

原油储罐温室气体排放核算方法研究

孙东¹, 林日亿², 苗明强², 周广响³, 冯洪庆², 范璐¹, 郑炜博¹

(1. 中国石化胜利油田技术检测中心, 山东东营 257061; 2. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要:原油储罐是油气生产上游环节中不可忽略的温室气体逸散排放源。为探究原油储罐温室气体排放情况,对储罐温室气体排放过程进行分析,建立基于气体状态方程、连续性方程和绝热条件下的能量方程的储罐小呼吸温室气体排放核算模型,修正 Vasquez-Beggs(VB)闪蒸排放模型,得到一次、二次沉降罐和净化罐温室气体排放核算方法,并与实测数据、API经验公式计算值进行对比。结果表明:储罐温室气体排放的理论计算与实际情况吻合较好,所修正的VB模型与小呼吸损耗模型可准确地评估原油储罐温室气体的排放量;储罐小呼吸损耗与闪蒸损失相比不能忽略,验证了模型的准确性。

关键词:原油沉降罐; 温室气体; 核算方法; 排放因子

中图分类号:X 322;X 171 **文献标志码:**A

引用格式:孙东,林日亿,苗明强,等.原油储罐温室气体排放核算方法研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):148-154.

SUN Dong, LIN Riyi, MIAO Mingqiang, et al. Study on greenhouse gas emission accounting methods for crude oil storage tanks[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2017,41(4):148-154.

Study on greenhouse gas emission accounting methods for crude oil storage tanks

SUN Dong¹, LIN Riyi², MIAO Mingqiang², ZHOU Guangxiang³,
FENG Hongqing², FAN Lu¹, ZHENG Weibo¹

(1. Shengli Oilfield Technology Testing Center, SINOPEC, Dongying 257061, China;
2. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. SINOPEC Engineering Incorporation, Beijing 100101, China)

Abstract: The crude oil storage tank is an important emission source of greenhouse gases, which cannot be negligible during the period of upstream oil and gas production. In order to explore the situation of greenhouse gas emission of the storage tank, we analyze the emission process, and then establish the standing loss model of storage tank based on the gas state equation, continuity equation and energy equation under adiabatic condition. The Vasquez-Beggs flashing model is corrected to obtain the accounting method of greenhouse gas emissions from first sedimentation tank, secondary sedimentation tank and purification tank, and it is compared with the monitoring data and API empirical formula. The result shows that the theoretical calculation is in good agreement with the real fact, and the modified V-B model is accurate enough to predict the emission of the greenhouse from the storage tank. The tank breathing loss cannot be negligible compared with the flash loss, which validates the accuracy of the model.

Keywords: crude oil tank; greenhouse gas; accounting method; emission factor

石油石化行业是中国能源消耗和温室气体 (GHG) 排放的主要行业之一,其节能减排对中国实

现碳排放目标具有重要意义。油气生产过程排放的温室气体主要为二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)及少量的氧化亚氮(N₂O)。在油气上游生产环节中,原油储罐是主要的温室气体逸散排放源,约占总逸散排放量的40%^[1-2]。储罐挥发出的气体中含有大量的甲烷。甲烷是一种主要的温室气体,以单位分子数而言,甲烷的温室效应比二氧化碳的大25倍^[3]。大量的甲烷逸散到环境中,造成温室效应的同时也浪费了大量的能源。原油储罐气体的挥发可分为:闪蒸排放、大呼吸排放和小呼吸排放。原油的闪蒸原理广泛应用于原油的稳定和炼化过程,闪蒸计算也一直是石油领域的研究热点。目前其主要的闪蒸计算方法有:经验关联式法、实验室测量法和软件模拟法。Vasquez等^[4]拟合出计算原油气油比的经验关联式(VB),但VB关联式最初是用来计算油藏在泡点压力下的气油比,计算储罐的闪蒸排放并不适合^[5]。Valko等^[6]利用Valko-McCain关联式(VM)计算储罐闪蒸排放虽然参数范围符合要求,但由于关联式考虑的影响因素单一,导致模型精度不高^[5]。目前对于储罐的闪蒸排放研究主要集中在计算储罐闪蒸出气体的总量,对于储罐的大小呼吸排放,美国石油学会(API)^[7]给出的大呼吸公式包含的影响因素有油品损耗量、收油量、油罐周转情况和原油品质等;小呼吸公式主要考虑了原油蒸汽压、油罐尺寸、原油液面高度、大气平均温差、原油品质等参数。储罐的温室气体主要来源于储罐的闪蒸排放,大小呼吸排放产生的温室气体较少^[8]。Smith等^[9]得出了科罗拉多地区储罐总排放气体的平均排放因子,但并没有对储罐排放气体中温室气体的含量进行研究。Hendler等^[10]计算出储罐排放挥发性有机物(VOC)的排放因子,但没有对储罐排放气体的规律和模型进行更深入的研究。对于储罐闪蒸排放的研究方面,国外相关关联式主要集中在计算储罐闪蒸出气体的总量,对于闪蒸出的气体中温室气体的含量并无深入研究,且考虑的影响因素单一,模型精度不高;国外研究方法、计算内容和结论不完全适合国内油气生产。为了解原油储罐温室气体排放状况,笔者通过对储罐闪蒸排放、大小呼吸排放温室气体过程进行分析,基于气体状态方程、连续性方程和绝热条件下的能量方程,建立储罐温室气体排放核算模型,并与实测数据、API经验公式计算值进行对比验证。

1 储罐温室气体排放形式

原油储罐温室气体的排放形式分为3种:闪蒸

排放(flash loss)、大呼吸排放(working loss)和小呼吸排放(breathing loss),见图1。闪蒸排放是指当原油从分离器进入储罐时,由于压力突然降低,高压下溶解在原油里的天然气,由液相“闪蒸”到气相的过程。大呼吸排放是指在油罐收发油的过程中,由于储罐油液面的改变所导致的排放。小呼吸排放则是由季节、昼夜温差变化所导致的排放。储罐温室气体的排放是一种无组织的逸散排放,由于影响因素较多,规律性不强,核算较为困难。为建立储罐温室气体排放模型须对储罐进行相应的测试。

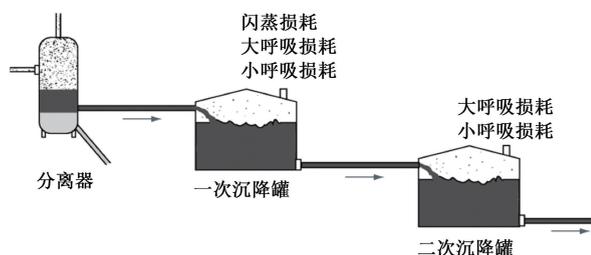


图1 储罐温室气体排放示意图

Fig. 1 Crude oil tank greenhouse gas emission chart

在储罐实际的运行状态中,闪蒸排放、大呼吸和小呼吸排放这3种形式通常是同时发生并相互影响的。由于影响因素复杂,现有计算公式所需参数较多,在碳核算过程中使用受到限制,目前有实地监测法、排放因子法等核算方法来核查储罐排放量,但数据相差较大。

2 数学模型建立

2.1 小呼吸模型分析

小呼吸排放是指储罐在静止储存状态下,随着外界环境(气温、压力)的变化所导致的排放。影响小呼吸排放的因素主要有:原油性质、气象条件、储罐大小等。

基于气体状态方程和扩散方程等公式推出了新的计算固定顶罐的小呼吸损耗的公式^[7],表示为

$$L_s = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) H_{vo} K_s K_E W_v \quad (1)$$

式中, L_s 为小呼吸损耗量,kg/d; D 为罐顶呼吸阀直径,m; H_{vo} 为罐内气体空间当量高度,m; K_s 为排出气体饱和因子; K_E 为气体空间膨胀因子,1/d; W_v 为罐内气体密度,kg/m³。

API MPMS Chapter19新版中^[7]依然沿用了此公式,但在应用气体状态方程时,忽略了原油表面蒸发的过程,见图2。

$$P_{1a} = P_{ATM} + P_{BV}, \quad (2)$$

$$p_{2a} = p_{ATM} + p_{BP} \quad (3)$$

式中, p_{1a} 和 p_{2a} 分别为状态 1 和状态 2 下的绝对压力, kPa; p_{ATM} 为大气压力, kPa; p_{BV} 和 p_{BP} 为状态 1 和状态 2 下的气体表压, kPa。

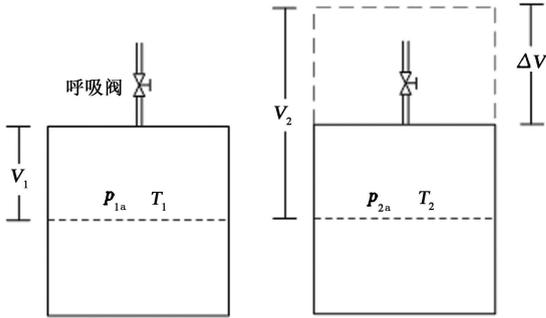


图 2 储罐小呼吸公式推导示意图

Fig. 2 Formula derivation of crude oil tank standing loss

气体总物质的量为

$$n_T = \frac{p_V}{RT} \quad (4)$$

式中, n_T 为气体总物质的量, mol; p_V 为气体压力, kPa; R 为摩尔气体常数, 8.3145 J/(mol · K); T 为温度, K。

小呼吸损耗可计算为

$$L_s = \rho_C \Delta V y_V \quad (5)$$

式中, ρ_C 为气体密度, kg/m³; ΔV 为油罐呼吸前后体积差, m³/d; y_V 为排出油蒸汽体积分数, %。

而在一个呼吸周期中小呼吸损耗的计算式为

$$L_s = K A_L t_D (y_V^0 - y_V) \quad (6)$$

式中, K 为油罐液体表面与气体空间之间的综合传质系数, kg/(m² · d); A_L 为储罐内液面面积, m²; t_D 为时间, d; y_V^0 为饱和油蒸气体积分数, %。

二者相等, 有

$$\rho_C \Delta V y_V = K A_L t_D (y_V^0 - y_V) \quad (7)$$

这实际上是认为油罐的小呼吸损耗由物质的扩散引起。这与联合站沉降罐损耗的实际情况完全不同, 联合站一次沉降罐储存原油具有周期短、温度高和蒸发量大等特点, 原油的静止损耗通常只有呼的过程, 没有吸的过程, 所以在原油表面挥发成分的浓度和呼出气体中的浓度是相等的, 即 $y_V^0 = y_V$ 。按照文献[7]中的推导, 损耗为 0, 即 $L_s = 0$, 这不符合实际情况。

文献[7]中的小呼吸公式基于扩散理论, 对于呼气量大的一次沉降罐不再适用, 因此须推导新型小呼吸模型。

油气损耗的过程是一个动态过程, 蒸发损耗过

程如图 3 所示。可由气体状态方程、连续性方程和绝热条件下的能量方程来描述。

图 3 中, 1-1 面为油罐所储存原油的液面, 0-0 面为油罐刚呼出气体的界面。油田联合站中的一次、二次沉降罐和净化油罐在实际运行过程中大都是同时进出液体的, 并且工艺要求所储液体温度较高, 因此这些油罐大都是在不断地呼出气体。假定在所研究的时间段气体的呼出(流出)是稳态的, 即流出速度不变; 气体在从液面到离开油罐的过程为绝热过程。

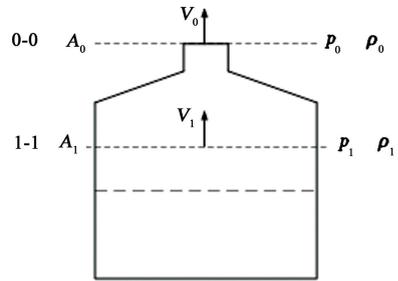


图 3 油气损耗原理示意图

Fig. 3 Principle of oil and gas loss

根据理想气体的状态方程:

$$\rho_1 = \frac{M_V p_1}{RT_1} \quad (8)$$

连续性方程:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_0 V_0 A_0 \quad (9)$$

绝热条件下气体的能量方程:

$$\frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0 g} + \frac{V_0^2}{2g} \quad (10)$$

可推得油田储油罐小呼吸损耗为

$$L_s = \rho_0 A_0 V_0 = \rho_0 A_0 \sqrt{\frac{\frac{2kR}{k-1} (T_1 - T_0)}{\left\{ 1 - \left[\left(\frac{p_0}{p_1} \right) \left(\frac{A_0}{A_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \right]^2 \right\} M_V p_0}} \quad (11)$$

式中, ρ_1 、 ρ_0 分别为气体在 1-1、0-0 处的密度, kg/m³; T_1 、 T_0 分别为气体在两处的温度, °C; p_1 、 p_0 分别为气体在两处的压力, kPa; V_1 、 V_0 分别为气体在两个截面处呼出气体体积, m³; M_V 为气体的平均分子量, g/mol。 A_1 、 A_0 分别为在 1-1、0-0 处横截面积, m²; K 为绝热指数, 无量纲。

公式(11)基于气体状态方程、连续性方程和绝热条件下的能量方程推导而成, 为联合站沉降罐小呼吸损耗的新型计算模型, 综合考虑了联合站油罐具有储存原油周期短、温度高和蒸发量大等特点, 以及原油的静止损耗通常只有呼的过程

而无吸的过程,对于呼气量大的一次沉降罐也有一定的适用性。

2.2 大呼吸模型

大呼吸排放是指储罐收发油过程中油液面改变所致的排放。油罐进油时,由于油面逐渐升高,气体空间逐渐减小,罐内压力增大,当压力超过呼吸阀控制压力时,一定浓度的油蒸气开始从呼吸阀呼出,直至油罐停止收油,所呼出的油蒸气造成油品蒸发的损失。油罐向外发油时,由于油面不断降低,气体空间逐渐增大,罐内压力减小,当压力小于呼吸阀控制真空度时,油罐开始吸入新鲜空气,由于油面上方空间油气未达到饱和,促使油品蒸发加速,使其重新达到饱和,罐内压力再次上升,造成部分油蒸气从呼吸阀呼出。API大呼吸计算公式为

$$L_w = \frac{V_Q K_N K_C K_B W_V}{365} \quad (12)$$

式中, L_w 为大呼吸排放量, kg/d; V_Q 为净工作损失量, kg/a; K_N 为周转系数, 取决于周转期 N ($N \leq 36$, $K_N = 1$; $N > 36$, $K_N = (180 + N) / (6N)$); K_C 为产品因数(原油的 K_C 为 0.75, 精炼石油和单一组分石油产品的 K_C 均为 1); K_B 为通气孔设置校正因子。

2.3 闪蒸排放模型

当液体与气体接触时, 高压条件下气体会溶解到液体中。当液体处于大气环境压力下时, 溶解气体会快速地逸散出来, 这一过程称为“闪蒸”。

原油流经分离器到达储罐时, 由于原油的压力突然降低到环境压力, 会发生闪蒸现象, 甲烷等有机化合物便从原油中逸散出来, 从而导致了温室气体 (CH_4 、 CO_2) 的排放。

用 VB 关联式计算油藏泡点压力和温度下溶解气的气油比, 表示为

$$R_s = C_1 S_{G_s} \left[1.0 + 5.912 \times 10^{-5} \gamma (1.8 T_s + 32) \times \lg \left(\frac{P_s}{790.83} \right) \right] p_s^{C_2} \exp \left(\frac{C_3 \gamma}{1.8 T_s + 492} \right), \quad (13)$$

其中

$$\gamma = 141.5 / \rho - 131.5$$

式中, R_s 为溶解气气油比, m^3/m^3 ; S_{G_s} 为实际条件下分离器气体相对密度(建议缺省值为 0.9); p_s 为分离器工作压力, kPa; T_s 为分离器工作温度, $^{\circ}C$; γ 为储罐原油重度系数; ρ 为原油密度, kg/m^3 ; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为经验系数。

当 $\gamma \leq 30$ 时, $C_1 = 0.0219$, $C_2 = 1.0937$, $C_3 = 25.724$; 当 $\gamma > 30$ 时, $C_1 = 0.0178$, $C_2 = 1.1870$, $C_3 =$

23.931。

计算储罐气油比的经验关系式为

$$\ln R_{ST} = 3.955 + 0.83Z - 0.024Z^2 + 0.075Z^3. \quad (14)$$

式中, R_{ST} 为溶解气气油比, m^3/m^3 ; Z 为经验系数。

通过对现场测试数据进行分析可知, 分离器温度、压力、原油流率、原油组分等参数对温室气体排放的影响基本呈线性关系。在联合站现场所测数据基础上利用多元线性回归方程对各影响因素进行拟合。

将储罐运行参数代入所得拟合公式进行计算, 发现所得数据与实际值相差过大, 经分析发现所拟合公式变量较少, 考虑因素单一, 模型精度较低, 因此须舍弃。

由于自身所建模型误差太大, 考虑对现有模型进行修正。经分析发现, VB 关联式比其他相关模型的精度稍高, 对 VB 关联式进行修正。

将 VB 关联式所得计算结果与模拟结果及现场实测数据进行分析, 发现二者关系密切。对其拟合如下, 见图 4。

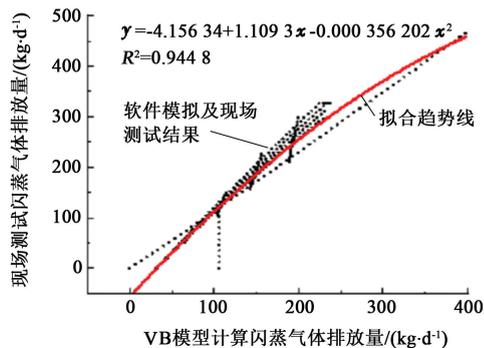


图4 拟合结果图

Fig.4 Fitting result chart

修正所得模型如下:

计算修正后的闪蒸气量为

$$Q_g = -4.15634 + 1.1093QC_1S_{G_c}P_s^{C_2} \exp \left(\frac{C_3\gamma}{1.8T_s + 492} \right) - 0.000356202 \left(QC_1S_{G_c}P_s^{C_2} \exp \left(\frac{C_3\gamma}{1.8T_s + 492} \right) \right)^2, \quad (15)$$

其中

$$S_{G_c} = S_{G_s} \left[1.0 + 5.912 \times 10^{-5} \gamma (1.8 T_s + 32) \lg \left(\frac{P_s}{790.83} \right) \right]. \quad (16)$$

式中, Q_g 为修正后的闪蒸气量, m^3/d ; Q 为储罐日转油量, m^3/d ; S_{G_c} 为分离器气体相对密度(修正到分离器压力为 689.48 kPa)。

修正后的闪蒸温室气体排放量为

$$L_f = Q_g (21M_{w_{CH_4}} X_{CH_4} + M_{w_{CO_2}} X_{CO_2}) / V_s, \quad (17)$$

式中, L_f 为修正后的闪蒸温室气体排放量, kg/d; $M_{w_{CH_4}}$ 为 CH_4 摩尔质量, kg/kmol; $M_{w_{CO_2}}$ 为 CO_2 摩尔质量, kg/kmol; X_{CH_4} 和 X_{CO_2} 分别为闪蒸气体中含 CH_4 和 CO_2 的质量分数, %; V_s 为理想气体在标准条件下的摩尔体积, $m^3/kmol$ 。

2.4 储罐温室气体排放模型

2.4.1 一次沉降罐

对于一次沉降罐和二次沉降罐, 由于其液位保持不变, 所以在其运行过程中有小呼吸损耗, 而无大呼吸损耗。由于油罐与上一级容器之间存在压差, 所以有闪蒸损失。沉降罐损耗为闪蒸损失与小呼吸损耗之和, 即: 总损耗 = 闪蒸损失 + 小呼吸损耗, 表示为

$$L_1 = L_f + L_s. \quad (18)$$

式中, L_1 为一次沉降罐总损耗, kg/d。

2.4.2 二次沉降罐/净化罐

对于二次沉降罐和净化罐, 其液位是不断变化的, 所以在其运行过程中既有小呼吸损耗, 又有大呼吸损耗。由于油罐与上一级容器之间不存在压差, 所以无闪蒸损失。沉降罐损耗为大、小呼吸损耗之和, 即: 总损耗 = 小呼吸损耗 + 大呼吸损耗, 表示为

$$L_2 = L_w + L_s. \quad (19)$$

式中, L_2 为二次沉降罐或净化罐总的排放气体量, kg/d。

3 模型验证及误差分析

为验证以上模型, 将模型计算值与实地监测值进行对比, 并进行误差分析。闪蒸模型计算过程中涉及的参数有分离器压力、分离器温度、原油密度、储罐日转油量; 小呼吸排放模型计算过程中涉及到的参数有储罐挥发出气体的密度、温度及压力, 储罐横截面积、呼吸口面积、呼吸口设定压力值; 大呼吸排放模型计算过程涉及的参数有年周转量、年周转次数、油品系数、储罐蒸汽相对分子质量等参数。

3.1 新型小呼吸损耗模型验证

为验证所建立的新型小呼吸模型, 将模型计算值与实地监测值进行对比。由于大多数联合站原油储罐均是同时进出液体, 油罐呼出的气体中既有小呼吸损耗又有闪蒸损失, 因此无法准确地进行原油储罐小呼吸损耗模型的验证。为此选择了联合站的原油沉降备用罐进行小呼吸排放研究。当该备用罐

在储存的原油达到工艺要求的最大液位后, 将油罐的进出油阀门全部关闭, 这样在经过一段时间的沉降后, 油罐呼出的气体均来源于小呼吸损耗, 因此可以用于验证新的小呼吸损耗计算方法。

模型误差的定义式为

$$\varepsilon = \frac{L_{mc} - L_c}{L_c}. \quad (20)$$

式中, ε 为模型误差, %; L_{mc} 和 L_c 分别为模型计算值和现场实测值, kg/d。

将实测值与 API 经验公式即公式(1) 计算值及所推导新型小呼吸模型计算值进行对比, 见表 1、2 (温室气体排放量折算为 CO_2 当量)。

表 1 小呼吸损耗量对比

Table 1 Comparison of small respiration loss

储罐编号	实际测量值	API 经验公式计算值	新型小呼吸模型计算值
1	448	262	516.45
2	625	257	693.12
3	1572	1282	1501.45
4	1261	841	1128.03
5	2808	1973	2993.50
6	1161	538	1025.38

表 2 小呼吸损耗量计算误差对比

Table 2 Error comparison of small respiration loss

储罐编号	API 经验公式	新型小呼吸模型
1	-41.52	15.28
2	-58.88	10.90
3	-18.45	-4.49
4	-33.31	-10.55
5	-29.74	6.61
6	-53.66	-11.68

由表 1、2 可以看出, 利用 API 经验公式所得计算结果与现场实测值之间误差很大, 这说明 API 经验公式并不符合联合站油罐油气损耗的实际情况; 而所推导新型小呼吸损耗模型所得计算结果与现场实测值最为接近, 误差较小。由此可见, 新型小呼吸损耗模型在计算联合站油罐的小呼吸排放方面准确可行。

3.2 闪蒸损耗模型验证

为验证所修正的储罐闪蒸排放模型, 将模型所得计算值与联合站现场监测值进行对比分析。闪蒸模型在计算过程中涉及的参数主要有: 分离器压力、分离器温度、原油密度、储罐日转油量; 由于原油储罐温室气体的排放除了闪蒸排放(损失)外, 还有其他形式排放(大、小呼吸损耗), 因此无法在原油储

罐中对闪蒸损失计算模型进行准确验证。但是原油稳定装置出来的气体由闪蒸引起,因此能够以原油稳定系统排放出的温室气体为准来验证储罐闪蒸损失计算方法的准确性。

选取了不同联合站原油稳定系统温室气体排放量验证不同的闪蒸计算模型,其结果对比见表3、4(温室气体排放量折算为CO₂当量)。

表3 闪蒸模型结果对比

Table 3 Calculation results comparison of flashing loss models

储罐编号	日转原油量/(t·d ⁻¹)	实际值/(kg·d ⁻¹)	V-M模型计算值/(kg·d ⁻¹)	V-B模型计算值/(kg·d ⁻¹)	修正模型计算值/(kg·d ⁻¹)
1	731	10472	13673	6901	9160
2	2250	35640	42086	21242	35668
3	450	5819	8417	4248	6730
4	1340	15683	25064	12651	16960
5	1130	14387	21155	10678	12438

表4 闪蒸损耗量误差对比

Table 4 Error comparison of flashing loss amount %

储罐编号	VM模型	VB模型	修正模型
1	31	-34	-13
2	18	-40	1
3	45	-27	16
4	59	-19	8
5	47	-25	-14

由表3、4可以看出,VB和VM经验关联式在计算联合站原油储罐闪蒸排放方面误差均较大,而修正后的闪蒸模型计算值与现场实测值之间误差较小,可满足一定的精度要求,因此所拟合的闪蒸计算模型可较准确地评估联合站原油储罐闪蒸损耗。

3.3 储罐温室气体排放模型分析

实际工况中闪蒸排放、大呼吸和小呼吸排放这3种形式通常是同时发生并相互影响的。表5、6分别为一次沉降罐和二、三次沉降罐温室气体排放模型计算值与实测值对比。通过对比发现,一次沉降罐模型误差均在±20%以内,二、三次沉降罐模型误差均在12%以内。对于规律性不强的逸散排放源来说,±20%的误差在允许范围内。由表5、6可以看出,储罐温室气体排放的理论计算与实际情况吻合较好,误差不大,所修正的VB模型与推导的小呼吸损耗模型可较准确地评估原油储罐温室气体排放量,但储罐小呼吸损耗与闪蒸损失相比不能忽略。

表5 一次沉降罐温室气体排放量对比

Table 5 Primary tank greenhouse gas emission analysis

储罐编号	排放量计算值/(t·a ⁻¹)		排放总量/(t·a ⁻¹)		误差/%
	闪蒸模型	小呼吸模型	计算值	测试值	
1	6190.04	1524.24	7714.28	7621.20	1.22
2	13018.82	2168.10	15186.92	13008.60	16.75
3	45976.50	10585.37	56561.87	52927.92	6.87
4	1762.10	337.63	2099.73	1831.01	14.68
5	122.85	41.92	164.77	205.87	-19.96
6	25.43	4.91	30.34	26.89	12.83
7	3699.36	257.71	3957.07	3892.36	1.66
8	1731.42	166.19	1897.61	1643.71	15.45
9	23.28	1.86	25.14	24.17	4.01
10	809.68	268.59	1078.27	1101.19	-2.08
11	0.42	0.29	0.71	0.82	-13.41
12	4977.08	302.75	5279.83	5480.40	-3.66
13	1938.87	227.09	2165.96	1955.38	10.77

表6 二、三次沉降罐温室气体排放量分析

Table 6 Secondary and third tank greenhouse gas emission analysis

储罐编号	排放量/(t·a ⁻¹)		误差/%
	公式计算	现场测试	
1	1274.65	1382.13	-7.78
2	47.02	50.17	-6.26
3	843.91	955.77	-11.70
4	912.74	923.61	-1.18
5	1222.24	1333.52	9.10
6	1.62	1.77	9.04
7	1303.89	1496.08	14.74
8	0.32	0.34	9.24
9	233.56	199.78	16.91

4 结论

(1)基于气体状态方程、连续性方程和绝热条件下的能量方程,综合考虑联合站油罐具有储存原油周期短、温度高和蒸发量大等因素,建立的新型小呼吸损耗模型及根据油罐日常运行参数修正的VB闪蒸排放模型在计算联合站油罐的小呼吸排放方面准确可行,储罐温室气体排放的理论计算与实际情况较吻合。

(2)一次、二次沉降罐和净化罐温室气体排放核算方法与实测数据、API经验公式计算值进行的对比验证了新核算方法具有较高的计算精度。

参考文献:

- [1] 崔翔宇,邓皓,刘光全,等.油气田温室气体排放测试与评估方法[J].天然气工业,2011,31(4):117-120.
CUI Xiangyu, DENG Hao, LIU Guangquan, et al.

- Greenhouse gas emission measurement and assessment in oil and gas fields [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(4):117-120.
- [2] 贾志慧. 石油储运过程罐区风险分析与储罐油气蒸发损耗量估算研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
JIA Zhihui. Study on risk analysis of tank farm and estimation of tank's evaporation loss in petroleum storage and transportation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [3] 张威, 陈燕. 基于土地利用的盐城滨海碳足迹研究[J]. *广州化工*, 2013, 41(11):166-169.
ZHANG Wei, CHEN Yan. Research on Yancheng coastal carbon footprint based on Land-use [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(11):166-169.
- [4] VASQUEZ, M, BEGGS H D. Correlations for fluid physical property predictions[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1980:968-970.
- [5] GIDNEY B, PENA S. Upstream oil and gas storage tank project flash emissions 436 models evaluation final report [R]. Austin, TX: Texas Commission on Environmental Quality, 2009:437-438.
- [6] VALKO P P, MCCAIN W D. Reservoir oil bubble point pressures revisited: solution gas-oil ratios and surface gas specific gravities [J]. *Journal of Petroleum Engineering and Science*, 2003(37):153-169.
- [7] Standard API. Manual of petroleum measurement standards 1: 0-90[S]. Corporation for the American Petroleum Institute, 2009.
- [8] SHIRES T M, LOUGHRAN C J, JONES S, et al. Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry [M]. Washington DC: API, 2009.
- [9] SMITH T J, WONSTOLEN K. Colorado E & P storage tank emission factor development [R]. SPE 84155-MS, 2003.
- [10] HENDLER A, NUNN J, LUNDEEN J, et al. VOC emissions from oil and condensate storage tanks [C]. The Woodlands: Texas Environmental Research Consortium, 2009.

(编辑 沈玉英)