

文章编号: 1007-4627(2006)02-0161-03

中子辐照铝的微观结构变化*

赵飞^{1,3}, 万奎贝¹, 万发荣^{1,#}, 周显明²

(1 北京科技大学材料物理与化学系, 北京 100083;

2 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900;

3 贵州大学材料科学与冶金工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 研究了中子辐照后铝的微观结构和力学性能的变化。发现中子辐照使铝的硬度有了一定的提高, 同时在铝的内部产生了大量细小的位错环。

关键词: 中子辐照; 铝; 位错环

中图分类号: TL341 **文献标识码:** A

1 引言

铝是一种很好的核反应堆结构材料, 由于它具有有良好的抗蚀性和塑韧性, 常用在反应堆中对强度要求不高的部分^[1]; 同时, 由于铝具有面心立方晶体结构, 常用来模拟面心立方结构材料的辐照损伤过程, 因此研究铝的辐照缺陷的形成和生长具有重要意义。

2 实验方法

本实验中铝的中子辐照实验是与硅的中子辐照同时进行的。中子辐照时, 纯铝箔(纯度为99.999%)包裹着硅。中子辐照实验在核反应堆中

进行, 辐照剂量为 10^{15} — 10^{16} neutron/cm²。辐照试样取出后, 放置一定时间, 等到放射性降低后再对试样进行分析。利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)和纳米显微力学硬度计对中子辐照后的纯铝试样进行了分析。

将辐照后的铝试样冲成直径为3 mm的圆片, TEM观察试样是通过电解双喷减薄的方式制成的, 双喷电解液为5%高氯酸酒精溶液。

3 结果与讨论

经过中子辐照后的铝箔试样的两个表面呈现不同颜色, 面向硅的一面呈灰色, 面向水的一面呈黑色(如图1所示)。将辐照后的铝箔和没有辐照的

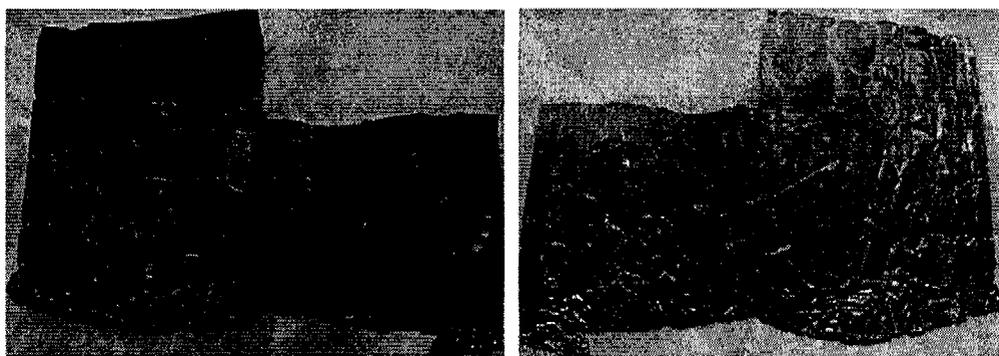


图1 辐照铝箔的表面颜色
(a) 黑面(面向水), (b) 灰面(面向硅)。

收稿日期: 2005-11-20; 修改日期: 2006-01-12

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59971010)

作者简介: 赵飞(1978-), 男(汉族), 贵州遵义人, 博士研究生, 从事核反应堆结构材料的研究。

联系人: 万发荣, E-mail: wanfr@mater.ustb.edu.cn

铝箔都进行硬度测试，测量时，在铝箔的表面取了 3 个不同的点进行测量，然后计算其平均值，所得结果如表 1 所示。从硬度值可以看出，中子辐照后

表 1 铝箔试样的表面硬度

类别	辐照铝箔(灰面)	辐照铝箔(黑面)	未辐照铝箔
硬度/GPa	未测出	3.66×10^{-1}	3.41×10^{-1}

铝箔的两个面中，灰面(面向硅的一面)测不出硬度，黑面(面向水的一面)的硬度值为 3.66×10^{-1} GPa，这可能是因为与硅接触的铝面在辐照过程中，有附着物产生，使表面变得疏松。而所使用的纳米显微硬度计是利用一定位移的压力值来测硬度的。由于表面的不平整，导致测不出硬度。将辐照铝箔黑面的硬度值与未辐照的铝的硬度值进行比较发现，中子辐照使铝箔的硬度有了一定增加，导致硬度增

加的原因可能是辐照使铝内产生一定数量的缺陷，相当于使铝产生了加工硬化，这与文献[2]一致。

图 2 给出了铝箔辐照前后的扫描电镜照片。从图中可以看出，辐照铝与未辐照铝的表面有很大不同，未经过中子辐照的铝表面平整而光滑，中子辐照后铝的两个表面的形貌差别比较大。从图 2(a) 中可以看到灰面上有大量粉末状物质存在，这就是灰面为什么测不出硬度的原因。

由于经过辐照后铝的两个表面呈现出不同的颜色，因此，对铝箔灰面进行了 EDS 能谱分析，结果如图 3 所示。从能谱图中可以看出，灰面(面向硅的一面)主要是铝，没有发现硅的存在，排除了灰面附着硅的可能性。但对灰面形成颗粒状物的原因，仍需进一步研究。

图 4 是经过中子辐照后铝的 TEM 照片。从图中可以看到，中子辐照在铝中产生了大量位错环，

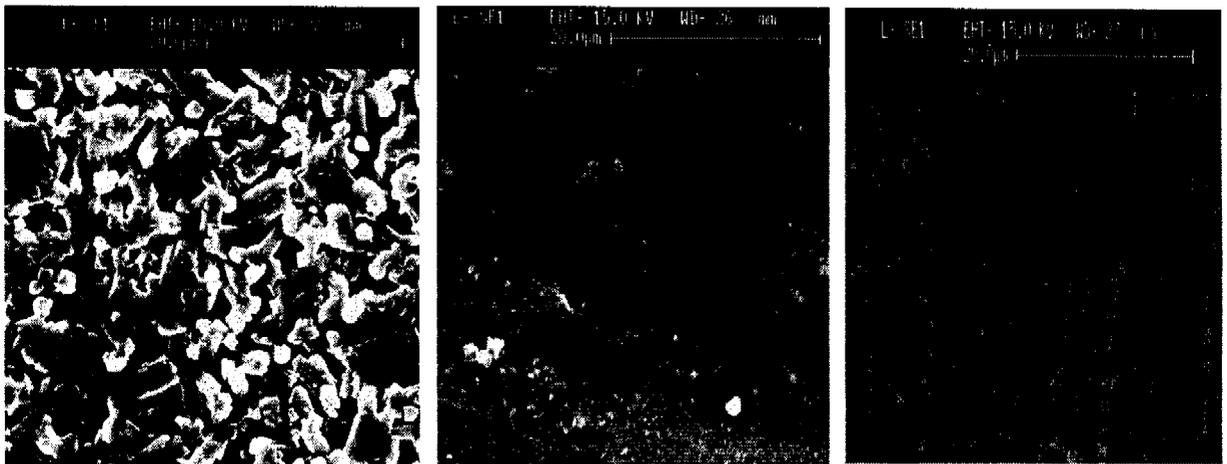


图 2 SEM 照片

(a) 辐照铝箔(灰面)的形貌, (b) 辐照铝箔(黑面)形貌, (c) 未辐照铝箔的形貌。

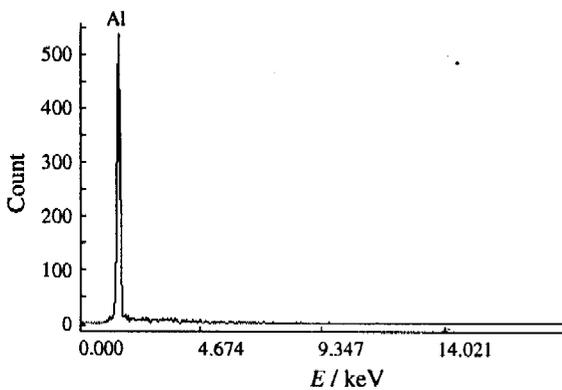


图 3 辐照铝表面的能谱分析图

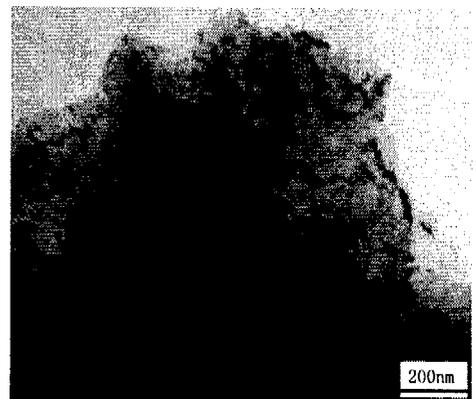


图 4 辐照后铝的透射电镜照片

位错环的平均尺寸小于 20 nm, 位错环的数密度约为 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。这和文献[2]相似, 都能在辐照铝中产生位错环, 但是位错环的数量有很大不同, 相对于文献[2]中产生的位错环要多很多, 相差 3 个数量级。并且所用的辐照剂量要比文献[2]中的低。但是, 在本实验中没有看到有明显空洞存在, 而在文献[2, 3]中发现, 经过中子辐照后铝中都会产生大量的空洞。这可能是本实验中辐照剂量较低的缘故。

由于位错环的强化作用, 使得中子辐照后铝的硬度有了一定提高。这说明即使在中子辐照剂量低

到 10^{16} neutron/cm² 也能在铝中产生大量的晶体缺陷。

4 结论

(1) 在中子辐照量较低 (10^{15} — 10^{16} neutron/cm²) 时, 纯铝中已经形成有大量的辐照缺陷。这些缺陷主要为位错环, 其平均尺寸小于 20 nm, 数密度约为 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。

(2) 上述剂量的中子辐照使铝的硬度得到一定提高。

参考文献:

- [1] Munitz A. J Nucl Mater, 1989, 165: 305.
[2] Packan N H. J Nucl Mater, 1971, 40: 1.

- [3] Packan N H, Braski D N. J Nucl Mater, 1970, 34: 307.

Change of Microstructure in Neutron Irradiated Aluminum*

ZHAO Fei^{1,3}, WAN Kui-bei¹, WAN Fa-rong¹, ZHOU Xian-ming²

(1 Department of Materials Physics and Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2 China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

3 College of Materials Science and Metallurgy Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: The change of microstructure and mechanical property in neutron irradiated aluminum was studied. It is found that neutron irradiation increased the hardness of the aluminum and caused the formation of many small dislocation loops in the aluminum.

Key words: neutron irradiation; aluminum; dislocation loop

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China (59971010)