

青春锋芒绽露华——纪念我国长活塞膨胀机预冷氦液化器定型生产60周年

胡忠军 朱世慧 李来凤[†]

(中国科学院理化技术研究所 北京 100190)

2025-03-17收到

[†] email: hli@mail.ipc.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20250710

CSTR: 32040.14.wl20250710

对发展我国低温技术的先驱者以及他们的创业精神,从事低温物理以及超导电技术研究的科技工作者,我一直怀有深切的敬意。——赵忠贤^[1]

洪朝生和周远,都是非常纯粹的科学家,也是我国低温事业的先驱者。2025年是长活塞膨胀机氦液化器型号研制成功60周年,仅以此文表达对他们的崇高敬意。周远等青年团队发明长活塞膨胀机氦液化器的过程,和他们的创新精神和坚持不懈的努力的经验,对于抢占科技制高点实现重大科技创新具有启示意义。

1 液化氦气的艰难破冰路

氦气是沸点最低的气体,曾被认为是“永久气体”。氦气的液化和超导现象的发现,将物理学研究推进到宏观量子世界的视野。近一个多世纪以来,以氦气液化为核心的低温技术促进了空间技术、应用超导、气体工业等科技,以及近年量子技术的发展。

氦液化技术可追溯到1908年海克·卡末林·昂内斯(Heike Kamerlingh Onnes)在荷兰莱顿大学第一次实现氦气的液化。但在很长时间内,世界上只有少数的实验室能液化氦,并且一直都是采用液氢预冷高压氦气节流制冷效应(焦耳-汤姆孙效应)产生液氦,即林德-汉普逊循环(Linde-Hampson cycle)。这种氦液化系统不仅复杂,还存在效率低和安全问题。1934年卡皮查在剑桥大学卡文迪许实验室实现了氦膨胀机代替液氢预冷的新型氦液化器,提高了液化率 and 安全性,“这是低温物理学界的一个重要的进展”^[2]。1936年林德公司研制成第一台使用低温膨胀机的迈斯纳

一卡皮查型氦液化器。由于膨胀机的活塞及气缸工作在低温环境,只能采用间隙内的气体润滑,为减少冷氦气通过间隙的泄漏,需要尽可能缩小活塞与气缸之间的间隙。

1946年塞缪尔·柯林斯(Samuel C. Collins)在麻省理工学院设计并建造了一台实用的双膨胀机氦液化器,被称为柯林斯型氦液化器。1947年柯林斯进行改进,将间隙缩小到3 μm,活塞和气缸表面还经氮硬化处理,以防止被落入的固体杂质划伤^[3]。柯林斯实现了氦液化器的商业化,到20世纪60年代中期,全世界的实验室中已经有250多台投入使用。这种带活塞式膨胀机预冷的氦液化器不仅提供了可靠和充足的液氦供应,也引起了物理学家的极大兴趣,打开了低温实验物理学

的大门。1961年卡皮查采用夹布胶木作活塞,磷青铜表面镀铬作气缸,也成功研制出实用的氦液化器。1962年西德的多尔(Doll)和埃德(Eder)设计了无阀活塞式膨胀机,转速高达1000—1700 rpm,而传统的双阀活塞膨胀机的转速仅为500 rpm以下^[4]。

正是在这种国际背景下,中国科学院应用物理研究所(1958年更名为中国科学院物理研究所)洪朝生创建的低温物理实验室在1953年开始部署氦液化的工作,但因为氦气



图1 1989年3月10日严济慈向洪朝生、周远颁发第一届胡刚复物理奖^[5]

來所實習人員通知卡片

() 应物 号 離 1961 年 10 月 31 日

姓名	周 遠	性别	男	年龄	24	籍貫	江蘇金壇	職別	實習研習員
原服务單位	中国科学院半导体研究所								
預計實習日期	壹年				离所日期				
組 別	所屬業務組	人事組	事務組	圖書組	器材組	全工厂	联合工厂		
姓 名	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生	洪朝生
來所日期	11月/日	11月/日	11月/日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日
姓 名									
离所日期	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日	月 日

图2 周远到物理所实习的通知卡片

供应问题被耽搁,直到1959年4月3日洪朝生等采用液氢预冷研制出我国第一台林德型氨液化器,液化率约为5升/小时。由于液氢预冷的氨液化器具有一定的危险性,1959年开始规划新的膨胀机型氨液化器试制,主要包括材料试验、膨胀机设计和液化器制造。1963年6月,低温物理实验室从东皇城根搬迁至中关村,膨胀机型氨液化器研制成为当时物理所的5个重点攻坚项目之一,并于1964年12月9日初步试制试验成功,膨胀机效率为67%,液化率2.5升/小时。这是国内首次研制出安全、经济、简便的氨液化设备,标志着我国低温技术的发展到了一个新的水平。其结构与当时国际上先进的柯林斯型氨液化器不谋而合。由于在液化氨方面突出的科技贡献,1989年物理学会首届胡刚复物理奖授予了洪朝生和周远(图1)^[5]。

2 发明长活塞背后的青年智慧

1961年2月周远从清华大学动力系热能工程专业毕业,分配到中国科学院半导体研究所工作,10月

被安排到中国科学院物理研究所(以下简称物理所)实习(图2)。正是这次实习的机缘巧合,低温研究成为周远追随一生的事业。

1962年初,24岁的周远以“研究实习员”身份参加膨胀机型氨液化器的研制工作。“膨胀机型氨液化器的研制”项目组共7人,除洪朝生、朱元贞外,还有几名技术员和技工。机加工由技工柴芝芬负责,具体由张生群和苏福泽制造,机床不合用时需要到外单位借用。膨胀机试车及液化器安装调试由技术员周远、王听元、高植檀负责。整体设计及个别部件试验主要由周远和朱元贞担任。

当时限于国内的科研条件和工业生产水平,机加工精度难以满足活塞膨胀机的要求,研制工作陷入停滞状态。原计划采用国际传统技术方案,活塞气缸长度较短(约为15—20 cm),进排气阀门都在低温下用杠杆拉动工作。但当时国内根本没有氮强化合金钢材料,机械加工也远达不到精度要求。虽也曾设法制造氮强化钢的气缸与活塞,由于椭圆度与圆锥度均要求小于万分之一,活塞与气缸之间的间隙不超

过5 μm ,一直未能制成。

周远受到大学所熟悉的内燃机和斯特林(Stirling)制冷机活塞结构的启发,突破传统轴向柱塞泵式的惯性思路,分析了加工高精度要求的原因在于低温下氢气粘性降低所致。同时为降低加工精度,提出了采用室温多道活塞环密封和长活塞结构的大胆设想^[6]。以长度为80 cm左右的长活塞替代柯林斯膨胀机那种短活塞;将气缸和活塞之间的密封由低温端改至室温端,这样就可以把活塞和气缸之间的间隙从5 μm 增加到100 μm 。正因为这个方案与国际上通用方案有显著差别,因此遭到质疑,甚至有人说“这根本就是想象”。他们的方案遭到反对。洪朝生经过考虑后,决定给予这位青年人支持。在洪朝生鼓励下,周远带着两位工人(仅一人为专职),在当时简陋的工作条件下,夜以继日地试验,遇到一个又一个困难。在困难面前,有人信心不足,说:“这样搞下去,别说年底,就是再搞三年也出不了液氨”;也有人说“谁愿意搞,谁就搞下去,你可以去拿奖金”等话来讽刺。在这种情况下,党支部及时启发鼓励大家要坚持下去,带着问题重新学习了《矛盾论》《实践论》《愚公移山》等毛主席著作,坚定了信心,继续试验,迎难而上,直到成功^[6]。

长活塞设计的核心思想是通过扩大活塞间隙和优化密封技术,提升稳定性。长活塞结构不仅降低了加工精度,而且间隙大了以后,在操作中对气体纯度要求亦不那么高,维护也很简便,同时还解决了低温下杂质气体固化后阻碍活塞运动的弊端,使活塞运动的可靠性大幅提高,提高了膨胀机的效率。试验在取得初步进展后,又获得了研

究室集中力量进行技术攻关。物理所1963年的工作总结中写道“共青团员研究实习员周远，勤学苦钻，不怕困难，不怕失败，敢于创造。和技工同志们一起动手，埋头苦干，在膨胀机氨液化器的试制任务中作出了一定的成绩”。

突破了这个难关，又遇到更大的难关——气门漏气问题。气门漏气是因为杠杆式气门开关结构(苏联式)的动作不是走直线，而是走弧线，不容易对准气门直至关严。工人师傅柴芝芬提出将进排气阀安置在气缸两侧，通过连接孔道两侧，采用直拉杆与传动机构连接，替代杠杆拉动的结构。但这个方案没有被技术人员接受，技术人员认为按老工人建议的结构不一定靠得住，有可能使膨胀机的死体积(也称为余隙容积，是指当活塞运动到止点位置时，气缸内无法被排出的气体所占据的容积)过大，不能提高效率。该建议没能得到应有的重视。直到失败了五六十次才考虑柴芝芬的建议“试试看”。按照柴芝芬的建议，经过研究人员的计算，发现死体积并不像想象的那样大。1964年8月开始了第三台膨胀机的设计和制造，结果证明：采用拉杆式的气门开关结构，既加工简单，又方便可靠，不漏气。这样，第三次也是最后一次闯过了制造膨胀机的难关。正如老工人柴芝芬说的那样：“不管是东洋西洋的，怎么好，咱们就怎么做，有啥问题，咱们就解决啥问题”^[6]。晚年的洪朝生多次和李来凤谈起要重视技术工人，他们的创造力相当强。像当年的柴芝芬、李世恕、王殿英、程先凤等都是技艺精湛的能工巧匠。当年为了调程先凤来物理所，洪朝生亲自与院领导郁文联系，而程先凤因为家住得离物理所太远，有顾虑，洪朝生自己掏

钱给他买了一辆带气缸助力的自行车，而且叮嘱办事人员不要告诉程先凤是他私人出的钱。

周远以实习员身份大胆提出长活塞方案，洪朝生慧眼识英才，支持和鼓励初出茅庐的周远做下去，这是一段风云际会的佳话。这种不唯资历论的精神也是当前科研生态去帽子化值得深思的。晚年时周远也常常提起这段经历，感念前辈的提携和培养。他在2021年给中国科学院大学学生作“低温事业的经验与感悟”报告时说：“采用长度为80 cm左右的长活塞替代柯林斯膨胀机长度小于20 cm的活塞，这个方案有很多新的特点，与国际上的经验有显著差别，刚提出时，遭到很多研究人员的怀疑甚至反对。但洪朝生先生鼓励我尝试一下”。洪朝生对此工作的评价是：1965年研制成功氨膨胀机/液化器，使得液氮温度下的研究工作和超导技术工作得以在国内发展，归功于周远等青年技术人员和柴芝芬等技工的创新和坚持不懈之努力。这种技术革新保持了膨胀机的高热工效率，而简化了制备工艺，并使膨胀机运行故障

率大大降低。美国也于同时试用了这种新结构，随后在其液化器商品中采用，沿用至今。(备注：柯林斯在1964年改进的新型氨液化器中也换用了这种结构的膨胀机，直到1970年代仍属于国际上最常用的型式。)

物理所对此成果登记时，主要完成人员除周远外，排名是按职称高低排序，洪朝生不同意这种排序，他坚持认为排名要按实际贡献，把柴芝芬、张生群、王殿英等技术工人排到前面(图3)，这也体现了洪朝生严谨治学、实事求是的科研作风。

经过对热交换器进行了相应的改进，于1965年研制成两台液氮产量达到5升/小时的膨胀机型氨液化器，技术指标达到国际先进水平。这种型号为CHY-5的新型液化器同年很快就在全国推广，成为国内高校超导研究的核心设备。1970年代美国科学家代表团在某次南京高校参观活动中，目睹该设备后发出惊叹，这一历史细节反衬出低温事业的先驱者们在科技自主创新上的水平。1965至1983年，长活塞膨胀

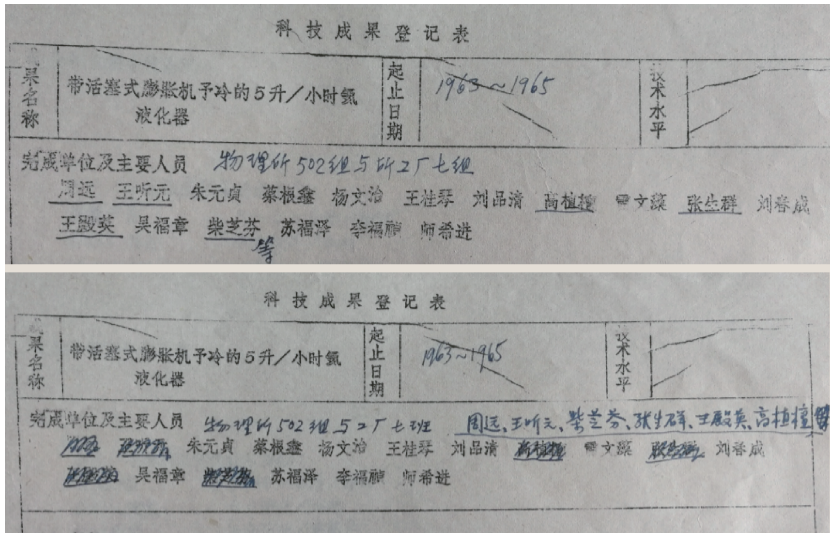


图3 洪朝生依据实际贡献对氨液化器完成人员排名的修改

机技术通过高校、科研院所推广至全国。在中国科学院、高校和国防等部门,大约六十多台氨液化器,仅有3台是进口的。1978年科学大会召开时,物理所将长活塞膨胀机预冷的氨液化设备等工作,统一以“低温技术设备的研制与推广”作为成果上报,获得了全国科学大会奖。

3 液氨灌溉下的春天:促进空间技术、超导研究和冷中子科学的发展

长活塞膨胀机型氨液化器(图4)的研制成功,为我国空间技术和超



图4 我国第一台CHY-20型长活塞氨膨胀机液化器



图5 中国通信卫星在北京卫星环境工程研究所KM4设备热沉环境中做真空热试验准备的照片^[9]

导技术的迅速发展提供了基本条件。这种氨膨胀机用在了我国第一台大型空间环境模拟设备(KM3)和空间辐射制冷地面模拟设备上。

氨低温技术在前沿科学研究中的贡献是瞩目的,特别是航天技术的发展需要低温技术^[7]。人造卫星需要进行外层空间环境的模拟试验,而外层空间面临着宇宙背景辐射温度约2.725 K的真空环境^[8]。空间环境模拟试验设备,简称“环模设备”,是重要的地面试验设备,主要功能是模拟真空、低温和太阳辐射等轨道空间环境,提前暴露航天器发射和在轨运行中的问题,可为航天器的研制和在轨稳定运行提供重要保障。由于技术复杂、研制周期长且投资巨大,环模设备的研制须提前开展,以保证研制工作的顺利进行。

1965至1970年,中国空间技术研究院北京卫星环境工程研究所、中国科学院物理研究所低温室和中国空间技术研究院兰州物理研究所合作并建成我国第一台带活塞膨胀机的空间环境模拟用氨制冷系统(KM3)^[9]。在空间环境模拟室中,利用了深冷凝结原理来获得超高真空,即通过氨制冷系统,使冷屏的

温度达到20 K,来捕获可冷凝的气体分子。KM3设备是首次采用气氨制冷系统的大型空间环境模拟设备,在中国科学院物理研究所雷文藻等负责设计、制备。该系统由活塞式压缩机、长活塞式膨胀机、纯化器、冷

箱、气柜等组成,系统的制冷量为400 W/20 K,氨板面积为29 m²,可产生的抽速为1×10⁶ L/s,使KM3模拟室的空载极限真空度达到9.3×10⁻⁷ Pa。KM3于1971年建成投入运行,为我国第一颗返回式卫星做整星试验。周恩来总理亲自去视察,这也说明这项工作的重要性^[10]。

1975年11月26日,我国第一颗返回式遥感卫星在酒泉卫星发射中心顺利发射升空,准确进入预定轨道。KM3后来使用自作用动静压气体轴承氨透平膨胀机。KM3和KM4环模设备为我国通信卫星、气象卫星、返回式遥感卫星进行了60余次热平衡与热真空试验(图5),满足了1980年代我国卫星研制工作的基本需要^[11]。KM3系统中的长活塞膨胀机,在此后的20多年空间环境模拟试验中发挥了很大的作用,特别是在卫星扫描辐射计性能联试和定标等大型实验中起到了重要的作用^[12]。

KM3和KM4低温系统的研制是经历艰难困苦才获得成功的。这里举一个典型的技术问题,技术人员经过多次试验发现真空度怎么也达不到要求的10⁻³—10⁻⁴ Pa。洪朝生抽调物理所低温实验室其他组的科研人员如赵忠贤、叶家鼎、林香烛、李刚等到怀柔协助攻关,检查了所有接口、小阀门、焊缝等可能漏气的地方,但都没有问题,最后发现是不锈钢容器钢板因冶炼轧制疏松渣点缺陷导致漏气,这是很难想到的漏点。另外一个没有想到的漏点是腔体大阀门。除了技术问题,艰苦的工作环境也是值得一提的。KM3和KM4环模装置建在怀柔,60、70年代怀柔的生活条件很艰苦,技术人员常年住在那里,伙食每天两稀一干,每天工作到凌晨1点。第二天早晨6点起床按军事化



图6 1986年在中国原子能科学研究院建成亚洲第一台冷中子源



图7 冷中子源制冷系统部分工作人员照片(从左至右:夏洪飞、朱文秀、梁臻英、周远、颜晓明、杨家洵、程国芳)

每人一生的时光是有限的,但创造力是无穷的,定将个人的潜力发挥到极来,报效祖国和人民!
周远 2016.5.23

图8 周远晚年对科技创新的感言

管理跑步,有些人累倒,也有人因为工作生活太艰苦坚持不下去,就是在这样的条件下,经过几年的努力,完成了任务。那一代科研人员的拼搏精神和对国家的责任感是值得当下科研人员学习和敬重的。

1982年由钱三强、洪朝生提出中法合作在中国原子能研究院(401所)的101堆上建冷中子源,利用14.5 K的低温氦气作为冷源。氦系统和氢系统由当时的中国科学院低温技术实验中心承担,但进展不顺利,洪朝生决定调当年在半导体所工作的周远去挂帅。1983年初,周

远从半导体所调到低温中心,负责冷中子源建设。1983至1986年,周远带领项目组人员长期在偏远、生活条件很差还有核辐射的房山阎村工作,与401所科技人员一道埋头苦干,完成了冷中子源建设。洪朝生对这项工作评价:周远80年代中期主持制备与建成冷中子源的氢、氦低温系统,达到了法国原子能总署安全标准要求。该项目于1988年出冷中子束流,通过鉴定验收。这台反应堆冷中子源是当时亚洲第一台(图6,图7)。

4 科研感言

周远在年近八旬时,写下一段感言(图8),也将鞭策着后人不断奋斗。

在新的科学技术发展时期,为了实现切实的科技创新和满足生产力高质量发展的需要,时代更加迫切地需要大力弘扬“爱国、创新、求实、奉献、协同、育人”的科学家精神。20世纪60年代周远等青年科技人员从实践出发提出独特的技术发明,始终践行着求实、奉献的治学态度。他具有强烈的爱国情怀、纯粹的科学信念和集体协同的精神,也培养出一批优秀的人才。这应给

广大科技工作者带来深刻的启迪。

致谢 感谢周远的学生北京大学顾超博士、中国电子科技集团第十一研究所段燕波博士,以及中国电子科技集团第十六研究所、中国科学院物理研究所在本文撰写过程中提供部分资料。

参考文献

- [1] 赵忠贤. 物理, 1983, 12(7): 400
- [2] Rubinin P E. Physics-Uspekhi, 1997, 40 (12): 1249
- [3] Collins S C. Review of Scientific Instruments, 1947, 18 (3): 157
- [4] Patzelt A *et al.* Linde Reports on Science and Technology. 1973, 19: 3
- [5] 程义慧. 现代物理知识, 1989, (4): 33
- [6] 中国科学院物理研究所. 膨胀机型氦液化器是怎样试制出来的. 中国科学院物理研究所科研档案, 档号: 2331/G5.3-9-01, 1965
- [7] 朱森元. 物理, 1991, 20(3): 141
- [8] Aghanim N *et al.* (Planck Collaboration). Astronomy & Astrophysics, 2018, 641: A6
- [9] 潘秋生. 中国制冷史. 北京: 中国科学技术出版社, 2008. p. 308
- [10] 阎守胜. 物理, 2018, 47(9): 570
- [11] 任元狮. 环模技术, 1994, (1): 21
- [12] 洪朝生. 制冷学报, 1981, (2): 1