以下关系

$$\eta = \sum_{i=1}^4 \left[ k_i \left( \frac{a}{W} \right)^{i-1} \right] \quad (9)$$

式中的待定系数  $k_i$  见表3。结合式(7)、(9)可求得对应的  $\gamma$ 。重新拟合  $\gamma$ - $a/W$  关系, 得到

$$\gamma = \sum_{i=1}^4 \left[ c_i \left( \frac{a}{W} \right)^{i-1} \right] \quad (10)$$

表3 TFAC 试样  $\eta$  和  $\gamma$  表达式系数

系数	A 系列	B 系列	C 系列
$k_1$	0.248 5	0.206 9	0.172 8
$k_2$	3.243 8	3.752 5	3.168 3
$k_3$	-7.782 8	-8.725 1	-6.905 5
$k_4$	5.610 0	6.093 9	4.571 6
$c_1$	6.014 0	-6.724 4	-6.799 9
$c_2$	34.107 0	38.018 0	36.656 0
$c_3$	-61.924 0	-68.597 0	-65.176 0
$c_4$	34.593 0	38.565 0	36.913 0

当试样未发生明显的裂纹扩展时, 塑性  $J$  积分  $J_p$  的计算则可直接采用式(8)。

## 3 结果与分析

对 A、B、C 三个系列铝合金 TFAC 试样进行断裂试验。图 10~12 分别给出了三个系列材料各 6 个 TFAC 试样的载荷( $P$ )与张开位移(Crack opening displacement, COD)曲线。

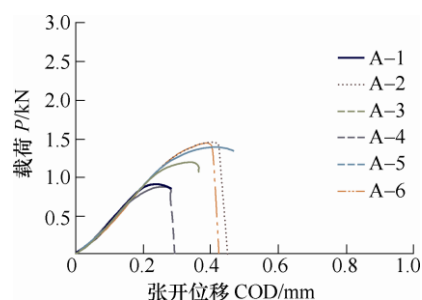


图10 A 系列 TFAC 试样载荷-位移曲线

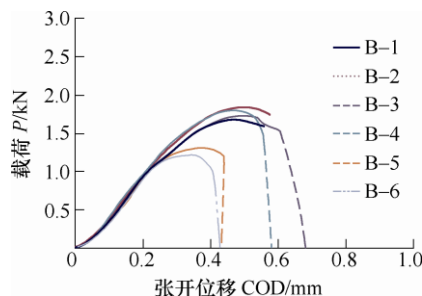


图11 B 系列 TFAC 试样载荷-位移曲线

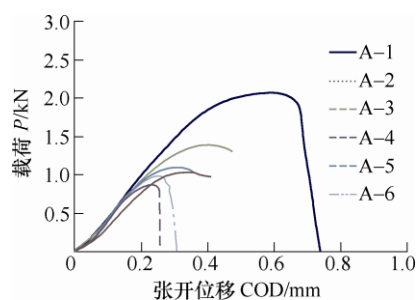


图12 C系列TFAC试样载荷-位移曲线

由于三类锆管 TFAC 试样在不同程度的塑性变形后均产生了脆性失稳破坏, 故采用解理断裂因子  $K_J$  来表征材料的断裂性能。通过对实测试样断口的观察发现, TFAC 试样仅在单侧开裂, 因此实际裂纹长度取为开裂一侧两条裂纹的平均值。首先采用断裂点的载荷、张开位移信息根据式(8)计算各试样的  $J_C$  值, 然后由式(11)换算为对应的应力强度因子

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{EJ_c}{(1-\nu^2)}} \quad (11)$$

表4及图13给出了三类锆管的断裂性能测试结果。可以看到, 三类锆管的  $K_{Jc}$  值具有一定的分散性, A、B 和 C 系列试样的  $K_{Jc}$  平均值分别为  $168.27 \pm 29.25$ 、 $193.94 \pm 23.64$  和  $160.42 \pm 39.22$ , 单位为  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

表4 三类锆管断裂试验结果

试样	断裂韧度 $J_C / (\text{kJ/m}^2)$	断裂韧度 $K_{Jc} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{Jc}$ 平均值/ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
A-1	150.82	123.88	$168.27 \pm 29.25$
A-2	400.20	201.80	
A-3	254.68	160.99	
A-4	163.57	129.01	
A-5	356.84	190.55	
A-6	406.40	203.36	
B-1	438.99	213.36	$193.94 \pm 23.64$
B-2	469.00	220.53	
B-4	449.00	215.77	
B-5	371.03	196.15	
B-6	272.88	168.21	
B-7	215.90	149.62	
C-1	525.76	244.43	$160.42 \pm 39.22$
C-2	192.08	147.74	
C-3	300.12	184.67	
C-4	118.34	115.96	
C-5	197.55	149.83	
C-6	126.45	119.87	
C-7	126.45	119.87	

结果显示, 三类试样的断裂韧度值均较高, 说明这种锆合金具有优良的抗裂性能; 少量的氢对锆合金的断裂韧度几乎没有影响, 这与锆合金管材在

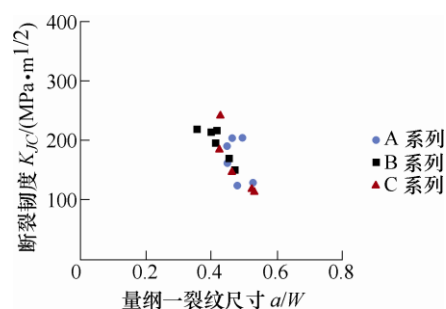


图13 三类锆管断裂试验结果

常规力学性能上的特性一致。当氢含量达到  $290 \text{ mg/kg}$  时, 材料的断裂韧度有所提高。分析认为, 这与氢的固溶强化作用有关, 当 TFAC 试样受到拉应力作用时, 裂纹尖端处于应力集中的高应力区, 固溶在合金中的氢原子会从低应力区向高应力区扩散, 导致裂纹尖端的氢含量增加, 如果这些氢仍然可以固溶在基体中, 对基体具有固溶强化的效应, 否则过饱和析出氢化物, 将导致材料塑韧性急剧下降。试验结果表明,  $300 \text{ mg/kg}$  以内的氢对锆合金管材的抗裂性能没有危害, 此时, 氢的固溶强化作用比过饱和析出的氢化物对材料断裂韧性的影响更大。

## 4 结论

(1) 设计了可用于锆合金包壳管断裂性能试验的 TFAC 试样及夹具系统。

(2) 基于弹性和弹塑性有限元分析建立了 TFAC 试样的  $K$  因子表达式、 $J$  积分计算式, 以及裂纹长度与柔度之间的关系式。

(3) 采用 TFAC 试样完成了不同氢含量的 A、B、C 三个系列锆合金包壳管 TFAC 试样的断裂韧性试验。锆合金管材具有优良的抗裂性能,  $200 \text{ mg/kg}$  以内的氢含量对材料的断裂韧度没有影响; 当氢含量达到  $290 \text{ mg/kg}$  时, 材料的断裂韧度有所提高。

## 参 考 文 献

- [1] GUPTA S K, BHASIN V, VAZE K K, et al. Derivation of J-resistance curve for through wall cracked pipes from crack mouth opening displacement[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(9): 686-699.
- [2] KIM Y J, SHIM D J, HUH N S, et al. Approximate elastic-plastic J estimates of cylinders with off-centred circumferential through-wall cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(12): 1673-1693.
- [3] KIM Y J, BUDDEN P J. Reference stress approximations for J and COD of circumferential through-wall cracked pipes[J]. International Journal of Fracture, 2002, 116(3): 167-178.

- 195-218.
- [4] SAXENA S, MURTHY D S R. Elastic-plastic fracture mechanics based prediction of crack initiation load in through-wall cracked pipes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 26(9): 1165-1172.
- [5] KIM Y J, SHIM D J. Relevance of plastic limit loads to reference stress approach for surface cracked cylinder problems[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(9): 687-699.
- [6] KIM Y J, KIM J S, LEE Y Z, et al. Non-linear fracture mechanics analyses of part circumferential surface cracked pipes[J]. International Journal of Fracture, 2002, 116(4): 347-375.
- [7] SINGH R N, BIND A K, SRINIVASAN N S, et al. Influence of hydrogen content on fracture toughness of CWSR Zr-2.5Nb pressure tube alloy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 432 (1-3): 87-93.
- [8] BAO Chen, CAI Lixun, HE Guangwei, et al. Normalization method for evaluating J-resistance curves of small-sized CIET specimen and crack front constraints[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 94-95: 60-75.
- [9] BAO Chen, CAI Lixun, DAN Chen. Estimation of fatigue crack growth behavior for small-sized C-shaped inside edge-notched tension (CIET) specimen using compliance technique[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 81: 202-212.
- [10] BERTSCH J, HOFFELNER W. Crack resistance curves determination of tube cladding material[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 352(1-3): 116-125.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM E1820-15 Standard test methods for measurement of fracture toughness[S]. Philadelphia, PA: Annual book of ASTM Standards: Vol. 3.01, 2015.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21143-2014 金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21143-2014 Metallic materials-Unified method of test for determination of quasistatic fracture toughness [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] BAO Chen, CAI Lixun, SHI Kaika, et al. Estimation of J-resistance curves for CT specimen based on unloading compliance method and CMOD data[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2015, 43(3): 1-12.
- [14] ERNST H A. Estimations on J-integral and tearing modulus T from a single specimen test record[C]// American Society for Testing and Materials. Fracture Mechanics, ASTM STP 743. Baltimore: ASTM, 1981: 476-502.
- 
- 作者简介: 刘肖(通信作者), 女, 1989 年出生, 助理研究员。主要研究方向为反应堆结构材料。  
E-mail: 18280008908@126.com
- 王理, 女, 1969 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为反应堆结构/功能材料。  
E-mail: 932163795@qq.com