

DOI: 10.11858/gywlxb.20261156

高压电学输运在量子物态探索中的应用——怀柔综合极端条件装置 A1 实验站*

周亚洲¹, 陈姝蓉^{1,2}, 郭静¹

(1. 中国科学院物理研究所, 北京 100080;
2. 河海大学, 江苏 南京 210024)

摘要: 高压、极低温和强磁场等综合极端条件为探索材料中的新型量子物态和调控量子相变提供了重要实验手段。本文介绍了怀柔综合极端条件装置 (SECUF) 的 A1 金刚石对顶砧 (DAC) 实验站, 该平台面向极端条件下的高压电学输运研究, 集成了六个并行工作的小型化高压胞, 实现了在超过 100 GPa 压强、低至 500 mK 温度以及高达 14 T 磁场条件下多个样品电输运测量。本文系统介绍了 A1 实验站的仪器设计、实验流程及其在综合极端环境下开展量子材料研究的能力, 并总结了该平台取得的代表性科学成果, 包括铬基超导体新成员的发现、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中压致超导的可重复性研究、层状量子材料中的结构重构与超演化, 以及高压条件下超导电子结构和关联磁态的调控。此外, 结合高压低温比热等多物性测量手段, A1 实验站进一步拓展了对复杂自旋态和其他关联量子态的探索能力。这些研究展示了高压电学输运及多模态极端条件实验技术在发现新型量子现象、理解物态演化机制以及探索量子材料中的关联效应方面的重要作用。最后, 本文展望了 A1 实验站在多参量协同调控、原位多物性表征以及新型量子材料探索方面的发展方向。

关键词: 综合极端条件装置 A1 实验站; 高压电学输运; 金刚石压砧; 极低温强磁场; 量子物态

中图分类号: O521.2; O521.3

文献标识码: A

凝聚态物理的前沿研究不断探索如何通过多维参数空间中的精确调控, 揭示由电子、晶格、自旋和轨道等自由度协同作用产生的新兴量子态, 包括非常规超导电性、奇异磁序和拓扑量子态等^[1,2]。近年来, 综合极端条件下的研究取得了显著进展^[3,4], 为理解复杂量子体系中的物态演化和相变机制提供了新的实验途径。许多量子材料中的新奇物性源于电子、晶格、自旋和轨道等多个自由度之间复杂的相互作用, 而这些相互作用往往处于微妙的能量平衡状态, 对外部环境极为敏感。因此, 发展能够连续调控多个物理自由度的实验手段, 是揭示量子态起源和调控机制的重要途径。

在众多调控方法中, 压强作为一种洁净且连续可调的热力学参数, 能够在不引入额外化学组分的情况下改变材料的晶格结构和电子结构, 从而有效调控电子关联、费米面拓扑以及超导配对行为。近年来, 高压研究在量子材料探索中展现出独特优势, 例如在富氢化合物中诱导出转变温度超过 200 K 的高温超导电性^[5-10], 推动了镍基和铁基等新型超导体中压强诱导量子态的发现与理解^[11-16], 并在多种强关联材料中揭示了常压下难以获得的新型电子相和新奇量子态^[12]。这些进展表明, 极端条件不仅是传统意义上的实验环境变量, 更是强大的热力学调控旋钮, 能够重塑电子带宽、改变晶格对称性、重构费米面并调控自旋-轨道耦合等关键物理自由度。通过外场调控竞争的相互作用, 极端条件能够稳定常压下难以实现的新基态, 并为理解关联电子体系中的微观机制提供新的途径。然而, 许多压强诱导量子态仅存在于极低温、高磁场等复杂条件下, 其微观起源和稳定区域需要通过多物理量联合测量进行解析。因此, 高压与极低温、强磁场的协同结合成为探索量子材料完整相图和揭示关联效应的重要方向。

*收稿日期: 2026-08-28; 修回日期: 2026-10-12

通信作者: 周亚洲 (1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事怀柔综合极端条件装置 A1 实验站运行研究. E-mail: zhouyz@iphy.ac.cn

郭静 (1985—), 女, 博士, 研究员, 主要从事高压等极端条件下的物性研究. E-mail: jguo@iphy.ac.cn

在此背景下,综合极端条件实验技术的发展为系统研究量子材料中的关联效应提供了新的实验框架。通过协同调控压强、温度和磁场,可以实现对电子、晶格、自旋和轨道自由度的多维操控,探索新型量子现象的产生条件及演化规律,并为理解关联电子体系中的基本物理机制和设计新型量子材料提供重要实验基础。

基于这一科学需求,怀柔综合极端条件装置(SECUF)的A1实验站致力于建立面向综合极端条件下量子材料研究的高压电输运实验平台,实现超高压、极低温和强磁场环境中的高精度、多通道电输运测量,并进一步拓展与光谱学及其他物性表征技术相结合的多模态研究能力。传统单样品DAC输运实验通常面临实验效率有限且存在批次差异,同时单一输运测量手段难以直接区分电子结构演化与晶格响应等不同物理自由度的贡献。针对这些问题,A1实验站发展了基于六个小型化DAC单元的并行测量策略,开发了使用直流Delta模式的多通道并行测量程序,并且扩展了多通道的微分电导测量程序,为压强下点接触隧道谱的测量打下了基础。此外,实验站还集成了最低能到8 K的高压低温拉曼光谱测量与低温原位压强控制系统。A1实验站旨在提升传统高压实验在效率、测量精度和多模态表征方面的限制,为探索新型量子物态和理解其微观机制提供先进实验工具。

1 A1 实验站总体介绍

A1实验站旨在建立面向综合极端条件下量子材料研究的高压电学输运平台,实现压强(P)、温度(T)和磁场(H)三维参数空间中的物态调控与精密测量(图1a)。该平台可提供高达约100 GPa的静态压强、低至500 mK的温度以及最高14 T的磁场条件,从而满足对超导、磁性以及其他关联电子态进行系统研究的需求。极低温和强磁场系统均采用了无液氦的压缩制冷机,有效降低了对液氦供应的依赖。其中,500 mK极低温是通过内循环的 ^3He 制冷单元实现,结合低温腔内部完成的 ^3He 冷凝与循环过程,提高了系统稳定性和长期运行可靠性。室温孔超导磁体为样品区域提供最高14 T的均匀外磁场,为研究压强诱导量子态的磁场响应提供了条件。

超高压环境由金刚石对顶压砧(diamond anvil cell, DAC)产生(图1b),它是实验室环境中产生静态超高压最广泛采用和最可靠的装置^[1]。在典型的DAC配置中,两个对顶的金刚石砧面将压力施加在金属垫片和样品上,由于压强等于压力除以面积,可达到的最大压强主要由砧面直径决定。通常情况下要达到100 GPa的最高压强,我们需要砧面直径小于150微米。然而,砧面的极端微型化为电输运测量带来了技术挑战:用于电阻测量的标准四电极配置,以及用于霍尔效应的范德堡四电极,必须在极其有限的空间内实现(图1c和1d)。在有限空间内制备可靠电极,并在高压下保持电极的机械稳定性和低接触电阻,是超高压输运测量的主要技术难点之一。

针对传统单DAC实验效率较低以及样品间差异带来的重复性问题,A1实验站自主研发了直径23 mm,高度34 mm的小型高压胞(以下简称为d23mm高压胞)。该设计兼顾高压能力、低温兼容性和操作便利性,配套齿轮盒(Gearbox)可简化高压胞的装配及后续压强调节。更重要的是,6个d23mm高压胞可以紧凑集成并同时安装于低温腔中(图1b),实现多样品并行测量,大大提高了极端低温和强磁场条件下实验资源的利用效率。此外,针对不同实验需求,实验站也为d23mm高压胞设计了用于气体加载系统(Gas Loading)的转接盒,使其不但能使用液体传压介质(如硅油、甲醇-乙醇混合物等),也可以使用气体传压介质(如氦气、氖气等),增强了压强环境控制的灵活性。值得强调的是,d23mm高压胞针对电输运测量进行了针对性优化,通过自上压砧和上底座引出测量电极,该设计省去了额外的电极架组件。此外,将样品腔内的电极集成于上压砧表面,最大可能的减小了电极与垫片或者高压胞短路的概率。

为了满足多高压胞同步测量需要,A1实验站建立了基于LabVIEW控制的18通道并行电输运测量程序。每个高压胞均支持标准四电极测量模式,从而实现六个样品的同步电阻测量。该系统集成矩阵开关、多通道Keithley 6221电流源和2182纳伏表,可在约20 s内完成一次完整测量循环,实现高效的数据采集。除常规的变温电阻和磁场扫描测量外,实验站进一步开发了适用于高压环境的直流微分电导测量程序,为开展高压条件下点接触隧道谱研究提供了技术基础。

总体而言, A1 实验站通过将超高压、极低温和强磁场环境相结合, 并发展多通道高压电输运及扩展测量技术, 构建了一个面向量子材料探索的综合实验平台。该平台能够在宽广的参数空间内研究压强诱导超导、磁性转变及其他新兴量子现象, 为揭示极端条件下物态演化机制提供了重要实验工具。

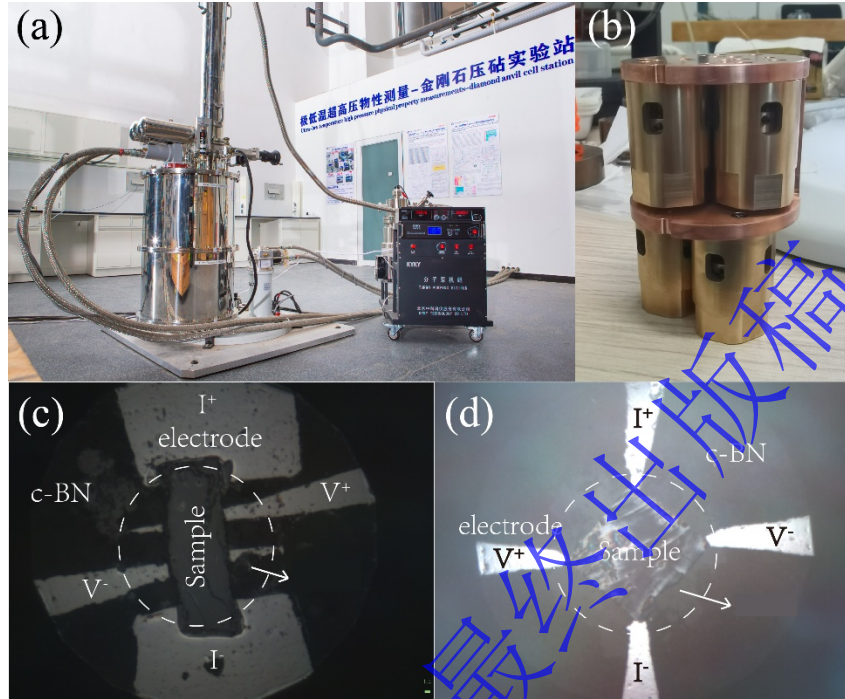


图 1 (a) 实验站设备示意图; (b) 6 高压胞组装实物图; (c) 标准四电极示意图^[18]; (d) 范德堡四电极示意图^[19]。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental station equipment; (b) Photograph of the assembled six high-pressure cells; (c) Schematic of the standard four-electrode configuration^[18]; (d) Schematic of the van der Pauw four-electrode configuration^[19].

2 极端条件下关联量子现象的涌现

以下结合 A1 实验站的代表性研究, 从综合极端条件下新超导相的发现、竞争电子序的演化及非常规输运行为等方面, 展示该平台所支撑的量子材料研究进展。

2.1 压致超导电性

2.1.1 准一维铁磁体 CrSbSe_3 的压致超导

自 CrAs 中首次发现铬基超导性以来^[12], 铬基超导体家族一直受到广泛关注, 但其材料体系和结构类型仍较为有限^[20–24]。Li 等人利用高压输运测量研究了准一维铁磁半导体 CrSbSe_3 , 发现了压强诱导出的超导态, 将铬基超导体系拓展至具有“准一维链+范德华堆叠”特征的新型结构体系^[25]。

常压下, CrSbSe_3 属正交晶系 $Pnma$ 空间群, 其结构由 $[\text{Cr}_2\text{Sb}_2\text{Se}_6]$ 单维链沿 b 轴通过 $[\text{CrSe}_6]$ 八面体与共边的 $[\text{SbSe}_3]$ 金字塔构建而成, 链间则依靠弱范德华作用耦合, 因而呈现显著的准一维特征。该材料在常压表现为铁磁半导体, 居里温度约 71 K, 光学带隙约 0.7 eV, Cr^{3+} 处于 $S = 3/2$ 的高自旋态, 磁各向异性导致 a 轴 (垂直于链) 为易磁化轴。高压条件下, 原位结构表征发现 CrSbSe_3 经历了两个连续的同构结构演化过程, 分别对应 HP-I 和 HP-II 高压相。尽管空间群保持不变, 但结构压缩和配位环境重构显著增强了链间耦合, 使体系逐渐由准一维结构向更高维电子网络演化。

与结构演化相伴, A1 实验站的高压电输运测量揭示 CrSbSe_3 中连续的电子态转变: 材料首先

在 15.3 GPa 左右由绝缘态转为半金属态，27.1 GPa 左右完成金属化。随着金属性增强，超导态于约 32.8 GPa 出现，临界温度随压强升高逐渐增加，在 57.9 GPa 附近达到最高值约 7.7 K，随后呈现下降趋势，形成典型的穹顶状超导相图（图 2a）。单晶样品测量得到的零温上临界场约为 2.9 T，结合其他实验结果支持其具有常规声子介导超导特征，7.7 K 的最高 T_c 在 Cr 基超导体中排第三（图 2b）。

进一步的高压拉曼光谱和第一性原理计算表明，压强诱导的晶格动力学演化以及电子结构重构共同促进了超导态的形成。压强作用下，[SbSe₃]局域配位环境发生变化，相关声子模式出现软化，同时费米能级附近 Cr-*d* 和 Se-*p* 轨道贡献增强，Se-Cr 轨道杂化加强，为超导配对提供了有利条件。该工作不仅丰富了铬基超导体的结构多样性，也表明低维范德华磁性材料中可能存在可通过压强激活的隐藏超导态，为探索新型量子物态提供了新的路径^[25]。

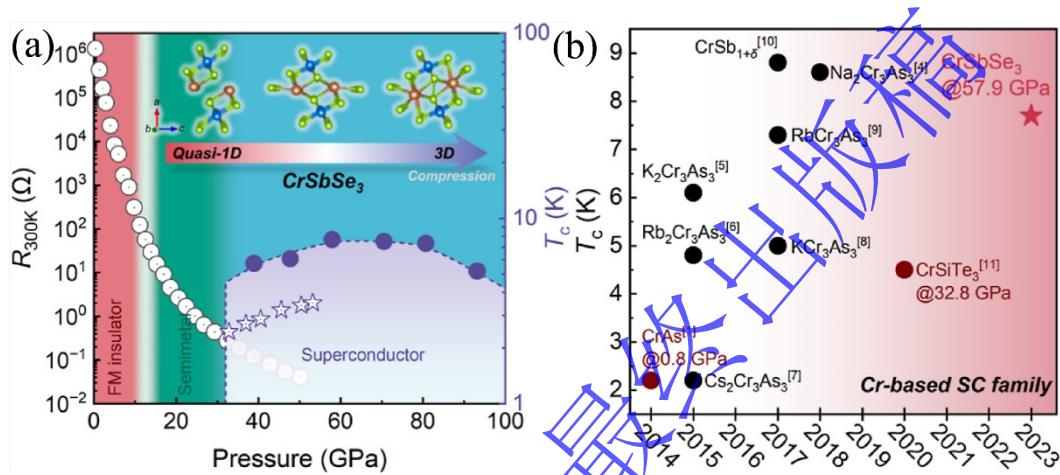


图 2 (a) CrSbSe₃ 在压强下的相图，经历了两次同结构相变之后，它从准一维链状结构转变为三维结构，同时伴随着超导电性的出现；(b) 已知的 Cr 基超导体的发现年份与超导转变温度^[25]。

Fig. 2 (a) Phase diagram of CrSbSe₃ under pressure. After undergoing two isostructural phase transitions, it transforms from a quasi-one-dimensional chain-like structure to a three-dimensional structure, accompanied by the emergence of superconductivity. (b) Superconducting transition temperature versus discovery year for known Cr-based superconductors^[25].

2.1.2 CrPSe₃ 中层间滑移诱导的压致超导电性

范德华磁体因其层状结构和可调节的层间耦合，为探索低维量子态和新型电子相提供了重要平台。常压下 CrPSe₃ 属于典型的范德华反铁磁体，具有单斜 *C2/m* 结构，由层内 [CrSe₆] 八面体和 [P₂Se₆] 二聚体构成蜂窝状磁性网络，层间通过范德华相互作用连接。其 Cr²⁺ 离子处于高自旋态 (*S* = 2)，在约 145 K 发生反铁磁转变，是 MPX₃ 族材料中具有独特磁结构的代表体系。

Li 等利用高压电输运结合结构表征研究了 CrPSe₃ 在压强下的电子态演化，发现层间滑移诱导了从绝缘态到半金属态再到金属态的连续转变，并在高压条件下观察到可能的超导转变^[26]。原位 XRD 与单晶衍射结果表明，CrPSe₃ 在加压过程中经历了两个连续结构相变过程：~6 GPa 进入 HP-I 相，该过程主要表现为层间滑移和堆垛方式调整，而晶体空间群仍为 *C2/m*；进一步加压至 ~22.9 GPa 后进入 HP-II 相，对称性转变为三方 *P3m1*，层间距急剧塌缩，相邻层间形成 Se-Se 键，整体由二维范德华晶格向三维共价框架发生维度跨越，同时 Cr²⁺ 可能发生高自旋 (*S* = 2) 到低自旋 (*S* = 1) 的自旋态转变。

与结构演化相对应，高压电输运测量揭示了 CrPSe₃ 中连续的电子态重构过程。在 ~8.4 GPa 发生绝缘体-半金属转变；进一步加压后，在 ~12.7 GPa 出现类密度波 (DW-like) 有序的温度反常，被认为与费米面重构以及电子有序态演化有关；随着压强的继续增加，约 21.2 GPa 出现电阻陡降，

标志可能超导的出现, 临界温度随压强增加逐渐升高, 在 30.1 GPa 附近达到最大值约 5.8 K。与此同时, 异常电子态逐渐被抑制, 暗示不同电子序之间可能存在竞争关系。由于目前尚未观察到严格意义上的零电阻状态, 该研究将其谨慎描述为“可能超导态”。

磁输运和理论分析进一步揭示了压强诱导超导行为的可能机制。Ginzburg–Landau 分析得到的零温上临界场约为 1 T 量级, 低于泡利顺磁极限, 支持常规配对机制的可能性; 同时, 正常态电阻表现出近似线性的温度依赖, 显示出非费米液体行为特征。卸压后的 HAADF-STEM (高角度环形暗场扫描透射电子显微镜) 表征进一步证明, 高压诱导的层间滑移具有一定不可逆性, 使材料保留增强的导电性质和不同于初始结构的电子态。第一性原理计算表明, 压强作用下 Cr-*d* 和 Se-*p* 轨道杂化增强, 同时层间耦合加强, 共同促进了金属性增强以及可能超导态的形成。该研究表明, 压强诱导的层间滑移可有效调控范德华磁性材料的电子结构, 为探索低维材料中的潜在超导态提供了途径^[26]。

2.1.3 RbMgBi 中压强诱导的两个超导相

层状拓扑材料因其丰富的电子结构和强自旋轨道耦合效应, 为探索压强调控下的新型量子态提供了重要平台。Chen 等人利用高压输运和磁性测量研究了层状半金属 RbMgBi, 发现压强能够诱导两个连续的超导相, 并揭示了结构演化、费米面重构与超导增强之间的关联^[27]。

常压下, RbMgBi 结晶于四方 $P4/nmm$ 空间群, 由 Mg-Bi 层和层间 Rb 层交替堆叠形成, 重元素 Bi 引入的强自旋轨道耦合使其具有拓扑半金属性。在加压作用下, 高压电阻测量发现 RbMgBi 经历了连续的超演化过程: 在约 4.5 GPa 出现第一个超导相 (SC-I), 零电阻转变温度达到约 6.6 K。随着压强进一步增加, 第二个超导相 (SC-II) 在约 10.4 GPa 附近出现, 其临界温度进一步提高, 两个超导区域在一定压强范围内共存, 最终在更高压强下由 SC-II 相占主导。

为了进一步验证 RbMgBi 超导态的体相性质, 高压交流磁化率测量在超导转变附近观察到了明显抗磁响应, 其信号强度与标准 Pb 参考样品相当, 证明压强诱导超导对应真实的体超导转变。磁场下的电输运测量表明, SC-I 相的零温上临界场超过简单泡利顺磁极限, 提示较强的电子关联或自旋-轨道耦合可能参与超导态的形成。

高压 X 射线衍射结合结构精修表明, RbMgBi 在约 5 GPa 附近发生由四方 $P4/nmm$ 向正交 $Cmcm$ 结构的转变, 并伴随层间距离压缩和 Mg-Bi 配位环境重构。结构变化显著增强了层间耦合, 并改变了费米能级附近的电子态分布, 为两个超导相的形成提供了结构基础。与此同时, 正常态电阻和霍尔系数随压强发生明显演化, 表明体系经历了显著的载流子重构过程: 载流子类型由空穴主导逐渐转变为电子贡献占优, 反映出压强诱导的费米面拓扑变化。

第一性原理计算 (包含自旋轨道耦合) 表明, 压强诱导的结构转变伴随着电子结构重构。常压 $P4/nmm$ 相中的拓扑特征在加压后逐渐消失, 而进入 $Cmcm$ 相后, Mg-Bi 键合环境变化导致费米面附近电子态重新分布。随着更多 Mg-Bi 轨道参与费米面贡献, 电子态密度和配对相互作用增强, 从而推动 SC-I 向 SC-II 转变。

该工作揭示了层状 RbMgBi 中结构相变、费米面重构与超导增强之间的内在联系, 为通过压强实现结构—电子协同调控和设计新型超导材料提供了重要参考^[27]。

2.2 镍氧化物中压强诱导的超导电性

2.2.1 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中压强诱导超导态的调控与电子起源

$\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 作为近年来受到广泛关注的层状镍氧化物体系, 在高压条件下表现出超过液氮温度的超导转变, 为探索新型高温超导机制提供了重要平台^[28–34]。然而, 由于样品质量、氧含量以及压强条件等因素的影响, 早期实验中观察到的高压超导信号存在一定不可重复性。围绕这一问题, Zhou 等人利用高压输运、调制交流磁化率以及微观结构表征等手段, 对 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶中近 80 K 超导迹象的可重复性和起源进行了系统研究^[35]。

常压下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 属正交晶系 $Amam$ 空间群, 表现出金属性输运行为; 加压后, 在约 10 GPa 以

上出现超导转变, 同时伴随正常态电子有序行为的演化: 密度波 (DW) 类相变逐渐被压制、而自旋密度波 (SDW) 类相变温度反而升高。高压调制交流磁化率测量观察到了与超导转变对应的抗磁响应, 但超导抗磁信号对应的体积分数仅约 1%, 且直流磁化率与未调制交流磁化率均未观察到明显的体超导信号, 表明该体系中的超导区域可能以局域或丝状形式存在。霍尔系数 R_H 在整个压强区间保持正值, 但在 P_c 附近出现突然下降, 暗示载流子类型或数量的转变与结构相变及氧空位 /Ni 价态变化有关。

进一步的扫描透射电子显微镜 (STEM) 揭示样品主相为 327 相 ($\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$, 双层堆垛), 还存在少量的 4310 相 ($\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 和 214 相 (La_2NiO_4)。结合高压输运结果, 研究表明观察到的超导行为很可能与 327 相与 4310 相之间的界面区域密切相关。通过电化学方法系统调节多晶样品氧含量, 发现超导仅出现在氧含量 6.88~7.42 窗口内 (图 3a), 在此窗口外正常态呈半导体行为, 超导信号消失 (图 3b-e)。进入窗口内则呈金属行为且超导 T_c 峰值几乎不变。这些结果揭示了氧含量、相组成以及局域结构环境对于稳定 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 高压超导态的重要作用, 为理解该镍酸盐高温超导机制以及寻找新型 3d 过渡金属超导体提供了重要线索^[36-40]。

为了进一步理解压强诱导超导的电子起源, Cai 等人利用高压低温同步辐射 X 射线吸收谱 (XAS) 研究了 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中镍离子平均价态随压强的演化行为^[35]。结果表明, 在 20 K 下, 单晶和多晶样品中 Ni 离子的平均价态在所研究的压强范围内均保持在 +2.5 附近, 表明压致超导并未伴随明显的 Ni 平均价态变化。相比之下, Ni K 边吸收谱积分面积随压强的变化在约 12.5 GPa 附近出现明显拐点, 该压强与高压 XRD 观察到的结构相变压强一致。结合压强-温度相图分析, 研究表明结构相变以及伴随的电子结构重构, 是抑制 DW/SDW 竞争序并促进超导态出现的关键因^[37,41,42]。

上述研究表明, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中的高压超导行为受到氧含量、局域结构以及电子有序态之间复杂耦合的共同影响。A1 实验站在该体系研究中提供了高压低温输运测量和样品制备支持, 为探索镍氧化物超导态的稳定性及其调控机制提供了重要实验基础。相关工作也展示了综合极端条件平台在研究复杂关联电子体系中的应用价值^[35]。

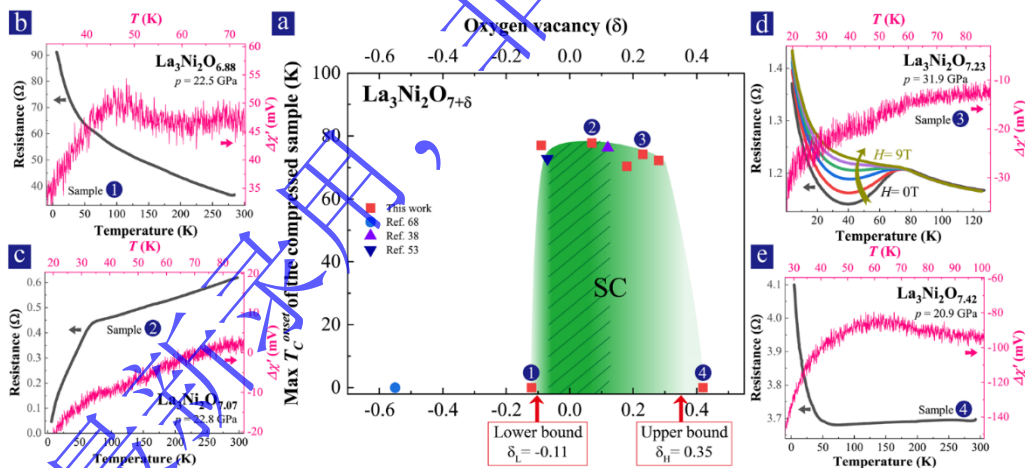


图 3 (a) 在不同氧含量的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 样品中, 最高超导转变温度 T_c 与氧含量的关系图。(b-e) 不同氧含量样品在压强下的电阻和磁化率数据^[35]。

Fig. 3 (a) Maximum superconducting transition temperature T_c as a function of oxygen content in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ samples with different oxygen contents. (b-e) Resistance and magnetic susceptibility data under pressure for samples with varying oxygen content^[35].

2.2.2 四方相 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$ 中压强诱导电子重构驱动超导

Ruddlesden-Popper (R-P) 相双层镍酸盐 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的高压超导通常被认为与压强诱导的正交-四方结构相变以及 Ni-O-Ni 键角拉直密切相关。然而, 结构相变是否是超导产生的必要条件仍存在争议。针对这一问题, Gao 等人通过高压氧退火制备了纯四方 $I4/mmm$ - $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$ 多晶样品, 并结合

高压原位同步辐射 XRD、电输运和交流磁化率测量系统研究了其超导行为^[43]。结果表明，四方相 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$ 在约 7 GPa 出现超导转变， T_c 随压强升高达到约 75 K 的最大值，并在更高压强下逐渐降低；低温 XRD 显示样品在整个超导压强范围内始终保持 $I4/mmm$ 结构，未发生结构相变，交流磁化率进一步证实了超导性的存在。

为探究四方结构与超导之间的关系，进一步开展了 Co 掺杂实验。尽管掺杂样品仍保持四方结构，但 5% Co 掺杂使 T_c 显著降低至约 37 K，而 10% Co 掺杂则完全抑制超导，表明四方对称性本身并非超导产生的决定因素。结合 DFT+DMFT（密度泛函理论+动力学平均场理论）计算发现，压强驱动的 Ni-3 d_z 轨道重构是超导形成的关键：Ni-3 d_z 衍生 γ 平带随压强升高逐渐上移，并在超导出现的压强区间穿越费米能级实现轨道金属化，形成新的费米面结构。因此，该研究揭示了电子结构重构而非结构相变在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$ 高压超导中的核心作用，为理解 R-P 镍酸盐超导机制提供了重要依据^[43]。

2.3 综合极端条件下关联量子态的演化与调控

2.3.1 MnSb_2S_4 中反铁磁与光电导的双重压致增强

低维磁性材料中，磁序、电子结构和光电响应之间存在复杂耦合关系，压强为调控这些自由度提供了连续可调的手段。Li 等人利用高压综合表征研究了准一维反铁磁体 MnSb_2S_4 ，发现压强能够同时增强磁有序和光电响应，并进一步诱导超导态的产生，为探索多自由度耦合量子体系提供了新的材料平台^[44]。

常压下， MnSb_2S_4 属于单斜晶系 $C2/m$ 空间群，其结构由沿 b 轴方向延伸的 $[\text{MnS}_6]$ 八面体和 $[\text{SbS}_3]$ 金字塔构成准一维链，链间通过范德华作用连接。该材料表现为螺旋磁有序反铁磁体，奈尔温度约为 27 K，并具有由磁结构诱导的铁电极化特征。磁性测量表明， Mn^{2+} 处于高自旋状态，其磁行为受到准一维结构和弱磁阻挫效应的共同影响。

在压强作用下， MnSb_2S_4 表现出显著的电子和磁性质演化。随着压强升高，材料逐渐由绝缘态转变为金属态；在约 30 GPa 时，电阻较常压下降近 8 个数量级。与此同时，磁有序相关输运异常随压强增强，奈尔温度持续升高，并在约 30.4 GPa 达到约 170 K，较常压提高超过 6 倍，显示出压强对磁交换作用的显著增强（图 4a）。

除磁性质外，压强还显著调控了 MnSb_2S_4 的光电响应。在约 30 GPa 附近，光电流由初始纳安量级提升至毫安量级，并发生由正光电导到负光电导的转变，形成可调控的光电响应开关。结合霍尔测量和输运分析，研究表明该转变主要来源于压强诱导电子结构变化以及光热效应增强，而非简单的载流子类型转换。

高压结构表征显示， MnSb_2S_4 在整个压强范围内保持 $C2/m$ 空间群，但局域结构环境发生持续调整。Raman 光谱和 XRD 结果表明，压强诱导的局域无序演化、晶格压缩以及振动模式变化与电子金属化过程密切相关（图 4b）。第一性原理计算进一步表明，压强作用下体系带隙逐渐减小并最终闭合，费米能级附近 Mn- d 和 S- p 轨道贡献增强，电子结构由低维局域态向更强三维耦合状态演化。同时， MnS_6 八面体局域畸变逐渐减弱，增强了磁交换作用，为磁有序温度的大幅提升提供了结构基础。

进一步加压至约 72 GPa 后， MnSb_2S_4 中出现超导转变，临界温度约为 1 K，并随压强升高继续增加，在 95 GPa 达到约 1.4 K。Ginzburg-Landau 分析得到零温上临界场约 1.1 T，对应相干长度约 17 nm。由于目前尚未观察到严格零电阻状态，该超导态仍需进一步研究确认，其低维结构和压强不均匀性可能影响超导通道的形成。

该工作不仅发现了 MnSb_2S_4 压致磁-光共增强的核心机制在于压强驱动的轨道与自旋交叉，以及两种不等价 $[\text{MnS}_6]$ 八面体的反向 Jahn-Teller 畸变；也刷新了人们对准一维反铁磁体的认知，为理解低维度关联系统中自由度之间的复杂耦合提供了理想平台；更展示了压强在同时调节磁、电、光三种自由度方面的强大威力。^[44]

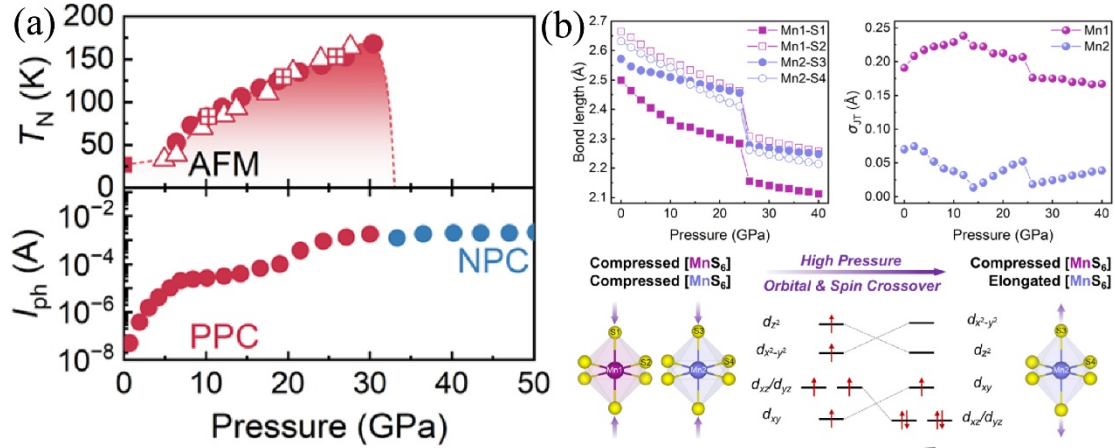


图4 (a) MnSb_2S_4 的压强-温度相图, 展示了磁有序温度 (T_N) 和光电导电流 (I_{ph}) 随压强的变化; (b) MnSb_2S_4 中两个不等价的 $[\text{MnS}_6]$ 八面体在压强下的键长变化和八面体畸变演化示意图^[44]。
Fig. 4 (a) Pressure–temperature phase diagram of MnSb_2S_4 , showing the magnetic ordering temperature (T_N) and photoconductive current (I_{ph}) as functions of pressure. (b) Evolution of bond lengths and octahedral distortion of the two inequivalent $[\text{MnS}_6]$ octahedra in MnSb_2S_4 under pressure^[44].

2.3.2 超高压强下 Nb_3Sn 超导电性与电子结构的演化

Nb_3Sn 是一种典型的 A15 型金属间化合物超导体, 因其较高的临界温度、上临界场以及良好的工程应用性能, 长期以来被广泛应用于超导磁体领域^[45]。其在超高压强下的超导稳定性和电子结构演化为理解压强调控超导机制提供了重要平台。Chen 等人利用 A1 实验站开展了 Nb_3Sn 在超高压强下原位电阻和同步辐射 XRD 研究, 并结合第一性原理计算系统揭示了其超高压条件下的超导演化规律^[46]。

常压下, Nb_3Sn 属于立方晶系 $P\bar{m}3n$ 空间群, 具有约 18 K 的超导转变温度。高压电输运测量表明, 随着压强升高, T_c 持续降低, 由低压下约 15 K 逐渐下降至 119.6 GPa 时约 7.7 K; 然而, 超导态在超过 140 GPa 的极高压强下仍然保持, 表明 Nb_3Sn 具有优异的压强稳定性 (图 5a)。同时, 零温上临界场 $\mu_0 H_{c2}(0)$ 随压强增加逐渐降低, 由约 10 T 量级下降至 2.45 T (图 5b), 表明其在极端条件下的潜在应用价值。

高压 XRD 结果显示, Nb_3Sn 在 217.4 GPa 范围内始终保持 A15 结构, 未发生明显结构相变, 说明其超导性质演化主要来源于电子结构变化而非晶体结构转变。第一性原理计算进一步表明, 压强作用下费米能级附近 Nb-d 轨道贡献逐渐减弱, 导致电子态密度降低; 同时电声耦合强度随压强增加而下降, 而声子频率升高。基于电子-声子耦合理论计算得到的 T_c 演化趋势与实验结果一致, 表明超导转变温度降低主要源于电声耦合减弱此外, 理论模拟表明外加应变会进一步影响 Nb_3Sn 中的电子结构和超导性能, 为理解压强、应变和超导态之间的关系提供了新的视角。该工作展示了 A1 实验站在超高压强条件下开展稳定电输运测量和结构关联研究的能力。通过结合高压输运、同步结构表征和理论计算, 系统阐明了 Nb_3Sn 在极端压强下的超导稳健性及其电子结构根源, 并为下一代超导器件中薄膜的设计提供了理论依据^[46]。

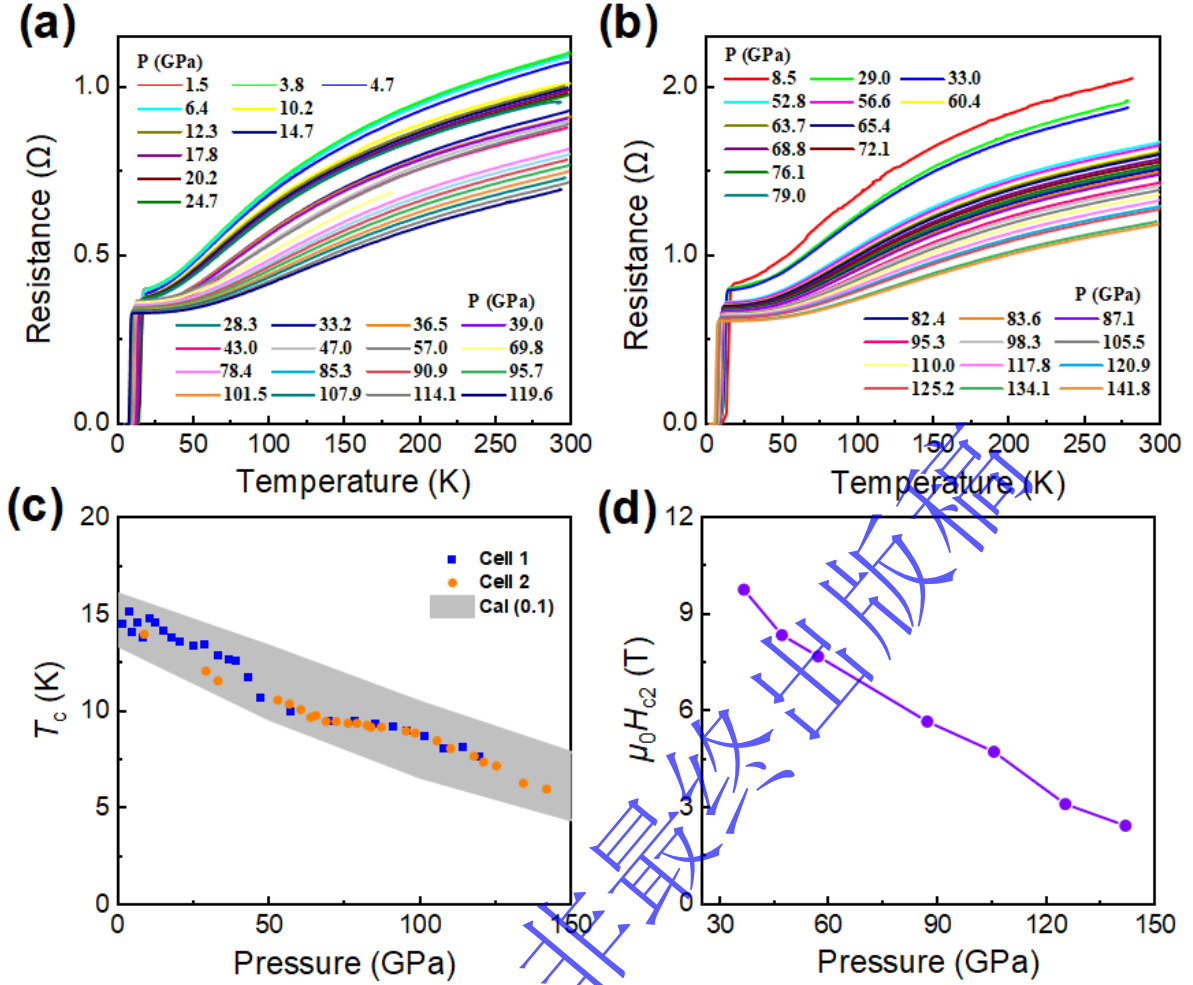


图5 (a-b) 两轮独立实验测得的 Nb₃Sn 的电阻-温度曲线随压强的变化; (c) Nb₃Sn 测量得到的超导转变温度与计算得到的结果对比; (d) Nb₃Sn 测量得到的上临界磁场随压强的变化^[46]。

Fig. 5 (a-b) Resistance-temperature curves of Nb₃Sn at various pressures measured in two independent experiments; (c) Comparison between the measured superconducting transition temperature of Nb₃Sn and calculated results; (d) Measured upper critical magnetic field of Nb₃Sn as a function of pressure^[46].

2.3.3 高熵陶瓷 Ti_{0.2}Zr_{0.2}Nb_{0.2}Mo_{0.2}Ta_{0.2}C 中的超导电性

高熵材料凭借多组元协同效应、结构稳定性以及可调控的电子结构,近年来成为探索新型量子态的重要材料体系。2024年,Zeng等人报道了高熵碳化物 Ti_{0.2}Zr_{0.2}Nb_{0.2}Mo_{0.2}Ta_{0.2}C ($x=1$ 和0.8)中的超导性,并发现其具有潜在的非平庸能带拓扑特征,为研究高熵材料中的超导与拓扑态耦合提供了新的平台^[47,48]。

该体系形成 NaCl 型高熵固溶体结构(空间群 $Fm\bar{3}m$),五种过渡金属元素随机占据阳离子位,而 C 占据阴离子位。电阻、磁化率及比热测量证实了其体超导性质,其中零电阻转变温度约为 4.00 K ($x=1$)和 2.65 K ($x=0.8$),磁屏蔽体积分数接近 100%。比热跃变 $\Delta C/\gamma T_c$ 接近 BCS 弱耦合理论值,结合较小的电子-声子耦合常数 λ_{ep} (约 0.46-0.49),表明该体系属于由电子-声子相互作用驱动的常规弱耦合超导体。其上临界场低于泡利极限,且较大的 GL(金兹堡-朗道)参数 ($K_{GL}(0) > 10$)表明该材料为强 II 型超导体。

值得注意的是,该体系表现出优异的压强稳定性,在 82.5 GPa 压强范围内超导转变温度仅发生约 0.3 K 变化,显示出高熵结构对超导态的稳定作用。第一性原理计算进一步揭示,该材料在高对称方向存在 II 型狄拉克交叉,主要来源于过渡金属 d 轨道与 C 的 p 轨道杂化;考虑自旋轨道耦

合后,能带交叉发生轻微劈裂,提示其可能具有潜在拓扑电子特征。费米能级附近电子态主要由过渡金属 d 电子贡献,说明超导配对与金属 d 态密切相关。

该工作拓展了高熵陶瓷在超导和拓扑量子材料领域的应用范围,展示了高熵结构调控电子态和稳定超导相的潜力,也为研究高熵材料中超导与拓扑耦合、开发新型量子器件提供了材料平台[47,48]。

2.3.4 其他关联量子态的极端条件调控

除基于高压电输运开展的研究外,A1 实验站还集成了高压低温比热等多种物性测量手段,为探索极端条件下关联量子态的演化规律提供了综合实验平台。早期研究已表明,kagome 晶格磁体 Mn_3GaC 在高压和强磁场作用下可发生磁态转变,展现出丰富的磁相演化行为^[49]。在此基础上,依托 A1 实验站的高压低温综合测量能力,进一步开展了 Mn_3GaC 体系在压强、温度和磁场协同调控下的物性研究,发现压强能够诱导体系中多重自旋态之间的转变,并实现不同磁构型在压强-温度-磁场空间中的连续调控。相关研究揭示了压强对自旋排列、磁态稳定性及磁输运行为的调节作用,构建了丰富的多维相图,为理解强关联磁体中的自旋重构和探索压强驱动的新型磁功能态提供了新的途径^[50]。

此外,基于 A1 实验站发展的高压低温比热测量能力,在 Shastry-Sutherland 量子磁体 $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 中开展了极端条件下的热力学研究。作为典型的阻挫量子磁体, $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ 在压强和磁场调控下展现出丰富的量子相变行为,相关磁态演化已通过前期研究得到广泛关注^[51-53]。利用该平台的综合极端条件测量能力,Guo 等人进一步开展了高压低温比热实验,在接近量子相变区域观察到异常的低温线性比热行为,提示体系中可能存在区别于传统磁有序态的非常规低能激发。该研究为探索阻挫量子磁体中的新型量子态以及理解压强与磁场协同调控下的量子磁态演化提供了重要实验依据^[54]。

上述研究表明,A1 实验站不仅能够支持高压条件下的超导输运研究,也具备开展磁性、热力学等多维物性探测的能力,为研究极端条件诱导的关联量子态及其演化机制提供了重要实验平台。

3 展望与未来发展

基于 A1 实验站在压强、低温和强磁场协同极端条件下开展的多维物性研究,一系列关联量子现象的发现不仅拓展了对超导、磁性以及强关联电子体系的认识,也提出了许多亟待解决的重要科学问题。未来,A1 实验站将进一步发挥多参量调控和多物性测量优势,围绕极端条件下量子态调控机制、关联电子体系中新奇相的产生与演化规律,以及新型量子材料的设计与探索等方向开展深入研究。同时,随着原位测量技术和多模态表征能力的持续发展,极端条件实验有望从传统的相图探索进一步迈向对量子态微观机制的精确调控。

3.1 极端条件下新型超导态与关联电子行为的探索

高压为调控电子结构、晶格自由度以及电子关联提供了独特手段,是发现和理解新型超导态的重要途径。未来,A1 实验站将进一步拓展超导材料体系的研究范围,通过压强、温度和磁场多维参数协同调控,系统探索不同结构维度、电子关联强度以及磁性背景下超导态的形成机制。

重点科学问题包括:压强诱导超导的普适规律是什么?晶格结构变化、电子重构以及磁关联在超导形成过程中分别扮演怎样的角色?如何通过极端条件调控提高超导临界温度和临界磁场,并揭示超导配对机制?结合高压输运、磁性测量以及光谱学手段的发展,未来有望建立结构、电子态与超导性质之间更加系统的关联,为理解高温超导和设计新型超导材料提供新的路径。

3.2 关联磁态与自旋自由度的极端条件调控

近年来发现的多种压致磁相转变表明,压强可通过改变晶体结构和电子态,调节磁交换作用、自旋排列及其与其他自由度的耦合。未来研究将进一步关注压强诱导磁态转变的普适机制,探索不同电子关联体系中自旋、轨道和晶格自由度之间的耦合关系。通过结合高压磁性测量、输运测试以

及结构表征,有望建立压强驱动磁相转变的微观图像,并探索基于压强调控的新型磁功能态和量子信息应用。

3.3 范德华材料与低维量子态的极端条件调控

低维范德华材料具有丰富的层间结构自由度和高度可调的电子性质,为探索新型量子态提供了重要平台。压强能够有效调节层间距离、堆垛方式以及电子耦合强度,从而实现对低维量子态的连续调控。

未来,A1实验站将结合高压、低温和强磁场条件,系统研究层间结构演化与电子态变化之间的关系,探索压强诱导的结构重构、电子相变以及新型关联态。同时,通过与二维材料异质结构、界面工程和人工量子体系相结合,有望进一步拓展极端条件调控低维量子态的新方法。

3.4 量子临界行为与新兴关联量子态的探索

量子临界区域通常伴随着强烈的量子涨落和非常规物理行为,是发现新型量子态的重要窗口。压强作为连续调节电子关联和晶格自由度的手段,为研究量子相变、临界涨落以及非常规标度行为提供了独特机会。

未来,A1实验站将进一步发展高压低温热力学测量能力,在更广泛的强关联体系中探索量子临界行为和新型低能激发。结合比热、磁性、输运以及理论计算,有望建立极端条件下量子相变的系统研究框架,推动对量子自旋液体、分数化激发以及其他新奇量子态的深入理解。

3.5 技术支撑与平台发展

上述科学问题的深入研究依赖于极端条件实验技术的持续发展。未来,A1实验站将进一步提升多参量协同调控和多模态原位表征能力,重点发展低温强磁场条件下的角度分辨输运、磁性测量、隧道谱以及光谱学技术,实现对电子结构、磁性行为和晶格响应的综合探测。

通过实验技术升级和测量能力拓展,A1实验站将逐步从传统的极端条件物性测量平台发展为面向量子材料探索的综合研究平台。在科学问题牵引和技术创新支撑下,A1实验站将持续推动关联电子体系、新型量子材料以及极端条件物理的发展,为国内外研究者提供开放、高效、多功能的实验研究环境。

4 总 结

A1金刚石压砧实验站将高压、极低温和强磁场等极端条件集成于单一实验平台,并结合并行化输运测量能力,实现了对压强-温度-磁场(P, T, H)多维参数空间的系统探索。该平台为研究极端条件下量子材料中的电子、自旋和晶格自由度演化提供了重要实验基础,并拓展了高压物性研究的测量能力和应用范围。

本综述中介绍的代表性研究,包括压强诱导超导态的发现、超导机制的探索以及复杂磁态和关联量子态的调控,展示了A1实验站在探索涌现量子现象方面的科学价值。通过对晶格结构、电子态和自旋自由度的协同调控,该平台为理解关联量子物质中的新奇现象及其演化机制提供了新的实验途径。

作为综合极端条件实验设施的重要组成部分,A1实验站持续面向国内外科研用户开放,每年开展春季和秋季两轮用户课题申请。未来,A1实验站将持续完善多物性测量和原位表征能力,为国内外用户开展超导、拓扑量子态及其他强关联现象研究提供实验支持。

致谢

衷心感谢综合极端条件装置工程和维护团队提供的专业技术支持。感谢本文中综述所涉及的发表文章的作者(按姓氏排序),邓司浩研究员、段德芳教授、胡江平研究员、Qingyu Kong博士、罗惠霞教授、毛河光院士、任治安研究员、胜献雷教授、孙力玲研究员、孙莹教授、王聪教授、王永刚教授、姚道新教授、应天平研究员、于佳助理研究员等在与本综述相关的研究中做出的贡献和给

予的帮助。向所有用户和合作者表示感谢,他们的科学贡献和反馈对该实验站的进步和升级至关重要。最后,感谢所在综合极端条件装置为维持开放和高效的研究环境所提供的持续支持。

参考文献

- [1] JAYARAMAN A. Diamond anvil cell and high-pressure physical investigations[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1983, 55(1):65–108.
- [2] MAO H, CHEN X-J, DING Y, et al. Solids, liquids, and gases under high pressure[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(1).
- [3] Synergetic Extreme Condition User Facility (SECUF)[EB/OL]. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences. <https://secuf.iphy.ac.cn/en>, 2026.
- [4] GUO J, WU Q, SUN L. Advanced high-pressure transport measurement system integrated with low temperature and magnetic field[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(7):77402.
- [5] EREMETS M I, MINKOV V S, DROZDOV A P, et al. The characterization of superconductivity under high pressure[J]. *Nature materials*, 2024, 23(1):26–27.
- [6] DROZDOV A P, KONG P P, MINKOV V S, et al. Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures[J]. *Nature*, 2019, 569(7757):528–531.
- [7] DROZDOV A P, EREMETS M I, TROYAN I A, et al. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system[J]. *Nature*, 2015, 525(7567):73–76.
- [8] MAO H. Pressure-induced hydrogen-dominant high-temperature superconductors[J]. *National science review*, 2024, 11(7):nwae004.
- [9] ZHAO W, HUANG X, ZHANG Z, et al. Superconducting ternary hydrides: progress and challenges[J]. *National science review*, 2024, 11(7):nwad307.
- [10] WANG H, LI X, GAO G, et al. Hydrogen-rich superconductors at high pressures[J]. *WIREs Computational Molecular Science*, 2018, 8(1).
- [11] 吴伟, 程金光, 雒建林. CrAs—第一个 Cr 基化合物超导体的发现[J]. *物理*, 2016, 45(2):73–79. <https://wuli.iphy.ac.cn/cn/article/doi/10.7693/wl20160201>.
- [12] WU W, CHENG J, MATSUBAYASHI K, et al. Superconductivity in the vicinity of antiferromagnetic order in CrAs[J]. *Nature communications*, 2014, 5:5508.
- [13] CHENG J, LUO J. Pressure-induced superconductivity in CrAs and MnP[J]. *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, 2017, 29(38):383003.
- [14] LUO J, CHENG J. Special issue on pressure-induced superconductivity in CrAs and MnP[J]. *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal*, 2017, 29(44):440301.
- [15] WEI Y, QI W, LI DING S. Superconductivities of pressurized iron pnictide superconductors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(3):37402.
- [16] CHU C W, LORENZ B. High pressure studies on Fe-pnictide superconductors[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2009, 469(9-12):385–395.
- [17] GAVRILIUK A G, MIRONOVICH A A, STRUZHNIKIN V V. Miniature diamond anvil cell for broad range of high pressure measurements[J]. *The Review of scientific instruments*, 2009, 80(4):43906.
- [18] ZHOU Y, KIM D-J, ROSA P F S, et al. Pressure-induced quantum phase transitions in a YbB₆ single crystal[J]. *Physical Review B*, 2015, 92(24).
- [19] ZHOU Y, ROSA P F S, GUO J, et al. Hall-coefficient diagnostics of the surface state in pressurized SmB₆[J]. *Physical Review B*, 2020, 101(12).
- [20] KOTEGAWA H, NAKAHARA S, TOU H, et al. Superconductivity of 2.2 K under Pressure in Helimagnet CrAs[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2014, 83(9):93702.

- [21] LIU Y, LIU Z-Y, BAO J-K, et al. Superconductivity under pressure in a chromium-based kagome metal[J]. *Nature*, 2024, 632(8027):1032–1037.
- [22] NOCE C. The chromium pnictide materials: A tunable platform for exploring new exciting phenomena[J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2020, 130(6):67001.
- [23] CHEN R Y, WANG N L. Progress in Cr- and Mn-based superconductors: a key issues review[J]. *Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain)*, 2019, 82(1):12503.
- [24] CAO G-H, BAO J-K, TANG Z-T, et al. Peculiar properties of -chain-based superconductors[J]. *Philosophical Magazine*, 2017, 97(8):591–611.
- [25] LI C, WANG Y, LIU K, et al. Superconductivity in Quasi-One-Dimensional Ferromagnet CrSbSe₃ under High Pressure[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(14):9688–9696.
- [26] LI C, LI C, TANG Z, et al. Superconductivity in Honeycomb Antiferromagnet CrPSe₃ via Irreversible Pressure-Mediated Interlayer Sliding[J]. *ACS nano*, 2026, 20(6):5072–5081.
- [27] CHEN X, CHEN W, YANG Y, et al. Pressure-induced superconducting phases and electronic reconstruction in layered RbMgBi[J]. *Physical Review B*, 2025, 112(1).
- [28] SUN H, HUO M, HU X, et al. Signatures of superconductivity near 80 K in a nickelate under high pressure[J]. *Nature*, 2023, 621(7979):493–498.
- [29] ZHU Y, DI PENG, ZHANG E, et al. Superconductivity in pressurized trilayer La₄Ni₃O_{10-δ} single crystals[J]. *Nature*, 2024, 631(8021):531–536.
- [30] ZHANG Y, SU D, HUANG Y, et al. High-temperature superconductivity with zero resistance and strange-metal behaviour in La₃Ni₂O_{7-δ}[J]. *Nature Physics*, 2024, 20(8):1269–1273.
- [31] WANG N, WANG G, SHEN X, et al. Bulk high-temperature superconductivity in pressurized tetragonal La₂PrNi₂O₇[J]. *Nature*, 2024, 634(8034):579–584.
- [32] WANG G, WANG N N, SHEN X L, et al. Pressure-Induced Superconductivity In Polycrystalline La₃Ni₂O_{7-δ}[J]. *Physical Review X*, 2024, 14(1).
- [33] PUPHAL P, REISS P, ENDERLEIN N, et al. Unconventional Crystal Structure of the High-Pressure Superconductor La₃Ni₂O₇[J]. *Physical review letters*, 2024, 133(14):146002.
- [34] WANG 王 M 猛, WEN 文 H 海, WU 吴 T 涛, et al. Normal and Superconducting Properties of La₃Ni₂O₇[J]. *Chinese Physics Letters*, 2024, 41(7):77402.
- [35] ZHOU Y, GUO J, CAI S, et al. Investigations of key issues on the reproducibility of high- T_c superconductivity emerging from compressed La₃Ni₂O₇[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2025, 10(2):27801.
- [36] GUO J, CHEN Y, WANG Y, et al. Revealing superconducting gap in La₃Ni₂O_{7-δ} by Andreev reflection spectroscopy under high pressure[J]. *Nature communications*, 2025, 16(1):10838.
- [37] CAI S, ZHOU Y, SUN H, et al. Low-temperature mean valence of nickel ions in pressurized La₃Ni₂O₇[J]. *Physical Review B*, 2025, 111(10).
- [38] ZHENG Y, MO S, WU W. Recent advances and prospects in theoretical study of bilayer nickelate superconductor La₃Ni₂O₇[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74(17):177403.
- [39] XU S, WANG H, HUO M, et al. Collapse of density wave and emergence of superconductivity in pressurized-La₄Ni₃O₁₀ evidenced by ultrafast spectroscopy[J]. *Nature communications*, 2025, 16(1):7039.
- [40] DI PENG, BIAN Y, XING Z, et al. Isotropic superconductivity in pressurized trilayer nickelate La₄Ni₃O₁₀[J]. 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2502.14410.
- [41] MENG Y, YANG Y, SUN H, et al. Density-wave-like gap evolution in La₃Ni₂O₇ under high pressure revealed by ultrafast optical spectroscopy[J]. *Nature communications*, 2024, 15(1):10408.
- [42] WANG Y, JIANG K, YING J, et al. Recent progress in nickelate superconductors[J]. *National science*

- review, 2025, 12(10):nwaf373.
- [43] GAO Y, CHEN W, LIU Q, et al. Decoupling Structural and Electronic Drivers of Superconductivity in Tetragonal $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$ [J]. Journal of the American Chemical Society, 2026. DOI: 10.1021/jacs.6c10135.
- [44] LI C, LIU K, JIANG D, et al. Concurrent Pressure-Enhanced Magnetic Order and Photoconductivity in Quasi-One-Dimensional Antiferromagnet MnSb_2S_4 [J]. Journal of the American Chemical Society, 2026, 148(6):6560–6568.
- [45] WU L-N, YANG S-T, SHEN J-K, et al. Coexistence of superconductivity and charge density wave instability in $\text{A15-Nb}_3\text{Sn}$ [J]. Physical chemistry chemical physics : PCCP, 2023, 25(47):32452–32459.
- [46] CHEN W, CHEN X, GAO Y, et al. Evolution of superconductivity and corresponding electronic structure in pressurized Nb_3Sn [J]. Superconductivity, 2025, 13:100153.
- [47] ZENG L, HU X, ZHOU Y, et al. Superconductivity in the High-Entropy Ceramics $\text{Ti}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Mo}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{C}_x$ with Possible Nontrivial Band Topology[J]. Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), 2024, 11(5):e2305054.
- [48] ZENG L, LI L, LI K, et al. Recent advances in high-entropy superconductors[J]. NPG Asia Materials, 2024, 16(1). DOI: 10.1038/s41427-024-00579-z.
- [49] KAMISHIMA K, BARTASHEVICH M I, GOTO T, et al. Magnetic Behavior of Mn_3GaC under High Magnetic Field and High Pressure[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1998, 67(5):1748–1754.
- [50] AN S, YANG F, SUN Y, et al. Emergent Multiple Spin States From Baromagnetic Effect in Strongly Correlated Magnet Mn_3GaC [J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2025, 37(18):e2420502.
- [51] GUO J, WANG P, HUANG C, et al. Deconfined quantum critical point lost in pressurized $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ [J]. Communications Physics, 2025, 8(1).
- [52] SHI Z, DISSANAYAKE S, CORBOZ P, et al. Discovery of quantum phases in the Shastry-Sutherland compound $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ under extreme conditions of field and pressure[J]. Nature communications, 2022, 13(1):2301.
- [53] GUO J, SUN G, ZHAO B, et al. Quantum Phases of $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ from High-Pressure Thermodynamics[J]. Physical review letters, 2020, 124(20):206602.
- [54] GUO J, WANG P, HUANG C, et al. T-linear specific heat in pressurized and magnetized Shastry-Sutherland Mott insulator $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ [J]. 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2602.18229.

Applications of High-Pressure Electrical Transport in Exploring Quantum States of Matter—The A1 Experimental Station at the Huairou Synergetic Extreme

Condition User Facility

ZHOU Yazhou¹, CHEN Shurong^{1,2}, GUO Jing¹

(1. *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

2. *Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu, China*)

Abstract: Synergetic Extreme Conditions, including high pressure, ultra-low temperature, and strong magnetic fields, provide powerful experimental approaches for exploring novel quantum states of matter and tuning quantum phase transitions. This paper introduces the A1 diamond anvil cell (DAC) experimental station at the Huairou Synergetic Extreme Condition User Facility (SECUF). Designed for high-pressure electrical transport studies under extreme conditions, this platform integrates six parallel miniature high-pressure cells, enabling electrical transport measurements on multiple samples under pressures exceeding 100 GPa, temperatures down to 500 mK, and magnetic fields up to 14 T. The paper systematically describes the instrument design, experimental procedures, and capabilities of the A1 station for conducting quantum material research under combined extreme environments and summarizes its representative scientific achievements. Key advances enabled by this platform include the discovery of new chromium-based superconductors, reproducible pressure-induced superconductivity in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$, structural reconstruction and superconducting evolution in layered quantum materials, as well as the manipulation of superconducting electronic structures and correlated magnetic states under high pressure. Furthermore, by integrating complementary measurement techniques such as high-pressure low-temperature calorimetry, the A1 station has expanded investigations into complex spin states and other correlated quantum phenomena. These studies demonstrate the important role of high-pressure electrical transport and multimodal extreme-condition techniques in discovering novel quantum phenomena, understanding the evolution of quantum states, and exploring correlation effects in quantum materials. Finally, this paper discusses future developments of the A1 station, including multiparameter quantum-state control, *in situ* multimodal characterization, and the exploration of emerging quantum materials.

Keywords: Synergetic Extreme Condition User Facility A1 experimental station; high-pressure electrical transport; diamond anvil cell; ultra-low temperature and high magnetic field; quantum states