

# 中国散裂中子源

陈和生

(中国科学院高能物理研究所 100049)

中子是组成原子核的粒子之一，和质子一起组成氢之外其他元素的原子核。1932年，查德威克(J. Chadwick)用 $\alpha$ 粒子轰击铍，发现从铍放出的射线是一种质量跟质子差不多的不带电的粒子，命名为中子。1935年查德威克因发现中子的重大贡献，获得诺贝尔物理学奖。1936年米切尔(P. Mitchell)和鲍尔斯(P. Powers)采用镭、铍不稳定热中子源在实验上定性地证明了中子的衍射特性。1944年费米(E. Fermi)和津恩(H. Zinn)使用Argonne CP-3堆引出的热中子，进行镜反射实验，实验结果明显地与中子的波动性而不是粒子性相关；中子的波长和散射截面与X光相当，这是中子光学的开端。其后陆续证明，所有用光及X光产生的经典光学现象都可用中子进行。1945年之后，随着核反应堆技术的进步，可以在很窄的能量范围内得到充分数量的中子，中子衍射才成为固体和液体研究中的一种重要技术。因中子不带电，不存在库仑势垒的阻挡，

穿透力很强，几乎任何能量的中子同任何核素都能发生反应。在实际应用中，低能中子的反应起更重要的作用。虽然中子是电中性粒子，但是中子具有 $-1.91304275 \mu_N$  ( $\mu_N$ 是磁矩的单位，称为核磁子)的磁矩。中子的磁矩使得中子能与原子磁矩发生电磁相互作用。

## 1. 中子散射的特点和应用

中子散射是人类探索物质微观结构的有力手段之一。如图1所示，低能中子的波长和物质中原子间的距离有相同的量级，其能量正好和原子分子的运动能量大体相当，具备研究物质结构和运动状态的理想条件；与X射线比较，中子散射技术具有高穿透性、对轻元素敏感、分辨同位素、探测磁矩和物质中核与磁的基本相互作用等方面的独特优势，不仅可探索物质静态微观结构，还能研究其动力学机制。由于中子的高穿透性，使得低温、强磁场和高压等原位样品环境

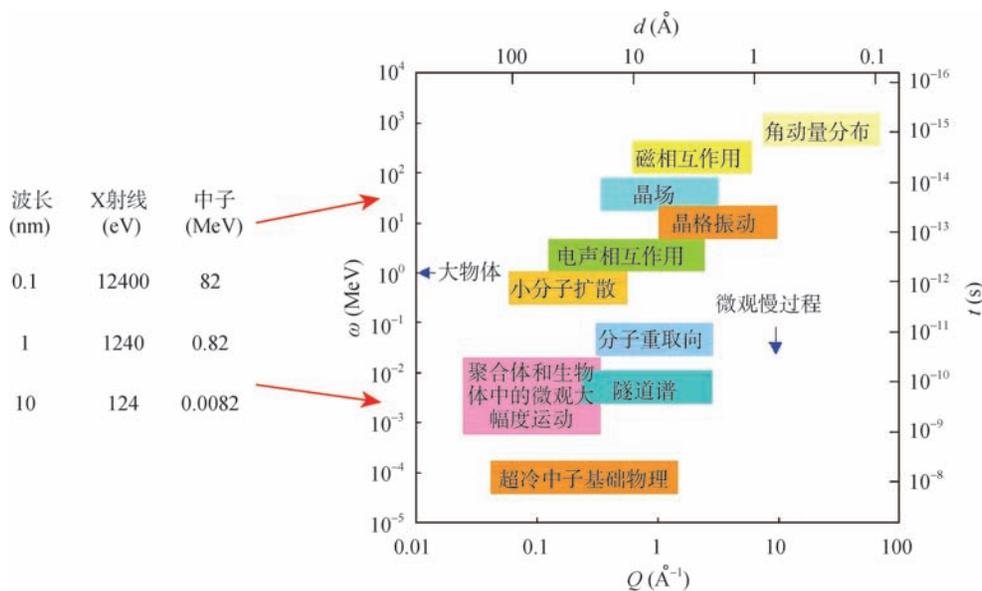


图1 热中子能量与物质中许多动态过程的激发能量相当，可测量晶格振动、扩散

容易实现；X射线对电子云的分布敏感，而中子是与原子核反应，确定的是原子核的位置，两种技术互补；中子对轻元素比X射线敏感，在确定轻元素的位置方面是不可替代的；中子对同位素有不同散射长度，特别是氕(H)和氘(D)，散射长度不仅大小不同、符号也相反，在求解如软物质、生物大分子领域中的复杂结构，氢氘衬度法具有重要作用；中子的磁散射强度和结构散射强度在同一量级，是测量磁结构和磁激发的重要工具，1948年在反应堆中子源首次从实验上观测到奈尔(L.Neel)预言的反铁磁序(奈尔指出存在有一种“反铁磁性”物质，在该物质里各层原子的磁取向彼此相反，总的说来没有磁性。但在某些情况下，一个方向上的磁取向超过另一个方向，这样总体看来就有了磁性，这就是“反铁磁序”)。

1994年沙尔(C.Shull)和布罗克豪斯(B.Brockhouse)利用中子散射分别研究磁结晶学及晶格动力学而获得了诺贝尔物理学奖，将中子散射应用推向了新的高潮。中子散射技术在国际上受到高度重视，其用户群体的研究领域也已经从传统的基础学科转向环境、健康、能源以及纳米和材料科学技术等新兴学科。中子散射的研究范围覆盖从pm( $10^{-12}\text{m}$ )到几十个 $\mu\text{m}$ ( $10^{-6}\text{m}$ )的量级，不同的中子谱仪可用于测量不同长度标度的微观结构(图2)：粉末和单晶衍射谱

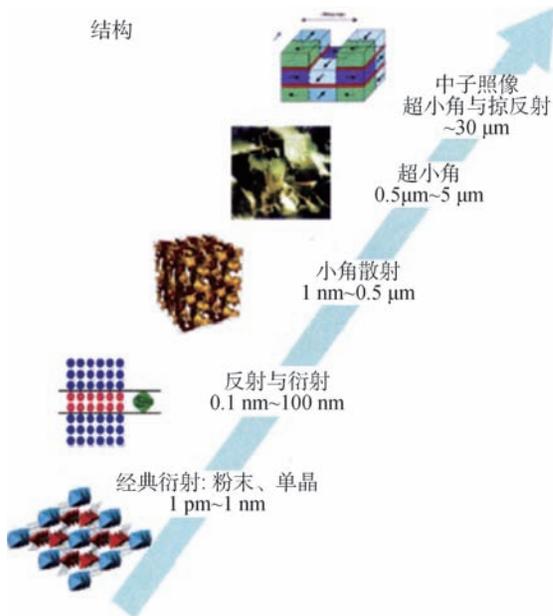


图2 中子散射谱仪：微观结构

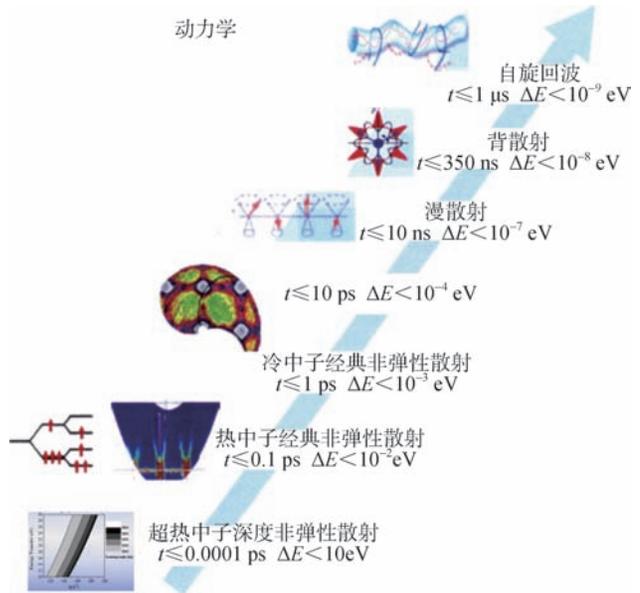


图3 中子散射谱仪：微观运动

仪可测量pm至nm( $10^{-9}\text{m}$ )量级的结构；反射谱仪可用于测量0.1nm至100nm量级的层状结构；小角谱仪的测量范围覆盖从 $\text{\AA}$ ( $10^{-10}\text{m}$ )至几十 $\mu\text{m}$ ；中子照相谱仪可达到更长的尺度标度。在动力学测量方面，中子散射研究的时间标度可从 $10^{-4}\text{ps}$ 到 $\mu\text{s}$ ( $10^{-6}\text{s}$ )量级(图3)：冷中子到超热中子非弹性谱仪的覆盖范围从 $10^{-4}\text{ps}$ ( $10^{-16}\text{s}$ )到10ps量级；漫散射和背散射谱仪可测量的动力学过程从几十到几百个ns( $10^{-9}\text{s}$ )；自旋回波谱仪甚至可测量 $\mu\text{s}$ 量级的慢运动和驰豫现象等过程。由于中子探测比X射线困难得多，而且中子散射实验中中子的流强比同步辐射实验中光子流强低许多数量级，因此，中子散射实验的难度比同步辐射实验高得多。

中子散射在我国的基础科学研究、应用基础科学研究和工程技术等诸多领域有着广泛的应用前景，为解决国家可持续性发展和国家安全的战略需求的许多瓶颈问题具有重要意义。例如中国散裂中子源在材料工程技术(如大型工程材料无损检测、应力等)、清洁能源材料(如锂离子电池材料、氢能源材料和燃料电池材料等)和生物医学的研发方面具有不可替代的作用，将填补我国脉冲式散裂中子源技术和应用领域的空白。

## 2. 反应堆和散裂中子源

当前国际上中子散射技术的研究和应用十分广

泛，对提高国家整体科技创新实力具有重要意义。中子散射研究需要先进的中子源，能产生高通量中子的中子源主要包括核反应堆和散裂中子源。

核反应堆是一种连续的中子源，应用于中子散射领域的反应堆的中子通量基本稳定在  $10^{14} \sim 10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$ 。随着科技的进步，小样品的快速、高分辨的中子散射测量需要通量更高、波段更宽的中子源，散裂中子源应运而生，脉冲中子通量达  $10^{15} \sim 10^{17}/\text{cm}^2/\text{s}$ ，成为研究用中子源的主流发展方向。

核反应堆是一种能以可控方式产生自持链式裂变反应的装置。如图 4 (a) 所示，裂变反应常见的过程是： $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow \text{A}^* + \text{B}^* + x\text{n}$ ； $\langle x \rangle \sim 2.5$ 。反应堆中子源的特点是中子通量大，但中子能谱复杂，通常低能部分服从麦克斯韦分布，高能部分服从  $1/E$  规律，称为费米能谱。

当一个中等能量的质子打到重核（铅、钨、汞等元素）之后会导致重核的不稳定而“蒸发”出 20~30 个中子，这样重核“裂开”并向各个方向“发散”出相当多的中子，大大提高了中子的产生效率，如图 4 (b) 所示。按这种原理工作的装置称为散裂中子源（Spallation Neutron Source）。裂变和散裂过程都会产生大量的热，消耗巨大的能量，裂变过程大约为 200MeV/中子，散裂过程大约为 40MeV/中子。所以散裂方法在热散处理和能耗方面比裂变方法有明显的优势，前者的效率大约是后者的 5 倍。铀 235 裂变中

子产额为 2~3 个，而 1GeV 的质子在重原子核的靶上通过散裂反应，可产生 30~40 个快中子。

与核反应堆中子源相比，散裂中子源具有许多独特性能：高脉冲通量，丰富的高能短波中子，优越的脉冲时间结构，低本底。近年来，随着强流加速器技术的发展，束流功率为兆瓦量级的散裂中子源成为国际公认的、新一代高通量、宽波段、高效安全的中子源。它们产生的脉冲中子通量比反应堆高上百倍，为诸多领域的创新研究提供了强大的平台。由于散裂中子源不使用核燃料，热功率低，只产生极少量活化产物，环境友好，成为了国际上先进中子散射源的发展趋势。

目前，世界上正在运行或建造的脉冲式散裂中子源主要有美国的 SNS、日本的 J-PARC 和英国的 ISIS 等，下面将分别介绍。

美国橡树岭国家实验室具有一台设计束流功率为 1.4 MW 的散裂中子源 SNS。它提供的脉冲中子通量高达  $10^{17}/\text{cm}^2/\text{s}$ ，项目总投资高达 14 亿美元，于 2006 年建成并投入使用，共有 18 台中子谱仪。SNS 已于 2014 年 6 月达到 1.4MW 的设计功率。SNS 正在积极规划第二靶站技术设计和科学应用。考虑到安全性、性价比和靶体体积等综合因素，SNS 第二靶站设计束流功率 500 kW，使用水冷却的钨靶。SNS 第二靶站总共可容纳 22 台中子谱仪，首期准备设计建造 8 台谱仪。

日本原子能研究机构与高能加速器研究机构合建了强流质子加速器研究联合装置 J-PARC，工程总投资约 18 亿美元，于 2008 年建成并投入使用。其中的散裂中子源已有 17 台谱仪对外开放。J-PARC 包含一个 400 MeV（现在运行在 180 MeV）的直线加速器，后接一个 3 GeV 的快循环同步加速器（RCS），提供设计束流功率为 1MW 的质子束打靶产生高通量中子束（ $10^{12}$  数量级）。因 2011 年的福岛地震影响了运行，迄今为止达到的最大功率为 0.5 MW 的功率输出。J-PARC 也计划建设第二靶站。

英国卢瑟福实验室的散裂中子源 ISIS 利用直线加速器将负氢离子加速到 70 MeV，通过剥离注入，把负氢离子剥离成质子注入到快循环同步加速器，质子束在同步加速器中累积并加速到 800 MeV，然后引出轰

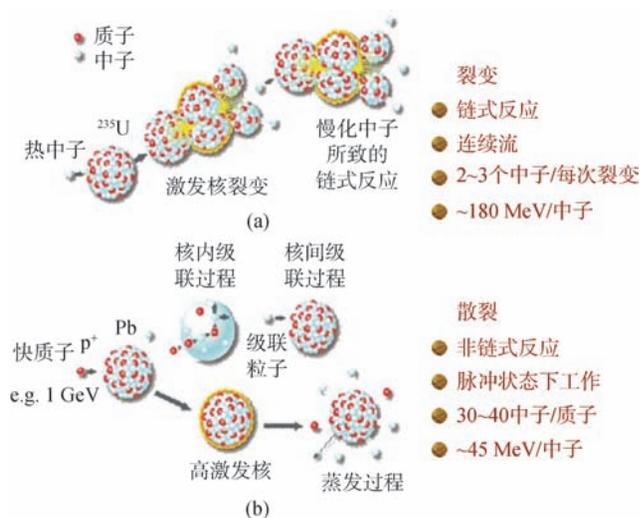


图 4 裂变过程 (a) 与散裂过程 (b) 的比较

击钨靶，产生的脉冲中子通量将可达  $8 \times 10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$ ，其脉冲中子通量已高出反应堆近一个量级。通过升级改造，ISIS 把质子加速器束流功率从 160 kW 提高到 240 kW。ISIS 已良好运行 20 年，其第一靶站的谱仪接近饱和，因此于 2003 年开始第二靶站建设。ISIS 第二靶站已于 2009 年建成，现有 27 台谱仪对外开放，其中第二靶站新增 13 台谱仪。现在每年用户逾 2000 人，是迄今为止世界上最成功的脉冲散裂中子源。

2014 年 9 月动工建设的欧洲散裂中子源 (ESS) 将建设世界最长的质子直线加速器，602 m 长的直线加速器产生 2.86 ms 的低频 (14Hz) 长质子脉冲，平均束流功率达 5 MW，质子束打击氦冷却的旋转钨靶，产生高通量宽波长范围的冷中子束流。ESS 预算超过 18 亿欧元，已于 2014 年 9 月动工。瑞典和丹麦共同做为主办国，出资 48%。ESS 建设在瑞典隆德，它的数据分析中心建在丹麦。11 个欧盟成员国已经承诺了工程建设经费的 49.5%，ESS 一期已规划设计 12 台中子谱仪。

表 1 是世界上正在运行和建造的主要的脉冲式散裂中子源参数比较，表中同时列出了正在我国广东建设的中国散裂中子源 (CSNS)。

### 3. 中国散裂中子源

中国散裂中子源 (CSNS, China Spallation Neutron Source) 是我国“十一五”期间重点建设的大科学装置，预期寿命超过 30 年。其一期设计束流功率为 100 kW，脉冲中子通量将大于  $2 \times 10^{15}/\text{cm}^2/\text{s}$ ，将来升级到 500 kW 后能提供  $\sim 10^{16}/\text{cm}^2/\text{s}$  通量的中子，与英国散裂中子源 ISIS、美国散裂中子源 SNS 和日本散裂中子源 J-PARC 一起列入世界四大散裂中子源的行列。CSNS 已于 2011 年在广东东莞开工建设，工程进

展顺利。2014 年 10 月 CSNS 加速器首台设备——负氢离子源进入隧道安装，标志着项目建设全面进入设备安装阶段；2015 年 4 月加速器前端的射频四极加速器 (RFQ) 成功出束，在 RFQ 出口处得到峰值流强超过设计值的负氢离子束流，标志了工程建设及束流调试的一个良好开端；2015 年 5 月靶站氦容器成功吊装，在密封筒内完成就位；2015 年 9 月 CSNS 工程 24 台 RCS 二极磁铁按计划完成了磁场测量，并在 RCS 隧道安装就位；至此，CSNS 从负氢离子直线加速器、环形快循环同步加速器到靶站的基本框架已经成功搭建，预计 CSNS 将于 2018 年春建成，对用户开放。

CSNS 的厂房、隧道和靶站的建设均已考虑到一期 80 MeV，100 kW 的负氢直线加速器将来升级到二期 250 MeV，500 kW 的需求。CSNS 靶站 500 kW 升级将使 CSNS 靶站每个脉冲的中子通量水平提升近五倍，达到 MW 级的日本 J-PARC 或美国 SNS 水平。

#### (1) 工程设计

CSNS 一期工程设计提供 20 条束线，参照国际惯例，在经费有限的情况下，只能“一次设计，分步实现”。根据我国目前科学研究和技术应用的重点，一期工程优先建设三台谱仪，即通用粉末衍射仪、小角散射仪和多功能反射仪三台谱仪。这三台谱仪用户量大，覆盖面广，且技术相对成熟。然而，三台谱仪未能充分利用中子束流资源，无法开展高精度测量及动力学、中子物理和技术基础等方面的研究，也无法满足国内中子散射研究和应用科学界对高性能中子谱仪的迫切需求。为了满足国内广大用户的需求，支撑解决国家中长期科技发展关键技术问题，同时也为了有效利用质子打靶产生的中子束流，节约国家资源，

表 1 世界上正在运行和建造的脉冲式散裂中子源的主要设计参数

	SNS	J-PARC	ISIS	ESS	CSNS
国家	美国	日本	英国	瑞典和丹麦为主的 13 个欧盟成员国	中国
束流功率 (MW)	1.4	1	0.16 升级至 0.24	5	0.1 升级至 0.5
中子通量 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$10^{17}$	$10^{12}$	$8 \times 10^{15}$	$2 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{15}$
靶材料	水银靶	水银靶	钨靶	钨靶	钨靶
第二靶站	规划设计中，钨靶	已决定建设	2009 年建成		
中子谱仪 (台)	18 台	17 台	27 台	一期规划 12 台	20 台
开始运行时间	2006	2008	1986	21 世纪 20 年代早期	2018

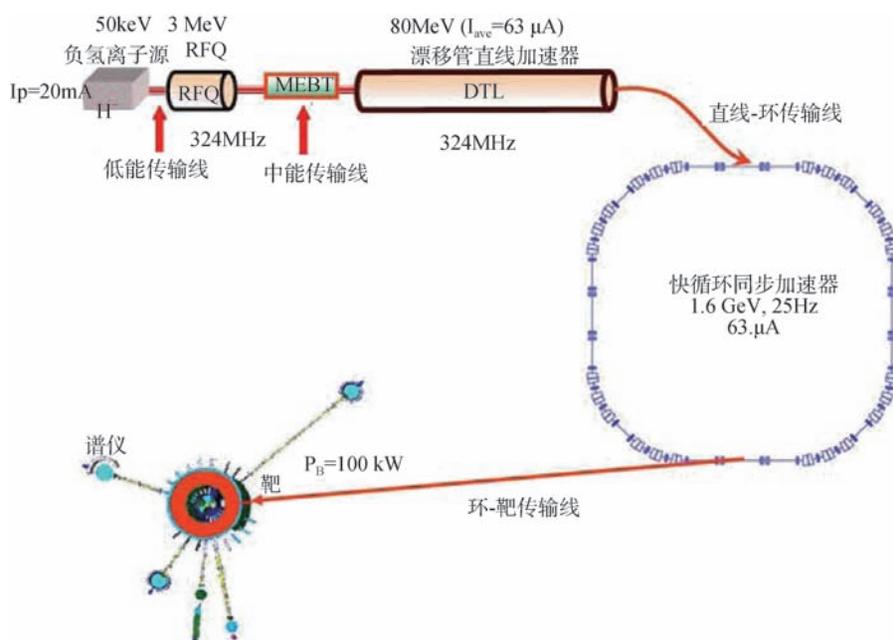


图5 CSNS 装置

CSNS 根据国内外中子科学研究应用的发展重点和用户需求规划了一期 3 台谱仪之后的 17 台中子谱仪。

CSNS 装置（图 5）建设的主要内容包括：一台 80 MeV 负氢离子直线加速器、一台 1.6 GeV 快循环质子同步加速器、两条束流输运线，一个靶站和一期 3 台谱仪及相应的配套设施。

CSNS 一期的总体设计指标为：打靶质子束流功率 100 kW，脉冲重复频率 25 Hz，每脉冲质子数  $1.56 \times 10^{13}$ （平均流强 62.5 μA），质子束动能 1.6 GeV，最高通量每质子、每单位立体角弧度  $5 \times 10^{-3}$ 。参照国际同类装置的建造及运行经验，CSNS 工程竣工的验收标准为所建装置具备所有达到 100 kW 打靶束流功率设计指标所需的设备，并通过初始性能验收测试。验收测试的指标为脉冲质子数达到设计指标的 1/10（即  $1.56 \times 10^{12}$ ），每质子、每单位立体角弧度的中子通量达到设计指标；谱仪验收指标为谱仪探测器中子探测效率大于 50%，空间分辨达到  $2.54 \times 2.54 \text{ cm}^2$ （高通量粉末衍射仪）和  $0.8 \times 1.0 \text{ cm}^2$ （小角衍射仪，多功能反射仪），时间分辨好于 5 μs。

靶站体系包括钨靶，三个中子慢化器（耦合氢慢化器容器、退耦合窄化氢慢化器、退耦合水慢化器容器），铁铍反射体，铁 + 重混凝土屏蔽体，公用和维

护系统。CSNS 的靶体材料选用钨包覆的固体钨靶，冷却剂为重水，靶体容器由在核工业广泛应用的耐照射及腐蚀的核级 316 不锈钢加工而成。低温液氢耦合慢化器和常温水慢化器分别位于靶体的正下方和正上方。CSNS 靶站系统能安全可靠地接受 100 kW、1.6 GeV 的质子束流，并把部分质子束流能量转化为短脉冲、高脉冲通量的慢化中子（ $<1 \text{ eV}$ ）。产生的脉冲中子通过水（300K），耦合液氢（20K），退耦合液氢（20K）等三个慢化器慢化后通过中子束道及束道开关分配到中子散射谱仪端。

## （2）大型中子散射平台

当前国内中子散射领域发展迅速，对中子散射技术的研究和应用的需求发展很快，中子散射领域的用户群体每年都在显著增加。CSNS 落户东莞，除了与国内外主要中子散射装置保持密切合作和共同用户培养计划外，也带动了国内特别是大珠三角地区的中子散射的科技和工业应用的迅速发展，与周边地区，包括香港地区的众多单位建立了合作关系。CSNS 装置的建设大大加强了国内中子散射科学和应用界的国际交流和合作，为我国的中子散射技术和应用在国际前沿领域占据一席之地提供了良好的机遇。

CSNS 为来自基础与应用科学研究、工程和工业应

用方面的广泛领域的用户提供了开放的大型的中子散射研究和应用的平台,目前我国中子散射的用户按应用方向可划分为以下4个领域,研究和应用内容涉及:

**量子和无序材料** 磁性和超导的弹性和非弹性散射相关材料,磁性薄膜中磁结构和磁相互作用,磁制冷材料的晶体结构和磁结构,关联电子体系等;有机材料的自旋密度分布和波,分子磁体;无序物质的原子动力学研究,多组分体系和特殊原子类型的动力学;无序,掺杂,相变,热动力学,化学和生物性质等方面。

**材料科学和工程** 应力应变测量,中子在工程部件和工程材料的应用;研究变形和破坏的机制,工程设计和评估的模型验证,过程控制和优化;优化能量存储体系和能量转换装置的过程和材料;理解浸润过程、性质和浸润表面相互作用之间的关系等方面。

**软物质和生物科学** 研究生物大分子的结构和动力学;研究蛋白质晶体学,对高分子体系实现功能性重要质子的精确定位;天然高分子材料、纳米材料、生物医用材料;功能性团簇的关联和自组装;药品和输运等方面。

**能源与环境科学** 清洁能源材料(锂离子电池材料、氢能源材料和燃料电池材料,太阳能电池薄膜等);新能源(包括核能、页岩气、可燃冰等);复杂环境,非环境条件下(包括应变)的多晶聚合;高温、高压下纳米多孔性,水合的,名义上无水的矿物合成物中水分子动力学研究;时间分辨的中子反射线照射术研究流变学,研究高压下流体和溶胶的物理和化学问题;火山爆发和地震学等。

#### 4. CSNS 工程进展

位于广东东莞的中国散裂中子源(CSNS)迄今为止工程进展顺利,CSNS加速器前端射频四极加速器(RFQ)已于2015年4月21日成功出束,标志工程建设及束流调试的良好开端;CSNS将于2018年春建成开放。

##### 加速器

2015年4月21日,加速器系统前端的RFQ成功出束,在RFQ出口处得到3 MeV,脉冲宽度50  $\mu\text{s}$ 的负氢离子束流,峰值流强达到28 mA(设计值15 mA),标志着工程建设及束流调试的一个良好开

端;束流诊断的软件、硬件启动和前端出束已同时在进行;RFQ的传输率达到88%,其四极管电源工作稳定。加速器系统的大部分设备均已完成批量生产:所有漂移管直线加速器(DTL)箱已完成生产,正在组装,所有注入件已完成生产;快循环同步加速器(RCS)磁铁,射频腔,主准直器和功率源已完成批量生产;引出冲击铁及其脉冲功率源和环至靶站的引出磁铁(Lambertson 磁铁)即将完成最后生产;环-靶传输线(RTBT)磁铁正在批量生产;26个双极陶瓷室已镀TiN,部分陶瓷室外部已安装射频腔;绝大部分控制系统已准备完毕。设备测试和测量方面,已经完成DTL第一个物理腔的高频场测量,该腔长9米,场的平整度和稳定性达到设计值;4个DTL调速管出现真空泄露,一个已修复,另外3个将送回CPI公司维修;冲击磁铁完成测试;RCS二极磁铁按计划完成了磁场测量,并在RCS隧道安装就位;RCS射频腔和功率源已完成大功率测试;主准直器完成测试;两组谐振高压电源均已完成高压测试。CSNS工程的24台RCS二极磁铁按计划完成了磁场测量,并在RCS隧道安装就位,标志着RCS磁铁测试与加速器设备安装取得了阶段性进展(图6)。

##### 靶站

2015年5月5日,靶站氦容器成功吊装,在密封筒内完成就位(见图7(a)),这是CSNS工程在设备安装阶段的重要里程碑,标志着靶站主体设备开始投入安装。目前,靶站主体框架安装已完成(靶体、反射体系统结构见图7(b)),重混屏蔽体已完成;其热室钢外壳已完成安装,重混屏蔽层也已完成浇筑。靶底部固定钢屏蔽、中子束开关底盘和靶站氦容器均已完成制造并安装到位。

靶体插件的设计和测试已于2015年年底完成,靶体插件远程控制已优化至最简,靶体基板已于2015年10月完成制造。靶体拖车的工程设计已完成,并于2015年12月在工厂完成预装,2016年3月将开始现场安装。耦合氢慢化器已完成部件加工;另外2个慢化器正在开始焊接。

反射体不锈钢插件已完成,铝容器正在制造;被反射体于2015年11月制造完成;慢化器反射体整体



图6 直线加速器隧道设备安装图



图7 靶站设备及其安装

插件将于2016年4月完成。靶站冷却水系统的嵌入式设备已安装完成，其他设备安装已于2015年年底之前完成；其他操作程序、调试方案和安全应急计划（包括主回路压力边界失败、电源故障、自然灾害等）已经制定。

### 实验系统

CSNS 实验系统包括中子谱仪和探测器、遥控维护、低温、中子束开关、斩波器、电子学和数据获取（DAQ）、实验控制、计算机网络、样品环境以及谱仪数据分析与软件等重要的系统。目前一期3台谱仪的物理设计已冻结，3台谱仪的工程设计基本完成，将于2016年开始现场谱仪部件安装；另外17条中子束道的谱仪选型已基本确定（图8）。一期小角散射谱仪（SANS）是国内第一台脉冲源小角谱仪，其研

究领域覆盖高分子物理与化学、胶体胶束化学、合金材料和生物大分子样品等方面；多功能反射仪的研究领域遍及金属磁性薄膜，氧化物磁性薄膜，氧化物薄膜，有机功能薄膜等；通用粉末衍射仪研究领域主要包括新光电材料结构、物性及其应用、金属间化合物的结构、磁性、及相关机理、金属材料结构与微结构分析与表征研究、储氢材料、太阳能能源材料的研究、磁性纳米颗粒等方面。

其他主要实验系统的关键部件样机已通过验收，包括中子探测器（ $^3\text{He}$  多丝室、闪烁体、主束检测器）及相应的电子学，斩波器等。谱仪数据分析与软件系统已确定统一的数据框架结构，完成数据分析、数据服务和数据预处理软件包；编目系统和数据门户系统已完成并开发了多功能反射仪的在线分析平

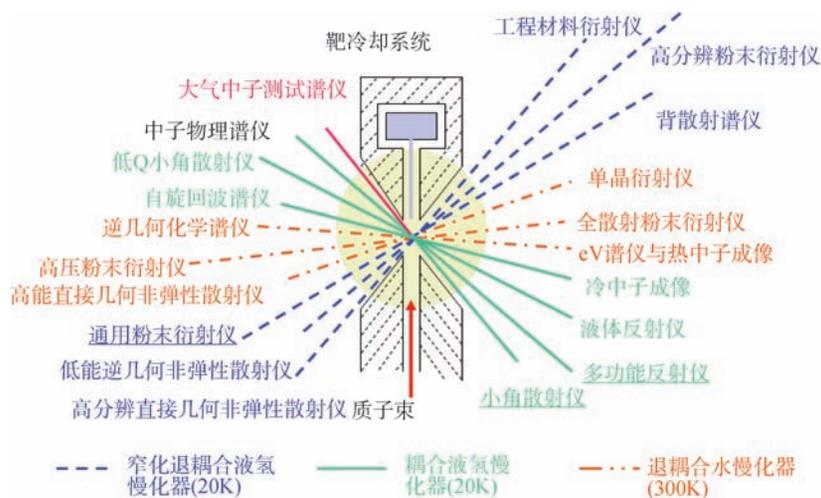


图8 中国散裂中子源实验系统

台。大部分重要的实验系统已于2015年10月正式开始现场建设。

## 5. 中国散裂中子源的未来发展

散裂中子源支撑的学科众多，领域最广泛，是目前国际上公认的、与大型光源互补，却发挥着其无法取代的作用的新一代科学研究和先进材料研发的主流大科学装置。依托大科学装置的大科学中心是中科院率先行动计划中建设的四类机构之一。它以CSNS为核心结合全国范围内，包括广东、香港的地方发展战略，加速推动新增谱仪和其他中子散射交叉学科的应用型装置的建设，并依托这些装置建设多个相关科学研究中心是大科学中心的最高效的结构形式，CSNS正在努力实现建设以CSNS为核心装置的大科学中心。

CSNS的总体目标是建设我国在相关基础科学和高技术领域的具备原始创新能力的团队，促进我国科技、工业和国防相关方面的技术的大力发展，至2030年，带领我国中子散射技术的研究和应用科学界全面进入世界先进行列。实现这一目标主要从以下几个方面着手：（1）充分发挥一期三台谱仪，即通用粉末衍射仪、小角散射仪和多功能反射仪在材料科学、生命科学、凝聚态物理和化学等领域的作用，为广大用户提供高性能，安全可靠的研究平台。（2）CSNS谱仪的选取及其性能指标应认真听取用户的意见，同时吸取国际先进经验，针对不同研究领域的群体，突出

谱仪的特色和优势；把材料科学技术的前沿问题与用户关注度联合起来考虑，特别应结合华南地区，特别是广东、香港等地发展战略需求，在选择谱仪建造的优先顺序的同时培养和扩大中子散射用户群体。（3）与用户单位合作，整合各方面资源，积极推动后期谱仪的共同建设。（4）CSNS靶站500kW升级将使CSNS靶站输出的中子通量水平提升近五倍；中子通量增加后，可开展更小量样品的研究以及更短时间尺度的实时研究，并适度提升大部分谱仪的分辨率，大幅缩短高分辨模式实验的时间，从而大幅提升CSNS中子散射谱仪的性能和研究能力。

李琳博士对本文编写给予了很大帮助，特此致谢。

