

专题: 镍基超导研究进展

三层镍氧化物高温超导研究进展*

张明鑫¹⁾ 裴翠颖¹⁾ 齐彦鹏^{1)2)3)4)†}

1) (上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210)

2) (上海科技大学, 量子功能材料全国重点实验室, 上海 201210)

3) (上海科技大学, 拓扑物理实验室, 上海 201210)

4) (上海科技大学, 上海高分辨电子显微学重点实验室, 上海 201210)

(2025年7月9日收到; 2025年9月9日收到修改稿)

近期, 双层镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 在压力下呈现的高温超导电性引发了广泛关注, 进一步推动了镍基超导领域的研究热潮. 对不同非常规超导体开展系统的比较研究, 有助于深化对高温超导机制的理解. 相较于铜基超导体, 镍基体材料在晶体结构、电子结构与物性行为上存在显著差异, 其实验研究亦面临更多挑战, 例如静水性对零电阻、抗磁性测试的影响, 单晶氧空位缺陷以及压力下诱导的结构相变等. 本文针对三层镍氧化物材料, 总结了高温超导研究进展及相关挑战, 为后续镍氧化物新超导体体系的研究提供了参考.

关键词: 镍基超导体, 非常规超导, 高温超导电性**PACS:** 74.25.-q, 74.70.-b, 74.62.Fj**DOI:** 10.7498/aps.74.20251258**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251258

1 引言

2019年, Li等^[1]在无限层结构 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ 镍基薄膜 (112 薄膜) 中首次观测到 9—15 K 的超导转变, 引起了广泛关注. 无限层镍基薄膜制备工艺复杂, 需要首先在衬底上生长 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_3$ (113 相) 前驱体, 随后经拓扑氢化还原转化为无限层 112 薄膜. 受还原程度等关键因素制约, 制备具有优异超导性能的高质量薄膜存在显著技术挑战. 2023年, Sun等^[2]在加压的双层堆垛 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中发现接近 80 K 的高温超导电性, 此后, 在三层镍氧化物 ($\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 和 1212 堆垛结构 ($\text{La}_5\text{Ni}_3\text{O}_{11}$) 中也陆续发现高温超导电性^[3-9], 进一步推动了镍基超导体的研究热潮. 与铜基超导体相比, 镍基体材料的物性对氧缺陷更为敏感, 其超导

通常在压力下出现, 且费米面表现为多带多轨道特征. 探索新型镍基超导体, 并系统比对不同非常规超导体之间的结构与物性特征, 将深化对于非常规超导机制的理解. 当前, 镍基超导研究尚处于起步阶段, 在单晶制备、超导测量、理论模型等方面仍面临诸多挑战, 亟待进一步探索.

本文聚焦镍氧化物在压力下的超导研究, 重点介绍近期在三层结构镍氧化物 ($n = 3$) 材料中探索高温超导的研究进展. 首先, 介绍层状钙钛矿镍氧化物材料的基本概况 (晶体结构、基本物性和氧缺陷等), 进一步介绍 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶在压力下的高温超导, 并引出相关研究挑战 (单晶中的氧缺陷和堆垛缺陷, 以及压力下静水环境对超导的影响). 其次, 在此基础上介绍三层镍氧化物 ($\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 中的超导探索, 并与双层堆垛比较. 结合已有的研究进展, 为探索新体系的镍基超导材料

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2023YFA1607400) 和国家自然科学基金 (批准号: 52272265) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiyp@shanghaitech.edu.cn

提供重要参考.

2 镍基氧化物及其超导研究背景

Ruddlesden-Popper (R-P) 相是一类具有特定层状结构的钙钛矿衍生氧化物. 以镍酸镧体系为例, 其基本化学通式为 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$, 其中 n 为整数. 图 1 展示了不同 n 值下 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 的堆垛结构示意图. 常见的 R-P 相有 La_2NiO_4 ($n = 1$, K_2NiF_4 型结构), $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ ($n = 2$), $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ ($n = 3$) 和 LaNiO_3 ($n = \infty$, 三维钙钛矿结构). 从结构角度, $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 相可视为由共顶角堆垛的 NiO_6 八面体和填充的 La 原子构成, 层内 Ni-O 面与铜基超导体中的 Cu-O 面结构类似. 随着 n 值增大, 其基本结构单元中氧化物的堆垛层相应增加. 当 $n > 1$ 时, c 方向相邻 NiO_6 八面体通过共用顶角氧连接. 受填充原子半径和层数影响, 相邻八面体之间存在倾角, 导致层内 Ni-O 面呈现褶皱特征. 从价态上分析, 随 n 值增大, Ni 离子的平均价态呈现升高趋势 (由 +2 向 +3 价过渡). 结构与价态的协同演化调控着 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 相的基态物性: 当 $n = 1$ 时, La_2NiO_4 为反铁磁绝缘体 [10,11]; 当 $n > 1$ 时, R-P 相 ($\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 基态为金属态, 并伴有自旋/电荷密度波转变 [12-15]; 当 $n = \infty$ 时,

LaNiO_3 呈现典型金属导电行为, 且无明显密度波转变 [16-18]. 此外, 实验表明 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 体系普遍存在氧空位缺陷, 且该缺陷对其物性具有显著影响 [15,17,18].

图 2(a) 展示了双层堆垛 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶在压力下的超导电性 [2]. 在小压力下, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶由金属行为转变为弱半导体行为, 压力高于 14 GPa 后开始出现超导转变. 在交流磁化率测试下, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶在约 77 K 表现出抗磁性 (图 2(b)), 表明电阻转变由超导引起. 值得注意的是, 在固体传压介质 (溴化钾) 下超导态存在剩余电阻, 引发了关于零电阻是否存在的争议. 在高压实验中, 一般使用“静水性”好坏来衡量实验腔体内的压力环境多大程度上接近理想的“静水压”状态. 理想的静水压下, 测试样品内部不存在剪切应力, 只承受均匀压缩; 而非静水压下, 不同方向施加的压力大小不一, 样品内部产生剪切应力, 进而发生形变, 可能影响物性测量结果. 考虑到静水性对超导测量的影响, 多个研究组 [19,20] 采用液体传压介质 (Daphne 7373, 甘油) 进一步测试了压力下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶的物性, 均实现了零电阻, 有力支持了 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中的超导电性. 该体系的物性具有如下关键特征: 1) 在超导转变温度之上区域, 电阻随温度呈线性依赖关系, 表明正常态为奇异金属行为 (图 2(c)); 2) 外加磁

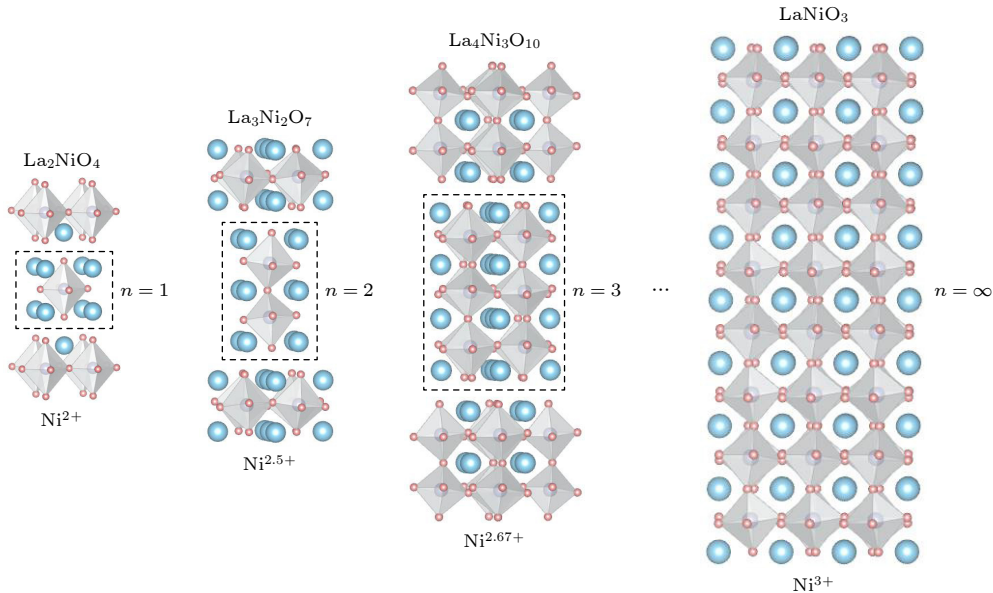


图 1 Ruddlesden-Popper 相 $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$. 从左至右分别为 La_2NiO_4 , $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 和 LaNiO_3 ; 蓝色、紫色、红色小球分别代表 La, Ni 和 O 原子, 虚线框内结构代表不同 n 值下的层数变化

Fig. 1. Ruddlesden-Popper phases $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$. From left to right: La_2NiO_4 , $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ and LaNiO_3 ; the blue, purple and red small balls represent La, Ni, and O atoms, respectively, the structures within the dashed box represent the changes in the layers under different n values.

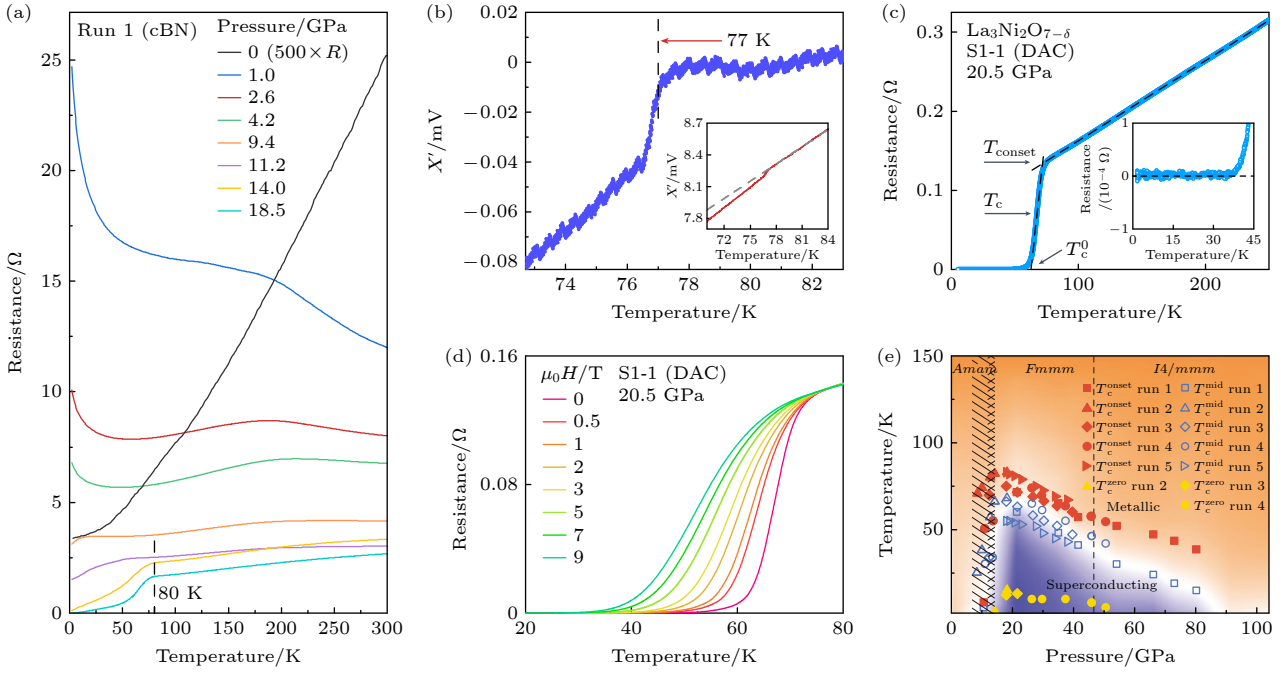


图 2 压力下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶的超导电性 (a) 固体传压介质 (立方氮化硼) 下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的电阻曲线^[2]; (b) 压力下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的交流磁化率^[2]; (c) 液体传压介质 (Daphne 7373) 下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的零电阻和奇异金属态^[19]; (d) 不同磁场下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的电阻曲线^[19]; (e) $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 在压力下的超导相图^[21]

Fig. 2. Superconductivity of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ single crystal under pressure: (a) Resistance curves of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ measured with solid as pressure-transmitting medium (cubic boron nitride)^[2]; (b) the a.c. susceptibility of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ under pressure^[2]; (c) the zero resistance and strange metal behavior of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ with liquid as pressure-transmitting medium (Daphne 7373)^[19]; (d) resistance curves of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ under various magnetic fields^[19]; (e) superconductivity phase diagram of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ under pressure^[21].

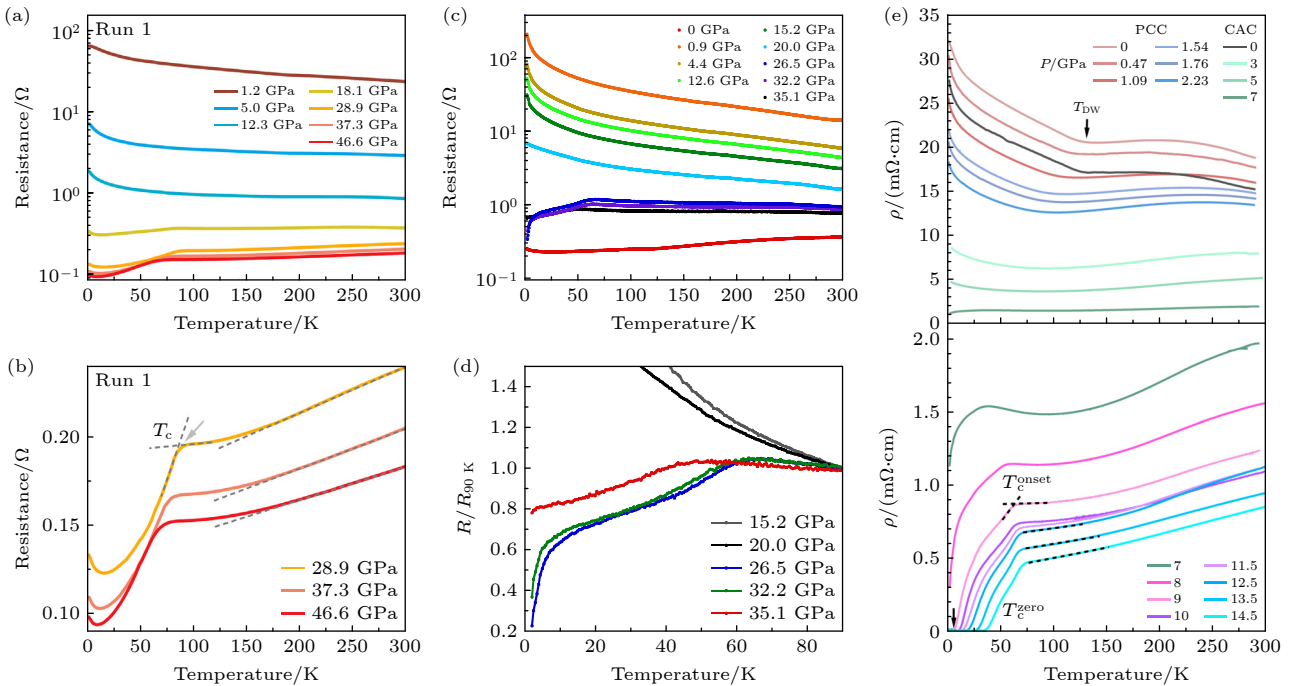


图 3 压力下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶的超导电性 (a)–(d) 固体传压介质 (氮化硼) 下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (固相反应) 的电阻曲线^[22,23]; (e) 液体传压介质 (Daphne 7373, 甘油) 下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (溶胶凝胶法) 的电阻曲线^[24]

Fig. 3. Superconductivity of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ polycrystalline under pressure: (a)–(d) Resistance curves of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (solid state reaction) measured with solid as pressure-transmitting medium (cubic boron nitride)^[22,23]; (e) resistance curves of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (Sol-gel method) under pressure with liquid as pressure-transmitting medium (Daphne 7373, glycerol)^[24].

场下, 超导起始温度 (T_c^{onset}) 缓慢降低, 与铜氧化物超导体类似 (图 2(d)); 3) 从相图上看, 超导转变温度 (T_c) 随压力呈穹顶状演化, T_c 最高值出现在结构相变临界压力附近, 此后随压力增大而系统性降低 (图 2(e))^[21]. 此外, 不同研究组的单晶测试结果存在一定差异, 这可能源于浮区炉生长的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶内部氧缺陷呈现空间上的不均匀性. 从单晶生长角度分析, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 相较其他镍氧化物 (如 La_2NiO_4 , $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 氧压生长窗口更狭窄 (15 bar 左右)^[13,14], 生长参数的细微波动易导致单晶质量及氧化学计量比的显著变化.

此外, 多个课题组在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶体系中报道了超导电性^[22-24]. 实验结果表明, 利用氮化硼传

压时, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶样品在 18 GPa 开始出现超导转变 (图 3(a)—(d)), 且正常态呈现线性电阻行为^[22]. 当采用液体传压介质 (Daphne 7373, 甘油) 时, 多晶体系可以实现零电阻态 (图 3(e)), 进一步证实了 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 样品中的超导电性^[24]. 然而, 尽管零电阻现象在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶中得到复现, 不同课题组报道的抗磁信号强度却存在显著分歧, 由此引发了关于 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 超导体积分数的讨论^[24-26]. 透射电子显微镜实验结果表明, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶内存在不均匀的氧空位缺陷, 且该缺陷主要位于 NiO_6 八面体的顶角氧位点 (图 4(a)—(c))^[27]. 鉴于双层 R-P 结构中 c 方向相邻八面体间仅一个共用顶角氧位点, 该位点氧缺陷对于 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的电子

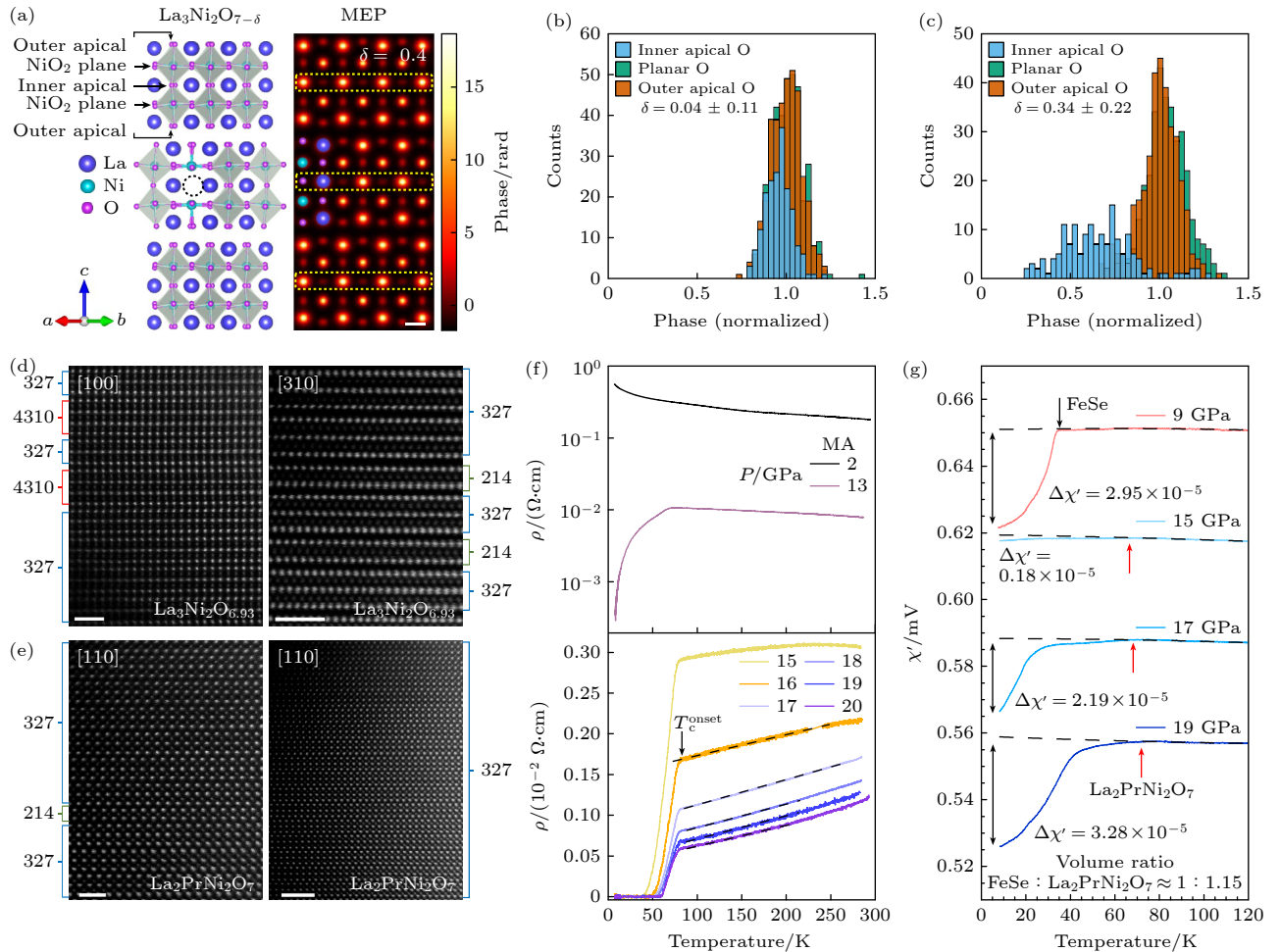


图 4 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶中的氧空位及压力下 $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 多晶的超导电性 (a) $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶中的氧空位; (b), (c) 不同氧空位含量下不同氧位点的相位直方图^[27]; (d) $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶中的堆垛缺陷^[43]; (e) $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 多晶中的长程有序^[43]; (f), (g) $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 多晶在压力下的零电阻和抗磁性^[43]

Fig. 4. The oxygen vacancies in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ single crystals and superconductivity of $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ polycrystalline under pressure: (a) The oxygen vacancies in $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ single crystals; (b), (c) the phase histograms from distinct oxygen sites with different oxygen vacancy concentrations^[27]; (d) the stacking faults of $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ polycrystalline^[43]; (e) the long-range orders of $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ polycrystalline^[43]; (f), (g) zero resistance and diamagnetic signals of $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ polycrystalline under pressure^[43].

结构影响显著. 许多理论研究者也从不同角度探讨了 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中的超导起源问题^[28-41]. 有理论计算表明, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中的超导配对主要来自 Ni 的 d_{z^2} 轨道, 顶角位点的氧缺陷对于超导的层间配对影响很大, 这可能解释了不同样品中输运性质、超导体积分分数不同的现象. 如图 4(d) 所示, 除氧缺陷外, 采用溶胶凝胶法制备的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 多晶中还普遍存在明显的无序堆垛^[42,43]. 这种缺陷会破坏多晶样品中的有序性, 阻碍体超导的实现. 为了进一步减少体系中的无序堆垛, Wang 等^[43] 利用原子半径更小的 Pr 对 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 相进行掺杂, 有效抑制了 327 多晶中的无序堆垛 (图 4(e)), 在加压的掺杂多晶样品中同时实现了零电阻和体超导 (图 4(f), (g)). 这表明通过不断提高样品质量, 在双层 327 体系中可以实现体超导.

高质量的单晶样品是研究超导机理的重要基础. 当前, 受限于浮区炉生长 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 相的氧压窗口狭窄, 高质量单晶的制备参数还需要进一步探索. 近期, 实验上陆续报道了一些利用助熔剂生长镍酸盐单晶的方法^[8,44,45], 单晶尺寸为 100—200 μm , 取得了很大的进步. 如何生长高质量、大尺寸的镍氧化物单晶是下一步实验关注的重点. 同时在 R-P 相家族中, 还存在许多其他体系的镍氧化物材料, 是否同样具有超导电性仍有待实验的进一步研究. 从结构与物性角度, 镍基超导体中

的 Ni-O 面与铜基超导体中的 Cu-O 面具有相似性. 值得注意的是, 铜基高温超导体中存在明确的层数依赖规律: 具有三层 Cu-O 面的结构 (例如 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$) 普遍表现出体系最高的超导转变温度^[46]. 该规律为镍基超导研究提供了启示, 进一步激发了近期在三层镍氧化物体系 (例如 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 中的高温超导探索, 以期建立层状镍基 R-P 相中结构维度与超导电性的普适关系.

3 三层结构镍氧化物超导体

3.1 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 超导体

鉴于镍基和铜基超导体在晶体结构上的相似性, $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中超导电性的发现引发了对类铜氧三层镍氧结构 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的超导探索^[22,23]. 研究结果表明, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶及多晶中同样存在压力诱导的超导态^[3,4,23]. 该材料在常压下具有密度波转变 (~ 136 K), 在不同输运上 (电学、磁学、比热) 都表现出明显的转变. 值得关注的是, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶具备较宽的生长氧压窗口, 有利于获得高质量的单晶样品. 如图 5(a) 所示, 在固体传压介质 (氯化钠) 下, 密度波转变随压力升高逐渐被抑制, 同时低温下开始出现超导转变, T_c 最高可达 25 K^[3]. 同时在超导温度以上表现出线性电阻行为^[3,4], 与 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶行为类似. 在气体传压介质 (氦气) 下

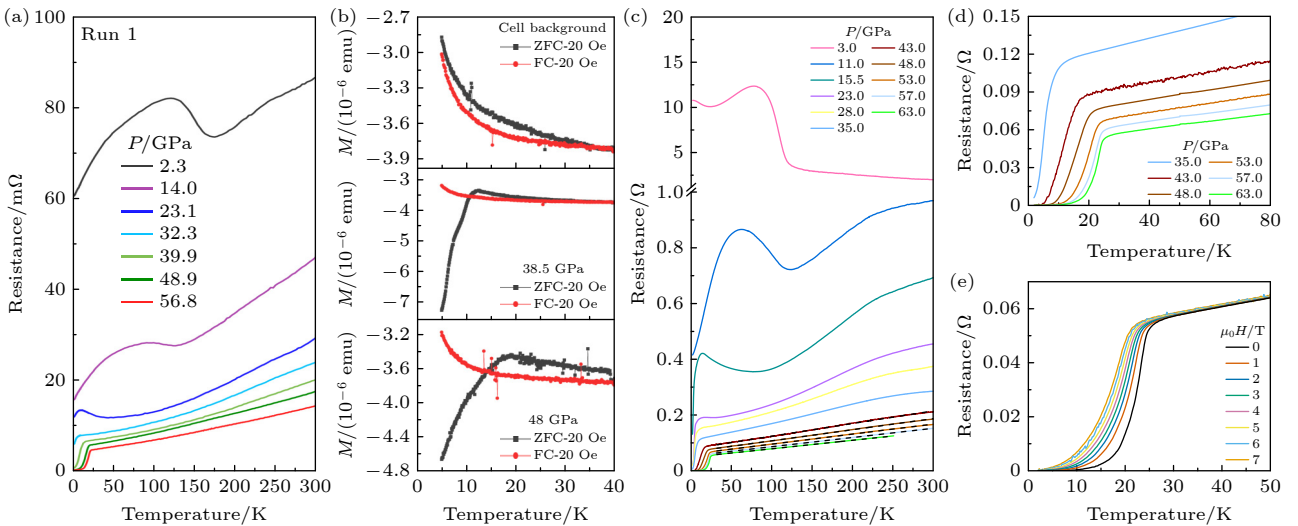


图 5 压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的超导电性 (a) 固体传压介质 (氯化钠) 下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的电阻曲线^[3]; (b) 气体传压介质 (氦气) 下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的直流磁化率^[3]; (c), (d) 气体传压介质 (氦气) 下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的零电阻^[4]; (e) 不同磁场下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的电阻曲线 (氦气)^[4]

Fig. 5. Superconductivity of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal under pressure: (a) Resistance curves of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ measured with solid as pressure-transmitting medium (NaCl)^[3]; (b) the d.c. susceptibility curves of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ measured with gas as pressure-transmitting medium (neon)^[3]; (c), (d) the zero resistance of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ measured with gas as pressure-transmitting medium (helium)^[4]; (e) resistance curves as a function of pressure under various magnetic fields (helium)^[4].

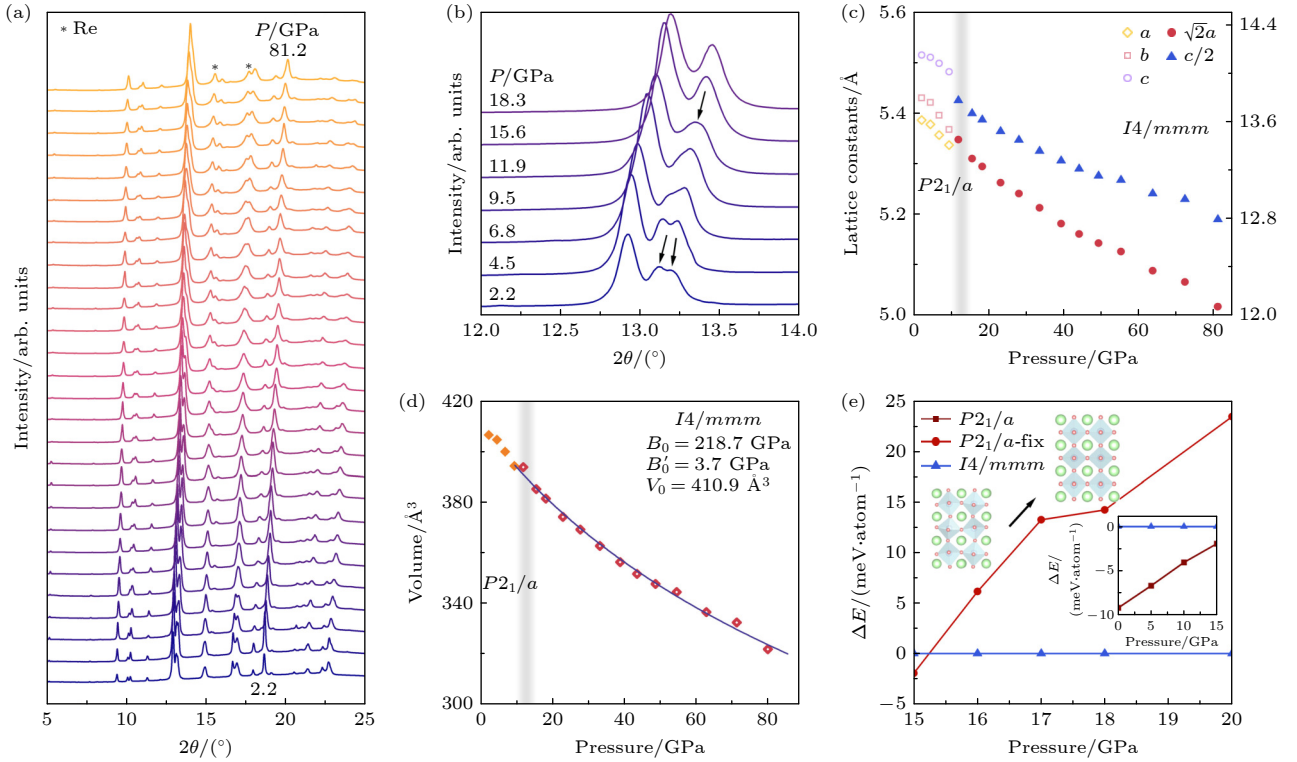


图6 压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的结构相变^[3] (a), (b) 压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的同步辐射 X 射线衍射; 压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的晶胞参数 (c) 和体积 (d) 变化; (e) $P2_1/a$ 和 $I4/mmm$ 空间群的焓差随压力的变化

Fig. 6. Phase transition of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal under pressure^[3]: (a), (b) Synchrotron X-ray diffraction patterns of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$; the lattice parameters (c) and cell volume (d) as a function of pressure in $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$; (e) the enthalpy between the space groups $P2_1/a$ and $I4/mmm$ as a function of pressure.

的直流磁化率测试中, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶在压力下呈现明显的抗磁转变 (图 5(b)), 进一步证实了其压力诱导的超导电性. 根据抗磁信号变化量可估算其最大超导体积分超过 80%, 确证了体超导性质^[3,4]. 随着压力的进一步增大, 超导转变温度升高的同时抗磁信号开始减小, 表明单晶中的超导体积分开始降低. 该现象源于高压区静水压条件的劣化, 表明镍氧化物单晶的超导态对静水性高度敏感. 实验上, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 中 T_c 随压力增大逐渐升高 (25 K@60 GPa), 仅在气体传压介质下实现零电阻 (图 5(c)—(e)). 与双层体系 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ (80 K@20 GPa) 相比, 三层体系 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的 T_c 更低但实现压力更高, 对静水性的要求更为苛刻.

同步辐射 X 射线衍射实验揭示了 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 在压力下的结构演化 (图 6(a)—(d)). 实验表明, 在临界压力区间 (10—20 GPa), (020) 和 (201) 衍射峰发生合并, 基于精修结果确认该体系在此压力范围发生单斜相 ($P2_1/a$) 到四方相 ($I4/mmm$) 的结构相变. 从结构演化上分析, 高压下 NiO_6 八面体在沿 c 轴方向上由倾斜堆垛重构为垂直堆垛, 晶体

结构的对称性进一步提高. 在焓值上, 相变后的四方结构相较单斜结构具有更低的焓值 (图 6(e)), 表明结构相变是压力诱导的热力学稳定化过程.

图 7 总结了压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的超导相图. 在压力下, 密度波转变逐渐被抑制, 随后体系进入超导态, 其超导转变温度随压力的增大逐渐升高, 最高可达 25—30 K. 超导态的出现与结构相变

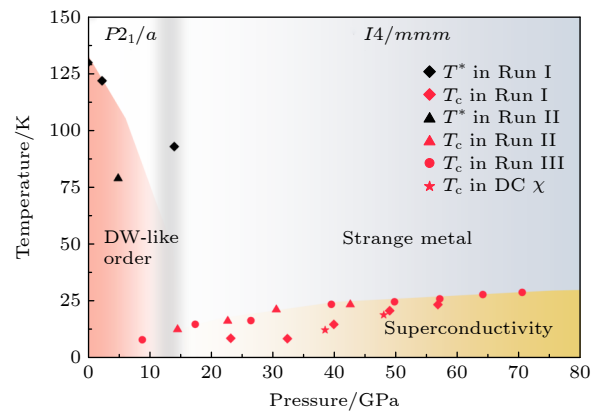


图7 压力下 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的超导相图^[3]

Fig. 7. Superconductivity phase diagram of $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal under pressure^[3].

协同发生, 该体系中压力诱导的结构演化行为与 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶呈现显著相似性.

3.2 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 超导体

除 La 系元素外, 其他稀土元素也可形成镍氧化物 R-P 相^[13,47-51], 且随着稀土元素原子半径的减小, 结构中 NiO_6 八面体间的倾斜程度呈现增大趋势, 等同于在体系中引入化学压力. 当前, 实验上确认稳定存在的 Pr 基 R-P 相有 Pr_2NiO_4 , $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 和 PrNiO_3 ($\text{Pr}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 可能热力学不稳定), 常压物性表征揭示, Pr_2NiO_4 表现为绝缘体行为, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 表现为具有密度波转变的金属态^[49], PrNiO_3 则在 135 K 发生金属-绝缘体转变^[50]. 在单晶生长方面, 由于 Pr 的原子半径更小, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 和 PrNiO_3 单晶稳定生长所需的氧压远高于 La 系 R-P 相, 实验上一般在 140 bar ($\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 和 300 bar (PrNiO_3) 左右^[13,49,51].

图 8 展示了压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 多晶的超导电性^[52], 多晶样品在常压下表现为具有密度波转变 (~ 156 K) 的金属态. 在压力下, 密度波转变随压力升高逐渐被抑制, 进一步加压后电阻开始出现下降, 且随压力增大电阻转变持续增强, 表明 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 发生超导转变. 从相图上看, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的结构相变发生在 20—30 GPa, 相变伴随超导出现, 且超导转变温度逐渐升高.

除了多晶体系外, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶中的超导电性也被多个研究组独立验证^[5,6,53]. 与 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 类似, 该体系的超导同样对传压介质表现出敏感性. 采用固体传压介质 (溴化钾) 时, 超导转变普遍较弱. 图 9(a), (b) 展示了液体传压介质 (矿物油) 下

$\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的变温电阻曲线: 单晶在 29.7 GPa 开始出现超导转变, 最大减小比例可达 95%. 直流磁化率测试表明, 液体传压介质下其超导体积分分数约为 6%(10 K)^[53]. 当采用气体 (氦气) 作传压介质时, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶中可以实现零电阻并且超导转变温度可以达到近 40 K(图 9(c), (e)). 外加磁场下超导转变逐渐被抑制, 50.2 GPa 下其上临界磁场可达 49.4 T(图 9(f)). 气体作传压介质下, 根据直流抗磁信号变化量估算其最大超导体积分分数超过 80%, 表明 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 在压力下同样可以实现体超导(图 9(d), (g), (h))^[6]. 低温高压同步辐射 X 射线衍射实验结果表明 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 在 20—30 GPa 之间发生与 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 类似的结构相变, 并且证实超导相为四方结构 ($I4/mmm$)(图 10(a)—(d)). $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 是首个报道的 Pr 基镍氧化物超导体, T_c 与 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 比较有明显提高, 在其他原子半径更小的稀土元素中是否存在更多高温超导体还有待实验上的进一步探索.

3.3 分析讨论

如图 11(a) 所示, 在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中, Ni 价态为 $+2.5(3d^{7.5})$, $3d_{x^2-y^2}$ 轨道接近半满, $3d_{x^2-y^2}$ 处于 1/4 填充状态, 费米面处 Ni 的两轨道均有贡献, 且与 O 的 2p 轨道杂化^[28-40]. 由于结构和价态的相似性, $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 中的基本电子构型为 $\text{Ni}^{+2.67}(3d^{7.33})$, 其 e_g 轨道同样部分填充(图 11(b)), 两个 3d 轨道接近 1/3 填充. 这与铜氧化物超导体中 $d_{x^2-y^2}$ 轨道主导费米面不同, 镍氧化物体系中 d_{z^2} 和 $d_{x^2-y^2}$ 两轨道共同参与费米面的形成^[54-57]. 与铜氧化物超导体具有较弱的层间耦合不同, 由于层间存在顶

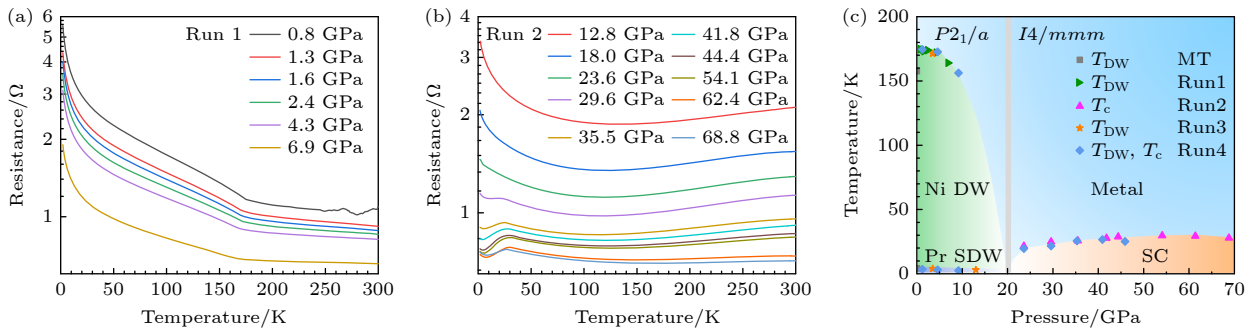


图 8 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 多晶的超导电性^[52] (a), (b) 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 多晶的电阻曲线; (c) 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 多晶的超导相图
Fig. 8. Superconductivity of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ polycrystalline under pressure^[52]: (a), (b) Resistance curves of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ polycrystalline under pressure; (c) superconductivity phase diagram of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ polycrystalline under pressure.

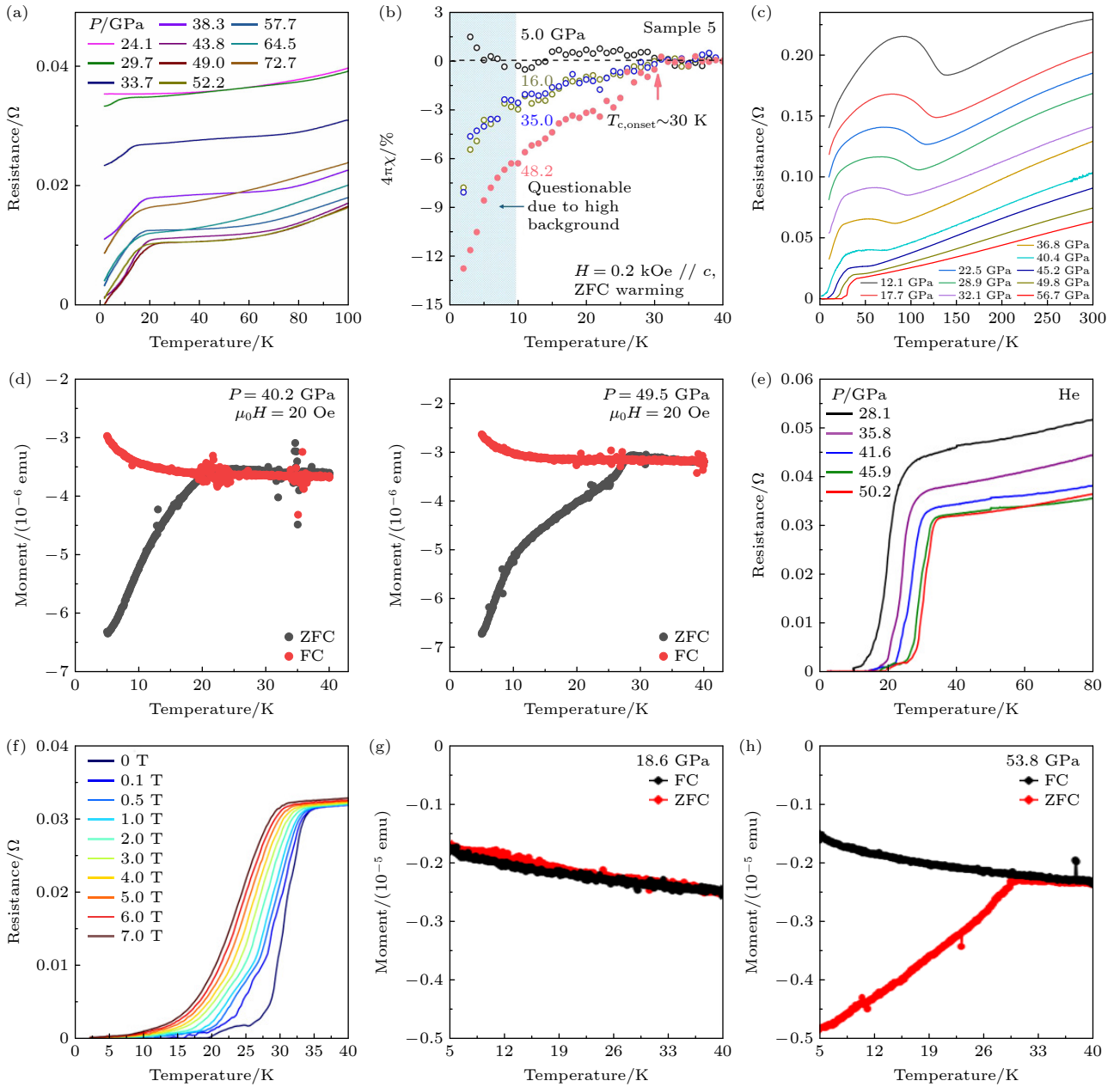


图9 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的超导电性^[6,53] (a), (b) 液体传压介质(矿物油)下单晶的电阻曲线和直流磁化率^[53]; (c), (d) 气体传压介质下单晶的电阻曲线(氦气)^[6]和直流磁化率(氖气)^[6]; (e), (f) 气体传压介质(氦气)下的零电阻及其在不同磁场下的电阻曲线^[5]; (g), (h) 气体传压介质(氖气)下的直流磁化率^[5]

Fig. 9. Superconductivity of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal under pressure^[6,53]: (a), (b) Resistance curves and d.c. susceptibility of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal measured with liquid as pressure-transmitting medium (nujol)^[53]; (c), (d) resistance curves (helium) and d.c. susceptibility (neon) measured with gas as pressure-transmitting medium^[6]; (e), (f) zero resistance and the resistance curves under various magnetic fields measured with gas as pressure-transmitting medium (helium)^[5]; (g), (h) the d.c. susceptibility measured with gas as pressure-transmitting medium (neon)^[5].

角氧, 镍氧化物中的 d_{2_2} 轨道具有较强的层间跃迁, 导致层间超交换相互作用^[54]. 在铜氧化物超导体中, 原胞内具有三层 Cu—O 面的体系具有最高的超导温度^[46], 而三层结构镍氧化物的超导温度 ($\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 和 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 明显要低于双层结构 ($\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$). 理论分析表明^[54], 在双层结构中, 配

对主要发生在相邻两层八面体间^[36-38], 没有阻挫效应, 而三层结构中相邻两层配对后, 余层电子会寻求面内配对, 而面内配对易受热涨落影响, 因此在三层结构中存在配对阻挫效应, 与双层结构 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 相比, 超导温度显著降低. 在配对机制上, 多数理论工作倾向 S±配对^[54-60].

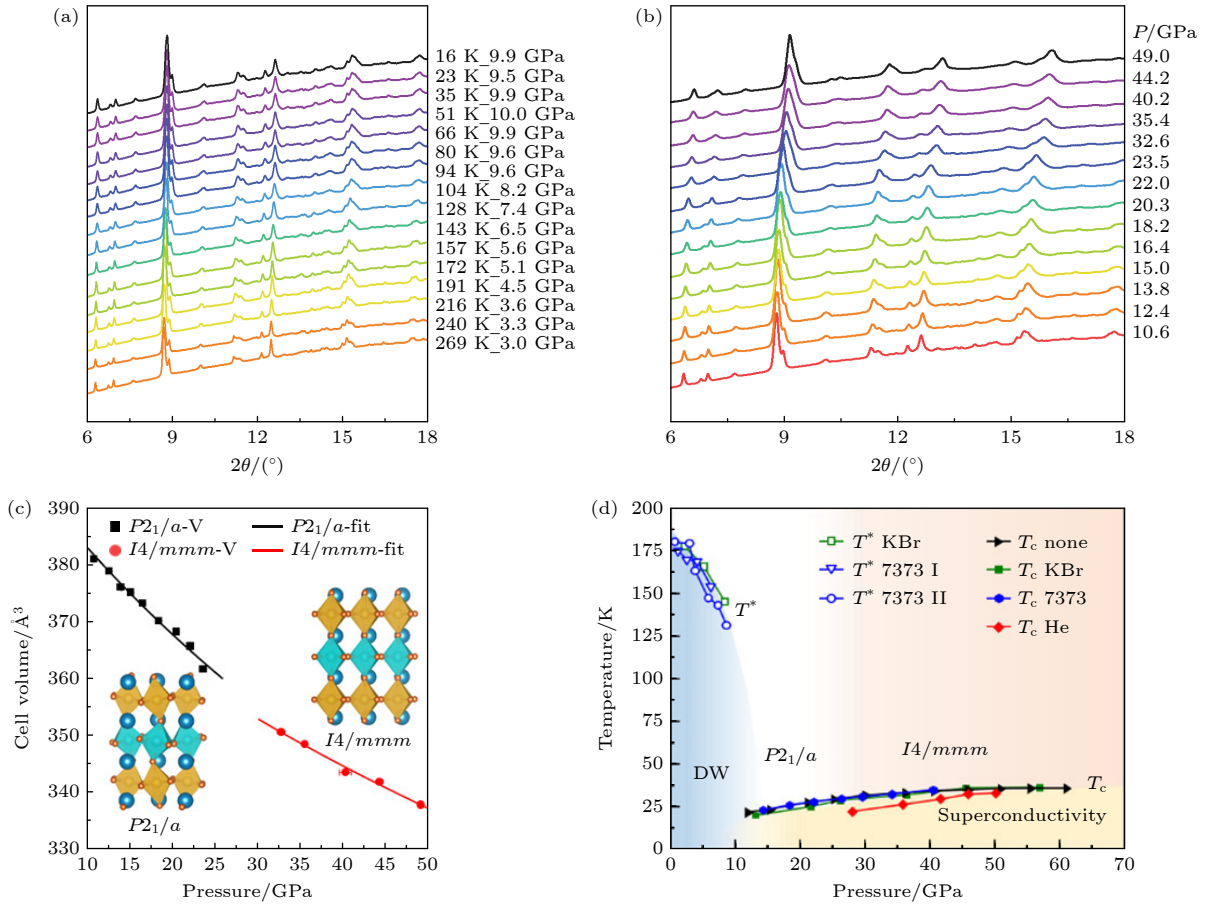


图 10 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 单晶的结构相变 (a), (b) 降温与加压过程中 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的同步辐射 X 射线衍射图谱; (c) 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的晶胞体积变化; (d) 压力下 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 的超导相图

Fig. 10. Phase transition of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ single crystal under pressure: (a), (b) Synchrotron X-ray diffraction patterns of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ measured during cooling process and compression process; (c) the cell volume as a function of pressure in $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$; (d) the superconductivity phase diagram of $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ under pressure.

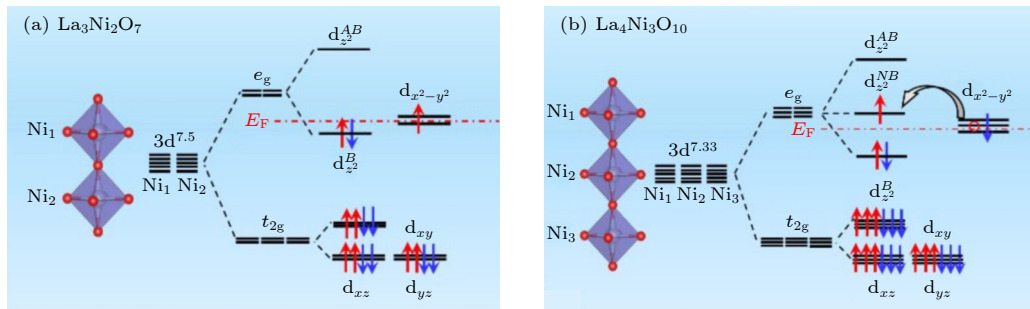


图 11 镍氧化物的简化电子能级 (a) $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$; (b) $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$

Fig. 11. Simplified electronic energy levels of the nickelates: (a) $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$; (b) $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$.

4 总结与展望

镍氧化物高温超导体的发现, 为非常规超导体的物性研究开辟了新方向. 三层结构镍氧化物 ($\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$, $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$) 在压力下表现出接近 25—40 K 的超导电性. 同步辐射结果表明超导的

出现与压力下的结构相变有关, 同时体系内的密度波转变逐渐被抑制. 三层结构镍氧化物体系为研究密度波与超导的关系、压力下的电子结构演化提供了平台. 同时, 相较于铜基、铁基超导体体系, 三层镍氧化物 R-P 相的超导研究更具挑战性. 首先, 氧缺陷对镍基单晶的物性影响较大, 单晶质量的差异会直接影响压力下的超导电性, 这一点上双层堆垛

的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 要更加明显. 由于浮区炉生长所需的氧压更高, 三层镍氧化物相较双层镍氧化物在单晶质量上普遍提高, 样品质量对超导的影响较小. 其次, 与双层结构类似, 三层镍氧化物体材料的超导电性对压力环境的静水性表现出显著依赖性. 不同传压介质下的超导体积分数存在显著差异, 零电阻的实现依赖于高静水性环境. 这种静水性的敏感性可能源于镍氧化物相变前后结构变化较小、受剪切应力影响较大以及氧化物塑性较差等因素. 随着研究的深入和实验方法的不断进步, 上述挑战有望得到系统性解决.

三层镍基高温超导研究方兴未艾, 展现出广阔的探索空间. 从实验结果看, 通过化学预压可以使三层体系超导温度得到进一步提高, 而镧系元素中仍然有许多未被探索的三层镍基氧化物体系 (例如 $\text{Sm}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$). 在未来, 通过不断优化生长参数得到更多种类的三层镍基单晶样品、探索不同稀土元素的镍氧化物超导相图, 可以进一步明确稀土元素在镍基超导中发挥的作用, 为更高转变温度的超导材料设计提供指导和参考. 探索新的镍氧化物超导体系, 进一步与铜氧化物、铁基等高温超导体体系相互印证、提炼共性, 将为探索高温超导的普适机理提供重要线索. 最近, 南方科技大学的薛其坤、陈卓昱团队与美国斯坦福大学 Harold Y. Hwang 团队在薄膜领域取得进展, 两团队独立在常压环境下生长出了 327 镍基超导薄膜, 并实现了高于 40 K 的超导 [7,61–63]. 这一重要发现不仅拓宽了镍基超导的研究维度, 也展示了在常压下实现高温超导的潜力. 相信在后续全面、多方位的物性测量基础上, 镍基氧化物高温超导研究将深化对于非常规超导机制的理解, 为建立统一的高温超导理论提供重要参考.

参考文献

- [1] Li D F, Lee K, Wang B Y, Osada M, Crossley S, Lee H R, Cui Y, Hikita Y, Hwang H Y 2019 *Nature* **572** 624
- [2] Sun H L, Huo M W, Hu X W, Li J Y, Liu Z J, Han Y F, Tang L Y, Mao Z Q, Yang P T, Wang B S, Cheng J G, Yao D X, Zhang G M, Wang M 2023 *Nature* **621** 493
- [3] Zhang M X, Pei C Y, Peng D, Du X, Hu W X, Cao Y T, Wang Q, Wu J F, Li Y D, Liu H Y, Wen C H P, Song J, Zhao Y, Li C H, Cao W Z, Zhu S H, Zhang Q, Yu N, Cheng P H, Zhang L L, Li Z W, Zhao J K, Chen Y L, Jin C Q, Guo H J, Wu C J, Yang F, Zeng Q S, Yan S C, Yang L X, Qi Y P 2025 *Phys. Rev. X* **15** 021005
- [4] Zhu Y H, Peng D, Zhang E K, Pan B Y, Chen X, Chen L X, Ren H F, Liu F Y, Hao Y Q, Li N N, Xing Z F, Lan F J, Han J Y, Wang J J, Jia D H, Wo H L, Gu Y Q, Gu Y M, Ji L, Wang W B, Gou H Y, Shen Y, Ying T P, Chen X L, Yang W G, Cao H B, Zheng C L, Zeng Q S, Guo J G, Zhao J 2024 *Nature* **631** 531
- [5] Pei C, Zhang M, Peng D, Shen Y, Huangfu S, Zhu S, Wang Q, Wu J, Wang J, Xing Z, Zhang L, Kadobayashi H, Kawaguchi S, Chen Y, Zhao J, Yang W, SUO H, Guo H, Zeng Q, Zhang G, Qi Y 2026 <http://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11433-025-2852-4> (in press)
- [6] Zhang E K, Peng D, Zhu Y H, Chen L X, Cui B K, Wang X Y, Wang W B, Zeng Q S, Zhao J 2025 *Phys. Rev. X* **15** 021008
- [7] Ko E K, Yu Y, Liu Y, Bhatt L, Li J, Thampy V, Kuo C T, Wang B Y, Lee Y, Lee K, Lee J S, Goodge B H, Muller D A, Hwang H Y 2025 *Nature* **638** 935
- [8] Shi M, Peng D, Fan K, Xing Z, Yang S, Wang Y, Li H, Wu R, Du M, Ge B, Zeng Z, Zeng Q, Ying J, Wu T, Chen X 2025 *Nat. Phys.* **21** 1780
- [9] Li Q, Zhang Y J, Xiang Z N, Zhang Y H, Zhu X Y, Wen H H 2024 *Chin. Phys. Lett.* **41** 017401
- [10] Poirot N, Phuoc V T, Gruener G, Gervais F 2005 *Solid State Sci.* **7** 1157
- [11] Kumar Y, Kumar P, Dixit G, Asokan K 2013 *AIP Conf. Proc.* **1536** 1021
- [12] Wu G, Neumeier J, Hundley M 2001 *Phys. Rev. B* **63** 245120
- [13] Zhang J J, Zheng H, Chen Y S, Ren Y, Yonemura M, Huq A, Mitchell J F 2020 *Phys. Rev. Mater.* **4** 083402
- [14] Liu Z, Sun H, Huo M, Ma X, Ji Y, Yi E, Li L, Liu H, Yu J, Zhang Z 2023 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **66** 217411
- [15] Taniguchi S, Nishikawa T, Yasui Y, Kobayashi Y, Takeda J, Shamoto S I, Sato M 1995 *J. Phys. Soc. Jpn.* **64** 1644
- [16] Zhang J J, Zheng H, Ren Y, Mitchell J F 2017 *Cryst. Growth Des.* **17** 2730
- [17] Sánchez R, Causa M, Caneiro A, Butera A, Vallet-Regi M, Sayagués M, González-Calbet J, Garcia-Sanz F, Rivas J 1996 *Phys. Rev. B* **54** 16574
- [18] Zheng H, Wang B X, Phelan D, Zhang J J, Ren Y, Krogstad M, Rosenkranz S, Osborn R, Mitchell J 2020 *Crystals* **10** 557
- [19] Zhang Y N, Su D J, Huang Y E, Shan Z Y, Sun H L, Huo M W, Ye K X, Zhang J W, Yang Z H, Xu Y K, Su Y, Li R, Smidman M, Wang M, Jiao L, Yuan H Q 2024 *Nat. Phys.* **20** 1269
- [20] Hou J, Yang P T, Liu Z Y, Li J Y, Shan P F, Ma L, Wang G, Wang N N, Guo H Z, Sun J P, Uwatoko Y, Wang M, Zhang G M, Wang B S, Cheng J G 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 117302
- [21] Li J Y, Peng D, Ma P Y, Zhang H Y, Xing Z F, Huang X, Huang C X, Huo M W, Hu D Y, Dong Z X, Chen X, Xie T, Dong H L, Sun H L, Zeng Q S, Mao H K, Wang M 2025 *Natl. Sci. Rev.* **12** nwaf220
- [22] Zhang M X, Pei C Y, Wang Q Y, Zhao Y, Li C H, Cao W Z, Zhu S H, Wu J F, Qi Y P 2024 *J. Mater. Sci. Technol.* **185** 147
- [23] Sakakibara H, Ochi M, Nagata H, Ueki Y, Sakurai H, Matsumoto R, Terashima K, Hirose K, Ohta H, Kato M, Takano Y, Kuroki K 2024 *Phys. Rev. B* **109** 144511
- [24] Wang G, Wang N N, Shen X L, Hou J, Ma L, Shi L F, Ren Z A, Gu Y D, Ma H M, Yang P T, Liu Z Y, Guo H Z, Sun J P, Zhang G M, Calder S, Yan J Q, Wang B S, Uwatoko Y, Cheng J G 2024 *Phys. Rev. X* **14** 011104
- [25] Gao R, Jin L, Huyan S Y, Ni D R, Wang H Z, Xu X H, Bud'ko S L, Canfield P, Xie W W, Cava R J 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 66857

- [26] Zhou Y, Guo J, Cai S, Sun H, Li C, Zhao J, Wang P, Han J, Chen X, Chen Y, Wu Q, Ding Y, Xiang T, Mao H K, Sun L 2025 *Matter Radiat. Extrem.* **10** 027801
- [27] Dong Z, Huo M, Li J, Li J, Li P, Sun H, Gu L, Lu Y, Wang M, Wang Y, Chen Z 2024 *Nature* **630** 847
- [28] Luo Z, Hu X, Wang M, Wu W, Yao D X 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 126001
- [29] Shen Y, Qin M, Zhang G M 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 127401
- [30] Yang Y F, Zhang G M, Zhang F C 2023 *Phys. Rev. B* **108** L201108
- [31] Zhang Y, Lin L F, Moreo A, Dagotto E 2023 *Phys. Rev. B* **108** L180510
- [32] Luo Z, Lü B, Wang M, Wu W, Yao D X 2024 *npj Quantum Mater.* **9** 61
- [33] Zhang Y, Lin L F, Moreo A, Maier T A, Dagotto E 2023 *Phys. Rev. B* **108** 165141
- [34] Yang Q G, Wang D, Wang Q H 2023 *Phys. Rev. B* **108** L140505
- [35] Sakakibara H, Kitamine N, Ochi M, Kuroki K 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 106002
- [36] Lu C, Pan Z M, Yang F, Wu C J 2024 *Phys. Rev. B* **110** 094509
- [37] Pan Z M, Lu C, Yang F, Wu C J 2024 *Chin. Phys. Lett.* **41** 087401
- [38] Lu C, Pan Z M, Yang F, Wu C J 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 146002
- [39] Lechermann F, Gondolf J, Bötzel S, Eremin I M 2023 *Phys. Rev. B* **108** L201121
- [40] Liu Y B, Mei J W, Ye F, Chen W Q, Yang F 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 236002
- [41] Shi L, Luo Y, Wu W, Zhang Y W 2025 *Chin. Phys. B* **34** 077403
- [42] Carvalho M, Costa F A, Pereira I S, Bassat J, Grenier J 1997 *J. Mater. Chem.* **7** 2107
- [43] Wang N N, Wang G, Shen X L, Hou J, Luo J, Ma X P, Yang H X, Shi L F, Dou J, Feng J, Yang J, Shi Y Q, Ren Z A, Ma H M, Yang P T, Liu Z Y, Liu Y, Zhang H, Dong X L, Wang Y X, Jiang K, Hu J P, Nagasaki S, Kitagawa K, Calder S, Yan J Q, Sun J P, Wang B S, Zhou R, Uwatoko Y, Cheng J G 2024 *Nature* **634** 579
- [44] Li F Y, Guo N, Zheng Q, Shen Y, Wang S L, Cui Q H, Liu C, Wang S P, Tao X T, Zhang G M, Zhang J J 2024 *Phys. Rev. Mater.* **8** 053401
- [45] Li F Y, Wang S L, Ma C, Wang X L, Liu C, Fan C Y, Han L, Wang S P, Tao X T, Zhang J J 2024 *Cryst. Growth Des.* **24** 347
- [46] Chu C W, Deng L Z, Lü B 2015 *Physica C* **514** 290
- [47] Rout D, Mudi S R, Hoffmann M, Spachmann S, Klingeler R, Singh S 2020 *Phys. Rev. B* **102** 195144
- [48] Obradors X, Martinez B, Batlle X, Rodriguez-Carvajal J, Fernandez-Diaz M T, Martinez J L, Odier P 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 6329
- [49] Huangfu S, Jakub G D, Zhang X, Blacque O, Puphal P, Pomjakushina E, von Rohr F O, Schilling A 2020 *Phys. Rev. B* **101** 104104
- [50] Torrance J B, Lacorre P, Nazzari A I, Ansaldo E J, Niedermayer C 1992 *Phys. Rev. B* **45** 8209
- [51] Zheng H, Zhang J, Wang B, Phelan D, Krogstad M J, Ren Y, Phelan W A, Chmaissem O, Poudel B, Mitchell J F 2019 *Crystals* **9** 324
- [52] Huang X, Zhang H, Li J, Huo M, Chen J, Qiu Z, Ma P, Huang C, Sun H, Wang M 2024 *Chin. Phys. Lett.* **41** 127403
- [53] Chen X, Poldi E H T, Huyan S, Chapai R, Zheng H, Bud'ko S L, Welp U, Canfield P C, Hemley R J, Mitchell J F, Phelan D 2025 *Phys. Rev. B* **111** 094525
- [54] Lu C, Pan Z, Yang F, Wu C 2025 *Phys. Rev. B* **111** 134515
- [55] Chen C Q, Luo Z, Wang M, Wu W, Yao D X 2024 *Phys. Rev. B* **110** 014503
- [56] Yang Q G, Jiang K Y, Wang D, Lu H Y, Wang Q H 2024 *Phys. Rev. B* **109** L220506
- [57] Zhang Y, Lin L F, Moreo A, Maier T A, Dagotto E 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 136001
- [58] Zhang M, Sun H, Liu Y B, Liu Q, Chen W Q, Yang F 2024 *Phys. Rev. B* **110** L180501
- [59] Qin Q, Wang J, Yang Y F 2024 *The Innovation Materials* **2** 100102
- [60] Huang J K, Zhou T 2024 *Phys. Rev. B* **110** L060506
- [61] Zhou G D, Lü W, Wang H, Nie Z H, Chen Y Q, Li Y Y, Huang H L, Chen W Q, Sun Y J, Xue Q K, Chen Z Y 2025 *Nature* **640** 641
- [62] Liu Y, Ko E K, Tarn Y, Bhatt L, Li J, Thampy V, Goodge B H, Muller D A, Raghu S, Yu Y, Hwang H Y 2025 *Nat. Mater.* **24** 1221
- [63] Chen Z Y, Huang H L, Xue Q K 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 097401 (in Chinese) [陈卓昱, 黄浩亮, 薛其坤 2025 物理学报 **74** 097401]

SPECIAL TOPIC—Research progress on nickelate superconductors

Research progress of high-temperature superconductivity in trilayer nickelate*

ZHANG Mingxin¹⁾ PEI Cuiying¹⁾ QI Yanpeng^{1)2)3)4)†}

1) (*School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

2) (*State Key Laboratory of Quantum Functional Materials, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

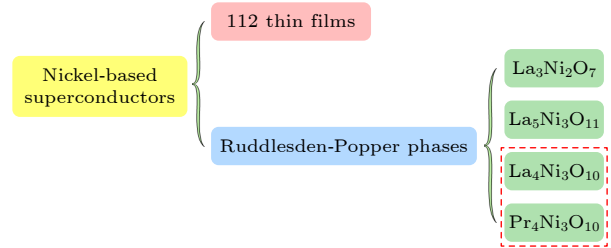
3) (*ShanghaiTech Laboratory for Topological Physics, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

4) (*Shanghai Key Laboratory of High-resolution Electron Microscopy, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

(Received 9 July 2025; revised manuscript received 9 September 2025)

Abstract

The recent discovery of high-temperature superconductivity in the bilayer nickelate $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ under high pressure has drawn significant attention, further catalyzing intensive research on nickel-based superconductors. Systematic comparative studies of unconventional superconductors are vital for advancing the mechanistic understanding of high- T_c superconductivity. In contrast to cuprates, bulk nickelates exhibit significant differences in crystal structure, electronic properties, and physical behaviors, and their experimental investigation faces specific challenges including the influences of hydrostatic conditions on the measurements of zero resistance and diamagnetic response, oxygen vacancy defects in single crystals, and pressure-induced structural phase transitions. This review comprehensively examines high-temperature superconductivity and the related research challenges in trilayer nickelate bulk materials, and provides experimental insights for future studies on nickel-based superconducting systems.



Keywords: nickel-based superconductors, unconventional superconductivity, high-temperature superconductivity

PACS: 74.25.-q, 74.70.-b, 74.62.Fj

DOI: [10.7498/aps.74.20251258](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251258)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251258](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251258)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2023YFA1607400) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52272265).

† Corresponding author. E-mail: qiyp@shanghaitech.edu.cn



三层镍氧化物高温超导研究进展

张明鑫 裴翠颖 齐彦鹏

Research progress of high-temperature superconductivity in trilayer nickelate

ZHANG Mingxin PEI Cuiying QI Yanpeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 227402 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251258

CSTR: 32037.14.aps.74.20251258

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251258>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

层状镍基超导体的电子结构和超快动力学

Electronic structure and ultrafast dynamics of nickel-based high-temperature superconductors

物理学报. 2025, 74(17): 177402 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250856>

自旋涨落与非常规超导配对

Spin fluctuations and unconventional superconducting pairing

物理学报. 2021, 70(1): 017408 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202180>

镍基超导体中电荷序的实验研究进展

Experimental research progress of charge order of nickelate based superconductors

物理学报. 2024, 73(19): 197104 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240898>

常压下双层结构镍氧化物薄膜高温超导电性的发现与研究展望

Ambient-pressure Ruddlesden-Popper bilayer nickelate superconductors: From discovery to prospects

物理学报. 2025, 74(9): 097401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250331>

探索非常规高温超导体

Searching for new unconventional high temperature superconductors

物理学报. 2021, 70(1): 017101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202122>

新型非常规超导体 UTe_2 的单晶生长方法研究进展

Advances in single crystal growth methods for novel unconventional superconductor UTe_2

物理学报. 2025, 74(8): 087401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241778>