引用格式：张昌盛，邓吉杰，孙光爱，等.中国绵阳研究堆中子科学平台与应用新进展[J].材料工程，2026，54(1)：46-61.
ZHANG Changsheng，DENG Jijie，SUN Guangai，et al.Latest progress in neutron science platform and application of China Mianyang Research Reactor[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(1)：46-61.

中国绵阳研究堆中子科学平台与应用新进展

张昌盛[1,2*]，邓吉杰[1,2]，孙光爱[1,2*]，陈 杰[1,2]，李 建[1,2]，刘 栋[1,2]，
白亮飞[1,2]，李 昊[1,2]，田 懿[1,2]，李 鑫[1,2]
（1 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所，四川 绵阳 621999；
2 中子科学与技术全国重点实验室，四川 绵阳 621999）

摘要：中子探针具有磁矩和深穿透能力，且对轻元素灵敏、能够鉴别同位素及近邻元素，已成为材料科学领域创新研究的重要手段。作为国家三大中子源之一，中国工程物理研究院的中国绵阳研究堆（China Mianyang Research Reactor，CMRR）于2013年率先建成首期8套科学装置并于当年投入使用，稳定运行至今已有十余年。本文重点介绍了CMRR中子平台近几年的装置技术和应用研究进展。目前平台拥有15套科学装置，相比于首期装置数量已几近翻番。基于新研建的装置，将材料静态结构最大可测尺度由原有的数百纳米拓宽至数十微米，突破实现了微观动力学能量分辨能力约3个量级的提升（由原来的亚毫电子伏特提升至百纳电子伏特）。基于平台跨尺度多参量的综合型大科学装置集群优势，CMRR已应用于金属合金、磁性材料、电池材料、含能材料、软物质等关键工程材料研究和工程部件制造等领域。在未来，依托中子科学与技术全国重点实验室，着力推动以中子科学为基础的重大原始创新和新材料、凝聚态物理等多学科前沿发展，为工程材料及部件研发面临的瓶颈科学技术问题提供新认识和创新解决方案。

关键词：中国绵阳研究堆；中子科学平台；跨尺度多参量表征；工程材料与部件
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000211 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000211
中图分类号：TL99 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)01-0046-16

Latest progress in neutron science platform and application of China Mianyang Research Reactor

ZHANG Changsheng[1,2*]，DENG Jijie[1,2]，SUN Guangai[1,2*]，CHEN Jie[1,2]，LI Jian[1,2]，LIU Dong[1,2]，
BAI Liangfei[1,2]，LI Hao[1,2]，TIAN Yi[1,2]，LI Xin[1,2]
（1 Institute of Nuclear Physics and Chemistry，Chinese Academy of Engineering Physics，Mianyang 621999，Sichuan，China；
2 National Key Laboratory for Neutron Science and Technology，Mianyang 621999，Sichuan，China）

Abstract：Neutrons have been the unique probe that possesses magnetism，depth detection，and element sensitivity，and have become an important technique of innovative research in the field of materials science. As one of the three major neutron sources in China，China Mianyang Research Reactor（CMRR）of China Academy of Engineering Physics took the lead in building eight scientific devices and putting them into use in the first phase in 2013，which has been running stably for more than ten years. This paper focuses on the progress in device technology and application research of the CMRR neutron platform in recent years. At present，the CMRR neutron platform has fifteen scientific devices，nearly double the number present in the first phase. Based on the newly developed devices，the maximum measurable scale of the static structure for materials is widened from hundreds of nanometers to tens of micrometers. Meanwhile，the energy resolution for micro-dynamic characterization is improved by about three orders of magnitude from the original sub-microelectron volt to the hundred-nanoelectron volt. Based on the advantages of an integrated large-scale scientific facility that possesses multi-scale and multi-parameter characterization abilities，the CMRR neutron platform has been applied to the research of key engineering materials such as metal alloys，

magnetic materials, battery materials, energetic materials, soft materials, as well as the field of engineering components manufacturing. In the future, relying on the National Key Laboratory of Neutron Science and Technology, effort will be made to promote the major original innovation based on neutron science and the frontier development of new materials, condensed matter physics and other disciplines, which is expected to provide new insights and innovative solutions for the bottleneck scientific and technological problems faced by the research and development of engineering materials and components.

Key words: China Mianyang Research Reactor; neutron platform; multi-scale and multi-parameters characterization; engineering material and component

大科学装置是为探索未知世界、发现自然规律、实现技术变革提供极限研究手段的重大科技基础装置，是国家科技创新体系的重要单元[1-2]。结合大科学装置发展的原位、实时、高通量制备与表征等技术[3]，是材料研发体系的重要技术物质基础。中子和同步辐射X射线大科学装置分别利用中子与原子核、X射线与核外电子的相互作用物理效应，获得物质结构信息互补，已成为材料科学领域创新研究的重要手段[4-7]。

相比于其他射线，中子探针的优势特点主要包括：(1)中子具有磁矩，作为磁性探针，可研究磁结构的有序性与磁矩之间的相互作用[6-9]；(2)中子是电中性粒子，具有远高于常规X射线与电子的无损穿透能力(譬如，对钢的穿透深度可达厘米级，对铝的穿透深度则可达数十厘米)[10-12]；(3)中子对核素和同位素具有高分辨能力，X射线散射长度与电子数成正比关系，中子散射长度则与原子序数无关，且对氢等低原子序数的原子也灵敏[13-14]；(4)中子波长与原子间距相当，可确定结构灵敏度与晶体结构等信息，热中子能量与固体中散射子的元激发能量相当，适合研究凝聚态物质中的点阵动力学过程[15-16]。

为发挥中子分析优势作用，美国依托橡树岭国家实验室、洛斯·阿拉莫斯国家实验室、国家标准与技术研究院等国家级机构建有中子科学中心，并作为其重大科研计划的基础平台。譬如，作为纳米科学研究必要工具，美国将中子分析技术纳入纳米科技行动倡议[5]。法国劳厄·朗之万研究所的中子平台与欧洲同步辐射光源毗邻而建，由10余个国家投资建设并运行[17]。自聚变能项目启动开始，欧洲专设基金项目打造欧洲区的聚变能关键材料研究环境[18-19]。近几年，欧盟联合了15家产学研机构(其中产业界不乏有全球航空发动机制造业的领军企业——罗尔斯·罗伊斯公司)，期望通过中子等大科学装置测定工程构件内部应力，结合工艺和服役管控，进而延长部件产品服役寿命和增加经济性[20]。

世界中子源名录Neutronsources网站显示[21]，目前国际上在役或在建的中子平台共有近50个，包括：北美洲9个(美国6个、加拿大3个)，欧洲25个，亚洲12个，非洲1个，大洋洲1个(澳大利亚核科学和技术组织)。我国三大中子源已建成并投用，分别是中国科学院高能物理研究所的中国散裂中子源、中国原子能研究院的中国先进研究堆、中国工程物理研究院的中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor，CMRR)。其中，CMRR中子平台于2013年率先建成首期8套谱仪装置并于当年投入使用，稳定运行至今已有十余年，为国内外多家科研机构提供束流并开展合作研究。本文将重点介绍CMRR中子平台近几年的装置技术和应用研究进展。

1　装置技术进展

CMRR中子科学平台整体布局见图1。反应堆大厅和散射大厅分别布局有5条热中子束线和3条冷中子束线，依次建有6套热中子谱仪和9套冷中子谱仪。目前建成投用的科学装置总数达15套，相比于首期8套，数量上已几近翻番。首期8套科学装置构成和技术参数已见诸公开报道[22-23]，部分装置详细设计和参数实测结果也已发表[24-32]。图2给出了基于CMRR的15套科学装置及功能分类，表1汇总了这些装置及配套的原位环境设备主要技术参数、用途以及应用领域。近几年的装置进展主要包括以下3个方面：

(1)率先于国内开展中子自旋回波技术研究和谱仪研制工作，自主设计建成国内唯一的纵向共振型中子自旋回波准弹谱仪和自旋回波中子小角散射谱仪。其中，自旋回波准弹谱仪研制结合了最新的纵向共振型自旋回波与传统型静磁场自旋回波2种技术，具有功耗低、布局紧凑(体积小)和兼容性好等特点，其关键技术指标自旋回波时间(微观动力学特征时间)最大达10 ns；在国际上将先进^{3}He中子极化分析与自旋回波中子小角散射技术创新结合，并自主研制了基于多层磁性薄膜的高饱和磁化强度、超薄中子自旋翻转器，其关键技术指标自旋回波长度达20 μm，超过国际同类型装置。

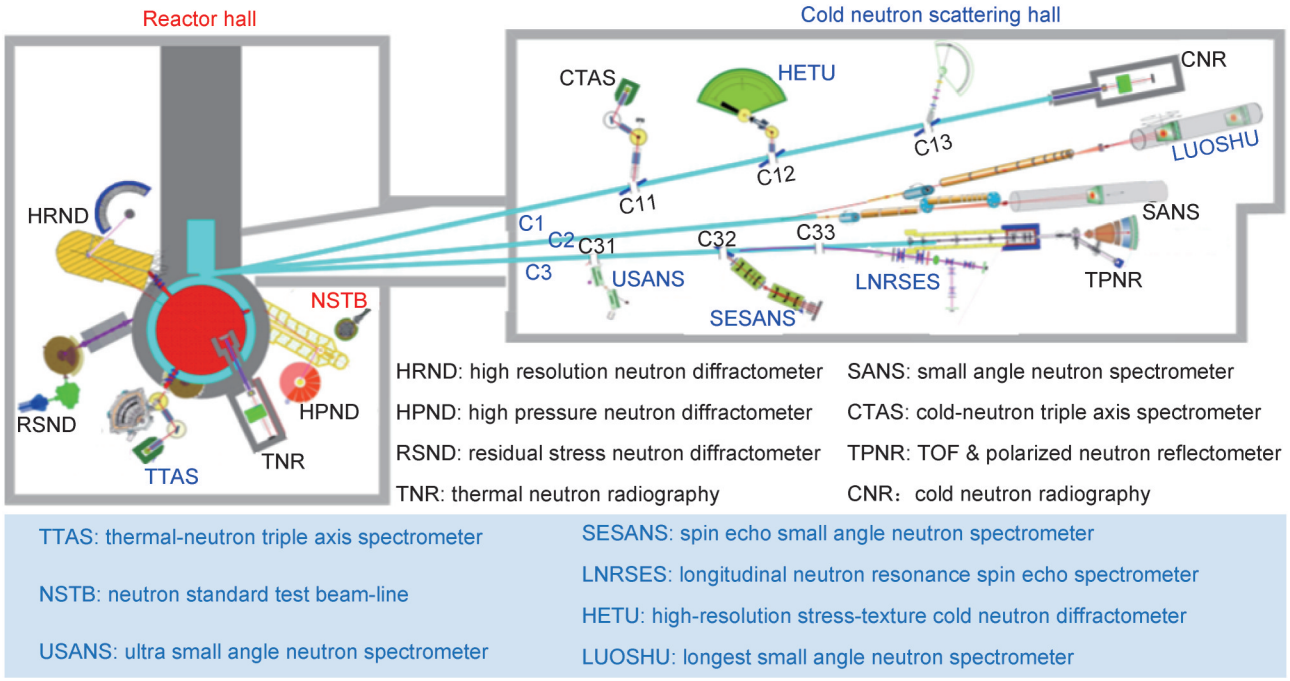


图 1 CMRR 中子科学平台整体布局

Fig.1 Overall layout of CMRR neutron science platform

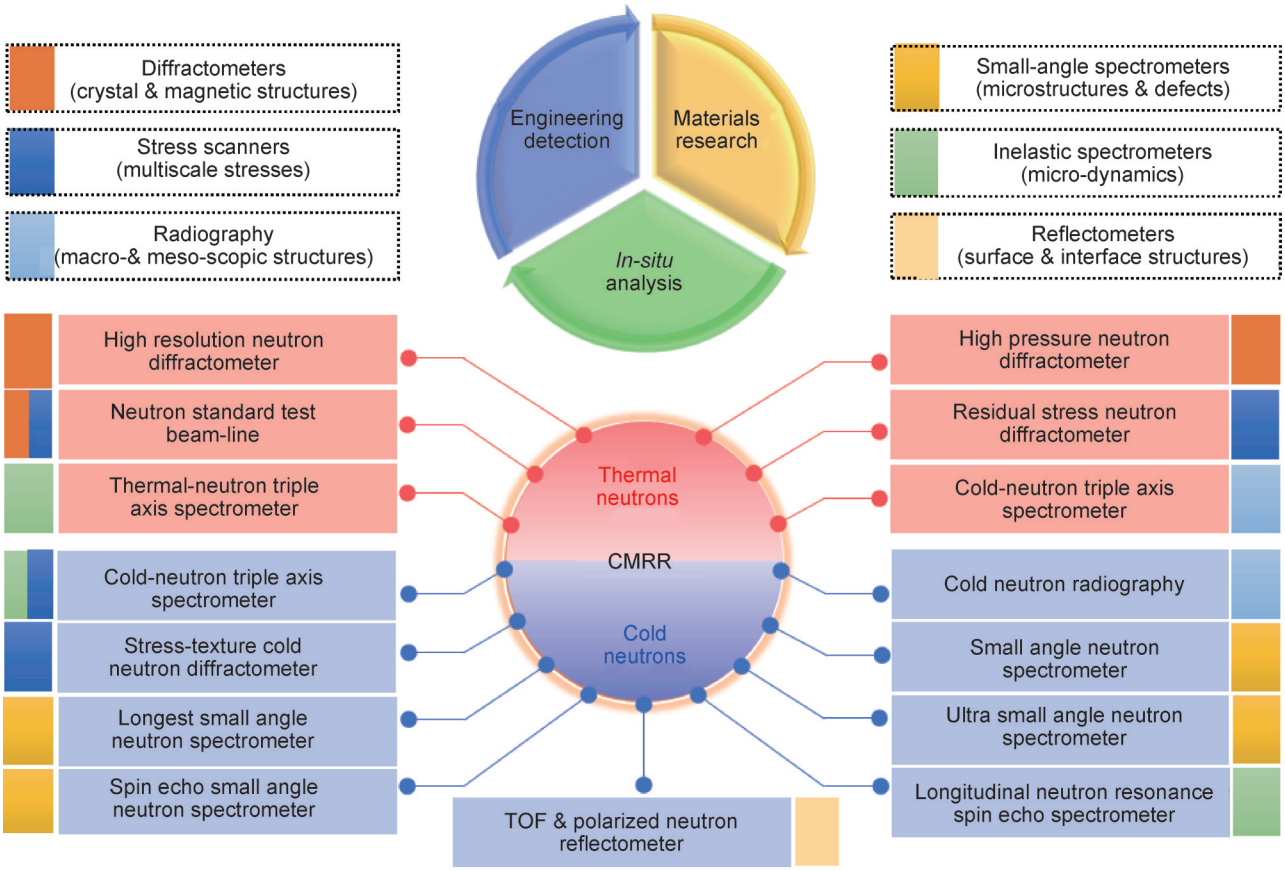


图 2 基于 CMRR 的 15 套科学装置及功能分类

Fig.2 Fifteen scientific devices based on CMRR and their functional classifications

(2)自主研制建成国内首台超小角中子散射谱仪,采用国际最先进的 Bonse-Hart 型三次反射光路技术,使其最大探测尺度达数十微米,与美国标准与技术研究院和澳大利亚核科学与技术组织等国际知名

表 1　CMRR 中子平台 15 套科学装置及配套原位环境设备的主要技术参数、用途以及应用领域

Table 1　Main technical parameters, function and application fields for fifteen scientific devices and *in-situ* environmental equipments of CMRR neutron platform

Neutron scientific device		Main technical parameter	Function	Application field
Stress scanner	RSND	Wavelength range: 0.12-0.28 nm; instrumental resolution: 1.8‰; gauge volume: (0.5×0.5×(0.5-10)×10×20) mm^3, flexibly adjustable; load capacity: 500 kg	Detection of residual stresses in engineering components; *in-situ* measurement and texture analysis	Manufacturing of high-end components in the fields such as aerospace and nuclear power; key engineering materials
	HETU	Wavelength range: 0.18-0.4 nm; instrumental resolution: 1.7‰; load capacity: 1000 kg		
Diffractometers	HPND	Available wavelength: 0.159 nm; diffraction angle range: 6°-148°; optimum resolution: 2.5‰, adjustable; high pressure: 30 GPa	Characterization of crystal and magnetic structures; *in-situ* measurement of phase structure transformation; determining the position of atoms such as hydrogen	Crystallography; new materials; condensed matter physics
	HRND	Dual mode: high resolution (1.6‰) and high intensity (2.4×10^6 $n\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}$); diffraction angle range: 4°-173°		
	NSTB	Wavelength range: 0.05-0.18 nm; load capacity: 500 kg	Performance test of spectrometer components; development of neutron analysis technology	Neutron physics; engineering components and materials
Small-angle spectrometers	SANS	Wavelength range: 0.35-1.5 nm; scattering vector range: 0.01-6.3 nm^{-1}	Characterization of nanophase and magnetic structures; analysis of polymer chain conformation; *in-situ* test of hydrogen and helium behavior	Physics of nano and composite materials; polymer chemistry; energy and life science
	USANS	Available wavelength: 0.241 nm, 0.474 nm; characterization scale range: 200 nm-20 μm		
	SESANS	Available wavelength: 0.4 nm; maximum spin echo length: 4 μm		
	LUOSHU	Full length of spectrometer: 46 m; characterization scale range: sub-nanometer to micrometer		
Inelastic spectrometers	CTAS	Energy range: 2.29-21 meV; energy resolution: 0.11 meV	Phonon dispersion curve and density of States; spin wave and quantum magnetic fluctuation; hydrogen diffusion and hydrodynamics	Condensed matter physics; new materials; biological protein
	TTAS	Energy range: 0-68 meV; energy resolution: 0.16 meV		
	LNRSES	Wavelength range: 0.4-1.2 nm; spin echo time: 10 ns		
Radiography	TNR	Maximum imaging resolution: 15 μm; maximum detection field of view: 400 mm×400 mm	Macroscopic geometry and connection structures; residues and defects	Manufacturing of high-end components; engineering materials in the fields such as nuclear, energy, and biology
	CNR	Maximum imaging resolution: better than 7 μm; maximum detection field of view: 200 mm×200 mm		

续表

Neutron scientific device	Main technical parameter	Function	Application field
TPNR	Wavelength range: 0.25-1.25 nm; minimum measurable reflectivity: 1×10^{-6}; polarization efficiency: > 90%	Film thickness and roughness; interface diffusion length; interface magnetic structure	Physics of magnetic materials; thin film materials; surface chemistry
Groups of *in-situ* environmental equipments	More than 20 sets of *in-situ* loading cells including temperature, force, magnetic field, atmosphere, and multi-field coupling, where the temperature range is 1.5-1873 K, the capacity of axial tensile and compressive force is 100 kN, the maximum torque is 50 N·m, the maximum magnetic field strength is 9 T, and the maximum air pressure is 20 MPa	In combination with various spectrometers	Multi-disciplines such as materials, physics, and chemistry

机构的同类装置指标相当。此谱仪采用国际首创双分析-探测器模式和“无限”厚切槽单晶分析器，使其测样效率较传统单分析器模式得以明显提升。在冷中子三轴谱仪技术基础上，自主设计研制了热中子三轴谱仪，极大拓宽了能量分析范围，覆盖了0～68 meV，并提升了样品处束流强度，达1.5×10^{7} n·cm^{-2}·s^{-1}；此外，采用双聚焦能量分析器大幅提升了采集信号强度，非常适合弱信号探测。

(3)与上海交通大学合作共建工程应力谱仪“河图”和小角散射谱仪“洛书”。“河图”高分辨率冷中子织构应力一体化衍射仪，是我国首台冷中子工程应力综合测试装置。利用冷中子信噪比高的优势，创新设计了具有高分辨高效率双模式的可切换双聚焦单色器，实现了高应变分辨率和高中子注量率等多项指标突破。“洛书”超长中子小角散射谱仪全长46 m，采用全球首创三探测器系统、双模式速度选择器和基于Wolter镜聚焦组合模块等创新设计，突破了宽广矢量测量范围和最大的瞬时散射矢量的跨度。

基于上述装置进展，材料表征技术能力突破主要体现在以下2个方面(见图3)：(1)静态结构测试方面，超小角和自旋回波等小角散射装置的联合，将最大可测尺度从原有的数百纳米拓宽至数十微米，进而突破了高分子链、网络、纳米沉淀相、孔洞缺陷等跨尺度信息无损获取；(2)动力学表征方面，热中子三轴谱仪拓宽了能量分析范围，约为原有能量范围的3倍，纵向共振型中子自旋回波准弹谱仪则显著提升了能量分辨率，与原有的能量分辨能力相比提升了约3个量级，进而突破了原子振动、磁涨落、氢扩散、水动力学等跨时域的微观动力学过程精细分析技术瓶颈。

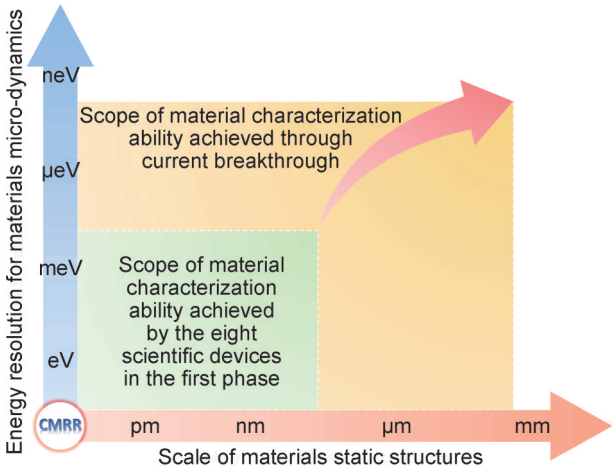


图3 静态结构和微观动力学两方面的材料表征能力突破

Fig.3 Breakthrough of material characterization ability in static structure and micro-dynamics

2 应用研究进展

2.1 工程部件检测

空天、核电、高铁等高端工程部件制造领域，对复杂构件形性精密控制和服役可靠性提出了极高要求。残余应力是关乎工程部件产品质量和使役寿命的关键因素，其精准检测与调控具有重要实际意义。中子对大多数工程材料具有高穿透能力(例如，对钢和铝材的测量深度可分别达80 mm[33-35]和200 mm[36-37])，是目前唯一能够无损获取部件厘米级深部三维应力分布的探针。作者团队及依托单位组织编写并发布应力和成像检测等关键技术国家与企业标准近10项，

以期推动中子平台在国家重大工程领域中的创新应用。已与国内数十家高校院所科研单位合作测试数万机时，解决了飞机蒙皮、发动机涡轮盘/叶片、惯性导航部件、钢轨、核电主设备安全端焊接头等多种复杂构件内部应力和精细结构无损检测（如型芯[38-39]、孔隙[40]）等部分难题，为制造工艺设计、产品质量控制和服役性能评估提供数据支持和参考依据。

镍基高温合金涡轮盘制造工艺环节将产生残余应力，并在服役过程中与外部加载或腐蚀介质交互作用。因此，掌握制造工艺过程中残余应力及其分布规律，对镍基高温合金涡轮盘等关键工程部件的可靠设计乃至服役寿命评估具有重要意义。基于中子衍射应力分析技术，王沿东团队[41]测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残余应力分布。实验结果表明，等温锻造态涡轮盘的切向和径向压应力均明显大于轴向应力（即在切向-径向平面内存在较大的双轴应力），从表面到深部的应力梯度高达约 220 MPa·mm^{-1}，锻造过程中涡轮盘不同区域塑性应变率存在明显差异，产生高应力梯度；固溶处理后，切向应力大于径向和轴向应力，塑性变形引起的应力得到明显释放，且应力梯度降低至 30 MPa·mm^{-1}，这是因为，γ基体中含有过饱和的间隙固溶原子，这种化学拉应力抵消了轴向和径向方向上的部分热压应力；时效处理后，长时间扩散后γ基体过饱和度降低，上述化学拉应力效应消失，导致涡轮盘边缘径向压应力增加。通过在热力学模型中引入温度相关的相变潜热，基于有限元方法模拟了固溶处理后的整体残余应力分布，数值模拟与中子测量实验结果吻合较好，误差小于 40 MPa[41]。

除了上述多晶镍基高温合金部件材料，作者团队针对单晶合金涡轮叶片残余应力定量分析难题，探索发展了单晶合金材料及叶片三维残余应力的中子表征技术。基于中子测量实验数据和建立的单晶应力分析方法，定量给出了镍基高温合金单晶内应力应变张量数据[42]。实验结果显示，γ′相等效应力随蠕变时间逐渐减小，而γ相等效应力先增加随后有所减小，这一变化趋势与两相之间作用机制有关。此外，针对某航空发动机斜支板涡轮后机匣试车后出现的裂纹故障，耿长建等[43]基于中子检测技术对后机匣进行了内部残余应力测试分析。结果表明，涡轮后机匣基体存在粗大晶粒组织，裂纹故障与粗晶/细晶组织之间残余应力分布差异有一定关系；后机匣斜支板存在 400～500 MPa 的拉应力，一定程度上加速了后机匣支板裂纹的萌生与扩展。

航空飞机节能与轻量化推动先进铝锂合金需求增长。2060 合金等第三代铝锂合金在刚度、断裂韧性、抗疲劳裂纹扩展等性能方面具有优势，2060-T8 合金的发明旨在取代传统铝合金 2024 用于机身蒙皮制造。对称三辊弯曲是最常用于制造机身蒙皮的工艺，随着这种高强度合金的应用，卸载后严重的形状变化对传统的机身蒙皮零件成形工艺提出了挑战，残余应力成为影响最终成型的关键因素[44]。因此，准确预测最终构型和残余应力对于提高商用飞机蒙皮部件几何外形精度至关重要。为此，李卫东团队[44]基于中子分析技术测定了客机铝锂合金蒙皮试件残余应力分布。研究表明，板厚度中心位置残余应力较小，两侧则分别呈约 120 MPa 的拉应力和压应力，与三辊弯曲工艺环节合金板受力规律相符；中子测量实验数据用于校验部件形变模型，理论模型和实验研究相结合揭示了形变预测精度降低的关键原因，进而可帮助突破飞机蒙皮加工制造精度控制难题。

纤锌矿 ZnO 被认为是有前途的第三代广泛用于光电子应用的半导体。然而，高质量 ZnO 基大块晶体的生长仍然是一项重大挑战，内应力和应力相关缺陷被认为是显著阻碍高质量 ZnO 基晶体生长的主要因素[45]。针对基于碳辅助化学气相输运技术制备的 ZnO 基块状晶体，Fan 等[45]利用中子衍射应力分析技术直接测量获取了晶体不同深度的应力分布。研究发现，晶体的＋c 和－c 面分别受到拉伸和压缩应力，在±c 面中心区域附近的最大应力值约为 280 MPa 和－291 MPa，而晶体周边基本上没有内应力，如图 4 所示。采用有限元方法模拟了生长系统的应力场、温度场和流场，结果与中子应力分析结果一致。生长系统中独特的温度场导致晶体向生长方向弯曲成轻微凸起，并产生结构缺陷形成的驱动力。不同晶体区域的霍尔性质和光学透射率等晶体性质的分布趋势与晶体中内应力和应力相关缺陷的分布趋势一致，例如：＋c 面中心附近区域在 800 nm 波长下的透射率为 79.2%、载流子迁移率为 159 cm^2·V^{-1}·s^{-1}，而晶体外围在相同波长下的透射率为 80.5%、载流子迁移率为 184 cm^2·V^{-1}·s^{-1}。

异型钢桥甲板具有优越的承载能力和快速安装等优点，广泛用于钢桥结构。桥甲板和纵向 U 形肋等部件通过焊接而成，焊接残余应力对其疲劳性能和可靠性至关重要，特别是有害的拉伸残余应力会加速焊趾或焊根处的裂纹产生和扩展，显著影响钢桥甲板的安全性和耐久性[46]。然而，由于缺乏有效方法，异型钢桥甲板部件焊接应力的精确测量和控制仍具挑战。针对上述钢桥结构中厚板焊接应力检测的工程需求，耿韶宁团队[46]开展了钢结构 U 肋接头激光-电弧复合

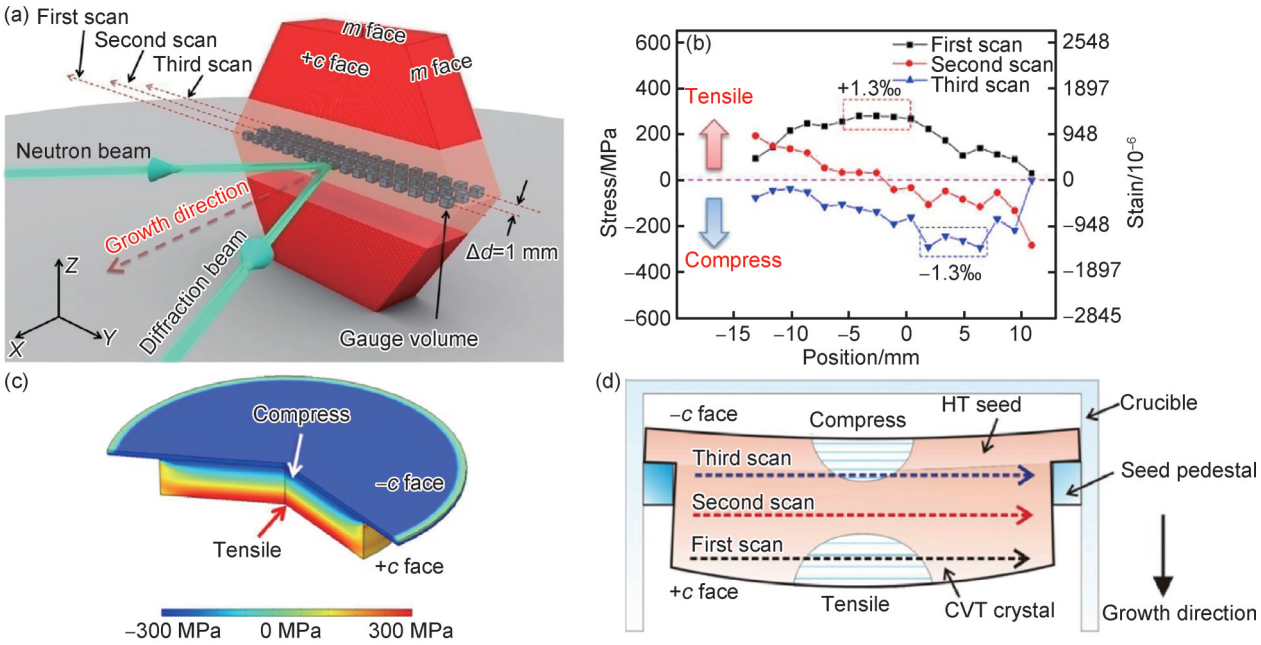


图 4 ZnO 基大块晶体应力分布实验测量与模拟分析结果[45]

(a)中子衍射应力测量布局;(b)应力分布实验结果;(c)有限元模拟计算结果;(d)坩埚中生长晶体应力状态示意图

Fig.4 Experimental and simulated stress distribution in ZnO-based bulk crystals[45]

(a)layout of neutron diffraction stress measurement;(b)experimental stress distribution;(c)results from finite element simulation;(d)schematic illustration of stress state of growing crystal in crucible

焊接残余应力的中子衍射实验研究。测量确定了焊接接头的三维残余应力分布,用于验证考虑了固态相变的热-冶金-力学有限元模型,基于此模型的残余应力模拟结果和中子测量结果相符,沿着潜在的裂纹扩展路径其应力分布呈合理的S形;研究揭示了焊接过程中固态相变对残余应力分布的关键影响,表明固态相变显著影响了激光-电弧复合焊接U形肋-甲板接头的残余应力,过冷奥氏体的低屈服强度特性和贝氏体转变应变的体积膨胀对于残余应力的降低至关重要。上述研究为评估激光-电弧复合焊接U形肋结构的疲劳性能提供了技术支持。

2.2 金属材料性能机制原位测试

中子与材料相互作用反映原子点阵、晶体与磁结构、析出相等亚纳米至微米跨尺度范围的信息。得益于中子的无损深穿透能力,又容易实现力、温度、磁、电、气氛等环境条件的加载。因此,特别适合原位定量研究材料力学(如弹塑性变形)、物理(如磁弹效应)和化学(如腐蚀)等性能机理。

作为航空发动机的关键材料,镍基高温合金单晶突出的蠕变和疲劳强度性能,直接来源于其独特的γ/γ′微观结构,立方$L1_2$ γ′沉淀相规则地嵌入在面心立方γ基体相中。然而,γ和γ′两相之间的相互作用机制仍未被实验清晰揭示。基于开发的原位力-热耦合与多自由度复合原位加载中子测试技术,作者团队[47]研究了DD10镍基高温合金单晶在500 ℃、760 MPa条件下的弹性拉伸引起的晶格畸变。结果表明,当样品被加热到500 ℃时,点阵应力逐渐松弛,当施加760 MPa拉应力时,γ和γ′相呈各向异性响应。由于较大的外应力,沿[001]方向的错配度呈较大负值,而垂直于[001]方向的错配度则为正值;γ相的四方畸变最大,γ′相的四方畸变则最小,γ和γ′相边界的畸变导致γ′相边界变宽。上述原位研究揭示的弹性诱导晶格畸变,深化了对γ和γ′两相相互作用效应的理解,为筏化结构起源提供了直接实验证据。

针对此类双相结构高温合金,作者团队开发构建了一种两位弹塑性自洽模型,针对空间和取向上强相关的不同相之间相邻晶粒,实现了其晶体织构发展和晶粒形态演变的定量描述[48-49]。结果表明[48],该理论模型在晶格应变演化方面具有良好的预测能力,并显示了晶格的旋转和夹杂物之间的相关性;$(200)_{\gamma}$、$(100)_{\gamma'}$横向晶格应变对γ-γ′相互作用和变形过程晶粒取向分布敏感,而$(220)_{\gamma}$和$(110)_{\gamma'}$横向晶格应变则对初始晶体织构敏感。将原位中子衍射和弹黏塑性自洽理论相结合,进一步研究了镍基高温合金不同类型γ′析出相的变形序列及其对界面应力分配的影响机理。结果表明[50],与具有单峰尺寸分布γ′相的高温合金相比,GH4738(含二次和三次γ′析出物)和GH4720Li(含初生和三次γ′析出物)双峰分布组织高

温合金表现出不同的变形行为；在微塑性阶段观察到过早的载荷分配，这归因于二次γ′沉淀相的奥罗万绕过机制或初生γ′沉淀相的直界面位错发射；在宏观塑性阶段，大量位错剪切3种类型的γ′析出物，尤其是三次γ′析出物，导致界面应力增长率降低。此外，对多晶镍基高温合金GH4169进行拉伸-扭转复合加载原位中子分析，对比研究了单轴和复合加载下力学性能变化规律及其微观变形机制差异，探索了近服役条件下高温合金的内在变形机理。研究表明[51]，拉伸和扭转变形后样品中的位错密度明显增大；同时复合加载下位错密度相较于单轴加载略小，表明存在位错湮灭效应；预加载产生的位错强化效应提高了屈服强度，而随后复合加载下位错湮灭效应使预拉伸扭转样品的极限强度有所降低。

Ni-Ti等形状记忆合金兼具优异的力学性能和生物相容性，广泛应用于汽车、航空航天等领域。然而，针对高频动态应用场景，宽应变率范围内合金变形机制尚未被透彻理解。为此，本团队[52]将准静态原位和动态离线中子衍射技术相结合，定量研究了不同应变率下Ni-Ti合金的体织构、孪晶体积分数和开动模式的演变。研究表明，归因于滑移活动的变化，Ni-Ti合金力学响应具有很强的应变率敏感性。基于原位中子衍射捕获到压缩过程孪晶模式变化明显，很好地描述了剪切诱导的孪晶重取向过程。在实验研究基础上，建立了一个包括弹性、孪晶重取向和塑性效应的本构模型，并在较宽的应变率范围内进行了验证，对马氏体Ni-Ti合金应变率相关的力学机制提供了新认识。基于上述方法进一步研究了奥氏体Ni-Ti合金在宽应变率范围内的力学行为机制，发现冲击载荷明显阻止了应力诱发马氏体相变，高应变率下奥氏体母相经历更显著的滑移变形[53]。针对形状记忆合金特殊的双屈服行为及其时效效应机制，基于原位中子衍射技术同时研究了其宏观和微观应力应变行为以及微观结构演化。结果表明[54]，时效前后合金的相结构并未改变，时效后双屈服行为的消失和屈服强度的提高源于时效诱导孪晶重取向的阻力增大。针对形状记忆合金孪晶重取向这一关键物理过程，采用原位中子衍射实验方法并构建弹黏塑性自洽模型，深入研究了马氏体Ni-Ti形状记忆合金在加载-卸载过程中的微观变形机制，完整获得了重取向孪晶、滑移和形变孪晶微观机制随外部载荷的演化过程，并实现了形状记忆合金双屈服力学行为的准确预测[55]。

面向轻量化和高能效需求，有必要开发兼具GPa级强度和大延展性的高性能结构材料。由软相和硬相组成的双相钢有望实现强度、延展性和高加工硬化率的综合性能，基于双相微观结构科学设计精细调控双相钢强度与延展性之间的平衡成为研究热点。张中武团队[56]针对新开发设计的塑性约30%、强度超过1.4 GPa的双相钢，通过原位中子衍射结合电子透镜、三维原子探针等实验方法，分析了时效析出的马氏体强化相对屈服强度、相变诱导塑性、双相应力配分的影响，明确了新型双相钢的强化机制；定量揭示出马氏体时效相抑制了软奥氏体的变形，形成了一个强有力的骨架，屈服强度由硬马氏体时效相的变形控制；软质相与硬质相协同变形和动态应力/应变分化有效抑制了相界面处的应变局域化，延缓裂纹的萌生。针对屈服强度为1730 MPa、断裂伸长率为13%的低碳超高强度钢，基于中子小角散射和原子探针等方法，该团队研究了在不同温度热轧和不同等温时效条件下的纳米析出相及其对强化机制的影响；定量给出了超高强度低碳钢在不同老化过程中纳米析出相的大小和数量密度等信息[57]，由此定量分析了沉淀强化机制，包括剪切机制和奥罗万机制。申勇峰团队[58]针对超细晶铁素体钢力学性能机制的原位中子衍射实验研究表明，超细晶钢的晶格参数小于马氏体钢的晶格参数，表明晶格中碳浓度较低；超细晶钢在初始张力下表现出接近各向同性的晶格应变响应，其中(110)、(002)和(112)晶面的晶格应变相同；当应力超过450 MPa时，(110)晶面的晶格应变增幅小于(002)和(112)晶面，表明纳米级碳化物促进颗粒周围几何必需位错的积累而有助于硬化能力，(110)晶格与其他两个晶面相比变得更硬。此外，针对空间技术、环境和超导工程等领域对低温应用日益增长的需求，结合中子大科学装置平台开发了6～300 K低温下原位力学加载技术，张兴义团队[59]研究了316LN不锈钢和超导带材在低温环境中的内部应力应变演变规律，以便深化认识关键工程材料的低温力学性能机制，进而帮助高性能材料设计和服役性能评价。

在储氢合金和金属氢化腐蚀的微观机制中，氢化物在金属合金表面上的初始成核是关键过程。理解金属的初始氢反应机制对于预测材料腐蚀性能演化至关重要。然而，在常温常压等自然环境条件下大多数金属和合金会不可避免地形成表面氧化层，导致复杂的初始氢化过程。原位实验监测表面吸附、渗透和氢浓度变化极具挑战，且早期氢化物发生过程仍不清楚。为此，本团队[60]基于小角中子散射装置构建了氢化反应原位表征技术。基于特别的反应腔体设计，增强了表面结构的散射信号；此外，通过调节氢的表面吸附以形成恒定流动，从而实现初始氢化过程的探

测。基于此技术,以非破坏性方式原位测量了初始氢化物,定量获得初始氢化物形核的临界氢浓度;进一步研究了金属氧化层厚度对初始氢化过程的影响,从而促进了对初始氢反应机理的认识。研究发现[61],在薄氧化层样品中,氢吸收后立即形成氢化物,随后其生长取决于消耗的氢含量;然而,在厚氧化层样品中,氘化物形核延迟,随后氘化物的生长减缓,而没有抑制氢的表面吸收。对于活性金属铈,氢含量为0.2 μmol·cm^{-2}时,上述原位表征技术对表面氢化相有很高的灵敏度,在探测氢化反应早期阶段的机理方面有很大的潜力。

2.3 新型功能材料结构表征

中子兼具元素灵敏、磁性探针和能量分辨可调等特点,在原子定位、磁结构测定和原子集体运动表征等方面具有独特优势,是认识新物质、新材料的有力手段。钙钛矿结构氧化物具有优异的物理化学性能,在能量转化和储存等方面应用广泛。基于中子表征技术,刘颖团队[62]研究了电化学性能优异的锂电池负极材料$SrVO_3$在锂化和去锂化可逆过程中的结构变化,获得了对钙钛矿结构起稳定作用的Li^+占位率(3*c*位)信息,解释了$SrVO_3$优异的电化学循环稳定性。针对高倍率锂电材料钛酸锂的锂离子传输机制,本团队[63]基于中子衍射最大熵方法,从实验上获得钛酸锂原子尺度的完整锂离子传输路径及对应能量演化信息,并通过不同充锂态激活能的变化揭示了锂离子库仑效应对锂离子传输的重要影响。固体电解质是提高电化学储能电池安全性、能量密度和可逆性的重要材料。然而,调节导电离子的配位结构仍是挑战,限制了离子电导率的提高和实用固体电解质的进一步发展。针对超离子导体高性能固体电解质$Li_3Zr_2Si_2PO_{12}$,汤卫平团队[64]基于中子衍射测定了其晶体结构并研究了Li^+替换Na^+以后传导离子的结构演化路径,表明在保持原有骨架不变情况下通过替换合成新材料可有效提高固态电解质离子传导率。针对ZrO_2掺杂Li_6PS_5Cl合成的新型超离子导体固态电解质$Li_{6.05}P_{0.95}Zr_{0.05}S_{4.9}O_{0.1}Cl$,徐志伟团队[65]通过中子衍射实验确认了Zr和O原子在晶格中的具体占位,为其空气稳定性和金属锂适配性等性能机制理解提供了结构信息。石榴石基超离子导体在下一代锂离子电池中具有广阔的应用前景。然而,在实际应用中仍面临化学稳定性的挑战。冯守华团队[66]通过中子衍射等手段确定了富锂石榴石结构中Li和F的分布,并阐明了间隙空间中Li-O/F相互作用如何限制Li^+/H^+交换行为等问题,进而揭示了石榴石基电解质化学稳定性的影响机制。稀土三氢化物以快速H迁移而闻名,然而高的电子导电性阻碍了其应用。陈萍团队[67]通过在晶格中制造纳米尺寸的晶粒和缺陷,LaH_x的电子导电性可被抑制超过5个数量级,具有创纪录的高H离子电导率(1.0×10^{-2} S·cm^{-1})和低扩散势垒(0.12 eV),并基于中子衍射确认了此材料中H原子的位置信息和H离子的传输路径。在超分子晶态化合物中,了解氢键单元的运动自由度和运动方式对调控其结构相变以及相关宏观物理响应行为至关重要。中山大学张伟雄团队[68]通过中子衍射获得不同降温速率下超分子化合物中氢原子排列信息,为制备新颖的响应型材料提供了科学基础。

借助中子磁探针和原位测试优势,结合纳米结构调控手段,作者团队定量揭示出Fe-Ga超磁致伸缩合金的纳米结构随磁场变化的响应规律。研究发现[69],关联长度大于纳米相尺寸,确保了纳米-基体交换耦合作用;经典畴变过程需要较大驱动磁场,而在纳米与畴的协同作用下,可获得由低场驱动的大应变。基于简单处理实现关联长度的调节,进而实现应变提升,由此揭示了智能应变新物理机制并提供了一种调控策略[70]。通常情况下,一阶相变引起的磁致伸缩具有磁滞现象,会导致合金材料脆化,而高熵合金$Fe_{35}Co_{35}Al_{10}Cr_{10}Ni_{10}$是具有超高强度和韧性的无磁滞大体积磁致伸缩新型合金。马天宇团队[71]通过原位中子衍射表征了$Fe_{35}Co_{35}Al_{10}Cr_{10}Ni_{10}$在室温与低温下的磁结构转变,推测磁转变引起的低自旋态到高自旋态的可逆转换是大体积磁致伸缩特性的根本原因。Kagome磁体因拥有奇异的电子或磁态而成为凝聚态物理领域的热点。Kagome磁体$TmMn_6Sn_6$在跨越几个磁相的宽温度范围内观察到了显著的拓扑霍尔效应,并表现出强烈的温度和磁场依赖性。王猛团队[72]通过中子衍射测量精确表征了磁体在温度-磁场二元相图里的磁结构,揭示了其复杂的磁性转变行为。$Ba_9V_3Te_{15}$是一种准一维铁磁半导体材料,其结构主要由一维的VTe_6链构成。此材料在3.6 K时会发生铁磁相变,而在高于转变温度时会呈现出一种罕见的负磁阻特性,对于超导研究具有重要意义。望贤成团队[73]通过原位中子衍射表征了$Ba_9V_3Te_{15}$在低温下的磁结构变化,揭示出负磁阻效应的内在机制是链内自旋耦合导致的短程自旋有序。零热膨胀具有强关联本质和巨大的应用前景,是凝聚态物理领域最为诱人的现象之一。然而,零热膨胀的起源仍不清楚,其可控设计成为一项巨大挑战,其中磁相互作用是关键。王聪团队[74]基于中子衍射研究了$Mn_3Sn_{0.5}Zn_{0.5}C_x$体系零热膨胀特性产生的微观机制,发现通过C元素掺杂调控非共面的反铁磁与铁磁相互作用可实现零热膨胀特

性，实验结果与理论预测的自旋模式具有高度一致性。该研究揭示了一种零热膨胀特性产生的物理机制，为零热膨胀材料设计提供了一种可靠策略，对强关联体系研究有重要意义。

热电技术用于实现热和电之间的转换，然而，许多热电材料包含稀有或有毒元素。因此，开发低成本、高性能和环境友好的热电材料势在必行。基于空穴掺杂硫化锡晶体，赵立东团队[75]通过引入硒来促进有效质量和载流子迁移率之间的协同优化，将功率因数从约 30 $\mu W\cdot cm^{-1}\cdot K^{-2}$ 提高到约 53 $\mu W\cdot cm^{-1}\cdot K^{-2}$，降低了热导率，并实现了在 873 K 下约 1.6 的最大品质因数。热电性能提升需降低热导率，而常温及高温区热导率主要由晶格振动贡献。中子的能量和动量与晶格振动准粒子（声子）接近，能够探测全布里渊区的声子性质，是理解热电材料优异性能内在机理的重要探针。基于中子非弹性散射实验，在热电材料硒掺杂的硫化锡晶体中，观测到 Γ-X 和 Γ-Y2 个方向的横波声学声子和光学声子色散，发现了横波光学支的软化，揭示出声学声子和光学声子之间的耦合是热电材料导热系数较低的原因[75]。

2.4　含能材料多尺度结构与性能分析

含能材料内部含有分子、晶体、微孔洞、界面、微裂纹、残余应力等，这些跨越纳米至毫米的复杂微结构显著影响性能。如何高精度表征多尺度结构并量化结构-性能关系，是含能材料设计与制备面临的挑战[76]。基于中子深穿透、氢灵敏和微介观结构表征等综合优势，可实现含能材料多尺度结构的精细表征和原位环境演化追踪，进而与材料性能进行关联分析。

纳米含能材料具有异于传统大颗粒含能材料的优异特性，如机械感度低、强度高等，是含能材料领域未来发展的重要方向。基于氘代溶剂的炸药晶体内外孔洞分类定量中子小角散射表征方法，作者团队[77]精细对比分析了纳米和微米粒径三氨基三硝基苯（1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene，TATB）粉末孔洞结构特征，发现微米 TATB 内部孔洞具有表面分形结构，纳米 TATB 内部缺陷具有两级尺寸的体积分形结构，纳米 TATB 内部纳米尺寸范围孔洞含量显著多于微米 TATB。在上述工作基础上，宫正等[78]进一步研究了纳米 TATB 粉末在不同温度老化过程的微结构演化规律，定量获得比表面积数值，发现老化温度越高比表面积下降趋势越显著，为揭示纳米 TATB 长大熟化机制提供了实验证据。激光点火被认为是引爆含能材料最有前途的方法之一，但是通过低功率和近红外波段的激光直接点火仍是挑战。针对不同微纳结构的 4,4′,5,5′-四硝基 1H,1′-H-[2,2′-联咪唑]-1,1′-二胺（DATNBI）晶体新型含能材料，叶平等[79]结合中子表征的研究表明，在溶剂和表面活性剂的诱导下，DATNBI 晶体具有不同程度的粗糙度和缺陷；与未经处理的 DATNBI 相比，具有粗糙表面和大量缺陷的 DATNBI 晶体可被近红外激光直接点燃，并表现出自持燃烧。研究结果为利用热点点火理论直接激光点火 DATNBI 提供了可靠支持。

微结构热稳定性是聚合物黏结炸药（polymer-bonded explosives，PBX）的一个关键特征，热膨胀取决于每种组分的热物理性质以及它们的界面相互作用。基于体积补偿效应，林聪妹等[80-81]引入具有负热膨胀特性的钨酸锆来调节含能复合材料的热膨胀。基于原位中子小角散射实验研究了上述复合材料在 25～120 ℃温度循环区间的微结构稳定性[80]，定量揭示出两种竞争效应，即：(1)由于 TATB 晶体的各向异性热膨胀，与散射相关的空隙体积分数增加。(2)含氟聚合物黏合剂的软化填充了空隙。这种负热膨胀体系在含能材料中的成功应用可为构建具有定制热膨胀的新型含能复合材料提供一种新策略[80-81]。弱界面相互作用总是限制和削弱复合材料的性能，并构成主要的瓶颈。基于生物工程思想，利用超支化聚合物独特的结构特征，将超支化聚合物原位接枝到聚多巴胺表面，设计了一系列多级核壳结构的 TATB 粒子，制备了 TATB 基 PBX 复合材料并进行了中子表征分析。何冠松等[82]研究表明，PBX 复合材料实现了高效的力学增强，通过引入线性软链来调控超支化聚氨酯的外壳，具有多级核壳结构的复合材料在聚合物壳质量分数仅为 1.5% 时表现出最高的拉伸和压缩强度；基于中子表征发现多巴胺包覆后界面表面分形维数增加，即表明界面粗糙度增加，进而提出了力学性能增强机理，为高性能聚合物复合材料的设计和制备提供了有潜力的方案。

针对环四亚甲基四硝胺（octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine，HMX）基 PBX 相回复机制，作者团队[83]利用小角中子散射技术的纳米孔隙探测和原位跟踪优势，发现 HMX 基 PBX 在潮湿空气中的相回复显著快于干燥空气，相回复诱导导致大量纳米孔隙产生。由此阐明湿度对 HMX 高温相回复的促进作用机理，为 HMX 基 PBX 的热损伤研究提供了重要支撑。HMX 基 PBX 材料的相态和不可逆损伤是其应用面临的重要问题。已有报道表明，潮湿大气加速了 δ 到 β 相的转变。然而，水的作用并没有被很好地理解。为此，基于中子衍射研究了 δ 到 β 相转变过程，发现了 δ 到 β 相转变过程中存在 γ-HMX-d8 的证据[84]。此外，基于原位高压中子衍射研究了 HMX 基 PBX 孪

晶面、解理面和滑移系等特殊结构中晶间应变的演化[84]，发现施加压力下某些晶面应变异常释放，以前报道未见此现象，这种异常现象被认为是HMX微裂纹形成的原因。

PBX各组分性能差异和成型工艺复杂性导致其内部不可避免地存在着界面、微孔洞等初始微结构（或称为初始损伤），直接影响PBX物理性能。采用衬度变换中子小角散射表征了冷压成型PBX微结构，获得了炸药晶体-黏结剂-孔洞三者之间界面面积随成型压力的演化信息，本团队[85]定量揭示了冷压成型过程造型粉和黏结剂被逐渐压实、黏结剂流动以及HMX晶体大量穿晶破碎等物理过程。TATB基PBX表现出显著的各向异性和不可逆膨胀特性，可能导致其性能可靠性问题，其各向异性力学和不可逆膨胀特性与晶体取向密切相关。基于中子衍射原位研究了热压过程TATB晶体应力、织构状态及压制后回弹效应等热力学演化机制。徐尧等[86]研究表明，TATB晶体在压缩过程中会发生重取向，(002)晶面的旋转角度主要集中在与垂直压制方向成35°角的范围内；热压后，旋转角从35°移动到52°，TATB晶体的取向有明显的反弹现象；(002)面取向度与TATB晶体的变形、碎裂和重取向有关，也与黏合剂的相变、热软化和间隙填充以及界面相互作用有关。该研究为目前基本还是黑匣子状态的压制行为研究及更精确的压制模型建立等提供了基础认识，更进一步有利于实现热弹性宏观性能预测、成型PBX残余应力、各向异性和不可逆膨胀的成因及控制、成型过程中的参数优化和控制。

2.5 软物质材料构效关系研究

中子微探针兼具的氢氘同位素分辨、跨尺度结构表征以及动力学研究等能力，与软物质材料的组分和结构特点以及性能机理相关的动态演化特征时间尺度十分匹配，是定量揭示软物质材料构效关系的有力手段。硅橡胶广泛应用于电子工业、汽车工业、航空航天、医疗等领域。引入纳米填料制备聚合物纳米复合材料，有望实现性能强化。然而，如何通过配方优化控制设计研发出高性能材料仍是挑战[87-89]。聚合物纳米复合材料中存在填料网络、橡胶网络、聚合物基质的链构象等多层级结构，可显著影响其宏观性能。这些多层级结构如何影响硅橡胶力学性能的内在机制成为重要课题。充分结合中子小角散射氘代链标记、衬度匹配和变换等技术手段，本团队[88-89]研究了二氧化硅填充硅橡胶泡沫的配方、分级结构和性能之间的关联。揭示了不同填料尺寸和含量硅橡胶中填料网络的分形结构，定量分析了界面结合胶结构，获得了硅橡胶材料多层级结构的特征参数。例如，分别使用颗粒直径约为20、16 nm和14 nm的二氧化硅填充制备3种样品，其团聚体质量分形分别为2.16、2.16和2.54，附聚物质量分形分别为2.90、2.52和2.54，结合胶厚度分别为10.3、7.5、6.5 nm[89]；结合结构信息修正的本构模型，进一步讨论分析了填料-填料和填料-橡胶相互作用及其对硅橡胶材料性能增强作用机制。

填充橡胶在实际应用中经常面临拉伸、压缩、剪切及其耦合的复杂载荷条件。研究不同加载条件下的微观结构演化有助于理解材料性能的增强机理。填充橡胶力学性能通常表现出马林斯效应，即循环变形过程中的应力软化和回复滞后，在过去的几十年里备受关注。原位实时地观测填充橡胶微结构演变对于揭示其应力软化/滞后行为的机制和起源至关重要[90-92]。针对这种高分子弹性体，本团队[90-91]开发了时间分辨原位中子散射技术，通过数据重构成功获取了0.1 s^{-1}应变速率下准平衡过程中界面和填料网络等结构演化数据信息。研究发现[91]，结合胶的周期性取向松弛会导致累积疲劳，力学响应软化、回复滞后、结合胶演变和本构分析等相关结果表明应变阈值为1.5；据此，讨论了基体、界面和填料网络的及其相互作用对马林斯效应起源的影响。上述针对不同应变速率下材料构效的原位研究[91-92]，为橡胶体系中的佩恩效应、马林斯效应、阻尼减振等性能行为机制理解提供了关键的结构认识，基于此进行材料设计与制备以实现材料性能的调控。

共轭聚合物具有可溶液加工和柔性等特点，在生物检测和电子皮肤等下一代电子学器件中具有应用前景。共轭聚合物链间强相互作用使其在溶液状态下具有超分子组装结构，这将对器件性能产生关键影响。然而，对于具有强分子间相互作用的给受体型共轭聚合物，其聚集态结构的实验研究仍具挑战性[93-97]。中子的电中性以及对各元素的分辨能力使中子散射实验方法能够在上述体系中获得比传统X射线更高的信噪比。因此，裴坚团队[93]基于中子分析独特优势研究了基于苯并二呋喃二酮(benzodifurandione-based oligo(p-phenylene vinylene))与联二噻吩(2,2′-bithiophene,2T)片段形成的共轭聚合物在邻二氯苯(良溶剂)与甲苯(不良溶剂)等不同溶剂体系中的超分子组装结构。研究发现，聚合物与良溶剂具有较强相互作用，因此呈现一维棒状、主链延伸的组装结构；加入不良溶剂削弱了上述相互作用，使聚合物主链倾向于折叠构象，从而形成二维片状组装结构。在上述工作基础上，该团队通过设计柔性侧链、电负性元素、极性溶剂和温度依赖等组装策略，实现了具有一维蠕虫状和无定形交叉网络状等系列不同的聚集态结构，进而调

控了共轭聚合物载流子传输能力的[94-97]。上述系列工作立足于研究共轭分子体系多级组装结构与器件电学性质之间的构效关系，为有机电子器件性能优化设计提供了科学策略。

水凝胶的快速发展为软体机器人、人造皮肤、可穿戴电子设备等仿生领域走向应用提供了可能。然而，实现与真实人类皮肤相当的高性能水凝胶面临关键挑战。人体皮肤柔软（杨氏模量约0.1～2 MPa）、可拉伸（140%～180%）、富含水分（接近70%）。然而，所有可用的软材料，包括弹性体和水凝胶，只能部分满足这些要求。传统弹性体显示出优异的力学性能和环境稳定性，而水凝胶具有高含水量、良好的生物相容性、透气性和对化学环境的响应性等独特性能。受结缔组织启发，王运龙团队[98]通过辐射引发的渗透性聚合制备了弹性体基水凝胶，用于人工皮肤。中子小角散射实验显示分子链呈现出具有2.4维数的表面分形结构，这证明了重水膨胀的聚丙烯酸（polyacrylic acid）与疏水性聚二甲基硅氧烷（polydimethylsiloxane）之间实现了链级均匀共混、无明显分相。这种独特的辐射诱导渗透聚合方法将传统弹性体转化为韧性水凝胶。该杂化水凝胶有望成为人造皮肤、流体流动控制器、伤口敷料层和许多其他仿生应用场景的候选材料。

3　结束语

经过近几年的运行和研建并举发展，CMRR中子平台目前建成投用15套科学装置。材料的静态结构表征方面，将最大可测尺度由原有的数百纳米拓宽至数十微米；微观动力学表征方面，实现能量分辨能力提升约3个量级（由原来的亚毫电子伏特提升至百纳电子伏特）。CMRR中子科学平台具有跨尺度多参量的综合型大科学装置集群优势，已应用于金属合金、磁性材料、电池材料、含能材料、软物质等关键工程材料研究和工程部件制造等领域，具有重要的社会效益。同时，面向国家重大战略需求和重要工程领域，通过有序积极部署中子分析技术的系列标准化工作，既提升了我国新建大型科研设施的运行效益，又有力支撑了航空航天、核电、高铁和先进制造等重要领域的创新发展。在未来，依托中子科学与技术全国重点实验室，着力推动以中子科学为基础的重大原始创新和新材料、凝聚态物理等多学科前沿发展，为工程材料及部件研发面临的科学技术瓶颈提供新认识和创新解决方案。

参考文献

[1] 陈和生. 促进我国重大科技基础设施持续发展[J]. 科技导报，2020，38(10)：44-46.
CHEN H S. Promote the sustainable development of major scientific and technological infrastructure of China[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(10): 44-46.

[2] 王贻芳. 中国重大科技基础设施的现状和未来发展[J]. 科技导报，2023，41(4)：5-13.
WANG Y F. Current status and future prospects of the national major infrastructure for science and technology [J]. Science & Technology Review, 2023, 41(4): 5-13.

[3] 王海舟，汪洪，丁洪，等. 材料的高通量制备与表征技术[J]. 科技导报，2015，33(10)：31-49.
WANG H Z, WANG H, DING H, et al. Progress in high-throughput materials synthesis and characterization [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(10): 31-49.

[4] REIMERS W, PYZALLA A R, SCHREYER A, et al. Neutrons and synchrotron radiation in engineering materials science: from fundamentals to material and component characterization[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

[5] ANDERSON I S, HORTON L, ISAACS E, et al. X-rays and neutrons: essential tools for nanoscience research [R]. Washington: NIST, 2005.

[6] 张昌盛，彭梅，孙光爱. 中子散射：理解工程材料的必要工具[J]. 物理，2015，44(3)：169-178.
ZHANG C S, PENG M, SUN G A. Neutron scattering: a necessary tool for understanding engineering materials [J]. Physics, 2015, 44(3): 169-178.

[7] CHATTERJI T. Magnetic neutron scattering[M]//Neutron Scattering from Magnetic Materials. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-24.

[8] ZHU Y, SPRINGERLINK. Modern techniques for characterizing magnetic materials[M]. Boston, MA: Springer US, 2005.

[9] MICHELS A, WEISSMÜLLER J. Magnetic-field-dependent small-angle neutron scattering on random anisotropy ferromagnets [J]. Reports on Progress in Physics, 2008, 71(6): 066501.

[10] CERETTI M. ECNS03 introductory course 'neutron stress analysis'[M]. Léon: Laboratoire Léon Brillouin, 2003.

[11] WISSINK M L, CHEN Y, FROST M J, et al. Operando measurement of lattice strain in internal combustion engine components by neutron diffraction[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(52): 33061-33071.

[12] HUTCHINGS M T, KRAWITZ A D. Measurement of residual and applied stress using neutron diffraction[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1992.

[13] CARPENTER J M, LANDER G H. 40 years of neutron scattering: a perspective[J]. Neutron News, 2010, 21(1): 10-12.

[14] DIANOUX A J, LANDER G. Neutron data booklet[M]. Philadelphia: OCP Science, 2003.

[15] 任清勇，陈闽楠，耿艳胜，等. 热电材料与非弹性中子散射技术[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2021，51(8)：123-128.
REN Q Y, CHEN M N, GENG Y S, et al. Thermoelectric ma-

terials and inelastic neutron scattering techniques[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(8): 123-128.

[16] BOOTHROYD A. Principles of neutron scattering from condensed matter[M]. Oxford: Oxford University Press, 2020.

[17] 李宪振, 常静, 杨君怡. 国际知名大科学装置ILL和ESRF建设经验及其启示[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(4): 474-484.
LI X Z, CHANG J, YANG J Y. Construction experiences and enlightments of international well-known large scientific facilities ILL and ESRF[J]. World Sci-Tech R & D, 2021, 43(4): 474-484.

[18] VOGEL S C. A review of neutron scattering applications to nuclear materials[J]. International Scholarly Research Notices, 2013, 2013(1): 302408.

[19] ANDREANI R, DIEGELE E, GULDEN W, et al. Overview of the European Union fusion nuclear technologies development and essential elements on the way to DEMO[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 25-32.

[20] CHARITIDIS C, BAÑARES M A, PORTELA R, et al. Report on NMBP-35 workshop 'from research to industry: how characterization and digitization change the game'[J]. Madrid: The NMBP-35-2020 Joint Workshop, 2024.

[21] CHAPMAN S. Neutron centres[OL].[2012-01-22][2025-04-21]https://neutronsources.org/neutron-centres/

[22] SUN G, ZHANG C, CHEN B, et al. A new operating neutron scattering facility CMRR in China[J]. Neutron News, 2016, 27(4): 21-26.

[23] 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[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021,51(9): 89-99.
SUN G A, LIU D, GONG J, et al. The neutron scattering platform of China Mianyang Research Reactor (CMRR) and recent applications[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(9): 89-99.

[24] LI J, WANG H, SUN G, et al. Neutron diffractometer RSND for residual stress analysis at CAEP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 783: 76-79.

[25] XIE L, CHEN X, FANG L, et al. Fenghuang: high-intensity multi-section neutron powder diffractometer at CMRR [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 915: 31-35.

[26] ZHANG J, XIA Y, WANG Y, et al. High resolution neutron diffractometer HRND at research reactor CMRR[J]. Journal of Instrumentation, 2018, 13(1): T01009.

[27] XIA Y, LI H, CAO X, et al. Upgrade of Xuanwu: a dual-mode neutron powder diffractometer at CMRR[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1042: 167452.

[28] 孙嘉程, 陈喜平, 谢雷, 等. 中国绵阳研究堆高压中子衍射谱仪在材料研究中的应用[J]. 高压物理学报, 2024, 38(3): 114-123.
SUN J C, CHEN X P, XIE L, et al. Application of the high-pressure neutron diffractometer at CMRR in materials research[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(3): 114-123.

[29] PENG M, SUN L, CHEN L, et al. A new small-angle neutron scattering spectrometer at China Mianyang research reactor[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 810: 63-67.

[30] LI X, HUANG C, WANG Y, et al. Diting: a polarized time-of-flight neutron reflectometer at CMRR reactor in China[J]. The European Physical Journal Plus, 2016, 131(11): 407.

[31] SONG J M, LUO W, LIU B Q, et al. Kunpeng: a cold neutron triple-axis spectrometer at CMRR in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 968: 163929.

[32] HUO H, LI H, WU Y, et al. Development of cold neutron radiography facility (CNRF) based on China Mianyang research reactor (CMRR)[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 953: 163063.

[33] WOO W, AN G B, EM V T, et al. Through-thickness distributions of residual stresses in an 80 mm thick weld using neutron diffraction and contour method[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(2): 784-793.

[34] WOO W, EM V, SEONG B S, et al. Effect of wavelength-dependent attenuation on neutron diffraction stress measurements at depth in steels[J]. Journal of Applied Crystallography, 2011, 44(4): 747-754.

[35] JIANG W, WAN Y, TU S T, et al. Determination of the through-thickness residual stress in thick duplex stainless steel welded plate by wavelength-dependent neutron diffraction method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 196: 104603.

[36] ROBINSON J S, HOSSAIN S, TRUMAN C E, et al. Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(10/11): 2603-2612.

[37] HOLDEN T. Fundamentals of neutron diffraction[M]//Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. Boca Raton: CRC Press, 2005: 25-64.

[38] 王倩妮, 郭广平, 顾国红, 等. 航空发动机叶片残余型芯中子照相检测[J]. 失效分析与预防, 2021,16(1): 76-82.
WANG Q N, GUO G P, GU G H, et al. Neutron radiography detection of residual core in turbine blades[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021,16(1): 76-82.

[39] 高祥熙, 尹伟, 顾国红, 等. 空心涡轮叶片中残芯的定量评价[J]. 失效分析与预防, 2021,16(2): 119-123.
GAO X X, YIN W, GU G H, et al. Quantitative evaluation on residual cores in hollow turbine blades[J]. Failure Analysis and Prevention, 2021, 16(2): 119-123.

[40] LI Z, SHAN L, YANG H. Improving the meso-structure identification of asphalt mixture using combined neutron and X-ray im-

aging [J]. Construction and Building Materials, 2024, 413: 134771.

[41] 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[J]. Materials & Design, 2019, 166: 107603.

[42] MO F, WU E, ZHANG C, et al. Correlation between the microstructural defects and residual stress in a single crystal nickel-based superalloy during different creep stages[J]. Metals and Materials International, 2018, 24(5): 1002-1011.

[43] 王宇, 耿长建, 由宝财, 等. 基于中子衍射技术的涡轮后机匣内部残余应力评估[J]. 航空发动机, 2022, 48(3): 116-120.
WANG Y, GENG C J, YOU B C, et al. Assessment of interior residual stress of turbine rear casing based on neutron diffraction technology[J]. Aeroengine, 2022, 48(3): 116-120.

[44] PENG J, LI W, WAN M, et al. Investigation on three-roller cylindrical bending of 2060-T8 Al-Li alloy plate for aircraft fuselage skin components[J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11(2): 269-278.

[45] FAN L, TIAN Y, PENG L, et al. Correlation between growth behavior, internal stress distribution and properties of ZnO: Zn crystals grown by carbon-assisted chemical vapor transport [J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11080-11088.

[46] LI Y T, GENG S N, LI J, et al. Determination of residual stress in hybrid laser-arc welded U-rib-to-deck joints by thermo-metallurgical-mechanical simulation and neutron diffraction [J]. Thin-Walled Structures, 2025, 208: 112755.

[47] MO F, SUN G, YANG Z, et al. Elastic tension induced lattice distortions in DD10 single crystal nickel-based superalloy at 500 ℃/760 MPa using *in situ* neutron diffraction[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 504-511.

[48] LI H, EKH M, COLLIANDER M H, et al. Accounting for lattice coherency in a two-phase elastic-plastic self-consistent model for nickel-based superalloys[J]. International Journal of Plasticity, 2018, 110: 248-271.

[49] LI H, LARSSON F, COLLIANDER M H, et al. Elastic-viscoplastic self-consistent modeling for finite deformation of polycrystalline materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 799: 140325.

[50] YANG J, LI H, GAO T, et al. Deformation behavior of nickel-based superalloys with bimodal γ′ size distribution studied by *in situ* neutron diffraction combined with EVPSC modeling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 977: 173382.

[51] 杨俊杰, 张昌盛, 李洪佳, 等. 拉伸-扭转复合加载对镍基高温合金 GH4169 力学性能与变形机理的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(1): 30-42.
YANG J J, ZHANG C S, LI H J, et al. Effect of tension-torsion coupled loading on the mechanical properties and deformation mechanism of GH4169 superalloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(1): 30-42.

[52] YANG Z, WANG H, HUANG Y, et al. Strain rate dependent mechanical response for monoclinic NiTi shape memory alloy: micromechanical decomposition and model validation *via* neutron diffraction[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108656.

[53] YANG Z, LI J, XIA Y, et al. Neutron diffraction study on strain rate dependent mechanical response in superelastic NiTi alloy: bulk structural evolution and constitutive model[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166323.

[54] ZHANG C S, WANG H, LI J, et al. The aging-effect-modulated mechanical behavior in U-Nb shape memory alloys through the modified twinning-detwinning process of the α″ phase [J]. Materials & Design, 2019, 162: 94-105.

[55] LI H, YANG Z, SHEN H, et al. On the effect of detwinning during compressive deformation of martensitic NiTi: *in situ* neutron diffraction and micromechanical modeling[J]. Acta Materialia, 2023, 247: 118737.

[56] XU S S, LI J P, CUI Y, et al. Mechanical properties and deformation mechanisms of a novel austenite-martensite dual phase steel[J]. International Journal of Plasticity, 2020, 128: 102677.

[57] XU S S, ZHAO Y, CHEN D, et al. Nanoscale precipitation and its influence on strengthening mechanisms in an ultra-high strength low-carbon steel[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 113: 99-110.

[58] LIANG J W, SHEN Y F, ZHANG C S, et al. *In situ* neutron diffraction in quantifying deformation behaviors of nano-sized carbide strengthened UFG ferritic steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 726: 298-308.

[59] YANG J, LI J, LIU W, et al. Development of a load frame for neutron diffraction and fluorescent thermometry at cryogenic temperature [J]. The Review of Scientific Instruments, 2022, 93 (7): 073904.

[60] YAN G, JI H, ZOU L, et al. *In-situ* small angle neutron scattering analysis of hydride initiation on oxide-coated metal with surface signals enhanced by a multi-plate reaction chamber[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 4065-4071.

[61] YAN G, SHI P, XIA Y, et al. *In situ* small-angle neutron scattering analysis of the initial deuteride formation of deuterium-cerium reactions under a controlled gas flow[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(37): 20175-20183.

[62] LI X, LIN Z, JIN N, et al. Perovskite-type $SrVO_3$ as high-performance anode materials for lithium-ion batteries [J]. Advanced Materials, 2022, 34(46): 2107262.

[63] LI H, XIA Y H, ZENG W W, et al. Revealing the lithium migration paths in $Li_{4+x}Ti_5O_{12}$ by neutron diffraction[J]. Journal of Materials Chemistry A: Materials for Energy and Sustainability, 2024, 12: 27570-27576.

[64] ZHU L, WANG Y, CHEN J, et al. Enhancing ionic conductivity in solid electrolyte by relocating diffusion ions to under-coordination sites[J]. Science Advances, 2022, 8(11): eabj7698.

[65] WANG S, SHI H, WANG D X, et al. Neutron-based characterization: a rising star in illuminating rechargeable lithium metal batteries[J]. Nano Energy, 2024, 122: 109337.

[66] SHI J Y, SUN G, LI L P, et al. Fluorine substitution at the O-site imparts enhanced chemical stability for garnet-structured electrolytes[J]. ACS Energy Letters, 2023, 8(1): 48-55.

[67] ZHANG W, CUI J, WANG S, et al. Deforming lanthanum tri-

hydride for superionic conduction[J]. Nature, 2023, 616(7955): 73-76.

[68] 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]. Journal of the American Chemical Society, 2019, 141(14): 5645-5649.

[69] ZHANG C S, GOU J M, YANG J J, et al. Nanoheterogeneity response in large-magnetostriction Fe-Ga alloys: an *in-situ* magnetic small-angle neutron scattering study[J]. Acta Materialia, 2022, 225: 117594.

[70] GOU J M, MA T Y, LIU X L, et al. Large and sensitive magnetostriction in ferromagnetic composites with nanodispersive precipitates[J]. NPG Asia Materials, 2021, 13: 6.

[71] GOU J, PAN Y, YANG T, et al. Large nonhysteretic volume magnetostriction in a strong and ductile high-entropy alloy[J]. Advanced Materials, 2024, 36(35): 2404192.

[72] WANG B, YI E K, LI L Y, et al. Magnetotransport properties of the kagome magnet $TmMn_6Sn_6$[J]. Physical Review B, 2022, 106: 125107.

[73] ZHANG J, ZHANG X Y, XIA Y H, et al. Structure and magnetic properties of with ferromagnetic spin chains[J]. Physical Review B, 2023, 108: 174423.

[74] MA Z J, SUN Y, LU H Q, et al. Noncoplanar antiferromagnetism induced zero thermal expansion behavior in the antiperovskite $Mn_3Sn_{0.5}Zn_{0.5}C_x$[J]. Physical Review B, 2023, 107: 094412.

[75] HE W, WANG D, WU H, et al. High thermoelectric performance in low-cost $SnS_{0.91}Se_{0.09}$ crystals[J]. Science, 2019, 365(6460): 1418-1424.

[76] BAI L F, LI X X, LI H, et al. A review of small angle scattering, neutron reflection, and neutron diffraction techniques for microstructural characterization of polymer-bonded explosives[J]. Energetic Materials Frontiers, 2023, 4(3): 140-157.

[77] SONG P, TU X, BAI L, et al. Contrast variation small angle neutron scattering investigation of micro- and nano-sized TATB[J]. Materials, 2019, 12(16): 2606.

[78] 宫正, 涂小珍, 曾贵玉, 等. 纳米TATB炸药贮存老化机理[J]. 含能材料, 2021,29(3): 234-240.
GONG Z, TU X Z, ZENG G Y, et al. Aging mechanism of nano TATB explosive during storage[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(3): 234-240.

[79] YE P, WANG W, LI X, et al. Near-infrared laser induced direct ignition of 4,4′,5,5′-tetranitro-1H, 1′H-[2, 2′-biimidazole]-1, 1′-diamine by constructing diverse crystal structures[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151781.

[80] LIN C, BAI L, WEI L, et al. Zirconium tungstate reinforced energetic composites with inhibited thermal expansion and reduced thermal stress[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 461: 141986.

[81] LIN C, WEN Y, WEI L, et al. Construction of zirconium tungstate modified polymer bonded energetic composites with highly inhibited thermal expansion *via* bioinspired interfacial reinforcement[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 175: 107794.

[82] HE G, LI X, BAI L, et al. Multilevel core-shell strategies for improving mechanical properties of energetic polymeric composites by the "grafting-from" route[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 191: 107967.

[83] 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]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(37): 20426-20432.

[84] LI H, LI Y, BAI L, et al. Acceleration of δ-to β-HMX-D8 phase retransformation with D_2O and intergranular strain evolution in a HMX-based polymer-bonded explosive[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(12): 6958-6964.

[85] 白亮飞, 田强, 屠小青, 等. 冷压成型压力对HMX基PBX微结构影响的SANS研究[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 853-860.
BAI L F, TIAN Q, TU X Q, et al. SANS investigation on the effect of cold-pressed forming pressure on the microstructure of HMX-based PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(10): 853-860.

[86] XU Y, TIAN Y, WANG H, et al. Crystal orientations of 1, 3, 5-triamino-2, 4, 6-trinitrobenzene-based polymer bonded explosives during the pressing process by neutron diffraction[J]. Powder Technology, 2023, 413: 118044.

[87] 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[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2021, 39(3): 365-376.

[88] 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[J]. Composites Communications, 2021, 23: 100547.

[89] SHUI Y, HUANG L, WEI C, et al. How the silica determines properties of filled silicone rubber by the formation of filler networking and bound rubber[J]. Composites Science and Technology, 2021, 215: 109024.

[90] HAN J J, WEI C S, LU A, et al. Visualizing filler network to reveal structural mechanisms on energy dissipation of Mullins effect in silicone rubber[J]. Polymer, 2024, 301: 127044.

[91] HAN J J, YANG T T, YANG C W, et al. The maximum-strain and strain-interval dependences of microstructural evolution underneath the Mullins effect[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 172: 107586.

[92] YANG T T, SHUI Y, WEI C S, et al. Effect of cyclic straining with various rates on stress softening/hysteresis and structural evolution of filled rubber: a time-resolved SANS study[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 242: 110100.

[93] ZHENG Y Q, YAO Z F, LEI T, et al. Unraveling the solution-state supramolecular structures of donor-acceptor polymers and their influence on solid-state morphology and charge-transport properties[J]. Advanced Materials, 2017, 29(42): 1701072.

[94] YAO Z F, ZHENG Y Q, LI Q Y, et al. Wafer-scale fabrication of high-performance n-type polymer monolayer transistors using a multi-level self-assembly strategy[J]. Advanced Materials, 2019, 31(7): 1806747.

[95] YAO Z F, WANG Z Y, WU H T, et al. Ordered solid-state microstructures of conjugated polymers arisen from solution-state aggregation[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59: 17467-17471.

[96] WANG Z Y, DI VIRGILIO L, YAO Z F, et al. Correlating charge transport properties of conjugated polymers in solution aggregates and thin-film aggregates[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(37): 20483-20488.

[97] ZHENG Y Q, YAO Z F, DOU J H, et al. Influence of solution-state aggregation on conjugated polymer crystallization in thin films and microwire crystals[J]. Giant, 2021, 7: 100064.

[98] TIAN Y, WANG Z, CAO S, et al. Connective tissue inspired elastomer-based hydrogel for artificial skin *via* radiation-indued penetrating polymerization[J]. Nature Communications, 2024, 15: 636.

基金项目:科学挑战专题(TZ2025009);国家科技重大专项项目(2019-Ⅶ-0019-016)

收稿日期:2025-04-21;**录用日期**:2025-06-09

通讯作者:孙光爱(1980—),男,研究员,博士,研究方向为中子科学与技术,联系地址:四川省绵阳市 919-218 信箱(621999),E-mail:guangaisun_80@163.com;张昌盛(1985—),男,研究员,博士,研究方向为中子科学与技术,联系地址:四川省绵阳市 919-218 信箱(621999),E-mail:inpc_zhang@163.com

(本文责编:齐书涵)