

国际原子能机构安全丛书第 42 号

中子发生器运行中的 辐射安全问题

原子能出版社

期 限 表

1979年12月31日前将书送回

国际原子能机构安全丛书第42号

中子发生器运行中的 辐射安全问题

[美] R. F. 博格 著

宋书绶 冷瑞平 译

王义民 陈常茂 校

原子能出版社

2-000

Safety series No. 42
Radiological safety Aspects of
the Operation of Neutron Generators

R. F. Boggs

IAEA, Vienna, 1976

国际原子能机构安全丛书第42号
中子发生器运行中的辐射安全问题

[美] R. F. 博格斯著

宋书绶 冷瑞平 译

王义民 陈常茂 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $1 \frac{3}{4}$ ·字数 30 千字

1981 年 2 月第一版·1981 年 6 月第一次印刷

印数001—1,000 ·统一书号: 15175·330

定价: 0.24元

内 容 简 介

本书主要介绍中子发生器的特性和应用范围以及中子发生器的辐射危害和对辐射安全的考虑,目的是为使用密封管和考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器的工作人员提供一些安全操作方面的基本指导。

前 言

本手册有助于国际原子能机构制定防护计划，以防止人们由于使用辐射而可能受到危害。美国马里兰州卫生、教育、福利部的R. F. Boggs博士应聘担任了编写本手册的顾问，并与本机构的工作人员共同承担了编写工作。

本手册的初稿曾寄给了一些国家的专家，并得到了D. H. Sykes(加拿大)，W. Eyrich(德意志联邦共和国)，H. Kawai, R. Miki(日本)和W. E. Thompson(美国)等对本手册的有益的评论(这些评论在定稿时作了考虑)，本机构表示感谢。

本出版物旨在指导和帮助那些对中子发生器辐射安全方面经验不多或没有经验并希望获得这方面知识的人员。欢迎读者对本手册再版时可能包括的内容提出评论，信可写给国际原子能机构核安全和环境保护部的负责人，通讯处为Kärntner Ring 11, P.O. Box 590, A-1011 Vienna, Austria。

目 录

引言	1
目的	1
范围	2
1. 中子发生器的特性和使用	3
1.1. 密封管型中子发生器	3
1.2. 考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器	4
1.2.1. 高压电源	4
1.2.2. 离子源	6
1.2.3. 加速管	6
1.2.4. 漂移管和靶系统	7
1.2.5. 真空系统	8
1.3. 中子发生器的应用范围	9
2. 中子发生器的辐射危害和安全考虑	10
2.1. 氚的危害	10
2.2. 中子的危害	13
2.3. 中子活化的考虑	15
2.4. X射线的产生	17
2.5. 屏蔽要求	18
2.6. 安全联锁	21
2.7. 警告装置	25
3. 辐射监测和测量的说明	25
3.1. 氚监测仪	26

3.2. 中子监测仪	27
3.3. X射线和 γ 射线监测仪	29
3.4. 个人监测	29
4. 对有效安全计划的要求	30
4.1. 安全机构	32
4.2. 辐射安全	32
4.3. 中子发生器的安全	33
4.4. 一般安全	33
附录1 非辐射危害和安全考虑	34
附录2 中子发生器实验室的考虑	37
参考文献	45
书目索引	47

引 言

最近十五年内中子发生器的数目有了迅速增加。中子发生器在教育、科研、工业和医学等许多领域中的应用还在不断地扩大。

在评价新安装的中子发生器的潜在危险时，下面两个问题是特别重要的：

(1) 中子发生器的价格比较便宜，因而为中子发生器的安全运行所必需的附加费用(包括屏蔽材料和辐射监测设施)就可能忽略。

(2) 中子发生器容易操作，并不需要十分熟练的技术人员。它可以在保健物理工作力量较弱或没有保健物理工作的地方运行。

目前使用的大部分机器，都采用考克饶夫特-瓦尔顿型电压倍增电路。中子由氘核-氟相互作用而产生，也就是由被加速的氘核打到氟靶上，随后释放出14兆电子伏的中子。直到最近，有关健康危害的资料仍然很少。本手册试图针对有关氟、X射线和中子的产生和(或)释放，以及对合适的屏蔽和辐射监测的总要求方面提供补充的和近期的资料。

目 的

本手册的目的是为放射卫生或保健物理方面不太熟悉的

人员提供一些有关密封管型和考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器运行中的若干安全问题的基本指导。本手册并不陈述规章和条例，而是叙述上述装置周围很可能发生的危害。

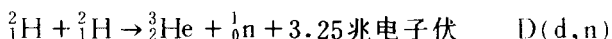
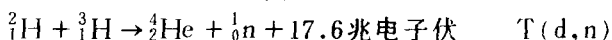
小型中子发生器的价格较低，所以它们常常被那些在辐射安全方面力量较弱的或没有力量的机构所拥有。本手册旨在提出一些在操作这些中子发生器时必须预料到的基本问题。

范 围

本手册所提出的概念和意见适用于那些比较小型的、通常在150—200千伏以下运行以产生14兆电子伏中子的中子发生器的放射卫生问题。本手册的范围仅限于对危害和测量技术的基本讨论，若要在所提出的概念方面得到专门的知识，读者必须参阅更详细的技术文献。

1. 中子发生器的特性和使用

中子发生器的设计特点，在于使用强束流的质子和(或)氘核^①通过下列反应产生快中子：



在T(d, n)反应中，所释放的能量约17.6兆电子伏。应用基本的能量和动量理论（该理论要求较轻的粒子得到较大的能量），可以确定所产生的中子的能量约为14.6兆电子伏。

应用同样的计算方法，可以确定D(d, n)反应所产生的中子能量约为2.6兆电子伏。

当轰击的能量为100千电子伏时，在典型靶上的T(d, n)反应的中子产额约为D(d, n)反应的100倍，因此T(d, n)反应更有意义。

1.1. 密封管型中子发生器

密封管型中子发生器是一个能量为14兆电子伏的中子源，它的典型产额可达 10^9 中子/秒，最大输出额约 10^{11} 中子/秒。这种系统比较小巧，可以移动，其工作方式可以是连续的，也可以是脉冲式的。由于它们比较简单，所以与较大的考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器相比，监测和管理工作较为简单。

① 中子发生器一般只加速氘核，而不加速质子。——译注

密封管由离子源、加速系统（通常为100—200千伏）、维持密封管内压力恒定的补充器以及自动补充的氟气靶或金属靶所组成。密封管的长度通常为30—65厘米，它与所需的电源和控制台相连接。

金属靶通常是载在钛上的氟靶，含有10—20居里（ 370×10^9 — 740×10^9 贝柯）的氟。通常用水或油冷却靶面。

在中子输出额为 10^{10} 中子/秒的连续运行条件下，预计密封管的寿命可超过500小时，而在脉冲式运行条件下，寿命可能减少一半。

1.2. 考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器

根据英国两位物理学家考克饶夫特和瓦尔顿在1932年的早期实验发展起来的产额非常高（达 10^{13} 中子/秒）的机器，对保健物理学工作者说来尤为重要。这机器适合作为电子加速器或离子加速器，它们通常在电压约为150千伏^①而束流达2.5毫安的条件下运行。目前所使用的大多数考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器是将氟离子加速后轰击金属底衬的氟靶，通过 $T(d, n)$ 反应产生14兆电子伏的中子。关于这类机器运行的详细资料可参阅文献〔2—4〕。

考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器的工作过程包括正离子（氟核）的形成、加速、流过漂移管和最后与靶碰撞。

中子发生器的主要组成部分是：（1）高压电源；（2）离子源；（3）加速管；（4）漂移管、靶和靶系统；（5）真空系统。

考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器的外形如图1所示。

1.2.1. 高压电源

高压电源通常装在一个充有油或气体的单独的箱子里，

① 原文误为150千电子伏。——译注

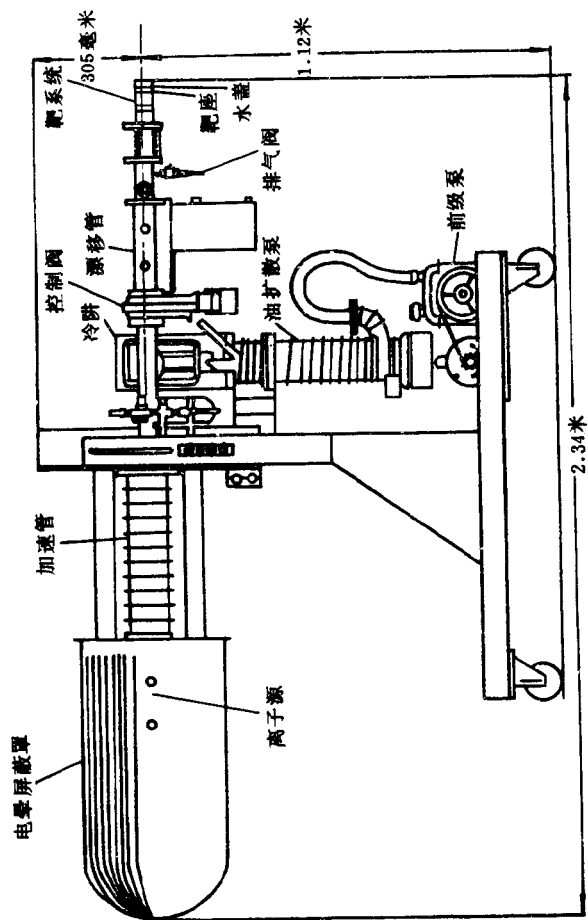


图 1 考克饶夫特-瓦尔顿型 (配备有油扩散泵和后加速脉冲装置的) 中子发生器外形图^[2]

箱子是能够（或不能）用人力从靠近中子发生器的地方移开的。电源在工作期间，其外部必须保持良好的接地。

1.2.2. 离子源

离子源有两种不同的类型，通常采用其中的一种。第一种离子源利用一个在30—80兆赫之间工作的射频场，使氙气产生强烈的电离。射频场穿过石英外壳进入该气体，使电子快速地来回运动。当电子运动时，它们与气体原子碰撞而产生了另外的电子，这样，便形成了由许多自由电子和自由氙离子组成的等离子体。利用外接电极上所加的直流电场，迫使离子朝引出管道飞行。离子离开引出管道后，被间隙透镜聚焦，并加速成为主射束^[4]。

另一种离子源是潘宁离子规。这种离子源在直流电压^①下工作（这就消除了对保健物理监测仪的任何射频干扰）。用电场和磁场来聚焦离子束，并使它向着加速管方向飞行。

无论用哪一种系统，通常都采用钨或镍的漏道（在氙与离子源中的真空之间放一片钨膜），将氙气或氢气引入离子源（有时也采用机械漏道）。加热的钨对氢原子来说是比较多孔的，因此可以通过控制钨的温度来调节气体的流量。因为除氢以外，钨对其他原子来说是不可渗透的，所以它起着一个过滤器的作用，能阻止其他的离子或杂质进入。

1.2.3. 加速管

离子束离开离子源和间隙透镜后，便进入加速管。加速管通常由一系列用来加速离子束的电极组成。每个电极的电位都依次增加，因此，当束流离子通过这些电极后，其电位将达到150千伏或更高。

① 原文为直流电流。——译注

1.2.4. 漂移管和靶系统

离子束被加速到所期望的速度后，便进入无电位的漂移管。漂移管的作用是在靶与加速区域之间提供一个真空连接管，在这里可以设置附属设备。可以安装在漂移管内部或其上面的一些设备包括：

- (a) 真空泵，
- (b) 靶隔离阀，
- (c) 束偏转器，
- (d) 束清除器，
- (e) 束观察器，
- (f) 电子抑制器。

设置靶隔离阀是为了在换靶期间仍可以保持漂移管内的真空，因而可以使“抽气”时间缩短，并能使真空系统组元或空气的污染减到最小。

有些考克饶夫特-瓦尔顿型中子发生器能够提供脉冲束，可通过使离子束在加速前或加速后偏离它的正常轨道的方法使束流间断。在这种情况下，可以在漂移管上安装束捕集器来吸收和耗散被偏转的离子束的能量。

在容许离子束到达靶之前，常常用束观察器来确定束斑在束捕集器上的大小和位置。

为了减小反向通过漂移管从而进入加速区域的次级电子逆流，在漂移管内可安装一个电子束抑制器。

根据所使用的中子发生器的具体类型的不同，还可以在漂移管部分附加各种其他辅助设备。

靶系统由靶座和冷却系统（通常用水、油、氟里昂作冷却剂）组成。将靶和靶座真空密封（即气密封）在漂移管的端部。

靶子通常是吸附有氚气的薄钛层（约1毫克/厘米²）圆片，直径约3厘米。钛蒸发在薄的铜底衬上。常用的氚含量大约为1居里/厘米²（ 37×10^9 贝柯/厘米²），但也可以增加到约10居里/厘米²。有时应用补充系统，在一段时间内可以使氚的沉积量高达100居里（ 3.7×10^{12} 贝柯）。在连续运行的情况下，这种靶的“半寿期”随所使用的束流强度而变化。一个标准靶的平均寿命约为4毫安·小时。因此，对于强束流的加速器来说，靶的寿命可能只有1小时。

为了延长靶在必须拆除之前的工作期限，已制成了带有旋转靶（把氚吸附在圆柱形靶的侧面）和多靶系统（将几个靶安放在一个较大的圆盘上）的中子发生器。这样，运行人员有可能通过移动靶，而使一个新的氚靶面对准离子束。

1.2.5. 真空系统

为了有效地加速离子束，必须在加速器内产生高真空。最通用的抽气装置包括一个用于系统粗抽的前级泵和一个在粗抽之后开动的附加泵，这样就可产生所需要的高真空。附加泵可以是涡旋分子泵、扩散泵或离子泵。如果使用离子泵，就要在启动离子泵之后，用一个阀门将前级泵（或预真空泵）与系统隔开。在使用其他泵的情况下，直接把气体排入前级泵。

大多数系统所使用的前级泵都是充油的旋转型机械泵。在泵循环期间，进入泵内的空气直接与油接触，气泡穿过油层之后到达排出口。

为了得到低于约 10^{-3} 毫米汞柱的真空，在加速器和前级泵之间安装了含有油或水银的扩散泵。待前级泵将系统中的压力抽到低于约 10^{-2} 毫米汞柱之后，才启动扩散泵。

为了产生加速器运行时所要求的高真空，常常用离子泵

(通常叫做溅射离子泵或吸气剂离子泵)来代替油扩散泵或水银扩散泵。离子泵捕获泵单元中的气体分子,一旦离子泵开始起它的抽气作用,就要关闭离子泵与前级泵之间的阀门。离子泵基本上由安放有一个或多个单元(常称为潘宁室)的不锈钢容器组成。潘宁室由两个钛阴极以及阴极之间的一个蜂房状的不锈钢阳极组成。潘宁室应设计成能使大量电子穿过阳极而来回运动,并使那里存在有电离的气体分子。这样产生的气体离子向阴极加速,以几千电子伏的能量轰击阴极,使新鲜钛溅射到整个阴极表面。诸如氮和氧这样的气体便与钛阴极形成稳定的低蒸气压化合物,而氢一类的轻气体则扩散到阴极内,形成所谓的氢在钛中的固溶体。

在含有氚的加速器上使用离子泵时,由于在泵单元内捕获了氚,所以可能对健康带来危害。运行几年后,会积累几百居里的氚。

1.3. 中子发生器的应用范围

由于中子发生器的产额高、价格较低,所以这类装置有可能在教育、科研、工业和医学等方面得到广泛的应用^[1]。

在教育方面,可以用中子发生器进行原子物理和核物理的基本原理方面的实验;进行中子产生和测量方法的实验和研究;以及进行活化分析的原理和应用方面的实验。

在基础研究和应用研究方面,已广泛地使用了中子发生器。这些研究包括核反应,新发展起来的活化分析技术,确定快中子、慢中子及热中子所引起的生物效应和损伤,评价屏蔽材料以及吸收和散射型式等。

工业上,包括活化分析、中子射线照相、材料辐照效应、冶金分析、地质勘探、以及半导体研究中的离子注入等许多

技术领域内的广泛应用。

因为目前发生器的中子产额接近 10^{12} 中子/秒,因此它在生物学和医学方面的应用可能会有增加。除了研究细胞和组织的生物效应以外,正在积极地研究高产额的发生器在辐射治疗方面的应用。

对现有中子发生器的许多应用进行详细叙述或提供详细说明,已超出了本节的范围,读者可参阅有关快中子应用方面的文献。

2. 中子发生器的辐射危害和安全考虑

中子发生器可能存在的放射卫生问题可分为下列几大类:
(1) 氚的危害;(2) 中子危害;(3) 中子活化;(4) X射线的产生;(5) 屏蔽要求;(6) 安全联锁;(7) 警告装置。

2.1 氚 的 危 害

密封管型中子发生器设计特点,是针对氚的辐照提供了一定程度的防护。这种管的偶然破裂所引起的氚的辐照是应当注意的主要问题,虽然业已证明在这种情况下所释放出的氚是小量的^[5]。除了释放一些气态氚以外,在破裂管中剩余的被吸附的氚的危害,也不比在操作常用的氚靶时可能有的正常危害大。为防止额外的氚的释放,这种管子必须远离高温,并且应将它作为放射性废物处理。除非实验室装备有处理氚污染的设备,否则密封管不应从它的金属头上拆下来。应将完整的管头送回制造厂。