

液化天然气的储存与运输技术现状分析

张盈盈, 李兆慈*, 丁杨, 仪记敏 张国飞

(中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室, 北京 102200)

摘要:液化天然气具有低温的特性,其储存和运输需要安全高效的配套技术。本文分析了目前液化天然气运输和存储技术的发展现状,并提出了中国液化天然气运输和储存技术存在的问题及发展方向。通过国内外先进技术的比较,对我国的液化天然气储运技术的发展进行了展望。

关键词:液化天然气, 运输, 储存, 技术进展

中图分类号: TE832

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)04-0004-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.04.002

Current situation of storage and transportation technology for liquefied natural gas (LNG)

ZHANG Ying-ying, LI Zhao-ci*, DING Yang, YI Ji-min, ZHANG Guo-fei

(National Engineering Laboratory for Pipeline Safety/Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: Liquefied Natural Gas (LNG) has low temperature characteristics. The safe and efficient techniques are needed to ensure the safe storage and transport of LNG. The recent development of LNG storage and transportation technologies is introduced. The challenges that we face up with are also discussed. The existing problems in the storage and transport of LNG are put forward. The development direction in the future is also suggested. Based on the analysis of the advanced LNG storage and transportation technologies at home and abroad, the development of LNG storage and transportation of China is proposed as well.

Key words: LNG; transportation; storage; present situation

近年来液化天然气(Liquefied natural gas, 简称 LNG)工业发展迅速, LNG 供应量稳步增加。经过美国能源部许可, 2014 年美国 20 个 LNG 出口项目获得批准。预计未来几年内 LNG 的供应将进一步增加。截至 2015 年上半年, 我国已建成 70 多座 LNG 液化厂和 9 座 LNG 接收站。LNG 工业链包括天然气预处理、液化、储存、运输、接收、再汽化、销售等环节。发展液化天然气的初衷是方便运输和降低天然气运输成本, 因此 LNG 的储存与运输在整个 LNG 工业链中占据非常重要的地位。

1 LNG 储存技术发展现状

天然气的大规模储存可采用地下储气库和 LNG 两种方式。有关数据表明, 地下储气库垫层气量大, 投资回收率低, 仅为天然气投资回收率的 85%, 而以 LNG 形式储存回收率高达 98%^[1]。我国现状是小型压力罐较多, 常压大型储罐较少, 无 LNG 储气库。

1.1 地下 LNG 储气库

相对于地上储气库来说, 地下储气库虽然在成本费用、环境保护等方面具有不可比拟的优势, 但是对于 LNG 来说, 液化温度为 -162°C , 储库的围岩在这种情况下将受到低温的影响, 造成岩体破碎, 导致 LNG 的大量泄漏和蒸发损失, 因此在稳定度较差的地下洞室储存 LNG 会很困难。到目前为止, 国外也仅有少部分用不锈钢保温层作为 LNG 的密封层地面储存槽来储存 LNG 的实例^[2]。阿尔及利亚阿尔泽的地下储气库利用冻土层地下洞穴来储存 LNG^[3], 仍然无法避免泄漏问题。

由于无法直接在岩洞中储存 LNG, 韩国通过对岩体冷却理论的深入研究^[4], 对使用隔热气密封砌系统地下岩洞储存 LNG 技术进行了探索研发。2001 年, 第一座衬砌水封 LNG 地下岩洞库在韩国大田试验成功, 其结果表明地上库和半地下库的运营成本远高于地下库。而目前我国在这一方面仍处于空白。

收稿日期: 2015-10-27

作者简介: 张盈盈(1992-), 女, 在读研究生, 研究方向为油气储运与液化天然气方向, 18810560027, 904391329@qq.com; 李兆慈(1971-), 男, 硕士生导师, 研究方向为油气储运与液化天然气技术, 通讯联系人, lizhaoci@cup.edu.cn。

1.2 地下 LNG 储罐

地下 LNG 储罐内壁及保温层与地上储罐基本相同,常用的储罐内壁材料主要为 9% 镍钢、不锈钢或铝合金,保温层材料为珍珠岩和硬质聚氨酯泡沫。外罐一般采用钢筋混凝土壁和预应力混凝土壁,上有碳钢拱顶,拱顶下有上覆玻璃纤维毡保冷层的铝质吊顶。地下 LNG 储罐具有占地少、安全性极高、储存液体不易溢出、抗震性能强、耐久性等特点。

日本为全球地下 LNG 储罐建造技术较为领先的国家^[5],由于该国天然气资源稀缺,故也是最大的 LNG 进口大国,有近 20 座储罐在役。日本东京燃气有限公司在横滨新建的 LNG 基地中,采用气浮工艺、空气支撑技术,同时通过储罐侧壁与筒底的刚性结合方式建造储罐,取得了良好的成效。目前,日本已建成了 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的地下 LNG 储罐,该容量已达到世界先进水平。地下储罐相对于地上储罐具有安全性高、土地利用率高等优势,我国在此领域并没有相应的研究成果。

1.3 地上 LNG 金属混凝土储罐

根据地上 LNG 金属混凝土储罐内壁材料的不同,通常分为预应力混凝土型储罐和薄膜型储罐两种。一般大型储罐都采用预应力混凝土型,外壳材料主要为预应力混凝土,内筒为低温的金属材料。薄膜型储罐内筒材料有殷瓦钢和不锈钢两种。

日本是全球建造大型 LNG 储罐最多的国家,其拥有的储罐数量占了全球 LNG 储罐的 62%。据报道,日本大阪煤气公司日前在建可储存 23 万 m^3 的 LNG 储罐。此外印尼、文莱和阿尔及利亚等 LNG 输出国以及英、法等 LNG 进口国均建有大量大型常压 LNG 低温储罐。韩国天然气公司建造了世界第一批最大的 $27 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 储罐。

与众多发达国家相比,我国 LNG 储罐大多为中小型压力罐,目前我国已经具备自主设计和建造大型 LNG 低温常压储罐的能力。我国东部沿海 10 余个 LNG 接收站的储罐容量全部为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[6]。我国目前最大储罐为中石油江苏液化天然气公司如东接收站的 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全容储罐。

2 LNG 运输技术发展现状

LNG 运输有着不同于天然气管道运输的巨大优势,特别是在跨洋运输方面^[7],主要采用 LNG 船运输。船运 LNG 成本较低,仅为天然气管道输送的 1/7 左右。船运 LNG 不仅能有效规避由于气源不

足铺设管道而引起的风险,而且天然气通过液化前的净化处理,含有的有害物质更少,更有利于环保。长距离的 LNG 运输可以采用船运和铁路运输,短途则可利用 LNG 槽车或罐箱运输,以及内河水运,其中槽车运输逐渐成为公认的相当可靠、成本最低的 LNG 物流运作模式。

2.1 槽车运输

槽车运输包括两种:公路运输和铁路槽车运输。研究表明,1 000 km 或更短的距离为公路运输的范围,超过 1 000 km 以上则选择铁路油罐车更为经济。

目前,国内相关技术已非常成熟,完全实现了国产化。对于单辆槽车来说,液化天然气水容积最大,已发展到 52.8 m^3 ,最大工作压力 0.7 MPa,最大充装天然气量 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,槽车行驶速度平均为 60 km/h。经跟车测量,运送中 LNG 槽车的储罐内压力基本稳定,紧急停车时压力会上升 0.02 MPa 左右,停车过程中安全阀无泄露,LNG 无损失。在安全性方面,许多 LNG 槽车在设计时为了提高罐容,将径向支撑结构放置在罐壁外,这虽然增大了罐内储存容积,但减小了储存容器的稳定程度,存在一定程度的安全隐患。

2.2 LNG 运输船

跨海航运是 LNG 国际远洋贸易采用的一种主要形式。现在生产 LNG 运输船的国家主要集中在亚洲。韩国大宇、三星以及日本三菱已成为世界主要 LNG 运输船制造商,但造船的核心技术被法国 GTT 等北欧公司垄断^[8]。目前 LNG 运输船的最大容量为 $26 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。作为世界第三大 LNG 船制造国,我国在 20 世纪 90 年代中期才开始进行 LNG 船的技术研发工作。2015 年 1 月我国建成目前第一艘具有完全自主知识产权且设计容量为 $17.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 船“大力水手号”。

LNG 船根据液货仓系统不同可分为独立型和薄膜型两种。目前独立 B 型和法国 GTT 公司开发的薄膜型占据整个市场^[9],薄壁型储罐主屏壁采用 36% 镍钢,次屏壁为 36% 镍钢或铝箔纤维,其蒸发率可以控制在 0.10 ~ 0.15% / d。由于薄膜型船的优秀性能,三星重工自主研发了在蒸发率和装载限制要求方面具有明显优势的 SCA 薄膜型 LNG 围护系统。由于我国政府在 LNG 进口项目的规划中明确规定,必须采用国内运输的 FOB 贸易模式^[10],我国仅能依靠自有的 6 艘 LNG 运输船承运 LNG 到指

定接收站,其余合同和现货 LNG 全部依赖租赁船舶进行承运。我国 LNG 船队运力不足成为制约 LNG 贸易的重要因素之一。

2.3 管道输送

目前 LNG 管道只用于天然气液化装置和 LNG 的装卸操作设施,还没有长距离管道输送 LNG 的实例。研究表明,用管道长距离输送 LNG 具有技术可行性,而 LNG 长输管道建设最大的问题在于^[11],使用的材料是否在低温条件下仍能保持良好的性能,为了防止 BOG(闪蒸汽)的产生,必须在中间设置 LNG 冷泵站^[12]。因此,LNG 长输管道的投资回收期初期较低,存在建设风险。随着海底低温管道技术的不断进步,LNG 的高效运输距离已经达到了 32 km^[13],这说明 LNG 长距离管输在技术上是可行的,随着近年来天然气需求的不断攀升,管道输送成为一种趋势。

2.4 LNG 罐箱运输

中国的小型 LNG 生产—罐箱运输—卫星气化站供应链已逐渐形成,这种产业链成为世界上最大的、低成本、技术领先的运作模式^[14]。LNG 罐式集装箱的运输方式,特别是近年来出现的 LNG 储罐多联运输,具有经济、灵活、稳定的特点,将成为集装箱物流和沿海 LNG 接收站的重要通道。LNG 储罐,尤其是圆柱加方框冷保温集装箱,采用高真空多层绝热,运输具有很大的灵活性,可以克服新开辟的天然气市场折旧成本太高的缺陷,加快 LNG 的进一步应用。

3 我国 LNG 储存与运输技术面临的一些问题

经 40 余年的发展,我国已建成了一条较完备的 LNG 产业链,满足了天然气高效运输的需要,但同时存在诸多问题。

首先在 LNG 储存方面,虽然我国目前具有自主承建大型储罐的能力,但是罐内泵和低温阀门等部分材料和设备依赖进口,使得 LNG 项目的建设成本居高不下;我国尚未颁布专门的大型低温 LNG 储罐设计与建造规范,LNG 行业标准体系也未完全建立起来,与国外存在显著差距^[15]。同时,没有适合国内 LNG 项目建设的相关制度和标准,使得工程完全依照国际化标准建设,没有根据我国的地理情况和环境特征,造成不必要的建设成本^[16];LNG 储罐建设方面,升顶技术研究的欠缺成为制约储罐大型化建设的重要因素。

在 LNG 运输方面,LNG 船的建造、设计要求极为苛刻,我国造船业的建造模式、冶金及材料等相关行业的发展水平等都是制约我国发展 LNG 船的因素。主要船型薄膜型专利技术被法国 GTT 公司垄断,使得 LNG 船厂必须付出高额的专利费,因此开发拥有自主知识产权的 LNG 货物围护系统迫在眉睫。同时我国造船效率相比韩国、日本来说较低,增加了建造的时间成本,核心部件和技术国产化成为我国 LNG 造船业面临的主要问题。目前我国在一些 LNG 船用关键部件上仅初步实现了国产化,在 LNG 船液货舱围护系统方面的绝缘箱、殷瓦管及殷瓦三面体制造等进行了相关研究,但技术并不成熟,国产 36Ni 殷瓦钢并不符合 IGC 和 USCG 规范中 E 级钢等低温钢的要求,已被国家发改委列入“十三五”重点项目。

4 我国 LNG 储存与运输技术的发展趋势

虽然全球天然气消费进入疲软期,LNG 贸易却迅猛增长^[17]。自 2000 年以来,LNG 贸易年均增长 1.3 倍,增速超过管道气;LNG 贸易与管道气贸易之比由 25:75 变为 31:69;转口贸易也迅速增长,由欧洲流向亚太和拉美。2013 年中国进口 LNG 贸易量占全球的 32.4%^[18],成为第三大 LNG 进口国。据英国能源咨询公司道格拉斯-韦斯特伍德(DW)发出的报道,未来 5 年全球 LNG 行业总体呈上升趋势,投资总量要比过去 5 年增加 90%,预计将接近 2 590 亿美元。

在当前中国对环保问题愈加重视的情况下,LNG 作为清洁能源格外受到关注。天然气产业将进入前所未有的高速成长期^[19]。大型 LNG 船建造运营、提高运输装备、浮式海上接收平台逐渐成为发展的新趋势。

(1) LNG 储罐超大型化。储罐越大,LNG 单位成本就会越低,越节省钢材、单位投资也会减小,同时布局紧凑,总体占地面积也会变小。对新型绝热结构与绝热材料的研究需要进一步深化。

(2) LNG 船朝着高能效、高载货率方向发展。由 DNV GL 联合现代重工(HHI)、GTT 和船东 Gaslog 共同开发最先进的新一代 LNG 运输船概念——LNGreen 对外发布。该船舶概念显著地提升了环境足迹,改善了汽化损耗率并增加了货物装载量。与现有船舶相比,该概念船能更好地适应未来的贸易模式^[20]。

(3)在 LNG 船储罐用材方面,低温铝材相比镍合金而言更经济、更安全,具有优良的低温力学性能和抗腐蚀性,可以预见,铝材将成为镍钢的最具潜能的替代材料;

(4)中小型 LNG 船近年来逐渐成为 LNG 船型发展的一个新趋势,这种小型船造价低廉,适于内陆运输,运营周期短,适应于市场需求,不过目前研究资料甚少,技术也并不成熟^[21]。

(5)LNG 管道密相输送工艺技术。即使管道内运行工况位于液相密相区,温度控制在饱和温度之下,操作压力控制在饱和压力之上,且需在管道沿线每隔一段距离设置泵站和冷泵站。

(6)新型海上集 LNG 的生产、储存于一身的 LNG-FPSO(浮式生产储油卸油装置)技术。该设施适用于油田伴生气的回收和边际气田的浮式 LNG 接收终端。既简化了过程,又降低了成本,目前无实际应用,仍有待进一步发展。

(7)LNG-FSRU(浮式 LNG 存储再气化装置)一般配备储存和再气化 LNG 的模块装置,因此既可作为 LNG 接收站具有气化 LNG 的功能,又有替代陆上 LNG 储罐储存 LNG 的功能。使用 LNG-FSRU 比常规的 LNG 接受终端可以有效地节约技术投资,并且可以提高供气的灵活性。

(8)数字化与智能化发展趋势。我国大型 LNG 接收终端努力开发仿真模拟优化技术,实现 LNG 运输的远程控制可以有效地避免安全问题的出现,例如采用 GPRS 通信技术、传感器、射频读卡器等对运输装置进行远程操控。

5 结语

在 LNG 储存方面,我国储罐多是中小型压力罐,大型 LNG 储罐的设计、材料制造与研发等方面还无法彻底摆脱外国进口。LNG 运输方面,LNG 槽车国产化已非常成熟;LNG 船还需要加强技术攻关,与国外水平有一定差距;LNG 管道输送技术在管材、低温管道施工、自动控制和检测等方面的研究工作还需进一步深入。

新能源是解决环境污染的重要途径,为了适应社会发展的需要,LNG 正在成为新的全球能源热点,LNG 产业的发展越来越受到人们的重视。然而 LNG 产业对我国来说仍是一个新兴的行业,相关技术以及行业标准还有许多不足之处。虽然中国 LNG 项目的建设大都是在东南沿海,但仍存在调峰

能力不足、小型液化化工厂布局杂乱无序等问题,有待进一步解决。

参考文献

- [1] 余洋.关于我国天然气调峰方式的思考[J].石油规划设计,2007,18(4):8-11.
- [2] 徐彬.大型低温液化天然气(LNG)地下储气库裂隙围岩的热力耦合断裂损伤分析研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [3] 钱成文,姚四容,孙伟,等.液化天然气的储运技术[J].油气储运,2005,24(5):9-11.
- [4] Jung Y B, Park E S, Shen B. Thermal-mechanical analysis of the fraction initiation and progation around the underground pilot LNG storage[J]. Cavern, Geosystem Engineering, 2014, (6): 331-341.
- [5] 张月,王为民,李明鑫,等.大型液化天然气储罐的发展状况[J].当代化工,2013,42(9):1323-1325.
- [6] 丁乙,刘骁,侯志强,等.20×10⁴ m³ LNG 储罐的设计与建造[J].油气储运,2014,33(10):1122-1125.
- [7] 陶金贤,黄勇,陈顺洪,等.支线 LNG 运输船船型设计研究[J].船舶工程,2015,37(3):10-12.
- [8] 刘佳.试析我国液化天然气的海上运输[J].国土资源情报,2014,27-31.
- [9] Zoofakar M R, Norman R, Mesbahi E. Holistic study of liquefied natural gas carrier system, procedia computer[J]. Science, 2014, (36):440-445.
- [10] 程丽霞,陈异,蒋显全,等.液化天然气运输船及其储罐用材料的研究进展[J].材料导报,2013,27(1):71-74.
- [11] 冯若飞,李学新,焦光伟,等.液化天然气长输管道输送技术[J].天然气与石油,2012,30(2):8-10.
- [12] Californian Energy Commission; Californian LNG transportation fuel supply and demand assessment, Consultant Report, Jan, 2014.
- [13] 施陵园,马建林. LNG 液化流程及管道输送工艺综述[J].天然气与石油,2010,28(5):37-42.
- [14] 华贲.中国 LNG 产业发展策略刍议[J].天然气工业,2014,34(8):141-146.
- [15] 张少增.中国 LNG 接收站建设情况及国产化进程[J].石油化工建设,2015,(3):14-17.
- [16] 聂立平,刘晟. LNG 标准在 LNG 项目建设中的应用探讨[J].中国高新技术企业,2015,(6):72-73.
- [17] British Petroleum. BP Energy Outlook 2035[R]. 2014.
- [18] BP 世界能源统计. 2014. BP[EB/OL]. 2014, bp.com/statistical-review.
- [19] 袁超.全球 LNG 产业发展前景及我国造船企业发展策略研究[J].船舶与海洋工程,2015,31(2):1-7.
- [20] LNG 运输船的创新发展[C].第三届 LNG 运输船与动力船大会,2015.
- [21] 何金平.中小型 LNG 运输船推进系统选型分析[J].船海工程,2014,43(5):142-144. ■