

# 脉冲散裂中子源的应用

沙 因

## 一、从高通量堆到脉冲散裂中子源的发展

自从1932年英国人查德威克发现中子以来,随着对中子基本性质及其与物质相互作用研究的深入,有关中子及其实验技术的应用也日益广泛进入人类社会生活并起着重要作用。例如,中子致铀裂变的核能发电站、原子能破冰船、核潜艇和核动力航空母舰的利用以及核武器的生产,这些都是人们所熟悉的。另一方面,中子作为凝聚态物质研究的特殊实验工具的意义也愈来愈被人们所认识。这些研究涉及到许多科学技术领域,例如物理、化学、地质、冶金、材料等学科,也影响到经济的发展。自60年代以来,世界上技术先进的国家为了进行上述研究工作争相发展强度越来越高的中子源。最初,人们很自然地采用反应堆裂变中子并设法提高它的强度,所以着眼于建造高通量的反应堆(简称高通量堆)。1972年建成的法国劳·郎之万研究所高通量堆(以下简称为ILL)是目前世界上最强的中子源,它可提供 $1.2 \times 10^{15}$ 中子/厘米<sup>2</sup>·秒的中子通量。近年来,每年在它上面进行六、七百项研究工作,内容十分广泛。现在,许多学科又要求更高的中子通量,但是由于费用昂贵和散热问题的工程限制,使得进一步提高高通量堆的中子通量变得很困难。人们注意到,在很多的中子应用实验中,需要选定中子能量,而选择反应堆热中子能量最有效的方法是所谓中子飞行时间法。在这个方法中,人们把时间连续的热中子调制成脉冲状态,所以绝大部分的中子被浪费了,只有在很窄的脉冲范围内的中子才是有效的。换句话说,在这类实验中,反应堆的功率绝大部分是无效功率。

然而近代的加速器可以提供脉冲化的束流,人们可以根据需要调制脉冲的宽度、强度和频率,在很短的时间间隔内(如小于1微秒)获得很强的束流,而束流的平均功率却相当低。用加速器脉冲束流轰击适当的靶产生的次级中子也是脉冲式的,人们称它为加速器脉冲中子源。这类中子源可以十分有效地满足实验要求。加速器脉冲中子源有两种。一种是电子直线加速器中子源,它利用电子直线加速器提供的能量为30兆电子伏特以上(一般用~50兆电子伏特)的电子束,轰击重元素靶所产生的韧致辐射通过( $\gamma, n$ )反应可以产生很多中子,所以又把这种中子源叫作光激中子源。另一种是脉冲散裂中子源,这是一种可望比高通量堆中子通量强得多的新型中子源。它用从质子同步加速器引出的、能量约为几百兆电子伏特到一千兆电子伏特左右的质子去和重元素(如铀、铅、钨、钼等)靶核碰撞,从而轰击出大量中子。每个质子约可产生20—70

个中子。这种碰撞过程所发生的反应叫做散裂反应,利用散裂反应原理做的中子源便叫做散裂中子源。人们把以脉冲方式工作的散裂中子源称为脉冲散裂中子源。

当前正在建造的美国阿贡实验室强脉冲中子源-11(以下简称为IPNS-11),用能量为800兆电子伏特的质子轰击铀靶,平均快中子产生率的设计值为 $9 \times 10^{16}$ 中子/秒。这些快中子经过慢化剂聚乙烯慢化后的中子通量谱如图1所示。为比较起见,图1中也给出了ILL通常情况下的中子通量谱及为了提高超热中子通量的所谓石墨热源(将石墨慢化剂加热至2000℃)的中子通量谱。

IPNS-11的有效峰值的热中子通量可达 $1 \times 10^{15}$ 中子/厘米<sup>2</sup>·秒,(如以中子/厘米<sup>2</sup>·秒·电子伏特为单位,则可达 $\sim 10^{17}$ ,如图1所示。)这要比ILL的高出10倍,其超热中子(能量0.15电子伏特—10电子伏特)和快中子(能量0.1—14兆电子伏特)的通量要比ILL的高出好几个数量级。由于这些特点,使得以IPNS-11为代表的脉冲散裂中子源可以做原来在堆上由于热中子通量不够而受限制的那些工作,并可用其

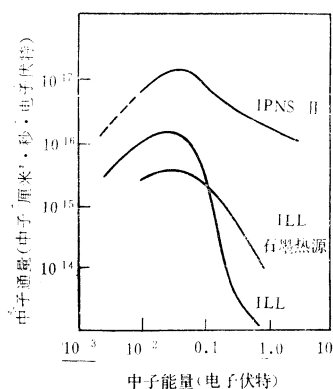


图1. 美国阿贡实验室的强脉冲中子源IPNS-11和法国劳·郎之万研究所高通量堆ILL的中子能谱比较图。

丰富的超热中子和快中子开展高通量、高能量转移的散射工作和辐照损伤研究。

由于脉冲散裂中子源可以提供强度很高的脉冲中子通量,所以它更有利于进行中子散射

实验,但是它的平均中子通量远低于高通量堆,所以有关晶体衍射实验、活化实验、辐照实验及放射性同位素生产等方面工作仍然不可能取代高通量堆。

## 二、中子与物质相互作用的特点

1. 在室温20℃即293°K时,热中子的波长为1.8埃,这正好与晶体中的晶格间距2埃相近;而热中子的能量为0.025电子伏特,又正好与凝聚态物质中的晶格振动能量(约百分之几电子伏特)相匹配。因此,用

中子非弹性散射技术,可测定非弹性散射过程中中子的动量和能量的转移,从而研究晶体的结构和动力学性质。

2. 中子不带电荷,对物质有很强的穿透本领,它比带电粒子更适于大块样品的研究。

3. 中子具有磁矩,利用中子和原子外层未成对电子的散射,可研究物质中原子磁矩的大小、分布和取向。中子磁性散射技术是直接观察磁性材料结构的重要手段。

4. 中子散射截面随着原子序数、原子量大小的变化是无规则的,邻近元素甚至同位素之间的中子散射截面可以相差很远,在许多情况下,用中子散射技术可以很灵敏地识别近邻元素和同位素,这是优于 X-射线分析技术的。

5. 轻元素(如氢、碳、氧)对中子的散射截面比较大(例如氢约 80 靶),重元素的散射截面小,所以中子散射技术很适合于有机化学,以及主要是碳、氢、氧等轻元素所构成的生物物质和重元素中的轻元素杂质的结构、分布和特性。

### 三、超热中子用于结构研究

到目前为止,人们利用脉冲散裂中子源的丰富的超热中子进行了对液体、非晶体物质的结构、金属氢化物、铁电体和反铁电体等方面的研究。

液体、非晶体物质不具有晶体那样的周期性结构,但也有一定的结构。它们的结构因子是决定其结构的重要因素,由分子结构因子和原子结构因子两部分组成。物质的结构因子是动量转移值的函数。当动量转移值增加时,分子结构因子渐减,特别是在高通量转移(如大于 30 埃<sup>-1</sup>以上)的情况下,分子结构因子便等于零。所以,在高动量转移情况下,物质的结构因子便等于其原子结构因子。人们一旦在实验上测定了物质的结构因子,也就知道了分子内原子的排列、结构情况。

超热中子已用于诸如 Br<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>O, PBr<sub>3</sub>, CCl<sub>4</sub>, VCl<sub>4</sub> 的分子性液体,液态 Se, 熔融金属 Ga, 非晶体 SiO<sub>2</sub>, 非晶态磁体 Fe-P-C, Fe-Ge, 熔融盐 MnO<sub>3</sub> (式中 M = Li, Na, K, Ag, Rb)液晶等物质结构的研究。

与液态、非晶态材料结构密切相关的另一个参数——径向分布函数也可用超热中子衍射法研究。为了获得空间分辨率为 0.1 埃的径向分布函数所需的中子波矢量约为 60 埃<sup>-1</sup>,相应中子能量为 8 电子伏特。在中子能量这么高的能区,只有加速器脉冲中子源才能提供足够的中子强度,以进行这方面的研究。有人用实验方法测定了非晶态合金 Pd<sub>0.8</sub>Si<sub>0.2</sub>的径向分布函数,当波矢量转移值由 10 埃<sup>-1</sup>增加到 30 埃<sup>-1</sup>时,其径向分布函数的精细结构逐渐变得明显、清晰。这是在日本东北大学的电子直线加速器脉冲中子源(峰值热中子通量为 10<sup>14</sup> 中子/厘米<sup>2</sup>·秒)上所得到的结果。在这种低水平的加速器脉冲中子源上尚可进行非晶态

合金的结构研究,人们更有理由相信,比这强得多的脉冲散裂中子源一定能够对于液态金属、液态合金、玻璃固体、熔融盐、液态碳氢化合物和水溶液的研究给出许多重要研究结果。例如,在溶液的情况下,人们便可弄清楚水分子围绕着离子是怎样排列的。

金属氢化物是一类可能能够贮存氢的新能源材料,对于这种材料的研究受到极大的重视。用中子衍射法可测定其结构、氢的位置和含量及其与物理性能的关系。有些金属间化合物如 LaNi<sub>5</sub>也能够吸收大量的氢。如果掺入少量其它金属则能够影响金属氢化物的形成和分解。中子衍射法是研究其结构与稳定性之间关系的最有效的方法。图 2 给出了美国阿贡实验室 ZING-P 脉冲散裂中子源(峰值热中子通量 1 × 10<sup>14</sup> 中子/厘米<sup>2</sup>·秒)上,用中子衍射法得到的 LaNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>D<sub>2</sub>的衍射图。

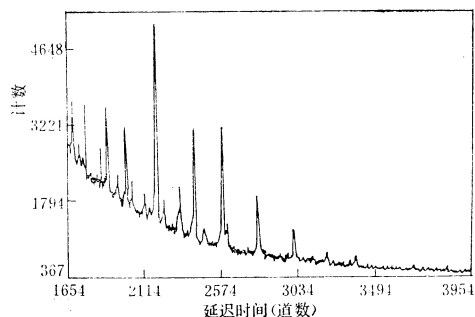


图 2. 在美国阿贡实验室的 ZING-P 脉冲散裂中子源上得到的 LaNi<sub>4.5</sub>Al<sub>0.5</sub>D<sub>2</sub> 的衍射图。图中有圆点标志的,表示在裂变反应堆实验中未曾得到的峰。

铁电体和反铁电体一类材料,在较高温度时常有一个稳定的无序相。有的材料在无序—有序相变时,常不可避免地要产生弯晶,从而给有序相的研究带来困难,所以往往需要在样品上加一个各向异性的压力,防止产生弯晶。这时,用样品固定不动的中子飞行时间法来研究比较有利。有人精确测定反铁电体 Ni<sub>1/2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 的低温结构便是一例。中子飞行时间法的一个特征是中子飞行距离越长,其能量分辨本领便越高。对于热中子,飞行距离为 20 米时,其能量分辨本领可达千分之一,这就可对结构研究做精确测定。中子飞行法的另一个优点是可以观察样品在瞬态极端条件(如脉冲高温、高压、电场、激光激发)下某些结构变化及其他弛豫现象。例如在研究铁电体 NaNO<sub>2</sub> 时,外加一个和脉冲中子同步的一个电场,当极化方向改变时,观察到 NO<sub>2</sub> 集团围绕(001)轴旋转的现象。人们从这些实验里获得对相变机构的新认识。

### 四、超热中子用于动态研究

科学家们已经用高通量堆这个强中子源进行了大量的物质动态研究。后来又利用脉冲散裂中子源继续开展这方面的工作。人们利用脉冲散裂中子源有相当强的超热中子这一特性,在美国阿贡实验室的 ZING-P

脉冲散裂中子源上,对  $ZrH_2$  进行非弹性散射实验,结果看到了  $ZrH_2$  分子中氢原子振动的三次谐波。三次谐波所对应的能量转移值为 0.56 电子伏特。如果仔细比较基波、二次谐波和三次谐波三个能级间的差别,就可知道氢原子所在的位阱的形状。

在磁学领域,为研究高频激发、自旋波色散关系,对于波矢量转移值小于 5 埃<sup>-1</sup>,而能量转移值 1—2 电子伏特的小角散射实验,则必须依赖加速器脉冲中子源。

### 五、冷中子和超冷中子的应用

在冷中子领域(能量小于 5 毫电子伏特)的中子散射研究工作最近得到很快的发展。由于脉冲散裂中子源的平均运行功率比高通量堆的低三、四个数量级,则为维持低温所需要的冷冻机功率也就相应地低多了,这使得在脉冲散裂中子源上做冷中子实验显示出明显的优越性。现以日本高能物理所脉冲散裂中子源(简称 KENS)与 ILL 作一比较:

名称	运行功率	峰值热中子通量(中子/厘米 <sup>2</sup> ·秒)	慢化剂温度	冷冻机功率
ILL	58 兆瓦	$1.2 \times 10^{13}$	20°K	5.8 瓩
KENS	2 瓩	$3 \times 10^{14}$	20°K	20 瓦

超冷中子是指温度在  $\sim 0.003^\circ\text{K}$  左右(约  $10^{-4} \sim 10^{-7}$  电子伏特)、速度约为每秒几米的中子。这部分中子有许多特殊的性能。对此,现在主要研究: 1. 将超冷中子储存在“中子瓶”或“磁瓶”里的可能性; 2. 准

确测定(误差  $\pm 1\%$ )中子半衰期; 3. 测定中子的电偶极矩。这是和基本粒子物理研究中的宇称守恒、CPT 守恒有关的项目。目前已测得的中子电偶极矩约为  $(0.4 \pm 1.1) \times 10^{-24}$  电子电荷·厘米,今后希望能达到  $10^{-26} \sim 10^{-28}$  的量级。

### 六、辐照损伤研究

人们已经用高通量堆对聚变堆及其材料进行了很多研究。后者对研究可控热核反应堆有重要意义。因为可控热核反应堆的实现在很大程度上取决于它的第一层壁材料的抗辐照性能。在用高通量堆中子进行辐照损伤研究时,由于伴随着很强的  $\gamma$  射线,样品及测量仪器在受到强  $\gamma$  射线照射时发热,有时甚至要升到很高温度,而使得这类实验难以进行。现在人们寄希望于脉冲散裂中子源,因为它的  $\gamma$  射线通量对中子通量的比例要比高通量堆上的低好多倍,从而使这类测量和研究成为可能。

### 七、结束语

综上所述,强脉冲散裂中子源将会在各个领域有广泛的应用,对发展科学技术有重要意义。世界上现有的脉冲散裂中子源是属于低通量、小型的,已在它上面做出了一些很有意义的工作。等到 80 年代末期,通量高的、大型的脉冲散裂中子源建成后,便能发挥更大的作用,它的优越性将在实践中得到证实。毫无疑问,这种价格便宜、性能良好的新型中子源的发展前途是非常光明的。