

无损检测
技术丛书

射线探伤



28

〔日〕日本无损检测协会编

NDT

机械工业出版社

无损检测技术丛书

射线探伤 B

〔日〕 日本无损检测协会 编

李 衍 译

肖蔚彬 校



机械工业出版社

本书第1章介绍了射线探伤中几个重要的物理效应和常用物理参数。第2~6章重点讲述五个典型问题：平板试件的透照；焊缝的透照；吸收系数不同时透度计灵敏度的换算；筒体或管子环焊缝的透照；精密检验。这些对射线探伤人员合理制定探伤工艺、解决某些特殊技术问题有一定的指导意义。第7章介绍欧美各国的射线探伤标准并与日本标准做了比较。附录中收进了12个日本标准等。全书插图270余幅。

在当前我国Ⅲ级（我国Ⅲ级相当于日本的Ⅰ级，即高级）。教材空白的情况下，本书是中、高级探伤人员很有参考价值的读物。也可供材料、机械专业大、专院校师生参考。

非破壊検査技術シリーズ

放射線透過試験 B

編集 社団法人 日本非破壊

検査協会

昭和58年3月25日

1983年第2版

* * *

射线探伤 B

〔日〕日本无损检测协会 编

李 衍 译

肖蔚彬 校

*

责任编辑：方婉莹

封面设计：郭景云

版式设计：霍永明

责任校对：李广孚

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{1}{4}$ · 字数 266 千字

1983年6月北京第一版·1983年6月北京第一次印刷

印数 20,001—3,650 · 定价：4.20元

*

ISBN 7-111-00543-0/TL·2

译 序

本书是日本大阪大学仙田富男教授主编的适用于射线探伤高级技术人员阅读的Ⅰ级(日本的Ⅰ级相当于我国Ⅲ级)教材。在研读本书之前,应先研读《射线探伤A》。本书内容无论在广度和深度上,都较《A》有一个特大的“飞跃”。在当前国内Ⅲ级教材空白的情况下,本书对希望在射线探伤专业上有较深造诣的技术人员和投考射线探伤Ⅲ级的人员确是一本很有参考价值的进修读物。

全书共分七章。在第一章“射线探伤基础”中,对有关射线探伤的一些基本物理现象和物理参数作了深入、细致的研讨。如对四个“效应”和实际探伤的关系,衰减系数和散射比的测定,考虑胶片感光度的修正值,与焦点尺寸和透照距离有关的几何修正系数的推导和应用,以及底片对比度和识别界限对比度、表观对比度的关系等等,在本章中均以大量数据、图表和公式作了详尽的剖析和说明。

第二章至第六章着重讲述了有关射线探伤工艺五个典型问题:1. 平板试件的透照;2. 有余高(即加强高)的焊缝的透照;3. 吸收系数不同时透度计灵敏度的换算;4. 筒体或管子环焊缝的透照;5. 射线探伤中的精密检验。

本书对透照工艺有许多精辟的论述和独到的见解,值得我们借鉴。例如对平板试件的透照,提出了达到识别界限的透照布置要求和控制有效透照长度的理由,提出了考虑散射线影响和透度计灵敏度的曝光曲线的制作方法;在焊缝透照中,探讨了余高高度对底片对比度的影响,并提出了达到一定灵敏度时可以容许的余高最大高度;另外,对特定条件下,当使用的透度计材质与被透照的工件材质不一致时,提出了用材质不同的两块薄板组成的线质计,作为透度计灵敏度换算依据的具体方法。

在锅炉、压力容器的制造工厂都会碰到 100%透照锅筒和容器环焊缝的情况。历来都是根据经验、通过反复试片来确定整圈焊缝的摄片次数和每次摄片长度的，既费时间，又不科学。本书在这方面有较多的篇幅介绍了用数学原理确定满足底片黑度和灵敏度要求的一次透照有效长度和整圈焊缝的最少曝光次数，提出了根据圆心角和辐射角、畸变角三者之间的相互关系，来确定环焊缝几种常规透照方式中上述参数的简捷方法，这对现场透照颇有实际意义。

关于底片的识别界限对比度 $\Delta D_{\min}$ ，以前国内对这方面的知识介绍较少，许多人对它的实用性感到怀疑。但《射线探伤 A》、《射线探伤 B》都一再强调这个问题对实际探伤的利害关系。要在底片上识别出尽可能细小的缺陷，在摄片和观片过程中就要注意设法尽量减小细小缺陷的识别界限对比度，使 $|\Delta D| \geq |\Delta D_{\min}|$ 。本书在“射线探伤精密检验”一章中提出了改善射线底片影象质量的基本原理和几种常用方法——补偿法、屏蔽法、狭照法、放大法、复制法等，并以焊缝透照为例作了具体说明。

在第七章中，本书概述了有关射线探伤的欧美各国的现行标准，并就透度计的型式、透照几何条件和透度计灵敏度等内容作了一一比较分析。其中特别对英国标准 BS2600（钢熔焊对接接头的射线照相检验方法）作了重点介绍。这些分析、介绍能使我们大开眼界，对我们向国际标准和国外先进标准靠拢有一定的启迪和促进作用。

在附录中收进了 12 个日本工业标准和轻金属协会、铸锻钢协会标准。有关 JIS Z 3104、3105、3108、3109、3861 及 JIS G 0581 的标准解说可参阅《射线探伤 A》第五章。

本书日文版本自 1978 年 7 月初版以来，中经 1979 年、1981 年两次修订，在修订版中补充了有关焊缝透照条件和铸钢件透照条件及其技术背景的内容（见卷末），对射线底片黑度和底片上可识别的最小金属丝直径的关系，对射线底片应该具备的条件确认方法，以及对射线源种类和最小透照厚度的关系，结合一系

■
列图表、公式作了细致的分析和归纳。

本书原译自1983年版本,但对照最近的1986年版本,发现两种版本的正文内容完全相同,所不同之处仅在于最新版将1983版附录中的12个射线探伤标准全部删去了,删去的理由是为了避免与《射线探伤A》的附录重复,因为这些标准在《A》中也是全文转载的。考虑到在阅读本书正文内容时便于专业人员翻阅参考的需要,所有标准在本书译文中仍然保留了,所以本书作为1986年版也无妨。

“与其花许多时间和精力去凿许多浅井,不如花同样的时间和精力去凿一口深井。”对热衷于开拓无损检测事业的技术人员来说,相信《射线探伤B》会成为你在专业领域内攀登高峰的阶梯,也会成为引导你向这个领域的深处不断前进的良师益友!

李 衍

1988年2月

序 言

日本无损检测学会为普及无损检测技术和提高检测技术水平,组织出版了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书也可供接受本学会无损检测人员资格鉴定委员会所实施的资格鉴定考试的人员,作投考准备用的教材。

但是有关介绍射线探伤最高技术,以及对 I 级资格鉴定考试应试人员来说,可以作为投考准备用的教材的书籍还不多。为此本学会决定编写《射线探伤 B》,介绍射线探伤技术发展的现状,以供射线探伤方面的高级技术人员学习使用。

由于有关人员坚持不懈的努力,使本教材在内容、水平方面得到充实与提高,确信它可以做为通用的高级参考用书。

这里要注意,作为射线探伤 I 级人员必需具备的知识,除《射线探伤 B》外,还包括下列出版物所记述的内容:

《无损检测概论 A》

《射线探伤 A》

《射线照相技术》

《射线透照底片的等级分类》

《有关焊缝射线透照技术的照片集》

《有关铸钢件射线透照技术的照片集》

此外,为加深理解,还希望能参考下列书籍:

《射线探伤习题》

《X 射线作业班长用教材》

《X 射线作业班长试题、解答和解说》

在本书的 1981 年版中,对 1979 年版书末的补遗作了修订,作为单独一章“6. 射线透照精密检验”,并增添了“射线探伤国外标准”。在附录部分加进了“JIS Z 3109”、“日本铸锻钢学会标准 JCSS G—2”,对其它部分也作了全面的修订。

社团法人 日本无损检测学会 1981 年 8 月

编辑委员及协助者

委员长	仙田富男	大阪大学工学部
委员	大岡紀一	日本原子能研究所 大洗研究所
	平山一男	大阪大学工学部
	松山 格	东京都立工业技术中心
	丸山 温	日本钢管公司技术研究所 津研究所
协助者	一色貞文	茨城工业高等专科学校
	桂山幸典	京都大学原子反应堆实验所
	小林昌敏	日本原子能研究所高崎研究所
	関田純一郎	检测公司
	寺田幸博	日立造船公司技术研究所
	中村和夫	无损检测公司
	古田純一郎	大阪府立射线中心研究所
	横山計次	酒井铁工厂
(按五十音图顺序排列)		

目 录

第一章 射线探伤基础	1
1.1 射线的吸收和散射	1
1.1.1 光电效应	1
1.1.2 汤姆逊散射	1
1.1.3 康普顿效应	2
1.1.4 电子对效应	3
1.2 吸收系数 (衰减系数)	4
1.2.1 线吸收系数	4
1.2.2 质量吸收系数	5
1.2.3 吸收截面	6
1.3 X射线的线质	7
1.3.1 吸收曲线	7
1.3.2 半衰减层和吸收系数	8
1.3.3 有效能量	10
1.3.4 考虑X射线底片速度系数的吸收曲线	11
1.4 散乱X射线和散射比	13
1.4.1 散乱X射线	13
1.4.2 散射比	13
1.4.3 宽场透照中平板试件的散射比	15
1.5 射线底片的对比度	19
1.5.1 厚度差和射线底片对比度	19
1.5.2 X射线管的焦点尺寸和射线底片对比度	22
1.5.3 散射线和射线底片对比度	26
1.5.4 金属丝的射线底片对比度	26
1.6 识别界限对比度	28
1.6.1 二次曝光法和射线底片对比度	28
1.6.2 金属丝影象的识别界限对比度	29
1.7 射线底片的观察方法	32

1.7.1	射线底片的表观对比度	32
1.7.2	观察方法和透度计识别灵敏度	33
第二章	平板试件的透照	38
2.1	透照条件的确定	38
2.1.1	X射线胶片和增感屏	38
2.1.2	射线底片的黑度	39
2.1.3	透照布置	39
2.2	曝光曲线图	47
2.2.1	散射线可忽略不计时的曝光曲线的制作方法	47
2.2.2	有散射线时曝光曲线的制作方法	48
2.3	考虑透度计灵敏度的曝光曲线图的制作方法	50
第三章	有余高试件的透照	53
3.1	焊缝中透度计金属丝的识别	53
3.2	余高对射线底片对比度的影响	55
3.3	X射线线质和余高中心部分的射线底片对比度	57
3.4	可以容许的最大余高高度	60
第四章	透度计吸收系数不同时透度计灵敏度的换算	63
4.1	透度计灵敏度的换算方法	63
4.2	线质计	66
4.3	JIS Z 3107 及其解说	68
4.4	对 9 % 镍钢焊缝的应用	87
第五章	管子环焊缝的透照	91
5.1	被检区的有效长度	91
5.1.1	满足射线底片黑度规定的长度	91
5.1.2	满足衬度计黑度差要求的透照条件的确定方法	93
5.1.3	满足透度计灵敏度规定的长度	94
5.1.4	被检区的有效长度	97
5.1.5	胶片内贴透照法的实例	97
5.2	被检区有效长度和摄片张数的关系	102
5.2.1	双壁单面透照法	102
5.2.2	双壁双面透照法	103
5.2.3	射源内置透照法	105

5.2.4 胶片内贴透照法	107
5.3 透照方法和对横裂纹的照射角度	109
5.3.1 透照方法与射线照射角度的关系	109
5.3.2 考虑透照方法和对裂纹照射角度的摄片张数	115
第六章 射线透照精密检验	116
6.1 一般检验和精密检验	116
6.2 改善方法	117
6.3 壁厚补偿块的利用	118
6.3.1 通过降低散射比改善底片象质	118
6.3.2 利用射线吸收块缩短曝光时间	119
6.3.3 用射线吸收块减小有害射线剂量	122
6.3.4 9%镍钢焊缝	123
6.4 射线吸收体的使用	125
6.4.1 射线底片黑度分布的调整方法	125
6.4.2 具体实例	127
6.5 屏蔽板的利用	129
6.5.1 狭场透照法	129
6.5.2 屏蔽板的形状和散射比	131
6.5.3 胶片试件间距与射线底片对比度的关系	133
6.5.4 最佳透照布置	135
6.5.5 加壁厚补偿块的狭场透照	136
6.6 放大透照法	138
6.6.1 狭场透照法中透照厚度的影响	138
6.6.2 用放大透照法改善射线底片的象质	139
6.7 复制技术的利用	143
6.7.1 增大黑度差的方法	143
6.7.2 减小黑度的方法	144
6.7.3 放大影象的方法	145
6.8 焊缝精密检验的实例	145
第七章 有关射线探伤的国外标准	148
7.1 标准的分类	148
7.1.1 有关透度计及射线底片象质的标准	148

X

7.1.2 有关探伤方法的标准	148
7.1.3 有关特定结构件和制品的评定标准	148
7.1.4 参考底片集	149
7.2 一些典型的国外标准	149
7.3 各种射线探伤标准的比较	156
7.3.1 透度计的类型	156
7.3.2 透度计的种类	156
7.3.3 透照布置	161
7.3.4 透度计灵敏度和象质	165
7.3.5 其它	168
7.3.6 标准的结构及其一例	168
7.3.7 英国标准 BS 2600 的要点	170
附录	175
各种金属的吸收系数表	175
JIS Z 3104 钢焊缝的射线透照方法和底片评级方法	183
JIS Z 3105 铝焊缝的射线透照方法和底片评级方法	194
JIS Z 3106 不锈钢焊缝的射线透照方法和底片评级方法	204
JIS Z 3107 钛焊缝的射线透照方法和底片评级方法	215
JIS Z 3108 铝管环焊缝的射线透照方法	222
JIS Z 3109 铝 T 型焊缝的射线透照方法	237
JIS Z 3861 焊缝射线透照技术鉴定考试方法和评定标准	242
JIS G 0581 铸钢件的射线透照方法和底片的评级方法	245
JIS H 0522 铝铸件的射线透照方法和底片评级方法	254
LWS N7601 轻金属透度计	261
LWS N7602 铝对接焊缝的射线透照底片判定方法	266
JCSS G 2 铸钢件的射线透照方法和底片评级方法	271
补遗	284
1. 焊缝射线透照条件及其技术背景	284
2. 铸钢件的射线透照条件及其技术背景	305
参考文献	317

第一章 射线探伤基础

1.1 射线的吸收和散射

当X射线在物质中传播时，一方面X射线会影响物质，使物质发生某些变化，另一方面，X射线也会受物质的影响，有一部分能量会被吸收，或者改变传播方向，这种现象称为X射线和物质的相互作用。相互作用的基础是物质的原子，但X射线和原子核几乎不发生作用，主要是和电子发生相互作用。相互作用有各种形式，主要有以下四种：即光电效应、汤姆逊散射、康普顿效应和电子对效应。

1.1.1 光电效应

当X射线的光子能量 ϵ 大于原子的核外电子如K层电子的结合能（即K层激发能） E_K 时，X射线光子就被该原子吸收，一个K层电子以 $\epsilon - E_K$ 的动能飞出原子。这种现象称为光电效应。相当于激发能量的波长称为吸收端，K层电子产生光电效应时，K层出现空位，结果产生K系列的特征X射线。从原子方面来看，这种现象与高速电子引起的特征X射线的发生机理相同，但激发核外电子的方法不同，所以光电效应产生的特征X射线，有时特别称做荧光X射线。波长长于吸收端的X射线不会产生光电效应，因而也不产生荧光X射线。产生荧光X射线的最佳条件是比较吸收端略短的波长，即光子能量稍大的X射线。但波长比这更短的X射线，就难于逐次发生光电效应。

1.1.2 汤姆逊散射

这是当X射线照射到物质上时改变传播方向的现象。当波长较短的电磁波——X射线照射到物质上时，由于其电场成分会使物质内的电子产生强迫振动。按照古典电磁学理论振动的电子即向周围空间辐射电磁波。这种电磁波被解释为散射X射线，

J. J. 汤姆逊根据这一观点创立了有关X射线散射的理论。因此, 这种散射也叫古典散射。在这种情况下, 入射线和散射线的波长当然相同, 被各个电子所散射的电磁波会产生相互干涉, 因而也叫干涉散射。从量子观念来看, 光子与原子只是发生弹性冲突, 并未把能量传给电子, 故光子能量不变, 只是改变运动方向。所以这种散射也叫弹性散射。

汤姆逊散射是和核外所有的轨道电子相互作用引起的, 散射的几率与原子序数 Z 成正比, 元素越重, 就越容易引起散射。

1.1.3 康普顿效应

这是X射线或 γ 射线在物质中发生散射时波长变长的现象, 用古典电磁波理论已无法解释, 必须引入光子的概念, 在物理学历史上意义很深, 实际上也是很重要的现象。产生康普顿效应时, 入射X射线光子将部分能量传给原子, 使电子以反跳电子的形式飞出原子, 同时散射X射线的能量也相应减小。按此机理, 康普顿散射也叫非弹性散射。

产生康普顿散射时, 不仅波长变化, 而且入射线和散射线之间没有一定的相位关系, 不会产生相互干涉。因此, 这种散射也叫非干涉散射。

康普顿散射不是由轨道电子引起的, 而主要是同固体内的自由电子相互作用引起的。

设照射的X射线能量为 ϵ , 由康普顿效应引起变化后的能量为 ϵ' , 则 ϵ' 与 ϵ 的关系如图 1.1 所示。由图中可见, ϵ' 的变化随 ϵ 的增加而增大, 且变化的程度随散射角 θ 的增大而明显增

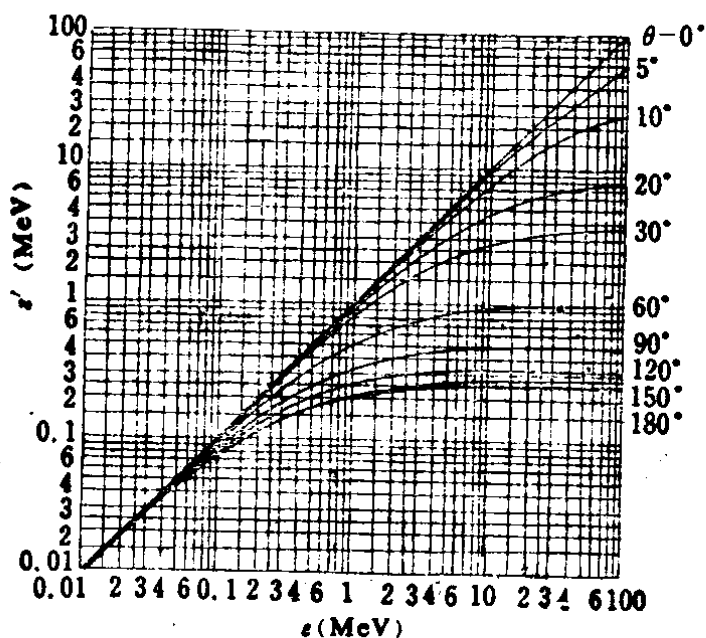


图1.1 康普顿效应与照射X射线能量的关系

大。换句话说，后散射（ $\theta > 90^\circ$ ）的X射线能量变化，要比前散射（ $\theta < 90^\circ$ ）大。

康普顿散射的截面积（按每个电子计） σ_c 可用下式表示：

$$\sigma_c = \frac{\text{散乱X射线能量 (erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{电子}^{-1})}{\text{照射X射线强度 (erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})} \quad (1.1)$$

与照射X射线能量 ϵ 相应的散射微分截面积（用科拉因·仁科的公式算出）的一例如图1.2所示。

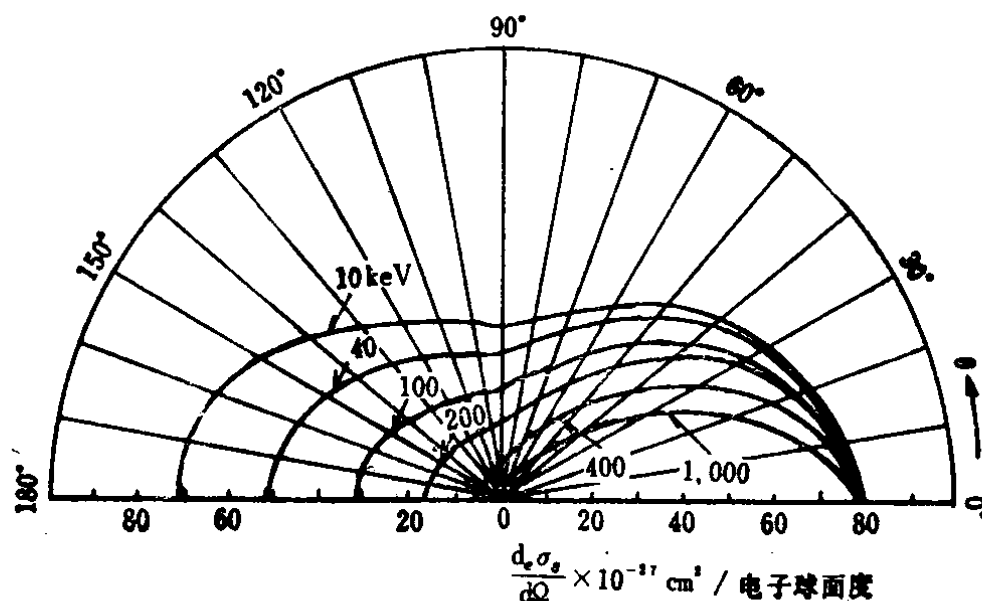


图1.2 散射微分截面积

1.1.4 电子对效应

这是当1.02MeV以上的高能X射线或 γ 射线光子通过原子核附近的核力场时，光子消失而代之以产生一对正负电子的现象。正电子和电子的静止质量 m_0 相等，电荷分别为 $+e$ 和 $-e$ 。X射线光子能量 ϵ 的一部分变成相当于两电子静止质量之和的能量 $2m_0c^2$ （ c 为光速），其余的能量变成正电子和电子的动能 E_p 和 E_e ，即

$$E_p + E_e = \epsilon - 2m_0c^2 \quad (1.2)$$

因此，如果光子能量在 $2m_0c^2 = 1.02\text{MeV}$ 以下就不会产生这种现象。当正电子的动能 E_p 减小时，正电子又会和负电子再结合而消失，同时代之以2个0.51MeV的光子朝完全相反的方向辐射。这种现象称为物质湮没（annihilation）辐射。

1.2 吸收系数 (衰减系数)

1.2.1 线吸收系数

如图 1.3 所示, 设无物体时单一波长 X 射线的强度为 I_0 , 物体厚度为 T , 则细束 X 射线透过物体后的强度 (不包含散射线) I 可由下式给出:

$$I = I_0 e^{-\mu T} \quad (1.3)$$

式中 μ ——线吸收系数 (或线衰减系数);

e ——自然对数的底 (2.7183……)。

线吸收系数 μ 则由下式给出:

$$\mu = \tau + \sigma_c + \sigma_T + k \quad (1.4)$$

式中 τ ——光电效应吸收系数;

σ_c ——康普顿效应散射系数;

σ_T ——汤姆逊效应散射系数;

k ——电子对效应吸收系数。

σ_c 又分光子散射部分 $\sigma_{c,s}$ 和将能量传给反跳电子所造成的吸收部分 $\sigma_{c,a}$ 。“吸收”这个术语有两种涵义: 一种是广义, 表示整个 μ 值 (即全吸收); 另一种是狭义, 不表示有关散射的部分 ($\sigma_T + \sigma_{c,s}$), 而只表示光子变成其它能量的部分 ($\tau + \sigma_{c,a} + k$) (即真吸收)。

图 1.4 表示五种物质的 μ 值与光子能量的关系。由此可见, 元素越

重, 则 μ 值越大, 且重元素的最小 μ 值, 出现在光子能量 ϵ 较小的位置。Pb 的曲线在 0.088 MeV 时有不连续的现象, 这是由 K 吸收端造成的。

图 1.5 表示 τ 、 σ_T 、 σ_c 和 k 分别除以 μ 所得的百分比, 由

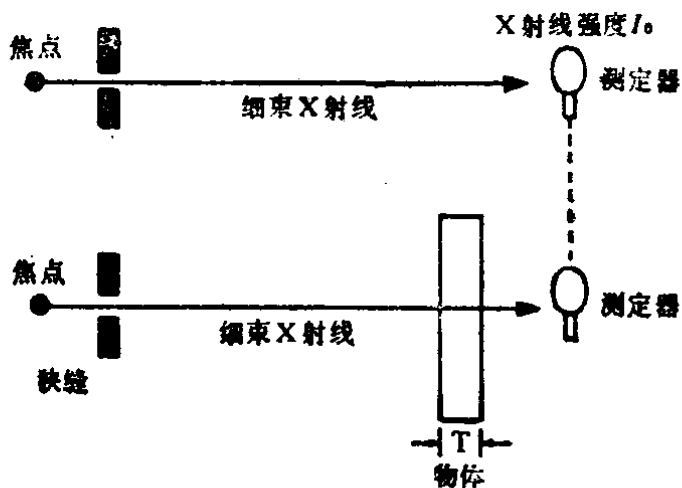


图1.3 X射线的衰减

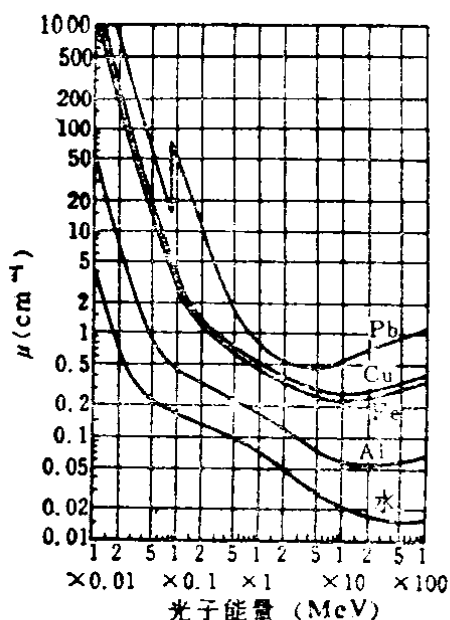


图1.4 各种物质的全吸收系数与光子能量的关系

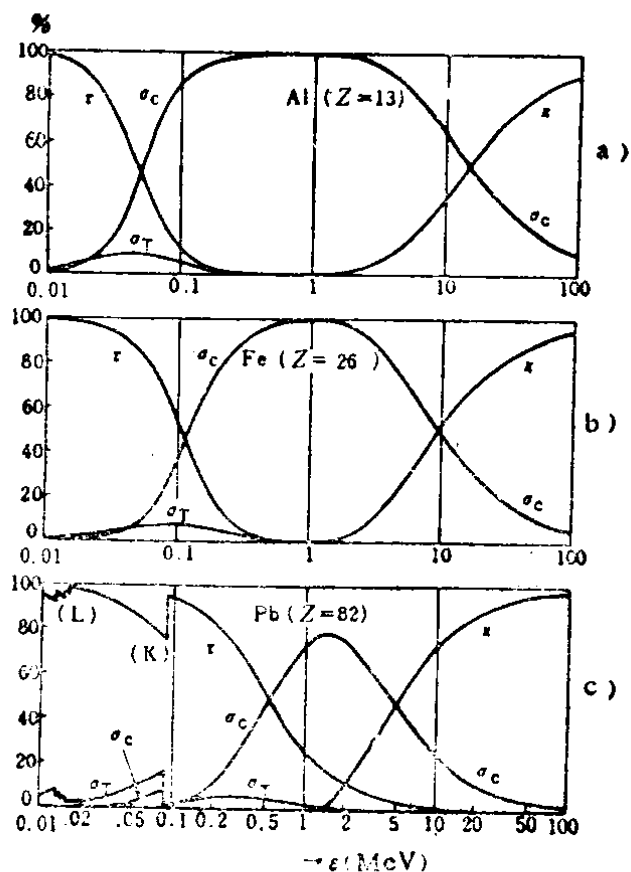


图1.5 各种吸收系数与全吸收系数的比率

此可知不同光子能量 ϵ 时各种相互作用的发生程度。以铁为例，如图 1.5 b 所示，当光子能量为 10keV 时，光电效应占优势，但随着 ϵ 的增加，光电效应逐渐减小，而康普顿效应的作用却逐渐增大，稍过 100keV，两种效应相等。汤姆逊散射在此能量附近达到最大，但其发生率也不满 10%。 ϵ 在 1 MeV 左右时，X 射线的衰减几乎都是康普顿效应造成的；超过这一点，由电子对效应引起的吸收又逐渐增加；当 ϵ 在 10MeV 左右时，电子对效应与康普顿效应的作用程度相同； ϵ 超过 10MeV，电子对效应起主要的作用。

图 1.6 表示元素的原子序数 Z 与光电效应 τ 、康普顿效应 σ_c 、电子对效应 κ 分别成为各种主要相互作用时的光子能量的关系。由此可见，随着原子序数的增加，康普顿效应成为主要相互作用的能量范围变小。

1.2.2 质量吸收系数

(1.3) 式指数项中的吸收系数 μ 是与吸收物质种类和透射