

优质热中子束技术

周春梅

(中国科学院原子能研究所)

优质热中子束技术是五十年代出现^[1]的中子实验测量的有用技术之一,今天仍受到重视并得到引人注目的发展^[2]。它的特点是,在反应堆孔道外能获得 γ 射线本底、超热中子和快中子本底都很低的较强热中子束(简称优质热中子束)。它是应用研究和基础研究的重要中子源之一。

一、获得优质热中子束的基本方法

归纳起来,获得优质热中子束与中子源、准直器、单晶体过滤器、中子导管以及屏蔽与捕集器等部分的性能有关,其中中子源具有的特点是重要的,它决定其它部分在获得优质热中子束中所起的作用。

1. 中子源

增加反应堆中子的通量是获得优质热中子束的重要条件。

供实验用的堆中子源有热柱,切线孔道和径向孔道三种中子束。

(1) 热柱中子束

热柱束的快中子和 γ 射线本底较低。对于多数需用中等强度的热束实验来说,热柱束是合适的,经简单准直后可供应用。但热柱束通量比慢化区的小很多,因此不能由热柱得到强热中子束。

(2) 切线孔道中子束

切线孔道中子通量比热柱的高得多。但是,超热中子和快中子本底以及 γ 射线本底也相当高。对获得优质热中子束来说,设法降低

这些本底是极重要的。

(3) 径向孔道中子束

各孔道中,径向孔道的中子通量最高。但是, γ 射线和快中子本底都非常高。只有采用特殊方法才能消除本底。这些方法就是下面要介绍的单晶体过滤器,中子导管,或者是这两者的结合。

2. 准直器

主要有聚焦准直器和直通准直器。直通准直器较简单,也常用,是我们比较熟悉的。需作重点介绍的是聚焦准直器。聚焦准直器的原理是简单的,即中子的小角度散射。中子(特别是慢中子)具有光的特性——反射,折射和衍射等现象。因此,中子入射到中子反射镜上会发生反射和折射。定义中子反射镜出现中子全反射的角度为反射临界角,

$$\theta_c = \lambda(Na/\pi)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\lambda = h(2mE)^{-1/2}, \quad (2)$$

θ_c 为临界角, λ 为中子波长, a 为相干散射幅度, N 为每立方厘米体积的原子数目, m 为中子质量, E 为中子动能, h 为普朗克常数。如

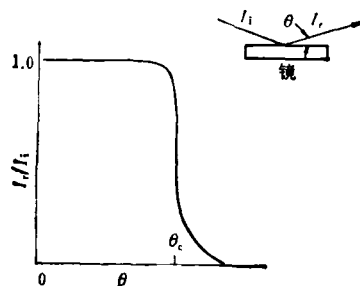


图1 单能入射中子束的镜面反射强度^[3]

图1所示,对于理想的平面中子反射镜,当 $\theta \leq \theta_c$,反射系数 $I_r/I_i = 1$, I_r 为反射中子强度, I_i 为入射中子强度.因此,可利用中子的反射性质制作中子反射聚焦镜系统,把中子束聚集在一点(或一平面).中子反射镜是在玻璃上蒸一层中子反射层制成的;反射层多用金属镍(Ni),因镍的相干散射幅度较大^[4]($\sim 10 \times 10^{-23}\text{cm}$).中子反射镜有平面的和弯面的两种.图2表示安装在荷兰佩特滕高中子通量堆上的

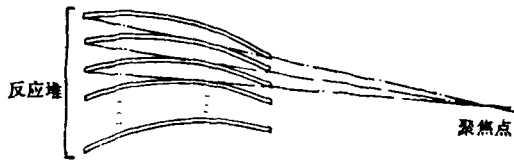


图2 安装在荷兰佩特滕高通量堆上的弯中子反射聚焦镜系统原理^[1]

弯面中子反射聚焦镜系统的原理.与直通准直器相比较,聚焦准直器的最明显优点是聚焦点(或面)上的中子通量有明显的提高,如在布鲁克海汶高通量堆上安装的垂直聚焦准直器中子强度比直通准直器的高3.5倍^[2],这相当于反应堆功率由4000kW提高到14000kW.

安装中子准直器的主要目的是获得确定方向的中子束和减少本底的影响.另一方面,也应注意,实际的准直器也同样受中子作用,它也产生次级散射中子和 γ 射线,这也是本底的一个来源.但是它是按距离平方成反比的规律减弱的.而被准直的初级中子束不会有较大的角散度,该强度完全不按距离平方成反比规律减弱,而是随距离的增加略有一些减弱的,因此,可适当选择距离来减少来自准直器本底的影响,由此也可获得较好的信号本底比.此外,在准直器末端应使用 ${}^6\text{LiCO}_3$ (或 ${}^6\text{LiF}$)和Pb作屏蔽体,以便屏蔽散射中子和 γ 射线.中子和空气发生吸收和散射作用也引起热中子束强度减弱.通常情况下,穿透一米厚空气后的热中子束强度减弱6%,这也是本底的来源之一.如准直器较长,应把准直器抽成真空;若抽真空有困难,充氮气也是有效的.

3. 单晶体过滤器

单晶体过滤器是消除堆芯 γ 射线、超热中子和快中子本底的有效方法之一.单晶体中子过滤器原理也简单.单晶体慢中子全截面主要由中子的俘获、非相干散射、劳厄-布拉格散射和热扩散散射等部分组成.如果所采用的晶体有很小的中子俘获和非相干散射截面,又不是顺磁物质,它的全截面主要由劳厄-布拉格散射和热扩散散射决定.实验^[6]表明,该单晶体的慢中子全截面随晶体温度的下降和中子波长的增加(中子能量的减小)而减小到极小,然后又按 $1/v$ 斜率规律逐渐上升形成“中子截面窗”.短波长(共振)中子的热扩散散射截面接近自由原子的散射截面.穿透单晶体后的中子能谱主要是由热扩散散射过程决定的.处于低温(液氮温度)状态下的单晶体慢中子全截面比共振中子(或快中子)的小得多,因此可用具有这种“中子截面窗”的单晶体作长波(热)中子穿过滤器^[4,6].图3表示不同温度下石英(SiO_2)单晶

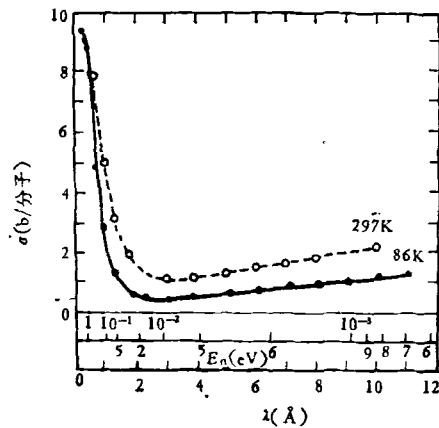


图3 单晶石英(SiO_2)分子中子全截面随中子能量 E_n (波长 λ)和温度的变化^[6]

体分子中子全截面随中子能量(波长)的变化.通常采用铋(Bi)、石英(SiO_2)、氧化镁(MgO)、硅(Si)等单晶体作过滤器;并把冷却到液氮温度,以便减少热扩散散射截面(如图4).这种过滤中子束装置不仅对热中子有很大的穿透能力,而且对 γ 射线和快中子也有很强的衰减作用.图5所示的是在不同温度下单晶硅(Si)

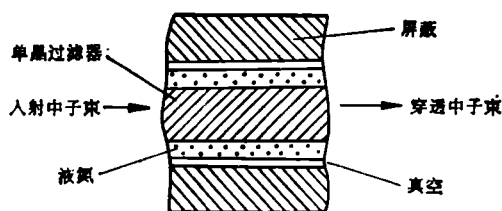


图4 单晶中子过滤器装置原理示意图

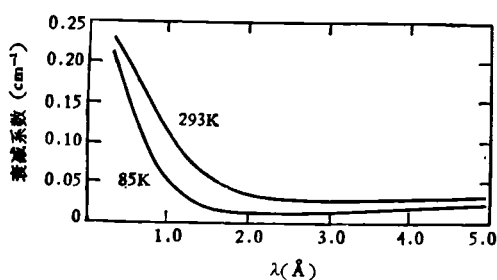


图5 不同温度下单晶硅(Si)的中子衰减系数曲线^[7]

对不同波长中子的衰减系数。对衰减 γ 射线来说,采用高原子序数单晶体作过滤器是有利的,如用液氮冷却的长40cm铋(Bi)单晶过滤器的热中子穿透率为0.1—0.3(与单晶体的结晶完好程度有关),对2MeV的 γ 射线和快中子的衰减分别为 4×10^{-8} 和 2×10^{-4} ^[8]。

4. 中子导管

由上所述,中子反射镜对小于和等于中子反射临界角的人射慢中子具有全反射的特性。中子导管就是利用这个原理制成的。中子导管和我们熟悉的光导管相似,通过中子在中子导管内的多次反射作用实现中子传导。中子导管的主要特点是被传导的中子与中子反射临界角有关。由公式(1)和(2)可知,只有慢中子(热中子和冷中子)反射损失小(对玻璃蒸镍的中子导管,每米反射损失约1—2%)^[2],因此,中子导管只能把热中子传到远处。但是,快中子和 γ 射线是按距离平方成反比的规律减弱的。

中子导管有直通导管和弯曲导管两种。直通导管的结构是笔直的,利用导管把热中子传到远处,而用远距离来减弱快中子和 γ 射线的本底,如宽和高为2cm,20m长的直通导管能把较高能量本底与热中子成分之比减弱30

倍^[2]。弯曲导管的结构是弯的,导管弯曲后能消除来自堆芯的 γ 射线和快中子本底,使热中子束品质会有明显提高,但其弯曲半径相当大,例如对2cm宽的中子孔道束的中子导管,弯曲半径约50m^[2]。

5. 探测器屏蔽和中子捕集器

合理设计探测器屏蔽体和中子束捕集器也是重要的。如同准直器那样,它们不仅屏蔽和吸收射线,而且也是本底的来源之一。例如,当中子束穿透测试样品并到达中子束捕集器时,不可避免地会发生射线(中子和 γ 射线)的大角度散射,为减少这种本底,捕集器应合理设计,使射线散射的逃脱几率(或立体角)尽可能小;于是,中子束应经过深的和窄的孔道进入捕集器内部。探测器屏蔽体也会出现一些次级辐射过程,如康普顿散射、中子非弹性散射、慢中子俘获和X射线荧光等。屏蔽体的一个极端情况是紧密屏蔽,即屏蔽体紧密包围住探测器,这可能是本底的重要来源。比较好的方法是建一个适中的屏蔽“小屋子”,把样品和探测器置于“小屋子”中间,对从屏蔽内墙散射的射线,探测所张立体角比紧密屏蔽情况的小得多。

二、优质热中子束装置及其特性

设计优质热中子束装置时,应把上述的五个主要因素进行分析和权衡。一般做法是以获得优质热中子束的关键设备为依据来划分装置。归纳起来,主要有单晶体穿透过滤器和中子束导管两种装置。对这两种装置,获得优质热中子束的机制是不同的,但是都可看作为慢中子(长波中子)通带滤波器。这两种装置都具备准直器,屏蔽和中子束捕集器等几部分;但是,对具体的装置来说,它们可能会有相当大的差别。这两种装置各有其特点:

1. 单晶体穿透过滤器

该过滤器的长度较小(一般几十厘米),体积也小,所占空间较小,设备简单,可应用于准

直较差的发散的中子束。但穿过滤器后热中子束的强度减弱较大。如加拿大巧克河 NRU 反应堆热柱孔道 ($\sim 10^8/\text{cm}^2\cdot\text{s}$) 安装的冷却到 77K (液氮温度) 的, 由长为 15cm 的铋 (Bi) 和长度可调到 30cm 的石英 (SiO_2) 单晶体组成的过滤装置可得到 $\sim 10^7/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 的过滤中子束 (离反应堆外壳 5.4m 远), 过滤中子束辐比超过 $10^{6[9]}$ 。目前, 这种装置应用得较广。

2. 中子导管

一般说来, 中子导管的长度为几米到几十米, 它所占的空间大, 因受中子反射临界角所限 (对玻璃蒸镍导管, $\sim 0.15^\circ$), 适用于准直较好 (基本上不发散) 的热中子束。它的显著特点是能弯曲和传的距离较远, 同时又基本上不损失热中子束。如安装在日本京都大学 5000kW 功率的游泳池反应堆上的弯曲中子导管^[10] (横截面 $1\times 7\text{cm}$, 长 10.8m, 弯曲半径 833m), 其中子能量比热中子麦克斯韦分布峰位略低一些, 束流强度为 $1.2\times 10^6/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 。它能有效地去掉堆芯 γ 射线和超热中子的本底。目前, 这种装置用得并不广, 原因不清楚。从发展的角度来看, 中子导管装置是获得优质热中子束的好装置, 是有生命力的。

三、应用

优质热中子束作为热能中子源, 它基本上可以用于现有热中子源所能进行的各种实验测

量工作。正因为它具有独特的优质强流的特性, 特别适合于进行小反应截面事件 (中子辐射俘获 γ 射线检验量子电动力学的实验^[11] 和极化中子俘获 γ 射线圆偏振度的实验^[9]) 测量; 小样品量的稀有或放射性同位素核数据的测量^[12]; 痕量元素瞬发中子活化分析, 中子散射和中子衍射研究物质结构和磁性材料的实验; 以及核结构、核衰变和核反应机制研究等方面的工作。以上的中子实验测量课题都有提高效应本底比的问题, 优质热中子束的获得为这些实验测量工作提供了重要的条件。

参 考 文 献

- [1] B. N. Borockhouse, *Rev. Sci. Instr.*, **30**(1959), 136.
- [2] W. K. Kane, *Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Proc. 3rd Int. Symposium*, (1978), 480—494.
- [3] D. J. 休斯著, 洪永炎译, 中子光学, 上海科学技术出版社, (1963), 39.
- [4] D. J. 休斯著, 洪永炎译, 中子光学, 上海科学技术出版社, (1963), 56.
- [5] F. Stecher-Rasmussen, *Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Proc. 2nd Int. Symposium*, (1974), 718.
- [6] B. M. Rustad et al., *Rev. Sci. Instr.*, **36**(1965), 49.
- [7] O. H. Ефимович и др., *ПТЭ*, **3**(1975), 50.
- [8] H. Maier-Leibnitz et al., *Reactor Science and Technology*, **17**(1963), 217.
- [9] M. A. Lone et al., *Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Proc. 3rd Int. Symposium*, (1978), 678.
- [10] S. Sakamoto, *ibid.*, (1978), 737.
- [11] H. C. Lee, *ibid.*, (1978), 353.
- [12] R. F. Casten, *ibid.*, (1978), 59.

电致发光 (EL) 矩阵屏周边驱动电路的研究

刘天夫 杨忠义

(中国科学院长春物理研究所)

目前我国研制的 AC-EL 矩阵屏, 存在着亮度低、驱动电压高等方面的缺点, 妨碍了它在显示现象方面的应用。针对上述缺点, 本文利

用电磁谐振原理, 在 EL 周边电路中加固定电感补偿, 从而得到 EL 亮度提高、驱动电压显著降低的效果。