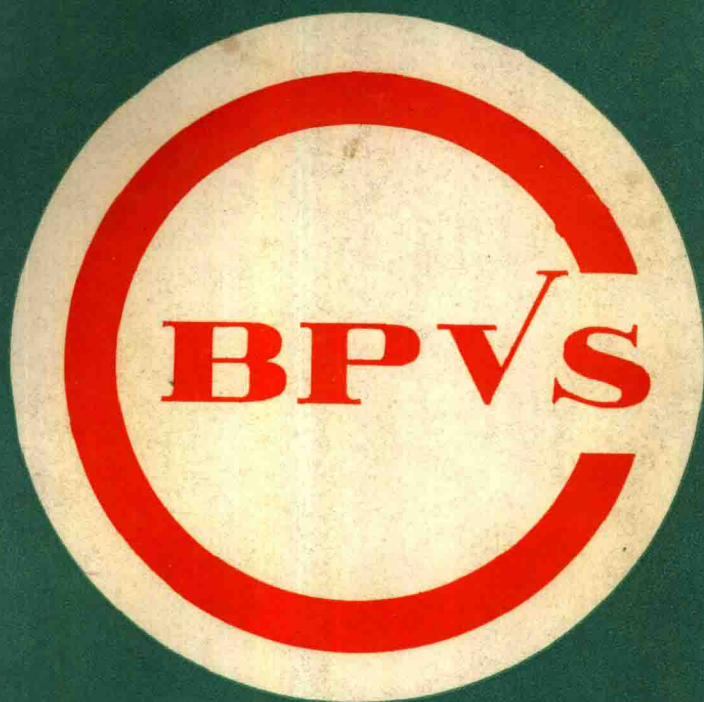




无 损 探 伤

云庆华等编著

WUSUNTANSHANG

劳动出版社

无 损 探 伤

云庆华等编著

劳 动 出 版 社

1982年

无 损 探 伤

云庆华等编著

*

劳动出版社出版

(北京市和平里中街十二号)

交通部出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 33.75印张 860,000字

1983年1月第1版 1983年1月第1次印刷

印数: 1—15,000册

书号: 15238·0026 定价: 5.20元

前 言

无损探伤是在不损害被检对象的前提下,探测其内部或外表的缺陷(伤痕)的现代检验技术。在工业生产中,许多重要设备的原材料、零部件、焊缝等必须进行必要的无损探伤,当确认其内部和表面不存在危险性或非允许缺陷时,才可以使用或运行。无损探伤是检验产品质量、保证产品安全、延长产品寿命的必要的可靠的技术手段。

工业锅炉、电站锅炉和各种压力容器,是承受一定压力和温度的特种设备,它的焊缝或原材料存在严重缺陷时,可能导致恶性爆炸事故。所以,对锅炉和压力容器的制造、安装和运行,正确地进行无损探伤是十分重要的,它将有效地减少事故,提高其安全可靠性。

设备的质量与探伤水平直接有关。为了提高无损探伤人员的技术水平,使探伤结果正确可靠,原国家劳动总局锅炉压力容器安全监察局于1980年4月组织力量编写《无损探伤讲义》试用本,以试用本为教材举办了两期无损探伤技术培训班。经过办班试点,并征求机械工业部合肥通用机械研究所、汕头超声仪器研究所、哈尔滨锅炉厂等二十几个科研、生产单位的意见,对试用本进行了修改和充实,编写成了这本《无损探伤》。本书较全面地讲述了无损探伤原理和应用,特别着重讲述了锅炉及压力容器的无损探伤。本书可作为培训和考核有无损探伤人员的教材。

本书是云庆华工程师主持编写的。参加本书编写的主要有云庆华、张泽丰、王世勋工程师。此外,本书第二篇第六、七两章由沈肇亚工程师编写;本书第二篇第五章薄板焊缝探伤一节由胡钟启工程师编写。

本书在编写过程中,参考了日本非破坏检查协会编写的《非破坏检查便览》〔新版〕、《超音波试验A》、《超音波试验B》、《放射线透过试验A》和《放射线透过试验B》。参考了美国机械工程师协会(ASME)《锅炉及压力容器规范》的无损检验部分。收集和选用了国内无损检测书刊中有关部分内容。

北京市机械工程学会无损检测分会对本书进行了审阅,中国科学院声学研究所副研究员、北京无损检测分会主任李明轩同志主持审阅工作,参加本书审阅的主要有常继明、沈肇亚、郑中兴工程师。

由于时间仓促和水平所限,本书难免存在不足和缺欠甚至错误和不妥之处,敬望有关专家和读者批评指教,以便不断改进成为一本较适用的无损探伤教材。

本书内容,如与我国现行规程、标准有不相符之处,应以规程、标准为准。

编 者

目 录

第一篇 射线探伤

第一章 射线探伤概论	1
1.1 x射线性质	1
1.2 放射线的种类	2
1.3 x射线与 γ 射线的发生	4
1.4 x射线与 γ 射线的减弱	12
第二章 射线探伤装置	18
2.1 探伤用x射线装置原理	18
2.2 探伤用x射线装置结构	18
2.3 x射线管构造	21
2.4 x射线管回路	32
2.5 x射线发生器	35
2.6 高压发生器	37
2.7 高压电缆	39
2.8 油泵冷却系统	39
2.9 操纵台	40
2.10 x射线机线路分析	41
2.11 x射线机常见的故障和维修	45
2.12 常见国产及国外x射线机型号及技术性能	48
2.13 x射线探伤机的选择	51
第三章 射线照相方法	54
3.1 射线照相法原理	54
3.2 射线照相灵敏度	55
3.3 透度计	55
3.4 几何不清晰度	65
3.5 射线能量的选择	69
3.6 增感屏的选择	70
3.7 胶片的感光作用及选择	74
3.8 散乱射线的遮蔽	78
3.9 胶片的暗室处理	81
3.10 影响射线照相灵敏度简表	92
3.11 射线底片上缺陷的评定	93
3.12 曝光曲线	111
3.13 不同种类焊缝和工件透照法举例	115

3.14 特殊照相方法.....	122
3.15 射线探伤监察.....	125
第四章 其它射线探伤方法.....	130
4.1 高能射线探伤国内外情况简介	130
4.2 电子感应加速器原理	131
4.3 电子感应加速器结构与性能	136
4.4 γ 射线探伤国内外情况简介	141
4.5 工业 X 射线电视探伤	142
4.6 中子射线检验	151
第五章 射线的防护.....	155
5.1 射线的最大容许剂量当量	155
5.2 有关射线剂量的基本概念	156
5.3 放射线的测量	157
5.4 射线探伤的防护	157

第二篇 超 声 探 伤

第一章 超声波探伤的物理基础.....	161
1.1 振动的一般概念	161
1.2 机械波的一般概念	167
1.3 超声波的特性	183
1.4 超声波的传播速度	187
1.5 超声波的反射与折射	198
1.6 超声场	216
1.7 超声波在规则形状有限界面上的反射	234
1.8 超声波集聚和扩散	243
1.9 超声波的衰减	249
第二章 超声波探伤仪、探头及试块.....	256
2.1 超声波探伤仪	256
2.2 超声探头	279
2.3 试块	298
2.4 超声波探伤仪和探头的技术性能测试	318
2.5 超声波测厚仪	330
第三章 超声波探伤方法概述.....	334
3.1 探伤方法的种类	334
3.2 A 型脉冲反射式仪器主要旋钮的作用、控制及选择	338
3.3 影响反射波高度的因素与探伤图形的观察	344
3.4 缺陷的定位	353
3.5 缺陷的定量	354
3.6 表面波探伤法	364

3.7	板波探伤法	365
3.8	水浸探伤法	365
3.9	分割式探头探伤法	367
第四章	斜角探伤	368
4.1	斜角探伤的基础	368
4.2	斜探头折射角(或K值)的测定及选择	378
4.3	时间扫描线的调整	381
4.4	试块中的孔型与灵敏度的选择	386
4.5	缺陷的定位	388
4.6	表面声能损失差的测定	392
4.7	当量定量法	393
4.8	探头移动定量法	399
4.9	缺陷高度的测定	400
4.10	声成象技术	402
第五章	焊缝探伤	403
5.1	超声波在焊缝探伤中的特点	403
5.2	焊缝探伤中常采用斜角探伤法的原因	403
5.3	探伤前的准备	404
5.4	对接焊缝的探伤	407
5.5	电渣焊缝的探伤	422
5.6	角焊缝的探伤	423
5.7	大口径厚壁管座角焊缝的探伤	427
5.8	薄壁管对接焊缝的探伤	428
5.9	锅炉联箱的焊缝探伤	431
第六章	板材探伤	434
6.1	概述	434
6.2	厚板的探伤方法和条件	435
6.3	薄板探伤	443
6.4	复合板材的探伤	446
第七章	管材探伤	449
7.1	概述	449
7.2	钢管探伤的要求	453
7.3	大口径管材的探伤	454
7.4	小口径管材的探伤	457
7.5	厚壁管探伤	459
7.6	管材自动探伤中的几个问题	460

第三篇 磁粉探伤和渗透探伤

第一章	磁粉探伤	462
-----	------------	-----

1.1 磁粉探伤概述	462
1.2 磁粉探伤的物理基础	462
1.3 磁性来源	472
1.4 技术磁化和磁畴	476
1.5 有关磁化的物理概念	480
1.6 常用磁学量的单位换算和磁学公式	482
1.7 磁粉探伤原理	483
1.8 磁粉探伤装置	487
1.9 磁粉探伤方法	493
1.10 磁粉和磁悬液	496
1.11 磁化电流规范的选择	498
1.12 磁粉探伤的技术操作	501
1.13 磁粉探伤灵敏度和灵敏度试片	505
1.14 磁痕分析	506
1.15 磁粉探伤国内外近况	508
第二章 液体渗透探伤法	512
2.1 液体渗透探伤的应用范围及优缺点	512
2.2 液体的一些物理化学现象	512
2.3 液体渗透探伤原理和影响探伤灵敏度的主要因素	516
2.4 液体渗透探伤法的分类	519
2.5 各种探伤剂的组成成份、性能要求	520
2.6 渗透探伤灵敏度试块	523
2.7 一些常用探伤剂配方	525

第一篇 射线探伤

第一章 射线探伤概论

1.1 x射线性质

1895年德国物理学家伦琴在研究阴极射线时，发现用高速度的电子流射到某些固体表面上时，会产生一种特殊的射线，这种射线能穿透可见光不能穿透的物质，可以使感光胶片感光，可以使某些荧光物质发光。因为当时对这种射线的本质还不清楚，所以伦琴把它称为x射线(在数学上x经常代表未知数)。后来物理学上称这种射线为伦琴射线，表示对伦琴的纪念，但人们在实际应用中还习惯于称x射线。x射线问世八十多年来，在工业、医疗、科学研究上得到了极其广泛的应用。x射线的发现，是人类科学史上的一件大事。

x射线究竟是什么东西呢？科学家证明，x射线就其本质而言与可见光、无线电波和 γ 射线相同，统属电磁波。所以也有人称x射线为x光。

可见光是人们比较熟悉的。可见光是由光源发出的，发光的物体称为光源。按光的激发方法来说，利用热能激发的光源称为热光源。例如白炽灯、弧光灯。利用化学能、电能或光能激发的光源称为冷光源。

关于光的本性和传播等问题，也很早引起人们的注意。但是直到近代，才认识到光的电磁本性，它既具有波动性，又具有粒子性。

在十九世纪七十年代，麦克斯韦根据自己对电磁现象的研究，指出了光的电磁本性。光的电磁说的主要内容是：光现象实质上是一种电磁现象，光波就是一种频率很高的电磁波。可见光的频率范围大致是 3.9×10^{14} — 7.5×10^{14} 赫芝，包括可见光在内的电磁波传播速度为 3×10^8 公里/秒。

什么是电磁波呢？电磁波的理论基础是电磁场理论。电磁场理论中最基本的概念就是：第一，任何变化的磁场都要在它周围的空間里产生电场；第二，任何变化的电场都要在它周围的空間里产生磁场。根据电磁场理论，可以知道：如果空间某区域中发生周期性变化的电场，那么它在邻近的区域中就引起周期性变化的磁场，这个周期性变化的磁场又要在较远的区域中引起新的周期性变化的电场，接着在更远的区域中引起新的周期性变化的磁场……(图1.1)。

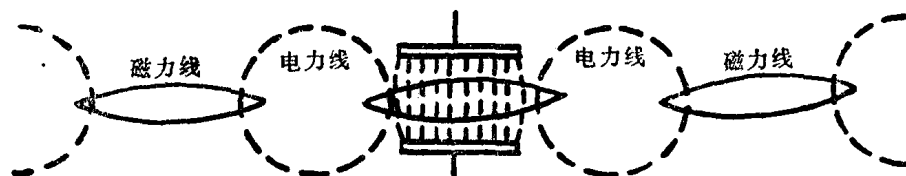


图1.1 周期性变化的电场和磁场传播过程示意图

这种周期性变化的电场和周期性变化的磁场不可分割地相互联系在一起，形成了统一的电磁场。它可以由近及远的向外传播。

电磁场在空间里由近及远的向外传播就形成了电磁波。

电磁波在物理学上通常用下述几个参量描述：即波速 C 、波长 λ 、频率 ν 和周期 T 。它们之间关系为：

$$\lambda = CT \text{ 或 } \lambda = \frac{C}{\nu} \quad (1.1)$$

电磁波的传播速度 C 非常大，在真空中传播速度是 3×10^8 公里/秒，在空气里的传播速度近似地等于在真空中的传播速度。各种电磁波的传播速度相同，但频率和波长则不同（表 1.1）。

表 1.1

电 磁 波 的 种 类	频 率 （以赫芝为单位）	在真空中的波长 （以厘米为单位）
无线电波	$10^4 - 3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^8 - 10^{-2}$
红 外 线	$10^{12} - 3.9 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-2} - 7.7 \times 10^{-6}$
可 见 光	$3.9 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$7.7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$
紫 外 线	$7.5 \times 10^{14} - 5 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-7}$
x 射 线	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{20}$	$10^{-6} - 10^{-10}$
γ 射 线	3×10^{19} 以上	10^{-9} 以下

从表 1.1 可以看出， x 射线、 γ 射线比可见光的波长短，频率高。对各种电磁波的研究可以看出：在一定波长范围内的电磁波具有一定的性质，当波长超过这个范围时，电磁波的性质就起了变化，随着波长的不同出现了不同性质的电磁波。

x 射线由于其波长短，有许多与可见光不同的独特性质，其主要性质如下：

(1) 不可见，依直线传播；

(2) 不带电荷，不受电场和磁场影响；

(3) 能透过可见光不能透过的物质，其中包括肌肉、骨骼、金属；

(4) 与可见光一样有反射、干涉、绕射、折射等现象，但这些现象又与可见光有区别。如 x 射线只有漫散射，不能产生象可见光那样的镜面反射。 x 射线的折射系数非常近于 1，其折射现象不能象可见光一样的能很清楚观察到；

(5) 能使物质产生光电子及返跳电子，以及引起散射现象；

(6) 能被物质吸收产生热量；

(7) 能使气体电离；

(8) 能使某些物质起光化学作用，使照相胶片感光，又能使某些物质发生荧光作用；

(9) 能起生物效应，伤害及杀死有生命的细胞。

1.2 放射线的种类

1.2.1 x 射线与 γ 射线

γ 射线是波长很短的电磁波，它的波长在 10^{-9} 到 10^{-10} 厘米之间，它的速度和光速一样。

它的穿透本领很大，能透过厚达300毫米的钢板。因而 γ 射线被广泛应用于厚工件的探伤。

γ 射线是某些放射性物质，如钴、钍、钋、铀、镭、铀、铯等放射性物质自发产生的。实验证明，我们不能利用光照、温度、压力等外界作用来改变物质的放射性。

x 射线与 γ 射线的产生机理完全不同， x 射线是人为的高速电子流撞击金属靶而产生的。

我们已经知道可见光、 x 射线、 γ 射线、电子、中子等一切微观粒子都是电磁波，具有波动性。理论和实验还证明它们不仅具有波动性，还具有粒子性。微观粒子的二重性是现代物理的重要基础。

x 射线与 γ 射线都可以产生反射、折射、干涉等现象，说明它们具有波动的本性；同时，它们又可以产生光电效应、康普顿效应、电子对效应，说明它们有粒子的本性。

1905年，爱因斯坦提出了关于光的本性的光子假说。这个学说认为光是一粒一粒以光速 C 运动的粒子流。这些光粒子称为光量子，也称光子。 x 射线、 γ 射线与可见光光子一样，也可认为是 x 光子和 γ 光子。光子具有一定的能量，每个光子的能量 ϵ 和光的频率 ν 成正比，即：

$$\epsilon = h\nu = hc/\lambda \quad (1.2)$$

式中： h ——恒量，叫做普朗克常数，它的数值等于 6.624×10^{-27} 尔格·秒；

ν ——电磁波振动频率(赫芝)；

C ——光速；

λ ——波长。

各种频率的光子能量是不相同的。利用1.2式可以算出各种频率的光子的能量。

例如红光波长为 6×10^{-5} 厘米，它的每个光子能量是：

$$\epsilon = h\nu = \frac{hC}{\lambda} = \frac{6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{6 \times 10^{-5}} = 3.31 \times 10^{-12} \text{ 尔格}$$

又例如硬 x 射线波长为 10^{-8} 厘米，它的每个光子能量为：

$$\epsilon = h\nu = \frac{hC}{\lambda} = \frac{6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{10^{-8}} = 1.99 \times 10^{-8} \text{ 尔格}$$

容易看出， x 光的光子能量比可见光能量大得多(差几个数量级) γ 射线由于波长更短，则能量更大(比 x 射线大一个数量级以上)。

1.2.2 α 射线与 β 射线

α 射线(氦核流)、 β 射线(电子流)与 γ 射线都是放射性物质放射的射线。

从放射性同位素的核放射出来的 α 粒子实际上就是氦原子核(${}_2\text{He}^4$)，它的质量和氦核相等，即 $m_\alpha = 4.002775$ 原子质量单位，而且也由2个质子和2个中子组成，带着 $2e$ 正电荷。

α 射线的速度约为 2×10^9 厘米/秒，它是带有 $+2e$ 电荷的氦原子核的粒子流，贯穿本领很小，但有很强的电离作用(光化学作用也强)。

从放射性同位素放射出来的 β 粒子的质量等于0.000549原子质量单位，并带着一个单位 e 的负电荷。所以事实上它就是电子。从核衰变放射出来的 β 粒子在被物质阻止之后，就成为自由电子，和一般电子没有什么不同。但是为了区别起见，通常称从核里出来的电子为 β 粒子或 β 射线。 β 衰变可以看成是母体的核中有一个中子转变成成为质子的结果。

β 射线是高速的负电子流， β 射线的速度约可达到光速的99%， β 射线贯穿本领较大，但

它的能量比 α 射线小得多，对空气的电离作用小。

在进行 γ 射线探伤时，放射性同位素中在放射 γ 射线的同时，常常伴随着放射 α 射线或 β 射线，一般并不直接利用 α 射线或 β 射线进行探伤。

卢瑟福和索第(Soddy)指出，放射性现象的本质是：放射性元素的原子核自发地转变为另一种原子核的过程。这种核的转变过程称为衰变。放射性元素的原子核怎样能放出 α 粒子或 β 粒子呢？

研究指出，在原子核中，两个质子跟两个中子常常更紧密地结合在一起形成一个 α 粒子，因此某些放射性元素能放出 α 粒子。

其次，在原子核中，原子和中子并不是静止不动的，它们在不断地运动着和变化着。在一定条件下，一个中子可以变成一个质子同时放出一个电子。从某些放射性元素的原子核中放出 β 粒子，就是因为它的中子在变成质子时，放出了电子的缘故。

1.2.3 中子射线

当科学家们用 α 粒子去轰击铀时，发现了铀遭受轰击后，发出一种新的射线。研究证明：这种射线是一种由铀原子核抛出的呈中性的微粒流。这些微粒叫做中子。它具有巨大的速度和贯穿本领。它的质量和质子的质量大约相等。

因为中子不带电，和原子核没有排斥作用，所以它能够很容易地钻入原子的深处。中子是一种轰击原子核的有利武器，人们可以利用中子的轰击而获得原子能。

中子射线用于探伤还是近些年的事情。它主要用于特殊检验。 x 射线和 γ 射线照相是根据射线穿过不同材料，衰减量不同而产生影像，材料的原子序数越高，衰减量越大。而中子射线在材料中的衰减，主要取决于材料对中子的俘获能力。例如铅， x 射线和 γ 射线穿过时衰减能量很大，但俘获中子的能力很小；而氢， x 射线和 γ 射线穿过时衰减少，但却能大量俘获中子。一个很厚的铅罐中装有石蜡，用中子射线照相，石蜡图象清晰，而用 x 射线照相则什么也看不到。

用中子射线可以检验火药、塑料和宇宙航空用零件。在工业探伤上中子源一是利用现有的原子反应堆，还有一种叫做镭 252，可以制成携带的中子源。

1.3 x 射线与 γ 射线的发生

1.3.1 x 射线管

x 射线在工业应用上是由一种特制的 x 射线管产生的。图 1.2 为 x 射线管的简单结构和工作原理。

x 射线管从结构上看非常类似二极管。它也是由阴极、阳极和玻璃外壳组成的。我们知道，一般二极管是不能产生 x 射线的。 x 射线管是一种热阴极高压二极管真空管。阴极是一加热灯丝，阳极(又称对阴极或阳极靶)的表面是由耐高温钨制成的靶面。

x 射线管的简单工作原理是：阴极灯丝被加热后，放出热电子，在阳极和阴极间加上高电压(两极间电压一般为几万至几十万伏)，阴

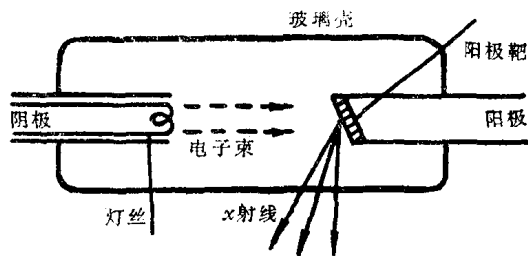


图1.2 x 射线管的原理

极放出的电子在高压电场作用下,即以相当大的速度向阳极靶撞击。高速电子所具有的动能,当撞击到阳极靶后大部分转变为热能被阳极吸收,一小部分转变为x射线,向周围放出。通常探伤用的x射线就是由这种x射线管产生的。一般二极管电子管不产生x射线主要是阳极电压不够高。

1.3.2 白色x射线(连续x射线)

我们知道,x射线是波长比较短的电磁波。x射线的波长范围大致为 10^{-8} — 10^{-10} 厘米。人们通常把获得的x射线按其波长组成为两类:一类是波长在一定范围内连续变化的x射线,称为连续x射线或白色x射线(即x射线是由多种波长组成的)。白色光也是由不同波长的单色光组成的,白色x射线即有波长并非单一的含意。另一类是波长相对单一的x射线,称为标识x射线或特性x射线。

当在x射线管两极间加上30、40、50千伏的管电压时,x射线管所发出的x射线波长、光量子能量如图1.3所示。

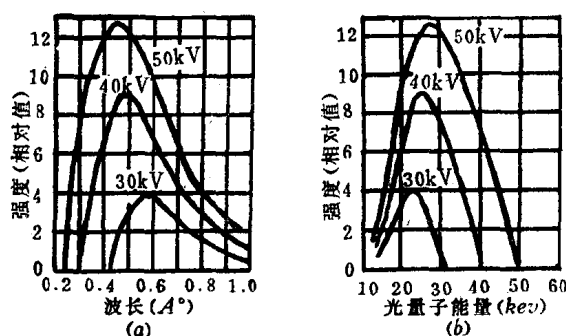


图1.3 连续x射线波长与能量分布

从图中可以看出:x射线管发出的射线波长和光量子能量都在一定范围内连续变化。在图1.3a中,管电压为50千伏时,最短波长 $\lambda_{\min}$ 为 $0.248\text{\AA}$,射线强度最大点对应的波长为 $0.45\text{\AA}$ 左右($\text{\AA} \sim \text{埃}, 1\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米)。当管电压降低时,最短波长 $\lambda_{\min}$ 和射线强度最大点对应的波长将增大。

$$\epsilon_{\max} = hc/\lambda_{\min} = eV \quad (1.3)$$

式中: $\epsilon_{\max}$ ——最高量子能量;

h ——普朗克常数;

c ——光速;

$\lambda_{\min}$ ——最短波长;

e ——电子电荷;

V ——x射线管上的电压。

取波长 λ 单位为 $\text{\AA}$ (埃),管电压 V 单位为千伏(KV),则有下列关系式:

$$\lambda_{\min} = 12.395/V \quad (1.4)$$

1.4式给出了x射线管电压与产生连续x射线中的最短波长 $\lambda_{\min}$ 的关系式。

最短波长 $\lambda_{\min}$ 对应的x射线光子能量为 $\epsilon_{\max} = hc/\lambda_{\min}$,并且 $\epsilon_{\max} = eV$ 。

x射线管中产生的x射线的波长为什么是连续变化的呢?当x射线管电压为 V 时,冲击到阳极靶表面的电子能量为 eV ,如果电子能量全部转化为x射线光子能量,则按1.3式有 $\epsilon_{\max} = hc/\lambda_{\min}$ 的关系式。但是阴极发射出来的高速电子的动能 eV ,在撞击阳极靶时常不是一下子等于0。电子撞击阳极靶的能量转换过程大致是:经过第一次撞击,电子处于中间状态,还具有 $(eV)_1$ 能量,此时电子失去的能量即转换成光子能量为: $eV - (eV)_1 = hc/\lambda_1$;

经过第二次撞击, 电子处于第二中间状态, 还具有 $(eV)_2$ 能量, 此时电子失去的能量即转换成光子能量为: $(eV)_1 - (eV)_2 = hc/\lambda_2$ 。如此撞击若干次, 电子动能将转变为多种不同波长(当然也可能有相同波长)的 x 射线, 同时也转换为热能 H 。电子撞击阳极靶的能量转换可以用1.5式表示。

$$eV = hc/\lambda_1 + hc/\lambda_2 + \dots + H \quad (1.5)$$

很明显, $hc/\lambda_1, hc/\lambda_2, \dots$ 比对应于临界波长(最短波长)的光量子 $\epsilon_{\max} = hc/\lambda_{\min}$ 要小。当大量电子撞击阳极靶时, $hc/\lambda_1, hc/\lambda_2, \dots$ 就可以得到任意值, 这样, x 射线的波长就成为连续变化的了。这就产生了连续 x 射线, 即白色 x 射线。象这样由金属阳极靶的原子核外电子场来制动高速冲击来的电子束产生的 x 射线, 也称为制动 x 射线或称韧致辐射。

x 射线管在单位时间内所发出的连续 x 射线的全部能量实验公式为:

$$\epsilon = \eta_0 I Z V^2 \quad (1.6)$$

式中: I ——管电流;

V ——管电压;

Z ——阳极靶材料的原子序数;

η_0 ——常数。

如图1.3所示, 连续 x 射线总强度(曲线与水平轴所形成的面积称总强度)与 x 射线管的管电压 V 成平方关系, 阳极靶材料的原子序数高则产生的 x 射线的总强度大。

x 射线管工作时需要有电源供电, 纯直流电源单位时间内供给 x 射线管的能量为 IV , 所以 x 射线的转换效率 η 为:

$$\eta = \epsilon / IV = \eta_0 I Z V^2 / IV = \eta_0 Z V \quad (1.7)$$

式中 $\eta_0 = 1 \times 10^{-9}$, 当阳极靶采用金属钨时, 原子序数 $Z \approx 74$, 管电压 $V = 100$ 千伏时, 转换效率 η 大约为0.7%。当管电压 $V = 200$ 千伏时, 转换效率 η 大约为1.5%。当管电压 $V = 400$ 千伏时, 转换效率 η 大约为3%。提高 x 射线管电压转换效率可以提高, 但由计算结果可以看出, x 射线管中的高速电子动能大部分转换为热能。

我们用来探伤的 x 射线管所产生的 x 射线都属于连续 x 射线。了解连续 x 射线的波长分布对于研究射线的透过和吸收是有帮助的。

1.3.3 特性 x 射线(标识 x 射线)

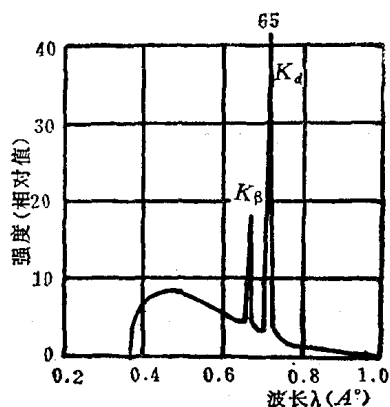


图1.4 管电压为35KV时钼的标识 x 射线与连续 x 射线的分布

标识 x 射线的波长分布与连续 x 射线不同。在 x 射线谱中, 除了波长连续分布的连续 x 射线外, 还有几个特别的波长, 其强度非常大, 如图1.4所示。这个波长的数值与电压大小无关, 而与组成阳极的元素有一定关系。这些波长的 x 射线便称为各该元素的标识 x 射线。

图1.4所示的是在管电压为35千伏下, 钼(M_o)所产生的两条标识 x 射线。其波长为 $0.63\text{\AA}$ 和 $0.71\text{\AA}$, 分别称为钼的 K_β 和 K_α 。这样两个波长的强度大, 即此时 x 射线束中含有这两个波长的光子数比起其它波长来多得多。波长与强度关系不是连续变化, 这就是标识 x 射线的特点。

事实上, 一个元素产生的标识 x 射线按其波长来排

列可分为K、L、M、O、P等系，每系又分好几条，上述之 K_β 和 K_α 就是属于K系的标识x射线。

实验证明，每种元素之标识x射线的波长是严格不变的数值，这一情况促使人们推测标识x射线是由于在离开平衡状态的阳极物质原子中所进行的某种特殊过程而产生的。假若有一个动能很大的外界电子打入原子中，则原子内层的一个电子便会被其击出。但因原子的所有内层轨道都被占满，而只能把电子击到未被其余电子占满的原子边界上的任何一层轨道上。这样原子能量就高了，处于激发状态。它一定要向稳定状态转换。但在转换为正常状态时，在不同原子中是按不同方式进行的。假如K层电子被打击出一个，则任一L层电子即可

转换到K层轨道上，这就为较远的电子空出地方。当然L层以外的电子也可跳到K层。

电子的这种跳跃，就造成了能量的放出，会产生可见光或x射线的光量子形式进行辐射的现象。辐射频率决定于：

$$h\nu_{nR} = \varepsilon_n - \varepsilon_R \quad (1.8)$$

式中： ε_n ——电子在远的轨道上的能量；

ε_R ——电子在近的轨道上的能量；

ν_{nR} ——当电子由较远轨道跳到较近轨道时所放射出的辐射线的频率。

假若 $\varepsilon_n - \varepsilon_R$ 差数小，便会产生可见光(当原子外层范围中的电子跳跃时产生此种情况)；假若这个差数很大(即在原子量很大的原子内层产生电子跳跃时)则就会产生x射线——标识x射线。

当任一电子跃到K层时，便产生K系标识x射线；跳到L层时便产生L系标识x射线，如图1.5所示。当电子从相邻层跳来，则出现相应系的 α 谱线，如从相隔一层跳来，则产生相应系的 β 谱线，以此类推。另外，当L系x射线产生时，一般不同时产生K系x射线，但K系x射线的发

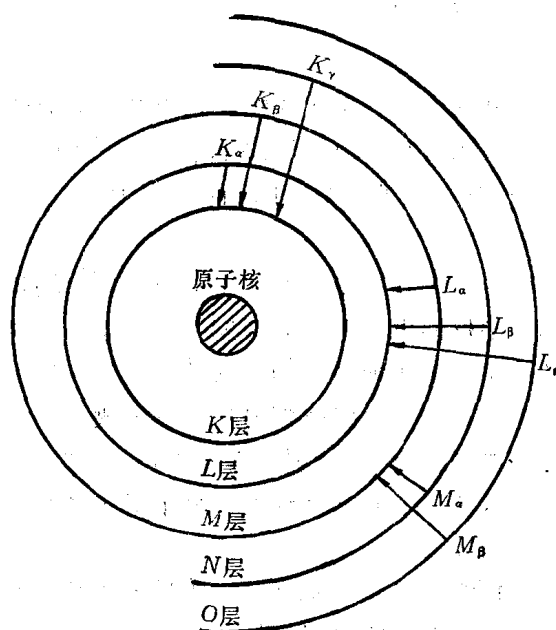


图1.5 标识x射线产生机理

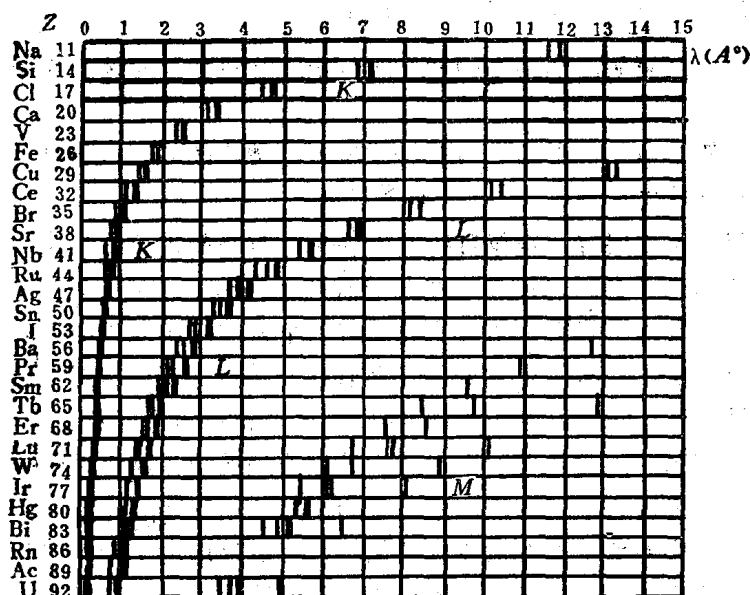


图1.6 各元素标识x射线的波长

生总是伴随有L等系的x射线的产生。至于L、M……等系也是一样。

由于原子中的电子轨道分为若干层，每一层电子的能量又不同，各元素的原子内部结合情况不一，因此在用电子束去撞击原子，使其成激发状态所需的能量随元素的不同而具有一定的各不相同的数值，故各元素就能发出自己固有的标识x射线谱来。我们可以利用不同元素有不同的固定波长的标识x射线来鉴别元素并进行物质的化学成份的定性、定量分析。图1.6所示即各元素标识x射线所对应的波长。

射线探伤应用的x射线一般是连续x射线，而不是标识x射线。

1.3.4 γ射线的发生

1. 元素和原子结构

我们已经知道，地球上所有的物质是由各种不同的元素组成的。构成某一元素的最基本的单位是该元素的原子。原子是很小的粒子，它的直径只有 10^{-8} 厘米左右。原子的质量也十分微小，最轻的氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} 克，就是最重的铀原子的质量也不过是 3.951×10^{-22} 克。

原子是化学元素中的最小粒子。不同元素的原子具有不同的性质，但是它们的构造是十分相似的。原子是由带正电的原子核和围绕原子核的电子所组成。原子核带正电荷，电子带负电荷，正常的原子在电极性上呈中性，其电子数等于原子核的电荷数。当原子失去一个或数个(或增加一个或数个)绕行电子时，它就带有电荷。此时我们就把它称为离子。

通常用字母Z来表示不同元素的原子核所带的正电荷数(用e为单位)，亦即是绕行电子数，它称为原子序数。不同的元素恰好用Z的数值从1到92来代表。近年来，又在实验室内制造出原子序数比铀还高的新元素，即所谓超铀元素。

外层电子和原子核构成一个原子，可是它们的质量相差很远。原子核差不多具有原子的全部质量，电子的质量比起核来要轻很多。例如，最轻的氢原子核的质量是 1.67243×10^{-24} 克，而它的一个外层电子的质量却只有 9.1085×10^{-28} 克。二者的比是：

$$\frac{\text{电子质量}}{\text{氢核质量}} = \frac{9.1085 \times 10^{-28}}{1.67243 \times 10^{-24}} = \frac{1}{1836}$$

原子序数大的元素，这个比数还要小些，例如，铀原子的92个绕行电子的总质量和核的质量的比只有1/4714。

原子核的质量虽然几乎等于原子的质量，可是核只占着整个原子的极小的一部分空间。原子的直径约 10^{-8} 厘米左右，而核的直径仅在 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 厘米之间。

原子中的电子是按层分布的。每一个壳层有一定数目的几个轨道，每个轨道最多只能有一个电子。最靠近核的是K壳层，它有两个轨道，所以最多只能有两个绕行电子。其次是L壳层，它有两个支壳层，第一个支壳层有两个轨道，第二支壳层有六个轨道，所以L壳层最多只能有8个绕行电子。第三层是M壳层，它有三个支壳层，共有18个轨道，所以最多只能有18个绕行电子。一般说来，壳层里可以有的最大电子数目可以用 $2n^2$ 来表示(n 为层数， $n=1$ 代表K壳层， $n=2$ 代表L壳层，余者类推)。由此可看出，越到外层容纳的电子越多，但最外一层的电子数是严格限制的，总不会超过八个。这样可把元素的周期律用原子的电子壳层理论来解说：当发生化学变化时，原子深处电子不发生多大变化，只有最外层电子发生了位置和运动的变化。因此，原子最外层的电子多少，就基本上决定了原子的化学性质。故在元素周期表中把各元素的最外壳电子从1~8作周期性地排列时，元素的化学性质也在周期性地

变化。

在某一轨道绕行的电子具有一定的能量。K壳层轨道的电子能量最低，越往外的轨道电子的能量越高。原子在正常状态时，电子是在距原子核最近的轨道上运行，此时原子能量最小，也最为稳定。当从外界输送能量给原子时，电子可以吸收外来的能量而从能量较低的轨道跃迁至能量较高的轨道（电子从内层跃迁到外层或脱离原子），此时原子即处于激发状态。激发状态的原子是不稳定的，很快就会复原，即电子跃回到低能轨道，而多余的能量视其大小不同，以 α 射线或可见光的形式放出。

2. 原子核的结构和同位素

在1932年中子被发现之后，人们对于原子核的构造才得到进一步的正确了解。原子核是由质子和中子组成的。质子带正电，质子数与电子数相等，也即为原子序数 Z 。中子不带电，它的质量是 1.6747×10^{-24} 克，与质子差不多。

原子核是由质子和中子相结合而成的。质子数加中子数就等于原子质量数(A)，任何一个原子核都是由 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子组成。

同位素：原子序数相同而原子质量不同的同一种元素，它们在周期表上占有同一位置，因此称为同位素(isotopes)。同位素的化学性质相同，但原子核的质量不同，这是因核中的中子数不同的原因，因此同位素也即质子数相同而中子数不同的原子。

同位素有稳定和不稳定的。不稳定的同位素又叫放射性同位素。原子核是由质子和中子组成的，但是，在一个核里，质子和中子的相对数目并不是可以成任意比例的。一般说来，在原子序数 Z 小的稳定同位素中，中子数差不多等于质子数或略多一些。在原子序数 Z 大的同位素中，中子要比质子多。当 Z 甚大时，中子要比质子多50%左右。任何含有过多中子或质子的核，都会是不稳定的。

核子间除了有质子与质子间的静电排斥力外，尚存在一种很强的具有引力性质的力，叫做核力。对稳定的核而言，核力克服了静电斥力而使核子(中子、质子)得以紧紧地结合在一个小体积(核)里。

3. 核能级

如同原子一样，原子核也具有许多能级，最低的能级称为基级，高的能级称为激发能级。通常用平行线来表示核的能级，最低的线代表基级，用0来标记。表示激发能级的横线和基级线的距离系与它们的能量差成正比(用兆电子伏特为单位)。

在原子核物理上，常用的能量单位尔格则嫌太大。一般采用电子伏特(eV)作为能量的单位。所谓电子伏特是指电子在电位差为1伏特的电场中从阴极走到阳极时所获得的能量。因为电子所带的电荷为 4.8×10^{-10} 静电单位，1伏特的电位差等于 $\frac{1}{300}$ 静电单位，所以

$$1 \text{ 电子伏特} = 4.8 \times 10^{-10} \text{ 静电单位 (电荷)} \times$$

$$\frac{1}{300} \text{ 静电单位 (电位差)} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格}$$

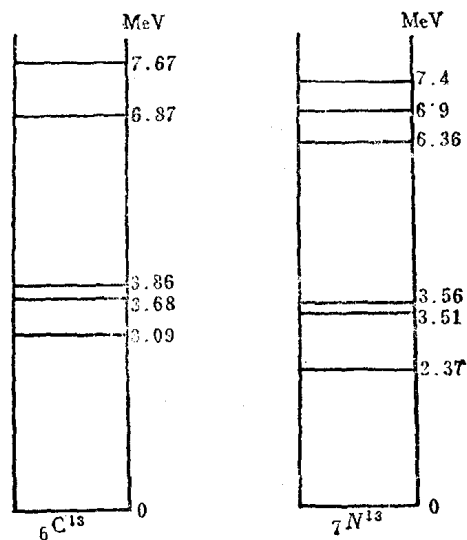


图1.7 碳-13与氮-13的原子核能级图

注：图里碳-13和氮-13的基级画在一条水平线上，实际上碳-13的基级要比氮-13的基级低2.29兆电子伏特。