

LNG 储罐压力安全阀泄放量的计算探讨

马国印¹, 王乃民¹, 顿张静¹, 陈 健¹, 周家和¹

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461)

摘要:基于 API 和 GB 规范, 对 LNG 储罐的泄放量计算方法进行总结并比较不同。分别对 API 和厂家指导手册就公制和美制单位下的储罐压力安全阀的泄放量计算方法进行详细介绍, 拟合排放系数关于绝对压力比的计算公式, 结果表明拟合公式计算结果与厂家计算值相近。基于某实际工程项目应用, 将规范、指导手册、拟合公式计算结果相比较, 结果具有较好的一致性。通过对不同规范及厂家标准的比较和计算, 可增强工程设计人员对储罐和压力安全阀泄放量的进一步认识, 并提供计算指导。

关键词:LNG 储罐; 压力安全阀; 泄放量; 排放系数; 拟合公式

中图分类号:TE65

文章编号:1000-0682(2024)04-0098-04

文献标识码:B

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.019

Research on calculation of relieving capacity of LNG tank pressure relief valve

MA Guoyin¹, WANG Naimin¹, DUN Zhangjing¹, CHEN Jian¹, ZHOU Jiahe¹

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: Based on API and GB specifications, the calculation methods for relieving capacity of LNG storage tank were summarized and compared. The calculation methods of relieving capacity for storage tank pressure relief valve in SI units and UCS units were introduced in detail according to API and the manufacturer's handbook, and the calculation formula for the absolute pressure ratio of the discharge coefficient was fitted. The results showed that the calculation results of the fitting formulas were similar to those calculated by the manufacturer. In addition, a certain engineering project was applied to compare the calculation results of the specification, manufacturer handbook and the fitting formula, which have good consistency. It can enhance the engineering designer's further understanding of the relieving capacity of storage tanks and pressure safety valves, and provide calculation guidance.

Keywords: LNG Tank; pressure relief valve; relieving capacity; discharge coefficient; fitting formula

0 引言

LNG 低温储罐作为接收站的关键设备, 其安全稳定运行是工艺系统设计的核心。储罐内存放 LNG 为饱和液体, 温度为 $-155\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -163\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设计压力为微正压。在工程设计中, 储罐压力指气相空间的压力, 通常采取以下措施来避免超压现象:

- (1) 调节 BOG 压缩机负荷维持罐压;
- (2) 开启压力泄放阀将超压 BOG 排至火炬系统;
- (3) 通过储罐压力安全阀排至大气。

其中, 储罐压力安全阀作为储罐最后一道防护措施, 其选型和设计至关重要。规范^[1-4]和文献^[5-8]对 LNG 储罐安全阀的超压储罐泄放量进行了说明, 但针对安全阀的选型和泄放量的计算没有详细的计算。

该文在调研规范和厂家指导手册的基础上, 分别对储罐和安全阀的泄放量进行了详细介绍, 拟合排放系数关于绝对压力比的计算公式, 并结合某工

收稿日期: 2024-03-07

第一作者: 马国印(1993—), 男, 河南浚池人, 硕士研究生, 仪控工程师, 研究方向为仪表专业相关工作。

工程项目进行实际应用计算,为工程设计人员提供参考。

1 储罐及安全阀泄放量的确定

安全阀型式分为弹簧式、平衡式和先导式,由于安全阀的低温工作环境、储罐操作压力波动范围较大、要求密封性能好、以及安全阀入口管线压力损失较大、出口管线背压较高等因素,先导式安全阀成为安全阀选型的首选。在进行安全阀泄放量设计时,需分别计算储罐和安全阀的泄放量,从而确定安全阀的能力和数量。

1.1 储罐泄放量的确定

储罐运行时,造成罐内超压的因素有:(1)向罐内注入 LNG 时,罐内蒸汽被液体置换;(2)环境中热量渗入储罐,LNG 气化使罐内压力升高;(3)大气压降低造成储罐压力升高;(4)罐外发生火灾;(5)翻滚现象的发生;(6)其他如罐内低压泵循环造成的热量输入,高压补气阀门异常打开等。当然这些事件并不是完全独立,可能是组合发生的,不同的组合是确定不同超压措施能力的影响因素,而确定储罐的泄放量主要取决于外部火灾和翻滚工况下的泄放量(两者取较大值)。

1.1.1 外部火灾工况

根据 API 2000,采用公制单位时,外部火灾工况的泄放量计算如下:

$$q = 906.6 \times \frac{Q \times F_1}{L} \times \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (1)$$

$$Q = 43\,200 \times S^{0.82} \quad (2)$$

式中: q 为泄放量(Nm^3/h); Q 为吸收热量(W); F_1 为环境因子; L 为气化潜热(J/kg); T 为绝对温度(K); M 为蒸发气的相对分子质量; S 为湿表面积(m^2),等于地上高度至 9.14 米立式壳体的表面积,对于安装在地面上的储罐,底板面积不包含在湿表面积内。

根据国标 GB/T 20368,采用公制单位时,外部火灾工况下压力泻放阀的泻放能力按照下式计算:

$$H = 71\,000 \times FA^{0.82} + H_n \quad (3)$$

$$W = \frac{H}{L} \quad (4)$$

式中: H 为总热流量(W); F 为环境因子,1; A 为储罐与火焰接触的湿表面积(m^2); H_n 为冷罐的正常漏热量(W); L 为储罐液体的气化潜热(J/g); W 为泻放条件下产品蒸发气的泻放能力(g/s)。

其中,对于环境因子,有绝热或热防护的环境因

子计算如下:

$$F = \frac{U(904 - T_f)}{71\,000} \quad (5)$$

式中: U 为总传热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$); T_f 为在泻放条件下容器内介质温度($^\circ\text{C}$)。

1.1.2 翻滚工况

API 2000 中规定安全阀的选型不考虑翻滚现象产生蒸汽的排放,虽然这也是造成超压的原因之一,但还没有一个公认的方法来计算这部分蒸汽的排放要求。根据规范 EN 1473 附录 B12 或 GB/T 22724 附录 D11 的说明,在没有具体工程设计模型的前提下,翻滚状况下 BOG 产生量可保守采用下式计算:

$$W = 100W_1 \quad (6)$$

$$W_1 = V \times \rho \times b/24 \quad (7)$$

式中: W 为泄放量(kg/h); W_1 为正常气化量(kg/h); V 为最大液位体积(m^3); ρ 为储液密度(kg/m^3); b 为日蒸发率,取值 0.05%。

1.2 安全阀泄放量的确定

规范^[2]中规定安全阀泄放过程流体的流动状态分为临界流和亚临界流类别,依据以下公式进行判断。

$$\frac{P_2}{P_1} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (8)$$

$$P_1 = P_s + P_o + P_A - P_L \quad (9)$$

$$P_2 = P_B + P_A \quad (10)$$

式中: P_1 为安全阀入口压力(kPaA); P_2 为安全阀出口压力(kPaA); k 为绝热指数; P_s 为整定压力(kPaG); P_o 为超压(kPaG); P_A 为大气压,取值 101.325 kPaG ; P_L 为安全阀入口管线压力损失(kPaG); P_B 为安全阀背压(kPaG)。

安全阀进出口压力若满足式(8),则为临界流,否则为亚临界流。对于低压常压储罐来说,采用的先导式安全阀泻放流动过程大多为亚临界流。因此此处不讨论临界流的情况。

1.2.1 API 2000 计算方法

对于亚临界流,规范^[1]通过实验对流量给出了计算公式,对于公制单位:

$$K_d = \frac{q_a}{q_{th}} \quad (11)$$

$$q_{th} = 125.15 \times P_1 \times A \times F \times \sqrt{\frac{1}{M \times Z \times T}} \quad (12)$$

$$F = \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (13)$$

式中: K_d 为排放系数或亚临界阀门系数; q_a 和 q_{th} 分别为实际和理论流量(Nm^3/h); P_1 和 P_2 分别为安全阀的入口和出口绝对压力(kPaA); A 为流通面积(cm^2); T 为温度(K); M 为相对分子质量; Z 为压缩因子。

对于美制单位,计算公式如下:

$$q_{th} = 278\,700 P_1 \times A \times F \times \sqrt{\frac{1}{M \times Z \times T}} \quad (14)$$

式中: q_{th} 为理论流量(ft^3/h); P_1 为入口绝对压力(psia); A 为流通面积(in^2); T 为温度(R); M 为相对分子质量; Z 为压缩因子。计算时需把单位转换为对应的量纲,否则会造成计算结果错误。

1.2.2 某厂商指导手册计算方法

查阅厂家指导手册,对于公制单位,计算公式如下:

$$W_1 = 5.6 P_1 \times K_d \times A \times F \times \sqrt{\frac{M}{Z \times T}} \quad (15)$$

$$V_1 = 125.15 P_1 \times K_d \times A \times F \times \sqrt{\frac{1}{M \times Z \times T}} \quad (16)$$

式中: W_1 和 V_1 为排放流量,单位分别为 kg/h 和 Nm^3/h ; P_1 为入口绝对压力(bara); A 为流通面积(mm^2); T 为温度(K); M 为相对分子质量; Z 为压缩因子。

对于美制单位,计算公式如下:

$$W_2 = 735 P_1 \times K_d \times A \times F \times \sqrt{\frac{M}{Z \times T}} \quad (17)$$

$$V_2 = 4645 P_1 \times K_d \times A \times F \times \sqrt{\frac{1}{M \times Z \times T}} \quad (18)$$

式中: W_2 和 V_2 为排放流量,单位分别为: lb/h 和 ft^3/min ; P_1 为入口绝对压力(psia); A 为流通面积(in^2); T 为温度(R); M 为相对分子质量; Z 为压缩因子。

实际应用时,设计人员或厂商首先会根据数据表要求的储罐泻放量计算得到所需的最小喉径面积 A_{\min} ,随后厂家根据自身标准,向上选取合适的值,这样既满足了储罐安全阀的泻放能力,同时也方便厂家选型。

对于排放系数 K_d ,厂商一般根据自己的产品情况而定。对于上述两种单位的情况,国内某主流厂家排放系数的计算如下:

$$K_d = 0.650 \times (P_2/P_1)^{-0.349} \quad (19)$$

API 2000 根据不同实验绘制了排放系数典型比例限定图,该文通过最小二乘法进行非线性拟合,得到排放系数 K_d 与绝对压力比 P_2/P_1 的拟合方程,如下所示:

$$K_d = 0.782\,4 \cdot \exp(-2.115 \cdot P_2/P_1) + 0.606\,7 \quad (20)$$

拟合方程的确定系数 R-square 为 1,回归平方和为 7.732×10^{-6} ,本方程与规范中最佳排放系数曲线具有良好的拟合度。

将拟合方程、厂家曲线公式绘制在 $P_2/P_1 - K_d$ 曲线中,如图 1 所示,横标为出口压力与入口压力的比值,纵标为排放系数。其中,中间实线为拟合方程曲线,虚线为 $\pm 5\%$ 范围区间曲线,下方曲线为厂家排放曲线。

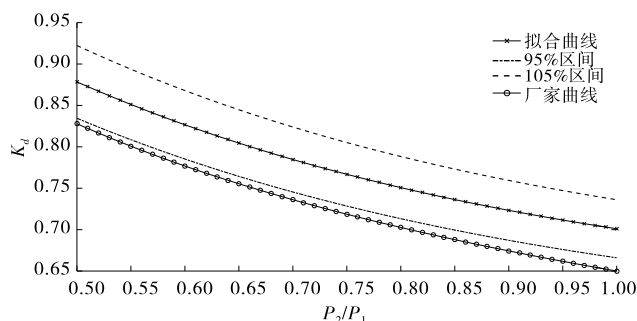


图 1 $P_2/P_1 - K_d$ 曲线

根据图 1,通过比较厂家曲线和拟合方程曲线,可以发现厂家曲线与拟合曲线的 95% 区间比较接近,且厂家的计算更加保守一些,因此在计算实际流量时,可用排放系数 K_d 的 95% 乘以理论流量。另外,通过曲线,可以发现适当地减小绝对压力比 P_2/P_1 的值,可以增大排放系数 K_d 的值,也就是说,可以通过减小入口管线压降值或降低出口背压值,增大排放系数从而增大安全阀实际泄放量。

2 项目应用

2.1 储罐泄放量的计算

在某 LNG 项目中,罐容 $200\,000\,\text{m}^3$ 低温常压立式储罐,内罐直径 85 米,最高液位 38.51 米,日蒸发率 0.05%,罐底离地面高度为 2.6 米。安全阀尺寸为 $12'' \times 16''$ 150# RF,计算过程中所用参数如表 1 所示。

表 1 计算所用参数

参数	入口压力	出口压力	整定压力	泻放压力	温度
单位	kPaA	kPaA	kPaG	kPaG	K
值	127.325	102.365	29	31.9	114.6
参数	流通面积	分子质量	压缩因子	绝热指数	F
单位	cm^2	-	-	-	-
值	729	16.1	0.961	1.333	1.393

湿表面积计算如下:

$$S = \pi d H = \pi \times 85 \times (9.14 - 2.6) = 1746 \text{ m}^2 \quad (21)$$

式中: d 为储罐内径(m); H 为暴露在火焰中的高度(m)。

根据 API 2000, 在外部火灾工况工况下, 计算得到泄流量:

$$q = 906.6 \times \frac{43\,200 \times S^{0.82} \times F}{L} \times \sqrt{\frac{T}{M}} \\ = 121\,376 \text{ kg/h} \quad (22)$$

根据 GB/T 20368, 在外部火灾工况工况下, 计算得到泄流量:

$$W = \frac{H}{L} = \frac{71\,000 \times F A^{0.82} + H_n}{L} = 227\,116 \text{ kg/h} \quad (23)$$

对于翻滚工况, 计算得泄流量:

$$W = 100 W_1 = 100 V \times \rho \times b / 24 = 190\,936 \text{ kg/h} \quad (24)$$

通过上述计算, 可以看出 API 和 GB 计算火灾时的泄流量计算方法不同, 且结果相差较大。在计算外部火灾工况下所需压力泻放能力, API 2000 与 ISO 28300 方法相同, 而 GB 20368 与 NFPA 59A 方法相同, 两者对于暴露在火焰下的湿表面积计算相同, 但是由于其他不同的假设如储罐绝热、消防、排放等因素从而导致热输入量不同, 从而导致泄流量不同。

对于 GB 中计算火灾和翻滚工况下的泄流量, 前者大于后者, 分析原因可能是在计算时未考虑绝热防护, 把环境因子当做 1 来计算, 但实际工程中环境因子要小于 1, 经重新评估后, 考虑绝热后环境因子约等于 0.82, 计算得到泄流量为 186 519 kg/h, 在选择超压设计安全阀泄流量时应按照泄流量大的工况进行计算。

另外, 不同储罐的泄流量还与承台高度、罐容(直径和最高液位)以及日蒸发率有关系, 因此, 在计算不同项目储罐泻流量要根据项目参数计算确定。

2.2 储罐安全阀泄流量的计算

通过计算, 对于 API 2000、厂家指导手册以及拟合曲线计算的阀门泄流量(已换算成 kg/h) 计算如表 2 所示。

表 2 计算结果

API 2000		指导手册		拟合函数	
公制	美制	公制	美制	公制	美制
57 343	57 182	55 295	55 161	58 209	58 046

通过对 API 2000、厂家指导手册以及拟合函数的计算结果对比, 安全阀的泄流量在 57 000 kg/h

左右, 为增加结果保守性, 此处按泄流量最小值进行安全阀设计, 取 55 161 kg/h。安全阀在布置过程中, 安装数量应遵从 $N+1$ 备用原则, 储罐的超压泄流量按照翻滚工况下的泄流量选为 190 936 kg/h, 相除约等于 3.5, 故此处设计安全阀数量为 $4+1$ 。

对于拟合函数, 在选择排放系数时, 按照拟合函数的 95% 进行计算, 比厂家实际的排放系数略大, 故安全阀泄流量略大。按照翻滚工况下的最大泄流量 190 936 kg/h, 相除约等于 3.3, 与上述 $4+1$ 的设置原则相同, 故可作为选型设计的依据。

3 总结

该文结合规范 API2000 和某厂商指导手册, 对储罐超压泄流量和安全阀的泄流量的计算方法进行了详细介绍, 并通过某项目实际应用, 计算结果与厂家实际计算结果相近, 可以指导安全阀配置选型。

(1) 对于储罐泄流量的计算, 在火灾工况下 API 和 GB 有着不同的计算方法。超压泄流量应以火灾和翻滚工况下的较大值为准, 与环境因子、承台高度、储罐直径和液位高度有关。

(2) 安全阀入口压力损失和出口背压, 对安全阀的排放能力影响较大, 设计时应结合实际情况尽量减小两者的值, 计算时应根据实际情况选取压力损失和背压。

(3) 排量系数的选取, 主要受安全阀的结构形式及开启高度的影响, 安全阀的实际排量系数是通过试验测定。结合规范 API 2000 提供数据, 拟合了安全阀排放系数 K_d 关于 P_2/P_1 的函数, 函数具有较好的拟合度, 可为实际排放量计算提供参考。

参考文献:

- [1] API 2000 - 2020: Venting atmosphere and low - pressure storage tanks[S]. Washington. 2020.
- [2] API 521 - 2020: Pressure - relieving and depressing system[S]. Washington. 2020.
- [3] NFPA 59A - 2019: Standard for the production, storage, and handling of liquefied natural gas [S]. Washington. 2019.
- [4] 中国石油天然气集团公司, 中国石油化工集团公司. 液化天然气接收站工程设计规范: GB 51156 - 2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [5] 刘浩, 周永春. LNG 低温储罐压力安全系统设计[J]. 化工设计, 2007, 17(1): 7 - 10.
- [6] 刘书华. 浅议 LNG 低温储罐安全阀泄流量的确定[J]. 化工设计, 2011, 21(6): 16 - 17.

(下转第 109 页)

- Research, 2021, 60(5): 2232 – 2248.
- [2] 顾幸生, 周冰倩. 基于 LNS – DEWKECA 算法的多模态工业过程故障检测 [J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 90 – 97.
- [3] 江升, 旷天亮, 李秀喜. 基于稀疏过滤特征学习的化工过程故障检测方法 [J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4698 – 4709.
- [4] 蓝艇, 朱莹, 俞海珍, 等. 基于缺失数据的误差生成策略及其在故障检测中的应用 [J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 143 – 149.
- [5] 索寒生, 蒋白桦, 宫向阳, 等. 基于 SFA 的工业过程质量相关的在线故障检测 [J]. 控制工程, 2019, 26(6): 1222 – 1227.
- [6] 吕鹏飞, 闫云聚, 荔越. 基于马氏距离的改进核 Fisher 化工故障诊断研究 [J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 143 – 155.
- [7] 张成, 高宪文, 李元. 基于 k 近邻主元得分差分的故障检测策略 [J]. 自动化学报, 2020, 46(10): 229 – 238.
- [8] A J M L, B C K Y, A S W C, et al. Nonlinear process monitoring using kernel principal component analysis [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(1): 223 – 234.
- [9] HUANG G B, ZHU Q Y, SIEW C K. Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks. In: IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2004. Proceedings. Budapest: IEEE, 2004, 985 – 990.
- [10] 崔鹏宇, 王泽勇, 邱春蓉, 等. 基于多尺度排列熵与双核极限学习机的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(05): 142 – 147.
- [11] YU H, YUAN K, LI W, et al. Improved butterfly optimizer – configured extreme learning machine for fault diagnosis [J]. Complexity, 2021, 2021(4): 1 – 17.
- [12] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23(3): 715 – 734.
- [13] 王晓东, 盛庆博, 孙立群, 等. 基于 AdaBoost 算法的光伏电站中长期发电预测 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(02): 65 – 69.
- [14] DOWNS J J, VOGEL E F. A plant – wide industrial process control problem [J]. Computers and Chemical Engineering, 1993, 17(3): 245 – 255.
- [15] 陈晓, 王瑞璇, 王晶, 等. 基于混合型判别分析的工业过程监控及故障诊断 [J]. 自动化学报, 2020, 46(8): 64 – 78.
- [16] 毛志勇, 黄春娟, 路世昌, 等. 基于 KPCA – MPSO – ELM 的矿井突水水源判别模型 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 111 – 116.
- [17] SENTHIL T, DEEPIKA J, NITHYA R. Detection and classification of breast cancer using improved grey wolf algorithm [J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2021, 1084(1): 012023.
- [18] 刘洪基. 基于混沌 PSO 的大数据智能加权 K 均值聚类算法 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(04): 311 – 319.
- [19] 高文欣, 刘升, 肖子雅, 等. 柯西变异和自应权重优化的蝴蝶算法 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(15): 43 – 50.
- [20] 杨如民, 雷倩, 余成波. 基于蝙蝠算法 – 随机森林分类算法和脉搏波的精神疲劳检测算法 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(04): 1495 – 1501.
- [21] 李辉, 李欣同, 贾嵘, 等. 基于分形和概率神经网络的水电机组故障诊断 [J]. 水力发电学报, 2019, 38(3): 92 – 100.
- [22] ZHANG N, LI Y, YANG X, et al. Bearing fault diagnosis based on BP neural network and transfer learning [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1881(2): 022084.
- [23] 杨泰春, 陶建峰, 覃程锦, 等. 采用支持向量机的非对称阀控液压缸模型预测控制 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 93 – 100.



(上接第 101 页)

- [7] 周琳琳, 刘庆胜. LNG 储罐压力控制系统设计 [J]. 石油工程建设, 2016, 40(5): 39 – 41.
- [8] 贾保印, 纪明磊, 刘禹岑. LNG 储罐安全阀选型探讨 [J]. 山东化工, 2017, 5(46): 117 – 119.
- [9] BS EN 1473 – 2016: Installation and equipment for liquefied natural gas – design of onshore installations [S]. Brussels. 2016.
- [10] ISO 28300 – 2008: Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Venting of atmospheric and low – pressure storage tanks [S]. Switzerland. 2008.
- [11] 全国石油天然气标准化技术委员会. 液化天然气设备与安装陆上装置设计: GB/T 22724—2022 [S]. 2022.
- [12] 全国石油天然气标准化技术委员会. 液化天然气 (LNG) 生产、储存和装运: GB/T 20368—2021 [S]. 2021.