

旋转靶强流中子源及其应用

伍永顺 翟光年 丁锡祥 杨小芸 徐 鷗 丁声耀

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

一、旋转靶强流中子源的现状

一般讲,强流中子源是指中子注量在 4π 空间中一秒钟内具有近于或等于或大于 1×10^{12} 个中子的辐射场.它可以利用反应堆得到平均能量为 1MeV 的中子;利用高能电子或质子加速器可得能量为数 MeV 的中子.国内外最近一、二十年来,在强流中子源方面做了大量的研究实验工作,除了利用加速器的 (d-Be), (p-Be) 和 (d-D) 反应产生中子外,大量的工作集中在用 (d-T) 反应并使用高速旋转的氘靶以产生强流中子场.

利用 300—600kV 的高压倍加器加速氘核,并使它轰击高速旋转的氘靶可以产生 $10^{12} \rightarrow 10^{13}$ 个中子/秒的强流中子场.其中子强度高,单色(能)性好,加速器设备简单小巧,造价低,适合于广泛应用.

仅使用高压倍加器而不使用旋转靶,即使高压倍加器能提供很大的流强,也只能获得低

强度的中子场 ($10^8 \rightarrow 10^{11}$ 中子/秒).这主要是受到了在氘束轰击下氘靶表面温度升高导致氘靶损伤的限制.比如说,氘束流强为 5mA 的 400keV 的氘束流轰击在 1 平方厘米的氘靶上,这相当于 2KW 的电功率所产生的热量.如果不采用合适的靶冷却措施,这样的氘靶在数秒到数十秒的时间内就会被打坏.为了延长氘靶的使用寿命和解决长时间应用高强度中子场这个问题,人们提出了采用高速绕轴心旋转的氘靶并且加以合适的冷却措施.其原理如图 1 所示.让氘靶形成一个环带,氘束流本身不动而让氘靶面绕其中心轴线高速旋转(通常大于 1000rpm).氘束均匀地轮番地轰击这个环带,并使靶底衬后通过 20—30 升/分的高速循环冷却水.这样就基本上保证了靶温升不致造成损坏氘靶的目的.氘靶温升除了与冷却水的流量有关外,更重要的它与靶转速有关.如图 2 所示,这是美国的 LLNL 实验室中

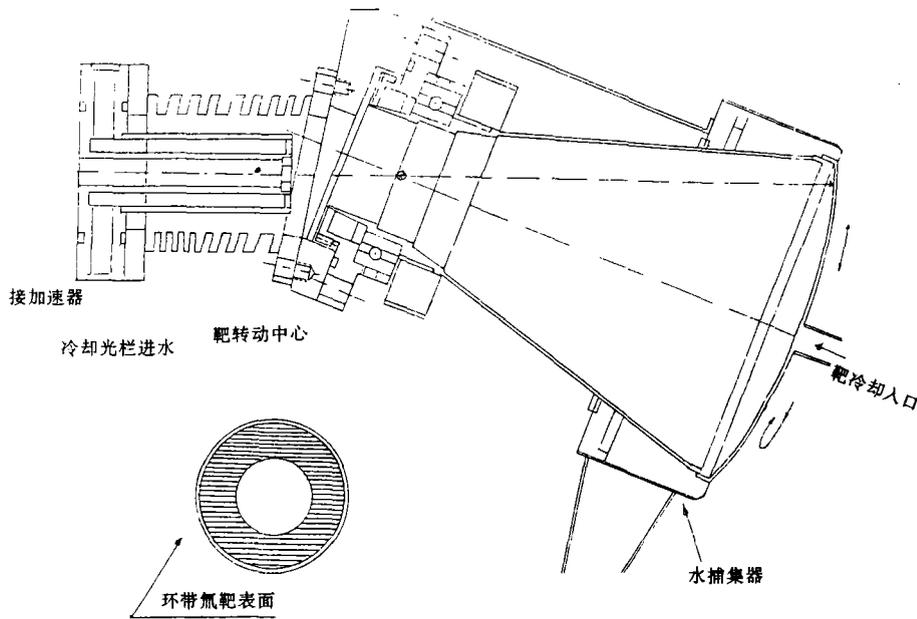


图 1 旋转靶装置示意图

RTNS-I(1100rpm)和RTNS-II(5000rpm)的靶温升随时间的变化曲线。在D束轰击的瞬间,这两种转靶几乎都达到同一温度,但其下降速度和持续时间(峰值宽度)以及平衡时的温度都是靶转速的函数。转速越高,靶温下降越快,持续时间也短,达到平衡的温度也越低,越有利于减小靶的温升,从而使靶少受热损伤而能延长使用寿命。

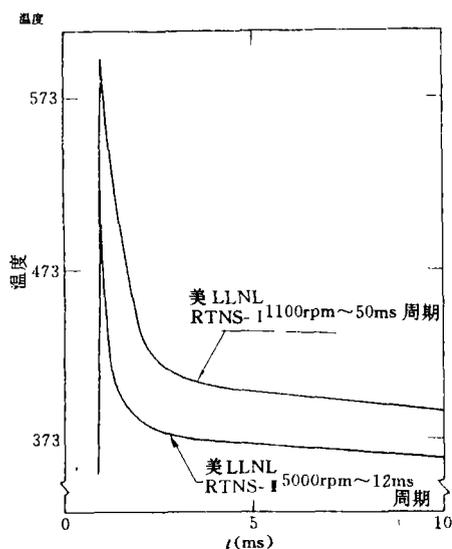


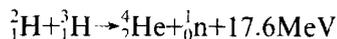
图2 靶转速与靶温度变化关系(计算值)

为了多种用途的需要,世界各地包括中国从70年代以来建成了许多的强流中子场。兰州大学1988年建成了(并于1993年作了进一步改进)我国第一台强流中子场。国防科工委放射性计量一级站在中国原子能科学院的600kV高压倍加器上即将建成中国另一台准强流(近似为 10^{12} 中子/秒)中子场。国内外主要实验室的加速器强流中子场见表1。

二、强流中子源(场)的广泛应用

1. 聚变堆研制设计以及堆材料试验方面

众所周知,为了解决人类未来的能源短缺及危机,一个理想的办法是利用聚变堆这个“人造太阳”。这是一个目前世界各国科技人员的热门课题。但是不管聚变堆技术设计多么复杂,它只不过是建立在氘氚反应即 $T(d, n)\alpha$ 反应的基础之上的,其反应方程式是:



即 $d+T \rightarrow \alpha(3.5\text{MeV})+n(14\text{MeV})$

聚变堆结构复杂,应用材料广泛,它们都是在高中子注量的辐照之下。在强的辐射下,堆材料的各种性能,比如说机械,热,大小尺寸以及材料的诱发性放射性能和材料的辐照损伤,都是近年来的热门课题。14MeV中子场为这一课题提供了极为理想的研究手段和工具。

表1 国内外主要实验室强流中子源情况

实验室	电压 (K.V)	靶流 (mA)	束斑 直径 (mm)	靶直径 (cm)	转速 rpm	产额 $\times 10^{12}$
Valaue(法)	160	110	50	34.5	1500	6
LLNL RTNS-I	400	22	6	23.0	1100	6
LLNL RTNS-II	380	150	10	46.0	5000	40
FNS-JAERA 日本	400	20	15	23.0	1100	5
OKA TAVIAN 日本	300	20	30	20	800	3
INGE-1 德国	300	10 ~ 20		20	1800	1
ZE-300-II 兰大(1988) (1993分析束)	300	30	18	20	1100	3.3
	300	12.5	15	20	1100	2.0
HV-600 CIAE	500	4~5	<10	16	1100	0.7~0.8 (即将 运行)

作为一个例子,在图3中给出了聚变堆结构材料碳化硅(SiC)在强中子注量辐照下的膨胀效应以及半导体新材料砷化镓(GaAs)在中子辐射后随退火温度变化的情况。

2. 核数据及核参数的测量方面

核数据及核参数的测量包括和平利用核能以及核武器的参数测量。多年来14MeV中子能区的核数据虽然很多,但它仍然远不能满足实际应用的需要。这主要是由于受到了中子源强度的限制,十分缺乏长寿命核素和弱反应截面核素以及某些仅能得到极少量样品的核素的核数据。国际原子能委员会的核数据委员会

(INDC)十分重视未来的能源开发,曾在北京第十六届国际会议上把原计划中涉及到 $(n, n' r)$ 反应截面的部分重新制定为一个新的国际协作计划——“对聚变堆工程放射性废物估算上重要的长寿命核素的活化截面的测量和计算”。

3.核医学应用方面

随着医学的发展以及核医学中X射线和 γ 射线治癌的普及推广,快中子、负 π 介子和重离子治癌已在进行。负 π 介子和重离子治癌价格昂贵,主要原因是其设备复杂庞大。而用D-T反应产生的快中子则相对地价廉易得。它同时对某些 γ 线抗拒的肿瘤有良好的效果。目前它已在世界许多实验室临床使用,是一个治癌的新式武器。

4.半导体材料和元器件的抗中子辐射加固研究

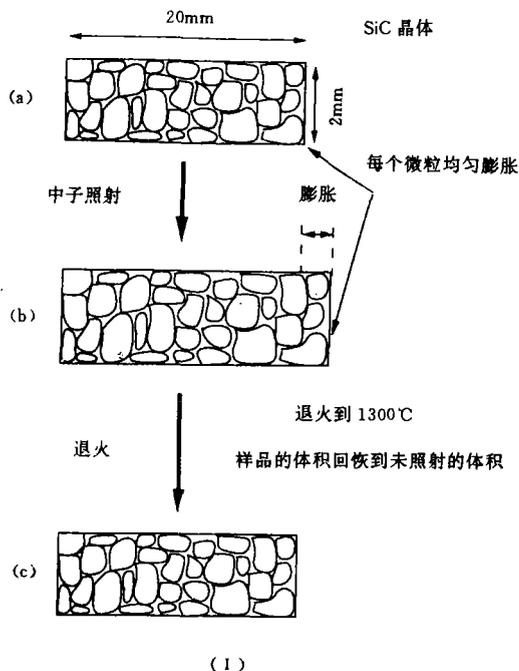
对于这方面的研究已成为一门专门的学科,它不仅涉及到半导体材料和元器件的抗辐射加固本身,而且也涉及到了与此有关的空间技术、核能技术、核武器技术、卫星及通讯技术

等。因为以上各类都离不开半导体材料和元器件。它们在强中子的辐射下会发生许多导致损伤的各种效应。研究其损伤随中子注量和能量的变化规律以及随不同的退火温度的性能变化是一类极为有实用价值的综合性极强的学科。

5.其他应用方面

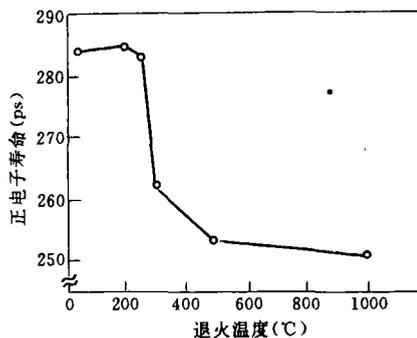
强流中子场的应用,除了上述外,还涉及到中子弹等核武器的研制以及核武器装备,核潜艇、核电站等的中子防护研究,还有对核实验现场用的仪表及剂量仪的校准刻度。还可用于基础科学中新元素的合成,农作物的种子辐照,昆虫学中防治病虫害,生物学上如像鱼苗,虾苗等辐射免疫菌种的生产等。

总之,强流中子场的应用极为广泛,每一类都是一个专门的学科。有些应用还有待于开发。我国除兰州大学强流中子场早已运行工作外,国防科工委放射性计量一级站的旋转靶中子场即将投入运行使用,我们热忱地欢迎各界人士共同来开发和利用这个新的强流中子场。



(I)

图3 (I) 碳化硅晶体在中子辐射下的膨胀变形以及退火效应



(II)

(II) 中化镓材料在中子辐射后正电子寿命随退火温度的变化