

15 273-277

中子引起的 α 粒子发射 DDX 数据测量进展*

叶邦角 范扬眉 韩荣典

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

0571.55

摘要 从实验的角度对目前国际上测量中子引起的 α 粒子发射双微分截面的主要研究小组的工作和所使用的两种主要测量谱仪进行了评述, 对现阶段的实验进展以及发展趋势作了探讨.

关键词 核数据 快中子 双微分截面 α 粒子

分类号 O571.55

发射, DDX 数据测

1 引言

快中子引起的 α 粒子发射的核反应对辐射损伤、原子核热产生和生物效应等过程有着重要的影响. 聚变堆材料在高中子辐照下的 (n, α) 反应产生的 α 粒子能量高达 10 MeV 左右, 对某些材料的产额亦很高. 例如, 在 14 MeV 快中子照射下, EHR (Experimental Tokamak Fusion-Fission Hybrid Reactor) 第一壁的氦产生率非常高 (壁材料为 SiC). 这对辐照材料的空洞形成与长大、位错结构、材料脆化等有着重要的影响. 详细的材料辐照性能研究需要 α 粒子的发射双微分截面数据 (DDX).

然而, 实验测量的 (n, α) 反应数据非常缺乏, 已测得的数据也相差较大. 通常的活化法和氦原子收集法都不能给出能谱与角分布, 而直接测量发射 α 粒子的难度很大. 理论计算的结果对能级密度参数和模型选择极为灵敏, 因而带来很大的不确定性. 少数的实验数据与评价结果相比较, 差异也较大. 甚至对 Fe、Cr、Ni 这些结构材料中的主要成分亦如此. 由于实验数据的精确度将直接决定反应堆结构材料的使用寿命, 因此需要新的可靠的 (n, α) 反应 DDX 数据. 为此, 1992 年, 国际原子能委员会 (IAEA) 成立了专门的 (n, α) 数据小组 (CRP) 来协调结构材

料的 (n, α) 反应的实验测量、理论计算和数据评价工作^[1]. 1992 年 10 月, 在 Debrecen 举行了第一次 CRP 会议. 1994 年 11 月, 在北京举行了第二次 CRP 会议. 1995 年 9 月, 在日本仙台举行了第三次会议, 讨论并总结了 (n, α) 反应截面的工作.

在 IAEA 的倡导下, 许多国家的研究小组建立了一些新的实验测量谱仪, 测量了一些新的核数据. 本文主要对近几年来建立的新的谱仪、实验测量状况和发展趋势做一评述.

2 多路望远镜系统

奥地利的 IRK (Institut für Radiumforschung und Kernphysik) 于 1981 年建立了一个多路望远镜系统. 1983 年, 他们对原系统作了改进, 建立了双层的圆柱型多丝正比室. 因而可用三重符合来减少本底. 该系统由外层的 32 根阳极丝、内层的 16 根阳极丝和中心的 CsI(Tl) 能量探测器构成^[2]. 金属样品安装在壁内侧的一半, 同时亦作为阴极. 在中子辐照下, 样品中产生的 (n, α) 反应发射的 α 粒子在外层阳极丝上与内层阳极丝上分别产生 ΔE_1 和 ΔE_2 信号, 然后终止于 CsI(Tl) 并产生 E 信号, 由 $\Delta E_1 - \Delta E_2 - E$ 三重符合筛选反应事例. 每一根外层丝对应于一个反

收稿日期: 1998-11-23, 收修改稿日期: 1999-04-20.

* 中国核数据中心资助项目.

应角, 可同时测量 $25^{\circ} \sim 165^{\circ}$ 的16个反应角. 壁的另一半用于同时测量本底. 该系统可同时获取每一核反应事件的5个参数数据, 即外层丝的 ΔE_1 和丝位置即反应角信号、CsI(Tl)探测器产生脉冲形状分辨(PSD)信号和能量 E 信号、以及外层丝与CsI(Tl)之间的粒子飞行时间信号. 他们用该系统测量了 ^{56}Fe 、 ^{60}Ni 、 ^{50}Cr 、 ^{43}Nb 、 ^{55}Mn 、 ^{53}Co 的 (n, α) 反应的双微分截面. 但该系统已于1989停止工作.

中国科学技术大学研究组在IRK探测器基础上于1992年建立了一套32路望远镜系统, 见图1. 用该探测器测量了 $^{63}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应的双微分截面^[3], 首次采用了 $E-\Delta E$ 、 E -PSD和 ΔE -PSD联合鉴别粒子, 并发展了厚靶技术, 使事件几率大大提高, 因而所得结果统计误差较小, 更具有可靠性.

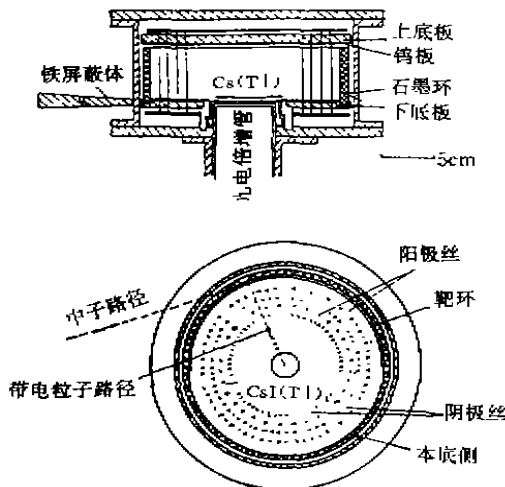


图1 中国科技大学的32路望远镜系统

美国的 LANL (Los Alamos National Laboratory)、NIST (National Institute of Standards and Technology)与奥地利的 IRK 联合研究组建立了一个宽范围的 α 谱仪^[4]. 结合散裂中子源 LAMPE/WNR, 可测量直至100 MeV 准直中子的 (n, α) 反应的双微分截面^[5]. 该谱仪实际上是四路 $\Delta E-E$ 计数望远镜系统, 由低气压正比 ΔE 计数器和Si (500 μm 厚, 450 mm^2)能量探测器组成, 可

测量 30° 、 60° 、 90° 和 135° 的4个反应角度上的产物(见图2). 正比计数器工作在1~3 kPa的气压, 采用Ar或Xe+10% CO_2 气体, 可探测出射 α 粒子的能量低至1.3 MeV. 因此

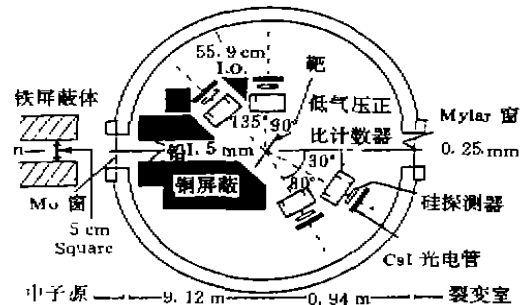


图2 美国 LANL、NIST 和奥地利 IRK 联合研究组的4路望远镜系统

可用于测量轻元素如碳的 (n, α) 反应. 该谱仪在用薄靶时, 靶的厚度约从0.1到几十 mg/cm^2 , 采用 $\Delta E-E$ 和 $\Delta E_1-\Delta E_2-E$ 分辨粒子; 此时测得中子能量最大为30 MeV. 若采用厚靶则靶本身就是晶体, 如 CaF_2 、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 、 $\text{KI}(\text{Tl})$ 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$, 靶厚可达1~2 cm. 通常用脉冲形状分辨粒子, 此时可测中子能量达100 MeV. 该谱仪最大的特点是同时采用了中子飞行时间谱仪, 这样就可同时测量以不同能量入射的中子所发生的核反应. 已经测量了 $^{12}\text{C}(n, \alpha)$ 、 $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)$ 和 $^{59}\text{Co}(n, \alpha)$ 反应的双微分截面等.

此外, 日本东北大学也正在研制一个类似的谱仪^[6], 用于测量几十 MeV 能量的 (n, α) 反应.

比利时 Geel 也发展了一个多路望远镜系统用于测量 (n, α) 反应, 可测量5~14 MeV 能区的结构材料的 (n, α) 反应 DDX 数据.

3 栅极电离室

日本东北大学研制了基于栅极电离室 GIC 的大立体角谱仪^[7]. 样品放置在中心阴

极板上, 用准直中子源照射, 探测 α 粒子的立体角几乎达 4π 立体角. 从样品发射的粒子经气体计数器后到达栅极, 由一个3参数数据获取系统获取阳极信号 P_n 和阴极信号 P_c . 由两个信号之间的关系

$$P_n = E \left(1 - \sigma \frac{\bar{x}}{d} \cos\theta \right),$$

$$P_c = E \left(1 - \frac{\bar{x}}{d} \cos\theta \right)$$

可确定 α 粒子的能量 E 和发射角 θ . 上式中 σ 为栅极无效效率(5.9%), d 为阴极与栅极距离(2.5 cm), \bar{x} 为阴极至粒子电离径迹中心的距离.

系统采用 Kr+(3%~5%)CH₄混合气, 可调整气压来选择最合适的 α 粒子发射能量. 粒子的分辨由阴极和阳极的二维谱给出. 因该谱仪具有高的探测效率、低本底产生率和安装样品方便等特性而可获得高效的 DDX 数据, 已用于测量中子能量从阈值至14 MeV 的⁶³Ni、⁶⁸Ni、Cu 和⁵⁰Cr 的(n, α)反应的 DDX 数据. 由于高的探测效率, GIC 可使用较薄的样品(可薄至0.4 μ m), GIC 的能量分辨可达1.5%, 因而可以测量剩余核的激发态 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_i (i \geq 2)$, 如可测量⁵⁵Fe 的基态和激发态. 为了提高谱仪的阻止本领, 通常室中气体的气压可高达1.2 MPa. 尽管如此, 由于受计数器阻止本领的限制, 该谱仪还不能用于测量破裂反应和中子能量 $E(n) > 20$ MeV 的反应.

美国的 LANL、奥地利的 IRK 和俄罗斯的 IPPE (Institute of Physics and Power Engineering) 联合研究组也建立了一台用于测量(n, α)反应的 DDX 数据的 GIC 谱仪^[5]. 该探测器使用5.6 kV 的负高压, 使用 Xe+3%CO+5%CH₄的混合气体可测量 α 粒子能量至9 MeV. 用该探测器测量了中子能量从3.5到6.8 MeV 的⁵⁸Ni(n, α)核反应出射 α 粒子的能谱和角分布.

我国北京大学与俄罗斯 Dubna 联合核子

所合作, 用 GIC 测量了中子能量为4~7 MeV 的⁴⁰Ca(n, α)和⁵⁸Ni(n, α)反应的 DDX 数据.

4 评述和发展趋势

最近几年, 测量(n, α)核反应的实验测量技术有了较大的发展, 特别是出现了两种各具特色的新型探测器——多路望远镜系统和栅极电离室, 已经完成了一些重要核素的(n, α)核反应数据测量, 但就数量和精度而言, 离用户的需求还有较大的差距.

奥地利的 IRK 和中国科学技术大学的多路望远镜系统可以同时测量反应谱和本底谱, 可以同时在全方位上进行测量, 因而不仅有效地减少系统误差, 而且能得到较好的角分布. 他们发展的厚靶技术使测量的实验数据有着数量级的增加, 因而统计误差亦大大减少. 特别是中国科学技术大学所采用的三重二维粒子分辨技术, 在粒子的分辨上独树一帜. 但是由于要采用大面积的靶材料, 这对测量同位素靶(通常极为昂贵)是一个极大的限制. 此外该探测器的探测的立体角也较小. 日本核数据中心的研究者曾建议, 在不同的丝(即不同反应角)所对应的室处采用不同的靶材料, 因而可一次测量多达十六种核反应, 然后通过转动系统获得所需的各种反应角数据.

栅极电离室的特出优点是探测器具有几乎 4π 的探测立体角和较低的本底产生率, 而且系统使用较小的靶材料、系统简单和使用安装方便等使之受到较多使用者的欢迎. 但其缺点是受电离室气压的限制而不能测量较高能量的 α 粒子.

随着核数据的需求往高能方向发展, 目前实验工作者的当务之急是研究和发新型高效的带电粒子探测器. 美国和奥地利的联合研究组研制的宽范围 α 谱仪, 已经成功地测量了能量高达100 MeV 中子引起的(n, α)核反应的微分截面数据, 结合 TOF 技术, 可以应用于非单能中子源, 这是一个极大的进步.

作为总结,表I给出了目前国际上各研究小组从事的(n, α)核反应的谱仪,已测的核素,将进行的工作等.目前世界各研究组在(n, α)核反应 DDX 数据实验测量方面的主要趋势是:

(1) 所测的核素开始由结构材料转向轻核,如 Be、C、N、O、Si 等,这是因为目前轻核的(n, α)核反应 DDX 数据较少,大部分是空白.此外理论计算急需轻核的(n, α)核反应 DDX 数据来选择和检验模型.

(2) 所测的中子能量开始转向高能区域,如30~100 MeV 能区,甚至到 GeV 量级.这是因为高能中子引起的 α 发射的 DDX 数据

还是空白,另外一个重要原因是随着洁净能源在美、日和欧洲被列入计划,GeV 量级的高能质子产生的高能散裂中子的相关数据变得重要.此外,空间技术也需要高能中子引起的 α 发射的 DDX 数据.

(3) 由于多路望远镜系统在高能中子区域比 GIC 具有更好的性能,因而世界主要研究组,如美国的 LANL 和日本的东北大学均发展多路望远镜系统作为测量高能中子产生的 α 发射的 DDX 数据.特别地,配以中子飞行时间谱仪(TOF),可以同时测量各种中子能量的(n, α)核反应 DDX 数据.

表I 国际上各研究小组的谱仪和进行的工作比较

研究小组	已测核素	$E(n)/\text{MeV}$	探测系统	$\theta/(\circ)$	计划测量的核素
美国的 LANL、NIST 与奥地利 IRK 联合研究组	^{10}B ^{16}O ^{27}Al ^{51}V ^{56}Fe ^{59}Co	阈能30	多路望远镜	30 60 90 120	Si ^{16}O ^{89}Y ^{83}Nb Ta
俄罗斯的 FEI 与奥地利 IRK 联合研究组	^{52}Cr ^{56}Fe ^{58}Ni	阈能7	GIC		
日本东北大学与日本原子能研究院联合研究组	^{56}Fe ^{58}Ni ^{52}Cr ^{12}C	阈能14	GIC 多路望远镜	30 60 90	^{52}Cr C N Al O Si structural element
比利时 IRMM 与 Geel 联合研究组	^{27}Al ^{58}Ni	阈能15	多路望远镜	14 51 79 109 141	
北京大学	^{58}Ni	5.1	GIC		
中国科学技术大学	^{58}Ni	14.6	多路望远镜	从25~165 的16个角	Be 等轻核*

* 与中国原子能研究院联合测量.

参 考 文 献

- 1 Vonach H, Chiba S, Pashchenko A. Report on the IAEA Coordinated Research Program on Improvements of Measurements, Theoretical Computations and Evaluations of Neutron Induced Helium Production Cross Sections. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 925~928
- 2 Traxler G, Fischer R, Vonach H. A Multiwire Proportional Chamber for the Measurement of Differential (n, Charged Particle) Cross Section. Nucl Instr Methods, 1983, 217, 121~127
- 3 Ye B J, Han R D, Wang Z M *et al.* Measurement of Alpha-particles Emitted from Interaction of 14.6 MeV Neutrons with Elemental Nickel. J Nucl Sci Tech, 1998, 35, 1~5
- 4 Sterbenz S M, Bateman F B, Lee T M *et al.* The ^{56}Fe (n, α) Reaction from Threshold to 30 MeV. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 314~317
- 5 Haight R C, Lee T M, Sterbenz S M *et al.* Neutron-induced Charged-particle Emission Studies below 100 MeV

- at WNR. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 154~156
- 6 Nauchi Y, Baba M, Matsuyama S *et al.* Development of Wide Range Charged Particle Spectrometer for Ten's MeV Neutron. JAERI-Conf, 1996, 96~008, 152~154
- 7 Ito N, Baba M, Matsuyama S *et al.* Large Solid Angle Spectrometer for the Measurements of Differential (n , Charged-particle) Cross Sections. Nucl Instr Methods, 1994, A337, 474~485
- 8 Goverdovski A A, Khryachkov V A, Ketterov V V *et al.* (n , α) Reaction Studies Using a Gridded Ionization Chamber. Pro Int Conf on Nucl Data for Sci Tech, Gatlinburg, 1994, 117~123

Progress on Measurement of DDX of α -particles Emission Induced by Neutrons

Ye Bangjiao Fan Yangmei Han Rongdian

(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract The main experimental groups in the world for measuring double-differential cross sections (DDX) of α -particles emission induced by neutron and two kinds of main spectrometers used are reviewed in the point of experimental view. Progress on experimental measurement of DDX in present stage is compared and development trend in future is discussed.

Key words nuclear data fast neutron double-differential cross section α -particle

Classifying number O571.55

(上接第272页)

Accelerator-driven Transmutation Technologies and Applications

—A popular topic on development of nuclear energy

Guo Junsheng

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract The existing nuclear power system has many problems, such as low utilization ratio of natural resources, output of long life radioactive nuclear wastes and safety of operation etc. The transmutation technology by using accelerator-driven sub-critical reactor can generate not only 'clean' nuclear power, but also can transmute nuclear wastes and proliferate and produce nuclear fuels. It will be a direction to develop new nuclear power.

Key words accelerator sub-critical reactor transmutation clean nuclear power

Classifying number TL43