

材料对 X 光的衰减系数与原子序数的关系的探究

俞颀翔

(复旦大学物理系 上海)

摘要: 通过测量不同波长的 X 光对材料的透射强度, 探究单质材料对 X 的衰减系数与单质的原子序数的关系。

关键词: X 光, 衰减系数, 吸收截面, 原子序数

1. 引言

通常波长在 $10^{-8}\text{m}\sim 10^{-11}\text{m}$ 范围的电磁波被称为 X 光。当高速运动的电子和原子相碰撞时, 一般都能发射 X 光。由于 X 光的波长与固体中院子的间距有相同的数量级, 因此 X 光成为研究晶体微观结构的有力工具。又由于 X 光有很强的透射能力, 且不同的材料对 X 光有不同的吸收, 故本实验旨在探究单质材料对 X 的衰减系数与单质的原子序数的关系。

2. 理论基础

a) 朗伯定律与衰减系数

X 光在某些材料中的衰减满足如下指数关系:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

其中 I_0 为入射 X 光的强度, I 为出射 X 光的强度, μ 为该材料的衰减系数, d 为该材料的厚度; 此即朗伯(Lambert)定律。所以, 衰减系数 μ :

$$\mu = \frac{-\ln \frac{I}{I_0}}{d} = -\frac{\ln T}{d} \quad (2)$$

其中 T 被称为透射率。显然对于不同波长的 X 光, μ 的值也是不同的, 即可以写成 $\mu(\lambda)$ 。

b) 吸收截面

而造成在 X 光在材料中衰减的原因是材料对 X 光的吸收和散射。设吸收系数为 τ , 散射系数为 σ , 则 $\mu = \tau + \sigma$ 。因为这些系数又往往正比于物质的质量密度 ρ , 故常用“质量系数”表示:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad \tau_m = \frac{\tau}{\rho}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma}{\rho} \quad (3)$$

它们分别成为质量衰减系数、质量吸收系数和质量散射系数, 满足 $\mu_m = \tau_m + \sigma_m$ 。

设 A 为原子的摩尔质量, 阿伏加德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$, 则对于单质, 又可以定义:

$$\mu_a = \mu_m \frac{A}{N_A}, \quad \tau_a = \tau_m \frac{A}{N_A}, \quad \sigma_a = \sigma_m \frac{A}{N_A} \quad (4)$$

它们分别被称为原子衰减系数、原子吸收系数和原子散射系数; 因为它们有着面积的量纲, 故又称为衰减截面、吸收截面和散射截面, 它们同样满足 $\mu_a = \tau_a + \sigma_a$ 。

在波长 $\lambda = 35 \sim 100\text{pm}$ 的 X 光的范围内，单质的散射截面要远小于吸收截面，并成立如下的经验公式：

$$\tau_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_A} - 0.2 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \frac{A}{N_A} = - \left[\frac{\ln T}{\rho \cdot d} + 0.2 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \right] \frac{A}{N_A} \quad (5)$$

可以看到 σ_a 比起 σ ，去除了材料的密度以及单质元素的原子量，故它只表征原子的能级对原子吸收 X 光的影响。本实验旨在探求

3. 实验装置及方法

本实验使用的是德国莱宝公司的 X 射线实验仪，如图 1。其中 X 光管为钨靶 X 光管，其特征光谱为 $71.1\text{pm}(K_\alpha)$ 和 $63.2\text{pm}(K_\beta)$ 。探测 X 光强度的传感器为 GM 计数管。数据采集方式为 AD 卡收集转换至电脑软件中处理。靶材为 NaCl 单晶，晶面间距为 0.283nm 。

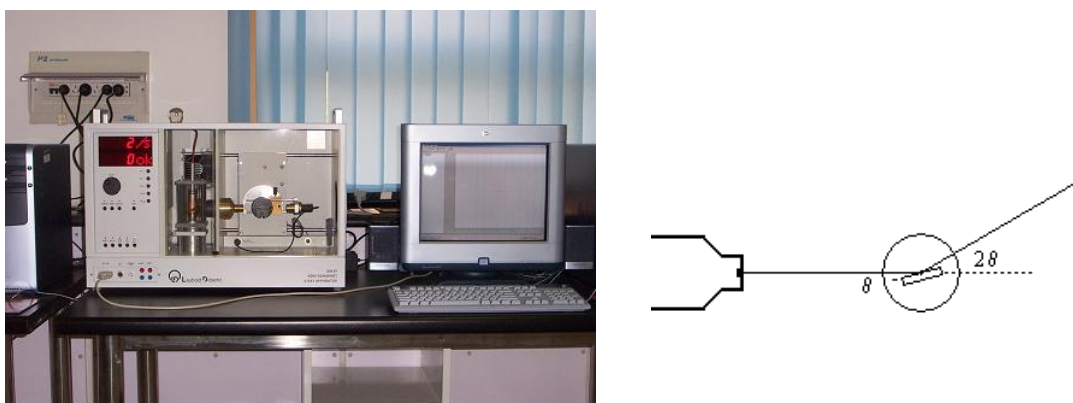


图 1 X 射线实验仪及实验原理示意图

本实验利用 X 光在晶体中的布拉格衍射来分离 X 光中不同波长的光，并得到不同角度 X 光强分布。由布拉格公式：

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (6)$$

得到不同衍射角 θ 对应于不同 X 光的波长 λ 。在光路中加上不同材料的吸收片，就能得到不同材料对不同波长 X 光的透射曲线。再通过式(2)及式(5)得到各单质材料的衰减系数 μ 及吸收截面 σ_a 与入射 X 光波长 λ 的关系。并由此探究单质材料的原子序数对其影响。

4. 结果与讨论

实验所用的单质金属吸收片的参数如表 1 所示：

材料	原子量 Z	原子量 $A(\text{g/mol})$	厚度 $d(\text{cm})$	密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$
Al	13	26.98	0.050*	2.70
Fe	26	55.85	0.050*	7.80
Cu	29	63.55	0.007	8.92
Zr	40	91.22	0.005	6.49
Mo	42	95.94	0.011	10.2
Ag	47	107.9	0.006	10.53
In	49	114.8	0.035	7.31

表 1 金属吸收片参数 (*为实验室参考数据，其余为实测数据)

测量范围在 $4.0^\circ \sim 8.0^\circ$ ，对应 X 光波长为 $39.3\text{pm} \sim 83.4\text{pm}$ 。结果如图 2。注意到，各测量的实验参数少许有些不同，这主要为了减少实验中 GM 计数管的死亡时间对计数测量的影响（通常计数率应控制在 $1500/\text{s}$ 以下）。由于 X 光管的管流 I 正比于输出的 X 光的强度，所以可以改变管流大小进行测量，然后通过线形放大测量结果得到 $I = 1.00\text{mA}$ 时的计数率。而参数 Δt 的不同取决于测量得到的计数率的大小，计数率越高则相对不确定度越小，则测量的时间就可以小一些；反之，需要长时间测量取平均来得到不确定度较小的结果。由此，得到各金属单质的透射率与波长的关系，结果如图 3 所示。

由式(2)及式(5)得到衰减系数 μ 和吸收截面 σ_a 对入射 X 光波长 λ 的关系，结果如图 4 和图 5。

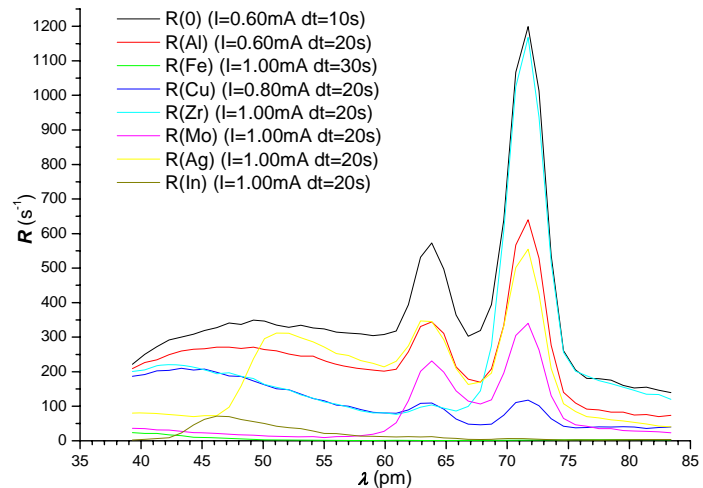


图 2 各金属吸收片对 X 射线的透射情况，黑色为不加吸收片时的情况

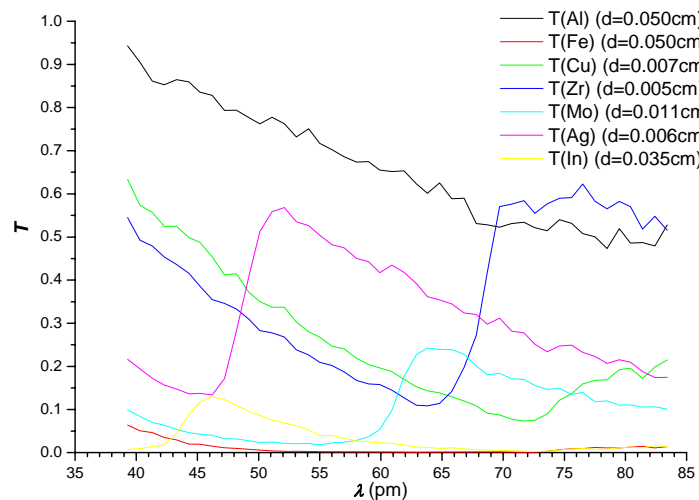


图 3 透射率对入射 X 光波长的关系

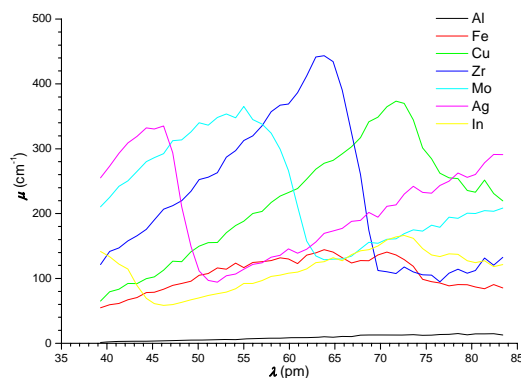


图 4 衰减系数对入射 X 光波长的关系

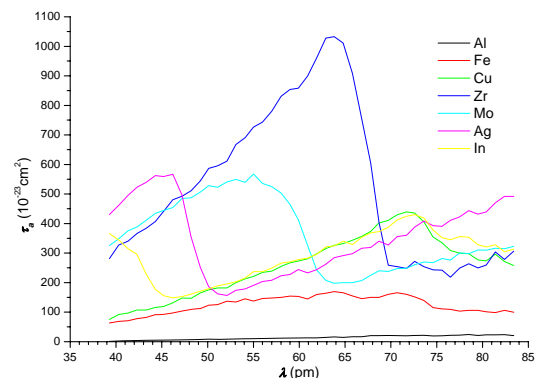
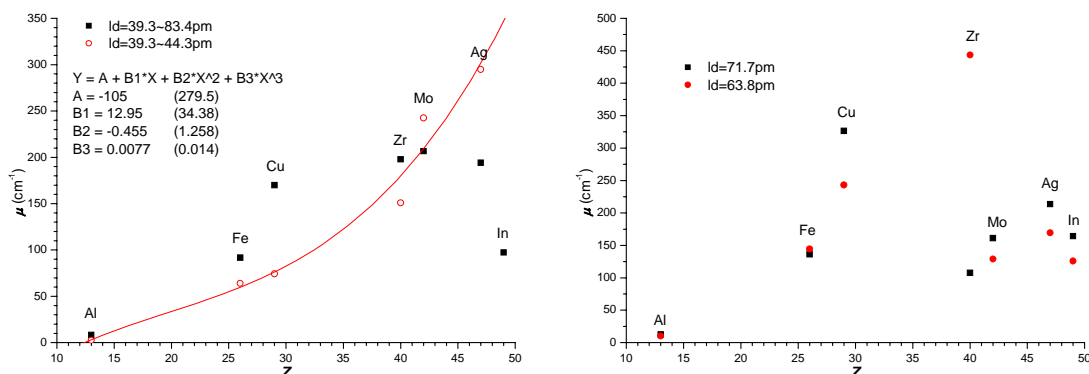


图 5 吸收截面对入射 X 光波长的关系

考虑到本实验的测量范围基本覆盖了大部分钨的 X 光的光强分布，我们可以把在各金属在整个测量范围，即 $39.3\text{pm} \sim 83.4\text{pm}$ 中的测量结果求个总合，并得到总的透射率，并求出

在这个范围内各金属单质的平均衰减系数 μ_0 ；又考虑钼的特征谱线为 71.1pm 和 63.2pm，所以我们可以 在特征谱附近观察各金属单质的衰减系数 μ_α μ_β ；除了铟(K 层吸收边在 39~40pm)，其他 6 种元素在 45pm 以下区域都属于远离 K 层吸收边区域，故我们又可以在该区域内选取某一或一段波长来得到除铟外其他 6 种金属单质的衰减系数 μ_1 ，本实验取前 6 个测量点，也就是 39.3~44.3pm。结果如图 6。



39.3 ~ 83.4pm 和 39.3 ~ 44.3pm

K_α 和 K_β 特征谱

图 5 衰减系数与原子序数的关系

由图 6 左图可以看到，虽然在 整个测量范围内，衰减系数与原子序数之间没有很明显的单一函数关系，但是如果去除了原子吸收边的影响，在 39.3 ~ 44.3pm 也就是在远离吸收边的情况下，除了铟以外其余 6 种金属元素成一个比较明显的单调函数关系，左图中的 3 次拟合曲线虽然不确定度较大，但还是显示一定的函数关系。如果认为这个函数关系是一个简单的幂次关系，即

$$\mu(\lambda) = C \times Z^\alpha$$

$\ln \mu \sim \ln Z$ 直线拟合图，斜率即幂次 α 的值，结果如图 7。

由实验结果可以得到 $\alpha = 3.64$ ，这与通常的经验公式相符。

而右图中可以看到，通常情况下单质在 K_α 的衰减系数比在 K_β 的衰减要高，

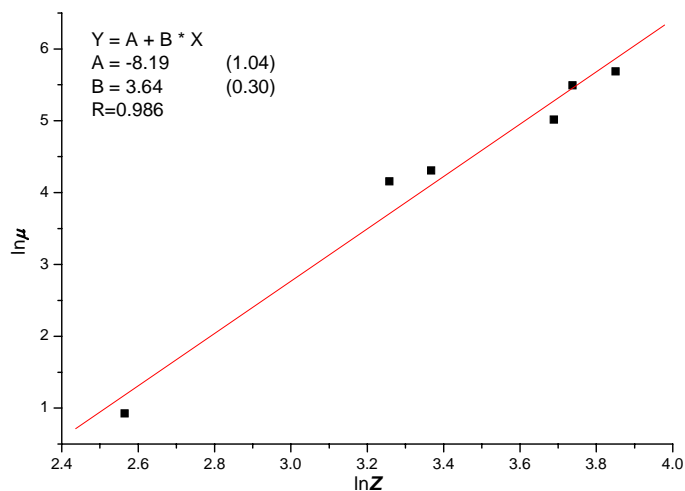


图 7 $\ln \mu$ 与 $\ln Z$ 线形拟合图

而锆却是个例外，后者的值远大于前者。由图 5 可以发现，锆的 K 层吸收边恰好在 K_{α} 线和 K_{β} 线之间，即对 K_{β} 线大量吸收而对 K_{α} 线吸收很少。故锆吸收片可以用来过滤钼 X 光谱中的 K_{β} 线，从而使其出射 X 光单色化。

5. 结束语

很遗憾，对比本实验所用的材料以及探究的 X 射线的波长范围，没能找到一个合适的波段，使得所有的材料的 K 层吸收边都大于且远离该波段，以至于拟合的结果不确定度较大。原因是原子序数越大，原子的 K 层吸收边波长也越小，所以在光谱图中，重核元素的衰减突变将发生的很靠前，而轻核元素则会离得很远。如果在实验中加入原子序数中等偏轻的单质金属，如锰(Z=25)、镍(Z=28)、锌(Z=30)等常见的金属单质制作的吸收片，可能可以得到更好的实验拟合结果。而对于重核元素，可以考虑对 K 层吸收边之后 L 层吸收边之前的波段进行分析，以得到另一组实验拟合结果。

参考文献

- [1] 杨福家 著 原子物理学 第三版 高等教育出版社.
- [2] 戴道宣, 戴乐山 主编 近代物理实验 第二版 高等教育出版社.

The exploration of the relationship between the attenuation coefficient of X-ray and the atomic number in elementary substance

Abstract: to explore the relationship between the attenuation coefficient of X-ray and the atomic number in elementary substance by detecting the transmission intensity of the X-rays in various wavelengths in materials

Keywords: X-ray, attenuation coefficient, absorption cross section, atomic number