



《射线检验培训教材》

编写组

射线检验培训教材



水利电力出版社

内 容 提 要

本书是金属焊缝射线检验II级人员培训用教材。内容包括X射线和γ射线探伤的基础理论、工艺技术、卫生防护，以及焊缝强度与质量控制等方面的知识。全书取材于射线检验实践的总结，是射线检验人员必须掌握的基础理论知识。

本书可作为电力部门和其他有关部门射线检验II级人员培训用书，也可供其他无损检验人员参考。

射线检验培训教材

《射线检验培训教材》编写组

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 8.125印张 178千字

1983年5月第一版 1983年5月北京第一次印刷

印数0001—6330册 定价0.70元

书号15143·5110

前 言

无损检测是一门新兴学科，它是当今产业部门特别是生产产品的部门进行质量控制的重要手段。近年来，随着科学技术的日益发展，无损检测技术不论在理论上，还是手段上都有了新的进展，已引起科学技术界和工业管理界的重视。无损探伤对改进工艺、更新产品、提高产品质量都有着重要的作用。作为检验手段，无损检验正向多功能、自动化的方向发展，并已取得了显著成效。

建国初期，水利电力部门在锅炉监察、金属监督、承重结构的质量管理等方面，就已使用无损检测手段，尤其是射线探伤，应用较早，范围较广，对电力工业的安全发供电起了积极的作用，并总结了一套符合自己特点的技术安全管理办法，培养、造就了一支有相当规模和技术水平的队伍，积累了丰富的经验。由于电力工业的发展，检验人员的在职培训已是一项紧迫的任务。为了适应培训工作的需要，加强无损检测人员的考核，水利电力部电力建设研究所组织了富有实践经验、培训教学经验和基础理论知识的同志，编写了本教材，教材编成后，在水利电力部门十多个培训班上进行了教学试用，同时征求了许多同行的意见，在此基础上又作了多次的修改。

本教材适用于锅炉压力容器、承压管道、承重结构的金属焊缝射线检验II级人员的培训，也可供无损检测专业人员参考。教材的第一、二两篇是II级人员培训的基本内容；第

三、四两篇是II级人员进一步提高的培训内容,这些内容也可作为III级(高级)人员进修之用。使用本教材培训的授课时数不得少于80学时。另外,还需要安排30学时以上的实习试验课,培训中还应讲授焊接技术基本知识和质量控制管理知识,但限于篇幅,这些内容均未编入本教材。

本教材由水利电力部电力建设研究所常继明工程师主编,内蒙古自治区电力试验研究所陈文孝副总工程师、江苏省电力建设公司第一工程处徐亚澄工程师、湖北省电力中心试验所孟传亨工程师和湖北省电力工程公司王寰明工程师参加编写,徐亚澄工程师统稿,武汉水利电力学院毛森祥老师定稿。

本教材的初稿承蒙进行培训教学的老师试用,同行专家们审阅,在此表示衷心感谢。由于编者水平有限,倘有错漏之处,敬请批评指正。

编写组

一九八二年九月

目 录

前言	
概 述	1
第一篇 射线探伤学	5
第一章 射线探伤的物理基础	5
第一节 射线的基本性质	5
第二节 X射线的发生及X射线谱	7
第三节 γ 射线及放射性元素的衰变	15
第二章 X、 γ 射线与物质的相互作用	21
第一节 一些概念与定义	21
第二节 窄束射线的衰减规律	22
第三节 宽束射线的衰减规律	27
第三章 X射线机和 γ 射线源	29
第一节 X射线机的构造和原理	29
第二节 X射线机使用注意事项	42
第三节 X射线机常见故障的判断及排除	45
第四节 X射线机参数的校验	48
第五节 γ 射线源	51
第六节 用于探伤的高能X射线发生器	56
第二篇 射线探伤工艺学	65
第四章 工业X射线胶片及其暗室处理	65
第一节 X射线胶片的结构和特性	65
第二节 胶片的暗室处理	75
第五章 射线透照底片的质量	89

第一节	射线透照的灵敏度、影响因素和表示方法	90
第二节	裂纹缺陷的检出率	117
第三节	有效检出范围对缺陷检出率的影响	121
第六章	透照设计	124
第一节	透照设计的目的	124
第二节	透照设计的内容	125
第三节	透照设计实例	128
第七章	底片上缺陷的评判	133
第一节	评判底片的基本要求	133
第二节	投影的概念	134
第三节	典型缺陷的分析	136
第四节	误判的典型实例	142
第五节	缺陷纵深位置的确定	144
第六节	缺陷大小的测定	145
第七节	假缺陷的辨认	146
第三篇	电离辐射卫生防护学	148
第八章	辐射单位和剂量水平	148
第一节	吸收剂量	148
第二节	照射量	149
第三节	照射量和吸收剂量的换算	150
第四节	剂量当量	153
第五节	其他的量和单位	154
第六节	剂量水平	157
第九章	辐射的生物效应	158
第一节	细胞	158
第二节	射线的原发作用	159
第三节	放射病	162
第十章	辐射防护的监测	166
第一节	工作场所的照射量场强的测定	167

第二节	个人剂量监测	173
第三节	照射量的测量原理	178
第四节	辐射测量的数据处理和评价	181
第十一章	防护设计和计算	182
第一节	防护设计的原则	184
第二节	防护的计算方法	185
第三节	γ 射源的换装	202
第四篇	管道焊缝的强度和质量控制	204
第十二章	焊接缺陷对管道焊缝强度的影响	204
第一节	管道焊缝的强度计算	204
第二节	许用应力及其选择	207
第三节	影响电站管道焊缝强度的因素	210
第四节	管道焊缝按应力分级控制质量	213
第五节	焊接缺陷对焊缝静载强度的影响	215
第六节	焊接缺陷对焊缝疲劳强度的影响	217
第七节	焊接缺陷对焊缝高温性能的影响	225
第十三章	断裂力学在焊接质量控制中的应用	229
第一节	断裂力学的基本概念	229
第二节	断裂力学在焊接接头中的应用	232
第三节	E.C.A法的应用	234
第十四章	管道焊缝的质量控制与安全分析	243
第一节	管道焊接接头断裂情况概述	243
第二节	管道焊接安全分析的准则	245
第三节	焊缝强度选择的基本要求	247
第四节	焊接安全性分析的程序和方法	249

概 述

无损检测是对材料、工件或组件进行非破坏检验和分析的一种方法。若以发现材料、工件或组件中的不连续的宏观缺陷（如裂纹、气孔、夹杂物等）为主要目的的检验，则称为无损探伤。

无损探伤具有下述一些特点：不破坏检测对象；可实现100%的检验；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；可对关键部件在使用中进行定期检查，乃至长期监控，以保证安全运行，避免事故的发生；发现缺陷，指出其形成原因和规律，促使有关部门采取措施，改进设计或工艺，以进一步提高产品质量，防止或减少废品，降低生产成本。

随着物理学中各个分支学科的发展，其成果充实并扩大了无损检测的应用范围。就金属焊缝的无损检测方法而言，主要有：射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、渗透探伤、涡流探伤、声发射监控及应力测量等。

一、射线探伤

射线探伤是工业生产中应用较早且比较成熟的探伤技术，现仍得到广泛应用。工业中应用的射线系指一些波长极短（以 \AA 为数量级， $1\text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米）的电磁波辐射（如X射线、 γ 射线）和高能流（如电子流、质子流、中子流）。

根据射线对材料具有一定的穿透能力和材料对射线的衰减现象来检查材料内部的质量，这就是射线探伤的简单原

理。射线探伤主要用于焊缝、铸件等结构材料。

二、超声波探伤

根据超声波在材料中传播至缺陷界面时产生反射或使透过的能量下降等物理现象，利用测量反射或透过的超声波强度来检查材料内部的质量，这就是超声波探伤的简单原理。

早期曾使用连续超声波进行探伤，这是基于连续超声波在其传播路径上被缺陷阻挡而形成声影的原理而实现的，这种探伤方法操作不便，缺陷检出能力低。40年代脉冲反射法超声波探伤开始在工业中应用，这种探伤方法是基于脉冲超声波在其传播路径上被缺陷反射回来的原理而实现的，由于发射的是超声波脉冲，因此，可以利用脉冲的间歇时间来接收从缺陷界面反射回来的超声脉冲，从而可以应用单探头工作的脉冲反射式仪器对材料进行探伤。超声波在探伤技术中最先使用的是纵波，此后横波、表面波、板波等波型的超声波也得到应用，从而扩大了超声波探伤的应用范围。近十年来，对超声场、各种类型反射体的反射规律、散射、爬波与棱边再生波等进行了理论研究，使缺陷大小的测定及其正确评价等技术均有所提高。

就超声波探伤的缺陷显示方法而言，可分为A型显示、B型显示、C型显示乃至正在试验阶段的超声全息显示。A型显示也称为脉冲显示，是目前普遍使用的脉冲反射式超声波探伤仪显示缺陷的方法，这种显示方法对精确判断缺陷大小和性质比较困难。B型显示也称为二维成象显示，其显示的是缺陷的平面图象，因此，对缺陷的判断就比较直观。C型显示也称为三维成象显示，其显示的是缺陷的立体图象，这种显示方法可以观察到缺陷在空间三个方向上的形状尺寸。

三、磁粉探伤

将铁磁性材料或工件通以电流或置于磁场中，使其磁化，在一定条件下，缺陷处产生漏磁场，磁性良好的磁粉被漏磁场吸附而显示缺陷，这就是磁粉探伤的简单原理。

磁粉探伤只适用于检验铁磁性材料的表面或近表面的缺陷。磁粉探伤的灵敏度与材料表面光洁度、磁化方法、磁化规范、缺陷的形状和取向等因素有关。从磁粉在材料或工件表面上堆积的情况，可以直观地判断材料有没有表面或近表面的缺陷，如果存在缺陷，就可以确定其长度，但不能确定其深度。

四、渗透探伤

在清洗过的工件表面上，涂敷渗透性良好、色泽鲜明或含有荧光物质的液体（称为渗透液），使之渗透到缺陷处，然后洗去表面多余的渗透液，再涂敷一层显象液，借助毛细管作用将缺陷中的渗透液吸出，通过色泽对比或进行紫外线照射激发荧光物质发出荧光而显示缺陷，这就是渗透探伤的原理。

渗透探伤主要用于检验非铁磁性材料开口的表面缺陷。对某些铁磁性材料（如金属焊缝和焊口母材），其表面缺陷也可应用渗透探伤进行检验。渗透探伤的灵敏度与材料表面光洁度、渗透液性能（如渗透能力、挥发程度和发光强度等）以及探伤工艺等因素有关。一般而言，渗透探伤的灵敏度低于磁粉探伤，但其设备简单，操作方便。

五、涡流探伤

当通以交变或脉冲电流的线圈置于金属工件附近时，工件表面由于电磁感应将产生涡流，该涡流产生的磁场反作用于主磁场，形成迭加磁场，若工件中存在缺陷，缺陷将使涡

流发生变化，致使迭加磁场发生相应的变化，通过测量线圈的磁场量，借助于仪器仪表就可将缺陷指示出来。

六、声发射监控

设备在运行状态下产生缺陷及缺陷发展的动态过程中都伴随有一定频率的振动，因此，可以把缺陷看作声源，通过对声源的监测，并对其定向、定位，就可以检测缺陷。设备在其强度和寿命允许的情况下，应尽量有效地服役。当被监测的缺陷大小接近其临界尺寸时，立即采取措施，以保证安全生产。这是60年代后期迅速发展起来的一门无损检测技术，是监测裂纹性缺陷的新手段。声发射监测技术可以用来监测焊接过程中、焊后及运行状态下焊缝内裂纹的产生和发展。

此外，近年来应用磁测法、X射线法、超声法等无损应力测量技术，测定焊缝由于多次热循环而产生的应力、残余应力及其分布情况。目前正在深入研究三维空间的应力分布场，这对改善焊接工艺和热处理工艺，消除或降低残余应力，将具有重要的作用。

第一篇 射线探伤学

第一章 射线探伤的物理基础

第一节 射线的基本性质

工业上广泛应用的射线探伤有X射线探伤及 γ 射线探伤。

X射线和 γ 射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线一样，都是电磁波，均以 30×10^{10} 厘米/秒的恒定速度在空间传播。各种形式的电磁波具有相同的本质，但又具有不同的生成条件与性质。例如，处于受激状态的原子和分子向正常状态进行各种转变时，就发生可见光、红外线、紫外线或标识X射线；X射线的连续谱是由于高速电子受到急剧阻挡而产生的；当原子核由受激状态转变成正常状态时，则产生 γ 射线。

各种形式辐射的性质决定于波长 λ 或频率 ν 。

波长与频率具有下列的关系：

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

式中 c ——电磁波的传播速度（ 3×10^{10} 厘米/秒）。

根据近代物理的概念，一切电磁波（可见光、紫外线、X射线与 γ 射线）的辐射除具有波动性质外，还具有粒子的性质。光的粒子（简称光子）是不带电的，但有一定的能量和质量，并依直线传播。表1-1列出了各种电磁波波长的范围。

表 1-1

各种电磁波波长分布的范围

电 磁 波 种 类	波 长
无 线 电 波	20公里~0.3毫米
红 外 线	0.3毫米~7500埃
可 见 光	7500埃~4000埃
紫 外 线	4000埃~10埃
X 射 线	10埃~0.02埃
γ 射 线	0.02埃~0.001埃

由于X射线、 γ 射线是波长极短的电磁波，因此它们具有其它几种电磁波所没有的特性：

(1) 不可见，依直线传播。

(2) 不受电场和磁场的影响，它的本身是不带电的。

(3) 具有很强的穿透力。X射线和 γ 射线能穿透可见光不能穿透的物质（如肌肉、黑纸、金属等），而且波长愈短，穿透能力愈强。由于X射线的波长比 γ 射线的波长长一些，所以X射线的穿透能力比 γ 射线的穿透能力弱。一般将波长短的（即穿透能力强的）射线称为硬射线；波长较长的射线称为软射线。X射线和 γ 射线都有各自的波长范围，故它们均有软、硬之分。射线穿透物质的能力，与物质的性质和结构有关，一般说来，原子序数大的物质，密度大的物质，不容易被射线穿透。换句话说，这些物质能大量吸收射线的能量。射线被物质吸收以后，其强度就减弱了。

(4) 能使某些物质起光化学作用。一种透明片基的两面均匀涂上一层溴化银感光乳剂所制成的X射线胶片，经射线照射以后，形成潜象，再经化学显影，溴化银变成黑色的金属银，未感光的溴化银则被定影液溶去。射线探伤就是利用这种射线化学感光作用，使缺陷的影象显现在底

片上。

(5) 某些物质被射线照射以后，能发出可见荧光。如磷、铂氰化钡、硫化锌、钨酸钙等物质受射线照射后，产生电离或处于激发状态，当恢复原状时，其原子即放射出一种在光谱中波长处于可见光与紫外线之间的荧光。在射线探伤中，通常把这些物质（常用的是钨酸钙）涂在一块特制的纸板上，探伤时将两块纸板——荧光增感纸夹着X射线胶片装在暗盒中，当射线照射时，X射线胶片不仅受到射线的感光作用，而且绝大部分的感光作用是由荧光增感纸发出荧光所引起的，从而利用荧光增感纸进行射线探伤时，可以大大减少曝光量。

(6) 能杀伤生物细胞。生物细胞受一定量的射线照射以后，将产生损害、抑制、甚至坏死。当人体受到过量的射线照射后，会引起各种病症，因而在进行射线探伤时，工作人员除需具备一定的射线知识外，还须严格遵守安全操作规程。

(7) 能使空气电离。根据射线的这一性质，可以制作各种形式的仪器，测定空气经射线照射以后被电离的程度，保证工作人员不致受到过量的射线照射。

第二节 X射线的发生及X射线谱

一、X射线的发生

1895年德国的物理学家伦琴在研究阴极射线时发现了X射线。

伦琴在做阴极射线试验时，使用一个嵌有两个板形电极的玻璃管（阴极射线管），如图1-1所示。当在阴极射线管的两极板（即阴极和阳极）间加上几万伏的高电压，并使玻

璃管内空气达到一定稀薄程度时，从阴极发出的并受高电压吸引的电子，沿直线向前高速地撞击玻璃管壁，从而产生阴

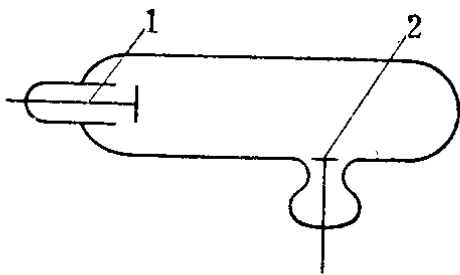


图 1-1 阴极射线管
1—阴极；2—阳极

极射线。在一次试验中，用一层黑纸遮住阴极射线管，当其两极间加上高电压以后，发现放在附近的涂有铂氰化钡的纸屏上发出可见荧光。再进一步试验，发现其能穿透纸板、衣服，甚至页数很多的书本。因为当时没有弄清这种射线性质，还不能全面地、

正确地解释其发生的原理，故以数学中的未知数“X”来命名，称为X射线。为纪念发现者，又把这种射线称为伦琴射线。

简单地说，可以通过下述方法获得X射线：当高速运动的电子，突然撞击一个障碍物，电子由于受到急剧阻挡而丧失了动能，绝大部分的动能在障碍物上变成了热量，大约1%左右的动能转换成X射线的能量。因此，产生X射线必须同时具备三个条件：

- (1) 具有一定数量的电子；
- (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能急剧阻止电子运动的障碍物。

二、X射线管

X射线管的基本结构是在一个高真空玻璃管内装置一个阴极（通常称为灯丝）和一个阳极（通常称为靶极），如图1-2所示。近年来，在国际上出现一种金属陶瓷X射线管，用金属作外壳，陶瓷作绝缘体，性能良好。

三、X射线谱

(一) 物质结构 简介

一切物质都是由分子组成的，分子是物质中保持原有化学性质的最小粒子。如果将分子进一步分割，又可分割为更小的粒子——原子，也就是说，分子又由原子所组成。原子和分子在物质中不停的运动是物质发生变化的基本因素。一定种类的具有相同化学性质的原子称为元素。一个分子可由一种元素或几种元素组成。

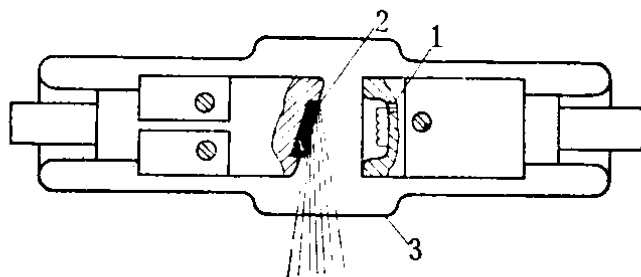


图 1-2 X射线管示意图

1—阴极；2—阳极；3—玻璃管

在原子结构中，有电子、质子、中子等基本粒子，它们决定着各种元素的性质，也是物质的最基本的组成单元。电子带有负电荷，彼此相斥，在一定的轨道上围绕着原子核旋转。质子带有正电荷，其质量比电子的质量约大1835倍，并集中在原子核内。中子不带电性，是一种中性的粒子，其质量与质子的质量几乎相同（ 1.66×10^{-24} 克），也集中在原子核内。

元素的性质，随电子、质子、中子的数目和安排的不同而异。原子核（氢除外）是由一个或多个质子和中子所组成，而外围的电子则由于受原子核的吸引而在一定的轨道上围绕原子核旋转。只有外界因素才能破坏原子的这种稳定状态，使电子脱离原子，或使电子从一层轨道移向另一层轨道。但这种现象是暂时的，原子很快又会恢复到稳定状态。原子核外围电子的数目称为该物质的原子序数。原子核中的质子、中子的总数称为该物质原子的质量，简称原子量。

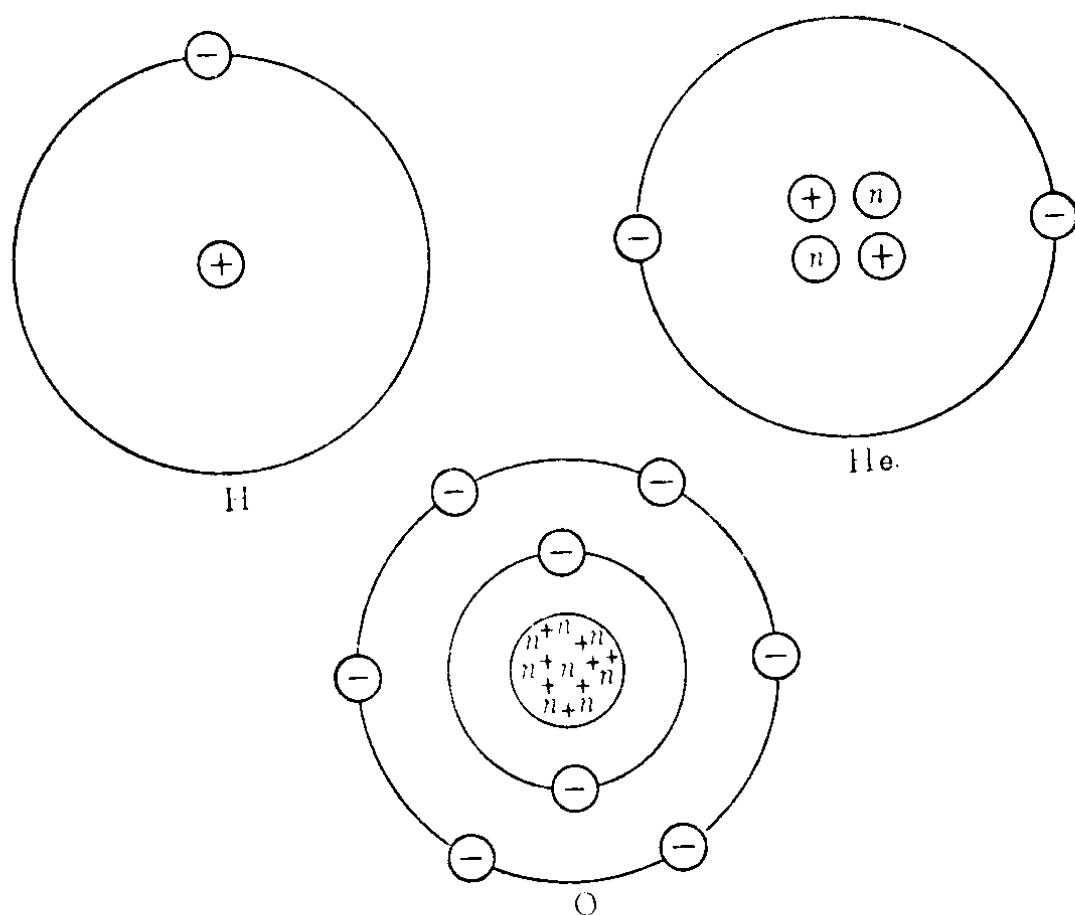


图 1-3 氢、氦、氧原子结构示意图

图1-3为氢、氦、氧原子结构示意图。氢原子核内只有一个质子，核外有一个电子；氦原子核内有两个质子、两个中子，外围有两个电子在一层轨道上旋转；氧原子核内有8个质子、8个中子，在核外有8个电子分别在两层轨道上旋转。原子序数越大的物质，其原子结构越复杂，如元素铀，在原子核外有七层轨道，这七层轨道从里往外数称为K层、L层、M层、N层、O层、P层、Q层。原子序数为83以上的元素，其原子核很不稳定，这种不稳定的元素叫做放射性元素。原子量不同而化学性质相同，并在元素周期表中占据同一位置的元素称为同位素。在原子中最外层轨道上的电子称为价电子，不同的元素之所以呈现出不同的化学特性，就