

厚靶的 PIXE 定量分析*

戴中宁 任焯刚

(复旦大学物理二系 上海 200433)

摘 要 本文主要从公式、数据的来源、探测效率、质子束流的测定、主、少量元素和微量元素的计算、精确度、探测限等方面介绍厚靶 PIXE 分析的近年来的发展及复旦大学厚靶 PIXE 工作的开展。

关键词 厚靶, PIXE, 定量分析.

粒子激发 X 射线(PIXE)1970年首先由 LUND 实验室发展成为一种元素分析的强有力的手段. 粒子激发 X 射线分析是通过激发样品内的原子使其发射 X 射线, 探测所发射的 X 射线的能量和强度来达到测量样品中元素的种类与含量. 在 PIXE 技术发展的前十年, 由于厚靶分析需要考虑很多参数, 如粒子能量损失、电离截面、X 射线在样品中的吸收、二次荧光增强效应、探测器效率、质子束流的测量等, 因此 PIXE 方法主要用于薄靶的分析, 如气溶胶样品、生物样品等. 在薄样品的测量中可以忽略粒子能量损失等很多效应, 且可以通过加内标的方法来避免一些物理量的绝对测量, 从而达到定量分析的目的. 在80年代, 厚靶 PIXE 定量分析越来越受到重

视. 这不仅因为薄样的制备繁琐、容易引起不必要的污染, 而且有些样品不能破坏或不易制成薄样, 如考古样品、合金样品等. 特别是近年来随着 PIXE 分析应用的重点向材料科学和地质科学的倾斜, 厚靶 PIXE 分析受到越来越多的实验室的重视. 目前有许多实验室发展了该方面的软件, 具有代表性的有: 加拿大 J. L. Campbell 等人的 GUPIX92^[1], I. Orlic 等人的 TTPIXAN^[2], E. Clayton 等人的 AXIL^[3], 以及 M. A. Reis 等的 DATTPIXE^[4] 等. 复旦大学的厚靶 PIXE 工作开展于1977年, 当时主要用于越王勾剑的分析. 后来又发展了新的厚靶分析软件 TSPIXE^[5], 最近对该软件又作了较大的改进. 表1列举了以上各软件的主要信息.

表1 几个主要的厚靶 PIXE 定量分析软件

软 件	GUPIX	TTPIXAN	AXIL	DATTPIXE	TSPIXE
作 者	J. L. Campbell	I. Orlic	E. Clayton	M. A. Reis	Dai Zhongning
电离截面 计 算	ECPSSR	Cohen 方法 Benka 归一函数表 ECPSSR	Cohen 和 Harrigan ECPSSR 截面表	K. Paul 的方法 ECPSSR	Cohen 方法 Benka 归一函数表
吸收系数	Leroux Thinh 半经验方法	Leroux Thinh 半经验方法	Mayer, Rimini 插值方法	Plechatty 对数插值法	I. Orlic 半经验方法
离子阻止 本 领	Andersen Ziegler	质子: Janni 氦、氮: Zadins	A-Z 理论	没有交待	A-Z 理论
二次荧光 增强效应	Ruter et al	没有考虑	没有考虑	Ahlberg et al 分层拟合	Ruter et al

1 公式及数据来源

对于表面光滑、元素分布均匀的厚样, 如

已知基体元素的百分含量 C_z , 则厚样 PIXE 分析中原子序数为 Z , 原子质量为 A_z 的微量

* 国家自然科学基金委资助课题
本文1994年1月31日收到.

元素的特征 X 射线产额 $Y(Z)$ 是在离子入射方向、从靶中连续的各点所发射的、被探测器探测到的 X 射线产额的积分. 若忽略二次荧光效应, 其产额可表示为

$$Y(Z) = \frac{\Omega_x}{4\pi} \left[\frac{N_{av} \omega_z b_z \epsilon_z}{A_z} \right] N C_z \int_{E_0}^0 \frac{\sigma_z(E) T_z(E)}{S(E)} dE \quad (1)$$

其中, $S(E)$ 是样品对质子的阻止本领 ($\text{keVg}^{-1}/\text{cm}^2$), N 为入射质子数, b_z 为相应 X 射线 (K 线或 L 线) 在所有该元素 K 线或 L 线中所占的分支比, ϵ_z 为探测器对该 X 射线的探测效率, ω_z 为相应 X 射线 (K 线或 L 线) 的荧光产额, N_{av} 为阿伏伽德罗常数, $\sigma_z(E)$ 是能量为 E 是该元素的电离截面, Ω_x 为探测器所张的立体角, $T_z(E)$ 是该 X 射线到样品表面的透射率, E_0 为入射质子的能量, E 为出射粒子的能量. 通常, 透射率可表示为

$$T_z(E) = \exp \left\{ - \left[\frac{\mu}{\rho} \right]_z \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} \int_{E_0}^E \frac{dE}{S(E)} \right\} \quad (2)$$

式中, α, θ 分别为质子入射方向及探测器表面与样品表面法线所成的角度, 如图1所示.

定义 $[\mu/\rho]_z$ 为所有基体元素对某一特定 X 射线的质量吸收系数. 其中, Z_j 是基体元素, C_j 是 Z_j 元素在基体中所占的百分含量.

$$\left[\frac{\mu}{\rho} \right]_z = \sum_i \left[\frac{\mu}{\rho} \right]_{z_i} C_i \quad (3)$$

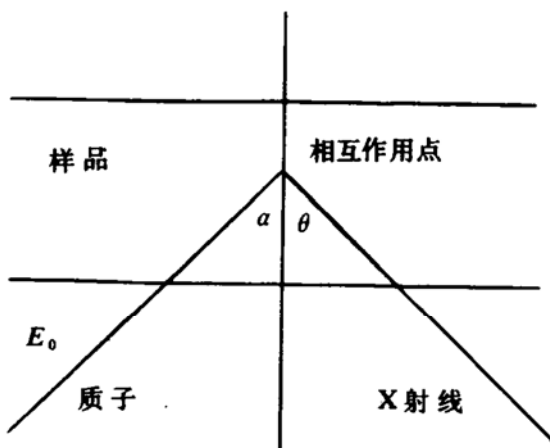


图1 PIXE 分析的一般几何图

基体对该 X 射线的质量吸收系数为基体

中所有元素 i 对 Z 元素所发射的特定 X 射线的质量吸收系数的求和.

在 TSPIXE 程序中, 将样品分为 N 层, 各层产额的和来代替(1)式的积分. 如忽略二次荧光效应, 则探测器所探测到的某特征 X 射线的产额为

$$Y(Z) = \frac{\Omega_x}{4\pi} N C_z B_z \epsilon_z \omega_z \frac{N_{av}}{A_z} \sum_j^{N_0} \sigma_z[E(j)] T_{z_j} \Delta t \quad (4)$$

其中, N_0 为样品被分的层数, Δt 为每层样品的平均面密度, $E(j)$ 为进入第 j 层时质子的能量, $\sigma_z[E(j)]$ 是能量为 $E(j)$ 时 Z 原子的电离截面, T_{z_j} 为第 j 层所发射的 Z 元素特定 X 射线到样品表面的透射率.

$$T_{z_j} = \exp \left\{ - \left[\frac{\mu}{\rho} \right]_z \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} \int_{E_0}^{E_j} \frac{dE}{S(E)} \right\} \quad (5)$$

假设已知样品中主量元素的含量, 由(1)、(2)可求出少量或微量元素的含量. 对于基体元素含量未知的样品, 如多元合金, 因为(1)、(2)式的积分中含有未知量, 只能用迭代方法先求主量元素, 然后再确定少量或微量元素的含量. 但两种情况下都需要考虑电离截面、阻止本领、吸收系数、探测效率等基本参数. 因为厚样定量分析的最终结果包含有许多物理参数, 现存的各参数的计算方法又很多. 为了得到尽可能准确的结果, 对各个物理参数计算方法都必须仔细地、慎重地选择.

1.1 质子阻止本领的计算

荷能离子射入物体后, 将逐渐损失其能量, 通常把单位长度离子能量的损失称之为阻止本领. 计算质子能量损失现有很多方法, 如 Andersen 和 Zeigler、Williamsen、Janni、Zaidins 等都有自己的方法. 对于能量大于 1MeV 时, 所有理论符合实验的程度则都在 $(1\sim 3)\%$. J. L. Campbell 等人^[6]研究发现, 对于 PIXE 分析感兴趣的能量范围即 1.5MeV 以上, Andersen-Ziegler 理论^[7]所给结果的不确定性在 1% 以下, 优于其它理论, 又由于 A-Z 理论所给的能量范围大, 对于不同粒子数据

齐全,厚靶PIXE工作绝大多数都采用他们的方法,我们也采用他们的数据和理论来计算质子能量损失。

1.2 电离截面的计算

在前十年中,电离截面的计算有重大进展,特别是 Babas、Brandt^[8,9]的工作。他们的 ECPSSR 理论是在平面玻恩近似(PWBA)的基础上首先发展起来的,该理论考虑了入射离子和靶的库仑排斥、通过微扰而引起的内层电子极化和束缚能的变化、入射离子能量损失效应及相对论效应,是当前最成功的计算轻离子电离截面的理论之一。最后所得理论模型是普适形式,即截面 σ 是约化参数的函数。对于 $10 \ll Z \ll 92$,能量在 $0.02 < E < 160\text{MeV}$ 范围内计算结果与实验值符合很好。理论误差在10%以内^[7]。在本程序中,我们采用 Cohen^[10]的方法及 Benka^[11]的普适函数计算 K、L 层的 ECPSSR 电离截面。为了得到与实验相符合更好的结果,对于 K 层质子激发的电离截面的计算,采用了 Paul^[12]所引入的参数 S ,即用 ECPSSR 理论计算的 K 层电离截面的结果乘以 S ,也就是:

$$\sigma_{\text{Final}} = S \times \sigma_{\text{ECPSSR}} \quad (6)$$

引入 S 参数以后,使理论计算的 K_{α} 线电离截面的误差变为:对于 $20 \ll Z \ll 50$ 的元素误差小于2%;对于 $Z < 20$ 的元素,误差小于3%^[2]。

1.3 质量吸收系数

探测器所探测到的 X 射线的强度直接与穿过样品的 X 射线有关。质量吸收系数的计算虽然也有 E. Storm 和 H. I. Israel、J. Veigele 及 J. W. Mayer 与 E. Rimini 等许多方法,但由于计算误差大或适用的能量范围小等没有被厚靶 PIXE 分析广泛采用。最为广泛采用的是 Leroux 和 Thinh^[13,14]的半经验方法计算质量吸收系数。对于 X 射线能量在1~40keV 的范围内,准确性大约为5%,在吸收限附近为10%左右。我们在软件 TSPIXE 中也采用他们的方法。

$$\mu/\rho = CE_{\text{ab}}\lambda n \quad (7)$$

式中, μ/ρ 为某元素对某一 X 射线的质量吸收系数, E_{ab} 为低于该 X 射线能量的最近吸收限, C 、 n 是对应于某一元素的拟合参数。

I. Orlic 等人^[15]得到0.1~1000keV 能量范围的半经验的数据。他们的公式是

$$\mu/\rho = \exp[P_1 + P_2(\ln\lambda) + P_3(\ln\lambda)^2 + P_4(\ln\lambda)^3] + \sigma_{\text{Kn}}ZN_A/M \quad (8)$$

其中 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 是拟合参数, λ 是 X 射线的波长, Z 和 M 是原子序数和原子重量, N_A 是阿伏伽德罗常数, σ_{Kn} 由下式给出

$$\sigma_{\text{Kn}} = 2\pi r_e \left[\frac{1+k}{k^2} \left(\frac{2(1+k)}{1+2k} - \frac{\ln(1+2k)}{k} \right) + \frac{\ln(1+2k)}{2k} - \frac{1+3k}{(1+2k)^2} \right]$$

其中, $k = E/mc^2$, $r_e = 2.817939 \times 10^{-13}\text{cm}$, $mc^2 = 511.0034\text{keV}$, E 是以 keV 为单位光子能量。

1.4 Si(Li)探测器效率的计算

在绝对含量的计算中,探测器效率是影响计算结果的一个非常重要的物理量。近年来随着厚靶分析越来越多,对探测器效率的研究也越发深入。主要用于厚靶 PIXE 分析的探测效率的计算方法有 I. Orlic 等人^[16]的方法及 Cohen^[17]的方法。

在 TSPIXE 程序中采用 Cohen 的五参数模型,计算了 Si(Li)探测器的效率。Cohen 的研究表明对于能量在3~60keV,该方法计算所得的探测器效率与用⁵⁴Mn 和²⁴¹Am 标准源测得的探测效率之间的差为 $\pm 3\%$ 。但对于小于3keV 的范围,没有合适的放射源作校刻,估计在此范围内偏差超过3%。此范围内探测效率的计算仍是 PIXE 分析中的一个需要深入研究的问题。

Cohen 的五参数方法所考虑的参数有:探测器灵敏厚度、灵敏直径、金接触层的厚度、Si 死层的厚度和一个描述放射性效率的参数。Cohen 所给的公式为

$$\epsilon = \epsilon_1 \cdot f_g \cdot f_{\text{Be}} \cdot f_{\text{Au}} \cdot f_d \cdot f_R$$

其中, ϵ 为探测器效率, ϵ_1 是 Si(Li) 探测器活性区的本征效率, f_g 是几何因子, f_{Be} 、 f_{Au} 、 f_d 分别是通过 Be 窗、Au 层、探测器前端死层的穿透因子, f_R 是与放射性有关的校正因子. 在 TSPIXE 计算中, 我们没有考虑 f_R 的影响, 即

$$\epsilon = \epsilon_1 \cdot f_g \cdot f_{Be} \cdot f_{Au} \cdot f_d$$

计算中, 我们所给的探测器的有关参数为: 铍窗厚度 = $8\mu\text{m}$, 金层厚度 = $0.02\mu\text{m}$, 探测器有效面积 = 30mm^2 , 探测器灵敏厚度 = 5.2mm .

I. Orlic 等人^[16]对低于 5keV 的 X 射线的 Si(Li) 探测效率作了较详细的研讨, 他们用实验测定了 1.5keV 到 5keV 的探测效率, 然后用基本参数的理论模型进行拟合, 再利用所拟合的参数对 1keV 到 5keV 的探测效率计算, 发现在 Si 吸收限以下不确定性为 (3~5)%, 在此能量以上为 (1~3)%.

1.5 二次荧光增强效应

在厚靶 PIXE 分析中, 由某些元素, 特别是主量元素或少量元素的 X 射线再激发其它元素产生 X 射线的现象是经常碰到的, 这种光致激发现象就称之为荧光增强效应. M. S. Ahlberg 等人^[18]仔细分析了二次荧光产生的原因, 认为主要由基体元素的 X 射线所引起, 就是当这种 X 射线的能量大于待测元素的光电吸收限时, 由于光电效应又可能激发该元素产生二次特征 X 射线, 结果使该 X 射线的强度增加, 通常以 X 光子激发相对质子激发的 X 射线的强度比, 即所谓增强因子来描述增强效应. J. L. Campbell 等人^[19]对二次荧光增强效应、三次荧光增强效应作了详尽论述. 在新版的 TSPIXE 软件中, 用分层求和方法计算二次荧光增强效应的影响.

2 非导电厚样电荷积累的消除与束流的测量

对于非导电样品, 在入射束的轰击下, 会引起样品表面电荷的积累, 从而使韧致辐射本底增加很大和探测灵敏度降低.

解决非导电厚样电荷积累的方法主要有以下几种: (1) 在样品表面喷镀导电层; (2) 将导电粉末与样品粉末混合均匀后, 压片制成厚样; (3) 低真空或在大气中分析; (4) 在靶室中安装电子枪, 对样品表面喷射电子; (5) 在样品前 $1\sim 2\text{cm}$ 处放置一种合适的薄膜 (C、Al、Ni、Au、C 基底上镀 Au 等), 即可以消除电荷积累, 又可以准确测量束流; (6) 在样品前加用于束流测量的旋转盘系统.

3 微量元素与主量元素的计算

3.1 微量元素与少量元素的计算

在主量元素已知的条件下, 测量少量或微量元素的含量是厚靶 PIXE 分析所主要关心的问题. 以下是现有的一些方法.

1) 合成具有相同基体元素标样的方法

如果样品中所含元素的种类少, 就有可能制成和样品同基体的标样, 且使它们含有相似的微量元素. Hyvonen-Dabek 等人^[20]利用厚靶 PIXE 所作的骨头分析就是一个典型的例子.

2) 单元素标样的方法

单元素标样方法, 是在待测样品中加入已知含量的元素, 通过测量待测元素和该元素的强度比, 来求得待测元素的含量. 由于这种方法不需要测量束流、探测效率、几何因子、样品质量等, 又能给出较好的结果, 所以具有良好的应用前景. TSPIXE 程序首先忽略能量损失及 X 射线的吸收, 求得各元素含量的近似值, 然后再考虑能量损失及吸收, 采用迭代的方法进行计算. 计算采用的公式为

$$C(Z) = \frac{I_{ms}/I_{ms}}{I_{cs}/I_{cs}} C(S) \quad (9)$$

其中, $C(Z)$ 为 Z 元素含量, $C(S)$ 为内标元素含量, I_{ms} 和 I_{ms} 分别为测量得到的内标元素和 Z 元素的 X 射线强度, I_{cs} 和 I_{cs} 分别为计算得到的内标元素和 Z 元素的 X 射线强度.

3) 相对于某一已知元素含量的方法

如已知样品中某一元素的含量, 则可以将其视为内标元素. 这一元素含量可由化学

分析或电子探针等方法得到. 值得注意的是, 这一元素不但分布要均匀, 而且原子序数要大一些, 因为原子序数小的元素容易受到吸收片穿透因子的影响而带来较大的误差.

4) 绝对含量的计算

已知几何条件、质子能量、质子数(束流强度)及样品密度等时, 可按测得的 X 射线强度计算样品中各元素的绝对含量. 该方法对数据要求高, 给分析结果所带来的误差大, E. Clayton 等人估计误差在(10~15)%^[21], 但由于数据计算方法的改进, 误差小了一些. 同相对含量计算类似, 我们采用迭代的方法, 所用公式为

$$C_{i+1} = C_i \frac{I_m}{I_c} \quad (10)$$

式中, C_i 、 C_{i+1} 分别为前后两次迭代所得的 Z

元素含量, I_m 、 I_c 分别为测量和计算所得的 X 射线强度.

3.2 用厚靶 PIXE 分析大量元素及轻元素的考虑

如果样品中所有元素都能被 PIXE 所探测, 厚靶 PIXE 也可以用于测量样品中的主要元素, 如合金、钱币、铜器等. 在这种情况下, 合成标样是不可能选取的方法, 只有用产额计算和用迭代的方法来求得元素的含量. 从一个较合理的假设出发, 然后通过计算得到 X 射线的产额, 对计算和测量所得的 X 射线产额进行比较, 所假设的元素含量被调整, 这样重复计算直到达到要求为止. 这种合理的假设是建立在对该样品或该类样品的含量有一定了解的基础之上的, 矿物样品、生物样品都是很好的例子.

表2 石英标样计算结果与石英标样的标准数据

元素符号	实验值	标准数据	实验值与标准值之间的偏差
Si	46.65166 (wt%)	46.65733 (wt%)	0.01%
Cl	110 ppm		
Ca	286 ppm		
Ti	67 ppm		
Cr	57 ppm		
Mn	55 ppm		
Fe	0.02328 (wt%)	0.02109 (wt%)	9%
Cu	97 ppm		
Zn	217 ppm		
O	53.31620 (wt%)	53.33161 (wt%)	0.03%

对于基体中含有大量轻元素的厚样分析, PIXE 分析有一定的困难. 现在最简便的方法是利用与 X 射线同时探测的背散射粒子和 γ 射线来确定轻元素的含量. 但由于厚靶分析中, 这些方法的分辨率较低, 从而带来较大的误差, 而且这种方法需要在靶室中安装许多别的探测器, 所以该方法也具有一定的局限性. 在生物样品和矿物样品的分析计算过程中, 如已知轻元素与分析元素的结合方式(如分子式), 可将轻元素按照与分析元素结合的形式加入到计算过程中. 即在得到分析元素的含量初值后, 按照轻元素与分析元

素的重量比例关系, 求得轻元素的含量, 每次迭代过程都要根据所得到的分析元素的含量, 再次计算轻元素的含量, 从而使轻元素也进入了迭代过程. 通过对一些标样的计算, 证明这种方法是行之有效的.

我们对地矿部的一个非常简单的标准样品石英厚样(BG290)作了 PIXE 分析, 实验装置是复旦大学质子微探针. 用 2×3 MV 串联加速器产生的 2.5 MeV 质子轰击样品, 在样品与探测器之间加了 102.6 μ m 的 Mylar 吸收片, 以降低大量轻元素所造成的本底, 从而使微量元素具有较好的分辨率和灵敏度. 测量

时间为300s, 质子束流积分是 $1937 \times 10^{-10} \text{C}$. 我们在计算过程中考虑 SiO_2 和 Fe_2O_3 这两个分子式, 使 TSPiXE 在计算过程中以此为依据来求得轻元素的含量, 每次迭代中都要以所计算出的重元素含量再次计算轻元素含量, 然后对计算结果进行归一, 从而使轻元素也加入了迭代过程. 表2是利用这种方法, 用 TSPiXE 对石英标样计算的结果与标准数据的比较. 可以看出, 对于较简单的化合形式的样品来说, 以分子式为依据直接进入迭代过程是一种简单而且可行的方法.

4 厚靶 PIXE 分析的精确度和探测限

J. L. Campbell 等人^[22]把影响厚靶分析精确度的因素概括为以下五个方面.

1) 模型的精确度

对厚靶 PLXE 分析来说, 一个基本的前提是质子的路径是线性的, 这样才能保证在样品的任何深度具有确定的质子能量. 因为质子能量的损失在任何物质中都有分布, 总是在 E 的 dE 范围内的一个分布, 所以在任何深度完全确定质子能量只是理想的一种状态, 而在实际中是不可能的. J. L. Campbell 等人研究得出在一定能量间隔的电离截面与能量的线性关系等于能量的弥散度.

2) 与模型假设的符合程度

表面完全光滑、且元素分布均匀的样品在实际中是不存在的. 对样品表面平滑度的要求主要来自于吸收系数和 X 荧光产额相关的计算^[23]. 对常规 PIXE 来说, 微小的粗糙引起的误差很小, 但对微束 PIXE 必须特别注意. 由样品的非均匀性所带来的误差也是主要通过吸收系数的计算表现出来的. 对元素分布不均匀的样品可以采用多点分析来解决.

3) 数据的精确度

质子能量计算的误差为 $\pm 3\%$. ECPSSR 理论计算 13MeV 范围的电离截面的误差为 3%. 由 XCOM 软件计算吸收系数所带来的不确定性为 2%. Krause 的 K 层 X 荧光产额

所引起的误差, 对于 $20 \leq Z \leq 50$ 的元素为 (1.5 ~ 2.5)%. 表3列举了 PIXE 所感兴趣的能量范围和各参数计算的不确定性.

表3 各主要参数在所计算结果中所造成的误差

电离截面	K_{α}	$20 < Z < 50$	$\leq 2\%$
(JJ)		$Z < 20$	$\leq 3\%$
吸收系数		$\mu/\rho > 300$	$\pm 5\%$
		$\mu/\rho < 20$	$\pm 1\%$
		吸收限附近	$\pm 10\%$
阻止本领			$\leq 1\%$
(Andersen Ziegler)			

4) 标准化的程度

由(1)、(2)式可对计算和测量所得到的 X 射线产额进行比较, 得出样品中所求元素的含量. 但由于束流、探测效率、立体角及吸收片等因素, 会引起大于 10% 的误差. 合理地利用标样会降低或消除某些不确定因素.

5) 谱的拟合

J. L. Campbell 等人^[24]曾对五种解谱软件进行了比较研究. 发现各种软件所给出的结果在大多数情况下符合得非常好. 但对于低能 X 射线叠加在较高能量的 X 射线的峰尾时, 所给出的结果相差很大, 甚至可达 30%. 如 Mg 叠加在非常强的 Fe 峰的峰尾上. 厚靶 PIXE 解谱要特别注意这种情况. 表4是目前最常用的几个厚靶 PIXE 解谱软件.

J. L. Campbell 等人^[25]对厚靶 PIXE 分析的最低探测限作过较全面的研究, 他们认为, 如基体元素对特征 X 射线没有贡献, 最低探测限可达 1ppm. 如有贡献则降低到 10 ~ 20 ppm. 对 2MeV 的质子, 探测限最佳元素序数是 30 到 40. 探测限的曲线呈 U 形, 低于或高于最佳元素序数元素的最低探测限会变差.

5 厚靶 PIXE 分析工作的展望

厚靶 PIXE 的定量分析近年来在理论模型、数据的精确性和实验方面等都得到了许多发展, 但是尚有许多工作需要做更深入的研究, 特别是随着微米 PIXE 的厚靶分析应用

的进一步扩大,有许多样品十分复杂.今后,厚靶 PIXE 的工作除了数据、理论模型及实验等方面的发展外,对于样品结构的进一步研究也是一个需要引起广泛重视的问题.对样品具有明显的层结构,但各层的元素分布均

匀的样品,Rickards 和 Ziron^[26]给出了详细的分析方法.但对象矿物中流体包裹体等这样的样品,不但具有层状结构,而且其空间的分布也不均匀的样品还没有令人满意的方法.K.K.Loh 等人^[27]在这方面作了初步的工作.

表4 几个主要的厚靶 PIXE 解谱软件^[28]

软 件	GUPIX	AXIL	PIXAN
拟合过程	NL LSF	NL LSF	NL LSF
薄中厚样	适 用	适 用	适 用
本 底	分析模型	数字过滤	多项或迭代法
计 算 机	VAX, PDPII IBM PC/AT	PDPII IBM PC/XT	VAX, IBM PRIME, IBM PC
主要作者	W. Maenhaut ¹	J. L. Campbell ²	Eric Clayton ³

1 Institut of Nucl. Science, Proeftuinstr 86, B-900 Gent, Belgium

2 Phys. Dept. College of Phys. Science, Univ. of Guelph, Guelph Ontario, Canada N1G 2W1

3 Appl. Phys. Division, Australian Atomic Energy Commission, Private Mail-bag Sutherland NSW 2232, Austrilia

参 考 文 献

- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1984, B3:185
- Orlic I, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1990, B49:166
- Clayton E, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1981, 180:541
- Reis M A, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1992, B68:300
- Dai Zhongning, et al. Chin. Jour. of Nucl. Phys., 1993, 15(2):133
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1983, 212:427
- Andersen H H, et al. Hydrogen Stopping Powers and Ranges in all Elements, The Stopping Power and Ranges of Ions in Matter, Vol. 3, ed. J. F. Ziegler (Pergamon, New York, 1977)
- Basbas G, et al. Phys. Rev., 1973, A7:983
- Brandt W, et al. Phys. Rev., 1981, A23:1717
- Cohen D D, et al. Atom. Data and Nucl. Tables, 1985, 33:225
- Benka O, et al. Atom. Data and Nucl. Data Tables 1978, 22:219
- Paul H, et al. Phys. Reports, 1986, 135:47
- Leroux J, et al. Revised Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients (Cor. Scientifique Claisse Inc., Quebec, 1977)
- Thinh J P, et al. X-ray Spectrum, 1979, 8:85
- Orlic I, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1993, B74:352
- Orlic I, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1987, A276:202
- Cohen D D, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1980, 178:481
- Ahlberg M S, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1977, 142:61
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, B43:539
- Hyvonen-Dabek M, et al. J. Radioanal. Chem., 1981, 63:163
- Clayton E. Nucl. Instr. and Meth., 1981, 191:567
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1990, B50:189
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1985, B12:402
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1986, B14:204
- Campbell J L, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1988, B30:317
- Rickards J, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1987, B29:527

27 Loh K K, et al. Nucl. Instr. and Meth. , 1993, B77: 132

Elemental Analysis (Wiley, Chichester, UK, 1988) P158

28 Johansson S A E, et al. PIXE, A Novel Technique for

Quantitative PIXE Analysis of Thick Samples

Dai Zhongning Ren Chigang

(Department of Physics, II, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract All aspects about quantitative analysis of thick samples including formalism, data base, detector efficiency, charge measurement, calibration of major, minor and trace elements, accuracy and detection limits are reviewed. The development of Fudan university on these areas are also discussed.

Key Words thick samples, PIXE, quantitative analysis.

(上接56页)

位置,呈有序分布^[4],他们的研究结果有力地支持了后一种观点^[5].

仍在不断扩大和深入,并展现出宽阔的应用前景.

4 结束语

上面简述了最近几年来穆斯堡尔效应在地质矿物学中应用的几个主要方面,据提交到1993年8月在加拿大 Vancouver 举行的第22届国际穆斯尔效应应用会议(ICAME'93)上交流的论文数量来看,有关地质矿物学领域的研究论文数仅次于磁学.已有迹象表明,穆斯堡尔效应在地质、矿物学领域中的应用

参 考 文 献

- 1 Hargraves R B, et al. J. Geophys. Res. , 1977, 82: 4547
- 2 Book of Abstracts—ICAME'93 Vancouver: 18
- 3 Da Silva E G, et al. J. Phys. , 1979, 12: 783
- 4 Osborne M D, et al. Contrib Mineral Petrol, 1981, 77: 251
- 5 Chen Y L, Xu B F, et al. Phys. Chem. Minerals, 1992, 19: 255

Current Status of Application of Mössbauer Effect in Geology and Mineralogy

Xu Binfu

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract This paper briefly introduces the current status of the application of Mössbauer effect in geology and mineralogy. It shows that geology and mineralogy are very active fields in the application of Mössbauer effect.

Key Words Mössbauer effect, geology, mineralogy.