

液化天然气的运输方式及其特点

徐孝轩* 陈维平

余金怀

(中国石油大学(北京))

(中石化清江石油化工有限责任公司)

徐孝轩 陈维平等:液化天然气的运输方式及其特点,油气储运,2006,25(3)6~11。

摘 要 从液化天然气产业供应链的角度讨论了液化天然气的管道输送、公路罐车运输和海上液化天然气船舶运输的技术特点,首次提出了液化天然气管道密相输送工艺技术及其经济可行性。分析了液化天然气公路运输链中液化、储存、运输、再气化等环节的关键技术,以及国内外海上液化天然气运输链各个环节的技术特点。针对中国液化天然气工业的发展现状,指出中国液化天然气工业发展的前提是建立完善的能源政策。随着广东、福建等东部沿海地区液化天然气项目的逐步发展,中国液化天然气工业发展前景广阔。

主题词 液化天然气 运输 方式

一、全球液化天然气贸易现状

液化天然气在运输、储存及调峰方面具有独特的优越性,近年来,世界液化天然气工业发展迅猛,液化天然气已成为世界上贸易量增长最快的一次能源。据 BP 公司 2002 年的统计数据,世界液化天然气总贸易量已从 1964 年的 8×10^4 t 上升到 2001 年的 10.359×10^8 t,年均增长率高达 22%。过去 10 年间,全球液化天然气贸易量增长了 80%。2002 年全球共销售液化天然气 1.24×10^8 t,全球液化天然气的市场规模为 250×10^8 美元。2002 年

液化天然气占全球天然气消费量的 6%,占国际天然气贸易量的 26%。预计到 2007 年,液化天然气在天然气市场的份额将上升到 9.5%^[1]。

目前,印度尼西亚是全球最大的液化天然气出口国,占世界液化天然气出口总量的 26%,日本则是世界最大的液化天然气进口国,其液化天然气进口量超过 720×10^8 m³/a,占世界液化天然气进口总量的 53%。中东和非洲的液化天然气出口份额也在不断增长,亚洲则是液化天然气主要进口地区(见表 1)。随着我国能源战略的调整,东南沿海液化天然气项目的不断建设,我国液化天然气工业将得到较快的发展。

23, Tronconi E : Prediction of slug frequency in horizontal two phase slug flow, ALChEJ, 1990(36).

24, Aziz K et al: Intermittent two phase flow in horizontal pipes-predictive models, Can, J. Chem. Eng.,1978(56).

25, Taitel Y, Barnea D and Brill J P: Stratified three phase flow in pipes, Int. J, Multiphase flow,1995(21).

26, 张西民 郭烈锦等:水平圆管内油气水三相摩擦阻力的模型与结构关系式,西安交通大学学报,1999,33(1)。

27, 张西民 郭烈锦等:水平圆管内油气水三相流摩擦阻力模型与结构关系式,西安交通大学学报,1999,33(3)。

28, 章龙江:油气水三相管流流型及水力计算方法研究,石油大学

博士论文,2000。

29, 刘 磊 周芳德:油气水三相流中的复杂相态及压力降的研究,工程热物理学报,2001,22(6)。

30, Bonizzi M, Issa R I: On the simulation of three-phase slug flow in nearly horizontal pipes using the multi-fluid model, Int. J, Multiphase flow, 2003(26)。

32, Odozi U A: Three-phase gas/liquid/liquid slug flow, PhD Thesis, Imperial College, London, U K.

(收稿日期:2005-04-13)

编辑:刘春阳

表 1 进口液化天然气国家和地区的需求量预测

| 时间 | 各进口国家和地区对液化天然气的需求量 ⁽²⁾ | | |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|
| | (10 ⁴ t) | | |
| | 日本 | 韩国 | 中国台湾 |
| 1995 年 | 4 300 | 600 | 2 000 |
| 2000 年 | 5 400 | 1 300 | 600 |
| 2005 年 | 5 900 | 1 800 | 800 |
| 2010 年 | 6 400 | 2 400 | 1 200 |

液化天然气产业链是一个资金庞大、技术密集、完整链系,包括上游天然气的开采、液化、储存、运输和装卸、液化天然气再气化、销售等环节,产业链中任何一个环节的断裂都将导致其他主要环节的连锁反应(见图 1)。

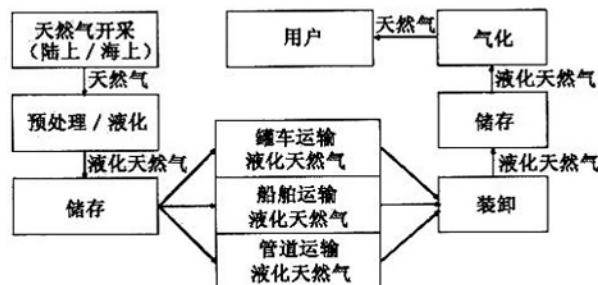


图 1 液化天然气产业链原理流程

液化天然气运输是液化天然气产业链中重要的一环,是连接上下游之间的纽带。以下着重对管道、罐车和船舶 3 种运输液化天然气方式的特点及其存在的技术难点进行了系统分析,旨在为我国液化天然气产业的发展提供借鉴。

二、液化天然气的管道输送

管输液化天然气多用于城市调峰装置和油轮装卸设施,由于管道低温输送技术存在一定的困难,目前尚无采用低温管道长距离输送液化天然气的实例。为此,必须加快研发并提高液化天然气管道运输技术的步伐,以适应当前液化天然气工业迅猛发展的迫切需求。

1、液化天然气密相输送工艺

液化天然气作为液体产品进行长距离管道输送,其输送技术与原油加热输送工艺类似,管道沿线

需要建设液化天然气加压泵站和冷却站。

进入管道的是饱和和液化天然气液体,由于管道沿线温度的影响,液化天然气易受热,其中一部分会被气化,使管道内形成两相流动,这不仅增大了沿线阻力,而且还会产生气体段塞流动现象,严重影响管道的输送能力和安全运行。因此,对于低温液体输送管道,特别是长距离管道,要防止液体气化,就必须实现液体单相流动。而防止液化天然气气化的方法需要采用密相输送工艺,即将管道的操作压力控制在临界冷凝压力之上,管道内流体温度控制在临界冷凝温度之下,使得管道运行工况位于液相密相区(见图 2)。

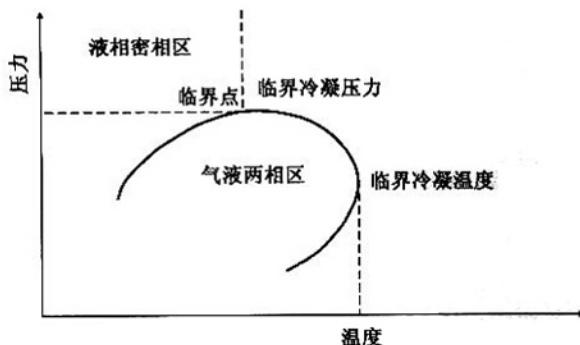


图 2 典型的天然气相包线图

此外,为降低因流动摩擦和过泵剪切引起的液化天然气温度升高,长距离液化天然气输送管道除建设加压站之外,还需要每隔一定距离设冷却站,并且使加压站和冷却站建在一起,即所谓的冷泵站,以便于施工和管理。随着低温材料和设备技术的发展,液化天然气长距离管道输送在技术上是可行的。

2、管输液化天然气经济分析

液化天然气的体积是其气态时体积的 1/600,与输气管道比较,输送相同体积的天然气,液化天然气输送管径要小得多,可以节约钢材投资。此外,液化天然气泵站的费用要低于输气压缩机站的费用,液化天然气泵站能耗要比压气站低若干倍。然而,液化天然气输送管道要求在密相区运行,温度较低,必须采用性能良好的低温隔热材料,价格昂贵,同时,管道降温需增建中间冷却站。这些因素会使得液化天然气输送管道的初期投资费用较高。

随着世界能源结构的调整,天然气占世界总能源的比例越来越大,天然气地区性贸易量也正逐年加大。液化天然气长距离管道的建设问题也越来越

受到重视。显然,输量的增加将有助于降低低温管道的投资费用和单位输量的运行管理费用,从而使得长距离管道输送液化天然气在经济上成为可能。

3、管输液化天然气技术难点

(1)管材的选择 如果要实现管道在低温“密相区”工况下运行,管道材质十分关键。管材必须选用性能良好的低温隔热材料,同时还应该考虑到管材的冷脆问题,因此,液化天然气管材一般选用9%和3.5%的镍钢^[3]。此外,管道焊接一般采用惰性气体保护焊,并需要进行焊缝检测。为了减少输送压降损失,管道内涂层技术仍需要开展研究。

(2)低温输送工艺 在管道输送液化天然气前,需要将管道温度从环境温度冷却到工作温度,即所谓的管道预冷过程。在预冷过程中,为使管道保冷层和周围土壤降温,需要蒸发掉一定量的液化天然气,且经过相当长的时间才能达到热稳定工况。

液化天然气管道停输期间,由于周围环境热量的作用,管内液化天然气温度升高而达到饱和状态,甚至进一步气化而使管内压力急剧升高,因此要在进出站处设置安全阀,与放空罐相连,以将管道压力控制在安全极限内。此外,液化天然气管道的在线检测和自动控制等方面还需要进一步研究。

(3)冷能再利用 将天然气液化(冷冻到 -162°C)需要大量的能量,该能量通常被称作液化天然气冷能。目前广东省正在建设第一个 $300\times 10^4\text{ t/a}$ 的液化天然气接收终端,并已经开始建造6座天然气发电厂,现有的燃油电厂将变为燃气电厂。液化天然气冷能在电厂中的利用系统^[4]见图3。经长输管道输入的液化天然气必须经过再气化后才能被用户使用。由于液化天然气有可观的冷能储备,回收利用这部分冷能可以有效提高能量的利用率。因此,在液化天然气长输管道项目的规划建设应进行综合考虑。

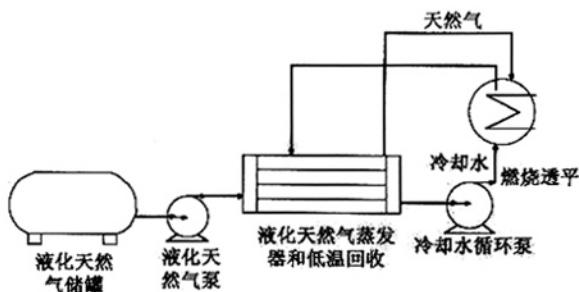


图3 液化天然气冷能在电厂中的利用系统

4、我国液化天然气管道输送现状

天然气管道建设将是中国管道建设的热点。继西气东输管道之后,中国将启动“俄气南送”工程,为了解决上海、广州等大型城市用气的季节性不平衡性问题,还将在城市附近建立大型的低温储气库。此外,为了改善我国东南沿海地区经济增长迅速而缺乏能源的状况,经国家批准,广东珠江三角洲地区将首先引进国外液化天然气资源,作为液化天然气项目的试点,该管道由一条主干线及两条支线组成,全长327 km,主干线由深圳至广东,预计2005年完工。液化天然气管道的建设将有力地拉动相关产业的发展,保证城市天然气市场的快速增长。

目前,国内液化天然气管道输送技术尚处于起步阶段,国外也无成熟的实践经验,因此需要加强对液化天然气管道输送技术,特别是在管材、低温输送工艺、低温管道施工、自动控制和检测技术及设备方面的研究工作。

三、液化天然气的公路运输

1、液化天然气公路运输供应链

采用液化天然气形式供应天然气的过程称为液化天然气供应链。公路液化天然气供应链主要包括天然气液化、液化天然气储存和运输、液化天然气再气化等环节。液化天然气再气化的目的是将液化天然气重新转化为气态,以便终端用户使用,再气化过程在专用蒸发器中进行。

(1)天然气液化厂(站) 根据液化的目的,天然气液化厂(站)通常分为基本负荷型和调峰型两种。基本负荷型液化厂的任务是将天然气以液态形式运输到消费地,其特点是全年连续运行且产量比较均衡。目前,中原、吉林、长庆、江苏、浦东、深圳等地已建成或在建天然气液化站。这些天然气液化站均包括天然气预处理、液化、储存等几个主要部分。调峰型液化厂的任务是为天然气供气系统提供一种储气调峰方式。对于一些城市,由于民用气冬用多,夏用少,或者因用气的化工厂检修及液化天然气厂的技术改造,甚至是输气管网发生故障等,都会造成定期或不定期的供气不平衡,而建设调峰型液化厂就能起到削峰填谷的作用。在经济上,调峰型液化厂比地面高压储气罐和地下储气库建设更节省土地、资

金,而且方便、灵活,不受地质条件限制。据统计,美国、日本、欧洲已建成投产 100 多座液化天然气调峰型液化厂。

(2) 液化天然气储存 储存液化天然气通常采用低温常压方式,储存温度在 -161°C 以下,压力一般不超过 0.03 MPa 。液化天然气储罐属低温常压大型储罐,分为地上金属罐、地上金属/混凝土罐、地下罐 3 类,大型液化天然气储罐的日蒸发率一般在 $0.04\% \sim 0.1\%$ 之间。储罐内壁与液化天然气直接接触,一般为含镍 9% 的低合金钢,也可为全铝、不锈钢薄膜或预应力混凝土,外壁为碳钢或预应力混凝土。液化天然气储罐有单容(封闭)罐、双容(封闭)罐以及全容(封闭)罐 3 种类型,此外,球形储罐也是液化天然气有效的储存方式。据统计,6 座储量为 1 MPa 的 $1\ 000\text{ m}^3$ 天然气球罐比 1 座储量相当 0.5 MPa 的 100 m^3 液化天然气储罐的投资高出 80 倍以上^[5]。

(3) 液化天然气运输及其费用 低温液化天然气罐车是公路运输的主要设备。目前,我国已成功研制了液化天然气低温运输设备。液化天然气储罐有立式和卧式两种结构,主要采用堆积绝热和真空粉末绝热两种绝热方式,储罐容积分别为 30 m^3 、 100 m^3 、 150 m^3 和 700 m^3 (组合)不等。目前,液化天然气罐车有 30 m^3 、 40 m^3 和 45 m^3 等几种规格^[5]。国外液化天然气罐车容积约为 90 m^3 。

液化天然气罐车运输费用一般包括天然气罐车成本折旧、驾驶员工资、燃料费用等,通常按照单位里程费用进行估计。美国加州能源委员会报告^[6]中指出,容积为 90 m^3 液化天然气罐车的单程运输费用为 $1.50 \sim 3.0$ 美元,与具有稳定用户源的长距离罐车输送相比,短途或者零星液化天然气罐车运费有所增加。按照这一运费进行估算,罐车运送 90 m^3 液化天然气 322 km 的运费为 2.50 美元/km。

(4) 液化天然气供气站 供气站是液化天然气应用点的供应站,非常适合于用气量大,又缺乏天然气源的地区。例如,山东淄博因陶瓷工业等要消耗大量的燃料,建设了液化天然气供应站,第一期有 100 m^3 储罐 14 台,第二期要扩大。上海浦东的东海液化天然气调峰站的液化天然气储量为 $2 \times 10^4\text{ m}^3$ 。另外,山东潍坊还要建 800 m^3 的供气站。目前国内的液化天然气供气站只有山东淄博、上海、深圳、北

京等处在建设,处于起步阶段。此外,山东的潍坊、青岛、烟台、济南以及江苏、浙江、广东、西安等地也在筹建中,今后几年,我国的液化天然气市场将逐渐扩大。

2、液化天然气储存技术

(1) 绝热技术 液化天然气在运输过程中一般采用无损储存,容器由内胆、外壳、绝热层和支承构件组成。漏热量是影响其性能的主要因素,因此低温储罐绝热结构的设计是非常关键的技术,直接决定了容器的性能。

储罐多以真空粉末绝热为主,但在液化天然气罐车中已开始使用高真空多层绝热,其绝热空间仅有 $30 \sim 35\text{ mm}$,比真空粉末绝热小 10 倍左右,而且绝热效果好。低温液体半挂车是目前国产容积最大的液化天然气半挂车,容积为 40 m^3 ,其日蒸发率低于 0.3% ,已达到国外同类产品水平,是多层绝热技术在大型液化天然气罐车上的首次应用^[7]。

(2) 安全技术 在液化天然气储运中,其安全性非常重要,应从储罐的布局、蒸汽压的控制、储罐及管路的惰化与钝化、分层的消除、储罐与罐车的预冷等环节上进行控制,并在流程与结构的设计中完善。

(3) 流程设计 因液化天然气是一种易燃易爆的低温液体,工艺流程中除了设置有充液、排液、压力液面检测等功能之外,还应当配备紧急截止阀、安全阀、放空阀、阻火器等设备。

3、我国液化天然气罐车运输现状

我国天然气资源往往远离能源消费市场,资源不能得到有效利用。输气管道的投资较大,适用于有稳定气源和稳定用户间的长期供气。而以液化天然气地面机动运输代替地下远距离管道输送,可以节省管道风险性建设投资,有效利用远海、荒漠地区的天然气资源。按目前液化天然气产量,用 40 m^3 (有效容积为 36 m^3) 的半挂罐车运输需 70 辆左右(按每车每天一次计)。2002 年,中原油田液化天然气产量增加到 $2\ 500\text{ m}^3/\text{d}$,需要增加同类型罐车 70 辆左右^[5]。

由于我国液化天然气应用开发时间较晚,从整个国家利用天然气资源、提高经济性来看,还与国际上存在差距。因此,今后应注重各种类型储存容器及其配套仪器仪表的研发,加强对液化天然气应用终端的开发研究。

四、液化天然气的海上运输

1、液化天然气海上运输的发展

20 世纪 50 年代初,随着天然气液化技术的发展,欧美开始研究液化天然气的海上运输技术。1959 年,用杂货船改装的“甲烷先锋号”从美国路易斯安那州的查尔斯湖向英国 Canvey 岛运送了 $5\,000\text{ m}^3$ 的液化天然气,这是世界上的第一次液化天然气海上运输。到 2000 年,世界上共有 25 条液化天然气运输航线,其中输量超过 $300 \times 10^4\text{ t/a}$ 的航线有 13 条,其总输量达到 $8\,000 \times 10^4\text{ t/a}$,占世界液化天然气运量的 82% 以上^[8]。

随着液化天然气海上运输技术的不断成熟,世界液化天然气的贸易量占世界天然气贸易量的比例呈逐年上升的趋势,1970 年为 6.5%,1980 年为 15.9%,1990 年为 23.4%,1998 年为 25.3%。2002 年世界液化天然气贸易增长率为 10.1%,达到 $1369 \times 10^8\text{ m}^3$,占国际天然气总贸易量的 26%,占全球天然气消费总量的 5.7%。

2、液化天然气海上运输特点

(1) 高风险 液化天然气的运输成本占液化天然气价格的 10% ~ 30%,原油的运输成本只占 10%。原因之一是液化天然气罐船需要低温绝热材料,建造费用昂贵。目前,运输能力为 $13.8 \times 10^4\text{ m}^3$ 的液化天然气运输船造价为 $1.5 \times 10^8 \sim 1.6 \times 10^8$ 美元,比同样输送当量的油船造价高出 4 ~ 5 倍。另外,由于此类船舶的用途单一,经营上又缺乏灵活性,使液化天然气船舶的投资风险比其他种类船舶更大,一般在进行投资之前都要求掌握长期运输合同(一般在 20 年以上)。

(2) 运输稳定 世界液化天然气运输大多为定向造船,包船运输,航线和港口比较固定,并要求较为准确的班期,非计划性停泊较少,运费收入比较稳定,一旦进入市场运费收入比较稳定,来自外界的竞争相对较小。

(3) 竞争有序 由于世界液化天然气运输的即期市场没有出现,因此其运费主要取决于气源地的天然气价格、运输距离以及船舶的营运成本等方面,一般不会出现市场竞争无序的情况。

3、液化天然气海上运输链

液化天然气海上运输链包括液化厂(站)、海上

运输和接收终端(再气化)3 个环节,由于这 3 个环节密切相连,相互影响,相互协同建设,同步投产,所以将其称为液化天然气海上运输链。

(1) 液化天然气运输船 随着液化天然气市场需求的进一步扩大,液化天然气船舶运输能力迅速扩大。根据 LNG Shipping Solutions^[1] 的统计,世界上正在运营的液化天然气运输船共有 151 艘,其中 15 艘船的运输能力低于 $5 \times 10^4\text{ m}^3$,16 艘船的运输能力在 $5 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4\text{ m}^3$ 之间,120 艘船的运输能力超过 $12 \times 10^4\text{ m}^3$ 。此外,在建的液化天然气运输船共有 55 艘,除其中 46 艘船的运输能力超过 $13.8 \times 10^4\text{ m}^3$ 外,有些正建船的运输能力已超过了 $25 \times 10^4\text{ m}^3$,但这一运输能力已经与现有的液化天然气终端不相匹配了。新建船只将使世界液化天然气的运输能力增加 44%,液化天然气输量从 2003 年 10 月的 $1\,740 \times 10^4\text{ m}^3$ 增加到 2006 年的 $2\,510 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

目前,世界上共有 8 家造船厂建造液化天然气运输船,其中 3 家在日本,3 家在韩国,两家在欧洲。印度、中国和波兰正在计划提高液化天然气运输船的造船能力。

现今,薄膜型船舶正在成为液化天然气船舶发展的主要方向。

(2) 世界液化天然气接收终端 液化天然气接收终端接收用船从基本负荷型天然气液化工厂运来的液化天然气,将其储存和再气化后分配给用户。接收终端的再气化能力很大,储罐容量也很大。主要由专用码头、卸货装置、液化天然气输送管道、液化天然气储罐、再气化装置及送气设备、气体计量和压力控制站、蒸发气体回收装置、控制及安全保护系统、维修保养系统等组成。

对于液化天然气进口国,需要建设液化天然气接收站,进行接收、储存和再气化液化天然气,再通过管网将计量后的液化天然气输至用户。目前世界上已经建成和包括在建的液化天然气接收站有 40 多个,液化天然气接收站的技术已相当成熟(见表 2)。

4、我国的液化天然气接收终端

我国东部沿海地区经济发达,但缺乏能源。为了解决经济发展和能源紧缺的矛盾,政府已决定在东南沿海地区适量引进液化天然气,在广州和福建分别建设液化天然气设施(见表 3)。

表 2 液化天然气接收终端统计结果^[9]

| 国家 | 接收终端 | 气化能力 (m^3/d) | 储备能力 (m^3) |
|------|------|-----------------------------------|--------------------------|
| 日本 | 23 | 629 000 | 12 946 000 |
| 韩国 | 2 | 154 000 | 2 000 000 |
| 中国台湾 | 1 | 29 000 | 690 000 |
| 法国 | 2 | 53 000 | 510 000 |
| 西班牙 | 3 | 38 600 | 460 000 |
| 意大利 | 1 | 11 000 | 100 000 |
| 比利时 | 1 | 18 000 | 261 000 |
| 土耳其 | 1 | 16 000 | 255 000 |
| 希腊 | 1 | 12 000 | 130 000 |
| 美国 | 2 | 32 600 | 440 000 |
| 波多黎各 | 1 | 2 300 | 160 000 |

表 3 中国液化天然气基础设施的前景规划^[10]

| 项目 | 建设规模 (10^4t/a) | 储存能力 (10^4t/a) | 码头装卸量 (10^4t/a) |
|---------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 珠江三角洲一期 | 300 | 27 | 300 |
| 珠江三角洲二期 | 500 | 37 | 500 |
| 闽东南一期 | 200 | 24 | 200 |
| 长江三角洲一期 | 300 | 27 | 300 |

广东液化天然气接收终端及相关配套项目建设分两期进行。一期工程设置两座 $13.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储罐,二期再增加一座约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的储罐。接收站配备高压开架式海水气化器,并设高压浸没燃烧式气化器,作调峰和备用。一期液化天然气气化能力为 $1\ 200 \text{ m}^3/\text{h}$;二期液化天然气气化能力为 $2\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。同时,中国海洋石油总公司将与其合作伙伴在福建湄洲湾共同兴建中国第二个液化天然气接收终端。两个液化天然气终端项目的启动,有助于发展我国的天然气市场和清洁燃料的可靠供应。

中国台湾地区从 1990 年开始从印度尼西亚进口天然气,2000 年中国台湾自印度尼西亚和马来西亚进口的液化天然气为 $59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。中国台湾的液化天然气接收终端位于 Yungan,气化能力为 $2\ 800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,共有 6 座储罐,其中 3 座储罐的单罐容量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,另 3 座储罐的单罐容量为 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[11]。

五、结束语

随着国际石油价格的不断攀升,我国出现了成品油供应紧张的局面,这对我国能源战略的调整和改革提出了挑战。液化天然气作为一种清洁能源,有着广泛的市场前景。日本是世界上液化天然气进口大国,其过去几十年经济的飞速发展主要得益于液化天然气工业采取了“稳油兴气”的战略方案,即在保证石油稳定供应的同时,加速液化天然气工业(发电、化工)。它的发展经验可以为我国液化天然气工业发展提供借鉴。在我国的能源结构中,天然气的比重平均仅有 2.6% 左右,远远低于世界的平均水平。

随着我国东南沿海液化天然气项目建设的展开,必将对改善我国的能源消费结构、促进经济发展起到积极作用。国家应从不同方面(包括需求与供应、燃气定价和税收政策等)进行政策改革,同时需要在中央政府设置一个能源管理机构以协调各方利益。

参 考 文 献

- 1, 张 祁 吕连浮:世界液化天然气的发展及对我国的启示,国际石油经济,2004(12)。
- 2, 任继善:液化天然气(LNG)前景广阔,中国石化,2003(4)。
- 3, 梁光川 郑云萍等:液化天然气(LNG)长距离管道输送技术,天然气与石油,2003,21(2)。
- 4, 王育明:液化天然气的储存和气化工艺及其冷能利用,石油规划设计,2004,15(3)。
- 5, 徐 烈 李兆慈等:我国液化天然气(LNG)的陆地储存与运输,天然气工业,2002,22(3)。
- 6, Californian Energy Commission: Californian LNG transportation fuel supply and demand assessment, Consultant report, Jan. 2002.
- 7, 李兆慈 徐 烈等:液化天然气槽车贮槽绝热结构设计,天然气工业,2004,24(2)。
- 8, 张 勇:液化天然气(LNG)的海上运输,水运工程,2004。
- 9, David Roe: LNG Trade: A Review of Markets, Projects and Issues in the Changing World of LNG, SMI Publishing Co., London, 2001.
- 10, 程劲松 白兰君:世界液化天然气工业发展综述,2000,20(3)。
- 11, 石玉美 汪荣顺等:液化天然气接收终端,石油与天然气化工,2003,32(1)。

(收稿日期:2005-03-23)

编辑:刘春阳