

# 液化天然气供气站的工艺设计

吴创明

(新奥集团股份有限公司)

吴创明.液化天然气供气站的工艺设计.天然气工业,2006;26(1):116-119.

**摘要** LNG供气站的设计核心是工艺设计,设计中应注意以下几点:正确处理技术先进性与经济合理性的关系,综合权衡设置费与运营费的比例,力求项目全寿命费用最低;大多数城市LNG供气站均利用空气气化LNG,单罐容积为 $100\text{ m}^3$ 的真空压力式储罐广泛用于储存量为 $1200\text{ m}^3$ 以下的LNG供气站;为正确设置储罐安全阀的开启压力和排放压力,必须根据储罐的最高工作压力按照规范正确确定储罐的设计压力;储罐上2套独立的液位计和高、低限报警自动切断装置可确保储罐安全运行;空温式气化器的气化能力按用气城市高峰小时计算流量的1.3~1.5倍确定,为便于自然化霜应设置2套空温式气化器切换使用;空温式气化器出口串接水浴式加热器可提高冬季或雨天出口天然气温度,保护碳钢管道并降低供销差;LNG储罐区应设置围堰,消防用水量为喷淋与水枪用水量之和。最后建议,必须尽快颁布国家LNG设计规范,以提高我国的LNG设计水平。

**关键词** 城市 液化天然气 供气站 工艺设计 储罐 空温式气化器 安全措施 规范

作为城市利用LNG的主要设施——LNG供气站凭借其建设周期短、能方便及时的满足市场用气需求的特点,已成为我国东南沿海众多经济较发达、但能源紧缺地区的永久供气设施或管输天然气到达前的过渡供气设施。LNG供气站的设计由总平面设计、建筑设计、工艺设计3大部分组成,其中后者是核心。

## 一、LNG供气站设计标准和设计原则

### 1. 设计标准

至今我国尚无LNG的专用设计标准,在LNG供气站设计时可采用的设计规范有:GB 50028—93《城镇燃气设计规范》(2002年版);GB J16—87《建筑设计防火规范》(2001年版);GB 50183—2004《石油天然气工程设计防火规范》;美国NFPA—59A(液化天然气生产、储存和装卸标准)。其中GB 50183—2004是由中石油规划设计总院参照和套用美国NFPA—59A标准起草的,大部分内容和数据等效套用了NFPA—59A标准。NFPA—59A标准除燃气站区距工业区和厂房消防间距小于GB J16—87和GB 50028—93外,绝大多数消防要求均高于后

者,导致工程造价高。目前国内LNG供气站设计中普遍采用GB50028—93(2002年版)中的LPG篇,实践证明其安全可行。

### 2. 设计原则

为了提高工程建设投资效果,在工艺设计中,要从供气和用气工况及气量平衡、管网压力级制、工艺流程、输配管网布置、主要设备和仪表阀门选型、自控系统设置、管道与防腐选材等方面进行多方案比选,从中选取技术先进、经济合理的最佳设计方案。设计方案优选应遵循以下原则。

(1)必须处理好技术先进性与经济合理性之间的关系<sup>[1]</sup>。由于LNG所具有的超低温、高能量密度、泄露后极易造成灾难性事故的危险特性,不允许一味追求经济效果而牺牲设施的功能水平。

(2)必须兼顾建设过程与使用过程,应综合考虑设置费与运营使用费,力求项目全寿命费用最低<sup>[2]</sup>。

## 二、LNG供气站工艺流程设计

按照气化LNG的热源是自然热源(空气)还是人工热源(热水)来区别,LNG工艺流程分为空温式气化和水浴式气化两种。前者的优点是运行成本

**作者简介** 吴创明,1953年生,高级工程师,中国注册投资咨询工程师;1982年毕业于原石油大学过程装备与控制工程专业,长期从事石油化工和城市燃气工程设计、科研、技术管理与经营管理,发表论文20多篇;现任新奥集团股份有限公司技术委员会秘书长。地址:(065001)河北省廊坊市经济技术开发区。电话:(0316)6079828,13933925038。E-mail:wcm8568@sohu.com

低,缺点是气化器体积大、投资高、在冬季和雨天天气化器出口温度较低。后者的优点是气化器体积小、投资较低、气化器出口温度稳定,缺点是运行费用很高,1台水浴式气化器的年运行费用可购买1台空温式气化器。所以,除东北等少数寒冷地区外,基本都采用空温式气化 LNG 流程(图1)。为了防止冬季和雨天空温式气化器出口天然气的温度低,损坏后连续的管道并加大供销差,在空温式气化器的出口常串接1台水浴式加热器。

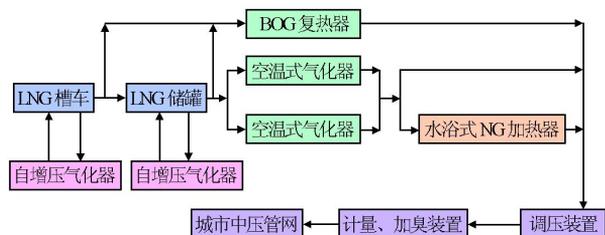


图1 空温式气化 LNG 工艺流程图

### 三、LNG 供气站工艺设计

#### 1. LNG 储罐的设计

##### (1) LNG 储罐结构设计

LNG 储罐按结构形式可分为:地下储罐、地上金属储罐和金属/预应力混凝土储罐 3 大类<sup>[3]</sup>。地上 LNG 储罐又分为金属子母储罐和金属单罐 2 种。LNG 供气站采用何种储罐方式,主要取决于其储存量。储存量在 1200~5000 m<sup>3</sup> 可采用子母罐带压储存和常压储槽储存,子母罐的单罐容积一般在 600~1750 m<sup>3</sup>。子母罐带压储存与常压储存相比其流程简单、设备数量少、运营费用低,但储罐投资较大。储存量在 1200 m<sup>3</sup> 以下的城市 LNG 供气站,基本都采用真空罐带压储存。为便于储罐自增压操作,带压真空罐通常采用立式双层金属罐。其内部结构类似于直立的暖瓶,内罐支撑于外罐上,内、外罐之间是真空粉末绝热层。受运输和整体吊装条件的限制,单罐容积多采用 100 m<sup>3</sup>,个别站用 50 m<sup>3</sup>。

常用的 100 m<sup>3</sup> 立式储罐,内罐内径为 3000 mm,外罐内径为 3200 mm,罐体加支座总高度 17100 mm,储罐几何容积为 105.28 m<sup>3</sup>。

##### (2) 设计压力与计算压力的确定

目前绝大部分 100 m<sup>3</sup> 立式 LNG 储罐的最高工作压力为 0.8 MPa(个别为 0.5 MPa)。按照 GB 150—1998《钢制压力容器》的规定,当储罐的最高工作压力为 0.8 MPa 时,设计压力为 0.84 MPa;充装系数 0.95,考虑液柱净压力和内外罐间的高真空,内罐

的计算压力为 1.01 MPa。

外罐的主要作用是通过吊挂或支撑形式固定内罐与绝热材料,同时与内罐之间形成高真空绝热层。作用在外罐上的荷载主要为内罐和介质的重力荷载以及绝热层的真空负压。因此,外罐为外压容器,设计压力为 -0.1 MPa。

##### (3) LNG 储罐的选材

正常操作时 LNG 储罐工作温度为 -162.3 ℃,第一次投用前要用 -196 ℃ 的液氮对储罐进行预冷,取储罐的设计温度为 -196 ℃。内罐既要承受介质的工作压力,又要承受 LNG 的低温,内罐材料必须具有良好的低温综合机械性能。因此内罐材料采用 0Cr18Ni9(相当于 ASME 标准的 304)。

据内罐的计算压力和所选材料,内罐的计算厚度和设计厚度分别为 11.1 mm 和 12 mm。

作为常温外压容器,外罐材料选用 16 MnR,设计厚度为 10 mm。

##### (4) 接管设计

开设在储罐内罐上的接管口有:上进液口、下进液口、出液口、气相口、测满口、上液位计口、下液位计口、工艺人孔等 8 个接管口。其中:在内罐上封头开设有上进液口、安全阀气相口、液位计气相口、测满口、工艺人孔;下封头开设有下进液口、液位计液相口、出液口。所有内罐上的接管材料都为 0Cr18Ni9。

为便于定期测量真空度和抽真空,在外罐下封头上开设有抽真空口(抽完真空后该管口被封结)。为防止真空失效和内罐介质漏入外罐,在外罐上封头设置有防爆装置。

##### (5) 液位测量装置设计

为防止储罐内 LNG 充装过量或运行中罐内 LNG 太少危及储罐和工艺系统安全,在储罐上分别设置有测满口与差压式液位计 2 套独立液位测量系统。这是观测储罐内部液位的“眼睛”,对 LNG 储罐的安全运行至关重要。在向储罐充装 LNG 和日常运行时,通过差压式液位计所显示的静压力读数,可从静压力与充装重量对照表上直观方便的读出罐内 LNG 的液面高度、容积和重量。当达到充装上限时,LNG 液体会从罐顶测满口溢出,操作工应立即手动切断进料。为确保安全充装和运行,储罐设置有高限报警(充装量 85%)、紧急切断(充装量 95%)、低限报警(剩余 10% LNG)。

##### (6) 绝热层设计

LNG 储罐的绝热层有以下 3 种形式。

①高真空多层缠绕式绝热:多用于 LNG 槽车和罐式集装箱车。

②正压堆积绝热:将珠光砂堆积在内外罐间的夹层中,夹层通氮气,绝热层较厚,广泛应用于大中型 LNG 子母罐和常压储槽。

③真空粉末绝热:容积为  $100\text{ m}^3$  和  $50\text{ m}^3$  的真空压力罐常采用这种绝热方式。在储罐内外罐之间的夹层中填充粉末(珠光砂)后抽成  $5\text{ Pa}$  的高真空用于绝热。通常用蒸发率来衡量储罐的绝热性能, LNG 储罐的日蒸发率小于等于  $0.3\%$  (体积比)。

### (7) LNG 储罐总容量

储罐总容量通常按储存 3 天高峰月平均日用气量来计算确定。同时还应考虑气源点的个数、气源厂检修时间、气源运输周期、用户用气波动等因素。对气源的要求是不少于 2 个供气点。若只有 1 个供气点,则储罐总容量还应考虑气源厂检修时能保证正常供气。

## 2. BOG 缓冲罐

对于调峰型 LNG 供气站,为回收非调峰期接卸槽车的余气和储罐中的 BOG(蒸发气体),或天然气混气站为了均匀混气,常在 BOG 加热器出口增设 BOG 缓冲罐,其容量按回收槽车余气量计算设置。

## 3. 空温式气化器设计

### (1) 储罐增压气化器

按  $100\text{ m}^3$  LNG 储罐装满  $90\text{ m}^3$  LNG 后,在  $30\text{ min}$  内将  $10\text{ m}^3$  气相空间的压力由卸车状态的  $0.4\text{ MPa}$  升压至工作状态的  $0.6\text{ MPa}$  进行计算,据计算结果每个储罐需选用 1 台气化量为  $200\text{ m}^3/\text{h}$  空温式气化器为其增压。

气化器的设计参数:设计压力  $1.0\text{ MPa}$ ;工作压力  $0.6\text{ MPa}$ ;设计温度  $-196\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ ;工作温度  $-145\sim -162.3\text{ }^\circ\text{C}$ ;安装方式为卧式;材料为 LF21。

目前设计多采用 1 个 LNG 储罐带 1 个自增压气化器。也可多个储罐共用 1 台或一组气化器增压,通过阀门切换,可简化流程、减少设备、节省投资。

### (2) 卸车增压气化器

由于 LNG 集装箱罐车上不配加压装置,因而站内要设置气化量为  $300\text{ m}^3/\text{h}$  的卸车增压气化器,将罐车压力增至  $0.6\text{ MPa}$ 。设计参数同储罐增压气化器。

### (3) 空温式气化器

空温式气化器是 LNG 供气站向城市用户供气的主要气化设施。气化器的气化能力按用气城市高峰小时计算流量的  $1.3\sim 1.5$  倍确定。常用的单台

气化器的气化能力为  $1500\sim 2000\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $2\sim 4$  台为 1 组,设计上配置  $2\sim 3$  组,相互切换使用。当一组使用时间过长,气化器结霜严重,导致气化器气化效率降低,出口温度达不到要求时,人工(或自动或定时)切换到另一组,本组进行自然化霜备用。

设计参数:设计压力为  $1.0\text{ MPa}$ ;工作压力为  $0.6\text{ MPa}$ ;设计温度为  $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ;进口温度为  $-145\sim -162.3\text{ }^\circ\text{C}$ ;出口温度大于或等于环境温度  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ ;安装方式为立式;材料为 LF21。

### (4) BOG 加热器

由于站内 BOG 发生量最大的是回收槽车卸车后的气相天然气,故 BOG 空温式加热器的设计能力按此进行计算。回收槽车卸车后的气相天然气的按  $30\text{ min}$  计。以一台  $40\text{ m}^3$  的槽车,压力从  $0.6\text{ MPa}$  降至  $0.3\text{ MPa}$  为例,计算出所需空温式 BOG 加热器的能力为  $240\text{ m}^3/\text{h}$ 。实际选用的加热能力略大于理论计算能力,为  $500\sim 1000\text{ m}^3/\text{h}$ 。在冬季使用水浴式 NG 加热器时,将 BOG 用作热水锅炉的燃料,其余季节送入城市输配管网。设计参数同空温式气化器。

### (5) NG 加热器(水浴式)

当环境温度较低,空温式气化器出口 NG 温度低于  $5\text{ }^\circ\text{C}$  时,在空温式气化器后串联水浴式加热器,对气化后的天然气进行加热。加热器的加热能力根据高峰小时用气量的  $1.3\sim 1.5$  倍确定。天然气出加热器的温度约为  $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### (6) EAG 加热器

LNG 常压下的沸点温度为  $161.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,常压下储存温度为  $-162.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,密度为  $426\text{ kg}/\text{m}^3$  ( $-165.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $101.325\text{ kPa}$ )。当 LNG 气化为 NG 时,其临界浮力温度为  $-107\text{ }^\circ\text{C}$ :①当 NG 温度高于  $-107\text{ }^\circ\text{C}$  时,NG 比空气轻,将从泄漏处上升飘走;②当 NG 温度低于  $-107\text{ }^\circ\text{C}$  时,NG 比空气重,低温 NG 会向下集聚与空气形成可燃性爆炸物。为防止第二种情况出现,流程中设置一台空温式放散气体加热器,放散气体先通过该加热器加热使其密度小于空气,然后再引入高空放散。

EAG(安全放散气体)空温式加热器设备能力按  $100\text{ m}^3$  储罐的最大安全放散量进行计算,经计算其安全放散量为  $500\text{ m}^3/\text{h}$ ,设计中选择气化量为  $500\text{ m}^3/\text{h}$  的空温式加热器 1 台。进加热器气体温度为  $-145\text{ }^\circ\text{C}$ ,出加热器气体温度为  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 。

对于南方不设 EAG 装置的 LNG 供气站,为了防止安全阀起跳后放出的低温 LNG 气液混合物冷

灼伤操作人员,应将单个安全阀放散管和储罐放散管接入总管集中放散。

#### 4. 调压计量与加臭装置设计

根据 LNG 供气站的规模选择调压装置。通常设置 2 路调压装置,选用带指挥器、超压切断的自力式调压器。

计量采用涡轮流量计。加臭剂采用四氢噻吩,加臭以隔膜式计量泵为动力,根据流量信号将臭味剂注入燃气管道中。

#### 5. 阀门与管道管件选型设计

##### (1) 阀门选型设计

工艺系统阀门应满足输送 LNG 的压力和流量要求,同时必须具备耐  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温性能。常用的 LNG 阀门主要有:增压调节阀、减压调节阀、紧急切断阀、低温截止阀、安全阀、止回阀等。其中增压调节阀、减压调节阀、紧急切断阀宜采用进口,其余可采用国产阀门。阀门材料为 0Cr18Ni9。

##### (2) 管道管件法兰选型设计

1) 介质温度小于或等于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的管道采用输送流体用不锈钢无缝钢管(GB/T14976-2002),材质为 0Cr18Ni9。管件均采用材质为 0Cr18Ni9 的无缝冲压管件(GB/T1245-90)。法兰采用凹凸面长颈对焊钢制管法兰(HG20592-97),材质为 0Cr18Ni9;法兰密封垫片采用金属缠绕式垫片(0Cr18Ni9)。

2) 介质温度大于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的工艺管道,当管径小于或等于 DN200 时,采用输送流体用无缝钢管(GB/T8163),材质为 20<sup>#</sup> 钢;当管径大于 DN200 时采用 ERW(高频直缝电阻焊)焊接钢管<sup>[4]</sup>(GB/T3041-001),材质为 Q235B。管件均采用 20<sup>#</sup> 钢无缝冲压管件(GB/T12459-90)。法兰采用 20<sup>#</sup> 钢突面带颈对焊钢制管法兰(HG20592-97)。法兰密封垫片采用柔性石墨复合垫片(HG20629-97)。

LNG 工艺管道安装除必要的法兰连接外,均采用焊接连接。低温工艺管道用聚胺脂管托和复合聚乙烯管壳进行绝热。碳钢工艺管道作防腐处理。

##### (3) 防止冷收缩设计

用作 LNG 管道的奥氏体不锈钢虽具有优异的低温机械性能,但冷收缩率高达 3%<sup>[5]</sup>。站区 LNG 管路在常温下安装,在低温下运行,前后温差高达 180 $^{\circ}\text{C}$ ,存在着较大的冷收缩量和温差应力,通常采用“门形”补偿装置对工艺管道进行冷收缩补偿。

#### 6. 工艺控制设计

LNG 供气站的工艺控制系统包括站内工艺装置的运行参数采集和自动控制、远程控制、连锁控制

和超限报警。通常在以下位置设置控制点:①卸车进液总管;②空温式气化器出气管;③水浴式 NG 加热器出气管;④100 m<sup>3</sup> LNG 储罐;⑤BOG 加热器压力;⑥调压器后压力;⑦出站流量;⑧加臭机(自带仪表控制)。

调压器选用超压切断式,当出口压力超压时自动切换。调压器后设安全放散阀,超压后安全放散。天然气出站管道上设电动阀,当站内天然气泄漏浓度达限声光报警时;或出站阀后压力高出设定压力声光报警时;或紧急情况(如失火)时,都可在控制室迅速切断进、出口电动阀。

#### 7. 消防设计

LNG 供气站的消防设计根据 GB50028-93《城镇燃气设计规范》(2002 年版) LPG 篇进行。在 LNG 储罐周围设置围堰区,通常 1 台罐为 1 组,每组之间以 0.3 m 高防液堤分隔,储罐区四周以 1.0 m 高防液堤分隔外界分隔开,以保证储罐发生事故时对周围设施造成的危害降低到最小程度。为保证储罐安全运行,在 LNG 储罐上设置冷却喷淋系统。LNG 储罐的消防用水量按储罐固定冷却喷淋用水量和火灾时水枪用水量之和计算。

## 四、结束语

(1) 尽快颁布我国的 LNG 设计规范,以指导 LNG 应用领域的设计、施工安装和运行管理。

(2) LNG 气化器的选型必须考虑供气站所在地域的环境气温。对东北等寒冷地区,应采用水浴式和空温式气化器并联运行方式气化 LNG。

(3) LNG 储罐的工作压力、设计压力、计算压力分别有不同的定义和特定用途,不能将计算压力误作为设计压力标注于 LNG 储罐铭牌上,这将导致储罐安全阀的开启压力设定过高而危及储罐安全。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴创明.城市天然气利用工程投资规模和工程造价控制浅论[J].天然气工业,2004,24(4):111-114.
- [2] 吴创明.城市燃气工程可行性研究报告的探讨[J].煤气与热力,2005(5):34-38.
- [3] 张立希,陈慧芳.LNG 接受终端的工艺系统及设备[J].石油与天然气化工,1999,28(3):163-166,173.
- [4] 吴创明.城市天然气输配方案的选择[J].煤气与热力,2004(5):279-282.
- [5] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2003.

(修改回稿日期 2005-10-24 编辑 居维清)