

中国散裂中子源靶站的物理设计和工程实现

殷雯 袁柳斌 王松林 张锐强 梁天骄

(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)

一、引言

靶站是中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source - CSNS)^①将加速器输出的高能质子脉冲转化成适合中子散射用慢中子和冷中子脉冲的设施。靶站的物理功能由靶-慢化器-反射体(Target-Moderator-Reflector, TMR)实现(图 1), 高能质子脉冲入射靶体, 通过散裂反应产生大量快中子, 快中子在耦合液氢(Coupled Hydrogen Moderator - CHM) (20K)、退耦合水(Decoupled Water Moderator - DWM) (300K)、退耦合窄化液氢(Decoupled Poisoned Hydrogen Moderator - DPHM) (20K)三个慢化器中与液氢或水的氢、氧原子多次碰撞、慢化后输出短脉冲、高通量的冷、热中子, 通过中子束线提供给中子散射谱仪。三个慢化器为适应中子散射谱仪的不同需求, 在积分中子通量和中子脉冲形状上各有不同的侧重点, CHM旨在提供较高的积分中子通量, 脉冲宽度较宽; DPHM旨在为高分辨要求谱仪提供最窄的中子脉宽, 以牺牲积分中子通量为代价, 通过在慢化器与反射体之间以及慢化剂液氢内插入中子吸收材料达到获得窄脉冲宽度的中子; DWM旨在为中分辨需求的谱仪提供较高积分通量的热中子。CSNS靶站也通过直接从靶体前向侧边和背向引出, 为大气中子辐照谱仪和反角白光中子实验装置提供热中子到 GeV 量级高能中子的宽能区中子脉冲。

从图 1 可以看出, CSNS 靶体材料选用固体钨

靶^②, 靶体容器由核级 316 不锈钢加工而成。CHM 位于靶体的下方, DWM 和 DPHM 位于靶体的上方。由直径 500 mm 的金属铍和直径 1000 mm 的铁组成的铍铁反射体将靶和慢化器包围起来, 反射体可以将部分从慢化器泄漏的中子反射回慢化器从而增加慢化器输出的中子强度。铍铁反射体外部被氦容器内的外反射体和屏蔽体包围并被密封于不锈钢制作的氦容器系统内。表 1 给出了 CSNS 一期的靶站参数。

二、靶站物理设计

靶站物理设计^③主要是进行靶站 TMR 优化设计, 目的是使靶站慢化器输出复合中子散射谱仪所

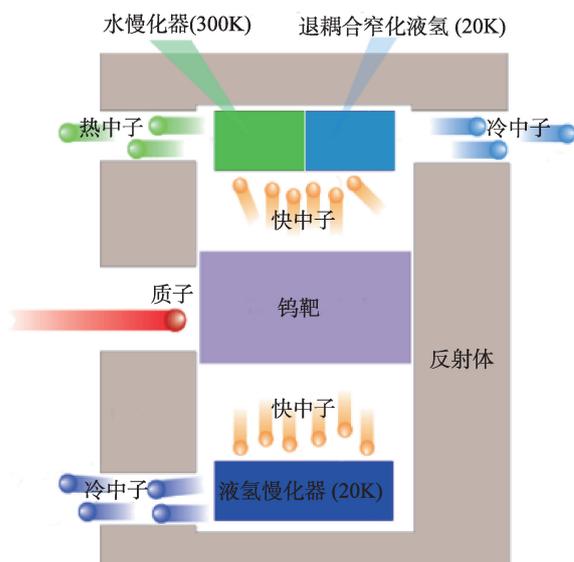


图 1 散裂中子源靶站的 TMR 结构

表1 CSNS一期的靶站参数

质子能量	1.6 GeV
质子束频率	25 Hz
质子束功率	100 kW
靶	钨靶(钨包覆)
慢化器	水(300 K), 耦合液氢(20 K), 退耦合窄化液氢(20 K)
反射体	铍/铁
屏蔽体	4.8 m 钢 + 1.2 m 重混凝土
中子束道	20条中子束道, 垂直中子开关
靶维护方案	水平拖车维护

需能量范围、脉冲形状的中子脉冲,并尽可能提高慢化器输出的中子强度,同时也为谱仪设计提供慢化器输出的中子性能参数。靶站的物理设计指标是最大中子效率达到0.1 n/Sr/proton。

1. 谱仪需求

散裂中子源绝大部分中子散射谱仪采用飞行时间技术,对中子脉冲的需求包括:中子波长(能量)范围、中子脉冲宽度和形状、尽可能高的中子强度、低中子和 γ 射线本底。根据中子散射用户的要求和建议,散裂中子源一期设计建造通用粉末衍射、小角散射、多功能反射三台中子散射谱仪。其中,通用粉末衍射谱仪主要利用短波长,窄脉冲中子;小角散射谱仪和多功能反射仪要求尽可能多的长波中子,而对分辨率要求不高,可利用脉冲形状稍宽的中子脉冲。

2. 计算方法

TMR的粒子输运模拟涉及高达13个量级能量

范围(0.1 meV - GeV)、多种粒子的输运过程(质子、中子、 γ 射线、氘、氚、 ^3He 、 α 、 π 介子等)以及复杂的物理过程(核内级联、核外级联、预平衡、蒸发、裂变、弹性和非弹性碰撞、热散射等)。粒子输运蒙特卡罗模拟程序NMTC/JAM+MCNP4C/LAHET+MCNP4C以及MCNPX被广泛应用于TMR设计中。核数据截面是保证模拟结果正确的基础,TMR模拟计算中采用的截面数据主要源自ENDF7.0、ENDF6.6A/B/C、Sab2002、La150n、La150h等数据库。在计算中采用了大量的方差缩减技术以提高计算精度和减少计算时间。通过和国外已有实验数据的TMR计算和实验结果进行对比验算,验证了计算方法、结果的准确性。

3. 几何模型

TMR设计和性能计算的几何模型如图2所示。

4. 中子波长谱

图3显示了图2 TMR几何模型下,模拟计算得到的耦合液氢慢化器BL01束线、退耦合水慢化器BL06束线、退耦合窄化液氢慢化器窄侧BL09束线和宽侧BL20束线输出的中子波长谱。

5. 中子脉冲形状

CSNS的质子束流频率为25 Hz,脉冲宽度小于0.5 μs ,质子脉冲打靶后产生的中子在靶-慢化器-反射体中输运,通过碰撞被慢化和热化,导致相同能量的中子从慢化器可视面溢出的时刻不同,具

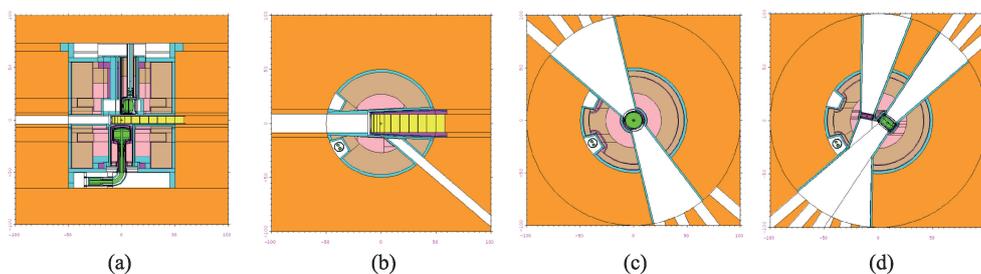


图2 TMR设计和性能计算的几何模型。(a)图为靶站的竖直剖面图(黄色区域是靶体,质子由左向右轰击靶体);(b)图为靶站在靶体高度中心平面的水平剖面图;(c)图为靶站在靶体下方耦合液氢慢化器中心高度的水平剖面图;(d)图为靶站在退耦合水慢化器和退耦合窄化液氢慢化器中心高度的水平剖面图

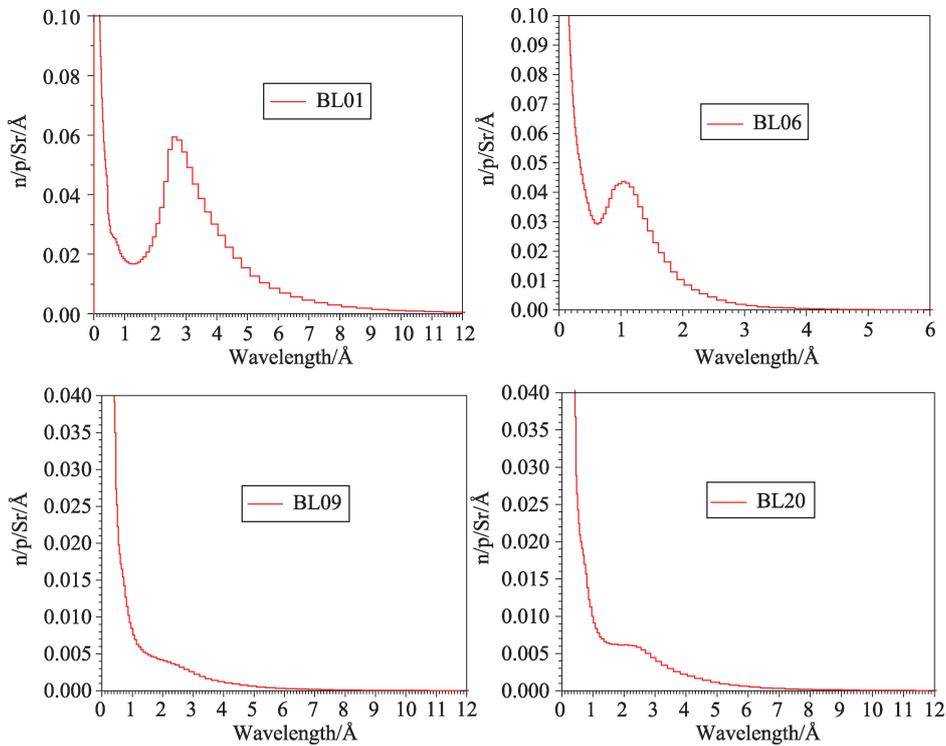


图3 BL01、BL06、BL09和BL20束线输出的中子波长谱

有一定的时间脉冲形状,对于快中子,其脉冲形状主要由质子束流时间结构决定;对于中子散射实验中使用的热中子和冷中子,某一能量中子的脉冲形状主要由靶-慢化器-反射体的参数决定。中子的

脉冲形状是决定谱仪分辨率的重要因素。图4显示了各慢化器输出50 meV能量的中子脉冲形状,图5显示了各慢化器输出不同波长的中子脉冲形状半高宽。

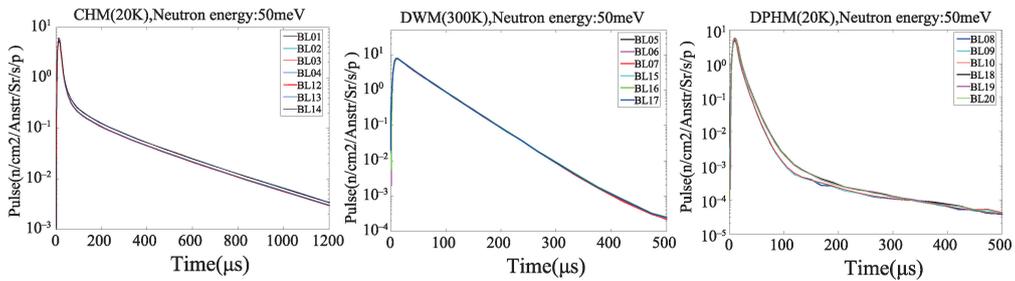


图4 各慢化器输出50meV能量中子的脉冲形状

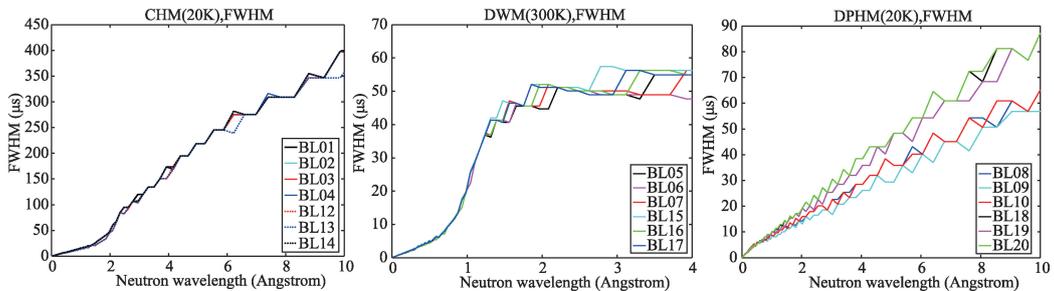


图5 各慢化器输出不同波长的中子脉冲形状半高宽

6. 中子空间分布

图6分别显示了图2 TMR 几何模型下耦合液氢慢化器、退耦合水慢化器以及退耦合窄化液氢慢化器的两个中子束流发射面输出的中子能量小于10 meV 中子强度的空间分布,描述的是发射方向为垂直慢化器表面法线的方向的空间分布结果,慢化器的10 cm×10 cm的发射面对应图中s,t轴的-2 cm到2 cm的范围。在此范围之外,是慢化器发射面之外的部分如预慢化器、中子束道等的成像结果。

对于CHM,其低能中子的分布由于预慢化器的存在,显示出在近靶侧和远靶侧上下两侧强,慢化器中心较弱的特点。对于退耦合水慢化器和退耦合窄化液氢慢化器,低能中子强度峰值均出现于慢化器中心偏靶一侧,其中退耦合窄化氢慢化器的峰值位置还受到氢输入管的影响。

三、靶站工程实现

CSNS靶站在设计时需要满足每年满功率运行

5000小时的要求,同时整个设施的设计要参考核设施和射线装置设计要求,关键部件如靶、慢化器和反射体等需要考虑辐照损伤对寿命的影响并在设计中考虑常规的维护和更换。所有设计应遵循国家相关设计标准以及国际通用设计标准,要求在500 kW下运行时谱仪大厅剂量小于2.5 $\mu\text{Sv/h}$,对靶站区域进行分区控制,并配置人身安全及设备安全联锁系统。根据靶站各部分的功能及要求,将靶站分为8个系统,如表2所示。

靶站外观为圆柱形建筑,直径12 m,高9.5 m(距离大厅地面高度)。主要设备包括靶站基板、靶站密封筒、靶体与拖车、慢化器与反射体、氦容器、中子束线开关、钢屏蔽体、重混凝土屏蔽墙、顶部重混凝土盖板、临时混凝土屏蔽体等,图7展示了靶站结构图。

1. 靶站建设历程

2011年10月20日,中国散裂中子源在东莞举行奠基仪式,时任国务委员刘延东致辞,翻开了中

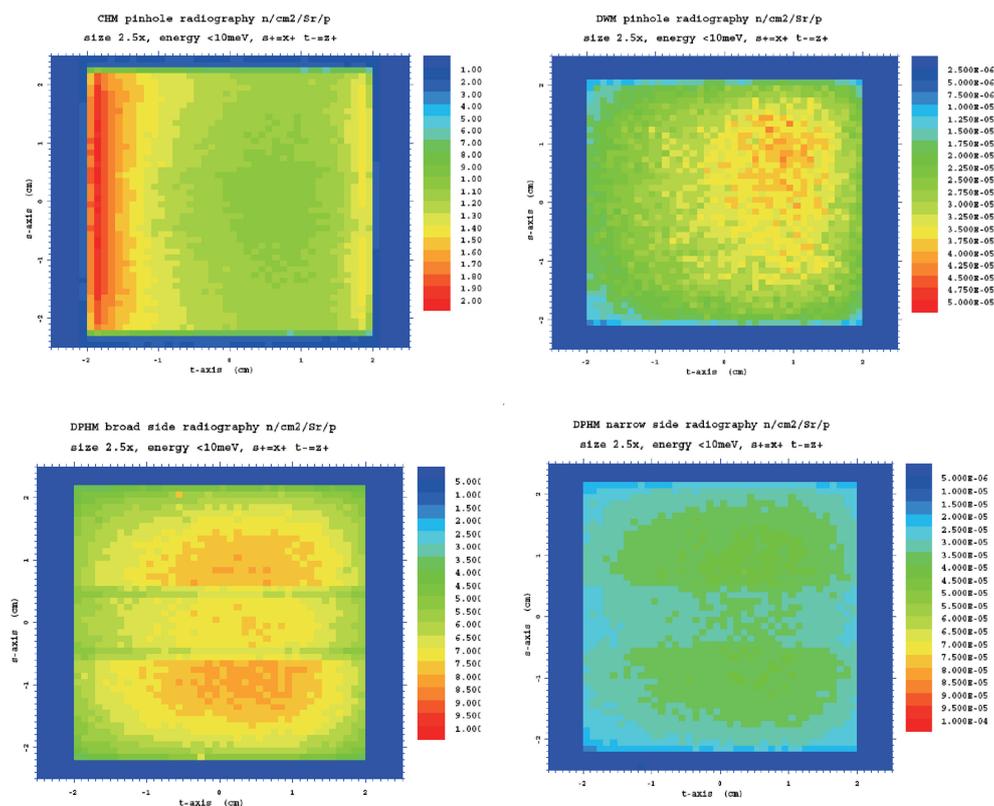


图6 CHM、DWM、DPHM 宽侧和窄侧慢化器表面中子空间分布($E < 10$ meV)

表2 靶站系统组成

靶体系统	含靶体、拖车、靶体拖车屏蔽体等
慢化器及反射体系统	含水慢化器、液氢慢化器，铍及钢反射体等
氦容器系统	含裙座、氦容器，束道水冷屏蔽体等
屏蔽体系统	含钢屏蔽体、混凝土屏蔽体、20套中子束线开关等
低温系统	为慢化器提供液氢，含氦制冷机、氢循环泵等
遥控维护系统	靶站关键部件遥控维护，热室及靶站公用系统维护区，靶站地下室及运输通道，放射性废物管理
控制系统	靶站控制，靶站运行监测
公用系统	靶、慢化器、反射体所涉及的重水、轻水冷却系统，去离子冷却水、电气、通风、气体系统等

国散裂中子源现场建设的新篇章。靶站作为散裂中子源主体装置的重要部分，于2014年8月5日开始第一个设备—靶站基板的安装(图8(a))。2014年8月8日，遥控维护系统的热室壳体吊装就位，开始热室主体施工。2014年9月7日，用于防止靶站内部活化气体外溢的靶站密封筒主体吊装就位。2015年5月5日，氦容器安装就位(图8(b))。

2015年9月11日，靶站顶部大厅砼结构顶板封顶，至此，结束了靶站设备露天安装阶段。2016年9月11日，完成20套中子束线开关机械主体的安装

工作。2017年4月1日，慢化器与反射体完成安装，之后成功实现首次20K氢气降温测试、靶体及拖车测试工作。图9展示了靶体与拖车、慢化器与反射体设备图，图10展示了靶站内部所有设备安装完成之后的状态。

历经六年艰苦的建设历程，2017年8月28日，CSNS获得首束中子束流，测量获得的热中子能谱完全符合预期，这是靶站建设的重大里程碑，充分证明了靶站设计科学合理，设备研制与安装调试的高质量和高可靠性(图11)。2018年8月23日，中国散裂中子源通过了国家验收，正式开始向国内外用户开放，为开展科学研究发挥重要作用。

2. 靶站现状及发展规划

CSNS从2018年正式开放运行后，逐步提升质子束流功率^④，到2020年春季已实现100 kW设计功率运行，提前一年半达到设计指标，2020年7月靶站中子效率测量值为0.16 (1±10%) n/Sr/proton ($E_n < 1$ eV)，优于设计指标。2022年2月到靶束流功率达到125 kW，大幅地提高了装置性能。

为了满足国家诸多战略需求，CSNS装置急需提升功率以获得更高的中子通量，提高测量精度，缩

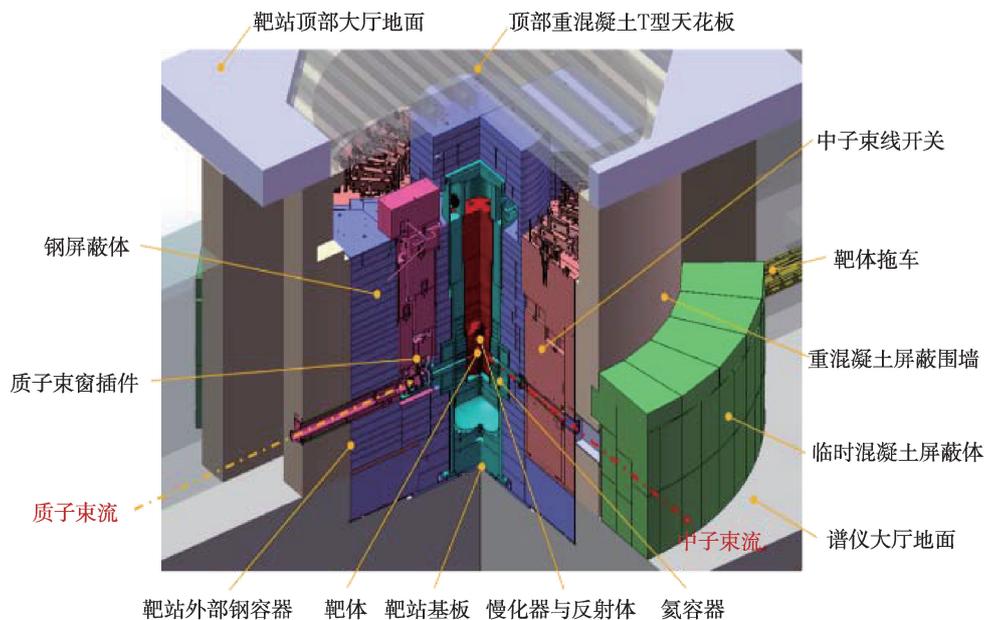


图7 靶站结构图

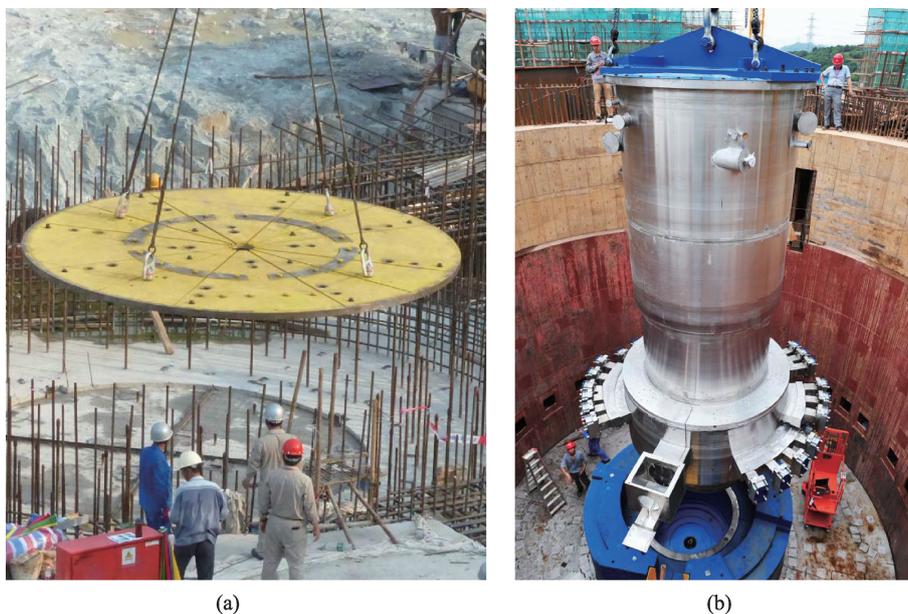


图8 (a)为靶站基板安装,(b)为氦容器安装

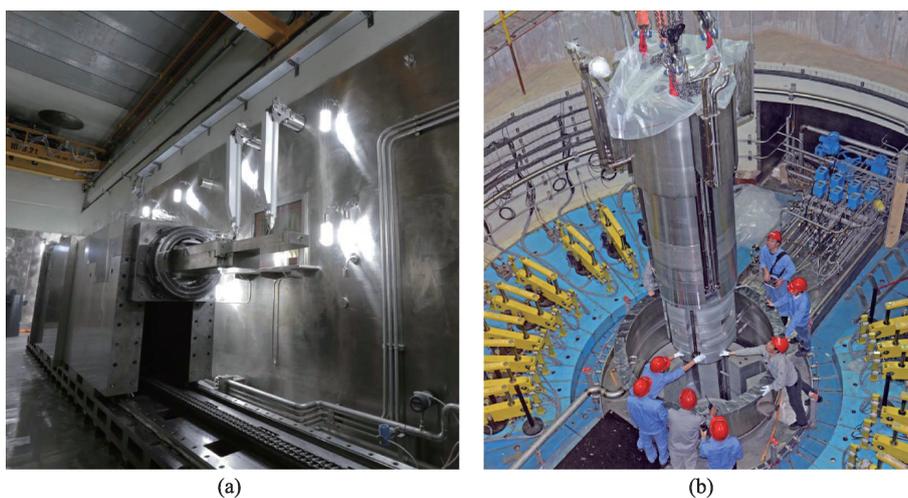


图9 (a)为靶体与拖车设备,(b)为慢化器与反射体设备安装

短实验时间并满足科技前沿研究对更小样品、更高精度、更高时间动态的中子散射测量要求。在CSNS一期工程的基础上,正在推动中国散裂中子源二期工程的立项建设,将束流功率提升到500 kW。功率的提升对靶站提出了更高的要求,需要设计和制造可承受500 kW束流功率的靶体和慢化器反射体,提升低温系统和水冷系统的冷却能力,更加符合众多中子谱仪需求的中子束流参数。

四、总结与展望

CSNS靶站作为中国散裂中子源的重要组成部分,建设团队克服了重重困难,按进度高质量地完成了靶站的建设、调试及验收,有力地促进了我国材料科学、生命科学、物理、新能源等领域高新技术的发展,使我国在中子散射领域实现了一次重大突破。在靶站物理设计中,采用TMR紧耦合结构,增

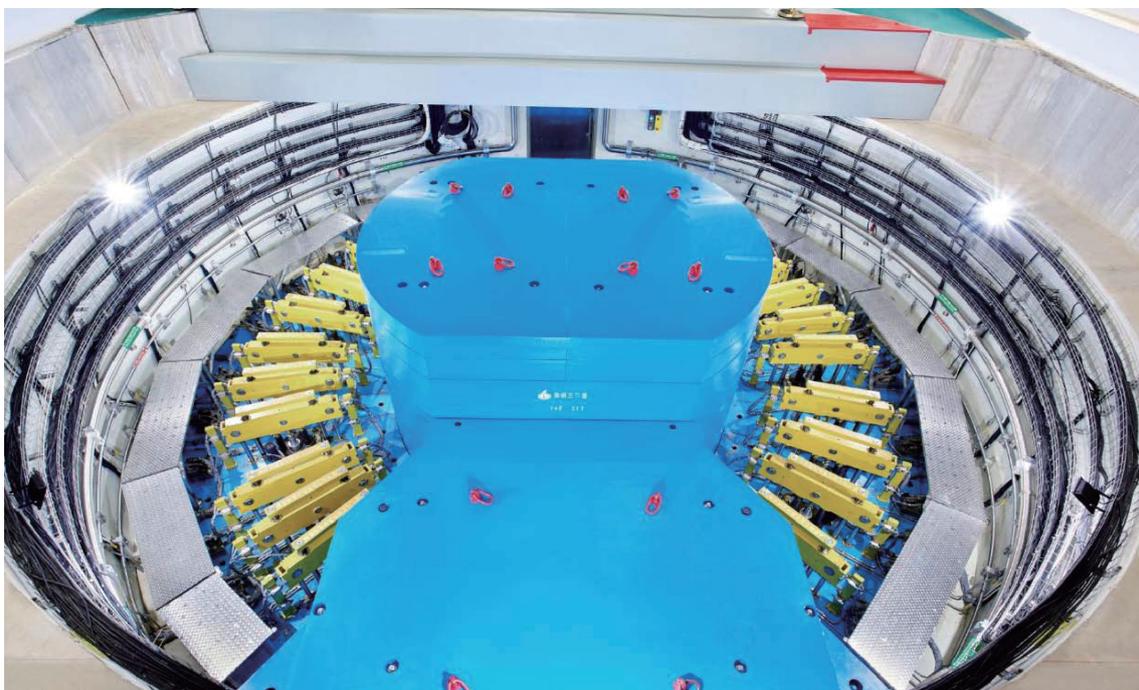
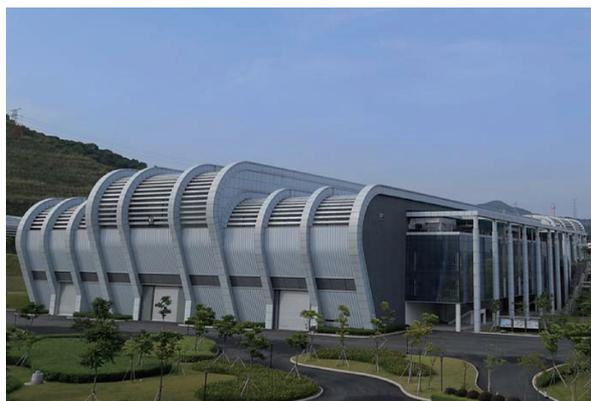


图10 靶站内部所有设备安装完成



(a)



(b)

图11 靶站外观(a)及获得首束中子束流时工作人员合照(b)

强了靶站中子学性能。CSNS靶站正不断稳定高质量地为越来越多的国内外用户提供中子束流,同时也将面临着CSNS-II工程500 kW高功率的挑战,后续任务更加艰巨,相信在不远的将来,中国散裂中子源将建成为世界一流的中子散射多学科研究平台,为解决我国重大需求和国民经济主战场瓶颈问题,提供一个强劲有力的研究平台。

参考文献

- ① 中国散裂中子源[J]. 陈和生. 现代物理知识. 2016(01)
- ② 中国散裂中子源靶体研制[J]. 魏少红,张锐强,史英丽,等. 原子能科学技术. 2019 (12)
- ③ 散裂中子源靶站谱仪的物理设计[J]. 王芳卫,贾学军,梁天骄,等. 物理. 2008(06)
- ④ 中国散裂中子源的多学科应用[J]. 程贺,张玮,王芳卫,陈延伟. 物理. 2019(11)