

锅炉安全监察基础

(下 册)



水利电力部电力生产司
西北电业管理局

言

锅炉压力容器是生产、生活中广泛使用的具有爆炸危险的设备，这些设备或其某一部件的损坏都可能导致灾难性的后果，因此世界各国都十分重视它们的安全问题。实施设计、制造、安装、检修、使用等阶段的全过程安全监察是世界各国普遍实行的制度。

电站锅炉与热力系统压力容器是火力发电厂生产过程中不可缺少的设备，其安全运行是发电厂安全生产的重要决定因素。我国电力工业锅炉监察体系始于五十年代，在当时的历史条件下，主要以苏联经验为蓝本，制定了《电力工业锅炉监察规程》，培训了一批锅炉监察工程师，建立健全了发电厂锅炉防爆制度，而后又相继组建了化学监督、金属监督、热工仪表监督专业，加强了焊接工作的管理，包括焊工与无损检验人员的考核培训工作。在发电设备向高参数，大容量发展进程中，在确保发电设备的安全可靠运行，起了很大的作用。在文革期间，发电厂锅炉监察工作受到冲击被削弱，设备制造质量下降，运行管理水平下降，事故以致恶性事故不断。针对上述情况，根据国务院1982年颁发的《锅炉压力容器安全监察暂行条例》，水利电力部于1983年决定恢复锅炉监察工程师建制，逐步实现由锅炉监察归口管理、化学、金属、焊接、热工各方面配合协作的发电厂锅炉压力容器安全监察体系，并逐步扩大为包括设计、制造、安装在内的全过程安全监察，以求大幅度、稳定地改变发电厂锅炉压力容器的不安全状况。

锅炉压力容器安全监察是一种技术性很强的管理工作，它以事故预防为主要目的。作为锅炉监察工作者，必须十分熟悉国内外有关规程，掌握国内外发生的锅炉压力容器事故的信息。随着发电设备的技术进步与诊断技术的不断发展，又需要不断实现自身的技术进步。

锅炉监察工作的技术领域包括力学、冶金、热处理加工、焊接、传热、水动力、失效分析及安全系统工作等诸方面，要从事事故分析、规程制度、反事故措施的制订审查工作，以科学态度实行安全监察在知识的广度与深度方面无疑有一定的要求。

在此恢复锅炉监察工程师建制，实行干部新老交替的情况下，部锅炉压力容器监察委员会认为有必要组织出版一些规程汇编、事故汇编、手册和学习参考材料。供从事电力系统锅炉压力容器安全监察工作的同志全面提高业务能力之用，并认为这些资料的出版发行将有利于各项规程制度的贯彻。

这本锅炉压力容器安全监察基础知识是上述资料的重要组成部分，是由西北电管局安监处负责组织撰稿，由国内许多有实践经验的同志编写而成的，希望它能对各级锅炉监察工程师广泛地掌握有关锅炉压力容器安全监察业务知识有所帮助。

本书内容以大、中型火力发电厂燃煤电站锅炉为主，对从事其他锅炉、压力容器制造、安装、使用修理、改造工作的工程技术人员也有参考价值。

能源部锅炉压力容器安全监察委员会办公室主任

钱群鹏

88, 10, 28

第八篇 无损探伤

西安热工研究所 刘德荣 高级工程师

目 录

第一章 射线探伤

第一节	射线探伤的物理基础	(1)
第二节	射线探伤设备	(12)
第三节	射线照相探伤工艺	(16)
第四节	焊缝的射线透照	(30)
第五节	探伤结果的评定	(35)
第六节	射线照相检验报告及底片存档	(44)
第七节	辐射防护	(44)
第八节	国内外有关射线探伤标准题录	(56)

第二章 超声波探伤

第一节	超声波探伤的物理基础	(57)
第二节	超声波探伤仪	(76)
第三节	超声波探头	(81)
第四节	试块	(85)
第五节	超声波探伤系统工作性能测试方法	(94)
第六节	超声波探伤的通用技术问题	(97)
第七节	AVG (DGS) 图及其应用	(104)
第八节	各种规则形状反射体的反射波波高的近似计算公式	(109)
第九节	探伤法	(110)
第十节	压力容器用钢板探伤	(117)
第十一节	高压无缝钢管探伤	(121)
第十二节	压力容器锻件探伤	(123)
第十三节	锅炉大口径管座角焊缝探伤	(126)
第十四节	锅炉和刚制压力容器对接焊缝的探伤	(129)
第十五节	电力管道焊缝的探伤	(132)

第十六节 国内有关超声波探伤标准题录	(137)
--------------------------	-------

第三章 磁粉探伤

第一节 磁粉探伤的原理和特点	(139)
第二节 磁粉探伤的物理基础	(141)
第三节 磁化方法	(152)
第四节 磁化电流	(160)
第五节 磁粉探伤设备	(163)
第六节 磁粉探伤器材	(164)
第七节 磁粉探伤工艺	(168)
第八节 磁痕分析	(175)
第九节 质量管理	(176)
第十节 国内外有关磁粉探伤标准题录	(179)

第四章 渗透探伤

第一节 渗透探伤的原理及特点	(181)
第二节 渗透探伤的种类和应用范围	(182)
第三节 渗透探伤的物理基础	(182)
第四节 渗透探伤材料	(184)
第五节 渗透探伤设备	(198)
第六节 渗透探伤方法	(201)
第七节 显示痕迹的解释	(210)
第八节 探伤剂性能的检查	(212)

第九篇 锅炉强度计算

西安交通大学 夏长江 副教授

目 录

第一章 概论

第一节	锅炉受压元件的可能失效方式	(216)
第二节	锅炉规范	(217)
第三节	元件强度和材料强度	(218)
第四节	极限应力和极限分析法	(219)
第五节	安定性 (Shakedown) 的初步概念	(222)
第六节	常规设计 (按规则设计) 和分析设计	(224)
第七节	应力分类及对不同应力的控制	(225)
第八节	热应力	(226)
一、	圆筒形元件的稳态热应力	(228)
二、	圆筒形元件热应力解的分析	(231)
三、	热瞬变过程的热应力	(232)

第二章 回转壳体的应力状态

第一节	薄壁圆筒的应力分析	(235)
第二节	承受内压力的回转壳体的薄膜应力	(236)
第三节	厚壁圆筒的应力分析	(242)
第四节	厚壁圆筒应力分析结果和圆筒的薄膜应力的比较	(247)

第三章 无减弱的回转壳体的强度设计

第一节	圆筒形元件强度—爆破压力	(250)
第二节	圆筒形元件强度—屈服压力	(252)
第三节	圆筒形元件强度—持久爆破压力	(258)
第四节	许用应力和安全系数	(259)
第五节	承受内压力的无减弱圆筒形元件强度计算基本公式	(267)
第六节	附加壁厚	(268)
第七节	计算压力和计算壁温	(269)

第八节	圆筒椭圆度引起的附加弯曲应力的估计及允许椭圆度的确定	(272)
第九节	弯头的强度及其计算	(275)

第四章 有减弱的回转壳体的强度设计

第一节	圆筒壳和球壳上孔周围的应力状态	(281)
一、	无限大平板上圆孔周围的应力	(281)
二、	无限大平板上椭圆孔孔边上应力	(283)
三、	曲率的影响	(285)
第二节	内压壳体上管接头处的应力状态	(287)
第三节	端部作用载荷的显著程度和不显著程度及其判据	(290)
第四节	回转壳体上的两类开孔	(292)
第五节	有孔排或焊缝减弱的锅筒和集箱的强度	(293)
一、	孔桥减弱系数	(293)
二、	孔桥区强度条件	(294)
三、	焊缝减弱系数	(299)
第六节	凸形封头的强度计算	(302)
第七节	两类强度计算—设计计算和校核计算	(308)
一、	设计计算	(309)
二、	校核计算	(310)

第五章 孔的加强

第一节	加强结构	(313)
第二节	未加强孔最大允许直径	(314)
第三节	单孔的加强	(316)
一、	讨论和判断加强作用的特征截面	(317)
二、	加强金属的有效范围	(317)
三、	加强金属的配置	(320)
四、	单孔加强条件	(320)
五、	压力面积法加强计算	(325)
六、	加强元件的连接强度	(328)
第四节	孔排的加强	(331)

第六章 受弯曲作用的平端盖的强度

第一节	平板的变形特点	(334)
第二节	等厚度均布载荷圆平板的弯曲	(340)
第三节	平端盖、平堵头和椭圆形盖板的强度计算	(344)

第七章 疲劳分析

第一节	高周疲劳	(350)
第二节	低周疲劳和低周疲劳设计曲线	(351)
第三节	平均应力影响及其对疲劳设计曲线的修正	(355)
第四节	平均应变的影响	(359)
第五节	缺口对疲劳性能的影响	(359)
第六节	ASME的疲劳分析方法	(360)
第七节	非恒定应力的疲劳问题—积累损伤问题	(363)
第八节	TRD的疲劳分析方法	(364)
一、	简化计算方法	(365)
二、	TRD301附录1的计算方法	(366)
第九节	裂纹疲劳扩展规律	(373)
第十节	裂纹疲劳扩展量	(378)
第十一节	疲劳寿命或剩余寿命的确定	(380)

第十篇 锅炉损坏形式与特征

能源部 钱祥鹏 高级工程师

目 录

参考书目 (略)	(381)
绪言	(381)
第一章 锅炉故障分析方法	
第一节 概述	(382)
第二节 故障分析原则	(382)
第三节 故障分析程序与内容	(384)
第四节 各种检验方法的适用性	(387)
第五节 锅炉受压元件的故障形式	(392)
第二章 材质不良引起的事故	
第一节 概述	(396)
第二节 锅筒的低温冷脆	(498)
第三节 管材缺陷	(499)
第三章 结构不良引起的事故	
第一节 概述	(402)
第二节 锅炉水动力问题	(404)
第三节 锅炉热应力问题	(415)
第四节 锅炉热疲劳问题	(420)
第五节 锅炉振动问题	(424)
第六节 锅炉飞灰磨损问题	(425)
第七节 锅炉过热器金属过热问题	(427)
第四章 与汽水品质有关的事故	
第一节 概述	(434)
第二节 苛性脆化	(435)
第三节 垢下腐蚀与氢脆	(436)
第四节 关于蒸汽机械携带	(438)
第五章 与操作, 燃烧有关的事故	
第一节 概述	(439)
第二节 锅内故障	(440)
第三节 炉内故障	(442)
第六章 与安装, 检修有关的事故	
第一节 概述	(445)
第二节 焊接缺陷引起的故障	(446)

第八篇 无损探伤

无损探伤是对材料、工件或组件进行非破坏检验，以发现材料、工件或组件中的裂纹、气孔、夹杂物等宏观缺陷为主要目的。

无损探伤具有下述一些特点：不破坏检验对象；可发现缺陷并作出相应的评价，以保证材料、工件或组件的质量；可对部件在使用中进行定期检查，以保证安全运行，避免事故的发生。

本篇介绍下述四种常用的无损探伤方法：

探伤方法	英文缩写符号
射线探伤	RT
超声波探伤	UT
磁粉探伤	MT
渗透探伤	PT

第一章 射线探伤

第一节 射线探伤的物理基础

一、射线的性质

工业上广泛应用的射线探伤有X射线探伤和 γ 射线探伤。

X射线和 γ 射线与无线电波、红外线、可见光和紫外线一样，均是电磁波，以 3×10^8 m/s的恒定速度在空间传播。

X射线和 γ 射线是波长很短的电磁波（表8-1-1）。

波长和频率的关系为：

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (8-1-1)$$

式中 λ ——波长，m；

ν ——频率， s^{-1} ；

c ——电磁波的传播速度， 3×10^8 m/s。

电磁波从它们的发射体出发，在空间或媒质中向各个方向传播的过程称为辐射。电磁射除具有波动性外，还具有粒子性，即波粒二象性。X射线和 γ 射线在衍射等现象中显示出波动性，在光电效应和康普顿效应等现象中显示出粒子性。光粒子称为光量子，也称

表8-1-1

各种电磁波波长分布的范围

电磁波种类	波长 (cm)	电磁波种类	波长 (cm)
无线电波	$3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^{-3}$	紫外线	$4 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-7}$
红外线	$3 \times 10^{-2} \sim 7.7 \times 10^{-5}$	X射线	$10^{-6} \sim 10^{-10}$
可见光	$7.7 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$	γ射线	10^{-9} 以下

作光子。X射线和γ射线的粒子分别称为X光子和γ光子。光子是不带电的，具有一定的能量。射线探伤中所说的射线能量，指的即是X光子或γ光子的能量。光子的能量大小与频率成正比，即：

$$E = h\nu = h \cdot c / \lambda \quad (8-1-2)$$

式中 E ——X光子或γ光子能量，J；

h ——普朗克常数， 6.626×10^{-34} JS；

ν ——频率， s^{-1} ；

c ——光速， 3×10^8 m/s；

λ ——波长，m。

由于X射线和γ射线是波长很短的电磁波，因此它们具有可见光等其它几种电磁波所没有的性质。X射线和γ射线的主要性质有：

①不可见，依直线传播。

②它本身不带电，不受电场和磁场的影响。

③具有很强的穿透力，它能穿透可见光不能穿透的物质，其中包括肌肉、骨骼、黑纸和金属等。波长愈短，穿透能力愈强。

④与可见光一样有反射、干涉、衍射、折射等现象，但这些现象与可见光有区别。

⑤能使物质产生光电子和返跳电子及诱发荧光X射线，以及引起散射现象。

⑥能被物质吸收，强度减弱。

⑦能使某些物质起光化学作用，使照相胶片感光，对于某些物质能激发荧光。

⑧能使物质电离。

⑨能引起生物效应，杀伤生物细胞。

二、射线的产生

1. X射线产生的原理

X射线是高速运动的电子流撞击一个障碍物而急剧减速时产生的。因此，为了产生X射线必须同时具备以下三个条件：

①要产生一定数量的电子；

②迫使这些电子在一定方向上作高速运动；

③在电子运动方向上设置一个适当的能急剧阻止电子运动的障碍物。

在实际工业应用上，X射线是由X射线管产生的。产生X射线的原理图如图8-1-1所示。它的工作原理是：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（一般为几十千伏至几百千伏），阴极灯丝放出的热电子在高压电场作用下，以相当高的速度飞向阳极，高速电子撞击阳极靶时急剧减速，而丧失了动能，大约1%左右的动能转换成X射

线能量，绝大部分的动能在阳极靶上变成了热量。

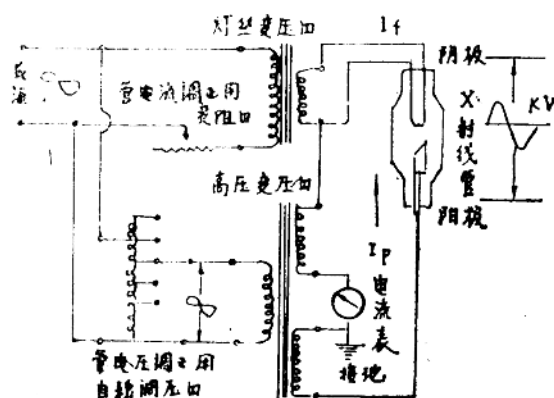


图 8-1-1 产生X射线的原理

2. 连续X射线

X射线是高速电子被阳极靶阻止时所发出的韧致辐射。高速电子的动能 E_e 转变成X射线能量 $h\nu$ 和热量 Q ，

$$E_e = h\nu + Q \quad (8-1-3)$$

当管电压一定时，撞击阳极靶的一个电子的能量为 eU ，则有

$$eU = h\nu + Q \quad (8-1-4)$$

对于电子流中的不同电子而言， $h\nu$ 和 Q 的比例可各不相同，X光子能量 $h\nu$ 可从最大的能量 eU 至0连续变化，即X射线的波长从一最短波长 λ_{min} 至 ∞ 连续变化，所以韧致辐射的X射线是连续X射线，也称作白色X射线。

电子的全部动能都变为X光子能量($Q=0$)时， $h\nu=eU$ ，这时X光所对应的波长称为最短波长 λ_{min} ，它与管电压的关系为：

$$\lambda_{min} = \frac{12.395}{U} \quad (8-1-5)$$

式中 λ_{min} ——最短波长， 10^{-8}cm ，

U ——管电压，kV。

3. 标识X射线

高速电子撞击阳极靶时，将靶原子内层的电子击到外层电子轨道上，使原子处于激发态。当原子从激发态向低能态或基态，即外层电子向内层轨道跃迁时，辐射出可见光或X射线。电子跃迁的能级差大时，则辐射出X射线。这种X射线称为标识X射线，也称作特征X射线。

辐射的光子能量($h\nu$)由下式决定：

$$h\nu = E_n - E_m \quad (8-1-6)$$

式中 E_n 、 E_m ——分别为原子一高能级和一低能级的能量。

根据玻尔理论，在不同轨道上运动的电子各有确定的能量。相应地原子有一系列不连续的能级。因此，标识X射线光子的能量(或波长)是不连续的。

4. X射线谱

① 射线强度

如前所述,射线能量就是光子能量。在原子核物理和射线探伤中用电子伏(eV)、千电子伏(keV)或兆电子伏(MeV)计量光子能量。1eV的物理意义是:一个电子通过1V的电场时,所获得(或减少)的能量。 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

射线强度的定义是:在单位时间内,通过某点垂直于射线传播方向上单位面积的射线能量。对于单能射线,即光子能量均相同的光子流而言,显然射线强度正比于单位时间内通过垂直于射线传播方向上单位面积的光子数。

在实际检测中,我们测量的是辐射场中某点的照射量率^①,即每秒伦琴数,也就是用照射量率来度量射线强度。

对于X射线探伤设备,人们一般用mA管电流和最高管电压时,在离焦点1m处的照射量率来说明一个X射线管的工作能力,这个数据称为X射线探伤设备的照射量率常数。其单位为 $\text{R}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{mA})$ 。利用这个常数可计算出在不同管电流、最高管电压时辐射场中距焦点不同距离处的射线强度(即照射量率)。

表8-1-2 给出几种管电压X射线探伤设备的照射量率常数、

表8-1-2 几种管电压X射线探伤设备的照射量常数

管电压 (kV)	照射量率常数 $\left(\frac{\text{R}\cdot\text{m}^2}{\text{h}\cdot\text{mA}}\right)$	管电压 (kV)	照射量率常数 $\left(\frac{\text{R}\cdot\text{m}^2}{\text{h}\cdot\text{mA}}\right)$
50	11.4	150	38.0
70	14.4	200	61.2
100	19.2	250	96.0
125	27.0	300	144

注:半波发生器,钨靶,在50, 70, 100和125~300KV, 分别1, 1.5, 2和3 mm 铝全束过滤。

2. X射线谱

X射线谱是X射线的强度(一般是相对强度)按波长分布的图形常以相对强度和波长作为坐标画成。连续X射线的波长是连续的,因此,连续X射线谱为一条曲线,而标识X射线谱是断续的线状谱,一般是叠加在连续谱上。

图8-1-2 示出不同管电压、管电流时的连续X射线谱;图8-1-3示出钨靶的标识X射线和连续X射线谱(管电压35kV时)。

实验表明,在单位时间内从X射线管发出的连续X射线的总能量 ϵ 为:

$$\epsilon = \eta_i I Z U^2 \quad (8-1-7)$$

式中 η_i ——常数;

I ——管电流;

Z ——阳极靶材料的原子序数;

U ——管电压。

从图8-1-2和式(8-1-7)可以看出,连续X射线有下述特点:

α 、对于每一管电压,有一最短波长 $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\min}$ 与管电压的关系如式(8-1-5)所示。

^①以往称其为剂量率。

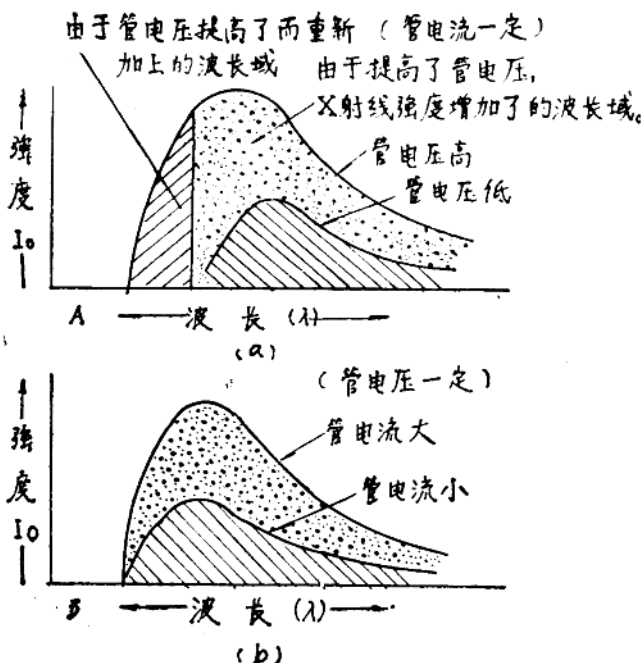


图8-1-2 不同管电压、管电流时的连续X射线谱

(a) 管电流一定、管电压不同时;

(b) 管电压一定、管电流不同时

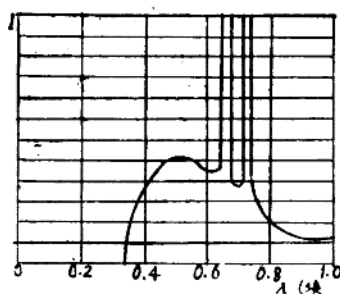


图8-1-3 含标识X射线谱的连续X射线谱

(钨靶, 管电压35kV)

式中 η_0 ——常数, 1×10^{-9} ;
 Z ——靶材料的原子序数;
 U ——管电压, V。

X射线的转换效率正比于靶材料的原子序数和管电压。

b、射线强度有一最大点, 其对应的波长为 λ_{max} , 它与 λ_{min} 的关系为 $\lambda_{max} \approx 1.5\lambda_{min}$

c、管电压增高, 射线强度增大, λ_{min} 和 λ_{max} 向左移, 射线变硬。

d、管电流增加, 射线强度增大, λ_{min} 和 λ_{max} 不变。

e、X射线的总强度与靶材料的原子序数、管电流以及管电压的平方成正比。

X射线的转换率效 η 为:

$$\eta = \eta_0 ZU \quad (8-1-8)$$

① λ_{max} 是连续X射线中强度最大点所对应的波长, 并非指最大或最长波长, 下脚max是习惯上这样写

标识X射线的特点是：

①线状谱的波长决定于靶的元素：对于每一元素，它的线状谱波长是严格不变的，与管电压无关。

②管电压增高，标识X射线强度增大，管电流增加强度亦增大。

③标识X射线有K系、L系等系，各系的线状谱波长取决于各元素原子的电子壳层以及能级情况。

图8-1-2所示的是在管电压为35kV下，钼（Mo）所产生的两条标识X射线。其波长分别为 $0.63 \times 10^{-8} \text{cm}$ 和 $0.71 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。

标识X射线的相对强度虽然很强，但相对X射线管发出的总强度来说，强度还是很小的，射线探伤应用的X射线主要是连续X射线。

(5) X射线的线质

所谓X射线的线质是用软、硬来定性区分的，以形象地说明射线的穿透能力。硬X射线穿透能力强，软X射线穿透能力弱。X射线的软硬取决于管电压，管电压愈高，射线愈硬（见表8-1-3）。

表8-1-3

不同线质X射线对照表

	管电压	穿透能力	光子能量	波长	半值厚度
软X射线	低	弱	低	长	薄
硬X射线	高	强	高	短	厚

三、γ射线的产生

1. 放射性同位素

质子数（即核电荷数）相同、中子数不同的同一元素的原子互称同位素。对于其中具体地每种同位素又称为核素。例如天然存在的铀元素由三种核素组成，它们的质子数（Z）都等于92，而中子数（N）分别为142、143和146。这三种核素合称为铀的同位素。

同位素（核素、元素的原子核）常用符号 ${}^A_Z X$ 表示。X为元素的化学符号，Z代表原子核中质子数（即核电荷数、原子序数），A代表质量数（即质子数和中子数之和）。例如 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 、 ${}^{192}_{77}\text{Ir}$ 和 ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ 等。除在描述核反应时注明质子数外，一般仅注明质量数，写作 ${}^{60}\text{Co}$ 、 ${}^{192}\text{Ir}$ 和 ${}^{137}\text{Cs}$ 。有时将质量数写在元素符号的右上角，例如 Co^{60} 、 Ir^{192} 和 Cs^{137} 。不稳定原子核自发发出α、β、γ射线的现象称为放射性。具有放射性的同位素称为放射性同位素。由放射性同位素所组成的元素即是放射性同位素。放射性同位素可分成两大类：天然放射性同位素和人工放射性同位素。

2. 放射性元素的衰变

放射性元素的原子核是不稳定的。放射性元素的原子核自发地放射一个α或β粒子、同时自身转变为另一种原子核的过程称为放射性元素的衰变，亦称核衰变。

放射性元素的衰变不受任何物理、化学条件的影响，仅取决于放射元素本身的性质。

γ射线是在原子核的衰变过程中产生的。γ射线是原子核从能量较高的能级跃迁到能量较低的能量时所放出的波长很短的电磁波。例如核素 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ （钴），它衰变时放射出一

质每秒钟产生 3.7×10^{10} 次该衰变, 则放射性物质的放射性活度为 1Ci 。显然, $\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。

放射性物质的活度同样也按指数规律变化, 即

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (8-1-10)$$

式中 A_0 ——初始时的[放射性]活度;

A ——时间 t 时的[放射性活度]。

同样地, γ 射线源的射线强度随时间也是按指数规律变化, 即

$$I = I_0 e^{-\lambda t} \quad (8-1-11)$$

式中 I_0 ——初始时的射线强度;

I ——时间 t 时的射线强度。

放射性物质的原子核数目因衰变而减少到原来一半时所需要的时间, 称为该放射性物质的半衰期, 使符号 $T_{1/2}$ 表示。由式(8-1-9)可得出半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变示数的关系为:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (8-1-12)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (8-1-13)$$

将式(8-1-13)代入式(8-1-9)、式(8-1-10)和式(8-1-11), 得

$$N = N_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}} \quad (8-1-14)$$

$$A = A_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}} \quad (8-1-15)$$

$$I = I_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}} \quad (8-1-16)$$

四、射线强度的平方比定律

射线源辐射的光子是向整个空间扩展向前传播的。辐射场中某点的射线强度与该点距射线源的距离平方成反比, 即

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{R_B^2}{R_A^2} \quad (8-1-17)$$

式中 I_A 、 I_B ——分别为A点和B点的射线强度;

R_A 、 R_B ——分别为A点和B点距射线源的距离。

如前所述, 实际检测中我们测量的辐射场中某点的照射量率, 用照射量率度量射线强度。

对于 γ 射线源, 每种放射性同位素均有一 Γ 常数。 Γ 常数表示 1Ci 点源在距源 1m 处的照射量率(R/h)。其单位为 $\text{R} \cdot \text{m}^2 / (\text{Ci} \cdot \text{h})$ 。 Γ 常数亦称照射量率常数。常用 γ 射线源 ^{60}Co (钴)、 ^{137}Cs (铯)和 ^{192}Ir (依)的 Γ 常数分别为1.30, 0.32和0.48 $\text{R} \cdot \text{m}^2 / (\text{Ci} \cdot \text{h})$ 。

利用照射量率常数(参见表8-1-2) Γ 常数和射线强度的平方反比定律, 可计算出不同管电流(或活性)时辐射场中距源各点的照射量率。

五、窄束射线和宽束射线

射线束可分成窄束射线和宽束射线。

窄束射线指的是：入射线束很窄、探测器P点也只能接收到范围很窄的穿透吸收体（或试件）的透射射线（见图8-1-7）。窄束射线仅在研究X射线或γ射线与物质相互作用时的特殊实验条件中获得。

宽束射线指的是：在射线传播方向上吸收体（或试件）后面的探测器（P点），除接收到透射射线外，还接收到散射射线（见图8-1-8）。在实际工作条件下所遇到的射线，均是宽束射线。在考虑工件对比度和辐射防护时，都要按宽束射线处理。

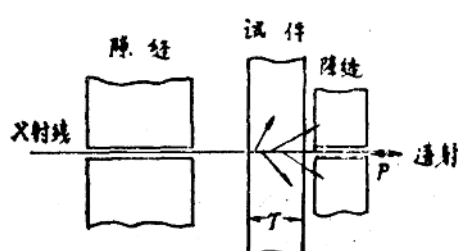


图8-1-7 窄束射线的实验装置
P—探测器

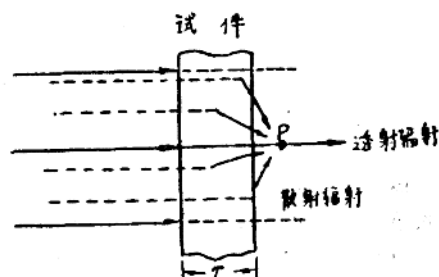


图8-1-8 宽束射线的实验装置
P—探测器

六、射线与物质的相互作用

当X射线和γ射线在物质中透过时，X光子和γ光子与物质的原子相互作用。相互作用的主要形式有以下四种。

1. 光电效应

当一个光子和原子相碰撞时，它可能将它所有的能量交给一个壳层电子，使壳层电子脱离原子而运动，光子本身则整个被吸收，如图8-1-9所示。由于这种作用而释放出来的电子称为光电子，这种效应称为光电效应。

光电子所带的能量 E_0 由下式决定：

$$E_0 = h\nu - \varepsilon_i \quad (i = K, L, \dots) \quad (8-1-18)$$

式中 $h\nu$ ——入射光子的能量；

ε_i —— i 壳电子的逸出功。

光子能量大于壳层电子逸出功时，才能产生光电效应。

在原子的内层电子被逐出之后，将由于外层电子向内层的跃迁而放出标识X射线。由于光电效应而引起的标识X射线称为荧光X射线。

2. 汤姆逊散射

当一个光子和原子相碰撞时，不向原子提供能量，即光子的能量不变；而仅仅改变了运动方向的现象，称为汤姆逊散射。因为散射光子频率和入射光子频率相同，故也称相干散射。对于频率较低（即能量较低）的X光子，汤姆逊散射显得重要；而对于频率较高的γ光子，主要的散射是后面叙述的康普顿散射。

3. 康普顿效应

当一个光子和原子中的一个壳层电子相碰撞时，光子将一部分能量传给电子，电子从原子中以与光子入射方向成 ϕ 角的方向射出，而光子则朝着与入射方向成 θ 角的方向散射。