

[美] R.A. 奎因 C.C. 西格尔 著

现代工业中的射线照相法

沈健 译 赵起良 校

国防工业出版社

现代工业中的射线照相法

〔美〕 R. A. 奎 因 著
C. C. 西 格 尔
沈 健 译
赵起良 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了射线照相法的原理,着重叙述了射线照相法的工艺过程,并分析了影响射线照相质量的有关因素,如几何不清晰度、增感屏、散射线、x射线胶片及其处理方法与工艺控制等。同时还介绍了一些特殊处理方法和射线照相技术。对近年来出现的一些新技术也作了介绍,如胶片的自动处理和相纸射线照相法等。对胶片的感光特性、胶片粒度、信噪比和照相潜影亦作了适当叙述。

本书的特点在于实用,内容丰富、系统性强。全书图文并茂,读者易于理解和掌握。

本书可供从事无损检验的工程技术人员、工人和高等院校有关专业的师生学习和参考。

Radiography in Modern Industry

Eastman Kodak Company 1980

现代工业中的射线照相法

A. C. 西格尔 著
R. A. 奎因
E. C. 西格尔
沈健 译
赵国良 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张10⁵/₈ 231千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数: 0,001—1,080册

ISBN 7-118-00130-9/TB4 定价: 5.20元

前 言

近年来，科学和工程上的许多惊人成就可以认为是与无损检验方法分不开的。因为这些无损检验方法（即不破坏产品的使用价值而又能测定其内部质量的方法）确保了产品的良好性能。

今天，在现代工业所有无损检验方法中，射线照相法是最重要、最通用的方法之一。利用穿透能力强而又对零件没有破坏作用的 α 射线、 γ 射线和其它形式的辐射而进行的射线照相检查，可以得到一张永久性的、可供观察的照片。这张照片能显示出零件内部的情况，其中包括用以判断零件安全性的基本信息。仅仅在过去的十年中，从许多胶片记录或射线照片资料的分析数据来看，射线照相法能够保证工业产品的可靠性，并提供了防止事故和拯救生命的信息，对用户是非常有利的。

因为经济上的合理性是判定任何一种检验方法的主要指标，因此射线照相法的价值就在于从某种程度上使用户得到效益。当在生产线上只允许那些被认为是没有缺陷的零件才能进行机械加工时，这种价值就可明显地表现出来。同样，经过质量评定，认为可以用更廉价的材料和制造方法代替较昂贵的材料和制造方法时，射线照相法的价值就可在降低成本方面明显地体现出来。从射线照相法中得到的资料还能帮助工程技术人员设计出更好的产品，并靠性能稳定、质量水平高的产品而使公司得到保护。总之，射线照相法的这些优

点能使用户满意，而且提高了制造厂家的声誉。

工业射线照相是一种相当通用的方法。受检物体的范围十分广泛：按其尺寸，可以从微型电子元件到巨大的火箭构件；按产品的成分，可以是已知的每一种材料；按其制造方式，可以是各种铸件、焊接件和组合件。这个方法已经用来对有机物、无机物、固体、液体甚至气体进行检验。它可以从每小时检验一个或几个毛坯到每小时检验数百个试样不等。它的广泛应用不但导致了在制造厂中建立射线照相部门，而且导致了建立独立的专业性试验室。工业上的射线检验常常由用户（即其它机械制造厂）或政府机构对质量进行监督。作为监督依据的有关说明书或规范可以由合同加以规定，也可以由其它一些技术协会或管理部门予以提供。

为了满足工业上越来越高的要求，射线照相领域的研究和发展正在不断地制造出新的辐射源，例如中子发生器和放射性同位素。同时，还在不断地制造出更精巧、更轻便、功率更大的 x 射线设备和产生强穿透辐射的几百万伏特的 x 射线机以及新型的 x 射线胶片和自动处理机。此外，射线照相技术也在不断改进。这些因素加上许多专业人员的积极努力，使得射线照相法在工业上的应用得到了推广。

毫无疑问，从情报资料来看，现代最早成熟的一种无损检验方法——射线照相法（从1895年开始使用至今）已经得到许多工业部门对它所提供的信息的莫大信任。现在，包括工业管理部门、设计人员、工程师、生产人员、检验人员和热爱实际工作的每一个人在内的工业队伍正在一年比一年地蓬勃发展，质量、产量和利润都在一年比一年地增长，这充分显示着射线照相法在现代工业中的重大意义。

目 录

前言

第一章 射线照相的概述	1
一、 x 射线的特性	1
二、 γ 射线的特性	1
三、射线照片的拍摄	2
四、增感屏	4
五、散射线	5
六、胶片的类型	5
第二章 x 射线和 γ 射线源	6
一、 x 射线的产生	6
二、 x 射线管	6
三、冷却	8
四、焦点尺寸	8
五、千伏电压的影响	8
六、快速 x 射线机	13
七、高压设备	13
八、各种型号 x 射线机的用途	15
九、 γ 射线源	15
第三章 几何原理	21
一、一般原理	21
二、射线照相的暗影	24
三、几何原理在射线照相法中的应用	25
四、几何不清晰度的计算	28

五、焦点的针孔投影测定法·····	28
第四章 影响曝光量的因素·····	32
一、由射线源所发射的放射线·····	32
二、平方反比律·····	35
三、试样对射线的吸收作用·····	38
四、射线照相增感屏·····	41
五、曝光系数·····	41
六、曝光系数的确定·····	42
七、对比度·····	43
八、胶片的选择·····	45
九、射线照相的灵敏度·····	45
十、多胶片法·····	46
十一、胶片处理的影响·····	48
第五章 射线照相增感屏·····	49
一、铅箔增感屏·····	49
二、氧化铅屏·····	56
三、荧光增感屏·····	58
四、x 射线胶片暗盒与胶片夹·····	64
第六章 散射线·····	66
一、减少散射线的方法·····	69
二、由 x 射线衍射引起的斑点·····	80
三、1 百万伏特至 2 百万伏特射线照相法中的散射·····	81
四、几百万伏特的射线照相法·····	82
第七章 曝光量的计算·····	84
一、毫安数(源的强度)、焦距和时间的关系·····	84
二、反比定律·····	88
三、对数·····	90
四、摄影密度·····	92
五、密度计·····	92
六、x 射线的曝光曲线·····	93

七、曝光曲线的制作	94
八、 γ 射线曝光曲线	97
九、特性曲线	98
十、特性曲线的用途	101
十一、感光度测定问题的图解法	104
十二、用于曝光曲线的计算尺	111
十三、对多重厚度试样曝光量的估算	118
十四、多胶片法的应用	122
十五、曝光曲线的局限性	123
第八章 射线照相的影像质量和细节的可见度	126
一、主因对比度	128
二、胶片对比度	129
三、胶片粒度、屏斑(见第十七章)	130
四、透度计	131
五、射线照片的观察和解释(判片)	137
第九章 工业 x 射线胶片	139
一、工业射线胶片的选择	141
二、胶片的包装	143
三、胶片的处理	144
四、射线照片的标记	145
五、x 射线胶片的装运	146
六、x 射线胶片的保存	146
七、射线照片的档案室保存	151
八、射线照片的一般性保存	152
九、关于保存射线照片的补充建议	152
第十章 胶片处理的基础知识	154
一、一般要求	155
二、胶片的手工处理	156
三、胶片的自动处理	171
四、射线照片的存档	180

第十一章 工艺控制	181
一、设备和器材	181
二、一般情况	183
三、方法	190
四、讨论	191
第十二章 处理间	193
一、处理场地	193
二、总的考虑	198
第十三章 特殊处理方法	201
一、曝光不足的射线照片的加厚	201
二、定影剂的去除	203
三、定影剂清除情况的检验	204
四、从双面胶片上除去一面的乳剂	206
五、盘处理法	208
六、从定影液中回收银	210
第十四章 特殊射线照相法	213
一、动态射线照相法	213
二、放射性材料的射线照相法	222
三、缺陷深度的测定	227
四、厚度测量	232
五、高速射线照相法	234
六、几何放大	236
七、中子射线照相法	237
八、自射线照相	240
九、射线照片的复制	241
十、 $\times$ 射线荧光检查	245
十一、荧光屏图像照相法	247
十二、 $\times$ 射线显微照相法	250
十三、电子射线照相法	259
十四、 $\times$ 射线衍射	265

第十五章 相纸射线照相法	271
一、相纸射线照片的优点	271
二、相纸射线照相法的用途	271
三、影响相纸射线照片的因素	272
四、曝光方法	272
五、处理方法	272
六、稳定化处理	273
七、自动处理	275
八、手工处理	275
九、相纸射线照片的观察	276
十、相纸射线照片的判读	278
第十六章 x 射线胶片的感光特性	281
一、特性曲线	281
二、密度和曝光量之间的关系	291
三、反比定律失效	291
四、显影时间对感光速度和对比度的影响	294
五、x 射线光谱灵敏度	298
第十七章 胶片粒度, 射线照片的信噪比	300
一、粒度	300
二、信噪比	303
第十八章 照相潜影	308
一、Gurney-Mott 理论	313
二、x 射线潜影	315
三、显影	319
第十九章 防护	324
一、对 x 射线的防护	324
二、x 射线防护材料和结构	326
三、对 γ 射线的防护	328

第一章 射线照相的概述

一、x射线的特性

x射线和光一样也是一种电磁辐射。x射线的明显特征在于它的波长非常短，大约只有光的波长的万分之一，甚至更短。这一特性使得x射线具有穿透能吸收或反射普通光线的材料的能力。

x射线表现出光的所有特性，但表现的程度不同，以致大大地改变了它实际的性能。例如光能被玻璃折射，因此光能被照相机、显微镜、望远镜和眼镜一类仪器中的透镜所聚焦。虽然x射线也能被折射，但折射的程度非常轻微，以致于只有用最精确的试验才能探测出这一现象。所以，将x射线聚焦是不现实的。尽管说明光和x射线之间的其它相似之处是可能的，但其结果多半是很不相同的，特别是在它们的穿透能力方面更是如此。因此最好是将x射线和γ射线与其它辐射分开考虑。图1示出了x射线在电磁波谱中的位置。



图1 电磁波谱部分。波长以埃 (Å) 作单位

(1 埃 = 10^{-8} 厘米 = 3.937×10^{-9} 英寸)

二、γ射线的特性

γ射线的特性和x射线相同。和x射线一样，γ射线既

与可见光有某些相似之处，又有某些不同之点。 γ 射线和 x 射线的明显区别仅仅在于它们的辐射源不同，而不是它们的特性。 γ 射线是从放射性物质的核蜕变过程中辐射出来的。这种辐射的强度和参量（波长或穿透率）不能由使用者加以控制。一些 γ 射线放射性同位素，如镭是天然存在的，而另外一些像钴60这样的放射性元素则是由人工制造的。在工业射线照相中，几乎只把人造的放射性同位素作为 γ 射线源使用。

三、射线照片的拍摄

射线照片是 x 射线或 γ 射线通过物体到达胶片上所产生的照相记录(图2)。当胶片对 x 射线、 γ 射线或可见光曝光时，在胶片的感光乳剂中产生不可见的变化，即潜影。当胶片浸入显影液中时，经过曝光的区域变黑，而变黑的程度则取决于曝光量。显影以后，最好将胶片放入停显液中冲洗以便停止显影。接着放入定影液中。定影液能溶解胶片上的未感光部分。然后从定影液中取出，用水冲洗并晾干，以便判读和保存。曝光胶片的显影、定影和水洗既可用手工操作，也可用自动洗相机进行处理。

图3表示胶片曝光时的主要特点。辐射线是从 x 射线管的焦点发出的。在 γ 射线照相法中，焦点则是装有放射性物质（例如钴60）的小盒，这就是射线源。使用 x 射线或 γ 射线时，射线都沿直线射向物体。此时，一些射线穿过物体，而其余的射线被物体吸收。穿过物体的射线数量取决于物体的性质和它的厚度。例如，假设物体是一个含有气泡的钢铸件，那么，气泡就使被穿透的钢铸件的总密度减小。所以，穿过含有气泡截面的射线将比穿过气泡周围金属的射线多。当胶片显影时，胶片上对应气泡投影的位置就出现一

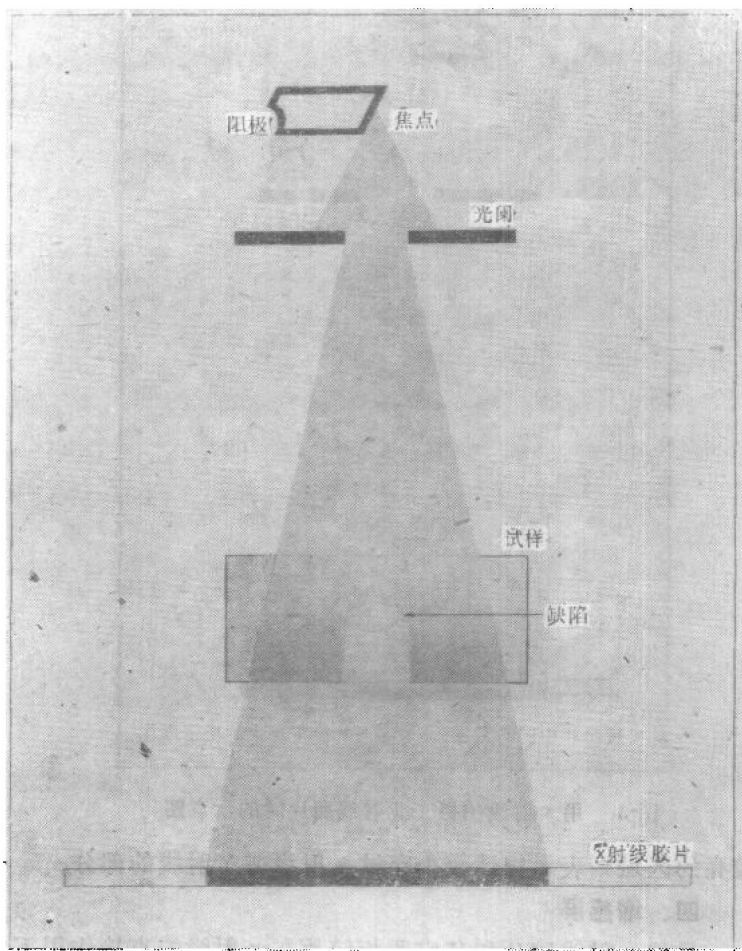


图2 射线照相曝光原理示意图。胶片的深色区域表示试样较容易穿过的部分，而浅色区域表示较难穿过的部分

个黑点。这样，一张射线照片就是一种暗影图——射线照片上较黑的区域表示物体较多穿过x射线或γ射线的部分，而

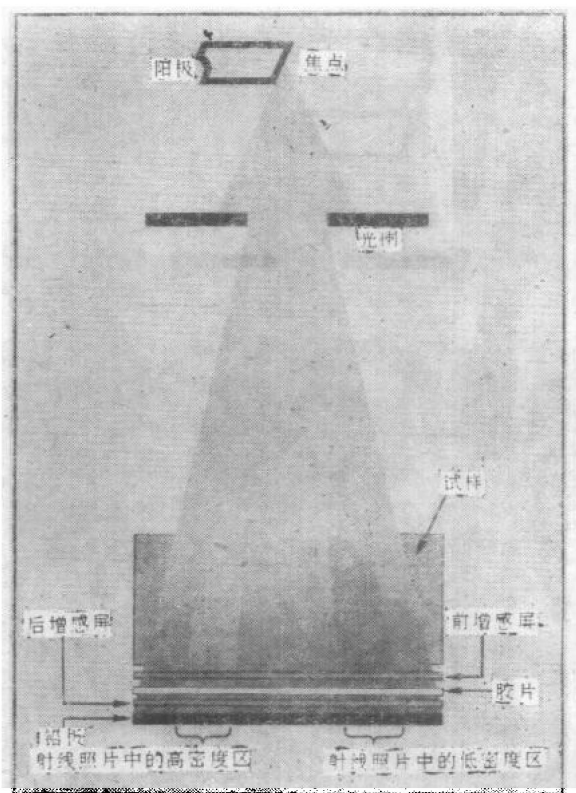


图3 用x射线拍摄工业射线照片时的示意图

较亮的区域则表示物体较少穿过x射线或γ射线的部分。

四、增感屏

虽然x射线胶片和其它照相胶片在x射线的直接作用下是容易感光的，但曝光时间相当长。如果在胶片两边放上与其紧贴的增感屏，就可缩短曝光时间。

一种类型的增感屏是由铅箔或均匀涂在纸背上的铅化合物薄层所构成。在波长较短的x射线或γ射线激发下，铅是

一种良好的电子辐射源，它使胶片感光，这样就增加了总的照相效果。

另一种类型的增感屏是由一种粉状荧光化合物（例如钨酸钙）与一种适当的粘合剂混合并涂在纸板或塑料上构成的。这种增感屏的作用是把一部分 x 射线能转换成可见光。因为胶片对可见光是很敏感的。

是否需要使用增感屏以及决定使用哪种类型的增感屏，这要根据具体情况而定。这方面的内容将在第五章详细讨论。

五、散射线

所有材料都有一个共同的特性，即不仅以不同程度吸收与透过 x 射线和 γ 射线，而且会使它们散射。散射以后，射线的波长变长且射向四面八方。在射线照相中，胶片接收来自试样、暗盒和一次射线束路径中其它材料的散射线，其后果是降低射线照片的对比度、清晰度和透明度。与胶片接触的铅屏可以减少散射线的影响。在某些情况下，将铜制或铅制滤波板放在 x 射线管和试件之间，或者放在试件和胶片之间以减少散射线对胶片的影响。有时，用铅板盖住暴露在一次射线中的物质，这对减少散射线的影响是很有好处的。关于这个问题，将在后面的章节中进行更详细的讨论。

六、胶片的类型

为了满足材料对射线照相的要求，已经设计出几种类型的 x 射线胶片。有些类型的胶片最好与铅屏一起使用，也可不用铅屏。而有些类型的胶片则主要与荧光增感屏一起使用。 x 射线胶片通常是在片基的两面均涂上感光乳剂。两乳剂层的射线照相影像相重叠使胶片密度增加一倍，从而使感光速度大大增加。当两乳剂层中相重叠的影像可能造成模糊的时候，就得使用只在一面涂有乳剂的胶片——单面胶片。

第二章 x射线和 γ 射线源

一、x射线的产生

当以高速运动的电子流与物体相碰撞或改变方向时，就产生了x射线。在常见的x射线管中，由炽热的灯丝提供电子，于是灯丝就构成了管子的阴极，即负极。而对管子施加的高压则驱使电子向阳极（或称靶）运动，这些高速运动的电子在靶面突然停止便导致了x射线的产生。

两个电极之间的距离和电极的结构以及管子的真空度这三者的设计 requirements 是：只有当灯丝被加热时，阴极和阳极之间才有电子流。

二、x射线管

图4是x射线管主要部分的原理图。灯丝由低压电源供给的几安培的电流加热。通常，这个低压源是一个小变压器。聚焦杯的作用是把电子束集中在靶的一块小区域上，这块小区域被称为焦点。电子束形成管电流，管电流的计量单位用毫安。

灯丝的温度越高，它发射的电子数就越多，管电流也就越大。所以，调节灯丝的加热电流就可以控制管电流。加热电流的调节通常由一个调压变压器来完成，这个变压器供给灯丝变压器的初级电压。在其它条件保持不变时，则x射线的输出与管电流成正比。

施加于射线管的大多数能量在焦点上转换成热能，而只有小部分转换成x射线。焦点上热量的高度集中，使阳极的

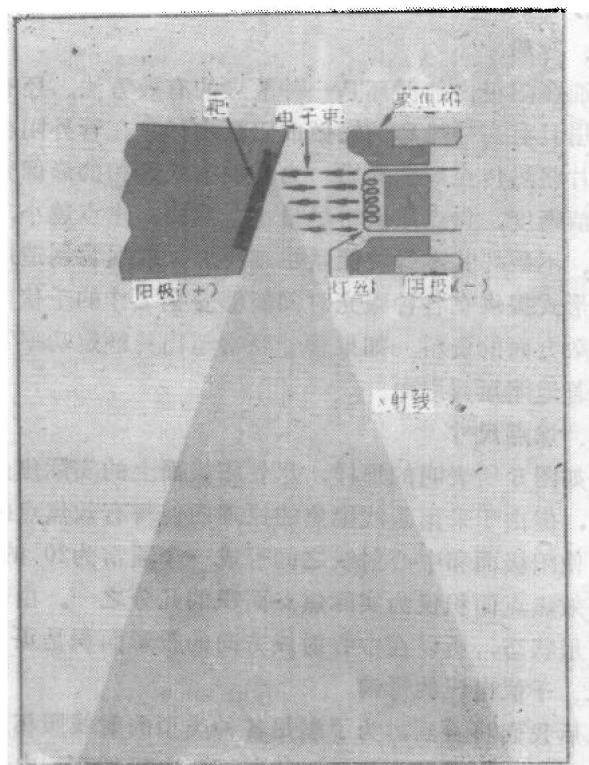


图4 X射线管示意图

材料和结构承受剧烈的负荷。钨的高熔点使它成为制造X射线管靶的一种很理想的材料。此外，靶材料产生X射线的效率与材料的原子序数成正比[●]。因为钨的原子序数高，所以它具有双重的优点。实际上，所有工业X射线机的靶都是用

- 元素的原子序数是原子核中的质子数，它等于核外的电子数。周期表中的元素按原子序数的递增排列。氢、铁、铜、钨和铅的原子序数分别为1、26、29、74和82。