

中国科大利用量子机器学习首次实验展示实用量子优势

本报讯 近日，中国科大自旋磁共振实验室彭新华教授、李兆凯副研究员与复旦大学李兆凯教授等人合作，在量子机器学习实验领域取得重要突破。团队提出了一种基于关联量子自旋系统的新量子机器学习方法，并通过实验首次证明，在处理真实世界的时间序列预测任务时，量子机器的性能可以超越经典神经网络模型。相关研究成果发表在《物理评论快报》上。

量子计算被广泛认为是突破经典计算局限、解决复杂问题的重要途径。近年来，量子计算已在若干特定基准问题上展现出超越经典方法的优越性，但如何将这一优势拓展到具有现实意义的实际任务，仍是当前国内外亟待解决的关键问题。特别是，许多量子算法依赖精密设计的复杂量子线路实现，而在当前含噪声中等规模量子(NISQ)设备上，这类深层线路往往受到操作误差累积和相干时间有限等实验条件制约，导致面向实际应用的量子优势难以真正落地。

为克服上述挑战，研究团队基于量子储层计算(quantum reservoir computing)这一机器学习框

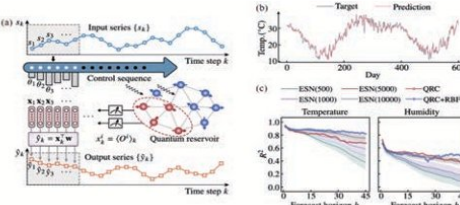


图 (a) 量子层计算示意图; (b) 单步天气预测实验结果; (c) 经典神经网络与量子储层在多步预测中的性能对比。

架，通过协同利用自旋相互作用与弛豫过程以实现长时间复用测量两项关键功能，提出并实验实现了一种适用于自旋体系的时序信息处理新方案。在该方案中，时序信号通过射频脉冲编码到高维量子态中，借助自旋网络内部的脉冲动力学进行信息处理，无需人为构造复杂量子线路，从而显著降低实验调控难度。同时，团队将通常被视为负面因素的弛豫过程转化为可利用的计算资源，为处理时序信息提供了必要的短期记忆能力。此外，时间复用测量在不增加额外硬件负担的情况下显著提高了信息提取效率，进一步释放

小规模量子系统的计算潜力。

基于这些创新，研究团队在核磁共振(NMR)量子平台上构建了由9个耦合自旋组成的量子储层系统(由13C标记巴豆酸分子中的4个碳核和5个氢核构成)。在常用的NARMA时序基准测试中，实验结果达到了现有量子实验中的最优水平，预测误差较此前结果降低了1至2个数量级。进一步地，在更具现实意义的多步天气预测任务中，研究团队构建的9自旋量子储层展现出卓越的预测能力，其精度能够达到甚至超越10000节点经典储层网络的水平。这一结果首次在实验上表明，量子机器学习在现实任务上能够超越大规模的经典神经网络模型，突破了相关研究长期停留于数值模拟和合成数据验证的局限，被审稿人评价为“量子机器学习领域的重要里程碑”。该研究为发展低能耗、高维、面向真实场景的量子人工智能提供了切实可行的实验范式，也为探索NISQ时代量子技术的实用化开辟了新局面。

博士研究生侯彦晋、华骏波为论文共同第一作者。(物理学院 科研部)

中国科大开发高可逆锂氧电池

本报讯 近日，中国科大工程科学学院化学和能源工程系谈鹏教授团队在锂氧电池研究方面取得重要进展。研究团队提出一种功能区域化电极设计策略，解决了锂氧电池中电化学反应与放电产物存储之间的固有矛盾，显著提升了传质特性和电化学性能。相关成果发表在能源领域著名期刊《焦耳》上。

锂氧电池因理论能量密度极高，被视为下一代高比能储能技术的重要候选体系。然而，该体系仍面临实际放电容量有限、循环稳定性不足等挑战。其核心问题在于，放电过程中生成的低导电性固体过氧化锂(Li₂O₂)在电极中不断累积，不可避免地导致传质通道和反应界面退化，阻碍氧气、锂离子和电子传输，进而限制电池反应持续进行。因此，如何协调电化学反应与Li₂O₂存储之间的冲突，是提升电池性能的关键。

针对这一挑战，研究团队提出功能区域化电极设计思路(图)。通过调控锂离子浓度分

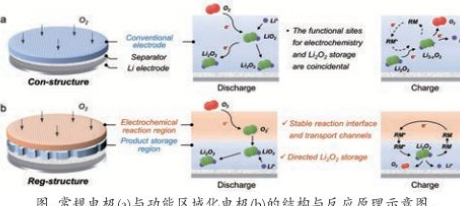


图. 常规电极(a)与功能区域化电极(b)的结构与反应原理示意图。

布，将氧分子还原和Li₂O₂存储分别锚定在电极的两个区域; 中间体超氧根和氧化还原介质(RM)分别作为放电和充电过程中连接两区域的桥梁，实现电子的持续交换以及Li₂O₂的定向存储与分解。研究表明，约92.7%的Li₂O₂定向存储在“有”的存储区，使得电化学反应区能够维持低阻力氧气传输和高反应活性，实现氧气和RM的快速转化。与此同时，产物存储区为Li₂O₂沉积提供充足的附着位点，抑制其团聚，从而保持与RM较高的反应接触面积。

实验结果表明，基于这一结构设计，即便采用常规碳材料构建电极，电极仍表现出优异性能。在0.1mA/cm²电流密度下，功能区域化结构的全放电容量达到4.6mAhcm⁻²，较传统结构提高约60%; 放电过电位低至0.2V，并可稳定循环368次。结合数学模型与可视化表征，研究团队进一步揭示了固体产物存储区结构对超氧根传输和Li₂O₂沉积行为的影响规律，为电极结构优化提供了理论依据。

研究团队进一步验证了该设计理念的普适性，构建了另一组不同材料配置的功能区域化电极体系。测试结果表明，新体系同样实现了预期的反应分区功能，并在放电容量和循环稳定性上表现出明显优势。该策略还可与催化剂优化相结合，根据性能需求对反应区与存储区开展独立调控。功能区域化电极设计策略不仅为高性能锂氧电池提供新的设计思路，也为其他伴随固体产物液化的金属-气体电池体系提供了参考。

张卓君博士后为论文第一作者，谈鹏教授为通讯作者。(工程科学学院 科研部)

中国科大揭示二维材料hBN中色心自旋弛豫的温度依赖特性

本报讯 郭光灿院士团队在二维范德瓦耳斯材料固态自旋色心领域取得重要进展。该团队李传锋、唐建顺研究员与武汉理工大学吕海飞等人合作，实验研究二维材料六方氮化硼(hBN)中带负电荷的硼空位色心(V_B⁻)中自旋态的两种弛豫过程，并利用理论模型对弛豫速率随温度的变化进行分析。其结果对影响V_B⁻色心退相干过程的自旋-声子相互作用提供深入的理解，也对基于V_B⁻色心的量子传感器实际应用具有指导意义。相关成果发表在《物理评论快报》上。

hBN中的V_B⁻色心作为具有光学可寻址特性的电子自旋系统，已被证实是量子传感领域极具潜力的候选材料。然而，在基于V_B⁻色心的量子传感器实际应用中，可能出现机械振动或热量累积等因素造成的局域温度升高现象。由于V_B⁻色心中存在的温度依赖性弛豫，温度变化会影响其自旋相干时间，进一步影响传感器的性能。

研究团队选择hBN中的V_B⁻色心为研究对象，测量了198-393K温度范围内自旋态|0> ↔ |±> 间的弛豫速率(即单量子弛豫，简称为SQ)和自旋态|+> ↔ |-> 间的弛豫速率(即双量子弛豫，简称为DQ)，并发现两种弛豫速率均随温度的升

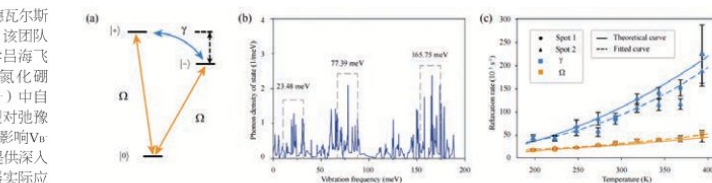


图 (a) V_B⁻色心简化的基态三重态、|0> ↔ |±> 的弛豫速率记作Ω，|+> ↔ |-> 的弛豫速率记作γ; (b) V_B⁻色心的声子态密度图像，选取三个峰值为有效声子模式; (c) 温度依赖的Ω和γ拟合曲线与理论计算曲线的对比。

高而增大。其中DQ弛豫速率增速更快，在超过393K后数值将超过SQ弛豫速率的3倍，即DQ将在由自旋-声子相互作用导致的退相干过程中起主要贡献作用。

此外，研究通过建立基于二阶自旋-声子相互作用的理论模型描述SQ和DQ两种弛豫速率的温度变化，其结果与实验数据基本符合。通过进一步将理论模型简化成自旋与3种有效声子模式(对应能量分别为23.48、77.39和165.75meV)耦合，再对实验数据进行拟合，其结果和理论预测也基本一致。

果表明，新体系同样实现了预期的反应分区功能，并在放电容量和循环稳定性上表现出明显优势。该策略还可与催化剂优化相结合，根据性能需求对反应区与存储区开展独立调控。功能区域化电极设计策略不仅为高性能锂氧电池提供新的设计思路，也为其他伴随固体产物液化的金属-气体电池体系提供了参考。

本研究为V_B⁻色心温度依赖性的退相干路径提供了有价值的见解，对超过393K后影响V_B⁻色心相干时间的弛豫行为进行预测，这种研究方法具有延伸到hBN中其他自旋色心的潜力，对传感领域具有重要意义。

中国科大博士生解琳珂、博士后刘伟和武汉理工大学硕士生黄凯宇为该论文共同第一作者。

(量子网络安徽省重点实验室 物理学院 中国科学院量子信息和量子科技创新研究院 科研部)

中国科大观测到重味夸克偶素在新物质形态中的“顺次熔解”现象

本报讯 中国科大重离子碰撞实验课题组在STAR国际合作组中发挥主导作用，在相对论重离子碰撞能区首次观测到粲夸克偶素“顺次熔解”现象，为深入理解超高温原子核碰撞产生的新物质形态——夸克胶子等离子体的特性迈出重要一步。相关研究成果发表在《物理评论快报》上。

超高温原子核碰撞的主要目标是产生一种由夸克和胶子作为组分、以强相互作用为主导的新物质形态——夸克胶子等离子体，并深入研究其特性和动力学机制。人们普遍认为，宇宙在大爆炸后约百万分之一秒时处于这种形态。对夸克胶子等离子体的研究有助于深入理解强相互作用的本质以及宇宙早期演化规律。

粲夸克偶素是由粲夸克及其反夸克组成的束缚态。丁肇中先生因1974年发现第一个粲夸克偶素—J/ψ粒子而获得诺贝尔物理学奖。当粲夸克偶素被放置于夸克胶子等离子体这一特殊物质形态中时，该束缚态可能会解离，且解离概率随束流能量增加而增加。这一现象被称为“顺次熔解”现象。该现象早有理论预言，但由于实验难度大，位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子碰撞实验经过20余年的研究，一直未能在实验中观测到。

中国科大唐泽波、查玉妹教授和研究生王岩、沈凯峰等通过机器学习方法显著提升了粲夸克偶素激发态的信号鉴别度，首次在该能区观测到粲夸克偶素的“顺次熔解”现象，并

与相关理论计算进行了比较，为夸克胶子等离子体特性和动力学机制的理解提供了重要实验依据。这是该课题组继2023年在该能区首次观测到底夸克偶素“顺次熔解”之后的又一次突破。

中国科大唐泽波教授、查玉妹教授和研究生王岩、沈凯峰为该STAR合作组文章的主要作者。

STAR是基于美国布鲁克海文国家实验室

突破钠电硬碳快充瓶颈! 中国科大揭示电子-离子双连续传输机制

本报讯 中国科大傅尧教授、李闯副研究员团队在《美国化学会志》上发表研究成果，报道了一项能源化学领域的突破性成果。该工作阐明了一种基于共价桥接策略构筑的电子-离子双连续传输碳材料结构模型。该结构实现了硬碳材料中电子与钠离子从类石墨层至封闭孔隙的高效协同传输，为高性能钠离子电池提供了重要的设计新范式。

钠离子电池(SIBs)作为锂离子电池的最佳替代品，因其钠资源丰富、长循环寿命和耐低温等优势已经引起学术界和产业界的广泛关注。如何协同增强硬碳的电子传导能力与离子传输效率，实现高倍率下高效、稳定储钠，成为突破SIBs快充瓶颈、迈向实用化取得突破的关键科学问题。针对这一核心科学难题，傅尧教授团队以碳量子点(CQDs)与硬碳骨架为结构基础，综合扫描透射电子显微镜(STEM)、X射线吸收近边结构(XANES)、原位透射电镜及理论计算等多尺度研究手段，成功构筑了高度石墨化纳米层与硬碳基质通过共价键合的双连续传输结构，取得了一系列揭示电子-离子协同传输机制的原位科学发现。

在本研究中，研究人员受自然界生物维管束中信号(电子)和养分(离子)高效协同传输现象启发，提出一种超分子桥接策略，通过在硬碳表面共价桥接CQDs，成功制备了具有电子-离子双连续超快传输特性的氮掺杂硬碳(NHC)。所形成的双连续传输网络(GNDs)均匀嵌入硬碳基质，显著提升了电子导电与离子迁移效率，并通过化学键增强了硬碳材料的结构稳定性。

通过多尺度结构表征，研究团队系统揭示了NHC的微观构效关系。结构表征分析证实，NHC中形成了通过C-C共价键稳定桥接的功能化GNDs，同时材料整体保持高缺陷密度，从微观层面有力证实了所设计的双连续结构特征。该共价桥接策略成功实现了双连续结构的构筑及跨尺度优化，为提升硬碳负极材料的电子-离子协同传输能力奠定了坚实的结构基础。

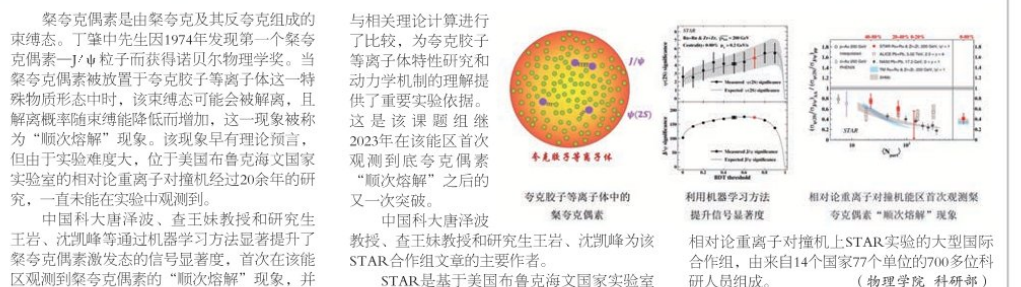
在材料结构优化的基础上，团队开展了钠离子电池性能测试。结果表明，GNDs的构筑协同提升了电池的首次库伦效率(ICE)、倍率性能和可逆7倍容量等电化学性能。其中，NHC实现了>92%的高ICE及平台态的高比容量(391mAhg⁻¹)。此外，在20C的高倍率下仍具有250mAhg⁻¹的可逆7倍容量，循环15000圈容量保持率高达83.5%。低温测试表明NHC在-20℃下的容量保持率仍表现出色。此外，研究团队利用椰壳粉等生物质前驱体进行拓展实验，进一步验证了该共价桥接策略在硬碳结构设计中的普适性。

该研究揭示了双连续硬碳在储钠过程中的离子传输机制及动力学行为，从理论和实验上证实了该结构对钠离子快速迁移和存储的重要作用，显著改善了钠离子电池的电子-离子传输效率、界面稳定性及反应动力学。

该工作综合运用原位与非原位表征手段研究了双连续硬碳储钠行为，阐明了NHC“缺陷/表面吸附-一层内吸附转化-孔内填充”的储钠机制。该双连续结构实现了动力学性能与容量输出的高效统一，为制备高性能钠离子电池负极材料阐明了完整、科学的结构设计模型。

该工作阐明了一种基于共价桥接策略构筑的电子-离子双连续传输模型，实现了电子与离子从类石墨层至封闭孔的高效协同传输，制备兼具高容量、高倍率快充能力、长循环寿命以及优异低温性能的低成本硬碳负极材料，从根本上突破了钠离子电池充电慢、寿命短的核心瓶颈，为大规模储能和高功率应用提供了兼具性能优势与实用潜力的解决方案。

论文第一作者为胥李志博士，通讯作者为傅尧教授、李闯副研究员。(化学与材料科学学院 科研部)



相对论重离子碰撞能区STAR实验的大型国际合作组，由来自14个国家77个单位的700多位科研人员组成。(物理学院 科研部)