

临床医学 影像技术新进展

(上)

刘海明等◎主编



临床医学影像技术新进展

(上)

刘海明等◎主编

图书在版编目 (C I P) 数据

临床医学影像技术新进展/刘海明等主编. -- 长春:
吉林科学技术出版社, 2017.4
ISBN 978-7-5578-2089-3

I. ①临… II. ①刘… III. ①影象诊断 IV.
①R445

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第077466号

临床医学影像技术新进展

LINCHUANG YIXUE YINGXIANG JISHU XIN JINZHAN

主 编 刘海明等
出 版 人 李 梁
责任编辑 许晶刚 陈绘新
封面设计 长春创意广告图文制作有限责任公司
制 版 长春创意广告图文制作有限责任公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
字 数 1205千字
印 张 48.5
印 数 1—1000册
版 次 2017年4月第1版
印 次 2018年3月第1版第2次印刷

出 版 吉林科学技术出版社
发 行 吉林科学技术出版社
地 址 长春市人民大街4646号
邮 编 130021
发行部电话/传真 0431-85635177 85651759 85651628
85652585 85635176
储运部电话 0431-86059116
编辑部电话 0431-86037565
网 址 www.jlstp.net
印 刷 永清县晔盛亚胶印有限公司

书 号 ISBN 978-7-5578-2089-3
定 价 145.00元 (全二册)

如有印装质量问题 可寄出版社调换
因本书作者较多, 联系未果, 如作者看到此声明, 请尽快来电或来函与编辑部联系, 以便商洽相应稿酬支付事宜。
版权所有 翻印必究 举报电话: 0431-85677817

编委会

主 编: 刘海明 刘福山 龚雪鹏

曹 伟 郝翠娟 薛 洁

副主编: 武秀兰 王田蔚 刘 彬

杜向东 赵丽萍 刘炳乐

原卫民 周茂荣 陈晓声

编 委: (按照姓氏笔画)

王田蔚 吉林大学中日联谊医院

孔令馨 牡丹江医学院红旗医院

刘 波 兖矿集团有限公司总医院

刘炳乐 乌鲁木齐市友谊医院

刘海明 中国人民解放军第二一一医院

刘 彬 青岛大学附属医院

刘博强 牡丹江医学院红旗医院

刘福山 新汶矿业集团中心医院

杜向东 新疆生产建设兵团医院

杨洪艳 牡丹江医学院红旗医院

邹彩红 甘肃省静宁县人民医院

宋 爽 牡丹江医学院红旗医院

张 卓 牡丹江医学院第二附属医院

陈晓声 威海市立医院

武秀兰 新疆医科大学附属肿瘤医院

周茂荣 包头市中心医院

孟 晔 牡丹江医学院第二附属医院

赵丽萍 新疆医科大学第二附属医院

郝翠娟 烟台毓璜顶医院

原卫民 海军青岛第一疗养院

曹 伟 徐州市第一人民医院

龚雪鹏 中国人民解放军第 451 医院

薛 洁 郑州人民医院



刘海明,1971 年出生,男。1989—1994 年哈尔滨医科大学医学影像与核医学专业学习,本科毕业后入伍到解放军第二一一医院,在放射科工作。1999—2002 年哈尔滨医科大学医学影像与核医学专业硕士研究生学习。毕业后回二一一医院放射科工作至今。其间,2000 年晋升为主治医师。2010 年晋升为副主任医师,现任放射科副主任。获军队医疗成果奖一项,著书三部,发表省级、国家级论文 20 余篇。技术专长 CT 三维后处理技术、CT 介入诊疗及 CT 疑难病诊断。



刘福山,男,1972 年 7 月出生,1995 年毕业于青岛医学院医学影像专业,现为新汶矿业集团中心医院影像科主任,副主任医师,从事影像诊断工作二十余年,擅长胸腹部影像诊断,发表论文十余篇,副主编专著 2 部。现为山东省医师协会核医学与分子影像医学分会委员,泰安市医学影像学研究会委员。



龚雪鹏,男,1968 年 2 月生,硕士学位,任职医学影像科副主任医师已近 10 年,现为解放军第 451 医院 MR 室负责人,熟悉 DR、CT、MR、DSA 等所有医疗业务,具有较丰富的放射影像诊断工作经验,尤其擅长中枢神经系统、大血管及胸腹部等疾病的 CT、MR 诊断,现主要从事 MR 诊断、教学及管理工作,开展新技术新业务 3 项,已在统计源期刊及核心期刊上发表论文 40 余篇,副主编及参编专著各一部。多次被评为优秀医务工作者和受到上级嘉奖,荣立三等功一次。

前 言

医学影像学在医学诊断领域是一门新兴的学科,不仅在临床的应用上非常广泛,对疾病的诊断提供了很大的科学和直观的依据,可以更好的配合临床的症状、化验等方面,为最终准确诊断病情起到不可替代的作用;同时像介入放射在治疗方面也有很好的应用。随着医学科技的发展,临床医学影像技术也不断提升,各种新型影像技术层出不穷并且逐渐广泛运用于临床诊断与治疗之中。鉴于临床医学影像学的飞速进展,本编委会特编写此书,以供临床医学影像科相关医务人员参考借鉴。

本书共分为十八章,介绍了临床常用影像技术以及临床疾病诊断中的应用,包括:普通 X 线成像技术、CT 成像技术、MR 成像技术、循环系统疾病的放射影像诊断、中枢神经系统疾病的 CT 诊断、五官及颈部疾病的 CT 诊断、乳腺疾病的影像诊断、消化系统疾病的 CT 诊断、消化系统疾病的 MRI 诊断、泌尿系统与肾上腺疾病的影像诊断、骨骼与肌肉系统疾病的影像诊断、超声技术概述、浅表小器官疾病的超声诊断、心脏疾病的超声诊断、肝胆疾病的超声诊断、妇产科疾病的超声诊断、临床疾病的介入放射应用以及 SPECT 显像与功能检查。书中多图配合文字解释,更为直观的展示了影像诊断的方法与技巧。

为了进一步提高医学影像科医务人员诊疗水平,本编委会人员在多年临床经验基础上,参考诸多书籍资料,认真编写了此书,望谨以此书为广大医学影像科临床医务人员提供微薄帮助。

本书在编写过程中,借鉴了诸多医学影像科相关临床书籍与资料文献,在此表示衷心的感谢。由于本编委会人员均身负一线临床工作,故编写时间仓促,难免有错误及不足之处,恳请广大读者见谅,并给予批评指正,以更好地总结经验,以起到共同进步、提高医学影像科临床诊治水平的目的。

本书共 120.5 万字,其中主编中国人民解放军第二一一医院刘海明编写了第二章的部分内容及第八章,共编写 13.4 万字;主编新汶矿业集团中心医院刘福山编写了第三章的部分内容,共编写 11 万字;主编中国人民解放军第 451 医院龚雪鹏编写了第七章及第九章的部分内容,共编写 10.6 万字;主编徐州市第一人民医院曹伟编写了第五、六章,共编写 10 万字;主编烟台毓璜顶医院郝翠娟编写了第一章的部分内容,共编写 5.5 万字;主编郑州人民医院薛洁编写了第十四章及第十六章的部分内容,共编写 5.7 万字;副主编新疆医科大学附属肿瘤医院武秀兰编写了第十二章的部分内容,共编写 4 万字;副主编吉林大学中日联谊医院王田蔚编写了第十七章,共编写 6.5 万字;副主编青岛大学附属医院刘彬编写了第十八章,共编写 4.4 万字;副主编新疆生产建设兵团医院杜向东编写了第一、十、十一章的部分内容,共编写了

3.7 万字; 副主编新疆医科大学第二附属医院赵丽萍编写了第三章及第十、十一章的部分内容, 共编写 5.8 万字; 副主编乌鲁木齐市友谊医院刘炳乐编写了第五章的部分内容, 共编写 3.5 万字; 副主编海军青岛第一疗养院原卫民编写了第十章的部分内容, 共编写 3.5 万字; 副主编包头市中心医院周茂荣编写了第九章的部分内容, 共编写 4.4 万字; 副主编威海市立医院陈晓声编写了第三章的部分内容, 共编写 2 万字。编委甘肃省静宁县人民医院邹彩红编写了第十二章的部分内容及第十三、十五章, 共编写 11 万字; 编委兖矿集团有限公司总医院刘波编写了第三、四章的部分内容, 共编写 1.8 万字; 编委牡丹江医学院红旗医院孔令馨编写了第十二章的部分内容, 共编写 2.6 万字; 编委牡丹江医学院红旗医院刘博强编写了第四章的部分内容, 共编写 2.3 万字; 编委牡丹江医学院第二附属医院孟晔编写了第十二章的部分内容, 共编写 2.3 万字; 编委牡丹江医学院第二附属医院张卓编写了第四章的部分内容, 共编写 1.9 万字; 编委牡丹江医学院红旗医院宋爽编写了第十二、十六章的部分内容, 共编写 1.3 万字; 编委牡丹江医学院红旗医院杨洪艳编写了第十六章的部分内容, 共编写 2 万字。

《临床医学影像技术新进展》编委会

2017 年 4 月

目 录

第一章 普通 X 线成像技术	(1)
第一节 普通 X 线成像基础	(1)
第二节 X 线防护	(13)
第三节 普通 X 线摄影技术	(20)
第四节 X 线造影检查	(50)
第二章 CT 成像技术	(56)
第一节 CT 构造与成像原理	(56)
第二节 CT 扫描技术	(72)
第三节 CT 图像质量控制	(78)
第四节 CT 临床检查技术	(85)
第三章 MR 成像技术	(125)
第一节 磁共振构造与成像原理	(125)
第二节 磁共振成像的脉冲序列	(138)
第三节 MR 图像质量控制	(161)
第四节 磁共振临床检查技术	(167)
第四章 循环系统疾病的放射影像诊断	(215)
第一节 影像检查技术	(215)
第二节 正常影像表现	(216)
第三节 基本病变影像表现	(221)
第四节 获得性心脏病	(229)
第五节 先天性心脏病	(236)
第六节 心包病变	(241)
第七节 大血管病变	(243)
第五章 中枢神经系统疾病的 CT 诊断	(247)
第一节 正常头颅 CT 表现	(247)
第二节 基本病变 CT 表现	(248)
第三节 常见疾病诊断	(248)
第四节 颅内常见肿瘤 CT 鉴别诊断	(272)
第六章 五官及颈部疾病的 CT 诊断	(274)
第一节 正常五官及颈部 CT 表现	(274)
第二节 基本病变 CT 表现	(277)
第三节 常见疾病诊断	(279)
第四节 五官及颈部常见肿块鉴别诊断	(309)
第七章 乳腺疾病的影像诊断	(312)
第一节 正常影像学表现	(312)

第二节	异常影像学表现	(317)
第三节	乳腺感染性疾病	(327)
第四节	乳腺增生	(331)
第五节	乳腺良性肿瘤	(335)
第六节	乳腺间叶组织肿瘤	(342)
第七节	乳腺癌	(344)
第八章	消化系统疾病的 CT 诊断	(348)
第一节	正常消化道及实质脏器 CT 表现	(348)
第二节	食管常见疾病	(349)
第三节	胃和十二指肠常见疾病	(351)
第四节	肝常见疾病	(354)
第五节	胆囊常见病变	(367)
第六节	胰腺常见疾病	(369)
第七节	脾常见疾病	(375)
第八节	肠道常见疾病	(377)
第九节	消化系统常见疾病 CT 鉴别诊断	(385)
第九章	消化系统疾病的 MRI 诊断	(388)
第一节	胃肠道和腹膜腔病变	(388)
第二节	腹膜后病变	(400)
第三节	肝脏弥漫性病变	(406)
第四节	肝脏炎症和寄生虫病	(415)
第五节	肝脏原发性恶性肿瘤	(421)
第六节	胆道炎症	(435)
第七节	胆石症	(441)
第八节	胆道恶性肿瘤	(443)
第十章	泌尿系统与肾上腺疾病的影像诊断	(448)
第一节	检查方法	(448)
第二节	正常影像学表现	(450)
第三节	基本病变的影像表现	(456)
第四节	肾脏疾病	(459)
第五节	膀胱疾病	(477)
第六节	肾上腺病变	(478)
第十一章	骨骼与肌肉系统疾病的影像诊断	(484)
第一节	正常影像学表现	(484)
第二节	异常影像学表现	(488)
第三节	不同成像技术的临床应用	(491)
第四节	骨与关节创伤	(493)
第五节	骨关节发育畸形	(498)
第六节	骨关节化脓性感染	(502)

第七节	骨关节结核	(504)
第八节	骨缺血性坏死	(507)
第九节	骨发育障碍性疾病	(509)
第十二章	超声技术概述	(514)
第一节	超声诊断的物理基础	(514)
第二节	多普勒血流显像	(530)
第三节	超声成像技术及伪像	(543)
第四节	超声诊断仪的应用	(552)
第五节	超声诊断的检查方法	(559)
第十三章	浅表小器官疾病的超声诊断	(572)
第一节	眼部超声诊断	(572)
第二节	乳腺疾病的超声诊断	(587)
第三节	甲状腺与颈部肿块的超声诊断	(593)
第四节	颌面部疾病的超声诊断	(603)
第十四章	心脏疾病的超声诊断	(609)
第一节	心脏瓣膜疾病	(609)
第二节	先天性心脏病	(617)
第三节	心肌和心包疾病	(623)
第四节	冠心病	(626)
第十五章	肝胆疾病的超声诊断	(627)
第一节	肝超声探测基础	(627)
第二节	肝疾病超声诊断	(634)
第三节	正常胆囊与胆管超声基础	(646)
第四节	胆囊疾病的超声诊断	(651)
第十六章	妇产科疾病的超声诊断	(660)
第一节	子宫附件疾病	(660)
第二节	正常早期妊娠	(669)
第三节	正常中晚期妊娠	(671)
第四节	异常妊娠	(678)
第五节	胎盘异常	(686)
第六节	胎儿先天性畸形	(688)
第十七章	临床疾病的介入放射应用	(694)
第一节	颅脑及头颈部疾病	(694)
第二节	胸部疾病	(703)
第三节	腹部疾病	(711)
第四节	脊柱骨关节疾病	(729)
第十八章	SPECT 显像与功能检查	(736)
参考文献		(765)

第一章 普通 X 线成像技术

第一节 普通 X 线成像基础

本节主要叙述 X 线成像的基本理论,分别介绍了 X 线的产生及其特性,X 线与物质的相互作用,X 线影像的形成及其影响。

一、X 线产生及其特性

(一)X 线的发现

1895 年 11 月 8 日,德国物理学家伦琴(Rontgen)在研究阴极射线管气体放电时,发现附近涂有铂氰化钡的纸板上能发出肉眼可见的荧光,并且将手置于阴极射线管与铂氰化钡板之间,在纸板上显示出手的轮廓及骨骼影像。伦琴推断这是一种特殊的射线,由于当时不清楚这种射线的性质,便借用数学上代表未知数的符号“X”来代替,称之为 X 射线(X-ray),后人又称之为伦琴射线。

(二)X 线产生的条件

在 X 线管中,高速运动的电子撞击到阳极(anode)靶物质金属原子内部,经过与靶原子的多次碰撞,能量逐渐损失,其能量损失分为碰撞损失(collision loss)和辐射损失(radiation loss)。高速运动的电子与原子的外层电子相互作用而损失能量统称为碰撞损失,损失的能量全部转化为热能。当高速运动的电子与原子核或内层电子作用而损失能量统称为辐射损失,其损失的能量大部分以 X 射线的形式辐射出去。

X 线是在真空条件下,高速运动的电子撞击到金属原子内部,使原子核外层轨道电子发生跃迁而放射的一种能。X 线的产生必须具备以下条件:①电子源;②在真空条件下,高电压产生的强电场和高速运动的电子流;③适当的障碍物(靶面)来接受高速运动电子所带的能量,使高速电子所带的动能部分转变为 X 线能。

若靶面物质原子序数较低,其内层电子结合能小,高速电子撞击原子内层电子所产生的 X 线能量小、波长较长;原子序数较高的元素如钨,其原子内层电子结合能大,当高速电子撞击时,便产生波长短、能量大的 X 线。现在用于 X 线诊断与治疗的 X 线管的靶面绝大多数是由原子序数较高的钨制成的。有些具有特殊用途(软组织摄影)的 X 线管靶面是由原子序数较低的金属(如钼)制成的,它能产生波长较长的 X 射线,称之软射线。

(三)X 线的本质

X 线属于电磁辐射的一种,和其他光线一样,具有微粒和波动二象性。X 线的波长范围为 $6 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ cm}$,医学诊断用的 X 线管电压通常在 $40 \sim 150 \text{ kV}$,相应的 X 线波长为 $8 \times 10^{-10} \sim 3.1 \times 10^{-9} \text{ cm}$ 。

1. 微粒性 经 X 线照射后,荧光屏及增感屏上的某些化学物质(如铂氰化钡、钨酸钙、碘化铯等)的原子外层轨道电子发生跃迁现象而产生荧光,也使气体或某些物质会发生电离。X 线光子与某些金属原子中的轨道电子碰撞,该原子轨道上的电子得到足够能量而脱出,物质会失去负电荷而产生光电效应。光子理论把 X 线看作是由一个个的微粒—光子组成,而这些

光子具有一定的能量($E=h\nu$)和动质量($m=\frac{h\nu}{c^2}$)这些现象说明了 X 线具有微粒性。

2. 波动性 X 线是一种波长很短的电磁波,实验证实了 X 线具有波的干涉和衍射等现象。X 线是一种横波,以波动的方式传播,在真空中的传播速度与光速相同($c=3\times 10^{10}$ cm/s)。X 线的波长用 λ 表示,频率用 ν 表示, c 代表其传播速度,三者的关系为:

$$c=\lambda\nu \text{ 或 } \lambda=\frac{c}{\nu} \quad \nu=\frac{c}{\lambda}$$

3. X 线的二象性及其统一 X 线在与物质相互作用时表现了微粒性,每个光子具有一定的能量、动量和质量,能产生光电效应,能激发荧光物质发出荧光等现象。X 线又和其他光线一样,在传播的过程中表现了波动性,具有频率和波长,并有干涉、衍射、反射和折射等现象。这些都充分说明了 X 线不仅具有微粒性和波动性,且微粒性和波动性并存。量子力学把 X 线(光波)看作是概率波,即光子在空间里存在的概率,它把光的微粒性和波动性统一起来,X 线既呈现微粒性又呈现波动性。干涉、衍射等表现了波动性,而光电效应等则表现为微粒性。

(四)X 线的质与量

X 线球管靶面发出的 X 线,在各个方向上的强度分布是不均匀的,它的分布与靶物质的种类、厚度、靶面倾斜角度等均有一定的关系。所谓 X 线强度(X-ray intensity),是指在单位时间内垂直于 X 线传播方向的单位面积上所通过的光子数目和能量的总和。X 线管长轴方向上的 X 线强度分布是非对称性的,近阳极端的 X 线强度小,近阴极端的 X 线强度大;X 线管短轴方向上的 X 线强度分布是基本对称的。

在实际应用中,常用质和量来表示 X 线强度。X 线的质(线质),一般用于表示 X 线硬度(X-ray hardness),即穿透物质的能力,它代表光子的能量。X 线的质仅与光子能量有关,能量越大,X 线的波长越短,穿透力越强,X 线的质越硬;反之,X 线的硬度就小。X 线管发出的是波长不等的连续 X 线谱,很难用一个数值来表示。由于 X 线的光子能量是由管电压决定的,一般用管电压(kV)数值间接表示 X 线的质,也可用半价层来表示 X 线质。半价层(half value layer, HVL)是指入射的 X 线强度减弱为原来的一半时某均匀吸收体的厚度,半价层越厚,表示 X 线质越硬。

X 线的量是 X 线束中的光子数目,在实际工作中,常用 X 线管的管电流与照射时间的乘积毫安秒(mAs)来表示 X 线的量。管电流越大,代表 X 线管中被加速的电子数目越多,电子撞击阳极靶面产生的 X 线量越多,则 X 线强度越大。X 线照射时间是指球管产生 X 线的时间。显然,X 线的量与管电流及照射时间成正比。

(五)X 线效应

X 射线是一种电磁波,除具有电磁波的共同属性外,还具有以下的性质:

1. 物理效应

(1)穿透作用(penetration action):穿透作用是指 X 线穿过物质时不被吸收的本领,其穿透性不仅与 X 线的能量有关,还与被穿透物质的本身结构和原子性质有关。光子能量越大,产生 X 线波长越短,对物质的穿透作用越强。物质的原子序数高、密度大,吸收 X 线量多,X 线穿透力相对较弱;物质原子序数低、密度小,吸收 X 线量少,X 线穿透力相对较强。

X 线对人体各组织穿透性的差异是 X 线医学成像的基础。

(2)荧光作用(fluorescence action):某些荧光物质,如碘化铯、钨酸钙、铀氰化钡及某些稀

土元素等,受到 X 线照射时,物质原子发生电离或被激发处于受激状态。当被激发的原子恢复到基态时,电子的能级跃迁辐射出可见光和紫外线光谱,即荧光具有这种特性的物质叫荧光物质,这种物质间的作用称荧光作用。透视用的荧光屏,摄影中用的增感屏,影像增强器的输入屏以及平板探测器的碘化铯等物质都是利用这种特性制成的。

(3)电离作用(ionization action):物质受到 X 线照射,原子核外电子脱离原子轨道,这种作用称为电离作用。虽然 X 线本身不带电,但具有足够能量的 X 线光子撞击物质原子中的轨道电子,使电子脱离原子而产生第一次电离;脱离原子的电子获得较大能量后又与其他原子碰撞,产生二次电离。这种由电离作用产生带电荷的正、负离子,在固体和液体中很快又复合,在气体中可由正负电极吸引此种离子形成电离电流。收集气体中的电离电荷,测定它的强弱,便可知道 X 线的量,X 线剂量测量仪便是根据这种原理制成的。电离作用是 X 线损伤和治疗的基础。

2. 化学效应

(1)感光作用(sensitization action):由于电离作用,X 线照射到胶片,使胶片上的卤化银发生光化学反应,出现银颗粒的沉淀,称为 X 线的感光作用。由于 X 线穿透人体后的强度分布不同,使卤化银的感光度发生差异,经显影后产生一定的黑化度,显示出人体不同密度的影像。如 X 线摄影和工业探伤等。

(2)着色作用(pigmentation action):某些物质,如 CR 的成像板、增感屏、铅玻璃、水晶等,经 X 线长时间照射后,其结晶体脱水渐渐改变颜色,发生脱水、着色,称为着色作用(脱水作用)。

3. 生物效应 生物细胞特别是增殖性细胞经一定量的 X 线照射后,可以产生抑制、损伤甚至坏死,即为 X 线的生物效应(biological effect)。不同的组织细胞对 X 线的敏感性不同,会出现不同的反应。放射治疗就是利用 X 线的生物效应治疗病变,对此,放射线工作者及受检者应该注意 X 线的防护。

(六)X 线产生的效率及其影响

X 线产生的效率是指发生的 X 线能量占全部电子撞击阳极靶面总能量的百分率。电子撞击阳极靶面的全部能量中,碰撞损失的能量最后将全部转化为热能,仅有辐射损失能量的极小部分(约 0.2%)转变为 X 线能。产生 X 线的效率(η)通常可用公式计算:

$$\eta = K \cdot Z \cdot kV$$

式中 K 为常数 10^{-9} ,Z 为阳极靶面物质的原子序数,kV 为管电压。产生 X 线的效率与靶面物质的原子序数及管电压成正比。大部分低能量的电子在撞击阳极靶面时,只增加了原子热运动,产生大量的热能要通过阳极散出。若焦点的温度过高,阳极会损坏或熔化,这是 X 线管不能长时间连续使用的根本原因,也是用熔点较高的钨作阳极靶面的原因之一。

X 线管阳极靶面允许产热(或能承受热量)的最大负荷量,称为 X 线管的容量,它是球管的重要参数之一。影响 X 线产生效率的因素很多,主要有管电压、阳极靶面物质、管电流等。

1. 管电压的影响 高速电子撞击阳极靶物质的最大能量,取决于管电压的峰值。若改变管电压,即改变了光子的最大能量,必然改变整个 X 线谱的形式。图 1-1 是管电流不变时,管电压对连续 X 线谱的影响。随着管电压的升高,曲线所对应的强度峰值和最短波长的位置均向短波方向(高能端)移动,X 线强度相应地增强,产生 X 线的效率越高。

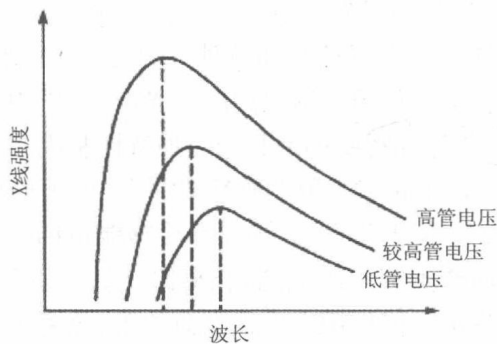


图 1-1 管电压对 X 线谱的影响

2. 阳极靶面物质的影响 连续放射是由高速运动的电子与所撞击的靶原子核相互作用所产生的,其能量与靶物质的原子序数成正比。在其他条件不变时,靶物质的原子序数越高,产生的 X 线强度越大。标识放射由 X 线管阳极靶物质的原子结构特性所决定,靶物质的原子序数越高,轨道电子结合能越大,产生标识放射的能量也越大。图 1-2 是其他条件相同时,原子序数较高的钨和原子序数较低的锡产生的 X 线谱。可以看出,两条曲线的两个端点重合,最大强度都对应于相同的光子能量处,但钨产生 X 线谱的强度峰值高于锡产生的强度峰值,说明钨产生 X 线强度比锡大,可见原子序数越高,产生 X 线的效率越高。

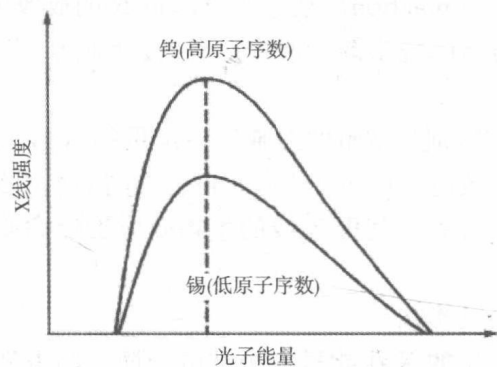


图 1-2 原子序数对 X 线谱的影响

3. 管电流的影响 当管电压固定时,管电流越大,撞击阳极靶面的电子数目越多,产生的 X 线强度越大。图 1-3 是管电压不变时,管电流对 X 线谱的影响。不同管电流的两条曲线的最短波长一样,但高管电流曲线的强度峰值比低管电流曲线的强度峰值大。说明高管电流的 X 线强度大,产生 X 线的效率高。

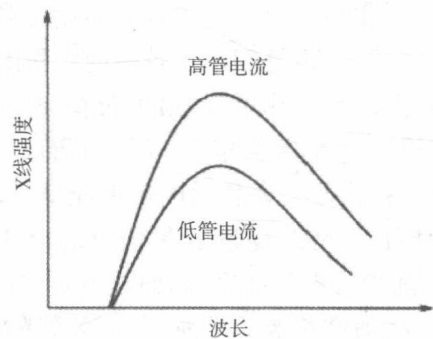


图 1-3 管电流对 X 线谱的影响

此外,高压波形对 X 线的产生也有一定的影响。尽管作用于 X 线管两极间管电压的整流形式都是脉冲电压,但 6 脉冲和 12 脉冲的峰值电压接近于恒定电压,比半波和全波整流峰值电压平均能量要高,X 线的硬线成分相对较多,辐射强度(或输出量)大,产生 X 线的效率也高。

二、X 线与物质的相互作用

(一)光电效应与康普顿效应

1. 光电效应 光电效应又称光电吸收,它是 X 线光子被原子全部吸收的作用过程。当一个能量为的光子通过物质时,它与原子的某壳层中某个轨道上一个电子发生相互作用,把全部能量传递给这个电子,而光子本身则整个被原子吸收,获得能量的电子摆脱原子的束缚而自由运动,这种电子称为光电子,这种现象称为光电效应。

光电效应的实质是物质吸收 X 线使其产生电离的过程。在此过程中产生的次级粒子有:光电子、正离子(产生光电子的原子)、新的光子(特征辐射光子)、俄歇电子。光电效应的发生概率可受以下三方面因素的影响。

(1)物质原子序数:光电效应的发生概率与物质的原子序数的 4 次方成正比,物质的原子序数越高,光电效应的发生概率就越大。对高原子序数物质由于结合能较大,不仅 K 层,其他壳层电子也较容易发生光电效应。但对低原子序数物质几乎都发生在 K 层。在满足光电效应的能量条件下,内层比外层电子发生光电效应的概率可高出 4~5 倍。

(2)入射光子能量:因为光电子的动能 $E_e = h\nu - E_b$,所以光电效应发生的能量条件是:入射光子的能量 $h\nu$ 必须等于或大于轨道电子的结合能 E_b ,否则就不会发生光电效应。光电效应的发生概率与入射线波长的 3 次方成正比,与光子能量的 3 次方成反比。

(3)原子边界限吸收:如果测出某一种物体对不同波长射线的光电质量衰减系数,就会得到质量衰减系数随入射光子能量 $h\nu$ 的变化。钡剂和碘剂都是 X 线检查中常用的对比剂,其 K 特征放射都具有较高的能量(钡是 37.4keV,碘是 33.2keV),它们都能穿过人体组织到达图像使之产生灰雾。

人体软组织中原子的 K 结合能仅为 0.5keV,发生光电效应时,其特征放射光子能量不会超过 0.5keV,如此低能光子,在同一细胞内就可被吸收而变为电子运动能。骨骼中钙的 K 结合能为 4keV,发生光电效应时其特征放射光子在发生点几毫米之内就被吸收。由此可见,在人体组织内发生的光电效应,其全部能量都将被组织吸收。

诊断放射学中的光电效应有利有弊,一是不产生散射线,减少了图像灰雾,增加人体不同组织和对比剂对射线的吸收差别,产生高对比度的 X 线图像。钼靶软组织 X 线摄影,就是利用低能射线在软组织中,因光电吸收的明显差别而产生高对比的图像。在放疗中,光电效应可增加肿瘤组织的剂量,提高其疗效。二是入射 X 线通过光电效应可全部被人体吸收,增加了受检者的 X 线剂量。

2. 康普顿效应 康普顿效应又称康普顿散射,它是射线光子能量部分吸收而产生散射线的过程。康普顿效应是入射光子与原子中的一个外层“自由”电子相互作用时发生的。康普顿效应的发生概率可受以下两个方面因素的影响。

(1)物质原子序数:康普顿效应的发生概率与物质的原子序数 Z 成正比。

(2)入射光子能量:康普顿效应发生概率与入射线波长成正比,与入射光子能量成反比。

康普顿效应是光子和“自由”电子之间的相互作用,在 K 电子结合能以上,随着入射光子能量的增加,由光电效应概率 $\propto I/(h\nu)^3$ 可知,光电效应随能量很快降低,而康普顿效应变得越来越重要。

需要指出,康普顿效应中产生的散射线,是 X 线检查中最大的散射线来源。从被照射部位和其他被照物体上产生的散射线,充满检查室整个空间。这一事实应引起 X 线工作者和防护人员的重视,对此应采取相应的防护措施。

(二)X 线衰减及其影响因素

X(γ)射线在其传播过程中一般有两种衰减形式,距离所致的衰减和物质吸收的衰减。

1. 距离衰减 X 线以 X 线管焦点为中心在空间向各个方向辐射。在半径不同的各球面上射线强度与该点到球心的距离(即半径)的平方成反比,射线强度的衰减遵循平方反比法则规律。可见,如果距离增加 1 倍,射线强度将衰减为原来的 1/4。这一衰减称为距离所致的衰减,也称为扩散衰减。

人体在元素构成上与空气类似,空气的密度是 0.0013t/m^3 ,当离开焦点 100cm 时,对 X 线的衰减仅相当于 0.13cm 人体厚度所致的衰减。当离开焦点距离为 200cm 时,相当于 0.26cm 人体厚度所致的衰减。

根据这一法则,焦点到接收器的距离由 50cm 分别变为 70cm、100cm、140cm、200cm 时,X 线强度变为原来强度的 1/2、1/4、1/8、1/16。

2. 物质吸收衰减 当射线通过物质时,由于射线光子与物质的原子、电子或原子核相互作用,致使入射方向上的射线强度产生衰减,这一衰减称为物质吸收所致的衰减。

X 线强度在物质中的衰减规律是 X 线透视、摄影、造影及各种特殊检查、X-CT 检查和放射治疗的基础和基本依据,同时也是进行屏蔽防护设计的理论根据。

从一般的胸部出来的射线平均照射量只有入射线的 1/10,从腹部前后位出来的仅为 1/100,从腹部侧位出来的仅有 1/1000。这是 X 线与物质发生各种相互作用而造成对 X 线能量的吸收造成的。

3. 影响因素

(1)X 线能量对衰减的影响:射线除了对光电吸收和散射吸收的类型有影响外,它对 X 线的衰减也有直接影响。实验表明,透过光的百分数随射线能量的增加而增加。对低能射线,绝大部分通过光电效应而衰减;对高能射线,绝大部分通过康普顿效应而衰减。

(2)吸收物质的原子序数对衰减的影响:物质对 X 线的吸收一般是随着元素的原子序数的增高而增加。但在某一能量范围内,也出现原子序数低的物质比原子序数高的物质吸收更多的 X 线的特殊现象,如锡和铅的质量衰减系数在 X 线能 29~88keV 时,锡的吸收系数大于铅的吸收系数,这一点很有实用价值,说明单位质量的锡比单位质量的铅能吸收更多的 X 线。由于锡比铅要轻得多,所以目前开始采用锡防护代替铅防护。

(3)物质密度对衰减的影响:物质密度的变化反映了电子数目和质量的变化,吸收物质的密度与 X 线的衰减成正比关系,如一物质的密度加倍,则它对 X 线的衰减也要加倍。

人体各组织的密度不同,对 X 线的吸收量也不等,这就形成了 X 线影像。密度大的物质对 X 线的衰减能力强,故多用密度大的物质作为屏蔽防护材料。但复合材料与单质材料比较,有的复合材料密度小而对 X 线的衰减能力强,这是因为多种元素的吸收不同而造成的结果。

(4) 每克物质的电子数对衰减的影响: 每克物质的电子数目叫做每克电子数, 单位是 e/g 。它与密度(单位 g/m^3) 的乘积为物质的每立方厘米的电子数。

除氢外的所有物质的每克电子数都大致相同。一般地说, 有效原子序数高的物质比有效原子序数低的物质每克电子数要少, 不少物质的每克电子数基本一样, 但单位体积内的电子数却相差很远。

(三) 连续放射与标识放射

X 线管产生的 X 线是由连续放射和标识放射两部分组成的。

1. 连续放射 连续放射又称连续 X 线或韧致辐射(bremsstrahlung)。在 X 线管中, 阴极电子撞击阳极靶面的动能, 取决于加在 X 线管两极间的管电压, 管电压越高, 阴极电子获得的动能就越大。一部分具有足够动能且高速运动的电子与所撞击的靶原子核相互作用, 将电子的全部能量(动能)转变为光子, 产生波长极短的 X 线。但高速运动的电子并不一定全部直接与靶原子核相撞, 有的只是受到核内正电场的作用而失去一部分能量, 并且以光子形式放射出来。越接近原子核, 失去的能量越多, 所放射出的 X 线波长越短。其他电子因得到的动能较小, 产生的 X 线波长较长。高速电子经过第一次撞击失去一部分能量, 再以较低速度继续撞击, 直到能量完全耗尽为止。由于单位时间内大量的、能量不等的电子同时撞击靶面, 且在与靶原子相互作用中损失的能量也各不相同。所以, X 线管放射出的 X 线是一束波长不等、连续的混合射线, 称之为连续放射(韧致辐射)。

光子能量可用 $h\nu$ 或 $\frac{hc}{\lambda}$ 来表示, 其中, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为 X 线的波长, 则:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve = \frac{hc}{\lambda} \text{ 或 } \lambda = \frac{hc}{Ve}$$

上式中 m 为电子质量, v 为电子的末速度, e 为电子的电量, V 是作用于 X 线管两端的管电压峰值。通常把求 X 线管发生的最短波长公式写成:

$$\lambda_{\min} = \frac{1.24}{V} nm$$

对于每一个确定的管电压, 都有一个最短波长, 且数值只与管电压有关, 管电压越高, 波长越短。

2. 标识放射 标识放射又称标识 X 线或特征辐射(characteristic radiation), 是由高速运动的电子与把原子的内层轨道电子相互作用所产生的。X 线管阴极发出的电子, 以很大的动能撞击靶面时, 原子内层轨道电子被击出而留下一个空位。按能量分布最低的原则, 处于高能态的外壳层电子必然要向内壳层填补, 产生电子跃迁现象。在跃迁过程中将其多余的能量以光子的形式放射出来, 便产生 X 线, 跃迁的电子能量差决定了这种 X 线的波长。不同的靶物质, 其原子结构不同, 发出 X 线的波长也相同。这种由靶物质所决定的 X 线称为标识放射, 它与 X 线管的管电流无关。电子撞击靶物质产生标识射线所需要的足够能量是由管电压决定的, 管电压与靶物质的原子序数平方成正比, 原子序数越高, 需要的能量越大, 产生的标识 X 线波长越短。

综上所述, 在 X 线管内, 高速运动的电子撞击阳极靶面时, 一部分电子撞击到靶物质的原子核, 或受到核内正电场的作用产生连续放射; 另一部分电子撞击了靶物质原子的内层电子, 出现跃迁现象, 产生标识放射。所产生的 X 线谱是由连续放射和标识放射叠加而成, 标识射线占很小一部分, 是在连续射线谱上出现的几个向上突出的尖端, 随着管电压的升高, 标识射