

疗体积以外组织放射性剂量迅速衰减。

放射性  $^{125}\text{I}$  粒子源组织间植入, 是利用  $^{125}\text{I}$  粒子释放低能光子产生 X 射线和  $\gamma$  射线来照射杀伤肿瘤细胞<sup>[1]</sup>,  $^{125}\text{I}$  粒子源可以最大限度的贴近肿瘤组织, 使肿瘤组织得到有效的杀伤剂量。在肿瘤切除部位及周围淋巴结可有效地阻止肿瘤细胞的转移, 为手术治疗的进一步的成功提供进一步的保证, 本组 46 例病例已印证了这点, II~III 期肿瘤患者经  $^{125}\text{I}$  粒子源植入治疗后, 均未发现肿瘤转移, 随访结果显示患者情况良好, 生存时间延长。由于  $^{125}\text{I}$  粒子源的最大射程只有 11mm, 在邻近组织的辐射剂量随距离的增加而迅速降低, 从而能有效保护正常组织的安全性。本组病例经  $^{125}\text{I}$  粒子植入治疗后未诱发新的恶性肿瘤。因此, 与外照射放疗相比: 定位更加准确; 邻近正常组织受照量低; 更适合治疗不规则形态的肿瘤, 达到较好的剂量分布, 而且能够起到外照射的补充作用; 更便于手术中的使用, 减少肿瘤手术治疗损伤的范围, 并发症与死亡率也可以得到降低。

则形态的肿瘤, 达到较好的剂量分布, 而且能够起到外照射的补充作用; 更便于手术中的使用, 减少肿瘤手术治疗损伤的范围, 并发症与死亡率也可以得到降低。

### 参 考 文 献

- [1] 王俊杰. 放射性粒子近距离治疗肿瘤 [M]. 北京: 北京医科大学出版社, 2001: 17.
- [2] Ling CC. Permanent implants using Au-198, Pd-103 and I-125: radiobiological considerations based on the linear quadratic model [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1992, 23(1): 81-87.
- [3] 刘泰福. 中国放射肿瘤学的发展 [J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2000, 9(1): 5-7.

(收稿日期: 2007-05-16)

## · 医用内照射剂量 ·

# 中子剂量测量及估算方法

向剑 戴光复 苑淑渝 丁艳秋 张良安

**【摘要】** 随着科技的发展, 中子在许多行业得到越来越广泛的应用, 在医疗上应用最广泛的是硼中子俘获治疗。但在使用中子辐射的过程中, 操作人员可能会受到中子辐射, 因此中子剂量的测量和估算问题也就变得重要起来。目前, 国内关于中子剂量的研究在有些方面还不是很深入, 因此对中子剂量的测量和估算方法进行了归纳和阐述。

**【关键词】** 辐射剂量; 中子俘获治疗, 硼; 放射治疗计划, 计算机辅助

**【中图分类号】** R144.1 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-4114 (2008) 01-0059-04

## The measurement and calculation method for neutron dose

XIANG Jian, DAI Guang-fu, YUAN Shu-yu, DING Yan-qi, ZHANG Liang-an

(Department of Health Physics, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China)

**【Abstract】** Company with the development of science, the neutron is used more and more widely, for example, neutron therapy cancer, neutron logging, neutron photograph and so on. The most wide application on medical treatment with neutron is boron neutron capture therapy. But it also brings some problems when it is in use. When the operator perform with the neutron, it may receive neutron irradiation. So the measurement and calculation for neutron dose become important. At home the research of neutron dose need to be advanced research. So the measurement and calculation method of neutron dose are conformed and summarized in this article for advance research.

**【Key words】** Radiation dosage; Neutron capture therapy, boron; Radiotherapy planning, computer-assisted

中子的应用越来越广泛, 有中子的应用就有中子源的研究, 人们制造出各种中子源, 应用于各个

方面。在中子源的使用过程中, 操作人员就有可能受到中子辐射, 因此有必要在理论上研究中子源涉及的中子剂量。中子剂量的测量及估算方法研究可分为理论研究和实际应用两个方面, 其中实际应用又分为核事故中子剂量估算和医疗过程中中子剂量估

作者单位: 300192 天津, 中国医学科学院中国协和医科大学放射医学研究所保健物理室

通讯作者: 张良安 (E-mail: zhangla43@yahoo.com.cn)

算口产生设备的中子剂量估算和人体各部分中子剂量的计算四个方面。

## 1 中子剂量测量及估算方法的理论研究

由于现在的人造中子源种类越来越多,而它们发射中子的原理和特性都是不同的,所以要研究这方面的中子剂量,首先要清楚是哪一类型的中子源。现在应用的中子源主要可以分为:放射性核素中子源、裂变反应堆中子源、加速器白光中子源、加速器单能中子源和超冷中子源五大类。对于每一种类型的中子源,可以直接得到或者可以测量到中子注量及中子注量率。当得到这两个参数之一时,就可以由中子注量率计算出中子注量,或者由中子注量计算出对应的能量,然后转换为所要研究的中子剂量——中子吸收剂量  $D_n$  或者是中子剂量当量。此外,还可以通过计算反冲能量来测定中子吸收剂量  $D_n$ 。在满足一定条件的前提下,对于一个给定的中子能量  $E_n$ ,吸收剂量  $D_n$  可以从微观横断面进行计算:

$$D_n = \Phi \sum_i n_i \bar{E} \cdot \sigma \quad (1)$$

式中,  $\Phi$  表示中子注量(单位:  $\text{cm}^{-2}$ ),  $n_i$  表示单位块中靶核素  $i$  的数目  $n$ ,  $\bar{E}$  表示物质中释放的平均能量(单位: J),  $\sigma$  表示总的横截面(单位:  $\text{cm}^2$ )。吸收剂量  $D_n$  取决于平均能量  $\bar{E}$  和横截面  $\sigma$ , 通过从非弹性反应中区别出弹性反应, 就可以确定这些值<sup>[2]</sup>, 从而计算出相应的中子吸收剂量  $D_n$ 。

## 2 中子剂量测量及估算方法在实践中的应用

### 2.1 核事故中子剂量估算

核事故中,中子剂量的估算包括核潜艇事故、核设施事故、核电站事故等方面。在核潜艇核事故条件下,中子吸收剂量可以根据中子照射后受照射者头顶处的  $^{24}\text{Na}$   $\gamma$  计数率进行快速评价<sup>[3]</sup>。关于  $^{24}\text{Na}$   $\gamma$  计数率,有专门的文章进行了研究(见参考文献[1])。此时,全身平均中子吸收剂量 ( $\bar{D}_n$ ) 可以表示为:

$$\bar{D}_n = 3.47 \times 10^5 f D_F \cdot n(t_0) \quad (2)$$

式中,  $f$  是与照射和测量时间相关的系数,  $D_F$  为单位中子注量产生的吸收剂量,  $n(t_0)$  是头顶处测量的  $^{24}\text{Na}$   $\gamma$  初始计数率。根据测量的  $n(t_0)$  可以快速对全身  $\bar{D}_n$  做出评价。

对于核设施核事故中子剂量估算,可以参考日本 Tokaimura 事故的中子剂量估算方法。当时采用的方法是收集由于事故而受辐射地区内的面值为 5 日元的硬币,这些硬币来源于离出事地点 100~550 m 范围内的住宅楼。通过频谱测定法,测定  $^{60}\text{Zn}$  所产生的质子,这样就得到  $^{60}\text{Zn}$  与中子  $n$  的核反应  $^{60}\text{Zn} + n \rightarrow ^{60}\text{Zn}$  中所产生的  $^{60}\text{Zn}$  的数目,最后可以根据  $^{60}\text{Zn}$  值来估算中子剂量  $D_n$ 。

对于核电站核事故中子剂量估算方法,可以参考切尔诺贝利核电站事故的处理方法。一般情况下,核电站发生事故定会引起巨大的破坏,在此过程中紧急救援是首要的,因此对于核电站核事故的中子剂量估算,一般采用回顾性剂量学方法处理,在事故一定区域内直接进行剂量率的测量,由此估算出事故区域受辐射者的个人剂量,然后进行修正,修正可以应用随机剂量学模式,并使用蒙特卡罗输运程序确定场所特定的位置因子。此外,对于核事故中子剂量估算,还可以采用人体毛发硫测定外照射事故快中子剂量的方法,快中子照射剂量  $D_{n,快} = \Phi D_F$ ,  $D_F$  为单位中子注量产生的吸收剂量 ( $3.83 \times 10^{-11} \text{Gy} \cdot \text{n}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ),  $\Phi$  为根据毛发中的硫所确定的快中子注量,其公式为:

$$\Phi = \frac{n \cdot e^{\lambda t} \cdot w}{\eta \cdot Y \cdot m \cdot \sigma \cdot S \cdot N_A \cdot \lambda} \quad (3)$$

式中,  $n$  为  $t$  时刻样品的计数率(计数/分),  $e^{\lambda t}$  为衰变校正参数,  $\eta$  为仪器的探测效率,  $Y$  为化学回收率,  $m$  为毛发样品的质量,  $\sigma$  为  $^{32}\text{S}$  的快中子有效活化截面,  $S$  为每克发样的硫水平,  $N_A$  为阿伏加德罗常数,  $\lambda$  为  $^{32}\text{P}$  的衰变常数。测定了探测效率  $\eta$ 、毛发样品的质量  $m$ 、化学回收率  $Y$  和样品的计数率  $n$ , 即可方便地计算出快中子注量,根据公式就可以计算出快中子剂量。

### 2.2 医疗过程的中子剂量估算

医疗过程中的中子剂量估算涉及硼(B)中子俘获治疗、调强放射疗法、质子疗法以及医疗过程中杂散辐射等方面。现在,硼中子俘获治疗应用越来越广泛,它的基本原理是应用热中子照射靶向聚集在肿瘤部位的 B, B 俘获中子后产生  $\alpha$  粒子和  $^7\text{Li}$ ,  $\alpha$  粒子和  $^7\text{Li}$  杀灭肿瘤细胞而起到治疗作用。硼中子俘获治疗剂量研究主要包括:①计算脑中各种射线造成的剂量成分及脑中组织的剂量分布;②计算总的生物效应。对硼中子俘获治疗进行剂量计

算时, 普遍使用 Synder 模型, 一般情况下还需对模型进行重建, 建立了修正 Synder 模型。在此模型基础上, 利用蒙特卡罗中子-光子输运程序 (Monte Carlo N-particle transport code, MCNP) 编制出放射性治疗软件, 就可以计算出不同能量的中子在头部不同深度的剂量分布<sup>[4]</sup>。

调强放射疗法是当今最为先进和精确的放疗技术。它是在三维适形放疗技术的基础上, 通过不同的手段和措施对三维适形射野不同位置处射线强度的调整, 使肿瘤靶区得到更高和更均匀的辐射剂量, 并使周围正常组织和器官少受或免受不必要的辐射<sup>[5]</sup>。在调强放射治疗中利用快速傅立叶变换建立三维光子卷积剂量计算模型, 用基于剂量的目标函数作为遗传算法个体适应度的评价指标, 经过遗传算法 100 次迭代, 就可以得到适形度较高的均匀剂量分布<sup>[6]</sup>。但是, 由于此项治疗技术受到诸如影像、逆向计划设计、精确定位及治疗设备等因素的影响, 对于治疗方案的剂量验证显得尤为重要<sup>[7]</sup>。在调强放射疗法的治疗过程中, 会产生高的中子注量和剂量当量<sup>[8]</sup>, 而对调强放射治疗过程中的次级中子剂量的研究是科技的前沿, 目前有待于进一步的研究。

质子疗法也是当前比较先进的放射治疗技术, 在质子放射治疗过程中, 质子射线能极大地改善剂量分布, 提高靶区的剂量而同时减少对靶区周围正常组织的影响, 所以质子疗法的治疗精确性高, 是目前最安全有效的放射治疗方法<sup>[9]</sup>。在质子疗法的过程中, 患者在质子辐射场外会受到中子辐射, 其中子剂量当量  $H$  可借助注量到剂量当量转换系数进行加权计算得到:  $H = H_F \cdot \Phi_E$ , 中子谱系数  $\Phi_E$  和单位中子注量产生的剂量当量  $H_F$  可由实验得到<sup>[10]</sup>。

在放射治疗过程中, 由于泄漏辐射、一次和多次散射辐射或者医疗操作失误等原因, 治疗室内一般还存在杂散辐射, 杂散辐射的辐射剂量与距离平方呈反比变化, 而中心处的辐射剂量可以比较容易得到, 根据这个原则, 用中心处的辐射剂量乘以杂散线系数, 就可得到杂散辐射的剂量。此外, 还可以采用通过测量人体血液中  $^{24}\text{Na}$  估算中子剂量的方法, 该方法通过激活  $^{24}\text{Na}$ , 使之经血液循环达到全身均匀分布, 采少量血测量  $^{24}\text{Na}$  活度, 就能推算出全身所受的中子剂量。

### 2.3 中子产生设备的中子剂量估算

中子产生设备的中子剂量估算又涉及医用电子

直线加速器、核反应堆以及中子源等方面。在加速器机房内, 加速电子的能量超过 10 MeV 时, 通过中子反应和光中子反应就会产生中子<sup>[11]</sup>。中子剂量率的大小与医用电子加速器照射视野、机架角度以及焦皮距有关, 通过预先将各个角度大小的照射视野、机架角度以及焦皮距进行中子剂量率的测量, 然后就可以通过查表得到中子剂量率, 当照射视野为 40 cm × 40 cm、焦皮距为 1 m 时, 以靶为中心, 垂直枪靶方向距靶 1 m 处的中子空气吸收剂量当量率为: X 射线能量为 8 MeV 时, 中子空气吸收剂量当量率为 2.1~2.5 mSv·h<sup>-1</sup>; X 射线能量为 16 MeV 时, 中子空气吸收剂量当量率为 4.2~5.0 mSv·h<sup>-1</sup>。

目前, 核反应堆的应用也越来越广泛, 核电站、核潜艇及一些核物理的实验等都要用到核反应堆。对于核反应堆的中子剂量计算是根据核反应堆堆芯等的实际结构资料, 建立了相应的蒙特卡罗三维几何计算模型, 对反应堆芯内的元件盒、燃料棒、栅格、反射层、覆盖材料以及堆水池装置实验孔道等都做了精确的模拟, 以 MCNP-4B 为蒙特卡罗计算软件包进行核反应堆临界迭代和中子联合输运计算, 编写 MCNP 用户数据文件, 输入核反应堆模型几何块数据, 设置临界条件、中子探测计数器, 就可计算出中子吸收剂量。也有很多情况是把核反应堆用作中子源, 以一个微型核反应堆中子源为例论述其中子剂量计算的过程。微型核反应堆中子源的氙毒反应性和反应堆中子注量密度及在此注量下的运行时间有关, 通过求出一定时间内的氙毒反应性的增量, 根据氙毒反应性的方程就可以求出中子注量密度<sup>[12]</sup>, 由中子注量密度又可以求出中子注量, 利用中子辐射防护的剂量转换系数<sup>[13]</sup>, 就可以计算出相应的吸收剂量或剂量当量。

### 2.4 人体各部分中子剂量的估算

目前已经构建出了人体模型用于核医学剂量的研究, 人体解剖模型在使用蒙特卡罗程序计算核辐射防护剂量中有着不可或缺的重要地位。目前建成的 VIP-Man 模型已用于核辐射传输方面的研究以及与光子、电子、中子和质子有关的核辐射剂量的模拟计算, 据此开发的基于电子-光子簇射模拟程序 (第 4 版) (electron gamma shower code version 4, EGS4) 的 VIP-Man 模型, 成为目前所开发出来的最为精细的应用于蒙特卡罗辐射计算的人

体模型。根据ICRP第74号出版物提供的单位中子注量到人体模型的不同器官和组织产生的吸收剂量的转换系数,用人体模型的器官和组织作为实验对象,就可以计算出人体各部分的中子剂量,而全身平均吸收剂量可通过各个器官和组织的剂量加权平均得到。将人体各部分的中子剂量数据都测出之后,对于任何事故的中子谱,单位中子注量产生的平均吸收剂量就可以根据查表得到的数据按中子谱进行权重计算得到<sup>[14]</sup>。也就是说,测出现场的中子注量就可计算得到人体各个部分的中子剂量或全身的平均吸收剂量。

### 3 结语

随着对中子研究的深入,中子应用将越来越广泛,中子剂量将会涉及到越来越多新的领域,而中子辐射与其他带电粒子的辐射在作用机制上有本质的区别,因此对中子剂量测量及估算方法进行叙述性总结,将对中子剂量应用于其他新的领域提供有益的参考。

### 参 考 文 献

- [1] 王月兴,鲁永杰,杨翊方.用体表<sup>24</sup>NaY计数率评价事故中子照射注量与剂量的实验研究[J].中华航海医学与高气压医学杂志,2004,11(3):141-145.
  - [2] Wrobel F, Benabdesselam M, Iacconi P. Neutron absorbed dose determination by calculations of recoil energy [J]. Radiat Prot Dosimetry, 2004, 110(14): 807-811.
  - [3] 王月兴,贾福星,马晓琳.核潜艇核事故艇内放射性应急防护和中子剂量快速评价研究[J].中华航海医学与高气压医学杂志,2005,12(4):193-196.
  - [4] 于涛,凌球,邱小平,等.基于Synder修正模型的硼中子俘获治疗剂量深度分布计算[J].原子能科学技术,2007,41(3):378-381.
  - [5] 邹华伟,贾明轩,吴荣.调强适形放射治疗计划剂量学的验证[J].中华放射医学和防护杂志,2004,24(3):256-258.
  - [6] 陈超敏,唐木涛,周凌宏,等.调强放射治疗中剂量计算与视野参数优化研究[J].中华放射医学和防护杂志,2006,26(3):248-250.
  - [7] 周振山,于广辉,乔艳萍.调强放射治疗计划的剂量验证[J].中华放射医学和防护杂志,2005,25(1):69-70.
  - [8] Howell RM, Ferenci MS, Hertel NE, et al. Investigation of Secondary neutron dose for 18 Mv dynamic MLC IMRT delivery [J]. Medical Physics, 2005, 32(3): 786-793.
  - [9] 江启安,周毅德,申文江.质子射线放射治疗研究现状[J].国际肿瘤学杂志,2006,33(7):510-513.
  - [10] Yan X, Titt U, Koehler A M. Measurement of neutron dose equivalent to proton therapy patients outside of the proton radiation field [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 2002, 476 (A): 429-434.
  - [11] 卢峰,邓大平,朱建国.影响加速器机房内中子剂量的因素分析[J].中国辐射卫生,2005,14(1):40-41.
  - [12] 赵海歌,郭诚湛.微型中子源核反应堆绝对中子注量密度计算[J].深圳大学学报理工版,2004,21(2):147-150.
  - [13] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Adopted by the ICRP and ICRU in September 1995[J]. Ann ICRP, 1996, 26(3-4):1-205.
  - [14] 王月兴,鲁永杰,杨翊方.单位中子注量照射中国参考人产生的全身平均吸收剂量[J].中国辐射卫生,2006,15(1):3-5.
- (收稿日期:2007-04-24)
- 
- (上接第57页)
- hemangioma from schwannoma of the orbit: a dynamic MRI study [J]. AJR Am J Roentgenol, 2004, 183(6): 1799-1804.
  - [9] Ohtsuka K, Hashimoto M, Akiba H. Serial dynamic magnetic resonance imaging of orbital cavernous hemangioma [J]. Am J Ophthalmol, 1997, 123(3): 396-398.
  - [10] Front D, Israel O, Kleinhaus U, et al. Tc-99m-labeled red blood cells in the evaluation of hemangiomas of the skull and orbit: concise communication [J]. J Nucl Med, 1982, 23 (12): 1080-1084.
  - [11] Gdal-On M, Gelfand YA, Israel O. Tc-99m labeled red blood cell scintigraphy: a diagnosis method for orbital cavernous hemangioma [J]. Eur J Ophthalmol, 1999, 9(2): 125-129.
  - [12] Ki WW, Shin JW, Won KS, et al. Diagnosis of orbital cavernous hemangioma with Tc-99m RBC SPECT [J]. Clin Nucl Med, 1997, 22(8): 546-549.
  - [13] Sayit E, Durak I, Capakaya G, et al. The role of Tc-99m RBC scintigraphy in the differential diagnosis of orbital cavernous hemangioma [J]. Ann Nucl Med, 2001, 15(2): 149-151.
  - [14] Polito E, Barroni L, Pichierri P, et al. Technetium Tc-99m-labeled red cells in the preoperative diagnosis of cavernous hemangioma and other vascular orbital tumors [J]. Arch Ophthalmol, 2005, 123 (12): 1678-1683.
  - [15] Burrioni L, Polito E, Tasciotti A, et al. The Tc-99m-RBC SPECT in the diagnosis of orbital cavernous hemangioma [J]. Q J Nucl Med, 2000, 44(1): 70.
- (收稿日期:2007-06-08)