

优质低温能源—液化天然气（一）

田 砚

陈隆智

（四平师范学院物理系） （兰州物理研究所）

内容提要：液化天然气是一种优质的低温能源。为天然气的贮存和应用提供了方便。国外的液化天然气的海运业务在70年代开始兴旺。从一个方面缓解了发达国家对能源的需求。这是有关液化天然气系列介绍的第一部分。重点介绍了资源状况、特点、发展概况和洲际联运。对国外情况进行了分析。并针对海运和陆运的特点阐述了一些共性的方面。

主题词：液化天然气、低温、能源、贮运。

天然气系产生于地表面之下的低分子量的键烷烃的可燃性气体混合物。主要含有甲烷、乙烷及少量的丙烷和丁烷。另外，还含有较高的烃，有时还含有少量的氮、二氧化碳、硫化氢和氦。

液化天然气是用天然气降温加压形成的液态产物。可以进行远程运输和贮存。

能源危机以后，世界各国在寻求新的能源的过程中，十分重视天然气资源的利用及天然气的液化工作。液化天然气的温度约为113K。天然气的液化及液化天然气的贮存和运输是70年代低温工程发展史中的一件大事。

一、资源

在世界的能源结构中，1929年，天然气仅占4.2%；1960年占16.4%；1970年已占22%^[1]。到80年代末期已接近30%。

1976年底，世界天然气储量为64.5万亿立方米。以原苏联最多（25.7万亿立方米），占40%。其次是伊朗、美国、阿尔及利亚、沙特阿拉伯、荷兰、加拿大、尼日利亚、委内瑞拉。

我国的天然气资源不太丰富。过去，主要产区在四川。其用途主要作为燃料。四川自贡、威远所产的天然气现在已由管道运输方式送到包括成都、重庆在内的许多城市作为家庭燃料使用。近年来，在陕甘宁地区发现了大型天然气气田，初步探明的储量达800亿立方米。为我国天然气资源的开发和液化天然气工业的发展创造了必要的前提条件。

在较长的时间之内，人们最关心的是天然气中的氮的含量。因为氮和液氮在低温领域中的应用量极大。天然气的组分含量变化很大，按其类型可分为两类。一类为主要含甲烷气的天然气；另一类为主要含氮的天然气。表1为4类天然气的组成^[2]。

美苏两国的天然气资源接近表1所列的后两类，氮的含量较大。中东产油国家的天然气资源接近表1所列的前两类。即便产地相隔甚近，氮的含量相差也很大。例如，我国四川威远的天然气资源中氮的含量就多于四川自贡的天然气。从表1可知，天然气中常有氮气。含量虽然不高，但比空气中的含氮量多得多。

表 1

组 分	天然气(1)	天然气(2)	天然气(3)	天然气(4)
CH_4	94.7	72.94	14.85	56.85
C_2H_6 及高碳氢化合物	2.8	18.96	—	10.33
CO_2	0.2	0.39	—	0.25
O_2	—	—	—	0.54
N_2	2.3	7.71	82.7	31.13
He	—	—	1.87	0.9

二、液化天然气的特点^[3]

天然气开发的最终目的在于应用。现在利用的方法不外乎三种：一种是分离并利用甲烷作为燃料和发电的原料（含氮量多的天然气则还要回收氮气资源）。这种方法已在中东各产油国实施；一种是用管道向国内外送气；再一种就是出口液化天然气。

液化天然气为何引起人们的关注呢？主要特点是所占的空间很小，便于运输和贮存。它的体积为当量气体体积的 $1/600$ ，液化温度为 $113K$ 。密度为 $0.4\sim 0.5$ 。由于温度较低，为减少蒸发损耗必须有良好的隔热措施。在低温隔热条件不具备时，可以采用压缩天然气管道式运输方法。

作为燃料使用时，液化天然气的优点是不污染环境，是一种理想的优质能源。与煤相比较，它的运输方便（船运、车运、海运、管道式运送等）。由于温度较低，再气化时又为人们提供了一个冷源。可以用于冷冻食品、海水淡化。也可以作为空分装置的预冷冷源。

所存在的缺点是液化装置较为复杂，一次性投资费用较大。产量受气源的日供应量和季节性等因素所制约。在管道煤气不足或不能使用的地区，液化天然气（天然气）可以用来补偿燃料的不足。作为交通工具的燃料来说，液化天然气主要用于轮船、油船或液化天然气贮运船。

三、发展概况^[4,5]

1937年，国外首次提出液化并贮存甲烷的设想。夏季把甲烷气与煤制气分开，冬季把贮存的甲烷重新气化予以使用。1941年，美国俄亥俄州建成第一个液化天然气厂。4个贮罐的总容量为500t。1944年10月，一场灾难性的事故使这个工厂付之一炬，4个贮罐爆裂燃烧，128人丧生。经济损失在600万美元以上。事故原因的调查表明：贮罐材料的选择是防止事故发生的关键所在。

50年代开始，出现运送液化天然气的海运船。70年代初期，已有不少容量为 $71500m^3$ 的贮运船。70年代末期，已建成 $200000m^3$ （ $145000t$ ）的大型贮运船。80年代末期，容量为 $125000m^3$ 的大型液化天然气贮运船的数量已接近100艘。按照近30年的发展速度来看，每隔10年，贮运船的数量就要翻一翻。70年代初期，容量为 $125000m^3$ 的液化天然气贮运船的造价每艘约为3700万美元。

阿尔及利亚从1964年开始大规模出口天然气。还引进液化技术，大量出口液化天然气。中东各产油国在控制石油输出和提高油价的同时，也重视液化天然气技术的引进。从70年代开始，英国开始建造液化天然气厂。到70年代中期已建成8个，贮量已达30万吨。大型液化

天然气贮存计划的实现为补偿临时性的能源短缺起到了重要作用。德国、荷兰也在这一时期建成大型液化天然气厂。荷兰的第一个大型液化天然气厂建于鹿特丹市市郊。80年代以前国外建成的15个大型液化天然气厂如表2所列。

表2 70年代建成的大型液化天然气厂

气源地	液化地	日需气量 ($0.028\text{m}^3/\text{天}$)	建成时间	设计公司名称	主要使用单位
北海气田	英国	1×10^8	1964	Sonatrach	英国气体公司
北海气田	法国	5×10^7	1965	Sonatrach	法国气体公司
西奈半岛	日本	1.4×10^8	1967	Phillips/ Marathon	东京气体公司
阿尔及利亚	法国	2.35×10^8	1972	ESSO	Snam 气体公司
阿尔及利亚	西班牙	1.1×10^8	1971	ESSO	西班牙天然气公司
文莱	日本	6.6×10^8	1972	Shell	东京气体公司等
中东	法国	3.5×10^8	1972	Sonatrach	法国气体公司
中东	美国	5×10^7	1972	Sonatrach	美国气体公司
中东	以色列	1×10^8	1974	Sonatrach	以色列气体公司
北海气田	美国	6.5×10^8	1977	Sonatrach	美哥伦比亚气体公司
北海气田	美国	3.5×10^8	1977	Sonatrach	美南方天然气公司
比利时	法国	1.3×10^9	1979	Sonatrach	法国气体公司
阿尔及利亚	西班牙	1.5×10^8	1974	Sonatrach	西班牙天然气公司
阿尔及利亚	安哥拉	6×10^8	1979	Sonatrach	安哥拉气体公司
阿尔及利亚	美国	1×10^9	1979	Sonatrach	美国气体公司

表2所列的工厂中大多采用了带透平膨胀机的流程。1976年以后建成的厂还采用了混合式制冷循环。80年代以来,随着压缩机和透平膨胀机性能的改进,液化天然气的价格才有所下降。流程的效率也有了较大的提高,冷损也大大减少。常用的4级循环过程是:串联、混合制冷、天然气膨胀、氮气膨胀。美国多采用混合式制冷、氮气膨胀流程。西欧各国却多采用开式或闭式混合制冷流程。其原因在于美国的大型液化天然气厂一般建于大中城市附近,可以常年获得所需的大量的低压气源,从而直接送入膨胀系统。在英国流行的也是混合式制冷循环。因为 $0.14 \sim 0.28 \times 10^9 \text{m}^3/\text{天}$ 只能适合于所用的离心式压缩机。混合式制冷装置的造价大大低于复杂的串联式装置。

进口气体后在当地液化的方法仍然满足不了发达国家对能源的需求。70年代,在建造大型液化天然气厂的同时,建造大型海上贮运船的行情看好。在这种形势下,各天然气出口国纷纷在自己的出口口岸建造液化天然气厂,直接经海上运输把液化天然气送到购买国所在的港口。输入国则在进口口岸建造大型贮罐和研制液化天然气槽车(或通过管路运到使用地)。液化天然气购销两旺的大好形势,大大推动了液化天然气工业的发展。

70年代初期投入海运的17艘大型液化天然气贮运船如表3所示。到1976年,就已增加到53艘。80年代末,已增加到100多艘。70年代初期,大型贮运船的容量就达到 71500m^3 。70年代末期,已建成容量为 200000m^3 的贮运船。

80年代末期,美国从各国进口的液化天然气的数量见表4。从1977年到1985年,日本从文莱、阿布扎比、伊朗、澳大利亚进口的液化天然气当量为 $0.84 \times 10^8 \text{m}^3/\text{天}$ 。

70年代初,美国在纽约附近的斯塔顿岛的岸边建造两个容量为 $1.26 \times 10^7 \text{m}^3$ 的液化天然

表 3

70年代初已投入海运的大型液化天然气贮运船

船 名	启运地—目的地	容量(m ³)	启用时间
先锋1号	英国自用	5123	1945(1958年改建)
包菲号	法国自用	25500	1943(1962年改建)
先锋2号	英国自用	27400	1964
进步号	英国自用	27400	1964
朱里斯·威姆号	北海气田—法国	25500	1965
毕达哥拉斯号	意大利自用	630	1966
ESSO伯列加号	阿尔及利亚—法国	40000	1969
ESSO波多维勒号	阿尔及利亚—意大利	40000	1969
ESSO里格利亚号	阿尔及利亚—西班牙	40000	1970
勒塔号	阿尔及利亚—法国	40000	1969
北阿拉斯加号	阿拉斯加—日本	71500	1969
笛卡儿号	阿尔及利亚—美国	50000	1971
Hassi R Mel号	阿尔及利亚—法国	40000	1972
Gadania号	文莱—日本	75000	1973
Gadila号	文莱—日本	75000	1973
Gari号	文莱—日本	75000	1973
Gastrana	文莱—日本	75000	1973

表 4

美国1990年从国外进口的液化天然气(当量天然气量)

出口国	进口海岸	数量(m ³ /天)	出口国	进口海岸	数量(m ³ /天)
阿尔及利亚	美国东海岸	1.42×10^8	澳大利亚	美国西海岸	0.28×10^8
委内瑞拉	美国东海岸	2.25×10^7	原苏联	美国东海岸	0.56×10^8
尼日利亚	美国东海岸	0.56×10^8	原苏联	美国西海岸	0.56×10^8
阿拉斯加	美国西海岸	3.36×10^7	委内瑞拉	美国东海岸	2.52×10^7
尼爪多尔	美国西海岸	0.14×10^7	伊朗	美国东海岸	0.28×10^8

气贮罐。容量为 $0.84 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的贮罐已有几十个。液化天然气的贮存方式不外乎有3种：双壁式金属贮罐、水泥贮罐、冷冻后的地坑。

双壁式金属贮罐是油罐和液氧贮罐的改进和发展。它是液化天然气工程中的一个大型设备。采用真空隔热或其它有效的隔热措施，以减少冷损。既可以装在地面上、山上，也可以埋于地层中。在这三种贮存方法中，第一种效果最好，第三种效果较差。贮罐系统中，有一套完整的输入和输出设备、安全阀、液面计。

由于原苏联占有全世界天然气储量的一半以上。东部(西伯利亚)天然气资源的开发和利用成为美、日两国最为关心的事情。因为资源得以保证，又可以节省运费。1974年在阿姆斯特丹的1974年国际气体技术会议上，美、日与原苏联代表共同拟定了把西伯利亚的天然气以管道方式运送到苏联东南部的出口港，就地液化后再运往美国和日本的大型计划。

早在1972年，*Ei Paso*天然气公司就对这项拟议中的计划表示关注。1973年，*Occidental*石油公司也提出了一整套方案，其中包括天然气的液化。另外还有两个公司愿意合作。1973年7月，原苏联和日本签署由美国公司进行施工的备忘录。1974年国际气体技术上，三

方聚会研究了计划的细节。作为第一步,原苏联西伯利亚雅库茨克气田的全面地质勘探工作需要1~2年。这项计划所要求获得的天然气气量为 10^{12}m^3 。对于储量达 $13\times 10^{12}\text{m}^3$ 的这个地区说来是不成问题的。在进行地质勘探的同时,需要从技术和经济角度制定出建造液化天然气厂的计划。

这个计划的一个重要部分是建造从雅库茨克到太平洋口岸(Olga)的输气管线。出口口岸既是一个深水港,又有可以停泊 $1.6\times 10^5\sim 2\times 10^5\text{m}^3$ 的液化天然气贮运船的海岸条件。输气管线全长4100km。输气管管径选用1220mm和1420mm两种,压力为75个大气压左右。所输送的高压天然气的温度为 -61°C 。输送管埋于地下。每隔270~300km建造压缩机站一个。在某些地区还需要补充建站。出口口岸的液化天然气厂的年液化能力为 $2\sim 2.1\times 10^9\text{m}^3$ 的天然气。初期要求每天液化 $6\sim 7\times 10^7\text{m}^3$ 的天然气(甲烷的含量达96%)。并建造钢和水泥的贮罐若干个,容量分别为 50000m^3 和 100000m^3 。这项计划已在70年代实现。

四、洲际联运⁵

70年代开始,液化天然气的洲际联运的兴旺景象预示着这种新型的优质能源的重要性已大大增加。虽然从数量上来说还无法与更为繁忙的运送石油的油轮相比拟,但从一个方面缓解了全球性的能源危机。海运液化天然气与陆上运输虽然有所不同,但其设计要求、隔热措施、安全措施等方面却是相同的。在发展液化天然气的海运业务之前,各个造船国提供了一笔国际性的基金,以确保海运比陆运更为经济。其次是从低温工程的角度出发,尽可能降低贮运船的造价。

最经济的方法是采用球罐形式贮存。保护温度略低于液化天然气的沸点,压力高于一个大气压。单个贮罐的压力容器采用自支承方式。支承的方法按贮运船的结构而定。贮罐也可采用圆柱式或三棱柱式。也可以用几个棱柱形的贮罐组装而成。外面的几个小贮罐则被用来保护盛液很多的大容器。根据贮运船的结构,压力容器也可以作成集装式。其集装的程度远远大于陆运。

1. 设计

液化天然气的海上运输可以分为船体和低温系统两个部分。船体由船身和传动装置(包括推进系统);低温部分由贮罐和隔热部分组成。

贮罐一般设计为有扶手的双层有底座的容器。为了防止船体与压力容器在贮运船万一发生碰撞或搁浅时可能发生的事故,这样的设计方式是必须的。同时也减少了贮罐下部和支承损坏的危险。为了保证航行的安全,贮运船上的贮罐周围有一定的贮水空间。因为液化天然气的密度较小($0.4\sim 0.5$),注水后可以使贮运船的质量保持一定的大小,航行时更加稳定和安全。在口岸输液或注液时,输送系统一定不能泄漏,如漏入隔热层之中,会大大影响隔热效果。

有的贮运船上设计有天然气再液化装置(小型),以回收气化的天然气。有的贮运船则把气化的天然气当作燃料用于贮运船的推进系统。图1所示的贮罐结构是一种国际通用的设计模式。为了保证安全,设计时必须详尽而仔细地考虑贮运船加速航行时所产生的内外负载、热负载和动力学负载。实验表明:当贮液只占贮罐容量的 $1/4$ (或更少时),在航行时贮液容易溢出。图1中的圆顶装置提供了必须的自由空间,主要用来贮存蒸发的气体,也可以防止贮液返流入注入管。也用来回收气化的天然气。

贮罐首次使用或已是空罐时,应先充入惰性气体或干燥的氮气。贮罐周围的管路也要充入干燥的氮气。有时还要有反复多次。使用前严格进行检漏。正常输液时停止充气。为了防止低温的液化天然气直接冲击罐壁,专门设计有喷射式注入系统。注入时既可自动也可以手动。报警装置用来防止意外事故的发生。蜂鸣器声响时立刻停止输入或采取排放及防火措施。

常用的贮罐结构如图2至图4所示。

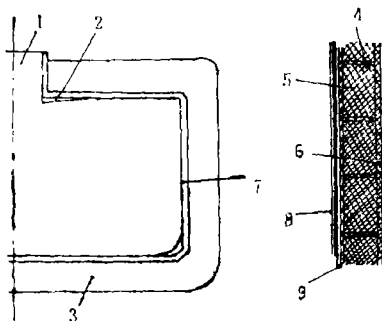


图1 桥式半独立贮罐系统

1—圆顶； 2—顶部支承； 3—水箱；
4—胶合板结构； 5—硬泡沫； 6—船内壁钢； 7—隔热层； 8—贮罐内壁；
9—第二层胶合板

2. 材料

液化天然气贮运船与油轮的最大区别就是低温条件。与贮罐相联结的所有管道或系统都必须耐 -160°C 左右的低温。船身通常选用各种型号的中碳钢。优质中碳钢只用于某些特殊的部位。一般来说, 0°C 的海水、 5°C 的气温为洲际海运的液化天然气船所能接受的最低温度。进入寒冷地区的贮运船的材料更应严格进行选择(例如,阿拉斯加地区,冬季气温低达 -50°C ,贮运船的选材和结构都有特殊的要求,造价也更高)。

贮罐所用的材料有:铝合金、9%镍钢、不锈钢或Invar钢(膨胀系数很低的36%镍钢)。80年代以来,也出现了以玻璃钢制成的贮罐。由于优质的低温材料较多,材料的选择在考虑到经济性时应满足一些基本的要求:(1)与液化天然气温度的相容性;(2)材料的承重和承压能力。必须能够承受液化天然气静重所产生的一切应力;(3)能够适应温度的迅速变化;(4)能够承受贮运船航行时产生的振动及一切因综合因素而产生的力;(5)材料的加工性能、焊接性能良好。显然,对陆运来说,这些要求也是必须具备的。考虑到洲

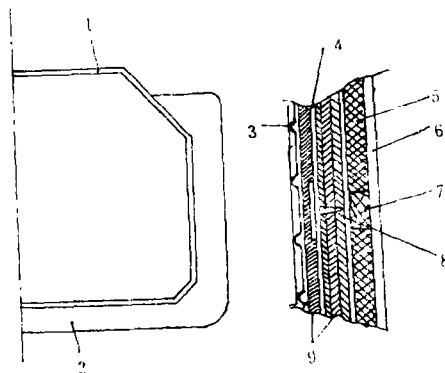


图2 液化天然气海运贮罐结构之二

1—隔热； 2—水箱； 3—焊点； 4—胶合板； 5—矿物棉； 6—船内壁钢板； 7—木底； 8—焊点； 9—软木

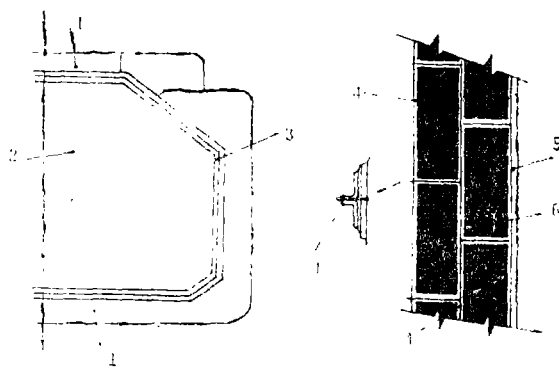


图3 液化天然气海运贮罐结构之三

1—水箱； 2—贮液罐； 3—隔热；
4—焊点； 5—钢板； 6—珠光砂

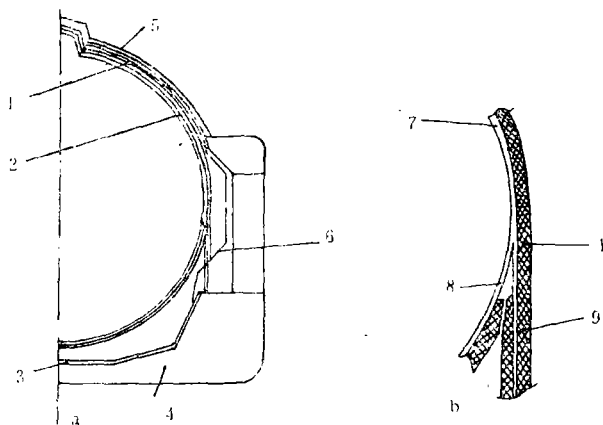


图4 液化天然气海运贮罐结构之四

(a.注入系统; b.球罐的边部附件)

- 1—隔热; 2—内壁; 3—注液管; 4—水箱;
5—圆顶; 6—喷射系统; 7—上壳; 8—下壳;
9—支承

际运输时间的漫长性, 贮运船上应有备用贮罐。万一某个贮罐发生泄漏, 可迅速把贮液转移到备用罐中。

3. 隔热

合适的隔热系统对于液化天然气的贮存是特别重要的。对于内壁来说, 已成功地选用了多种隔热方法。有些贮罐选用软木结构作为静支承。软木已用于许多采用玻璃纤维、聚氨酯泡沫、矿物棉隔热的液化天然气贮罐的设计中。

胶木箱壁中涂有珠光砂或珠光粉, 厚度为200~300mm。

80年代以来, 隔热性能优良的聚氨酯泡沫在液化天然气贮罐的隔热系统中的用量不断增多。许多用于超低温系统的隔热方法也在不大幅度增加成本的条件下向这方面转移。总的说来, 由于液化天然气的温度大大高于液氮、液氢、液氧和液氮, 隔热系统的设计相对而言要容易得多。

4. 安全措施

液化天然气的注入、运送和排放都必须有防燃性良好的安全措施。还有一套合适的管路系统、设备、仪器和报警装置。在通常情况下, 各国的用户都迫切要求洲际联运时有一整套完整而详尽的安全措施。但各造船厂会有各自的特殊的规定, 难以强求统一。贮罐的抽吸装置应当配备齐全, 有一定的使用期限。有些用户还在贮罐上再装一个备用泵, 以便在另一抽吸泵发生故障时使用。抽吸泵一般设计为可拆卸性, 便于维修和更换。在口岸注入液化天然气时, 输液管路中应装上减压器, 使用前严格进行检漏试验。贮罐内至少要留下2%的自由空间。

5. 蒸发损耗

在洲际联运过程中, 液化天然气的损耗量将会大于总贮量的2%。蒸发后的天然气可以作为主推进器的燃料加以利用。蒸发后的天然气也可以放空, 这是极不经济的。有的国家也不允许放空, 因为会污染环境。现在, 国际上规定的蒸发损耗率为不高于2%, 另外还规定到达运送口岸后, 贮罐内的液化天然气不能全部放空。必须保留5%。因此, 实际交付的货量为总容量的93%。为了使用户按合同要求尽快收货。当蒸发损耗率可能大于2%时, 应利用船上的再液化装置把回收的天然气液化再注入贮罐中。因此, 贮运船上还有适量的液氮, 以便用来再液化天然气。

在调研这个课题的过程中参阅了同春、雷雯两同志的部分译文, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 方开炳 顾镜清, 70年代世界工业技术。上海: 上海科学技术出版社, 1979: 20
- 2 施亚钧, 气体的分离。上海: 上海科技卫生出版社, 1959: 288

低温泵在热工工艺中的应用

涂祖顺 摘译

内容提要: 介绍了低温泵在热工工艺中的应用情况。即低温泵在小型真空炉和大型真空炉中的应用。引人注目的是低温泵的应用范围已涉及到温度高于1500K的领域。说明了设计技术条件、热负载的处理、热负载的计算方法、抽速和流导。简介了在真空炉中的具体应用。

主题词: 低温泵、真空炉、工艺、设计。

真空专业的工程师可能还未认识到在温度高达1500K以上的许多场合也可多方择用低温泵。本文拟评述这些低温泵的优缺点。

真空工程师也许会问,一台通常工作温度低于77K的低温泵怎能在作业温度很高的热真空室中使用呢?本文拟讨论的正是低温泵在负荷区常见温度高达1500K以上的真空炉中的应用,及其在真空炉和其它高温真空室两种工况下使用的优缺点。

列为典型高温系统用户的真空炉工业可划为两个市场块,头块是小型真空炉(其负载区小于宽0.61m×高0.457m×长0.914m);另一块为大型真空炉。

小型真空炉主要用于航天、科研设计及医药仪器工业。而多数这类工艺的关键在于污染的控制。

多数真空炉用户会疑问:低温泵靠在低温下冷凝气体分子来获得真空是否与其高温应用不矛盾呢?其实在炉荷区温达1500K的最糟情形,与真空室直联的低温泵也不会承受到高过600K温度的。那是因为在真空管道和电阻式加热器间装有隔热外层(钼、304不锈钢、陶瓷或石墨)之故。多数情形,低温泵可装个90°弯头,以避免与真空室直通,这就进一步减少了传给泵的热负载。

一、设计技术条件

真空炉可用不同方式建造。例如,一台不贵的生产炉可用石墨作隔热体来制造。而航天工业典型使用的全金属系统则用合金作隔热体。这比石墨贵些,但明显清洁多了。

真空工程师在设计大型真空炉用低温泵系统时,应着重考虑以下几个方面:

- 1) 作用在低温泵上的过量热负载;
- 2) 低温泵第二级装置的潜在油污物;
- 3) 由于使用丙烯粘合剂,可能会潜放出大量水份,进而分解成氢气和氧气。

利用隔板或一些90°弯头或普通弯头可控制过量热负载,如何选用,在本文后部会详细讨论。这种解决措施的唯一不足是降低了真空室冷泵的有效抽速。

-
- 3 Graham E B, LNG—A review of developments. Cryogenics, 1973; 8: 453—456
 - 4 Birmingham B W et al. Cryogenics and the energycrisis. Cryogenics, 1975; 3: 115~117
 - 5 Nilson J J, An introduction to the marine trans Portation of bulk LNG and the design of LNG Carriers. Cryogenics, 1974; 3: 115~120