

质子、氘和 α 在 Ar 和 Kr 中的 径迹长度测量与计算*

张国辉 唐国有 陈金象 施兆民

(北京大学技术物理系重离子物理研究所, 北京, 100871)

用屏栅电离室对 α 和 p 在 Ar 与 Kr 中到达电离密度重心的径迹长度 \bar{X} 进行了测量, 并根据 Trim 程序和其它文献的阻止本领数据对其进行了计算。理论值与实验结果符合较好。

关键词 屏栅电离室 径迹长度 \bar{X} 实验测量 理论计算

中图法分类号 TL 815 TL 811.1

1 原理

利用屏栅电离室测量中子引起的出射带电粒子核反应数据具有一些突出的优点, 如粒子探测效率高(接近 100%), 探测的立体角接近 2π 可以同时得到粒子角分布、能谱和双微分截面数据; 改变工作气体的气压可适应不同能量和不同种类带电粒子的测量并具有粒子分辨能力。这些优点使屏栅电离室成为测量带电粒子的一种重要手段。

使用屏栅电离室测量中子引起的出射带电粒子的核反应双微分截面时, 需要用到带电粒子在工作气体中到达电离密度重心的径迹长度 \bar{X} 数据^[1]。 \bar{X} 数据精度直接影响到双微分截面的测量精度。在已有的文献中, 未见到有关的计算或测量数据, 在理论和实验上准确地确定不同种类和能量的带电粒子在电离室工作气体(Ar, Kr)中的 \bar{X} 数据具有重要意义。

采用屏栅电离室测量时, 中子入射样品后出射的带电粒子在到达栅极之前被工作气体阻止, 屏栅电离室的阳极和阴极信号分别为^[1]:

$$U_a = E_0(1 - \sigma \frac{\bar{X}}{d} \cos\theta) \quad (1)$$

$$U_c = E_0(1 - \frac{\bar{X}}{d} \cos\theta) \quad (2)$$

其中: E_0 是出射带电粒子的能量; d 是阴极与栅极的距离; θ 是出射方向与法线的夹角; σ 是栅极非屏蔽因子, 由电离室的结构决定, 本电离室的 $\sigma = 0.011$; \bar{X} 是从离子出发点到达电离密度重心的径迹长度, 其定义为:

* 中国核工业总公司和中国核数据中心资助项目

张国辉: 男, 33岁, 原子核物理专业, 讲师, 在职博士生

收稿日期: 1997-07-09 收到修改稿日期: 1997-08-20

$$\bar{X} = \frac{\int_0^R \rho(x) x dx}{\int_0^R \rho(x) dx} \tag{3}$$

其中: $\rho(x)$ 是电离径迹上 x 处的电离密度, x 的坐标原点是离子在样品中的出射点; R 是离子在工作气体中的射程。由于电离密度 $\rho(x)$ 正比于离子在工作气体中的阻止本领 dE/dx , 故式(3)可表示为:

$$\bar{X} = \frac{\int_0^R \frac{dE}{dx}(E_0, x) x dx}{\int_0^R \frac{dE}{dx}(E_0, x) dx} \tag{4}$$

射程与阻止本领的关系为:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{1}{\frac{dE}{dx}(E)} dE \tag{5}$$

2 \bar{X} 的实验测量

一定能量的带电粒子在工作气体中的 \bar{X} 可通过阴极谱测得。由式(2)知: $\theta = 90^\circ$; $U_c(90^\circ) = E_0$; $\theta = 0^\circ$; $U_c(0^\circ) = E_0(1 - \bar{X}/d)$ 。故由 $U_c(90^\circ)$ 、 $U_c(0^\circ)$ 和 d 即可定出 \bar{X} 。

$$\bar{X} = d \frac{U_c(90^\circ) - U_c(0^\circ)}{U_c(90^\circ)} \tag{6}$$

$U_c(90^\circ)$ 对应于阴极谱的上沿, $U_c(0^\circ)$ 对应于阴极谱的下沿。 \bar{X} 的测量归结为阴极谱上下沿的确定。

2.1 α 与 t 在 Ar 与 Kr 中 \bar{X} 的测量

实验要选择适当的气压, 气压过低会使待测离子不能被阻止在阴极的栅极之间; 气压过高会使离子射程很短, 阴极谱变得很窄, 影响 \bar{X} 的测量精度。各极之间电压的选择, 要使电子的收集满足饱和条件和栅极非俘获条件。

分别用 Ar 和 Kr 作屏栅电离室工作气体测量 Pu-α 混合源 (包括 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{234}U 和 ^{244}Cm 4 种核素)、 ^{241}Am -α 源及热中子引起的 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 反应源的阴极-阳极双维谱, 进而得到阴极谱, 并得到相应能量的 α 粒子和 t 在 Ar 与 Kr 气中的 \bar{X} 。

图 1 是 Pu-α 混合源在 0.105 MPa 的 Ar 中测得的双维谱, 图的深浅表示计数的多少。图中包含 4 种能量的 α 粒子。由双维谱可以分别得到每一种 α 粒

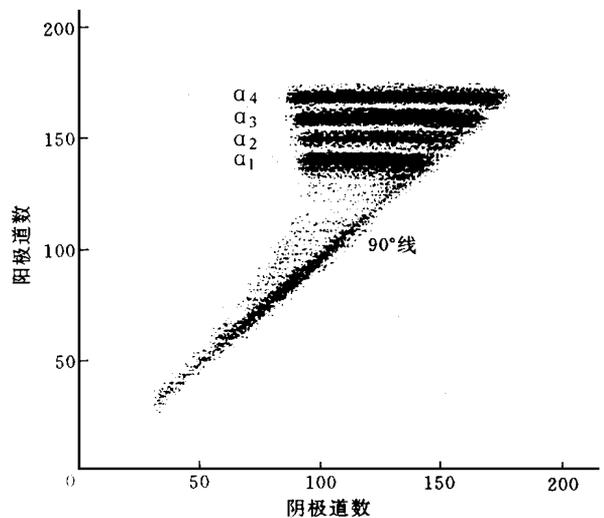


图 1 α 混合源的阴极-阳极双维谱

Fig 1 The two dimensional spectrum from compound α source
工作气体 Ar, 气压为 0.105 MPa, $d = 5.1 \text{ cm}$

子的阴极谱。典型的阴极谱及其前后沿的确定方法示于图 2。

同样可从 ${}^6\text{Li}(n_{th}, t){}^4\text{He}$ 反应双维谱得到 t 的阴极谱, 进而得到其 \bar{X} 值。

2.2 p 在 Ar 与 Kr 中 \bar{X} 的测量

天然单能质子源很难找到, 难以用上述测量 α 和 t 的 \bar{X} 的方法得到质子的 \bar{X} 。可通过反冲质子双维谱和 Pu- α 混合源以及 ${}^6\text{Li}(n_{th}, t){}^4\text{He}$ 双维谱来得到不同能量的质子的 \bar{X} 值。

(1) 在静电加速器上, 通过 D(d, n) 反应产生单能中子, 利用屏栅电离室测量某一能量的中子在聚乙烯薄膜上引起的 $\text{H}(n, p)n$ 反应中反冲质子的双维谱。然后在相同的电子学系统和电离室工作条件下测量 Pu- α 混合源以及 ${}^6\text{Li}(n_{th}, t){}^4\text{He}$ 反应双维谱。

(2) 利用(1)中测量到的 Pu- α 混合源以及 ${}^6\text{Li}(n_{th}, t){}^4\text{He}$ 反应双维谱对谱仪进行能量刻度, 并且确定双维谱上对应于不同能量的阴极谱上沿所连成的 90 线(图 1 中斜线, 找较多个点进行直线拟合以减小误差)。对不同的带电粒子在相同的工作条件下, 其双维谱上 90 线是相同的。已知 90 线, 根据离子的能量或相应的阳极道数即可确定阴极谱上沿。

(3) 利用反冲质子双维谱(典型谱示于图 3) 确定最大反冲能量附近一个很小能量范围内的质子阴极谱下沿。再根据(2)中确定的阴极谱上沿即可得到相应能量质子的 \bar{X} 。

2.3 \bar{X} 测量误差分析

为了便于和理论结果进行比较, 将测量的结果换算成带电粒子在 0.1 MPa 的 Ar 与 Kr 中的 \bar{X} 值:

$$\bar{X} = p \cdot d \cdot \frac{U_c(90^\circ) - U_c(0^\circ)}{U_c(90^\circ)} \quad (7)$$

其中: p 是工作气体压强(以 0.1 MPa 为单位)。由上式进行误差分析, 结果列于表 1。

表 1 \bar{X} 测量误差分析

Table 1 Error analysis for measured \bar{X}	
误差来源	误差参考值/%
阴极谱上沿	2
阴极谱下沿	3
上沿的 0 道误差	2
d 的误差	1
气压值的误差	2.5
总误差	7

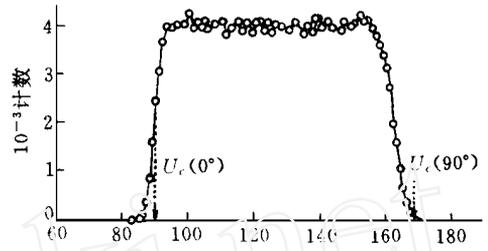


图 2 图 1 中 α 的阴极谱及其上下沿的确定方法

Fig 2 Cathode spectrum of α in Fig 1 and the method for $U_c(0^\circ)$ and $U_c(90^\circ)$ determination

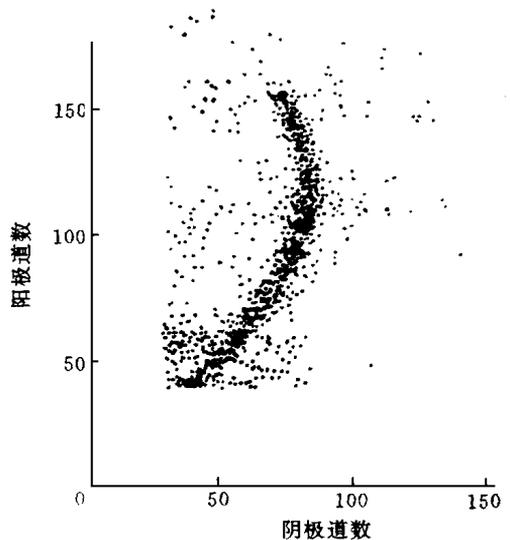


图 3 4.1 MeV 中子引起的反冲质子双维谱

Fig 3 The two dimensional spectrum for recoil protons induced by 4.1 MeV neutrons
工作气体 Ar, 0.6 MPa, $d = 4.35$ cm

3 \bar{X} 的理论计算

实验只能测量离子个别能量的 \bar{X} 值。要得到一组系统的数据还需要进行理论计算并与实验结果进行比较。由式(4)可以根据离子在气体中的阻止本领 dE/dx 得到 \bar{X} 值。阻止本领的数据可使用有关程序(如 Trim)算得或从有关文献^[2]查得。由于本工作使用 Trim 程序算得的以及从文献中得到的阻止本领是离子在工作气体中能量 E 的函数,所以式(4)需要改写,将变量 x 换成离子能量 E ,并考虑到式(5)可得:

$$\bar{X} = R - \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} \left[\int_0^E \frac{1}{dE(E)/dx} dE \right] dE \quad (8)$$

其中第一重积分的上限是第二重积分的变量。

由式(5)、(8),可根据离子在工作气体中的阻止本领随离子能量的变化关系(阻止本领-能量表)得到相应于能量 E_0 的射程 $R(E_0)$ 和 $\bar{X}(E_0)$ 。

4 结论

4.1 计算值与实验结果的比较

使用由 Trim 程序计算得到的 α p 和 t 在 Ar 与 Kr(0.1 MPa)中的阻止本领数据,计算了 α t(0.25~30 MeV)以及 p(0.25~10 MeV)在 Ar 和 Kr 中的 \bar{X} 数据。由图 4 可见, α p 与 t 3 种离子在 Ar 与 Kr 两种工作气体中的 \bar{X} 数据的实验值与计算值符合很好。在计算 \bar{X} 的同时也对射程进行了计算,计算的射程与 Trim 的射程非常接近。

4.2 用其它文献中的阻止本领数据计算的结果

用文献[2]的阻止本领数据对 α 与 p 在 Ar 与 Kr 中的 \bar{X} 数据进行了计算。与用 Trim 的阻止本领计算结果相比,除了在很低的能量范围内(E_p 1.5 MeV, E_α 3 MeV)两种计算结果差别稍大以外,其它相差在 3% 以内。文献[2]给出的阻止本领数据点要比 Trim 给出的点少得多。

4.3 不同离子 \bar{X} 之间的关系

不同离子在同种物质中的阻止本领之间满足一定的关系,对于 α p 与 t,有

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_t (3E) = \left(\frac{dE}{dx} \right)_p (E) \quad (9)$$

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_\alpha (4E) = 4 \left(\frac{dE}{dx} \right)_p (E) \quad (10)$$

由(9)、(10)两式,结合(5)、(8)式,可得:

$$\bar{X}_t(3E_0) = 3\bar{X}_p(E_0) \quad (11)$$

$$\bar{X}_\alpha(4E_0) = \bar{X}_p(E_0) \quad (12)$$

用 Trim 的阻止本领结果算得的 α p 与 t 的 \bar{X} 与式(11)、(12)两式的结果相符,除了在很低的能区(E_p 1 MeV, E_t 3 MeV, E_α 4 MeV)外,误差在 1% 以内。因此,计算和测量的 \bar{X} 数据结果是可靠的,为今后的屏栅电离室工作奠定了一定的基础。

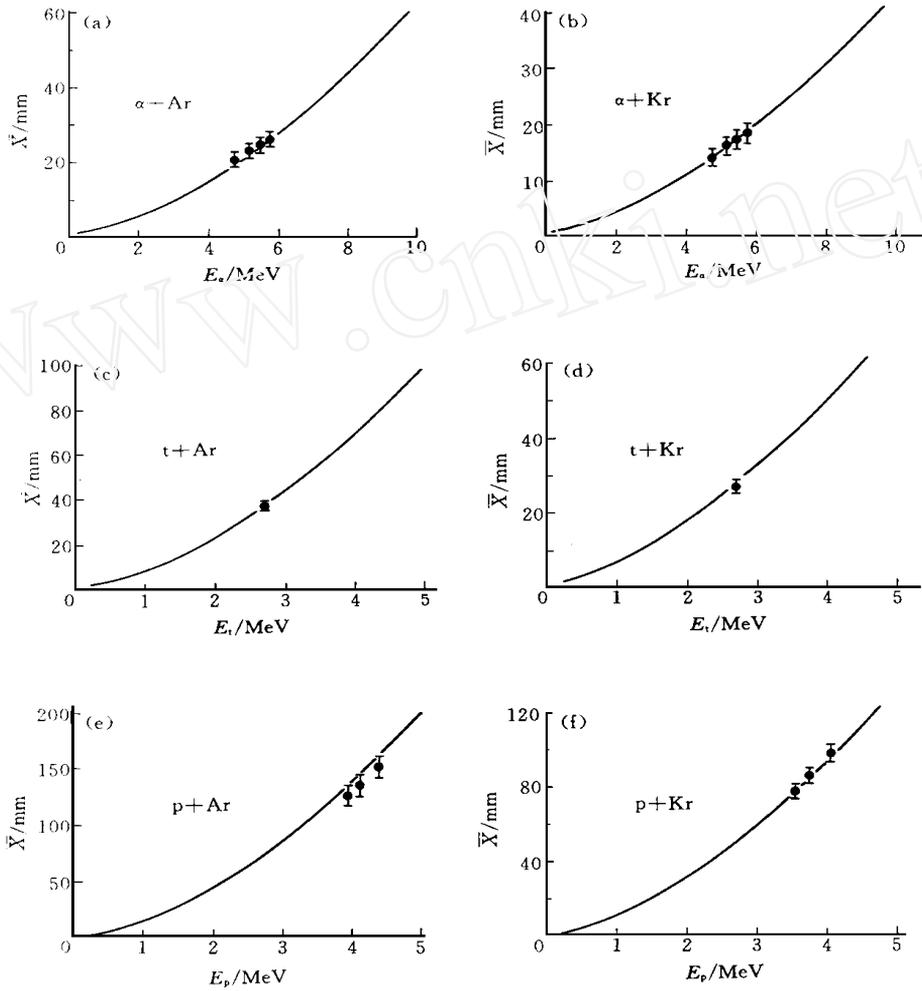


图4 α p 与 t 在 Ar 与 Kr 中的 \bar{X} 数据测量与计算结果的比较

Fig 4 The comparison of measurement and calculation of \bar{X} for α p and t in Ar and Kr
实线——计算值; ————测量值

参 考 文 献

- 1 Budtz-Jørgensen C, Knitter HH, Straede CH, et al A Twin Ionization Chamber for Fission Fragment Detection Nucl Instrum Methods, 1987,A 258: 209
- 2 Northcliffe LC, Schilling RF. Range and Stopping-power for Heavy Ions Nuclear Data Tables, 1970, A 7: 252

THE MEASUREMENT AND CALCULATION OF TRACK LENGTH \bar{X} FOR PARTICLES p, t AND α IN Ar AND Kr

Zhang Guohui Tang Guoyou Chen Jinxiang Shi Zhaomin

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing, 100871)

ABSTRACT

Using the gridded ionization chamber, the track length \bar{X} data for particles α , p and t in Ar and Kr are measured. These data are calculated using the stopping power data from the program Trim and other reference. The measurement and the calculation are in good agreement.

Key words Gridded ionization chamber Track length \bar{X} Measurement Calculation

“生命科学中的核分析方法”国际会议

由中国原子能科学研究院主办, 国际原子能机构协办的第六届“生命科学中的核分析方法”国际会议于1998年10月26日至30日在北京召开。国际学术委员会主席 Zeisler (蔡斯勒) 和国际原子能机构代表 Parr (铂尔) 分别在开幕式上致辞。

本次会议分痕量分析的质量保证、质量控制和标准物质研究、元素化学种态和微区分析、与健康关联的环境研究、核分析和相关分析技术的最新发展、痕量元素与疾病和健康的关联五个专题, 这些专题很好地反映了本领域的最新进展和发展趋势。

核分析方法以其高灵敏度、高准确度、非破坏性、多元素等固有特点, 在生命科学及其他领域发挥了不可替代的作用。我国核分析研究始于60年代, 现已取得了一批具有国际先进水平的重要成果。中国原子能科学研究院的核分析实验室在核分析方法学及其在生命科学、环境科学、地球和宇宙科学、材料科学、考古学、法医学等领域的应用研究取得了多项重要成果并获得5项国家级奖。

“生命科学中的核分析方法”国际会议是一个系列性国际会议, 我国是第一个主办这一系列会议的亚洲国家。

摘自中国原子能科学研究院《原子能院报》