中国绵阳研究堆CMRR中子散射平台及应用

孙光爱, 刘栋*, 龚建*, 彭述明*

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621999

*联系人, 刘栋, E-mail: dongliu10@mail.ustc.edu.cn; 龚建, E-mail: gongjian@caep.cn; 彭述明, E-mail: pengshuming@caep.cn

收稿日期: 2021-04-01; 接受日期: 2021-06-01; 网络出版日期: 2021-08-20

国家自然科学基金联合基金重点项目(编号: U1830205)资助

摘要 20 MW中国绵阳研究堆(CMRR)上的中子科学平台, 首期建设6台散射谱仪和2台中子成像装置, 从2013年以来全部投入使用. CMRR的中子科学平台, 可分别从事热、冷中子衍射实验测试. 实测用于中子散射实验的热中子注量率为 $2.4 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 冷中子注量率为 $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 首期运行的谱仪分别为: 高分辨中子衍射仪(HRND)、中子应力分析谱仪(RSND)、高压中子衍射仪(HPND)、小角中子散射谱仪(SANS)、飞行时间极化中子反射谱仪(TPNR)、冷中子三轴谱仪(CTAS)和冷/热中子成像装置(CNR). 此外, 二期有8台自主建设的谱仪, 将在未来2–5年内建成并投入使用. 目前CMRR每年运行超200天, 其中提供给用户的束流超60%. 本文重点介绍了CMRR中子科学平台及其在软物质、磁性膜材料、航空、基础物理等领域的典型应用.

关键词 中国绵阳研究堆, 中子科学平台, 中子衍射, 中子散射

PACS: 28.20.-v, 28.20.Cz, 28.50.Dr, 29.25.Dz, 29.30.Hs

1 引言

我国正大力发展用于中子散射和中子无损检测的三大中子源, 包括中国工程物理研究院的中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)、中国科学院高能物理研究所的中国散裂源(CSNS)、中国原子能研究院的中国先进研究堆(CARR). 其中, CMRR的功率为20 MW, 位于四川省绵阳市的核物理与化学研究所9023厂区, 2012年通过国家验收, 2013年9月冷源正式投入使用. 已建成8台国际先进水平的中子射线分析装置, 平台被评为2013–2015年度中国十大核科技进展. 目前, CMRR年运行时间达200天/年.

CMRR中子平台已列入世界中子源名录Neutron-sources.org^[1]. 用于中子散射实验的热中子注量率达 $2.4 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 冷中子注量率达 $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 首期6台中子散射谱仪和2台中子成像装置, 从2013年开始已经全部投入使用. 分别为高分辨中子衍射仪(HRND)^[2]、中子应力分析谱仪(RSND)^[3]、高压中子衍射仪(HPND)^[4]、小角中子散射谱仪(SANS)^[5]、飞行时间极化中子反射谱仪(TPNR)^[6]、冷中子三轴谱仪(CTAS)^[7]和冷/热中子成像装置(CNR)^[8]. 谱仪的综合性能指标先进. 平台配备了高/低温、高压、力学和磁场等丰富的原位环境加载设备. 平台的用户数量和产出质量逐年提升, 在国家重大科技领域发挥了重要作用.

引用格式: 孙光爱, 刘栋, 龚建, 等. 中国绵阳研究堆CMRR中子散射平台及应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 092009

Sun G A, Liu D, Gong J, et al. The neutron scattering platform of China Mianyang Research Reactor (CMRR) and recent applications (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 092009, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0096](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0096)

用. 此外, 正在建设中的热中子三轴谱仪(TTAS)、标准测试束(NSTB)、超小角中子散射谱仪(USANS)、纵向型中子共振自旋回波谱仪(LNRSE)、自旋回波小角中子散射谱仪(SESANS)、工程应力谱仪(ESD)、极化小角中子散射谱仪(PSANS)等二期谱仪, 也将进一步完善CMRR中子科学平台的测试能力.

平台经过几年的开放和发展, 一期谱仪应用广泛, 在不同科研领域发挥了重要作用. 目前CMRR堆正与CARR堆和CSNS源协同发展, 促进国内中子技术发展并提升其在先进材料等国家重要领域中的地位和作用. 本文将重点介绍CMRR中子科学平台及其在软物质、磁性膜材料、航空、基础物理等领域的典型应用.

2 绵阳中子科学平台布局

CMRR的中子散射谱仪及中子无损检测装置总体布局如图1所示. 包含反应堆大厅和冷中子大厅两个大厅. 目前已建成8台中子散射谱仪和无损检测装置, 正在建设超小角中子散射谱仪、热中子三轴谱仪等8台新谱仪. 下面将依次介绍反应堆大厅的热中子散射谱仪和冷中子大厅的冷中子散射谱仪, 以及典型应用情况.

3 热中子散射平台与应用

反应堆大厅中的三台热中子散射谱仪依次是: 中

子应力分析谱仪(RSND)、高压中子衍射谱仪(HPND)和高分辨中子衍射谱仪(HRPD). 下面将从每台谱仪的特点、参数指标、功能以及相关的应用研究展开介绍.

3.1 中子应力分析谱仪

中子应力分析谱仪^[3]如图2所示, 是基于中子衍射原理建造的实验平台. 适用于大型工程部件、先进材料及结构件等对象内部厘米级深度范围的三维残余应力分布无损检测. 中子应力分析谱仪安装在CMRR的2号水平孔道处. 多能量的白光中子束由反应堆心出射, 经过闸门和超镜中子导管到达单色器系统. 白光中子束变成单能中子束, 由狭缝调节束斑后, 与样品发生衍射, 衍射信号由探测器采集. 表1给出了RSND的主要技术参数.

RSND有三大测量功能: 残余应力检测、原位应力分析以及织构测量. 中子衍射残余应力测量技术, 在航空航天、军工装备、交通运输、核工业应用等重大工程领域均有重要的应用.

应用方面, 利用RSND开展了发动机高温合金涡轮盘残余应力测量. 在涡轮盘件中, 热形变/热处理等制造工艺过程中产生的残余应力及其分布规律, 对其服役寿命和结构的安全性评定有重要意义. 利用中子衍射技术, 结合修正相变潜热的热-结构耦合有限元分析, 确定了镍基高温合金涡轮盘在等温锻造、固溶处理和时效处理后的三维宏观残余应力. 图3给出了盘

图1 (网络版彩图)中国绵阳研究堆中子科学平台的反应堆大厅和冷中子散射大厅的谱仪布局

Figure 1 (Color online) The layout of instruments in the CMRR reactor hall and cold neutron scattering hall.

图 2 (网络版彩图)中子应力分析谱仪(图片来自文献[3], 已获得使用授权)

Figure 2 (Color online) Residual stress neutron diffractometer (reprinted with permission from ref. [3] Copyright © 2015 Elsevier).

表 1 CMRR中子应力分析谱仪主要技术参数

Table 1 Main parameters of the RSND at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
单色器	双聚焦单色器Si(311)
分辨率	$\Delta d/d=0.2\%$, $\Delta\epsilon=\pm 5\times 10^{-5}$
样品处中子注量率	$4.7\times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
样品台最大承重及尺寸	500 kg, 0.5 m

件残余应力的温度-应力耦合模拟与实验结果对比, 三维残余应力的有限元预测结果与实验结果差值小于 40 MPa^[9].

3.2 高压中子衍射谱仪

高压中子衍射谱仪^[4]如图4所示, 主要用于研究物质在高压加载下的结构变化信息. 系统主要由中子聚焦导管、可调狭缝、单色器、探测器、样品台、运动控制及电子学系统和静高压原位加载装置等部分组成. 聚焦导管是由椭圆形和锥形导管组成, 将入口7 cm 宽的中子束在样品处汇聚成3 cm宽, 既增强中子束流强度, 同时也实现中子6 m的长距离传输. 可调狭缝用于调节中子束流的宽度, 实现谱仪分辨率的调节, 以适应不同测试需要. 聚焦单色器由13片Ge单晶及机械装置构成, 主要作用是选择单一波长的中子, 并且实现中子束流在垂直方向的聚焦. 探测器由70路³He管组成探测器阵列, 采用完全扫描模式运行, 即每支探测器均扫描全谱, 然后叠加所有探测器的全谱, 这种模式的优势在于不需要对每支探测器效率进行标定. 表2给出了高

图 3 (网络版彩图)利用中子散射对发动机Ni基高温合金涡轮盘残余应力测量(图片来自文献[9], 已获得使用授权)

Figure 3 (Color online) Neutron diffraction characterizes residual stress in powder metallurgy Ni-based superalloy turbine discs (reprinted with permission from ref. [9] Copyright © 2019 Elsevier).

图 4 (网络版彩图)高压中子衍射谱仪

Figure 4 (Color online) High Pressure Neutron Diffractometer (HPND).

压中子衍射谱仪主要技术参数.

在静高压、高温、低温等极端样品环境加载下, 材料晶格常数会发生变化(衍射谱上的表现为衍射峰位的偏移), 高压中子衍射谱仪可以通过测量这一变化获取材料的体弹模量及体弹模量的一阶导数等物性信息; 还可原位探测材料在高压等极端环境下的晶体结构及相变、磁结构及相变等信息. 这极大地拓展了中子衍射在凝聚态物理、材料科学、地球科学、化学等领域的应用范围.

应用方面, 与高压科学中心等单位开展合作, 利用 HPND开展研究. sp³碳基材料具有优异的机械和光学

表 2 CMRR 高压中子衍射谱仪主要技术参数

Table 2 Main parameters of the HPND at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
波长	1.59 Å
分辨率	$\Delta d/d=0.35\%$
探测器	70 支 ³ He 阵列
样品处中子注量率	$2.8 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

性能, 对不饱和分子如芳香族类分子施加极端压力可以制备 sp^3 杂化碳基材料. 如图5所示, 利用高压中子衍射和色谱分析质谱技术确定了该反应的具体路径为[4+2] Diels-Alder, retro-Diels-Alder和1-1'耦合几步反应, 其中第一个反应为关键反应^[10].

3.3 高分辨中子衍射谱仪

高分辨中子衍射谱仪^[2]如图6所示, 主要用于粉末材料的静态晶体结构和磁结构测量和分析. HRND可准确确定轻原子和近邻原子以及同位素原子的位置信息; 可获得材料在不同温度下的晶体结构和磁结构相变信息; 还可进行原位化学气固反应动力学研究, 探索材料结构与性能的关系. HRND安装在反应堆大厅1号孔道上, 主要由第一准直器、单色器、第二准直器、样品台、探测器和数据获取与运动控制等部分组成, 基本布局如图7高分辨模式所示. 为了提升仪器的应用范围, 2019年对谱仪进行了升级改造, 将第一准直器向后端移动, 其前端安装双聚焦Si单色器, 实现高强

度模式, 改造后的布局如图7中高强度+高分辨模式所示. 表3给出了高分辨中子衍射谱仪主要技术参数.

应用方面, 与华中科技大学研究人员开展合作, 利用中子衍射开展了Na离子电池材料研究. Na超离子导体对于开发安全和廉价的全固态Na离子电池至关重要. Na_3OBH_4 的离子传导率为 $4.4 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ (室温)和 $1.1 \times 10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ (328 K), 比目前已知的反钙钛矿材料高4个数量级. 如图8所示, 利用中子衍射获得阴离子团簇 BH_4 的位置信息, 发现阴离子团簇的高度自由性, 揭示了材料具有高离子传导率的本质原因. Na_3OX 具有高的结构容忍性和结构控制^[11].

与复旦大学研究人员合作, 利用中子衍射研究了 $\text{MgH}_2\text{-Li}_3\text{VO}_4$ 混合物结构信息, 确认了在Mg吸氢和脱氢过程中 Li_3VO_4 结构保持稳定, 不发生化学反应, 证明了 Li_3VO_4 结构的稳定性, 从而确保反应过程中的催化活性^[12].

4 冷中子散射平台与应用

热中子经过冷源的慢化, 可以增加中子谱中冷中子份额. 冷中子波长更长, 适合纳米到亚微米范围内的结构测试以及能量范围在10 meV以下的非弹性散射测量. 目前冷中子大厅中安装有3台冷中子散射谱仪, 分别为: 小角中子散射谱仪、飞行时间极化中子反射谱仪和冷中子三轴谱仪. 这一部分将主要依次介绍这三台谱仪的特点、功能、参数指标以及应用进展.

图 5 (网络版彩图) 高压下的聚合机理研究. (a) 中子衍射数据拟合; (b) 原位高压中子衍射数据(图片来自文献^[10], 已获得使用授权)

Figure 5 (Color online) Investigation of pressure-induced polymerization of $\text{C}_6\text{H}_6\text{-C}_6\text{F}_6$ cocrystal. (a) The fitting of the neutron diffraction data; (b) *in-situ* high pressure neutron diffraction (reprinted with permission from ref. ^[10] © 2019 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim).

图 6 (网络版彩图)高分辨中子衍射谱仪

Figure 6 (Color online) High resolution neutron diffractometer (HRND).

4.1 小角中子散射谱仪

小角中子散射谱仪^[5,13-15]如图9所示,是无损探测纳米尺度结构的有力工具,在基础科学和工程材料研究领域应用广泛.谱仪主体由屏蔽体、速度选择器、导管、准直系统、探测器系统、多功能样品台等组成.入射白光中子束经过速度选择器单色化为特定波长的中子.准直后的入射中子束照射在样品上,与原子核发生相干、非相干散射和吸收作用.相干散射起源于材料内部纳米尺度的结构起伏.散射中子被二维敏探测器记录.通过对SANS数据的解析,可获得材料内部散射体形状、尺寸、数量等信息.表4给出了SANS谱仪的主要技术参数.

作为测量物质亚微观结构的重要手段, SANS在高

分子材料^[16-18]、高分子复合材料^[19,20]、金属材料^[21]、含能材料^[22]等体系的研究中作用显著.

应用方面,利用小角中子散射谱仪及配套的原位设备,我们针对硅橡胶层级结构与性能的关系开展了系列研究^[23-25].其中,为研究不同含量填料增强的硅橡胶体系中的结合胶层结构模型差异,我们对系列样品开展了“衬度匹配”实验研究.通过调节环己烷溶剂的氢(H)氘(D)配比,分别对复合材料体系中白炭黑粒子(53.7%D)和高分子基体(4.9%D)进行匹配.分析结果表明了结合胶层指数形式梯度变化的结构特征,并得到了不同含量填料的硅橡胶体系中界面层的不同结构模型^[24].

最近,与华南理工大学及美国橡树岭国家实验室的研究人员展开合作,通过衬度变换小角中子实验设计进行了金属有机多面体(MOP)材料研究,实现了多层级结构的解析(图10).证实了溶液状态下MOP材料的稳定性以及外层烷基链的舒展状态^[26].

4.2 飞行时间极化中子反射谱仪

飞行时间极化中子反射谱仪^[6]如图11所示,是研究薄膜材料表界面微结构的有力工具.中子镜反射可获得薄膜材料深度方向纳米至百纳米量级的微结构参数,中子非镜反射可获得百纳米至微米量级的表面形貌.在基础科学和薄膜工程材料方面,如高分子聚合物薄膜、磁性薄膜、生物薄膜、金属薄膜等领域,有广泛的应用价值.

TPNR谱仪工作过程中,白光中子从导管出射,依

图 7 (网络版彩图)高分辨衍射谱仪改造前后布局图. (a) 高分辨模式; (b) 高分辨+高强度模式

Figure 7 (Color online) Layout of the HRND before and after upgrade. (a) High resolution mode; (b) high resolution and high intensity mode.

表 3 CMRR高分辨中子衍射谱仪主要技术参数

Table 3 Main parameters of the HRND at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
高分辨模式	波长
	1.8846 Å
	衍射角
	8°–172°
	分辨率
高强度模式	0.16%
	探测器
	64支 ³ He阵列
	中子注量率
	$1.75 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
高分辨模式	波长
	1.3364 Å
	衍射角
	8°–110°
	分辨率
高强度模式	0.4%
	探测器
	64支 ³ He阵列
	中子注量率
	$2.39 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

次经过第二闸门、聚焦导管、监视器和第一限束狭缝, 到达斩波器. 表5给出了TPNR谱仪主要技术参数. 斩波器主要由带有中子束流窗口的4个斩盘组成, 高速旋转的斩盘将通过的白光中子束斩成具有一定范围波段的脉冲中子束. 然后依次经过第二狭缝、样品台前真空双通道(极化和非极化通道)及第三狭缝达到样品

台; 真空双通道可以根据实验需要, 通过平移切换极化或者非极化模式. 样品台通过平移与两个维度的旋转, 能够将薄膜样品精确地置于中子束流中心, 中子束经样品反射后通过第四狭缝以及样品后的真空双通道. 反射的中子束最后达到探测器以及束流捕集器.

极化模式下, 中子通过极化器、样品前自旋翻转器、样品后自旋翻转器和极化分析器组成的极化系统, 可以用于获得样品薄膜精确的磁结构信息. 样品台前的极化器采用透过式的极化超镜, 能够过滤掉中子束中的自旋朝上的中子, 得到自旋向下的极化中子, 中子自旋翻转器开启时, 将中子自旋方向翻转, 获得自旋向上的极化中子. 中子自旋翻转器关闭时, 中子自旋取向不变. 样品台后配有样品后自旋翻转器以及极化分析器, 极化分析器的原理与前述极化器一致. 非极化模式下测得的镜反射率曲线主要反映样品薄膜膜层厚度、材料成分以及表界面粗糙度信息, 其中反射率曲线上的峰宽对应着膜层的厚度. 非镜反射还可获得表面形貌结构. 极化模式下, 反射率曲线分为4种, 其反映的样品信息在非极化模式的基础上, 还能获取磁性薄膜的面内磁化强度大小与方向. 飞行时间模式

图 8 (网络版彩图)钠离子电池材料的中子衍射研究. (a) 300 K下 Na_3OBD_4 ND的衍射谱及拟合; (b) 精修的晶体结构(图片来自文献[11], 已获得使用授权)

Figure 8 (Color online) Neutron diffraction study of sodium-ion battery materials. (a) Rietveld refinement plots of Na_3OBD_4 ND at 300 K; (b) crystal structure of Na_3OBD_4 derived from ND Rietveld refinement (reprinted with permission from ref. [11] Copyright © 2019, American Chemical Society).

图 9 (网络版彩图)小角中子散射谱仪(图片来自文献[5], 已获得使用授权)

Figure 9 (Color online) Small-angle neutron scattering (SANS) (reprinted with permission from ref. [5] Copyright © 2016 Elsevier).

表 4 CMRR小角中子散射谱仪主要技术参数

Table 4 Main parameters of the SANS at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
散射矢量 Q 范围	0.01–5.0 nm ⁻¹
波长范围	0.2–2.0 nm
波长分辨率	5%–18%
二维灵敏探测器	640 mm×640 mm

图 10 (网络版彩图) (a) 衬度变换小角中子散射曲线; (b) 烷基链接枝的金属有机多面体材料结构(图片来自文献[26], 已获得使用授权)

Figure 10 (Color online) (a) Contrast variation SANS profiles on the (b) chain grafted Metal-Organic Polyhedron (MOP) (reprinted with permission from ref. [26] Copyright © 2020, American Chemical Society).

图 11 (网络版彩图) 飞行时间极化中子反射谱仪

Figure 11 (Color online) Time-of-flight and polarized neutron reflectometer (TPNR).

适于开展大样品和非均匀样品的测量, 而极化系统则适于磁性膜材料和表、界面磁结构的研究。

应用方面, 与西南科技大学开展合作, 利用极化中子反射研究了高频磁性多层膜Ta/FeNi/FeMn/Ta^[27]。交换偏置效应是影响高频磁性材料磁各向异性, 从而影响到高频特性的一项重要因素。这一实验设计的重点是对磁性多层膜共振频率与交换偏置效应进行关联。

图12所示是不同参数设计的Ta/FeNi/FeMn/Ta多层膜的极化中子反射实验曲线。图13为基于反射数据

表 5 CMRR飞行时间极化中子反射谱仪主要技术参数

Table 5 Main parameters of the TPNR at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
波长范围	0.25–1.25 nm
最低反射率	1×10 ⁻⁷
极化器效率	≥95%
自旋翻转器效率	>99%

拟合得到的多层膜散射长度密度。通过改变多层膜的微结构设计, 可以提高磁共振频率。这一工作通过交换偏置效应设计, 将原有共振频率从0.72 GHz提高到了2.8 GHz。

4.3 冷中子三轴谱仪

冷中子三轴谱仪^[7]如图14所示, 是用于中子非弹性散射研究最常用的谱仪之一, 早期主要用于晶格动力学研究。中子三轴谱仪利用单色器、样品和分析器3个转动轴, 可以直观地观测倒易空间和能量空间的某一个点的散射性质, 适合研究固体中的各种元激发。中子三轴谱仪的能量尺度与凝聚态物理学中重要的性质相匹配, 在基础物理研究中发挥了越来越重要的作用。CTAS主要用于研究凝聚态物质的元激发等能量

图 12 (网络版彩图) Ta/FeNi/FeMn/Ta的极化中子反射实验曲线及拟合结果。黑色圆圈表示R++的实测数据, 红色圆圈表示R--, 蓝色圆圈表示R。实线为计算结果(图片来自文献[27], 已获得使用授权)

Figure 12 (Color online) Reflectivity curve for Ta/FeNi/FeMn/Ta multilayer films. The black circles represent the measured data of R++, the red circles represent R--, and the blue circles represent R. The solid line gives the calculation results (reprinted with permission from ref. [27] Copyright © 2020 Elsevier).

图 13 (网络版彩图)中子反射数据拟合的Ta/FeNi/FeMn/Ta多层膜散射长度密度(图片来自文献[27], 已获得使用授权)
Figure 13 (Color online) Fitted SLD profiles of Ta/FeNi/FeMn/Ta multilayers obtained from TPNR data (reprinted with permission from ref. [27] Copyright © 2020 Elsevier).

图 14 (网络版彩图)冷中子三轴谱仪(图片来自文献[7], 已获得使用授权)
Figure 14 (Color online) Cold neutron triple-axis spectrometer (CTAS) (reprinted with permission from ref. [7] Copyright © 2020 Elsevier).

过程和动力学性质, 例如晶体材料声子态密度、磁振动与自旋涨落、聚合物和生物大分子的晶格动力学、软膜相变、自旋波色散等研究. 发明中子三轴谱仪的加拿大Bertram Brockhouse获得了1994年的诺贝尔物理学奖. 表6给出了CMRR的CTAS谱仪的主要技术参数.

声子、自旋波等元激发的测量是三轴谱仪最重要的功能, 主要测量模式有恒 E 扫描和恒 Q 扫描. 以恒 Q 扫描为例, 固定入射中子波矢 k_i , 在指定倒易空间点和能量转移范围之后, 谱仪将自动旋转到相应的测量位置对能量进行扫描, 得到该动量下的元激发能量. 得益于

表 6 CMRR冷中子三轴谱仪主要技术参数

Table 6 Main parameters of the CTAS at CMRR

分析谱仪性能项目	技术指标
能量范围	0–10 meV
能量分辨率	0.11 meV
样品处注量率	$3.73 \times 10^7 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

谱仪角度和样品倒易空间之间的一一对应关系, CTAS理论上可以获得布里渊区内所有点的元激发信息.

CMRR的CTAS已经成功应用于铁基超导体量子临界点^[28]、超分子化合物相变^[29]、热电材料各向异性机理^[30]、含能材料起爆机理和低维磁阻挫系统量子相变等研究中. 以热电材料为例, 与北京航空航天大学合作开展了低价环保热电材料声子谱的研究, 揭示了其非简谐性和各向异性对热导率的影响. 成功观测到Se掺杂的SnS单晶 Γ -X和 Γ -Y两个方向的横波声学声子和光学声子色散, 发现横波声子明显的软化现象, 这是热电材料 $\text{SnS}_{0.91}\text{Se}_{0.09}$ 具有优良导热性质的物理机制. 相关研究认识可帮助寻找经济实用、环境友好的热电材料^[30].

5 样品环境设备

为满足不同研究背景的用户对不同体系材料的原位加载需求, 平台配置了丰富的样品环境加载设备. 具备包括高温、低温、磁场、高压、力学、温度-力学、流变-温度、温度-磁场及多场环境的耦合加载能力. 例如: 高压中子衍射谱仪配备了温度最高至1500 K、压力最高至20 GPa的原位环境装置; 中子反射谱仪配备了10 K, 0.6 T的温度-磁场原位加载条件; 小角中子散射谱仪配备了各类温度和流变加载装置^[31,32]; 冷中子三轴谱仪配备了1.7 K闭循环低温制冷机、1600°C高温炉、8 T低温磁场、X射线劳厄衍射仪、高压等环境设备. 这些原位装置拓展了谱仪测试能力, 可广泛应用于凝聚态物理、材料、化学及生物学等领域的研究中.

6 总结与展望

经过近几年的发展, CMRR中子科学平台运行时

间、用户申请和成果产出逐年增加. 目前应用广泛, 谱仪性能指标、年度产出数量及质量都达到国际同类科学中心和装置的先进水平. 平台的发展和应用对国内不同的工程及科研领域起到了推动作用, 具有重要的社会效益. 此外, 团队通过前期的谱仪建设和运行, 在谱仪的设计、电子学、极化技术^[33]、控制^[34]等方面都积累了丰富的经验, 并与中国散裂中子源和国际著名中子散射实验室保持多方面的交流. 二期将有8台自主建设的谱仪. 包括将要建设的反应堆大厅的热中子三轴谱仪和

标准测试束, 以及建设到冷中子散射大厅的超小角中子散射谱仪、纵向型中子共振自旋回波谱仪(与中国工程物理研究院研究生院共建)、自旋回波小角中子散射谱仪(与中国工程物理研究院研究生院共建)、工程应力谱仪(与上海交通大学共建)、极化小角中子散射谱仪(与上海交通大学共建)等. 这些谱仪将会在未来2–5年内建成并投入使用, 作为CMRR中子科学平台的有力补充, 期望继续为我国中子散射技术进步、多学科应用以及国家重大研究需求做出更大贡献.

致谢 感谢所有为CMRR中子科学平台建设和运行做出过和正在做出贡献的同事: 黄朝强, 李建, 夏元华, 谢雷, 宋建明, 李新喜, 庞蓓蓓, 王燕, 王云, 孙良卫, 房雷鸣, 彭梅, 陈良, 陈喜平, 王虹, 张昌盛, 屠小青, 谢超美, 陈杰, 闫冠云, 邹林, 白亮飞, 胡丙锋, 杨锋, 闫海洋, 李鑫, 曹晓锋, 陈波, 刘耀光, 彭太平等; 感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所反应堆技术与应用研究室同事为中子束流提供的反应堆运行保障.

参考文献

- 1 Sun G, Zhang C, Chen B, et al. A new operating neutron scattering facility CMRR in China. *Neutron News*, 2016, 27: 21–26
- 2 Zhang J, Xia Y, Wang Y, et al. High resolution neutron diffractometer HRND at research reactor CMRR. *J Inst*, 2018, 13: T01009
- 3 Li J, Wang H, Sun G, et al. Neutron diffractometer RSND for residual stress analysis at CAEP. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2015, 783: 76–79
- 4 Xie L, Chen X, Fang L, et al. Fenghuang: High-intensity multi-section neutron powder diffractometer at CMRR. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2019, 915: 31–35
- 5 Peng M, Sun L, Chen L, et al. A new small-angle neutron scattering spectrometer at China Mianyang research reactor. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2016, 810: 63–67
- 6 Li X, Huang C, Wang Y, et al. Diting: A polarized time-of-flight neutron reflectometer at CMRR reactor in China. *Eur Phys J Plus*, 2016, 131: 407
- 7 Song J M, Luo W, Liu B Q, et al. Kunpeng: A cold neutron triple-axis spectrometer at CMRR in China. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect A*, 2020, 968: 163929
- 8 Li H, Wang S, Cao C, et al. Neutron imaging development at China Academy of Engineering Physics (CAEP). *Phys Procedia*, 2017, 88: 154–161
- 9 Zhang Z, Feng Y, Tan Q, et al. Residual stress distribution in Ni-based superalloy turbine discs during fabrication evaluated by neutron/X-ray diffraction measurement and thermomechanical simulation. *Mater Des*, 2019, 166: 107603
- 10 Wang Y, Dong X, Tang X, et al. Pressure-induced diels-alder reactions in C_6H_6 - C_6F_6 cocrystal towards graphane structure. *Angew Chem Int Ed*, 2019, 58: 1468–1473
- 11 Sun Y, Wang Y, Liang X, et al. Rotational cluster anion enabling superionic conductivity in sodium-rich antiperovskite Na_3OBH_4 . *J Am Chem Soc*, 2019, 141: 5640–5644
- 12 Zang J, Wang S, Wang F, et al. Li-triggered superior catalytic activity of V in Li_3VO_4 : Enabling fast and full hydrogenation of Mg at lower temperatures. *J Mater Chem A*, 2020, 8: 14935–14943
- 13 Chen L, Sun L, Wang Y, et al. Small-angle neutron scattering spectrometer Suanni equipped with ultra-thin biconcave focusing lenses. *J Appl Crystlogr*, 2016, 49: 1388–1393
- 14 Chen L, Sun L, Tian Q, et al. Upgrade of a small-angle neutron scattering spectrometer Suanni of China Mianyang Research Reactor. *J Inst*, 2018, 13: P08025
- 15 Tian Q, Yan G, Bai L, et al. Calibration of the Suanni small-angle neutron scattering instrument at the China Mianyang Research Reactor. *J Appl*

- [Crystlogr](#), 2018, 51: 1662–1670
- 16 Yang H, Liu D, Ju J, et al. Chain deformation on the formation of shish nuclei under extension flow: An *in situ* SANS and SAXS study. [Macromolecules](#), 2016, 49: 9080–9088
- 17 Chen W, Liu D, Li L. Multiscale characterization of semicrystalline polymeric materials by synchrotron radiation X-ray and neutron scattering. [Polym Crystl](#), 2019, 2: 10043
- 18 Wang T, Tian N, Chen J, et al. Revisiting flow-induced crystallization of polyethylene inversely: An *in situ* swelling SANS study. [Polymer](#), 2019, 184: 121934
- 19 Kang X W, Liu D, Zhang P, et al. Revisiting silica networks by small-angle neutron scattering and synchrotron radiation X-ray imaging techniques. [Chin J Polym Sci](#), 2020, 38: 1006–1014
- 20 Liu D, Li X, Song H, et al. Hierarchical structure of MWCNT reinforced semicrystalline HDPE composites: A contrast matching study by neutron and X-ray scattering. [Eur Polym J](#), 2018, 99: 18–26
- 21 Xu S S, Zhao Y, Tong X, et al. Independence of work hardening and precipitation strengthening in a nanocluster strengthened steel. [J Alloys Compd](#), 2017, 712: 573–578
- 22 Yan G, Fan Z, Huang S, et al. Phase retransformation and void evolution of previously heated HMX-based plastic-bonded explosive in wet air. [J Phys Chem C](#), 2017, 121: 20426–20432
- 23 Liu D, Song L, Song H, et al. Correlation between mechanical properties and microscopic structures of an optimized silica fraction in silicone rubber. [Compos Sci Tech](#), 2018, 165: 373–379
- 24 Huang L Z, Shui Y, Chen W, et al. How the aggregates determine bound rubber models in silicone rubber? A contrast matching neutron scattering study. [Chin J Polym Sci](#), 2021, 39: 365–376
- 25 Shui Y, Huang L, Wei C, et al. Intrinsic properties of the matrix and interface of filler reinforced silicone rubber: An *in situ* Rheo-SANS and constitutive model study. [Compos Commun](#), 2021, 23: 100547
- 26 Li M, Zhang M, Lai Y, et al. Solvated and deformed hairy metal-organic polyhedron. [J Phys Chem C](#), 2020, 124: 15656–15662
- 27 Mao M, Zhou R, Shen J, et al. Exchange bias adjust resonance frequency in FeNi/FeMn nanofilm based on polarized neutron reflectometer. [J Magn Magn Mater](#), 2020, 507: 166853
- 28 Zhang W, Wei Y, Xie T, et al. Unconventional antiferromagnetic quantum critical point in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.97}\text{Cr}_{0.03})_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$. [Phys Rev Lett](#), 2019, 122: 037001
- 29 Huang R K, Wang S S, Liu D X, et al. Supercooling behavior and dipole-glass-like relaxation in a three-dimensional water framework. [J Am Chem Soc](#), 2019, 141: 5645–5649
- 30 He W, Wang D, Wu H, et al. High thermoelectric performance in low-cost $\text{SnS}_{0.91}\text{Se}_{0.09}$ crystals. [Science](#), 2019, 365: 1418–1424
- 31 Tian N, Wang T, Tu X, et al. Cyclic tensile machine with wide speed range for *in situ* neutron/X-ray scattering study on elastomers. [Rev Sci Instrum](#), 2020, 91: 015113
- 32 Wang T, Sun L, Chen L, et al. Rheo-small-angle neutron scattering apparatuses at China Mianyang Research Reactor. [J Inst](#), 2018, 13: T10008
- 33 Yan S, Zhang M F, Guo W C, et al. Development of a polarized ^3He neutron spin filter based on spin exchange optical pumping at China Mianyang Research Reactor. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2019, 62: 102021
- 34 Wang T, Pang B, Li X, et al. *MyNeutronDAQ*: A general program for data acquisition of neutron scattering spectrometers at China Mianyang Research Reactor and on-line data-analysis. [Softw Pract Exper](#), 2021, 51: 438–448

The neutron scattering platform of China Mianyang Research Reactor (CMRR) and recent applications

SUN GuangAi, LIU Dong^{*}, GONG Jian^{*} & PENG ShuMing^{*}

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China

The 20-MW China Mianyang Research Reactor's (CMRR) neutron science platform has been in use since 2013. In the first phase, there are six scattering spectrometers and two neutron imaging devices. For neutron scattering experiments, the thermal and cold fluxes are measured to be 2.4×10^{14} and $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. The neutron instruments used in the first phase include a high-resolution neutron diffractometer, residual stress neutron diffractometer, thermal neutron radiography station, high-pressure neutron diffractometer, small-angle neutron scattering, time-of-flight and polarized neutron reflectometer, cold neutron triple-axis spectrometer, and cold/thermal neutron radiography station. In addition, eight second-phase spectrometers are currently under construction and will be operational in the next two to five years. CMRR currently operates for more than 200 days a year, with more than 60% of the beam time supplied to users. This paper focuses on the neutron science platform of CMRR and its typical applications in the fields of soft matter, magnetic membrane materials, aviation, basic physics, etc.

China Mianyang Research Reactor (CMRR), neutron scattering platform, neutron diffraction, neutron scattering

PACS: 28.20.-v, 28.20.Cz, 28.50.Dr, 29.25.Dz, 29.30.Hs

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0096](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0096)