

文章编号 : 0258-0926(2017)S1-0074-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.S1.0074

# 国产 A508-3 钢辐照前后小样品 断裂韧性测试分析

林 贇, 佟振峰, 宁广胜, 杨 文

中国原子能科学研究院, 北京, 102413

**摘要:** 国产 A508-3 钢是反应堆压力容器 (RPV) 用钢, 属于低合金铁素体钢, 这类材料具有明显的韧脆转变行为, 并且在经受中子辐照后, 产生明显的辐照脆化效应, 降低材料韧性, 增加脆性断裂的风险。为掌握中子辐照对压力容器钢断裂韧性的影响, 本文研究并掌握了国产 A508-3 钢 0.5CT 样品断裂韧性测试技术, 并对辐照前后断裂韧性数进行比较, 分析了中子辐照对 A508-3 钢断裂韧性的影响。

**关键词:** 压力容器; 中子辐照; 断裂韧性

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A

## Fracture Toughness of RPV Steel Using Small Specimens after Neutron Irradiation

Lin Yun, Tong Zhenfeng, Ning Guangsheng, Yang Wen

China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413

**Abstract:** The domestic A508-3 steel is a kind of low alloy ferritic steel, using for the reactor pressure vessel (RPV). The material has significant ductile-brittle transition behavior, and after neutron irradiation, it resulting in significant irradiation embrittlement effect, reducing the material toughness, increasing the risk of brittle fracture. To master the neutron irradiation effect on the fracture toughness of the pressure vessel steel, fracture toughness tests have been done by A508-3 0.5CT specimens, and the analyzed the neutron irradiation on A508-3 steel fracture toughness combining with the fracture data before and after neutron irradiation.

**Key words:** PRV, Neutron Irradiation, Fracture Toughness

### 0 前 言

目前, 反应堆压力容器 (RPV) 均由铁素体钢制成, 此类材料具有冷脆特征, 同时低温脆性对辐照很敏感, 长期辐照会诱发 RPV 脆性断裂。除了 Charpy-V 试样是随堆监督试样外, 无延性转变温度 (NDT) 测试等试验, 都因样品尺寸大而不能进入随堆的安全监督管中, 因而无法获取试验数据。为克服此问题, 有效地利用小试样断裂韧性测试技术, 产生了主曲线方法。以庞大的监督数据库作依托、可信度高的主曲线方法评估核电厂寿命及其延寿, 将会充分发挥 RPV 的寿命潜

力, 为核电厂带来巨大的经济效益。因此正确分析基于主曲线分析方法的小试样断裂韧性测试的各种状况具有非常重要的意义。

### 1 断裂韧性测试及辐照试验

#### 1.1 断裂韧性测试

本研究中使用的 RPV 断裂韧性样品取自于中国第一重型机械集团公司生产的 A508-3 钢锻件, 该压力容器钢的热处理工艺如表 1 所示, 其主要化学成分 (除铁之外) 如表 2 所示。

RPV 材料断裂韧性测试参考 ASTM E

表 1 压力容器钢热处理工艺  
Table 1 Heating Processing of RPV Steel

工艺	热处理温度/	热处理时间/h
正火	930±10	5
回火	670±10	10
调质	890±10	5 (然后水冷)
	655±10	10 (然后空冷)

表 2 A508-3 钢化学成分  
Table 2 Chemical Components of A508-3 Steel

元素	C	Si	Mn	P	S
成分/%	0.19	0.17	1.41	0.003	0.002
元素	Cu	Cr	Ni	Mo	Cu
成分/%	0.03	0.12	0.74	0.48	0.03

1820-11<sup>[1]</sup>、ASTM E 1921-10<sup>[2]</sup>在国产 SANS 电子拉伸试验机上进行。试验温度为 -120 ~ 300 ，控温精度±1 。试验机精度等级为一级，最大载荷 10 kN，变形测量精度在 0.5%之内。

位移测量采用变形规装卡于样品端面刀口的方法，这种安装方式解决了放射性试样变形规装卡的困难，加载线位移用系数  $K_V$  进行修正如下：

$$K_V = 1 + \frac{0.25W}{a_0 + 0.1(W - a_0)} \quad (1)$$

式中， $a_0$  为初始裂纹长度； $W$  为样品宽度。

用显微镜测量  $a_0$ ，测量误差小于 0.1 mm。测量方法：由试件两侧边或两侧断口顶部分别偏离厚度  $B$  的 1%或 0.1 mm（取最大值），把试件的剩余厚度分成 8 等份，在等分处沿 9 个点测量裂纹长度。

## 1.2 中子辐照试验

加速中子辐照（简称辐照）试验在中国原子能科学研究院 49-2 堆 H8 孔道中进行，该孔道在满功率运行下的中子注量率为  $0.8 \sim 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，有效满功率辐照时间为 145 d，中子注量约为  $10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ，相当于非能动先进压水堆（AP1000）反应堆服役 60 a 注量水平，辐照过程中对辐照温度进行了严格监控，确保辐照温度在  $286 \pm 6$  ，与压力容器钢实际服役温度一致。

## 2 结果分析

### 2.1 多温度点法

多温度点法通过在不同试验温度下进行多个试样断裂韧性测试，无需指定温度进行试验，获得大量断裂韧性试验数据后计算参考温度  $T_0$ 。

将得到的  $K_{JC}$  根据式（2）换算为  $B=25 \text{ mm}$  的标准样品值，公式为：

$$\frac{K_{JC}^X - K_{\min}}{K_{JC}^Y - K_{\min}} = \left( \frac{B_Y}{B_X} \right)^{1/4} \quad (2)$$

式中， $K_{JC}^X$ 、 $K_{JC}^Y$  分别为厚度为  $B_X$  和  $B_Y$  的试样的断裂韧性； $K_{\min}$  为试样最小断裂韧性。

在不同试验温度  $T_i$  下，根据已知的  $K_{JC}$  计算  $T_0$ ，公式为：

$$\sum_i^n \frac{\delta_i \exp[c(T_i - T_0)]}{a - K_{\min} + b \exp[c(T_i - T_0)]} = \sum_i^n \frac{(K_{JC} - K_{\min})^4 \exp[c(T_i - T_0)]}{\{a - K_{\min} + b \exp[c(T_i - T_0)]\}^5} \quad (3)$$

式中， $\delta_i$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  为公式参数。解理断裂时  $\delta_i=1$ ，无解理断裂时  $\delta_i=0$ ； $a=31 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ； $b=77 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ； $c=0.019 \text{ }^{-1}$ 。

累计断裂概率  $P_f$  下的断裂韧性强度因子  $K_{JCP}$  与试验温度  $T$  之间的关系曲线：

$$K_{JCP} = K_{\min} +$$

$$\left[ \ln \left( \frac{1}{1 - P_f} \right) \right]^{1/4} \{ 11 + 77 \exp[0.019(T - T_0)] \} \quad (4)$$

根据上述公式计算国产 A508-3 钢的转变温度  $T_0$  为 -63.3 。

### 2.2 单温度点法

单温度点法是通过冲击试验数据首先估计一个测试温度，然后对该温度下获得的一个解理断裂韧性强度因子进行有效性判定，确认有效后在该温度点下完成一组断裂韧性测试，并通过计算得到的比例参数  $K_0$ 、 $K_{JC \text{ med}}$  计算参考温度  $T_0$ ，计算完  $T_0$  后需判定  $T_0$  进行有效性，看其是否满足： $-50 \leq T - T_0 \leq 50$ 。虽然单温度点法较多温度点法流程更为复杂，但具有巨大的优势，单温度点法所需样品数量远小于多温度点法，更符合核电厂结构材料服役性能测试需求。

根据最大似然法可得  $K_0$  公式为：

$$K_0 = \left[ \sum_{k=1}^N \left( K_{JC}^{(k)} - K_{\min} \right)^4 / r \right]^{1/4} + K_{\min} \quad (5)$$

式中， $N$  为试验的试件总数； $k$  为试验试件序号； $r$  为试验试件的修正数量。

$K_{JC\ med}$  计算公式为：

$$K_{JC\ med} = K_{\min} + (K_0 - K_{\min})(\ln 2)^{1/4} \quad (6)$$

根据已知的  $K_{JC\ med}$  计算参考温度  $T_0$ , 公式为：

$$T_0 = T - \frac{1}{0.019} \ln \left[ \frac{(K_{JC\ med} - 30)}{70} \right] \quad (7)$$

类似的可以由式(5)~式(7)计算  $K_{JC}(T)$ 。使用 2 种方法计算了  $T_0 = -64$  时的国产 A508-3 钢的  $T_0$ , 结果表明, 2 种方法所得  $T_0$  一致, 证明了小尺寸样品  $K_{JC\ med}$  可以通过多温度点法验证, 少量试样  $K_{JC\ med}$  可以通过单温度点法验证。

### 2.3 中子辐照对国产 A508-3 钢断裂韧性的影响

单温度点法对辐照前后国产 A508-3 钢断裂韧性进行了对比分析, 分别计算了参考温度和  $K_{JC\ med}$ 。针对辐照后 RPV 材料进行了断裂韧性测试, 与未辐照数据相比, 韧脆转变温度  $T_0$  升高 84 。

根据 ASTM E1921 标准, 确定样品发生解理的断裂概率可根据断裂韧性数据, 由式(8)计算获得, 针对辐照前后的断裂韧性性能测试样品, 分别计算出的断裂概率表明, 辐照明显增大了 RPV 样品的解理断裂的发生。  $P_f = 0.632$  时, 辐照前后的临界断裂韧性  $K_{IC}$  分别为  $111 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 、 $74 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ , 下降了  $37 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。该数据指标是评价 RPV 结构完整性的关键输入数据。

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{(K_{JC} - K_{\min})}{(K_0 - K_{\min})} \right]^b \right\} \quad (8)$$

材料强度的提高将会导致延伸性能下降, 即硬化导致脆化。主要的原因是: 在恒应变速率下, 当温度变化在低温至室温以上不太高的温度范围内时, 断裂应力随温度的变化比较小, 但是位错

在滑移面上开动所需的力会随温度的降低而升高, 当温度降低至流变应力大于断裂应力时, 材料就发生了脆性断裂。结构材料辐照后产生大量的辐照缺陷, 尽管会增大断裂应力, 但会更大影响在滑移面上开动位错所需的力, 会明显增强流变应力随温度降低而升高的趋势, 从而流变应力和断裂应力相等时所对应的温度也会明显升高, 导致  $T_0$  升高。因此, 通常屈服强度的增加会导致材料的延伸性能下降而发生脆化, 即硬化导致脆化。

### 3 结 论

对未辐照国产 A508-3 钢 0.5CT 断裂韧性样品进行了断裂韧性测试, 获得了相应的  $K_{JC}$ , 并通过求解  $K_{JC\ med}$  计算了  $T_0$ 。结果表明, 多温度点法与单温度点法所获得的  $T_0$  一致, 多温度点法测试分析流程相对简单, 但需要较多样品数量, 而单温度点法测试分析流程相对复杂, 但所需样品数量远小于多温度点法, 更适用于国产 A508-3 钢辐照后断裂韧性测试分析。

辐照前  $T_0 = -64$ , 辐照后  $T_0 = 20$ , 增量  $\Delta T_0 = 84$ , 说明经中子辐照至  $10^{20} \text{ cm}^{-2}$  后, 国产 A508-3 钢表现出了较为明显的脆化行为。

参考文献：

- [1] ASTM E 1820-11. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness[S].2011.
- [2] ASTM E 1921-10. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range[S]. 2010.

(责任编辑：王中强)