

文章编号: 1000-8241(2020)12-1422-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 油罐承压能力对油品蒸发损耗的影响

方洁 黄维秋 吕爱华

常州大学石油工程学院·江苏省油气储运技术重点实验室

**摘要:** 油罐油品蒸气排入大气将会造成能源浪费、环境污染,其中压力和温度变化是引起油罐内油品蒸发的主要因素。针对油罐的呼吸损耗,以 API 理论计算公式为基础,推导出压力罐对呼吸损耗的最低降耗率的计算公式,从而提出通过增加油罐呼吸阀控制压力来减少呼吸损耗,甚至完全消除小呼吸损耗。分析温度变化对单体烃(丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷及正己烷)和不同油品(93<sup>#</sup>汽油、97<sup>#</sup>汽油、石脑油、煤油、柴油及番禺原油)膨胀因子的影响情况,结果表明:在设计储罐时,存储不同组分、不同种类的油品,应采用不同的设计压力并选用合适压力的呼吸阀,通过增加壁厚来增加控制因子,从而减少储罐呼吸损耗。研究成果可为油罐设计和油库管理提供理论参考。(图 7,参 23)

**关键词:** 油罐; 蒸发损耗; 控制压力; 温差; 压差

中图分类号: TE972

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.12.016

## Influence of bearing capacity of oil tank on evaporation loss of oil products

FANG Jie, HUANG Weiqiu, LYU Aihua

School of Petroleum Engineering, Changzhou University//Jiangsu Key Laboratory of Oil-Gas Storage and Transportation Technology

**Abstract:** If the oil vapor from the tanks is discharged into the atmosphere, the environment pollution will be caused and the human health will be threatened. Definitely, pressure and temperature changes are the main factors causing evaporation of oil products in the tank. As for the breathing loss of oil tanks, the formula concerning the minimal reduction rate of the breathing loss of pressure tanks was derived based on the API theoretical formula, so as to reduce the breathing loss, even to completely eliminate the small breathing loss, by controlling the pressure with a breather valve of oil tank. According to the analysis on influence of temperature change on expansion factor of monomer hydrocarbon (propane, n-butane, isobutene, n-pentane and n-hexane) and various oil products (93<sup>#</sup> gasoline, 97<sup>#</sup> gasoline, naphtha, kerosene, diesel oil and Panyu crude oil), the results show that when the storage pressure of the tanks is designed for oil products of different types and compositions, tank with different design pressure shall be adopted. In addition, appropriate type of breather valve can be used, or the tank wall can be thickened to increase the control factor, further to reduce the breathing loss of tank. The research results could be used as theoretical reference for oil tank design and oil depot management. (7 Figures, 23 References)

**Key words:** oil tank, evaporation loss, control pressure, temperature difference, pressure difference

油罐无论是处于静置还是收发油过程中均会排放大量油气,如果油气挥发得不到有效控制,则会造成能源浪费、经济损失、环境污染,甚至也存在较大的安全隐患<sup>[1-3]</sup>。油气中含有苯和 VOCs,会对人体健康产生极大损害,甚至引起死亡<sup>[4-8]</sup>。随着 GB 37822—2019《挥发性有机物无组织排放控制标准》、GB 31570—2015《石

油炼制工业污染物排放标准》、GB 31571—2015《石油化学工业污染物排放标准》等标准的相继颁布,环保部《石化行业挥发性有机物综合整治方案》(环发〔2014〕177号)的实施,炼化企业对罐区的 VOCs 治理也越来越重视。目前,石油化工储运罐区 VOCs 治理采用油气连网集中收集治理,中国石油化工股份有限公司炼油事

业部发出“关于印发《石油化工储运罐区 VOCs 治理项目油气连通工艺实施方案及安全措施指导意见》的通知”,统筹考虑了储罐区油气收集问题。但油气联网后存在一些安全问题,如企业现有的内浮顶罐大都按照常压罐来设计和管理,若将内浮顶罐进行密闭改造并集中收集排放气,其受力及承压能力需要重新核定<sup>[9]</sup>。在油罐运行过程中,罐内油品的真实蒸气压、温度、气体空间体积、油罐进出油料顺序、油罐运行状况、油罐承压能力等都会影响油品蒸发损耗。刘敏敏等<sup>[10]</sup>在分析储罐呼吸损耗应对措施时,提出应在低温或降温时进行收发油作业,可以降低日平均油品表面温度,进而通过减小油品的蒸气压来减少储罐的大呼吸损耗。Farhan 等<sup>[11]</sup>研究发现,根据油品蒸气压加入合适浓度的添加剂,可以有效减少油品中轻烃组分的挥发,最高降耗率可达到 47%。Moncalvo 等<sup>[7]</sup>针对因大气温度变化导致低压储罐呼吸损耗进行分析研究,并提出了相应的计算模型。丁丽芹等<sup>[12]</sup>分析了甲醇储罐发生损耗的原因,对比了不同的 VOCs 治理技术,经过综合考虑,建议采用工艺简单、投资较低的吸收法回收甲醇。王永强等<sup>[13]</sup>研究得出储罐储存不同油品时,不同因素对挂壁损耗的影响显著性从大到小依次为罐壁锈蚀程度、边缘密封类型、液体种类及罐壁材质,并提出了相应的减耗措施。陈亚楠等<sup>[14]</sup>通过分析浮顶罐的排放机理,以美国 EPA 推荐的 AP-42 计算公式为基础,选取某汽油内浮顶罐为例,计算了不同工况下罐内损耗值的变化,针对不同的损耗提出了减排措施。刘华欣等<sup>[15]</sup>根据 AP-42 公式,研究浮顶罐结构、油品性质、周转量及环境因素 4 个方面对内浮顶罐 VOCs 排放的影响,研究结果表明内浮顶罐的浮盘构造、周转量、罐壁锈蚀程度及边缘密封形式是内浮顶罐的 VOCs 损耗的主要影响因素,并提出了相应的降耗措施。Huang 等<sup>[16]</sup>基于 CFD 数值模拟方法,揭示了拱顶罐运行过程中内部复杂的传质机理,分析了不同季节下太阳辐射对拱顶罐呼吸损耗的影响,研究结果为减少储罐呼吸损耗提供了理论支持。随着中国工业制造水平逐步提高,低温储罐储运技术也越来越多地应用于化工企业,如 2003 年扬子石化建成  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$  低温丙烯贮罐;2005 年中海壳牌南海石化设计制造了 3 台  $3\,000 \text{ m}^3$  的丙烯低温球罐,设计压力达到了  $2.2 \text{ MPa}$ <sup>[17]</sup>。使用低温储罐储存成品油虽然能够有效减少蒸发损耗,但是低温储罐运行和维护成本

较高,因此一般使用常温储罐储存成品油。

除了油罐承压能力可调、可控外,其他参数都是由油品固有物性参数或储运工艺/条件确定,因此难以改变。目前,关于油罐承压能力对油品蒸发损耗影响的相关研究仍是薄弱环节,油罐内油品的蒸发损耗与罐承压能力息息相关。在常见的常压储罐中,球罐的承压能力最大,卧式罐次之,拱顶罐承压最小。如果油罐的承压能力大,油罐通过呼吸阀进行的呼吸次数会减少,可以有效降低油罐的呼吸损耗。对于拱顶罐或已经进行密闭改造的内浮顶罐,进油时压力阀开启,呼出油气,而发油时真空阀开启,吸入空气或补充氮气。由于收发油作业造成的大呼吸蒸发损耗或由于温差引起的小呼吸蒸发损耗,都与油罐的承压能力有关。但油罐的承压能力并非越大越好,因为提高油罐承压能力,油罐壁厚也会相应增加,导致钢材消耗量增大、储罐建设成本增加。基于此,分析了油罐承压能力对油品蒸发损耗的影响,同时研究了油罐承压能力与壁厚的关系。

## 1 油罐呼吸损耗最低降耗率公式

1991 年,美国石油学会(American Petroleum Institute, API)提出油罐呼吸损耗的计算公式:

$$\Delta V_{A,L,b} = V \frac{1}{K} \left( \frac{p_1 + p_2}{1\,380 - 8M_A} \right) \times \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1} + \frac{p_2 - p_1}{p_A + p_P - p_2} - \frac{p_P - p_V}{p_A + p_P - p_2} \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta V_{A,L,b}$  为油品呼吸损耗的体积,  $\text{m}^3$ ;  $V$  为油罐气体空间的容积,  $\text{m}^3$ ;  $K$  为单位换算常数,取 51.6;  $p_1$ 、 $p_2$  分别为状态 1 和状态 2 时油品本体温度下的蒸气压,  $\text{kPa}$ ;  $M_A$  为油气摩尔质量,  $\text{kg/mol}$ ;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为状态 1 和状态 2 时油罐气体空间的绝对温度,  $\text{K}$ ;  $p_A$  为当地大气压,  $\text{kPa}$ ;  $p_P$  为压力阀的控制压力,  $\text{kPa}$ ;  $p_V$  为真空阀的控制压力,  $\text{kPa}$ 。

由式(1)可知,当状态 1 和状态 2 确定时,单位气体空间容积的蒸发损耗体积取决于 3 个参数  $\chi$ 、 $\psi$ 、 $\omega$  的组合,即取决于“ $\chi + \psi = \omega$ ”。其中,  $\chi$  表示由于气体空间温升而引起的体积膨胀,  $\psi$  表示随着油温升高而逸入气体空间的油气引起的体积膨胀,即所谓的“附加蒸发”,  $\omega$  表示油罐呼吸阀控制压力范围内混合气受到压缩而减小的体积。参数  $\chi$ 、 $\psi$ 、 $\omega$  的表达式分别如下:

$$\chi = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{p_2 - p_1}{p_A + p_P - p_2} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{p_P - p_V}{p_A + p_P - p_2} \quad (4)$$

将 $(\chi + \psi)$ 定义为膨胀因子 $\kappa$ ,  $\omega$ 定义为控制因子。对于常压储罐(设计压力小于0.1 MPa,其设置有与大气直接相通的接管),  $\omega = 0$ , 单位气体空间容积的蒸发损耗量与 $\kappa$ 成正比。对于压力油罐(油罐带呼吸阀或能够承压的油罐),  $\omega$ 与 $\kappa$ 的比值即压力罐相对于常压储罐的降耗率。如果 $\omega \geq \kappa$ , 则意味着呼吸蒸发损耗量等于0。为消除小呼吸损耗, 不同地区、不同油品所要求的最低油罐承压能力不同, 对于汽油, 其罐压在10~30 kPa之间变化。

油罐收发油作业时, 除了由于油面高度变化引起的呼吸损耗外, 还存在温度、油气浓度变化引起的呼吸损耗。对于装有呼吸阀的压力油罐的蒸发损耗质量, 可以采用瓦廖夫斯基-契尔尼金公式计算<sup>[18]</sup>:

$$\Delta m_A = \frac{\rho M_A [(p_A + p_V - p) V_1 - (p_A + p_P - p) V_2]}{RT(\bar{p} - p)} \quad (5)$$

$$\bar{p} = p_A + \frac{p_V + p_P}{2} \quad (6)$$

式中:  $\Delta m_A$  为油品呼吸损耗的质量, kg;  $p_A$  为状态1和状态2时油品本体温度下的平均蒸气压, kPa;  $T$  为状态1和状态2时气体空间的平均温度, K;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为状态1和状态2时油罐气体空间的体积, m<sup>3</sup>;  $R$  为通用气体常数, 取8.314 kJ/(kmol·K)。

根据式(5), 如果要求呼吸损耗等于0, 则必须满足:

$$V_2^* = \frac{p_A + p_V - p}{p_A + p_P - p} V_1 \quad (7)$$

式中:  $V_2^*$  为进油到即将产生呼吸损耗的临界气体空间体积, m<sup>3</sup>。

式(7)未考虑温差变化, 因此, 无大呼吸损耗的极限进油量 $\Delta V_1^*$ 为:

$$\Delta V_1^* = V_1 - V_2^* = \frac{p_P - p_V}{p_A + p_P - p} V_1 \quad (8)$$

由于常压储罐 $\Delta V_2^* = 0$ , 因此压力罐相对于常压储罐所减少的呼吸损耗量则为:

$$\Delta m_B = \Delta V_1^* \frac{\rho M_A}{RT} \quad (9)$$

于是, 压力罐的呼吸损耗降耗率 $\varepsilon$ 可由其降耗量与常压储罐损耗量的比值求得, 整理后得:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V_1^*}{V_1 - V_2} = \frac{p_P - p_V}{p_A + p_P - p} \frac{V_1}{V_1 - V_2} \times 100\% \quad (10)$$

在式(10)中,  $V_1 - V_2$ 为进油量。显然, 当 $V_1 - V_2 > \Delta V_1^*$ 时, 进油量越大, 则压力罐的呼吸损耗率越低。假定油罐的容积为 $V_0$ , 安全装油系数为 $\eta$ , 在不考虑油品自身特性参数变化的情况下, 则压力罐对大呼吸损耗的最低降耗率为:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{p_P - p_V}{\eta(p_A + p_P - p)} \times 100\% \quad (11)$$

可见, 适当提高油罐承压能力不仅能完全消除小呼吸损耗, 还能在一定程度上降低大呼吸损耗。

## 2 罐压对小呼吸损耗的影响

在油品储存、运输过程中, 小呼吸损耗是造成固定顶油罐蒸发损耗的重要原因, 尤其是昼夜温差较大地区的小呼吸损耗更严重, 同时还会对油罐氮封正常操作造成干扰。液体的表面温度是影响液体蒸发速率的重要因素, 因此需要对固定顶油罐所处的大气环境温度、油品温度变化、昼夜温差带来的蒸气压变化进行研究<sup>[19]</sup>。

油罐呼吸阀控制的压力或罐设计时考虑油罐自身的压力, 主要包含油品自身的饱和蒸气压、温差引起的压力膨胀、油品蒸发引起的压力膨胀, 尤其在夏季, 温差引起的压力膨胀更为明显。昼夜间油罐内气体空间、油品温度变化决定了油罐内饱和状态下的油气浓度、油罐呼吸气体的体积: 当油品表面温度升高时, 油品加剧蒸发, 油气的呼出体积增大; 当油品表面温度下降, 油气凝结, 空气的吸入体积增大。

根据《石油化工基础数据手册》中单体烃(丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷及正己烷)的饱和蒸气压数据、王英霞等<sup>[20]</sup>测得的油品饱和蒸气压数据, 分别以单体烃(丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷及正己烷)和不同油品(93#汽油、97#汽油、石脑油、煤油、柴油、番禺原油)为例, 分析温度变化对小呼吸损耗的影响。由于油面温度的昼夜温差约等于大气昼夜温差的10%<sup>[19]</sup>, 故取大气温差 $\Delta T$ 分别为10 K(油面温差 $\Delta T' = 1$  K)、20 K(油面温差 $\Delta T' = 2$  K)、30 K(油面温差 $\Delta T' = 3$  K)时, 得到上述不同单体烃和不同油品的饱和蒸气压差和膨胀因子变化曲线(图1~图4, 其中横坐标温度区间均指起始温度、最

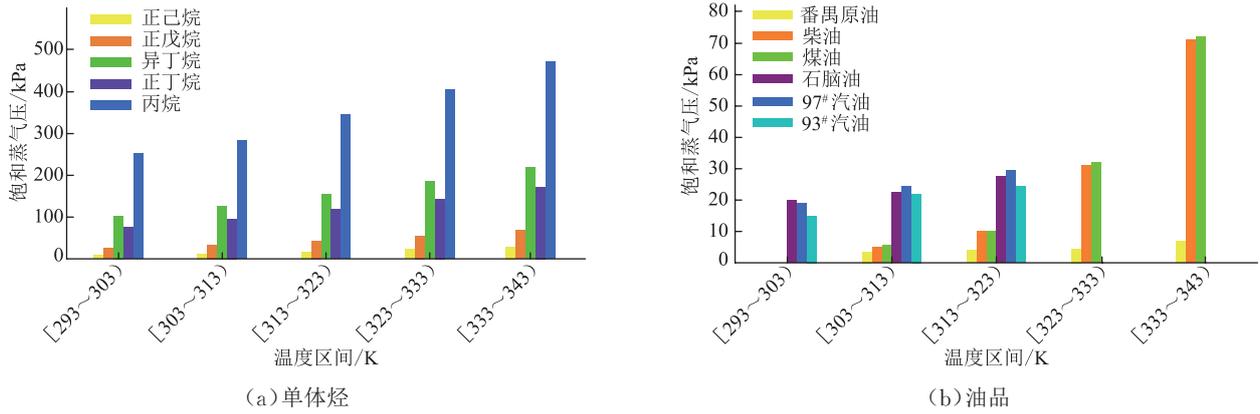


图1 单体烃和不同油品在  $\Delta T=10\text{ K}$  时的饱和蒸气压差变化曲线

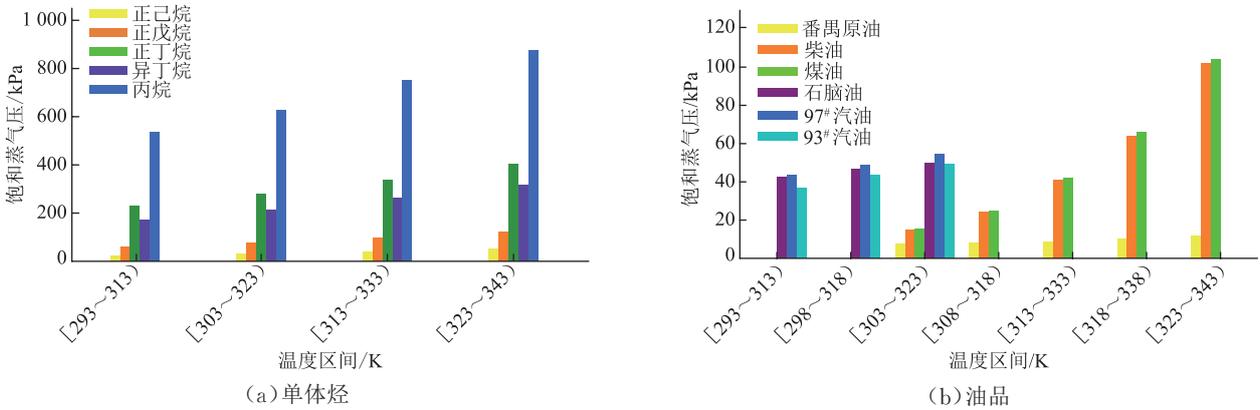


图2 单体烃和不同油品在  $\Delta T=20\text{ K}$  时的饱和蒸气压差变化曲线

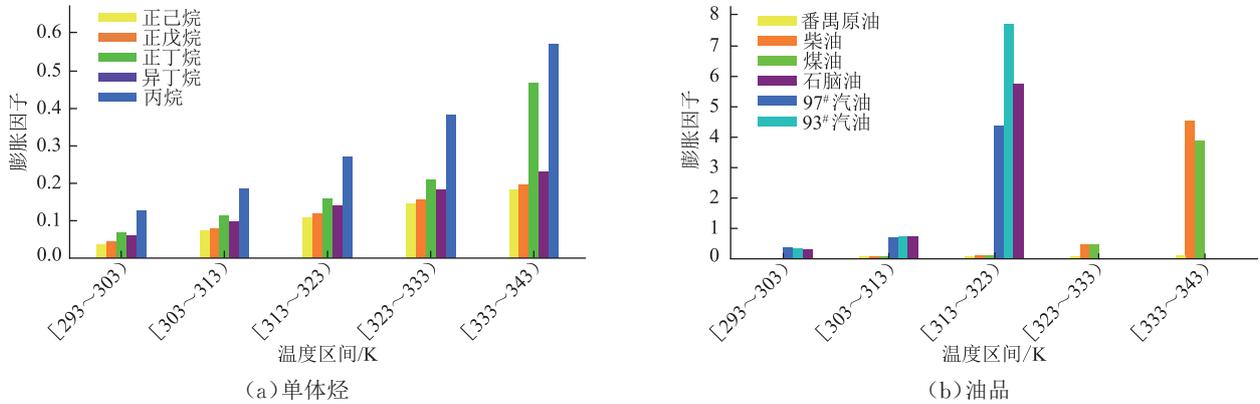


图3 单体烃和不同油品在  $\Delta T=10\text{ K}$  时的膨胀因子变化曲线

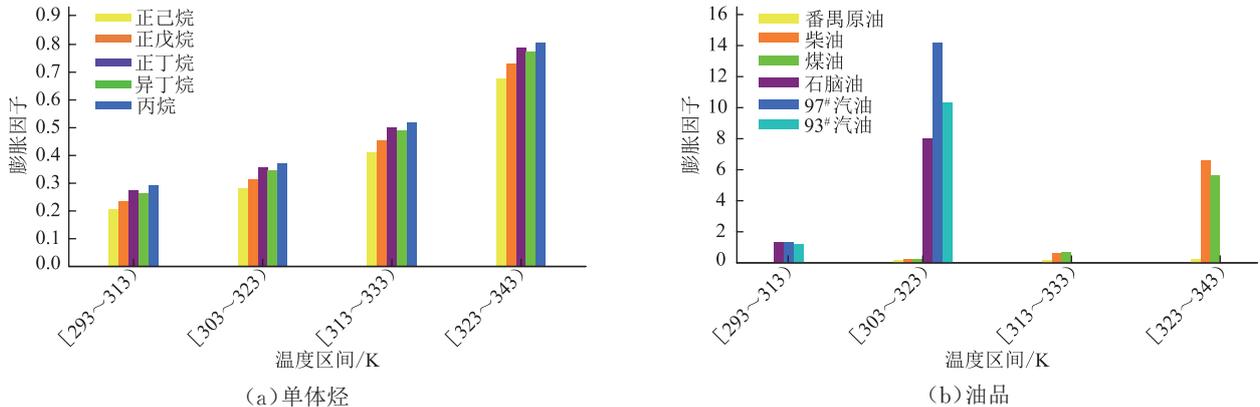


图4 单体烃和不同油品在  $\Delta T=20\text{ K}$  时的膨胀因子变化曲线

终温度下的饱和蒸气压差、膨胀因子,如温度区间为293~303 K是指以293 K为起始温度上升到最终温度为303 K时的饱和蒸气压差和膨胀因子)。

由图1~图4可见:①无论是单体烃还是油品种类,在两种大气温差下,随着温差起点的升高,蒸气压差升高幅度均增大。②单体烃、油品的种类不同,在不同温度区间内,膨胀因子上升幅度不同,如丙烷、异丁烷、柴油及煤油在333~343 K的温度区间内,93<sup>#</sup>汽油、97<sup>#</sup>汽油及石脑油则在313~323 K的温度区间内。因此,在设计储罐罐压时,应针对不同的单体烃、油品种类设计适宜的储罐压力以增大控制因子。③与图1、图2中其他烷烃和油品相比,在温差相同的情况下,丙烷、煤油、柴油蒸气压差上升幅度很大,这意味着在实际储存时,应注意不同地区、不同季节的昼夜温差,因地制宜地选取承压能力合适的油罐。④针对正丁烷和异丁烷,当同一分子式结构式不同时,其饱和蒸气压差、膨胀因子也存在差异,因此在设计储存单体烃的油罐罐压时还应考虑同一分子式结构式不同的情况。

### 3 壁厚对储罐承压能力的影响

在GB 150.1—2011《压力容器》中,规定采用弹性失效准则和第一强度理论进行储罐设计,因此,以周向薄膜应力作为当量强度与许用应力关系建立强度条件,其中薄膜应力以中径作为计算依据。容器内压圆筒中径设计公式为:

$$\frac{p_c}{2\delta} = [\sigma]_t \phi \quad (12)$$

式中:[ $\sigma$ ]<sub>t</sub>为设计温度下圆筒材料的许用应力,MPa; $\phi$ 为焊接接头系数,取0.9; $p_c$ 为计算压力,MPa; $\delta$ 为圆筒的计算厚度,mm。

由此,可以得出:

$$p_c = 2\delta[\sigma]_t \phi \quad (13)$$

根据式(13),油罐的承压能力与壁厚有关,提高壁厚可提高油罐的承压能力。由于油罐焊接后很难进行焊缝的焊后热处理,因此需以不进行焊后热处理且保证焊接质量的条件来限制油罐的最大壁厚。在中国,油罐罐壁最小厚度是根据油罐容积确定的,容积小于3 000 m<sup>3</sup>的油罐壁厚为4~5 mm,容积为5 000~10 000 m<sup>3</sup>的油罐壁厚为5~7 mm,容积为20 000~50 000 m<sup>3</sup>的油罐壁厚为8~10 mm;国外则根据油罐

直径来规定壁厚尺寸<sup>[18]</sup>。目前,中国容积5 000 m<sup>3</sup>油罐的最大壁厚规定为32 mm,美国、日本规定的最大壁厚均为38 mm,英国则规定为40 mm。

钢制油罐是目前应用最广泛的储油容器,常采用Q235B碳素结构钢。在确定油罐材料许用应力的情况下,以Q235B碳素结构钢为例,当壁厚小于40 mm时,[ $\sigma$ ]<sub>t</sub>为160 MPa,油罐承压能力与壁厚的关系式为 $p_c = 288\delta$ 。

但如果提高呼吸阀(在压力罐中,一般为安全阀)的压力,为了安全,将会使得油罐的设计壁厚以及罐顶厚度增加,从而导致储罐的造价提高,故在实际应用中,选择合适的油罐承压之后,还需进行油库设计的经济性分析和储罐自身的安全性校核<sup>[21-23]</sup>。

## 4 实例应用

在油库设计中选择油罐罐型时,应综合考虑油库类型、油品性质、周转频繁程度、储油容量、建设成本、建筑材料供应情况等多种因素<sup>[18]</sup>。选取拱顶罐、球罐为例,以期对油库选择油罐类型提供参考。

### 4.1 拱顶罐

根据GB 17930—2016《车用汽油标准》,拱顶罐取汽油的雷特蒸气压 $p_{RV} = 60$  kPa,当气体空间的最低温度为268 K、气体空间昼夜温差为40 K、油面最低温度为288 K以及油面温度的昼夜温差约等于大气昼夜温差的10%<sup>[18]</sup>(油面温度为4 K)时,则一般拱顶罐呼吸阀控制压力正压(压力阀的压力) $p_p = 2.0$  kPa、负压(真空阀的压力) $p_v = -0.5$  kPa,根据式(11)可以计算得出其降耗率为4.74%。如果 $(p_p - p_v)$ 提高至10.0 kPa,则降耗率约为18.6%;如果 $(p_p - p_v)$ 可以提高至62 kPa,则可消除小呼吸损耗。

以容积为1 000 m<sup>3</sup>的拱顶罐为例,储存油品体积为罐容的1/2, $p_p = 2.0$  kPa、 $p_v = -0.5$  kPa,在考虑控制因子的情况下,选取夏季气体空间的最低温度为298 K、气体空间昼夜温差为45 K、油面最低温度为328 K、油面昼夜温差为4.5 K,分别计算93<sup>#</sup>汽油、97<sup>#</sup>汽油、石脑油、煤油、柴油及番禺原油在夏季时气体空间的净膨胀率 $\gamma$ (图5,其中 $\gamma = \kappa - \omega$ );再分别计算93<sup>#</sup>汽油、97<sup>#</sup>汽油、石脑油、煤油、柴油及番禺原油在夏季时罐压随油温的变化情况(图6)。

由图5可见:①随着温度升高,93<sup>#</sup>汽油、97<sup>#</sup>汽油、

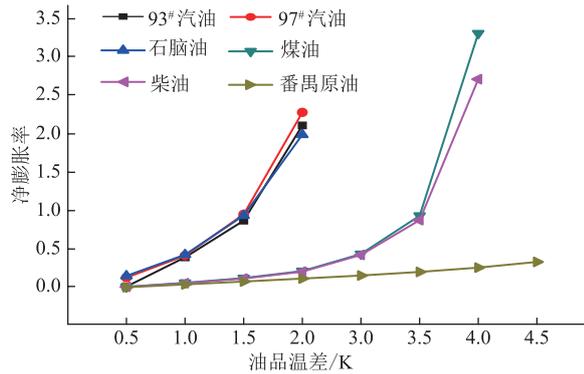


图5 不同油品在不同温差下的净膨胀率变化趋势图

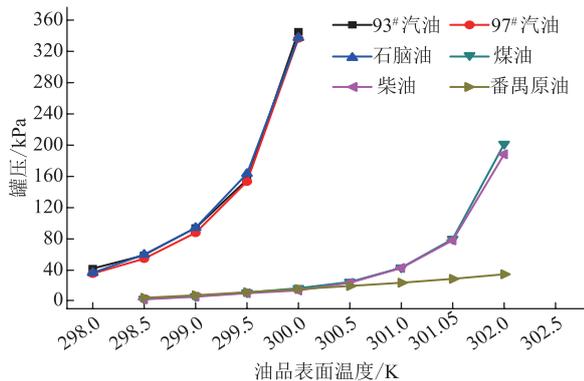


图6 拱顶罐罐压随不同油品表面温度的变化趋势图

石脑油、煤油、柴油及番禺原油的净膨胀率逐渐升高,93#汽油、97#汽油及石脑油在油品表面温度为299 K左右时,净膨胀率达到0.5;煤油、柴油在油品表面温度为300.5 K左右时,净膨胀率达到0.5。此时拱顶罐的罐压达到峰值,在设计时需要考虑呼吸阀、安全阀的控制范围以及储罐壁厚的因素。②将图5(考虑控制因子)与图1、图2(未考虑控制因子)进行对比,可以得出考虑控制因子后,造成油罐小呼吸损耗的温度条件有所提高,即在考虑呼吸阀、安全阀压力后,在合适的温度范围内,小呼吸损耗降低。③93#汽油、97#汽油及石脑油在油品表面温度为299 K左右时,净膨胀率达到0.5,对应图6来看,可知此时罐压为100 kPa左右,而油品表面温度从299 K升至300 K,罐压增加了250 kPa,若想通过改变油罐壁厚来控制罐压,结合上述油罐的承压能力与壁厚的关系,至少增加1 mm的计算壁厚(此数据未考虑焊接处磨损厚度和安全性校核);煤油和柴油在油品表面温度为300.5 K左右时,净膨胀率达到0.5,对应图5来看,可知此时罐压为35 kPa左右,而油品表面温度从300.5 K升至302 K,罐压增加170 kPa,若想通过改变储罐壁厚来控制罐压,结合上述油罐承压能力与壁厚的关系,至少需增加0.75 mm左右的计算壁厚。

上述分析是在 $p_p - p_v = 2.5$  kPa的控制条件下,

如果 $(p_p - p_v)$ 增至26.0 kPa,则93#汽油、97#汽油及石脑油在油品表面温度为300 K左右时,净膨胀率达到0.5;煤油、柴油在油品表面温度为301 K左右时,净膨胀率达到0.5。可见,通过考虑呼吸阀和安全阀的控制范围(也可在同等条件下),提高储罐净膨胀率,达到小呼吸损耗的条件,从而减少了油罐的小呼吸损耗。

综上,提高呼吸阀控制压力和提高罐自身承压能力可以减少储罐小呼吸损耗。目前,中国某些城市在挥发性有机物综合整治实施方案中,提出挥发性有机液体储存设施应在符合安全的前提下,采用压力罐、低温罐、高效密封的浮顶罐或安装顶空联通置换油气回收装置的拱顶罐。这种做法是通过顶空联通来减少温差变化对罐压的影响,从而降低小呼吸损耗。

#### 4.2 球罐

球罐是承受内压能力相对最高(2~10个大气压)的压力油罐,具有受力状态好、承压能力高、降低油品蒸发损耗效果显著的特点,主要用于储存低沸点液化气(如丙烷、丁烷)及其他某些高挥发性的化工产品。假设某球罐承受内压为1 013.25 kPa(10个大气压),储存单体烃容积为罐容的1/2时,取单体烃表面温度的昼夜温差约等于大气昼夜温差的10%<sup>[18]</sup>,分别计算丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷及正己烷在夏季时罐压随单体烃表面温度的变化情况(图7)。

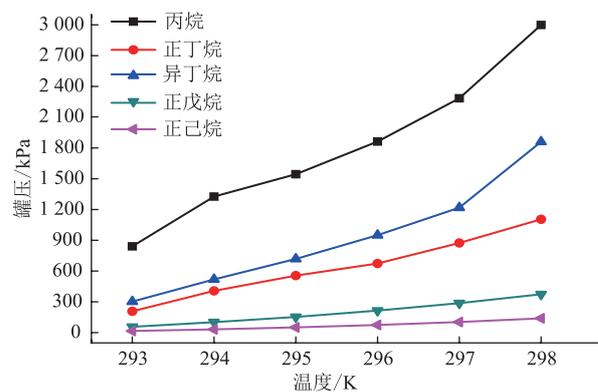


图7 球罐罐压随单体烃表面温度的变化趋势图

根据图7可见,丙烷、正丁烷、异丁烷分别在298 K、338 K、328 K左右时,达到球罐最大可承受压力,而正戊烷、正己烷则在日常温度下达不到球罐最大可承受压力。若球罐设计承受内压为1 519.9 kPa(15个大气压),则丙烷、异丁烷分别在318 K、338 K左右时,达到球罐最大可承受压力,而正丁烷、正戊烷、正己烷则在常温下达不到球罐最大可承受压力。因此,提高球罐罐压可以减少球罐小呼吸损耗,与上述拱顶罐研究结

果相一致。这说明无论何种油罐罐型,在设计过程中,可以通过增加储罐壁厚和提高呼吸阀控制压力来提高储罐的承压能力,从而降低小呼吸损耗。

## 5 结论

结合 API 理论公式、瓦廖夫斯基-契尔尼金公式,推导出储油罐呼吸损耗最低降耗率公式,表明通过调节呼吸阀的压力范围或在许用应力范围内提高储罐承压能力,可以减小甚至完全消除油罐的小呼吸损耗,并可在一定程度上降低大呼吸损耗。针对不同油品种类、不同组分,通过推导的公式计算温度变化对单体烃和油品的膨胀因子的影响情况,计算结果可以在设计储罐时为储罐设计压力、储罐呼吸阀压力范围及储罐壁厚的选用提供参考依据,并以此减少储罐呼吸损耗。

### 参考文献:

- [1] 黄维秋. 油气回收基础理论及其应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 9-12.  
HUANG W Q. Fundamental theory of oil vapor recovery and its application[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 9-12.
- [2] WU D Y, CHEN Z. Quantitative risk assessment of fire accidents of large-scale oil tanks triggered by lightning[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 63: 172-181.
- [3] TAUSEEF S, ABBASI T, POMPAPATHI V, ABBASI S. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 120: 331-338.
- [4] GURUNATHAN T, MOHANTY S, NAYAK S K. Hyperbranched polymers for coating applications: a review[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2016, 55(1): 92-117.
- [5] MUKERJEE S, SMITH L A, THOMA E D, OLIVER K D, WHITAKER D A, WU T, et al. Spatial analysis of volatile organic compounds in South Philadelphia using passive samplers[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016, 66(5): 492-498.
- [6] BROWN K K, SHAW P B, MEAD K R, KOVEIN R J, VOORHEES R T, BRANDES A R. Development of the chemical exposure monitor with indoor positioning (CEMWIP) for workplace VOC surveys[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2016, 13(6): 401-412.
- [7] MONCALVO D, DAVIES M, WEBER R, SCHOLZ R. Breathing losses from low-pressure storage tanks due to atmospheric weather change[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 702-705.
- [8] AFSHAR-MOHAJER N, FOX M A, KOEHLER K. The human health risk estimation of inhaled oil spill emissions with and without adding dispersant[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 924-932.
- [9] 黄维秋, 吕成, 郭淑婷, 吕爱华, 纪虹, 赵书华. 油气排放及回收的研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(2): 421-432.  
HUANG W Q, LYU C, GUO S T, LYU A H, JI H, ZHAO S H. Research progress on oil vapor emission and recovery[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2019, 35(2): 421-432.
- [10] 刘敏敏, 刘芳, 王永强, 段潍超. 石化企业储罐大呼吸损耗影响因素的分析[J]. 化工环保, 2017, 37(3): 357-361.  
LIU M M, LIU F, WANG Y Q, DUAN W C. Analysis on factors affecting breathing loss of storage tank in petrochemical industry[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2017, 37(3): 357-361.
- [11] FARHAN M M, AL-JUMIALY M M, AL-MUHAMMADI A D, ISMAIL A S. Development of a new method for reducing the loss of light hydrocarbons at breather valve of oil tanks[J]. Energy Procedia, 2017, 141: 471-478.
- [12] 丁丽芹, 念利利, 袁晓东, 李孟阁, 梁生荣. 甲醇储罐的蒸发损耗分析及对策[J]. 天然气化工, 2019, 44(5): 107-111.  
DING L Q, NIAN L L, YUAN X D, LI M G, LIANG S R. Analysis of evaporation loss of methanol storage tank and countermeasures[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44(5): 107-111.
- [13] 王永强, 刘敏敏, 刘芳, 陈曦, 吴鹏伟, 姜珊. 石化企业储油浮顶罐挂壁损失影响因素分析[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(6): 1195-1202.  
WANG Y Q, LIU M M, LIU F, CHEN X, WU P W, JIANG S. Analysis on factors affecting withdrawal loss of oil floating roof tanks in petrochemical industry[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2018, 34(6): 1195-1202.
- [14] 陈亚楠, 赵东风, 韩丰磊, 卢磊, 欧阳振宇. 浮顶罐挥发性有机物排放量计算及控制措施[J]. 油气储运, 2018, 37(5): 551-555.

- CHEN Y N, ZHAO D F, HAN F L, LU L, OUYANG Z Y. Emission calculation and control measures of the volatile organic compounds in floating roof tanks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(5): 551-555.
- [15] 刘华欣, 孙中举, 刘昕, 段滩超, 欧阳振宇, 王永强. 石化企业内浮顶罐挥发性有机物排放量核算与影响因素分析[J]. 化工环保, 2019, 39(5): 592-596.
- LIU H X, SUN Z J, LIU X, DUAN W C, OUYANG Z Y, WANG Y Q. Emission accounting of VOCs from floating roof tanks in petrochemical industry and analysis of influencing factors[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2019, 39(5): 592-596.
- [16] HUANG W Q, WANG S, JING H B, WANG C, SUN X H, ZHOU N, et al. A calculation method for simulation and evaluation of oil vapor diffusion and breathing loss in a dome roof tank subjected to the solar radiation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107568.
- [17] 任大为. 丙烯罐区 3 000 m<sup>3</sup> 低温球罐的选用[J]. 广州化工, 2016, 44(5): 169-171.
- REN D W. Selection of 3 000 m<sup>3</sup> low temperature spherical tank in propylene tank farm[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44(5): 169-171.
- [18] 郭光臣, 董文兰, 张志愿. 油库设计与施工[M]. 东营: 石油大学出版社, 1991: 311-325.
- GUO G C, DONG W L, ZHANG Z L. Oil depot design and management[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1991: 311-325.
- [19] 张加成, 刘艺, 胡乃科, 刘超, 姜豪. 轻质油品罐区油气密闭收集系统的设计及安保措施[J]. 油气储运, 2016, 35(2): 167-172.
- ZHANG J C, LIU Y, HU N K, LIU C, JIANG H. Design and safety measures of oil/gas sealed collection system in the light oil tank farm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(2): 167-172.
- [20] 王英霞, 黄维秋, 郑京禾, 杨光, 钟璟, 赵晨露. 油品参数测定在油气排放评估中的应用[J]. 环境工程, 2014, 32(8): 143-146.
- WANG Y X, HUANG W Q, ZHENG J H, YANG G, ZHONG J, ZHAO C L. Application of oil parameter measurement in oil and gas emission assessment[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 32(8): 143-146.
- [21] 王兆利, 黄维秋, 纪虹, 赵晨露, 李丽, 张齐正. 拱顶罐收油过程中油气扩散排放的数值模拟[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(2): 371-378.
- WANG Z L, HUANG W Q, JI H, ZHAO C L, LI L, ZHANG Q Z. Numerical simulation of vapor diffusion and emission in loading gasoline into dome roof tank[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2017, 33(2): 371-378.
- [22] 黄维秋, 陈凤, 吕成, 张高, 黄风雨. 基于风洞平台实验的内浮顶罐油气泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 425-433.
- HUANG W Q, CHEN F, LYU C, ZHANG G, HUANG F Y. Numerical simulation of oil vapor leakage and diffusion from inner floating roof tank based on wind tunnel platform experiment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 425-433.
- [23] 李飞, 黄维秋, 纪虹, 吕成, 景海波, 郭淑婷, 等. 浮盘和气窗位置对内浮顶罐正己烷蒸发损耗的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 410-416.
- LI F, HUANG W Q, JI H, LYU C, JING H B, GUO S T, et al. Influence of floating roof and vent locations on n-hexane evaporative losses of internal floating-roof tanks[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(2): 410-416.
- (收稿日期: 2018-07-15; 修回日期: 2020-10-11; 编辑: 李在蓉)
- 
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“储油罐石油蒸发及油气排放扩散的数值模拟及风洞实验研究”, 51574044; 江苏省重点研发计划“产业前瞻与共性关键技术”, BE2018065.
- 作者简介:** 方洁, 女, 1994年生, 助理工程师, 2020年硕士毕业于常州大学油气储运工程专业, 现主要从事油品蒸发损耗及油气泄漏扩散方向的研究工作。地址: 江苏省常州市武进区滆湖中路21号常州大学石油工程学院, 213164。电话: 15861177237。Email: fangxyjoyce@sina.com
- 通信作者:** 黄维秋, 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 2004年博士毕业于南京理工大学应用化学专业, 现主要从事油气回收基础理论及其应用等方面的科研与教学工作。地址: 江苏省常州市武进区滆湖中路21号常州大学石油工程学院, 213164。电话: 0519-85280250。Email: hwwq213@cczu.edu.cn