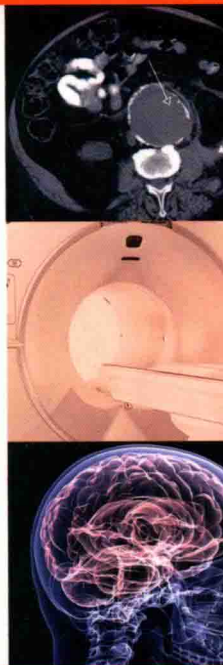


国家卫生和计划生育委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供医学影像学专业用

医学影像物理学 学习指导与习题集

第 **3** 版

主 编 童家明 吉 强
副主编 刘东华 龚 明



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

国家卫生和计划生育委员会“十三五”规划教材配套教材
全国高等学校配套教材
供医学影像学专业用

医学影像物理学

学习指导与习题集

第3版

主 编 童家明 吉 强

副主编 刘东华 龚 明

编 委 (以姓氏笔画为序)

马远新 (新疆医科大学)

王 礼 (大连医科大学)

王 岚 (哈尔滨医科大学)

王亚平 (锦州医科大学)

仇 惠 (牡丹江医学院)

石继飞 (包头医学院)

吉 强 (天津医科大学)

刘东华 (新乡医学院)

许建梅 (海南医学院)

杨文沛 (右江民族医学院)

吴小玲 (南京医科大学)

张瑞兰 (北华大学)

陈仕国 (第三军医大学)

周志尊 (牡丹江医学院)

侯淑莲 (华北理工大学)

洪 洋 (中国医科大学)

龚 明 (南昌大学)

童家明 (青岛大学)

谢晋东 (泰山医学院)

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医学影像物理学学习指导与习题集/童家明,吉强主编. —3版.

—北京:人民卫生出版社,2017

本科医学影像学专业第四轮规划教材配套教材

ISBN 978-7-117-24610-1

I. ①医… II. ①童… ②吉… III. ①影象诊断-医用物理学-
医学院校-教学参考资料 IV. ①R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 122434 号

人卫智网	www.ipmph.com	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	www.pmph.com	人卫官方资讯发布平台

版权所有,侵权必究!

医学影像物理学学习指导与习题集

第 3 版

主 编:童家明 吉 强

出版发行:人民卫生出版社(中继线 010-59780011)

地 址:北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编:100021

E - mail: pmph @ pmph.com

购书热线:010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷:天津安泰印刷有限公司

经 销:新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:10

字 数:237 千字

版 次:2006 年 11 月第 1 版 2017 年 7 月第 3 版

2017 年 7 月第 3 版第 1 次印刷(总第 3 次印刷)

标准书号:ISBN 978-7-117-24610-1/R·24611

定 价:23.00 元

打击盗版举报电话:010-59787491 E-mail: WQ @ pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

前言

《医学影像物理学》(第4版)是根据全国高等学校医学影像学专业规划教材会议的精神修订的医学影像学专业系列规划教材之一。为了帮助学生快速熟悉该教材的内容,复习并自我检测对医学影像物理学基础理论和基本知识的掌握程度,提高学生分析、综合和应用所学知识的能力,我们编写了配套教材《医学影像物理学学习指导与习题集》。

本书按照教材的内容框架分章编写,每章均由学习目标、重点和难点内容、章后习题解答、补充习题、补充习题参考答案五部分组成。“学习目标”按掌握、熟悉、了解三个层次,列出对本章知识点的教学要求;“重点和难点内容”以概要的结构和文字总结本章知识的重点难点,对已学习过的理论知识与应用进行加工、梳理;“章后习题解答”给出教材各章后习题的详细参考解答,供同学们与自己所做解答对比使用;“补充习题”与“补充习题参考答案”则为学生在学习各章之后的再次自我检测提供方便。

为《医学影像物理学》(第2、3版)配套编写的《医学影像物理学学习指导》(第1、2版)给本书的编写奠定了良好的基础,新一届编委会对前两届《医学影像物理学学习指导》编委会卓有成效的工作表示敬意。

本书的编写会议和定稿会议也得到南昌大学和新疆医科大学的鼎力协助;各位编者得到所在院校领导的关心支持,在此一并致谢!

尽管在编写过程中,所有参编人员均投入了极大的热情和努力,但限于我们的学识水平和能力,书中的错误与疏漏在所难免,恳请使用本书的老师和学生予以批评指正。

童家明 吉 强

2017年5月

目录

第一章 X射线物理

1

一、学习目标	1
二、重点和难点内容	1
三、章后习题解答	8
四、补充习题	10
五、补充习题参考答案	12

第二章 X射线影像

16

一、学习目标	16
二、重点和难点内容	16
三、章后习题解答	24
四、补充习题	35
五、补充习题参考答案	41

第三章 超声波物理

50

一、学习目标	50
二、重点和难点内容	50
三、章后习题解答	58
四、补充习题	61
五、补充习题参考答案	62

第四章 超声成像

65

一、学习目标	65
二、重点和难点内容	65
三、章后习题解答	71
四、补充习题	73

五、补充习题参考答案	76
------------	----

第五章 磁共振物理 80

一、学习目标	80
二、重点和难点内容	80
三、章后习题解答	88
四、补充习题	91
五、补充习题参考答案	92

第六章 磁共振成像 94

一、学习目标	94
二、重点和难点内容	94
三、章后习题解答	103
四、补充习题	108
五、补充习题参考答案	110

第七章 核医学物理 112

一、学习目标	112
二、重点和难点内容	112
三、章后习题解答	117
四、补充习题	120
五、补充习题参考答案	122

第八章 核医学影像 125

一、学习目标	125
二、重点和难点内容	125
三、章后习题解答	130
四、补充习题	133
五、补充习题参考答案	135

第九章 电离辐射的生物效应 138

一、学习目标	138
--------	-----

二、重点和难点内容..... 138

三、章后习题解答..... 141

四、补充习题..... 143

五、补充习题参考答案..... 144

第十章 电离辐射的防护 147

一、学习目标..... 147

二、重点和难点内容..... 147

三、章后习题解答..... 148

四、补充习题..... 149

五、补充习题参考答案..... 151

第一章 X 射线物理

一、学习目标

1. 掌握 X 射线的产生机制、X 射线与物质相互作用的主要类型、单能 X 射线在物质中的衰减规律。
2. 熟悉 X 射线的空间分布、连续 X 射线在人体中的衰减规律。
3. 了解 X 射线管结构、X 射线的基本特性。

二、重点和难点内容

(一) X 射线的产生

1. X 射线管 阴极、阳极是 X 射线管的两个最重要的组成部分,阴极是 X 射线管的负极,由灯丝和聚焦罩两部分组成;阳极是 X 射线管的正极,靶是阳极中受电子轰击的区域。

对于给定的灯丝电流,管电流将会随着管电压的升高而增大,并达到其最大值,此时进一步增加管电压,将不会使管电流增大。超过饱和电压,只有通过提高灯丝的温度才能增加管电流。在管电压一定的情况下,管电流随灯丝电流的增加而增加。但在灯丝电流小于某定值时,不会产生管电流,这是由于灯丝电流太低,灯丝温度不高,不能提供热电子。

灯丝发射的电子,经聚焦加速后撞击在阳极靶上的面积称为实际焦点。焦点就是一个实际的 X 射线源。X 射线管实际焦点的投影,统称为有效焦点。此时,有效焦点的大小与灯丝尺寸、管电流和管电压、靶倾角、沿阴极-阳极轴线的位置等因素有关;有效焦点大小的一般规律是越靠近阴极有效焦点越大,越靠近阳极有效焦点越小,这种现象称为焦点的方位特性。我们测量到的有效焦点仅指实际焦点沿 X 射线束中心轴线方向上投影的面积,通常所谓的 X 射线管的焦点标称值就是指此时的有效焦点,而不是其他方向的有效焦点,更不是实际焦点。

通过对有效焦点的测量发现,焦点的形状是不一样的,它反映在有效焦点面上的 X 射线量分布是不均匀的。事实上,有效焦点 X 射线量的分布对应实际焦点受电子轰击的数目分布。轰击电子到达靶上的位置,决定于由阴极出射的电子所经历的电场。阴极与阳极体可构成一个聚焦电场,此电场对从阴极不同部位上出射电子所产生的聚焦作用不同,一般可以产生如下聚焦效果:①从阴极前方出射电子在到达靶面上时刚好聚集,而阴极两侧出射电子则表现为过聚焦,这就在实际焦点上形成一个主焦点、两个副焦点的三峰电子分布;②从阴极前方出射电子在到达靶面上时过聚焦或欠聚焦,从阴极两侧出射电子也是过聚焦或欠聚焦,这可在实际焦点上形成电子分布的四峰或五峰分布。

实际焦点的大小直接影响 X 射线影像的清晰度,实际焦点越大,有效焦点的面积也增大,必然引起在胶片上所形成影像的清晰度降低。这里所讲的焦点对成像的影响,是焦点大小所产生的影像模糊。当焦点极小时,相当于点光源投照物体成像,这时影像质量最高,模糊度为零,或者说半影 P 为零。当焦点的线度 S 为不等于零的某一定值时, P 的大小取决于半影公式:

$$P = \frac{d}{f-d} \cdot S$$

式中 d 为被投照体与胶片间的距离, f 为焦点至胶片的距离。当 d 很小时, $P \propto d \cdot S$, 所以为减小 P , 要求 S 尽可能小; 同样, 被投照体与胶片间的距离也是越小越好。

2. X 射线的产生机制

(1) 连续 X 射线: 仅当电子的能量或管电压不超过某一限度时, 才只发射连续谱。

产生机制: 高速电子射到阳极靶上时, 受到阳极中原子核的库仑场作用就会骤然减速, 由此伴随产生的辐射称为轫致辐射, 由于电子速度在阳极靶中连续变化, 所以产生连续谱。

能谱特点: 强度随波长变化, 在某一波长处, 强度有极值。在长波方向强度降落缓慢, 在短波方向强度降落较快, 且有明显的极值, 最短波长与材料无关, 只与管电压有关, 当管电压增高时, 最短波长减小。

(2) 特征 X 射线: 当电子的能量或管电压超过某一临界值时, 除有连续谱外, 还存在连续谱的背景上叠加一些线状谱。

产生机制: 从阴极发出的高速电子打到阳极靶上, 由于电子能量很高, 它能深入到原子的内层, 将内壳层的电子击出至原子之外, 使原子电离, 并在内壳层出现一个空穴, 当邻近内壳层的电子跃迁到这个空穴时, 就发射出波长很短的 X 射线, 内壳层能级分立, 所以产生 X 射线的线状谱。

能谱特点: 线状谱的位置和结构与阳极材料有关, 即不同元素的阳极材料发射的线状谱虽有相似结构, 但波长不同, 按原子序数顺序排列时, 波长依次变化。每种元素都有一特定波长的线状谱, 即特征 X 射线谱成为这种元素的标证。

(3) X 射线能谱: 指 X 射线光子数随光子能量的分布。能谱图中的曲线表示的是经靶自吸收、固有滤过和附加滤过后的能谱。决定 X 射线能谱形状的主要因素有管电压、靶倾角和固有滤过。对 X 射线能谱的研究, 可使 X 射线系统的设计者更准确地预测受检者所接受的剂量, 从而研制出更好的硬件和软件系统来降低受检者所接受的剂量。在放射诊断影像质量保证中, X 射线能谱的分布对于评价诊断影像的产生和优化影像质量亦是十分重要的。

(二) X 射线的空间分布

1. X 射线强度 X 射线强度是描述 X 射线辐射场的物理量, X 射线强度越大其辐射剂量越大。X 射线在空间某一点的强度是指单位时间内通过垂直于 X 射线传播方向上的单位面积上的光子数量与能量乘积的总和。根据这一概念, X 射线强度的数学表达式视具体情况而定。

单能 X 射线的强度为:

$$I = N \cdot h\nu$$

能量完全确定的有限种光子组成的线状谱的强度为:

$$I = \sum_i N_i \cdot h\nu_i$$

连续 X 射线能谱的强度为:

$$I = \int_0^{E_{\max}} E \cdot N(E) dE$$

应充分理解各种因素对 X 射线强度的影响,以便在 X 射线成像中通过改变强度获取高质量的 X 射线影像。

2. X 射线的空间分布 不同管电压即不同入射电子能量下, X 射线在薄钨靶周围呈空间立体分布,当管电压为 100kV 时, X 射线强度在各方向上几乎相等;当管电压继续升高时, X 射线最大强度方向逐渐趋向于电子束的入射方向,其他方向强度相对减弱,而当管电压为 20MV 时, X 射线束主方向与电子入射方向基本相同,所以光子出射随管电压的提高有前冲趋势。

国内外用于医疗诊断方面的 X 射线管,其阳极靶为厚靶。这里存在“足跟”效应,又称阳极效应。在放射工作中,当成像的解剖结构在厚度或密度上差别比较大时,阳极效应就必须给予足够的重视,应尽量降低阳极效应对摄影的影响。另外,阳极效应可改变有效焦点的大小和形状。

(三) X 射线与物质相互作用的类型

1. 作用截面 一般情况下,作用截面 σ 定义为一个入射粒子与单位面积上一个靶粒子发生相互作用的概率。 σ 的 SI 单位是 m^2 ,常用单位为靶恩(barn), $1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$ 。如果作用对象是物质中的一个原子或电子就称为“原子截面”或“电子截面”。

2. 光电效应 这里讲的光电效应所产生的光电子一般不会逸出物质,故也称为内光电效应,其机制是入射光子对靶原子的激发,使壳层中的电子成为自由电子即光电子。其条件是光子的能量大于电子在原子壳层中的结合能。在软组织中平均结合能仅为 0.5keV,所以极易发生光电效应。

放出了光电子的原子处于激发态,内层电子的空位立即被外层电子来填充,此时,原子随即放出特征 X 射线,其能量等于两能级之差。有时,特征 X 射线在离开原子前,又击出外层的轨道电子即“俄歇电子”,俄歇电子的动能等于特征 X 射线的能量减去该电子在原子中的结合能。在人体组织中特征 X 射线和俄歇电子的能量低于 0.5keV。这些低能光子和电子很快被周围组织吸收。

在诊断 X 射线光子能量范围内,光电效应原子截面 σ_{τ} 与光子能量、原子序数间的关系可表示为:

$$\sigma_{\tau} \propto \frac{Z^4}{(h\nu)^3}$$

上式表明:随原子序数的增大,光电效应发生的概率迅速增加,也就是说,电子在原子中束缚得越紧,其参与光电效应的概率越大;光电效应截面与光子能量的 3 次方成反比,随能量增大,光电效应发生的概率迅速减小。当光子的能量小于 K 壳层的结合能时,光电效应仅发生在 L 壳层或离原子核更远的壳层;当光子的能量等于或大于 K 壳层的结合能时,光电效应主要发生在 K 壳层。这说明光电效应的概率在光子能量等于 K、L 等壳层结合能时发生突然的跳变,概率最大。光电效应发生的概率突变的地方称为边缘吸

极限。如碘和钡的 K 吸收限分别为 33keV 和 37keV。碘和钡都是 X 射线检查中常用的造影剂。

3. 康普顿效应 能量介于 30keV~30MeV 之间的 X(γ)射线光子与软组织相互作用时以康普顿效应为主。康普顿效应的本质是入射光子与自由电子(实际上是被原子核束缚较弱的电子)弹性碰撞。设入射光子频率为 ν (波长 λ), 散射光子频率为 ν' (波长 λ'), 那么碰撞前后光子的能量分别为 $h\nu$ 和 $h\nu'$, 它的动量分别为 $\frac{h\nu}{c}$ 和 $\frac{h\nu'}{c}$ 。电子在碰撞前近似地看做是静止的, 碰撞后反冲电子的动能和动量分别为 E 和 p_e , 按照相对论原理, 它们之间的关系为: $E+m_0c^2=\sqrt{(p_ec)^2+(m_0c^2)^2}$ 。

在弹性碰撞过程中, 光子和电子之间遵循能量守恒和动量守恒, 由此可得光子波长的改变(以 nm 为单位)为:

$$\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=0.00243(1-\cos\varphi)$$

式中 φ 为散射光子与入射光子方向的夹角。

另外, 散射光子能量 $h\nu'$ 和反冲电子动能 E 为:

$$h\nu'=\frac{h\nu}{1+\alpha(1-\cos\varphi)}$$
$$E=h\nu-h\nu'=\frac{\alpha(1-\cos\varphi)}{1+\alpha(1-\cos\varphi)}h\nu$$

α 为入射光子的能量 $h\nu$ 与电子的静止能量 m_0c^2 的比值, $m_0c^2=0.511\text{MeV}$ 。

散射光子能量在特定方向上, 可作如下讨论: ①当 $\varphi=0^\circ$ 时, $h\nu'=h\nu$, $E=0$, 散射光子能量最大, 反冲电子动能为零, 这表明, 在这种情况下, 入射 X 射线光子从电子旁掠过, 它的能量没有损失; ②当 $\varphi=90^\circ$ 时, $h\nu'=\frac{h\nu}{1+\alpha}$ 。由于 $(1+\alpha)>\alpha$, 故 $h\nu'<\frac{h\nu}{\alpha}=0.511\text{MeV}$, 这说明, 不管入射 X 射线光子的能量有多高, 90° 散射光子的能量最大不超过 0.511MeV; ③当 $\varphi=180^\circ$ 时, $h\nu'=\frac{h\nu}{1+2\alpha}$, 散射光子能量最小, 相应地反冲电子动能最大。由于 $(1+2\alpha)>2\alpha$, 故 $h\nu'<\frac{h\nu}{2\alpha}=0.256\text{MeV}$, 这说明, 不管入射 X 射线光子的能量有多高, 180° 散射光子的能量最大不超过 0.256MeV。

康普顿效应电子截面 σ_e 可表示为

$$\sigma_e\propto\frac{Z^0}{h\nu}$$

上式表明: 康普顿效应电子截面与入射光子能量成反比, 与原子序数无关。相应地, 康普顿效应原子截面 σ_a 为

$$\sigma_a=Z\cdot\sigma_e$$

随着入射光子能量的增加, 光电效应发生概率下降, 康普顿效应发生概率相对提高, 在图像上的表现是骨骼与软组织的对比度下降。

当低能光子经历康普顿作用时, 入射光子的大部分能量被散射光子带走, 反冲电子仅获得很少的能量。

4. 电子对效应 在诊断 X 射线能量范围内不会发生电子对效应。只有当光子能量大于 1.02MeV 时,才能发生电子对效应。通过对电子对效应的学习,能够深刻理解能量(光子能量)转换为物质(正、负电子)与物质(正、负电子)转换为能量的意义。电子对湮没过程产生的能量相同,飞行方向正好相反的两个光子,是核医学显像的物理基础。

5. 各种相互作用的相对重要性 光电效应、康普顿效应和电子对效应是 X 射线光子与物质相互作用的三种主要形式,它们与 X 射线光子能量、吸收物质原子序数的关系各不相同,表现为对不同原子序数在不同能量范围,它们的作用截面占总截面的份额有变化。在 10keV~100MeV 能量范围的低能端部分光电效应占优势,中间部分康普顿效应占优势,高能端部分电子对效应占优势。

(四) X 射线在物质中的衰减

1. 线性衰减系数和质量衰减系数 当单能窄束 X 射线穿过厚度为 Δx 的均匀物质层时,其作用截面可定义为:

$$\sigma = -\frac{\Delta N/N}{n \cdot \Delta x}$$

式中 n 为单位体积内靶粒子数, $n \cdot \Delta x$ 可以理解为人射粒子在单位面积上可以与之发生相互作用的靶粒子数, $-\frac{\Delta N}{N}$ 可认为是被吸收的光子数与原来入射的光子数之比,也就是说一个入射粒子与靶物质发生相互作用的概率。

根据截面的定义,从理论上可以推导出单能窄束 X 射线在物质的吸收衰减规律:

$$N = N_0 e^{-\sigma n x} = N_0 e^{-\mu x}$$

式中 μ 为物质的线性衰减系数,其物理意义由 $\mu = \frac{-dI/I}{dx}$ 给出, X 射线光子束在单位厚度上穿过靶物质的作用概率。又由于

$$\sigma = -\frac{dN/N}{n \cdot dx} = \frac{\mu}{n} = \frac{\mu}{\frac{\rho}{M} N_A}$$

此式说明当穿透物质不变[即摩尔质量 M 不变,作用形式一定(即 σ 不变)]时, $\mu \propto \rho$ 。这个事实说明一切 X 射线的图像都是密度图像。由于物质密度会随温度和(或)气压的变化而变化,因此线性衰减系数也将随温度和(或)气压的变化而变化。为了避开这种与物质密度的相关性,故引入质量衰减系数 $\frac{\mu}{\rho}$ 。这时吸收衰减规律可以写为:

$$N = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x}$$

式中 ρx 称为质量厚度。

光子与靶物质可能发生光电效应、康普顿效应、电子对效应等多种形式的相互作用,而相互作用总截面等于各相互作用之和。因此,线性衰减系数可进一步改写为

$$\begin{aligned} \mu &= (\sigma_{\tau} + \sigma_c + \sigma_p + \cdots) \frac{\rho}{M} N_A \\ &= \mu_{\tau} + \mu_c + \mu_p + \cdots \end{aligned}$$

式中 μ_{τ} 、 μ_c 、 μ_p 分别称为光电线性衰减系数、康普顿线性衰减系数、电子对线性衰减系数。

类似地,总质量衰减系数可表示为

$$\begin{aligned}\frac{\mu}{\rho} &= (\sigma_{\tau} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{p}} + \cdots) \frac{N_{\text{A}}}{M} \\ &= \frac{\mu_{\tau}}{\rho} + \frac{\mu_{\text{c}}}{\rho} + \frac{\mu_{\text{p}}}{\rho} + \cdots\end{aligned}$$

显然,光电质量衰减系数 $\frac{\mu_{\text{c}}}{\rho} \propto Z^3$, 电子对质量衰减系数 $\frac{\mu_{\text{p}}}{\rho} \propto Z$, 而康普顿质量衰减系数 $\frac{\mu_{\text{c}}}{\rho} = \sigma_{\text{c}} \frac{N_{\text{A}}}{M} Z$, 除氢的 $Z/M=1$ 外, 其他原子的 $Z/M \approx 0.5 \sim 0.4$, 因此, 康普顿质量衰减系数除氢外几乎与原子序数 Z 无关。

另外, 如何引导从实验上得出单能窄束 X 射线在物质的吸收衰减规律是非常重要的, 这有利于培养学生的“理论实验”方法。

2. 质能转移系数和质能吸收系数 X 射线与物质相互作用过程, 实质上就是 X 射线光子的能量在物质中的转移和吸收的过程, 为此引入能量转移和能量吸收系数。若光子的能量为 $h\nu$, 在一次相互作用中转移给带电粒子的能量和被物质吸收的能量分别为 E_{tr} 和 E_{en} , 则

$$\mu_{\text{tr}} = \mu \frac{E_{\text{tr}}}{h\nu}$$

$$\mu_{\text{en}} = \mu \frac{E_{\text{en}}}{h\nu}$$

式中 μ_{tr} 和 μ_{en} 分别为线性能量转移系数和线性能量吸收系数。相干散射对线性能量转移系数和线性能量吸收系数没有贡献。

同样地, 为避开同物质密度的相关性, 常引入质能转移系数 $\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho}$ 和质能吸收系数 $\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}$ 。

3. 单能 X 射线在均匀物质中的衰减 单能 X 射线在物质中的衰减可分为窄束和宽束两种情况。单能窄束 X 射线在均匀物质中的衰减规律为 $I = I_0 e^{-\mu x}$, 这一指数规律是讨论其他复杂情况的基础。实际上 X 射线大多为宽束辐射。所谓宽束 X 射线是指含有散射线成分的 X 射线束。宽束 X 射线的衰减规律比较复杂, 它可以在窄束衰减规律基础上加以修正, 即:

$$I = BI_0 e^{-\mu x}$$

式中, B 是积累因子, 描述了散射光子对辐射衰减的影响, 相对地反映了宽束与窄束的差别。积累因子的大小与多种因素有关, 例如 X 射线光子的能量、屏蔽层材料的原子序数、屏蔽层厚度、屏蔽层的几何条件、X 射线源和屏蔽层与测量点之间的相对位置等因素。

X 射线强度衰减到其初始值一半时所需某种物质的厚度定义为半价层 (HVL), 它与线性衰减系数的关系可表示为:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

半价层的定义适用于单能和连续 X 射线、宽束和窄束 X 射线。在相同能量下, 宽束 X 射线的半价层大于窄束 X 射线的半价层, 这可从它们的衰减规律上推导出, 当然从实验上更容易得出。

4. 连续 X 射线在均匀物质中的衰减 由于物质对低能 X 射线吸收能力强 (氢除

外), 所以连续谱 X 射线通过物质层后, 虽然总的强度在减小, 但硬 X 射线相对成分增加, X 射线变硬, 即 X 射线的有效能量提高。从 X 射线能谱形状上看, 其变化是: 能谱变矮变窄, 即 X 射线硬化。连续 X 射线的有效能量是通过测量得到的, 其原理是: 如果一连续能谱 X 射线的半价层与某单能 X 射线的半价层相等, 则可认为它们等效, 此时单能 X 射线的能量称为连续 X 射线的有效能量, 一旦测出连续 X 射线的半价层, 根据公式 $HVL \cdot \mu = 0.693$, 得出线性衰减系数, 再通过查表找出线性衰减系数所对应的能量。

连续 X 射线在均匀物质中的衰减规律为:

$$I = I_{01}e^{-\mu_1 x} + I_{02}e^{-\mu_2 x} + \dots + I_{0n}e^{-\mu_n x}$$

式中, $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}$ 表示各种能量 X 射线束的入射强度; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 表示各种能量 X 射线的线性衰减系数; x 为吸收物质层的厚度。

如果知道连续 X 射线的能谱 $N(E)$, 则衰减规律可进一步表示为:

$$I = \int_0^{E_{\max}} N(E) E e^{-\mu(E)x} dE$$

此表达式具有更广泛的用途和意义。

5. X 射线在非均匀物质中的衰减

(1) 单能窄束 X 射线在非均匀物质中的衰减: 将非均匀物质等分为厚度是 x 的 n 个薄层, 每个薄层可视为均匀, 其线性衰减系数为 μ_i , 入射 X 射线的强度为 I_0 , 则通过第一个薄层后的 X 射线强度 $I_1 = I_0 e^{-\mu_1 x}$, 第二个薄层后的 X 射线强度 $I_2 = I_1 e^{-\mu_2 x} = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2)x}$, 显然第 n 个薄层后的 X 射线强度:

$$I_n = I_{n-1} e^{-\mu_n x} = \dots = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)x}$$

(2) 连续窄束 X 射线在非均匀物质中的衰减: 将连续 X 射线在均匀物质中的衰减和单能窄束 X 射线在非均匀物质中的衰减结合起来考虑。首先假定连续 X 射线是由能量为 $h\nu_1, h\nu_2, \dots, h\nu_m$ 的光子组成, 相应的 X 射线强度为 $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0m}$; 其次将非均匀物质等分为厚度是 x 的 n 个薄层, 每个薄层可视为均匀, 其线性衰减系数为 μ_{mn} 。连续窄束 X 射线在非均匀物质中的衰减规律为:

$$I = I_{01} e^{-(\mu_{11} + \mu_{12} + \dots + \mu_{1n})x} + I_{02} e^{-(\mu_{21} + \mu_{22} + \dots + \mu_{2n})x} + \dots + I_{0m} e^{-(\mu_{m1} + \mu_{m2} + \dots + \mu_{mn})x}$$

(3) 诊断 X 射线在人体内的衰减: 诊断用的 X 射线是宽束、连续的, 而人体又是非均匀的, 因此 X 射线在人体中的衰减规律可表示为:

$$I = BI_0 e^{-\mu' d}$$

其中, B 为积累因子, d 为被检体的厚度, μ' 为被检体的有效线性衰减系数, 是 X 射线有效能量和人体的有效原子序数下的线性衰减系数。

被辐射的物质通常是以化合物形式出现的, 单元素物质的光电吸收的至关因素是原子序数 Z , 因此希望用一个有效或平均原子序数 $\bar{Z}$ 来表示化合物对 X 射线吸收的能力大小。

较为简单的计算公式为 $\bar{Z} = \left[\frac{\sum a_i Z_i^4}{\sum a_i Z_i} \right]^{1/3}$, a_i 为第 i 种元素原子在分子中的原子个数,

Z_i 是第 i 种元素的原子序数。 $\bar{Z}$ 应理解为化合物对 X 射线吸收能力的综合表示, 它不是经典意义上的原子序数。

三、章后习题解答

1-1 产生 X 射线需要哪些条件?

答: 这个题目实际上把高速电子轰击靶产生 X 射线这一事实在条件上予以明确。首先要有产生电子的阴极和被轰击的阳极靶, 电子加速的环境条件即在阴极和阳极间建立直流高压, 为防止阴极和阳极氧化以及电子与中性分子碰撞的数量损失, 要制造压强小于 10^{-4}Pa 的真空环境, 为此要有一个耐压、密封的管壳。

1-2 影响 X 射线管有效焦点大小的因素有哪些?

答: 影响有效焦点大小的因素有: 灯丝大小、管电压和管电流、靶倾角、投照方向等。

1-3 在 X 射线管中, 若电子到达阳极靶面的速度为 $1.5 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 求连续 X 射线谱的最短波长和相应的最大光子能量。

解: 此题的思路是由动能公式 $\frac{1}{2}mv^2$ 求出电子的最大动能, 此能量也是最大的光子能量, 从而求出最短波长。但当速度可与光速 $c=3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 相比较时, 必须考虑相对论效应, 我们可以用下面公式求出运动中电子的质量。

$$m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{9.11 \times 10^{-31}}{\sqrt{1-(1/2)^2}} = 1.052 \times 10^{-30} \text{kg}$$

$$h\nu_{\max} = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{1}{2} \times 1.052 \times 10^{-30} \times (1.5 \times 10^8)^2 = 1.18 \times 10^{-14} \text{J} = 73.8 \text{keV}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{h\nu_{\max}} = 0.0169 \text{nm}$$

此题的结果告诉我们, 管电压为 73.8kV。反过来, 如果知道管电压, 求电子到达阳极靶表面的电子速度时, 同样需要考虑相对论效应。

1-4 下面有关连续 X 射线的解释, 正确的是

- A. 连续 X 射线是高速电子与靶物质轨道电子相互作用的结果
- B. 连续 X 射线是高速电子与靶物质的原子核电场相互作用的结果
- C. 连续 X 射线的最大能量决定于管电压
- D. 连续 X 射线的最大能量决定于靶物质的原子序数

正确答案: B、C

1-5 下面有关特征 X 射线的解释, 正确的是

- A. 特征 X 射线是高速电子与靶物质轨道电子相互作用的结果
- B. 特征 X 射线的产生与高速电子的能量无关
- C. 特征 X 射线的波长由跃迁电子的能级差决定
- D. 滤过使特征 X 射线变硬

正确答案: A、C

1-6 影响 X 射线能谱的因素有哪些?

答: 电子轰击阳极靶产生的 X 射线能谱的形状(归一化后)主要由管电压、靶倾角和固有滤过决定。当然, 通过附加滤过也可改变 X 射线能谱的形状。

1-7 影响 X 射线强度的因素有哪些?

答: X射线在空间某一点的强度是指单位时间内通过垂直于X射线传播方向上的单位面积上的光子数量与能量乘积的总和。可见, X射线强度是由光子数目和光子能量两个因素决定的。影响X射线强度(量与质)的因素很多, 主要有: 增加毫安秒, X射线的质不变、量增加, X射线强度增加; 增加管电压, X射线的质和量均增加, X射线强度增加; 提高靶物质原子序数, X射线的质和量均增加, X射线强度增加; 增加滤过, X射线的质增加、但X射线的量减少, X射线强度减小; 增加离X射线源的距离, X射线的质不变, X射线的量减少, X射线强度减小; 管电压的脉动, X射线的质和量均减少, X射线强度减小。

1-8 原子放出X射线前是静止的, 为了保持活动不变, 当它发射X射线时, 原子经历反冲。设原子的质量是 M , X射线的能量为 $h\nu$, 试计算原子的反冲动能。

解: 此题的关键在于利用X射线的动量和能量的关系: $p = \frac{h\nu}{c}$ 。

根据动量守恒, 可知: $Mv = p = \frac{h\nu}{c}$

这样, 原子的反冲动能 $\frac{1}{2} Mv^2 = \frac{(h\nu)^2}{2Mc^2}$

1-9 X射线摄影中, 光电效应和康普顿效应对影像质量和患者防护各有何利弊?

答: 放射诊断学中的光电效应, 可从利弊两个方面进行评价。有利的方面, 能产生质量好的影像, 其原因是: ①不产生散射线, 大大减少了照片的灰雾; ②可增加人体不同组织和造影剂对射线的吸收差别, 产生高对比度的X射线照片, 对提高诊断的准确性有好处。钨靶乳腺X射线摄影, 就是利用低能X射线在软组织中因光电吸收的明显差别产生高对比度照片的。有害的方面是, 入射X射线通过光电效应可全部被人体吸收, 增加了受检者的剂量。从全面质量管理观点讲, 应尽量减少每次X射线检查的剂量。

康普顿效应中产生的散射线是辐射防护中必须引起注意的问题。在X射线诊断中, 从受检者身上产生的散射线其能量与原射线相差很少, 并且散射线比较对称地分布在整个空间, 这个事实必须引起医生和技术人员的重视, 采取相应的防护措施。另外, 散射线增加了照片的灰雾, 降低了影像的对比度, 但与光电效应相比受检者的剂量较低。

1-10 0.5cm的铝将单能X射线强度衰减到46.7%, 试求该光子束的HVL。

解: 此题是衰减规律的简单应用。

根据衰减规律 $I = I_0 e^{-\mu x}$, 可知: $46.7\% I_0 = I_0 e^{-0.5\mu}$, 从而求得线性衰减系数

$$\mu = 1.523 \text{ cm}^{-1}$$

再根据半价层HVL与线性衰减系数 μ 的关系: $HVL \cdot \mu = 0.693$, 得:

$$HVL = 0.455 \text{ cm Al}$$

1-11 质量衰减系数、质能转移系数和质能吸收系数三者间的区别和联系。

答: X射线光子与吸收物质发生相互作用时, 一般情况下, 光子的一部分能量以散射辐射的方式从吸收体中辐射掉, 另一部分转化为高速电子或正电子的动能。

质量衰减系数 $\frac{\mu}{\rho}$ 表示入射X射线与物质相互作用的总概率, 它包括所有可能发生的相互作用的概率之和。质能转移系数 $\frac{\mu_{tr}}{\rho}$ 表示相互作用过程中光子能量转移给带电粒子

的那部分份额的总和。不过,由于光核反应及其他一些过程的发生概率很小,因而带电粒子的能量主要来自光电效应、康普顿效应和电子对效应三个主要过程。传递给带电粒子的能量,其中又有一部分转移成韧致辐射。质能吸收系数 $\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho}$ 表示扣除韧致辐射后,光子交给带电粒子的能量用于造成电离、激发,从而真正被物质吸收的那部分能量所占的份额。

在数量上它们之间的关系为:

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{E_{\text{tr}}}{h\nu}, \quad \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{E_{\text{en}}}{h\nu}, \quad \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = (1-g) \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho}$$

1-12 已知入射光子的能量为 $h\nu$, 散射角为 φ , 试求散射光子的能量。并分析低能入射和高能入射光子在 90° 方向上光子散射的情况。电子的静止能量为 $m_e c^2$ 。

解:由能量守恒和动量守恒,可得,散射光子能量 $h\nu'$ 为:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1+\alpha(1-\cos\varphi)}$$

α 为入射光子能量 $h\nu$ 与电子的静止能量 $m_0 c^2$ 的比值, $m_e c^2=0.511\text{MeV}$ 。

当 $\varphi=90^\circ$ 时, $h\nu' = \frac{h\nu}{1+\alpha}$ 。由于 $(1+\alpha) > \alpha$,故 $h\nu' < \frac{h\nu}{\alpha} = 0.511\text{MeV}$,这说明,不管入射X射线光子的能量有多高, 90° 散射光子的能量最大不超过 0.511MeV 。

1-13 $I=I_0 e^{-\mu x}$ 的适用条件是什么?

答: $I=I_0 e^{-\mu x}$ 的适用条件是:单能、窄束、均匀物质。

1-14 若空气中各组分的质量百分比为氮75%,氧23.2%,氩1.3%,试计算在能量为 20keV 光子作用下,空气的质量衰减系数。已知氮、氧、氩的质量衰减系数分别为0.36、0.587和 $8.31(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$ 。

答:根据混合物或化合物的质量衰减系数公式: $\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i P_i$ 来计算。

空气的质量衰减系数为:

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\rho} &= \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_N P_N + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_O P_O + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{Ar}} P_{\text{Ar}} \\ &= 0.36 \times 0.75 + 0.587 \times 0.232 + 8.31 \times 0.013 \\ &= 0.514 \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

四、补充习题

(一) 名词解释

1. 实际焦点
2. 有效焦点
3. 阳极效应
4. 光电效应
5. 作用截面
6. 康普顿效应