

中国散裂中子源 中子谱仪简介

张俊荣 庄建 王平 周建荣 胡海韬 吴延岩

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 散裂中子源科学中心 523803)

中子谱仪(Neutron Instrumentations)利用中子与原子核的作用来进行物质微观结构和动力学的研究。如果把散裂中子源比做超级显微镜,每台中子谱仪都是一个“显微镜”。中子谱仪的工作原理如图1所示,中子源产生的中子当做一束“光”,入射到科学家用要研究的“黑盒子”样品上进行观测,中子将与样品内部原子核发生作用,中子探测器类似人的“眼睛”收集与样品作用后各方向出射的中子,最终通过散射中子方向、速度和自旋等的数据分析,获得样品内部原子和分子在哪里,以及如何运动等信息。这些微观结构将帮助我们理解物质的力、热、光、电等宏观属性。

一、中子谱仪构成

中子谱仪的主要构成包括:

1. 中子源慢化器

中国散裂中子源拥有三种类型的慢化器:快中子在退耦合水(300K)、耦合液氢(20K)、退耦合窄化液氢(20K),输出短脉冲、高通量的冷、热中子。谱仪根据对中子通量、分辨率和能谱等的需求,选择不同的慢化器。退耦合水慢化器适合短波中子需

求的谱仪,耦合液氢慢化器适合高通量需求的谱仪,退耦合窄化液氢慢化器适合高分辨率需求的谱仪。

2. 中子导管

中子束流是通过中子导管传输到谱仪大厅中,进而传输到样品上。中子能够在中子导管内部的Ni/Ti超镜涂层上进行反射,从慢化器传输到几十米甚至上百米以外的样品中心。中子导管能够有效地减小束流损失,保障样品处的中子通量,节省样品辐照时间,提高谱仪工作效率。

中子导管从结构上可以分成两大类:常规中子导管和特殊中子导管。常规中子导管是指矩形中子导管,即内部腔体结构为矩形,主要作用是最小损伤地进行中子传输。特殊中子导管包括椭圆聚焦中子导管、抛物线聚焦中子导管、六边形中子导管等非常规结构的中子导管,主要作用是对宽范围的中子起到聚焦作用。中子导管按照基片的材料可以分成两大类:玻璃基片中子导管和金属基片中子导管。玻璃基片中子导管采用含硼或者不含硼的浮法玻璃作为基片。在其表面镀制超镜涂层。而金属基片中子导管则采用铝或者铜作为基片制作中子导管。

3. 中子斩波器

中子斩波器是一种从时间尺度上对束流调控的中子光学器件,又称中子能量选择器。在飞行时间型中子散射谱仪中,中子斩波器通过相位控制使转动体的转动与中子的飞行时间同步,对中子束流

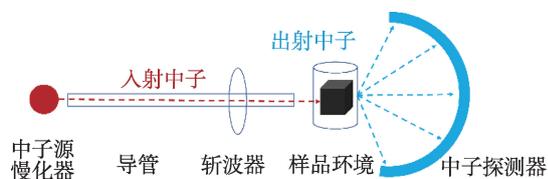


图1 中子谱仪的构成示意图

进行吸收阻挡和选择。根据功能可以分为T0斩波器、带宽斩波器、脉冲斩波器、费米斩波器等类型。

T0斩波器功能是去除打靶产生中子瞬间释放出的大量快中子和高能伽马射线,降低谱仪本底。带宽斩波器主要功能是截取指定波段中子,消除多个脉冲之间长波中子飞行时间重叠本底,提高信噪比。脉冲斩波器与带宽斩波器结构类似,主要区别是脉冲斩波器转速远远高于带宽斩波器,可以截取极窄时间窗的束流脉冲。费米斩波器主要功能是选择出单一能量中子,通过相位同步控制技术,使得所需要的某个单一波长中子才能够通过狭缝,其他中子则被中子狭缝包所吸收。

4. 中子探测器

中子探测器是中子谱仪关键设备之一,被誉为中子谱仪的“眼睛”。中子入射到样品后,与物质发生相互作用,通过探测器测量穿过样品后的中子强度和空间分布,从而得到物质内部的微观结构信息。由于中子本身不带电,不会引起电离和激发,无法进行直接探测。因此中子的探测是通过中子与敏感材料相互作用,产生带电粒子或光子实现间接探测。常用的热中子敏感材料有 ^3He , ^6Li , ^{10}B 等,这些同位素与热中子的核反应截面大,有利于提高探测器的中子探测效率。中子与中子敏感材料作用产生带电粒子或者光子,产生微弱的模拟电信

号,经多通道专用集成电路芯片进行放大,然后进入数字逻辑电路进行逻辑处理得到入射中子空间和时间信息,最后通过数据获取系统经光纤网络的方式将数据传输到服务器用于物理分析(图2)。

5. 样品环境

中子散射原位样品环境设备(图3)为待测试样品提供温度、压力、磁场、电场、气氛、应力应变以及多场耦合等原位实验环境,使得中子散射谱仪能够在用户所需要的各种特殊实验条件下对样品进行原位测量。将中子散射技术与极端条件样品环境相结合,可充分发挥中子散射技术在原位测量晶体结构、晶体织构、动态相变、电磁特性、应力应变等方面的优势。

6. 控制与数据分析

谱仪运行需要实验控制、数据分析和计算等软硬件支持。实验控制负责各种设备的配置、调度、检测与控制,以及不同设备之间必要的安全连锁。在实验过程中,进行实验参数配置、运动控制和数据采集、实验运行状态监测,以及实验状态记录与管理等,保证实验的自动化运行。数据分析负责中子实验数据的在线处理和可视化,实验数据的重建、规约和物理分析,以及数据的计算模拟等,为谱仪和用户的数据分析软件和数据平台。



图2 中子探测器的基本组成

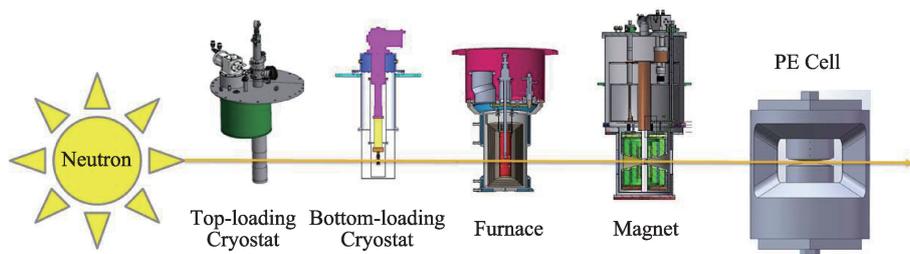


图3 主要中子散射原位样品环境示意图

二、中子谱仪分类

利用中子、电子、X射线和激光等手段观测物质微观结构和运动的基本原理相似。由于中子和物质作用不同,与其他手段互补,从而能够从不同方面对物质微观结构形成完整的描述。中国散裂中子源中子谱仪充分利用中子与物质作用的特点,包括:中子散射能测定较轻原子,区分同位素,直接测定磁结构,具有极强的穿透性等,开展高温、高压和强磁场等极端条件下的原位实验,最大化发挥中子技术的优势,与其他手段形成充分互补。为物质科学、生命科学、资源环境、新能源等方面的基础研究和高新技术研发提供了强有力的研究平台,满足国家重大战略需求、解决前沿科学问题和瓶颈问题。

中国散裂中子源三类慢化器提供20条中子束流孔道,根据不同科学研究的目标和各类型谱仪的设计需求,中子谱仪布局如图4。

1. 弹性散射:中子与原子核作用后,没有能量的改变,可用于静态结构的表征。中子波长与物质

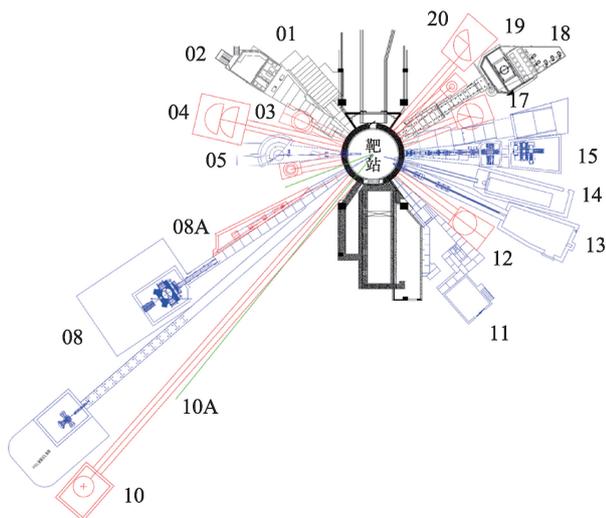


图4 中国散裂中子源中子谱仪布局图。01:小角中子散射仪,02:多功能反射仪,03:液体中子反射仪,04:冷中子直接几何非弹谱仪,05:高能直接几何非弹谱仪,06:逆几何分子振动谱仪,07:预留,08:工程材料中子衍射仪,08A:中子技术发展线站,09:高分辨中子衍射仪,10A:预留,11:大气中子辐照谱仪,12:中子物理与应用谱仪,13:能量分辨成像谱仪,14:微小角中子散射仪,15:高压中子衍射仪,16:多物理谱仪,17:弹性漫散射中子谱仪,18:通用粉末衍射仪,19:单晶中子衍射仪,20:直接几何极化非弹谱仪

中原子、团簇的距离相近,可以测量小到原子的晶体结构(\AA)、大到纳米(nm)/微米(μm)的介观尺度结构,覆盖物理、化学、生物等体系中多尺度结构。

中国散裂中子源建设5台粉末衍射仪:通用粉末衍射仪、多物理谱仪、工程材料中子衍射仪、高压中子衍射仪、高分辨中子衍射仪。从应用上覆盖:晶体结构、磁结构、无序结构表征和残余应力无损检测多方面的应用。从分辨率上覆盖:高、中、低三档分辨率,满足不同的实验需求。从样品环境上覆盖:高低温、高压、强磁场多种实验条件。

中国散裂中子源建设1台单晶衍射仪:单晶中子衍射仪。主要用于单晶材料的磁性结构和生物大分子结构表征。

中国散裂中子源建设2台小角散射仪:小角中子散射谱仪、微小角中子散射谱仪。前者覆盖常规的1~100纳米尺度范围,后者能够测量1微米以上更大尺度的结构。主要应用于聚合物、生物大分子、多孔材料等领域纳米尺度结构的表征。

中国散裂中子源建设2台中子反射仪:多功能反射仪、液体中子反射仪。前者为垂直几何,主要用于固体界面结构表征;后者为水平几何,主要用于液体界面结构表征。

2. 非弹性散射:中子与原子核作用后,能量增加或损失,用于物质运动的表征。中子能量和物质的动力学能量范围相符,可以探测小到纳电子伏特(neV)、大到电子伏特(eV)的原子运动、分子振动和磁激发,覆盖凝聚态、软物质等体系中的微观运动。

中国散裂中子源建设4台直接几何非弹性散射谱仪:高能直接几何非弹性中子散射谱仪、直接几何极化非弹谱仪、弹性漫散射谱仪、冷中子直接几何非弹谱仪。从应用上覆盖:晶格和自旋动力学。从能量范围上覆盖高、中、低能段,满足不同的研究需求。

中国散裂中子源建设2台逆几何非弹性散射谱仪:中子背散射谱仪、逆几何分子振动谱仪。前者用于原子/分子扩散等慢动力学的准弹性测量,后者用于分子振动谱的大范围测量。

3. 其他

中国散裂中子源建设1台中子成像谱仪:能量分辨中子成像谱仪。可以开展常规中子成像和布拉格边成像,对材料和部件内部微结构进行设计、加工、运行与服役性能评估。主要应用于能源、材料、装备制造等领域。

中国散裂中子源建设1台中子俘获谱仪:中子物理与应用谱仪。可以开展瞬发伽玛活化分析(PGA)、共振中子俘获分析和中子深度剖面测量(NDP),对样品内微量和痕量元素进行快速和非破坏式检测。主要应用于能源、地质、考古、医学等领域。

中国散裂中子源建设1台大气中子辐照谱仪:模拟大气中子不同环境下的样品辐照试验,主要

应用于航空航天、电子通讯、核电、高性能计算等领域。

中国散裂中子源建设1台中子技术发展线站:开展中子器件、中子技术和实验方法学的测试和研究,主要应用于中子探测器、极化器、导管等领域。

参考文献

- ① 陈和生,中国散裂中子源,现代物理知识,2016, 28(1),3-10
- ② 魏阳东,周健荣,周晓娟,朱林,周建晋,许虹,杨桂安,王小胡,孙志嘉,陈元柏,基于气体电子倍增器的位置灵敏快中子探测器优化设计,核技术,2021,44,2
- ③ 蔡伟亮,王平,张清,耿艳胜,张文翔,CSNS带宽限制中子斩波器系统的设计方法. 核技术,2018,41,12
- ④ 胡海韬,袁宝,白波,张绍英,童欣,段钰锋,中国散裂中子源样品变温环境设备技术,低温工程,2019,2,17-20



封底说明

费曼与呼麦

物理学家费曼是被人们公认的当今最聪明的科学家之一,他曾是加州理工学院物理学的教授。由他提出的费曼图、费曼规则和重整化计算方法是研究量子电动力学和粒子物理学的重要工具。由于费曼在量子电动力学方面的卓越贡献,1965年他荣获了诺贝尔物理学奖。费曼被人们尊为是量子电动力学的创始人和第一位提出纳米概念的人。费曼在科学研究上成绩卓著,而让他名扬四海的还有他喜欢搞怪的性格。他打邦哥鼓、破译玛雅的象形文字、研究如何撬开保险柜和逛脱衣舞厅的经历,让人们看到其有趣的另一面。特别是费曼曾着迷于一种流传在蒙古草原的古老歌唱方式呼麦,呼麦又名浩林潮尔,是一种高超的运用喉音的唱法。这种唱法极难掌握,演唱者通

过调节口腔的共鸣,能发出十分独特、美妙的声音,并且一个人便能够展现出多个声部。呼麦的魅力无疑激起了费曼的好奇心,他曾希望有一天能够到图瓦去研究呼麦,但可惜却因他的离世而成为遗憾。后来代替他完成这个遗愿的是他的好友拉尔夫·莱顿。莱顿最终将3名图瓦牧民歌手请到美国加州的音乐舞台,当歌者神奇的宛如天籁的歌声唱起,人们都震惊了,“呼麦”随之通过媒体传播到全世界,使更多的人开始了解到这门古老的音乐艺术。让我们记住这位平易近人且个性独特的科学家——理查德·菲利普斯·费曼。

(博文/供稿)