

原子级制造专题

低温技术的发展及未来趋势

林煜杰¹ 潘长钊² 刘旭明² 俞大鹏^{2,3,4*}

(1. 南方科技大学 量子科学与工程研究院 深圳 518055; 2. 深圳国际量子研究院 深圳 518048;
3. 合肥国家实验室 合肥 230088; 4. 北京大学 物理学院 北京 100871)

Development and Future Trends of Cryogenic Technology

LIN Yujie¹, PAN Changzhao², LIU Xuming², YU Dapeng^{2,3,4*}

(1. Shenzhen Institute for Quantum Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen International Quantum Academy, Shenzhen 518045, China; 3. Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China; 4. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Since the Industrial Revolution, advancements in cryogenic technology have significantly accelerated due to the successful liquefaction of gases such as nitrogen, hydrogen, and helium, accompanied by the discovery of superconductivity. This article reviews the historical progression of cryogenic technology, tracing its evolution from the passive utilization of natural ice through the establishment of thermodynamic theories and breakthroughs in active refrigeration, particularly emphasizing the discovery of the Joule-Thomson effect and superconductivity. Fundamental cryogenic principles are described, including adiabatic expansion, throttling processes, and vapor-compression refrigeration cycles, with detailed discussions on three representative cryogenic devices: the Gifford-McMahon (G-M) cryocooler, the pulse tube cryocooler and dilution refrigerator. Furthermore, the paper elaborates on the extensive applications of cryogenic technology across scientific research, industrial production, aerospace, and energy transportation fields. Finally, it offers a prospective outlook on the development trends of cryogenic technology, highlighting directions towards miniaturization, environmental sustainability, and intelligent operation.

Keywords Cryogenic technology, Gas liquefaction, Cryocooler, Research review

摘要 工业革命以来,随着氮、氢和氦等气体成功液化,同时超导现象的发现,低温技术得以迅速发展。文章回顾了低温技术的发展历史,从被动利用天然冰到热力学理论建立与主动制冷技术的突破,特别是 Joule-Thomson 效应与超导现象的发现;介绍了低温技术的基本工作原理,包括绝热膨胀、节流效应和蒸气压缩制冷循环,并重点描述了 G-M 制冷机、脉管制冷机和稀释制冷机典型设备;阐述了低温技术在科学研究、工业生产、航空航天和能源运输等多个领域的应用;最后展望了低温技术向微型化、绿色低碳和智能化方向的发展趋势。

关键词 低温技术 气体液化 制冷机 研究综述

中图分类号: TB66 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202507001

低温学(Cryogenics)的名称源于希腊语“kryos”(意为“霜冻”)与“genic”(意为“生产”)的组合,这一概念最早由荷兰物理学家海克·卡末林·昂内斯(Heike Kamerlingh Onnes)于1894年提出^[1]。随着低温技术的发展,1971年国际制冷学会在第13届国际制冷大会中正式规定低温的温度范围:低于

120 K(−153℃)^[2]。

低温学的发展离不开人类对于“永久气体”液化的追求。19世纪末至20世纪初,氧气、氮气、氢气与氦气的相继液化奠定了低温实验的基础,同时超导现象的发现更推动了低温物理学的发展。诞生以来,低温技术在科学研究与工业应用中一直扮

演着重要角色。例如,在交通领域,低温为液化天然气(LNG)与液氢等能源储运提供支持^[3-4];在食品加工领域,隧道式速冻机等设备需要液氮快速冷却食物^[5-6];在航天领域,火箭发动机需要液氧液氢等低温推进剂^[7-8]。此外,低温环境还为量子计算、深空探测等前沿科技提供必须的实验条件^[9-10-11]。近年来,随着脉管制冷机、稀释制冷机等技术的突破,低温技术正走向规模化应用,成为推动21世纪科技革命的关键之一。本文从低温技术的发展历史出发,介绍其核心原理与应用场景,并对低温技术的未来发展进行了展望。

1 低温技术的发展历史

相比于对火焰的高温应用,人类对低温的认识和应用较晚。公元前2500年,古埃及人利用尼罗河畔的天然冰块进行伤口镇痛与防腐处理^[12];公元前2000年,中国商代建立了“凌阴”(冰窖)系统,用于储冰与食物保鲜。然而,受限于热力学认知与制冷技术的缺失,此阶段的应用仅停留在对自然冰的被动利用。

18世纪的工业革命推动了主动制冷技术的发展。1755年,苏格兰化学家威廉·卡伦(William Cullen)通过乙醚的减压蒸发实验实现人工制冰,发现了气液相变过程中潜热吸收的物理机制^[13]。1805年,美国工程师奥利弗·埃文斯(Oliver Evans)设计出首台蒸汽压缩制冷机原型,但受限于材料与密封技术未能实用化。直到1824年,法国物理学家萨迪·卡诺(Sadi Carnot)提出卡诺定理,首次从热力学角度定义了制冷循环的理论效率极限,为制冷循环效率奠定了理论基础。

19世纪中叶,热力学第一定律(能量守恒)与第二定律(熵增原理)的逐步完善,进一步推动了低温技术的理论构建。1823年,英国科学家迈克尔·法拉第(Michael Faraday)在厚壁玻璃管中加压封存氯气,利用冰盐混合物维持低温环境,随后通过阀门使气体急速膨胀至常压,将剩余气体冷却至临界温度以下,最终获得液态氯^[14]。在之后的数十年中,几乎所有的气体都可以通过这个方法进行液化,除了被称为“永久气体”的甲烷、一氧化碳、氧气、氮气、氢气等,这些气体即使在40 MPa的高压下仍然无法液化。这一困境的本质在于没有意识到临界温度(critical temperature)的概念:只有当气体温度低

于其临界温度时,方可通过仅加压的方法液化气体。1869年,爱尔兰物理学家托马斯·安德鲁斯(Thomas Andrews)通过系统研究二氧化碳的相变行为,明确指出每种气体存在特定的临界温度^[15]。1852年,英国物理学家詹姆斯·焦耳(James Joule)与威廉·汤姆逊(William Thomson)合作发现“节流膨胀效应”(Joule-Thomson效应):高压气体通过节流装置进行节流膨胀时,因分子间势能变化导致温度显著下降^[16]。基于此,德国工程师卡尔·林德(Carl Linde)与英国化学家威廉·汉普森(William Hampson)于1895年分别独立发明“林德-汉普森循环”制冷机,通过压缩机将空气加压至20 MPa,经逆流换热器预冷后节流膨胀至常压,成功将空气冷却至80 K以下并分离出液氧与液氮^[17],这一技术使得工业级气体液化成为可能。

19世纪末至20世纪初,低温技术的焦点转向了“永久气体”的终极挑战——氢与氦的液化。1898年,英国物理学家詹姆斯·杜瓦(James Dewar)基于林德-汉普森循环,首次突破氢气的液化壁垒。他采用液态空气预冷高压氢气,经逆流换热器与节流膨胀成功将氢冷却至20 K获得液氢^[18]。杜瓦发明的银镀层真空玻璃杜瓦瓶(Dewar flask)极大降低了蒸发速率,也为后续氦的液化奠定了基础。由于氦4的临界温度低至5.2 K,传统节流膨胀难以单独实现其液化。为此昂内斯在莱顿大学构建了一套复杂的级联预冷系统:通过甲基氯、乙烯、氧气和空气的四级蒸气压缩循环制取液态空气(82 K),随后以液态空气预冷高压氢气,经JT膨胀获得液态氢(20 K),最终以液氢为预冷介质冷却高压氦气。1908年7月10日,昂内斯团队将氦气加压至10 MPa,经逆流换热器预冷至15 K后节流膨胀,成功在双层液氢-液空浴保护的玻璃杜瓦瓶中获取了约100毫升液氦(4.2 K)^[19]。这一里程碑式的成就更催生了超导现象的发现,1911年昂内斯观察到汞在液氦温区(4.2 K)下电阻突降为零,为低温物理学的实验研究开辟了新道路^[20]。

进入20世纪,液化技术的效率和可靠性得到了极大提高,以氧气为例,从1910年的2吨/天提升到了1954年的100吨/天。得益于液化技术的发展,液氮的研究也取得了极大的突破。通过泵出液态氮4即可获得约0.7 K的温度,1926年Debye^[21]和Giauque^[22]分别独立提出了绝热去磁制冷法,并由

Giauque 和 MacDougall 于 1933 年在伯克利成功进行了第一次实验, 获得了 0.242 K 的温度, Giauque 本人因其绝热去磁和热力学第三定律的工作获得了 1949 年的诺贝尔奖。1937 年 Kapitza^[23] 和 Allen^[24-26] 等独立发现了低于 2.17 K 时液氮的超流动现象, Kapitza 因此获得了 1978 年的诺贝尔奖。1950 年初 London 提出了稀释制冷技术, 于 1964 年在 Kamerlingh Onnes 实验室实现^[27], 提供了另一种达到 mK 温区的方法。1956 年美国科学家 William Gifford 与 Howard McMahon 开发出了 G-M 制冷机^[28], 这种制冷机具有结构简单、可靠性高的优点, 并迅速在科研与工业领域广泛应用。与此同时, 1963 年 William Gifford 与 Robert Longsworth 首次提出了脉管制冷机概念^[29], 通过脉动气流在管道内实现热量传输和制冷, 而无需任何运动部件, 从而极大提高了制冷设备的可靠性和寿命。经过数十年的持续改进, 脉管制冷机已成为低温领域中的核心技术之一。

21 世纪以来, 随着超导磁体与量子技术的飞速发展, 需要低温环境的大型科学装置逐渐增多。同时在工业领域, 液化气体的大规模生产与小型低温制冷机技术的发展, 推动了低温技术在能源、运输、航空航天等多个领域的应用。

2 低温技术的基本工作原理

根据热力学第二定律可得, 热量是不会自发从低温物体转移到高温物体上去的, 因此必须利用物质状态或性质变化, 从低温热源处吸收热量, 同时消耗一定的功或热, 向高温热源放热, 并且数量上满足热力学第一定律。能够实现这个过程的装置被称为制冷机^[30], 下面介绍几种实现制冷的方法和工作原理。

2.1 主要低温制冷原理概述

绝热膨胀制冷: 绝热膨胀制冷是指气体与外界没有热量交换的情况下, 从高压状态膨胀到低压状态的过程。这一膨胀过程中, 因为气体对外做功 W 为正, 导致气体的内能 U 减少。气体内能的降低表现为气体分子平均动能的减小, 从而导致气体温度 T 下降, 实现制冷效果。

节流制冷: 节流制冷的原理即焦耳-汤姆逊效应。高压气体通过节流装置, 这一过程无外界热量交换也无外界功输出, 气体的体积增大而压力迅速降

低^[31]。与绝热膨胀不同, 节流过程中气体的温度变化是由气体内部能量(包括分子动能和分子间势能)的再分配以及压强变化引起的。准确地说, 理想节流过程是一个等焓过程。气体节流后的温度变化方向和大小取决于其热力学性质以及节流前后的温度和压力, 由焦耳-汤姆逊系数 μ 决定。要通过节流获得制冷效果, 必须确保工质在节流前的温度低于其反转温度。节流制冷装置结构简单可靠, 是许多低温循环中实现降温的关键环节, 特别是在气体液化流程的末级。

蒸气压缩制冷循环: 蒸气压缩制冷循环通过压缩机对工质做功, 结合相变与节流效应, 构建了一个闭合的热力循环系统^[32]。典型的单级蒸气压缩制冷循环如图 1 所示, 通常它由以下四个主要设备组成。

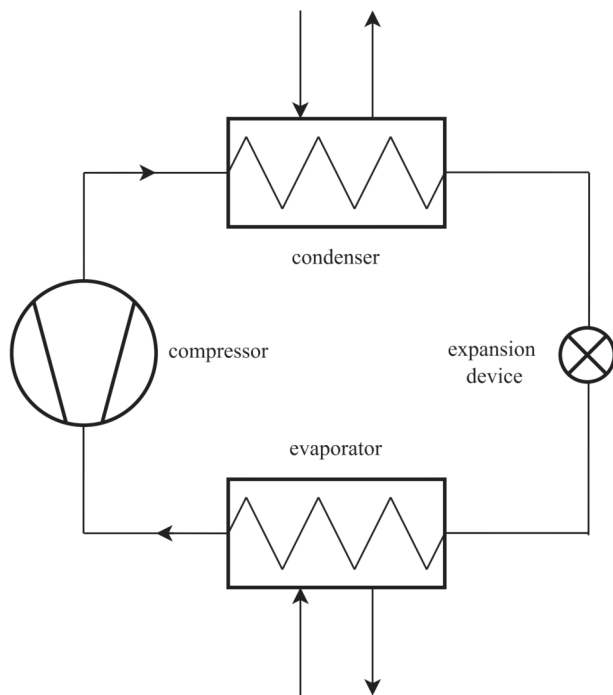


图1 蒸气压缩制冷循环示意图

Fig. 1 Schematic drawing of vapor-compression refrigeration cycle

压缩机, 将低温低压气态制冷工质压缩为高温高压的气态, 然后排至冷凝器并输入外部功; 冷凝器, 将高温高压气体工质在恒压下冷凝成液体, 同时放出热量被水、空气等热源带走; 节流装置, 包括节流阀、毛细管等, 在等焓条件下降低工质的压力和温度, 使其成为低温低压的两相混合物; 蒸发器, 将低温低压两相混合物在恒压下加热成蒸气, 同时从被冷却物体吸收热量, 实现制冷效应。

2.2 典型低温制冷机技术

基于上述制冷原理,已经开发出多种成熟的低温制冷机。可以根据所采用的换热器类型,将典型的低温制冷机分为间壁式制冷机、回热式制冷机以及结合两者特点的混合式制冷机^[33]。

间壁式制冷机:采用间壁式换热器,通过流道之间的固体壁面对流体进行热量传递,流体在不同流道中流动,优点是流体流动相对稳定,适用于连续流动或包含活塞的循环。常见的制冷机中 J-T 节流制冷机、林德汉普逊制冷机以及布雷顿制冷机属于间壁式制冷机^[33]。

回热式制冷机:采用回热式换热器,通常是一个填充有多孔材料的容器,当冷热流体交替流经回热器时,多孔填料周期性地储存和释放热量,实现低温端和高温端之间的热量转移,具有结构紧凑、效率高等优点。常见的制冷机中 GM 制冷机、斯特林制冷机、脉管制冷机等都属于回热式制冷机^[33]。

混合式制冷机:结合了间壁式换热和回热式换热的特点,以优化性能或实现特定温度范围的制冷,常见的包括波利斯制冷机。下面将从更为实用的角度,介绍三种具有代表性的典型低温制冷机。

2.3 G-M 制冷机

G-M 制冷机的制冷原理是绝热放气制冷。在刚性容器中绝热注入高压气体,使得容器内的温度和压力升高。再一边充气一边对容器内进行冷却,维持其温度保持不变,向低压处排出气体,气体的温度和压力就会下降,便可以产生制冷量。循环注入高压气体,重复以上步骤,就可以持续维持低温并获得冷量^[33]。

图2为单级 G-M 制冷机示意图,主要由位压缩

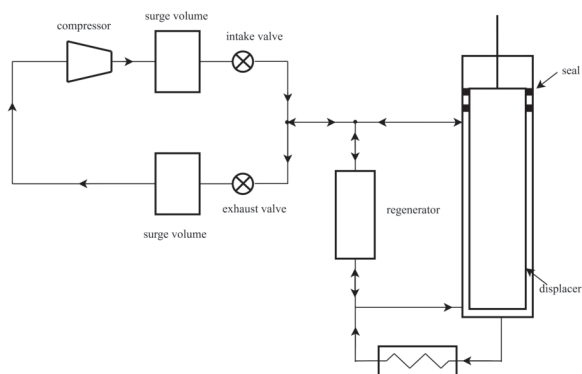


图2 单级 G-M 制冷机示意图^[34]

Fig. 2 Schematic drawing of a single-stage G-M cryocooler^[34]

系统和膨胀系统构成。压缩系统的功能是提供稳定、持续的高压工作气体,它包含一台活塞式压缩机以及相应的控制、冷却、油分离等辅助单元。膨胀系统主要组件有控制气体进出的配气阀、负责气体在冷热端之间移动的排出器、用于高效热量交换的回热器、气体进行膨胀吸热的膨胀气缸,以及驱动排出器运动的机构。

2.4 脉管制冷机

脉管制冷机是另一种重要的回热式低温制冷机,与 G-M 制冷机最大的区别在于,脉管制冷机的低温工作区域没有任何运动部件,极大地减小了振动,提高了制冷机的可靠性和寿命,使其在对振动敏感的应用领域具有独特的优势。

脉管制冷机的工作原理是基于由压缩机产生的周期性压力波,驱动工作气体(通常是氦气)在回热器、脉管和脉管封闭端之间往复运动。在这一过程中,气体在脉管的不同位置经历压缩和膨胀。气体在高压时向高温端放热,而在低压时从低温端吸热,从而将热量从冷端“泵”向热端。

基本型脉管制冷机主要由压缩机、旋转阀、回热器、脉管和封闭端组成,如图3所示。压缩机提供高压气体,旋转阀控制气体的进出,回热器实现内部热量交换,脉管是气体往复运动的核心区域,封闭端产生制冷效应,其制冷量和效率相对较低。

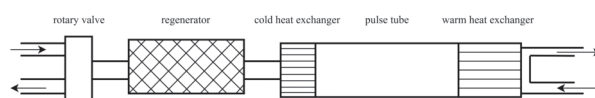
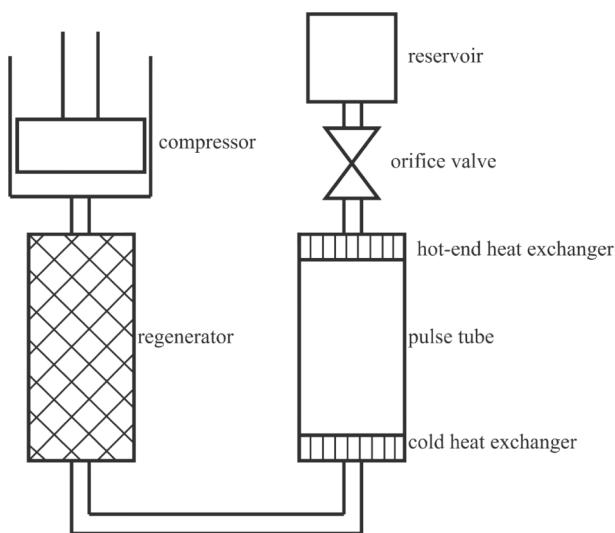


图3 基本型脉管制冷机示意图^[30]

Fig. 3 Schematic drawing of a basic-type pulse tube cryocooler^[30]

为了提升性能,研究人员提出了多种改进型脉管制冷机,例如采用小孔气库、双向进气、双活塞、多路旁通等调相技术,以优化气体在脉管内的流动和热力学过程,这些改进提高了脉管制冷机的性能和效率。图4为小孔气库调相器的脉管制冷机,在脉管热端换热器增加了小孔和气库。在气体压缩阶段,脉管热端流出的高压气体通过小孔进入气库;在气体膨胀阶段,气库中的部分气体则通过小孔返回脉管并参与膨胀。小孔气库结构为回热器内质量流和压力波提供了合适的相位角,从而大大提升了脉管制冷机的制冷能力。

图4 小孔气库型脉管制冷机示意图^[33]Fig. 4 Schematic drawing of orifice pulse tube cryocooler^[33]

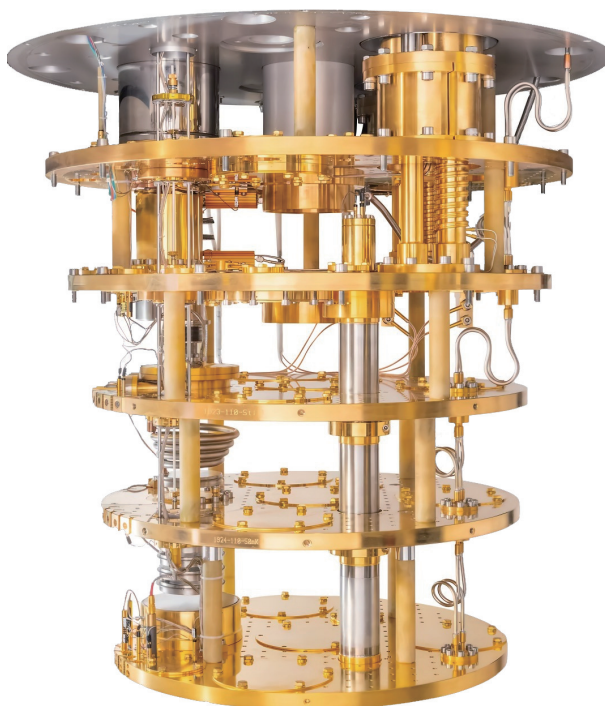
2.5 稀释制冷机

在亚开尔文温区(低于 1 K)的制冷技术中, 稀释制冷机(Dilution Refrigerator, DR)因其能够达到极低的 mK 温区、提供持续冷却以及相对较大的制冷功率, 已成为凝聚态物理、量子计算、天文学观测等前沿研究领域的基础工具。

稀释制冷机利用液态³He 在超流体⁴He 中的稀释过程来产生制冷效应^[35]。这一基本思想最早由 H. London 于 1951 年提出, 基于³He 和⁴He 混合物在极低温下的特殊热力学性质——当温度低于约 0.87 K 时, 混合物会发生相分离, 形成富集³He 的浓相和富集⁴He 的稀相。在混合室中, ³He 原子从浓相跨过相界进入稀相时, 会吸收热量, 从而实现降温。这一过程本质上是一种³He 在⁴He 背景下的“稀释”过程, 类似于宏观液体蒸发时的吸热现象。

稀释制冷机的实验实现始于 20 世纪 60 年代, 随着 London 等开发出可行的技术, 首台稀释制冷机于 1965 年建成并达到了 220 mK 的温度^[27]。此后, 通过对换热器设计和循环系统的不断优化, 稀释制冷机的性能迅速提升, 目前传统的稀释制冷机能达到的最低温度为 1.75 mK^[36], 并在商业化方面取得了巨大成功。

传统的湿式稀释制冷机通常使用液氮浴进行预冷, 而干式稀释制冷机则利用脉管制冷机等制冷机进行预冷, 如图 5 所示。此外, 为了进一步提高制冷效率, 研究人员还探索了多混合室稀释制冷机等改进型设计^[37-38]。稀释制冷机的实际性能受到诸多

图5 典型干式稀释制冷机示意图^[39]Fig. 5 Schematic drawing of a typical dry DR model^[39]

非理想因素的限制, 如换热器效率、气体流阻、死体积以及热负荷等。

3 低温技术的应用领域

3.1 科学研究

低温技术在科学研究领域有着广泛的应用。典型例子是欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC), 其配备了庞大的低温系统, 利用闭循环液氮将上千个超导磁体维持在约 1.9 K 的温度, 为此需配置约 120 吨液氮并消耗 40 MW 电力, 以稳定全环磁体的温度^[40], 磁体线圈中的铌钛合金才能超导运行, 避免电阻发热。

除粒子加速器外, 许多大型科学装置同样需要低温技术支持。例如, 国际热核聚变实验堆(ITER)的环形超导磁体将采用 4 K 左右的液氮冷却, 以产生维持聚变等离子体所需的强磁场^[41]; 另外, 在引力波天文领域, 日本的 KAGRA 干涉仪将 4 只测量臂末端反射镜冷却至约 20 K, 以降低镜片热噪声, 从而提高引力波信号探测灵敏度^[42]。

近年来兴起的量子计算进一步拓展了低温技术的应用。基于超导量子比特的量子计算机必须在约 10 mK 的深低温环境中工作, 以抑制热噪声,

维持量子相干性^[43]。随着量子比特数量从几十个向数千甚至百万个发展,其对低温系统提出的制冷功率需求也日益增长,预计将从当前的 μW 至 mW 级别,未来扩展到 W 级,这推动了稀释制冷机向更大冷量、模块化和“工厂化”集成方向发展。

国际上,该领域由商业巨头和国家级实验室共同引领。芬兰 Bluefors、英国 Oxford Instruments 等公司提供了成熟的商业化产品,单台制冷量可达 $3\text{ mW}@100\text{ mK}$ 。为应对未来更大规模计算的需求,前沿研究正在向更大制冷功率和实验容积的极限探索。例如,IBM 于 2022 年推出的“Goldeneye”稀释制冷机,拥有 1.5 m^3 的实验空间和 $10\text{ mW}@100\text{ mK}$ 的制冷量^[44];而美国费米实验室正在研制的“Colossus”项目,目标是实现更大的 5 m^3 实验容积,以满足未来量子处理器的集成需求^[45-46]。

在此背景下,中国在量子计算低温支撑技术领域也取得了显著进展。针对稀释制冷机这一“卡脖子”设备,国内自主化进程正在加速。中国科学院物理研究所、中船鹏力超低温、中电科 16 所等研究单位已取得初步突破,并催生了如科大国盾、本源量子、合肥知冷等一批商业化公司。尽管取得了长足进步,但客观而言,中国稀释制冷机的研发总体尚处早期阶段。主要体现在尚无成熟的、经过长期应用验证的商业化产品;在 100 mK 温区下,缺乏制冷功率大于 1 mW 的商业化机型,与国际先进水平存在差距;部分核心部件,如高性能脉管制冷机、超低温温度计等仍需进一步发展。

在核心技术攻关方面,中国已展现出独特的突破性进展。以深圳国际量子研究院为代表的科研力量,正致力于从核心部件到整机的全链条自主研发。现已成功研制出大冷量 4 K 脉管制冷机及相关的气隙热开关等核心技术,解决了稀释制冷机预冷级的关键瓶颈。以此为基础,已研制出制冷功率为 $400\text{ }\mu\text{W}@100\text{ mK}$ 的稀释制冷机样机,并正对关键技术和长期稳定性进行测试验证。这些从底层核心部件入手的自主化努力,旨在从根本上打破国外技术垄断,为中国量子计算等重大战略领域的发展提供坚实、自主可控的低温支撑。

3.2 工业应用

低温技术在工业上的一大应用是大规模气体液化与分离^[47],全球超过 95% 的工业氧气和约 85% 的工业氮气都是通过深冷蒸馏从空气中分离得到

的。Linde、Air Liquide、Air Products 等气体公司在全球建设了数以千计的深冷空分装置生产液氮、液氧、液氩以及液氦等,为制造、冶金、能源等行业提供基础原料。

低温技术在食品工业中的应用十分广泛,为保持食材的新鲜品质,快速充分地冷冻食品至关重要。例如,隧道式速冻机作为大型食品快速冷冻的主力设备,其利用 77 K 的液氮在食品通过冷冻通道时进行喷淋冷却^[5]。超快速降温避免了食品细胞内形成大冰晶,保存了食品的营养成分和质地^[48]。除速冻机外,食品加工厂还广泛配备有浸没式液氮冷却槽、低温储罐和液氮灌装站等设备,用于在生产线上快速冷却并在仓储中维持超低温环境,以实现从生产到运输全流程的冷链保障。

在电子和高端制造领域,低温技术同样发挥着特殊作用。在晶圆制程的真空腔体中,常使用低温真空泵将真空抽至极高水平,通过在低温表面凝结捕获残余气体分子,实现洁净的超高真空环境,提高薄膜沉积等工艺的质量^[49]。除了常规电子工艺,超导电子学、深紫外光刻等前沿领域也离不开低温装置的支持^[50-51];一些新型的高灵敏度传感器需要在液氮温区下才能发挥作用^[52]。

3.3 航空航天

低温技术在航空航天领域发挥着重要作用。最传统的应用如运载火箭的低温推进剂,其典型组合是液氧和液氢^[53]。著名的土星五号登月火箭,正是依赖低温氢氧发动机提供强大动力将宇航员送抵月球。相较于常温推进剂,液氢具有单位质量能量高、燃烧洁净的优点,但必须在低温环境下储存,这对火箭在地面准备和飞行中的保温性能提出了极高要求。为此,运载器上配备了真空绝热的低温贮箱,并在发射前通过低温加注设备向火箭快速灌注超低温的液体推进剂。进入 21 世纪,液氧/液甲烷等新型低温推进剂组合也开始在 SpaceX 星舰等运载系统上采用^[54],体现了低温推进技术的多样化发展。

在深空探测领域,低温技术是获取高灵敏度观测数据的基础条件。典型的情况是天文载荷中的红外、微波波段探测器必须在深低温下工作,以压低本底热噪声、提升对微弱信号的响应。美国于 2021 年发射的詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)便配备了分布式四级混合脉管/焦耳-汤姆逊制冷机,将

其中的中红外探测器冷却到 7 K 以下, 以满足观测微弱星际红外信号的要求^[55]。更早一些的欧洲普朗克(Planck)空间望远镜采用辐射冷却、焦耳-汤姆逊制冷机和³He/⁴He 稀释制冷机结合的方式, 将高频探测器冷却到 0.1 K^[56]。在如此低温下, 探测器的自身热噪声几乎彻底压制, 普朗克得以高精度测量宇宙微波背景辐射的微小涨落。

3.4 能源运输

低温技术在能源运输领域的核心应用之一是 LNG 的储存和输送。天然气在常温常压下为气态, 体积庞大且远距离运输不便。通过深冷工艺将天然气冷却至约 111 K, 可使之凝结成无色液体即 LNG。液化后的天然气体积缩小约 600 倍, 从而极大地提高了单位容积所承载的能量^[57]。一艘 LNG 海运船可携带数十万立方米的 LNG, 其球形或膜式围壳的罐体在整个航程中持续保持超低温, 日蒸发率仅约千分之几。由于天然气燃烧相比传统重油更清洁, LNG 已成为当今国际航运和重载卡车运输中备受青睐的替代燃料之一。

氢能交通是另一个与低温技术紧密相关的前沿领域。如前所述, 氢气的能量密度高且燃烧产物清洁, 然而常温下氢气密度极低, 需以高压或低温形式储存以获得足够的能量密度。目前市面上的氢燃料电池汽车(如丰田 Mirai 等)多采用高压气态储氢(70 MPa 压缩氢气)方式, 而低温液态储氢则有望进一步提升储能密度。早在 2001 年, BMW 公司就试制了以液氢为燃料的原型车, 2024 年梅赛德斯-奔驰推出了 GenH2 概念卡车^[58], 采用双真空绝热液氢罐供氢燃料电池使用, 一次加注液氢可支持重卡行驶 1000 公里以上。为支持此类低温储氢交通工具的推广, 正在建设液氢生产、运输和加注设施。目前已有工程实践表明, 在加注站利用深冷泵和真空管线可在短短数分钟内将数十公斤液氢安全注入车辆低温罐中^[59]。

4 低温技术的未来发展趋势

4.1 制冷机的微型化与挑战

相对于很多仅需不到 1W 冷却功率的应用场景而言, 目前常见的制冷机体积明显过大。为满足量子计算、高灵敏度传感器等前沿领域对紧凑、高效低温环境的需求, 发展与应用场景相匹配的微小型制冷机已成为研究的焦点^[60]。目前, 微型制冷技术

主要沿着两条路径发展: 一是将宏观制冷机(如脉管制冷机)按比例缩小, 二是采用 MEMS 技术进行颠覆式设计。近年来, 微机械加工技术推动了微型制冷机的发展, 有研究报道一款质量不到 1 kg 的微型脉管制冷机在 80 K 温度下获得了约 2.26W 的冷却能力, 折合单位质量制冷功率达 2.48 W/kg, 相对卡诺效率达到约 7.5%, 性能接近甚至超越多数现有同类装置^[61]。然而, 这类装置面临难于实现低成本、批量化生产的瓶颈。与之相对, MEMS 技术的应用提供了更大的集成化和低成本潜力^[62], 但在微尺度下这一技术面临着显著的物理和工程挑战。

首先是源于物理尺度效应的挑战。随着制冷机尺寸的缩小, 其制冷量大致按 x^3 迅速减小, 而寄生热负载则按 x^1 或 x^2 缓慢减小。当尺寸小到一定程度时, 制冷量将不足以补偿寄生热负载, 导致净制冷量急剧下降甚至为零^[60]。其次是制造与设计层面的挑战。MEMS 晶圆的制造工艺极其复杂, 一个设计方案可能需要多达 7 次光刻和近 100 个工艺步骤^[63]。同时器件需在微米级的脆弱玻璃结构中承受高达 80 bar 的内部高压, 这对应力控制和微结构设计提出了苛刻的要求。最后是核心部件与系统集成的挑战。即便微型制冷机本身无振动, 整个系统的噪声仍会受外围组件影响, 例如驱动泵可能引入低频振动, 连接导线也会带来额外热负载和电磁噪声, 这些因素在为 SQUID 等噪声敏感设备降温时必须被妥善处理^[64]。

4.2 低温系统的绿色低碳与智能化

面向可持续发展的未来趋势, 对低温技术提出了更高的绿色低碳和智能化要求。绿色低碳应用方面的典型例子是液氢与液氮的回收再利用。由于氮资源稀缺且价格上涨, 越来越多装置安装了液氮回收系统, 通过对蒸发掉的氮气进行收集、净化, 实现氮的循环使用。例如, 美国 LCLS-II 加速器采用闭环氨循环, 可在装置中循环约 4 吨液氮且损失极低^[65]。除了工质回收, 冷能回收亦是研究焦点。LNG 气化等过程中产生的冷能, 可用于驱动冷冻、水产冷藏等过程, 甚至可与液态空气储能(LAES)技术结合以提高效率。研究表明, 将冷能引入液态空气储能循环, 可使后者效率提升约 50%^[66]。通过工质循环利用和能量回收, 低温系统大幅降低了运行过程中的资源浪费和碳排放。

在智能化应用方面, 现代大型低温设施普遍引

入自动化控制和监测技术,对温度、压力、液位等关键参数实现实时采集与调节,大幅提高了运行可靠性和效率。例如,研究者开发了基于物联网传感和机器学习的健康监测系统,通过监测冷头电流、振动等信号,利用人工智能算法及时识别异常征兆,预测潜在故障并提供维护建议^[67]。这些智能化应用显著提高了低温系统的平均无故障运行时间和能源利用效率。

5 总结

综上所述,低温技术作为一项支撑前沿科技发展的关键技术,广泛应用于量子计算、深空探测以及 LNG 与液氢的能源储运和冷链物流等领域。随着脉管制冷机、稀释制冷机等关键技术的突破与商业化,低温技术正朝着小型化、高效化、绿色低碳和智能化方向发展,不断提高低温技术的性能与应用领域,以推动科技发展和社会进步。

参考文献

- [1] National Institute of Standards and Technology (NIST). About cryogenics[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://trc.nist.gov/cryogenics/aboutCryogenics.html>
- [2] International Institute of Refrigeration (IIR). International dictionary of refrigeration[EB/OL]. [2025-04-09]. <http://dictionary.iifir.org/search.php>
- [3] Kumar S, Kwon H T, Choi K H, et al. LNG: an eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4264–4273
- [4] Ratnakar R R, Sun Z, Balakotaiah V. Effective thermal conductivity of insulation materials for cryogenic LH₂ storage tanks: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(21): 7770–7793
- [5] Brown D C. The application of cryogenic fluids to the freezing of foods[M]//Timmerhaus K D. *Advances in cryogenic engineering*. Boston: Springer, 1967: 11–22
- [6] Xu Z B, Li Y Q, Liu Z Q, et al. Current knowledge on cryogenic microorganisms and food safety in refrigerators[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 146: 104382
- [7] Utturkar Y, Wu J Y, Wang G Y, et al. Recent progress in modeling of cryogenic cavitation for liquid rocket propulsion[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41(7): 558–608
- [8] Palerm S, Bonhomme C, Guelou Y, et al. The future of cryogenic propulsion[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 112: 166–173
- [9] Zhai Y J, Wu S G, Ma D, et al. Development of a cryogen-free dilution refrigerator for superconducting quantum computing[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(3): 1700105
- [10] Han Y N, Zhang A K. Cryogenic technology for infrared detection in space[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 2349
- [11] Wang Y Y, Li J D, Li X, et al. State-of-the-art development about cryogenic technologies to support space-based infrared detection[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(12): 32–52
- [12] Freiman A, Bouganin N. History of cryotherapy[J]. *Dermatology Online Journal*, 2005, 11(2): 9
- [13] Smith E C. Some pioneers of refrigeration[J]. *Transactions of the Newcomen Society*, 1942, 23(1): 99–107
- [14] Faraday M. Liquefaction of gases: papers[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1906
- [15] Andrews T. XVIII. *The Bakerian lecture*. —On the continuity of the gaseous and liquid states of matter[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1869, 159: 575–590
- [16] Perry R H, Green D W. Perry's chemical engineers' handbook(4th edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 1984
- [17] Radebaugh R. Historical Summary of Cryogenic Activity Prior to 1950 [M]// Timmerhaus K D, Reed R P. *Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress*. New York, NY: Springer, 2007: 9.
- [18] Dewar J. Collected papers of sir James Dewar[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1927: 678
- [19] Nobel Media AB. Nobel prize in physics 1913: Heike Kamerlingh Onnes[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/summary/>
- [20] Matthiessen A, von Bose M. I. On the influence of temperature on the electric conducting power of metals[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1862, 152: 1–27
- [21] Debye P. Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur[J]. *Annalen der Physik*, 1926, 386(25): 1154–1160
- [22] Giauque W F. A thermodynamic treatment of certain magnetic effects. A proposed method of producing temperatures considerably below 1° absolute[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1927, 49(8): 1864–1870
- [23] Kapitza P. Viscosity of liquid helium below the λ -point[J]. *Nature*, 1938, 141(3558): 74

- [24] Allen J F, Misener A D. Flow of liquid helium II[J]. *Nature*, 1938, 141(3558): 75
- [25] Allen J F, Jones H. New phenomena connected with heat flow in helium II[J]. *Nature*, 1938, 141(3562): 243–244
- [26] Keesom W H, Keesom A P. New measurements on the specific heat of liquid helium[J]. *Physica*, 1935, 2(1-12): 557–572
- [27] Das P, de Ouboter R B, Taconis K W. A realization of a London-Clarke-Mendoza type refrigerator[C]//Proceedings of the IXth International Conference on Low Temperature Physics Columbus, Ohio: Springer, 1964: 1253–1255
- [28] McMahon H O, Gifford W E. Closed-cycle helium refrigeration[J]. *Solid-State Electronics*, 1960, 1(4): 273–278
- [29] Gifford W E, Longworth R C. Pulse-tube refrigeration[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1964, 86(3): 264–268.
- [30] Chen G M, Chen G B. Principles of refrigeration and cryogenics (2nd edition)[M]. Beijing: China Machine Press, 2010 (陈光明, 陈国邦. 制冷与低温原理 (第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010 (in Chinese))
- [31] Geng H, Cui X Y, Weng J H, et al. Review of experimental research on Joule–Thomson cryogenic refrigeration system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113640
- [32] Zubair S M. Thermodynamics of a vapor-compression refrigeration cycle with mechanical subcooling[J]. *Energy*, 1994, 19(6): 707–715
- [33] Chen G B, Tang K. Principles of small cryocoolers[M]. Beijing: Science Press, 2010 (陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010 (in Chinese))
- [34] Barron R F. Cryogenic systems (2nd edition)[M]. New York: Oxford University Press, 1985: 271
- [35] Wheatley J C, Vilches O E, Abel W R. Principles and methods of dilution refrigeration[J]. *Physics Physique Fizika*, 1968, 4(1): 1–64
- [36] Cousins D J, Fisher S N, Guénault A M, et al. An advanced dilution refrigerator designed for the new Lancaster microkelvin facility[J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 1999, 114(5-6): 547–570
- [37] Coops G M, de Waele A T A M, Gijsman H M. The multiple mixing chambers[J]. *Cryogenics*, 1979, 19(11): 659–665
- [38] Coops G M. Dilution refrigeration with multiple mixing chambers [D]. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1981.
- [39] Leiden cryogenics[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://www.leidencryogenics.nl/>
- [40] Pezzetti M. Control of large helium cryogenic systems: a case study on CERN LHC[J]. *EPJ Techniques and Instrumentation*, 2021, 8(1): 6
- [41] Fauve E, Bonneton M, Chalifour M, et al. ITER LHe plants parallel operation[J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 42–47
- [42] National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ). KAGRA project[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://gwpo.nao.ac.jp/en/research/kagra.html>
- [43] Park J, Kim B, Jeong S. A review on a 4 K cryogenic refrigeration system for quantum computing[J]. *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, 2022, 24(2): 1–6
- [44] IBM. IBM scientists cool down the world’s largest quantum-ready cryogenic concept system[EB/OL]. [2025-07-16]. https://www.ibm.com/quantum/blog/goldeneye-cryogenic-concept-system?mhsr=ibmsearch_a&mhqGoldeneye
- [45] Hollister M I, Dhuley R C, Tatkowski G L. A large millikelvin platform at Fermilab for quantum computing applications[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022, 1241(1): 012045.
- [46] Hollister M I, Dhuley R C, James C, et al. An update on the Colossus mK platform at Fermilab[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2024, 1302(1): 012030.
- [47] Smith A R, Klosek J. A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 70(2): 115–134
- [48] Ecoinvent Association. Ecoinvent dataset documentation[EB/OL]. [2025-04-09]. <https://ecoinvent.org/database/>
- [49] Collart E, Longley A, Gordon D, et al. Predictive maintenance practices for cryogenic pumps in semiconductor manufacturing[C]//2022 33rd Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), Saratoga Springs: IEEE, 2022: 1–6
- [50] Rajashekara K, Akin B. A review of cryogenic power electronics-status and applications[C]//2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago: IEEE, 2013: 899–904
- [51] Baracu A M, Dirdal C A, Avram A M, et al. Metasurface fabrication by cryogenic and Bosch deep reactive ion etching[J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 501
- [52] Nguyen T K, Phan H P, Dinh T, et al. Highly sensitive 4H-SiC pressure sensor at cryogenic and elevated tempera-

- tures[J]. *Materials & Design*, 2018, 156: 441–445
- [53] Chato D J. The role of flight experiments in the development of cryogenic fluid management technologies[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(2-3): 82–88
- [54] Brown T M, Fazah M, Allison M, et al. NASA Marshall Space Flight Center In-Space Cryogenic Propulsion Capabilities and Applications to Human Exploration[C]//71st JANNAF Conference Proceedings. Joint Army-Navy-NASA-Air Force (JANNAF), 2024.
- [55] Penanen K, Banks K, Breda D, et al. Mid-Infrared Instrument Cryocooler on James Webb Space Telescope: Cooldown, Commissioning, and Initial Performance[J]. *Cryocoolers*, 2022, 22: 21–33
- [56] Morgante G, Pearson D, Melot F, et al. Cryogenic characterization of the Planck sorption cooler system flight model[J]. *Journal of Instrumentation*, 2009, 4(12): T12016
- [57] Shell Global. What is LNG?[EB/OL]. [2025-04-15]. <https://catalysts.shell.com/en/glossary/liquefied-natural-gas>
- [58] Reddit. Mercedes-Benz Actros truck using SLH2 [EB/OL]. [2025-04-15]. https://www.reddit.com/r/energy/comments/1aldv50/mercedesbenz_actros_truck_slh2_liquid_hydrogen/
- [59] Glenn M, Kim H, Coleman B, et al. Mobile hydrogen liquefaction and storage system[C]//IOP Conference Series:Materials Science and Engineering, Honolulu: IOP Publishing, 2024: 012061
- [60] Cao H S, ter Brake H J M. Progress in and outlook for cryogenic microcooling[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044044
- [61] Yang Z X, Wu C T, Zhu H F, et al. Experimental study on the operating characteristics of a miniature pulse tube cryocooler less than 1 kg[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 274: 126832
- [62] Bégot S, Getie M, Lanzetta F, et al. A novel model and design of a MEMS Stirling cooler for local refrigeration[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021, 313: 10001.
- [63] Lerou P P P M, Venhorst G C F, Berends C F, et al. Fabrication of a micro cryogenic cold stage using MEMS-technology[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(10): 1919–1925
- [64] Kalabukhov A, de Hoon E J, Kuit K, et al. Operation of a high- T_c SQUID gradiometer with a two-stage MEMS-based Joule–Thomson micro-cooler[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2016, 29(9): 095014
- [65] Semedo A, Garcia J, Brito M. Cryogenics in renewable energy storage: a review of technologies[J]. *Energies*, 2025, 18(6): 1543
- [66] Sciacovelli A, Vecchi A, Ding Y. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 84–98
- [67] Cabras A, Ortu P, Pisanu T, et al. Incremental clustering for predictive maintenance in cryogenics for radio astronomy[J]. *Sensors*, 2024, 24(7): 2278