

强流中子发生器及其应用

苏桐龄

(兰州大学原子核研究所)

本文简述了强流14MeV中子发生器发展现状及其在核聚变技术和放射医疗中的应用。介绍了兰州大学最近建成的 3×10^{12} n/s强流中子发生器的性能。

关键词: 中子发生器 聚变中子学 中子辐射损伤 快中子放射医疗

近十几年来, 由于核聚变反应堆材料和快中子治疗癌症研究的需要, $T(d, n)^4\text{He}$ 反应中子发生器向强流发展。通常把中子产额达到或超过 10^{12} n/s量级的冠以“强流”。兰州大学最近建成了一台 3×10^{12} n/s强流中子发生器, 标志着我国已进入世界中子发生器先进国家行列。本文扼要介绍了中子发生器发展现状及其应用问题。

1. 在聚变技术中的应用

聚变堆部件, 尤其是第一壁和包层材料, 受到高通量高能中子的辐照。有些还处在高温和高机械压力之下。其综合效应会导致材料的辐射损伤。宏观上表现在材料的机械强度、塑性、尺寸、热导、电导、光导等性能衰退。微观上最主要的效应有^[1]: 由 (n, α) 反应产生的氦在晶粒边界处形成的氦泡造成的氦脆变(见图1); 由辐照产生的夫伦克耳缺陷(空位和填隙子)过饱和造成的肿胀; 起因与肿胀相似, 在相对低温下发生的堆内蠕变; 由可观的辐照点缺陷导致的辐射感应扩散; 高能中子与固体表面作用产生的两种相互有关的表面效应——溅射和放射性反冲发射。

在快增殖反应堆的材料开发过程中也结合上述效应进行了广泛的研究。尽管快增殖堆堆芯中的辐射状况在性质上类似于聚变堆包层中的情况, 但两者之间有本质性的定量差异, 主

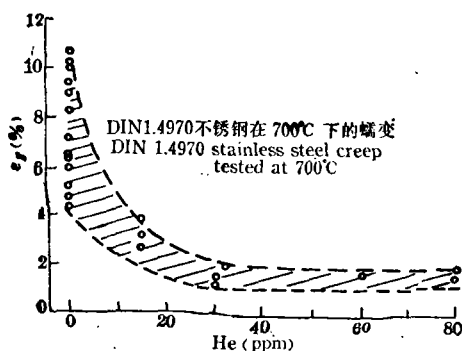


图1 拉长到断裂时的伸长率 ϵ_F 与He含量的关系
Fig.1 Elongation to fracture ϵ_F as a function of He content

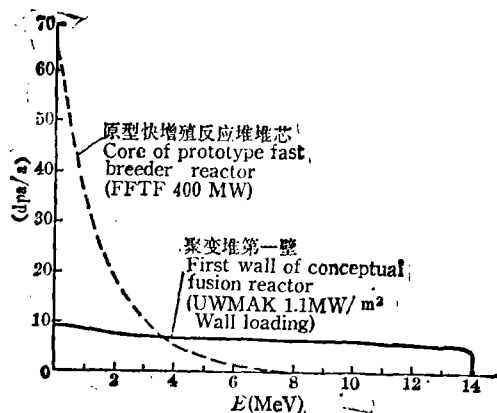


图2 由能量 E_n 大于给定值 E 的中子产生的每原子的位移数 dpa 与 E 的关系(用文献2数据计算)
Fig.2 Number of displacements per atom produced by neutrons with energies E_n above a given value E (calculated by using data from Ref.2)

要是由于二者的中子能谱大不相同。图2所示的计算表明:在聚变堆第一壁,中子辐照产生的平均每个点阵原子的位移数(简称dpa)的总数中的75%是由能量大于5MeV的中子产生的,而在快增殖堆中,这一部分只占总数的5%。此外,高能中子造成的更严重的后果是来自 (n, α) 反应的气体产生率比裂变中子的大得多。在不锈钢中产生的氦浓度与位移数之比的计算结果,在快增殖堆中是0.12ppm He/dpa,而在聚变堆中是20ppm He/dpa。高的氦绝对浓度将加速材料的脆变,并且不同的ppm He/dpa比将导致不同的空洞和泡的成核状况。为了解决上述问题,需要能谱合适的中子源,最好是14MeV中子源。对材料的长期性能考验,希望中子通量能达到 $10^{14}\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 以上。但对现阶段进行的研究而言,如表面研究,位移率的确定,大模型包层的研究,冷却剂分解的研究等,已实现的 $10^{12}\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 量级的源已经足够了。

现有的14MeV中子核数据也还不能满足聚变堆设计工作的要求。近年来,聚变中子学研究集中到如下问题:中子输运问题,包括氚增殖,中子屏蔽和冲流(Streaming)问题;材料问题,除辐射损伤外,还有感生放射性问题,尤其是一些小截面、长寿命核素活化截面的测量。一般说来,对解决中子能谱有关问题,源强 $10^{12}\text{n}/\text{s}$ 已够了。但要直接测量氚增殖比,更强的点源是有益的^[3]。

由于核武器及其防御、空间技术和核能技术发展的需要,电子系统,尤其是半导体器件的抗中子加固已成为一个重大的课题之一。20余年来,国外对硅材料和硅元件的中子辐射损伤已进行了大量研究。对中子辐照产生的辐射缺陷的类型,退火动力学及其与硅晶格不完整性的相互作用得到了很多有价值的实验结果和理论模型,并研制出了抗中子能力较强的元件和系统。由于14MeV中子是热核爆炸中子谱中的主要成分之一,因此14MeV中子源是研究工作不可缺少的模拟源之一。

2. 在放射医疗中的应用

用中子治疗癌症最早在1936年提出^[4]。1938年至1943年间,Stone在美国贝克莱实验室的回旋加速器上收治了250例极晚期患者,其中18例生存5年,4例存活近30年,大多数晚期反应严重。Stone认为快中子会同时严重损伤正常组织细胞,是其固有特性,因而实验不应继续下去^[5]。

五十年代以后,放射生物学研究发现, γ 等低LET射线对缺氧细胞和相对稳定状态的癌细胞敏感性不高,而快中子的这种氧效应小得多,对静止期细胞也敏感。由此,对快中子治疗的兴趣再次高涨起来。1966年在伦敦的Hammersmith医院再次展开快中子临床治疗^[6]。一些极晚期患者获得满意的效果。七十年代以来各国纷纷开展快中子的临床治疗研究。据统计^[7],用快中子或快中子与 γ 射线混合治疗,晚期头颈部患者的局部长期控制率达76%(γ 组19%);妇科肿瘤局部控制率63.3%(γ 组42%);对 γ 射线抗拒的唾液腺瘤、骨肉瘤、软组织肉瘤、黑色素瘤的局部控制率在70%以上。目前快中子治疗在进一步积累病例。大体认为对晚期头颈部上皮样癌比 γ 射线有较好的疗效;对 γ 射线抗拒的肿瘤有较好反应。有人回头评论早期Stone所作的工作,认为根据生物效应的新知识,病人接受的剂量太大了^[8]。

中子治疗希望中子能量大于10MeV,以减小到达肿瘤部位之前在人体中的散射。可供选择的加速器有:用能量30MeV以上的回旋加速器或直线加速器通过D-Be或p-Be反应产生平均能量较高的中子束,或用能量数百keV的低能加速器通过D-T反应产生14MeV单能中子束。前者中子束方向性较好,准直屏蔽易于解决,但中子能谱复杂,平均能量较低;后者设

备较小, 造价较低, 中子能量高, 能谱单一, 缺点是中子发射各向同性, 准直屏蔽较难。随着旋转靶和氘氦混合束的使用, 源强、靶寿命问题逐步得到解决。现有的D-T中子治癌机的中子产额在 $3 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13} \text{ n/s}^{[9,10]}$ 。

3. 强流中子发生器现状

D-T反应中子发生器中子产额的提高主要受到靶技术的限制。它不仅要能承受数十kW/cm²的功率密度而不使温升太高(氘靶温度为摄氏一百多度), 而且要有足够的氦以维持必要的靶使用寿命。目前提出的加速器-靶概念有三种。使用最多的是被加速的氦离子轰击金属(多用钛)膜氦吸收靶。为了提高承受功率的能力和延长使用寿命, 增大靶面积并使其高速旋转。第二种方式是用氘氦混合束轰击金属或金属镀层表面注入自生靶, 由于靶核不断得到补充, 延长了靶使用寿命。但它需要氦-氦气体回收循环使用系统, 密封性能要求极高, 因而使用并不普遍。密封中子管较简单, 但使用寿命较短。为了进一步提高中子产额, 在研究用被加速的氦离子轰击用超音速喷枪或差动抽气形成气压差的氦气体靶产生中子的方案, 试图将中子产额提高到 $10^{15} - 10^{16} \text{ n/s}$ 水平^[11-13]。

表1列出了几台中子发生器的性能^[14-17,3,9,16]。基本上反映出了目前国际发展水平。美国加利福尼亚大学劳伦斯 Livermore国家实验室的 RTNS-II 和 RTNS-I 型器代表世界最高水平。美国有十多所著名大学或国家实验室利用这些中子发生器进行有关研究工作^[19]。目前, 日本正在筹建OKATAVIAN-II型器, 预定中子产额 $3 \times 10^{13} \text{ n/s}$, 总预算1500至2000万美元^[3]。

目前, 我国一些需要14MeV强流中子源研究的课题已经和正在排上日程。利用兰州大学的 $3 \times 10^{12} \text{ n/s}$ 强流中子发生器已开展的工作有: 小截面和长寿命核素活化截面的测量; 半导体器件中子辐照损伤研究; 聚变-裂变混合堆结构材料的中子辐照损伤研究等。

表1 世界上几台重要的中子发生器

Table 1 Several important neutron generators in the world

机器名称 Facility names	RTNS-I	RTNS-I	FNS	LANCECOT	OKATAVIAN	DYNAGEN	INGE-I*	ZF-300-I
国名 Country names	美国 USA	美国 USA	日本 Japan	法国 France	日本 Japan	联邦德国 GFR	民主德国 GDR	中国 China
所在地 Location places	LLNL	LLNL	JAERI	Valauc	大阪大学 Osaka	Hamberg	Dresden	兰州大学 Lanzhou
加速电压 (kV) Accelerating voltage	365	400	400	160	300	500	300	300
高压电源电流 (mA) H. V. supply current	150	40	80	160	50	25	50	50
靶上氦束流 (mA) Target D-beam current	150	25	20	110	20	12	20	30
靶上束斑直径 (cm) Spot size	1	0.6	1.5	5	3	2		1.8
靶直径 (cm) Target diameter	50	23	23	34.5	20	20	15	20
旋转靶转速 (r/min) Target speed	5000	1100	1100	1500	800		300	1100
中子产额 (n/s) Neutron yield	3.5×10^{12}	6×10^{12}	5×10^{12}	5×10^{12}	3×10^{12}	3×10^{12}	$>1 \times 10^{12}$	3.3×10^{12} *
脉冲运行 (ns) Pulse operation	—	1.5	1.6	—	1.5	—	—	—

* 在建造中 Under construction

参 考 文 献

- [1] H. Ullmaier *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 1.
- [2] R. W. Conn *et al.*, *Nucl. Technol.*, 26 (1975), 125.
- [3] K. Sumita, IAEA-TECDOC-410. Proceedings of an advisory group meeting on properties of neutron sources organized By the IAEA and Held in Leningrad, USSR, 1986, p. 313.
- [4] E. O. Lawrence, *Radiology*, 29 (1937), 313.
- [5] R. S. Stone, *Am. J. Roentgenol.*, 59 (1947), 771.
- [6] M. Catterall *et al.*, *Brit Med. J.*, 2 (1975), 653.
- [7] 林怀冰, 高能物理, 1(1984), 25.
- [8] G. E. Sheline *et al.*, *Am. J. Roentgenol.*, 111 (1971), 31.
- [9] M. R. Cleland *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 41.
- [10] F. M. Bacon *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-29 (1981), 1902.
- [11] J. H. Delecuw *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 119.
- [12] D. Dale *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 127.
- [13] D. D. Armstrong *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 26 (1979), 3055.
- [14] J. C. Davis, IAEA-TECDOC-410. Proceedings of an advisory group meeting on properties of neutron sources organized By the IAEA and Held in Leningrad, USSR, 1986, p. 303.
- [15] R. Booth *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 25.
- [16] R. Nakamura *et al.*, Proc. VII. symp. on ion sources and ion assisted technology, Antwerp (1982).
- [17] J. B. Hourst *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 145 (1977), 19.
- [18] P. Eckstein *et al.*, Proceedings of the XIV-the international symp. on the interaction of fast neutrons with nuclei-neutron generators and application, 1984, p.24.
- [19] C. M. Logan *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 200 (1982), 105.

Intense neutron generators and their applications

Su Tongling

(Institute of Nuclear Research, Lanzhou University)

Abstract

This paper gives a brief review on the development of intense 14 MeV neutron generators and their applications in fusion technology and radiotherapy. A 3×10^{12} n/s neutron generator built recently in Lanzhou University is introduced.

Keywords: Neutron generator Fusion neutronics Neutron radiation damage

Fast neutron radiotherapy