

强永刚 主编



医学辐射防护基础

YI XUE FU SHE FANG HU JI CHU

陕西科学技术出版社

主 编 强永刚
副主编 王家鑫 李俊杰

编 委 (按姓氏笔划为序)

王家鑫	邹蓉珠	李俊杰
陈随明	姚永明	高 路
贾毅华	强永刚	

序

本书的出版,适逢伦琴发现 X 射线 100 周年。X 射线的发现和医学中的应用开辟了放射医学的新纪元。100 年来人们在利用 X 射线诊断疾病方面进行了不断的探索和研究,从利用 X 射线对人体结构做透视、照相检查,进展到 X 线 CT、数字减影血管造影、数字化放射摄影等,放射诊断技术有了重大的发展。加之,近十几年来影像核医学、磁共振成像和超声等在临床的应用,使成像技术发展成为一门崭新的影像医学。在现代医学中辐射源和放射性核素的广泛应用,提高了疾病的诊断水平,改善了卫生保健服务质量,推动了医学科学的发展。

然而,在射线为人类造福的同时,也使人们付出了很大的代价。在 X 射线应用的早期,人们还不知道它可能带来的危险。由于过量的照射,使不少的放射技师和医生献出宝贵的生命。在以后的多年实践中,人们对射线的损伤作用逐步有所认识,加强了防护措施,限制了照射剂量,急性放射损伤的事例已不多见。但是现今辐射源和放射性核素在临床应用范围甚广,接触射线的工作人员和病人的人数众多,他们对射线的危害不够了解,缺乏防护知识,滥用放射诊断的情况仍然存在,忽视辐射防护引起过量照射的事故仍有发生。同时,对工作人员的职业照射和对病人大量的医疗照射

造成了较大的集体剂量,增加了国民的电离辐射剂量负担,可能带来潜在的危害。因此,加强医学辐射防护的教育,使医生们对应用放射诊断有正确的认识,提高他们的防护知识和技术水平,努力减少医疗照射剂量,是当前医学辐射防护中的重要任务。

本书作者以他们丰富的专业知识和实践经验写成这本“医学辐射防护基础”。书中从核辐射物理基础、辐射的生物效应到辐射损伤的防治都有全面的论述,参照有关国际组织的建议介绍了辐射防护原则和防护措施。内容丰富,文字易懂,是一本很好的参考书。它不但可以作为专业教学的教材,也是辐射防护人员的有益读物。这本书的出版,无疑会对提高专业教学质量,普及医学辐射防护知识起到良好的作用。

张景源

1995年7月

前 言

医学辐射防护是研究辐射对人体健康的影响,并研究拟定卫生防护措施的一门边缘学科,是预防医学的一个分支,它的内容涉及到物理学、核电子学、生物学和临床医学等领域。特别是近十年来,CT、ECT、数字减影、核磁共振和超声等影像诊断技术已深入到医学诊断的各个领域,使影像医学的防护范围从单一的电离辐射防护扩展到整个辐射领域。我国放射防护规定,新参加放射性工作的人员要进行放射防护的培训,考核合格并取得《放射工作人员证》才可以从事放射工作。因此,为医学影像专业学生开设放射防护课已是当务之急,目前我国尚无一部适合医学影像专业使用的放射防护教材,为此我们编写了这本教材提供给有关单位参考和使用。由于非电离辐射在医学影像专业的使用越来越多,鉴于目前尚缺少一个较好的“术语”来统一电离辐射与非电离辐射的概念,遂用《医学辐射防护基础》一书名来概括医学上应用的电离辐射与非电离辐射的防护。

全书共分十章,第一章重点介绍医学辐射物理基础及辐射防护常用量;第二、三章分别介绍电离辐射的生物学原理,辐射生物效应和电离辐射对造血,免疫系统的影响;第四、五章是放射病的诊断和治疗;第六、七章为电离辐射防护的基本原则,基本标准以及医学上应用的电离辐射防护;第九章为放射性废物的治理;第八、十章分别是医用诊断X线的防护及影像质量保证和影像医学中非电离辐射的安全与防护;将第八、十章编入教材是一种尝试,主要是针对医学影像专业教学的需要而设置,本书作为大专院校、中等专业学校医学影像专业学生用书,本书也做为卫生管理部门

放射防护培训教材和参考用书,使用单位可根据实际需要确定本教材的内容取舍。

本书在编写过程中始终得到广州医学院教务处的关怀和指导,邱庭曾副处长给予了大力的支持和具体的帮助,广州市卫生防疫站刘育明主任,中华核医学会委员李泽波主任,中国医学科学院放射医学研究所所长张景源教授对本书章节的安排,布局的合理性以及内容的取舍等方面给予了悉心的指导,本书还征求了有关医学院校影像医学系的意见,李扬彬主任对本书的一些章节给予了具体的指导,中国医学影像技术研究会理事,广州医学院医学物理教研室主任黄大同副教授审阅了本书的大部分初稿,并将国外最新的影像质控发展动向介绍给读者,对以上专家对本书的厚爱 and 提供的宝贵意见表示衷心的感谢,何秀霞、张敦炎同志为本书的抄写做了大量的工作一并表示感谢。

由于编者水平阅历所限,谬误疏漏之处在所难免,恳请各位读者给予指正。

编者

1995年7月

目 录

第一章 医学核辐射物理基础及辐射防护常用量	(1)
第一节 原子结构与放射性核素	(1)
一、原子结构	(1)
二、X 射线	(3)
三、核素, 同位素, 同质异能素	(6)
第二节 核衰变类型及衰变规律	(7)
一、核衰变类型	(7)
二、核衰变规律	(10)
第三节 辐射防护常用量及其单位	(11)
一、放射性活度 A	(11)
二、照射量 X	(11)
三、吸收剂量 D	(13)
四、比释动能 K	(13)
五、剂量当量 H 与当量剂量 $H_{T,R}$	(14)
六、有效剂量当量 H_E 与有效剂量 E	(16)
七、待积剂量当量 $H_{50,T}$	(19)
第二章 辐射的生物学作用基本规律	(22)
第一节 辐射及其生物学作用	(22)
一、辐射的概念、种类及其与物质的相互作用	(22)
二、传能线密度和相对生物效应	(27)
第二节 电离辐射的直接作用	(31)
第三节 电离辐射的间接作用	(32)
一、自由基的产生	(33)

二、自由基的损伤机制	·····	(34)
三、稀释效应	·····	(34)
四、氧效应	·····	(35)
五、防护效应	·····	(38)
六、温度效应	·····	(39)
第四节 直接和间接作用的相对效应	·····	(40)
第五节 影响电离辐射生物效应的主要因素	·····	(40)
一、与辐射有关的因素	·····	(40)
二、与机体有关的因素	·····	(49)
第三章 电离辐射的生物效应	·····	(57)
第一节 电离辐射生物效应分类	·····	(57)
一、躯体效应与遗传效应	·····	(57)
二、近期效应与远期效应	·····	(57)
三、随机效应与确定性效应	·····	(57)
第二节 电离辐射对细胞的损伤	·····	(58)
第三节 电离辐射致突变及致癌效应	·····	(61)
一、电离辐射致突变效应	·····	(61)
二、电离辐射致癌效应	·····	(62)
第四节 电离辐射对细胞染色体的作用	·····	(65)
一、人类染色体	·····	(65)
二、电离辐射诱发的染色体畸变	·····	(67)
第五节 电离辐射对造血系统的影响	·····	(69)
一、电离辐射致造血系统的基本变化	·····	(70)
二、电离辐射致出血综合征	·····	(71)
第六节 电离辐射对免疫系统的作用及感染并发症	·····	(73)
一、电离辐射对非特异免疫系统的抑制	·····	(74)
二、电离辐射对特异免疫系统的抑制	·····	(78)
三、急性放射损伤感染并发症及其特点	·····	(80)

四、长期小剂量照射对免疫系统的作用——Hormesis 效应	(80)
第四章 外照射急性放射病	(83)
第一节 病因	(83)
第二节 临床表现	(84)
一、初期	(85)
二、假愈期	(85)
三、极期	(86)
四、恢复期	(87)
第三节 外照射急性放射病分型	(88)
一、骨髓型急性放射病	(89)
二、肠型急性放射病	(91)
三、心血管型和脑型急性放射病	(92)
第四节 外照射急性放射病的诊断	(93)
一、物理剂量估算	(94)
二、临床判断	(94)
三、生物剂量估算	(94)
四、血、尿生化检测	(96)
第五节 外照射急性放射病的治疗	(97)
一、治疗原则	(97)
二、轻度骨髓型急性放射病的治疗	(98)
三、中、重度骨髓型急性放射病的治疗	(98)
四、极重度骨髓型、肠型、脑型放射病的治疗	(99)
第五章 外照射慢性放射损伤	(101)
第一节 外照射慢性放射病	(101)
一、病因	(102)
二、临床表现	(103)
三、分度诊断	(104)

四、处理原则	(105)
第二节 慢性放射性皮肤疾病	(106)
一、慢性放射性皮肤损伤	(106)
二、放射性皮肤癌症	(107)
第三节 放射性白内障	(107)
第六章 电离辐射防护的基本标准	(110)
第一节 辐射防护的目的	(110)
第二节 辐射防护的基本原则	(110)
一、正当化原则	(111)
二、最优化原则	(111)
三、个人剂量限值化原则	(112)
第三节 我国电离辐射防护的基本标准	(112)
一、放射防护基本限值	(112)
(一)放射性工作人员的剂量限值	(112)
(二)特殊职业人员的剂量限值	(114)
(三)公众中的个人剂量限值	(114)
二、放射防护的推定限值	(115)
(一)放射性物质的污染表面导出限值	(115)
(二)年摄入量限值及导出空气浓度限值	(116)
三、教学和事故性照射的防护及其限值	(117)
(一)教学中接触电离辐射时的剂量限值	(117)
(二)特殊照射、应急照射和事故照射的剂量限值	(121)
第四节 放射性工作人员的健康管理	(122)
一、常规医学监督	(122)
二、放射性工作人员的健康要求	(122)
三、特殊受照人员的管理	(123)
四、放射性工作人员的保健	(123)
第七章 医学上应用的电离辐射防护	(125)

第一节 辐射源与辐射场	(125)
一、X 射线源(装置)	(126)
(一)X 射线的线质	(126)
(二)X 射线源(装置)的照射量率	(127)
二、 γ 辐射源	(130)
(一)点源照射量率的估算	(131)
(二)非点源照射量率的估算	(133)
第二节 我国医疗照射及其现状	(139)
第三节 医疗照射防护的基本原则	(145)
一、医疗照射的正当化	(146)
二、医疗照射的最优化	(147)
第四节 医用封闭源的防护	(148)
一、外照射防护的基本措施	(149)
二、医用 X、 γ 射线的衰减及屏蔽厚度估算	(150)
(一)X、 γ 射线的衰减	(150)
(二)利用衰减倍数计算物质屏蔽厚度	(160)
(三)利用半衰减厚度估算物质屏蔽厚度	(170)
(四)医用 X、 γ 辐射源装置的屏蔽估算	(171)
(五)医用 X、 γ 射线的常用屏蔽材料	(189)
第五节 医用开放源的防护	(195)
一、放射性工作场所及工作条件	(195)
(一)放射性工作场所的划分	(195)
(二)开放型放射工作单位的分类及工作场所分级	(203)
(三)开放型放射工作单位的防护要求	(204)
(四)放射性工作条件的划分及防护要求	(205)
二、医用开放源防护的基本措施	(206)
三、医用开放源的安全操作规程	(210)

附:放射性危险标志物(牌)	(212)
第八章 医用 X 射线诊断的防护及影像质量保证	(214)
第一节 医用 X 射线诊断的管理	(214)
第二节 对受检者的防护要求	(216)
第三节 医用 X 射线诊断工作人员的防护操作要求	(217)
第四节 医用 X 射线诊断的防护设施要求	(218)
第五节 医用 X 射线诊断的质量保证	(219)
第六节 医用 X 射线诊断设备的防护监测与管理	(222)
一、透视用 X 射线机的监测	(222)
二、摄影用 X 射线机的监测	(228)
第九章 放射性废物的治理	(232)
第一节 概述	(232)
一、放射性废物的分类及特点	(232)
二、放射性废物治理的基本原则和途径	(232)
三、放射性废物的处理指标	(233)
第二节 放射性废液的治理	(233)
一、低放射性废液的处理	(233)
二、中、高放射性废液的处理	(236)
第三节 气载放射性废物的治理	(236)
第四节 固体放射性废物的治理	(238)
一、低放固体废物的处置	(238)
二、中、高固体放射性废物的处置	(239)
第十章 医学非电离辐射的安全与防护	(241)
第一节 射频辐射与微波辐射	(243)
一、对机体的作用及影响	(243)
二、射频与微波辐射危害的防护	(246)
第二节 激光	(248)
一、激光对机体的影响	(249)

二、激光危害的防护措施	(249)
第三节 超声波与核磁共振	(250)
一、超声波	(250)
(一)超声波对物质的作用	(252)
(二)超声对人体的损害及安全	(253)
二、核磁共振	(258)
(一)核磁共振的成像原理	(259)
(二)核磁共振对人体的可能损害及安全	(261)

第一章 医学核辐射物理基础 及辐射防护常用量

第一节 原子结构与放射性核素

一、原子结构

自然界中的一切物质都是由各种元素组成的,构成元素的基本单位是原子。19世纪末期以前,大多数物理学家都认为原子是构成物质最小的、不能再分的微粒。直到1895年伦琴发现X射线,次年贝克勒尔又发现放射性现象以后,才打破了原来的看法,逐步揭示和认识了原子结构的微观奥秘。

1911年,英国物理学家卢瑟福用一束高速带正电荷的 α 粒子流,轰击金属薄片,发现绝大多数 α 粒子能穿过金属薄片而不改变方向,这说明原子的内部是很“空敞”的,有些 α 粒子穿过金属薄片时方向稍有改变,个别粒子好象碰到一种极硬的,不可穿过的东西一样被弹回来。这说明 α 粒子碰到了一种体积很小,带正电荷的物体,卢瑟福称之为“原子核”。

卢瑟福 玻尔原子模型与现代物理学中原子结构的概念是相当符合的,它能对原子物理学范围内各种现象作出合理的解释。这个模型假设在原子中央有一原子核,离原子核很远的外围有一

定数量的绕行电子,按一定轨道绕核运转,称为电子云;原子核带正电荷,核外电子带负电荷,原子核的正电荷与核外电子所带负电荷量相等;原子的质量集中在核上。

原子核是由质子(Proton)和中子(Neutron)组成,它们统称为核子(Nucleon)。质子即氢原子的核,带有一个单位的正电荷。各种元素的原子中,核内的质子数和核外的电子数相等,整个原子呈电中性。核内的质子数即核电荷数,亦即该元素在周期表中的原子序数。中子是不带电的中性粒子,其质量是 1.6747×10^{-27} 千克,比质子(1.6724×10^{-27} 千克)略重。在自然界中,中子不能单独存在,它是在原子核受到外力作用时,从核内释放出来的。自由状态的中子不稳定,会自发地蜕变成一个质子、一个电子和一个中微子,蜕变的半衰期为10.6分钟。

由于基本粒子(质子、中子、电子)的质量十分微小,核物理上使用“原子质量单位”来表示核子和核素的质量。原子质量单位是 ^{12}C 原子质量的 $1/12$,等于 1.66043×10^{-27} 千克,约等于氢原子的质量,由于电子的质量远远小于核子的质量(大约是核子质量的 $1/1836$),质子和中子的质量又几乎相等,所以根据原子核的质量和电荷数便可以确定核内的核子数。例如,已知某一个原子核的电荷数 Z 和质量数 A ,则它的中子数 $N=A-Z$ 。

原子的直径约 10^{-8}cm ,而原子核的直径只有 10^{-13}cm ,占原子直径的十万分之一。但是原子的质量几乎全部集中在原子核上。核子能够紧密结合成原子核,这是因为核子间除了有质子与质子之间的静电排斥力外,尚存在一种非常强大的吸引力,这种吸引力称为核力。核力是一种短程力,在距离大于 $5 \times 10^{-13}\text{cm}$ 时,其作用减弱到接近于零。核力与电荷无关,对各种核子而言,核力的大小都大致相等。

二、X 射线

1895 年, 伦琴在研究阴极射线时发现一种穿透本领很强的辐射, 当时称为 X 射线, 后来又称为伦琴射线, 经过较长的时间以后, 人们才知道 X 射线是一种比紫外线波长更短的电磁波, 它具有电磁辐射的一切特性。

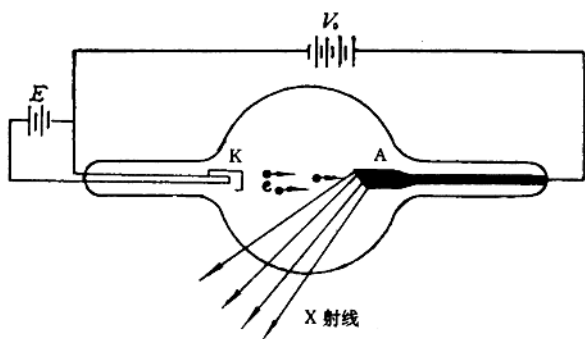


图 1-1 X 射线管示意图

X 射线是高速运动的电子与物质相互作用而产生的, 这种过程通常在 X 射线管内进行。图 1-1 是 X 射线管的示意图。K 是阴极, 被灯丝电源 E 加热后可以发射电子。a 是阳极, 也称对阴极。在阴极和对阴极之间加一约 10 万伏的加速电压 V_0 , 阴极产生的电子在强电场中加速, 到达阳极时将具有很高的能量。这种高速电子与阳极的物质相互作用, 便可产生 X 射线。在原子核物理学上, 常用的能量单位是电子伏特 (eV), 其值为一个电子通过 1 伏特电势差时能量的改变。常用单位还有千电子伏 (KeV)、兆电子伏 (MeV)、十亿电子伏 (BeV)。一般在通常的技术设备中, 电子的能量约十万电子伏, 但也有能使电子能量达到一百万电子伏的 X 射

线装置,用特殊的电子加速器还可以获得能量更高的电子,这样的电子与物质相互作用,可以获得波长更短的 X 射线。一般医用 X 射线的波长为 10^{-10} 米左右,对激发电压小于 120 千伏产生的 X 射线叫软 X 射线,激发电压大于 120 千伏产生的 X 射线叫硬 X 射线。

X 射线管产生的 X 射线可分两类,一类 X 射线的光谱是连续的,另一类 X 射线的光谱是线状的。当电子与某种确定的对阴极相互作用时,如果电子的能量没有超过一定的限度,则只发射连续光谱的 X 射线,当电子能量超过一定的限度后,除发射连续光谱的 X 射线外,还伴随着一种线状光谱的 X 射线,如图 1-2 所示。能量为 35 千电子伏的电子还不能使钨靶发射线状光谱的 X 射线,只有连续光谱的 X 射线。然而,能量为 35 千电子伏的电子与钨靶相互作用,除发射连续光谱的 X 射线外,还叠加两条线状光谱的 X 射线,这两条谱线分别称为钨元素的 K_{α} 线和 K_{β} 线。要得到钨元素的 K_{α} 线,则必须使电子的能量增加到 70 千电子伏以上。同一种物质,在高能电子的作用下能够发射两种类型的 X 射线的机制是不同的。

(一) 韧致辐射

韧致辐射产生的 X 射线是连续能谱,当高能电子轰击对阴极的原子时,电子在原子核库伦场的作用下急剧减速,将一部分动能以光子的形式辐射出来称为韧致辐射。连续能谱意味着产生 X 射线光子的能量是从零一直到一个最大值的范围,最大值取决于加速电压的大小。