

LNG 气化站 EAG 产生分析及计算方法比较

刘浩然 王 飞 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 本文主要分析采用固定真空绝热深冷压力容器的 LNG 气化站中 EAG 的产生原因, 比较 LNG 气化站 EAG 安全放散量的不同计算方法, 探讨适用于 LNG 气化站 EAG 量计算的最优方法, 最后通过项目实例给出了 EAG 加热器的选型计算依据, 以期实现为采用固定真空绝热深冷压力容器的 LNG 气化站的相关设计提供借鉴和参考意义。

关键词: EAG; 安全放散量; 计算方法; EAG 加热器

泄放气 EAG 的计算在 LNG 气化站设计中占有重要地位, EAG 计算量过大, 会导致整个放散系统设计能力过于富足, 从而会增大建设成本, 浪费工程投资; EAG 计算量过小, 将导致整个放散系统设计能力不足, 无法满足站内最大 EAG 放散量的安全放散。EAG 放散作为站内最后一道安全屏障, 其计算方法的选择和依据成为 LNG 气化站设计中的关键点。

1 EAG 产生分析

1.1 EAG 产生机理

EAG 为 LNG 储罐超压泄放或管道内 LNG 受热膨胀的安全泄放产物, 是低温气态天然气。EAG 的安全泄放温度一般在 $-140^{\circ}\text{C} \sim -120^{\circ}\text{C}$ 。当 LNG 从储存容器内释放到大气中时, 将气化并在大气温度下成为气体。LNG 气化为低温气态天然气时, 其临界浮力温度为 -112°C (均按甲烷)。当低温气态天然气温度高于 -112°C 时, 该气体比 15.6°C 下的空气轻, 将从泄漏处上升飘走。当低温气态天然气温度低于 -112°C 时, 该气体比 15.6°C 下的空气重, 低温气态天然气会向下积聚, 与空气形成可燃性爆炸物。为防止泄放的低温气态天然气向下积聚形成爆炸性混合物, 目前, LNG 气化站每个站场均设置了 EAG 加热器 (空温式), 站内低温放散气体先通过该加热器加热, 使其密度小于空气, 然后再引入放散管或火炬进行放散。

1.2 EAG 产生工况

根据目前国内在运行的 LNG 气化站生产数据, 只有在槽车卸车、泵预冷工艺操作工况时有微量的 EAG 放散, 不会有大量的 EAG 放散。因此, 需要考虑极端工况作为 EAG 安全放散量计算及 EAG 加热器的选型依据。如果 LNG 储罐内气相空间的压力超高, 储罐内多余的蒸发气将通过自动调节阀或安全泄放阀排入放散系统; 当储罐内 LNG 因温度或密度差产生液体分层引发翻滚时, 大量不正常蒸发的气体也将通过放散

卸压。EAG 产生的极端工况包含: ① LNG 储罐及管道处于火灾工况; ② LNG 储罐翻滚工况。故 EAG 安全放散量及 EAG 加热器的选型应按最大的一次事故排放量或按合理和可能的事故组合排放量来选择。

2 EAG 量计算方法

2.1 火灾工况

火灾工况是引发 EAG 泄放量产生的一种极端工况, 国内标准、手册等对于压力容器、管道的安全放散有以下 6 个计算依据:

2.1.1 方法 1: 最小泄放能力^[1]

规范^[1]第 7.8.3.3 条规定: 泄放装置的最小泄放能力 kg/h , 应不低于 24h 内排出满罐容量的 3%。

本条规定了泄放装置的最小泄放能力即 EAG 放散的最小控制标准, 当火灾工况其他计算方法的计算值小于此值时, 以该值作为选型依据。

2.1.2 方法 2: 暴露于火^[1]

规范^[1]第 7.8 章节: 与火焰接触要求的压力泄放能力应按式 1 计算:

$$H=71000F \cdot A^{0.82}+H_n \quad (\text{式 } 1)$$

式中: H - 总热流量 (W); F - 环境因子; A - 储罐与火焰接触的湿表面积 (m^2 , 对于大型储罐, 与火焰接触的湿表面积应为地面以上至 9.15m 高度的面积); H_n - 冷罐的正常漏热量 (W)。

压力泄放阀的泄放能力由式 2 决定:

$$W=H/L \quad (\text{式 } 2)$$

式中: H - 总热流量 (W); W - 在泄放条件下产品蒸汽的泄放能力, (g/s); L - 储存液体在泄放压力及温度下的气化潜热 (J/g)。

泄放能力 W 确定后, 当量气体流量按式 3 计算:

$$Q_a = 0.93W \sqrt{\frac{T_z}{M}} \quad (\text{式 } 3)$$

式中: Q_a - 当量气体流量, (Nm^3/h , 在 15°C 时和

101kPa 的压力下)；T- 在泄放条件下产品蒸气的绝对温度 (K)；Z- 在泄放条件下产品蒸气的压缩因子；M- 产品蒸气的相对分子质量。

2.1.3 方法 3: 火灾情况下容器的安全泄放量^[2]

手册^[2]第 322 页介质为可燃液化气体或装在可能发生火灾的环境下的非可燃液化气体, 对有完善的保温层的液化气体容器按式 4 计算:

$$G = \frac{9.4(650-t)\lambda \cdot A^{0.82}}{\delta \cdot H_V} \quad (\text{式 4})$$

式中: G- 容器的安全泄放量, (kg/h)；t- 泄放压力下的饱和温度 (°C)；λ- 常温下隔热材料的导热系数 (W/m·K)；H_V- 在泄放压力下液体的蒸发潜热 (kJ/kg, 低压 93kJ/kg 不能用)；A- 容器的受热面积 (m²)，按下列公式计算 (D₀ 外径, m；L 长度, m，h 容器内最高液位, m)；对半球形封头的卧式容器 A=π·D₀·L；对椭圆形封头的卧式容器 A=π·D₀·(L+0.3D₀)；对立式容器 A=π·D₀·h；对球形容器 A=0.5π·D₀² 或从地面起到 7.5m 高度以下所包括的外表面积, 取二者中较大的值；δ- 保温层厚度 (m)。

2.1.4 方法 4: 盛装液化气体的容器安全泄放量^[3]

规范^[3]附录 B 第 B.7 章节, 介质为易爆液化气体或位于有可能发生火灾环境下工作的非易爆液化气体的容器, 安全泄放量分有、无绝热保温层两种情况计算, 设计中常按照有完整的绝热保温层 (例如火灾条件下, 保温层不被破坏) 时依据式 5 计算:

$$W_n = \frac{2.61 \times (650-t) \lambda \cdot A_r^{0.82}}{\delta q} \quad (\text{式 5})$$

2.1.5 方法 5: 液化气体容器和管道系统安全泄放量^[4]

规范^[4]附录 E 第 E1.3 章节, 可燃液化气体或者位于有可能发生火灾环境下工作的非可燃液化气体的容器在有完善的绝热保温层时, 安全泄放量也是按照式 3.1-4.1 计算。但需要注意的是, 在规范^[4]中公式 E-4 中的“t”与规范^[3]中公式 B.4 中的“t”单位不同: 规范^[3]中公式 B.4: t- 泄放压力下的饱和温度 (°C)；规范^[4]中公式 E-4: t- 泄放压力下的饱和温度 (K)。

因此, 尽管公式一样, 但因此符号“t”单位不同, 故方法 4 (规范^[3]中公式 B.4) 计算所得数值要比方法 5 (规范^[4]中公式 E-4) 计算所得数值稍大。

2.1.6 方法 6: 安全泄放量的计算^[5]

①规范^[5]附录 A 第 A.1.2 火灾情况根据真空绝热深冷容器的绝热系统在火灾工况中的损坏程度不同给出了不同的计算公式, 结合国内 LNG 气化站工程实际, 推荐选用真空绝热容器的绝热系统完好或部分完好,

但夹层真空已丧失, 且外部遭遇火灾或遭遇 922K 高温的工况给出的公式 A.9 进行计算; ②放散量按式 6 计算:

$$W_s = 3.6H/q \quad (\text{式 6})$$

2.2 翻滚工况

2.2.1 翻滚现象简述

翻滚工况是引发 EAG 泄放量产生的另一种极端工况, 属于 LNG 储存时的一个严重的事故工况。1971 年意大利的 LNG 储罐发生翻滚对储罐产生巨大破坏后, 人们开始关注翻滚现象。LNG 翻滚的前提是必须先要产生分层现象, 倘若 LNG 中含有不溶性气体如氮, 氦等气体, 也是造成易翻滚的一个原因, 当液体含氮量不小于 1% 且储存时间较长, 对于采用立式 LNG 储罐的气化站而言, 发生翻滚的可能性就会较大。

2.2.2 翻滚工况泄放量计算方法

国内标准^[6]附录 I 及欧洲标准 BS EN1473-2007 附录 B 均给出了翻滚引起的气体排放流量计算公式。

参考书^[7]给出翻滚工况下容器的安全放散量宜取正常日蒸发量的 250 倍, 依据国内外公开发表的相关文献资料以及国内工程中 LNG 储罐不会全年处在夏季最高气温环境的实际情况, 笔者建议采用 100 倍计算且 V_T 的取值考虑为 LNG 储罐自然蒸发从环境吸热产生的 BOG 量。

综合以上分析, 翻滚工况下的泄放量按式 7 计算:

$$V_B = 100 \times \frac{N_{\text{储罐}} \times V_{\text{储罐}} \times \rho_{\text{LNG}} \times \text{BOR}_{\text{储罐}}}{24} \quad (\text{式 7})$$

式中: N_{储罐}- 储罐数量 (座)；V_{储罐}- 储罐有效容积 (m³)；BOR_{储罐}- 储罐日蒸发率 (wt%)；ρ_{LNG}- 储存介质 LNG 的密度 (kg/m³)。

3 计算方法比较

火灾工况下的几种计算方法, 方法 2~6 其计算原理一样, 不同点有以下几点: ①方法 2 中容器处于火灾工况下与火焰接触的湿表面积计算取值较其他方法小; ②方法 4 中隔热材料导热系数单位为 kJ/m·h·°C, 而其他方法为 W/m·K, 注意换算; ③方法 5 中温度“t”单位为 K (热力学温度), 经过与方法 4 及方法 6 的比较分析可知, 规范^[4]给出的方法 5 中“t”单位应为 °C (摄氏温度), 原规范^[4]属于笔误, 注意更正; ④将方法 6 中各公式进行合并可知与方法 3 公式基本一致, 不同点在于常数值的微小差别。通过以上比较可知手册^[2]给出的方法 3 计算结果应为最大。

4 实例计算

火灾工况下, 站内 LNG 储罐及管道均会处于火灾

环境中,因此火灾工况下,LNG 储罐 EAG 放散量按方法 1~6 分别计算,管道 EAG 放散量按方法 3 计算。

以某 LNG 气化站项目为例,EAG 量计算基本参数见表 1。将表 1 中相关参数分别代入各公式中,统计算结果见表 2。根据表 2,可知火灾工况下容器及管道的最大 EAG 放散量为: $G_{\text{容器}}+G_{\text{管路}}=233.3\text{kg/h}+62.5\text{kg/h} < V_B=1196.7\text{kg/h}$,故本例以翻滚工况下放散量 1196.7kg/h 做为 EAG 安全放散量及 EAG 加热器的选型计算依据。同时根据 GB 50028-2006《城镇燃气设计规范》第 9.4.16 条,EAG 加热器选型宜按照最大泄放量的 1.5 倍确定,故本例 EAG 加热器设计能力取 $1800\text{Nm}^3/\text{h}$,最终推荐 2 座 $900\text{Nm}^3/\text{h}$ 并联使用。

5 结论

①在 LNG 气化站的设计中,储罐多采用固定深冷绝热储罐,无论是多层缠绕真空容器还是珠光砂填充真空容器^[8],其抽真空装置都处在容器底部,都会在火灾工况下迅速失效,故方法 6 比较贴合工程实际,EAG 放散计算应首选该方法,但因方法 3 计算结果稍大于方法 6,因此需采取方法 6 进行计算验证,并选取较大值,但均需满足方法 1 的最小泄放能力;
②EAG 安全放散计算需要比较火灾工况和翻滚工况的计算值,并以两者中的较大者作为 EAG 加热器的选型依据,避免 EAG 加热器设计能力低于工程实际可能出现的最大 EAG 安全放散量,从而威胁整站安

全生产。

参考文献:

- [1] GB/T 20368-2012. 液化天然气 (LNG) 生产、储存和装运 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2013.
- [2] 张德江,王怀义,刘绍叶. 石油化工装置工艺管道安装设计手册第一册设计与计算. 第四版 [M]. 北京: 中国石化出版社,2009.
- [3] GB150.1~150.4-2011. 压力容器 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012.
- [4] TSG D0001-2009. 压力管道安全技术监察规程 - 工业管道 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2009.
- [5] GB/T 18442.1~18442.6-2011. 固定真空绝热深冷压力容器 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012.
- [6] GB/T 22724-2008. 液化天然气设备与安装陆上装置设计 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2009.
- [7] 顾安忠等. 液化天然气技术 [M]. 北京: 机械工业出版社,2003.
- [8] 何启友等. LNG 加气站、气化站 EAG 产生量计算方法分析 [J]. 城市燃气,2017,03(505).

表 1 LNG 气化站 EAG 量计算基本参数表

变量	含义	取值	变量	含义	取值
$N_{\text{储罐}}$	站内储罐数量	2	t_i	最高泄放压力下对应饱和温度	-135.6°C
$V_{\text{储罐}}$	储罐有效容积	150	λ	隔热材料导热系数	$0.025\text{W/m}\cdot\text{K}$
$BOR_{\text{储罐}}$	储罐日蒸发率	0.3%	δ	保温层厚度	0.25m
ρ_{LNG}	LNG 密度	462.1kg/m^3	H_v	泄放压力下气化潜热	551.8kJ/kg
P_w	储罐操作压力	0.40MPa (g)	D_0	储罐内径	3.2m
P_m	最高泄放压力	0.748MPa(a)	H	储罐最高液位	20m
Z	泄放条件下压缩因子	0.9297	M	EAG 相对分子质量	17.88g/mol
T_a	最高环境温度	313.65K	$\lambda_{\text{空气}}$	干空气在常压、253K~922K 下平均导热系数	$0.043\text{W/m}\cdot\text{K}$

表 2 极端工况下 LNG 气化站 EAG 量计算结果表

方法	计算结果 kg/h	换算为标态气量 Nm^3/h	备注
容器火灾工况计算结果			
1	173.3	119.7	
2	56.9	39.3	
3	233.3	161.1	
4	64.8	44.8	
5	45.2	31.2	
6	199.5	137.8	
管道火灾工况计算结果			
	62.5	43.2	
容器翻滚工况计算结果			
	1732.9	1196.7	