

超导的典型应用

罗会仟

(中国科学院物理研究所 100190)

超导材料具有独特的绝对零电阻、完全抗磁性、磁通量子化等物理特性,这使得它们几乎在所有可以用到电和磁的方面都有用武之地(图1)^[1]。特别是在需要突破传统功能材料电磁能力极限的地方,超导材料有着不可替代的应用,例如实现零损耗载流、高电流密度、强磁场、量子极限测量等^[2]。遗憾的是,受到实际应用条件和环境的制约,以及化学稳定性、加工难度、机械强度、原料成本等方面的影响,已有的上万种超导材料里适合应用的体系却极其有限。常见的超导应用材料体系有Nb、Nb-Ti合金、Nb₃Sn、Nb₃Al、MgB₂、ReBa₂Cu₃O_{7-δ}、Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ}、Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ}、Ba_{1-x}K_xFe₂As₂等^[3-5]。近年来,超导的规模化应用正在迈入一个崭新的阶段,根据欧洲超导行业协会 Conectus 数据显示,全球超导产品市场规模在2022年为68亿欧元,到2027年

有望增至192亿欧元。在本文中,我们简要介绍超导材料在强电和弱电条件下的应用,并展望超导的量子应用。

一、超导的强电应用

处于零电阻状态的超导体能承载极大的电流密度且没有发热带来的能量损耗,在电力系统具有非常广泛的应用,主要包括高密度低损耗输电、超导电动机、超导储能,以及超导变压器、限流器、转换接头等各种电力设备(图2)^[6]。2021年9月,粤港澳大湾区第一高楼——深圳平安金融中心的供电由一条直径17.5厘米、长400米、输电容量高达43兆伏安的高温超导电缆来承担,其输电能力是传统电缆的5倍,输电损耗仅是常规电缆的1/4到1/5^[7];2021年12月,世界首条35千伏千米级高温超导输

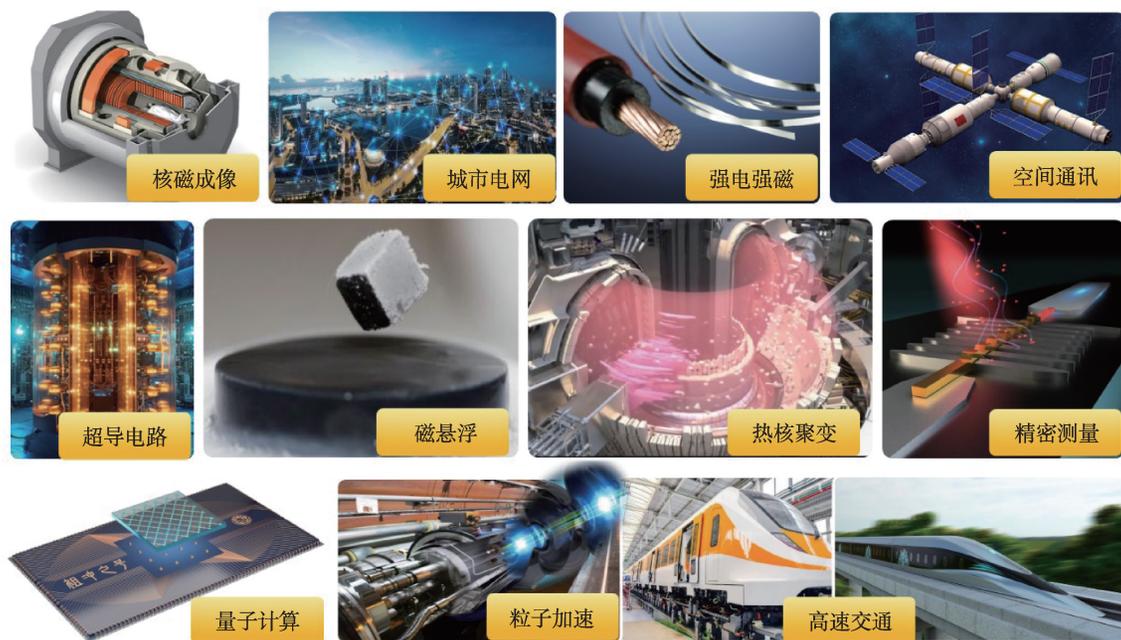


图1 超导材料的典型应用^[1]

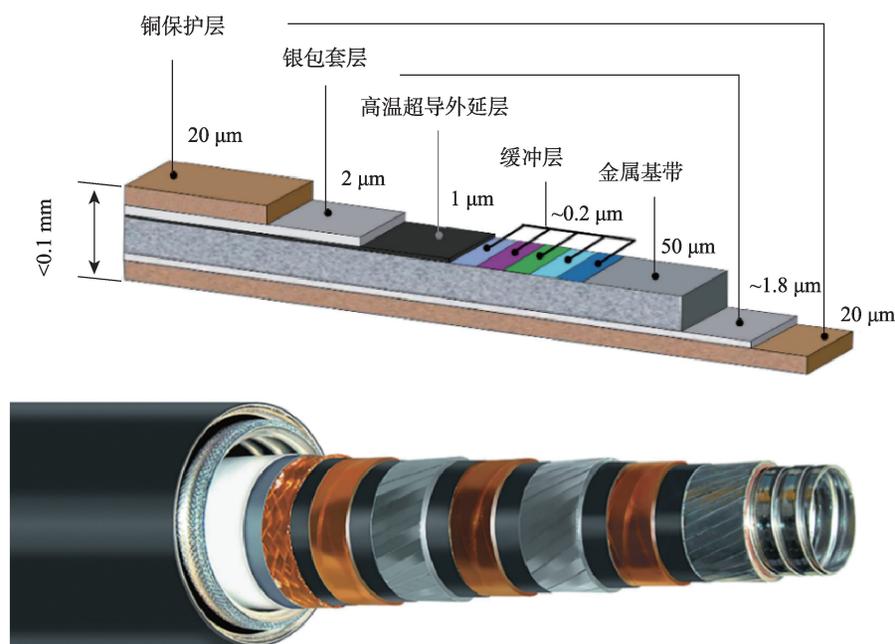


图2 铜氧化物高温超导带材及电缆的内部结构^[9]

电示范工程在上海徐汇区中心地段正式投入运行,持续稳定地为该区域4.6万用户供电至今^[8]。借助可实用化超导体在低温下极强的载流能力和极高的上临界场,能够实现各种场景下的强磁场应用。

对于凝聚态物理基础科研而言,强磁场结合极低温、超高压等极端条件是发现新物理的重要手段,已有的商业化超导磁体可以实现9 T、12 T、15 T等级别的磁场,特殊设计的超导磁体可达20~30 T,全超导磁体实现的稳态强磁场最高纪录为32.35 T,混合磁体的最高纪录则在45.22 T左右。对于核磁共振功能成像(fMRI)而言,需要构造一个人体尺度的超大腔磁体,且保证腔体内磁场的极高均匀度,而且信号强度、成像分辨率直接与磁场强度正相关,目前已有3 T、5 T、7 T等不同级别的fMRI商业设备,9.4 T和11.7 T的fMRI磁体也正在研制,如果进一步实现14 T的fMRI,将能实现单个大脑神经元的高分辨扫描。对于磁约束可控核聚变而言,聚变功率与磁场强度的四次方成正比,因此提升磁场强度是关键核心技术,但聚变磁体往往尺寸非常庞大,例如国际热核聚变堆(ITER)的磁体就有三层楼那么高,采用超导磁体几乎是唯一的选择(图3)^[10]。

对于高能粒子加速器而言,加速磁体的场强决定了加速效率,超导强磁体的应用可以极大减少加速器的尺寸,从而大幅降低建设和运行成本。目前国际上最高能量的粒子加速器——大型强子对撞机(LHC)的对撞能量为14 TeV,如此高能的粒子已经不能单纯靠2 T左右的常规电磁铁来实现,而必须依赖于更高场强的超导磁体,才能偏转或聚焦如此高能的粒子。LHC现在采用的超导加速磁体为8.3 T,并准备将部分磁体升级到11 T^[11],未来加速器还可能采用15~20 T的高温超导磁体。

超导磁悬浮列车有两种实现方案:一是将铜氧化物高温超导块材置于强磁场中,利用其强大的磁通钉扎效应来实现超导磁悬浮,该方案下列车的悬浮高度可达10~20毫米,浮重比可达到1:20左右;二是将高温超导带材制成特殊的超导磁体,在列车逐渐提速运行下,借助切割磁力线产生的斥力实现电动悬浮(图1)。2000年12月,世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车“世纪号”在西南交通大学研制成功;2015年4月,日本山梨县的低温超导磁悬浮列车实现了时速603千米的试运行,并计划在2027年开通东京至名古屋超导磁悬浮中央新干线;2021

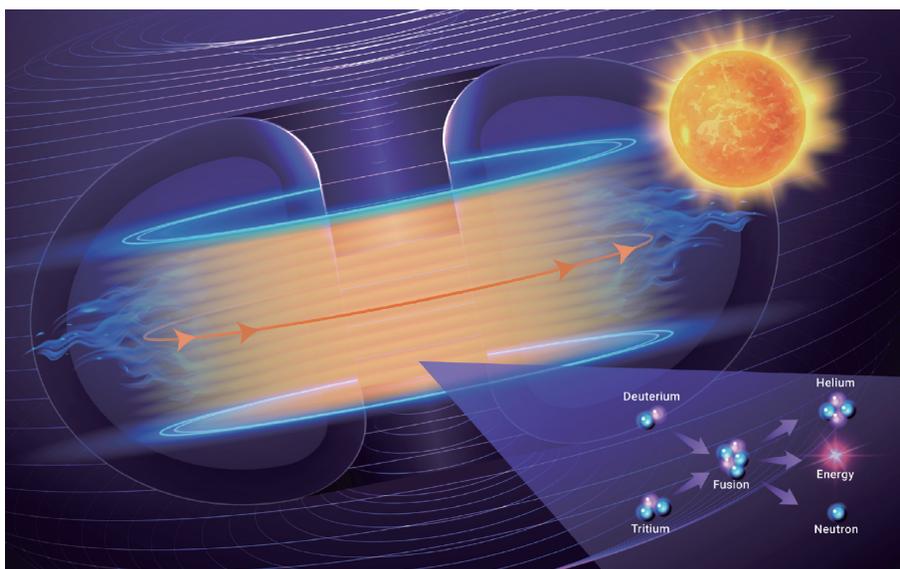


图3 “人造小太阳”——超导可控核聚变示意图^[10]

年1月,西南交通大学完成了世界首台高温超导高速磁悬浮工程样车的研制^[12];2023年3月,由中国中车自主研发的国内首套高温超导电动悬浮系统在长春中车长客公司完成首次悬浮运行^[13]。

超导的强电强磁应用还可以用于风力发电、磁体除铁、磁体选矿、动能弹射、污水净化、感应加热熔炼等。2023年4月,由江西联创公司研制的世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置在中铝集团东北轻合金公司正式投用,将传统工频感应炉的能效转化率提升了一倍,节能50%,碳排放减少一半以上(图4)^[14]。

超导强电应用场景下对超导体的临界参数有很高的要求,主要涉及:临界温度 T_c ,临界磁场 H_c (或 H_{c2}),临界电流密度 J_c 。这三个临界参数相互牵制,构成了超导体的“临界曲面”(图5),只要任何一个参数被突破,就会转变为有电阻的正常态,意味着承载极大电流的超导设备会迅速发热甚至烧毁^[3]。一般来说,临界温度 T_c 和临界磁场 H_c 由材料本征性质所决定,临界电流密度 J_c 则更多依赖于材料具体的磁通钉扎能力,与加工工艺密切相关。所以,超导的强电应用的关键,就是在相同温度下尽可能提升材料在强磁场下的工程临界电流密度,使其能在

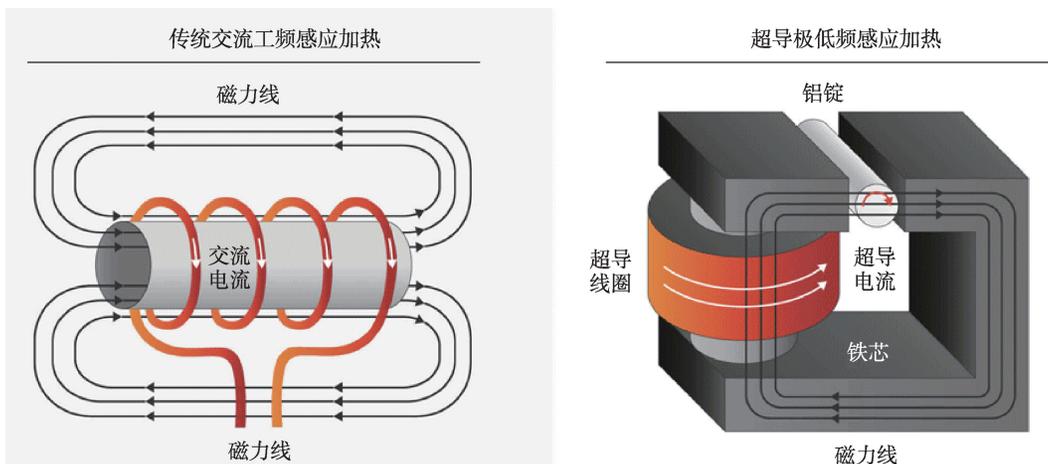


图4 传统交流工频感应加热与超导极低频感应加热的原理(由江西联创公司提供)

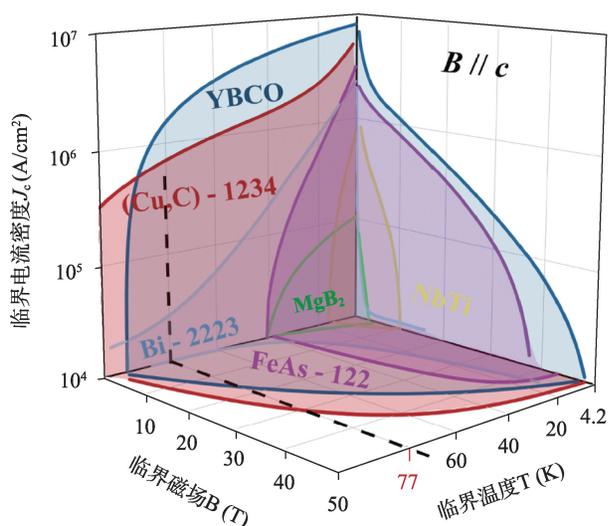


图5 典型超导应用材料的临界曲面(由蔡传兵教授提供)

强电强磁下保持优异的性能(图6)^[4]。综合考虑超导材料的临界参数关系、机械强度、稳定性和制造成本,不同类型的超导线带材,适用于不同强电应用的场景,并非是一味追求高临界温度就能解决所有问题。

二、超导的弱电应用

超导用途并不局限于强电强磁领域,在电子学

器件方面的用途也非常广泛。基于超导体的零电阻效应,可简单设计超导微桥为一个“开关”,一旦零电阻被破坏就能产生一个电压信号。超导纳米线单光子探测器就用的此原理,将超导体刻蚀成极窄的纳米线阵列,即使只吸收一个光子,也足以形成一个在纳米线上扩散的热点信号,从而导致两端形成一个电压。超导单光子探测器是最灵敏的光电探测装置,探测效率可达98%以上,远远大于半导体光子探测器的30%左右的效率^[15,16]。基于超导单光子探测器的激光测距技术,精度非常之高,在38万千米的月地距离尺度上可实现厘米量级的分辨(图7)^[17]。超导单光子探测器在量子通信领域有关键作用,如将光纤双场量子密钥分发安全传输距离推进到833千米^[18]。

超导材料具有非常优异的表面阻抗,其微波表面电阻比正常金属材料还要低2~3个数量级,所以超导在微波领域有着不可替代的应用。例如:超导金属Nb制作的高频谐振腔,其品质因子Q可达 10^{10} 量级左右,是粒子加速器的“心脏”,并与直线加速器兼容,加速梯度最高55 MV/m,在粒子进入环形加速器之前就得到了充分的加速,大大减小了环形

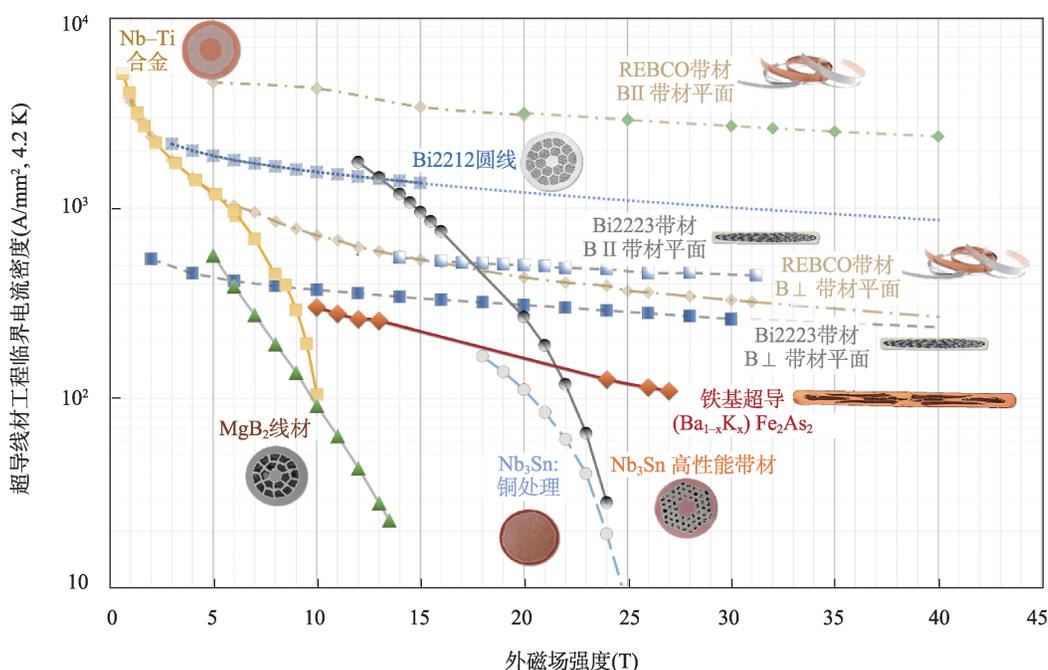


图6 各类超导线带材在强磁场下的工程临界电流密度(由马衍伟研究员提供)^[4]

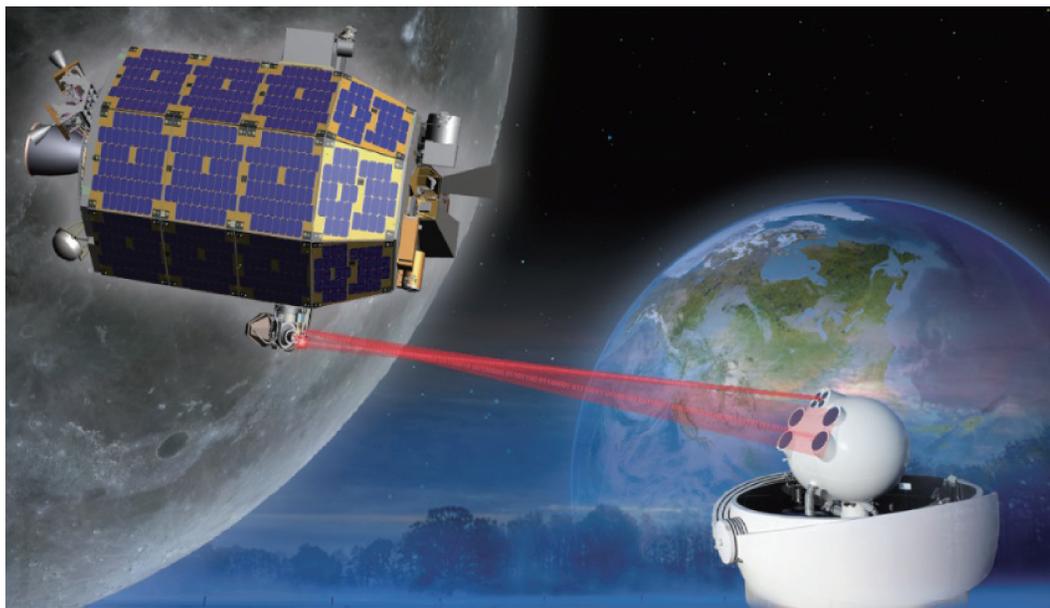


图7 基于超导单光子探测器的激光测距技术(由尤立星研究员提供)^[17]

加速器的直径^[19];超导滤波器具有低损耗($< 0.1 \text{ dB}$)、阻带抑制大(噪声系数 $< 0.5 \text{ dB}$)、边带陡峭(过渡带 $< -10 \text{ dB/MHz}$)的特点,这些性能都远远优越于传统金属滤波器^[20];基于超导材料的微波器件还有:超导低噪放、超导振荡器、超导固定延时线、超导混频器和超导相变边沿探测器,等等^[21, 22],这些设备可以满足许多精密探测的高标准要求;我国自主研制的高温超导微波接收机前端已在天宫二号进行了空间实验验证,未来超导微波器件还将在宇宙深空探测中发挥关键作用。

基于超导的宏观量子效应,两个弱连接的超导体会存在约瑟夫森效应,在不加电压情况下即存在直流隧道电流,施加电压之后会出现一个交流隧道电流,结区以相同的频率向外辐射电磁波,频率与电压成正比,比例系数为量子常数 $2e/h$ ^[23]。基于约瑟夫森效应的超导弱电应用也有很多,例如:我们现在各种电器的电压基准就是根据交流约瑟夫森效应来定义的,通过测量交流电的频率就能以极高精度确定电压大小,而且与材料性质和环境条件无关^[24];基于双约瑟夫森结构造的超导量子干涉仪(SQUID)是世界上最灵敏的磁探测装置,精度可达地磁场的千亿分之一,原则上能测量出单根量子磁

通的变化;SQUID装置是基础科研领域物质磁性测量的前沿设备,是心磁图、脑磁图等生物弱磁探测的核心部件,是地磁测量、地质探矿、反潜侦查的神兵利器(图2)^[2]。

虽然低温环境是制约超导应用的瓶颈,但也意味着功耗将大幅降低,这促使人们思考超导在低温电子学领域的应用。类比于半导体PN结的单向导通二极管效应,基于不同载流子类型的超导约瑟夫森结也可以构造出“超导二极管”,区分不同方向的无耗散超导电流(无电阻)和有耗散普通电流(有电阻)(图8)^[25]。2022年,荷兰科学家在 $\text{NbSe}_2/\text{Nb}_3\text{Br}_7/\text{NbSe}_2$ 约瑟夫森结中首次实现了无外场的约瑟夫森二极管效应^[26]。结合超导环中有无磁通定义0和1的逻辑态,以及约瑟夫森结作为电路控制开关,可以构造出基本的超导电路,继而批量构造超导集成电路。超导集成电路的加工工艺和半导体电路是几乎兼容的,但运行速率从GHz提升到了百GHz,运行功耗从 10^{-14} W 降低到了 10^{-19} W 。低温超导电路是超导模数转换电路、超导探测器读出电路、量子绝热计算的基础^[27],更是能够继而建造出超导数字计算机,是有别于超导量子计算机的另一条高性能、低功耗计算路径。

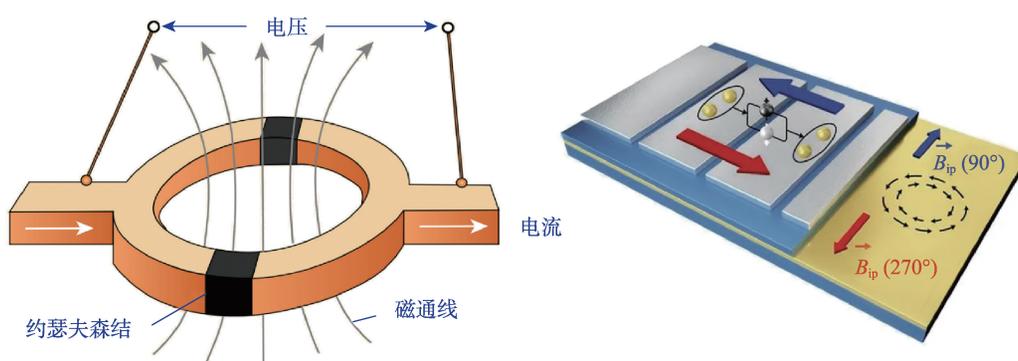


图8 超导量子干涉仪与超导二极管^[25]

相比于强电应用,超导的弱电应用往往在零磁场或极低磁场环境下,其关键并不强烈依赖于三个临界参数,而依赖于超导态下的相干长度、穿透深度、表面阻抗等参数。例如针对超导量子效应的一些弱电应用场景,可能需要mK附近的极低温,此时材料本身的 T_c 多高并不是很重要。由于超导弱电应用所需的超导材料体量要小得多,且器件可以做到类似半导体的封装和集成,因此对材料的毒性、机械加工性能、化学稳定性等没有太苛刻的要求,但对微纳加工特性提出了新的要求。

三、超导的量子应用

实现量子计算的可行方案有光量子计算、离子阱量子计算、核磁共振量子计算和超导量子计算等,其中超导量子计算是发展和迭代最快的。超导量子计算的核心在于超导量子芯片,由多个超导量

子比特和纠错单元耦合而成,其加工工艺同样与半导体工艺基本兼容。超导量子比特又细分为相位比特、磁通比特和电荷比特三类,它们的基本结构单元就是超导约瑟夫森结(图9)^[28]。在众多的超导材料里,适用于超导量子比特的寥寥无几,因为需要能做到极高纯度、优异微纳加工特性、极强稳定性等特殊要求,目前主流的量子比特都采用高纯铝。铝基超导量子比特的最长相干时间为几亿分之一秒,但依旧有很大局限性,特别是临界温度很低(约1.2 K)^[28]。在过去的15年时间里,科学家一直在努力尝试应用铌基量子比特,因为它的临界温度是单质金属中最高的(9 K),工作频率范围是铝基量子比特的18000倍,但其相干时间要短得多。直到2024年2月,一种新构型的铌基量子比特相干时间提升到了6200万分之一秒,铌基量子芯片或许在将来会有一席之地^[29]。尽管超导量子计算机在近年来高歌

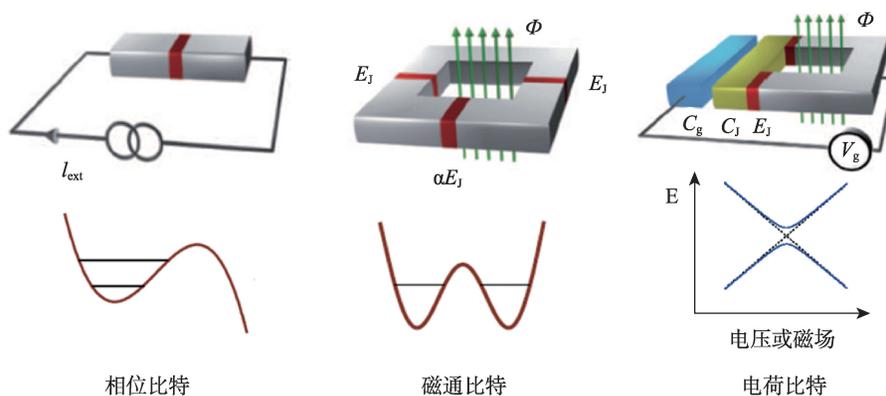


图9 三种类型的超导量子比特(由于扬教授提供)

猛进,谷歌等企业也先后宣布实现了量子优越性,我国的“祖冲之二号”量子计算机已成功制备并验证51个超导量子比特的真纠缠^[30],但是目前真正可商业化的超导量子计算机并没有。我们现在正处于“前量子计算时代”,即便量子计算机的民用化还尚未普及,在基础科研领域已有大量利用量子计算机的系列量子模拟,尤其是多体物理领域的量子模拟是经典计算机难以企及的目标。例如:利用量子计算机来模拟拓扑材料中的能带结构、拓扑物性和拓扑相变,可以实现对量子多体系统拓扑物态性质的复现与观测^[31];多量子比特系统可以模拟Hofstadter蝴蝶拓扑物态、薛定谔猫态、量子临界相变、动力学相变等诸多复杂的量子多体行为^[32, 33];通过晶格模型的类比黑洞模拟,超导量子比特系统甚至可以模拟黑洞霍金辐射和弯曲时空^[34]。

普通的超导量子计算通常依赖于极低温(mK量级)的环境,且相干时间仍然太短,难以保证量子计算的保真度,为此人们进而提出了拓扑量子计算的概念。拓扑量子计算的容错率更高,且工作温度可以高不少,但承载计算的并不是超导库伯对,而是服从非阿贝尔统计的任意子,例如正反粒子皆为其自身的“马约拉纳费米子”。马约拉纳费米子的一种特殊状态叫作“马约拉纳零能模”,由此构造的非局域拓扑量子比特,可以从原理上解决量子退相干问题^[35]。从理论上来看,超导态下的准粒子激发——波戈留波夫粒子就由一对马约拉纳费米子组成,因此在超导材料中寻找马约拉纳零能模,是拓

扑量子计算的基础^[35]。起初人们在超导体/拓扑绝缘体超结构中寻找马约拉纳零能模,但样品制备的挑战难度很大,后来人们发现一些铁基超导体可以轻松实现马约拉纳零能模,甚至构造出阵列^[36-38]。如果进一步通过交换两个不同的马约拉纳零能模,来改变量子比特的状态,实现“拓扑编织”,就迈出了拓扑量子计算的新阶段(图10)^[39]。当然,马约拉纳费米子只是一种可能的非阿贝尔统计任意子,有没有其他类型的拓扑量子态,同样也可以实现拓扑量子计算呢?我们仍拭目以待。

四、超导应用的展望

超导研究已有113年的漫长历史,前后有10位科学家直接因超导研究获得了诺贝尔物理学奖^[40]。如今,超导大规模应用的序幕正在展开,未来,科学家们还将发掘出更多的超导应用环境和途径。

超导应用领域尚待解决的关键技术问题有:如何找到综合性能优越且适合规模化应用的超导材料?如何大幅度提高现有超导材料的性价比?如何实现更大电流、更强磁场、更高精度的超导应用场景?如何借助超导材料推进新一代量子革命?随着能源消耗的与日俱增、AI技术的迅猛发展、量子革命的加速到来,未来的超导应用需求是海量的,人类的发展定然离不开超导材料。

参考文献

[1] 章立源. 超越自由: 神奇的超导体[M]. 科学出版社, 2005.

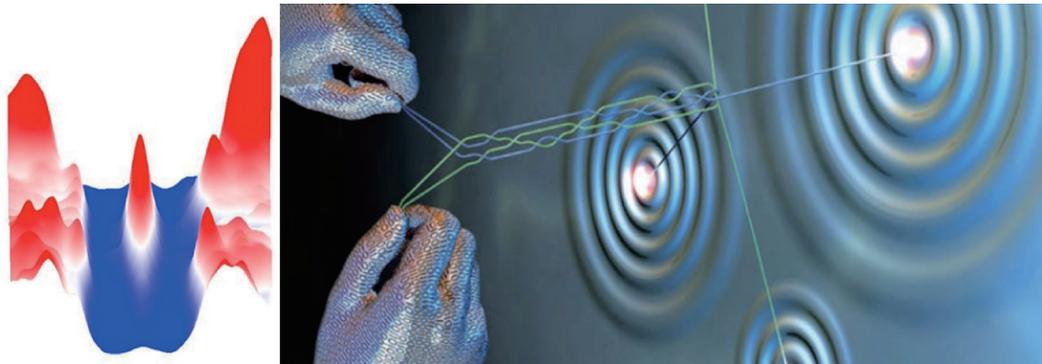


图10 马约拉纳零能模及其拓扑编织^[38]

- [2] 罗会仟, 超导“小时代”——超导的前世、今生和未来[M], 清华大学出版社, 2022.
- [3] 张裕恒. 超导物理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [4] 罗会仟, 周兴江. 神奇的超导[J]. 现代物理知识, 2012, 24(2): 30-39.
- [5] 王猛, 液氮温区镍氧化物高温超导体的发现[J], 物理. 2023. 52(10): 663-671.
- [6] 肖立业, 林良真, 戴少涛. 超导电力技术[J]. 现代物理知识. 2013.25:13-17.
- [7] 零电阻!“深圳第一高楼”用上超导电缆! http://news.sohu.com/a/753829388_121123896.
- [8] 电力高速畅通无“阻”探访世界首条35千伏公里级超导输电示范工程. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1784310446933089944-&wfr=spider&for=pc>.
- [9] 王伟, 刘林飞, 李贻杰. 漫谈第二代高温超导带材. 现代物理知识. 2018.3:51-59.
- [10] Zheng J. et al., Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration. *The Innovation* 2022. 3(4): 100269.
- [11] 徐庆金. 粒子加速器中的超导磁体技术[J]. 现代物理知识. 2022.3:37-41.
- [12] 四川发布: 高温超导高速磁浮工程化样车及试验线 <https://news.swjtu.edu.cn/info/1012/37257.htm>.
- [13] 中国新闻网: 中国首套高温超导电动悬浮全要素试验系统完成首次悬浮运行. <https://www.chinanews.com/cj/2023/03-31/9982205.shtml>.
- [14] 中国青年网: 世界首台兆瓦级高温超导感应加热装置投用能效转化率提升一倍. http://news.youth.cn/gn/202304/t20230423_14473541.htm.
- [15] You L. SNSPDs for QI[J]. *Nanophotonics* 2020. 9: 2673.
- [16] Xu Y. et al., Microfiber coupled superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optics Commun.* 2017. 405, 15:48-52.
- [17] 李佩展等, 高性能超导相变边缘单光子探测器[J]. 光子学报. 2023. 5:1-9.
- [18] Wang S. et al., Twin-field quantum key distribution over 830 km fibre [J]. *Nature Photonics* 2022. 16:154-161.
- [19] 郝建奎, 赵夔. 射频超导腔的研究新进展[J]. 强激光与粒子束. 2005. 7:1096-1100.
- [20] Li C. G. et al. A high-performance ultra-narrow bandpass HTS filter and its application in a wind-profiler radar system[J]. *Supercond. Sci. Technol.* 2006, 19: S398.
- [21] Nakade K et al. Applications using high-Tc superconducting terahertz emitters[J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 23178.
- [22] Welp U et al. Superconducting emitters of THz radiation [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7:702-710.
- [23] Yu Y. et al. Coherent Temporal Oscillations of Macroscopic Quantum States in a Josephson Junction [J]. *Science*, 2002, 296: 889-892.
- [24] 薛寿清. 约瑟夫森电压基准[J]. 中国计量. 1998. 06:33.
- [25] Zhang Y. et al., General Theory of Josephson Diodes[J]. *Phys. Rev. X* 2022. 12: 041013.
- [26] Wu H. et al., The field-free Josephson diode in a van der Waals heterostructure[J]. *Nature* 2022. 604: 653-656.
- [27] Johnson M W et al. Quantum annealing with manufactured spins [J]. *Nature*, 2011, 473: 194-198 .
- [28] 返朴: 当量子计算遇上超导: 一场美丽的邂逅. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1701599530264530215&wfr=spider&for=pc>.
- [29] Anferov A. et al., Improved coherence in optically defined niobium trilayer-junction qubits[J]. *Phys. Rev. Applied* 2024, 21: 024047.
- [30] Cao S. et al., Generation of genuine entanglement up to 51 superconducting qubits[J]. *Nature* 2023. 619: 738-742.
- [31] Tan. X. et al., Topological Maxwell Metal Bands in a Superconducting Qutrit[J]. *Phys. Rev. Lett.* 2018. 120: 130503.
- [32] Shi Y. et al., Quantum simulation of topological zero modes on a 41-qubit superconducting processor[J]. *Phys. Rev. Lett.* 2023. 131: 080401.
- [33] Li H et al., Observation of critical phase transition in a generalized Aubry-André-Harper model with superconducting circuits [J]. *npj Quantum Information* 2023. 9:40.
- [34] Shi Y. et al., Quantum simulation of Hawking radiation and curved spacetime with a superconducting on-chip black hole[J]. *Nature Comm.*, 2023. 14: 3263.
- [35] Lutchyn, R. M., et al. Majorana zero modes in superconductor-semiconductor heterostructures[J]. *Nature Reviews Materials*. 2018. 3: 52-68.
- [36] Wang D. et al. Evidence for Majorana bound states in an iron-based superconductor[J]. *Science* 2018, 362: 333-335.
- [37] Zhu S. et al., Nearly quantized conductance plateau of vortex zero mode in an iron-based superconductor[J]. *Science* 2019. 367: 189-192.
- [38] Li M. et al., Ordered and tunable Majorana-zero-mode lattice in naturally strained LiFeAs[J]. *Nature* 2022. 606:890-895.
- [39] Google Quantum AI and Collaborators. Non-Abelian braiding of graph vertices in a superconducting processor[J]. *Nature* 2023. 618:264-269.
- [40] 罗会仟. 超导与诺贝尔奖[J]. 自然杂志, 39(6), pp 427-436, 2017/12.