

文章编号: 1000-8241(2015)03-0258-04

大型 LNG 储罐翻滚的影响因素

曲顺利¹ 李玉星² 李政龙² 王武昌² 胡其会² 张华伟¹

1. 中海油山东化学工程有限责任公司, 山东济南 250000; 2. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580

摘要: 研究 LNG 的翻滚机理, 根据 LNG 的储存状态对 LNG 在储罐中的翻滚做出准确判断对 LNG 翻滚的预防有着重要意义。建立了 LNG 储罐的翻滚模型, 并利用 FluentTM 软件, 通过模拟储罐的翻滚过程研究了储罐的初始密度差、分层高度、储罐罐容对 LNG 翻滚的影响。结果表明: 储罐中 LNG 分层间的初始密度差越大, 罐容越大, 储罐发生翻滚的时间越早, 储罐翻滚越剧烈; 相反, 储罐中的分层高度越大, 由于分层高度使储罐相邻两分层之间的黏滞力增大, 储罐翻滚越不易发生, 翻滚持续时间越长。通过分析储罐翻滚的影响因素, 可以更全面地对 LNG 翻滚做出预防, 保证储罐运行安全。(图 9, 参 14)

关键词: LNG; 翻滚; 数值模拟; 初始密度差; 分层高度; 储罐罐容; 影响因素

中图分类号: TE821

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.03.007

Influencing factors for LNG roll-over in large-scale tanks

QU Shunli¹, LI Yuxing², LI Zhenglong², WANG Wuchang², HU Qihui², ZHANG Huawei¹

1. CNOOC Shandong Chemical Engineering Co. Ltd., Jinan, Shandong, 250000;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580

Abstract: Studying on the liquefied natural gas (LNG) roll-over mechanism to accurately judge the LNG roll-over in storage tank according to the LNG storage status has great significance on the prevention of LNG roll-over. Roll-over model of LNG in storage tank is established, and FluentTM software is used to simulate the roll-over process in order to identify the influence of initial density difference, stratification level and tank capacity on the LNG roll-over. The simulation results show that the larger the initial density difference between stratified LNGs, the larger tank capacity, the sooner and more tense roll-over happens; conversely, since stratification height may increase the viscous force between adjacent stratified LNGs, the higher the stratification level in the tank, the more difficult the and longer the roll-over occurs. Through analyzing the influencing factors, LNG roll-over can be prevented comprehensively to ensure the tank safety. (9 Figures, 14 References)

Key words: liquefied natural gas (LNG), roll-over, numerical simulation, initial density difference, stratification level, tank capacity, influencing factor

在 LNG 的存储过程中, 由于充装 LNG 和储罐内原有 LNG 的组分、温度不同, 或者含氮(N₂)较多的 LNG 内部 N₂ 的优先蒸发, 可能出现分层现象, 进而导致翻滚现象的发生^[1]。翻滚发生时, 两分层剧烈混合, 瞬间产生大量汽化气(BOG), 使储罐内压力急剧上升, 对储罐和其他附属设备的安全造成威胁, 甚至威胁人身安全。通常翻滚发生时, 需要被迫打开安全阀泄压, 大量的天然气被释放到空气中, 不仅存在很大的危险性, 同时还造成重大的经济损失^[2]。在翻滚的理论研究上, Chatterjee & Geist 提出了首个翻滚模型(C-G 模型, 1972), 之后经过 Heestand 等^[3](HSM 模

型, 1983), Bates 等^[4](Bates-Morrison 模型, 1997), 覃朝辉等^[5](覃朝辉模型, 1999)的发展, LNG 分层和翻滚模型逐渐完善。在实验方面, 国外 Shi J Q、Muro、Graffis 等, 国内游立新、程栋等分别针对不同形状、不同大小的储罐, 利用盐-水、水-糖、F11-F113、液氧-液氮等介质进行了大量的翻滚实验研究。基于这些对翻滚的原因、机理的理论和实验研究结果, 提出了一些预防翻滚的措施, 对储罐的安全储存具有重要意义。

近年来, 随着世界 LNG 产业的飞速前进, 中国的 LNG 接收终端亦蓬勃发展, LNG 的应用领域逐渐增多^[6-8], LNG 储罐发生翻滚的概率也随之增大。而在

储罐发生翻滚的过程中,不同密度差、储罐罐容等都有可能对翻滚造成影响。因此在前人的研究基础上,对储罐中 LNG 翻滚的影响因素进行研究,以便更全面地对储罐翻滚做出预防,保证储罐的安全储存。

1 模型建立

1.1 分层翻滚机理

LNG 在储罐中储存时,由于储罐的储存温度约为 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$,与外部环境温度相差较大,因此罐壁的漏热会导致储罐中 LNG 的密度变化,使不同高度之间的 LNG 出现密度差,即分层。分层产生后,各层形成相对独立的自然对流循环(图 1),在环境漏热及轻组分蒸发的双重作用下,两分层的密度逐渐趋于一致,最终发生翻滚(图 2)^[9-10]。

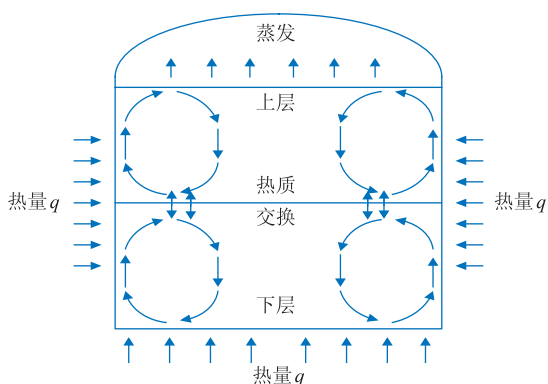
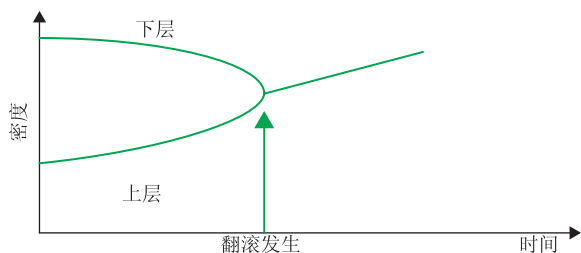
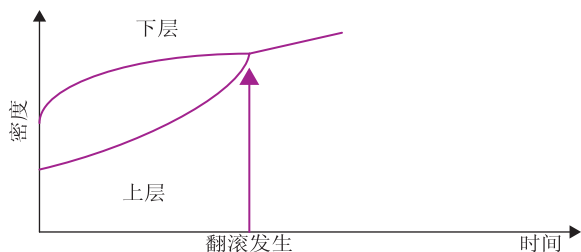


图 1 分层后储罐内的自然对流循环示意图



(a) 第 1 种情况



(b) 第 2 种情况

图 2 分层后各液层的密度变化示意图

1.2 模型建立及假设条件

分层产生后,储罐中 LNG 分为多个分层(图 3a),

而翻滚发生在相邻的两个分层之间。取储罐中高度相同(均为 1 m)的两层作为研究对象,忽略 LNG 储罐的分层过程,不考虑气相空间,只对翻滚过程进行研究^[11],建立 LNG 储罐翻滚的物理模型(图 3b),并设置模型的初始条件和边界条件如下:①侧壁和底部壁面的边界条件是速度 u_x 均为无滑移条件;对于 LNG 组分的质量分数 S 而言, $\frac{\partial S}{\partial y}=0$;对于湍流动能 κ 而言, $\frac{\partial \kappa}{\partial y}=0$ 。② LNG 储罐翻滚模型的初始条件是 LNG 作为一个整体赋予密度值,其初始密度值设为定值;上下分层密度一定(上层密度大于下层密度)且存在密度差;流体的初始速度为 $u_x=0, u_y=0$ 。

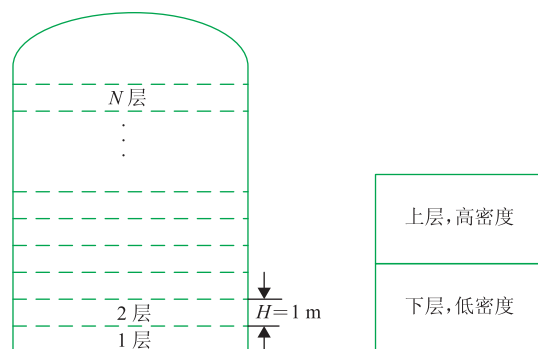


图 3 分层发生后的 LNG 储罐及其翻滚物理模型示意图

1.3 模拟条件设置

采用 FluentTM 软件进行模拟,模型选取接收站常见的 $16 \times 10^4\text{ m}^3$ 储罐,设定其上、下分层密度分别为 $424\text{ kg/m}^3, 423.5\text{ kg/m}^3$ 。计算区域采用结构化网格进行网格划分,网格总数约为 16 000 个。选用 mixture 模型,边界条件设为绝热壁面。正常状态下,由于储存在较大型储罐内的 LNG 液体产生大空间紊流态自然对流,因此紊流方程采用 $\kappa-\epsilon$ 方程^[12]。

为了对模拟中不同工况下的翻滚程度进行对比分析,采用翻滚系数 f 来表征翻滚的剧烈程度^[13]:

$$f = \frac{|\Delta\rho_{\max} - \Delta\rho_0|}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: f 为翻滚系数; $\Delta\rho_{\max}$ 为翻滚过程中的最大密度差, kg/m^3 ; $\Delta\rho_0$ 为初始密度差, kg/m^3 ; Δt 为翻滚时间, s 。

2 影响因素模拟分析

2.1 初始密度差的影响

针对直径为 79 m 的 $16 \times 10^4\text{ m}^3$ 的 LNG 储罐,取

初始密度差 0.5 kg/m^3 , $1.0 \sim 9.0 \text{ kg/m}^3$ (间隔 1.0 kg/m^3) 分别进行模拟, 得到 LNG 储罐翻滚的最大速度随时间变化的曲线(图 4)和翻滚系数随初始密度差变化的曲线(图 5)。

随着时间的增加, 储罐中 LNG 的翻滚速度逐渐减小趋于平稳。而初始密度差越大, 储罐发生翻滚时, LNG 的速度也越大, 翻滚越剧烈(图 4)。翻滚系数随初始密度差的增加先缓慢增加, 然后剧烈增加, 表明储罐中 LNG 的翻滚随着初始密度差的增大由平稳向剧烈转变, 这个转折点所对应的初始密度差即为储罐翻滚的临界密度差, 当初始密度差小于临界密度差时, 认为储罐储存安全, 大于临界密度差时, 即认为储罐内发生了翻滚(图 5)^[14]。在翻滚的过程中, 上下分层的密度差相当于翻滚的动力, 密度差越大, 推动翻滚发生的动力越大, 翻滚发生得越早, 翻滚也就越剧烈。

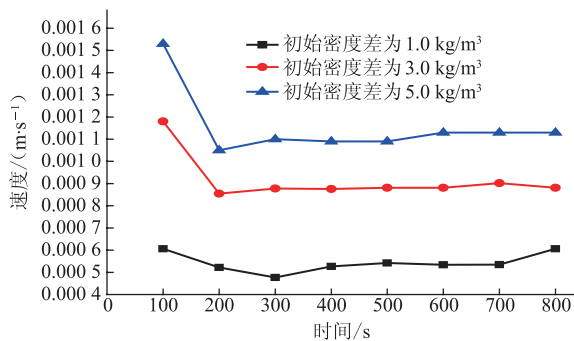


图 4 不同初始密度差时 LNG 翻滚速度随时间的变化曲线

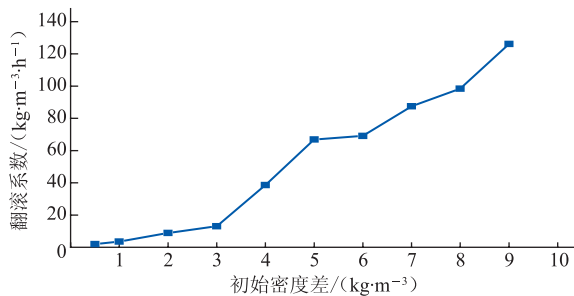


图 5 不同初始密度差时翻滚系数随初始密度差的变化曲线

2.2 分层高度的影响

对直径为 80 m 的 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐, 分别取其分层高度为 1 m 、 1.5 m 、 2.0 m , 取初始密度差 0.5 kg/m^3 , $1.0 \sim 9.0 \text{ kg/m}^3$ (间隔 1.0 kg/m^3) 进行数值模拟, 得到初始密度差为 1 kg/m^3 时, 储罐翻滚的最大速度随时间的变化而变化的曲线(图 6)和翻滚系数随初始密度差变化的关系曲线(图 7)。

分层高度越大, 速度出现峰值越晚, 峰值越大, 而随着分层高度的增加, 速度剧烈变化的范围也增大, 表

明随着分层高度的增加, 储罐翻滚持续的时间增长, 储罐发生翻滚的时间延迟(图 7)。

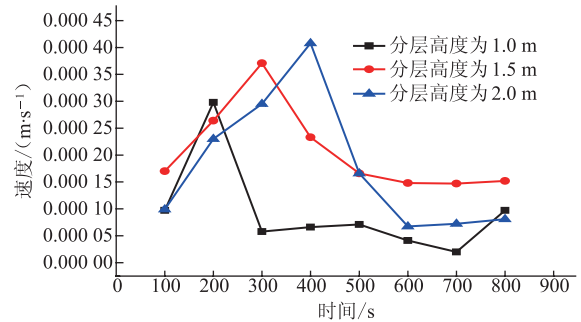


图 6 不同分层高度时储罐翻滚的速度随时间的变化曲线

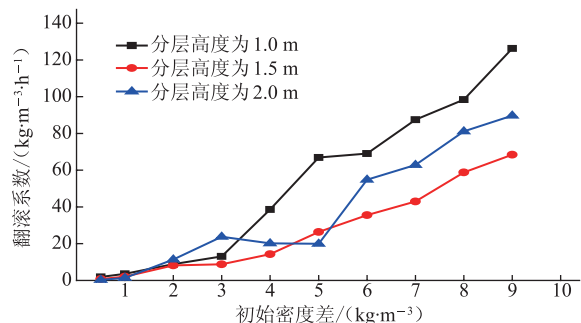


图 7 不同分层高度时翻滚系数随初始密度差的变化曲线

$16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐的临界密度差在分层高度为 1 m 、 1.5 m 、 2.0 m 时分别为 3 kg/m^3 、 4 kg/m^3 、 5 kg/m^3 , 随着分层高度的增加, 储罐翻滚的剧烈程度增大, 临界密度差增大。这是由于分层高度的增加使单一分层的体积增大, 各分层 LNG 液体与罐壁的接触面积增加, 因此, 液体与罐壁之间的黏滞力增大, 使分层变得更加稳定, 延缓了翻滚的发生。

2.3 储罐罐容的影响

对 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ (直径 79 m)、 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ (直径 40 m)、 5000 m^3 (直径 20 m) 的 LNG 储罐, 取初始密度差分别为 0.5 kg/m^3 、 $1.0 \sim 9.0 \text{ kg/m}^3$ (间隔 1.0 kg/m^3) 进行数值模拟, 得到初始密度差为 1 kg/m^3 时, 储罐翻滚的最大速度随时间的变化曲线(图 8)和翻滚系数随初始密度差的变化关系(图 9)。

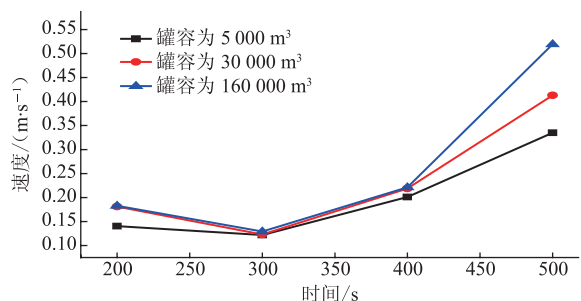


图 8 不同罐容下储罐翻滚的速度随时间的变化曲线

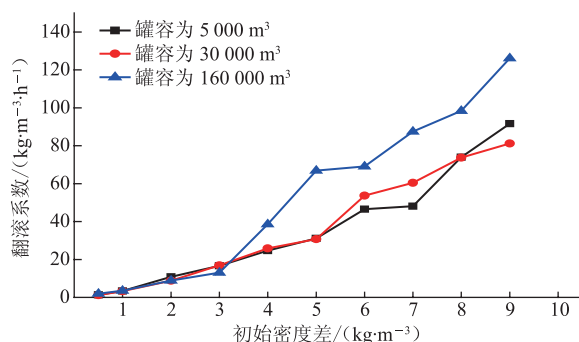


图9 不同罐容下翻滚系数随初始密度差的变化曲线

可见,随着罐容的增加,翻滚的最大速度逐渐增加,而翻滚速度越大,LNG移动的速度越大,翻滚越剧烈(图8)。罐容为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $5\,000 \text{ m}^3$ 的储罐的临界密度差分别为 3 kg/m^3 、 $3 \sim 5 \text{ kg/m}^3$ 、 5 kg/m^3 ,随着罐容的增加,储罐翻滚的临界密度差减小(图9)。这是由于罐容的增大使储罐翻滚时产生的漩涡增多,漩涡之间的相互作用增加,因此相同初始密度差下,储罐罐容越大,LNG的稳定性就越差,对应储罐发生翻滚的临界密度差也越小。

3 结论

(1)不同初始密度差下储罐翻滚的剧烈程度不同。相邻分层的初始密度差越大,翻滚发生的越早,翻滚时的速度越大,翻滚越剧烈,且存在一个储罐翻滚的临界密度差:当初始密度差小于临界密度差时,认为储罐储存安全;大于临界密度差时认为储罐内发生了翻滚。

(2)对于同一储罐,分层高度越小,翻滚发生的时间越早;分层高度越大,翻滚持续的时间越长,翻滚时的速度越大,翻滚越剧烈。而分层高度的增大使分层变得稳定,翻滚延迟,储罐翻滚的临界密度差也增大。

(3)储罐罐容越大,翻滚时的漩涡越多,速度越大,储罐中LNG翻滚越剧烈,相邻分层之间的LNG越不稳定,储罐翻滚的临界密度差越小。

参考文献:

- [1] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] SARTEN. LNG Stratification and Rollover[J]. Pipe and Gas J, 1972(99): 1233-1235.
- [3] HEESATAND J, SHIPMAN C W, MEADER J W. A predictive model for rollover in stratified LNG tanks[J]. AIChE Journal, 1983, 29(2): 199-207.

- [4] BATES S, MORRISON D S. Modeling the behavior of stratified liquid natural gas in storage tanks: A study of the rollover phenomenon[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(8): 1875-1884.
- [5] 覃朝辉, 顾安忠. 液化天然气涡旋的模型研究[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(8): 40-44.
- [6] 乔国发. 影响LNG储存容器蒸发率因素的研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2007.
- [7] 程劲松. 世界液化天然气工业发展综述[J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 101-105.
- [8] 顾安忠. 迎向“十二·五”中国LNG的新发展[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 1-11.
- [9] 孙贤胜. 中国天然气市场2013年及远景展望[N]. 中国石油报, 2013-3-26(2).
- [10] 李品友, 顾安忠. LNG涡旋及其预防措施[J]. 低温与特气, 1998(2): 54-57.
- [11] 李品友, 顾安忠. 液化天然气涡旋的理论研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2000, 15(2): 182-190.
- [12] 曲顺利, 刘玉平, 姚云, 等. LNG储罐内翻滚模型及翻滚现象的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2013(8): 2216-2220.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 姚云, 张湘凤, 曲顺利, 等. LNG储罐内翻滚现象临界判据的数值模拟[J]. 低温工程, 2012(6): 37-40.

(收稿日期: 2014-08-03; 修回日期: 2014-12-06; 编辑: 潘红丽)



基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目“LNG储罐翻滚机理与动态充装蒸发特性研究”, 13CX02092A; 中国石油大学(华东)校人才引进项目“LNG安全储存特性研究”, Y1215035。

作者简介: 曲顺利, 高级工程师, 1976年生, 1999年毕业于北京化工大学化学工程

专业, 现主要从事化工工程、LNG接收站、液化天然气工程等设计管理及项目管理工作。

QU Shunli, senior engineer, born in 1976, graduated from Beijing University of Chemical Technology, chemical engineering, in 1999, engaged in the design management and project management of chemical engineering, LNG terminal and LNG project.

Tel: 18663736983, Email: 18663736983@163.com