

超导电力低温技术展望

王惠龄, 饶荣水, 李敬东, 唐跃进, 程时杰, 潘 垣
(华中科技大学超导电力科学技术研究中心, 武汉 430074)

摘要: 从超导电力应用的角度出发, 详细阐述了低温技术的基础理论、研究方法、技术思路及研究发展的变化与趋势, 指出用微低温工程学观点研究制冷机直接冷却机理、界面热阻最佳耦合问题和高温超导二元电流引线动态稳定性等, 是超导电力低温技术的研究热点, 具有重要发展前景。

关键词: 超导电性; 低温工程; 直接冷却; 微结构传热; 动态稳定性

中图分类号: TM 26; O 514.1

0 引言

自1911年荷兰科学家昂纳斯(H. K. Onnes)发现汞的超导现象后, 超导研究取得了很大的进展, 其中1962年超导体约瑟夫森(B. Josephson)效应的发现, 触发了超导量子干涉器(SQUID)在弱电方面的应用^[1]。80年代, 超导工频线材的研究, 使低温超导出现了转机。虽然所发现的低温超导材料的临界温度最高只有23.2 K, 主要在液氦温区工作, 但在医学上使用的核磁共振成像仪(MRI)已达到广泛应用的水平。1986年瑞士苏黎世实验室贝德诺兹(J. G. Bednorz)和缪勒(K. A. Muller)发现LaBaCuO的超导体(超导临界温度 $T_c=30$ K), 为高温超导研究揭开了新的一页。经美国、中国、日本等国科学家的努力, 高温超导材料的 T_c 已达90 K以上^[2]。高温超导材料经过10余年的研究发展, 目前已出现了一些接近实际应用和达到使用水平的材料。

由于超导材料的进步, 不论是低温超导还是高温超导, 将进入逐步发展应用技术的新阶段。预计在21世纪前期, 超导技术有望在电力系统中应用。

低温技术为超导应用提供最基本的运行条件, 是超导系统整体的一个重要且不可分割的部分。不能把低温与超导技术的关系看成只是前者为后者提供杜瓦、制冷机的关系。低温技术直接关系到超导设备的效率和安全性, 是超导技术能否实际应用于电力系统的关键之一。因此对低温技术, 包括低温热力学、低温传热学、低温材料特性等与超导电力应用结合的重大基础科学问题, 以及研究制冷机直接冷却技术实现超导电力低温系统一体化的关键技术, 提出了新的要求和研究课题^[3-5]。

1 超导应用的低温技术

1.1 低温工程学

低温工程学(Cryogenics)也就是低温技术, 是研究低温下的物理现象及其应用的学科。这门学科的起源可以把昂纳斯1908年在荷兰来登(Leiden)大学实验室首次液化世界上最难也是最后一种气体氦(He)作为标志, 不过当时还未出现“Cryogenics”这一名词; 也有观点认为低温工程学始于1950年, 这是柯林斯(Collins)1947年发明了氦液化器, 实现了氦气的大量液化后, 同时由于50年代美国宇航开发和60年代超导磁体的研制, 推动了低温工程学的飞跃发展, 才出现了“Cryogenics”一词。

低温工程学具体对超导电力来说, 就是超导装置的高效冷却与维持稳定性、低温装置对常温的绝热应用, 以及对低温下热输运性问题的数理分析和实验研究。因此它的研究方法具有热物理学的基础性和技术综合性。随着现代空间技术、光电信息等高新技术进步, 低温技术与许多新兴工程学科发展日益密切, 具有交叉边缘学科的特点, 同时也保持着一门不断发展的独立学科的特性。从现在低温工程学发展来看, 制冷与低温可以分成4个温区, 如表1所示。

表1 制冷与低温温区的划分
Table 1 Temperature ranges of cooling and cryogenics

名称	温度范围	应用领域
制冷	室温 ~ 120 K	空调、冷藏等
低温	120 K ~ 4.2 K	气体分离、超导、激光、信息、空间技术、低温生物与医学、
超低温	4.2 K ~ 0.1 K	低温物理与低温技术
极低温	0.1 K ~ 0 K	基础研究

国际上集中发表低温工程研究成果具有权威性的定期论文集有: Advance in Cryogenics Engineering(低温工程进展); 具有权威性的国际学术刊物为 Cryogenics(低温工程学); 主要国际会议

有 International Conference on Low Temperature Physics (国际低温物理大会), International Congress of Refrigeration(国际制冷工程大会), 及 International Cryogenic Engineering Conference(国际低温工程会议)。国内较集中刊登和反映低温工程研究的有《低温物理学报》、《低温工程》和《低温与超导》等核心刊物。

1.2 低温实验技术

低温实验技术是在首先弄清原理和概念的基础上, 为实现预期目标的方法与实施, 经验性和技巧性是它的特征。

1.2.1 低温液体与低温恒温器

超导电力装置用低温液体浸泡和蒸发气体冷却。主要的低温冷却介质是液氮(N_2)和液氦(He), 其主要相关性能汇于表 2。

表 2 主要低温液体的性能

Table 2 Characteristics of main cryogenics media

液体	分子量	沸点/ K	潜热/ ($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比热 C_p / ($\text{kJ}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)		介电常数 ϵ' 10^4	
				气体	液体	气体	液体
氮	28.020	77.348	61.19	1.042	2.030	5.870	1.4318
氦	4.003	4.215	2.60	5.233	4.410	0.728	1.0490

由表 2 可见, 液氮的汽化潜热很小, 而液氮又比液氦贵得多, 所以进行液氮实验时, 一般都是用液氮从室温预冷到 77 K。如果只考虑液氮潜热, 1 kg 铜从 300 K 冷却到 4.2 K 需要 30 L 的液氮。如果先用液氮预冷, 则从 77 K 冷却到 4.2 K 只需要 2 L 的液氮, 可见用液氮预冷节省了 90% 以上的液氮。同时液氮气化所生成的冷氮气的显热是很大的, 如果把显热再运用起来, 则液氮的消耗将会更低。这些对低温超导应用具有重要意义。

在 80 年代以前, 液氮、液氦都比较贵, 1 L 液氮 5 元左右, 1 L 液氦约 300 元(不回收氦气)。但随着

工业应用进步和市场机制发展, 如进口液氮等, 目前在较大量使用的情况下, 1 L 液氮已降到约 1 元左右, 比矿泉水还便宜, 1 L 液氮可在 100 元左右。低温液体价格的下降, 将有利于低温超导技术应用的创新发展。

盛装低温液体介质的低温容器, 称为低温恒温器, 俗称“杜瓦”。杜瓦由冷媒槽、含有多层绝热层的真空夹层构成。它是 1892 年由英国科学家杜瓦(J. Dewar)发明的用玻璃双层壁真空夹层的绝热容器, 用以存放低温液体。玻璃杜瓦制作方便, 价格便宜, 而且玻璃是透明的, 便于观察杜瓦瓶内状况和液面的高度, 但由于金属杜瓦结构坚固, 可以制成复杂和大型的低温装置, 特别适用于工程应用, 所以现在主要使用金属杜瓦。

金属杜瓦主要采用真空多层绝热技术, 用铝箔加低导热系数的薄膜材料缠绕在储槽内壁上。它的绝热性能可以比一般传统的绝热形式优良数十倍。微球绝热是一种较先进的绝热技术, 是用 $15 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 的中空玻璃球、外表面镀铝, 与金属多层绝热相比, 微球绝热填充简单, 而在绝热性能上各有优势^[6,7]。

1.2.2 超导低温实验装置

图 1 为超导装置低温系统示意图。超导电力装置的超导部分(磁体、线圈)置于金属杜瓦中, 用低温液体浸泡和蒸发气体冷却。杜瓦和低温制冷系统相连接, 图 1 中右侧所示为储存低温液体的杜瓦。

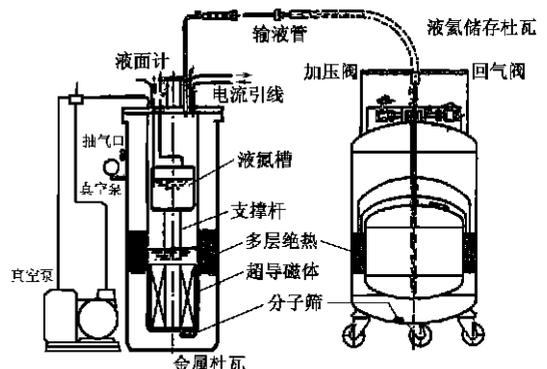


图 1 液氮冷却超导装置与系统示意图

Fig. 1 System diagram of superconducting apparatus

1.2.3 低温测量与安全性

低温测量的内容比较多, 但常用的是低温温度和低温液面的测量。

液面测量是进行液氮实验时首当其冲的问题。在液氮实验中常用超导液面计或电容液面计等, 在液氮实验中常用电阻式, 传感器可以是铂电阻丝或半导体器件等, 也可以是超导体元件。一般液面计测量低温液体液面的准确度可为 $\pm 5 \text{mm}$, 若经实验标

· 广告 ·

定,精度可以提高。

低温测量常用的温度计有热电阻式和热电偶式2类。从测量原理上,一般常温和低温没有原则上的不同,但在测量方法上,往常温下忽略的问题,在低温下需要考虑,如测量引线的导热、辐射等因素。而温度计的选用首先取决于使用的温区,然后还要满足灵敏度、动态响应等要求。主要的热电阻温度计有铂电阻、锗电阻、碳电阻和铑铁电阻温度计等。热电偶温度计在液氮温区以上有铜—康铜、镍铬—镍硅;在液氦温区有镍铬—金铁和镍铬—铜铁。镍铬—铜铁是廉金属低温热电偶温度计,它也可用于液氮温区,且在77 K温度灵敏度比常用的铜—康铜热电偶高40%^[8]。

在进行低温试验和维持低温系统稳定运行时,需要注意安全性。首先是科学的实验程序和正确的操作方法,同时设置和运用必要的可靠监测仪器和手段,因为超导装置失超产生的热量会引起低温冷却介质的蒸发,造成体积成百倍地增加。对超导电力应用来讲,防止失超,在装置和系统上采取相应的保护与安全措施是必要的。值得一提的是,在低温装置系统实验完毕或停机时,必须打开装置封闭系统上和大气或低压气柜连通的排气阀,否则存留的低温液体由于漏热而逐步气化,将以约700倍液体的体积倍率而升压。

1.3 制冷机直接冷却

高温超导材料的出现和小型低温制冷机的进步,逐步发展到了用制冷机直接冷却超导器件与超导装置的应用,如图2所示。这与传统的单一低温液体冷却的模式不同,是以导热为主的新的冷却模式。

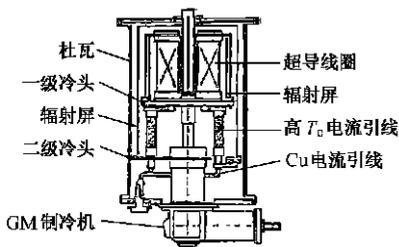


图2 制冷机直接冷却的超导装置

Fig. 2 Superconducting apparatus cooled by direct cooling method

直接冷却的优点是:①运行简便,不需要加注液氮、液氦;②长时间运行不需补液,维护操作容易;③装置系统结构紧凑,体积小;④可简化杜瓦的设计,如只要设置一个辐射屏,从而降低了低温设备的费用和重量;⑤安全、高效,没有储存低温液体的部分,失超时不会产生高压气体。

—麦克马洪(Gford-McMahan)循环制冷机(简称GM制冷机)提供的导热冷却来取代浸泡冷却。普通二级GM制冷机可以提供20 K低温、5 W的制冷量^[9]。目前,GM制冷机平均无故障工作时间已达到1万h以上。国际上GM制冷机销售量每年1000套以上,一个MRI系统中,超导磁体浸泡在4.2 K的液氦池中,通过GM制冷机冷却辐射屏,可以使液氦蒸发降低到很低的程度,这样每年只加1次液氦就可以保持系统的正常运行。

1.4 低导热二元电流引线

超导磁体是直接通过电流引线从室温电源中得到能量的。如果用常规的铜电流引线,它的漏热为铜线的导热和焦耳热2部分叠加而成。在直接冷却中,利用铜引线和高温超导引线的新型二元电流引线,当高温超导电流引线工作在临界温度 T_c 以下时,则消除了引线的焦耳热;同时作为陶瓷材料的高温超导引线(如Bi2223)的热导率很低,从而极大地减小了从高温区向低温区的热传导漏热。这不但降低了系统的运行费用,而且可以延长补液周期,减小了低温杜瓦的体积。

2 超导应用的低温技术发展方向

超导研究可以看成超导物理、超导材料和超导应用3个领域。随着研究的深入和技术的进步,超导应用研究逐步提到重要日程。从某种意义上说,超导应用是超导物理、超导材料研究的推动力,而三者是相互关联、相互促进的。因此,为推动我国超导电力走向应用,应着力开展超导应用低温技术的基础科学和关键技术的研究。建立超导技术学科体系和基础,积累经验与工程科学数据,与超导物理、超导材料一起,逐步形成我国自己的超导应用工业基础和知识产权。

超导装置的动态稳定性是超导技术进入应用的最重要问题之一。超导磁体的冷却对稳定性的影响是限制进一步提高电流密度、磁场强度及运行可靠性的根本问题。而超导磁体外界热扰动的瞬态稳定性和高温超导材料线性退化及随机因素等引起的机械稳定性,从热动力学观点,属超导磁体热脉冲扰动,脱离和恢复热平衡态的过程,是一个动态的、随机的、非线性热力学系统。建立合理模型,进行状态识别、故障诊断、超导装置设计、优化及预测、控制超导磁体稳定性,是现在研究的关注点。

直接冷却技术的应用将已有的液体与固体冷却的模式,转移到固体与固体的热传导形式,用微结构低温工程学观点研究接触导热的界面热阻和最佳热耦合与优化,是直接冷却技术的关键科学问题。

制冷机直接冷却技术、适合超导电力应用的制冷机新技术、以固体导热为主的热输运过程、热扰动对高温超导电流引线 and 超导磁体稳定性的影响等基础课题,以及直接冷却技术的二元电流引线、超导磁体的结构和冷却机制等课题,是超导电力迈向应用过程中所需要着力解决的关键技术,是发展高效、安全和一体化超导电力低温技术的重要研究方向。

超导线材,特别是高温超导丝材、棒材的热导率、表面传热与失超热传播特性等,以及高热导率且同时是高电绝缘性的材料(ALN)在低温条件下的特性的研究也十分重要,是提高超导体稳定性和装置优化设计所必须的。但是,目前国内外都很缺乏这些基础数据。因此,为进一步满足超导电力应用,收集低温基础数据,提出新概念、新原理、新工艺,开发新结构材料,研究高效、低蒸发率和无磁杜瓦以及超导电力低温技术一体化技术等,都是需要扎扎实实地进行的基础性工作。

3 结论

超导电力低温技术的基础科学研究和超导低温装置应用关键技术研究是超导走向实用化的重要基础与保证条件。

制冷机直接冷却是超导电力应用发展的方向,既要加强装置器件特性研究,又要重视其基础科学问题的研究。

为适应超导电力应用发展,需要开发低温超导与高温超导的复合超导装置和制冷机与杜瓦复合的超导低温系统装置。

开展超导电力-低温技术一体化新概念、新原理、新材料、新工艺的研究,逐步积累形成我国的超导应用与低温技术的知识产权结构。

参考文献

1 唐跃进,李敬东,叶妙元,等(Tang Yuejin, Li Jingdong, Ye Miaoyuan, et al). 未来电力系统中的超导技术(Applied Superconducting Technique in the Future

Electric Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(2): 70~75

2 周华锋,李敬东,唐跃进,等(Zhou Huafeng, Li Jingdong, Tang Yuejin, et al). 高温超导电力电缆的发展(Development of High Temperature Superconducting Cable). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(8): 71~74

3 严陆光(Yan Luguang). 八十年代超导应用的进展(The Advantage of Superconductor Application in the Eighties). 电工电能新技术(Advanced Technology for Electrical Engineering & Energy), 1992(3)

4 余运佳(Yu Yunjia). 超导储能电力应用新进展(New Progress of SEMS for Electric Utility Use). 低温与超导(Cryogenics and Superconductivity), 1995(2)

5 王惠龄,程德威,李嘉,等(Wang Huiling, Cheng Dewei, Li Jia, et al). 超导电力与低温技术研究进展(Progress on the Study of Superconducting and Cryogenic Technology). 低温工程(Cryogenics), 1999(5)

6 Frank Pobell. Matter and Methods at Low Temperatures. Berlin: Springer-Verlag, 1992

7 Wang Huiling, Guo Fangzhong. Temperature of 1 K Obtained by ^4He and Heat Analysis. Chinese Physics, 1987(1)

8 王惠龄(Wang Huiling). 制冷与低温测量技术(Measurement in Refrigeration and Low Temperature). 武汉:华中理工大学出版社(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 1988

9 Liu L Q, Zhang L. Study on a New Type of Sealing—Regeneration-Labyrinth Sealing for Displacer in Cryocoolers. Cryogenics, 2000, 40(2): 85~90

10 Tien C L. Challenges in Microscale Conductive and Radiative Heat Transfer. J of Heat Transfer, 1994, 116(4): 799~807

王惠龄,男,教授,博士生导师,主要从事制冷与低温工程方面的研究工作。

饶荣水,男,博士研究生,主要从事超导电力直接冷却系统的研究工作。

李敬东,男,博士,副教授,主要从事超导电力应用技术的研究工作。

PROGRESS ON CRYOGENIC TECHNOLOGY APPLIED IN SUPERCONDUCTING ELECTRIC ENGINEERING

Wang Huiling, Rao Rongshui, Li Jingdong, Tang Yuejin, Cheng Shijie, Pan Yuan
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With respect to superconducting electric engineering, the cryogenic theory, research methods and their development are illustrated. It is pointed that the key problems are the mechanism of cryocooler-cooling, dynamic stability of high temperature superconducting binary current leads and thermal contact resistance for cryogenic conditions. They are important aspects for applying superconducting technique to electric power systems.

Keywords: superconductivity; cryogenics; direct cooling; microstructure heat transfer; dynamic thermal stability