

火电工程调试技术手册

金属卷

010 1 01 1

0101 100 01010101

河南省电力公司 编

010 1 01 1

10101 01



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

火电工程调试技术手册 金属卷

河南省电力公司 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《火电工程调试技术手册》(金属卷), 主要介绍了电站设备金属材料的五种常规无损探伤, 即超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤、渗透探伤、涡流探伤的原理、适用范围、探伤方法与技术规范, 以及钢的基础知识、金属材料的性能和焊接、电厂金属材料和技术监督、金属材料失效分析等内容。

本手册是火电工程调试人员掌握金属专业知识的工具书, 对金属专业人员也有较高的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

火电工程调试技术手册. 金属卷/河南省电力公司编.
北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1195-7

I. 火… II. 河… III. ①火力发电-发电机-机组-调试-技术手册 ②火力发电-发电设备-无损检验-技术手册 ③火力发电-发电设备-金属材料-技术手册 IV. TM31-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 056440 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 23.75 印张 582 千字

印数 0001—4000 册 定价 53.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《火电工程调试技术手册》编委会

主任：吴华斌

副主任：尚全忠 方志民 刘毓珩

委员：(按姓氏笔画排列)

马淮军 石 光 白明九 刘韶林 刘遵义

刘静宇 张 强 李丙军 李庆渝 李春茂

李春林 陈守聚 时进荣 邱武斌 易绪涛

郭子仁 袁立平 崔文涛 阎留保

责任编辑：尚全忠 李庆渝 白明九

《火电工程调试技术手册》

(金属卷)编写人员

崔文涛 冯文吉 胡天明 张 黔 李晓红

蔡红生 肖文凯 王 学 王志武

电力工程调整试运工作是电力基本建设不可替代的重要环节。调试工作既是一个相对独立的阶段，同时又贯穿于整个工程建设全过程。通过对整套设备的调整试运行，使各系统单个设备形成具有活力和生产力的有机整体。

在长期的电力建设中，广大电力工程调试工作者善于学习、勇于探索、勤于实践、开拓创新，积累了丰富的调试经验，为电力建设整体水平的不断提高奠定了坚实的基础。随着现代化、大容量、高参数火电机组的迅猛发展，新设备、新技术、新工艺、新材料广泛运用，对电力工程调整试运行工作提出了更高、更新的要求。

“工欲善其事，必先利其器。”为适应调试技术不断发展的需要，提高电力调试队伍的整体素质和调试技术水平，我们组织了电力工程调试战线上的一批专家和工程技术人员，立足电力工程基本建设的实际，重视经验的总结和积累，努力跟踪国内外电力工程调试前沿新技术，从大量纷繁零散的资料中综合提炼，融会贯通，历时两年，几易其稿，终于完成了这套火电工程调试技术手册的编写和出版工作。

该套手册详细阐释了火电工程中汽轮机、锅炉、金属、热工、化学、电气等各系统基础知识、基本原理、技术参数、经济指标以及调试的标准、方法、步骤等等。其内容既是电力工程调试工作经验的升华，又充分反映了当今国际国内调试技术的最新成果，具有较强的科学性、实用性，对指导电力建设工程调试工作、提高工程调试人员的综合素质都大有裨益。

本套技术手册能在 21 世纪的开元之际如期付梓，要感谢各位作者以科学、严谨的治学态度，满腔热情投入资料的整理和编写中，为确保手册的高质量完成，付出了辛勤的汗水。要感谢各位专家，他们的学术造诣和敬业精神令人钦佩，使本套手册既有较强的实用性，又具有较高的学术价值。同时还要感谢出版社各位编辑的辛勤劳动。在此谨向他们致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

火电工程调试是一个复杂的系统工程。电力调试工作的技术含量之高、配

合分工之严，使我们在编写过程中感到压力和责任。尽管经过专家和编者的认真审查和核校，百密一疏，错误和纰漏在所难免，敬请各位同仁和广大调试工作者斧正，以期在今后的修订中不断地完善。

吴华斌

2002年1月3日于郑州

编写说明

电站的绝大部分设备是由金属材料组成，且长期在高温高压、高转速的恶劣工况条件下运行，其金属材料的提前失效将严重地影响电站设备的安全运行。预防材料的提前失效，查出设备的隐患，应首先从安装调试入手，把好安装调试这一关键环节。

《火电工程调试技术手册》（金属卷）分为“无损探伤”和“金属材料”两篇。“无损探伤篇”论述了五种常规探伤方法，即超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤、渗透探伤和涡流探伤的物理基础、适用范围、操作方法及技术术语、规范等。“金属材料篇”从钢的基础知识入手，叙述了合金的基本结构、钢的热处理、钢的分类、金属材料和机械性能、金属焊接、金属在高温下长期运行中组织结构的变化、火力发电厂金属事故的分析方法等。本书力求通俗易懂，简明扼要，以使参加调试的专业人员掌握金属专业知识，有利于调试工作的深入开展。本书对金属专业人员也有较高的参考价值。

《火电工程调试技术手册》（金属卷）由河南电力试验研究所崔文涛、冯文吉、蔡红生，武汉大学胡天明、张黔、李晓红、肖文凯、王学、王志武编写，河南电力试验研究所教授级高工陈贻守审核。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大读者指正。

编者

2002年12月

前言
编写说明



第一篇

无损探伤

绪论.....	3
第一章 射线探伤.....	5
第一节 射线探伤的物理基础.....	5
第二节 射线探伤设备.....	11
第三节 射线探伤工艺方法.....	15
第四节 射线安全防护.....	32
第二章 超声波探伤.....	37
第一节 超声波探伤的物理基础.....	37
第二节 超声波发射声场与规则反射体的回波声压.....	44
第三节 超声波探伤用仪器、探头和试块.....	49
第四节 超声波探伤的应用.....	53
第三章 磁粉探伤.....	66
第一节 磁粉探伤的物理基础.....	66
第二节 磁粉探伤材料与设备.....	70
第三节 磁粉探伤工艺方法.....	73
第四章 液体渗透探伤.....	80
第一节 液体渗透探伤的理化基础.....	80
第二节 渗透探伤试剂、试块和装置.....	84
第三节 渗透探伤工艺方法.....	90
第五章 涡流探伤.....	98
第一节 涡流探伤的基本理论.....	98
第二节 涡流检测仪、线圈和试样.....	100
第三节 涡流检测工艺方法.....	103



第二篇

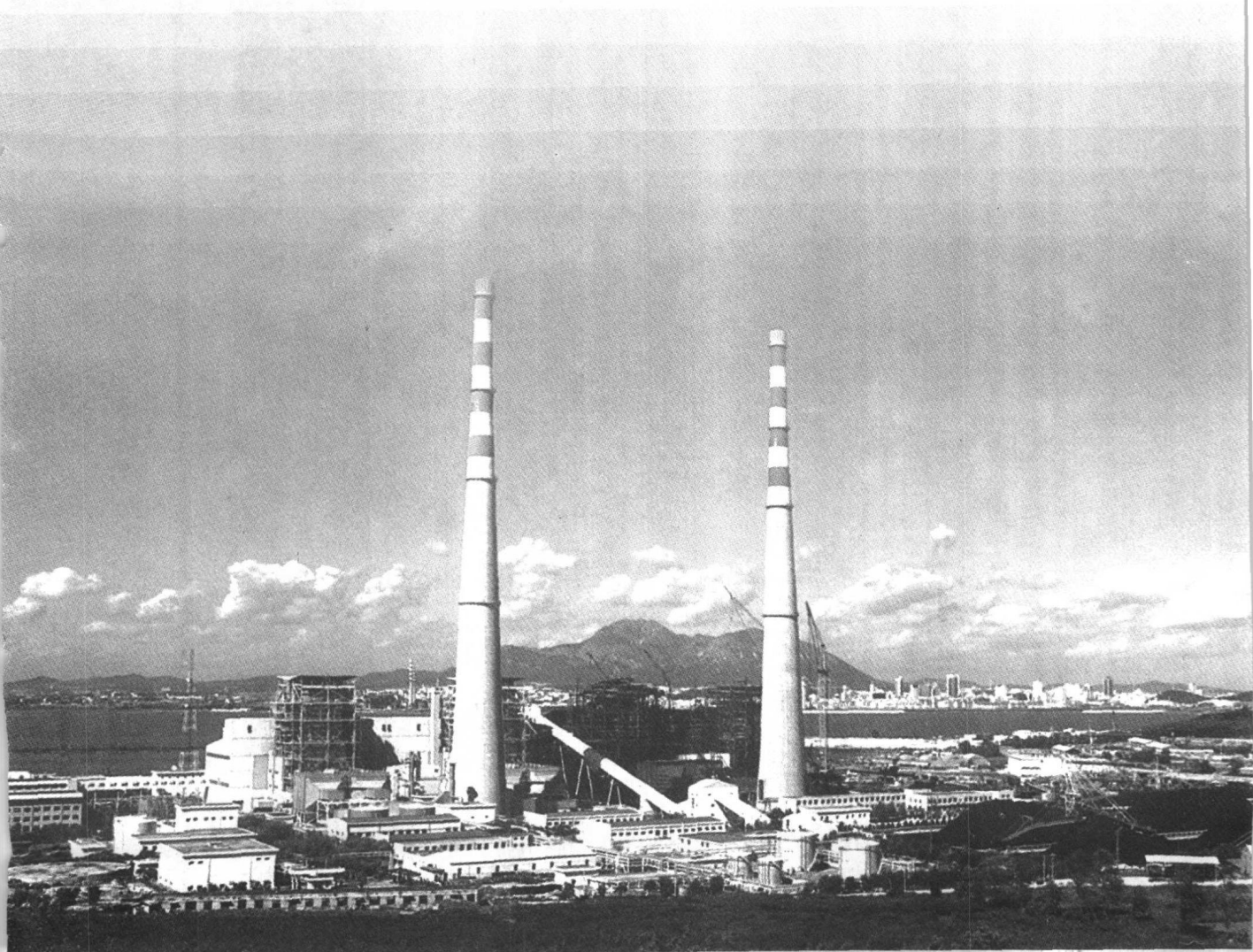
金属材料与火电厂金属技术监督

第六章 钢的基础知识.....	107
第一节 金属学.....	107
第二节 钢的热处理.....	114
第三节 合金元素在钢中的作用.....	125
第四节 钢的分类与表示方法.....	129

第五节	钢中常见的缺陷	130
第六节	铸铁和有色金属	134
第七节	金属腐蚀与防护基础	140
第七章	金属材料的力学性能和工艺性能	146
第一节	常温力学性能	146
第二节	金属高温力学性能	158
第三节	工艺性能	165
第八章	电厂金属材料	170
第一节	金属材料在高温长期运行下组织的变化	170
第二节	锅炉及压力容器用钢	173
第三节	汽轮机和发电机用钢	194
第四节	紧固件用钢和铸钢件用钢	210
第五节	其他部件用钢及耐热钢	220
第九章	金属焊接与焊接材料	228
第一节	焊接方法及工艺	228
第二节	焊接材料	241
第三节	电厂常用金属材料焊接	255
第四节	焊接缺陷及质量检验	263
第五节	电厂重要部件补焊	274
第十章	火电厂金属技术监督	282
第一节	金属技术监督任务和范围	282
第二节	金属技术监督方法	284
第三节	焊接质量监督	296
第四节	技术档案	297
第五节	电力建设施工及验收	299
第十一章	失效分析	307
第一节	分析程序	307
第二节	微观组织检验	309
第三节	断口检验	318
第四节	材料化学成分分析	330
第五节	主要设备件失效形式和防止措施	335
附录 A	电站中常用焊接接头的基本形式及坡口尺寸	355
附录 B	常用焊条熔敷金属的化学成分和常温力学性能	359
附录 C	常用钢焊丝的化学成分	361
附录 D	焊接异种钢的焊条(焊丝)及焊后热处理温度推荐表	362
附录 E	蠕变测量和计算方法	363
附录 F	焊接接头质量检查试样	367
参考文献	370

第一篇

无损探伤



绪 论

1 无损探伤的概念

为了保证产品质量和设备安全运行，必须对产品和设备进行检验。一般检验分为破坏性检验和无损检验（非破坏性）两大类。

破坏被检对象来检测材料或产品性能质量的方法称为破坏性检验。如机械性能试验、化学分析、金相分析和爆破试验等。

在不破坏被检对象的前提下，利用声、光、电、磁等各种物理的方法来检测材料内部及表面缺陷的测试技术，称为无损检验，又称无损探伤。如水缸检漏，挑选西瓜，医生听诊及工业上的超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤、渗透探伤和涡流探伤等。

无损探伤是一门新兴的应用技术科学，在电力、机械、化工、冶金、交通、航空、航天等工业部门得到愈来愈广泛的应用。

2 无损探伤的任务

由于科学技术和工业生产迅速发展，对材料性能的要求愈来愈高，然而当前的冶金技术难以提供完美无缺的材料。同时各种设备在加工过程中也会产生这样或那样的缺陷，如焊接中的气孔、夹渣、未焊透等，铸造中的缩松、缩孔等，锻造中的白点、折叠等。当承载零部件，特别是高温、高压、高速的零部件的内部存在缺陷时，往往是十分危险的，有时甚至会整个机构损毁，引起重大的设备人身事故，造成重大损失。

通过无损探伤，可以挑选合格产品或把正在运行着的存在缺陷的零部件检测出来，消除隐患，防止事故的发生，提高设备的安全可靠性，这已成为工程技术中的一个重要课题。也正是无损探伤所要承担的首要任务。

此外无损探伤还可发现毛坯中的缺陷，防止后续工时的浪费，从而降低产品成本。无损探伤对于改进焊接、铸造等工艺也是十分有益的，先设计一些不同的工艺方案，然后进行试验，最后通过无损探伤来确定最佳的工艺方案。无损探伤在运行设备监督方面也发挥着重要作用。

3 无损探伤方法简介

随着科学技术的发展，新的无损探伤方法不断涌现，据有关资料介绍至今已发展到 50 多种。不过目前常用的仍然是超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤、液体渗透探伤和涡流探伤等五大常规方法。下面分别予以简介。

3.1 射线探伤 RT

射线探伤是利用某些射线（如 X、 γ 射线）穿透工件时，由于缺陷与工件材料对射线的衰减作用不同，从而使胶片感光不一样，于是在底片上形成黑度不同的影像，据此来判断材料内部的缺陷情况，简称 RT。

射线探伤缺陷显示比较直观，探伤结果可长期保存。但射线对人体有害，消耗胶片，探伤成本较高，穿透能力不及超声波，裂纹检出率低。

3.2 超声波探伤 UT

超声波探伤是利用超声波能在弹性介质中传播，在界面上产生反射、折射等特性来探测材料内部或表面缺陷的探伤方法，简称 UT。

超声波探伤不但检测厚度大，而且灵敏度高，速度快，成本低，能对缺陷定位和定量，同时对人体无害。然而超声波探伤，缺陷显示不直观，探伤技术难度大，易受主、客观条件的影响，探伤结果不便保存。

3.3 磁粉探伤 MT

磁粉探伤是利用被磁化的工件在其缺陷处形成漏磁场来吸附磁粉，显示缺陷的探伤方法，简称 MT。

磁粉探伤缺陷显示直观，操作简单，成本低，速度快。但磁粉探伤只能探伤铁磁性材料表面或近表面缺陷，如铁、钴、镍及其合金，但奥氏体不锈钢例外。

3.4 渗透探伤 PT

渗透探伤是利用液体的毛细管现象来检测工件表面开口缺陷的探伤方法，简称 PT。

渗透探伤不受材料种类的限制，可一次检出工件表面不同方向缺陷，灵敏度高，使用方便，操作简单，适用于无电源、水源的野外现场检测。但渗透探伤只适用于检测材料表面开口缺陷，所用试剂有一定的毒性，要求工件表面光洁，不能检测多孔性材料。

3.5 涡流探伤 ET

涡流探伤是根据高频电流在工件材料中产生的感生涡流大小的变化来检验工件材料表面缺陷的探伤方法。涡流探伤是以电磁感应理论为基础的，当高频电流通过线圈时，便在靠近线圈的工件表面感应出涡流，涡流又产生自己的磁场，与线圈激励的磁场相互作用。当工件表面存在缺陷时，涡流磁场就会发生变化，从而引起检测线圈电流的变化，据此可以判定工件表面的缺陷情况，涡流探伤简称 ET。

涡流探伤速度快，成本低，操作简单，易于实现自动化，可用于磁性或非磁性导电材料的检测。但涡流探伤只能检测表面或近表面缺陷，而且只适用于导电材料。

以上各种探伤方法各有优缺点，都有一定的局限性，没有哪一种方法是完美无缺的。在实际探伤中应根据被检对象的具体情况、相关的技术规范要求选择合适的探伤方法，且彼此有机配合，才能获得比较理想的探伤结果。

第一章 射线探伤

第一节 射线探伤的物理基础

1 X、 γ 射线的实质与性质

射线的种类很多,如X射线、 γ 射线、 α 射线、 β 射线、中子射线等,据统计已达数百种。但目前广泛应用于无损探伤的主要是X射线和 γ 射线。

1.1 X、 γ 射线的实质

X、 γ 射线与无线电波、红外线、可见光、紫外线一样,都是电磁波、光子流,具有波粒二象性。X、 γ 射线传播时产生的衍射和干涉现象,体现其波动性,X、 γ 射线与物质相互作用时体现其粒子性。

电磁波的波长与频率的关系为 $\lambda = \frac{c}{\nu}$

光子的能量与频率的关系为 $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$

式中 c ——电磁波的波速, $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$;

h ——普朗克常数, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$;

ν ——电磁波的频率, Hz;

λ ——电磁波的波长, m;

E ——光子的能量, J。

由上式可知,X、 γ 射线的能量与频率成正比,与波长成反比。频率愈高,波长愈短,光子的能量就愈高,其线质就愈硬,穿透能力也就愈强。各种电磁波的频率和波长范围见表1-1。

表 1-1 各种电磁波频率和波长范围

电磁波种类	频 率 (Hz)	波 长 (m)
无线电波	$10^4 \sim 10^{12}$	$3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^{-4}$
红外线	$10^{12} \sim 3.9 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-4} \sim 7.8 \times 10^{-7}$
可见光	$3.9 \times 10^{14} \sim 7.7 \times 10^{14}$	$7.8 \times 10^{-7} \sim 3.9 \times 10^{-7}$
紫外线	$7.7 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16}$	$3.9 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-8}$
X射线	$3 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{-8} \sim 6 \times 10^{-13}$
γ 射线	$3 \times 10^{18} \sim 10^{21}$	$1 \times 10^{-10} \sim 3 \times 10^{-13}$

1.2 X、 γ 射线的性质

(1) 具有较强的穿透能力。X、 γ 射线虽然与可见光一样都是电磁波,但由于其频率很高,波长很短,具有很高的能量,因此它能穿透可见光不能穿透的物质,如黑纸、肌肉、金

属等。射线穿透物质后其强度将减弱，减弱的程度与物质的原子序数及密度有关。物质的原子序数愈高，密度愈大，衰减就愈大。射线探伤就是利用射线穿透工件时，工件母材与缺陷对射线的衰减不同来判别有无缺陷的。

(2) 能使胶片感光。X、 γ 射线的实质与可见光一样是一种光子流，因此它们与可见光一样，能使胶片感光。当X、 γ 射线照射涂有感光乳剂层的胶片时，产生光化学作用，使感光乳剂层内的AgBr中的Ag还原，形成“潜像”，再经化学显影、定影等暗室处理后成为可见的黑色影像。射线照相检验就是利用射线的这一性质来实现的。

(3) 能使荧光物质发出荧光。X、 γ 射线照射钨酸钙(CaWO_4)、硫化锌(ZnS)、铂氰化钡 $[\text{BaPt}(\text{CN})_6]$ 等荧光物质时，能使荧光物质发出荧光。荧光是波长接近于紫外线的可见光，多为黄绿色，感光能力强。在射线探伤中，为了增强X射线胶片的感光作用，而采用的荧光增感屏就是根据这一性质制成的。

(4) 能杀伤生物细胞。X、 γ 射线照射生物细胞，会使生物细胞受到损伤、抑制甚至坏死。过量照射，会引起某些病变。因此在X、 γ 射线探伤中，要注意安全防护，严格控制照射剂量，不要超过剂量标准规定的最大允许剂量。

(5) 能使空气电离。X、 γ 射线照射空气，能使空气电离成正负离子，电离的正负离子数随射线的强度增加而增加。根据射线的这一性质制成的剂量仪可以测定射线的剂量，以便科学地进行防护。

(6) 不受电磁场的干扰。由于X、 γ 射线是一种光子流，不带电，因此X、 γ 射线不受电磁场的干扰。

(7) 不可见，沿直线传播。X、 γ 射线与可见光一样沿直线传播，但它不可见。因此更要注意对它的防护。

此外，X、 γ 射线还具有其他一些性质，如衍射、折射等。由于在实际探伤中无多大应用价值，故这里不再赘述。

2 X射线的产生与X射线谱

2.1 X射线的产生

X射线是德国物理学家伦琴在1895年11月8日的一次实验中首先发现的，这一发现当时轰动了整个科学技术界。伦琴因此于1901年12月10日成为世界上第一个诺贝尔奖获得者。

X射线是由一个酷似真空二极管的电子管产生的，这个电子管称为X射线管，如图1-1所示。它由阴极、阳极和玻璃外壳组成。其工作原理是：将玻璃管抽真空，阴极灯丝通电加热，放出热电子，热电子在阳极和阴极间的高压电场（几万伏至几十万伏）作用下加速飞向阳极，高速撞击阳极靶，突然受阻，产生一种不可见的射线，它能穿透可见光不能穿透的黑纸、衣物、肌肉、金属等，可使 $\text{BaPt}(\text{CN})_6$ 荧光纸发出荧光。由于当时未弄清这种射线的产生机理和性质，故以数学中的未知数X来命名，叫X射线。后来为了纪念发现该射线的科学家伦琴，

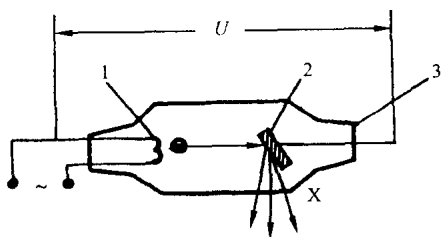


图 1-1 X射线管示意图

1—阴极灯丝；2—阳极靶；3—玻璃外壳

因此又叫伦琴射线。

由此可见产生 X 射线必须具备以下三个条件：

- (1) 具有足够数量的自由电子。
- (2) 使电子做定向运动，形成高速电子流。
- (3) 设障碍物（靶），使高速电子突然受阻。

简单地说，X 射线是高速电子撞击阳极靶突然受阻放出的一种波长很短的电磁波。根据波长的变化情况将其分为连续 X 射线和标识 X 射线。

2.2 连续 X 射线谱

波长在一定的范围内连续变化的 X 射线称为连续 X 射线谱，又称韧致 X 射线或白色 X 射线谱，如图 1-2 所示。图中纵坐标为 X 射线的强度 I ，表示单位时间内垂直通过单位面积的 X 射线光子的总能量，横坐标为波长 λ 。图中曲线表示 X 射线管发出的 X 射线强度随波长连续变化的情况。

经典电动力学指出，凡具有加速度的带电粒子将产生电磁波辐射。在 X 射线管中，由于阴极热电子在高压电场作用下高速撞击阳极靶，突然受阻，产生很大的负加速度，因此也会产生电磁波辐射，即 X 射线。

连续 X 射线的波长连续变化，但具有最短波长。当高速电子撞击靶产生电离和激发所耗能量 $W=0$ 时，高速电子的全部能量转变为 X 射线光子的能量，这时 X 射线的能量最高，波长最短。而高速电子的能量是从高压电场中加速获得的，因此 X 射线光子的最高能量等于电子在高压电场中加速获得的能量。由此可以导出最短波长为

$$\lambda_{\min} = \frac{1.24}{U}$$

式中 λ_{\min} ——对应管电压下最短波长，nm， $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ；

U ——管电压，kV。

由上式可知，X 射线管的管电压愈高，X 射线的最短波长就愈短，其能量就愈高，穿透能力也就愈强。

连续 X 射线总强度为

$$I_z = KZiU^2$$

由此可知，X 射线的总强度 (I_z) 与管电压的平方 (U^2) 成正比，与管电流 (i)、靶原子序数 (Z) 成正比。

当电流 i 、原子序数 Z 一定时，若管电压 U 增加，则最短波长减小，总强度急剧增加。因此在 X 射线探伤中，提高管电压，不仅可以提高 X 射线的穿透能力，而且可以大大提高 X 射线的总强度，从而缩短曝光时间。

当管电压 U 、原子序数 Z 一定时，若管电流 i 增加，则最短波长不变，总强度增加。因此在实际探伤中，增大管电流，只能提高 X 射线的总强度、缩短曝光时间，不能提高穿透能力。

2.3 标识 X 射线谱

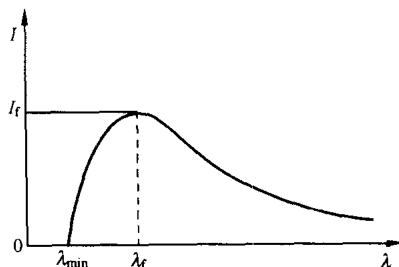


图 1-2 连续 X 射线谱

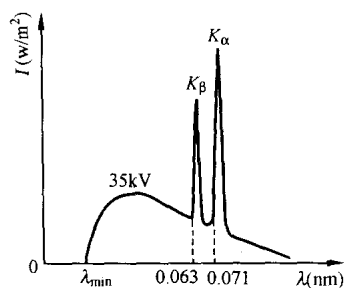


图 1-3 标识 X 射线谱 (钼靶 35kV)

X 射线管发出的波长特定、强度很大的 X 射线称为标识 X 射线谱或特征 X 射线, 如图 1-3 所示。图中表示钼 (Mo) 靶在 35kV 条件下产生两条波长分别为 0.063nm (K_{β}) 和 0.071nm (K_{α}) 强度很大的标识 X 射线。

标识 X 射线的特定波长与管电压及管电流无关, 仅与靶材料有关。利用这一规律可以对材料化学成分进行定性分析。在射线探伤中, 标识 X 射线无多大实用价值。

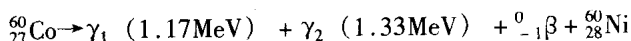
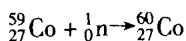
3 γ 射线的产生与放射性物质的衰变

3.1 γ 射线的产生

伦琴发现 X 射线的第二年——1896 年, 法国物理学家贝可勒尔发现铀盐能自发地放出一种穿透能力很强的性质类似于 X 射线的射线。两年后 1898 年居里夫妇又发现钋 (^{210}Po) 和镭 (^{226}Ra) 也能自发地放出这种射线。后来人们把某些元素自发地放出的穿透能力较强的射线称为 γ 射线, 把这种放出射线的性质称为放射性, 把具有放射性的元素 (或物质) 称为放射性元素 (或物质)。

γ 射线的产生是原子核能级跃迁的结果。原来, 元素的原子核如同原子一样也具有许多不同的能级, 也有基态和激发态之分, 基态能级最低, 激发态能级较高。在正常情况下, 原子核处于基态, 最稳定。在核反应、核裂变等过程中, 核吸收一定的能量处于受激状态, 能量较高, 不稳定。当它向基态跃迁时, 多余的能量就以电磁波的形式放出, 从而产生 γ 射线。由于原子核能级差大, 因此产生的 γ 射线能量高, 波长短, 穿透力强。

例如, 用中子 (^1_0n) 轰击钴 ($^{59}_{27}\text{Co}$), 就会使 $^{59}_{27}\text{Co}$ 变为 $^{60}_{27}\text{Co}$ 。 $^{60}_{27}\text{Co}$ 不稳定, 将自发地放出两条能量分别为 1.17MeV 和 1.33MeV 的 γ 射线以及 β 射线, 它本身转变为另一种元素镍 ($^{60}_{28}\text{Ni}$), 即:



γ 射线能量的单位常用电子伏特 (eV) 来表示, 1eV 是指 1 个电子在 1 伏特的电场中加速所获得的能量。1MeV = 10^6 eV, 1eV = 1.6×10^{-19} J。

放射性元素分为两大类。一类是天然放射性元素, 一般是原子序数 $Z > 83$ 的元素, 如 $^{210}_{84}\text{Po}$ (钋)、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ (镭)、 $^{235}_{92}\text{U}$ (铀) 等。另一类是人工放射性同位素, 如 $^{60}_{27}\text{Co}$ (钴)、 $^{137}_{55}\text{Cs}$ (铯)、 $^{192}_{77}\text{Ir}$ (铱) 等。由于天然放射性元素价格昂贵, 因此工业上应用很少。目前广泛应用的是各种人工放射性同位素。

3.2 放射性物质的衰变

放射性物质的原子自发地转变为另一种物质的原子, 放出射线, 能量逐渐减弱的现象称为衰变。其衰变规律为

$$N = N_0 e^{-Kt}$$

式中 N ——衰变时间为 t 后的原子数;

N_0 ——衰变开始时的原子数;

K ——衰变常数;