



液体低温系统

YETI DIWEN XITONG

《低温工程》编辑部

液体的低温系统

[俄]尼·瓦·费林
亚·波·布拉诺夫 著
赵运生 崔春娥 译

《低温工程》编辑部

序

作者尼古莱·瓦西里耶维奇·费林教授现任俄罗斯低温机械联合体总设计师,技术科学博士。1992年10月我们研究所访问莫斯科时,作者出于对中国人民的深厚感情和同行之间的友谊,向我们热情地推荐了这本著作。

这本书全面、系统地论述了各种工业用低温系统、低温液体贮存及管道输送、低温系统设备以及低温系统安全使用、保障条件等内容。书中总结了前苏联的低温研究成果,给出了大量工程设计与计算的方法,因此具有很高的实用价值,是低温工程领域中一本少见的专著。

作为一个从事低温工程科研单位,作为“低温技术情报网”的一员,我们愿将此书介绍给国内的同行们以及“情报网”的同事们,以促进国内外的交流和推动我国低温技术的发展。

仅对提供信息和支持这件工作的十五所王瑞铨同志以及承担翻译、出版工作的赵运生、崔春娥、夏英德、吴世功等同志表示衷心感谢。

中国运载火箭技术研究院

试验技术研究所所长

郑继文

一九九三年七月

前 言

当前国民经济的不同部门中,像机械制造、冶金、动力和食品工业以及火箭空间技术和农业中广泛地使用液体低温产品。这些产品被使用最多的是甲烷、氧、氢、氮、氢和氮,它们在正常环境条件下均为气体状态。上述物质在液态下所以能广为使用,一方面是由于低温技术发展的结果,液化和气体分离过程和设备的现代化以及贮存、运输设备的发展;另一方面也是由于不同的国民经济部门应用低温显示了技术和经济优越性,从而使几十年来对低温产品的需求在不断增长。

液体低温产品的生产量和应用规模越来越大。在最近几十年来一直以10%的年增长率高速发展。工业性大规模的使用必然要求建立低温产品的贮存、供应系统,以保证所需的使用参数。

贮存液体低温产品并向用户供应的系统在本书中统称液体系统。这样的系统可满足储备和贮存液体形式的产品,获得对产品要求的压力、温度参数并供应产品。

考虑到产品的特性,在近代建设液体低温系统的同时,也出现了大量的针对低温产品贮存运输过程的研究成果。

本书系我国这方面的第一个专著,其中总结了液体低温产品的参数计算,设备结构和系统实际使用的经验。

第一章属引言性,叙述了低温产品的应用范围以及工业使用系统的介绍。

在第二、三章中叙述了低温产品的贮存方法和管道输送(其中包括不放气封闭贮存和管路加注)。

第四、五章专门论述低温系统在输送状态下管路中的流动过程。在这两章中特别研究了与气腔填充有关的各种非稳定过程的特殊形式。

在单独的一章中系统地介绍了当代低温系统主要设备的结构

水平:容器、管路和附件。

第七章专门谈安全使用的保障问题和系统中工作介质的纯净保障问题。

由于内容和主要资料新颖,作者承认书中难免有错误之处。作者将诚恳欢迎批评和建议,来信请寄 191065,列宁格勒,捷尔任斯基大街 10 号,机械制造出版社、列宁格勒分社。

目 录

前言	(I)
第一章 液体低温产品的贮存、供应和恒温系统	(1)
1.1 液体低温产品的使用范围	(1)
1.2 液体低温系统	(6)
第二章 在贮存、冷却和供应产品时容器中发生的过程	(24)
2.1 液体低温产品贮存	(24)
2.2 液体低温产品从容器中供出	(38)
2.3 低温产品的冷却	(47)
第三章 液体低温产品的管路输送	(56)
3.1 沿管路输送时低温液流参数计算	(56)
3.2 低温系统管路的冷却	(72)
3.3 管路冷却时间的计算	(82)
3.4 低温液体送入热管道后压力升高的计算	(91)
第四章 低温系统中的不稳定过程	(98)
4.1 低温液体工作中不稳定过程的特点	(98)
4.2 填充盲支管的不稳定过程	(110)
4.3 阀门打开时的不稳定过程	(124)
4.4 低温系统在过渡状态下的工作	(135)
第五章 低温系统不稳定过程中参数的试验研究和计算方法	(145)
5.1 用低温液体进行试验研究的特点	(145)
5.2 低温系统中不稳定过程参数的测量	(150)
5.3 不稳定过程参数的计算	(159)
第六章 低温系统的设备	(171)

6.1	容器	(171)
6.2	管路	(203)
6.3	管路附件	(216)
第七章	低温液体系统的使用工艺.....	(226)
7.1	低温产品纯度的保证	(226)
7.2	低温系统使用的安全保障	(238)

第 一 章

液体低温产品贮存、供应和恒温系统

1.1 液体低温产品的使用范围

随着低温在不同经济部门和人类科学活动中的应用,工业性大规模地有效使用低温产品的问题就具有愈来愈大的意义。获得和应用低温(120K 以下)可藉助一系列物质诸如氮、氢、二氧化碳、氟、氩、氧、氦、氖及其它来实现。这是因为用这些物质为工质可以最简单、最有效地获得低温,通过气流在膨胀机中绝热膨胀做功或者用节流的方法。

但是不是所有上述提及的物质在低温区内都能被使用。影响这些物质在低温范围应用有两个基本因素:在不同技术领域使用的规模和它们作为冷工质的可接受性。它们中有些在大气中含量少,价格昂贵(氦),有一些受它们毒性的限制(氟,二氧化碳),而有一些则应用广泛,被广为接受(氧、氢、甲烷、氩、氮)以及有的作为冷工质具备特别优越的性质(氮、氦)。以上条件和因素决定了在现今工业性大规模使用的仅限于:甲烷、氩、氧、氮、氢和氦。

甲烷和氢用作化工原料和燃料;氩—惰性物质;氮—惰性物质,化工原料和冷工质;氧—活泼的氧化剂;氦—最低温度的工质。这些物质在不同的技术领域常常是使用其液体状态。这是由于它们的液体状态较气态具有一系列的优点。首先,在正常条件下它们液态密度较气态大 800 倍,使其贮存运输的体积和包装重量大为减小,从技术上实现大量的贮存、供应成为可能。这一点在使用产品的化学性质时更为重要。其次,对氢、氧、甲烷和氦来说,大量的

贮存、运输、建立储备和短时间内大流量的供应等以液体状态实现,然后汽化使用最为有利。这种方法有时可以说是在不同技术领域中使用时的唯一方法。例如只有把甲烷变为液态才能通过海运实现其从产地到用地的运输;氧和氩以液体供应机械加工工厂,然后就地汽化使用,从经济上说最为有利;氢和氧作为火箭燃料只能是液体状态,否则无法实现箭上容器的重量和尺寸特性。作为低温产品,用于对不同的容器和装置的冷却和低温致冷更是液态具有的优势,因为液态的比焐值(内能)较同样温度下的气态要小一个蒸发热值。因此用液态获得和保持所需的温度很容易实现。

下面我们分别叙述上述物质液态使用范围。

甲烷一天燃气的主要组成部分,作为原料和燃料广泛使用于化学工业。

在我国由于存在长距离的水域障碍,用管道输送天然气存在很大困难,甚至是不可能的。最近若干年发展了气体液化工艺,并实现了特装容器的液体运输。为此研制了相应的工艺装置:强大的液化设备,绝热容器的运输车、船,大型的贮罐、管道、泵和汽化器。大型运输甲烷的列车,其槽罐容积可达 $5 \text{ 万} - 10 \text{ 万 m}^3$ 以上。地面液体天然气的贮罐的容积可达 130 万 m^3 。液化天然气大量的贮存可以建立大容量的储备量以解决各个地区在最大需求时的供应问题。目前即使利用管道输送气体天然气的国家和地区也要液化相当数量的天然气,以建立储备能力。

液体甲烷也用作汽车燃料。使用它可以减少排气中的有害杂质,同时又提高了发动机的经济性。

氧—最活泼的氧化剂,它的天然储量实际上是无限的,它对人是无毒的。这使它在一系列的经济领域中得到广泛的应用:黑色和有色冶金工业、化学工业、火箭空间技术、机械制造、医疗和其它部门。作为火箭发动机燃料的组元大量地使用于火箭空间技术中。

正因为液氧被用作火箭空间技术中燃料的主要成分,才促成了首批大型液体低温系统的建立,以满足储备、贮存、参数稳定和供应使用的要求。50年代末出现的火箭空间综合体和试车台的液

氧保障系统导致了建造大型固定的和运输用的容器,建造长距离大流量管道和配套装置(泵、过滤器、管路附件等),促进了设备技术参数的改进,同时也强烈地推动了液体系统工作过程的研究和使用工艺的完善。液氧加注系统是最大最复杂的液体低温系统之一。

例如土星—5 火箭系统上液氧加注量为 1730m^3 (2000t), 地面贮罐容积为 3230m^3 , 加注管道直径 0.25m, 长 580m。

液氧还使用在空间飞行器和飞机生命保障系统的电化学电源中, 特制的磁流体动力发生器(МГД)中。尽管液氧在这些系统中使用的量不大, 但是这些系统对于飞行器和工程对象来说是特别重要的。

在绝大多数情况下, 在冶金和化工工艺过程中, 机械制造和医疗中使用的氧均为气态氧。

对小用户供氧, 一般采用压力容器和高压气瓶, 或者采用特制液氧容器就地汽化。用液态向用户供氧可以简化贮存和运输工作, 所以采用的越来越多。这种供应方法也适用于其他空分产品—氮和氩的供应。例如在美国, 400 万吨的液氧和其他空分产品(氮、氩)的供应是靠分布在全国的 5000 个供应站来实现的[62]液体产品用铁路和公路槽车运输到各个供应站并泄入站内贮罐中。中小型用户的供应均使用槽车或船从固定贮罐中提取。

最近 15—20 年来, 英国空分液化产品的供应系统得到了很大程度的发展; 贮存容器发展到 5 万吨。在法国, 液氧也是用公路槽车运送到汽化站。其他的用户(800 个以上)直接的接受液氧供应, 自备汽化装置。在苏联直接向用户供应液氧、液氮和液氩的方式也正在积极发展之中; 直接向用户供应液氧并在用户就地汽化的成本较用气瓶氧降低 2.6—6 倍, 较高压供应车供氧成本降低 1.1—2.4 倍。

通常液体低温产品是靠周围环境中的热量汽化的, 有时也使用专门热载体—热水、蒸汽等。

氩—惰性气体, 在机械制造业中广泛用于金属焊接, 同时也使

用于电子管工业中。液体状态多数情况下用于向集中供气的企业用户供应。

液氮—无毒、惰性和价格低廉,因此广泛用作冷冻介质。大量的液氮被使用在模拟空间条件的热真空舱内。热真空舱的容积可从 1m^3 到 10万 m^3 以上。在这些舱中进行空间装置和组合件的研究、试验和改进。有时把整个空间系统置于舱中进行试验研究。舱内模拟真空度可达 $10^{-3}\text{—}10^{-8}\text{Pa}$ (帕)。真空度靠真空泵予以保障,在大型的热真空舱内作为抽气手段甚至使用液氮和低温气氮。舱内空间温度的模拟靠接近液氧温度的黑体吸热屏实现,所需温度的保持则依靠屏内液氮的循环。这种保障舱内空间温度条件的低温系统的特点是液氮的消耗量非常大。例如容积 $V=1\times 10^4\text{m}^3$ 的模拟舱,其过冷液氮在液氮屏中循环的耗量为 10^6 kg/h ,它的液氮贮罐的容积为 $2\times 10^3\text{m}^3$ 。

液氮广泛地应用在液氧、液氢和液氮设备低温压力试验和冷冻试验中。食品工业也是液氮的重要应用行业。用喷淋液氮方法快速冷却和冷冻处理后的食品在氮的环境中保存,可以长期保鲜。

在农业上和医学上液氮还用于生物精液活体的保存。人血冷冻到液氮温度可以保存几个月甚至几年的时间。在医疗上液氮用作外科手术切除肿瘤、扁桃体和白内障。在低温氮系统中液氮广泛用于冷却设备的绝热保护层,在超导磁体、电缆和变压器等中液氮还用于大质量金属体的预冷。在加工工艺中,为了去除橡胶、塑料和金属零件的铸瘤和飞边毛刺,也首先用液氮进行冷处理。磨损的橡胶件(例如汽车轮胎)在粉碎再生之前也先用液氮浸泡使其脆化。气体氮在化学、石油化工和冶金工业的一系列工艺过程中得到应用。在这些情况下,一般用量不大,但为了建立储备也是利用液氮就地蒸发汽化。有时这种工艺使用在化学工业的工艺过程中,为氢系统和石油化工产品运输槽罐创造惰性环境。

液氮—工业规模的使用与火箭发动机的研制有关,低温液体—氢和氧是火箭发动机的推进剂。例如美国著名的土星—5 运载火箭上装载 1275m^3 ($\approx 90\text{t}$)液氢作为上面两级的燃料。多次使用

的轨道地面运输系统的航天飞机(shuttle),它的燃料就是液氢。

液氢还应用在进行基本粒子研究试验的气泡舱内。苏联最大的70吉电子伏(ТЭВ)的中子加速器内装有约 11m^3 大的液氢舱,重3000t[66]。

液氢同样被用在空间飞行器中的电化学电源中(ЭХГ),把氢氧的化学能转变为电能。当前(因为地球上石油和天然气储量有限),氢被看作运输工具的最有前途的通用燃料。持这种观点的专家们认为,氢能满足对理想燃料的一系列的要求。这些要求看起来应该是这样的:储量应该实际上是用之不尽的;成本应该是足够低的;燃料应该具有高的比能值;使用安全方便;不需要对现有发动机进行大的结构变更;在贮存、运输和燃烧中对周围环境仅产生最小的危害性和危险性。氢作为燃料所具有的优点是:燃烧时不污染环境;具有高的能量指标;它的贮量是用之不尽的;它的生产与其它主要能源,如电能、热能和原子能是可以共存的。除此之外,使用氢只要求对现有系统进行最小的改造。成本高、密度小,为了液化和液态贮存要建造相应的专用设备,这些缺点限制了氢的使用。

氢的安全问题当前还是一个复杂的问题,但是人们已经积累了一定的经验。对使用氢时危险性的一般警告已经在逐渐的消失中,但是仍在拖着它将来被广泛使用的后腿。氢作为燃料的最主要缺点是成本高,但是现在还不清楚大量降低其成本的途径。

广泛使用液氢作为燃料的开端,人们把它与航空事业联系在一起,认为首先应该作为燃料在航空上使用。持这种观点的专家是有一定客观根据的,其中主要是:航空业现在使用的石油量相对来说并不大,但是它对石油的需求会很快剧增。需求量的增加和航空传统燃料相对较高的价格有可能导致液氢在航空业中的使用。因此,随着液氢生产量的不断增大,会在一定程度上降低液氢的生产成本。此外,液氢的使用将会大大地提高飞机的飞行技术性能,如提高飞行速度,降低飞机结构重量。

氮一是籍以能够使金属进入超导状态的物质。为了对各种超导装置进行冷却和恒温广泛地使用液氮。由于液氮的蒸发热不大,

而气氮的热容又相对较高,同时又因为液氮相应的温度和压力范围很狭窄,所以除了液氮之外,在接近临界参数时也使用气氮作为冷工质。液氮作为冷工质在超导冷却和恒温中既用于浸泡又用于循环回路,而气氮只能用在循环回路中。超导现象在 1911 年就已发现,但工业性应用的研究试验是从 50 年代末和 60 年代初开始的;相应于这个时间液氮系统的广泛应用也开始了。现在利用液氮系统进行冷却和恒温,已经建造超导磁铁、发动机、发电机、输电线路和变压器等大型系统。正在紧张地进行着超导强磁场的工作。可以指出以下一些实际使用超导磁场的方向:在热核反应堆 Tokamak 中,在磁流体动力发电机(МГД)中,在基本粒子加速器中以及在交通运输设施中。

在苏联一系列利用液氮系统的工业和半工业性超导电磁系统已经完成设计或正在建造中。第一位的应该是 Tokamak 型超导系统。

在 Tokamak-7 中积累的经验将被用来为新一代 Tokamak-15 热核反应堆建造更大的新型超导系统。

利用超导磁铁还研制了工业试验型 МГД 发电机组,其功率为 500 兆瓦。功率为 250 兆瓦的超导磁流体发电机将作为把运动的气体动能转变为电能的第一阶段。

为了研究基本粒子的性质,在苏联正在利用超导磁铁建造加速—储存综合工程(YHK)。它们的使用将大大提高加速中子的能量,同时又减少电能的消耗。建造中的 YHK,其加速中子的能量为 3000 吉电子伏特,将比正在投产的塞尔普哈夫(Серпуховский)加速器的能量大 40 倍。YHK 的圈长约 21 公里。为了对其超导磁铁圈环系统进行冷却、恒温,将采用液氮。

1.2 液体低温系统

工业性使用液体低温产品通常是体现在复杂的技术工程中。从这些工程中又可以区分出一些工程,它们又要求低温系统在供

应产品的同时还要保证需要的参数。这样区分的必要性是因为工程的一些项目和装置的建造和使用,与低温产品应用的科学技术范围有关。例如使用液氢、液氧为火箭推进剂的组元必然要导致建造箭上贮箱、涡轮泵部件、火箭发动机,而且它们均必须满足低温推进剂的要求,同时还要研究发动机冷却和启动的工艺。在动力和电子技术上使用液氮必然要涉及建造新结构的发电机、电磁铁和变压器。当然,这些新结构要由相应的专业公司或部门来负责研制。一般地说,对于使用低温产品的工业工程进行科学技术综合分析时,必须对低温技术与其他技术对接的问题进行较大范围的研究和讨论。

与建立低温产品供应系统有联系的问题,一般说有共同通用的性质,而与供应系统工作过程本身的特性联系较少。在贮存、冷却和输送时有关工作过程、设备结构和流程布置的要求,均与具体的产品种类和参数有关,但均不超出传统低温技术范围。液体低温产品供应系统一般选用同类型的设备为基础,对系统中的部件从热力学、水力学和传热学上要进行分析的问题也基本相同。系统的主要功能可以大致归纳为两种:一种是系统要储备、贮存和供应产品并保证要求的参数,供应的产品可为液体,也可可为气态,其参数也可能与贮罐内的参数不同;另一种系统则要求对系统中的部件进行冷却并保持部件中一定的温度场,也就是要使部件稳定在低温温度上(或恒温)。这两种系统在流程布置和工作过程上的明显差异很难区分,因为有时把产品输送到用户容器中后还要求在一定时间内保持容器内液体温度。相反从恒温系统中有时也要求供应产品。液体低温系统的主要部件为容器,管路和调节附件、热交换装置、流量激发器、有时还有产品的降温装置。

在恒温系统中还要有致冷装置,但在分析系统工作时,致冷装置只看作是冷源。有关致冷装置的建造和使用已超出了本书的范围。

图 1.1 为产品贮存和供应的原理图。产品供应可用挤压法(图 1.1a)或者用泵来实现(图 1.1b);后一种情况下容器结构重量可减

轻,因为容器中的工作压力只需满足泵的无气蚀工作。当供应产品的温度要求被冷却到大气压力时饱和温度以下,则系统必须有自己的降温装置。图 1.1b 表示了供应冷却后产品的一种方案。供应气体的液体低温系统则在自己的系统中装有产品汽化器(图 1.1r)。

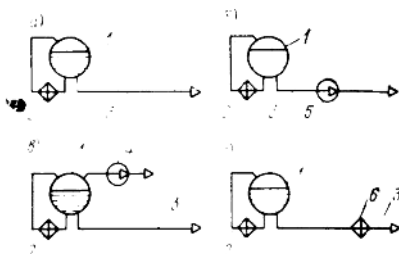
有时当为用户容器加注后,尚要求系统在一定的时间内保持容器内的液面和温度。为此系统内就必须增设一个循环回路,这

图 1.1 低温系统供应液体(a-

b)和气体(r)产品的系统原理图

a, r—在贮存温度下挤压; b—在贮存温度下泵压; r—挤预先冷却过的产品。

1—容器; 2—保持容器压力的汽化器; 3—供应管线; 4—容器汽腔抽气装置; 5—泵; 6—供应产品的汽化器。



样问题就可用最简单的办法得到解决。图 1.2 中表示了几种加注后进行循环以稳定液位和温度的方案。这些流程可以是封闭的(图 1.2a),也可以是开式的(图 1.2b),也可以是半封闭循环式的(图 1.2b)。

封闭循环流程中使用泵压,所以它可以准确地保持加注后容器中的需要参数。开式的和半封闭循环回路的流程中使用挤压法供应液体。这些流程中,在加注结束后均存在着加满了的容器和排空了的容器,使液体可以从一个容器挤入另一个容器。在半封闭循环回路流程中还使用了流体引射泵,加压的引射流是从加满的容器中流出。与开式循环回路的流程一样,参数稳定的时间受容器中液体贮量的限制,但是因为进入和消耗的量很小,所以参数稳定还是可延续很长时间的。火箭空间系统中箭上容器的加注,飞机、轮船、公路和铁路槽车上容器的加注,组合件试验用容器的加注,产品储备容器、天然气分配站和用户需求量波动时调节补偿用的容器,其加注方法均按照图 1.1 和 1.2 的流程原理进行系统设计。

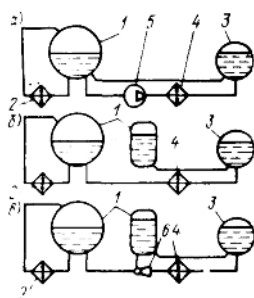


图 1.2 贮存、输送液体产品并在用户容器中进行参数稳定的原理流程图

a—有全封闭循环回路；b—带开式循环回路；c—带半封闭回路。

1—贮罐；2—汽化器；3—用户容器；4—热交换器；5—机械泵；6—引射泵。

图 1.2 表示的流体产品供应系统同时也是另外一种液体供应系统—恒温系统的不同形式。

为了建立“冷宇宙”条件在热真空舱内使用的低温系统，氮致冷装置的液氮保护屏系统，实现不同的超导工程和装置（电磁铁、输电线路、变压器和发动机等）的氮系统均属于恒温系统。恒温的对象可直接浸泡在液体中或者在专门的管道中进行液体循环来保持对象的温度场。在管道中循环的流体可以保持为单相，或者部分汽化。满足液体的单相流状态将有效地提高恒温系统在热负荷变化时的恒温可靠性。

在恒温系统中，除了容器、管路、热交换装置、泵之外，还应包括致冷装置，借助它补偿进入循环液体中的热量。在稳定的工作状态下，使用致冷装置可以利用排出蒸气的冷量。在类似的系统中使用致冷装置的另一优点是可以减少工质由于排入大气而带来的损失。这样就提高了系统的自主性，降低了运行的消耗。液氮恒温系统，由于液氮、气氮相对廉价，所以常为开式循环（蒸气排入大气），只部分地利用排出蒸气的冷量。在开始填加液氮并补偿冷却损失时，液氮来自大型高效的空分装置。由于氮气价格昂贵，而且液化能耗很大，氮恒温系统通常使用致冷装置形成封闭循环回路。开始时填加气氮，在回路中，由于液化一致冷装置的作用，液氮逐渐积累起来。图 1.3 是含液化—制冷器的低温恒温系统原理图。由于循环回路方式不同，系统可分为单回路的和双回路的。在双循环回

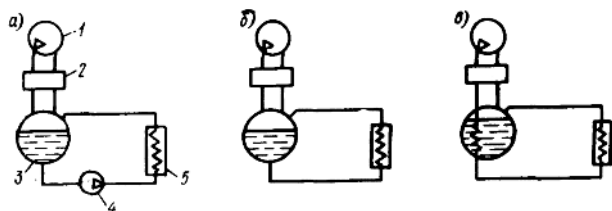


图 1.3 恒温循环系统的原理图 a—利用泵; 6—自然循环回路; b—利用压缩机。1—压缩机; 2—致冷装置; 3—积存容器; 4—泵; 5—恒温对象。

路中,液体流经恒温对象借助于泵(图 1.3a)或借助于上升、下降管路中工质密度差的对流作用(图 1.3b)。在单回路中,循环依靠制冷装置中压缩机的工作(图 1.3b)来实现。使用压缩机作为工质的流量激发器仅适用于液氮系统。在使用高效的液化—制冷恒温系统中,必须严格地使循环回路的放热量与制冷量相适应。在负荷波动的情况下,装置的有效性急剧下降。所以,使用图 1.3 中所示的流程时是受到限制的。工业规模的氮装置广泛使用双回路循环流程,见图 1.4。用这种流程很容易解决一系列实际问题:通过正向流流量的变化和对制冷机罐内补给液体来满足制冷量大范围的变化,用简单流程和液体贮备提高工作可靠性,实现主要工况的自动化,并获得足够高的热力学指标—在 4.5K 下每传入 1W 热量补偿功率消耗为 400—500W。在类似的系统中都含有液化器,制冷装置和液体贮存容器。恒温的实现靠制冷装置之压缩泵驱动液体(或两相流)循环,或者依靠向上,向下管路中受热和未受热的工质密度差驱动循环。

恒温循环回路所需的液氮由制冷装置提供,制冷装置为带终端膨胀机或者为简单节流膨胀的循环。为了提高制冷装置的效率,从液化装置的回路中向制冷机的收集器中输送一定量的液氮。若把制冷机中的逆向流相对正向流增大一点(在 4—10% 的范围内)则制冷循环的效率急剧增长[57]。当然负荷变化时,正向、反向流