

强流中子发生器和中子管现状

洪忠悌

俞良铎

(兰州大学现代物理系)

(黄河大学)

摘 要: 本文综述了国内外强流中子发生器和中子管的发展与现状, 对其主要技术问题进行了分析。

利用氘氘反应产生的中子强度达到 (或超过) $1 \times 10^{12} \text{n/s}$ 的中子发生器或中子管一般叫强流中子发生器或强流中子管。中子发生器是一种专门产生中子的小型化抽气式加速器, 中子管更是一种把离子源、加速系统、靶和气压调节系统全部密封在一个玻璃或陶瓷管内的超小型加速器。它们是加速器中子源中结构紧凑、体积小、操作简便、价格较低的一种中子源 (其中中子管的结构更为紧凑), 所以在科研、医学、工农业及教学等领域有着广泛的应用。

一、强流中子发生器发展概况

六十年代末, 由于中子治癌、半导体器件辐照效应及聚变中子学研究的需要, 开始研制强流中子发生器, 并在七十年代获得迅速发展。它所涉及的强流离子源、大功率小型化高压电源、在强流条件下 (空间电荷效应显著) 适用的加速管和束流输运系统, 以及靶室系统等关键技术七十年代获得决定性的进展, 从而使 D-T 中子流强从 $1 \times 10^{12} \text{n/s}$ 提高到 $1 \times 10^{13} \text{n/s}$, 初步满足了聚变堆研究及快中子治癌等对源强的要求。在八十年代, 强流中子发生器在数量上有较多增加, 在源强上也有所提高, 达到了 $4 \times 10^{12} \text{n/s}$ 。

在几种强流中子发生器的设计方案中,

以使用高速旋转靶的强流中子发生器最为成功, 研制单位以美国劳伦斯—利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 为代表, 它们在 1976 年就达到 $6 \times 10^{12} \text{n/s}$, 在 1979 年达到 $1 \times 10^{13} \text{n/s}$, 在 1982 年达到 $4 \times 10^{13} \text{n/s}$, 始终处于世界领先地位。近十几年来, 世界上研制成的强流中子发生器的概况见表 1。

自七十年代以来, 美国等国曾设计过以超音速气体靶为基础的超强流中子发生器, 试图以数安培的束流产生 10^{15}n/s , 但迄今未见完成的正式报导。

我国对强流中子发生器的研制于八十年代初在兰州大学开始, 于 1988 年完成, 中子强度 $3 \times 10^{12} \text{n/s}$, 采用高速旋转靶和双等离子体离子源, 它的研制成功使我国研制中子发生器的主要技术水平开始步入世界先进行列。

二、中子发生器关键技术的发展概况

1. 离子源和前束流分析系统

强流中子发生器上使用的大多是双等离子体离子源或由它改进的新型离子源。例如单孔引出的双等源, 一般能引出几十毫安氖离子束, 美国 RTNS-I 型中子发生器及兰州大学强流中子发生器上就使用了这种离子

源。由双等源改进的具有七个引出孔的反射式弧源 (Reflex arc source)、又名 MATS—Ⅲ 离子源,能引出400mA 左右的氘离子束,这种离子源使用在 RTNS—Ⅱ 型中子发生器上,获得了130mA 左右的靶流。在可控聚变实验中,常使用很强的离子源,可以把这类离子源引变到中子发生器上使用,如瑞士 EPFL 中子发生器使用的圆环形 (Toroidal) 离子源,其引出氘氚混合离子束达500mA。由于双等离子体离子源的单原子离子比只有50% 左右,为了把中子强度提高到 10^{14} n/s 量级,单原子离子比高得多的大功率高频离子源有可能成为首选的离子源。

对于轰击粒子是氘的强流中子发生器而言,在离子源引出系统之后,大多数都配置了束流分析系统。实验表明:采用分析束,可提高中子产额 (n/s—mA) 近一倍,可延长靶子寿命近一个量级,靶子寿命延长对中子发生器利用效率的提高、运转费的降低及有关人员所受辐照剂量的减少都有极重要的作用。

2. 高压电源

强流中子发生器采用的大功率高压直流电源有倍压电源、绝缘芯变压器等,它们都能提供几百毫安的负载电流,国外已有商品出售,国内研制输出电压几百千伏、负载电流不超过100mA 的高压电源已有技术基础。

3. 加速管及束流输运系统

随着加速流强的增加,空间电荷效应也随着增加,为减小束流的空间电荷效应,一般尽量减短加速管的长度。在束流传输过程中,为防止自身空间电荷效应产生的束分散,成功地引入了空间电荷透镜,它使束流传输强度大幅度提高,在国外,传输上百毫安氘离子束已不成问题,在国内,传输约30mA 的氘离子束也已实现。

4. 靶子

对于中子强度在 $10^{12} \sim 10^{14}$ n/s 的中子发生器,其靶子承受的束流功率达到几千瓦至

上百千瓦,因此靶子性能已成为限制中子强度的一个关键问题,也是中子产额稳定性差的一个主要原因,所以不少国家对提高靶子承受功率和寿命以及中子产额方面作了大量的研究。靶子类型常用的主要有金属旋转靶和自激靶两种。

(1) 金属旋转靶

旋转靶比固定靶的优点是能在不增加中子产生面积的条件下增加有效的靶子面积,同时也降低了给定靶面积上的束流功率密度,从而提高了靶子对束流功率的承受能力。金属旋转靶主要采取增大靶直径、提高靶转速及改善水冷效果等措施来进一步提高靶子对束流功率的承受能力,这不仅为进一步提高中子强度创造了条件,而且也延长了靶寿命。国内外有代表性的强流中子发生器的旋转靶性能如表2所示。由表2可知,美国 RTNS—I 与日本的 OKTAVIAN 中子发生器的靶寿命相近,中国和法国中子发生器的靶寿命与前两台相比,相差甚远,这主要是后者未装前分析系统所致。

(2) 自激靶

这种靶须用 D—T 混合束来轰击,它解决了一般氘吸附靶中氘含量随氘束轰击而逐渐减少的问题,其靶寿命一般由靶材料被溅射的速率决定,约可达几百小时。例如,瑞士的 EPFL,用250keV,500mA 氘氚混合离子束轰击自激靶,靶寿命近500h,获得了 8×10^{12} n/s。总之,这种靶的寿命较长,配制较易,但需复杂的氘回收系统,中子产额也较低。

上述两种类型的靶已实际应用多年,目前还在不断改进。此外,还有一种超音速气体靶,这种靶系统具有自动冷却的功能,所以能承受更高的束流功率密度,而且不存在寿命问题,在物理思想上是个突破,可是未见试验结果的正式报导。

5. 氘处理系统及剂量监测系统

强流中子发生器所用的氘靶,含氘量高

达几百到几千居里,在离子束轰击下,其15%以上会释放出来。为此,必须把泵排出的气体通过氟净化处理系统处理,该系统排出的气体氟浓度及加速器大厅和实验厅等处的氟浓度都须用仪器连续监测,这个系统加上中子

— γ 剂量监测系统对保障工作人员及周围居民健康起关键作用。随着对辐射剂量防护及监测要求的日趋严格,这方面所需的经费有时超过研制中子发生器的经费。

表1 国内外强流中子发生器概况

型 号	设 置 地	电压 (kV)	靶流 (mA)	中子强度 (n/s)	剂 量 (Gymin ⁻¹ /SSD) 及中子束特点	用 途
RTNS— I	Lawrence Liver. Lab 美 国	400	150 400	4×10^{13} (1×10^{14})		核聚变研究等
INS, TTF	Los Alamos 美 国	180	200	10^{13}		治癌及其它
	Sandia N. L 美 国	200	200	10^{13}		治癌及其它
	LBL Berkeley 美 国	200	450	8×10^{12}	等中心	治癌及其它
RTNS— I	Lawrence Liver. Lab 美 国	400	20	6×10^{12}	0.08/125 cm	多用途
LANCELOT	Valduc 法 国	160	160	6×10^{12}		核聚变研究等
FNS	JAERI 日 本	400	20	5×10^{12}		核聚变研究等
	Chalk River 加拿大	300	25	4×10^{12}	等中心	治癌及其它
	兰州大学 中 国	300	30	3.3×10^{12}		多用途
OKTAVIAN	Osaka Univ. 日 本	300	20	3×10^{12}		核聚变研究等
	Hanburg 西 德	500	85	2.3×10^{12}	0.15/80 cm 等 中 心	治癌及其它
DYNAGEN	NASA LEW R. C 美 国	300	30		0.10/80 cm	多用途
	Manchester 英 国	250	30			治癌,已停
	Glasgow 英 国	250	30			治癌,已停
	Oak Ridge N. L 美 国	300	15		0.02/125 cm	多用途
	Univ. Wisconsin 美 国	200	14	1.8×10^{12}		
INGE— I	Dresden 东 德	300	20			在建
	Inst. Phys. Bratislava 捷 克	300	10			在建

三、中子管发展概况

强流中子管在国内还是空白, 国外的强流中子管中子强度达 $8 \times 10^{12} \text{n/s}$ 左右。

强流中子管中使用的离子源不仅引出束流强度大, 而且有不少创造。例如, 美国 Sandia 国家实验室的单环磁会切离子源, 能在 $0.27 \sim 0.4 \text{Pa}$ 气压下工作, 使氙的存储量可减少6倍, 其引出氙离子的强度可达 200mA , 用它取代双等源使得运转大为简化; 又如德国称为 Karin 的中子管, 应用一个低气压放电型的圆环形离子源, 能引出 150mA D—T 混合离子束。

中子管由于空间限制, 无法采取大面积的高速旋转靶, 大多使用自激靶, 靶材料有的采用分解温度很高的铀, 它可吸附一定的

氙氙混合气体原子, 有的则采用导热性很好的金属铜管。上述靶子的寿命可达几百小时。

强流中子管大多用于快中子治癌, 也有用于活化分析等。强流中子管概况见表3。

四、应用概况

强流中子发生器及中子管主要用途包括: (1) 聚变堆设计参数的实验测定, 例如氙增殖比、中子倍增系数、聚变堆材料辐照效应的测定以及聚变堆包层、屏蔽和结构材料的中子谱和反应率的测定等。(2) 快中子治癌, 快中子特别适合于治疗对光子射线有抗辐射作用的肿瘤, 是放疗治癌中一种有发展前途的新治疗手段。(3) 半导体器件 14MeV 中子辐射效应的研究。(4) 中子活化分析。

表2 国内外有代表性的旋转靶性能

中子发生器 型号及 设置单位	RTNS—I U. S. A LLNL	RTNS—II U. S. A LLNL	OKTAVIAN JAPAN Osaka Univ.	LANCELOT FRANCE Valduc 中心	ZF—300—I 中国 兰州大学
靶片直径 (cm)	23	50	20	34.5	20
靶转速 (rpm)	1100	5000	800	1500	1100
靶含氙量 (Ci)	2000	4800	800	1000	200~800
靶材料	Ti	Ti	Ti	Ti	Ti
束斑直径 (cm)	0.6	1~2	3	5	1.8
靶流强 (mA)	25	150	29	110	30
束流组分	氙分析束	氙分析束	氙分析束	氙未分析束	氙未分析束
束流功率 (kW)	10	50~60	6.9	26	9.0
靶寿命 (mA·h)	2500	5000	2300	330~440	~200
中子强度 (n/s)	6×10^{12}	3.6×10^{13}	4×10^{12}	6×10^{12}	3.3×10^{12}

(下转第35页)

- [10] V. A. Zagryadskij et al., INDC (CCP) — 272/G (1987)
- [11] R. S. Hartley, Ph. D. Dissertation, University of Texas, Austin, U. S. A. (1987)
- [12] J. Frehaut et al., BNL—NCS—51245 (1980) 399
- [13] T. Elfruth et al., Atomkernenergie, kerntechnik 49 (3) (1987) 121
- [14] P. O. Joneja et al., Fusion Technology, 12 (1987) 115
- [15] E. T. Cheng, Lecture given at the 16th INDC Meeting (Oct. 1987, Beijing, China)
- [16] Wang Dahai (ed.), INDC (NDS) — 232/L (1990)

(上接第 29 页)

表 3 国外强流中子管概况

型 号	设 置 地	电压 (kV)	靶流 (mA)	靶	中子强度	用 途
TCC—4100	Fox Chase Cancer Center 美国宾州	170	500 D. T 混合	自激靶	8×10^{12}	治 癌
同 上	King Faisal Specialist Hospital 沙特阿拉伯	170	500 D. T 混合	自激靶	8×10^{12}	治 癌
* Karin	KFK 德 国	200	150 D. T 混合	ScTD 500CiT	6.2×10^{12}	治 癌
Karin	GKSS 德 国	200	150 D. T 混合	ScTD 500CiT	6.2×10^{12}	活化分析等

* 由 Karin 型中子管所配成的快中子治疗系统还分别安装在德国的 Zürich、Müster 以及海德堡的 DKFZ.

参 考 文 献

- [1] Booth et al., Nucl. Instr. & Meth, 145 (1977) 25
- [2] J. C. Davis, IAEA—TECDOC—410 (1986) 303
- [3] Su Tongling et al., Nucl. Instr. & Meth., A287 (1990) 452
- [4] D. Massoletti, et al., Nucl. Instr. & Meth., B10/11 (1985) 779
- [5] G. Stengl, et al., Nucl. Instr. & Meth, 140 (1977) 197
- [6] 程伟燮, 洪忠悌, 粒子加速器原理, 北京, 原子能出版社, 1984
- [7] J. Pivarc, IAEA—TECDOC—410 (1986) 356
- [8] R. C. Barrall, et al., IEEE, NS—30, No. 2 (1983) 1777
- [9] R. J. Walko, et al., IEEE, NS—30, No. 2 (1983) 1449