

文章编号: 1007-4627(2020)03-0364-13

中国先进研究堆中子科学平台发展现状及展望

李天富, 武梅梅, 焦学胜, 孙 凯, 陈东风[†]

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 依托中国先进研究堆 (CARR) 高通量中子源, 建成了初具规模的中子科学平台, 具备中子散射、中子成像和中子活化分析等多种研究技术。其中, 中子散射技术包括中子衍射、小角中子散射及中子反射、非弹性中子散射, 可以用于分析材料微观结构和动力学性质; 热中子成像和冷中子成像可以用于材料内部缺陷等无损检测; 中子活化分析系统可以用于物质内核素成分分析。目前已建成和在建中子谱仪共计 19 台, 并初步配备了样品环境装置, 为相关应用研究提供了条件基础, 可为我国物理、化学、材料科学、生命科学、能源和环境等领域基础研究及工业应用提供重要技术支撑。CARR 中子科学平台始终坚持合作共享对外开放的宗旨, 将继续为国内外用户提供优质中子技术, 服务基础科学前沿和国家重大创新需求研究。

关键词: 中国先进研究堆; 中子散射; 中子成像; 中子活化分析

中图分类号: O571.5

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC36

1 中子散射、中子成像和中子活化分析技术

自 1932 年查德威克发现中子以来, 中子科学技术已深入至各个领域, 从微观原子宏观物质乃至星际天体, 深刻地影响着人类的认知和社会的发展。随着先进中子源的陆续建造, 中子散射、中子成像和中子活化分析等

技术已经成为物理、化学、材料、生物和考古等基础研究领域, 以及缺陷检测、服役监控和寿命评估等工业应用领域独一无二、不可或缺的重要支撑^[1-5]。得益于中子本身的特点, 例如不带电、核素灵敏等, 中子散射、中子成像和中子活化分析等三种中子技术都具有其鲜明的技术优势特色, 但其工作原理也不尽相同, 如图 1 所示。

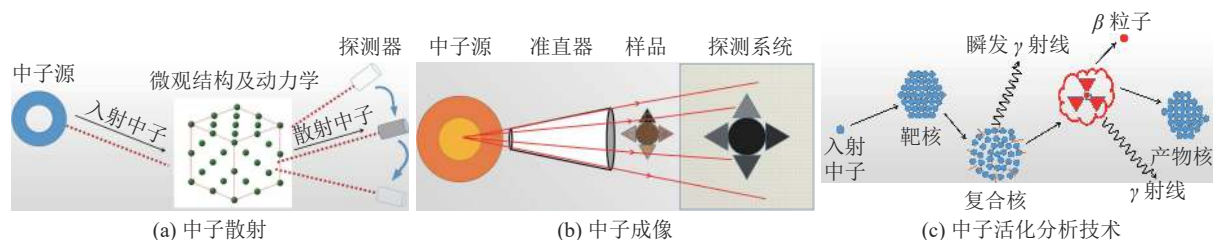


图 1 (在线彩图) 三种中子技术原理示意图

中子散射技术创始于 1940 年代, 早期主要应用于固体物理方面研究。中子衍射和非弹性散射实验为观测反铁磁有序和声子存在提供了关键实验证据, 检验了相关理论。美国科学家沙尔 (Clifford G. Shull) 和加拿大科学家布罗克豪斯 (Bertram N. Brockhouse) 也因此获得了 1994 年的诺贝尔物理学奖。经过几十年的持续发展, 中子散射技术应用日益广泛, 覆盖了物理、化学、生物、材料、地质、能源和工业等众多研究领域, 研究成果丰硕^[3-4]。中子散射技术通过测量分析热中子 (或冷中子) 与物质材料相互作用后动量能量变化, 研究材

料微观结构和动力学, 参见图 1(a)。中子散射发展出了包括中子衍射、大尺度结构散射、非弹性散射等多种分支技术, 分别适用于解决不同科学问题。与同步辐射 X 射线等其他技术相比, 中子散射技术具有穿透力强、同位素灵敏、磁灵敏、易实现动力学测量、无损测量等优势 and 特点。

与中子散射研究原子分子尺度物质的结构和动力学特性不同, 中子成像是利用中子束穿过物体时强度上的衰减变化, 对被测物体进行透视成像, 从而反映样品内部材料的空间分布、密度、各种缺陷等综合信息, 属于

收稿日期: 2019-12-31; 修改日期: 2020-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFA0403700); 国家财政部稳定支持研究经费 (WDJC-2019-04)

作者简介: 李天富 (1981-), 男, 山东新泰人, 研究员, 博士, 从事凝聚态物理研究; E-mail: litianfu.li@163.com

[†] 通信作者: 陈东风, E-mail: dfchencia@126.com。

一种无损检测技术，参见图 1(b)。中子的深穿透力、对轻元素灵敏以及可区分同位素等优势，使得中子成像与 X 射线成像等技术相比具有其鲜明特色 [5]。早期人们主要利用胶片技术开展中子成像研究，并在反应堆上建立了专门的中子束线站用于爆炸物、涡轮叶片、核燃料、机翼等多种重要领域部件的探测检测。90 年代以后新探测系统和数字化技术的应用，使得更先进更复杂的中子成像技术得以发展，包括三维中子成像、极化中子成像、相衬法成像、能量选择法成像、共振成像等技术。目前，基于高强度中子源的先进中子成像技术已经在工程应用和科学研究方面都发挥了重要作用。

中子活化分析(Neutron Activation Analysis, NAA)是基于核反应的一种核分析方法，即利用一定能量和流强的中子束轰击试样，使被测元素转变为放射性核素，通过测量生成核释放的特征射线能量和强度，实现对元素的定性和定量分析，参见图 1(c)。中子活化分析技术具有分析元素多、灵敏度高、非破坏、基体无关性、准确度高、样品量范围宽、低污染等技术优势 [6]。

通常用于中子活化分析的中子源有同位素中子源、加速器中子源、反应堆中子源等。由于反应堆中子源具有中子注量率高、对多数元素的活化截面大、核反应道单纯(多为 (n, γ) 反应)、中子注量率空间均匀性好等特点，反应堆中子活化分析具有较低的探测极限、较高的选择性和准确度，是活化分析的主流。中子活化分析技术已经广泛应用于地球科学、环境科学、材料科学和考古学等领域。

2 国内外高强度中子源发展概况

研究堆或散裂中子源等大型高强度中子源装置，是先进中子科学技术的重要依托。这些装置需要投入巨大的人力物力建造和运行，全世界约有四十余座研究堆和七座散裂中子源用于开展中子散射、中子成像以及活化分析研究。世界上主要的高强度中子源情况参见表 1。总体而言，在中子科学技术研究领域，欧美长期处于领先地位，亚洲大洋洲地区近期发展迅速 [7]。

表 1 世界上主要高强度中子源 [7-8]

中子源/研究机构/国家或地区	中子注量率/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	功率	时间结构
CARR/CIAE/China	8×10 ¹⁴	60 MW	连续
CMRR/CAEP/China	2.48×10 ¹⁴	20 MW	连续
CSNS/IHEP/China*	2.5×10 ¹⁶	100 kW	脉冲25 Hz
OPAL/ANSTO//Australia	2×10 ¹⁴	20 MW	连续
JRR-3/JAERI/Japan	2.7×10 ¹⁴	20 MW	连续
J-PARC/KEK/Japan*	1.3×10 ¹² at 300 kW	1 MW	脉冲25 Hz
HANARO/KAERI/Korea	4.5×10 ¹⁴	30 MW	连续
NCNR/NIST/America	4×10 ¹⁴	20 MW	连续
HFIR/ORNL/America	2.5×10 ¹⁵	85 MW	连续
SNS/ORNL/America*	2.1×10 ¹² at 1 000 kW	2 MW	脉冲60 Hz
HFR/ILL/Europe	1.5×10 ¹⁵	57 MW	连续
FRMII/MLZ/Germany	8×10 ¹⁴	20 MW	连续
SINQ/PSI/Switzerland	1×10 ¹⁴	1.8 MW	连续
ISIS/RAL/United Kingdom	8×10 ¹⁵	160 kW	脉冲50 Hz
ESS/Europe*	2×10 ¹⁷	5 MW	脉冲14 Hz
IBR-2/JINR/Russia	~10 ¹⁶	2 MW	脉冲5/10 Hz
PIK/NRCKI /Russia	1.5×10 ¹⁵	100 MW	连续

注：其中*表示散裂中子源，其他为反应堆中子源。

欧洲方面，位于法国格林诺贝尔的劳尔朗之万实验室(Institute Laue-Langevin, ILL) 仍是目前世界领先的中子应用技术研究中心，由法国、德国、英国等欧洲十二个国家联合建造运营，共建有 40 多台中子谱仪，运行开放极好并得到持续升级改造。德国当前最具影响的

是位于慕尼黑的 FRMII(Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz) 研究堆，也已成为欧洲重要的中子研究中心。英国卢瑟福阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL) 的 ISIS(ISIS Neutron and Muon Source) 是运行较成功的散裂中子源，为满足日

益增长的研究需求,最近又投资建设第二靶站和更多谱仪。瑞士保罗舍尔研究所(Paul Scherrer Institut, PSI)的散裂中子源 SINQ(The Swiss Spallation Neutron Source)具有连续时间结构,并非通常的脉冲模式,利用该装置开展了很有特色的中子散射和中子成像研究工作。此外,欧洲还拥有很多中等通量的中子源,与高通量中子源形成较好的互补。欧洲为了保持其领先地位,又投入 18 亿欧元巨资建设新一代的欧洲散裂中子源(European Spallation Source, ESS),ESS 采用了低频长脉冲的全新设计理念,未来建成后有望代替 ILL 继续引领欧洲的中子科学研究。

美国目前主要的中子研究中心有橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)的高通量研究堆 HFIR(High Flux Isotope Reactor)与散裂源 SNS(spallation neutron source)联合组成的中子科学中心,以及国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的中子散射中心 NCNR(NIST Center for Neutron Research)。SNS 是当前世界上最强的散裂中子源,HFIR 也拥有较高的中子注量率。SNS 在积极争取建设第二靶站,以大幅提升其能力水平。NCNR 运行非常成功,是投入产出比最高的中子散射中心之一,近期完成了第二导管大厅和多台谱仪扩建。

俄罗斯的联合核子所(Joint Institute for Nuclear Research, JINR)拥有独特的脉冲堆 IBR-2(Fast pulsed reactor IBR-2)中子源,已发展了傅里叶谱仪等特色方法仪器,开展了许多中子科学研究。此外,库尔恰托夫国家研究中心(National Research Center “Kurchatov Institute”, NRCKI)建设的 PIK(the high-flux reactor PIK)高通量研究堆也主要用于中子科学技术研究。

在澳大利亚,隶属于澳大利亚核科学和技术组织(Australian Nuclear Science and Technology Organization, ANSTO)的 OPAL(Open-Pool Australian Light-water reactor)研究堆为其中子科学研究提供了强大支撑,近几年来运行良好,成果丰硕。日本主要有原子能研究所(Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI)的 JRR-3(Japan Research Reactor No. 3)反应堆中子源和日本高能加速器研究机构(High Energy Accelerator Research Organization, 简称 KEK)建设的 1MW 加速器散裂中子源 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex),并在持续投入升级建设。韩国原子能机构(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)的 HANARO(the High-Flux Advanced Neutron Application Reactor)研究堆高强度中子源也

建设有多台中子谱仪。

此外,印度、马来西亚、荷兰、波兰、匈牙利等国也都有中子源和中子谱仪设施。欧美日等国还建设或计划建设多台紧凑型加速器中子源,期望能成为高强度中子源很好的补充,以满足中子科学技术发展的需求。

经过几十年的发展,高强度中子源的发展已经进入了一个新的阶段。一方面加紧建设新的更高强度的中子源,另一方面也在持续地投入升级中子谱仪和配套设备。中子科学技术的相关应用研究也愈加广泛而深入。

我国目前主要有三大高强度中子源,分别是位于北京的中国先进研究堆(China Advanced Research Reactor, CARR)、位于绵阳的中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)和东莞的中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)。这些中子源已经相继投入运行,在地域、类型和应用侧重等方面相互补充,为当前国内中子科学技术发展和应用提供强有力支撑,也带来了新机遇。

3 中国先进研究堆中子科学平台

早在 20 世纪 50 年代末 60 年代初,在建成我国第一座实验性重水反应堆(101 堆)的同时,中国原子能科学研究院(以下简称原子能院)也成功研制出达到当时国际水平的我国第一台中子晶体谱仪和第一台中子衍射仪。20 世纪 80 年代,由原子能院与中国科学院物理研究所、低温中心等单位合作在原子能院重水反应堆上建造了 5 台功能不同的中子散射谱仪,形成初具规模的热中子散射实验室,并逐步开展了多个方向的前沿研究工作,为我国中子散射工作的发展奠定了基础^[9-12]。从 20 世纪 60 年代开始原子能院开始发展中子活化分析方法,先后为核爆、核能、月样等分析做出重要贡献。进入 21 世纪后,101 堆面临退役,需要建设新的研究堆。2002 年 CARR(图 2)在原子能院开工建设,2012 年实现满功率运行 72 h,2017 年底通过现场竣工验收,转入运行服役状态^[13-14]。



图 2 (在线彩图) 中国先进研究堆

CARR是一座具有世界先进水平的研究型反应堆，采用紧凑堆芯反中子井型设计和使用 U_xSi_xAl 弥散型新型燃料元件，功率为60MW，其重水反射层内设计最高热中子注量率达 $8 \times 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。该反应堆设置有9条中子束水平孔道和25个垂直辐照孔道，并配有冷中子源。CARR是一座高性能、多用途研究堆，可开展中子散射、中子成像、中子活化分析、核物理与核数据、反应堆材料及核燃料考验、放射性同位素生产及单晶硅中子掺杂等工作，其主要目的是开展中子科学技术应用研究[15]。

迄今依托CARR已建成12台中子谱仪，正在建设7台谱仪，并建设有样品准备实验室和样品环境等附属配套设备。规划未来再建设4台中子谱仪，谱仪布局示意图参见图3。此外，还规划利用CARR长切向水平孔

道(图3中“同位素分离”孔道)建设北京在线同位素分离丰中子束流装置(北京ISOL)。其中，中子衍射类谱仪6台，包括：高分辨中子粉末衍射仪、高强度中子粉末衍射仪、中子四圆衍射仪、中子织构衍射仪、中子残余应力衍射仪、中子工程衍射仪；大尺度结构研究类谱仪2台，包括：小角中子散射仪和中子反射仪；非弹性中子散射谱仪4台，包括：IOP-CIAE热中子三轴谱仪、中德热中子散射谱仪、冷中子三轴谱仪、冷中子广谱谱仪；中子成像装置2台，包括：热中子成像和冷中子成像；中子活化分析装置5套，包括：仪器中子活化分析系统、热中子瞬发伽马活化分析系统、冷中子瞬发伽马活化分析系统、中子深度剖面分析系统和缓发中子测量系统[16-20]。

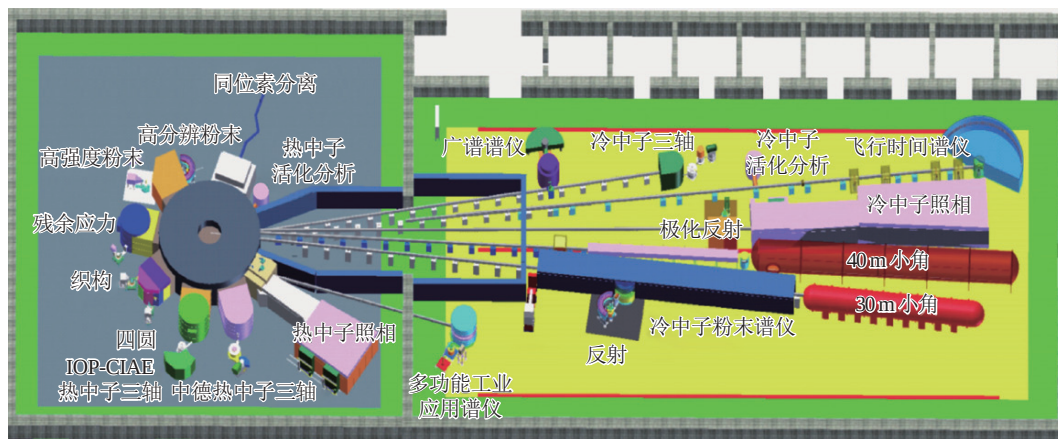


图3 (在线彩图)CARR中子谱仪布局示意图

3.1 中子衍射类谱仪

中子衍射技术主要用于测量材料内部原子尺度结构和磁结构，在基础科研和工程应用中发挥重要作用。根据研究对象和内容的不同，中子衍射技术已发展了粉末衍射、单晶衍射、织构和残余应力衍射等多个分支。本节将对CARR上发展的中子衍射谱仪进行简单综述，表2列出了中子衍射谱仪的关键指标、样品环境以及功能与应用情况。

两台中子粉末衍射仪设计各具特色，具有一定互补性。高分辨中子粉末衍射仪[图4(a), 图4(c)]由原子能院科研人员自主研发，中国科学院大学参与建设。该谱仪起飞角 120° ，采用Sollar型准直器和高效率单管探测器设计，实现高分辨率测量；使用探测器共计64路，有效提高了实验测量效率。目前已开展了磁电材料 $\text{Fe}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ 的低温磁结构及晶体结构相转变研究[21-22]。高强度中子粉末衍射仪[图4(b) 图4(d)]是由北京大学和原子能院共同研发。谱仪采用非对称切割的双聚焦单

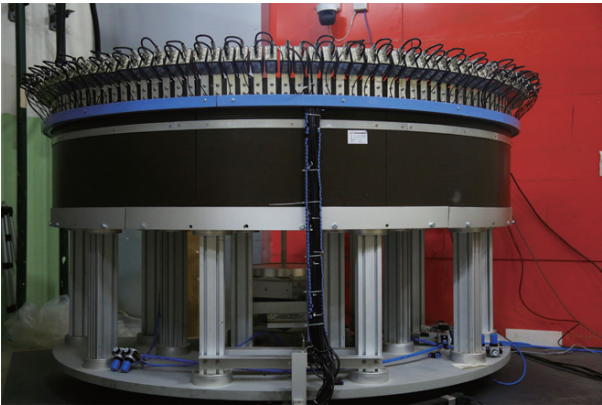
晶硅单色器，能够显著提高样品处中子通量；旋转震荡准直器能够有效屏蔽外界干扰，提高信噪比；位置灵敏探测器阵列能有效提高探测效率和保持较高水平分辨率。目前已开展了MnGa材料磁结构、高镍层状正极材料结构、元素掺杂调控钠离子电池正极材料等研究[23-27]。

中子四圆衍射仪(图5)用于单晶样品晶体结构和磁结构测量分析。该谱仪采用垂直聚焦铜(220)单色器，获得高通量短波长单色中子束，以实现较高效率的实验测量。目前，已通过硅单晶氯化钠标准样品的测量，完成谱仪的标定和优化，并开展了非线性光学晶体材料铌酸锂的测试分析。

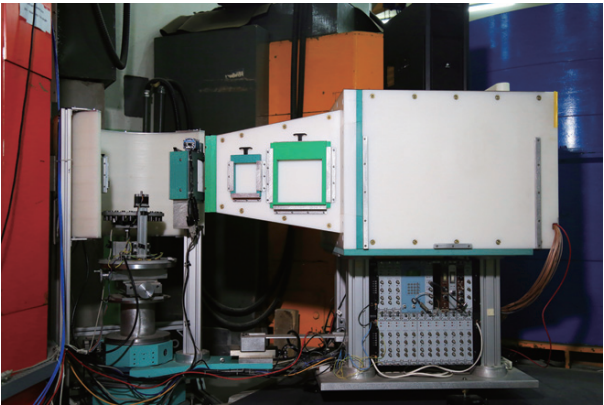
中子织构衍射仪(图6)是一台强度高、分辨水平中等的衍射仪。聚焦单色器和大尺寸二维位置灵敏探测器的使用，使该谱仪可实现快速织构测量。大尺寸欧拉环和高温、拉伸样品环境装置的配备，使谱仪可开展模拟工况下的原位织构演变测量。谱仪已开展了国际标准样品的比对测量实验，测量结果表明谱仪测量数据达到国

表 2 中子衍射谱仪关键指标、样品环境及功能与应用

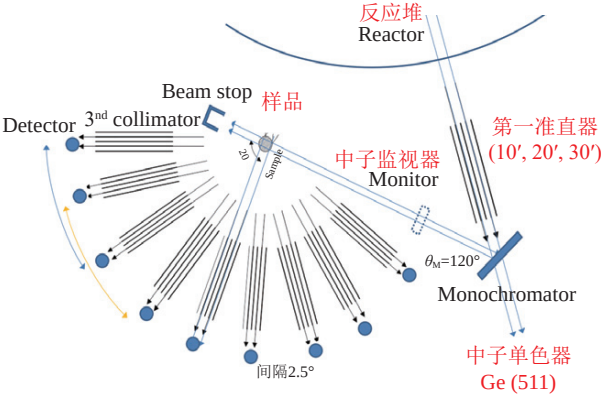
谱仪名称	关键指标	样品环境	功能与应用
高分辨中子粉末衍射仪	●最佳分辨率: $\Delta d/d \approx 1.5 \times 10^{-3}$; ● Q 区间: $0.43 \sim 6.43 \text{ \AA}^{-1}$; ●常用波长: $1.888 \text{ \AA}$	●低温: $4 \sim 300 \text{ K}$ ●高温: 室温 $\sim 1\,800 \text{ K}$	●大晶胞、低对称性的粉末样品晶体结构 ●磁结构 ●晶体结构的局域性细小变化或对称性细微变化
高强度中子粉末衍射仪	●最佳分辨率: $\Delta d/d \approx 2 \times 10^{-3}$; ●可用波长: 1.478 (最佳), 2.316 , 1.762 , 1.171 , $1.075 \text{ \AA}$	●低温: $2 \sim 300 \text{ K}$ ●高压: 10 GPa ●室温实验多样品自动切换	●相变研究 ●化学反应等动力学现象的原位研究 ●晶态、非晶态材料结构快速测定 ●材料晶体结构、磁结构
中子四圆衍射仪	●波长: $0.90385 \text{ \AA}$ ●样品处中子通量: $1.08 \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	●高温: 室温 $\sim 1\,000 \text{ K}$	●单晶样品精细结构测定及精修 ●单晶样品磁结构及自旋有序等的测定
中子织构衍射仪	●常用波长: $1.48 \text{ \AA}$ ●样品处中子通量: $5.6 \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	●高温: 室温 $\sim 1\,100 \text{ K}$ ●拉伸装置: 拉力 10 kN	金属、合金、陶瓷、复合材料等多晶材料的织构研究
中子残余应力衍射仪	最常用波长 $1.7 \text{ \AA}$, ●样品台处的热中子注量率: $2 \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ● 90° 衍射角对应的分辨率: 4.5%	高温: 室温 $\sim 1\,100 \text{ K}$	航空航天、核工业等领域金属多晶材料与构件的焊接、热处理、塑性变形、增材制造、喷涂等工艺引起的深部三维残余应力
中子工程衍射仪	●样品处最高热中子注量率: $4 \times 10^7 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ●最优分辨率: $\Delta d/d \approx 2 \times 10^{-3}$	●拉伸仪: 100 kN ●高温: 室温 $\sim 1\,300 \text{ K}$ ●低温: $77 \text{ K} \sim$ 室温	航空航天核工业等领域金属多晶材料与构件的焊接、热处理、塑性变形、增材制造、喷涂等工艺引起的深部三维残余应力; 模拟材料与构件在服役条件下的晶格应变演化



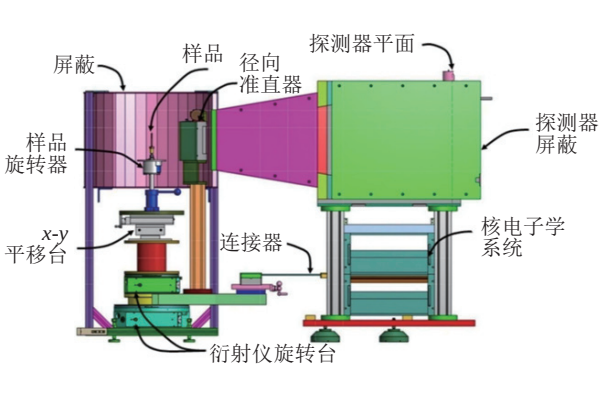
(a) 高分辨中子粉末衍射仪实物



(b) 高强度中子粉末衍射仪实物图



(c) 结构示意图



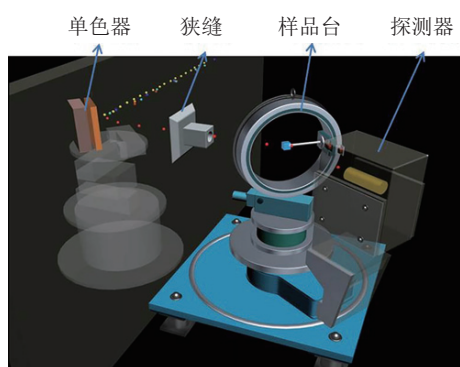
(d) 结构模型图

图 4 (在线彩图) 高分辨中子粉末衍射仪实物

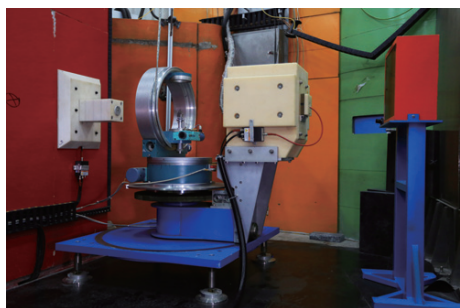
际同类先进谱仪的水平, 可为用户提供可靠的实验数据。目前已开展了锆合金、镁合金、铝合金、镍基高温合金和钛合金等材料的织构研究 [28-33]。

中子残余应力衍射仪能实现材料与构件内部残余应

力深度三维无损测量, 有其独特技术优势和不可替代性。中子残余应力谱仪 (图 7) 位于 CARR 物理大厅, 已建成并面向用户开放。该谱仪采用了 Si(311) 聚焦单色器和一维位置灵敏探测器的组合, 已经应用于航空、航天、

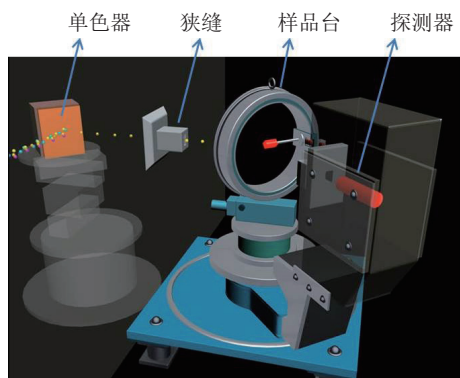


(a) 结构示意图

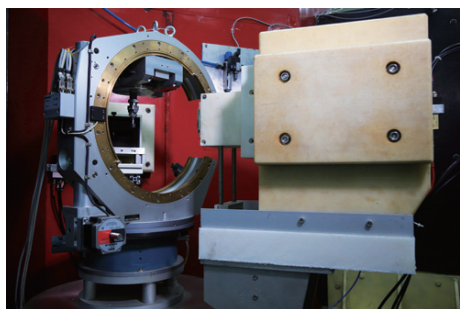


(b) 实物图

图 5 (在线彩图) 中子四圆衍射仪



(a) 结构示意图

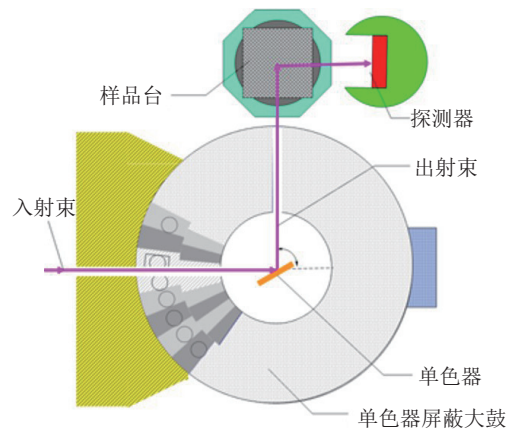


(b) 实物图

图 6 (在线彩图) 中子织构衍射仪

核工业、高铁以及化工领域的关键构件残余应力分析测试^[34-37]。中子工程衍射仪(图8)位于CARR导管大厅,由中南大学和原子能院合作建设。该谱仪采用Si(400)双聚焦单色器、二维位置灵敏探测器和承重达一吨样品

台等多种先进设计,并附有拉伸、高低温样品环境设备。该谱仪拥有更大的样品空间,方便实现大部件样品的测量^[38]。

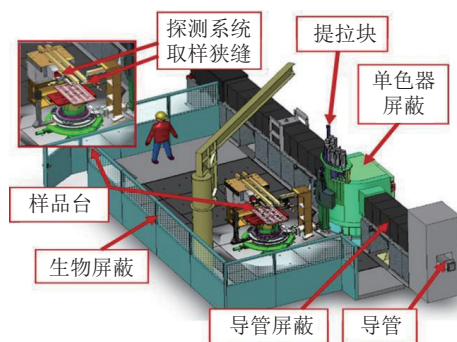


(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 7 (在线彩图) 中子残余应力衍射仪



(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 8 (在线彩图) 中子工程谱仪

3.2 大尺度结构研究谱仪

大尺度结构是指纳米到亚微米尺度范围结构，是相对于原子尺度结构而言。目前，由中国科学院化学研究所和原子能院合作建成两台相关谱仪，即小角中子散射仪(图9)和中子反射仪(图10)，分别用于材料内部和表面界面的纳米尺度结构研究^[39-41]，其关键指标、样品环境及应用领域见表3。小角中子散射仪采用机械速度选择器、圆孔准直和二维位置灵敏探测器等主要设计结构，并预留了较大的样品空间，便于实现复杂样品环境原位加载测量。目前已经开展了高温合金、压力容器钢、表面活性剂等方面的实验测量分析。中子反射仪采用了水平样品几何设计和固定波长扫描角度的数据采集方式，可用于分析薄膜样品的厚度、界面粗糙度和成分密度等，适合开展生物膜、聚合物薄膜等研究，并能够实现自由液体表面界面测量。目前已开展了超镜反射率测量、中子单色器和新型探测器测试等工作。

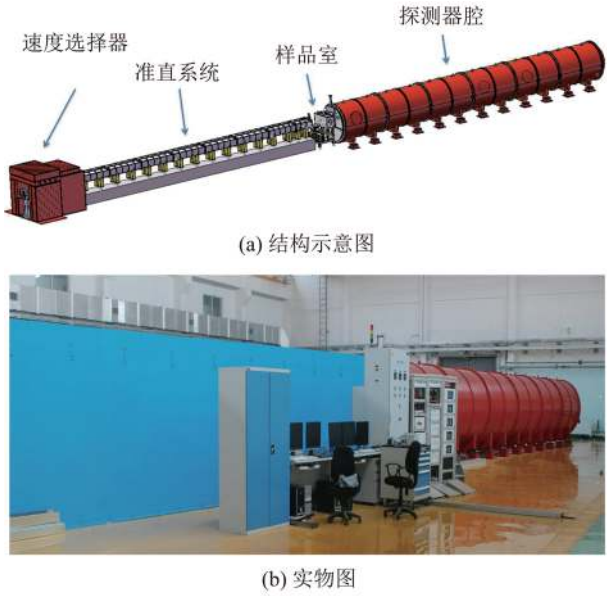


图 9 (在线彩图) 小角中子散射仪

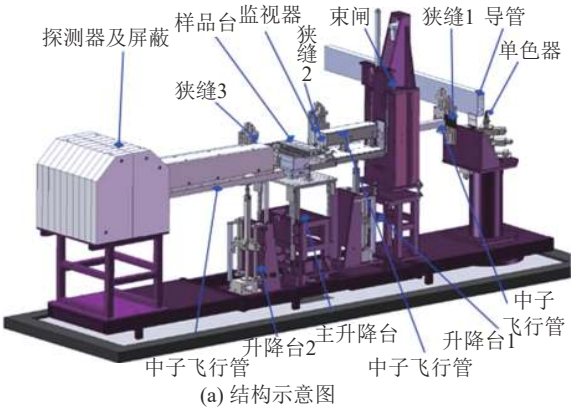


图 10 (在线彩图) 中子反射仪

表 3 大尺度结构谱仪关键指标、样品环境及应用领域

谱仪名称	关键指标	样品环境	应用领域
小角中子散射仪	●测量 Q 范围: $0.008\sim7\text{ nm}^{-1}$ ●波长范围: $\lambda=0.4\sim2.0\text{ nm}$ ●样品到探测器距离: $1.0\sim15\text{ m}$	●多样品自动切换 ●原位高温拉伸装置(最高温度 $1\,100\text{ K}$, 拉力 10 kN)	聚合物、胶体、表面活性剂、生物大分子、合金纳米相、纳米药物载体、电池多孔材料、超导磁性纳米结构
中子反射仪	●散射几何: 水平样品 ● Q 范围: $0.03\sim4.0\text{ nm}^{-1}$ ●束流截面范围: $(0.01\sim30\text{ mm})\times50\text{ mm}$	●多样品自动切换	聚合物薄膜、生物膜、硬物质薄膜和多层膜、自由液体表面界面纳米结构

3.3 中子非弹性散射谱仪

中子非弹性散射是用于研究声子、自旋波、扩散弛豫等动力学性质的重要手段^[42-43]。中子三轴谱仪是反应堆上常见的一种非弹性散射谱仪，这种谱仪主要结构组成参见图11，它通过设置中子分析器实现对散射中子能量的测量，分析散射中子与入射中子的能量差别，以探索样品的微观动力学信息。目前，CARR上已建

成四台中子非弹性散射谱仪(图12)，包括中德热中子三轴谱仪^[44]、IOP-CIAE热中子三轴谱仪^[43]、冷中子三轴谱仪^[45]和冷中子广谱谱仪，表4列出中子非弹性散射谱仪关键指标、样品环境及应用领域。

四台非弹性散射谱仪各具特色，设计指标先进，能够覆盖较宽的能量测量范围，并配备了先进的样品环境设备，能够为凝聚态物理前沿研究等提供技术支撑。中德热中子散射谱仪由德国于利希(Jülich)研究中心与原

子能院合作建设，采用大面积双聚焦中子单色器，样品处中子通量达到 $10^8\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。IOP-CIAE 热中子三轴谱仪由中国科学院物理研究所与原子能院合作研发，采用速度选择器过滤高能中子，实现入射中子能量连续可调。冷中子三轴谱仪和冷中子广谱谱仪，由中国人民大学与原子能院合作建成。冷中子三轴谱仪具有极化中子测量功能，能够实现复杂磁结构的研究。冷中子广谱谱仪采用 170 路能量-动量分析探测通道，将探测效率提高 100 倍以上。目前，在谱仪上已开展了铁基超导材料、自旋阻挫材料、二维磁性材料、量子磁性材料等实验测量工作。

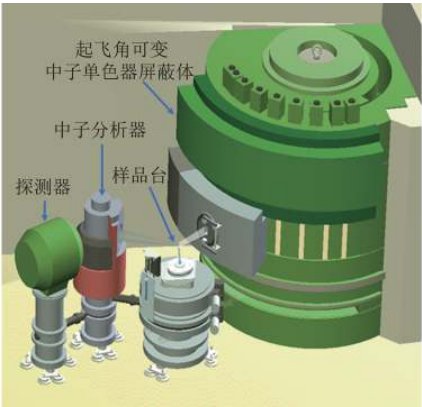


图 11 (在线彩图) 中子三轴谱仪结构示意图



图 12 (在线彩图) 已建成的四台中子非弹性散射谱仪

表 4 中子非弹性散射谱仪关键指标、样品环境及应用领域

谱仪名称	关键指标	样品环境	功能与应用
中德热中子散射谱仪	●入射中子能量: 5, 14, 50, 105 meV ●样品处最大中子通量: $1 \times 10^8\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	●高温: 室温~1 300 K ●低温: 室温~6 K ●磁场: 7 T垂直磁场	●晶格结构及晶格动力学 ●磁结构及自旋激发 ●晶格电子场激发
IOP-CIAE热中子三轴谱仪	●入射中子能量: 6~80 meV ●能量分辨率: 0.5 meV@12 meV	低温: 室温~1.5 K	●晶格结构及晶格动力学 ●磁结构及自旋激发 ●晶格电子场激发
冷中子三轴谱仪	●入射中子能量: $2.4\text{ meV}<E_i<19\text{ meV}$ ●最高能量分辨率: $0.036\text{ meV}@E_i=2.6\text{ meV}$	●闭循环制冷(4 K) ● ^3He 制冷(300 mK) ●稀释制冷(30 mK) ●磁体 (9 T & 12 T)	●声子、磁子激发观测 ●磁-声相互作用 ●极化中子对磁结构及磁激发研究
冷中子广谱谱仪	●入射中子能量范围: $2.4\text{ meV}<E_i<19\text{ meV}$ ●最高能量分辨率: 优于 $0.05\text{ meV}@E_i=3\text{ meV}$	●闭循环制冷 (4 K) ● ^3He 制冷(300 mK) ●稀释制冷(30 mK) ●磁体 (9 T & 12 T)	●声子、磁子激发快速观测; ●量子液体动力学

3.4 中子成像装置

热中子成像装置和冷中子成像装置由原子能院自主设计建设，能为基础科学和工业无损检测应用提供高效和多样化的测试手段，其关键指标、功能及应用领域见表 5。热中子成像装置(图 13)位于 CARR 堆物理大厅，具有高中子通量的特点，适合开展实时成像及大样品测试。通过选择不同过滤器，截取不同能谱的中子，能够实现热中子、超热中子和快中子成像。冷中子成像装

置(图 14)位于 CARR 堆导管大厅，具有本底低的特点，适合开展高分辨、相称和极化中子成像。目前，冷中子成像装置配备了速度选择器和双晶单色器，能够实现能量选择成像。此外，还配备 X 射线原位成像装置，可实现中子与 X 射线同时成像。近年来，相继开展了核燃料元件芯块与包壳、涡轮叶片、碳纤维、岩石、水泥、古化石以及热工力学两相流等工业无损检测和基础科学研究 [46-53]。

表 5 中子成像关键指标、功能及应用领域

谱仪名称	关键指标	功能	应用领域
热中子成像	●样品处最大中子通量：$1\times10^9\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ●最大成像面积：$20\text{ cm}\times40\text{ cm}$ ●空间分辨率：$50\text{ }\mu\text{m}$ ●样品台承重：200 kg	二维和三维成像、实时中子成像、热中子、超热中子和快中子成像	核工业、航空航天、能源、地质、汽车工业、军工、考古、生物等领域内部缺陷、元素分布、两相流、应力等内部结构信息
冷中子成像	●样品处最大中子通量：$1.8\times10^8\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ●最大成像面积：$30\text{ cm}\times30\text{ cm}$ ●空间分辨率：$50\text{ }\mu\text{m}$ ●样品台承重：250 kg	二维和三维成像、能量选择成像	

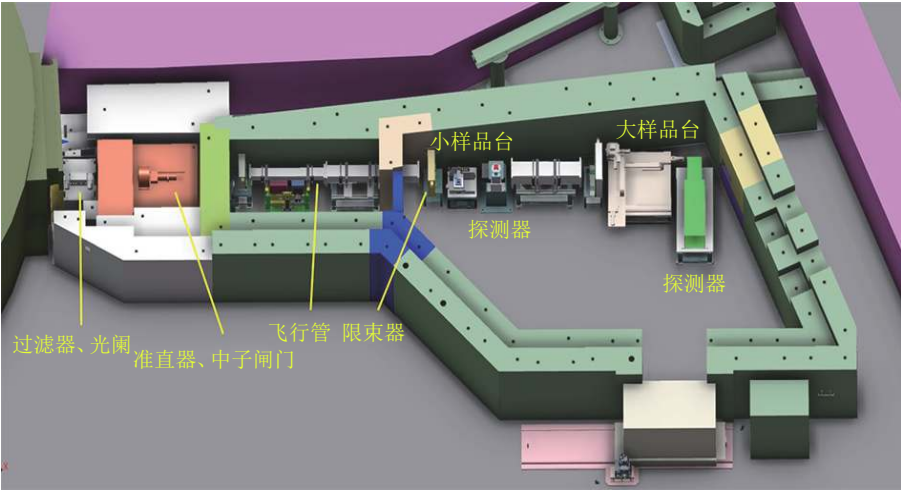


图 13 (在线彩图) 热中子成像结构示意图

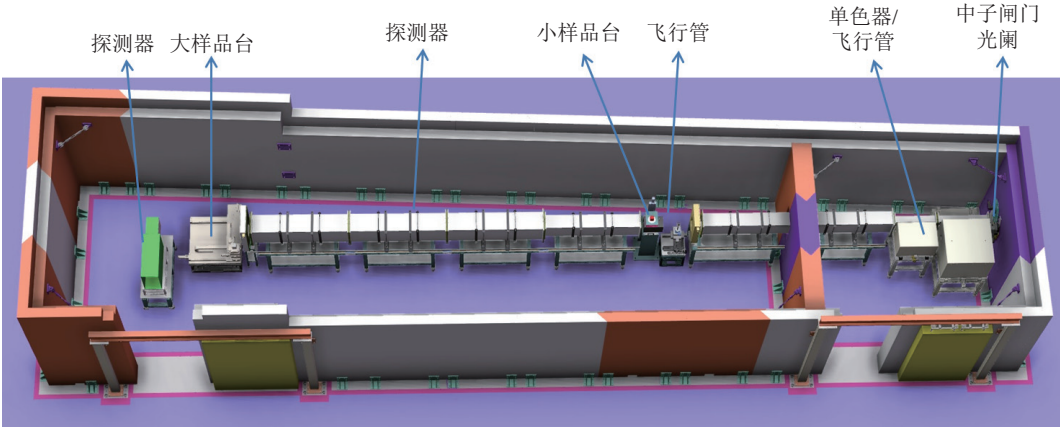


图 14 (在线彩图) 冷中子成像结构示意图

3.5 中子活化分析装置

中子活化分析装置用于物质材料的核素成分分析，由原子能院自主设计建设，装置示意图参见图 15。利用 CARR 堆高中子注量率、高稳定性等优势，正在建设分析元素种类齐全、技术先进的中子活化分析研究平台，主要包括：仪器中子活化分析系统、冷中子瞬发伽马活化分析系统、热中子瞬发伽马活化分析系统及中子深度剖面分析系统和缓发中子测量系统，表 6 列出中子活化分析关键指标、功能及应用领域。仪器中子活化分析是一种离线的分析方法，可分析元素周期表中大部分核素，但对于中子俘获生成核为非放射性核、纯β衰变和γ分支比相对较低的核素时，不能实现其核素测量。瞬发伽马活化分析是一种非破坏、多元素在线检测方法，对 H、B、C 等有较好的探测下限和灵敏度。冷中子瞬发伽马活化分析更侧重于材料中 H、B 等元素的痕量分析，而对分析含有中子散射截面较大且含量较高的 H 元素样品如生物样品和聚合物时，则适合采用热中子瞬

发伽马活化分析。近年来，开展了大气颗粒物多种元素定量分析、多种地质和生物标样的对比测试、高温合金中 B 浓度深度分布分析、锂电池充放电过程中 Li 动态分布研究、多种单质和化合物元素瞬发伽马谱数据库的建立等工作^[54-60]。

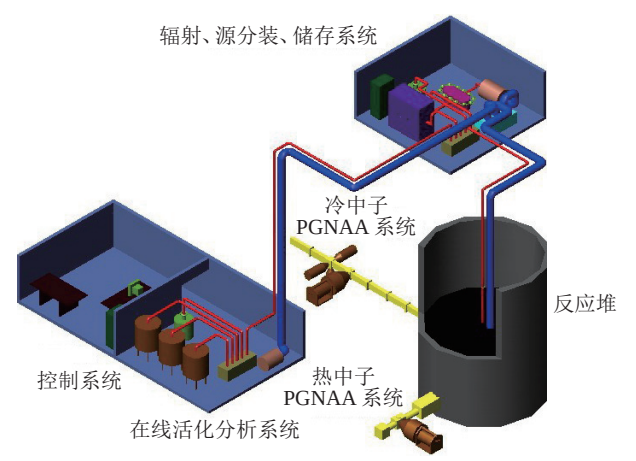


图 15 (在线彩图)CARR 中子活化分析装置示意图

表 6 中子活化分析关键指标、功能及应用领域

谱仪名称	关键指标	功能	应用领域
仪器中子活化分析系统	●中子注量率达到 $10^{14} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ●大部分元素探测限 $10^{-8}\sim 10^{-15} \text{ g}$	具有长照、短照、多套探测器一体化集成控制测量系统，样品中 60 多种元素定量分析	地球、环境、材料、生物医学、核法证学、考古学、宇宙科学、质量评价和质量控制、食品卫生健康等领域
缓发中子测量系统	● ^{233}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 探测限优于 1 ng ●分析速度 1 个样品/1 min	核裂变缓发中子测量，U、Pu 定量分析	●大规模的铀矿资源普查 ●乏燃料及后处理等 U、Pu 的定量 ●核保障
热中子瞬发伽马活化分析系统	●中子注量率 $\sim 10^8 \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	高 H 含量样品如生物样品和聚合物材料中多元素定量及无损分析	医学、薄膜材料等
冷中子瞬发伽马活化分析系统	●中子注量率 $10^{10} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ●H 探测限小于 1 μg、B 探测限小于 0.1 μg	材料中 B、H 等 20 余种仪器中子活化分析难测定的元素非破坏定量分析	●氢燃料电池、受控核聚变容器壁材料、储氢材料 ●半导体材料、核材料 H、B 等 ●标准物质轻元素、多元素定值等领域
中子深度剖面分析装置	● ^6Li 、 ^{10}B 等探测限 $10^{12} \text{ 原子}/\text{cm}^2$ ●深度分辨率：nm 级	材料近表面 B、Li、He、Be、N、O 等多种元素非破坏定量分析	锂电池、半导体、高温合金材料、聚变堆材料等材料中 Li、B、He、N、O 等多元素浓度深度分布

4 总结和展望

中子散射、中子成像和中子活化分析等中子科学技术因其鲜明特色优势，可为前沿科学研究和技术创新提供强有力的技术支撑。随着 CARR、CMRR 和 CSNS 等高通量中子源大科学装置的逐步建成并投入使用，我国中子科学技术迎来前所未有的发展机遇。

依托 CARR 高通量中子源，通过自主研发和国内外合作共建等方式，在原子能院建成了初具规模的国际先进中子科学平台，主要设备包括建成 12 台谱仪、在建 7 台谱仪及若干相关附属配套设施等。在 CARR 中

子科学平台上开展了大量中子散射、中子成像和中子活化分析实验研究。研究课题既包括了超导、量子磁性、软物质生物等基础科学前沿探索，也涉及了反应堆压力容器、核燃料元件和包壳、电池材料、涡轮叶片、大气污染物等服务于国家重大需求的应用研究。

此外，原子能院提出在 CARR 旁利用现有长切向水平孔道建设北京在线同位素分离丰中子束流装置，简称“北京 ISOL”(图 16)，以进一步满足核科技领域中重大基础科学问题与核能材料等研究需求。北京 ISOL 采用反应堆和强流加速器、以及在线同位素分离和弹核碎裂相结合的方法，产生最高强度的丰中子核束，用于拓

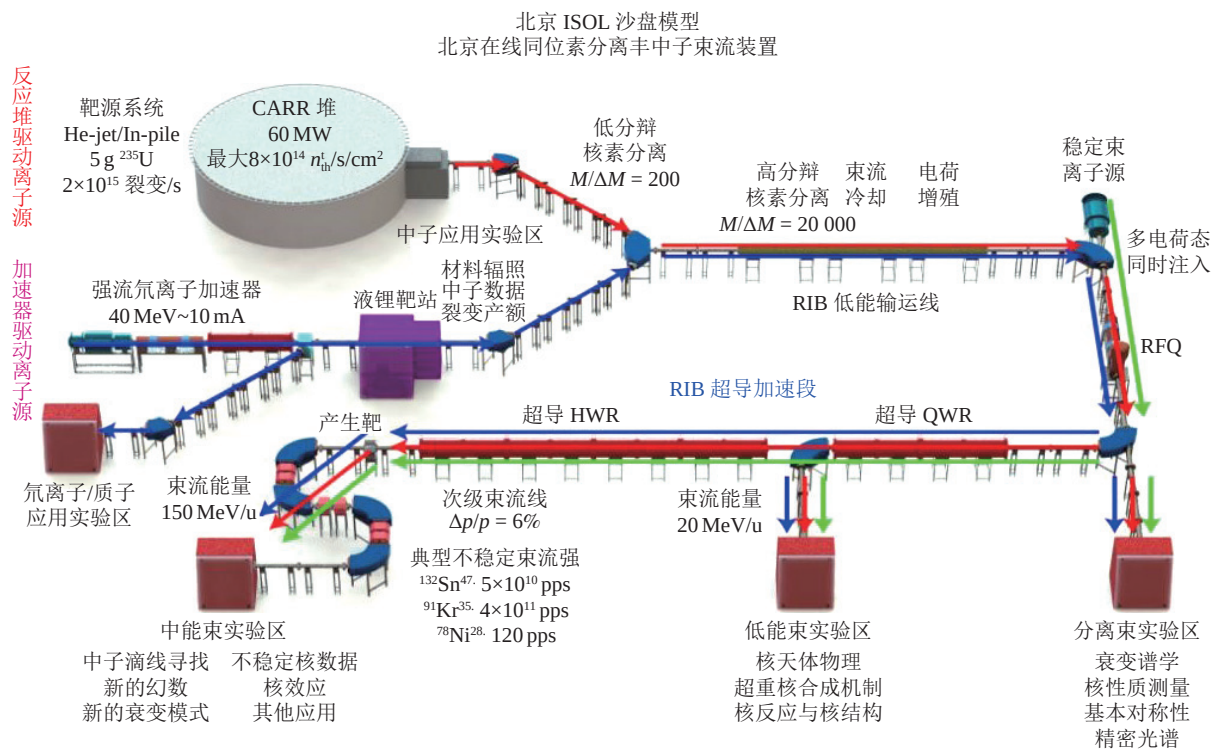


图 16 (在线彩图) 北京 ISOL 规划模型图

展核素新版图并认识新规律；用强流氦束打靶产生强流中子，以满足先进核能系统特别是聚变堆材料的辐照测评等急迫需求^[61-63]。

随着反应堆的逐步稳定运行和国家持续投入，CARR 中子科学平台将以已构建的 19 台中子谱仪及配套设备为基础，不断提升装置性能，逐步实现全面开放运行，为国内外用户提供优质的中子散射、中子照相和活化分析技术，在基础科学前沿和国家重大需求应用研究中发挥国家大型科学装置的技术支撑作用。

致谢 特别感谢所有参与 CARR 中子科学平台建设和应用研究的合作单位和科技工作者们。感谢中核集团、科工局、科技部、国家自然科学基金委和中科院等部门对 CARR 中子科学平台建设和应用的相关资助支持。本文得到国家重点研发计划 (2017YFA0403700)，国家财政部稳定支持研究经费 (WDJC-2019-04) 资助。

参考文献:

- [1] DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang. Neutron Physics-principle, Method and Application[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011. (in Chinese)
(丁大钊, 叶春堂, 赵志祥. 中子物理学: 原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2011.)
- [2] LOVESEY S W. Theory of Neutron Scattering from Condensed Matter, Vol 1: Nuclear Scattering, Vol 2: Polarization Effects and Magnetic Scattering[M]. Oxford: Oxford University Press, 1984.
- [3] DOBRZYNSKI L, BLINOWSKI K, Cooper M. Neutrons and Solid State Physics (Ellis Horwood Series in Physics and Its Applications)[M]. Upper Saddle River: Pearson Education, 1994.
- [4] RINALDI R, LIANG L, SCHÖBER H. Neutron Applications in Earth, Energy, and Environmental Sciences[M]. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [5] PERFECT E, CHENG C, LEHMANN P. Neutron Imaging and Applications: A Reference for the Imaging Community[M]. New York, Springer-Verlag, 2009.
- [6] LI Dehong, SU Tongling. College Physics, 2005, 24(6): 56. (in Chinese)
(李德红, 苏桐龄. 大学物理, 2005, 24(6): 56.)
- [7] Chinese Neutron Scattering Society[EB/OL].[2019-12-12]
<http://english.ihep.cas.cn/ls/cnss/>;
<https://nucleus.iaea.org/RRDB/Content/Geo/All.aspx>.
- [8] MAEKAWA F, HARADA M, OIKAWA K, et al. Nucl Instr and Meth A, 2010, 620(2/3): 159.
- [9] YE C. Physica B, 1997, 48: 241.
- [10] GOU C, CHEN D, SUN K, et al. Physica B, 2002, 311(1-2): 40.
- [11] YE Chuntang, LIU Yuntao. Physics, 2006, 35: 961. (in Chinese)
(叶春堂, 刘蕴韬. 物理, 2006, 35: 961.)
- [12] ZHAO Zhixiang. Modern Physics, 2000, 6: 16. (in Chinese)
(赵志祥. 现代物理知识, 2000, 6: 16.)
- [13] The First Cold Neutron Beam Experiment of China Advanced Research Reactor[EB/OL].[2019-12-12]. <http://www.cnnc.com.cn/cnnc/300555/300557/495087/index.html>.
- [14] LV Zheng, XIAO Shigang, ZHENG Wuqin, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2012(10): 33. (in Chinese)

- (吕征, 肖诗刚, 郑伍钦, 等. 原子能科学技术, 2012(10): 33.)
- [15] YUAN Lvzheng, KE Guotu, JIN Huajin, et al. *Nuclear Power Engineering*, 2006, S2: 1. (in Chinese)
(袁履正, 柯国土, 金华晋, 等. *核动力工程*, 2006, S2: 1.)
- [16] HAN Songbai, LIU Yuntao, CHEN Dongfeng. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 22: 24. (in Chinese)
(韩松柏, 刘蕴韬, 陈东风. *科学通报*, 2015, 22: 24.)
- [17] LIU Yuntao, CHEN Dongfeng. *Physics*, 2013, 42(8): 534. (in Chinese)
(刘蕴韬, 陈东风. *物理*, 2013, 42(8): 534.)
- [18] CHEN Dongfeng, LIU Yuntao, HAN Songbai. *Materials China*, 2009, 28(12): 1. (in Chinese)
(陈东风, 刘蕴韬, 韩松柏. *中国材料进展*, 2009, 28(12): 1.)
- [19] CHEN D, LIU Y, WU M. *Neutron News*, 2009, 20(2): 32.
- [20] CHEN Dongfeng, GOU Cheng, YE Chuntang. *Nuclear Techniques*, 2005, 2: 40. (in Chinese)
(陈东风, 勾成, 叶春堂. *核技术*, 2005, 2: 40.)
- [21] KISI E H, HOWARD C J. *Applications of Neutron Powder Diffraction*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [22] JANA R, SHEPTYAKOV D, MA X, et al. *Physical Review B*, 2019, 100: 094109.
- [23] YANG W, ZHAO H, LAI Y, et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, 65(6): 1324.
- [24] ZHAO H, YANG W, SHAO Z, et al. *Scripta Materialia*, 2017, 129: 6.
- [25] WANG R, QIAN G, LIU T, et al. *Nano Energy*, 2019, 62: 709.
- [26] KONG W, GAO R, LI Q, et al. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7: 9099.
- [27] ZHAO H, YANG W, SHAO Z, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 14.
- [28] LI Meijuan, LIU Xiaolong, LIU Yuntao, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(3): 532. (in Chinese)
(李眉娟, 刘晓龙, 刘蕴韬, 等. *原子能科学技术*, 2014, 48(3): 532.)
- [29] LI M, LIU Y, LIU X, et al. *Mater Sci Forum*, 2014, 777: 71.
- [30] LI Meijuan, LIU Xiaolong, LIU Yuntao, et al. *Chinese Physics C*, 2016, 40(03): 036002.
- [31] LI Meijuan, LIU Xiaolong, LIU Yuntao, et al. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(4): 463. (in Chinese)
(李眉娟, 刘晓龙, 刘蕴韬, 等. *金属学报*, 2016, 52(4): 463.)
- [32] MALAMUD F, MOYA RIFFO A, VICENTE ALVAREZ M, et al. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, 510: 524.
- [33] XIAO Y, BIAN Z, WU Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 798: 644.
- [34] HUTCHINGS M T, WITHERS P J, HOLDEN T M, et al. *Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction*[M]. Boca Ra-ton: CRC Press/Taylor & Francis, 2005.
- [35] LI Junhong, GAO Jianbo, LI Jizhou, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(04): 0484. (in Chinese)
(李峻宏, 高建波, 李际周, 等. *原子能科学技术*, 2010, 44(04): 0484.)
- [36] LIU Xiaolong, LI Meijuan, LIU Yuntao, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(5): 0915. (in Chinese)
(刘晓龙, 李眉娟, 刘蕴韬. *原子能科学技术*, 2016, 50(5): 0915.)
- [37] LIU Xiaolong, LIU Yuntao, CHEN Dongfeng, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(8): 1486. (in Chinese)
(刘晓龙, 刘蕴韬, 陈东风, 等. *原子能科学技术*, 2016, 50(8): 1486.)
- [38] LIU X, LIU Y, HAN S, et al. *Materials Science Forum*, 2016, 850: 148.
- [39] ROE R. *Methods of X-ray and Neutron Scattering in Polymer Science*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- [40] ZHANG H, CHENG H, YUAN G, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 735: 490.
- [41] YUAN G, ZHANG H, CHENG H, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2011, 656(1): 65.
- [42] SHIRANE G, SHAPIRO S, TRANQUADA J. *Neutron Scattering with a Triple-Axis Spectrometer*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [43] LI Shiliang, DAI Pengcheng. *Physics*, 2011, 40: 33. (in Chinese)
(李世亮, 戴鹏程. *物理*, 2011, 40: 33.)
- [44] HAO Lijie, MA Xiaobai, LIU Xinzh, et al. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2015(01): 89. (in Chinese)
(郝丽杰, 马小柏, 刘新智, 等. *中国原子能科学研究院年报*, 2015(01): 89.)
- [45] CHENG P, ZHANG H, BAO W, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 821: 17.
- [46] HAN S, WU M, WANG H, et al. *Phys Proced*, 2013, 43: 73.
- [47] HE L, HAN S, WANG H, et al. *Physics Procedia*, 2015, 69: 79.
- [48] WEI Guohai, HAN Songbai, HE Linfeng, et al. *Nucl Tech*, 2013, 36: 070204. (in Chinese)
(魏国海, 韩松柏, 贺林峰, 等. *核技术*, 2013, 36: 070204.)
- [49] ZHAO Y, XUE S, HAN S, et al. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 122: 4963.
- [50] HE L, HAN S, WEI G, et al. *Development and Application of Neutron Imaging Technique at China Advanced Research Reactor*[C]//*Materials Science Forum*, 2016.
- [51] ZHAO Y, XUE S, HAN S, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 693.
- [52] WEI G, HAN S, WANG H, et al. *Physics Procedia*, 2013, 03: 036.
- [53] WEI G, HAN S, WANG H, et al. *ysics Procedia*, 2015, 69: 258.
- [54] YAO Yonggang, XIAO Caijin, JIN Xiangchun, et al. *Journal of Isotopes*, 2018, 31(06): 362. (in Chinese)
(姚永刚, 肖才锦, 金象春, 等. *同位素*, 2018, 31(06): 362.)
- [55] XIAO Caijin, ZHANG Guiying, SUN Hongchao, et al. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(04): 434. (in Chinese)
(肖才锦, 张贵英, 孙洪超, 等. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(04): 434.)
- [56] YAO Y, XIAO C, JIN X, et al. *J Radioanal Nucl Chem*, 2017, 311: 1265.
- [57] YAO Y, XIAO C, LONG H, et al. *J Radioanal Nucl Chem*, 2016, 307: 1651.
- [58] TANG C, XIAO C, YAO Y, et al. *Applied Radiation and Isotopes*, 2019, 148: 102.

- [59] YANG J, LIU G, YAO Y, et al. Journal of Reactional and Nuclear Chemistry, 2019(11): 20.
- [60] JIN X, HAN S, CHEN D, et al. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019, 563: 022050.
- [61] LIU Weiping. Physics, 2014, 43(03): 150. (in Chinese) (柳卫平. 物理, 2014, 43(03): 150.)
- [62] ZHU Fei, PENG Zhaohua, ZHENG Jian, et al. Nuclear Techniques, 2017, 40(11): 110201. (in Chinese) (朱飞, 彭朝华, 郑健, 等. 核技术, 2017, 40(11): 110201.)
- [63] CUI Baoqun, MA Yingjun, TANG Bing, et al. Annual report of China Institute of Atomic Energy, 2016(01): 79. (in Chinese) (崔保群, 马鹰俊, 唐兵, 等. 中国原子能科学研究院年报, 2016(01): 79.)

Current Status and Future Prospect of Neutron Facilities at China Advanced Research Reactor

LI Tianfu, WU Meimei, JIAO Xuesheng, SUN Kai, CHEN Dongfeng[†]

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Neutron research facilities have been built on the high flux neutron source China Advanced Research Reactor(CARR), of which different kinds of neutron techniques, including neutron scattering, neutron imaging and neutron activation analysis, are now available. The neutron scattering instruments, including neutron diffractometers, small-angle neutron scattering, neutron reflectometer, inelastic neutron scattering spectrometers, can be used to analyze the microstructure and dynamic properties of materials. The thermal neutron imaging and cold neutron imaging facilities can be used for the non-destructive testing of defects inside materials. And neutron activation analysis systems are powerful for the detection of different elements or isotopes. There are now 19 neutron instruments which have been built or under construction. Some sample environment devices are also available. These facilities provide important support for both fundamental scientific researches and industrial applications in the fields of physics, chemistry, material science, life science, energy, environment and so on. CARR neutron research facilities will continue to open to the users from outside the institute, to not only serve scientific frontier researches, but also meet the major national innovation needs.

Key words: China Advanced Research Reactor; neutron scattering; neutron imaging; neutron activation analysis

Received date: 31 Dec. 2019; Revised date: 28 Apr. 2020

Foundation item: National Key R&D Program of China(2017YFA0403700); Stable Support Research Fund of Ministry of Finance(WD-JC-2019-04)

[†] Corresponding author: CHEN Dongfeng, E-mail: dfchenciae@126.com.