

镍基超导综述

A Review of Nickelate Superconductors

林沛晗 2300011401

2025 年 11 月

摘要

2019 年镍基超导体的发现标志着非常规超导研究的一个新阶段。镍基超导体因为其与铜基高温超导体存在的诸多相似和差异而受到了广泛的研究关注。本文将综述近年来镍基超导体在实验探测和理论研究领域取得的重要进展。

The discovery of nickelate superconductors in 2019 marked a new phase in unconventional superconductivity research. Nickelate superconductors have attracted significant attention due to their similarities and differences with cuprate high-temperature superconductors. This review summarizes the important experimental and theoretical advancements in the field of nickelate superconductors in recent years.

目录

1 引言	2
2 约化 Ruddlesden-Popper 型镍氧化物	2
2.1 材料合成与晶体结构	2
2.2 电子结构	2
2.3 超导性质	3
3 Ruddlesden-Popper 型镍氧化物	5
3.1 材料合成与晶体结构	5
3.2 电子结构	6
3.3 超导性质	6
4 总结	8

1 引言

2019 年在无限层镍氧化物 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$ 中发现的转变温度为 10K 的超导态 [1] 标记着非常规超导研究的一个新阶段。镍基超导体的进展吸引了广泛的研究兴趣，因为它与广为人知的铜基超导体具有相似的晶体结构和电子能带结构。然而随着研究的深入，镍基超导体也展现出显著不同的特性。这些类似和差异引发了对镍基超导体材料合成、电子结构和配对机制的广泛研究。本文将对镍基超导领域的实验和理论进展进行回顾。

2 约化 Ruddlesden-Popper 型镍氧化物

2.1 材料合成与晶体结构

约化 Ruddlesden-Popper (RP) 型的化学式为 $\text{R}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{2n+2}$ [2]，其中 $\text{R}=\text{Nd}, \text{La}, \text{Pr}$ 为稀土元素。其空间结构可以表示为 $(\text{RO}_2)^-[(\text{RNiO}_2)_n]^+$ ，也就是被 n 层 RNiO_2 隔开的单层 RO_2 (图 1)。Ni 原子位于平面内的正方晶格位置，O 原子位于 Ni 原子的四个侧面，形成平面内的 NiO_2 结构单元，与铜基超导体中的 CuO_2 平面相同。

在这种结构中，Ni 的电子结构为 $d^{9-1/n}$ 。我们尤其关心 $n = \infty$ 极限（无限层相），因为此时 Ni 的电子结构为 d^9 ，与最典型的铜基超导体 La_2CuO_4 (La-214) 中 Cu 的电子结构相同。无限层相的化学式为 RNiO_2 。它的制备方式最早由 Harold H.Hwang 课题组提出 [1]。他们首先在 SrTiO_3 衬底上生长钙钛矿结构的 NdNiO_3 薄膜，然后使用加热的 CaH_2 释放 H_2 ， H_2 与薄膜反应，带走 O 八面体中顶角的两个 O 原子 (图 2)，从而成功制备出了 NdNiO_2 。通过使用 Sr 替换 Nd 进行空穴掺杂，实验者在 $\text{Nd}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{NiO}_2$ 中观测到了转变温度 10K 的超导。利用同样的方法，实验者制备了 LaNiO_2 、 PrNiO_2 、 $\text{Sm}_{1-x-y}\text{Eu}_x\text{Ca}_y\text{NiO}_2$ 等多种 RNiO_2 型镍氧化物，它们的转变温度在图 3 中展示。其中转变温度的最高纪录为 32.5K[3]。

更一般的约化 RP 型镍氧化物可以通过从 RP 型镍氧化物 $\text{R}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 中用 H_2 去除顶角 O 原子制备，对应体系也有相当可观的实验进展。例如，在 $n = 5$ 情况下（对应化学式 $\text{Nd}_6\text{Ni}_5\text{O}_{12}$ ）观测到了转变温度 13K 的超导状态 [4]。在 $n = 3$ 情况下（对应化学式 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_8$ 和 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_8$ ），可以观测到条纹序和线性电阻行为 [2, 5]。这两点类似于铜基超导的性质，但实验表明 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_8$ 低温下为绝缘态，而 $\text{Pr}_4\text{Ni}_3\text{O}_8$ 为金属态，均未观测到超导。

2.2 电子结构

首先考虑无限层相，也就是 RNiO_2 型镍氧化物的电子结构。DFT 结果于图 4 中展示。与铜基超导体类似，Ni 的 $3d_{x^2-y^2}$ 轨道穿过费米面，形成一个很大的费米口袋。然而不同的是， Γ 点存在由 R 的 $5d_{z^2}$ 轨道和 Ni 的 $3d_{z^2}$ 杂化形成的小费米口袋，而在 A 附近也存在 R 的 $5d_{xy}$ 轨道或间隙 s 轨道形成的费米口袋。因此，Ni 轨道对应的能带实际上并非半满填充，而是存在大约 10% 的空穴掺杂，这一现象被称作“自掺杂”效应。

另一个重要的因素是电荷转移效应，即电荷从 Ni 的 $3d$ 轨道转移到 O 的 $2p$ 轨道，这一效应可以通过电荷转移能 $\Delta = E_d - E_p$ 来量化。对于铜基超导体， Δ 通常较小，O 的 $2p$ 轨道在费米面附近起重要作用，从而形成 Zhang-Rice 单态。而对于镍基超导体， Δ 较大，O

的 $2p$ 轨道远离费米面。这导致镍基超导体的电子结构更接近于典型的 Mott-Hubbard 型体系，而非铜基超导体中的 Zaanen-Sawatzky-Allen 电荷转移型体系 [6, 7]。更大的电荷转移能意味着镍基超导体中超交换相互作用更弱，超导转变温度更低，且不存在反铁磁长程序。这和铜基超导体存在显著区别 [1, 2]。

对于 $n = 5$ 和 $n = 3$ 的约化 Ruddlesden-Popper 型镍氧化物，其电子结构更类似于铜基超导体，具体现象包括更小的自掺杂效应和更小的电荷转移能 [2]。

2.3 超导性质

$RNiO_2$ 型镍氧化物的超导机制仍然是一个开放性问题。早期研究多集中于讨论其与铜基超导体的相似性，尤其是其作为掺杂 Mott 绝缘体的特性。然而， $RNiO_2$ 型镍氧化物中存在的稀土元素轨道与 Ni 轨道杂化形成的额外费米口袋使其性质接近于金属互化物型或者重费米子型超导体 [7]。

$RNiO_2$ 型镍氧化物的温度-掺杂相图展示在图 5 中。与铜基超导体类似的是超导“穹顶”和奇异金属效应，但不同之处在于不存在反铁磁长程序和赝能隙现象，且前者被电荷序所替代。在超导区域，实验上观测到了两类能隙，一种体现为透射率的 V 型图案，对应 d 波配对对称性，另一种体现为 U 型图案，对应 s 波配对对称性 [8]。理论上认为前者由 Ni 的 $3d_{x^2-y^2}$ 轨道大费米口袋主导，而后者则可能与稀土元素轨道相关，成因更为复杂。此外， $RNiO_2$ 的相位刚度反常地小，这表明超导转变温度可能与相位相干性有关 [7]。

关于正常态的行为也有很多实验观测结果。例如，正常态的电阻超出了 Mott-Ioffe-Regel 极限，且在转变温度到室温的广泛范围内观测到了与温度线性相关的电阻，均表明其为奇异金属态 [9]。对于未掺杂的 $NdNiO_2$ ，实验上观测到了 50K 左右的金属-绝缘体相变，且 50K 以下存在电阻率的反常上升，这可能与 Kondo 效应或磁性杂质散射有关 [7]。

理论上的解释通常为三带模型，包含 Ni 的 $3d_{x^2-y^2}$ 轨道和稀土元素的两个杂化轨道 [10]。在这一模型中，Ni 轨道具有较强的电子相互作用，且横跨布里渊区，具有 van Hove 奇点，而稀土元素轨道则更为局域化，电子相互作用更弱，它们对 Ni 轨道起到“自掺杂”效应（图 6）。于是，超导最简单的模型为对单带 Hubbard 模型的掺杂。综合考虑多个因素，超导配对机制最类似于铜基超导体 $CaCuO_2$ ，只不过超交换作用更弱，临界温度更低 [10, 11]。

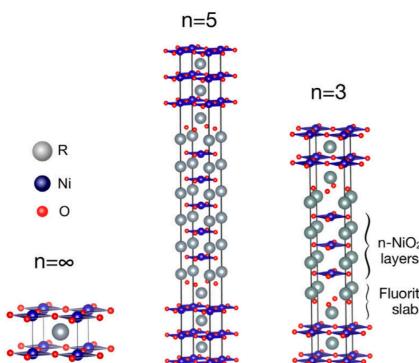


图 1: $RNiO_2$ 型镍氧化物的空间结构 [2]。

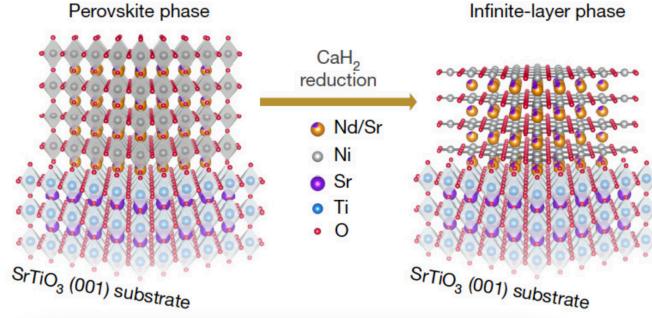


图 2: 无限层相 NdNiO_2 的制备 [1]。

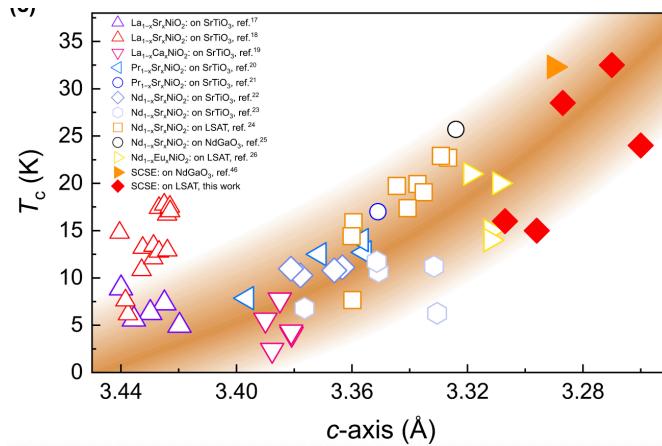


图 3: 不同 RNiO_2 型镍氧化物的超导转变温度 [12]。

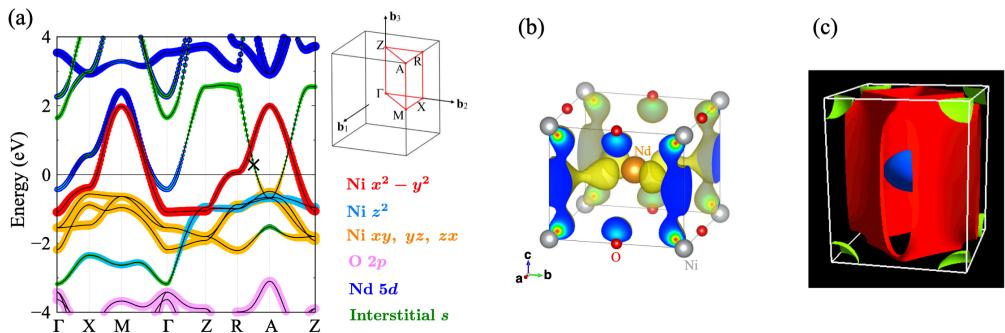


图 4: RNiO_2 型镍氧化物的电子结构 [13]。

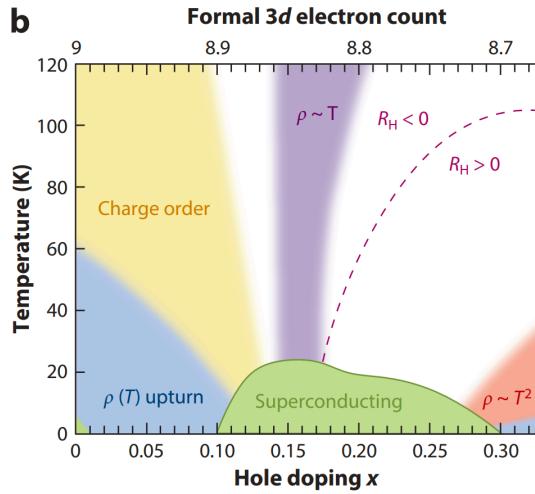


图 5: RNiO_2 型镍氧化物的温度-掺杂相图 [7]。

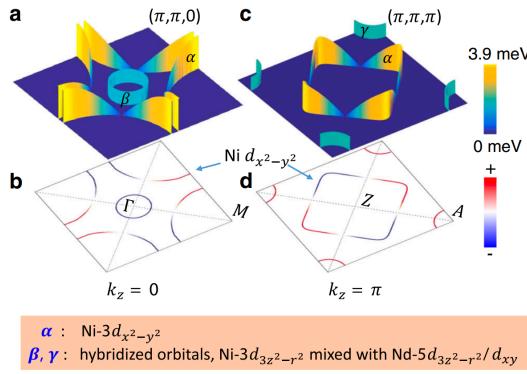


图 6: NdNiO_2 的费米面示意图 [8]。

3 Ruddlesden-Popper 型镍氧化物

3.1 材料合成与晶体结构

长久以来，人们认为镍基超导体只能出现在约化 RP 型镍氧化物中，而 RP 型镍氧化物 $\text{R}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ 中 Ni 的电子结构为 $d^{7+1/n}$ ，故不可能实现 d^9 电子结构对应的超导态。然而 2023 年王猛课题组发现，在 20GPa 左右的高压下， $n = 2$ 的 RP 型镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 存在超导态，转变温度接近 80K[14]。这开启了 RP 型镍氧化物超导体的研究热潮。

RP 型镍氧化物的晶格结构在图 7 中展示。其基本结构为由 n 层 RNiO_3 钙钛矿八面体层隔开的 R_2O_2 夹层。在高压下，Ni-O-Ni 键角接近 180 度，晶体结构从正交晶系的 Amam 空间群相变为四方晶系的 I4/mmm 空间群（图 8），形成线性链状结构单元。这被认为是超导态出现的关键因素之一。

然而， $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 存在若干影响其均匀性和高温超导相的问题。首先是氧缺陷 [15]，其次

是杂质相（实验中通常会伴随 $n = 1$ 的 La_2NiO_4 相和 $n = 3$ 的 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 相的形成 [16]）。一种改进方案是将部分 La 替换为 Pr，从而降低杂质相的占比，同时不改变晶格结构。实验上在 $\text{La}_2\text{PrNiO}_7$ 中消除了 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 相的影响，并在 8GPa 下观测到了转变温度约为 70K 的超导态 [17]。Pr 掺杂还引入了化学压效应，从而减小外压强阈值。

基于高压下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的超导现象，研究者开始尝试在常压下稳定其超导相。因为高压下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 发生结构相变，故在常压下实现超导相要求 $a = b$ 的四方晶系晶格结构。晶体外延生长技术为此提供了可能性。由于衬底的厚度（毫米级别）远大于沉积样品厚度（纳米级别），沉积样品会按照衬底的晶格常数生长。选择不同晶格常数的衬底还能调控 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 面内的压缩应变，从而使用面内应力等效替代外界高压。基于这一思路，研究者进行了诸多尝试。2024 年，Harold H.Hwang 课题组在 SrLaAlO_4 衬底上成功生长出了四方晶系的具有压缩应变的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜，经过臭氧退火处理之后在其中观测到了 40K 到 2K 范围内的宽超导转变 [18]。2025 年，薛其坤课题组通过巨型氧化原子层外延技术在 SrLaAlO_4 衬底上生长了 $\text{La}_{2.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜，并在其中观测到了 80K 的超导转变 [19]。这些实验证据表明，外延生长技术可以提供四方晶系结构和面内压缩应力，在常压下稳定 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的超导相。

除此之外，近年实验还在 $n = 3$ 的 RP 型镍氧化物 $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10}$ 中观测到了超导态，转变温度约为 30K [20]。这一发现进一步拓展了镍基超导体的研究范围。

3.2 电子结构

RP 型镍氧化物的电子结构与 RNiO_2 型镍氧化物存在显著差异。RP 型镍氧化物中 Ni 的电子结构为 $d^{7+1/n}$ ，这导致其费米面主要由 Ni 的三条 d 轨道贡献，而非 RNiO_2 型镍氧化物中的单一 $d_{x^2-y^2}$ 轨道，通常也不存在稀土元素轨道形成的额外费米口袋。

首先考虑 $n = 2$ 情形，即 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 。DFT 能带结果展现于图 9。Ni 的两条 $3d_{x^2-y^2}$ 轨道穿过费米面。常压下 $3d_{z^2}$ 位于费米面以下，被完全填满，而高压下它的能量上升，与费米面交叉。这表明 RP 型镍氧化物超导性与 $3d_{z^2}$ 轨道密切相关。

对于 SrLaSiO_4 衬底上生长的具有压缩应变的 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_{2.85}\text{Pr}_{0.15}\text{Ni}_2\text{O}_7$ 薄膜，其电子结构存在两条由 Ni 的 $d_{x^2-y^2}$ 轨道形成的关于费米能级对称分布的能带。随着温度的升高，谱权重逐渐从下能带向上能带转移。在费米能级以下 70meV 附近能带存在弯折，标志着电声耦合的作用 [21]。

3.3 超导性质

RP 型镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的压强-温度相图展示在图 10 中。在常压下系统不存在超导性，在高压下系统经历了结构相变，且在超导转变温度以上是奇异金属态。 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的超导机制包含两个主导因素。首先是 Ni 的 $3d_{x^2-y^2}$ 轨道。在高压下，结构相变和晶场调整使它接近半填充强关联状态，类似于单层铜基超导体，故存在反铁磁涨落介导的 d 波超导 [22]。其次是双层 NiO_2 平面的 $3d_{z^2}$ 轨道，它们形成成键和反成键两条分子态能带，能量劈裂接近 1eV。两条能带之间形成有效隧穿，从而增强了超导配对 [14]，形成 s 波超导。费米面以下 70meV 附近的电声耦合现象可能也对超导配对起到一定作用。O 的 $2p$ 轨道位于费米面附近，

可能通过增强超交换相互作用促进超导配对。另外，实验表明能隙在超过超导转变温度之后仍然存在，故可能存在预配对和赝能隙等机制 [21]。总体来说，RP 型镍氧化物 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的超导机制涉及多个轨道和相互作用的协同作用，其理论解释仍在不断发展中。

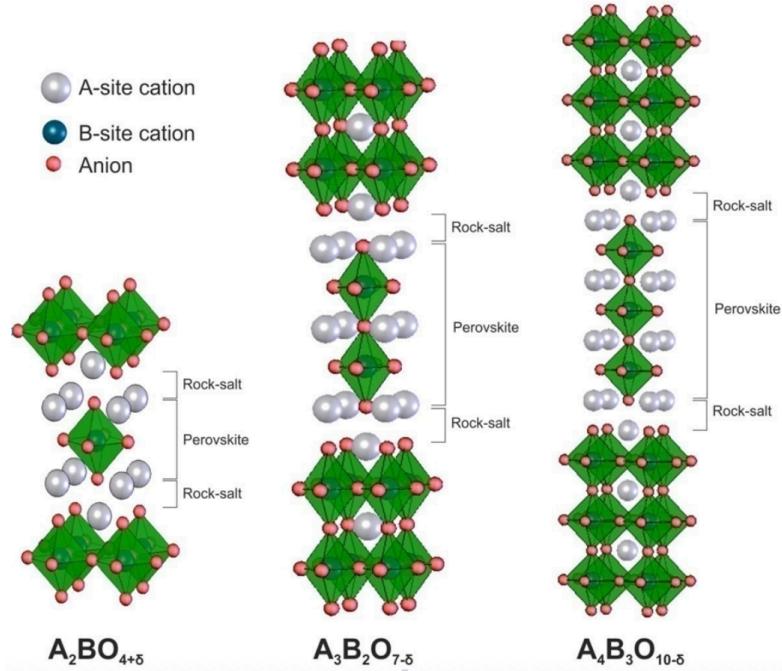


图 7: RP 型镍氧化物的晶格结构 [23]。

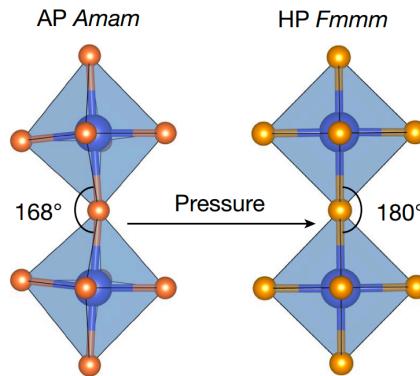


图 8: 高压下 RP 型镍氧化物的结构相变 [14]。

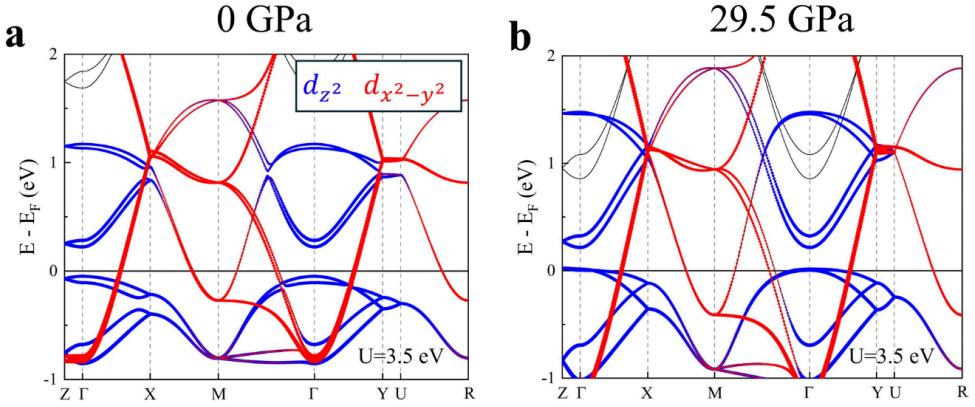


图 9: $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的电子结构 [24]。

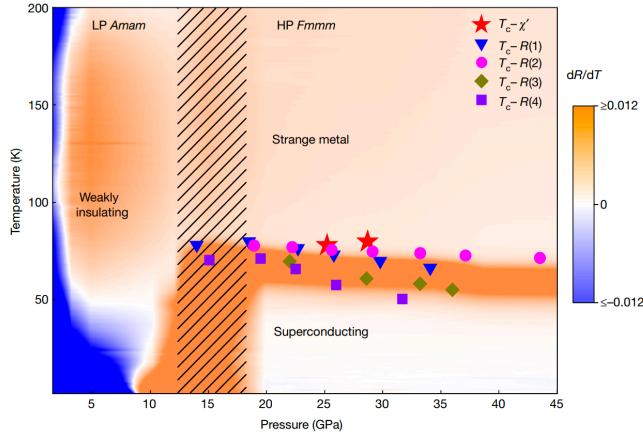


图 10: $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 的压强-温度相图 [14]。

4 总结

本文讨论了镍基超导体的晶体结构、电子结构和超导机制。镍基超导体主要包括 RNiO_2 型镍氧化物和 RP 型镍氧化物两大类。 RNiO_2 型镍氧化物与铜基超导体在晶体结构和电子结构上存在显著相似性，但也存在诸多差异，例如稀土元素轨道形成的额外费米口袋和较大的电荷转移能。RP 型镍氧化物，尤其是高压下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 中高温超导现象，则展现出不同的电子结构和配对特征。镍基超导体的超导机制仍然是一个开放性问题，涉及自旋涨落、电声耦合等多种因素。未来的研究需要进一步探索镍基超导体的配对机制、材料合成方法以及提高超导转变温度的途径。

参考文献

- [1] Danfeng Li, Kyuho Lee, Bai Yang Wang, Motoki Osada, Samuel Crossley, Hye Ryoung Lee, Yi Cui, Yasuyuki Hikita, and Harold Y Hwang. Superconductivity in an infinite-layer nickelate. *Nature*, 572(7771):624–627, 2019.
- [2] Antia S. Botana, Kwan-Woo Lee, Michael R. Norman, Victor Pardo, and Warren E. Pickett. Low valence nickelates: Launching the nickel age of superconductivity. *Frontiers in Physics*, Volume 9 - 2021, 2022.
- [3] S Lin Er Chow, Zhaoyang Luo, and A Ariando. Bulk superconductivity near 40 K in hole-doped SmNiO₂ at ambient pressure. *Nature*, 642(8066):58–63, June 2025.
- [4] Grace A Pan, Dan Ferenc Segedin, Harrison LaBollita, Qi Song, Emilian M Nica, Berit H Goodge, Andrew T Pierce, Spencer Doyle, Steve Novakov, Denisse Córdova Carrizales, et al. Superconductivity in a quintuple-layer square-planar nickelate. *Nature materials*, 21(2):160–164, 2022.
- [5] Junjie Zhang, Yu-Sheng Chen, D. Phelan, Hong Zheng, M. R. Norman, and J. F. Mitchell. Stacked charge stripes in the quasi-2d trilayer nickelate La₄Ni₃O₈. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(32):8945–8950, 2016.
- [6] A. S. Botana and M. R. Norman. Similarities and differences between LaNiO₂ and CaCuO₂ and implications for superconductivity. *Phys. Rev. X*, 10:011024, Feb 2020.
- [7] Bai Yang Wang, Kyuho Lee, and Berit H. Goodge. Experimental progress in superconducting nickelates. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 15(Volume 15, 2024):305–324, 2024.
- [8] Qiangqiang Gu, Yueying Li, Siyuan Wan, Huazhou Li, Wei Guo, Huan Yang, Qing Li, Xiyu Zhu, Xiaoqing Pan, Yuefeng Nie, and Hai-Hu Wen. Single particle tunneling spectrum of superconducting Nd_{1-x}Sr_xNiO₂ thin films. *Nat. Commun.*, 11(1):6027, November 2020.
- [9] Kyuho Lee, Bai Yang Wang, Motoki Osada, Berit H Goodge, Tiffany C Wang, Yonghun Lee, Shannon Harvey, Woo Jin Kim, Yijun Yu, Chaitanya Murthy, Srinivas Raghu, Lena F Kourkoutis, and Harold Y Hwang. Linear-in-temperature resistivity for optimally superconducting (Nd,Sr)NiO₂. *Nature*, 619(7969):288–292, July 2023.
- [10] Jonathan Karp, Antia S. Botana, Michael R. Norman, Hyowon Park, Manuel Zingl, and Andrew Millis. Many-body electronic structure of NdNiO₂ and CaCuO₂. *Phys. Rev. X*, 10:021061, Jun 2020.
- [11] Yusuke Nomura, Motoaki Hirayama, Terumasa Tadano, Yoshihide Yoshimoto, Kazuma Nakamura, and Ryotaro Arita. Formation of a two-dimensional single-component correlated electron system and band engineering in the nickelate superconductor NdNiO₂. *Phys. Rev. B*, 100:205138, Nov 2019.
- [12] Mingwei Yang, Heng Wang, Jiayin Tang, Junping Luo, Xianfeng Wu, Wenjing Xu, Aile Wang, Yuetong Wu, Ruilin Mao, Ze Wang, Zhicheng Pei, Guangdi Zhou, Zhengang Dong, Bohan Feng, Lingchi Shi, Wanjie Meng, Chuanying Xi, Li Pi, Qingyou Lu, Jun Okamoto, Hsiao-Yu Huang, Di-Jing Huang, Haoliang Huang, Qisi Wang, Peng Gao, Zhuoyu Chen, and Danfeng Li. Enhanced superconductivity and mixed-dimensional behaviour in infinite-layer samarium nickelate thin films, 2025. [arXiv:2503.18346](https://arxiv.org/abs/2503.18346).
- [13] Yusuke Nomura and Ryotaro Arita. Superconductivity in infinite-layer nickelates. *Rep. Prog. Phys.*, 85(5), March 2022.
- [14] Hualei Sun, Mengwu Huo, Xunwu Hu, Jingyuan Li, Zengjia Liu, Yifeng Han, Lingyun Tang, Zhongquan Mao, Pengtao Yang, Bosen Wang, et al. Signatures of superconductivity near 80K in a nickelate under high pressure. *Nature*, 621(7979):493–498, 2023.
- [15] Zehao Dong, Mengwu Huo, Jie Li, Jingyuan Li, Pengcheng Li, Hualei Sun, Lin Gu, Yi Lu, Meng Wang, Yayu Wang, and Zhen Chen. Visualization of oxygen vacancies and self-doped ligand holes in La₃Ni₂O_{7-δ}. *Nature*, 630(8018):847–852, June 2024.
- [16] Xinglong Chen, Junjie Zhang, Arashdeep S Thind, Shekhar Sharma, Harrison LaBollita, Gordon Petersen, Hong Zheng, Daniel P Phelan, Antia S Botana, Robert F Klie, and J F Mitchell. Polymorphism in the Ruddlesden-Popper nickelate La₃Ni₂O₇: Discovery of a hidden phase with distinctive layer stacking. *J. Am. Chem. Soc.*, 146(6):3640–3645, February 2024.
- [17] Ningning Wang, Gang Wang, Xiaoling Shen, Jun Hou, Jun Luo, Xiaoping Ma, Huixin Yang, Lifen Shi, Jie Dou, Jie Feng, Jie Yang, Yunqing Shi, Zhian Ren, Hanming Ma, Pengtao Yang, Ziyi Liu, Yue Liu, Hua Zhang, Xiaoli Dong, Yuxin Wang, Kun Jiang, Jiangping Hu, Shoko Nagasaki, Kentaro Kitagawa, Stuart Calder, Jiaqiang Yan, Jianping Sun, Bosen Wang, Rui Zhou, Yoshiya Uwatoko, and Jinguang Cheng. Bulk high-temperature superconductivity in pressurized tetragonal La₂PrNi₂O₇. *Nature*, 634(8034):579–584, October 2024.
- [18] Eun Kyo Ko, Yijun Yu, Yidi Liu, Lopa Bhatt, Jiarui Li, Vivek Thampy, Cheng-Tai Kuo, Bai Yang Wang, Yonghun Lee, Kyuho Lee, Jun-Sik Lee, Berit H Goodge, David A Muller, and Harold Y Hwang. Signatures of ambient pressure superconductivity in thin

- film La₃Ni₂O₇. *Nature*, 638(8052):935–940, February 2025.
- [19] Guangdi Zhou, Wei Lv, Heng Wang, Zihao Nie, Yaqi Chen, Yueying Li, Haoliang Huang, Wei-Qiang Chen, Yu-Jie Sun, Qi-Kun Xue, and Zhuoyu Chen. Ambient-pressure superconductivity onset above 40 K in (La,Pr)3Ni₂O₇ films. *Nature*, 640(8059):641–646, April 2025.
- [20] Yinghao Zhu, Di Peng, Enkang Zhang, Bingying Pan, Xu Chen, Lixing Chen, Huifen Ren, Feiyang Liu, Yiqing Hao, Nana Li, Zhenfang Xing, Fujun Lan, Jiyuan Han, Junjie Wang, Donghan Jia, Hongliang Wo, Yiqing Gu, Yimeng Gu, Li Ji, Wenbin Wang, Huiyang Gou, Yao Shen, Tianping Ying, Xiaolong Chen, Wenge Yang, Huibo Cao, Changlin Zheng, Qiaoshi Zeng, Jian-Gang Guo, and Jun Zhao. Superconductivity in pressurized trilayer La₄Ni₃O₁₀- δ single crystals. *Nature*, 631(8021):531–536, July 2024.
- [21] Jianchang Shen, Guangdi Zhou, Yu Miao, Peng Li, Zhipeng Ou, Yaqi Chen, Zechao Wang, Runqing Luan, Hongxu Sun, Zikun Feng, Ximru Yong, Yueying Li, Lizhi Xu, Wei Lv, Zihao Nie, Heng Wang, Haoliang Huang, Yu-Jie Sun, Qi-Kun Xue, Junfeng He, and Zhuoyu Chen. Nodeless superconducting gap and electron-boson coupling in (La,Pr,Sm)3Ni₂O₇ films, 2025. [arXiv:2502.17831](#).
- [22] Zi-Yu Cao, Di Peng, Seokmin Choi, Fujun Lan, Lan Yu, Enkang Zhang, Zhenfang Xing, Yuxin Liu, Feiyang Zhang, Tao Luo, Lixing Chen, Vuong Thi Anh Hong, Seung-Yeop Paek, Harim Jang, Jinghong Xie, Huayu Liu, Hongbo Lou, Zhidan Zeng, Yang Ding, Jun Zhao, Cailong Liu, Tuson Park, Qiaoshi Zeng, and Ho kwang Mao. Direct observation of d-wave superconducting gap symmetry in pressurized La₃Ni₂O₇- δ single crystals, 2025. [arXiv:2509.12606](#).
- [23] AV Nikonov, KA Kuterbekov, K Zh Bekmyrza, and NB Pavzderin. A brief review of conductivity and thermal expansion of perovskite-related oxides for sofc cathode. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 2(3), 2018.
- [24] Jiangang Yang, Hualei Sun, Xunwu Hu, Yuyang Xie, Taimin Miao, Hailan Luo, Hao Chen, Bo Liang, Wenpei Zhu, Gexing Qu, Cui-Qun Chen, Mengwu Huo, Yaobo Huang, Shenjin Zhang, Fengfeng Zhang, Feng Yang, Zhimin Wang, Qinjun Peng, Hanqing Mao, Guodong Liu, Zuyan Xu, Tian Qian, Dao-Xin Yao, Meng Wang, Lin Zhao, and X J Zhou. Orbital-dependent electron correlation in double-layer nickelate La₃Ni₂O₇. *Nature Communications*, 15(1):4373, May 2024.