

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

射线检测

辽宁省质量技术监督局特种设备处 组编
辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 编



*SHEXIAN
JIANCE*

辽宁大学出版社

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

射线检测

辽宁省质量技术监督局特种设备处 组编
辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

*SHEXIAN
JIANCE*

辽宁大学出版社

©辽宁省质量技术监督局特种设备处 辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会 2008
图书在版编目 (CIP) 数据

射线检测/辽宁省质量技术监督局特种设备处, 辽宁省特种设备无损检测人员资格考核委员会编. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2008. 3

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

ISBN 978-7-5610-5553-3

I. 射… II. ①辽…②辽… III. 射线检验—技术培训—教材 IV. TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 023213 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 12

字 数: 308 千字

出版时间: 2008 年 3 月第 1 版

印刷时间: 2008 年 3 月第 1 次印刷

责任编辑: 韩行章

封面设计: 刘桂湘

责任校对: 齐 悦

书 号: ISBN 978-7-5610-5553-3

定 价: 45.00 元

联系电话: 024—86864613

邮购热线: 024—86830665

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: lnupress@vip.163.com

特种设备 I、II 级无损检测人员培训教材

编 委 会

主 审：王宏新

主 编：王 俊

副主编：张忠新 徐富民 金宝辉

教材编写组组长：王凤志 李敬军 高迎峰 张永杰

王丽萍

编 委：周 震 陈东初 贾胜军 杨跃存 于清泉

王钰玮 王庆云 王成功 王 宁 王晓林

白洪海 卢天惠 史向东 田景涛 曲邦宁

刘振营 杜 辉 李增甫 李耀武 吴云法

张 轲 金静华 单志军 杨继斌 徐 彦

徐德昆 郭 超 董 辉 綦振国

序 言

无损检测是特种设备安全工作中一种重要的检验方法和手段，在特种设备制造、安装、改造、维修、使用和检验等环节中应用十分广泛。

辽宁省特种设备无损检测人员考核委员会成立二十多年来，在各相关单位、专家和各位委员的大力支持和积极努力下，为全省无损检测培训考核工作做出了可喜的成绩，对提高无损检测人员的技术水平和操作技能起到了积极的促进作用。为了更好地配合无损检测人员培训与考核工作，更加适应当前特种设备无损检测相关标准的贯彻实施，考委会组织相关人员编写了这套培训教材和培训考核习题集。

本人有幸参加了几次教材编写讨论活动，各位编委会成员高度负责的工作态度、一丝不苟的工作热情、精益求精的钻研精神，非常让人钦佩和感动。本套教材倾注了他们的辛勤汗水，凝聚着他们的智慧博才。相信这套教材的出版对特种设备无损检测人员培训与考核工作的规范化、系统化会起到一个极大的推动作用，对进一步保障特种设备安全运行具有重要意义。

刘普明

2007年12月

前言

为了更好地贯彻实施国家质检总局即将颁布的《特种设备检验检测人员管理办法》，切实有效地规范特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核工作，全面提高特种设备无损检测人员实际检测能力和业务水平，确保特种设备无损检测工作质量安全可靠，受辽宁省质量技术监督局特种设备处委托，由辽宁省特种设备无损检测人员考核委员会组织编写了本套特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训教材和培训考核习题集。

本套教材以特种设备无损检测现行有关国家法规、安全技术规范和 JB/T4730—2005《承压设备无损检测》标准为依据，按照辽宁省特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核大纲要求，全面系统地阐述了特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员必须熟悉和掌握的特种设备相关基础知识、无损检测工作中常用四种检测方法的基础理论和实际操作等内容。是一套既适合特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核使用，又方便其他设备监理、金属监督、质量管理和安全监察等部门人员日常学习和参考使用的好教材。

本套教材包括《射线检测》、《超声波检测》、《磁粉检测》、《渗透检测》、《特种设备基础知识》五本书和一本《特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员培训考核习题集》。本教材针对Ⅱ级无损检测从业人员的工作特点，突出体现应知应会理论、工艺与实际工作关系，既注重基础知识的普及，又密切联系生产实际。在教材编写过程中，重点强调特种设备无损

检测实际应用工艺，增加了典型检测工艺卡和应用实例的介绍。为了适应特种设备无损检测人员工作需要，开阔视野，教材对国内外无损检测新技术应用方面也作了简明扼要的介绍。为了方便广大学员和读者学习使用，《特种设备基础知识》中收集了大量无损检测方面的相关法规与标准的具体条款。考虑到实际工作情况，教材未对Ⅰ级无损检测人员的培训内容明确区分，只是在习题集编著中标注了必备的知识要点。

习题集作为特种设备无损检测培训考核工作的辅助教材，其结构编排与教材章节一一对应，编著要点也是特种设备Ⅰ、Ⅱ级无损检测人员初、复试考核命题的重点。

本套教材的编写工作得到了辽宁省安全科学研究院有关同志、行业内专家和辽宁省考委会秘书处人员的大力支持和帮助，在相关资料整理过程中也得到了孟祥飞同志全力协作，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者的水平和经验有限，加之编写时间仓促，整套教材的编著工作难免有疏漏或不当之处，真诚希望广大读者和有关人士提出宝贵建议，以便今后进一步修订完善。

编 者

2007年12月

编写说明

本教材结合 JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》、辐射防护等现行无损检测法规标准，按照辽宁省特种设备 I、II 级无损检测人员资格培训考核大纲的要求，在参考现行全国特种设备无损检测人员资格考核统编教材《射线检测》（II、III 级）基础上编写。射线检测方法很多，按射线的种类划分，有 X 射线检测、高能射线检测、 γ 射线检测和中子射线检测等。按显示方法划分，有射线照相法、射线实时成像法和数字化射线成像法等多种方法。本教材阐述的射线检测主要是指目前应用最普遍的以胶片作为信息载体的 X 射线和 γ 射线照相法。本教材内容完全是为了满足射线 I、II 级无损检测人员实际工作需要，是一本注重实际应用的教科书。

考虑到多年来射线检测工作的适用性与连续性，教材基础理论部分力求简明扼要，突出体现了射线 I、II 级无损检测人员必须掌握的理论知识，重点充实了实际检测工艺内容，特别是增加了工艺卡的编写和应用实例的介绍，着重编制了射线照相底片评定与辐射防护计算等内容。为便于查阅本教材还给出四个附录，包括承压设备无损检测标准中各技术等级的像质计灵敏度、环向对接焊接接头的透照次数图、有关钢制对接接头质量分级的规定、现场 γ 射线检测控制区的确定等。

本教材共分七章。内容包括：射线检测物理基础、射线检测的设备和器材、射线照相质量的影响因素、射线检测工艺、暗室处理技术、射线照相底片的评定、辐射防护。本教材第 1、2 章由董辉编写，第 3 章由董辉、田景涛编写，第 4 章和附录由李耀武、徐彦编写，第 5、6 章由王凤志、王庆云编写，第 7 章由单志军、徐彦编写。全书由徐彦和李耀武统稿。

目
录

MU LU

第一章 射线检测物理基础	(1)
1.1 原子与原子核	(1)
1.2 射线的种类和性质	(4)
1.3 射线与物质的相互作用	(12)
1.4 射线照相法的原理与特点	(20)
第二章 射线检测的设备和器材	(23)
2.1 X 射线机	(23)
2.2 γ 射线机	(38)
2.3 射线照相胶片	(44)
2.4 射线检测辅助设备器材	(52)
第三章 射线照相质量的影响因素	(59)
3.1 射线照相灵敏度的影响因素	(59)
3.2 最小可见对比度 (识别界限对比度) $\Delta D_{\min}$	(66)
第四章 射线检测工艺	(68)
4.1 射线检测工艺条件的选择	(68)
4.2 透照方式的选择和一次透照长度的计算	(76)
4.3 曝光曲线的制作及应用	(87)
4.4 散射线的控制	(90)
4.5 焊缝射线检测工艺规程及应用举例	(94)
4.6 焊缝透照的基本操作	(118)
4.7 射线透照技术和工艺研究	(119)

MU LU

第五章 暗室处理技术	(122)
5.1 暗室基本知识	(122)
5.2 暗室处理技术	(125)
第六章 射线照相底片的评定	(131)
6.1 评片工作的基本要求	(131)
6.2 评片基本知识	(134)
6.3 底片影像分析	(134)
6.4 焊接接头的质量等级评定	(145)
第七章 辐射防护	(147)
7.1 放射防护的基本概念	(147)
7.2 剂量测定方法和仪器	(155)
7.3 辐射防护原则	(157)
7.4 辐射防护的方法和防护计算	(158)
附录 A JB/T 4730.2-2005 标准中各技术等级的像质计灵敏度	(166)
附录 B JB/T 4730.2-2005 标准中环向对接焊接接头的透照次数图	(168)
附录 C JB/T 4730.2-2005 有关钢制对接接头质量分级的规定	(174)
附录 D 现场 γ 射线检测控制区的确定	(179)
参考文献	(182)

第一章 射线检测物理基础

1.1 原子与原子核

1.1.1 元素与原子

元素是构成世界万物的本原和基础。迄今为止，已发现的元素有 100 多种，其中天然的有 90 多种，人工制造的有 10 多种。

元素是在元素周期表中按原子序数排列着的原子，这些原子从元素周期表的角度讲可称为元素，所以说，元素是原子的表现形式，原子是元素的具体存在。为便于表达和书写，每种元素都用元素符号表示，如碳 C，铁 Fe，钴 Co。元素的名称是用它的元素符号和质量数来表示，如 C^{12} （C 是碳元素的符号，其质量数为 12）。

原子是体现元素性质的最小微粒，在化学反应中，原子的种类和性质不会发生变化。

原子质量非常小，用它的实际质量来表示很不方便，国际上以碳原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位，用符号 u 表示。其他原子的质量与 u 的比值，作为这种原子的原子量。照此规定，碳元素的原子量为 12，氢元素的原子量为 1，氧元素的原子量为 16。

原子由一个原子核和若干个核外电子组成。原子核带正电荷，位于原子中心，核外电子带负电荷，在原子核周围高速运动。原子核所带正电荷数（核电荷数）与核外电子所带负电荷数相同，所以整个原子呈电中性。

原子核由质子和中子组成。质子带一个单位正电荷，中子不带电荷，原子核中有几个质子就有几个核电荷。原子核与原子的体积相比是非常微小的，原子核的体积比原子要小 100 000 倍，所以原子几乎是空的，仅被电子占据着。

核外电子的质量极小，每个电子带有一个单位负电荷。因此，在数值上有下列关系：

$$\text{质子数} = \text{核电荷数} = \text{核外电子数} = \text{原子序数}$$

质子和中子的质量大致都相当于 $1u$ ，电子质量约是质子质量的 $1/1836$ ，计

算原子量时电子质量忽略不计。由此可见，用原子质量单位来度量原子质量时，原子质量就等于原子中中子和质子的质量，或者说，原子质量在数值上就等于原子中的中子数和质子数之和，即：

$$\text{原子质量} = \text{质子数} + \text{中子数}$$

原子量用 A 、质子数用 Z 、中子数用 N 表示，其数量关系为 $A=Z+N$ 。例如 Co60 ： $A=60$ 、 $Z=27$ 、 $N=33$ 。

凡具有一定质子数、中子数并处于特定能量状态的原子或原子核成为核素。一种元素可包含多种核素。同一种元素的原子必定具有相同的核电荷数，但中子数可以不同。也就是说在元素周期表中，一个元素占一个位置。但同一位置上原子的性质并不一定相同。例如氢元素有三种原子：氕、氘、氚，它们均含有 1 个电子，1 个质子，但中子数分别为 0、1、2，原子量分别为 1、2、3。我们把这些处于同一位置但有不同的性质的各种原子互称同位素。即具有相同质子数和不同中子数的同一元素的原子互称同位素。具有放射性的同位素，称为放射性同位素。

1.1.2 核外电子的运动规律

1913 年，丹麦科学家玻尔完善了原子有核模型，提出了原子轨道和能级的概念，从现代量子力学观点上看虽存在缺陷，但它对原子发光机理做出了解释，揭示了核外电子的运动规律。

玻尔的原子理论假说可概括叙述如下：

原子中的电子沿着圆形轨道绕核运行，各条轨道有不同的能量状态，称为能级，各能级的能值都是确定的。正常情况下电子总是在能量最低的轨道上运行，这时的原子状态称为基态。

当原子从外界吸收一定能量时，电子就由最低能量轨道跳到较高能级轨道，这一过程称为跃迁，此时原子的状态，称为激发态。激发态是一种不稳定的状态，所以电子将再次跳回较低能级轨道，电子从较高能级 E_n 跳回到较低能级 E_m 时，这样，先后两个能级的能值差就会以光子的形式辐射出来，即：

$$h\nu = E_n - E_m \quad (1-1)$$

式中： $h\nu$ ——光量子能量；

E_n ——较高能级的能值；

E_m ——较低能级的能值。

以氢原子为例：氢原子的能级图如图 1—1 所示，图中各定态轨道的量子化的能量状态即能级，用主量子数 n 表示。能量单位用电子伏 eV （1 电子伏相当于 1 个电子通过电势差 1 伏的电场时所获得或减少的能量）表示。图中最下一条横线是 $n=1$ ，是离核最近且能量最低的能级，表示氢原子处于基态。如果由外界获得 10.2eV 即 $(E_2 - E_1)$ 的能量，原子的内能增大，原子中的一个电子就跳到 $n=2$ 的第二个能级，再获得 1.89eV 即 $(E_3 - E_2)$ 的能量，电子就跳到 $n=3$ 的

第三个能级，在后两种情况下，氢原子都处于激发态。基态的氢原子获得 13.6eV 的能量，电子就能完全脱离核的引力，成为自由电子。受激的电子是不稳定的，它不能在高能级停留太久，接着就跳回较低能级。电子从高能级跃迁到低能级时，放出 1 个光子，如果电子是从第三能级跳到第一能级，则放出的光子应具有 12.09eV（即 $E_3 - E_1$ ）的能量。

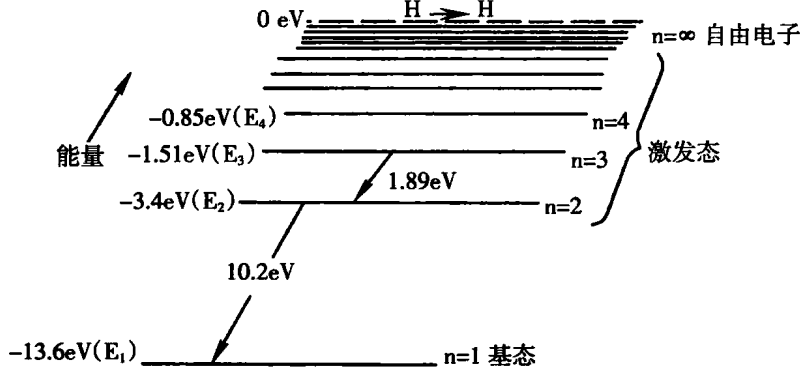


图 1-1 氢原子的能级图

1.1.3 原子核的稳定性及衰变规律

原子核极小，它的半径约为原子半径的万分之一，在这极小的原子核里却集中了 99.95% 以上原子的质量。

正如原子中的电子处于运动中一样，原子核中的质子和中子也处于运动中，其能级也是量子化的。

原子核的稳定性取决于核内质子间库仑斥力和核子间核力大小的改变。

核力是短程力，只有相邻原子核之间发生作用；核力与电荷无关，无论中子，还是质子都受到核力的作用；核力比库仑斥力约大 100 倍，它能促成质子和中子之间成对结合，质子和质子之间、中子和中子之间对对结合。它是使原子核处于稳定状态的主要因素。

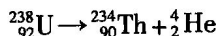
库仑斥力是质子和质子之间库仑力。

核力和库仑斥力随核内中子数 (N) 与质子数 (Z) 的比例而变化：对小质量数的核， $N/Z=1$ 附近较稳定，这个比值随核质量数的增大而增大；对大质量数的核， $N/Z=1.6$ 附近较稳定。中子数过多的核，因为没有足够的质子来与中子配对，核力的作用减弱，这种核是不稳定的；质子数过多的核，因为库仑斥力随之增大，这种核也是不稳定的。因此，可采用人为的方法，以中子、质子或其他基本粒子轰击原子核，从而改变核内质子或中子的数目，便可以制造出新的核素，也可以使稳定的核素变为不稳定的核素。

人工制造的核素已有 1600 多种，其中绝大部分是不稳定的核素。不稳定的核素会自发地蜕化，变为另一种核素，同时释放出各种射线，这种现象称为放射性衰变。天然存在的放射性核素能自发地放出射线的特性，称为“天然放射性”。

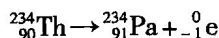
放射性衰变有多种模式，其中最主要的有：

α 衰变：不稳定的原子核，自发地放出 α 粒子（氦核）的衰变，称做 α 衰变。例如，铀-238 核放出 α 粒子变成钍-234 核的衰变，可表示为：



α 衰变的规律是子核的质量数比母核减少 4，子核的核电荷数比母核减少 2，所以子核在元素周期表中的位置要向前移两位。在 α 衰变中往往伴随有 γ 辐射发生。

β 衰变：不稳定的核自发地放出 β 粒子，变成子核，称做 β 衰变。 β 衰变相当于母核中的一个中子转化为质子，使中子、质子数目之比发生了新变化，达到了新的平衡。 β 粒子实际上就是电子，它的静止质量等于电子质量，带有一个负电荷。 β 衰变的规律是母核与子核的质量数相同，子核的原子序数增加一个，即：



γ 衰变：就是 γ 跃迁，放出波长很短的电磁辐射。 γ 衰变前后核的质量数和电荷数均不发生改变。

γ 衰变总是伴随着 α 衰变或 β 衰变而发生，母核经 α 衰变或 β 衰变到子核的激发态，这种激发态核是不稳定的，它要通过 γ 衰变过渡到正常态。所以 γ 射线是原子核由高能级跃迁到低能级而产生的。

1.2 射线的种类和性质

1.2.1 X 射线和 γ 射线的性质

X 射线和 γ 射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线等同属于电磁波的范畴，其区别在于波长不同以及产生的方法不同，因此，X 射线和 γ 射线具有电磁波的共性，同时也具有不同于可见光和无线电波等其他电磁辐射的特性。

X 射线和 γ 射线是一种波长很短的电磁波，在电磁波谱上位于紫外线和宇宙射线之间，见图 1-2。其波长 λ 、频率 ν 以及光速 c 三者之间的关系是：

$$\lambda = c/\nu \quad (1-2)$$

式中： λ 为波长、 ν 为频率、 c 为光速

X 射线和 γ 射线都是光子流，不带电，静止质量为零，具有波粒二象性，以光速直线运动。



图 1-2 电磁波谱

X 射线和 γ 射线有以下性质：

- (1) 在真空中以光速直线传播。
- (2) 本身不带电，不受电场和磁场的影响。
- (3) 在物质界面只能发生漫反射，折射系数接近于 1，折射方向改变的不明显。
- (4) 仅在晶体光栅中才产生干涉和衍射现象。
- (5) 不可见，能够穿透可见光不能穿透的物质。
- (6) 在穿透物体过程中，会与某些物质发生复杂的物理和化学作用，如电离作用、荧光作用、热作用和光化学作用。
- (7) 具有辐射生物效应，能够杀伤生物细胞，破坏生物组织等。

1.2.2 X 射线的产生及其特点

X 射线是在 X 射线管中产生的，射线管是一个具有阴阳两极的真空管，阴极是钨丝，阳极是金属制成的靶。在阴阳两极之间加有很高的直流电压（管电压），当阴极加热到白炽状态时释放出大量电子，这些电子在高压电场中被加速，从阴极飞向阳极（管电流），最终以很大速度撞击在金属靶上，失去所具有的动能，这些动能绝大部分转换为热能，仅有极少一部分转换为 X 射线向四周辐射。

对 X 射线管发出的 X 射线做光谱测定，可以发现 X 射线谱由两部分组成，一个是波长连续变化的部分，称连续谱，又称连续 X 射线或白色 X 射线，它的最短波长只与管电压有关，另一部分是具有分立波长的线状谱，这部分谱线一旦出现，它的谱峰所对应的波长位置完全取决于靶的材料，这部分谱线为标识谱，又称特征谱。标识 X 射线谱重叠在连续谱之上，如同山丘上的宝塔。见图 1-3。

1. 连续谱的产生和特点

(1) 连续 X 射线的产生机理

根据经典电动力学理论，带电粒子作加速运动（包括减速运动）时必然伴随着电磁辐射。在 X 射线管内高速运动的电子与靶原子碰撞时，与原子核的库仑场相互作用，由于电子急剧减速而产生电磁辐射，称为轫致辐射。

大量电子（例如当管电流为 5mA 时，撞到靶上的电子数目约为 3×10^{16} 个/s）与靶相撞。相撞前电子初速度各不相同，相撞时减速过程又各不相同，少量电子经一次撞击就失去全部动能，而大部分电子经过多次制动逐渐丧失动能，这就使得能量转换过程中所发出的电磁辐射可以具有各种波长，因此，X 射线的波

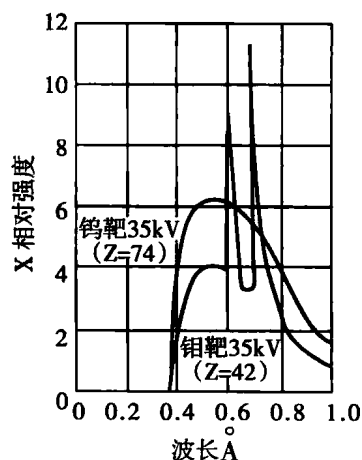


图 1-3 X 射线谱

谱呈连续分布。

(2) 连续谱的特点

由图 1-4 连续 X 射线谱可知：

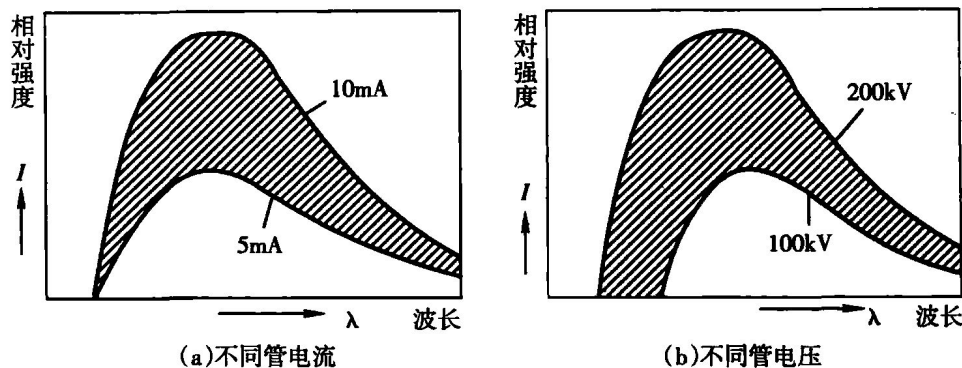


图 1-4 X 射线谱

① 连续 X 射线有最短波长

连续 X 射线存在一个最短波长 $\lambda_{\min}$ ，如果一个电子在电场中得到动能 $E=eV$ ，与靶一次撞击这些动能全部转换为光子的辐射能，则辐射的连续 X 射线最短波长可按下式计算：

$$E=eV=h\nu=hc/\lambda_{\min}$$

$$\lambda_{\min}=hc/eV=12.4/V \quad (1-3)$$

式中： h —普朗克常数， $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ （焦耳·秒）；

c —光速， $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ （米/秒）；

e —电子电量， $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；

V —管电压，kV；

$\lambda_{\min}$ —最短波长， $\text{\AA}$ 。

最短波长 $\lambda_{\min}$ ，只依赖于外加电压，与靶材料无关。由图 1-4 (b) 可知，随着管压的增大 $\lambda_{\min}$ 向短波长方向移动。

【例】有一台 X 射线探伤机，当管电压使用 $V=200\text{kV}$ 时，求产生 X 射线的最短波长是多少？

已知： $V=200\text{kV}$

求： $\lambda_{\min}$

解： $\lambda_{\min}=12.4/V$

$$\lambda_{\min}=12.4/200=0.062 \text{ \AA}$$

答：X 射线的最短波长是 $0.062 \text{ \AA}$ 。

② 连续 X 射线强度最大值所对应的波长 $\lambda_{\max}$ 约为 $1.5\lambda_{\min}$ 。

③ 连续 X 射线的总强度 I_T 可用连续谱曲线下所包含的面积表示。

试验证明， I_T 与管电流 i (mA)、管电压 V (kV)、靶材料原子序数 Z 有以下关系：

$$I_T=K_i Z V^2 \quad (1-4)$$

式中： K_i 比例系数 $K_i = (1.1 \sim 1.4) \times 10^{-6}$

管电流越大，表明单位时间撞击靶的电子越多，见图 1-4 (a)；管电压增加时，虽然电子数目未变，但每个电子所获得的能量增大，因而短波成分的射线增加，且碰撞发生的能量转换过程增加，因此，射线强度同时增大。靶材料的原子序数越大，核库仑场越强，韧致辐射作用越强，射线强度也会增加，所以靶一般采用高原子序数材料制作，如检测用的 X 射线机采用钨靶。

④ X 射线的效率

X 射线产生的效率等于连续 X 射线的总强度 I_T 与管电压 V 和管电流 i 的乘积之比。

$$\eta = I_T / iV = K_i Z i V^2 / iV = K_i VZ \quad (1-5)$$

可见，X 射线的产生效率与管电压和靶材料原子序数成正比。在其他条件相同的情况下，管电压越高，X 射线产生效率越高；管电压的高压波形越接近恒压，X 射线的产生效率越高。当电压为 100kV 时，X 射线的转换效率约为 1%，而产生 4MeV 的高能 X 射线加速器，其转换效率约为 36%。

由于输入的能量的绝大部分转换为热能，所以 X 射线管必须有良好的冷却装置，以保证阳极不被烧坏。

【例】求 2005 型工业 X 射线探伤机在额定输出时，X 射线管的效率（已知钨靶 $Z=74$ ； $K_i=1.4 \times 10^{-6}$ ）？

已知： $Z=74$ 、 $K_i=1.4 \times 10^{-6}$ 、 $V=200$ kV；

求： η

解： $\eta = K_i VZ = 1.4 \times 10^{-6} \times 74 \times 200 = 2\%$

答：X 射线的效率为 2%

⑤ X 射线的能量

射线能量表示穿透物质的能力。X 射线能量取决于管电压，管电压是可调的，所以 X 射线的能量是可控的。

2. 标识谱的产生和特点

当 X 射线管两端所加的电压超过某个临界值 V_k 时，波谱曲线上除连续谱外，还将在特定波长位置出现强度很大的线状谱线，这种线状谱线只依赖于阳极靶的材料，而与管电压和管电流无关，因而，把这种波谱称为标识谱或称特征谱， V_k 称为激发电压。不同靶材的激发电压各不相同，例如钨的激发电压为 $V_k=69.51$ kV，而钼的激发电压为 $V_k=20.0$ kV。

标识 X 射线产生机理：当 X 射线管两端所加的电压超过某个临界值 V_k 时，阴极发射的电子可以获得足够的能量，它与阳极靶碰撞时，可以把靶原子的内层电子逐出壳层之外，使该原子处于激发态，此时外层电子将向内层跃迁，发射标识 X 射线。标识 X 射线光子的能量等于发生跃迁的两个能级能量值之差，例如， K_α 、 K_β 谱线，就是 L 和 N 层电子跃迁到 K 层发射波长最短的一组谱线，称为 K 线系标识 X 射线。

标识 X 射线强度只占 X 射线总强度的极少一部分，能量也很低，它的激发电压低于工业射线检测中的管电压，所以标识谱不起什么作用。