文章编号:1673-5005(2014)05-0160-05

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.05.023

限制空间装货过程中透气变化的晃荡效应

卢金树,朱哲野,刘枫琛

(浙江海洋学院石化与能源工程学院,浙江舟山 316022)

摘要:油船装货过程中存在油气蒸发,蒸发出的油气会带来多种危害。装货时产生的晃荡是影响油品蒸发的因素之一。研究油船装货过程中舱内货油的晃荡及气液界面处的扰动对油气蒸发排放的影响,建立几何尺寸比例约为 1/40 的油船单个油舱模型,进行两组 4 种不同装货速度下的装货试验。结合对流扩散模型,综合考虑扩散效应、对流效应及透气孔处的透气效应,研究在整个装货过程中油舱透气孔处排出油气体积分数的变化原因及规律。结果表明,在类似油舱这样的限制性空间的完整装油过程中(0~95%),油气的产生与排出规律随着装载率的不同而变化,大致分为 0~5%、5%~50%、50%~70%、70%~95% 四个阶段。

关键词:装货速度;晃荡效应;限制空间;对流扩散;试验

中图分类号:TE 832; TE 988 文献标志码:A

引用格式:卢金树,朱哲野,刘枫琛.限制空间装货过程中透气变化的晃荡效应[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(5):160-164.

LU Jinshu, ZHU Zheye, LIU Fengchen. Effect of liquid sloshing on oil-vapor emission in limited space during loading operation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):160-164.

Effect of liquid sloshing on oil-vapor emission in limited space during loading operation

LU Jinshu, ZHU Zheye, LIU Fengchen

(College of Petrochemical and Energy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Oil-vapor emission from the oil tanker during loading operation will bring a variety of hazards. And the liquid sloshing caused by loading is one of the factors which influence the oil evaporation and emission. The relationship between the oil-vapor emission and the liquid sloshing intensity was studied. An approximate 1/40 scale model of the oil tanker was established to conduct loading experiments, and then the comprehensive effects of diffusion, convection and ventilation on the behavior of oil-vapor emission in the entire loading process (0-95%) were studied. The results show that in a limited space such as oil tanker, with the change of the loading speeds, the changing rules of oil-vapor emission from the breather hole can be approximately divided into four stages, which are 0-5%, 5%-50%, 50%-70%, 70%-95%.

Key words: loading speed; sloshing effect; limited space; convention-diffusion theory; experiment

海上石油储运风险主要来自油气的蒸发。作为 舱气主要成分的 VOCs(挥发性有机化合物)在海运 及液货作业过程中实际排放达到(400~700)万吨/ 年,造成巨大的经济损失和环境损害风险,更为严重 的油舱爆炸事故也屡见不鲜^[14]。针对油船这样有 特定开口的大型限制空间,舱内油气体积分数呈现 特殊的分布状态,透气孔处油气的排出受油品性质、 装油速度、油舱结构和其他因素影响^[6-7]。装油过程 中油舱内油品动能的变化及液面的上升会引起油品 的晃荡,造成气液界面的湍动,影响舱内油气体积分 数的分布^[8]。目前,一些学者已经在实船或模型上 研究了油气及其他烃类气体的排放规律^[5,9-10],但没 有深入研究排放机制及相关影响因子的效应。关于 气液界面湍动对传质的影响及非稳态蒸发动力学的

收稿日期:2013-12-02

基金项目:国家自然基金项目(51079129)

研究,不同学者做了一定的工作^[11-19],但尚未针对 性地考虑装油引起液体的晃荡会影响气液界面传质 速率,进而引发油气在特定形状的限制空间中流动 及透气行为。笔者采用理论分析及模型试验的方法 研究装货过程中油船透气体积分数的变化。

1 试验理论基础

1.1 对流扩散模型

将油舱内气体的排出分为液相区气体的产生与 传递、气相区气体的传递,采用对流扩散模型加以描述:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial i} (W c) - \frac{\partial}{\partial i} \left((D_m + D_n) \frac{\partial c}{\partial i} \right) = 0.$$
(1)

式中,c为透气口处排出油气体积分数;i代表坐标 轴方向;t为时间,s;W为液面上升的速度,m/s; D_m 、 D_a 分别为有效扩散系数和未定扩散系数, m^2/s_a

式(1)中已经充分考虑了装油引起的对流效应 以及液体的晃荡产生的扩散效应。

液面的上升会引起油气的强迫对流;有效扩散 系数与液体种类、温度等有关;未定扩散系数由液相 扰动造成。

1.2 对流效应分析

油舱透气口处的 VOCs 体积分数明显受到装货 速率的影响。其中对流速度 W 与装油速率的关系如 下:

$$W = Q/A . (2)$$

式中,Q为装货速率(体积流量), m^3/s ;A为油舱横截面积, m^2 。

显然,装油速度越大,则对流速度越大,对透气 口体积分数的影响越明显。

1.3 扩散效应分析

对于存在自由液面的油舱,油气体积分数场的 扩散效应不但受到 D_m 的影响,还会受到表征各种 扰动因素引起界面湍动的未定扩散系数 D_n 影响。 D_m 与液货种类、温度等有关,本试验认为在短时间 内温度及油气成分基本不变,该系数 D_m 恒定;未定 扩散系数 D_n 由装油过程中舱内油品动能变化产生 的液相晃荡引起,与单位体积扰动能及油品的黏度 有关。具体如下:

$$D_{n} = f(Te,\mu), \qquad (3)$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Q^3 / A_0^2, \qquad (4)$$

$$Te = \frac{1}{2} \frac{E}{V} \frac{\rho Q^2}{A_0^2 t}.$$
 (5)

式中, Te 为单位时间单位体积油品的扰动能, J; E 为 单位时间内从注油孔处装入油品的动能, J; V 为舱 内已装入油品总体积, m³; μ 为油品黏度, Pa · s; ρ 为 油品的密度, kg/m³; A_0 为装油口横截面积, m²; t 为 装货时间, s。

本试验中使用同一种油品,故不考虑黏度这一 因素。显然单位体积扰动能与装油速率及容器油品 容积有关。

由式(5)知,单位时间单位体积扰动能的变化 趋势为先迅速减小至很低水平,然后缓慢减小。同时,装货速度越大,Te越大(对应的D,也就越大)。

在整个限制空间进行装货的过程中,由装货所 引起的液面上升及所造成的液相晃荡都会影响油气 的产生、传递,最终影响透气孔处油气的排出。

2 试 验

2.1 装置与方法

综合现有油船结构尺寸资料,选择单个边舱原型尺寸为长25.7 m,宽16.1 m,舱深18.9 m,舱容约为7820 m³。将原型舱简化为长方体,按照几何相 似准则,用玻璃制作单个边舱模型。模型舱尺寸为长640 mm,宽400 mm,高470 mm,容积为120 L。 试验材料为93[#]汽油。汽油通过计量泵以一定的速度从注油孔泵入模型舱,用来模拟油船装货过程,油 气从模型舱上的透气口处排出。采用烃气体积分数 传感器测量透气口处排出油气的体积分数。传感器 与一台计算机相连,由计算机记录实时数据。部分 试验装置及材料如图1 所示。



图 1 部分试验装置实物图 Fig. 1 Part of experiment devices

为了便于数据的分析与处理,模型舱内被分为 3个区:液相区、气相区和气液边界层(气液边界层 为扰动的,这里取平均值)。液相区主要为液态的 汽油,高度用L表示;气相区主要为油气与空气的混 合气体,高度用 h 表示;气相区与液相区的交界处称 为气液边界层。模型舱的深度为 H。模型舱简图如 图 2(A、B、C 分别为加油孔、透气孔、浓度传感器) 所示。



of instrument installation

每次进行装货试验前,模型舱内充满干净空气, 密封,舱内气体压强等于当地大气压。试验开始时, 打开透气口自由排气,通过计量泵控制,分别进行两 组4种不同加油速度的注油试验,装载率同为95% (114 L)。试验记录透气口处排出气体的实时体积 分数。至转载率为95%后,经过充分静置,舱内气 体体积分数达到饱和,为81.6%(试验时通过空调 系统控制试验室的环境温度为26℃)。

2.2 加油速度确定

选择动力相似中的欧拉准则数来确保模型油舱 和原型在加油过程中加油管内的压力相似。欧拉数 定义为

$$Eu = p/\rho v^2. \tag{6}$$

式中,v为加油速度,m/s;p为加油孔处加油管内的 压力,Pa。

由于油船装货输油管的数量、管径和流量设定 不相同,装货速度不固定,因此考虑实际油船单根输 油管的装油速度及模拟的便利性,假设油舱注油的 单根输油管速度为流量 50 L/min、压力为 80 MPa, 按照欧拉相似准则得到模型舱的加油速度为 1.38 L/min、压力为 0.06 MPa。

装货试验共设计两组 4 种加油速度:第一组为 考虑实际油船装货速率,按照欧拉相似所得速度 1.38 L/min;第二组为了研究不同装货速率产生不 同晃荡强度时对透气口 B 处排出气体体积分数的 影响,结合计量泵的量程及最小刻度的实际情况,设 计出装货速率间隔大约为 0.5 L/min 的 3 个速度 2.46、2.96、3.46 L/min。

3 试验结果及其讨论

3.1 不同装货速度下透气体积分数变化

装油过程中模型舱内油气并没有达到饱和,模型舱透气口处气体体积分数的增长原因主要有两方面:①油面的上升造成油气在气相区的对流;②油气分子的自然扩散。试验结果如图3所示。为了加强不同数据之间的可比性,对数据进行了无量纲化处理,如图4所示。



图 3 不同装货速率下排出气体体积分数变化曲线

Fig. 3 Concentration curves of exhaust gas in different loading speeds



图 4 无量纲化处理后不同装货速率下排出气体 体积分数变化

Fig. 4 Dimensionless concentration curves of exhaust gas in different loading speeds

从图4可以发现,第一组速度(1.38 L/min)下, 当装载率达到70%之前,透气口排出气体体积分数 处于较低水平,约为35%,且上升较慢。装载率在 70%~95%时,气体体积分数快速上升,最后达到 90%,接近饱和。这主要因为在加油过程中从液面 蒸发出的油气分子的自然扩散为从体积分数高的地 方向体积分数低的地方进行,这使得舱内的油气体 积分数分层:越靠近液面,油气体积分数越大。在装 载率达到70%之前,主要为油气分子自然扩散,聚 集形成油气体积分数层;同时,舱内空间较大,油气 的对流效应比较弱,油气从产生至传递到透气口处 有延迟效应,使得此过程中透气口处排出的油气体 积分数较小。随后,装载率从70%上升到95%,随 着液面的上升,气相区体积缩小,对流效应越来越明 显,延迟效应越来越弱,同时,油气分子自然扩散进 行得更加充分,透气口排出气体的体积分数上升加 快,体积分数越来越大。

结合图 4 和式(5),第二组 3 个速度下,模型舱 顶气体远未达到饱和,排出气体体积分数变化趋势 大体相同。随着装货速率增大,装货时间减少,装载 率达到 95%时,舱顶排出气体体积分数逐渐变小, 依次相差约 10%。这是由于 3 个速度比较接近,液 位的上升速度相差不大,造成的对流效应与未定扩 散系数 D_a 较为一致。同时,这 3 个装货速率都较 大,液位上升较快,在装载率达到 95%时,油气气体 分子未能进行充分扩散,气体体积分数比较低,造成 对流效应不明显,所以透气体积分数比较低,没有出 现明显的快速增大过程。

3.2 透气体积分数的增长速率变化

为了研究不同装货速率下透气口处排出气体体 积分数的增长速率的变化情况,对图 3 中所得到的 气体体积分数进行求导。具体为:分别在 4 条曲线 上等间隔取 14 个点,求出每个点的导数(油气体积 分数对时间的导数),即为该点体积分数增长速率。 用这 14 个点代表整条曲线上气体体积分数增长速 率的变化趋势,并对 x 轴进行无量纲化处理,结果如 图 5 所示。





从图 5 可以看出,限制性空间中透气口处排出 气体体积分数的增长率先缓慢增加,然后快速增加, 与图 3 中排出油气体积分数的增长变化类似。增长 速率与时间不为直线关系,也不是类似浅盘试验中 的对数关系,而为一个特殊的抛物线关系;在装货速 率为 1.38 L/min 时,气体体积分数的增长速率明显 小于其他 3 种装货速率的情况;第二组的 3 个速度 下,气体体积分数增长速率在装载率达到 50% 之前 几乎一样,随后依次增大。

在装载率达到50%之前,第一组速度下透气口 处油气体积分数的增长速率大于第二组3个速度下 油气体积分数的增长速率;装载率超过50%以后, 第二组3个速度下透气口处油气体积分数的增长速 率大于第一组速度下的增长速率。形成这种现象的 主要原因:在装载率达到50%之前,影响透气口处 油气体积分数增长速率的因素是油气分子的自然扩 散,即 D_m和 D_n起主要作用;装载率超过50%之后, 主要影响因素为由于液面上升 W 所引起的对流效 应。尤其是第二组的3个速度下,虽然液面上升的 速度 W 不一样,即油气的对流效应不一样,但在装 载率达到50%之前,气体体积分数增长速率几乎一 样,且很低。这更能够说明在装货的前半段,透气口 处油气体积分数增长速率的主要影响因素为油气分 子的自然扩散。

图5实际体现了油气的对流扩散与透气口处油 气的透气效应对体积分数的综合作用结果,即油气的 对流扩散产生的累积效应大于透气效应,因此在装货 过程中导致顶部体积分数趋于增大。在装货初始阶 段(装载率达到50%之前),由于空挡高度产生的滞 后效应,由W形成的对流产生的累积效应还未得到 体现;同时舱内气体体积分数较低,透气产生的消散 效应也基本没有;因此透气体积分数会上升,但增长 率相对较低。第二阶段(装载率50%~95%),对流 产生的累积效应发挥主导作用,大于透气产生的消散 效应,因此透气体积分数上升较快,增长率相对较大。

4 结 论

(1)油舱进行加油时,在装载率达到70%之前, 透气口处排出气体体积分数缓慢上升,且水平较低; 在此之后,排出气体体积分数迅速增加,接近饱和。 透气口处排出气体体积分数的增长速率的变化先为 缓慢变大,后迅速增大。在加油的前期(装载率约 为50%之前)起主要作用的为油气分子的自然扩 散;在加油的后期主要影响因素为液面上升所引起的油气对流效应。 (2)在类似油舱这样的有特定开口的限制性空间的完整加油过程中(0~95%),油气的产生与排出 分为0~5%、5%~50%、50%~70%、70%~95%四 个阶段:@0~5%,油品的晃荡效应很明显,此时排出 舱外的主要为舱内原有的空气或惰性气体,排出的油 气很少; 65%~50%,透气孔处排出油气体积分数缓 慢变大,主要影响因素为油气分子充分的自然扩散; (c50%~70%,透气孔处排出油气体积分数继续变 大,增长率大于前一阶段,主要影响因素为液面上升 所引起的油气对流效应; @70%~95%,透气孔处排 出油气体积分数迅速增大,最后接近饱和。

参考文献:

- CONCAWE. VOC emissions from loading gasoline onto sea-going tankers in EU-15: control technology and costeffectiveness[S]. CONCAWE ad hoc Group on Marine Loading VOC Emission Controls, 2002.
- [2] HUSAIN M, ALTSHULLER D, SHTEPANI E. Hydrocarbon emission containment in tankers during loading and unloading[J]. Society of Naval Architects and Marine Engineers Annual Meeting, 2005,113(5):595-609.
- [3] OLDERVIK O. Emission of hydrocarbon gas to the atmosphere from shutter tankers[J]. Pollution Control and Monitoring, 2001, 38(3):123-131.
- [4] 张劲军,何利民,宫敬,等.油气储运理论与技术进展
 [J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):
 152-162.

ZHANG Jinjun, HE Limin, GONG Jing, et al. Theoretical and technological advances in petroleum storage and transportation engineering [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37 (5):152-162.

- [5] GUNNER T J. Physical behavior of crude oil during transportation and its impact on the carriage of crude oil by sea[J]. Marine Technology, 2002,39:256-265.
- [6] 黄维秋,钟秦. 车船装油过程油品蒸发损耗影响因素 分析[J]. 油气储运,2004,23(8):44-48.
 HUANG Weiqiu, ZHONG Qin. Analysis of effect factors on petroleum products evaporation loss in petroleum products filling tank[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2004,23(8):44-48.
- [7] 黄维秋,钟秦. 非稳态油品蒸发的数值分析 I:数学模型的建立[J]. 石油学报:石油加工, 2003,19(6):58-63.

HUANG Weiqiu, ZHONG Qin. Numerical analysis of petroleum products evaporation under unsteady conditions I :establishment of mathematic model[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2003,19(6):5863.

- [8] 卢金树,吴宛青. 气液界面移动时油舱气相区烃气对流扩散模型[J]. 油气储运,2008,27(4):18-20.
 LU Jingshu, WU Wanqing. Convection-diffusion model on hydrocarbon gas in the vapor space of oil tank in moving gas-liquid boundary [J]. Oil and Gas Storage and Transportation,2008,27(4):18-20.
- [9] OTTO M M, OLDERVIK O. Control of VOC emissions from crude oil tankers [J]. Marine Technology and SNAME News, 2001,38:208-217.
- [10] WERNER J, DUBOIS D. Benzene concentrations on board chemical tankers [J]. WMU J Marit Affairs, 2011,10:117-126.
- [11] FINGAS M F. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004,107:27-31.
- [12] ZHU Ling, CHEN Jiaqing, LIU Yan. Experimental analysis of the evaporation process for gasoline[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25:916-922.
- [13] BOYADJIEV C, BOYADJIEV B. On the non-stationary evaporation kinetics mathematical model and experimental data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003,46:1679-1685.
- [14] BOYADJIEV B, BOYADJIEV C. On the non-stationary evaporation kinetics II stability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003,46:1687-1692.
- [15] PAN Xuhai, HUA Min, JIANG Juncheng, et al. Experiment on dynamics characteristic of evaporation process for two-component liquid [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2006, 19:55-59.
- [16] PAN Xuhai, HUA Min, JIANG Juncheng, et al. Experimental research on evaporation characteristic of naphtha and crude oil in boundary layer [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2006,19:64-67.
- [17] WANG Yong, ZHANG Zeting. Experiment on dynamics characteristic of evaporation process for two-component liquid [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2002,29:11-14.
- [18] 马友光,杨雄文,冯惠生,等.界面湍动对气液传质的 影响[J].化学工程,2004,32(4):1-4.
 MA Youguang, YANG Xiongwen, FENG Huisheng, et al. Influence of interfacial turbulence on gas-liquid mass transfer[J]. Chemical Engineering, 2004,32(4):1-4.
- [19] SHA Yong, LI Zhangyun, LIN Fenfen. Shallow graph observation on interfacial turbulence phenomena in gasliquid mass transfer[J]. CIESC Journal, 2010,61:844-847.

(编辑 沈玉英)