

# 用 $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$ 反应分析氢分布

钱思天 2001112187

2021 年 5 月 25 日

## 摘要

氢存在与空气中。在常温下，氢就可以扩散到大多数金属中，使金属的各种性能发生变化。长期以来，用常规方法很难分析样品中的氢分布状况。加速器技术和重离子核反应技术的发展和运用，使无损分析样品中的不同深度处氢的分布状况成为可能。由于入射粒子只与靶样品中的氢发生共振核反应，靶样品中其它元素对氢含量分析没有影响，因此这种方法灵敏度高，也比较准确。本实验利用了  $2\times 1.7\text{MV}$  加速器，通过测量  $^{19}\text{F}^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  的共振核反应放出的光子，测量了样品中混有的氢杂质的分布。

关键词：核反应、 $2\times 1.7\text{MV}$  加速器、氢分布

## 1 实验原理

氢存在与空气中。在常温下，氢就可以扩散到大多数金属中，使金属的各种性能发生变化；例如钢中含氢导致氢脆现象。其他材料中氢含量的多少也影响其性能。因此，了解材料中氢的存在和分布状况，在冶金、矿物、半导体、能源、材料等领域的研究中都很重要。

长期以来，用常规方法很难分析样品中的氢分布状况。加速器技术和重离子核反应技术的发展和运用，使无损分析样品中的不同深度处氢的分布状况成为可能。由于入射粒子只与靶样品中的氢发生共振核反应，靶样品中其它元素对氢含量分析没有影响，因此这种方法灵敏度高，也比较准确。

### 1. 共振核反应的选择

本实验采用  $^1\text{H}(^{19}\text{F},^{16}\text{O}^*)\alpha$  共振核反应来测量氢在样品中的分布。入射粒子  $^{19}\text{F}$  轰击靶核  $^1\text{H}$  发生核反应，生成处于激发态的  $^{20}\text{Ne}$  核；它退激后发射  $\alpha$  粒子和处于激发态的  $^{16}\text{O}^*$  核， $^{16}\text{O}^*$  核退激后回到基态，同时发射  $\gamma$  光子。该共振反应的末态粒子有  $\alpha$  粒子和  $\gamma$  光子。由于  $\alpha$  粒子阻止本领较大，测量必须在真空中进行；因此我们在实验中只测量  $^{16}\text{O}^*$  核退激发射的  $\gamma$  光子产额，以确定样品中氢的含量。探测  $\gamma$  光子的探测器可以放在靶室之外。

反应截面随入射粒子能量变化的曲线称为核反应的激发曲线。对应不同的入射 F 离子能量，该核反应有两个主要的共振峰，分别在 6.42MeV 和 16.44MeV。共振峰的形状可用 Breit-Wigner 公式描述：

$$\sigma(E) = \frac{\sigma_R}{1 + \frac{(E-E_R)^2}{\Gamma^2/4}} \quad (1)$$

式中  $\Gamma$  为共振峰宽度， $E_R$  为共振能量， $\sigma_R$  为共振截面。

实验采用 6.42MeV 的共振  $\Gamma = 55\text{KeV}$ ,  $\sigma = 0.1\text{b}$  测量氢分布。6.42MeV 的共振核反应产生的  $^{16}\text{O}$  处于激发态，退激时发出能量分别为 6.13 6.92, 7.12MeV 的  $\gamma$  光子，如图三所示。这三支  $\gamma$  光子的分支比比值为：

$$\begin{aligned} \gamma_1 : \gamma_2 : \gamma_3 &= 2.8 : 0.016 : 0.075 \\ &\approx 97\% : 0.5\% : 2.5\% \end{aligned} \quad (2)$$

因此我们可以忽略  $\gamma_2$  和  $\gamma_3$  的贡献，测量时主要记录能量 6.13MeV 的  $\gamma_2$  光子。

采用 6.42MeV 的共振核反应，可以测量较厚度处的氢分布，因为相邻共振峰相距较远，不会相互影响。另外， $^{16}\text{O}$  退激发出的  $\gamma$  射线能量较高，本底干扰很小，可以忽略入射离子与除氢以外其它核子发生核反应所放出的  $\gamma$  射线的影响。同时，也可以提高束流以缩短测量时间，而不影响测量精度。但 6.42MeV 的共振峰有一定的宽度，因此深度分布的测量精度不是很高，约为 200Å 至 300Å。

## 2. 氢分布分析原理

入射能量为  $E_0$ （高于共振能量）的氟离子打到待分析的样品上，进入样品后逐渐损失能量。设在深度为  $x$  处，F 离子的能量损失了  $\Delta E$  后变为  $E$ 。

- (a) 氟离子只在其能量为共振能量  $E_R$  时，才和样品中所含的氢发生核反应。入射能量  $E_0$  ( $> E_R$ ) 的氟离子在进入样品一定深度（设为  $x$ ）后，能量降为  $E_R$ ，这时它和该深度处的氢发生反应。即

$$E = E_0 - \Delta E \approx E_0 - \left| \frac{dE}{dx} \right| \times x = E_R \quad (3)$$

因此，发生氢反应的深度  $x$  为

$$x = \frac{E_0 - E_R}{|dE/dx|} \quad (4)$$

氟离子束流能量  $E_0$  和加速器高压的关系为  $\text{HV} \times (4 + 1)\text{MeV}$  设  $(dE/dx)$  的单位为  $(\text{eV}/\text{\AA})$ ，则

$$x(\text{\AA}) = \frac{[\text{HV} \times (4 + 1) - 6.42] \times 10^6 (\text{eV})}{|dE/dx| (\text{eV}/\text{\AA})} \quad (5)$$

依次改变加速器束流能量 HV，不同入射能量的氟离子就和不同深度处的氢发生反应，记录反应后产生的氧激发态退激  $\gamma$  光子产额，就可以得到样品中的氢分布情况。

- (b) 含量分析：

如前所述，实验时记录氧激发态发出的 6.13MeV 的  $\gamma$  光子，多道谱记数能量区间取为 3 – 7MeV。对应每一个高压（或氟离子入射能量）的测量点，记数时取确定的束流积分电荷；也就是每个测量点对应同样数量的入射氟离子。这样，在入射离子数一定、反应截面一定的条件下，记录到的  $\gamma$  光子越多，说明样品中的氢含量越多，即氢含量正比于在上述区间内记录到的  $\gamma$  光子数。假设标准样品中，氢沿深度均匀分布，且氢含量  $C_{st}$  已知，测量得到  $\gamma$  光子记数为  $N_{st}$ 。测量未知样品得到  $\gamma$  光子记数为  $N$ ；则待测样品的氢含量为

$$C = C_{st} \times \frac{|dE/dx|_{E=E_R} \times N}{|dE/dx|_{st; E=E_R} \times N_{st}} \times \frac{\rho_{st}}{A_{st}} \times \frac{A}{\rho} \quad (6)$$

式中  $dE/dx_{E=E_R}$  为粒子能量为  $E$  时在靶物质中的阻止本领， $\rho$  和  $A$  分别为物质的密度和原子序数，下标  $st$  表示标准样品。

## 2 实验介绍

### 2.1 实验操作

1. 把样品装在靶盘上，装进靶室，并抽真空，接好线。靶室上接好“束流”线（通束流积分仪）和“抑制”线，“抑制”加-270V。使 BGO 探测器对准靶室窗，并加高压至 580V-600V（调节钮读数约 4.0 格）。
2. 测本底，作能量刻度。

在实验室及周围环境中，普遍存在着放射性核素钾 40 和铊 206 的本底，它们发出的  $\gamma$  光子具有确定的能量，分别为 1460.7 keV 和 2614.3 keV，可以被我们所用的 BGO 探测器探测到。从多道谱上我们可以确定这两个本底峰对应的道数。设能量-道数是线性关系，则由这两个点可以定出一条直线，这样就可以进行能量-道数的互相转换。

### 3. 测量标准样品。

我们用 Maestro 软件作数据获取，用束流积分仪控制记数的开始和停止（设置：“Services”；-> “Job” -> “Control” -> “D:User” -> “GATEON.JOB” -> “OK”）。根据上面本底测量定出的能量-道数关系，在多道上选取对应 3–7MeV 的道数区间，落在该区间的  $\gamma$  光子将被记数。我们所用的标准样品中，所含的氢均匀分布在约 2 $\mu$ m 的非晶硅层，该层是在单晶硅衬底上通过辉光放电沉积而成的。给定的标准样品中含氢的原子比为 13.9%。

测量时，每个点束流积分取 15 – 20 微库，高压从 1.30 开始取 5 个点，对应样品表面以内 5 个不同深度。5 个点的平均记数作为标准样品的记数  $N_{st}$ 。在每个测量点，分别记录高压值、 $\gamma$  光子在 3 – 7MeV 区间内积分记数、测量时间、束流积分 ( $\mu$ C) 和流强 (nA)。

### 4. 测量未知含量样品。

未知样品表面大多含氢，可测到一个表面峰。有的样品内部也有氢分布。测量时从高压 1.26 开始。

## 3 实验记录与数据处理

### 3.1 刻度

直接测量环境本底得到的两个峰的测量结果如表1。

表 1: 利用环境本底进行标定结果

Isobar	Position	Energy[MeV]
40K	71.58	1.4607
208Tl	126.87	2.6143

利用测量结果，将 160 – 350 道作为目标  $\gamma$  光子的计数区段。

### 3.2 标样的测定

标样的测量结果记录如表2。后续会采用标样的平均计数作为标样的计数值。

表 2: 标样的测量结果

HV[MV]	I[nA]	t[s]	N
1.30	350	50.60	1467
1.35	450	43.08	2177
1.40	460	39.78	2267
1.45	480	38.28	2394
1.50	500	37.90	2378

3.3 样品 10 的测量结果

样品 10 的测量结果记录如表3。因为样品 10 是不锈钢，所以在后面的分析中，采用的成分为：Fe 71%, Cr 19%, Ni

表 3: 样品 10 的测量结果

HV[MV]	I[nA]	t[s]	N
1.26	2.85	75.48	89
1.30	2.85	77.82	956
1.34	2.90	72.42	1138
1.38	2.95	69.70	1078
1.42	2.90	72.00	750
1.46	2.90	71.66	282
1.50	2.90	71.24	116

10%，密度为 7.39g/cm<sup>3</sup>。

3.4 氢含量分析

直接计算，可以得到氢含量的分布表4及图1。

表 4: 不同深度的氢含量计算表

HV[MV]	N	Depth[Å]	H Percent
1.26	89	-317.32	0.79%
1.30	956	226.98	8.43%
1.34	1138	806.89	10.03%
1.38	1078	1376.05	9.51%
1.42	750	1896.76	6.61%
1.46	282	2362.91	2.49%
1.50	116	2861.96	1.02%

4 致谢

感谢赵捷老师和徐川老师的帮助和指导。

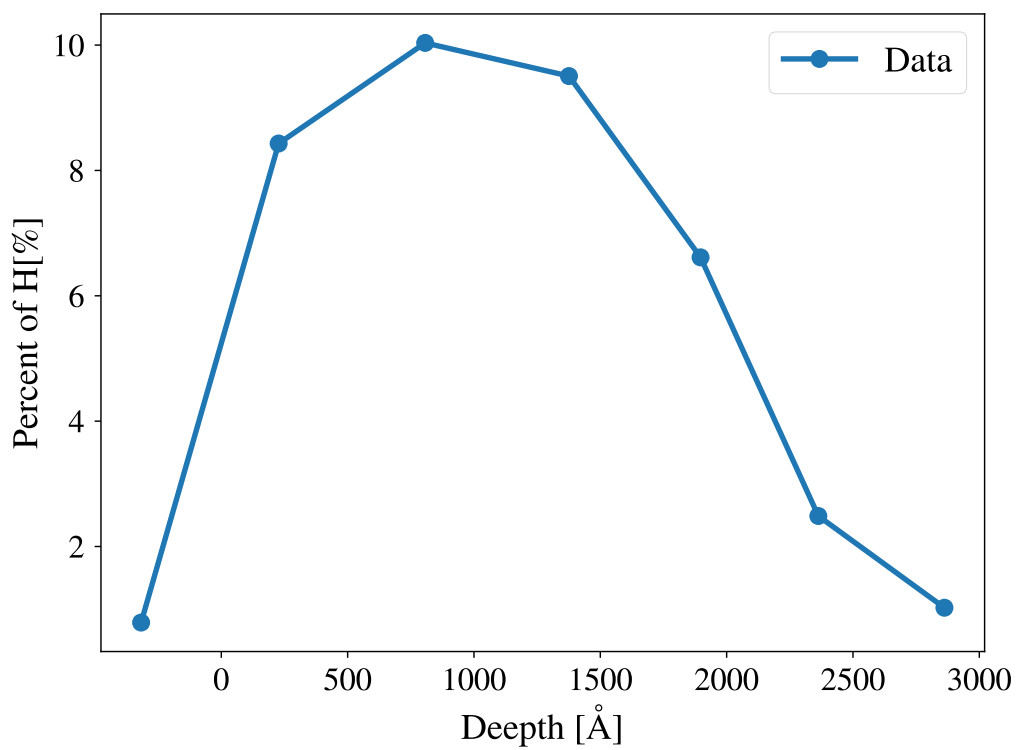


图 1: 不同深度的氢含量计算图