

无损检测Ⅱ级培训教材

射线检测

中国机械工程学会无损检测学会
航空航天无损检测人员资格鉴定委员会

编

(第2版)



机械工业出版社

无损检测Ⅱ级培训教材

射线检测

(第2版)

中国机械工程学会无损检测学会
航空航天无损检测人员资格鉴定委员会

编



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书是无损检测学会推荐使用的Ⅰ级人员培训通用教材。书中系统地介绍了Ⅰ级射线检测人员所应具备的知识,包括射线检测的原理与影像质量、设备与胶片、检验的基本技术、典型工件的透照技术、评片、其他射线检测方法、辐射防护,并按照培训及资格鉴定考核的要求,安排有实验,设计了复习题及相应标准答案,形式包括有问题、填空、选择与判断、计算,有助于全面掌握教材内容,通过资格鉴定的基础理论考核。

本教材可供从事射线检测的工人、工程技术人员、无损检测等级技术培训人员及有关设计、工艺、质量管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射线检测/中国机械工程学会无损检测学会, 航空航天无损检测人员资格鉴定委员会编. 第2版, —北京: 机械工业出版社, 1994

无损检测Ⅰ级培训教材

ISBN 7-111-04177-1

I. 射… I. ①中… ②航… I. 射线检验-技术教育-教材 IV①TB302.5 ②TL81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 00224 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑: 武江 版式设计: 张世琴 责任校对: 樊中英

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1988年10月第1版·1994年10月第2版·1994年10月第3次印刷

787mm×1092mm_{1/32}·10.875印张·236千字

0 001—2 350 册

定价: 15.00 元

前 言

无损检测Ⅰ级人员培训教材——射线检测，第一版发行已近五年，在这段时间内使用本教材进行培训的过程中，培训教员和培训班学员提出了一些意见和修改建议；同时在这段时间内我国发布了许多新制订的射线检测标准，其中包括：GB9445—88《无损检测人员技术资格鉴定通则》等，客观上它们对培训教材也提出了新的要求。

1991年10月，在无损伤检测学会第五届年会上，学会编辑与出版工作委员会召开了Ⅰ级人员培训教材修订会议，研究了培训教材存在的主要不足，讨论了培训教材修订的指导原则和一些具体问题处理的基本方案，确定了工作的大体计划。

会议决定，《射线检测》由第五届射线专业委员会主任郑世才同志负责编写。

1991年召开了培训教材修订提纲小型讨论会，参加会议的有：孙德、何双起、赵起良、宫润理、刘本森、蒋福棠、郑世才等同志，会议具体研究了《射线检测》培训教材的编写基本原则、编写水平，讨论了教材的编写提纲和章节安排。对拟定的编写提纲又征求了无损检测学会第五届射线专业委员会副主任：孔凡庚、李衍、赵久同志的意见。

编写工作从1991年10月开始，至1992年4月19日完成初稿。此后，编者对初稿进行了多次修改。

修订版与第一版相比，主要在下列方面进行了较大的修改：

1) 调整了部分章节的安排,对部分章节的内容进行了增删或更新;

2) 补充、加强了评片问题的系统化讨论;

3) 简明扼要地介绍了射线检测中一些具有特殊应用的技术和一些非常规射线检测技术的主要特点;

4) 按照资格鉴定考核的要求,设计了习题,习题包括五种类型:问答——是该章内容的基本线索;填空——该章需要记忆的内容类型;选择与判断——该章较难记忆或需进一步理解的内容点;计算——该章应掌握的基本计算问题类型。它们有助于全面掌握教材的内容,也有助于通过资格鉴定的基础理论考核。

教材中给出了八个附录,附录 I ~ 附录 V, 对射线照相检验的一些基本问题给出了比较详细的理论推导过程,这些并不要求 II 级人员掌握,仅是为帮助理解或为了说明所叙述的有关结论,但它们对于 III 级人员则是有用的资料。附录 VI 概括地介绍了射线照相检验工艺的编制,附录 VII 列出了国内外部分主要射线照相检验的标准目录,其中有关 ASTM 的目录是一比较完整的目录,从中可以看到有关射线照相检验标准的概貌。附录 VIII 是教材中复习题的答案,可供参考。

III 级人员可按照本教材给出的基本系统进行加深和扩展。

与国内同类教材相比,这本教材的特点是:

1) 设计了一个系统性比较强的章节安排,章节安排贯穿的思想是建立比较完整的常规射线照相检验理论和技术系统,从而为理解和掌握射线照相检验技术、独立解决常规射线照相检验问题、提高射线照相检验工作质量提供基础;

2) 融入了较多的实践经验和文献资料,具体深入地讨论

了典型工件的射线照相检验技术及评片技术，为解决实际问题提供了可资利用的具体方法和依据；

3) 简明扼要地介绍的射线检测中一些具有特殊应用的技术和一些非常规射线检测技术，为解决特殊问题提供了基本的途径；

4) 在某些方面，如技术理论、辐射防护等补充了常见教材的不足，或更新了某些已经陈旧的概念或内容，为正确、全面理解这些方面提供了新的知识。

教材稿已在航空航天部西南地区无损检测资格鉴定委员会举办的(1992) I级射线人员培训班进行了试用，受到了好评，使用者希望能尽快出版。

航空航天部无损检测资格鉴定委员会委员赵起良同志、无损检测学会第五届射线专业委员会副主任孔凡庚同志、李衍同志审阅了书稿，提出了宝贵的意见和修改建议，编者表示由衷的感谢。

在编写本教材中，无损检测学会总干事长张企耀同志、劳动部锅炉压力容器检测中心总工程师童有武同志，对书稿提出了有益的指导意见。无损检测学会第五届编辑与出版工作委员会副主任方婉莹同志、无损检测学会第五届青年工作委员会付主任何双起同志给予了全面的关心和帮助。编者对他们的支持表示深深的谢意。

限于编者的水平，教材中肯定存在不足和错误之处，热诚欢迎各种批评、指正，期望在大家的帮助下使这本教材能成为一本较好的教材。

郑世才

1993.11 北京

目 录

前言

第一章 射线检测的物理基础.....	1
1.1 原子结构与元素	1
1.1.1 原子结构.....	1
1.1.2 原子能级.....	3
1.1.3 元素、同位素、元素周期律	5
1.2 电磁波与光量子概念	6
1.2.1 电磁波概念.....	6
1.2.2 光量子概念	8
1.3 X射线的本质与主要性质	9
1.3.1 X射线的发现与主要性质	9
1.3.2 X射线谱	11
1.4 γ 射线与放射性	13
1.4.1 放射性与放射性衰变	13
1.4.2 放射性衰变规律	15
1.4.3 γ 射线的产生与 γ 射线的主要性质	17
1.5 光量子与物质的相互作用	17
1.5.1 瑞利散射	17
1.5.2 光电效应	18
1.5.3 康普顿效应	19
1.5.4 电子对效应	20
1.6 射线衰减规律	22
1.6.1 吸收、散射与衰减	22
1.6.2 线衰减系数与半厚度	24
1.6.3 宽束、连续谱射线的衰减规律	27
复习题	31

第二章 设备与胶片	35
2.1 X射线机	35
2.1.1 X射线机的基本结构与类型	35
2.1.2 X射线管	36
2.1.3 高压发生器	39
2.1.4 冷却系统	40
2.1.5 控制系统	41
2.1.6 X射线机的工作过程与X射线的产生	42
2.1.7 X射线机的主要技术性能	44
2.1.8 X射线机的常见故障与维护	48
2.2 γ 射线机	53
2.2.1 γ 射线机的基本构成	53
2.2.2 γ 射线源的主要特性	54
2.2.3 γ 射线机与X射线机比较	56
2.3 加速器	57
2.4 胶片	59
2.4.1 射线胶片的结构与潜影的形成	59
2.4.2 胶片的主要感光特性与特性曲线	61
2.4.3 射线胶片的分类与选用	66
复习题	69
第三章 射线检测原理与影象质量	72
3.1 射线检测基本原理	72
3.2 影象形成的简单分析	74
3.3 影象质量的基本因素	77
3.3.1 影象的射线照相对比度	77
3.3.2 影象的射线照相不清晰度	81
3.3.3 不清晰度对对比度的影响	86
3.3.4 影象的颗粒度	87
3.4 射线照相灵敏度	88

3.4.1	概念	88
3.4.2	象质计的主要类型	89
3.4.3	丝型象质计可识别性公式理解	98
3.4.4	细节影象的可识别性	99
3.4.5	射线照相灵敏度计算	100
复习题		102
第四章 射线照相检验的基本技术		106
4.1	透照布置	107
4.1.1	透照布置概述	107
4.1.2	射线源、工件、胶片的相对位置	108
4.1.3	有效透照区	108
4.1.4	中心射线束方向	110
4.1.5	象质计和标记的放置	110
4.2	基本透照参数	111
4.2.1	透照参数概念	111
4.2.2	射线能量的确定	112
4.2.3	焦距的确定	115
4.2.4	曝光量确定	118
4.3	曝光量计算	120
4.3.1	平方反比定律、互易律与曝光因子	120
4.3.2	曝光量修正计算	123
4.4	散射线控制	126
4.4.1	散射线的产生	126
4.4.2	散射线对影象质量的影响	128
4.4.3	散射线防护的主要方法	129
4.5	增感	132
4.5.1	增感概念	132
4.5.2	增感屏的类型与特点	133
4.5.3	增感屏使用	136

4.6 曝光曲线	137
4.6.1 曝光曲线概述	137
4.6.2 曝光曲线的典型形式	138
4.6.3 曝光曲线制作	142
4.6.4 曝光曲线的应用	145
4.6.5 射线照相的厚度宽容度	148
4.7 暗室处理	149
4.7.1 暗室处理概述	149
4.7.2 胶片切装	152
4.7.3 显影	152
4.7.4 停显或中间水洗	158
4.7.5 定影	158
4.7.6 水洗	161
4.7.7 干燥	162
4.7.8 胶片自动处理	162
4.8 缺陷位置确定	163
复习题	166
第五章 典型工件的透照技术	172
5.1 平板工件透照技术	172
5.1.1 透照布置	172
5.1.2 有效透照区与胶片尺寸	173
5.1.3 透照参数确定	175
5.2 变截面工件透照技术	175
5.2.1 双胶片技术	176
5.2.2 适当提高透照电压技术	177
5.2.3 补偿技术	178
5.3 环焊缝透照技术	178
5.3.1 源在外单壁透照方法	179
5.3.2 源在外双壁透照方法	180

5.3.3	源在内单壁透照方法	182
5.3.4	透照次数的确定	183
5.4	小直径管对接焊缝透照技术	187
5.4.1	椭圆成象透照布置	187
5.4.2	椭圆成象透照的透照次数	189
5.4.3	椭圆成象透照的影象质量	190
5.4.4	椭圆成象透照的透照焦距与透照电压	192
5.5	非金属材料与复合材料工件的透照技术	193
5.6	多个工件一次透照技术	195
	复习题	196
第六章	评片	200
6.1	评片概述	200
6.1.1	眼睛的视觉特性	200
6.1.2	评片的主要条件	201
6.1.3	评片的主要内容	202
6.2	射线照片质量	203
6.2.1	黑度	203
6.2.2	射线照相灵敏度	204
6.2.3	标记系	205
6.2.4	表观质量	206
6.3	缺陷识别	206
6.3.1	缺陷识别概述	206
6.3.2	铸件常见缺陷识别	208
6.3.3	焊缝常见缺陷识别	216
6.3.4	射线照片上常见的伪缺陷	225
6.4	质量评定	227
6.4.1	质量评定概述	227
6.4.2	铸件的质量分级评定	230
6.4.3	焊缝的质量分级评定	237

6.5 衍射斑纹	242
6.5.1 线状衍射斑纹	243
6.5.2 羽毛状衍射斑纹	243
6.5.3 斑点状衍射斑纹	243
复习题	245
第七章 其他射线检测方法	250
7.1 放大射线照相技术	250
7.2 扫描射线照相技术	253
7.3 实时射线照相技术	256
7.4 层析射线照相技术	258
7.4.1 胶片断层射线照相技术	258
7.4.2 射线 CT 技术	260
7.4.3 康普顿背散射层析成像技术	261
7.5 电子射线照相技术	262
7.6 中子射线照相技术	264
复习题	267
第八章 辐射防护	269
8.1 辐射量及其单位	269
8.1.1 照射量	269
8.1.2 吸收剂量	270
8.1.3 剂量当量	271
8.1.4 吸收剂量与照射量的关系	273
8.2 辐射生物效应	275
8.2.1 辐射生物效应概述	275
8.2.2 辐射损伤	277
8.2.3 辐射损伤的相关因素	279
8.3 辐射防护标准	280
8.3.1 辐射防护的基本原则	280

8.3.2 我国辐射防护标准的有关规定	282
8.4 辐射防护方法与监测	284
8.4.1 外照射的基本防护方法	284
8.4.2 防护计算	286
8.4.3 辐射防护监测	292
复习题	293
实验	297
实验 1 X射线机焦点的测量	297
实验 2 散射线对影象质量的影响	300
实验 3 曝光量与焦距的关系	301
实验 4 X射线透照电压对射线照相灵敏度 的影响	303
实验 5 曝光曲线制作	304
实验 6 胶片特性曲线制作	305
附录	308
附录 I 射线照相灵敏度的基本公式	308
附录 II 曝光曲线函数关系的导出	312
附录 III 射线照相的厚度宽容度	314
附录 IV 环焊缝有效透照长度	315
附录 V 椭圆成象透照的透照厚度	320
附录 VI 射线照相检验工艺编制概述	324
附录 VII 国内外射线照相检验的部分标准目录	327
附录 VIII 复习题答案	330
主要参考文献	335

第一章 射线检测的物理基础

1.1 原子结构与元素

1.1.1 原子结构

物质是由分子组成的,分子是由原子组成的。直到 19 世纪末,人们一直认为原子是组成物质的最小微粒,它是不能再分割的。19 世纪末到 20 世纪初物理学的许多新发现,揭示了原子是可以分割的,并且具有自己的结构。研究证明,原子都是由原子核和核外电子组成的。

原子核由质子和中子组成,位于原子的中心。

质子是一种物质微粒,其质量为 $1.6726 \times 10^{-27} \text{kg}$,带有一个单位的电荷,电量为 $1.602189 \times 10^{-19} \text{C}$ 。中子也是一种物质微粒,其质量为 $1.6748 \times 10^{-27} \text{kg}$,不带电荷。不同原子的原子核含有的质子数和中子数不同。原子核的半径为 10^{-14}m ,约为原子半径的万分之一,它的体积只占原子体积的几千亿分之一,可见在原子内部存在很大的空间,电子就在这个空间中运动。

电子是一种更小的物质微粒,其质量为 $9.1095 \times 10^{-31} \text{kg}$,仅为质子质量的 $1/1836$,其带有一个单位的负电荷,电量为 $1.602189 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

核外电子在原子空间做高速运动,但电子的运动与我们通常所见的物体的运动存在根本的不同。对普通物体,我们可以测定或计算它在某一时刻的准确位置,描绘它们运动的轨迹。但对电子,我们既不能测定或计算它在某一时刻的准

确位置，也不能指出它的运动轨迹，而只能指出它在核外空间某个位置出现机会的多少。形象地说，它像云雾笼罩在原子核周围，所以常用电子云描述核外电子的运动。

不同能量的电子运动状态不同，能量低的电子通常在核附近的区域运动，能量高的电子通常在离核较远的区域运动。也就是说，能量低的电子出现在离核较近区域的机会多，能量高的电子出现在离核较远区域的机会多。按照这种情况，可以称核外电子在不同的电子层运动。离核最近的称为第一层，从核向外依次称为第二、三、四、五、六、七层等，也常称为第 K、L、M、N、O、P、Q 层等。实际上，核外电子的运动是相当复杂的。

如果把在一定电子层上的电子云所占据的空间称为一个“轨道”，这样也可以说电子在不同的轨道上运动，但这并不是我们对通常物体所说的轨道。按照这种概念，核外电子也可以称为轨道电子。

核外电子的分层排布（也就是其可能的运动状态）服从下述的规律：

1) 泡利不相容原理：在同一原子中，不能存在运动状态完全相同的电子。

2) 能量最低原理：核外电子总是先排布在可能的能量最低的轨道上，使原子的能量处于最低的状态，这时候原子才是稳定的。

按照上述规律，如果以 n 记层数，则各层最多可能存在的电子数为 $2n^2$ ；即第一层最多可以存在 $2 \times 1^2 = 2$ 个电子；第二层最多可以存在 $2 \times 2^2 = 8$ 个电子……，原子的上述结构可以形象简单地画成图 1-1 所示的图形。

描述原子的主要常数是核电荷数和质量数。

核电荷数表示原子核带有的电荷，通常采用符号 Z 表示，其等于原子核的质子数。

原子的质量很小，通常采用相对质量表示原子的质量，即采用质量为 $1.9927 \times 10^{-26} \text{kg}$ 的碳原子质量的 $1/12$ 为原子质量的单位，其它原子的质量与其相比，得到的数值即为这种原子的原子量。由于电子的质量远

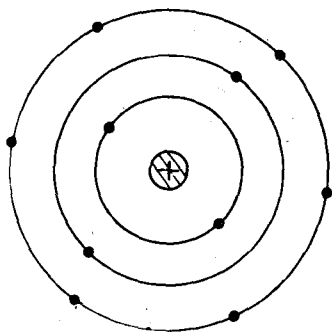


图 1-1 原子结构轨道图

小于质子、中子的质量，所以原子的质量近似等于质子和中子的质量之和。质子的相对质量为 1.007，中子的相对质量为 1.008，均近似取整数值，即取为 1，忽略电子的质量，将原子核内所有质子和中子的相对质量加起来，得到的数值称为质量数，常用 A 表示，中子数常用 N 表示。这样有

$$\text{质量数} = \text{质子数} + \text{中子数}$$

也即

$$A = Z + N$$

一个质量数为 A 、质子数为 Z 的原子 X ，可以记为

$${}^A_Z X$$

从这个符号可以知道，其原子核中有 Z 个质子、 $(A - Z)$ 个中子，核外有 Z 个电子。

1.1.2 原子能级

1913 年，物理学家玻尔提出了一种原子理论，他假设：

1) 原子只能处于一系列不连续的能量状态中, 在这些状态中原子是稳定的, 这些状态称为定态。

2) 原子从一种定态跃迁至另一种定态时, 将辐射或者吸收一定频率的光量子, 光量子的能量决定于两个定态的能量差, 即

$$h\nu = E_2 - E_1$$

式中 E_1 ——初态能量;

E_2 ——终态能量。

3) 原子的不同能量状态对应于电子的不同轨道分布。

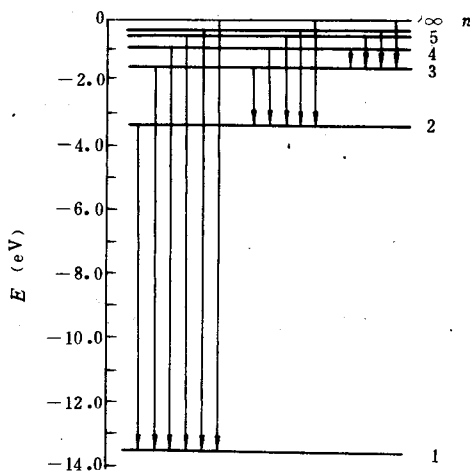


图 1-2 氢原子能级图

原子各个定态的能量值叫做原子能级。图 1-2 为氢原子能级图。在正常状态下, 原子处于最低能级, 即其核外电子都在可能的最低能量轨道上运动, 这种定态称为基态, 其他