

双转子中子散射飞行时间谱仪*

李际周 叶春堂 金余恒
李竹起 杨大华 康健

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

在中国原子能科学研究院的重水研究性反应堆上设计建造了一台双转子中子散射飞行时间谱仪。该谱仪采用高速同步双转子(最高转速为15000 r/min)系统,并在90°角范围内配置54支³He管(可扩展为108支)记录散射中子,散射中子讯号由飞行时间编码单元编码后送入DG-10/SP微机数据获取系统,该系统采用了通用智能接口并具有实时显示54路谱的功能。该谱仪还在转子本体中填入大量含硼含氢物质,在费米转子准直系统中采用超薄(0.025 mm)钷(Gd)片作为芯片,既增强了准直效果,又使转子系统屏蔽快中子本底的能力增强10倍,解决了径向水平孔道本底高的困难。谱仪指标:单能入射中子能量范围5—200 meV,分辨率 $\Delta E/E \sim (3-8)\%$,样品上单色中子强度 $\sim 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,信号本底比优于20:1,在转速为13000 r/min时连续工作10 d,相位及速度漂移均不大于0.04%。

关键词 中子散射谱仪, 双转子, 飞行时间, 热中子非弹性散射, 声子谱。

一、引言

中国原子能科学研究院重水反应堆水平孔道旁的双转子飞行时间谱仪是一台大型中子散射谱仪。国外同类设备通常建在高通量堆的切线水平孔道或冷中子束上,但原子能院重水反应堆上没有切线孔道,因而快中子本底较高,且堆通量较低,为了克服这一困难,我们在设计中采用了中子束水平、垂直双向聚焦几何,并采用一对高速同步转子来切断脉冲中子束周期外的连续中子本底,还在转子本体填入含硼含氢物质和采用超薄钷片作为费米转子芯片等项措施,致使转子抗快中子本底能力增强10倍,成功地解决了中等通量堆径向孔道上安装飞行时间谱仪的困难。它的建成为原子能院用中子散射研究凝聚态物质结构提供了一项重要手段,将在超导材料、金属材料、聚合物材料、非晶态材料等的晶格动力学研究方面发挥重大作用。

二、谱仪结构

谱仪结构示于图1。机械部分主要由三大部分组成:本底转子和堆旁屏蔽体,费米转子和直径为2.4 m的晶体单色器大鼓,样品室、中子飞行室和³He探测器组。这台谱仪由于采用了高速

* 该工作得到了国家自然科学基金资助。

同步双转子系统,并在飞行距离为2 m、散射角在90°范围内配置54支³He管记录散射中子,因此既保证了必要的分辨率,提高了探测效率,又能在实验中满足相干散射大角平均的要求。

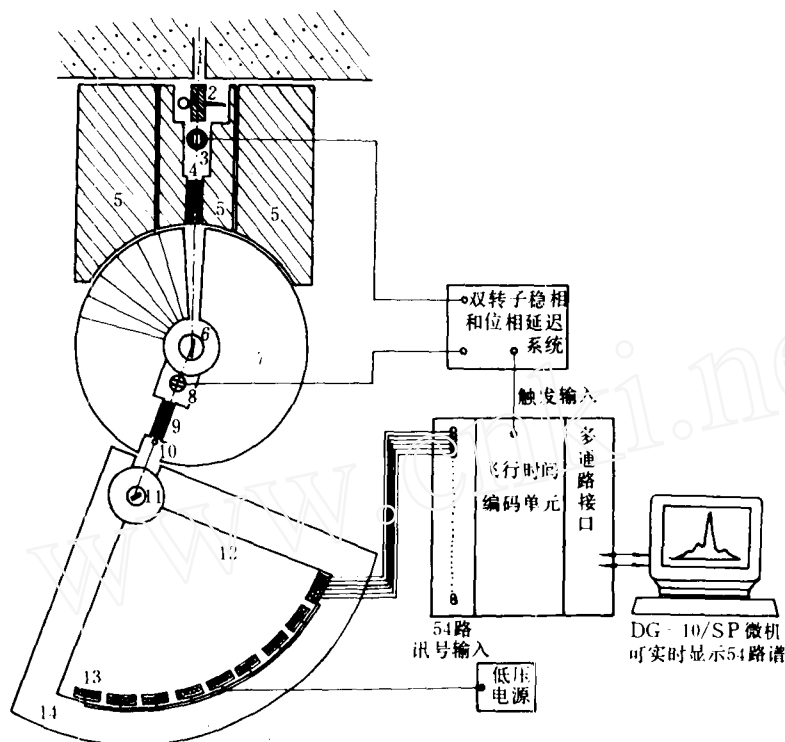


图1 飞行时间谱仪方框图

Fig. 1 Sketch of the time-of-flight spectrometer

- 1 堆内准直器;2 电动门;3 本底转子;4 第一准直器;5 重混凝土屏蔽;6 晶体台和石墨单色器;7 屏蔽大鼓;8 费米转子;9 第二准直器;10 监视器;11 样品室;12 散射室;13 ³He计数管;14 含硼石墨屏蔽块。

为了增加中子注量,谱仪各部分的几何尺寸和相对布局采用了双向聚焦几何的安排。堆内准直器呈坡型,长1.2 m,内口93 mm×66 mm,外口83 mm×57 mm。本底转子距堆口0.6 m,窗口尺寸为80 mm×54 mm,费米转子窗口尺寸为60 mm×35 mm,两转子相距2.6 m。位于单色器屏蔽大鼓中心的晶体台距本底转子2.2 m,距费米转子0.4 m。样品室距费米转子1.2 m。中子束以上述几何到达样品,要求样品截面为51 mm×26 mm,这个尺寸比较适用于一般物理实验的要求。单色器除热解石墨外,还可用锗(Ge)单晶、铜单晶和人造云母等。第一准直器长35 cm,第二准直器长40 cm,准直器内插片的最小间隔为3 mm,插片上蒸有碳化硼层,最小准直角~20'。

国外飞行时间谱仪很多是固定角度的,例如德国 Karlsruhe 核中心 FR2堆旁的 TOF1和 TOF2就分别固定在 $\theta = 24.5^\circ$ 和 31° 。我们为了一机多用,扩展能区范围,设计了可以自由转动的直径为2.4 m的单色器大鼓,大鼓重量虽超过17 t,由于采用了圆柱型滚珠回转轴承(HJB-880),仍可人力自由转动。其转动范围 $\theta = 5^\circ - 40^\circ$,采用石墨单色器所得到的单能中子范围 $E_n = 5 - 200$ meV。与大鼓相连接的样品室和中子飞行室在 θ 角改变时必须同时绕单色器和样品两个中心作圆周运动,为此设计了飞行室气垫装置,10 t多重的飞行室在4个 $\phi 500$ mm的气垫

支撑下可由人力自由移动,以满足物理实验的要求。 $\phi 570$ mm 真空样品室可与液氮温区恒温控温装置相配合,更低温度的控温装置正在设计中。飞行距离为2 m 的扇形散射室现放置9盒共54支 ^3He 管,将来可扩展放置18盒108支 ^3He 管。

谱仪的电子学系统可分为5部分:54路讯号放大甄别系统,飞行时间编码单元,双转子稳速稳相和位相延迟系统,多通路接口以及可实时显示54路谱的 DG-10/SP 微机自控数据获取系统。从飞行室来的54路散射中子讯号由双转子稳相系统控制,经飞行时间编码后可以实时在微机上显示和收集,然后经过多声子修正飞行时间谱程序处理,可以得到被测样品材料相应的声子谱。

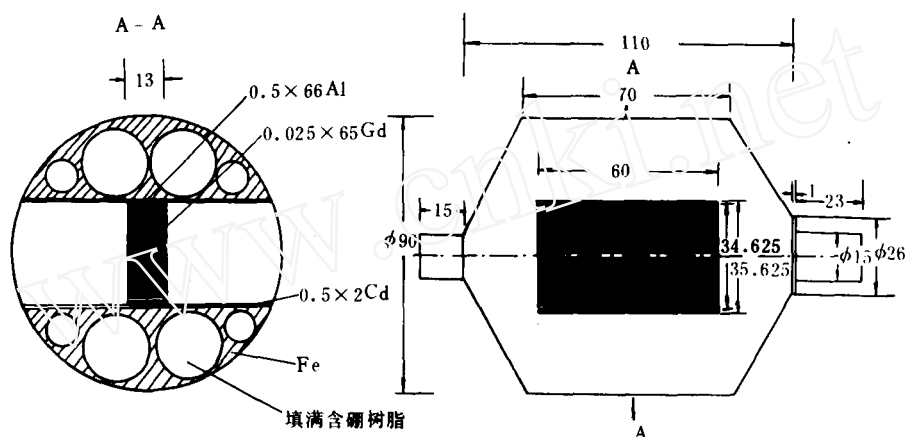


图2 费米转子结构示意图

Fig. 2 Sketch of the structure for Fermi chopper

三、双转子结构特点

飞行时间谱仪的核心部件是两个同步高速旋转的转子,其中费米转子的结构示于图2。为了提高转子抗本底的能力,我们设计的费米直缝转子没有采用镉(Cd)片或含镉物质,而是采用吸收中子能力比Cd强20倍的钆(Gd)片来做芯片,其厚度只有0.025 mm,65片Gd与66片Al片(0.5 mm)交替重叠组成了准直角为 2.2° 的费米转子,当转速为15000 r/min时, Δt 为25 μs 。另外为了增强转子抗快中子的能力,在两个转子的支撑部位填入了足量的含硼含氢物质。根据58.6 meV中子的透射率比较实验,说明效果极佳。转子旋转靠上方的磁滞同步马达带动,本体密封在一个圆柱型薄铝壳中,以减少高速旋转时空气涡流的影响,磁头起始信号取自下端。转子材料强度经过严格计算,利用精密数控车床完成加工,并经过了仔细的动平衡试验。两转子相距2.6 m,这样长的距离可以保证通过改变两转子位相延迟来消除掉单色器级次中子的污染。

四、稳速稳相控制单元、飞行时间编码单元和智能通用谱仪接口件

1. 稳速稳相控制单元^[1]

双转子的同步稳相运行由专门设计的稳速稳相单元控制,两个转子分别由3台交流功率放大器驱动,控制单元的方框图示于图3。

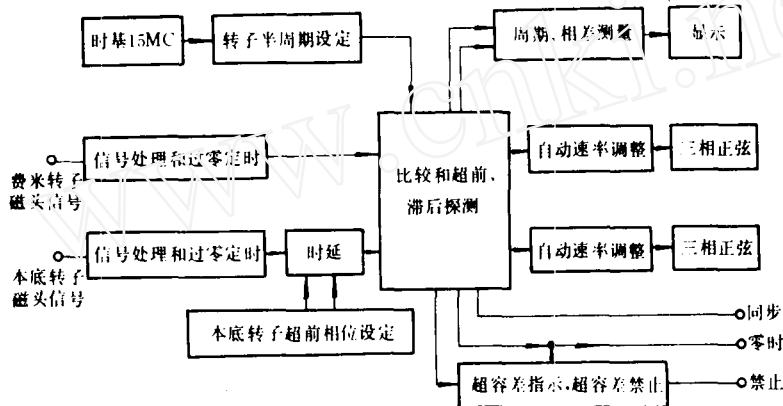


图3 稳速稳相控制单元

Fig. 3 Scheme of the phasing control unit

2. 飞行时间编码单元

多路(64路)飞行时间编码单元方框图示于图4。每路道数最多可达4096道,道宽以0.5 μs 间隔递增。各路谱除有上、下阈设置外,还具有移道功能。

3. 智能通用谱仪接口件

³He 计数管探测到的散射中子讯号经飞行时间编码单元编码后通过智能通用谱仪接口件与微机 DG-10/SP 连接。接口件内有双极型高速16位微处理器 F9445,它担负管理接口、获取和运算数据、实现与主机通信等多项任务。由于它的高速、多功能、并且自

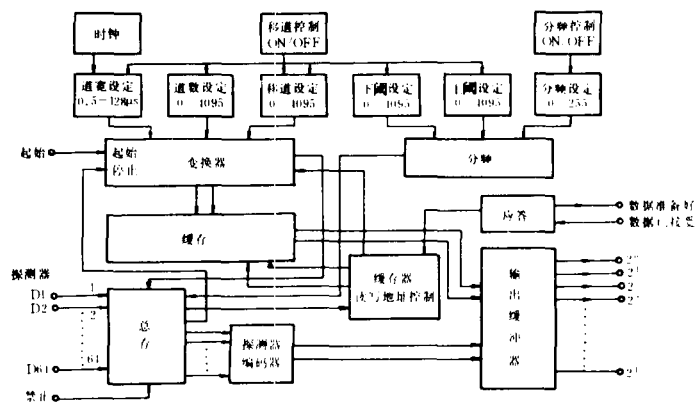


图4 多路飞行时间编码单元方框图

Fig. 4 Scheme of the time-of-flight coding unit

身可带一个终端,使用户实现双向运行,跟踪调试和故障诊断都非常方便。详见文献[2]。

五、谱仪性能指标和测试结果

在谱仪调试过程中,我们改变了3个 θ 角,分别为 12° , 13.75° 和 23° ,此时用热解石墨作单色器通过(002)和(004)反射面得到的单能中子分别为:(42 meV, 168 meV), (32.2 meV, 128.8 meV)和(12 meV, 48 meV)。在这3个条件下分别测试了两转子相位延迟时间改变时各级次中子比份的变化,结果表明,在上述情况下(002), (004)和(006)中子可以很好地分开,得到的单色中子,其级次中子污染小于或远小于1%,这是此谱仪能否正常工作的重要指标之一。图5给出了一个典型例子,此时转子半周期为2.39 ms,转速为12552.3 r/min,石墨单色器(002)和(004)面反射的单能中子分别为12 meV和48 meV。当两转子位相延迟时间改变,单色器各级中子强度会随之变化。此测试结果是通过测量置于样品位置的 ^3He 管的中子飞行时间谱而得到的。从图5可以看出,延迟时间置于1000 μs 时,(004)中子强度很大,而(002)和(006)中子的干扰均小于1%,当延迟时间置于1450—1600 μs 时,可以得到强度很高的(002)单色中子,而(004)中子的干扰远小于1%。

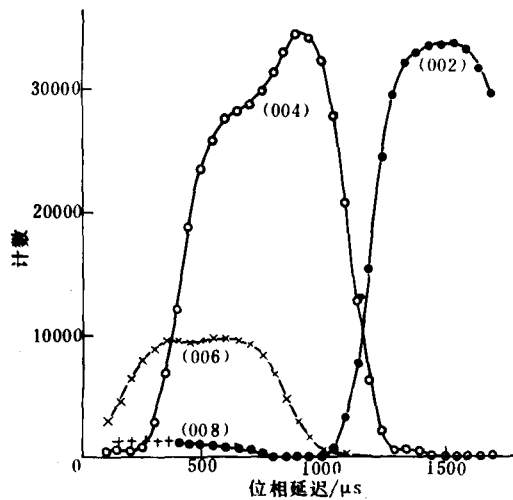


图5 石墨单色器级次中子强度比的变化图

Fig. 5 Monochromatic neutron intensities of different order reflections from the PG monochromator

费米转子的准直角为 2.2° ,当转速为15000 r/min时,时间分辨 Δt 为25 μs ,12000 r/min为30 μs 。由时间分辨造成的能量分辨在3%—8%之间。

经初步测试,到达样品的单能中子注量率可达 $10^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。 ^3He 管的自然本底 < 3 个计数/h·支。一般实验的效应本底比好于20:1,对于2 mm厚的标准

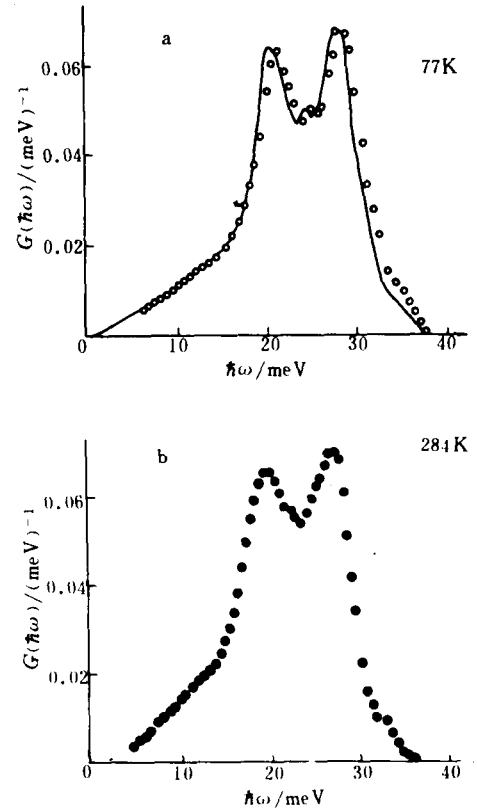


图6 标准钒样品声子谱的比较

Fig. 6 The measured phonon density of states of vanadium

a——Grenoble 和 Karlsruhe 的结果;
b——本谱仪测得的结果。

钒样品,其效应本底比约为50:1。此结果说明该谱仪强度和本底情况能很好地满足物理实验的要求。

六、标准钒样品声子谱的比较

谱仪性能测试后,我们实地测量了标准钒样品的声子谱,并与国外结果进行比较,结果示于图6。图6a是Grenoble高通量堆HFR上的IN4谱仪和Karlsruhe核中心FR2堆上TOF1谱仪测得的数据^[1],图6b是本谱仪测得的数据,前者样品温度为77 K,后者为284 K。两者进行比较,可以看出非常一致,钒声子谱双峰中的微小结构清晰可见,只是本谱仪测得的数据的峰的分辨略差于前者。其弹性散射峰的半高宽分辨实测得33 μ s,稍加改进,分辨还可以提高。钒声子谱的比较说明谱仪运行状态正常,性能良好。

谱仪建成后,两年多来在高Tc超导材料YBaCuO和BiSrCaCuO两个系列和几个替换系列的声子谱测量中做了一系列的工作,还对Invar效应合金和形状记忆合金马氏体相变中声子形核过程中的软化现象进行了研究,结果将另文发表。

在该谱仪建造过程中,曾得到德国Karlsruhe核中心Dr. W. Reichardt和Dr. N. Nücker的热情帮助,特在此表示感谢。

参 考 文 献

1. 金余恒等,核电子学与探测技术,11(2), 78(1991)。
2. 金余恒等,核电子学与探测技术,11(1),21(1991)。
3. Schweiss, P., KFK 2051,1971,p. 11.

(编辑部收稿日期:1991年8月24日)

A DOUBLE CHOPPER SYSTEM NEUTRON SCATTERING TIME-OF-FLIGHT SPECTROMETER

LI JIZHOU YE CHUNTANG JIN YUHENG

LI ZHUQI YANG DAHUA KANG JIAN

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-30, Beijing, 102413)

ABSTRACT

A double chopper system neutron scattering time-of-flight spectrometer is built and installed at the Heavy Water Research Reactor (HWRR) of China Institute of Atomic Energy in Beijing with the purpose of phonon measurement using neutron inelastic scattering technique. The two choppers are rotated in a synchro way (the highest speed is 15000 r/min). Scattering neutrons are detected by 54 ^3He counters, distributing in an angle region of 90°. The total number of the ^3He detector will be extended to

108 in future. Neutron signals from ^3He detectors are coded by a time-of-flight coding system and then transferred to the data acquisition system of DG-10/SP micro-computer. An universal intelligent interface was used in the data acquisition system, which has the function of displaying the real time spectrum separately for each counter. Boron containing resin is filled in the chopper body, thus increasing anti fast neutron background ability of this system by a factor of 10, and enabling the spectrometer to be used on the radial experimental channels of the HWRR. In addition, Gd foil of 0.025 mm is used as the material for the collimation system within the core of the Fermi chopper, which also strengthens the collimation efficiency and reduces the background due to the large neutron absorption cross section of Gd. The technique specifications of the spectrometer are as following; energy region of monochromatic incident neutrons; 5—200 meV; resolution; $\Delta E/E \sim (3-8)\%$; monochromatic neutron flux at sample position; $\sim 10^3 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$; signal to noise ratio; better than 20:1; phase and speed shift of the chopper system for a 10 day non-stop operation at 13000 r/min; less than 0.04%.

Key words Neutron scattering spectrometer, Double chopper system, Time-of-flight, Thermal neutron inelastic scattering, Phonon spectrum.