

T(d,n)⁴He 强流中子发生器的中子能谱和角分布模拟计算

岳伟明, 姚泽恩*, 杜洪新, 谭新建, 罗 鹏, 王学智

(兰州大学 核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:采用将厚靶分割成薄靶的方法对厚氟钛靶、260 keV 氘束流能量条件下 T(d, n)⁴He 反应中子源的能谱和角分布进行计算。以分割法计算得到的能谱和角分布数据为基础,建立了 D-T 中子源 Monte-Carlo 模拟抽样模型,在考虑中子发生器各元件材料及实验大厅墙壁对快中子的慢化、散射和吸收的条件下,采用 MCNP 程序对兰州大学 $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 强流中子发生器 260 keV 氘束流能量下的中子能谱和角分布进行了模拟,给出了模拟结果。为检验模拟结果的可靠性,与实验测量能谱进行了比较, Monte-Carlo 模拟谱和实验测量谱基本符合。

关键词:强流中子发生器;中子能谱;中子角分布;MCNP 模拟

中图分类号:O571.53

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)12-1073-04

Simulation Calculation of Neutron Energy Spectrum and Angular Distribution for T(d,n)⁴He Intense Neutron Generator

YUE Wei-ming, YAO Ze-en*, DU Hong-xin, TAN Xin-jian, LUO Peng, WANG Xue-zhi

(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Neutron energy spectrum and angular distribution were computed for T(d, n)⁴He reaction neutron source with 260 keV deuteron beam and TiTi_{1.5} thick target. The data were applied to simulate the neutron energy spectrum and angular distribution of Lanzhou University $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ intense neutron generator with 260 keV deuteron beam using MCNP. The interactions of neutron and the materials of neutron generator and laboratory wall were included in this MCNP simulation. The simulation results on the neutron energy spectrum and angular distribution of Lanzhou University $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ intense neutron generator with 260 keV deuteron beam were presented. Moreover, the simulation neutron energy spectrum was compared with the experimental neutron energy spectrum for verifying the reliability of Monte-Carlo simulation results.

Key words: intense neutron generator; neutron energy spectrum; neutron angular distribution; MCNP simulation

收稿日期:2007-08-06;修回日期:2007-09-25

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(ZS001-A25-005-Z);国家经贸委高技术开发资助项目(96BK-474)

作者简介:岳伟明(1982—),男,河北邢台人,硕士研究生,粒子物理与原子核物理专业

* 通信作者:姚泽恩, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn

氘氚(D-T)反应强流中子发生器中子源被广泛应用于中子核数据测量(如活化截面测量、积分实验等)、半导体抗辐射加固、活化分析、中子照相、中子辐照育种等方面^[1-4]。这些研究常需要中子源的能谱和角分布数据。对 D-T 反应中子发生器,由于结构材料对中子的慢化和散射,其中子能谱不仅依赖于氘束能量,且与氘靶系统的结构、中子实验大厅及中子发生器各元件的布局相关。得到中子发生器现实的中子能谱和角分布最直接的办法是进行多点实验测量,但由于中子测量困难,实验多点测量是一项十分繁杂的工作,很多实验室只测量了某些特殊角度和位置的中子能谱^[5]。

本工作利用分割法计算得到的厚氘钛靶条件下 D-T 反应中子源能谱和角分布的计算数据^[6],结合大面积旋转靶结构、束流的状态、中子实验大厅及中子发生器各结构材料的布局等,对兰州大学 $3\times10^{12}\text{ s}^{-1}$ 强流中子发生器 D-T 反应的中子能谱和角分布进行 Monte-Carlo 模拟,并将模拟结果与一特定点测量的中子能谱的实验数据进行比较。

1 厚氘钛靶 D-T 反应中子源的能谱和角分布模拟

D-T 反应强流中子发生器一般采用大面积高速旋转厚氘钛靶。采用将厚氘钛靶分割成许多层薄靶的办法,对厚氘钛靶条件下 D-T 中子源的能谱和角分布的计算方法进行了研究,并发展了 1 套计算机程序,能用以计算 1 000 keV 氘束能量以下的厚氘钛靶 D-T 反应中子发生器的中子能谱和角分布,详细的计算方法和结果参见文献^[6]。图 1、2 分别示出了用该程序计算得到的 260 keV 氘束流能量、厚氘钛靶条件下的中子能谱和角分布。

2 强流中子发生器中子能谱和角分布的 Monte-Carlo 模拟

所给出的用分割法得到的中子能谱和角分布是理想条件下的数据,即将 D-T 中子看成一个点源,且未考虑实验大厅和结构材料对中子的慢化和散射等。本工作利用 MCNP 程序,考虑了中子发生器的氘束流靶点为一个 $\phi 20\text{ mm}$

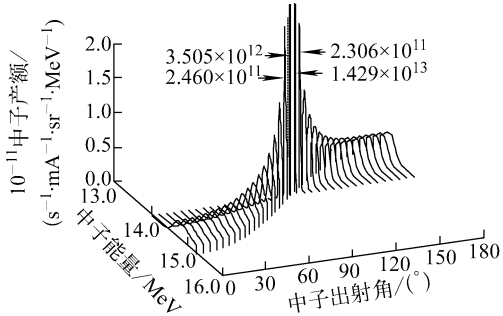


图 1 分割法得到的 260 keV 氘束能量下 TiT_{1.5} 厚靶 D-T 反应的中子能谱
Fig. 1 Neutron energy spectra of D-T reaction with 260 keV incident deuteron energy in TiT_{1.5} thick target
图中数值为相应箭头所指峰的峰值

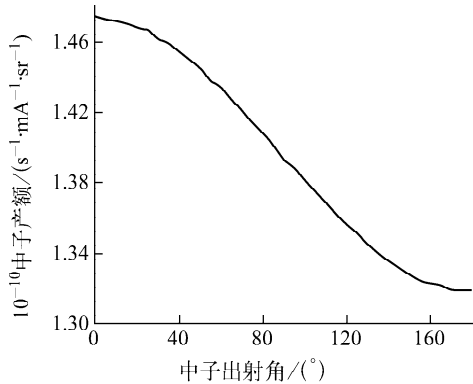


图 2 用分割法计算得到的 260 keV 氘束能量下 TiT_{1.5} 厚靶 D-T 反应的中子角分布
Fig. 2 Neutron angular distribution of D-T reaction with 260 keV incident deuteron energy in TiT_{1.5} thick target

的平面、中子发生器结构材料和实验室墙壁对中子的慢化和散射等,对兰州大学强流中子发生器的中子能谱和角分布进行 Monte-Carlo 模拟。模拟条件为:中子发生器氘束能量,260 keV;氘束靶点直径,20 mm。将图 1 中的中子能谱数据输入 MCNP 程序,以控制中子能量的抽样。将图 2 中角分布转换成中子角产额数据,输入 MCNP 程序,以控制中子出射角的抽样。中子角分布可通过下式转换成角产额数据:

$$dY/d\theta = 2\pi\sin\theta dY/d\Omega \tag{1}$$

其中: $dY/d\theta$ 为中子角产额; θ 为中子出射角; $dY/d\Omega$ 为中子角分布。

根据兰州大学中子发生器的结构和中子大厅的实际布局,对 MCNP 模拟中的几何和材料进行了如图 3 所示的输入。其中,大面积旋转氚靶直径为 33 cm,靶托由 0.15 cm 厚铜、0.15 cm 厚冷却水层和 0.15 cm 厚不锈钢板组成,靶前管道周围为 1 cm 厚有机玻璃组成的冷却水回流箱,外形尺寸为 50 cm×50 cm×30 cm。靶前 5 cm 处为 D⁺束流准直器(主要成分为 Cu),靶前 100 cm 处为 D⁺束流聚焦用三重四级透镜(主要成分为 Fe 和 Cu),靶后-45°方向 20 cm 处为中子产额监测望远镜系统的准直屏蔽体(由 Fe 和 Cu 组成);中子大厅长 10 m、宽 7 m、高 5.9 m,大厅墙壁为 2 m 厚混凝土(密度为 2.34 g/cm³,主要成分为 C、H、O、Si 和 Ca)。

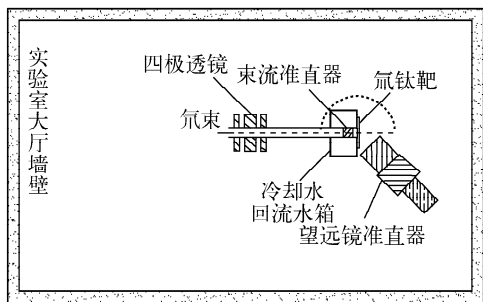


图 3 强流中子发生器实验大厅示意图
Fig. 3 Scheme of intense neutron generator hall

在 MCNP 模拟中,为记录不同角度的中子能谱和中子产额(角分布数据),在以 D⁺束流靶点中心为圆心、半径 40 cm 的水平面圆周上,每隔 5°设置 1 个测点,用探测器记录中子能谱和中子产额。MCNP 模拟得到的中子能谱和角分布数据如图 4、5 所示。模拟跟踪了 10⁷ 个中子,所有结果的标准差均小于 0.05。

3 模拟结果与实验数据的比较

在 3×10¹² s⁻¹强流中子发生器建成初期,采用核乳胶探测器在 30°方向、距靶点 20 cm 处对中子能谱进行了实验测量,结果参见文献[5]。为验证模拟数据的可靠性,对距靶点 20 cm 处 30°方向的中子能谱进行 Monte-Carlo 模拟,并与此位置的实验测量能谱数据进行了比较(图 6)。

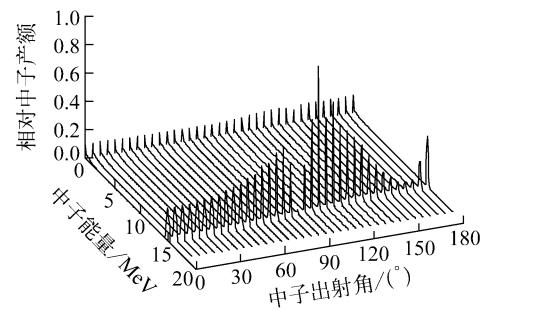


图 4 260 keV 氚束能量下 D-T 反应强流中子发生器的中子能谱
Fig. 4 Neutron energy spectra of D-T intense neutron generator with 260 keV deuteron beam energy

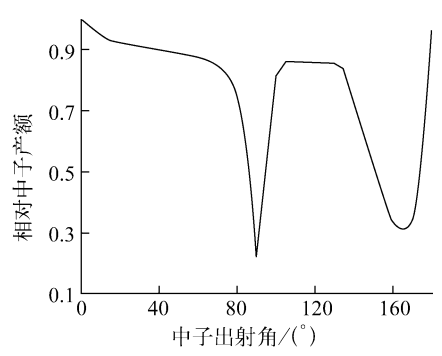


图 5 260 keV 氚束能量下 D-T 反应强流中子发生器的中子角分布
Fig. 5 Neutron angular distribution of D-T intense neutron generator with 260 keV deuteron beam energy

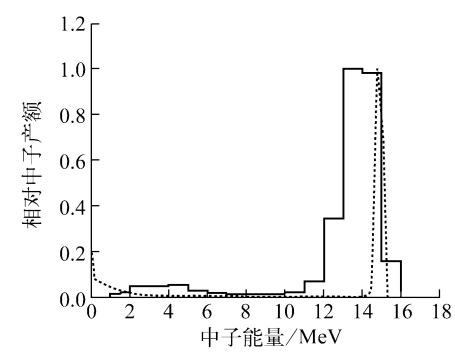


图 6 中子能谱模拟结果与实验测量结果^[5]比较
Fig. 6 Comparison of MCNP simulated neutron spectrum with measured neutron spectrum^[5]
虚线——模拟结果;实线——实验结果

4 结果及讨论

根据文献[6]给出的方法,对厚氚靶、260 keV 氚束流能量条件下 D-T 中子源的能谱和角分布进行了计算,以厚靶分割法计算得到

的能谱和角分布数据为基础,建立了 D-T 中子源 Monte-Carlo 模拟抽样模型,在考虑中子发生器各元件材料及实验大厅墙壁对快中子的慢化、散射和吸收的条件下,用 MCNP 程序对兰州大学 $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 强流中子发生器 260 keV 氘束流能量下的中子能谱和角分布进行了模拟,给出了模拟结果。从图 1、4 中的中子能谱数据及图 2、5 中的角分布数据比较可看出,由于中子发生器各元件材料及实验大厅墙壁对快中子的慢化、散射和吸收,D-T 反应中子发生器实际的中子能谱、角分布与理想条件下(不考虑慢化、散射和吸收)的中子能谱、角分布有较大差异。图 4 中的能谱数据中出现的低能中子峰主要是实验室结构材料对中子的慢化、散射所致; 90° 方向中子能谱的快中子峰急剧下降的主要原因是 90° 方向出射的快中子穿越了厚度为 25 cm 由有机玻璃制成的靶冷却水回流水箱壁,快中子被强烈慢化、散射和吸收; 140° 到 175° 方向范围内的中子能谱的快中子峰也有不同程度的下降,原因是从这些角度出射的快中子穿越了厚度约为 10 cm 铜制氘束流准直器。图 5 所示的角分布数据中, 90° 附近及 140° 到 175° 范围的相对中子产额明显下降,这也是由靶冷却水回流水箱壁和铜制氘束流准直器对快中子的慢化、散射和吸收造成的。

为验证模拟数据的可靠性,采用同样方法对距靶点 20 cm 处 30° 方向的中子能谱进行了 Monte-Carlo 模拟,并与此位置的核乳胶法实验测量能谱数据进行了比较(图 6)。在核乳胶法测量能谱的过程中,由于反冲质子径迹的起始端的银颗粒很稀疏,通常会造成反冲质子径迹的测量失误,这种失误会导致部分中子的能量测量值偏低约 0.8 MeV;另外,核乳胶本身的能量分辨率约为 8%,即造成的约 14 MeV 的快中子能谱的线状谱展宽约为 1.12 MeV,两项测量误差引起的快中子实验测量能谱向低能区的展宽量约为 1.4 MeV,向高能区的展宽量约为 0.6 MeV^[5]。另外,图 6 中的实验能谱在 2~6 MeV 能区有一小包峰,这部分中子主要来自于氘氘反应中子和 14 MeV 快中子的慢化和散射, Monte-Carlo 模拟谱未考虑来自于氘氘反应的中子; Monte-Carlo 模拟谱具有结构

材料慢化快中子所形成的明显的低能中子峰,核乳胶法未测量低能中子。考虑以上因素, Monte-Carlo 模拟谱和实验测量结果基本符合。

参考文献:

- [1] SU Tongling, SUN Biehe, YANG Baotai, et al. An intense 14 MeV neutron source[J]. Nucl Instrum Methods, 1990, A287: 452.
- [2] 孔祥忠,王永昌,袁俊谦,等. 14 MeV 快中子反应截面测量的进展[J]. 原子能科学技术, 1995, 29(4): 316-317.
KONG Xiangzhong, WANG Yongchang, YUAN Junqian, et al. Progress of the cross section measurement for 14 MeV fast neutron reactions [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1995, 29(4): 316-317(in Chinese).
- [3] 苏桐龄. 强流中子发生器及其应用[J]. 核技术, 1989, 12(8-9): 553-556.
SU Tongling. Intense neutron generator and its applications[J]. Nuclear Techniques, 1989, 12(8-9): 553-556(in Chinese).
- [4] 姚泽恩,苏桐龄,姜汭雯. 多元合成法研究中子源能谱等效的尝试[J]. 核技术, 1992, 15(12): 731-734.
YAO Zeen, SU Tongling, JIANG Bianying. A preliminary study of an arbitrary neutron spectrum equivalence by multisource synthesis [J]. Nuclear Techniques, 1992, 15(12): 731-734 (in Chinese).
- [5] 苟全朴,王学智. $3.3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 强流中子发生器中子能谱测量[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1991, 27(2): 185-187.
GOU Quanbu, WANG Xuezh. Neutron spectra measurement for $3.3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ intense neutron generator[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 1991, 27(2): 185-187(in Chinese).
- [6] 姚泽恩,岳伟明,罗鹏,等. 厚靶 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应加速器中子源的中子产额、能谱和角分布[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(5): 400-403.
YAO Zeen, YUE Weiming, LUO Peng, et al. Neutron yields, energy spectrum and angular distribution of accelerator-based $T(d, n)^4\text{He}$ reaction neutron source for thick target[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(5): 400-403(in Chinese).