

高温超导体材料调研

王展鹏

2020 年 5 月 9 日

摘要 这是高温半导体材料的调研内容，先写上东西再说，摘要很长很长很长很长很长

1 引言

超导体 (Superconductor)，指可以在特定温度以下，呈现电阻为零的导体。零电阻和完全抗磁性是超导体的两个重要特性。超导体电阻转变为零的温度，称为超导临界温度，据此超导材料可以分为低温超导体和高温超导体。虽然是高温超导，其实是相对于绝对零度而言，因此其温度可以远低于冰点摄氏 0°C 。当温度很低时，超导体并没有太大的应用，科学家一直在寻求提高超导材料的临界温度，称之为“高温超导体”。

水银的电阻完全消失，这种现象称为超导电性，将此温度称为临界温度。

1933 年，瓦尔特·迈斯纳和罗伯特·奥克森菲尔德两位科学家发现，如果把超导体放在磁场中冷却，则在材料电阻消失的同时，磁感应线将从超导体中排出，不能通过超导体，这种现象称为抗磁性。经过科学家的努力，磁电障碍已被跨越，下一个难关是突破温度障碍，寻求高温超导材料。

2015 年，德国普朗克研究所的 V.Ksenofontov 和 S.I.Shylin 研究组创下了新的超导温度记录：203K。其物质为硫化氢。

1.1 超导体演化历史

1911 年，荷兰科学家海克·卡末林·昂内斯用液氮冷却汞，发现当温度下降到绝对温标 4.2K 时

图1即为已发现的各种超导材料的超导临界温度概述 [1]。

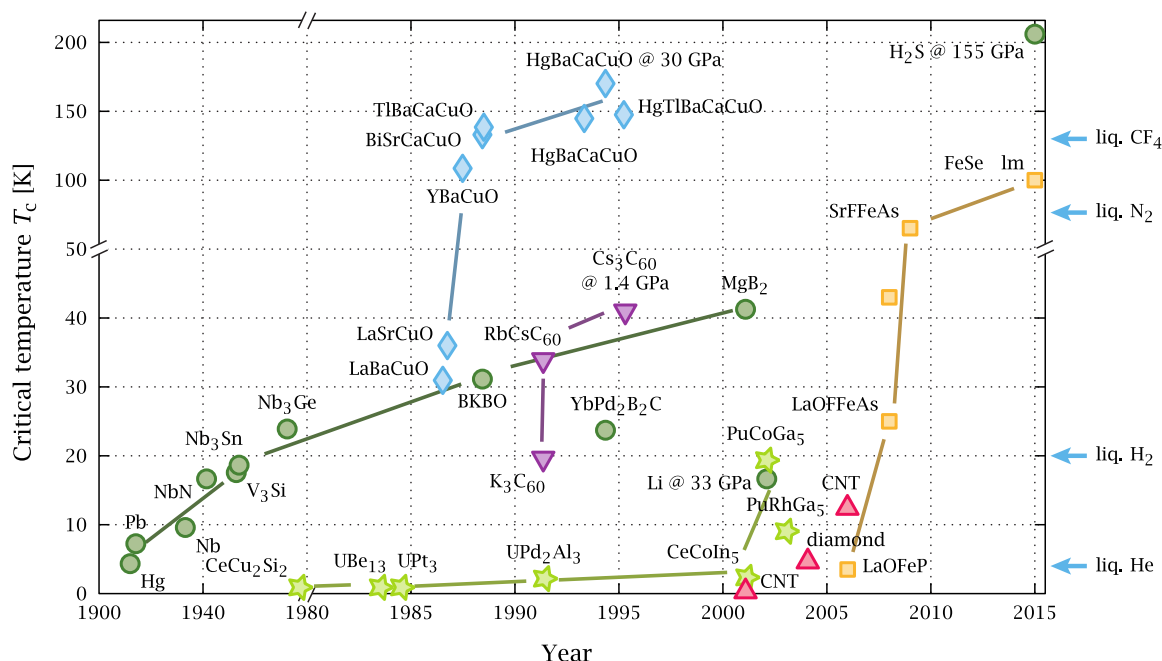


图 1: 自 1911 年首次发现以来，各种超导材料的超导临界温度概述

温度 (开尔文)	材料	种类
300	常温 (27°C/80.6°F)	
250	LaH ₁₀ (十氢化镧, 170 GPa高压) ^[10]	氢基超导体
203	H ₂ S (150 GPa高压) ^[9]	
195	干冰的升华点	
138	Hg ₁₂ Tl ₃ Ba ₃₀ Ca ₃₀ Cu ₄₅ O ₁₂₇	铜氧化物超导体
110	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (BSCCO (英语))	
92	YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (YBCO)	
77	液态氮的沸点	
43	SmFeAs(O,F)	铁基超导体
41	CeFeAs(O,F)	
26	LaFeAs(O,F)	
20	液态氢的沸点	
18	Nb ₃ Sn	金属低温超导体
10	NbTi	
4.2	Hg (汞)	

图 2: 超导材料一览

1.2 高温超导体简介

高温超导体 (High-temperature superconductors) 是超导物质中的一种族类, 具有一般的结构特征以及相对上适度间隔的铜氧化物平面。它们也被称作铜氧化物超导体。此族类中一些化合物中, 超导性出现的临界温度是已知超导体中最高的。不同铜氧化物在常态 (以及超导态) 性质之间具有共同的特征; 这些性质中, 许多无法以金属的传统理论来解释。

如图2, 当温度大于 77K, 超导材料被称为突破液氮的“温度壁垒”的材料。高温超导铜氧化物超导体等都是现在高温超导材料研究的热门材料。

2 高温超导发展简史

铜氧化物超导体在实验上是由卡尔·米勒及约翰内斯·贝德诺尔茨首度发现。

1987 年, 来自台湾的美国物理学家吴茂昆和朱经武在钇钡铜氧系材料上把临界温度提高到了 90K 以上。以吴茂昆为第一作者的论文 [2] 发表以来已获期刊引用论文五千多次, 史上第一次超越液态氮沸点“温度壁垒”将超导温度从 30K 提升到 90K, 被称为超导体领域 30 年来最重要的先驱之一。

2015 年, 物理学者发现, 硫化氢在极度高压的环境下 (至少 150GPa, 也就是约 150 万标准大气

压), 约于温度 203K 时会发生超导相变 [3]。

2018 年, 德国化学家发现十氢化镧有超导性出现, 是目前已知最高温度的超导体。

十氢化镧是镧和氢形成的氢化物之一, 化学式为 LaH₁₀, 是一种多氢化物或超氢化物, 有望用作高温超导体。它的超导转变温度 T_c 为约 250 K 150GPa, 是 2019 年记录新高。其合成需要约 160 GPa 以上的压力。在 1,000K 能够制得立方晶系的晶体, 在室温得到的是六方晶系的晶体 [4]。

3 国内外高温超导材料发展现状

4 我国高温超导体领域应用现状

4.1 高温超导输电

我国能源资源和负荷的地理分布决定了我国电能输送具有划区域、远距离和大规模的特点, 西南的水电、西北的火电、风电和太阳能发电将送至华北、华中、华南和南方从而形成大规模“西电东送”、“北电南送”电力流格局 [5]。为了提高能源、环境和经济等综合利用效率, 从“十二五”起我国将大力发展特高压交流和直流输电。其中特高压交流定位于主网架建设和跨大区送电, 直流定位于大型能源基地的远距离、大容量外送和跨网电源输送。

电网的损耗主要源于输配电线路及变压器, 其

中输电线路损耗约占 1/3, 即大约为总发电功率的 2.5% 左右。采用新的输电技术以提高电网的效率是十分重要和迫切的任务。

目前, 高温超导体的性能越来越接近实用化的水平, 因此它以后再很多方面必将取代低温超导体, 因此建议开展面向配电系统的高温超导体限流器的研究与开发工作。同时还可以为以后从事其它超导电力设备和超导电力系统的研究和开发打下基础, 并通过高温超导限流器的研究和试验运行使我国在高温超导的电力应用方面有重大技术突破并达到国际一流水平 [6]。

4.2 高温超导体在聚变领域应用前景

铜氧化物高温超导体主要有四大类: $\text{Bi}(\text{BiSrCuO}, \text{BSCCO})$, $\text{Y}(\text{YBaCuO}, \text{YBCO})$, $\text{Ti}(\text{TiBaCaCuO})$, $\text{Hg}(\text{HgBaCaCuO})$, 它们的各自临界温度都在 77K , 可以工作在液氮温区。[7]

4.3 高温超导体磁悬浮技术研究

高温超导磁悬浮利用高温超导体在混合态中的磁通钉扎特性以及抗磁性来实现稳定悬浮。这种自稳定悬浮无需外加能量输入, 抗干扰能力强, 相比于其它悬浮方式具有非常明显的优势。[8]

2000 年, 我国引进德国磁悬浮 TR08 系列磁悬浮列车, 建成上海浦东机场线, 并于 2004 年正式投入商业运营 [9]。长沙磁浮快线工程于 2014 年 5 月 16 日正式开工, 于 2015 年下半年建成, 于 12 月 26 日开始试运行, 并于 2016 年 5 月 6 日投入载客试运营。2019 年 5 月 23 日, 我国时速 600 km , 高速磁悬浮试验样车在青岛下线。

2000 年 12 月, 我国西南交通大学已经完成了世界上第一辆载人高温超导磁悬浮试验车系统。该课题于 2001 年 2 月 11 日通过了由国家“863”计划国家超导技术专家委员会首席专家甘子钊院士主持的验收。验收会议认为: 此项成果“是长期努力的创造性成果, 它开拓了在磁悬浮技术上实现创新跨越发展的可能性。”所用的高温超导钇钡铜氧块材, 我国已经具备了批量生产的能力, 高温超导磁悬浮技术所需的特殊原材料钇和钆均属于我国富有的稀土元素。与现在我国已从德国引进的常导磁悬浮列车相比, 不仅具有其不可及的一系列优点, 而且拥有我国自己的全部知识产。[10]

2006 年, 西南交通大学王家素团队设计了一种高温超导磁悬浮系统。发射系统是由悬浮滑车、永

磁体轨道和直线电机组成。车辆由车载 HTS、磁浮装置和车体组成。该高温超导磁悬浮发射系统的永磁轨道长 10.05 m 、宽 0.68 m 。真空输送管 (ETT) 中真空管的框架长 11.2 m 、宽 1.0 m 。真空管相对于水平方向的纵坡为 $0 \sim 30^\circ$, 与水平方向的横坡为 15° 。高温超导磁悬浮发射车长 1.0 m 、宽 1.0 。[11]

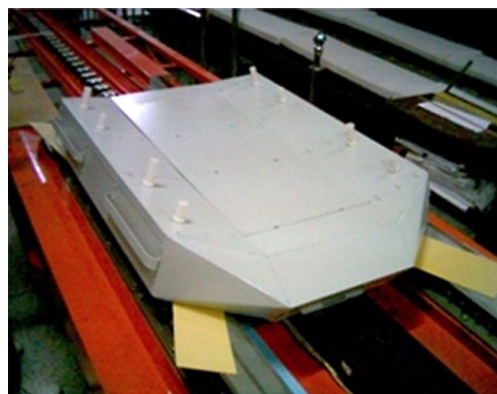


图 3: HTS 磁悬浮发射平台的悬浮体

5 我们的工作

中国科学院系统梳理了改革开放 40 周年以来中科院广大广大科研人员取得的众多重大科技成果, 以“三个面向”为线索, 综合凝结归纳出 40 项具有代表性的标志性重大科技成果。40 项标志重大成果经学术委员会委员审核把关, 通过网络向院属单位和社会进行了公示, 已收录于《改革开放先锋创新发展引擎——中国科学院改革开放四十年》¹一书, 现予以公布。

其中高温超导体研究位于 40 项**重大科技成果**首位。中国科大和物理研究所在铁基超导体研究方面先后在国际上首次突破了麦克米兰极限温度², 确定铁基超导体为新一类高温超导体, 并在物理性质研究方面取得重要成果, 具有潜在应用价值, 获得 2013 年国家自然科学一等奖。

6 总结

氧化物高温超导材料将会是液氮温区下强电应用的主角, 应用前景广泛。以 YBCO 图层导体为代表的第二代高温超导带材正处于产业化前夜, 人们

¹中国科学院改革开放四十年 40 项标志性重大科技成果. 中国科学院院刊, 2018, 33(12): 1282-1313

²科学家麦克米兰根据获 1972 年诺贝尔奖的 BCS 理论计算, 认为超导临界温度最高不大可能超过 40K , 他的计算得到了国际学术界的普遍认同, 40K 也因此被称作“麦克米兰极限”。

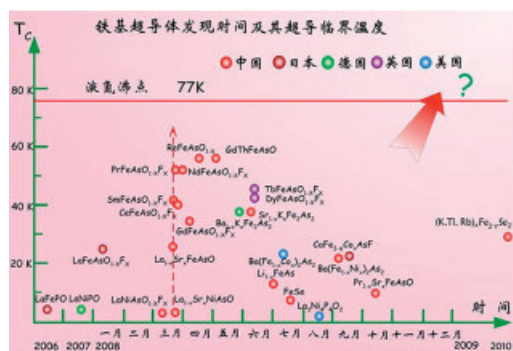


图 4: 铁基超导体发现时间及其超导临界温度

正在努力推动起向低成本、稳定化和规模化方向发展 [12]。

超导技术作为 21 世纪的战略高技术,被世界各国所重视,特别是实用化超导材料的研究与应用一直是国际最激烈也是最活跃的领域之一。

参考文献

- [1] Pia Jensen Ray. Master's thesis: Structural investigation of $\text{La}(2-x)\text{Sr}(x)\text{CuO}(4+y)$ - Following staging as a function of temperature. 2016.
- [2] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu. Superconductivity at 93 k in a new mixed-phase y-ba-cu-o compound system at ambient pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 58:908–910, Mar 1987.
- [3] AP Drozdov, MI Eremets, IA Troyan, Vadim Ksenofontov, and SI Shylin. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. *Nature*, 525(7567):73–76, 2015.
- [4] AP Drozdov, PP Kong, VS Minkov, SP Besedin, MA Kuzovnikov, S Mozafari, L Balicas, FF Balakirev, DE Graf, VB Prakapenka, et al. Superconductivity at 250 k in lanthanum hydride under high pressures. *Nature*, 569(7757):528–531, 2019.
- [5] 严陆光, 周孝信, 甘子钊, 周远, et al. 关于发展高温超导输电的建议. 电工电能新技术, 33(1):1–9, 2014.

- [6] 肖立业 and 林良真. 超导限流器——超导技术产业化的领头产品. 科技导报, 17(9907):37-40, 1999.
- [7] 孙林煜 and 李鹏远. 第二代高温超导体研究与在聚变领域应用前景. PhD thesis, 2012.
- [8] 刘文旭, 李文龙, and 方进. 高温超导磁悬浮技术研究论述. 低温与超导, (2):9, 2020.
- [9] Y. Luguang. Progress of the maglev transportation in china. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16(2):1138-1141, 2006.
- [10] 沈志云, 葛昌纯, 甘子钊, 杨叔子, 熊有伦, 闻邦椿, 宋玉泉, 汪耕, 刘宝珩, 经福谦, et al. 在我国建设世界上第一条高温超导磁悬浮列车试运行线的建议. 中国科学院院刊, (1):28-28, 2012.
- [11] ST Pan, SY Wang, DH Jiang, and JS Wang. Influence of the vertical inclination of permanent magnet guideway on levitation characteristics of hts maglev system. *Journal of superconductivity and novel magnetism*, 24(5):1677-1681, 2011.
- [12] 马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望. 物理, 44(10):674-683, 2015.