第 49 卷第 2 期
2021 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 2
February，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200499

综 合 评 述

高压下富氢高温超导体的新探索

段德芳[1]，黄晓丽[1]，崔 田[1,2]

(1. 吉林大学物理学院，长春 130012；2. 宁波大学物理科学与技术学院 浙江 宁波 315211)

摘 要：实现室温超导是超导研究的终极目标。最近科学家在高压下富氢材料中发现了系列高温超导体，特别是首先被理论预测随后被实验证实的新型硫氢化物 H_3S 和镧系氢化物 LaH_{10}，它们的超导转变温度均超过 200 K。富氢材料已经被认为是室温超导体的最佳候选体系，成为物理、材料、超导等多学科的研究热点。综述了本课题组在此领域的主要成果，包括：在高压下成功制备了多种新型的笼状结构超氢化物 PrH_9 和 NdH_9，确定了它们的超导转变温度(T_c)，首次发现了具有强磁功能特性的 NdH_9，其磁性抑制了超导电性；设计了新型笼状超氢化物 CaH_9，其高压下的理论 T_c 达到了 266 K；实验和理论紧密结合，在温和压力条件下合成了超导锆氢化合物 ZrH_3 和 Zr_4H_{15}；进一步将二元氢化物拓展到三元氢化物，设计了 T_c 超过 60 K 的 $MgXH_6$(X=Si，Ge)。

关键词：高压；富氢材料；超导体；金刚石；对顶砧；第一性原理
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0250–06
网络出版时间：2020–10–22

New Exploration of Hydrogen-based High-temperature Superconductors under High Pressure

DUAN Defang[1], *HUANG Xiaoli*[1], *CUI Tian*[1,2]
(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China;
2. School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Developing room-temperature superconductors is the ultimate goal of superconducting research field. Recent work focus onthe development of high-temperature superconductors in hydrogen-rich materials under high pressure. Sulfur hydride (H_3S) and lanthanide hydride (LaH_{10}) with superconducting transition temperatures (T_c) of >200 K are theoretically predicted and then experimentally confirmed. Hydrogen-rich materials are considered as one of optimum candidates for room-temperature superconductors, thus becoming a hot research aspect in physics and materials. Some contributions in this aspect were achieved involve a variety of new cage-like superhydridesPrH_9 and NdH_9 are synthesized under high pressure, and their T_c is determined, The magnetic properties of NdH_9 are discovered and its magnetic properties suppress a superconductivity; Novel cage-like superhydrides of CaH_9 are designed under high pressure, and its T_c is predicted to be 266 K; superconducting zirconium hydrogen compounds ZrH_3 and Zr_4H_{15} are synthesized under mild pressure conditions by experimental and theoretical studie; The binary hydrides are extended to ternary hydrides, and $MgXH_6$ (X=Si, Ge) with T_c of 60 K are designed.

Keywords: high pressure; hydrogen-rich material; superconductivity; diamond; anvil cell; first principles

自从1911年荷兰物理学家Onnes发现汞的超导现象以来，寻找室温下的超导材料一直是科学家们竞相追逐的目标。20 世纪 80 年代以来，科学家们在铜氧化合物超导体和铁基超导体等非传统超导材料的研究上取得了很大的进展，如铜氧化合物的超导转变温度(T_c)在常压下为 133 K[1]，加压后可提高到 164 K[2]；近年来发现的铁基超导体最高 T_c 也达到了 56 K[3]。而传统高温超导体的研究进展则比较缓慢，2001 年在 MgB_2 中发现的最高 T_c 仅为 39 K[4]，远低于铜氧化合物的超导转变温度。根据 BCS 理论，材料的超导转变温度与其德拜温度成正比，而德拜温度又与物质的质量成反比。因此理论物理学家预言，自然界中

收稿日期：2020–07–06。　修订日期：2020–11–15。
基金项目：国家自然科学基金(51632002, 11674122, 11974133)。
第一作者：段德芳(1982—)，女，博士，教授。
通信作者：崔 田(1964—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–07–06.　**Revised date:** 2020–11–15.
First author: DUANDefang (1982–), female, Ph.D., Professor.
E-mail: duandf@jlu.edu.cn
Correspondentauthor: CUITian (1964–) male, Ph.D., Professor.
E-mail: cuitian@nbu.edu.cn

最轻的元素氢在高压下金属化后极有可能是室温超导体[5]，但至今实验上仍然没有获得金属氢的直接证据[6]，虽然近年来可以看到金属氢出现的报道，但是争议比较大，并没有得到学术界的共识。一些科学家更加关注含氢量较高的化合物，在这类化合物中由于非氢元素对氢子晶格的化学预压缩，实现金属化的压力比纯氢低得多，金属化之后有望呈现出优异的超导电性[7]。

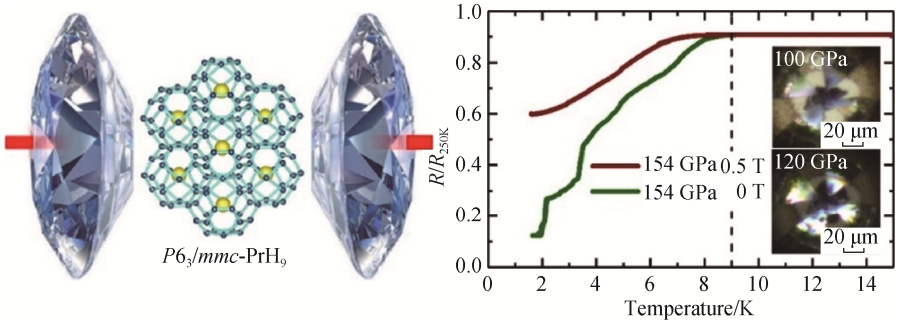
最近科学家在高压下富氢材料中发现了系列高温超导体，从自然界中已知的氢化物 SiH_4、GeH_4、SnH_4 和 AlH_3[8–11]扩展到了新型氢化物 H_3S、CaH_6、YH_6、YH_{10}、LaH_{10} 和 ThH_{10} 等[12–18]。本课题组在这一领域的研究成果包括：在高压下成功合成了笼状结构的超氢化物 PrH_9[19]和 NdH_9[20]等，理论设计了高压下多种超导转变温度超过 200 K 的新型富氢材料 H_3S[12–13]、CaH_9[21–24]等。特别是 2014 年课题组首次提出了新型共价氢化物 H_3S 在 200 GPa 下的超导转变温度高达 200 K[12–13]，随后被实验证实[25–26]，引领了人们在富氢材料中寻找室温超导体的研究热潮。最近理论预测[16–17]和实验测量[27–28]发现笼状结构的 LaH_{10} 在 200 GPa 超导温度达到 260 K，激励着研究者们继续寻找新型富氢材料。本文主要介绍了课题组最近几年在国家自然科学基金重点项目的支持下，在高压富氢材料这一领域做出的一些创新性研究成果。

1　高压下镧系笼状结构超氢化合物的实验制备及超导电性研究

选取镧系中具有代表性的金属单质与氢在高温高压条件下进行合成，利用高压原位同步辐射 XRD 和高压原位电学表征手段，结合第一性原理计算，对新型镧系金属氢化物进行了系统的研究，探究了镧系金属原子在超氢化合物的晶体结构和超导电性方面所起的作用，获得了一系列新型的超氢化物，发现了 La-Ce-Pr-Nd 系列氢化物的超导转变温度随 La-Ce-Pr-Nd 元素的原子量增加而下降。具体成果如下：

1.1　首次获得超导的镨超氢化物

为了在富氢材料中继续寻找潜在的高温超导体，同时探究镧系金属原子在超导转变中的作用，我们选取镨单质与不同的氢源，分别在“冷压”和“热压”两个路径下合成了多种新型镨氢化合物。其中，立方相-PrH_9 和六角相-PrH_9 均具有与 LaH_{10}、CeH_9 相似的氢笼构型，原位高压电阻测量结果显示其可能的超导转变温度低于 9 K。通过进一步的理论计算，发现镨氢化物中磁有序和电声相互作用在极接近的压力范围内共存，导致了其超导转变温度较低。



(a)　　(b)

图 1　金刚石对顶砧装置内合成的六角相-PrH_9(a)及原位高压超导转变 $R(T)$曲线、样品腔(b)照片[19]

Fig. 1　(a) Hexagonal phase-PrH_9 synthesized in the DAC, (b) Resistance steps at different magnetic fields, and the sample inside the DAC connected with four electrodes before and after laser heating[19]

研究表明，La-Ce-Pr 系列氢化物的超导转变温度随 La-Ce-Pr 元素的原子量增加而下降，镧系非氢元素的加入不仅为“金属氢”的子晶格提供电子而稳定了氢笼构型，而且在决定超导转变温度中也发挥着极为重要的作用。

1.2　首次高压合成出具有强磁功能特性的钕超氢化合物

稀土金属电子壳层中复杂的 d 和 f 电子数目的增加，对于 Fermi 能级 $N(E_F)$处总电子态密度的贡献不断增加，导致了超氢化合物磁性的增强。随着 d 和 f 电子的不断增加，是否会出现具有不寻常晶体结构的镧系超氢化合物，及其声子主导的超导电性与磁有序之间的相互作用关系，成为研究热点。

选取镧系中较重的钕单质与氢在高压下进行化合，通过激光加热金刚石对顶砧及原位高压实验，结合理论计算，在 90~140 GPa 压力范围内发现了 3

种新型的富氢化合物：*I*4/*mmm*-NdH_4, *C*2/*c*-NdH_7 及 $P6_3/mmc$-NdH_9，其中原位高压电阻测量实验在 4.5~300 K 范围内未观察到 $P6_3/mmc$-NdH_9 的超导转变。磁性计算结果显示：*I*4/*mmm*-NdH_4, *C*2/*c*-NdH_7 和 $P6_3/mmc$-NdH_9 分别具有与[112]，[144]和[23 $\bar{1}$]共线的反铁磁性，这是首次在氢化物体系中发现具有强磁性的富氢化合物。与镧氢化物相比，由于钕元素核外电子中 *d* 和 *f* 电子数目的增加使得钕氢化物具有较强的磁性，从而抑制了钕氢化物基于电子-声子耦合的超导电性。

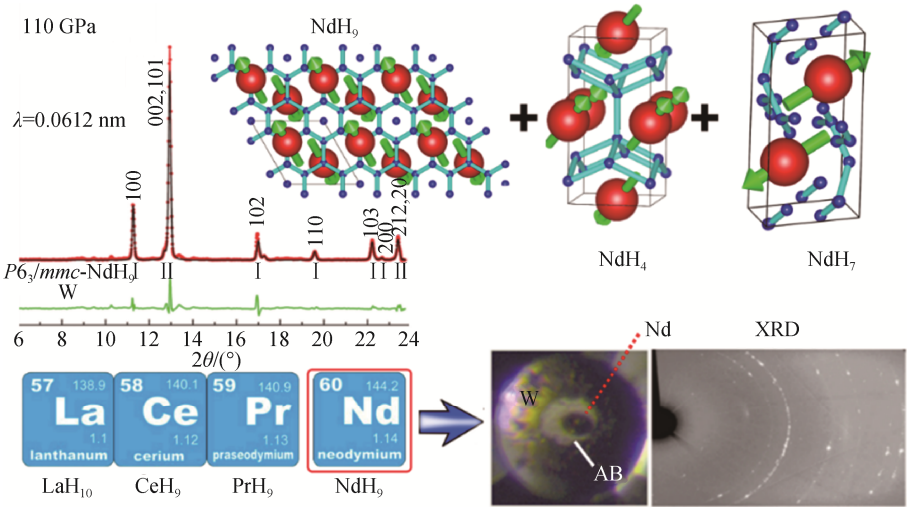


图 2　实验合成的三种新型 Nd-H 化合物的晶体结构图及 NdH_9 的 XRD 谱，NdH_9 样品腔照片及原始 XRD 环[20]

Fig. 2　Crystal structure of the three new Nd-H compounds synthesized experimentally and the X-ray diffraction pattern of NdH_9, NdH_9 sample inside DAC and the original X-ray diffraction ring[20]

2　高压下二元氢化物 Ca-H 及 Zr-H 体系的奇异结构及超导电性

从首个具有高 T_c 的氢笼结构 CaH_6 被提出后[14]，稀土氢化物 REH_n (n=6、9、10)中也发现了高 T_c 氢笼结构[15–17]。特别是理论预测氢笼结构的 YH_6、YH_9、LaH_{10} 分别在 120、150 和 200 GPa 下的超导转变温度达到 264、276 和 280 K。实验合成的 LaH_{10}，其在高压超导临界温度为 250~260 K(170~180 GPa)[27–28]，证实了理论预测。碱土金属及稀土元素笼型氢化的发现使得人们对与这类氢化物及相邻氢化物更加的关注。选取 Ca-H 体系及 Zr-H 体系，进行了深入的研究，发现了氢笼结构的 CaH_9，其超导转变温度达到 266 K；在理论指导下，温和压力条件下合成了超导锆氢化合物 ZrH_3 和 Zr_4H_{15}。

2.1　揭示了高压下 Ca-H 体系的独特相图和超导电性

通过晶体结构预测和化合物元素配比分析，在 Ca-H 体系中发现了新化学配比的钙氢化合物 CaH_9，其在 100~400 GPa 的压力范围内稳定存在。据目前的研究结果所知，CaH_9 可能是唯一具有奇数氢含量的碱土金属氢化物，氢原子形成了扭曲的 H_{29} 笼状结构。此外在 400 GPa 发现了亚稳相 $R\bar{3}$ *m*-CaH_{10}，氢原子以褶皱的蜂窝状二维层状结构存在。值得注意的是，新相 *C*2/*m*-CaH_9 和亚稳相 $R\bar{3}$ *m*-CaH_{10} 皆是潜在的高温超导体，在 300 GPa 和 400 GPa 下的 T_c 值分别为 266 K 和 175 K。电子结构分析表明，两者良好的超导电性主要因为 Fermi 能级处的电子态密度值 $N(\varepsilon_f)$是由 H 元素主导的。

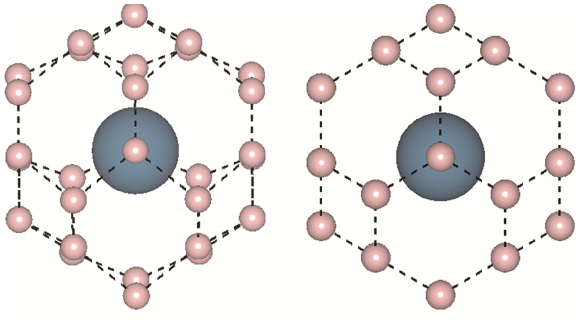


图 3　笼状结构(a) *C*2/*m*-CaH_9 (b) $P6_3/mmc$-CaH_9[21]

Fig. 3　Cage structure of (a) *C*2/*m*-CaH_9 and (b) P $P6_3/mmc$-CaH_9[21]

2.2　温和压力条件下实验合成了超导锆氢化合物 ZrH_3 和 Zr_4H_{15}

锆的氢化物不仅是潜在的超导材料，而且还是传统的储氢材料。储氢极限是 ZrH_2，是否存在 H 含量更高的氢化物是一个重要的科学问题。基于此，我们对 Zr-H 体系在 0~100 GPa 的压力范围内进行了

大量的结构搜索，成功预测出氢含量更高的氢化物：$Pm\bar{3}$ n-ZrH_3(比较有名的 A15 构型)和 $I\bar{4}3d$-Zr_4H_{15}(与 Th_4H_{15} 等结构)，二者的稳定压力范围分别为 8~100 GPa 和 4~100 GPa。并且提出了 2 个合成路径：$ZrH_2+H_2\rightarrow ZrH_3/Zr_4H_{15}$ 和 $Zr+H\rightarrow ZrH_3/Zr_4H_{15}$。为了验证理论结果，我们以 ZrH_2+H_2 和 $Zr+H_2$ 为前驱物，分别通过常温和激光加热，在比较温和的压力下(30~50 GPa)合成了 ZrH_3 和 Zr_4H_{15}，它们的成功合成打破了传统储氢极限，储氢体积密度分别达到了 163.7 g/L 及 180.8 g/L。如图 4 给出了 ZrH_3 和 Zr_4H_{15} 在 40 GPa 时的谱函数 $\alpha^2F(\omega)$及其积分$\lambda(\omega)$，发现 ZrH_3 的电声相互作用比 Zr_4H_{15} 的要强。同时，原位高压电阻以及外加磁场测量结果显示 ZrH_3 和 Zr_4H_{15} 的超导转变温度分别为 6.4 K 和 4.0 K，与理论计算结果较好符合。比较氢含量相同的 H_3S 和 ZrH_3 的超导特性，发现 ZrH_3 Fermi 面处 d 电子投影态密度较大以及锆原子质量较大抑制了电声相互作用，从而导致 T_c 较低。

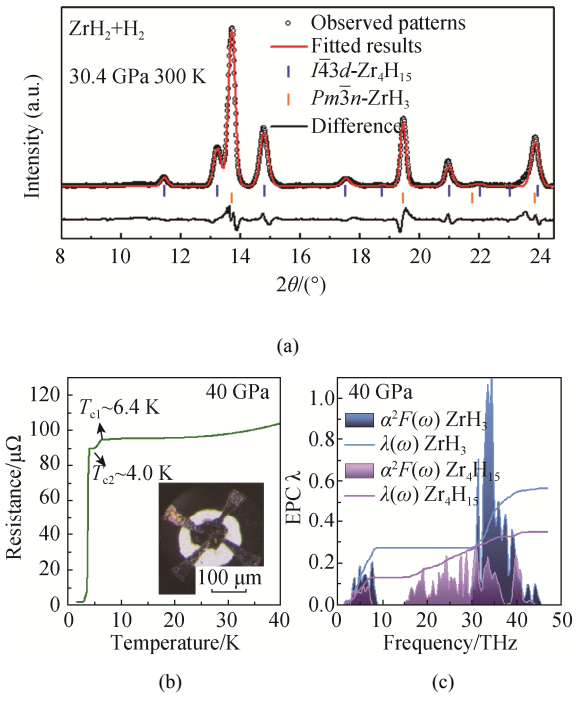


图 4　(a)ZrH_2+H_2 在 30.4 GPa、300 K 条件下反应产物的 Le Bail 精修谱，(b) 40 GPa 下，Zr-H 样品电阻随温度的变化曲线 $R(T)$，插图为激光加热后样品腔的照片，(c) ZrH_3 和 Zr_4H_{15} 在 40 GPa 下的谱函数及其积分$\lambda(\omega)$[22]

Fig. 4　(a) Le Bail refinement plot of powder XRD data (λ=0.06199 nm) obtained in ZrH_2+H_2 reaction route at 30.4 GPa. (b) Electrical resistance R (T) curve of Zr-H sample at 40 GPa. Inset shows the photo of the sample after laser heating. (c) Eliashberg spectral function $\alpha^2F(\omega)$ and the EPC integral $\lambda(\omega)$ of ZrH_3 and Zr_4H_{15}at 40 GPa[22]

3　高压下三元富氢材料的结构及超导电性研究

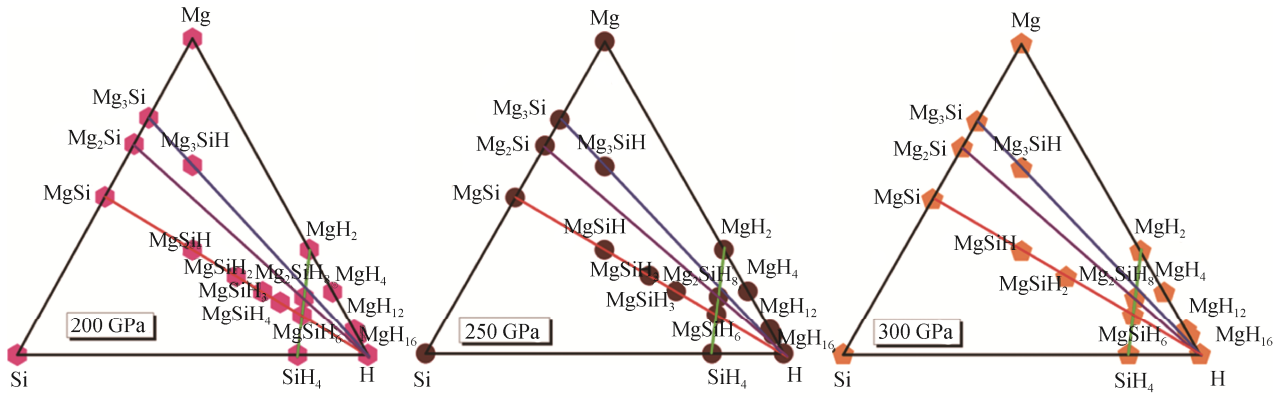
为了寻找更丰富的新型传统高温超导材料，将研究领域拓展到了三元氢化物。在国家自然科学基金项目的支持下，基于“化学预压缩”思想，通过在 T_c 较高的二元氢化物或者德拜温度较高的小分子氢化物体系中进一步掺杂碱金属或者碱土金属，引入更多的电子，重新进行化学组份和电子调控，获得一些新型的三元富氢材料。如在 Si-H 和 Ge-H 体系中掺入 Mg，获得了 T_c 超过 60 K 的 $MgXH_6$(X=Si，Ge)，并提出了三角形直线法的合成路径准则，可以方便的判断三元化合物的合成路径。

3.1　明确了三元 $MgSiH_6$ 的高压合成路径及其超导电性

首次在 250 GPa 以上设计了新的三元氢化物 $MgSiH_6$，它是离子型化合物，空间群为 $Pm\bar{3}$。第一性原理计算表明，立方的 $MgSiH_6$ 在 250 GPa 是一个潜在的高温超导体，T_c 约为 63 K。发现声子谱沿着 Γ-X 和 Γ-M 方向出现一些软的声子模式，相应的声子软化主要是由 Fermi 面嵌套行为引起的，对 $MgSiH_6$ 的超导电性起着至关重要的作用。提出了“三角形—直线”合成路径方法，即：即在三角形相图中，如果 1 条直线连接任意 2 种稳定的物质 A 和 B(A 和 B 其中一个为单质，另一个为二元化合物，或者全为二元化合物)，并且能够通过第三个三元氢化物 D，则证明这个三元氢化物 D 可能由 A 和 B 合成。根据 Mg-Si-H 体系的三元相图，如图 5 所示，建议了 $MgSiH_6$ 的 2 个高压合成路径：$MgH_2+SiH_4\rightarrow MgSiH_6$ 和 $MgSi+3H_2\rightarrow MgSiH_6$，此方法也适用于其它三元化合物，对实验上合成三元氢化物有重要的帮助和指导意义。

3.2　确定了高压下三元氢化物 $MgGeH_6$ 的合成路径和超导电性

设计出了高氢含量化学配比的 $MgGeH_6$，空间群为 $Pm\bar{3}$，提出了获得 $MgGeH_6$ 的 3 个不同高压合成路径：$Mg+Ge+3H_2\rightarrow MgGeH_6$、$MgGe+3H_2\rightarrow MgGeH_6$ 和 $MgH_2+GeH_4\rightarrow MgGeH_6$，即通过直接压缩元素单质 $Mg+Ge+3H_2$，也可以通过将 MgGe 合金掺入氢中，还可以通过挤压 MgH_2 和 GeH_4 来合成 $MgGeH_6$。电子结构计算表明立方的 $MgGeH_6$ 具有良好的金属性并且呈现离子型特点。电声耦合计算表明 $MgGeH_6$ 在 200 GPa 电声耦合参数 λ=1.16，其超导转变温度达约为 67 K[24]。



Solid symbols denote stable stoichiometries. Four different color lines stand for different synthesis routes for ternary hydrides

图 5 三元 Mg-Si-H 化合物在 200、250 和 300 GPa 下的高压相图[23]

Fig. 5 Trigonal phase diagrams of Mg-Si-H system at 200, 250 and 300 GPa, respectively[23]

4 展望

通过这一系列的研究工作，揭示了新型富氢材料的晶体结构特征、电子结构特征、氢的成键方式、磁性等因素与超导电性之间的内在联系，获得了具有高温超导电性的一般规律：

1) 具有高对称性结构；

2) 不存在 H_2 或 H_3 分子单元；

3) Fermi 面处 H 的电子态密度占比高;；

4) Fermi 面处电子与高频声子有强的耦合；

5) 不出现磁性。

这些发现为进一步理解和探寻未来新型超导体提供了崭新的思路、重要的数据以及新的实例，为寻找室温超导材料向前迈进了更现实的一步，拓展了高压超导研究领域。另一方面，可以通过掺杂元素的方式来降低此类超导体的合成压力，提高其超导性能。高压下的富氢材料是科学研究的富矿，在高温超导材料、储氢材料、新型功能材料等领域，都有着广阔的应用前景，值得进一步深入地探索。

参考文献:

[1] BEDNORZ J G, MüLLER K A. Possible high T_c superconductivity in the Ba−La−Cu−O system[J]. Z Phys B, 1986, 64(2): 189–193.

[2] GAO L, XUE Y Y, CHEN F, et al. Superconductivity up to 164 K in $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ under quasihydrostatic pressures[J]. Phys Rev B, 1994, 50(6): 4260–4263.

[3] WU G, XIE Y L, CHEN H, et al. Superconductivity at 56 K in samarium-doped SrFeAsF[J]. J Phys-Condens Matter, 2009, 21(14): 142203.

[4] NAGAMATSU J, NAKAGAWA N, MURANAKA T, et al. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride[J]. Nature, 2001, 410(6824): 63–64.

[5] ASHCROFT N W. Metallic hydrogen: A high-temperature superconductor?[J]. Phys Rev Lett, 1968, 21(26): 1748.

[6] DALLADAY-SIMPSON P, HOWIE R T, GREGORYANZ E. Evidence for a new phase of dense hydrogen above 325 gigapascals[J]. Nature, 2016, 529(7584): 63–67.

[7] ASHCROFT N W. Hydrogen dominant metallic alloys: high temperature superconductors?[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(18): 187002.

[8] EREMETS M I, TROJAN I A, MEDVEDEV S A, et al. Superconductivity in hydrogen dominant materials silane[J]. Science, 2008, 319(5869): 1506–1509.

[9] GAO G, OGANOV A R, BERGARA A, et al. Superconducting high pressure phase of germane[J]. Phys Rev Lett, 2008, 101(10): 107002.

[10] GAO G, OGANOV A R, LI P, et al. High-pressure crystal structures and superconductivity of Stannane (SnH4)[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107(4): 1317–1320.

[11] GONCHARENKO I, EREMETS M I, HANFLAND M, et al. Pressure-induced hydrogen-dominant metallic state in aluminum hydride[J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(4): 045504.

[12] DUAN D, LIU Y, TIAN F, et al. Pressure-induced metallization of dense $(H_2S)_2H_2$ with high-Tc superconductivity[J]. Sci Rep, 2014, 4: 6968.

[13] DUAN D, HUANG X, TIAN F, et al. Pressure-induced decomposition of solid hydrogen sulfide[J]. Phys Rev B, 2015, 91(18): 180502.

[14] WANG H, TSE J S, TANAKA K, et al. Superconductive sodalite-like clathrate calcium hydride at high pressures[J]. Proc Natl Acad Sci U.S.A., 2012, 109(17): 6463.

[15] LI Y, HAO J, LIU H, et al. Pressure-stabilized superconductive yttrium hydrides[J]. Scient rep, 2015, 5: 9948.

[16] LIU H Y, NAUMOV, II, HOFFMANN R, et al. Potential high-T-c superconducting lanthanum and yttrium hydrides at high pressure[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(27): 6990–6995.

[17] PENG F, SUN Y, PICKARD C J, et al. Hydrogen clathrate structures in rare earth hydrides at high pressures: Possible route to room-temperature superconductivity[J]. Phys Rev Lett, 2017, 119(10): 107001.

[18] KVASHNIN A G, SEMENOK D V, KRUGLOV I A, et al. High-temperature superconductivity in a Th–H system under pressure conditions[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(50): 43809–43816.

[19] ZHOU D, SEMENOK D V, DUAN D, et al. Superconducting praseodymium superhydrides[J]. Sci Adv, 2020, 6(9): eaax6849.

[20] ZHOU D, SEMENOK D V, XIE H, et al. High-pressure synthesis of magnetic neodymium polyhydrides[J]. J Am Chem Soc, 2020, 142(6): 2803–2811.

[21] SHAO Z, DUAN D, MA Y, et al. Unique phase diagram and superconductivity of calcium hydrides at high pressures[J]. Inorg Chem, 2019, 58(4): 2558–2564.

[22] XIE H, ZHANG W, DUAN D, et al. Superconducting zirconium polyhydrides at moderate pressures[J]. J Phys Chem Lett, 2020, 11: 646–651.

[23] MA Y, DUAN D, SHAO Z, et al. Divergent synthesis routes and superconductivity of ternary hydride $MgSiH_6$ at high pressure[J]. Phys Rev B, 2017, 96(14): 144518.

[24] MA Y, DUAN D, SHAO Z, et al. Prediction of superconducting ternary hydride $MgGeH_6$: from divergent high-pressure formation routes[J]. Phys Chem Chem Phys, 2017, 19(40): 27406–27412.

[25] 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.

[26] EINAGA M, SAKATA M, ISHIKAWA T, et al. Crystal structure of the superconducting phase of sulfur hydride[J]. Nat Phys, 2016, 12(9): 835.

[27] 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.

[28] SOMAYAZULU M, AHART M, MISHRA A K, et al. Evidence for superconductivity above 260 K in Lanthanum superhydride at megabar pressures[J]. Phys Rev Lett, 2019, 122(2): 027001.