

文章编号: 1007-4627(2010)04-0455-04

一种用于 DT 聚变诊断的新型中子谱仪的设计*

周林, 蒋世伦, 祁建敏

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:介绍了一种基于反冲质子法和磁分析技术的新型 DT 聚变中子谱仪, 能够以高信噪比对 9—17 MeV 的中子能谱进行精确测量, 适用于稳态及脉冲条件下的等离子体温度 (T_i) 和燃料面密度 ($\langle \rho R \rangle$) 的诊断, 对 14 MeV 的初级 DT 中子具有约 4% 的能量分辨率和约 10^{-8} 的探测效率。谱仪的磁分析系统使用高性能钕铁硼二极永磁铁建造, 焦平面上使用 CR-39 固体径迹探测器测量反冲质子的位置分布。使用 ^{239}Pu α 源对磁分析系统进行了实验研究, 并建立了配套的粒子输运模拟程序。结合实验和程序模拟结果, 使用蒙特卡罗软件模拟分析了谱仪整体性能。谱仪结构紧凑、性能良好且适用于稳态及脉冲辐射场, 可望在未来的聚变研究中得到有效应用。

关键词: 中子能谱; 磁质子反冲; 磁分析系统; 蒙特卡罗

中图分类号: O536

文献标识码: A

1 引言

燃料面密度 ($\langle \rho R \rangle$) 和等离子体温度 (T_i) 是聚变反应的两项基础参数, 相关的诊断技术一直是聚变研究中的重要课题。通过测量初级 DT 中子 (~ 14 MeV) 的多普勒展宽及其散射中子 (10—13 MeV) 份额计算 T_i 和 $\langle \rho R \rangle$, 是一种不依赖于聚变模型的诊断方法^[1]。近年来, 随着聚变研究的发展, 国内外出现了一系列具有较高性能的中子能谱测量仪器。例如: 金刚石探测器、反冲质子谱仪、液体闪烁体探测器和飞行时间谱仪等, 对 14 MeV 的 DT 中子可以实现很高的能量分辨率 (约 2%—4%^[2])。然而, 在脉冲辐射场诊断中, 需要在极短的时间内 (ns 至 ~ 100 ns 量级) 测量高通量 (10^{16} 以上) 的中子, 且受实验空间和 neutron 产额等的限制, 往往需要进行近距离测量, 上述的中子谱仪无法满足使用要求。为此, 我们设计了一种基于反冲质子法和磁分析技术的新型中子能谱测量仪器——磁质子反冲 (magnetic proton recoil, 简称 MPR) 谱仪, 通过使用磁分析系统对 n-p 转换靶产生的反冲质子进行动量分析, 实现稳态和脉冲条件下 DT 中子能谱的精确测量。类似的谱仪已在 JET 和 OMEGA 装置上得到有效的应用^[3-7]。由于有高分辨率、高信噪比、宽动态范

围及较高的探测效率等突出优点, 该谱仪的出现被认为是近十几年来中子诊断领域最大的进步^[8]。

谱仪能够测量能量在 9—17 MeV 范围内的中子, 对 14 MeV 的 DT 初级中子具有约 4% 的能量分辨率和约 10^{-8} 的探测效率, 其核心部件——磁分析系统使用高性能钕铁硼二极永磁铁建造, 目前已完成了系统的组装和实验标定, 并建立了配套的模拟程序。在谱仪设计的初始阶段使用具有高位置分辨和本地免疫能力的 CR-39 固体径迹探测器测量反冲质子的位置分布, 最终将使用 PIN 半导体探测器阵列进行实时测量。

2 设计原理

准直中子束与聚乙烯薄靶作用产生反冲质子, 对于入射中子数 N_n , Ω 方向 $\Delta\Omega$ 立体角内产生的反冲质子数 N_p 为

$$N_p = N_n \frac{2N_A \rho d}{A} \int_{\Delta\Omega} \frac{d\sigma_s(\Omega)}{d\Omega_{\text{lab}}} d\Omega_{\text{lab}}, \quad (1)$$

其中, N_A 为阿伏伽德罗常数, A 为 CH_2 的分子量, ρ 为转换靶密度, d 为靶厚度, $d\sigma_s(\Omega)/d\Omega_{\text{lab}}$ 为实验室坐标系内 n-p 反应的微分截面。入射中子能量 E_n 、反冲质子能量 E_p 和反冲角 ϕ 存在如下关系:

* 收稿日期: 2010-03-11; 修改日期: 2010-03-29

* 基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目 (2008B0103003)

作者简介: 周林 (1986—), 男 (汉族), 云南泸西人, 硕士研究生, 从事聚变中子能谱测量研究; E-mail: zhoulin2003@gmail.com

$$E_p = E_n \cos^2 \phi . \quad (2)$$

由于反冲角偏差和质子在转化靶内的能量损失, 实际到达角度 ϕ 处 $\Delta\Omega$ 立体角内的质子能量为

$$E_p = E_n \cos^2(\phi + \Delta\phi) - \int_0^s \frac{dE(E_p)}{dx} dx , \quad (3)$$

其中, $\Delta\phi$ 为反冲角偏差, s 为质子在靶中的径迹长度, $dE(E_p)/dx$ 为转化靶对质子的阻止本领。令 $\Delta\phi$ 引起的反冲质子能量展宽为 ΔE_k , 转化靶引起的展宽为 ΔE_f 。随着反冲角的减小, 聚乙烯靶阻止本领降低, ΔE_f 减小, 而在 $45^\circ-0^\circ$ 范围内 ΔE_k 随角度的减小而减小, 且 n-p 反应的微分截面随反冲角的减小而增加^[9], 因而选择较小的反冲角可提高 MPR 谱仪的能量分辨率和探测效率 (N_p/N_n)。然而, 受实验空间的制约, 实用的中子谱仪必须尽可能紧凑, 分析磁铁的体积不能过于庞大。为满足紧凑型的要求, 谱仪的设计采用 45° 的反冲角, 使用钕铁硼二极永磁铁作为分析磁铁, 在此条件下寻求最大探测效率和最佳能量分辨率。

3 磁分析系统

磁分析系统是 MPR 谱仪的核心组成部分, 其性能对整个谱仪起着重要作用。系统使用钕铁硼二极永磁铁作为分析磁铁、针对 45° 反冲角方向、能量在 7 MeV 附近的反冲质子进行动量分析, 其结构如图 1 所示。粒子入射角为 9° , 参考粒子 (7 MeV) 出射角为 -44° , 偏转角为 45.3° , 4 和 8 MeV 质子的偏转角分别为 53.0° 和 43.6° 。较大的负出射角和均匀二极磁场为粒子束提供了很好的横向聚焦 ($\langle x|\theta \geq 0 \rangle$), 参考设置下焦点处 7 MeV 质子的横向放大倍数约为 0.8。

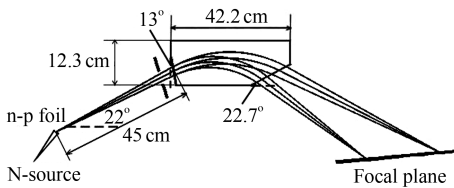


图 1 磁分析系统结构

实际加工的磁铁重约 200 kg, 磁极间隙 3 cm, 均匀场区磁场强度为 0.792 T, 不均匀度小于 5%。系统处于真空状态, 使用两级光阑调节等效靶面积 A_f 和反冲质子立体角 $\Delta\Omega_p$, 焦平面上使用 CR39 固

体径迹探测器测量质子位置分布。通过所建立的模拟程序研究表明, 系统能够对 3.5—8.5 MeV 能量范围内的质子进行动量分析, 各能量粒子束的焦斑位置和宽度与粒子能量具有良好的线性关系, 系统在整个能量范围内具有较为一致的能量分辨率。在靶面积 $A_f=0.2 \text{ cm}^2$ 、入射立体角 $\Omega_p=0.46 \text{ m}\cdot\text{sr}$ 的设置下对于 7 MeV 质子具有 1.8% 的能量分辨率。整个系统结构紧凑, 反冲质子径迹总长度约为 1.5 m, 容易满足脉冲辐射场诊断对谱仪所占空间的严格要求。

使用 ^{239}Pu α 源 (α 粒子能量为 5.15 MeV) 对磁分析系统的实际性能进行了实验测量。图 2(a) 显示了不同探测器位置测量得到的粒子位置谱宽度的变化, 其中 d 为探测器箱内的相对坐标, 各个测量点的位置分布宽度由高斯拟合得到。位置分布宽度随探测器与磁铁出射口距离的增加先减小后增大, 束流在水平面内成腰。 $d=25 \text{ cm}$ 处的 α 粒子位置谱如图 2(b) 所示, 直方图为实验测量得到的粒子位置分布, 曲线为高斯拟合结果。实验表明, 使用永磁铁建造的磁分析系统具有稳定的性能, 粒子位置谱呈良好的高斯分布, 在设计预期的焦平面附近呈现像腰, 满足 MPR 谱仪的设计要求。

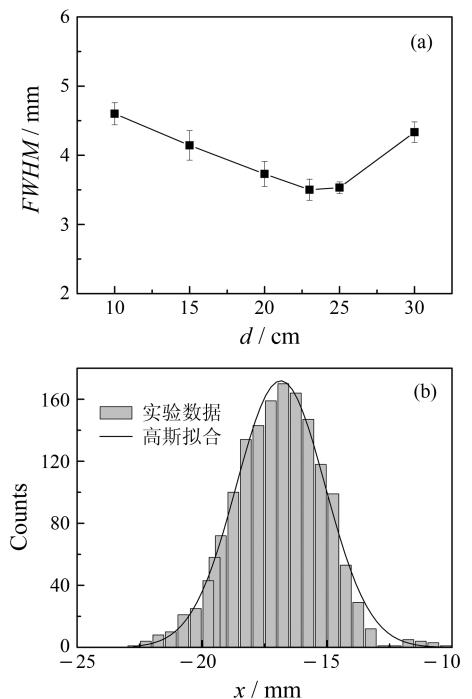


图 2 (a) 不同探测器位置测量得到的粒子位置谱宽度和 (b) $d=25 \text{ cm}$ 处的 α 粒子位置分布

4 谱仪性能

谱仪的能量分辨率由两项决定：转换靶及入射几何参数造成的反冲质子能量展宽 ΔE_p 和磁分析系统的光学性能，其中 ΔE_p 由聚乙烯靶厚度造成的展宽 ΔE_t 和各几何尺寸造成的展宽 ΔE_k 决定。使用MCNPx程序模拟不同靶厚度及几何参数设置下进入磁分析系统的反冲质子的能量分布。图3显示了穿过光阑的中子和的归一化计数(对入射中子数归一)，入射中子能量为14 MeV，聚乙烯靶直径0.72 cm，厚度6 mg/cm²，质子光阑直径0.9 cm。散射中子平均能量为7.00 MeV，高斯拟合半高宽为372.9 keV。由于 ΔE_t 的影响，反冲质子能谱进一步展宽，其平均能量为6.83 MeV，高斯拟合半高宽为542.7 keV。穿过光阑的反冲质子可以被完全探测到，计算得到相应设置下谱仪的探测效率

$$\epsilon = 7.20 \times 10^{-8}。$$

考虑磁分析系统性能对应的展宽 ΔE_s ，谱仪的整体能量展宽 ΔE_i 可以表示为^[4]

$$\Delta E_i \approx \sqrt{\Delta E_t^2 + \Delta E_k^2 + \Delta E_s^2}。 \quad (4)$$

计算不同几何参数条件下穿过光阑的质子束能量展宽及探测效率，结合束流输运模拟程序，得到不同设置下谱仪对14 MeV中子的能量分辨率($\Delta E_i/E_p$)和探测效率如表1所示。其中聚乙烯转化靶距离点状中子源50 cm，转化靶按45°放置以最大限度地减小 ΔE_t 。根据磁分析系统的实际结构，设定质子光阑与聚乙烯靶相距28 cm。实际应用中可根据中子产额等实验条件调整靶厚度、面积和光阑尺寸等参数，以满足相应条件下的能谱测量要求。

表1 不同设置对应的MPR谱仪性能

标号	箔片厚度 /(mg/cm ²)	箔片直径 /mm	口径直径 /mm	$\sqrt{\Delta E_t^2 + \Delta E_k^2}$ /keV	ΔE_s /keV	能量分辨率 (%)	探测效率 (10 ⁻⁸)
1#	2	4.0	5.0	273	93	4.1	0.94
2#	4	5.0	6.8	393	128	5.9	3.49
3#	6	6.4	8.0	518	176	7.8	7.20

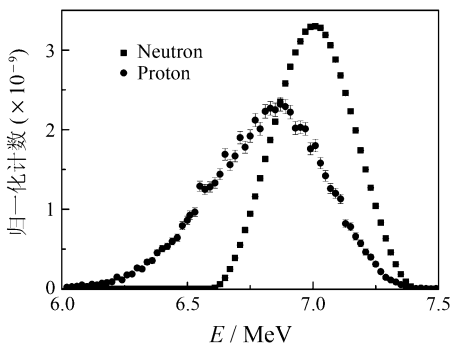


图3 反冲质子与散射中子的能量展宽

对于不同能量的中子，谱仪的分辨率和探测效率不同。计算得到表1中的1#设置下，谱仪对9—17 MeV能量范围内中子的分辨率和探测效率如图4所示。

谱仪的噪声信号主要包括中子、 γ 射线、X射线、电子以及探测器自身的噪声等，其中中子是主要的噪声来源。中子与CR-39发生n-p反应产生质子从而被探测到，噪声中子的探测效率约为 10^{-4} — 10^{-5} ^[1]。由于探测器与中子源之间有足够的距离设

置屏蔽装置，同时反冲质子经过磁场的偏转而与入射和散射中子分离开，因此与其它类型的中子谱仪相比，MPR谱仪更容易实现高信噪比。

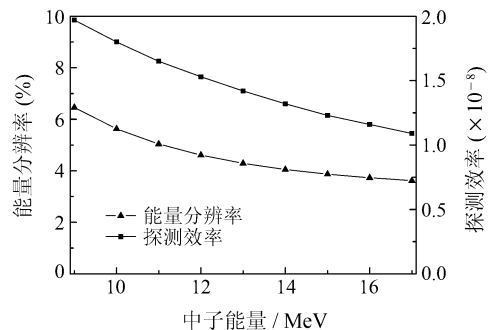


图4 谱仪的分辨率和探测效率与中子能量的函数关系

5 结论

设计了一种用于稳态和脉冲DT聚变诊断的紧凑型MPR谱仪，能够以高信噪比测量9—17 MeV的中子能谱和产额，对14 MeV的DT初级中子具有约4%的能量分辨率和约 10^{-8} 的探测效率。谱仪

使用高性能钕铁硼永磁体作为分析磁铁, 初始阶段使用具有高位置分辨和本底噪声抑制能力的 CR-39 固体径迹探测器测量反冲质子位置分布, 最终将使用 PIN 半导体探测器阵列进行实时测量。由于 MPR 谱仪结构紧凑, 具有高分辨率、宽动态范围、高信噪比及较高的探测效率, 能够对聚变等离子体温度和燃料面密度等参数进行较为精确的诊断, 可望在未来的聚变研究中得到有效应用。目前国内还没有相关研究的报道, 本文的工作可以为这方面的研究提供一定的借鉴信息。

参考文献 (References):

- [1] Frenje J A, Sangster T C, Glebov V Yu, *et al.* Rev Sci Ins, 2001, **72**(1): 854.
- [2] Jarvis O N. Nucl Instr and Meth, 2002, **A476**: 474.
- [3] Ericsson G, Ballabio L. Rev Sci Ins, 2001, **72**(1): 759.
- [4] Källne J, Ballabio L, Conroy S, *et al.* Rev Sci Ins, 1999, **70**(1): 1181.
- [5] Glebov V Yu, Barrera C A, Caldwell S E, *et al.* Rev Sci Ins, 2006, **77**: 10E715.
- [6] Sjöstrand H, Gorini G, Murari A, *et al.* Rev Sci Ins, 2006, **77**: 10E717.
- [7] Hawkes N P, Belle P van, Bond D S, *et al.* Rev Sci Ins, 1999, **70**(1): 1134.
- [8] Källne J, Ballabio L, Frenje J, *et al.* Phys Rev Lett, 2000, **85**: 1246.
- [9] Liu Qingzhao. Diagnostic Technologies for Pulsed Radiation Field (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994, 494—495. (刘庆照. 脉冲辐射场诊断技术. 北京: 科学出版社, 1994, 494—495.)

Design of a Novel Neutron Spectrometer for DT Fusion Diagnosis^{*}

ZHOU Lin¹⁾, JIANG Shi-lun, QI Jian-min

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: Design of a novel spectrometer for measurements of neutrons in the energy range 9—17 MeV has been proposed. Based on proton recoil method and magnetic analyzing technique, the spectrometer can be used to determine DT fuel areal density($\langle \rho R \rangle$) and ion temperature under steady state and pulsed radiation field. The detection efficiency is about 10^{-8} for measuring 14 MeV neutrons with an energy resolution of about 4%. A neodymium-iron-boron permanent dipole was used for the magnetic analyzing system and CR-39 track detectors were used in the focal plane. The system has been tested with ^{239}Pu α source and a corresponding particle transport simulation program has been worked out. Performance of the spectrometer was investigated with Monte Carlo simulation, experiment data and the transport simulation. Due to its good performance, compact structure, and availability for both steady state and pulsed radiation field, the spectrometer can be effectively used for fusion research in the future.

Key words: neutron spectrum; magnetic proton recoil; magnetic analyzing system; Monte Carlo

* Received date: 11 Mar. 2010; Revised date: 29 Mar. 2010

* Foundation item: Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2008B0103003)

1) E-mail: zhoulin2003@gmail.com