

中国先进研究堆中子散射科学平台介绍*

刘蕴韬[†] 陈东风

(中国原子能科学研究院 中子散射实验室 北京 102413)

2013-07-07 收到

[†] email: ytliu@ciae.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130801

The neutron scattering platform of China's Advanced Research Reactor

LIU Yun-Tao[†] CHEN Dong-Feng

(Neutron Scattering Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

摘要 中子散射技术作为人类认知世界不可或缺的独特手段, 多年来在诸多领域得到了广泛应用并成绩显著。文章以新建成的中国先进研究堆中子散射科学平台谱仪为例, 较为详细地介绍了中子散射技术和谱仪的基本原理和特点, 并对其未来的应用进行了展望。

关键词 中国先进研究堆, 中子散射

Abstract As a very important method to discover the world neutron scattering technique has been applied in many fields and achieved a lot. Based on the neutron scattering facilities just built at China Advanced Research Reactor the principle and characters of this technique and facilities are introduced in details, and their prospected applications in the future are also described.

Keywords China Advanced Research Reactor, neutron scattering

1 中子散射技术介绍

艳阳当空, 阳光洒向大地, 人类的眼睛接收来自万物散射的光线, 经过大脑的处理, 最终使蓝天、白云、青山、绿水, 一个多姿多彩的世界便呈现在眼前。其实本文所要介绍的中子散射技术和我们日常观察世界的手段和方法有异曲同工之妙。所谓中子散射技术就是以中子源(相当于太阳)引出的中子束(相当于可见光)为探针, 通过中子探测器(相当于眼睛)收集与被研究对象相互作用后中子能量与动量的变化以及相应中子强度分布情况, 然后通过电脑程序分析处理(相当于人脑)来获取被研究对象内部组分、结构和动力学等相关信息(多彩的微观世界)^[1-6]。通俗地讲, 中子散射技术可以告诉我们“物质世界中原子、分子在哪里, 它们在做什么”。

1932年查德威克发现中子^[7, 8], 之后美国橡树

岭国家实验室的Shull和加拿大乔克河国家实验室的Brockhouse等科学家分别在弹性和非弹性中子散射领域做出了开创性的工作。经过多年的发展, 目前中子散射技术已经在物理、化学、材料、生物、地矿、能源、环境等诸多领域得到了广泛应用, 甚至在某些方面发挥着不可替代的作用^[9-11]。Shull和Brockhouse也因其在发展中子散射技术方面的杰出贡献, 分享了1994年的诺贝尔物理学奖。首先, 让我们来了解一下中子散射技术和其使用的中子探针具有哪些特性:

(1)合适的时空测量尺度: 目前中子散射常用的中子波长从零点几埃到十几埃范围内连续可选, 相应的能量从零点几毫电子伏到几百个毫电子伏, 无论是从空间角度还是从时间(能量)角度来看, 都是度量原子、分子及其团簇间距和动态过程的最佳标尺, 因此, 可从原子、分子尺度观

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB833105)资助项目

察物质的内部结构和各种不同的原子、分子相互作用等动力学信息。

(2) 散射能力和原子序数无关联性：和X射线不同，中子与原子主要是核相互作用，散射长度与原子序数之间没有明显的函数关系。随着原子序数增加，中子散射长度或增或减，或正或负，特别是对氢、碳、氧等轻原子较为敏感，能够区分大多数近邻元素。凭借这些优势，中子散射技术在储氢材料、锂离子电池、生物大分子等领域发挥了不可替代的作用，为解决能源、医药等与国计民生相关的重大课题提供了强有力的技术支撑。

(3) 能区分同位素：原子核内中子数的变化可以极大地影响其对中子的散射能力，导致同位素之间的中子散射长度会截然不同，从而使其成为一门独特的研究手段。最具代表性的是氕(^1H)、氘(^2H)同位素衬度法用于研究储氢材料和富含氢原子的生物与有机材料等。

(4) 穿透性强：因为中子不带电，它与非磁物质的作用主要是核相互作用，因此中子表现出较强的穿透性，通常在厘米量级，这不仅有利于开展大样品、大部件的常规无损分析测量，而且还可加装高温、低温、高压、磁场、气氛等样品环境，模拟材料应用中的实际工况，开展实时原位测量，解决工程应用中的实际问题。

(5) 具有磁矩：虽然中子不带电，却具有磁矩。人们利用这个天然的“小磁针”，通过研究它与磁性材料发生相互作用后“磁针”取向的变化情况，进而获知磁性原子的磁矩大小和分布情况，辅以变温磁场等样品环境，甚至可以观察到磁相变现象。目前中子散射技术已成为研究磁性材料的最直接和强有力的工具之一。

此外，中子还具有核散射能力与散射矢量无关的特性，其数据分析处理简单，能量为meV量级，不会破坏生物样品的活性，特别有利于研究生物活性体系等特点。也正因为中子散射技术的特点和独到优势，它已成为基础科学研究和先进工业应用的重要研究手段，其发展水平和应用程度已经成为衡量一个国家科技综合实力的主要标

志之一。近些年，欧、美、日、澳等发达国家或地区均投入巨资兴建大型中子散射装置。我国也开始重视该技术的发展，中国原子能科学研究院中国先进研究堆已经建成，中国科学院广东散裂中子源项目目前也进展顺利，有望四至五年后投入使用，其他大学和研究院所在相关方面也开展了很多有意义的工作。

2 中国先进研究堆中子散射平台建设进展和应用

我国的中子散射技术起步很早，1958年就在中国原子能科学研究院(简称原子能院)建成了我国第一座实验性重水反应堆(该堆于2007年关闭)，戴传曾、张焕乔、叶春堂等人于1959年研制出我国第一台中子晶体谱仪，做出了开创性的贡献。上世纪80年代，原子能院和中国科学院物理研究所(简称中科院物理所)合作，建成了当时国内唯一的热中子散射实验室，并在凝聚态物理、材料科学等领域做出了一批具有国际水平的工作，在国际中子散射领域争得了一席之地。与此同时，锻炼了一支从事中子散射应用的研究队伍，为今天中国先进研究堆(简称新堆)中子散射科学平台的顺利建立奠定了坚实的技术、人才和用户基础。

中国先进研究堆功率为60 MW，其反射层处设计最大未扰热中子通量为 8×10^{14} 中子/s·cm²，各项性能指标均达到世界先进水平。该堆2002年8月26日破土动工，2010年5月13日首次达到临界。2012年3月13日首次实现满功率稳定运行72小时，达到了预期验收指标。目前相关工程验收工作正在开展，待国家批复后便可正式运转并为广大的国内外用户服务。

新堆为多用途研究型反应堆，主要用于开展中子散射、中子活化分析、单晶硅辐照、同位素生产、材料辐照考验等研究与生产工作。该堆建有九根水平孔道，其中7根用于中子散射科学谱仪建设：一根连接冷源，由导管系统将冷中子传

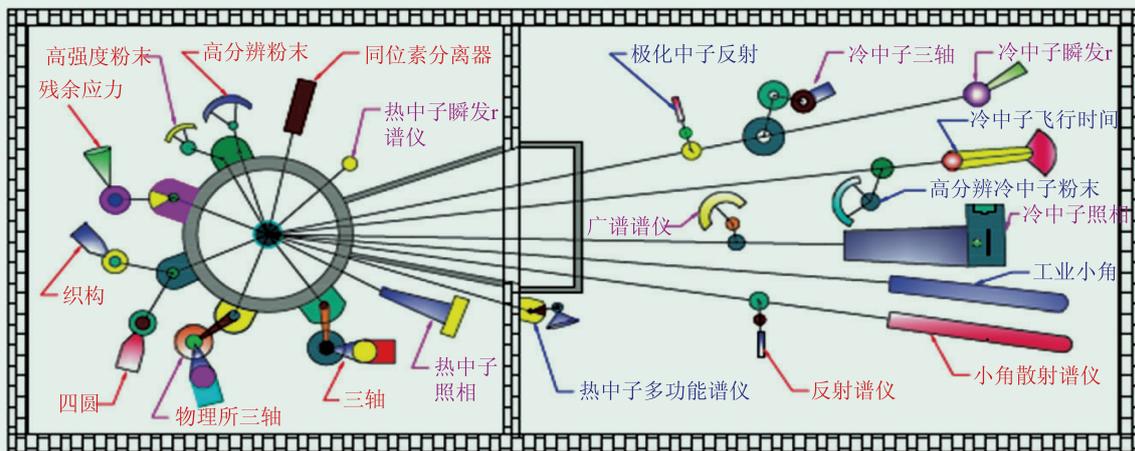


图1 中国先进研究堆谱仪布局图(红色为已建谱仪；粉色为在建谱仪；蓝色为规划谱仪)



图2 (a)粉末衍射谱仪工作原理示意图；(b)高分辨粉末谱仪实物图；(c)高强度粉末谱仪实物图

输到宽30 m、长60 m的导管大厅，用于冷中子科学谱仪建设；余下的6根为4个双束、2个单束，用于热中子谱仪建设。中国先进研究堆中子散射谱仪整体布局与规划见图1。

目前中国先进研究堆已完成一期9台谱仪的建设，包括：由中国原子能科学研究院建造的高分辨粉末衍射谱仪、残余应力衍射谱仪；与北京大学合作建造的高强度粉末衍射谱仪；与德国于利希研究院合作的织构衍射谱仪、四圆衍射谱仪和热中子三轴谱仪；与中科院物理所合作建造的热中子三轴谱仪；和中国科学院化学研究所合作建造的反射谱仪和小角散射谱仪。正在设计建造的4台谱仪包括：原子能院的热、冷中子照相装置；与中国人民大学合作的冷中子三轴谱仪和广谱谱仪。这4台设备预计将于2017年建设完成。

下面将根据新堆已完成和正在建设的谱仪类型，就相关谱仪的工作原理和应用特点加以介绍。

2.1 中子粉末衍射谱仪

中子粉末衍射谱仪(简称粉末谱仪)是基于布拉格衍射定律，用于研究多晶材料的晶体结构和磁结构的仪器^[12, 13]。其优势体现在：辨认较轻原子(如储氢材料研究)和近邻原子的占位和占位数，测定磁性原子磁矩的大小和方向，快速测定晶态、非晶态结构及其相变等。该类谱仪主要由中子单色系统、中子准直系统、样品定位和调整系统、中子探测系统和数据获取系统等几部分组成，其结构和工作原理如图2(a)所示。第一准直器限定投射到单色器上的白光中子的方向和发散度，单色器利用衍射原理从白光中子中取出特定波长的中子。入射到样品上的中子方向由第二准直器限定，散射后的中子经第三准直器去除杂散中子后被探测器收集，并最终形成衍射图谱(在不同散射角度方向上的强度分布)。谱仪的分辨率和

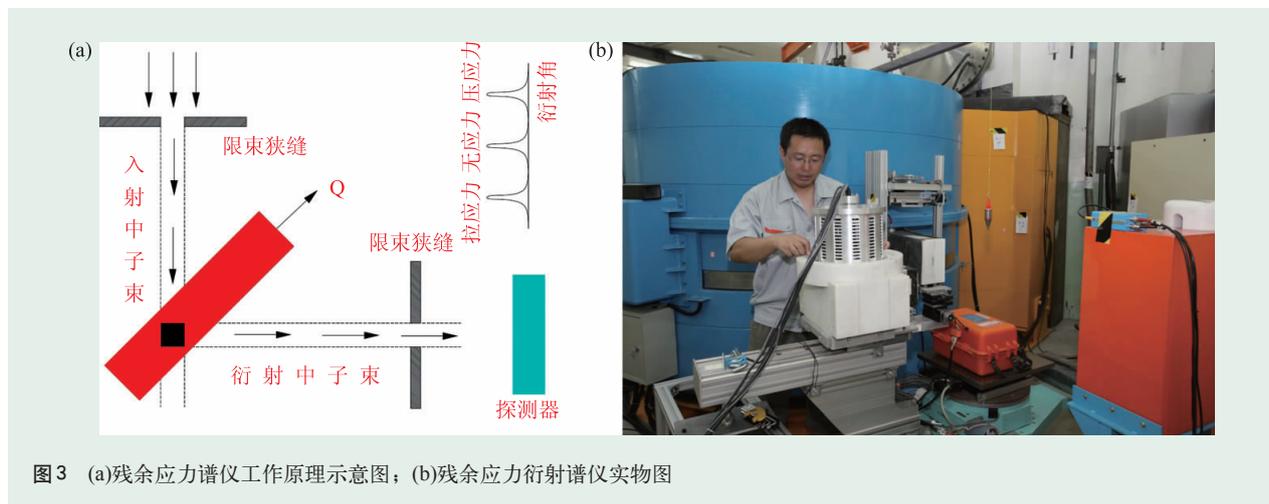


图3 (a)残余应力谱仪工作原理示意图；(b)残余应力衍射谱仪实物图

测量时间是衡量谱仪性能及确定应用范围的重要参数，可通过选取准直器、单色器的类型或调节其参数进行调整变化。

高分辨粉末谱仪由原子能院自主设计建造，采用Ge(115)垂直聚焦单色器，在 120° 起飞角处选取 1.886 \AA 波长的中子。探测器由64根间隔 2.5° 的 ^3He 探测器阵列组成，覆盖角度为 157.5° 。准直器可根据需要在 $10'$ 、 $20'$ 和 $40'$ 之间自由切换选取。该谱仪最优分辨可达 $\Delta d/d=1.4 \text{ ‰}$ ，可以解决单胞体积在 1000 \AA^3 左右的低对称结构问题。目前该谱仪已完成建造和初步带束调试工作(见图2(b))，在反应堆正式运转后将作为首批谱仪为用户服务。

高强度粉末谱仪由北京大学联合原子能院共同建造完成。该谱仪采取Si(511)双聚焦单色器、径向震荡准直器和位置灵敏探测器阵列的独特组合方式，以达到提高谱仪探测效率的目的。按照设计要求，该谱仪可以满足少量样品(1 g甚至100 mg)的测试分析要求，可在快速实时测量结构，研究相变、化学反应以及高压下物态变化等方面发挥优势，和前面介绍的高分辨谱仪有较强的互补性。这台设备在2012年4月完成建造工作(见图2(c))，待后续带束调试优化后便可以向广大用户开放。

针对以上两台设备，原子能院在初期还配备了两台变温装置(4 K至500 K；室温至1800 K)、高压装置(600 Mpa，10 GPa)、变温磁场装置(1.6

K—300 K，7 T)，这为研究材料在各种复杂环境下的变化提供了有力支撑。

2.2 中子残余应力衍射谱仪

中子残余应力谱仪工作原理如图3(a)所示，它是利用布拉格衍射原理，测量被测材料(部件)取样体积内某一取向晶面(晶面间距为 d)衍射峰，通过与无应力相应晶面(晶面间距为 d_0)衍射峰峰位比较，获得取样体积在该方向上的应力信息^[14, 15]。通过旋转和移动样品，可进一步获得样品内部相同或不同部位三维应力整体分布情况，而通过改变狭缝尺寸改变取样体积，则可以调整应力分析梯度。在无损应力测试分析手段中，X射线主要集中在表面(微米至毫米量级)，而中子利用其深穿透性，可实现工件内部深度(厘米至分米量级)三维无损应力分析和原位工况(配备变温、加载等样品环境)应力状态实时监测^[16]。也正因为中子残余应力谱仪具备较大工程部件深度、无损、原位测试分析能力，使得该技术目前在实际工业中获得广泛应用，尤其是在新材料研发，部件加工处理工艺改进以及关键部件使用安全和寿命评估中发挥着越来越重要的作用。

残余应力衍射谱仪由原子能院设计建造^[17]，单色器可在Cu(220)和双聚焦Si(311)之间自由切换，入射中子波长在 0.895 \AA 和 2.666 \AA 范围内可变，针对不同的研究材料，可根据需要选择不同

的入射波长,以使取样体积接近立方体。样品台是与瑞典合作引进的,可承重200 kg。样品台到单色器和探测器之间的距离可调,以满足不同工件尺寸和分辨需求。探测器为一维位置灵敏探测器,可以实现衍射峰数据的同时获取。该装置还配备了样品自动定位和狭缝自动调整系统,大大节省了束流时间。目前,残余应力衍射谱仪已完成安装和带束初步调试工作(见图3(b)),并分析检测了高强度钢等样品,结果表明,该装置已具备开展应力测试分析的能力。此外,原子能院还为其配备了拉伸装置(最大载荷分别为10 kN和50 kN),疲劳机(最大动态负荷100 kN),高温炉(室温到1300 K)等样品环境,以满足部分原位测试分析的需求。

2.3 中子织构衍射谱仪

所谓织构是指多晶材料由于加工过程或受到其他外界因素的影响,使得晶粒在某些方向择优排列,呈现出或多或少的方向上的统计不均匀性的一种现象。中子织构谱仪就是利用衍射的方法,在传统的中子粉末衍射的基础上,加装特殊的样品取向调整装置(通常利用欧拉环测角头(见图4(a))的转动实现样品在 4π 空间的任意取向)并辅以特殊的角度读出系统和测量控制程序,通过转动样品取向调整装置,达到测量样品不同取向时的衍射强度,从而得到多晶样品内某个晶面族(由固定探测角度的探测系统确定)取向分布图

形(极图)的一种衍射谱仪^[18, 19]。中子织构谱仪因中子较强的穿透力,因而可以测量较大体积样品的织构,得到工程上更受重视的体织构的信息,保证高的统计性和测量精度,实现大样品局部织构的无损测试分析,以及加装样品环境开展织构随环境变化原位测试分析。

原子能院织构衍射谱仪(见图4(b))是在和德国于利希研究中心合作引进的一台四圆单晶谱仪的基础上改造而成,其单色器运动控制和屏蔽系统、准直和运动控制系统、核电子学系统、数据采集和处理系统由原子能院配备。该装置采用垂直聚焦Cu(111)单色器,中子波长为 1.48 \AA ,中子准直系统由可自由切换的发散度为 $20'$, $30'$ 的Soller型准直器组成,探测器现由单根 ^3He 正比计数管组成。目前该谱仪在国际原子能机构支持下,其探测系统将升级为二维位置灵敏探测器,届时探测效率将至少提升8倍。该谱仪配有一台高温装置(温度范围:室温至1000 K)。2012年,谱仪成功完成了铝合金标样织构测定工作,获得了我国首个中子织构极图,测试精度达到国外同类谱仪的同等水平,得到了国际同行的赞许和肯定。

2.4 中子四圆衍射谱仪

中子四圆衍射谱仪又名单晶谱仪,顾名思义,其研究的对象主要为单晶样品。一般认为,粉末衍射仪所研究的多晶材料的所有晶粒取向在

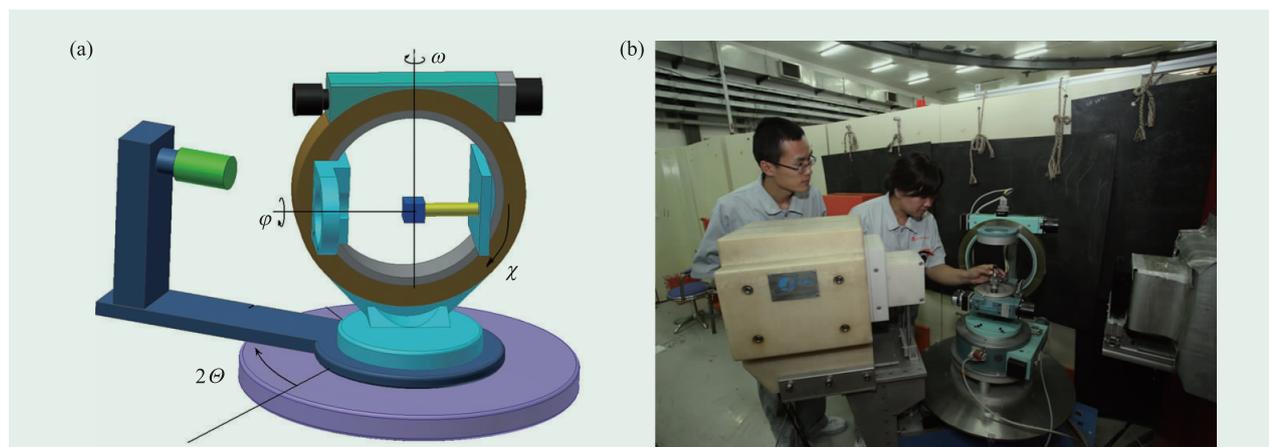


图4 (a)欧拉环测角头工作原理示意图; (b)中子织构谱仪实物图

4π 方向均匀分布,而织构谱仪所研究的多晶材料的晶粒取向在 4π 空间的某些方向上存在择优分布。单晶谱仪可以认为是织构的一种极端表现,即所有晶粒取向都沿某一个特定的方向。因此,单晶谱仪和织构谱仪的整体构型基本相同,同样是由中子单色系统、准直系统、样品固定和姿态调整系统(欧拉环测角头样品台)、探测系统、运动控制系统和电子学等系统组成,只是在运动控制和实验数据获取和分析处理方面有所不同。其之所以被称为四圆谱仪,是因为它的特征是有4个独立旋转的圆,圆的中心为入射中子束与样品交汇中心,分别是样品以该中心水平旋转、垂直旋转和自转以及探测器以该中心水平旋转构成(见图4(a))。中子四圆衍射谱仪可以在晶体结构中近邻元素、轻元素和同位素占位识别以及磁有序研究等方面发挥作用^[20, 21]。

原子能院四圆谱仪也是在和德国于利希研究院合作引进的一台四圆单晶谱仪的基础上,根据需要配备了单色器运动控制系统、屏蔽系统和准直系统等关键部件后建成的(见图5)。它所采用的垂直聚焦Cu(220)单色器,其入射中子波长为 0.89 \AA ,中子准直系统为可自由切换的发散度为 $15'$, $30'$ 的Soller型准直器,探测器为1根 ^3He 正比计数管。目前,该谱仪已顺利实现了氯化钠单晶的测量工作,结果表明,它已具备开展单晶样品测试的基本能力。

2.5 中子反射谱仪

中子反射谱仪是薄膜材料研究的一种重要手



图5 四圆衍射谱仪实物图

段^[22-24]。其工作原理和光在媒质中传播时发生的折射和反射现象相似。当中子以较小的角度从一种介质进入另一种介质时,因其在两种媒质中的散射长度密度(势能)不同,中子会感知环境的变化而在界面处发生反射和折射,其镜像(入射角等于反射角且在同一散射平面内)或非镜像反射率曲线的变化情况将反映出薄膜表面、界面、薄膜厚度和成分沿厚度方向变化等信息。中子反射谱仪就是通过测量反射率和散射角度(散射矢量)对应关系来探知薄膜内部信息(见图6(a))。目前,该类谱仪(非飞行时间模式)一般有两种构型,分别为水平散射几何(样品垂直放置,探测器水平移动)和垂直散射几何(样品水平放置,探测器垂直移动)。水平散射几何研究对象主要为固态薄膜或者密封的固液薄膜,而垂直散射几何则可以研究自由表面液态薄膜。由于中子对轻元素灵敏,具有磁矩,因此目前在生物膜研究以及利用极化中子

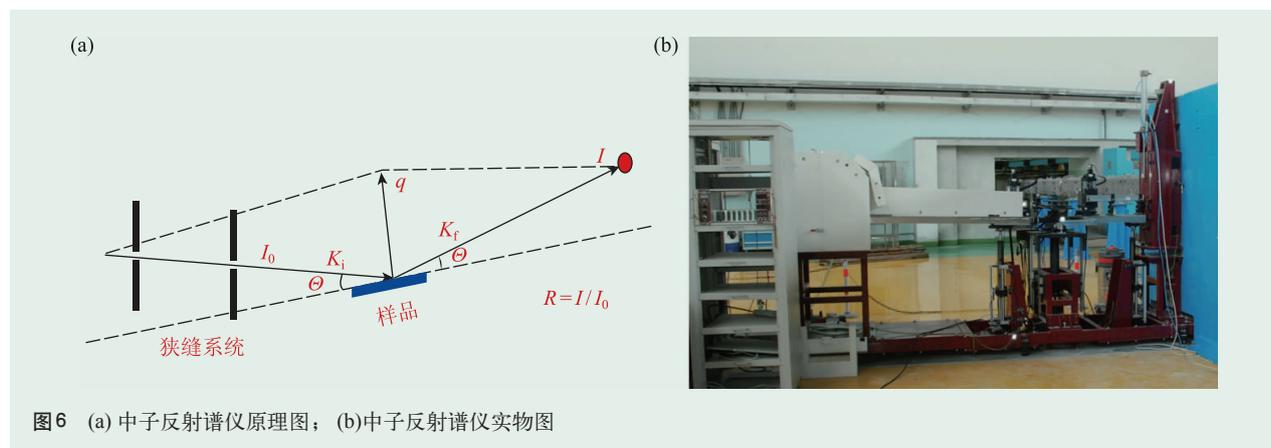


图6 (a) 中子反射谱仪原理图; (b) 中子反射谱仪实物图

技术研究磁性薄膜特性等方面有其独到优势。

新堆导管大厅内已建成的中子反射谱仪(见图6(b))为中国科学院化学研究所和原子能院联合建造,几何构型为垂直散射几何^[25]。单色器采用热解石墨PG(002),将由反应堆经导管传输来的波长为4.75 Å的冷中子沿垂直方向取出。入射中子和待研究薄膜之间的夹角的调节(即入射角)是通过调整单色器垂直倾角来实现。与此同时,样品的高度以及样品和探测器之间的夹角随着入射中子束倾角的改变而联动调节,以保证样品始终处于束流的中心,并保证入射角和反射角相同。中子的入射尺寸以及谱仪的分辨率可通过调整两套可在X, Y方向上自由调节的狭缝系统来进行调整。谱仪的运动控制部分和后面将要提到的小角谱仪是在中国科学院高能物理研究所支持下完成的。目前该谱仪建造工作已完成,待反应堆完成冷源安装工作后可开展后续调试工作。

2.6 中子小角谱仪

中子小角谱仪所研究材料结构的尺寸远大于原子间距,通常在1 nm至1000 nm之间,在空间尺度上是常规衍射谱仪很好的一种补充手段。众所周知,在入射波长固定的情况下,较大的测量尺度对应的是较小的测量角度。也正因其常规测量角度小,故被习惯性地称为小角谱仪(其实确切的称呼应该是小Q(散射矢量)谱仪)^[26, 27]。而为了尽可能提高可测试的最大空间尺度信息,往往要想办法尽可能地拓展可探测的最小衍射角度,其中增加样品到探测器的距离便是方法之

一,所以通常小角谱仪都比较长,出现所谓的30 m或40 m小角谱仪。在谱仪组成上,小角谱仪和常规衍射谱仪一样,也是由中子单色系统、准直系统、样品定位和调整系统、中子探测系统和数据获取系统等几部分组成,构型示意图7(a)。中子单色系统一般会选用机械速度选择器,而准直系统会根据需要选用不同距离的单孔或多孔来实现。此外,因为谱仪较长,为了减小空气对中子的衰减,中子飞行路径要保持在真空状态下。

中国科学院化学研究所和原子能院合作建造的小角谱仪长为30 m(见图7(b)),可根据需要利用机械速度选择器选择4 Å至20 Å范围内的某一波长的中子作为入射中子($\Delta\lambda/\lambda=10\%—22\%$),准直系统在单孔、四孔和聚焦透镜间自由切换。探测器采用的是645 mm×645 mm ³He二维位置灵敏探测器(位置分辨率为5 mm×5 mm),该探测器位于一个真空屏蔽桶内,被放置在一个可前后自由移动的轨道车上,根据测量需要,自动调整位置,最终可实现的散射矢量测量范围为0.0008 Å⁻¹至5 Å⁻¹。现在该装置和反射谱仪一样,业已完成安装工作,等待条件具备后开展后续调试工作。

2.7 中子三轴谱仪

到目前为止,前面介绍的所有中子谱仪均为弹性散射谱仪,即所观察的中子与物质作用前后不损失能量,只是通过测量、分析不同散射方向上中子强度变化情况来获知物质内部成分和结构信息,即回答原子、分子在在哪里的问题。而中子

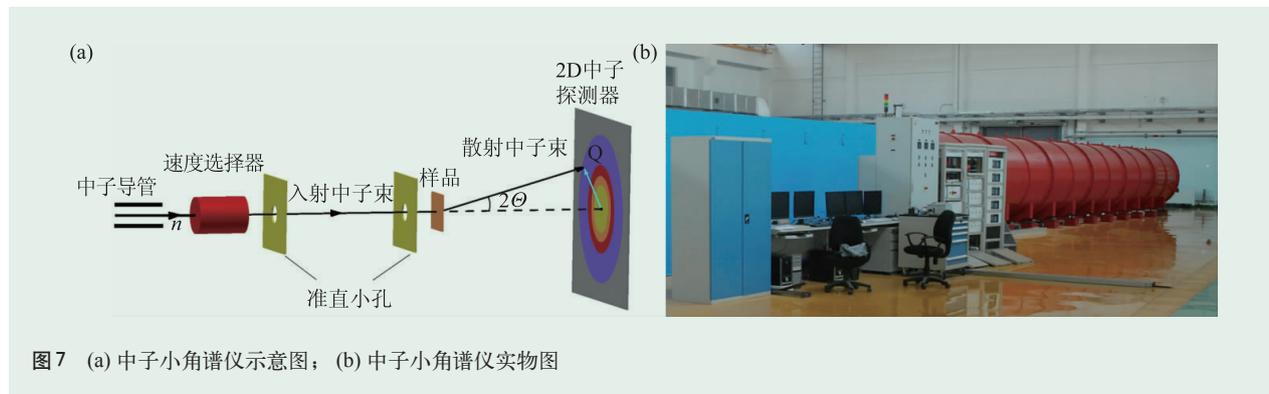


图7 (a) 中子小角谱仪示意图; (b) 中子小角谱仪实物图

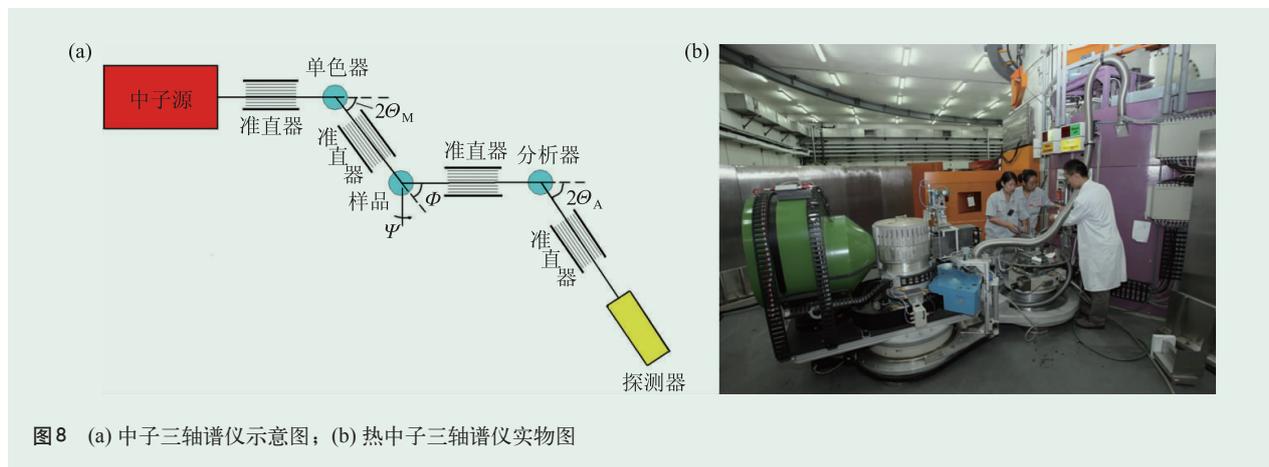


图8 (a) 中子三轴谱仪示意图；(b) 热中子三轴谱仪实物图

三轴谱仪在常规弹性散射(衍射)谱仪的基础上, 添加了散射后中子能量分析功能, 进而可以通过中子相干非弹性散射来测量分析物质晶格动力学的相关问题, 即回答原子、分子在做什么的问题^[28, 29]。该谱仪的工作原理如图8(a)所示。和前面提到的粉末衍射谱仪(有时也被称为二轴谱仪)比较不难看出, 三轴谱仪增加了分析器这个功能部件。单色器、样品和分析器分别被放置在3个平台上, 这些平台可各自绕垂直轴水平转动, 三轴谱仪也因此而得名。单色器绕垂直轴旋转, 可以改变入射中子能量, 分析器绕垂直轴转动, 可以分析散射中子能量, 通过比较散射前后中子能量变化, 可得出中子与样品的能量交换情况。样品和分析器绕样品台垂直轴旋转, 可以改变散射矢量。两者的结合便可以得出能量与动量的变化关系。目前三轴谱仪的应用主要集中在物质内部的自旋、电荷和轨道等自由度之间的相互作用或耦合所产生的关联效应和元激发色散关系等谱学特性研究方面, 因反应堆产生的中子能量和物质的元激发能相当, 而动量转移基本可以覆盖整个第一布里渊区, 因此在晶格动力学研究方面有其独特的优势。

中国原子能科学研究所的三轴谱仪和前面提到的中子结构、四圆谱仪相同, 是从德国于利希研究院合作引进的, 并以此三台设备为基础, 形成了中国原子能科学研究所—德国于利希研究院中德中子科学联合中心, 该中心于2010年12月正式揭牌成立。三轴谱仪(见图8(b))配有Cu

(200)和热解石墨PG(002)两种双聚焦单色器, 以适应不同能量中子的需要。两个单色器的起飞角分别固定于 26.8° , 41.4° 和 74.3° 3个入射角, 中子能量可提供6种选择: 5, 14, 17, 34, 50, 117 meV。分析器采用双聚焦PG(002)。为了减少高能中子的干扰, 谱仪配备了铪和热解石墨两种过滤器。准直器有20', 40'和60'可供选择。所有单色器、过滤器、准直器的切换均采用自动切换方式, 操作灵活简便。

继中德中子科学联合中心的热中子三轴谱仪之后, 中国科学院物理研究所立足于国内凝聚态物理研究的迅猛发展和强大的应用需求, 与中国原子能科学研究所合作开发建造了以高通量、高分辨率、强磁场为特征的热中子三轴谱仪。该谱仪与中德中子科学联合中心的热中子三轴谱仪的重要区别在于入射中子能量采用连续可调方式, 使测量的适用性更强, 可测试范围更广。同时速度选择器的使用可有效降低散射背底, 提高测试精度^[30]。

鉴于热中子与冷中子的测试范围不同, 具有互相补充的特性, 继热中子三轴谱仪之后, 中国人民大学与中国原子能科学研究所联合合作开发了两台冷中子非弹性散射谱仪, 分别包括冷中子三轴谱仪及冷中子广谱谱仪。冷中子三轴谱仪不仅秉承了热中子三轴谱仪操作灵活的特点, 而且借助于冷中子源低能量的特点, 可将能量探测分辨率提高到0.05 meV以下。目前该项目已得到国家经费支持, 预计2017年建设完成。

2.8 中子照相谱仪

中子穿过物体时, 中子与原子核发生俘获和散射等核反应而使透射中子注量率减少。因为不同的材料对中子束有不同的衰减特性, 所以透射中子束包含样品内部成分和结构的信息, 将透射中子注量率的空间分布显示出来, 就可获得样品内部所含材料的空间分布、密度变化和各種缺陷的综合信息, 这就是中子照相的基本原理^[31]。中子照相设备结构通常由三大部分构成: 中子源、准直器、探测成像系统(包括中子转换屏)。中子源和准直器的设计决定了照相中子束的特性。中子束的特性对成像的反差灵敏度、分辨率等都有影响。由于中子的独特优越性, 中子照相技术在国际上得到了迅猛的发展, 在传统的中子照相技术的基础上已经研发出三维断层照相、实时照相、相衬度法照相等先进技术。作为一种无损测试技术, 中子照相用途十分广泛, 在航天、航空、军工、核工业、建筑、考古、生物学、材料学、能源存储等领域中有着广泛和迫切的需求。

在中国先进研究堆上规划建设热中子照相、

冷中子照相两台设备, 该项目已获得国家批复, 目前已经完成相关物理设计工作^[32], 预计2017年可以建成投入使用。

3 结束语与展望

中子散射技术作为人类认知物质微观世界的一种独特技术手段, 被广泛应用于物理、化学、生物、医药、材料、能源和工业等众多领域, 并发挥着越来越重要的作用。中国先进研究堆已经成功建成, 在广大用户的支持和参与下, 现已完成9台中子散射谱仪的建造工作, 待新堆获得国家批复运行后, 一个初具规模的中子散射科学平台便可对外开放, 为广大用户提供支持与服务。4台建设中的中子谱仪正在按计划进行, 有望在5年后建成并投入使用, 届时一个较具规模、在国际上具有一定竞争力的中子散射中心将初步形成。与此同时, 中国原子能科学研究院中子散射团队正在积极筹划后续谱仪的建设与发展, 争取各方面的参与与支持, 努力将新堆建成一个开放、共享、合作、共赢的中子科学平台, 为推动我国科技进步和提升国际竞争力提供技术支撑。

参考文献

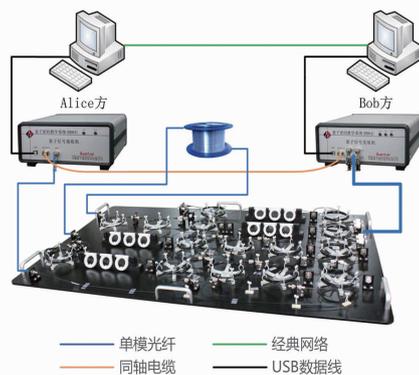
- [1] 叶春堂, 刘蕴韬. 物理, 2006, 35:961
- [2] 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学——原理、方法与应用. 北京:原子能出版社, 2011
- [3] Squires G L. Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering. Cambridge: Cambridge University Press, 1978
- [4] Lovesey S W. Theory of Neutron Scattering from Condensed Matter (Vol.1: Nuclear Scattering, Vol.2: Polarization Effects and Magnetic Scattering). Oxford: Oxford University Press, 1984
- [5] Skold K, Price D L (eds.). Methods of Experimental Physics 23 A. New York: Academic Press, 1986
- [6] Dobrzynski L, Blinowski K, Cooper M. Neutrons and Solid State Physics. New York, London, Toronto, Sydney, Tokyo, Singapore:Ellis Horwood, 1994
- [7] Chadwick J. Nature, 1932, 129: 312
- [8] Chadwick J. Proc. Roy. Soc. A, 1932, 136: 692
- [9] Liang L Y, Rinaldi R, Schober H(eds.). Neutron Applications in Earth, Energy, and Environmental Sciences. New York: Springer-Verlag, 2009
- [10] Neumann D A. Materials Today, 2006, 9:34
- [11] Furrer A, Neutron Scattering in Novel Materials. Switzerland: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000
- [12] Kisi E H, Howard C J. Applications of Neutron Powder Diffraction. Oxford:Oxford University Press, 2008
- [13] Pecharsky V K, Zavalij P Y. Fundamentals of Powder Diffraction and Structure Characterization of Materials. Germany: Springer Science+Business Media, Inc., 2003
- [14] Hutchings M T. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. CRC Press/Taylor & Francis, 2005
- [15] Hauk V. Structure and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. Aachen:Elsevier Science B. V., 1997
- [16] Tanaka T, Akiniwa Y. JSME International Journal Series A,

- 2004, 47: 252
- [17] 李峻宏, 高建波, 李际周等. 原子能科学技术, 2010, 44(4): 484
- [18] Bunge H J. Texture and Microstructures, 1989, 10:265
- [19] Szpunar J A. Journal of Materials Science, 1984, 19:3467
- [20] Lander G H, Emery V J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1985, B12: 525, 537
- [21] Wilson C C. Single Crystal Neutron Diffraction from Molecular Materials. World Scientific Publishing Company, 2000
- [22] Zhou X L, Chen S H. Physics Report, 1995, 257:223
- [23] Daillant J, Gibaud A. X-ray and Neutron Reflectivity: Principles and Applications. Berlin: Springer Verlag, 1999
- [24] Majkrzak C F. Acta Physica Polonica, 1999, 96:81
- [25] Yuan G C, Zhang H X, Cheng H *et al.* Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2011, 356:65
- [26] Chen S H. Ann. Rev. Phys. Chem., 1986, 37:351
- [27] Windsor C G. J. Appl. Cryst., 1988, 21:582
- [28] Shirane G, Shapiro S M, Tranquada J M. Neutron Scattering with a Triple-Axis Spectrometer. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [29] Trevino S F. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 1993, 98:59
- [30] 李世亮, 戴鹏程. 物理, 2011, 40:33
- [31] Anderson I S, McGreevy R L, Bilheux H Z(eds.). Neutron Imaging and Applications; A Reference for the Imaging Community. New York: Springer-Verlag, 2009
- [32] Han S B, Wu M M, Wang H L *et al.* Physics Procedia, 2013, 43:73



QKDEdu-S 量子密码教学科研系统

系统组成



组件清单

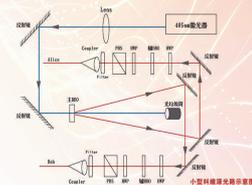
名称	数量
QKDEdu-T量子信号发射机	1
QKDEdu-R量子信号接收机	1
QKDEdu-P光学调试平台	1
光纤盘	1
同轴电缆	1
网线	1
可选配件	
PC (Windows XP以上操作系统)	2

QEPS小型纠缠源系统

系统组成



QEPS小型化纠缠源系统实物图



技术指标

泵浦光功率 (mW)	100
偶然符合计数率 (Hz)	< 10
单路光子亮度 (cps.)	> 100k
纠缠光子对亮度 (cps.)	> 10k
H, V偏振对比度	> 25:1
P, N偏振对比度	> 7:1
Bell不等式破坏程度	S > 2.3
可见度	92%

提供最专业的量子通信设备

物理专业: 探测器、小型纠缠源、高亮纠缠源、多光子纠缠等。

通信专业: BB84教学科研系统、B92教学科研系统、可商用的量子通信保密网络。

地址: 合肥市创新产业园D3楼
电话: 400-885-0929
0551-6533590

销售: 13395515356
13395515359
邮编: 230088

传真: 0551-65368589
邮箱: feng.liu@quantum-info.com
网址: http://www.quantum-info.com