

焊缝射线照相典型缺陷

图谱

崔秀一、张泽丰、李伟 编著

劳动人事部锅炉压力容器安全杂志社
全国锅炉压力容器资格鉴定考核委员会

焊缝射线照相典型缺陷图谱

崔秀一 张泽丰 李伟 编著

劳动人事部 锅炉压力容器安全杂志社
全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会

序 言

焊接是制造和连接各种工程构件最重要的方法，无损探伤则是检验鉴定焊接质量好坏的重要手段。焊接技术的发展是和无损探伤技术的提高分不开的。随着焊接方法、工艺的改进，目前虽然已能使焊缝的性能完全达到甚至高于母材的水平，但是，由于影响焊接质量的因素太多，诸如电流、焊机、焊件、焊材、焊剂、环境以及人为因素等等，即使是十分成熟的焊接工艺，也难免在焊缝中残留这样那样的缺陷。所以，要保证产品质量，要检验构件的可靠性和安全性，焊缝必然是检查的重点。

射线照相具有准确、可靠、直观和便于存查之特点，是当今世界上运用最广的无损探伤方法。尤其在承受压力构件的主要焊缝的检查中，这种方法是其他任何无损探伤方法难以代替的。

对射线照相探伤方法来说，当然首先应当要求制备合格的照相底片，这是基础。然而如何从底片上不同程度的明暗影象中判断出底片所贴部位焊缝中是否有缺陷、缺陷性质、类别、大小以及发展趋势等，是射线探伤人员，特别是中、高级射线探伤人员的基本功。要正确判断这些缺陷是一个十分细致而复杂的工作，既需要有较强的理论分析能力，又需要对焊接工艺、生产过程、各种缺陷产生的原因有实地观察剖析能力和经验。尤其需要实践经验，即射线底片上影象特点和实际缺陷相吻合的实践经验。要取得这种经验，当然最好的办法是根据一张张底片上影象特点所判断的缺陷，对其所对应的每条焊缝进行剖解来实地验证。但对每一个射线探伤人员来讲，这种机会是不多的，也不可能都靠这种办法来积累自己的评片经验。比较现实的办法是多看标准（典型）缺陷底片，接受别人的经验来丰富自己。

国际上有许多版本的射线探伤典型缺陷图谱发行，供射线探伤人员对比分析、参考学习。我国这方面的工作还不多。崔秀一、张泽丰、李伟三同志编著的这本《焊缝射线照相典型缺陷图谱》，是一项十分有益的尝试。他们长期从事无损探伤工作，收集整理了大量的典型缺陷射线底片，精心筛选了最典型的200张。为便于大家分析比较，图谱中还翻印了部分国际焊接学会的标准底片。这本图谱的出版，对提高无损检测人员和有关工程技术人员的技术素质，将起积极作用。我很高兴地向有关无损探伤和焊接专业的工人、工程技术人员推荐这本图谱，愿它对你的技术上精益求精有所帮助。同时也希望它能够成为进行培训、考核射线探伤人员的一本好的参考资料和教材。

全国锅炉压力容器无损检测人员

资格鉴定考核委员会主任 马德林

15797/09

前 言

焊接检验是保证焊接产品质量的重要手段。检验内容除了对焊接接头进行机械性能、化学分析、金相检验等破坏性检验以外,还要采用一些不损伤产品来发现焊缝缺陷的无损检验方法。在众多的无损检验方法中,射线探伤是应用较早的检验方法。利用射线照相检验焊缝内部缺陷具有准确、可靠、直观等优点,射线照相底片不仅可以用于缺陷的分析,而且还能作为质量凭证存档,这是其它无损检验方法所无法比拟的。因此,射线照相作为保证焊接质量的重要检验手段而得到充分的重视和广泛的应用。

焊缝射线底片是焊缝射线照相方法的最终结果,对焊缝射线照相底片进行评定是关系焊缝质量和安全性评价的关键。因此,要求评片人员必须具备正确识别底片上显示的各种影像的娴熟技术和丰富经验,结合产品结构、焊接工艺等各方面有关知识进行综合判断,并按照有关标准正确评定。

目前,劳动系统和许多工业部门正在致力于无损检测人员的技术培训和资格鉴定工作,大批无损检测人员从事射线探伤,承担着保证产品质量、安全可靠运行的技术责任。为了提高射线探伤人员评片的基本素质,正确判断底片上的各种影像,增强对缺陷的识别能力,提高评片效率,我们编著了这本《焊缝射线照相典型缺陷图谱》。本书前半部分介绍了焊缝射线照相一般原理,焊缝中常见典型缺陷形成机理及其在射线照相底片上的形貌特征。这些对于评片人员了解一般性技术基础知识和加深对底片影像的理解无疑是有帮助的。本书后半部分所附的图片是近年来从各方面收集并经充分筛选的各种常见典型缺陷底片和一部分常见伪缺陷底片复制而成的。在图谱中,我们还翻印了部分国际焊接学会的标准底片,这对于我们增进对焊接缺陷的了解肯定会有帮助。所有这些图片基本上保持了原有底片的形貌。在本书的最后附录了国家标准GB3323—82《钢焊缝射线照相及底片等级分类法》、GB3323—82标准的修订报批稿《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》及国际标准化协会ISO 6520《金属熔焊焊缝缺陷分类及说明》,以便读者查阅。我们试图通过这本《图谱》能对从事无损检测和焊接工作的工人、工程技术人员、技术管理干部以及从事锅炉、压力容器安全监察的干部掌握射线照相底片评定技能有所帮助。同时,提供作为射线检验教学和培训射线探伤人员的辅助参考教材。

本书由黑龙江省劳动局崔秀一同志、劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心张泽丰同志、北京燕山石油化工公司大修厂李伟同志共同编著的。天津市劳动局锅炉压力容器检验所马殿中同志参加了本书第二章的编写工作。

在编著过程中承蒙哈尔滨工业大学李之光教授和高广安教授的热情指导,浙江省劳动局付文炳同志,北京市锅炉压力容器检验所董守江同志,劳动人事部锅炉压力容器检测研究中心康纪黔同志的大力支持,特此表示诚挚的谢意。由于我们经验不足、水平有限,加之时间仓促,难免存在错误之处。尚祈有关专家、探伤界同仁和广大读者不吝赐教是幸。

编者

1987年元月

目 录

第一章 焊缝射线照相概述	(1)
1.1 射线照相法原理.....	(1)
1.2 底片的黑度.....	(3)
1.3 底片的对比度.....	(4)
1.4 底片的清晰度.....	(7)
1.5 射线照相的灵敏度.....	(8)
1.6 缺陷平面与射线束方向.....	(10)
第二章 焊缝缺陷的分类和形成机理	(13)
2.1 概述.....	(13)
2.2 裂纹.....	(16)
2.3 未熔合和未焊透.....	(20)
2.4 气孔.....	(22)
2.5 夹渣.....	(24)
2.6 夹钨.....	(26)
2.7 焊缝表面缺陷.....	(27)
2.8 伪缺陷.....	(30)
图谱	
一、表面成形缺陷	图 1
二、气孔	图14
三、夹渣	图42
四、夹钨	图61
五、未焊透	图62
六、未熔合	图71
七、裂纹	图75
八、伪缺陷	图92
附录	
附录一 关于执行修改后的国家标准 GB3323—82 的通知.....	(33)
附录二 GB3323—82 钢焊缝射线照相及底片等级分类法.....	(34)
附录三 蒸汽锅炉安全监察规程(有关探伤部份的摘录).....	(41)
附录四 压力容器安全监察规程(有关探伤部份的摘录).....	(44)
附录五 JB3111—82 射线探伤名词术语.....	(47)
附录六 ISO 6520 金属熔焊焊缝缺陷分类及说明.....	(54)
附录七 JISZ3104 钢焊接区射线透照试验方法以及透照底片的等级分类方法	(65)
附录八 ASME 标准第五卷(有关焊缝射线照相验收标准的摘录).....	(73)
附录九 GB3323—XX钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级(报批稿)...	(78)

第一章 焊缝射线照相概述

1.1 射线照相法原理

射线探伤是利用射线可以程度不同的穿透物质，在穿通过程中具有一定的衰减规律，并能使照相胶片发生感光作用或使某些化学元素和化合物发生荧光，来发现被检物体内部缺陷的一种探伤方法。

射线的种类很多，用于工业探伤的射线主要有X射线、γ射线和高能射线（由加速器产生的高能X射线）。X射线和γ射线都是电磁波，它们都具有微观物质的波粒二象性，都能穿透普通可见光所不能穿透的物质。X射线和γ射线除了能量和产生机理不同外，其探伤原理和探伤方法是大体相同的。按照显示缺陷的方法不同，射线探伤可以分为：照相法、电离法、荧光屏观察法和工业电视法等。目前，在焊缝射线探伤中最广泛应用，灵敏度也较高的是X射线或γ射线照相法。

当一束X射线或γ射线穿透物质时，因被物质吸收和散射使其强度发生衰减，它们在各处的衰减程度与其经过部位的物质厚度、密度、材料内部有无缺陷有关。穿透部位的物质厚度愈大或密度愈大对射线的衰减程度就愈大；反之，厚度愈小或密度愈小对射线的衰减程度就愈小。以射线穿透焊缝有缺陷部位与无缺陷部位后的射线强度作比较，如果缺陷是空穴（如气孔、裂纹、未焊透、未熔合等），则相当于穿透厚度减少，射线的衰减便会少些，射线穿透该部位到达试件底面的强度较之穿透无缺陷部位到达底面的强度就会大些；如果缺陷是非金属夹渣物，由于非金属夹渣物的密度较焊缝金属的密度小，对射线的衰减作用小，穿透后的射线强度就会大一些；如果缺陷是夹钨，由于钨的密度较焊缝金属的密度大，对射线的衰减作用大，穿透后的射线强度就会小一些；如果焊缝有余高，焊缝处的厚度较母材的厚度大，则对射线的衰减大，穿透后的射线强度较母材处为小。由于上述种种因素都能引起射线穿透后强度的改变，倘若在被穿透物质的后面放置感光胶片，就能够感受射线强度的这种变化，感光胶片经暗室处理以后，便可以得到能直接观察的射线探伤底片。射线探伤底片记录了被透照试件内部缺陷特征、大小、位置及其分布情况，达到了探伤的目的。

如果，我们能掌握物质对射线的衰减规律，那么就可以对透过物质后的射线强度进行定量计算。由理论推导得出，当用一束束X射线透照某一试件时，透过试件后的射线强度可由下式计算：

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.1)$$

式中：I——射线透过厚度为d的材料层后的强度

I_0 ——没有透过试件时，入射射线的强度

e——自然对数的底（ $e=2.718\cdots$ ）

d——射线透过试件材料层的厚度

μ ——在试材料中射线的衰减系数

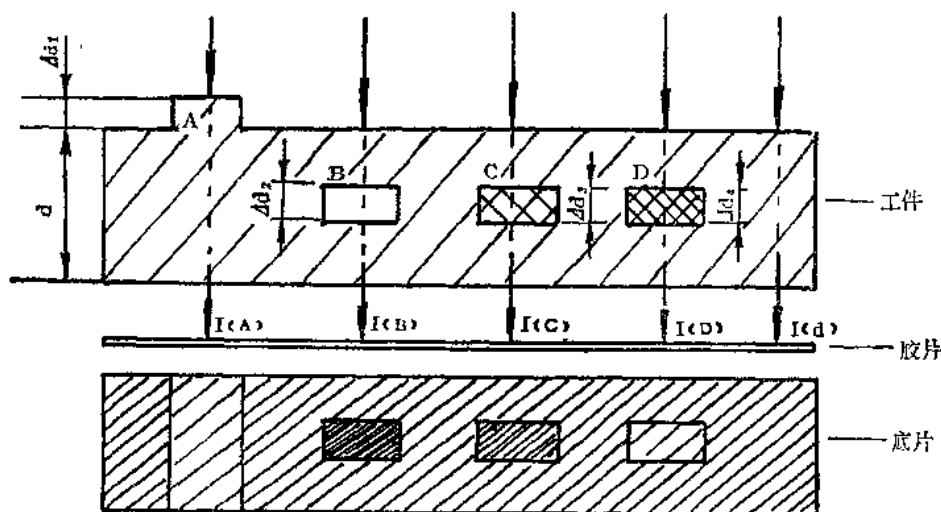


图 1.1 射线照相法原理示意

如图1.1, 某钢制试件衰减系数为 μ , 厚度为 d ; A为凸出部位, 较基本金属厚 Δd_1 ; B为一空穴, 其沿射线方向的尺寸为 Δd_2 ; C为非金属夹渣, 其沿射线方向的尺寸为 Δd_3 , 衰减系数为 μ' ; D为重金属夹杂物, 其沿射线方向的尺寸为 Δd_4 , 衰减系数为 μ'' 。当经一窄束射线透照后, 通过部位A、B、C、D到达胶片的射线强度分别为 $I_{(A)}$ 、 $I_{(B)}$ 、 $I_{(C)}$ 、 $I_{(D)}$, 通过厚度为 d 无缺陷部位到达胶片的射线强度为 $I_{(d)}$ 。由式1.1可以导出

$$I_{(d)} = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} I_{(A)} &= I_0 e^{-\mu(d + \Delta d_1)} \\ &= I_0 e^{-\mu d - \mu \Delta d_1} \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} I_{(B)} &= I_0 e^{-\mu(d - \Delta d_2)} \\ &= I_0 e^{-\mu d + \mu \Delta d_2} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} I_{(C)} &= I_0 e^{-\mu(d - \Delta d_3) - \mu' \Delta d_3} \\ &= I_0 e^{-\mu d + (\mu - \mu') \Delta d_3} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} I_{(D)} &= I_0 e^{-\mu(d - \Delta d_4) - \mu'' \Delta d_4} \\ &= I_0 e^{-\mu d + (\mu - \mu'') \Delta d_4} \end{aligned} \quad (1.6)$$

在相同的透照条件下, 胶片的感光度只与投射到胶片上的射线强度成正比, 经暗室处理后得到底片上各处的黑度与胶片的感光度成正比。也就是说胶片上感受射线强度大的部位, 经暗室处理后在底片上对应的黑度就大; 胶片上感受射线强度小的部位, 经暗室处理后在底片的黑度就小。

比较式(1.3)与式(1.2), 可得 $I_{(A)} < I_{(d)}$, 可知在底片上试件中突出部位较正常部位的黑度要小。

比较式(1.4)与式(1.2), 可得 $I_{(B)} > I_{(d)}$, 可知在底片上试件中有空穴的部位较正常部位的黑度要大。

比较式(1.5)与式(1.2), 由于 $\mu' < \mu$ (非金属夹渣的衰减系数小于钢材的衰减系

数), 可得 $I_{(c)} > I_{(d)}$, 可知在底片上有非金属夹渣的部位较正常部位的黑度大。

比较式(1.5)与式(1.2), 由于 $\mu'' > \mu$ (钨夹渣的衰减系数大于钢材的衰减系数), 可得 $I_{(D)} < I_{(d)}$, 可知在底片上有钨夹渣的部位较正常部位的黑度小。

1.2 底片的黑度

在射线照相中, 通常把未经过曝光和暗室处理的软片称为胶片, 把经过曝光和暗室处理的软片称为底片。

胶片曝光以后, 经过暗室处理, 胶片乳剂层中溴化银颗粒, 由于接受射线强度的不同而被还原为不等量的金属银沉积在乳剂层中, 因为这些金属银是不透明的黑色颗粒, 所以在底片上就构成了黑色的影象。底片上由于金属银颗粒密度不同, 构成了底片上黑化程度不一, 为了便于衡量, 用底片的黑度来表示底片上各点的黑化程度。通常, 底片的评定是通过观片灯来观察的, 因此, 底片的黑度不用反射黑度而采用穿透黑度来度量。底片各点的黑度也就代表底片各点吸收可见光的程度, 同样也反映了底片各点透过可见光的能力。

当光强度为 L_0 的可见光投射到底片上, 其透过底片后的强度减小到 L 时, L 与 L_0 的比值称为透光率 τ ,

(1.7)

$$\text{即 } \tau = L/L_0$$

透光率 τ 的倒数称为阻光率 0 ,

$$\text{即 } 0 = 1/\tau = L_0/L$$

(1.8)

阻光率的数值往往较大, 为了实际应用计算方便取其对数值, 则阻光率的常用对数值称为底片的黑度。用 D 表示:

$$\text{即 } D = \log_{10} 0$$

(1.9)

$$\text{或 } D = \log_{10} L_0/L$$

(1.10)

由于常用对数是以10为底的对数, 因此, 若某个数是10的 n 次方时, n 就是某个数的常用对数。例如, 当入射光强 L_0 是透过光强 L 的10倍时, $L_0/L = 10 = 10^{1.0}$,

$$\text{即 } D = \log_{10} (L_0/L)$$

$$= \log_{10} 10^{1.0}$$

$$= 1.0$$

黑度值即为1.0。

当底片进一步变黑, 若透过光强 L 是入射光强 L_0 的1/100时, 则 $L_0/L = 100 = 10^{2.0}$,

$$\text{即 } D = \log_{10} (L_0/L)$$

$$= \log_{10} 10^{2.0}$$

$$= 2.0$$

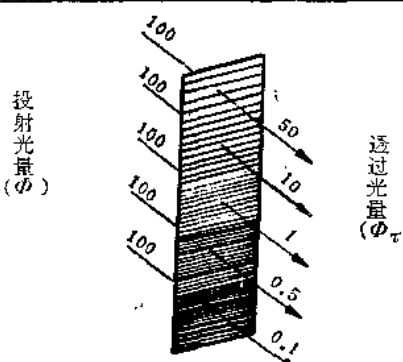
黑度值即为2.0。

透光率 τ 、阻光率 0 和底片黑度 D 之间的关系见表1.1。

底片黑度的大小与射线的能量、射线的强度、暗室处理的条件及胶片本身的特性有关。若射线的能量和暗室处理条件都固定, 曝光条件选择在胶片特性曲线正常曝光区, 则底片黑度 D 与射线的曝光量的常用对数成正比(下节将详细叙述)。

底片黑度是用黑度计来测定的。在日常工作中, 也可以用底片需测定的部位与标准黑度

表 1.1

	透光率 $\tau = \Phi_{\tau} / \Phi$	阻光率 $O = \Phi / \Phi_{\tau}$	黑度值 $D = \log O$
	50/100	100/50=2	$\log 2=0.3$
	10/100	100/10=10	$\log 10=1$
	1/100	100/1=100	$\log 100=2$
	0.5/100	100/0.5=200	$\log 200=2.3$
	0.1/100	100/0.1=1000	$\log 1000=3$

片以目视来比较确定大致的黑度值。

在一定范围内，提高底片黑度有利于提高射线照相的灵敏度。

我国国家标准GB3323—82《钢焊缝射线照相及底片等级分类法》中规定：“底片有效评片区域内无缺陷处的黑度值应为1.2~3.0”。重新修订的GB3323标准规定：对于X射线底片黑度，A级和AB级为1.2~3.5，B级为1.5~3.5；对于γ射线为1.8~3.5。

国际上有些国家规定的底片黑度值还要高一些。例如，美国ASME标准中规定：X射线单片观察时，黑度至少为1.8；γ射线底片单片观察时，黑度至少为2.0。对于双胶片曝光并作迭合观察时，黑度至少为2.6。迭片中的每一张底片的黑度至少应为1.3。无论是单片还是迭片观察，最大黑度应不超过4.0。

1.3 底片的对比度

在射线照相底片上辨别试件有无缺陷，是根据缺陷部位与健全部位之间在底片上所显示的黑度差来判定的。我们将底片上这种相邻两区域之间的黑度差叫做底片的对比度。对比度也称为反差或衬度。

在观察底片时，只有当缺陷部位与健全部位的黑度差大到一定的程度（即大于识别灵敏度）时，才能用目视的方法发现缺陷的影象，而且，黑度差愈大缺陷的影象愈明显。因此，从便于识别的角度看，底片的对比度愈大愈好。在底片上试件中缺陷部位的影象与健全部位的对比度取决于沿射线方向缺陷尺寸与试件尺寸的比值；取决于射线的能量、曝光量、胶片类型、胶片的暗室处理过程、散射辐射线的强弱以及增感屏的种类等。

从影响对比度的因素出发，可以将射线照相对比度分为“工件对比度”和“胶片对比度”。由工件引起的影响对比度的因素称为工件对比度，由胶片引起的影响对比度的因素称为胶片对比度。

工件对比度（或称主因衬度）可以定义为：射线通过工件两个不同区域后的辐射强度之比率。它取决于工件本身的状况，所用射线的能量（光谱成分或波长）、散射线分布和强度等因素。

某一工件沿射线方向的厚度为d毫米，其中有一空穴性质的缺陷沿射线方向的尺寸为Δd

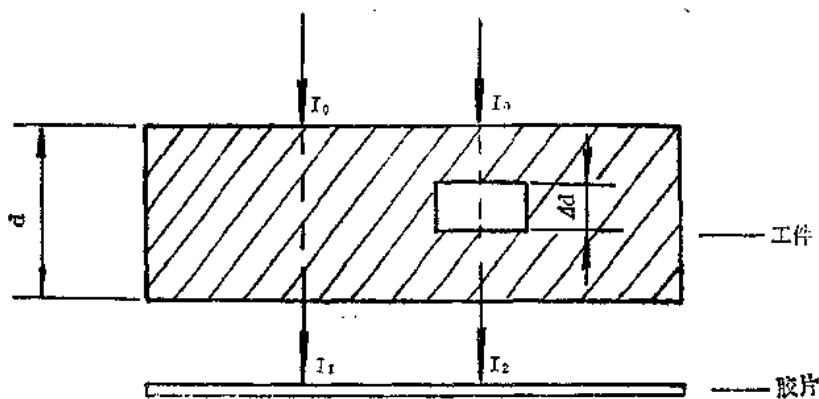


图 1.2 工件对比度

毫米(如图1.2)。为了便于理解,我们假定射线束是单一波长的平行射线,而不考虑散射线所造成的影响。取入射的X射线的强度为 I_0 ,穿透厚度为 d 的部位和有缺陷的部位照射到胶片上的X射线的强度分别为 I_1 和 I_2 。则 I_1 和 I_2 可由下式给出(参照1.1节)

$$I_1 = I_0 e^{-\mu d} \quad (1.11)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu(d - \Delta d)} \quad (1.12)$$

$$\log_{10} (I_1/I_0) = -0.434 \mu d \quad (1.13)$$

$$\log_{10} (I_2/I_0) = -0.434 \mu (d - \Delta d) \quad (1.14)$$

比较式(1.13)和式(1.14)可以看出仅有 Δd 的变化。由(1.14)式减去(1.13)式可得如下关系式:

$$\begin{aligned} \log_{10} I_2 - \log_{10} I_1 &= \log_{10} (I_2/I_1) \\ &= 0.434 \mu \Delta d \end{aligned} \quad (1.15)$$

从式(1.15)可以看出,射线透过有缺陷部位和无缺陷部位照射到胶片上B、A两点的强度比,与缺陷沿射线束方向的尺寸 Δd 及工件的衰减系数 μ 成正比。对于同一工件当采用不同能量的射线源透照时,其衰减系数 μ 也不是一个常数,试验表明:

$$\mu \propto \rho \cdot z \cdot \lambda^3 \quad (1.16)$$

式中: ρ —材料的密度

z —材料的原子序数

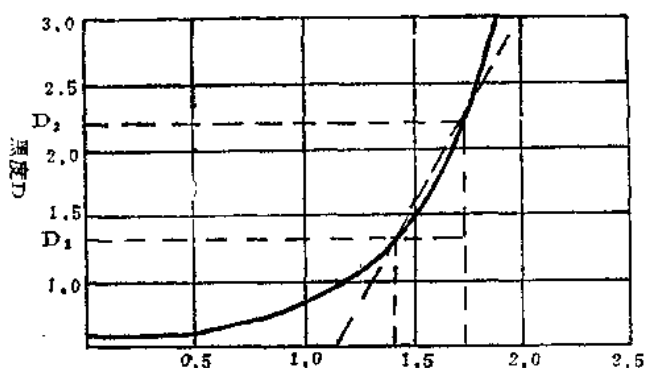
λ —射线的波长

对于同一种材料密度 ρ 和原子序数 Z 是相同的,该材质的射线衰减系数只取决于射线波长 λ ,并与波长 λ 的三次方成正比。对于X射线,当选用的管电压愈高时所产生的射线质愈硬,光量子的能量愈高,射线的波长愈短,因而材料的衰减系数愈小。

由以上分析可知,当缺陷沿射线束方向的尺寸愈大时,工件对比度愈大;对于同一工件而言,当采用x射线透照时,欲获得较大工件对比度的有效方法是在能穿透工件的前提下尽量选择较低的管电压。

影响射线照相对比度的因素除了工件对比度之外,还有胶片对比度。胶片对比度定义为:改变胶片的曝光量所引起的相应底片上黑度差别的固有能力。

假设使用的胶片特性曲线如图1.3所示。胶片上A点和B点照射的x射线的强度分别为 I_1 和 I_2 ,若曝光的时间为 t ,则胶片上A点和B点获得的x射线的照射剂量(曝光量)分别为 $I_1 t$ 和 $I_2 t$ 。



相对曝光量 (对数值 $\log_{10} E$)

图 1.3 胶片特性曲线

设 $I_1 t = E_1$ 、 $I_2 t = E_2$ ，则A点和B点的底片黑度为图1.3中所示的 D_1 和 D_2 。取特性曲线中的 D_1 和 D_2 之间平均胶片对比度为 $\bar{\gamma}$ 则

$$\bar{\gamma} = \tan \alpha = \frac{D_2 - D_1}{\log_{10} E_2 - \log_{10} E_1}$$

$$= \frac{D_2 - D_1}{\log_{10} I_2 t - \log_{10} I_1 t}$$

$$= \frac{D_2 - D_1}{\log_{10} I_2 - \log_{10} I_1}$$

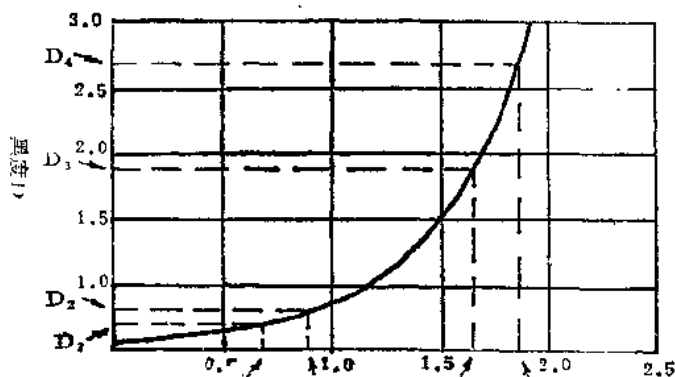
$$D_2 - D_1 = \bar{\gamma} (\log_{10} I_2 - \log_{10} I_1) \quad (1.17)$$

$D_2 - D_1 = \Delta D$ 即为底片的对比度。将式 (1.15) 代入式 (1.17) 可得

$$\Delta D = 0.434 \bar{\gamma} \Delta d \quad (1.18)$$

当 ΔD 非常小时，即考虑 D_1 和 D_2 非常接近的情况，平均的胶片对比度 $\bar{\gamma}$ 可以用特性曲线上 D_1 处切线的斜率 γ 表示。

对于不同类型的胶片来说，都具有各自不同的胶片特性曲线，有的具有较高的胶片对比度，有的具有较低的胶片对比度。即使是同一种胶片，由于胶片特性曲线并不是一条直线，因此，胶片特性曲线各部位的斜率 γ 也是不相同的。就一般胶片而言，其特性曲线如图1.4所



相对曝光量 (对数 $\log_{10} E$)

图 1.4 曝光曲线

示。假定工件中有缺陷的部位与健全部位对于胶片的曝光量（射线强度与透照时间的乘积）分别为 E_1 和 E_2 ，此时，胶片对比度是 D_2 与 D_1 之差（ $\Delta D_A = D_2 - D_1$ ）；如果采用大曝光量透照，工件中有缺陷部位与健全部位的曝光量分别为 E_4 与 E_3 ，相对的黑度变化是 D_4 与 D_3 之差（ $\Delta D_B = D_4 - D_3$ ）。虽然 $\log_{10} E_4 - \log_{10} E_3 = \log_{10} E_2 - \log_{10} E_1$ ，从图1.4中可以看出 $D_4 - D_3 = \Delta D_B$ 较之 $D_2 - D_1 = \Delta D_A$ 要大得多。换句话说，对比度要大得多。这就说明了为什么胶片对比度一般随曝光量的增大而增大的道理。因此，在探伤中为了获得较高的对比度，在一般情况下要选较大的曝光量。

1.4 底片的清晰度

清晰度是指底片上黑度不同区域间分界线的宽度。射线底片上影像的边界宽度愈窄，影像就愈清晰、鲜明，清晰度就愈高。反之，则清晰度愈低。

在射线照相中，影响成像不清晰的因素很多，主要有由于几何因素产生的半影效应（几何不清晰度）；胶片颗粒度的影响；散乱射线的影响等。

所谓几何因素造成的影响，系指随射线源尺寸的增大、缺陷至胶片距离的增大以及射线源至胶片距离增大造成缺陷在底片上影像边缘模糊程度增大的现象。如图1.5所示，射线源焦点尺寸为 ϕ ，射线源焦点至缺陷的距离为 L_1 ，缺陷至胶片的距离为 L_2 ，缺陷的尺寸为 d 。则缺陷影像与几何布置之间的关系从图中可以看出：

图（a）焦点尺寸极小，可以假设为一个几何点时，影像只会被放大，边缘清晰不产生影像的不清晰度。但是射线源不可能是一个几何点而具有一定尺寸，只有当焦点尺寸相对于

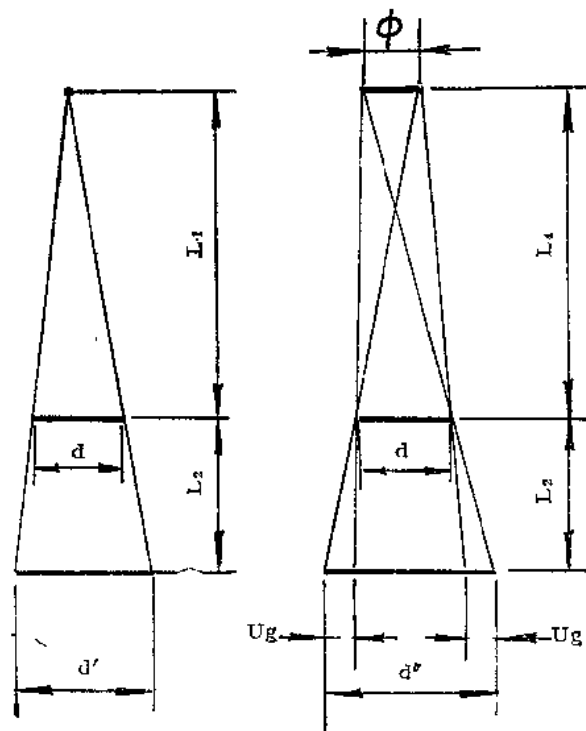


图 1.5 几何布置对影像的影响

缺陷尺寸可以忽略时,才能近似认为是这种情况。

图(b) 当焦点尺寸为 ϕ 时,在像的外围造成一个边缘模糊的半影区域,这个半影区域的大小称为几何不清晰度。

几何不清晰度的大小随焦点尺寸 ϕ 和焦点至缺陷、缺陷至胶片之间距离大小而变化。设几何不清晰度的大小为 U_g ,则 U_g 值可由下式求出:

$$U_g = \phi \frac{L_2}{L_1} \quad (1.19)$$

从上式可以看出,几何不清晰度 U_g 随焦点尺寸的增大而增大;随缺陷至胶片之间距离的增大而增大,随焦点至缺陷距离的减小而增大。在实际探伤中,由于射线源和工件都是给定的,焦点尺寸和缺陷至胶片的距离是定值。减少几何不清晰度的有效方法是增大焦点至工件的距离。

另外,从图1.5中还可以看出,缺陷的影像的尺寸 d' 与缺陷尺寸 d 相比被放大了。

图(a)把焦点尺寸作为一个点考虑,若影像的放大率为 m 。时,则 m 。由下式确定:

$$m_{\phi} = \frac{d'}{d} = \frac{L_1 + L_2}{L_1} \quad (1.20)$$

图(b)如果焦点尺寸为 ϕ 时,若影像的放大率为 m_{ϕ} ,则 m_{ϕ} 由下式确定:

$$m_{\phi} = \frac{d''}{d} = \frac{\phi}{d} \cdot \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_1 + L_2}{L_1} \quad (1.21)$$

在这种情况下的放大率 m_{ϕ} 包含有影像不清晰度 U_g 在内。

除了探伤中由于几何位置所产生的几何不清晰度以外,胶片的颗粒度也能影响射线照相底片的清晰度。一般说来,胶片颗粒度愈小,射线照相底片的清晰度愈高。对于底片像质要求高的场合应当选用颗粒度细的胶片。此外,射线照相时的散乱射线也会降低底片的对比度与清晰度,对于这些散乱射线应当给予适当的屏蔽,尽量减少散乱射线的影响。

1.5 射线照相的灵敏度

所谓射线照相的灵敏度应当是指采用射线照相方法检查工件时,显现缺陷的程度或发现最小缺陷的能力。但是,由于缺陷本身的性质、成份、尺寸和分布等状况;透照时选用的曝光参数;设备和器材的质量;暗室操作等诸因素的影响,在我们估价灵敏度时,往往用人工制造的灵敏度象质计(或称透度计)来进行测试。它与实际缺陷情况有很大的差异,发现实际缺陷的灵敏度一般低于这种人工制造的象质计所反映的灵敏度。实际上,用象质计所测定的灵敏度是射线照相质量的一个反映,它是底片对比度和清晰度的一个综合指标。

象质计的种类很多,有金属丝象质计、平板象质计、沟槽象质计等。我国关于焊缝射线照相的国家标准GB3323规定,采用线径的变化按等比级数(公比为1.25)排列的金属丝象质计。在射线照相底片上,象质计的识别灵敏度可按下式进行计算:

$$\text{象质计灵敏度} = \frac{\text{底片上可见的金属丝最小线径 (mm)}}{\text{材料的穿透厚度 (mm)}} \times 100\% \quad (1.22)$$

对于x射线来说,由于衰减系数 μ 随材料穿透厚度而变化,还由于射线的能量不均匀及散射射线的影响,底片上可见的金属丝最小线径和材料的穿透厚度之间并不是线性关系。一般是

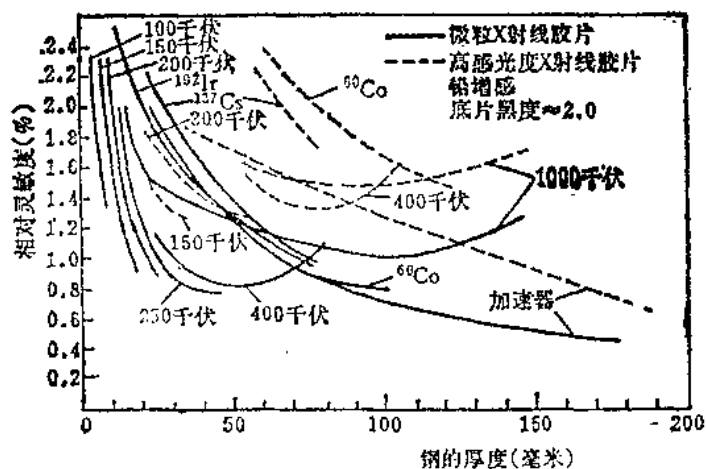


图 1.3 不同射线源及不同胶片时钢的灵敏度曲线

当材料厚度较小时，象质计的识别灵敏度比较低；材料厚度增加时，象质计的识别灵敏度提高；当材料厚度超过一定值以后，象质计的识别灵敏度又下降(如图1.6所示)。采用400KV，以下x射线机进行探伤时，完全符合这一规律。采用其它射线源时，情况略有不同。

影响灵敏度、对比度和清晰度的诸因素分列如下：

低	←——	灵敏度	——→	高
低	←——	对比度	——→	高
不好	←——	清晰度	——→	好

(被照工件及 照相条件)	低	←——	对比度	——→	高
	小	←——	工件厚度差	——→	大
	不足	←——	曝光量	——→	适当
	硬	←——	射线质	——→	软
	大	←——	散射线	——→	小
工件对 比度	倾斜	←——	缺陷平面与射线束方向	——→	平行
(胶片及暗 室处理)	粗	←——	胶片颗粒度	——→	细
	荧光	←——	增感屏	——→	金属
	不足、过度	←——	黑度	——→	适当
	大	←——	散射线	——→	小
	不足、过度	←——	显影处理程度	——→	适当
胶片对 比度					

	不好 ←—— 清晰 度 ——→ 好
照相条件 的几何因素	大 ←—— 射线源晃动 ——→ 无
	大 ←—— 被照物晃动 ——→ 无
	大 ←—— 射线源焦点尺寸 ——→ 小
	小 ←—— 焦点至工件表面的距离 ——→ 大
	大 ←—— 缺陷至胶片的距离 ——→ 小
	松 ←—— 胶片与增感屏贴合 ——→ 紧
	大 ←—— 散 射 线 ——→ 小
显影处理和 胶片增感屏 等因素	粗 ←—— 胶片的颗粒度 ——→ 细
	快 ←—— 胶片的感光速度 ——→ 慢
	荧光 ←—— 增感屏 ——→ 金属
	不足、过度 ←—— 显影处理的程度 ——→ 适当
	不足、过度 ←—— 黑 度 ——→ 适当

1.6 缺陷平面与射线束方向

从光学投影的原理可知，当一束光线垂直入射一个小于光束截面的物体上时，可以获得一个形状一致的投影。但光线倾斜入射时，所获得的物体投影会产生畸变（如图1.7）

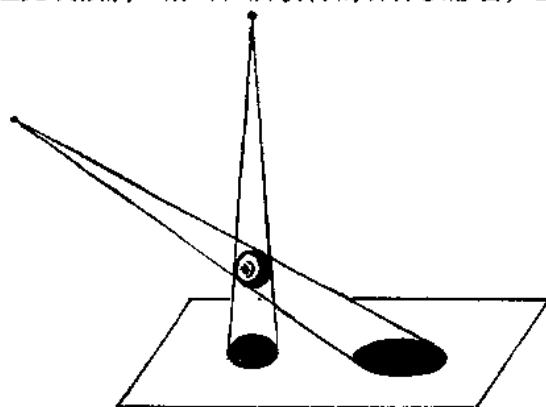


图 1.7 物体的光学投影

当一束射线照射到缺陷上时，缺陷在胶片上的投影与光学投影的情况相同，若射线束垂直入射时，所获得的缺陷影象畸变最小，而当射线倾斜入射时，缺陷影象的畸变程度随倾斜角增大而增大。从对缺陷的检出率来说，希望射线束与缺陷截面最大尺寸方向相一致，这样就使

沿射线方向的穿透厚度改变最大，缺陷在底片上的反差最大，缺陷最容易被检出。若射线束倾斜入射，缺陷的检出率就明显下降，尤其是裂纹等平面形缺陷，若射线束倾斜角过大就有可能在底片上难以显示而漏检。例如，裂纹开裂宽度为0.03毫米，如果射线束中心方向与裂纹平面的夹角大于 15° 时，在底片上就难以发现裂纹的影像。图1.8中曲线是6毫米深不同宽度的裂纹在40毫米厚的钢板上的试验结果。曲线上面的部分是在底片上可见裂纹影像的区域。曲线下面斜线部分是在底片上不显示裂纹影像的区域。由此曲线可以说明裂纹的宽度及射线束中心与裂纹平面夹角不同时，裂纹显现灵敏度亦不同。这一试验与实际裂纹透照的情况还是有差别的，因为实际裂纹的形状是各种各样的，所以显现实际裂纹的灵敏度将低于这个实验结果。

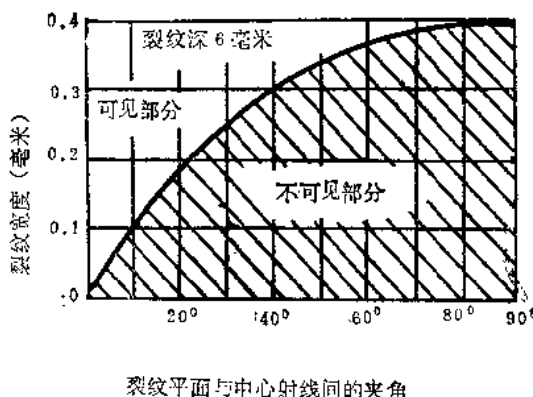


图 1.8 裂纹的显现程度曲线

在实际探伤中，由于缺陷的方向无法预知，因此只能按照工件中危害性最大的缺陷（裂纹）的大致方向确定射线的入射方向。从一般的焊接工艺缺陷形成规律得知，裂纹方向一般来说大多数垂直于焊缝表面。所以，在射线照相时，总以焊缝表面为基础使射线中心束垂直于焊缝表面进行射线照相。

另外，由于射线源是有一定尺寸的，它所辐射的射线束不是一个平行的射线束。对于工件表面来说，除射线束中心垂直于工件表面之外，其余部分都与工件表面成一定倾角，偏离中心愈远，与工件表面的倾角愈大。由于这种倾角的存在，当射线束透照工件时，中心射线束和

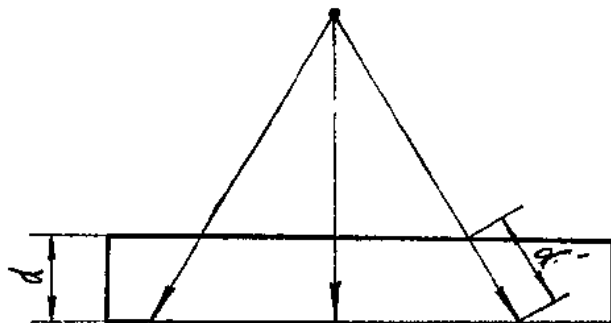


图 1.9 焊缝透照厚度比示意图

边射线束所穿透工件的厚度是不相等的，边缘射线束对工件的穿透厚度大于中心射线束的穿透厚度。为了使射线照相底片的黑度差在一定范围内和保证横向裂纹的检出率，在焊缝射线照相标准中，往往要规定这一厚度差不大于某一数值。并由这一数值来确定一次透照时，工件有效的透照长度。我国修订的焊缝射线照相标准GB3323规定：焊缝的透照厚度比 K (如图 1.9 $K = \frac{d'}{d}$), 对于A级和AB级的 K 值不大于1.1, B级的 K 值不大于1.06。