

文章编号: 1007-4627(2006)02-0164-03

## 质子辐照不锈钢中氢气泡产生和演化研究\*

郑永男, 周冬梅, 袁大庆, 左 翼, 杜恩鹏, 胡跃明,  
段 晓, 王朝晖, 刘 猛, 李 永, 朱升云  
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘 要:** 采用质子辐照模拟方法和正电子湮没寿命测量方法研究了质子辐照在国产改进型 316L 不锈钢中产生的氢气泡及其随辐照质子注量的演化过程。 $5 \times 10^{12}$ ,  $5 \times 10^{13}$ ,  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  质子辐照的实验结果表明, 辐照在不锈钢中产生氢气泡的尺度随辐照质子注量增加而增大, 在质子注量为  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  时氢气泡尺寸达到 0.62 nm, 气泡的浓度随质子注量增加而减小。

**关键词:** 国产改进型 316L 不锈钢; 氢气泡; 质子辐照模拟; 正电子湮没寿命测量  
**中图分类号:** O571      **文献标识码:** A

### 1 引言

加速器驱动洁净能源系统(ADS)是建立在新原理基础之上的新型核能系统。ADS 是利用高能强流加速器产生的质子轰击重金属靶产生散裂中子, 再用产生的散裂中子驱动次临界反应堆以进行电能生产。这种核能系统同时还可达到长寿命放射性废物的嬗变、同位素生产等目的。

ADS 系统中质子出射的束窗材料处于高能和高剂量的质子和中子辐照环境。辐照在束窗材料中产生辐射损伤, 导致材料宏观性质的变坏。当辐照达到一定累积剂量时, 辐射损伤会引起材料性能的严重恶化。

加速器驱动洁净能源系统中, 不锈钢是一种重要的散裂中子源束窗材料<sup>[1]</sup>。辐照在不锈钢中除产生位移损伤, 还会产生气泡。气泡的产生与辐照剂量和温度密切相关。

本工作利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器扫描质子束, 模拟研究了国产改进型 316L 不锈钢中氢气泡的产生和随辐照注量的演化过程。

### 2 实验

实验样品是国产改进型 316L 不锈钢。这是一

种 20% 冷轧和掺 Ti 的低碳、铬镍不锈钢, 具有很好的抗辐照性能<sup>[2]</sup>, 其成分为 Cr 15.05%, Ni 14.76%, Mo 1.23%, Ti 0.32%, P 0.007%, S 0.007%, Mn 1.78%, Si 0.52% 和 C 0.048%, 其余是铁。实验用的不锈钢样品尺寸是  $\phi 25 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 样品表面采用机械方法抛光成镜面光亮。

质子照射在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器的扫描质子束终端进行(见图 1)。质子扫描面积是  $30 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ , 扫描均匀度好于 90%。辐照在室温下进行, 质子能量为 5 MeV, 辐照注量分别为  $5 \times 10^{12}$ ,  $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 。辐照产生的位移损伤很小, 用 TRIM95 程序计算得到上述质子辐照注量产生的位移损伤分别为  $3.1 \times 10^{-7}$ ,  $3.1 \times 10^{-6}$  和  $3.1 \times 10^{-5} \text{ dpa}$ (displacement per atom)<sup>[3]</sup>。

用正电子湮没寿命测量技术检测质子照射产生的氢气泡。正电子湮没寿命测量采用快-快符合正电子湮没寿命谱仪。谱仪的探测器由氟化钡闪烁体和 XP2020Q 光电倍增管组成。采用  $^{60}\text{Co}$  源测量的谱仪的时间分辨为 205 ps。实验测量中采用  $^{22}\text{Na}$  正电子源, 源强为  $8 \times 10^5 \text{ Bq}$ 。测量时用两片相同注量质子辐照的样品和源形成“样品-源-样品”的夹心结构。正电子湮没寿命测量在室温下进行, 每个寿命谱总计数为  $10^6$ 。

实验测量的正电子湮没寿命谱用 LT 程序拟

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-16

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999022600)

作者简介: 郑永男(1978-), 男(朝鲜族), 吉林通化人, 助理研究员, 从事核技术应用研究; E-mail: zhengyn@iris.ciae.ac.cn

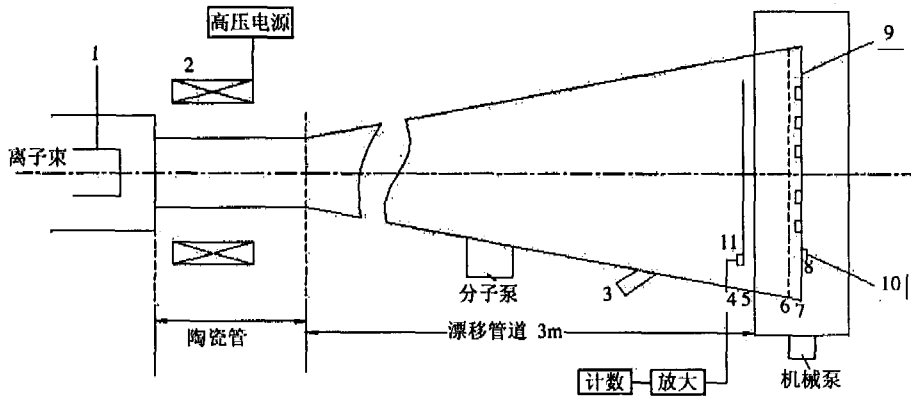


图 1 HI-13 串列加速器的扫描质子束终端装置示意图

1 Faraday cup, 2 扫描磁铁, 3 观察窗, 4 ZnS 对光板, 5 Kapton 封窗, 6 二次电子抑制槽, 7 铝板样品架, 8 小 Faraday cup, 9 束流积分仪, 10 束流积分仪, 11 金硅面垒探测器。

合<sup>[4]</sup>。除源成分外, 寿命谱可以用两个寿命很好地拟合, 拟合参数为  $\tau_1, \tau_2, I_2 (I_1 + I_2 = 1)$ 。拟合优度好于 1.3。

### 3 结果和讨论

图 2 给出了拟合得到的正电子湮没寿命参数  $\tau_1, \tau_2, I_1, I_2$  随质子注量的变化。短寿命  $\tau_1$  是自由正电子湮没寿命和质子辐照产生的单空位和双空位捕获的正电子湮没寿命的加权平均值, 长寿命  $\tau_2$  是正电子在辐照产生的氢气泡中湮没寿命。

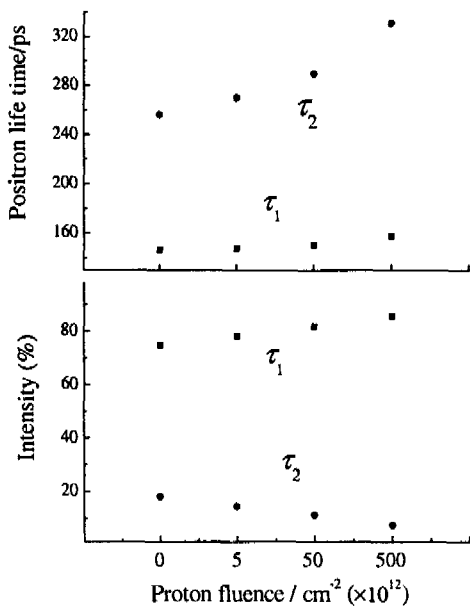


图 2 正电子湮没寿命  $\tau_1$  和  $\tau_2$  及其相对强度  $I_1$  和  $I_2$  随质子注量变化

由图可见, 短寿命成分  $\tau_1$  随辐照质子注量增加而增大, 但增大量很小, 这是由于辐照产生的位移损伤很小, 在样品中产生的单空位和双空位较少。 $\tau_1$  随辐照质子注量缓慢增大表明, 虽然产生的单空位和双空位较少, 但它们的浓度还是随辐照质子注量增大而增加。

长寿命成分  $\tau_2$  明显随着质子注量的增加而增加, 而其相对强度减小。 $\tau_2$  也与氢气泡尺寸密切相关, 气泡越大, 正电子湮没寿命  $\tau_2$  越大。实验结果表明随辐照注量增加, 注入质子在不锈钢中聚集形成的氢气泡变大, 导致正电子湮没寿命  $\tau_2$  随辐照注量增加而增大, 较大的气泡聚集了较多的质子, 使气泡的浓度(相对强度)随辐照注量增加而变小。

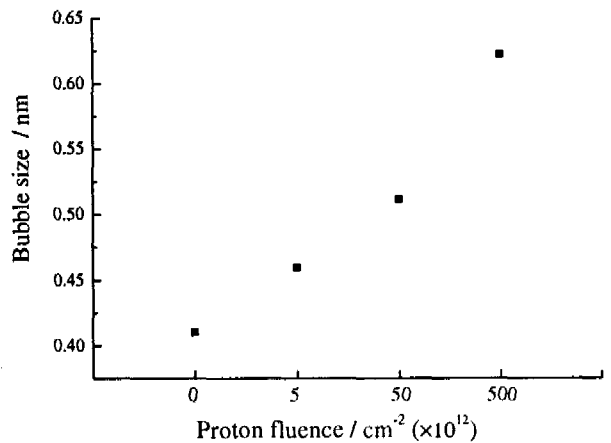


图 3 国产改进型 316L 不锈钢中产生的氢气泡尺寸随质子注量变化

从实验测量的正电子湮没寿命  $\tau_2$  可以计算产

生的氢气泡的尺度<sup>[5]</sup>。图 3 给出了由正电子湮没寿命  $\tau_2$  得到的氢气泡尺寸随辐照质子注量的变化。由图可见, 随质子辐照注量增加氢气泡尺寸迅速变大, 质子注量为  $5 \times 10^{12}$ ,  $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  时对应气泡的尺寸分别为 0.46, 0.51 和 0.62 nm。

采用质子辐照模拟方法, 研究了国产改进型

316L 不锈钢中氢气泡的产生和演化过程。辐照产生氢气泡, 随着辐照质子注量的增加, 气泡尺度增大, 在  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  辐照剂量时, 产生的气泡尺寸为 0.62 nm; 较大的气泡需要聚集更多的注入质子, 产生的氢气泡的相对浓度随辐照质子注量的增加而变小。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵志祥. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集, 北京: 原子能出版社, 2000, 53—69; 219—230.
- [2] Ahmat Polat, Fan Zhiguo, Luo Qi, *et al.* Nuclear Science and Technology, 2000, 11: 52.
- [3] Ziegler J F, Biersack J P. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1995.
- [4] Kansy J. Nucl Instr and Meth, 1996, A374: 235.
- [5] Zhu Shengyun, Zheng Yongnan, Polat Ahmat, *et al.* J Nuclear Materials, 2005, 343: 325.

## Bubble Production and Evolution in Stainless Steel Irradiated by Protons\*

ZHENG Yong-nan, ZHOU Dong-mei, YUAN Da-qing, ZUO Yi, Du En-peng, HU Yue-ming, DUAN Xiao,  
WANG Zhao-hui, LIU Meng, LI Yong, ZHU Sheng-yun  
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The bubble production and evolution in the home-made modified 316L stainless steel have been investigated by the proton irradiation simulation technique and the positron annihilation lifetime measurement. The experimental results of  $5 \times 10^{12}$ ,  $5 \times 10^{13}$  and  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  proton irradiations show that the produced bubble size increases, while the bubble concentration decreases, with the increasing of the irradiation proton fluence. At the proton irradiation fluence of  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^2$  the bubble size reaches 0.62 nm.

**Key words:** home-made modified 316L stainless steel; hydrogen bubble; proton irradiation simulation; positron annihilation lifetime measurement

\* Foundation Item: State Major Basic Research Development Program in China (G1999022600)