

# 大型低温液体贮存站贮罐设计选型论证 (续)

郭怀东<sup>1</sup>, 邵百岁<sup>2</sup>, 陈忠胜<sup>3</sup>

[1. 山东绿能燃气实业有限责任公司, 山东省菏泽市长江路 6660 号 274000;

2、3. 四川空分设备(集团)有限责任公司, 四川省简阳市建设中路 239 号 641400]

**摘要:** 运用热力学第一定律对低温液体在贮存、运输转注过程中的热力学特性进行了分析, 定量分析、计算了低温液体节流过程的节流汽化率值, 提出了减少节流过程所形成的汽化率的有效途径; 论证了在大型低温液体贮存站贮罐设计选型时, 应根据不同的低温液体液源、液体品质和操作工况等条件进行设计选型; 论证了除合理地选择正确的低温液体贮罐结构形式外, 还应高度重视低温液体贮罐的安全泄放设计, 以确保低温液体贮存站的安全性能、使用性能和技术经济性能均处于最佳状态。

**关键词:** 大型低温液体贮存站; 节流; 汽化; 贮罐选型; 安全泄放

**中图分类号:** TB658 **文献标识码:** A

## Discussion on model selection in designing storage tanks for large scale cryogenic liquid storage station ( continuation)

Guo Huai-dong<sup>1</sup>, Shao Bai-sui<sup>2</sup>, Chen Zhong-sheng<sup>3</sup>

[1. Shandong L neng Gas Industrial Co., Ltd., 6660 Changjiang Road, Heze 274000, Shangdong, P. R. China; 2、3. Sichuan Air Separation Plant ( Group ) Co., Ltd., 239 Jianshe Mid Road, Jianyang 641400, Sichuan, P. R. China]

**Abstract:** The thermodynamic characteristics of cryogenic fluid during its storage, transport and transmission are analyzed with the first law of thermodynamics. The vaporization rates of throttling processes are analyzed and calculated quantitatively, and some effective ways for decreasing vaporization rate of throttling processes are also proposed. The model selection of storage tanks for large scale cryogenic liquid storage station is discussed from the view of cryogenic fluid type, liquid quality and operation condition. Besides the rational structural form of cryogenic fluid tank, the safe discharge should also be highly emphasized in the design to ensure safety performance, service convenience and technically economic operation of cryogenic fluid storage station.

**Keywords:** Large scale cryogenic liquid storage station; Throttling; Vaporization; Storage tank model selection; Safe discharge

### 符号说明:

$c_K$  —— 单位质量饱和液体介质在节流过程前后的平均比热

容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

$h$  —— 汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;

$h_1$ 、 $h_2$  —— 分别为介质在节流过程前后所处饱和状态的汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;

$i_1$ 、 $i_2$  —— 分别为单位质量介质在节流过程前后的焓值,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;

收稿日期: 2008-04-31

作者简介: 郭怀东 (1953—), 男, 高级工程师, 西安交通大学深度冷冻专业毕业, 兰州理工大学兼职教授, 全国压力容器标准化技术委员会移动分会委员, 资深低温贮运专家, 曾在四川空分设备(集团)有限责任公司从事低温液体贮运设备产品研制开发工作, 现为山东绿能燃气实业有限责任公司副总经理。

$i'_{1}, i''_{1}$ ——分别为单位质量介质在节流过程前饱和液体介质、饱和蒸气的焓值, kJ/kg;

$i'_{2}, i''_{2}$ ——分别为单位质量介质在节流过程后饱和液体介质、饱和蒸气的焓值, kJ/kg;

$i_{2S}$ ——单位质量介质在实际节流过程后的焓值, 下标“S”代表实际节流过程, kJ/kg;

$P_1$ ——节流前的饱和压力, MPa;

$P_2$ ——节流后的饱和压力, MPa;

$P_0$ ——标准沸点压力, 0.10132MPa;

$q$ ——单位质量介质在节流过程中与外界交换的热量, kJ/kg;

$q_S$ ——单位质量介质在实际节流过程中与外界交换的热量, kJ/kg;

$X_{\min}$ ——单位质量介质在等焓节流过程所形成的最小汽化率, kg/kg;

$X_q$ ——介质在实际节流过程自外界吸入热量  $q_S$ , 并由  $q_S$  所产生的汽化率, kg/kg;

$X_S$ ——介质在实际节流过程所产生的汽化率, kg/kg;

$X_{L_{O_2-\min}}$ ——液氧在等焓节流后的最小汽化率, kg/kg;

$X_{L_{N_2-\min}}$ ——液氮在等焓节流后的最小汽化率, kg/kg;

$X_{L_{NG-\min}}$ ——液化天然气在等焓节流后的最小汽化率, kg/kg;

$T$ ——温度, K;

$T_1, T_2$ ——分别为介质在节流过程前后的饱和液体温度, K;

$\rho$ ——密度, kg/m<sup>3</sup>;

$V_{LNG-\min}$ ——计算所得 LNG 在等焓节流转注过程的最小液体体积汽化量, m<sup>3</sup>/h;

$G_{LNG-\min}$ ——计算所得 LNG 在等焓节流转注过程的最小液体质量汽化量, kg/h;

$V_{0-\min}$ ——计算所得标准状态下 LNG 在等焓节流转注过程的最小液体体积汽化量, m<sup>3</sup>/h。

## 前 言

随着国民经济的高速发展, 市场对大型低温液体贮存站的需求越来越大。文献 [1] 对大型低温液体贮存站的贮罐设计选型进行了论证, 提出了可供选型的方案有: A (子母罐)、B (球罐)、C (圆筒罐)、D (常压罐+ 输液泵)、E (集群罐) 5 种。

若将 5 种方案按操作压力进行分类, 可分为压力型 (A、B、C、E 型) 和常压型 (D 型)。

在对大型低温液体贮存站的贮罐进行设计选型时, 应根据设计要求的使用条件, 针对不同的低温液体液源、液体品质、操作工况和安全泄放等因素

综合考虑, 使其综合经济性能处于最佳状态。

## 1 低温液体贮存、运输转注

### 1.1 低温液体贮存、运输转注过程

低温液体通常贮存在有特殊绝热措施保护的低温贮罐内, 采用专用低温绝热运输容器或管道进行输送, 依靠低温液体泵或压力差进行转注。

#### 1.1.1 低温液体的贮存方式

低温液体贮存时通常按有无压力分为常压贮存 (亦称无压贮存) 和带压贮存两种方式。

##### 1.1.1.1 常压贮存

常压贮存是指低温液体在贮存期间, 打开顶部排气阀门管路或用抽气机械将随时蒸发出来的 BOG (Boil of Gas) 气体排出, 使低温液体贮罐的压力始终保持在接近常压状态的一种贮存方式。常用于常压贮罐, 也可用于压力贮罐, 是最安全的贮存方式。

在常压贮存期间, 低温液体的热力学状态参数维持不变, 单一介质的物理性质也不改变, 多组分介质的物理性质有可能改变, 物料质量的总量亦会发生变化。

##### 1.1.1.2 带压贮存

带压贮存是指低温液体在贮存期间, 关闭顶部排气阀门管路, 将随时蒸发出来的 BOG 气体封闭在贮罐内, 只有当压力超过贮罐的安全设定值或有必要时才将 BOG 气体排出, 使低温液体贮罐的压力始终保持高于常压状态的一种贮存方式。通常用于压力贮罐, 低温液体运输容器在运输期间亦采用带压贮存。

在带压贮存期间, 低温液体的热力学状态参数及物性会发生变化, 但物料质量的总量保持不变。

#### 1.1.2 低温液体的转注方式

低温液体的转注采用低温液体泵增压或两容器间压力差及液位高度差来进行转注。

### 1.2 低温液体贮存、运输转注过程的热力学分析

#### 1.2.1 热力学状态参数、物性及节流汽化

(1) 特别说明: ①文中所述压力除无特别指明外, 均为绝对压力; ②文中所述的物性参数均摘自文献 [2]。

(2) 低温液体在贮存、运输转注过程中的热力学状态会不断发生变化, 主要表现在: ①热力学状态参数与物性的改变, 例如: 压力  $P$ 、温度  $T$ 、汽化潜热  $h$  和密度  $\rho$  的变化; ②组分的改变, 例

如：对于多组分的液化天然气（LNG）而言，气相/液相还会分别发生组分的变化；③物相的改变，例如：低温转注时，由较高饱和压力状态转变为较低饱和压力状态，压力降低将引起低温液体的节流汽化，导致低温液体的汽化损失；④低温液体的节流过程如图 1 所示。

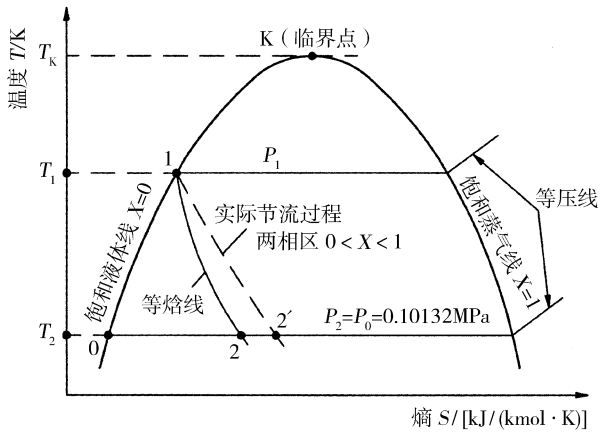


图 1 温度—熵 (T-S) 图

### 1.2.2 低温液体的节流汽化

节流过程中的能量转移关系按热力学第一定律

可描述为：

$$q = i_2 - i_1 \quad (1)$$

理想的节流过程为绝热节流过程，即  $q = 0$  时：

$$i_2 = (1 - X_{\min}) i'_{2+} + X_{\min} i''_{2-} = i'_1 \quad (2)$$

$$X_{\min} = \frac{i'_1 - i'_2}{i''_{2-} - i'_2} = \frac{c_K (T_1 - T_2)}{h_2} \quad (3)$$

### 1.2.3 常用低温液体的 $X_{\min}$ 值计算

以常用低温液体（液氧、液氮和液化天然气）为例进行分析计算。

设节流后的饱和压力均为  $P_2 = P_0$ （标准沸点压力）。

#### (1) 液氧的 $X_{LO_2-\min}$ 值：

$$\begin{aligned} X_{LO_2-\min} &= \frac{c_K (T_1 - T_2)}{h_2} \\ &= \frac{1.7 (T_1 - 90)}{213.652} \\ &= 0.0079568 T_1 - 0.716 \end{aligned} \quad (4)$$

按式 (4) 计算液氧的最小汽化率  $X_{LO_2-\min}$  见表 1。

表 1 液氧的最小汽化率  $X_{LO_2-\min}$  计算表

液氧： $T_0 = 90K$ , $c_K = 1.7kJ/(kg \cdot K)$ , $h_2 = 213.652kJ/kg$									
饱和压力 $P_1$ / MPa	0.1	0.196	0.304	0.51	0.712	0.915	1.35	1.59	1.75
饱和温度 $T_1$ / K	90	97	102	109	114	118	125	128	130
汽化潜热 $h_1$ / (kJ/kg)	213.7	201.9	196.3	188.3	181.6	175	161	152.7	147.2
最小汽化率 $X_{LO_2-\min}$ / (kg/kg)	0	0.055	0.095	0.151	0.191	0.223	0.278	0.30	0.318

说明：当节流后的压力  $P_2 > P_0$ ，不为标准沸点压力时，可用实际的  $P_2$  下的  $T_2$  及  $h_2$  代入式 (4) 进行计算该节流过程的  $X_{LO_2-\min}$  值。

#### (2) 液氮的 $X_{LN_2-\min}$ 值：

$$\begin{aligned} X_{LN_2-\min} &= \frac{c_K (T_1 - T_2)}{h_2} \\ &= \frac{2.029 (T_1 - 77.345)}{199.25} \end{aligned}$$

$$= 0.0101832 T_1 - 0.78762 \quad (5)$$

按式 (5) 计算液氮的最小汽化率  $X_{LN_2-\min}$  见表 2。

表 2 液氮的最小汽化率  $X_{LN_2-\min}$  计算表

液氮： $T_0 = 77.345K$ , $c_K = 2.029kJ/(kg \cdot K)$ , $h_2 = 199.25kJ/kg$									
饱和压力 $P_1$ / MPa	0.1013	0.205	0.3	0.5	0.73	0.957	1.16	1.39	1.74
饱和温度 $T_1$ / K	77.35	84	88	94	99	103	106	109	113
汽化潜热 $h_1$ / (kJ/kg)	199.25	190.6	184.5	175.2	166.5	158.1	150.9	142.2	128.1
最小汽化率 $X_{LN_2-\min}$ / (kg/kg)	0	0.068	0.109	0.17	0.221	0.261	0.292	0.322	0.363

说明：当节流后的压力  $P_2 > P_0$ ，不为标准沸点压力时，可用实际的  $P_2$  下的  $T_2$  及  $h_2$  代入式 (5) 进行计算该节流过程的  $X_{LN_2-\min}$  值。

(3) 液化天然气的  $X_{LNG-min}$  值:

因液化天然气是以液态甲烷  $LCH_4$  为主要成分 (85% 以上) 的低温液体, 故讨论时仅以纯液态甲烷代表液化天然气。

$$X_{LNG-min} = \frac{c_K (T_1 - T_2)}{h_2}$$

$$= \frac{2.13 (T_1 - 111.7)}{510} = 0.00418T_1 - 0.4665 \quad (6)$$

按式 (6) 计算液化天然气的最小汽化率

$X_{LNG-min}$  见表 3。

表 3 液化天然气的最小汽化率  $X_{LNG-min}$  值计算表

液化天然气: $T_0 = 111.7K$ , $c_K = 2.13kJ/(kg \cdot K)$ , $h_2 = 510kJ/kg$									
饱和压力 $P_1/MPa$	0.1013	0.2	0.3	0.513	0.6	0.818	0.944	1.345	1.79
饱和温度 $T_1/K$	111.7	120	126	135	138	144	147	155	162
汽化潜热 $h_1/(kJ/kg)$	510	500.3	487.6	471.8	465.4	451.55	443.9	420.7	395.5
最小汽化率 $X_{LNG-min}/(kg/kg)$	0	0.035	0.06	0.097	0.11	0.135	0.147	0.18	0.21

说明: 当节流后的压力  $P_2 > P_0$ , 不为标准沸点压力时, 仍可用实际的  $P_2$  下的  $T_2$  及  $h_2$  代入式 (6) 进行计算该节流过程的  $X_{LNG-min}$  值。

### 1.2.4 实际的节流过程

低温液体在实际的节流过程中将自外界吸收热量, 节流过程前后的能量转换关系仍可应用热力学第一定律建立数学模型进行分析计算。则:

$$q_s = i_{2s} - i_1 = [(1 - X_s) i'_{2s} + X_s i''_{2s}] - i'_1 \quad (7)$$

解得:

$$X_s = \frac{i'_1 - i'_{2s}}{i''_{2s} - i'_{2s}} + \frac{q_s}{i''_{2s} - i'_{2s}} = \frac{c_K (T_1 - T_2)}{h_2} + \frac{q_s}{h_2} = X_{min} + X_q \quad (8)$$

式中: 各符号下标 “S” 表示实际节流过程。

式 (8) 表明:

(1) 实际节流过程的汽化率  $X_s$  为  $X_{min}$  与  $X_q$  两部分之和。

(2) 其中  $X_{min}$  为等焓节流化率值, 是低温液体因热平衡状态改变 (由较高饱和压力的热平衡状态转变为较低饱和压力热平衡状态) 过程的压力降低, 所引起的低温液体的节流汽化而导致的汽化损失率。

(3)  $X_{min}$  不因其介质与外界是否有能量交换, 即使  $q_s = 0$  也必然会发生的最低汽化率。

(4)  $X_q$  值为实际节流过程中介质自外界吸入热量  $q_s > 0$  所产生的汽化率。

(5) 实际节流过程为不等焓节流过程, 在图 1 中等焓节流过程用实线表达, 实际节流过程用虚线

表达。

(6) 实际节流过程的  $q_s$  可根据实际的低温液体输泵机及管道设备应用传热学有关原理进行分析计算。

### 1.3 节流过程的几点结论

将表 1、2、3 中的节流前饱和压力  $P_1$  和节流最小汽化率  $X_{min}$  用曲线图表达, 如图 2 所示。

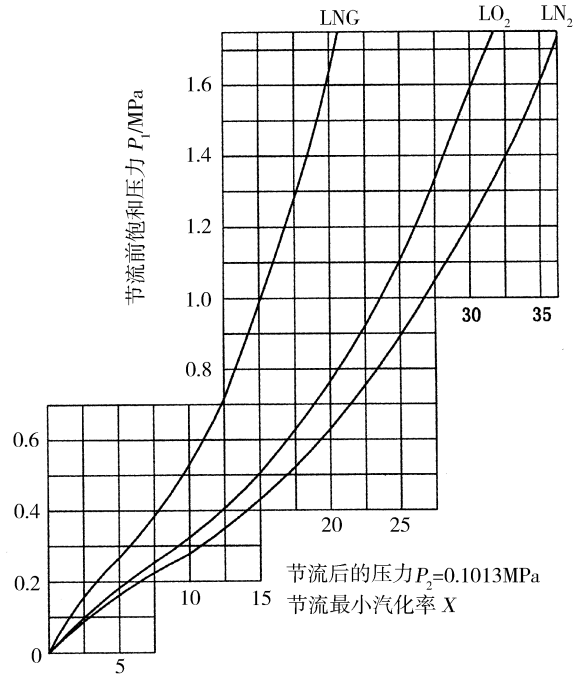


图 2 常用低温液体节流汽化率图

(1) 节流过程的汽化率  $X_s$ , 代表着节流前单位质量的饱和和低温液体在节流后会产生  $X_s$  汽化损

失, 剩下的液体量为  $(1 - X_S)$ 。

(2) 对液体输送管道或设备进行良好保冷隔热降低  $q_S$  值, 可降低节流过程的  $X_S$  值。

(3) 实际节流过程的汽化率  $X_S > X_{\min}$ 。

(4) 不同的介质种类在相同的节流前后饱和压力条件下,  $X_{\text{LNG-min}} > X_{\text{LO}_2\text{-min}} > X_{\text{LN}_2\text{-min}}$ 。

(5) 对于同一种介质, 节流前后饱和压力降  $\Delta P = P_1 - P_2$  越大, 则  $X$  值越大。

(6) 对于同一种介质, 节流前后的温度  $T_1$  对于  $X$  值是最主要的影响因素。

(7) 节流前的温度  $T_1$  越低, 在同样的节流前后压力降  $\Delta P = P_1 - P_2$  范围内,  $X$  值越小。

(8) 欲降低节流前的温度  $T_1$ , 则应使低温液体处于过冷状态才能降低  $X$  值。

(9) 虽然  $X$  值与节流前的温度  $T_1$  及节流后的温度  $T_2$  具有一次线性函数关系, 但因介质的饱和压力  $P$  与饱和温度  $T$  并不一定呈一次线性函数关系, 所以  $X$  值并不一定与介质节流前后的饱和压力  $P$  呈一次线性函数关系。

(10) 欲降低实际节流过程的汽化率  $X_S$  值, 除了上述因素外, 更要注意促使  $q_S$  值趋近于零。

(11) 欲使实际节流过程的  $q_S$  值趋近于零, 则应努力降低节流过程的不可逆损失 (如跑冷损失和摩阻损失等)。行之有效的措施如下: ①缩短液体输送管道长度, 降低节流过程的跑冷损失; ②对液体输送管道或设备进行良好保冷隔热, 降低节流过程的跑冷损失; ③确保液体输送管道或设备流道流畅, 可降低节流过程的摩阻损失。

## 1.4 实际案例

### 1.4.1 液氧槽车向大型常压贮罐转注液氧

某钢厂因空分设备停车, 为保证炼钢生产, 用液氧运输槽车自外地购回液氧转注至大型常压液氧贮罐。在转注开始时即出现大型常压液氧罐安全装置急剧动作, 致使转注工作无法进行。

#### 1.4.1.1 原因分析

(1) 液氧运输槽车自外地购回的液氧处于较高饱和压力, 转注时因  $X_S$  影响产生大量 BOG 气体。

(2) 大型常压液氧贮罐的安全装置是按空分设备正常生产设计选型匹配的, 无法满足液氧转注时产生的大量 BOG 气体的排放要求。

#### 1.4.1.2 安全警示和措施

(1) 不可轻易将有压力的低温液体向常压贮罐进行转注, 否则将会对大型常压贮罐构成超压危险。

(2) 如果必须将有压力的低温液体向常压贮罐进行转注, 可考虑: ①降低转注压力或减小阀门开度, 有效控制液体转注流量, 减少 BOG 气体产生量; ②对 BOG 气体进行适当回收处理; ③对大型常压贮罐的安全装置按该工况要求进行正确的安全泄放设计选型; ④对于在用常压贮罐的安全装置应进行校核使其处于安全运行状态。

### 1.4.2 LNG 罐箱向大型常压罐转注 LNG

某装液量为  $36\text{m}^3$  的 LNG 运输罐箱经数千公里长途运输到达目的地时, LNG 运输罐箱内的饱和压力约为  $0.8\text{MPa}$ 。若将该罐箱内的 LNG: ①向大型 LNG 常压罐进行转注; ②向  $0.3\text{MPa}$  的 LNG 压力罐进行转注; ③向  $0.5\text{MPa}$  的 LNG 压力罐进行转注; ④向  $0.7\text{MPa}$  的 LNG 压力罐进行转注。

试分析以上 4 个转注过程的  $X_{\text{LNG-min}}$  及产生的 BOG 气体量 (该转注过程要求在 60 分钟内完成)。

根据文献 [2] 可查得 LNG 有关物性; 根据图 2 可查得 LNG 的  $X_{\text{LNG-min}}$  值; 再计算产生的 BOG 气体量, 有关结果见表 4。

从表 4 中可以看出:

(1) 初始压力  $P_1$  相同的 LNG 由于节流后的  $P_2$  不同, 所产生的  $X_{\text{LNG-min}}$  相差很大。

(2) 只要能维持正常的转注压力稳定, 适当地控制节流压降, 方能有效地减小  $X_{\text{LNG-min}}$  值。

(3) 在向常压贮罐进行转注时, 该过程产生的 BOG 气体量如果处理不当, 将会对常压贮罐的安全保护构成威胁, 不容忽视。

## 1.5 低温液体的品质

如前所述, 低温液体节流前的温度  $T_1$  越低, 在同样的节流前后压力降  $\Delta P$  范围内,  $X$  值越小。

由此表明: 目前低温液体贸易交接过程中通常采用的计重法和组分法并不能全面客观地评价物料的综合交接质量。一般情况下低温液体的温度越低其品质越好, 转注时的  $X$  值则越小。若要使低温液体的温度尽可能低, 则要求同时做到:

(1) 在装入运输容器之前, 低温液体的温度应接近标准沸点温度  $T_0$ ;

表4  $X_{LNGmin}$ 值、BOG气体量计算表

状态	项目	转注过程				备注	
		①	②	③	④		
节流前	饱和压力 $P_1/MPa$	0.8					
	饱和温度 $T_1/K$	144					
	饱和液体密度 $\rho_1/(kg/m^3)$	374					
节流后	饱和压力 $P_2/MPa$	0.1	0.3	0.5	0.7		
	饱和温度 $T_2/K$	111.7	126	135	141		
	饱和液体密度 $\rho_2/(kg/m^3)$	426	402.7	388.1	377.7		
	汽化潜热 $h_2/(kJ/kg)$	509.7	487.6	471.8	458.75		
	最小汽化率 $X_{LNG-min}$	13.3%	7.9%	4.06%	1.4%		
BOG	最小汽化量	$V_{LNG-min}/(m^3/h)$	4.788	2.844	1.46	0.5	液态
		$G_{LNG-min}/(kg/h)$	2499	1064	546	187	
		$V_{G-min}/(m^3/h)$	1791	1484	762	261	标准状态

(2) 在运输过程中, 应采用无压贮存方式运输, 但无压贮存运输的安全性低于带压贮存运输。

## 2 与液化工厂配套的贮罐设计选型

工业上常用的低温液体主要有两大类, 一类为空分设备生产的液氧、液氮和液氩产品, 另一类为LNG液化工厂生产的LNG液态产品。

### 2.1 与空分设备配套的贮罐设计选型

现代大型空分设备为了保证生产的液氧、液氮和液氩产品的纯度要求, 均采用全低压流程, 所生产的低温液态产品均为常压。为了降低设备投资, 与之配套的低温液体贮罐均为常压贮罐, 然后采用低温液体泵增压或借助液位高度差形成的势能进行转注。大型空分设备采用常压低温液体贮罐有利于降低设备投资。

### 2.2 与LNG液化工厂配套的贮罐设计选型

现代LNG液化工厂生产的液态产品按压力划分通常有以下几种情况。

#### 2.2.1 小型LNG液化工厂

小型LNG液化工厂生产的液态产品压力通常为0.3MPa, 与之配套的LNG贮罐应为子母罐式压力贮罐。

#### 2.2.2 中型LNG液化工厂

中型LNG液化工厂生产的液态产品压力通常为0.3MPa, 与之配套的LNG贮罐应为压力子母罐; 也有生产常压液态产品的, 与之配套的LNG贮罐应首先选用常压贮罐, 其次为压力贮罐。

### 2.2.3 大型LNG液化工厂

大型LNG液化工厂生产的液态产品由于产量大, 与之配套的LNG贮罐容量也大, 若此时仍采用子母罐式压力贮罐, 不仅将大幅度增加设备投资, 还有可能由于占地面积过大等因素导致技术方案无法实现, 因此必须采用常压贮罐。

#### 2.2.4 LNG装车

LNG液化工厂通常采用LNG液体泵增压进行转注输入LNG运输容器, 以保证快速装车。

#### 2.2.5 关于LNG产品压力

当LNG液化工厂采用子母罐式压力贮罐时, 通常生产的液态产品也具有一定的压力, 装置相应的制冷温度可适当提高, 达到既降低能耗又提高液化率的目的。

## 3 卫星站用贮罐设计选型

### 3.1 液氧、液氮和液氩卫星站用贮罐设计选型

所有液氧、液氮和液氩卫星站设计选型均采用压力贮罐。

采用压力贮罐可以方便地依靠罐内压力输出液体, 并保证供液压力稳定。一般情况下不需要采用较为昂贵且复杂的液氧、液氮和液氩泵输出液体; 只有当供气管网的压力为中压以上时, 才采用低温液氧、液氮和液氩泵增压输出液体。

### 3.2 LNG卫星站用贮罐设计选型

#### 3.2.1 常用LNG卫星站用贮罐设计选型

常用LNG卫星站通常用于城镇燃气供应的贮

存站。贮罐设计选型应为压力贮罐，通常选用文献[1]中所述的A（子母罐）、E（集群罐）两种方案。

LNG压力贮罐可以方便地依靠罐内压力输出LNG，并保证供液压力稳定。一般情况下不需要采用较为昂贵、复杂的LNG泵输出液体，具有安全可靠和操作方便的优点；当LNG用于供电厂发电需要3.5MPa以上供气压力时，才采用LNG泵增压后输出液体。

由于LNG压力贮罐具有一定的承压能力，有利于接收来自LNG运输罐箱内的物料。其优点在于：

- (1) 利用承压能力条件，可以缩小节流前后压力降 $\Delta P$ 范围，可降低 $X$ 值；
- (2) 利用承压能力条件，可以适量贮存一定量的BOG气体；
- (3) 利用承压能力条件，还可以调节BOG气体的峰值特性；
- (4) LNG压力贮罐的安全装置动作较高，有利于转注过程的操作安全性。

### 3.2.2 大型LNG卫星站用贮罐设计选型

近年来LNG卫星站的容量越来越大，由于LNG常压贮罐具有设备投资小的优点受到用户青睐。但在贮罐设计选型时往往忽视了对LNG来源及品质的研判，导致选型不当。

在建设大型LNG卫星站时若选用常压贮罐，必须注意以下6个方面因素：

- (1) LNG来源及品质的研判问题。若LNG的来源是采用LNG运输罐箱经数日远距离运输而来的，其罐箱内的液体应视为饱和液体，转注入LNG常压贮罐时，必定产生大量BOG气体。
- (2) 对转注时产生的BOG气体回收处理问题。
- (3) LNG转变为气体不能直接放空，应妥善回收处理，否则将不可避免地造成经济损失以及安全事故问题。
- (4) LNG常压贮罐由于输出液体时不具备输出压力，需要采用LNG泵增压后输出。
- (5) 由于大型LNG卫星站的液体输出量峰值高，按理应采用离心泵。但由于液体输出量范围波

动较大，往往需要采用泵后回流操作予以适应。为了保证LNG液体输出的可靠性，LNG泵通常需要设置备份，促使泵投资增大。LNG泵的维护技术难度及费用较高。

(6) 除上述因素外，还必须总体考虑LNG常压贮罐、LNG泵和运行维护等各项的综合费用评估问题。

## 4 关于常压贮罐的安全泄放设计

常压贮罐的安全泄放装置设计必须满足以下各种工况下的安全泄放量或多种工况下安全泄放量的组合值要求：

- (1) 与液化工厂配套时，应按相关标准规范的规定进行设计。
- (2) 对于卫星站用常压贮罐，除了应按相关标准规范的规定进行设计外，还应考虑液体源的品质问题。
- (3) 对于卫星站用常压贮罐，若用于接收来自LNG运输罐箱远距离运输而来的饱和液体时，必须考虑产生的大量BOG气体对贮罐构成的安全影响问题。

## 5 结束语

对低温液体贮存、运输转注过程进行了热力学分析，运用热力学第一定律重点分析了节流过程的汽化现象，对节流过程所形成的汽化率 $X_S$ 值进行了定量分析计算，得出了常用低温液体（LO<sub>2</sub>、LN<sub>2</sub>、LNG）在一定节流条件下的最小汽化率 $X_{min}$ ；建立了实际节流过程的汽化率 $X_S$ 计算的基本数学模型；提出了减少节流过程所形成的汽化率 $X_S$ 值的有效途径；结合实际案例分析提出了与液化工厂配套及卫星站用低温液体贮罐设计选型的基本原则；讨论了关于常压贮罐安全泄放设计值得注意的有关问题。

参考文献：

- [1] 郭怀东. 大型低温液体贮存站贮罐设计选型论证[J]. 深冷技术, 2004 (1): 24-28.
- [2] 化工第四设计院主编. 深冷手册[M]. 1版. 北京: 石油化学工业出版社, 1979.