

X 射线吸收系数的研究实验

郑林

复旦大学 材料科学系

摘要： 本实验使用德国莱宝教具公司生产的 X 射线实验仪，通过测量 X 射线入射 Al、Fe、Cu、Zr、Mo、Ag 等材料的透射率来研究某特定能量下，材料吸收系数与其原子序数的关系，并将实验结果与文献参考值进行对比分析。

关键词： 衰减系数 光电效应 线吸收系数 质量吸收系数 吸收截面 原子序数

在做 X 射线系列实验时，验证了材料衰减系数 μ 与入射 X 光波长 λ 近似满足关系式： $\mu \propto \lambda^3$ ，也发现 μ 还与材料原子序数 Z 有关。而在查阅相关资料时，发现关于材料吸收系数与其原子序数关系的这部分内容，都给出了 $\mu \propto Z^n$ 或 $\mu_m \propto Z^n$ 的关系（ n 的具体数值与 μ 的物理意义有关），但也都叙述地比较简要。抱着学习的态度，利用实验室现有的材料，测量计算了几种元素的衰减系数，得到了一定的结论，并对实验过程中出现的一些问题进行了分析讨论。

1、原理和方法

1.1 原理

X 射线束在透过物质后强度发生衰减，这是和物质相互作用的结果。X 射线和物质的相互作用是相当复杂的，除掉按原来方向直接透过的 X 射线光子外，那些不重新出现在原线束方向的光子可能发生的反应有：光电效应、康普顿散射、相干散射等。

X 射线由低能光子组成（一般不会超过 150KeV），它在物质中的衰减系数具体表示为[1]：

$$\mu = \mu_{\text{光电}} + \mu_{\text{康}} + \mu_{\text{相干}} \quad (1)$$

因为本实验的 X 射线能量较低，不会超过 35KeV，文献[1]给出参考：

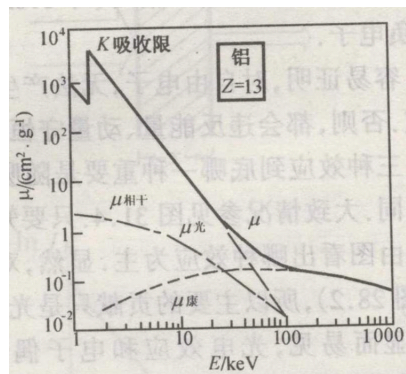


图 1

从图 1 中可以得到：X 射线能量较低时，它在材料中的衰减系数近似等于光电吸收系数；当能量较高时，康普顿散射占主要作用。所以实验中近似认为衰减系数等于吸收系数。

一束强度为 I_0 的单色 X 射线通过吸收材料，其强度 I 的变化遵循朗伯-比耳（Lambert-Beer）定律，有：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

其中 x 为材料厚度，单位为 cm 。称 μ 为线吸收系数，单位为 cm^{-1} 。记 $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ 为质量吸收系数，单位为 $cm^2 \cdot g$ 。 μ_m 比 μ 更为基本，其数值不再依赖于吸收材料的物理状态，更能反映材料本质。

光电效应是由 X 光子与物质靶原子中的束缚电子作用引起的，所以束缚电子的数密度越大，光电作用几率（常用每个原子对入射 X 光子的作用截面 σ_p 来表示）就越大。爱因斯坦光电方程表明入射 X 光子的能量 $h\nu$ 必须大于束缚电子的束缚能，但这只是光电效应发生的必要条件。事实上，光电效应的发生还需要光子、束缚电子外的第三者加入，这个第三者就是靶原子原子核或金属品格。理论推导和实验事实都表明光子与自由电子是不能发生光电效应的[2]，正是因为没有这个第三者；而康普顿效应则刚好与其相反，只能与自由电子发生碰撞。由上述分析可得 σ_p 与原子序数 Z 及光子的能量 $h\nu$ 有关，文献[3]中给出：

$$\sigma_p \propto Z^5 \left(\frac{1}{h\nu}\right)^{1 \rightarrow 3.5} \quad (3)$$

因为 Z 越大，电子在原子中束缚得越紧，就越容易使原子核参与光电效应来满足能量和动量守恒的要求，使发生光电效应的几率 σ_p 增大；而光子能量 $h\nu$ 越高，相对而言，电子的束缚能就可以忽略不计，即这种电子近似为“自由电子”，所以光电效应几率 σ_p 就减小。

(3) 式中 $\frac{1}{h\nu}$ 上指数的确切值是由束缚电子所在壳层决定的。如文献[4]所述，K 层的指数值为 3.5，这也反映了吸收限的概念，即吸收材料吸收系数发生突变处所对应的 X 射线能量或波长值。如图 2 所示：

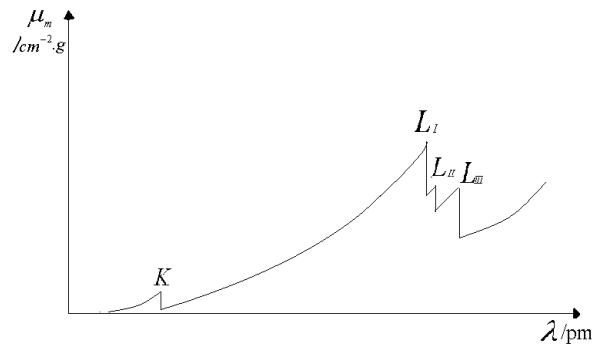


图 2

所以 (3) 式的成立范围是两个不同壳层吸收限之间的波长段, 即 $\lambda < \lambda_K$ 、 $\lambda_K < \lambda < \lambda_{L1}$ 两个区间内的 λ 对应的公式不同。

显然, 线吸收系数 μ 与光电吸收截面 σ 的关系为:

$$\mu = \sigma \cdot n \quad (4)$$

n 为单位体积内的原子个数 (cm^{-3}), 所以 $n = \frac{\rho}{A} \cdot N_A$, A 为摩尔质量 ($g \cdot mol^{-1}$), N_A 为阿伏伽德罗常数 (mol^{-1})。所以应有:

$$\sigma = \frac{\mu_m \cdot A}{N_A} \quad (5)$$

1.2 方法

由原理可知 μ_m 与 λ 、 Z 有关, 保持 λ 不变, 研究 μ_m 与 Z 的关系。为与文献值进行对比, 实验选取特殊波长 $\lambda_{K\alpha}$, 即在所用 X 射线仪阳极靶材 Mo 的 $K\alpha$ 特征谱入射下, 研究 μ_m 与 Z 的关系。用 NaCl 晶体的衍射谱来标定波长值。

X 射线的强度 I 用 G-M 计数器的计数率 $R (S^{-1})$ 来表征, 通过测量 X 射线透过吸收材料前后的计数率, 测量材料厚度 x 后可应用 (2) 式求出材料的线吸收系数 μ , 进而求得 μ_m 。

处理数据时, 根据 $\mu_m \propto Z^n$ 的关系式, 对 $\ln \mu_m$ 及 $\ln Z$ 进行线性拟合, 可得 n 即直线斜率。

对由 (5) 式得到的 σ 进行了相同的拟合。

2、实验

实验中用到的仪器及材料有: 莱宝 X 射线仪, 配套的 Al、Fe、Cu、Zr、Mo、Ag 吸收片, 配套的 X-Ray 数据处理软件, NaCl 晶体。

X 光管电压、电流的最大值分别为 35KV、1mA, 前者限制了 X 射线韧致辐射连续谱的

短波限，后者则限制了 X 射线的强度。为增大计数率减小误差，测量时将 X 光管的电流设为最大值 1mA，而电压设为 30KV，计算得短波限 $\lambda_{\min} = 41.32\text{pm}$ 。由布拉格公式 $n\lambda = 2d\sin\beta$ 及 λ_{\min} 可得一级衍射角为 4.2° ，二级衍射角为 8.4° ，而 $K\alpha$ (71.07pm) 对应的一级衍射角为 7.2° ，所以扫描的角度范围定为 $4^\circ \sim 8^\circ$ ，就能有效地控制在只发生一级衍射。(经计算，若电压设为 35KV， 7.2° 处已开始有二级衍射发生，会影响到测量结果。)

$\Delta\beta$ 设为 0.1° ， Δt 设为 5S。

受 G-M 计数器死亡时间、分辨时间的影响，需控制不放吸收片时的计数率在 1500 s^{-1} 以下，所以在出射光阑处放置 Zr 滤波片较好，这样不仅能达到计数率在 1500 s^{-1} 以下的目的，还能使出射 $K\alpha$ 射线的单色性更好。

在 COUPLED 模式下扫描不放吸收片及在出射光阑处分别放置 Al、Fe、Cu、Zr、Mo、Ag 吸收片的衍射情况。扫描结果经 X-Ray 软件处理后可得到各吸收材料的 $T \sim \lambda$ 透射谱，按照 1.2 方法得到 μ_m 。

3、结果与讨论

用到的材料参数见表 1:

吸收材料	原子序数 Z	质量数 A	密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	厚度 x/cm
Al	13	26.98	2.698	0.05
Fe	26	55.85	7.873	0.0202
Cu	29	63.55	8.932	0.007
Zr	40	91.22	6.507	0.005
Mo	42	95.94	10.22	0.01
Ag	47	107.9	10.50	0.005

表 1

实验结果见表 2:

吸收材料	计数率 R/S^{-1}	透射率 T/%	质量吸收系数 $\mu_m / \text{cm}^{-2}\cdot\text{g}$				
			文献值[5]	实验值 1	误差 1	实验值 2	误差 2
Al	725.6	52.3	5.16	4.805	-0.355	4.459	-0.701
Fe	6.4	0.5	38.5	33.32	-5.18	31.20	-7.30
Cu	97.6	7.0	50.9	42.53	-8.37	39.05	-11.85
Zr	829.6	59.8	15.9	15.80	-0.10	13.67	-2.23
Mo	230.4	16.6	18.4	17.57	-0.83	17.17	-1.23
Ag	392.4	28.3	25.8	24.04	-1.76	22.68	-3.12

表 2

备注：实验值 2 是改变 X 光管电压为 35KV 后的参照。对比可得高压设置为 30KV 更好。

在 Origin 软件中对 $\ln \mu_m$ 与 $\ln Z$ 进行线性拟合（X 表示 $\ln \mu_m$ ，Y 表示 $\ln Z$ ），如图 3：

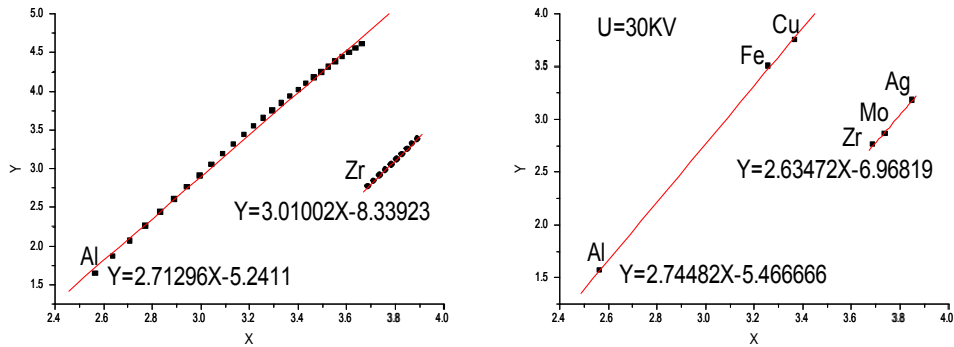


图 3

备注：拟合文献值时，选取了从 Al 13 到 In 49 的 37 个数据值。拟合实验值时，选取了更好的实验条件下得到的实验值 1。

二者都反映了较好的线性关系，从中能得到结论一：

当 $\lambda < \lambda_K$ 时， $\mu_m \propto Z^{2.7}$ ；当 $\lambda_K < \lambda < \lambda_{L_I}$ 时， $\mu_m \propto Z^3$ 。

实验值的拟合结果在前一结论上与文献值符合得较好，而在后一结论上则有较大偏差，观察表 2，发现这是由于 Zr 的误差与 Mo、Ag 相比太小造成的，如果拟合误差更大的实验值 2，可得图 4：

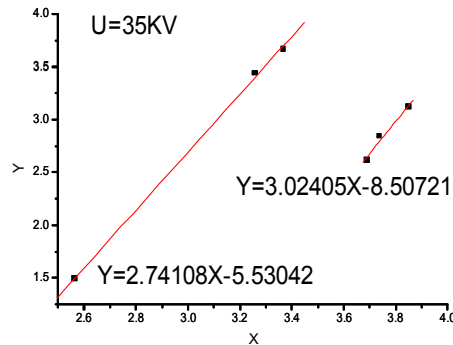


图 4

尽管实验值 2 的误差更大，但它的线性关系却符合地更好。

由（5）式可计算得到各材料的质量吸收截面 σ ，线性拟合 $\ln \sigma \sim \ln Z$ ，如图 5：

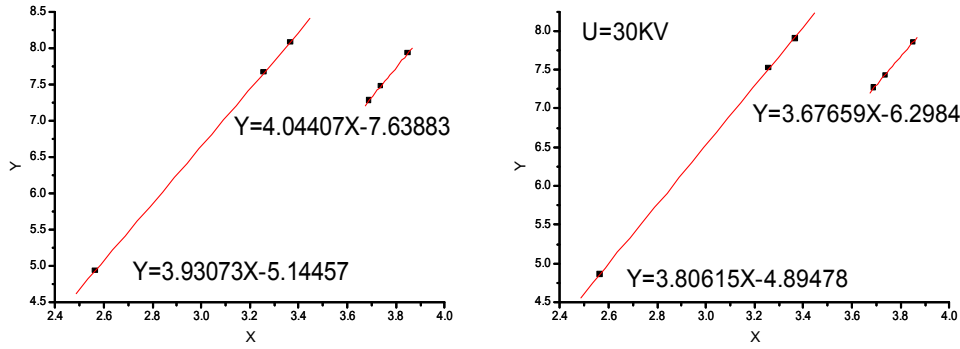


图 5

发现 σ 与 Z 的关系与 μ_m 类似，得到结论二：

当 $\lambda < \lambda_K$ 时， $\sigma \propto Z^{3.9}$ ；当 $\lambda_K < \lambda < \lambda_{L_i}$ 时， $\sigma \propto Z^{4.0}$ 。

然而由 (3) 式得光电作用截面与原子序数的关系为： $\sigma_p \propto Z^5$ ，似乎产生了矛盾。但仔细分析，发现质量吸收截面与光电作用截面在物理意义上有很大的差别。从前面的原理介绍中可得，一个光子与材料原子中的束缚电子发生碰撞后，将其绝大部分能量交给了电子，若这些能量恰好等于该电子所在壳层的结合能，则电子被电离，在向金属表面运动过程中又会发生各种非弹性碰撞，若到达表面后电子的能量仍大于金属逸出功，则它就可以逸出成为光电子。 μ_m 是用来衡量被吸收的光子数的，而 σ_p 则是反映被打出的光电子数的。事实上 σ 及 σ_p 与 λ 的关系也有差异。

误差分析：

观察表 2，发现所有的质量吸收系数实验值都比文献值小，即实验中透过吸收片的 X 光子偏多，透射率偏大。综合分析，造成误差的原因有：

①由于 X-Ray 软件限制，选取的 $K\alpha$ 波长实验值为 70.7pm，而其文献值为 71.07pm，且 μ_m 近似正比于 λ^3 ，这样必定使实验值小于文献值。

②G-M 计数器的计数误差在计数率超过一定数值后会显著增大，而作为透射率公式中的分母，无吸收片时的计数率是最大的，由于死亡时间、分辨时间的存在，该数值被测小的概率较大，使透射率被测大。且 G-M 计数器取的是 Δt 时间内测到的平均值，存在较大的偶然误差。所以若实验条件允许， Δt 越大越好。

③各吸收材料的实际差异（如真实密度与表 1 所列密度存在差异，实验环境的改变等）及 G-M 计数器对各材料的计数差异，使各实验误差不同。

④实验背景中的少数 X 光子使各材料都叠加上一个较小误差。

事实上，结论一、二得到的 μ_m 及 σ 与 Z 的关系都只是比较粗糙的实验式，文献[6]中给出：当 $\lambda < \lambda_K$ 时， $\sigma \propto Z^{3.94}$ ；当 $\lambda_K < \lambda < \lambda_{L_I}$ 时， $\sigma \propto Z^{4.3}$ 。但这显然与图 5 中由文献值拟合得到的结果也不是一致的。

4、结论

μ_m 与 Z 的关系和 μ_m 与 λ 的关系类似，也需要根据材料的吸收限进行分段讨论。

当 $\lambda < \lambda_K$ 时， $\mu_m \propto Z^{2.7}$ ；当 $\lambda_K < \lambda < \lambda_{L_I}$ 时， $\mu_m \propto Z^3$ 。

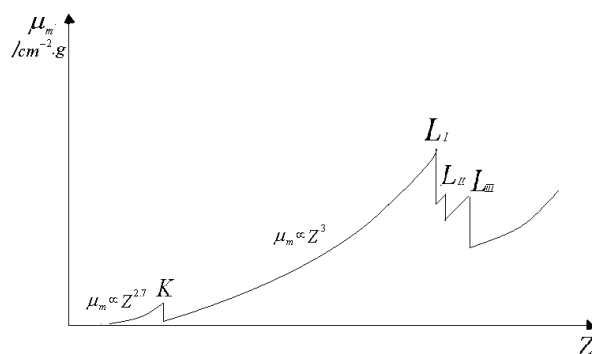


图 6

致谢：

谨对所有近代物理实验的任课老师对我提供的帮助和指导表示由衷感谢。

参考文献：

- [1] 杨福家 原子物理学 高等教育出版社 2004
- [2] 王青 王蕊 正确理解光电效应中的阈能 西安航空技术高等专科学校学报 2001 第 19 卷第 1 期
- [3] Marmier P Sheldon E Physics of Nuclei and Particles 1969
- [4] 戴道宣 戴乐山 近代物理实验 高等教育出版社 2006
- [5] 黄胜涛 固体 X 射线学 高等教育出版社 1985
- [6] 吴思诚 王祖谏 近代物理实验（一） 北京大学出版社 1986