

不锈钢在 14.6MeV 中子轰击下质子 发射的能谱和角分布*

范扬眉 叶邦角 王忠民 韩荣典 虞孝麒 杜淮江

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

肖 振 喜

(中国科学技术大学管理学院 北京 100086)

1996-02-07 收稿

摘 要

描述了用多路望远镜系统测量不锈钢在快中子辐照下质子发射的双微分截面, 所测量的 16 个反应角的范围为 25° — 165° , 平均角分辨约为 12° . 并由此得到了出射质子的能谱、角分布和总发射截面.

关键词 不锈钢, 双微分截面, 能谱, 快中子.

1 引 言

结构材料在快中子辐照下的带电粒子发射截面测量在聚变堆和裂变堆设计中具有非常重要的地位. 在强快中子辐照下, 结构材料的性能将发生变异, 在材料内部产生氢气泡、氦气泡和剩余放射性, 这将直接影响结构材料的稳定性和使用寿命. 因此, 精确地测定结构材料的带电粒子发射截面具有巨大的经济效益. 此外, 该截面的测量在核数据评价和核模型的检验中亦有很高的价值.

不锈钢是应用在反应堆中最重要的结构材料之一, 虽然它的带电粒子发射截面可由各种成分的相应截面按丰度相加而成, 但目前核数据方面存在着两个问题: 一是不锈钢各种成分的带电粒子发射截面的各家测量值存在着严重的差异; 二是世界各大数据库的评价差异亦较大. 此外, 一些核的实验测量的数据太少, 精度太差. 按同位素丰度相加而成的截面与天然核结果也存在着不自洽^[1]等等. 因此, 直接测量不锈钢的中子核数据尤为重要. 1977 年美国的 R. Haight^[2]等人测量了 316 和 304 型不锈钢在 15MeV 中子能量下的(n, x)截面, 1985 年 Ahmad^[3]等人测量了 316 型不锈钢在中子能量为 9.4MeV 和 11MeV 下的带电粒子发射截面, 但大量的不锈钢中子核数据仍是空白.

* 核工业总公司和中国科学技术大学青年基金资助.

测量(中子,带电粒子)核反应的截面特别是双微分截面的难度较大,首先是反应截面小,因而相应的反应事例数少;其次是本底大,反应产生的 γ 射线和来自靶周围材料的本底等要比真事件大几个数量级,有的高达 10^6 倍^[4].因此,没有一个好的探测器,没有一个理想的本底删除技术和粒子鉴别技术,要想测出(中子,带电粒子)核反应的双微分截面是不可能的.为此,中国科学技术大学的测量小组建立了一个专门用于测量(中子,带电粒子)核反应的双微分截面的多路望远镜系统^[5].该系统能同时测量32个反应角的出射粒子,其中一半用于测量反应谱,一半用于测量本底谱.系统采用三重符合减少本底计数,并用 ΔEE -望远镜和PSD脉冲形状鉴别粒子^[6],用时间飞行谱删除偶然本底等一系列有效的方法和技术.使用厚靶技术^[7],大大地提高了计数率,减少了统计误差,使系统对本底的依赖更加减少,出射粒子谱的高能端也更加可靠.该系统已经成功地用于测量 $^{93}\text{Nb}(n, xp)^{81}$, $^{54}\text{Fe}(n, xp)^{51}$ 和 $^{58}\text{Ni}(n, xp)^{50}$ 等核反应的双微分截面.这里将报道使用该系统首次测量了1Cr18Ni9Ti不锈钢的(n, xp)核反应的双微分截面,在测量精度和减少统计误差方面都有较大的提高.并由双微分截面得到了出射质子的能谱、角分布和总质子发射截面.

2 实验过程

中国科学技术大学的多路望远镜系统详见文献[5],在此仅作一些简单的介绍.

多路望远镜系统由圆柱型多丝正比室和中心能量探测器CsI(Tl)闪烁体组成,圆柱型多丝正比室由内外两层阳极丝和内外两层阴极丝组成,每两根阳极丝中间都有一根隔离丝.外层阳极丝共有32根,内层阳极丝共有16根,与中心探测器组成32路望远镜系统,并构成3路符合系统.靶环在最外面同时又作为阴极面,被测的靶环固定在石墨环上占据16个望远镜,另16个望远镜直接用石墨环来测量本底,因为碳具有较大的负 Q 值(-12.6MeV)和很小的(n, p)核反应截面.

CsI(Tl)晶体厚1mm,直径为25.4mm.选用CsI(Tl)晶体作为能量探测器是因为它对质子的能量响应具有较好的线性;此外,CsI(Tl)晶体具有很好的脉冲分辨特性^[11],可很好地分辨出p、 α 粒子和 γ 射线.

光电倍增管选用GDB50L,测量时使用1900V的高压.多丝正比室系统使用时的气压为100 mbar,丝电压为-740V,工作气体为95%Ar+5%CO₂,采用流气式工作方式.

为了减少本底计数,我们使用20cm的铁屏蔽CsI(Tl)晶体;多丝正比室的上下底板采用钨板覆盖(钨的(n, x)截面很小).此外在电子学硬件上还采用8路线性门和三重符合来进一步减少本底计数.

选用1Cr18Ni9Ti(即321型)不锈钢作为靶,该型号的不锈钢的各元素含量见表1,尺寸为40mm×289mm,厚为0.8mm,足以阻止从靶中出射的最大能量的质子.快中子是由中国科学技术大学的高压倍加器产生的,能量为14.6MeV.整个系统放置在T-Ti靶的前面,靶室中心离中子源的距离为400mm.测量时,中子源的强度控制在约 1.5×10^9 / s,中子通量由伴随 α 粒子方法测量,并由BF₃计数器监测.在本底侧的一个

室中装有一个弱 ^{241}Am α 源, 用以监测系统的能量稳定性. 测量过程中还要监测所有重要信号的单道计数率, 以保证系统在长时间测量过程中的稳定性. 整个系统的累计辐照时间约 40h, 在测量到约一半时间时, 将靶转动 180° , 以消除整个系统可能由于不对称带来的影响. 所测量的总真计数为 84000.

表 1 321 型不锈钢的组成成分

元素成分	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Co	Ti	C	W	P
含量(Wt%)	70.30	18.40	9.20	0.03	1.38	0.48	0.03	0.01	0.10	0.03	0.03

3 数据分析和实验结果

整个实验的数据采集由 CAMAC 系统执行, 在线的计算机控制. 并记录在计算机的磁盘上.

对每个 (n, xp) 核反应, 计算机 CAMAC 系统都将采集和记录 5 个参数, 即质子在外层丝上产生的能量损失 ΔE 信号, 在外层丝上产生的丝地址即反应角信号, 在 CsI (TI) 晶体中产生的能量 E 信号, 在光电倍增管阳极中产生的脉冲形状分辨 PSD 信号以及从外层丝到 CsI (TI) 晶体的飞行时间 TOF 信号^[2]. 所测量的 16 个反应角为 25.0° 、 32.8° 、 43.9° 、 55.0° 、 67.2° 、 77.1° 、 88.3° 、 98.3° 、 108.6° 、 117.9° 、 128.0° 、 136.6° 、 144.3° 、 151.9° 、 157.8° 和 164.5° .

离线数据分析采取以下步骤完成: (1) 用 PSD 谱和 ΔEE - 谱来鉴别粒子并删除不需要的 α 粒子和 γ 射线, 由实验得到的 PSD 谱(见图 1), 可较好地分辨出 p、 α 粒子和 γ 射线; (2) 用 TOF 谱删除偶然符合本底计数; (3) 用反应能谱减去对应丝号本底能谱即可得到厚靶的净能谱; (4) 把厚靶的数据转换成相应的“薄靶”的数据, 具体过程是: 首先把厚靶能谱 $N(\epsilon_p)$ 乘以能量损失率 $d\epsilon_p/dx$, 然后对所得的结果 ϵ_p 进行数值微分即可得到相应“薄靶”的结果. 转换所使用的能区间隔为 1 道即 0.064MeV . 由“薄靶”能谱就可计算得到 16 个反应角的双微分截面, 由于统计误差仍然较大, 出射质子的能区通常选择 1MeV 间隔. 所得到的双微分截面的误差来源于两方面, 一是统计误差, 通常取 1σ ; 二是系统误差, 它由以下几部分组成, 中子通量误差 3.3%、靶高误差 2.0%、数据删除误差 2.0%、 $d\epsilon_p/dx$ 值误差 2.0%、立体角误差 3.0% 和其它可能的误差 3.0%, 总系统误差为 6.2%.

由发射质子的双微分截面可得到角分布, 由于角分布随出射质子的能量变化缓慢, 因而把出射质子的能量分成 3 个区间, 得到了图 2 的结果, 图 2 表明随着出射质子能量的增加, 角分布随角度的不对称性也逐渐增加, 这是由于核反应预平衡过程的结果.

出射质子的角度积分截面可从双微分截面用二阶勒让德拟合得到, 结果见表 2 和图 3, 由图可知, 峰值大约在 3—4MeV 范围内, 且随能量的增加, 截面明显减少, 但从谱的高能端可知仍然有预平衡过程的贡献. 由于不锈钢的成分较多, 而且每一种成分又有若干种同位素组成, 因而要计算出锈钢的双微分截面、角分布和角度积分截面较为困难, 因此测量结果目前还无法同理论计算结果相比较.

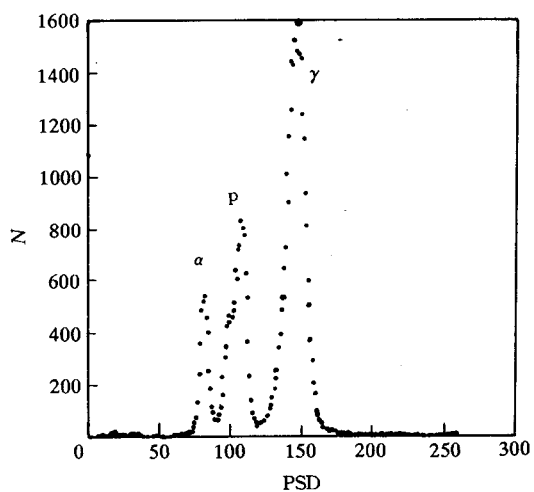


图1 实验测量得到的 PSD 谱

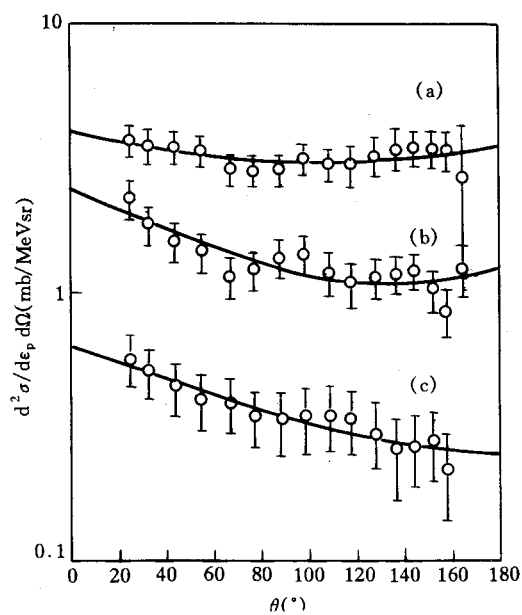
图2 不锈钢(n, xp)核反应出射质子的角分布
角分布按质子能量分为3个区, (a)为2—6MeV, (b)为6—10MeV, (c)为10—14MeV; 实线为二阶勒让德拟合结果.

表2 出射质子的角度积分截面

ϵ_p (MeV)	$d\sigma / d\epsilon_p$ (mb)
2—3	41.6 ± 1.88
3—4	48.1 ± 2.17
4—5	37.5 ± 3.13
5—6	30.9 ± 1.62
6—7	23.0 ± 1.70
7—8	16.4 ± 1.36
8—9	14.7 ± 1.22
9—10	11.0 ± 0.98
10—11	7.6 ± 0.64
11—12	5.0 ± 0.34
12—13	3.3 ± 0.32
13—14	2.2 ± 0.25
14—15	1.4 ± 0.29

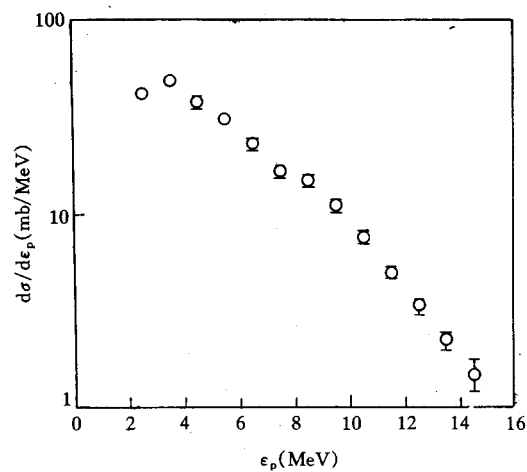


图3 出射质子的角度积分截面

在 $\epsilon_p > 2\text{MeV}$ 时本实验得到的出射质子的总截面为 $(229 \pm 16)\text{mb}$.

参 考 文 献

- [1] 刘廷进, 原子能科学技术, **29**(1995)321.
[2] R. Haight, S. Grimes, J. Anderson, *Nucl. Sci. Eng.*, **63**(1977)200.
[3] M. Ahmad, S. Graham, S. Grimes *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **90**(1985)311.
[4] H. Vonach, *Phys. Appl.*, **6**(1980)59.
[5] 叶邦角、范扬眉、王忠民等, 高能物理与核物理, 18 增刊(1994)13.
[6] Ye Bangjiao, Fan Wei *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **A345**(1994)115.
[7] R. Fischer, M. Uhl, H. Vonach, *Phys. Rev.*, **C37**(1988)578.
[8] Ye Bangjiao, Fan Yangmei *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **117**(1994)67.
[9] Ye Bangjiao, Fan Yangmei *et al.*, *Nucl. Sci. Eng.*, **122**(1996)136.
[10] Ye Bangjiao, Wang Zhongmin *et al.*, Measurement of double differential (n, xp) cross sections of natural nickel in 14.6 MeV neutron energy. *Nucl. Phys. A*, to be published.
[11] 叶邦角、范 为、范扬眉等, 核电子学与探测技术, **14**(1994)129.
[12] 叶邦角、范扬眉、虞孝麒等, 中国科技大学学报, **25**(1995)25.

Energy Spectra and Angular Distributions of Proton Emission for 14.6MeV Neutrons Bombardment of the Stainless Steel

Fan Yangmei Ye Bangjiao Wang Zhongmin
Han Rongdian Yu Xiaoqi Du Huaijiang

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Xiao Zhenxi

(Institute of Management, University of Science and Technology of China, Beijing 100086)

Received 7 February 1996

Abstract

The measurement of the double differential cross sections of protons emitted from the reaction of 14.6 MeV neutron with stainless steel was performed by using the multitelescope system at 16 angles from 25 to 165 deg with angular resolution of 12 deg on an average. The energy spectra, angular distributions and total cross section of proton emission have been obtained.

Key words stainless steel, double-differential cross section, energy spectra, fast neutron.