

科技自立自强之路

2008年9月,神舟七号飞船发射,我国成为继美国、俄罗斯之后,独立掌握出舱活动关键技术的国家。就在举国欢庆之时,中国科学院理化技术研究所(以下简称理化所)的科学家们却在思考一个关于中国航天事业持续发展的重要问题。航天事业要发展,需要依靠推力更大、效率更

高、清洁环保的大型运载火箭。液氢液氧作为比推力高且环保的火箭推进剂,在相同条件下能够产生更大的速度增量,采用液氢液氧的火箭发动机效率更高。氢气在-253℃才能变为液态,想生产液氢,先要有大型低温制冷装置。然而,此时的大洋彼岸,美国明令禁止各类机构向中国出口-250℃以下的

低温制冷机及核心部件。
“大型低温技术是太空安全体系不可或缺的关键技术之一。”2009年1月,理化所科学家主动向中国科学院请缨,申请攻克大型液氢低温制冷技术的“堡垒”。
一场大型低温制冷装备国产化的攻坚战悄然开始。



-269℃温度下冷量为2500瓦的千瓦级液氢制冷机冷箱(左)和-271℃温度下冷量为500瓦的百瓦级超流氦制冷机冷箱(右)。

国产“超级低温工厂”攻坚纪实

■本报记者 倪思洁

1 前奏：“砸锅卖铁也得做”

低温环境的创造要靠低温制冷机不断把环境内的热量向外抽,同时又不让外面的热量进来。大型低温制冷装备素有“超级低温工厂”之称。它如同超大型冰箱一般,能够将温度降到-253℃以下乃至-271℃超低温,并维持百瓦至万瓦制冷量。

这种“超级低温工厂”是国家重要的战略支撑装备,在航天低温推进剂保障、特种材料提取、氢能利用与氢储能、战略资源开采、国家重大科技基础设施等重要领域有不可替代的作用。

正因为这种不可替代性,一些西方国家试图借此锁死中国相关技术的发展。从上世纪50年代开始,理化所老一辈科学家洪朝生院士、周远院士就开启了低温技术研究,尝试突出重围。

然而,直到2009年,国家还未正式为面向新需求的大型低温制冷装置研发项目立项,零敲碎打的小课题无法撑起建制化攻关。相关科学家心急如焚,向中国科学院提出立项建议。

详细了解情况后,院领导当即立断:“还等什么,砸锅卖铁也得做!”中国科学院向理化所特批

经费,紧急部署重要方向上的项目。

与此同时,中国科学院相关部门也开始研究大型低温制冷装置是否具备成为国家重大科研装备研制项目的条件。

当时,恰逢国家重大科研装备研制项目试点启动。财政部安排专项资金用于支持重大科研装备的自主创新,并以中国科学院为试点,探索国家财政对重大科研装备自主创新的支持模式。

项目立项论证过程中,长期从事液氢温区低温制冷技术研发工作的理化所研究员李青带着团队反复论证方案。他常常因腰疼而汗透衣衫,却依然在为我国大型低温制冷技术在国际上占有一席之地而努力。他一度住在办公室里,几乎每天都忙到下半夜。

在组织专家进行广泛调研和严格论证的基础上,2010年,财政部和中国科学院共同启动“大型低温制冷设备研制”项目,由理化所牵头攻关,项目经费1.73亿元,李青任首席科学家。

这个项目后来被很多人称为“一期项目”。

在该项目的支持下,中国科学家自主研发出一台万瓦级液氢温区制冷设备,突破了高速气体轴承透平膨胀机稳定性技术、超低漏率板翅式低温换热器设计和制造技术、高精密油分离技术、气动低温调节阀制造技术及系统集成调控技术五大关键技术。

研制初期,由于国内很少进行大型低温制冷相关设备的设计和制造,国产的压缩机、低温换热器等关键设备的密封性能比需求差两个数量级。项目组在理化所5号楼旁边搭建起一座简易小楼。夏天,大家包扎绝热材料时,汗水哗哗往下流。冬天,大家靠着一个小小的取暖器,手脚冰凉通宵达旦地工作。

功夫不负有心人。2015年4月29日,在李青及其团队的努力下,一期项目通过验收,我国初步具备了自主设计与制造液氢温区大型低温制冷设备的能力,解决了大型液氢温区低温制冷装备从无到有的问题。

它如同一把钥匙,开启了中国大型低温制冷装备国产化的大门。而对于科学家来说,他们的征途才刚刚开始。

4 突破：向-271℃冲刺

项目的另一半任务是研制出百瓦级超流氦制冷机。这部分任务与液氢制冷机研制几乎同步启动。

超流氦制冷机的关键设备是离心式冷压缩机,也是整个项目中让大家提心吊胆的设备。

冷压缩机能在低温下工作,采用电磁轴承,要求控制系统在0.5毫秒内对转子可能发生的偏离作出准确反应。低温技术实验中心(理化所前身之一)从1959年起就在研制各种接触式、非接触式轴承压缩机,却从没研制过电磁轴承压缩机。

为稳妥起见,项目组准备了两条路线,一是从国外购买整机或零部件,二是全部自主研发。两条路线,齐头并进。

结果,第一条路线状况百出,大家的心就像坐过山车一样忽上忽下。

2015年,科研团队寻得一家有冷压缩机生产经验的外国公司,都已谈妥购买事宜,没想到招投标之前,这家公司发来邮件说:“为获得出

口许可证,我们上周与政府部门进行了讨论和协商,但是它们对发放出口许可证持较负面观点,理由是贵所被列入政府的禁制品名单。”后来,科研团队又找到另一家外国企业,可是这家公司生产的冷压缩机运到廊坊,第一次试车就失败了,返修进度也一拖再拖。

第二条路线虽然同样困难重重,却让人踏实许多。

在第一条路线彻底行不通时,科研团队已经积累了多年技术经验,自主攻克了电磁轴承的技术难题。此后,科研团队将全部精力集中到第二条路线上。到2019年,团队自主研发出的冷压缩机进入技术测试环节。

由于试验需要使用大量液氦,他们将试验场地搬到具备试验条件的中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心。在这里,冷压缩机试验整体非常顺利。2019年11月,冷压缩机搬回廊坊,集成到超流氦系统试验台上。

科研人员接下来的目标是将超流氦系统做到500瓦,与2500瓦的液氢系统结合。

2 目标：“还要继续往下降”

从“十二五”时期开始,我国部署了大量大科学装置项目。看着装置一个个“上马”,理化所的科学家们却想得更多。

很多大科学装置需要使用超导设备,包括超导磁体和超导高频腔。为获得良好性能,这些超导设备大多必须在液氦温区(-269℃左右)至超流氦温区(-271℃左右)工作。有人说,“如果没有大型液氢或超流氦温区的制冷装备,大部分大科学装置无异于一堆废铁”。因此,更低温区的低温制冷机成为必需。

当时,国内没有能力生产更低温区的大型低温制冷装备。一些大科学装置项目因为进口产品的供货时间不可控等问题,在争分夺秒的国际科技竞争中陷入被动。

“我们不能只满足于做到液氦温区,温度还要继续往下降,覆盖全温区,降到液氦温区甚至超流氦温区。”理化所时任所长张丽萍与原所长、一期项目总顾问詹文山商量。

以当时的技术能力,大型低温制冷机做到-253℃已属不易。若要降到-269℃甚至-271℃,难度可想而知。大家讨论后决定,从一期经费里“挤”出小部分经费,论证实现全温区大型低温制冷技术的可行性。

在此基础上,理化所于2014年向中国科学院提交报告,申请将项目延续下去。

这份报告被反复修改了不下25次,争论最多的是,接下来是“一步一个台阶”还是“一步跨两个台阶”。

“一步一个台阶”,指先立一个项目攻克液

氦温区制冷装备,再立一个项目攻克超流氦温区制冷装备。这种做法步子稳,但速度慢。

“一步跨两个台阶”,指只立一个项目,攻克液氢和超流氦温区的装备,研制出一台能同时提供-269℃和-271℃温度的装备。这种做法速度快,但风险高。

起初,大部分人支持走更稳妥的路线。“液氦温区的装置我们有把握,而超流氦制冷机很多人连见都没见过,更别说把它制造出来。”理化所研究员、二期项目常务副总指挥龚翎会说。

但国内对制冷的现实需求、国际竞争的胶着局势不等人。中国科学院和理化所最终决定,“一步跨两个台阶”。

2015年,立项申请得到国家认可。在国家重大科研装备研制项目的支持下,二期项目“液氢到超流氦温区大型低温制冷系统研制”无缝衔接,经费为1.87亿元。

龚翎会觉得压力太大了。二期项目研制内容包含3种制冷机,一是-269℃温度下冷量为2500瓦的百瓦级液氢制冷机,二是-269℃温度下冷量为2500瓦的千瓦级液氢制冷机,三是-271℃温度下冷量为500瓦的百瓦级超流氦制冷机。不仅如此,后两种制冷机还需要集成到一台装备上。

“项目内容多,时间又紧,真怕拿不下。”龚翎会坦言。



用于2500瓦低温系统的液氢螺杆压缩机测试验收。



我国首套出口国际的200瓦液氦温区制冷机。



大型低温制冷团队。

理化所视觉中国供图

5 联调：实现一机两用

2019年11月,冷压缩机样机装上超流氦系统,首次和液氦系统联调;12月,第二次联调,超流氦系统首次达到-271℃……试验看上去一切顺利。然而,就在他们逼近500瓦、-271℃的更高目标时,问题出现了。

2020年2月,第三次联调获得一个好结果和一个坏结果,好结果是超流氦系统在-271℃下,获得了瞬态502.9瓦制冷量;坏结果是仪表系统发生故障停机。

那时候,试验经常做着做着就停机,电机过热,仪表报警。“自己研发的装备,自己能推断问题在哪儿,可以不断地进行技术迭代。”二期项目首席科学家、理化所研究员刘立强虽然心急,却有底气。

他们一边继续完善冷压缩机各种性能,一边努力解决包括电机过热在内的各类问题,超流氦系统稳定运行时间逐渐延长:2020年7月初,第九次联调,稳定运行1小时;月末第十次联调,稳定运行5小时;8月,第十一次联调,稳定运行7小时。可是,电机过热的问题还是未能根治。

一狠心,大家决定给冷压缩机做“一次”大手术,换掉电机里所有线圈,优化冷却结构。

团队每个人都觉得,就算进展慢一点,交给国家的设备也容不得一丝隐患。“保守疗法”也许可以达到72小时的稳定性指标,但任何一个偶然因素的出现都会让它处于不稳定状态。”刘立强说。

2020年10月,廊坊园区里,电机线圈更换完毕,准备进行第十二次联调。这一次,他们要挑战72小时。

1小时,5小时,7小时,10小时……刘立强看到了成功的征兆。以往的调试,总会有数值偏高或偏低的问题,这次却特别顺,系统一直平稳运行。

12小时,24小时,36小时,48小时……系统依然平稳。直到10月20日,设备平稳运行了72小时。

“这件事终于完成了!”刘立强感觉肩上的压力终于释放了。

2020年12月29日,液氢、超流氦低温制冷装置通过专家组验收。

3 征程：向-269℃进发

不出所料,技术和时间的双重压力让项目难度倍增。

按照计划,研究团队先要研制一台冷量相对小的液氦系统。2016年9月,250瓦液氦系统集成完毕,开始调试。“没承想,全不是那么回事儿。开机一试试出问题,温度降不下去。”理化所时任副所长、二期项目总指挥刘新建说。

讨论会开了无数次,原因查了无数遍,问题却一直没能解决,大家的信心一点点跌到谷底。“干到一半就干不下去了,往下怎么办?”刘新建心里打鼓。

到2017年夏天,大家觉得修修补补的“保守治疗”已无济于事,便决定破釜沉舟:“拆了!重新组装!”

要拆的设备主要是冷箱。从外观看,冷箱像个罐子,里面有许许多多的零部件,氢气在这里变成液氢或超流氦。

拆装任务在理化所廊坊园区开展。那时,园区还没竣工,厂房刚刚通上水电。为了节省时间,龚翎会带着团队几个年轻人,把凉席、被单、水壶、“热得快”和成箱的方便面搬进厂房,就地住了下来。

没日没夜地干了一个多月,他们总算找到了问题。调试进度随之顺畅起来。到2017年10月,250瓦液氢制冷机通过专家验收,关键部件国产化率达100%。

攻关团队信心倍增。基于成功经验,他们进一步研发并完善关键核心设备——高速氢透平膨胀机,集成出2500瓦液氢制冷机。2019年9月,大型液氢制冷系统性能达到设计指标。

不过,研制出百瓦级和千瓦级液氢制冷设备,项目任务只完成了一小半,更大的挑战在等着他们。

2021年4月15日,二期项目通过项目验收和科技成果鉴定。

验收意见认为,该项目“全面突破了大型液氢低温制冷装备核心技术”;鉴定意见认为,该项目“形成了千瓦级大型液氢低温装置的研制能力,打破了发达国家的技术垄断,项目整体技术达到国际水平”。

这是我国首台可以达到超流氦温区的大型低温制冷装置。从这天起,中国有了自己的“超级低温工厂”。

在二期项目之后,中国科学院又设立战略性先导科技专项,继续支持理化所研制5吨/天级大型氢液化系统。2024年3月8日,该系统通过测试验收,系统满负荷稳定运行8.5小时,氢气液化率约5.17吨/天。

在很多亲历者看来,“超级低温工厂”的成功得益于一套行之有效的重大项目管理体制和机制。

理化所所长王雪松介绍,低温设备项目实施过程中,理化所探索了独具特色、卓有成效的管理机制,打造了“边研究、边应用、边转化”的创新研发模式和完整的发展链条。

在管理方面,“我们打破原有‘PI(课题组)制’课题组之间的藩篱,实体整合3个课题组,组建起面向重大战略目标的研究中心,形成了合力做大事的科技架构,为项目的统筹管理奠定了坚实基础。”王雪松说。

目前,理化所大型低温制冷机已实现18台(套)的应用。其中,百瓦级液氢制冷机不仅应用于中国科学院高能物理研究所超导磁体测试装置、中国原子能科学研究院直线加速器(KSTAR)上;液氢、超流氦制冷机应用于中国科学院近代物理研究所的加速器驱动嬗变研究装置试验线。

与此同时,理化所在螺杆压缩机、氢气阀门、高速电机、电磁轴承等部件的研制方面与企业协力攻关。山东、福建等地20多家企业在短时间内实现技术突破,其中有些技术达到国际先进水平。

“我们承担国家大项目,不光要完成项目,而且要为国家打下工业基础。”龚翎会说。

从2010年一期立项,到2021年二期验收,再到如今先导专项持续突破,中国科学家仅用10余年就走完了西方国家数十年的路,我国大型低温制冷技术随之进入新的发展阶段。

如今,这些科学家又一次看到国家对低温制冷装置的新需求,布局极低温大冷量制冷机研究,助力中国成为世界低温技术和低温产业高地,全面支撑国家战略资源、航空航天、科技创新等领域。

(实习生赵宇彤对此文亦有贡献)