

$10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 快中子辐照国产 A508-3 钢材料的小冲杆试验研究

王成龙, 白冰, 张长义, 佟振峰, 钟巍华, 徐帅, 赵迎超, 宁广胜, 杨文

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要:小冲杆试验方法以其所需测试样品尺寸小而带来的样品感生放射性小等优势,越来越多地应用于核材料力学性能评价领域。本文设计了一套利用光栅尺直接测量样品变形的小冲杆试验装置,较传统装置精度有明显提高。利用该套装置对注量为 $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$)快中子辐照的国产 A508-3 钢材料进行了小冲杆测试研究,探索了针对放射性样品从制备到测试的试验方法,并获得了国产 A508-3 钢材料的小冲杆屈服特征值、抗拉特征值和韧脆转变温度与标准试验之间的关系式。

关键词:国产 A508-3 钢;小冲杆;放射性

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)04-0683-05

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0527

Study on Small Punch Test of China A508-3 Steel Material Irradiated by Fast Neutron at $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$

WANG Chenglong, BAI Bing, ZHANG Changyi, TONG Zhenfeng, ZHONG Weihua, XU Shuai, ZHAO Yingchao, NING Guangsheng, YANG Wen

(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Small punch test is more and more used in the field of mechanical properties evaluation of nuclear materials because of the advantages of small sample-induced radioactivity caused by the small size of the test sample required. In this paper, a set of small punch test device to directly measure the deformation of the sample using a grating ruler was designed, which has a significantly improved accuracy compared with the conventional device. Using this device, a small punch test was carried out on China A508-3 steel with a fast neutron flux of $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$). The test method for preparation and testing of radioactive samples was explored and obtained. The relationship between the yield, tensile characteristic value and ductile-brittle transition temperature of the small punch of China A508-3 steel material and the standard test was obtained.

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0702200)

作者简介: 王成龙(1989—), 男, 吉林白山人, 助理研究员, 博士, 核燃料循环与材料专业

网络出版时间: 2019-10-31; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20191030.1507.014.html>

Key words: China A508-3 steel; small punch; radioactivity

小冲杆 (SP) 试验是一种测定材料韧脆性质的试验技术^[1-4]。该试验技术是在 20 世纪 80 年代由 Baik 等^[1]提出的,起初主要用于研究受辐照材料断裂性能与服役温度和受照剂量之间的关系。由于其所需测试样品体积小,例如典型样品直径为 3 mm,厚度为 0.25 mm^[5-6],由此带来的感生放射性小,节约实验堆的辐照空间,使用普通的试验机及简单的附加装置即可完成材料性能测试等优点,使其在核材料力学性能测试领域得到了一定的应用。

本文设计加工一套 SP 试验装置,并利用该套装置获得注量为 $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$) 快中子辐照的国产 A508-3 钢材料的 SP 特征值与标准拉伸试验和夏比冲击试验之间的关系。

1 试验原理及装置

传统试验装置主要采用试验机横梁等间接方式来测量样品的变形,会引入较大的误差,本文结合该装置在核测试领域应用的特点以及提高装置测试精度的要求设计了一套 SP 试验装置^[7],建立了针对放射性样品从制备到测试过程的方法。

本套 SP 测试装置设计实现了对 SP 样品变形的直接测量,如图 1a 所示,样品由上下夹块夹持,样品的下表面是小球和冲杆,样品的上表面是位移杆和光栅尺。试验过程如图 1b 所示,由试验机向冲杆施加载荷后,冲杆挤压小球,随后小球挤压样品下表面,使样品发生变形,样品上表面的变形由位移杆传递给光栅尺

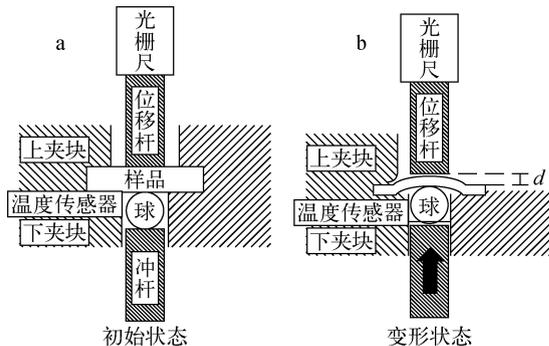


图 1 SP 装置原理图

Fig. 1 SP device schematic

进行样品变形 d 的测量,由于在试验过程中,位移杆和光栅尺不受力,自身不发生变形,尽管小球、冲杆和试验机会发生一定的变形,但这部分变形不在光栅尺的测量范围之内,有效提高了试验测量的精度。

使用厚度为 $(0.30 \pm 0.01) \text{ mm}$ 的 2 个样品来测试试验装置的重复性。在室温、冲压速度为 0.2 mm/min 条件下进行测试,同时记录载荷-横梁位移曲线和载荷-光栅尺曲线,测试结果如图 2 所示。可看到,无论是采用直接方法测得的载荷-光栅尺曲线或是用间接方法测得的载荷-横梁位移曲线,2 条曲线基本重合,表明试验装置具有可靠的重复性。同时可看到,利用直接方法与间接方法,在试验结束时,横梁与光栅尺测得的位移差为 0.29 mm ,而球与位移杆之间的样品厚度仅为 0.16 mm ,由此可看出在整个试验过程中由冲杆与试验机等相连部分受力后产生形变引入的误差为 0.13 mm ,占光栅尺测量得到的位移的 14% ,由此看出采用横梁位移进行试验会引入较大的试验误差。

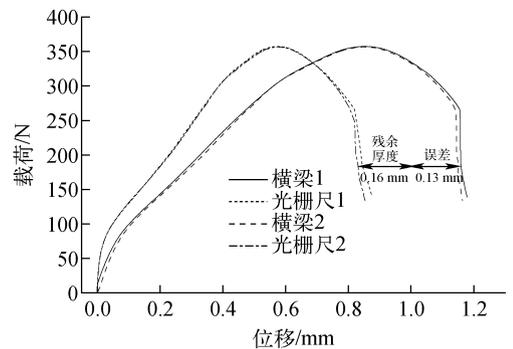


图 2 两样品的 SP 载荷-位移曲线

Fig. 2 SP test load-displacement curves for two samples

本套试验装置操作简便,例如室温样品更换的时间仅为 90 s ,高低温时样品更换的时间约为 150 s ,大幅减少试验人员的受照剂量。温度传感器测温点距样品仅 4 mm 左右,有效提高了控温精度,控温范围为 $(-140 \pm 1) \sim (200 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 试验材料和步骤

本文选取的试验材料是在中国原子能科学研究院轻水反应堆辐照的国产压力容器 A508-3 钢材料冲击试样断头, 快中子注量为 $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$)。样品为 $\phi 3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 的小圆片。

试验时, 首先将带有放射性的冲击断头利用机械手在热室中使用热熔剂粘于样品台上, 再将样品台固定于专门设计的金刚石线切割机底座上, 使用线切割机对冲击断头进行切割, 获得尺寸为 $27.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的片状样品。

将获得的片状样品使用自动磨样机将样品厚度 (t_0) 从 0.4 mm 磨制为 0.3 mm , 随后利用孔径为 $\phi 3 \text{ mm}$ 的冲孔机将样品冲压成 $\phi 3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 的小圆片试样。

试验样品准备完毕后, 测量样品厚度, 随后装入试验装置中进行控温。本文试验温度为: 室温、 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-50 \sim -100 \text{ }^\circ\text{C}$ (间隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$) 和 $-140 \text{ }^\circ\text{C}$, 冲压速度为 0.2 mm/min , 试验过程中试验机自动记录载荷-位移 (由光栅尺测量) 曲线, 试验完成后计算屈服、抗拉特征值和断裂能, 并与标准未辐照试验进行拟合, 获得 SP 屈服、抗拉特征值与标准拉伸试验屈服、抗拉强度, SP 韧脆转变温度与夏比冲击韧脆转变温度之间的关系式。

3 试验结果分析与讨论

在不同试验温度下, 由 SP 试验获得的累计快中子注量为 $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($E \geq 1 \text{ MeV}$) 的国产 A508-3 钢样品的载荷-位移曲线如图 3 所示。

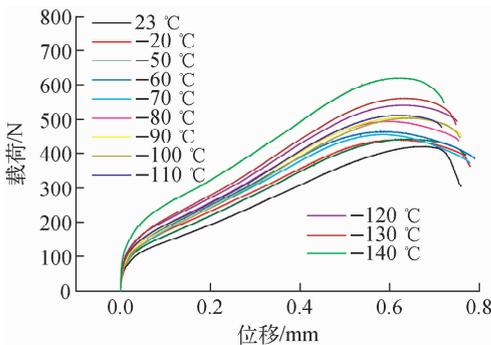


图 3 不同温度下样品的载荷-位移曲线
Fig. 3 Load-displacement curve of sample at different temperatures

示。从图 3 可看出, 随着试验温度的降低, 在相同位移处, 试验所需载荷逐渐增大。

3.1 SP 特征值与标准拉伸试验强度关系建立

将 SP 载荷-位移曲线中的屈服载荷特征点 P_y 和抗拉载荷特征点 P_m 按分别除以厚度的平方得到 SP 屈服特征值 P_y/t_0^2 和抗拉特征值 P_m/t_0^2 。SP 屈服特征值和抗拉特征值随温度的变化关系如图 4 所示。可看出, 屈服特征值和抗拉特征值总体上均表现出随试验温度的升高而降低的趋势。国产 A508-3 钢材料的标准拉伸屈服强度和抗拉强度随温度的变化曲线如图 5 所示。可看出, 由 SP 试验获得的特征值与由标准拉伸试验获得的强度值的变化趋势基本一致。

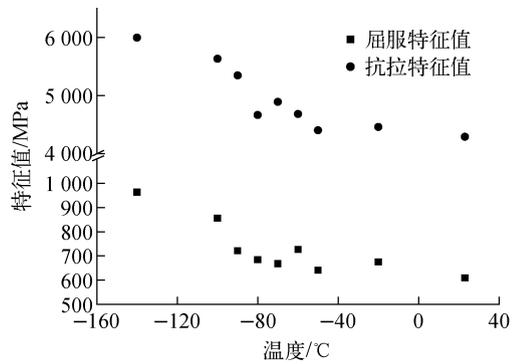


图 4 SP 屈服、抗拉特征值与温度的关系
Fig. 4 Relationship between SP yield and tensile characteristic values with temperature

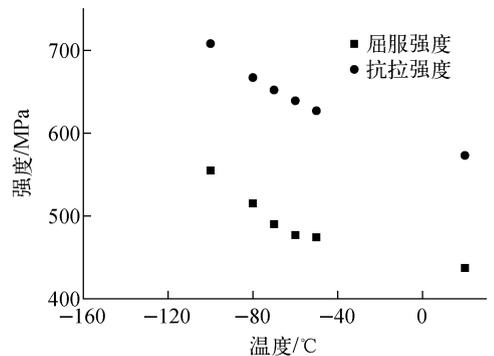


图 5 标准拉伸屈服与抗拉强度随温度的关系
Fig. 5 Standard tensile yield and tensile strength as a function of temperature

将相同试验温度下由 SP 载荷-位移曲线得到的 P_y/t_0^2 和 P_m/t_0^2 与通过标准拉伸试验获得的屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_m 示于图 6, 采用如下

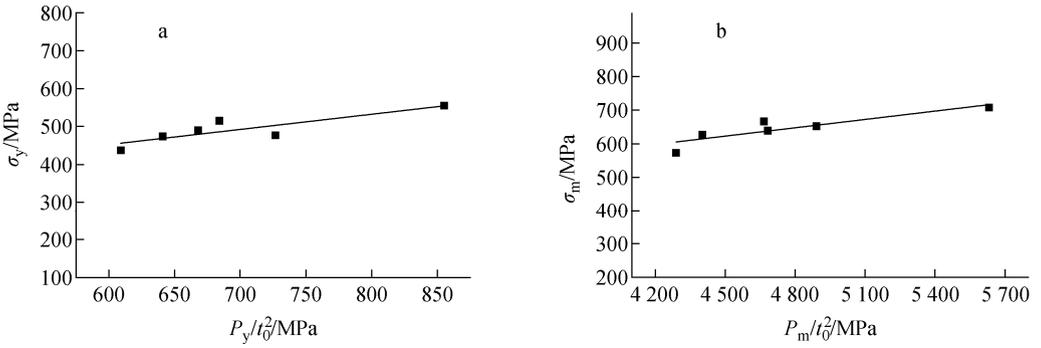


图6 SP特征值与标准强度之间的关系

Fig. 6 Relationship between characteristic value of small punch and standard strength

半经验公式^[8-9]进行线性拟合:

$$\sigma_y = \alpha P_y / t_0^2 + \beta \quad (1)$$

$$\sigma_m = \alpha P_m / t_0^2 + \beta \quad (2)$$

式中, α, β 为拟合参数。

则 $\sigma_y - P_y / t_0^2$ 和 $\sigma_m - P_m / t_0^2$ 的经验关系为:

$$\sigma_y = 0.4 P_y / t_0^2 + 212 \quad (3)$$

$$\sigma_m = 0.083 P_m / t_0^2 + 50 \quad (4)$$

3.2 SP 韧脆转变温度与标准夏比冲击韧脆转变温度关系建立

对于 T_{sp} (SP 韧脆转变温度) 与 T_{CVN} (冲击韧脆转变温度) 的关系, 国际上进行了大量的研究, 其中一种分子动力学模型理论研究结果认为 T_{sp} 与 T_{CVN} 存在线性关系^[10-11], 关系式可表示为:

$$T_{CVN} = \delta T_{sp} + \gamma \quad (5)$$

式中, δ 和 γ 为常数。对于 δ 的数值, Kameda 等^[11]进行了拟合研究, 得出其经验值为 2.5, 该值在之后的研究中得到了广泛的认可和引用, 因此, SP 的通用转换经验公式可表示为:

$$T_{CVN} = 2.5 T_{sp} + \gamma \quad (6)$$

前期工作中测得的国产 A508-3 钢材料的标准夏比冲击转变温度 T_{CVN} 为 $-52 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[12]。图 7 为 SP 断裂能-温度曲线, 得到 SP 韧脆转变温度为 $-94 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

根据标准夏比冲击韧脆转变温度和 SP 韧脆转变温度计算得到:

$$T_{CVN} = 2.5 T_{sp} + 183 \quad (7)$$

4 结论

本文通过对小冲杆测试技术的研究及装置的改进设计加工, 使用注量为 $10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$

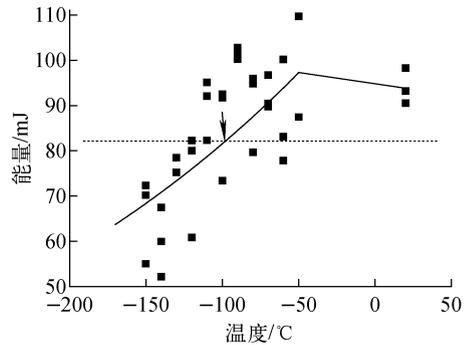


图7 SP断裂能-温度曲线

Fig. 7 SP fracture energy-temperature curve

($E \geq 1 \text{ MeV}$) 的快中子辐照国产 A508-3 钢材料开展了小冲杆试验, 并得出以下结论。

1) 本文设计的采用光栅尺直接测量样品变形的小冲杆测试装置的精度较传统装置有明显提高。

2) 通过小冲杆试验得到标准屈服强度与小冲杆屈服特征值之间的关系式为 $\sigma_y = 0.4 P_y / t_0^2 + 212$; 标准抗拉强度与小冲杆抗拉特征值之间的关系式为 $\sigma_m = 0.083 P_m / t_0^2 + 50$ 。

3) 夏比冲击韧脆转变温度与小冲杆转变温度之间的关系式为 $T_{CVN} = 2.5 T_{sp} + 183$ 。

参考文献:

- [1] BAIK J M, KAMEDA J, BUCK O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel[J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17 (12): 1 443-1 447.
- [2] 李璞, 关凯书. 小冲杆测试法在评定材料性能的应用进展[J]. 化工机械, 2006, 33(5): 262-267.
LI Pu, GUAN Kaishu. Application and progress

- of the small punch test method for material performance evaluation[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2006, 33(5): 262-267(in Chinese).
- [3] 张小亮,王兆希. 小冲杆试验方法研究进展及存在的问题[J]. *中国测试技术*, 2008, 34(1): 10-14.
ZHANG Xiaoliang, WANG Zhaoxi. Research and problems of small punch test method[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2008, 34(1): 10-14(in Chinese).
- [4] 陈玉新,凌祥,涂善东. SUS304 材料的小冲孔蠕变试验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(2): 219-225.
CHEN Yuxin, LING Xiang, TU Shandong. Study on small punch creep test for SUS304[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(2): 219-225(in Chinese).
- [5] 韩浩,关凯书,王志文. 基于 Delphi 的小冲杆试验机数据采集系统的开发[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(7): 21-23.
HAN Hao, GUAN Kaishu, WANG Zhiwen. Development of data acquisition system for small punch test machine's based on Delphi[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(7): 21-23(in Chinese).
- [6] 赵昌正,张国定. 金属基复合材料[M]. 上海:上海交通大学出版社,1996.
- [7] 佟振峰,王成龙,钟巍华,等. 一种可直接测量挠度的小冲杆测试装置,中国:ZL201610963065. 5 [P]. 2019-03-29.
- [8] MANAHAN M P. A new postirradiation mechanical behavior test: The miniaturized disk bend test[J]. *Nuclear Technology*, 1983, 63(2): 295-315.
- [9] 韩浩,关凯书,李建卫,等. 小冲杆试验参数的有限元分析[J]. *机械强度*, 2004, 26(4): 455-459.
HAN Hao, GUAN Kaishu, LI Jianwei, et al. FEM analysis of experimental parameters of the small punch test[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(4): 455-459(in Chinese).
- [10] MAO X, SHOJI T, TAKAHASHI H. Characterization of fracture behavior in small punch test by combined recrystallization-etch method and rigid plastic analysis[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 1987, 15(1): 30-37.
- [11] KAMEDA J, MAO X. Small-punch and TEM-disc testing techniques and their application to characterization of radiation damage[J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27(4): 983-989.
- [12] 林赞,宁广胜,张长义,等. 国产 A508-3 钢辐照性能[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(2): 204-207.
LIN Yun, NING Guangsheng, ZHANG Changyi, et al. Mechanical property of China A508-3 steel after neutron irradiation[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(2): 204-207 (in Chinese).