

测量材料对 X 光的衰减系数与原子序数的关系

赵澎阳

(复旦大学物理系, 上海)

摘要 基于德国 Leybold 公司出产的 X 光试验仪为平台, 提供三种方法用于研究不同材料对 X 光的衰减系数与原子序数之间的关系; 分别给出三种方法的测量结果; 并对三种方法进行分析对比。

关键词 X 光; 吸收系数; 吸收光谱; 原子序数

X 光, 也称 X 射线, 在许多科学和工业领域有着十分广泛的应用。X 光可以用来帮助人们进行医学诊断和治疗; 可以用于工业上的非破坏性材料的检查; 在基础科学和应用科学中经常被用于晶体结构分析, 并通过 X 光谱和 X 光吸收进行化学分析和原子结构的研究。之所以有如此广泛的应用价值, 主要是由 X 光与物质相互作用的特点所决定的。而作为物质与 X 光相互作用时的一个基本现象——物质对 X 光的吸收, 对这一过程的特点和规律的研究则有着重要的实际意义。

在利用实验室提供的德国 Leybold 公司出产的 X 光实验仪研究材料衰减系数与入射 X 光波长的关系实验中, 由于实验变量是波长, 不需考虑发射出的 X 光谱的成分问题, 需要固定的实验变量原子序数也随着实验材料的选定而确定下来, 因此很容易测量。而当研究不同材料的衰减系数与原子序数的关系时, 需要固定的变量是入射 X 光的波长, 改变的是原子序数, 即不同材料。考虑到 X 光管发出的特征谱是包含很多波长的, 如何获得单色 X 光就成了该实验的关键所在 (这一问题在许多 X 光衍射实验中都会涉及到)。本文提出了三种实验方法用以解决这一单色光问题, 给出不同材料的衰减系数与原子序数的关系, 同时对三种方法进行比较, 从而给出最佳的实验方案。

1. 实验原理

X 光在某种材料中的衰减系数满足如下的指数规律:

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

其中 I_0 是入射 X 光的强度, I 是出射 X 光的强度, μ 为该材料的衰减系数, d 为该材料的厚度。实验中利用此规律, 分别测量入射前的 X 光强度 I_0 和出射 X 光强度 I , 则可给出:

$$\mu = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)/d, \quad (2)$$

这样定出的称为线衰减系数, 表示单位体积物质对 X 光的衰减程度, 它与物质的密度成正比。定义质量衰减系数 $\mu_m = \mu/\rho$, 表示单位质量的物质对 X 光的衰减程度, 单位是 cm^2/g 。经验规律发现, 在由两个邻近吸收边限所确定的一个吸收谱曲线分支上, 质量衰减系数与波长和原子序数 Z 存在如下近似关系:

$$\mu_m \approx k\lambda^\alpha Z^\gamma, \quad (3)$$

其中 k 为常数。

实验中通过测量透射率 $T = I/I_0$ ，由(2)式可得到 $T \sim \mu$ 关系，再利用(3)式，可确定出 $\mu_m \sim T$ 的关系。拟合时尝试 $\ln(-\frac{\ln T}{a\rho})$ 与 $\ln Z$ 的线性关系以验证关系式(3)。

2. 实验方法

本次实验平台是基于德国 Leybold 公司出产的 X 光实验仪，为了能获得单色性较好的入射 X 光，提出以下三种方法：

- 1). 考虑到 X 光实验仪是利用钼(M_o)作为阳极靶发射 X 光的，而钼的 K_α 为 71.1pm ， K_β 为 63.2pm ，因此，吸收边 λ_k 在 $71.1 \sim 63.2\text{pm}$ 之间的材料锆(Z_r)作为过滤片，其吸收边 λ_k 为 68.9pm ，从而可以过滤掉大部分连续 X 光谱和 K_β 成分，使强度本身就较大的 K_α 在入射 X 光中占更大比例，从而一定条件下可以看作近似的“单色光”。实验中利用 X 光实验仪配带的吸收板，采用手动扫描，对不同材料设置合适的 X 光管电流和扫描时间，利用仪器提供的“REPLAY”功能，测量平均计数率，从而可测得透射率 $T \sim Z$ 关系。
- 2). 以上方法虽然提高了单色性，但连续谱和 K_β 成分也只是部分被过滤掉，入射光中仍然混杂着大量不同波长的 X 光。为进一步提高单色性，可以借助 N_aCl 晶体对 X 光的衍射效果，将不同波长的 X 光衍射到不同的角度分布处。由于晶体对 X 光衍射的强度分布是形如函数 $\sin^2 N\theta/\sin^2 \theta$ ，除在极大值处（布拉格衍射角）强度有很强分布外，稍微偏离极大值一点，强度则迅速趋向零。这种类似于 δ 函数行为的角分布保证了在某一角度下探测到的出射 X 光基本上是以该角度作为布拉格衍射角的特定波长的单色波。而在测量时，材料吸收片套在 X 光出射口处，设定手动扫描，对某一特定角度，利用“REPLAY”功能，测量平均计数率，得到透射系数。
- 3). 方法 2 虽然解决了单色性问题，但其测量效率不高，手动扫描的方式并没有发挥出实验仪器的高效率和简易性。事实上，虽然实验是在固定波长 λ 的条件下测量透射率 T 与原子序数 Z 的关系，但实际上，为保证实验结果的精度，需要测量多个波长 λ （远离吸收边，且在同一个吸收谱分支上）下的 $T \sim Z$ 关系，因此，在方法 2 基础上，确定一个共同的扫描角度（波长）范围，改变测量顺序，对不同材料，分别扫描出在这段范围内的吸收谱曲线 $T \sim \lambda$ 图，并画到同一图上，延纵向看，则是同一波长下不同材料的透射系数，这样一来，只要扫描范围取得合适（最好能完整包含一个吸收谱曲线分支），则可以得到丰富的试验结果，而这并不需要很多的手动操作，完全发挥出了实验仪器的自动化特长。

3. 实验结果

- 1) 对于方法 1，我们给出不加锆过滤片和加锆过滤片的拟合结果，分别如图-1 和图-2 所示。需要指出，从图中可以看出最后两个数据（依次对应锆和银(A_g)）明显偏离前四个点所确定出的直线，因此图中给出的拟合是只取前四个点（依次对应碳(C)、铝(Al)、铁(F_e)、铜(C_u)四种材料)。

从拟合结果看，两者线性程度基本一样，锆过滤片并没有预想的那样起到明显的过滤作用，很可能是连续谱和 K_β 成分在入射 X 光中的所占比例不高，因此过滤得效果基本明显不出。而锆和银实验结果的偏离则与实验用锆做过滤片有关。银的吸收边 λ_k 为 48.6pm ，小于锆的吸收边限 68.9pm ，因此过滤后的入射光对锆和银来讲，其中不会含有小于 λ_k 的成分。而对于吸收边都大于 68.9pm 的前四种材料，入射 X 光中依然含有小于 λ_k 的成分，而 λ_k 是不同吸收谱曲线分支的分界处，因此，同一实验条件对前四种材料和对后两种材料是对应不同的吸收谱曲线范围，实验结果自然不统一。图中拟合结果给出的斜率即

式(3) 中的 γ 值, 两者给出的结果分别为 2.3 ± 0.2 和 2.5 ± 0.3 。

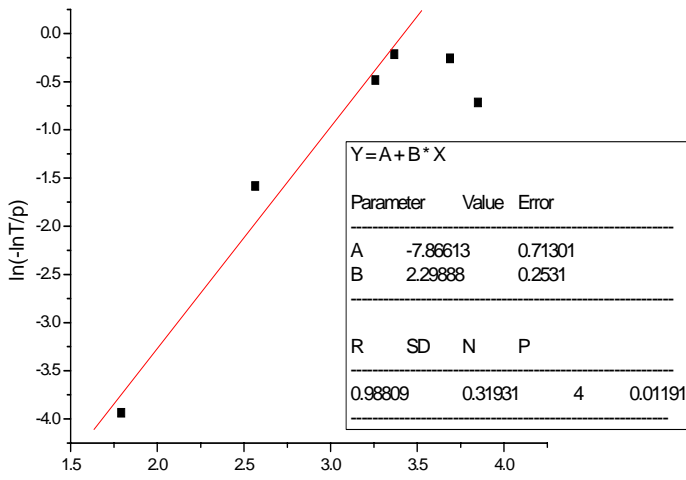


图-1

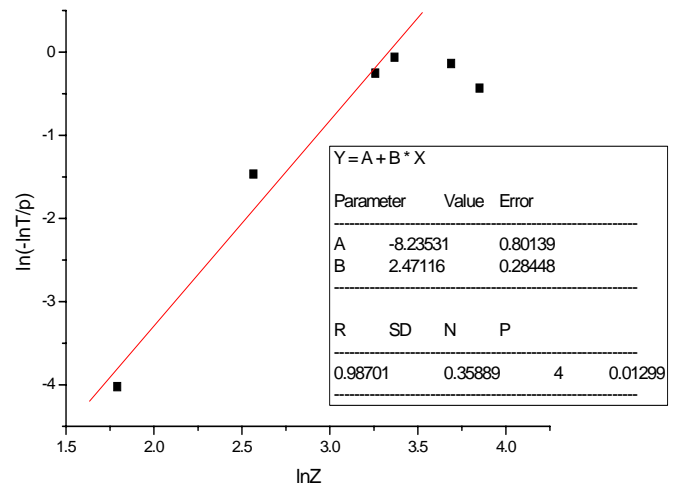


图-2

2) 对于方法 2, 实验中测量六种材料: 铝、铁、铜、铅、钨、银, 选取的扫描角度分别为 $\beta = 3.9^\circ$ 、 4.1° 、 4.3° 、 4.5° , 即可以得到四组数据。这里只给出 $\beta = 4.1^\circ$ 时的拟合图 (图-3), 其余结果以表格形式给出拟合结果 (表-1)。

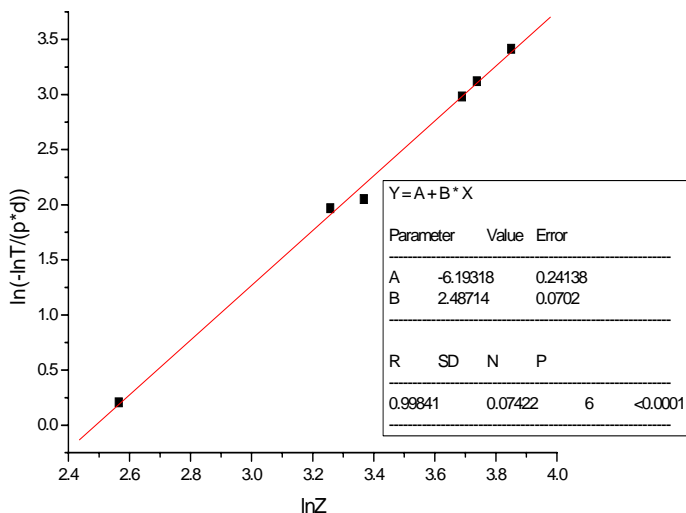


图-3

$\beta / ^\circ$	斜率值(γ)	线性相关系数 R
3.9	2.4 ± 0.2	0.98941
4.1	2.5 ± 0.1	0.99841
4.3	2.8 ± 0.2	0.99433
4.5	2.7 ± 0.1	0.99709

表-1

由于表-1 中所有的斜率值都有重叠区域, 可以进行平均, 确定出式(3)中的 γ 值为 2.6 ± 0.2 。相比方法 2 的结果, 用 N_aCl 晶体对 X 光谱进行衍射以分辨出不同波长 X 光成分的方法显然给出了更好的结果, 表明这种实验设计很好的解决了单色光问题。

3) 方法 3 所用材料与方法 2 相同, 得到的扫描结果如图-4。从中看出由于扫描角度选取的合适, 整个吸收谱的趋势基本上是单调的, 表明在吸收谱曲线的同一个分支上; 纵向读取数据进行拟合, 这里同样只给出某一个波长 ($36.4\mu m$) 下的拟合图 (图-5), 其余结果仍以表格形式列出 (表-2)。

从结果看出, 图-3 中给出的 $\beta = 4.1^\circ$ 处的结果即对应表-2 中 $\lambda = 40.3\mu m$ 的结果, 相比较而言, 此方法给出的结果比起方法 2 得到的结果拟合的线性程度更好; 关于斜率的结果, 除去两个结果只有两位有效数字外, 其余都给出三个有效数字, 比方法 2 给出的结果多了一位, 但也正是多出来的一位, 使得结果之间没有了共同的交叠区域, 这表明多出来的这一位有效数字实际上还是不确定的, 在本实验条件下只能确定 γ 到小数点

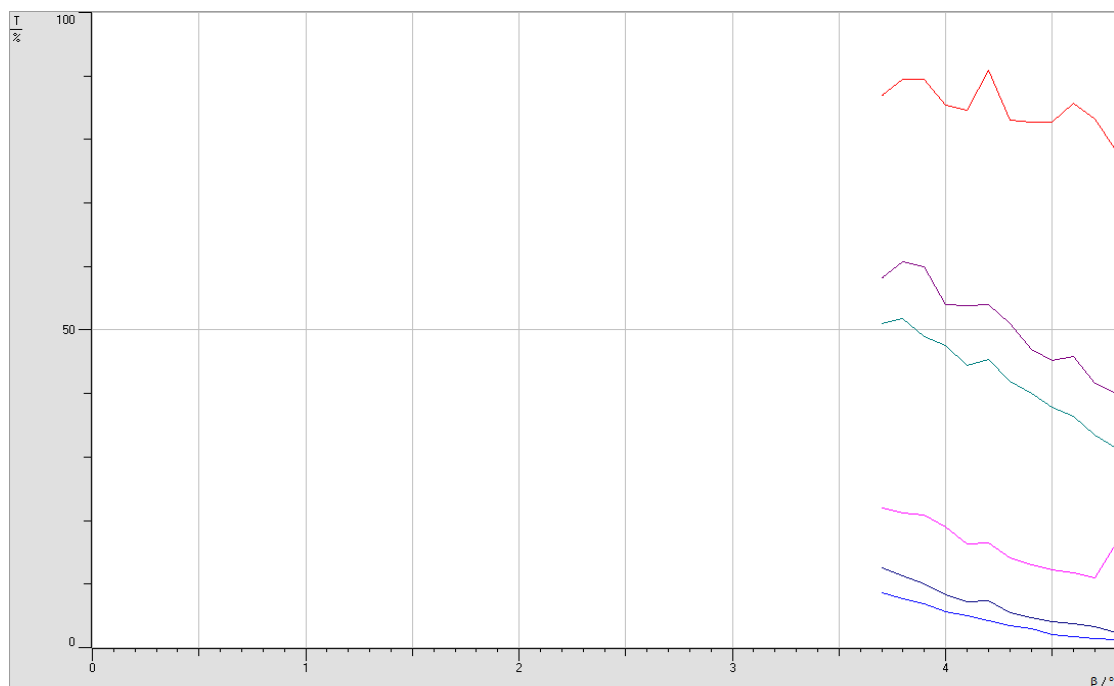


图-4

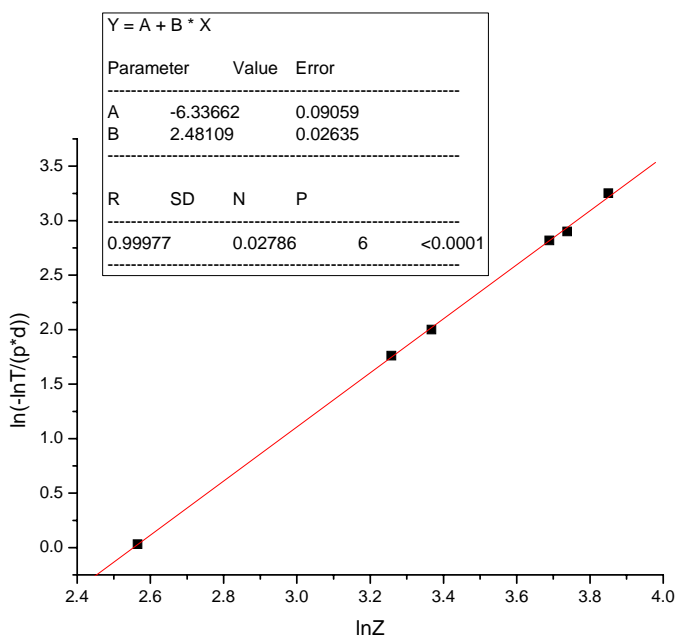


图-5

$\lambda/\mu m$	斜率值(γ)	线性相关系数
36.4	2.48 ± 0.02	0.99977
37.4	2.66 ± 0.07	0.99866
38.4	2.69 ± 0.07	0.99847
39.3	2.47 ± 0.03	0.99972
40.3	2.50 ± 0.03	0.99956
41.3	2.9 ± 0.1	0.99571
42.3	2.47 ± 0.05	0.99931
43.3	2.49 ± 0.03	0.99967
44.3	2.51 ± 0.05	0.9991
45.2	2.7 ± 0.1	0.9969
46.2	2.59 ± 0.08	0.99786
47.2	2.45 ± 0.04	0.99969

表-2

后一位。将表-2 中的斜率值保留两位有效数字，并加权求平均，给出的式(3)中的 γ 值为 2.6，而文献上给出的经验值是 3，且 3 只是个平均值，不同波长范围内 γ 是有可能不同的。

4. 实验结论

通过三种不同的方法，研究测量了不同材料对 X 光的质量衰减系数 μ_m 与原子序数之间的关系，对三种方法做了对比讨论，解决了 X 光实验中经常遇到的“入射 X 光需要是单色光”的问题；由此得出了 $\mu_m \propto Z^\gamma$ 的关系，并确定出不同波长下的 γ 值，给出在实验波长范围内 γ 的

平均值。

参考文献

- [1] B.D.Cullity, Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1995
冯根源译, X 射线金属学, 北京, 中国工业出版社, 1965
- [2] Leybold Didactic, Technical Documentation for X-Ray Apparatus

Investigating the Relationship between the Coefficient of Attenuation and the Atomic Number

Pengyang Zhao

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract: Three methods of determining the relationship between the coefficient of attenuation and the atomic number with the Leybold Company's X-Ray apparatus are proposed in this thesis. All results of the three methods are presented and the relationship between attenuation and atomic number is determined. Analysis and contrast among the three methods are also presented.

Key words: X-ray; attenuation coefficient; attenuation spectrum; atomic number.