

低温液体 BOG 再液化系统压力及蒸发率试验研究

焦纪强, 陈叔平, 高慧毅, 金树峰, 姚淑婷, 王旭东

(兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050)

摘要:为研究低温液体吸热产生蒸发气(Boil-Off Gas, BOG)的动态过程,寻求合理调控低温液体压力和温度的方法,搭建了一套低温液体 BOG 再液化试验系统。以液氮为工质对 120L 高真空变密度多层绝热储罐进行了压力、温度及蒸发率测试试验,分析了以上参数与时间的变化规律,计算了储罐静态蒸发率与漏热量。结果表明:储罐压力随时间增加而逐渐上升,在 480min 之前压力上升速率较快,为 10.9Pa/s,之后上升速率逐渐减小。从液相到气相的温度依次升高,液相内部的温度相差较小,约为 1.2℃;随着时间的增加,液相和气液分界面的温度逐渐升高,气相的温度逐渐降低,480min 后达到相对稳定的状态。初始充装率为 0.7 时,自然蒸发的 BOG 流量随时间增加逐渐减小;经计算,储罐静态蒸发率为 2.04%/d,漏热量为 4.1W。试验结果为后续开展低温液体 BOG 再液化研究提供了相关依据。

关键词:低温液体; BOG; 高真空变密度多层绝热; 蒸发率; 试验研究

DOI:10.16711/j.1001-7100.2018.05.006

Experimental study on pressure and evaporation rate of cryogenic liquid boil-off gas re-liquefaction system

Jiao Jiqiang, Chen Shuping, Gao Huiyi, Jin Shufeng, Yao Shuting, Wang Xudong

(School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the dynamic process of Boil-Off Gas (BOG) produced by decalescence of cryogenic liquid, and find the method of reasonably controlling pressure and temperature, a set of cryogenic liquid BOG re-liquefaction test system was established. Experiments on pressure, temperature and evaporation rate of a 120L tank with the high vacuum variable density multilayer insulation (VD-MLI) were conducted with liquid nitrogen as working medium. Besides, the static evaporation rate and heat leak-rate of the tank were calculated. The following findings were obtained based on the experiments. ①The tank pressure gradually increases with the storage time, and the rising rate is about 10.9 Pa/s before 480 minutes, then gradually decreases. ②The temperature increases from the liquid phase to the gas phase, the temperature inside the liquid phase difference is small, about 1.2℃. The temperature of the liquid phase and the gas-liquid interface increases with the storage time, the temperature of the gas phase declines gradually, and reaches a relatively stable state after 480 minutes. ③When the initial filling rate of the tank is 0.7, the average flow rate declines with storage time. The static evaporation rate is 2.04%/d and heat leak-rate is 4.1W. The results provide a theoretical support for the subsequent research of cryogenic liquid BOG re-liquefaction.

Keywords: Cryogenic liquid, BOG, VD-MLI, Evaporation rate, Experimental research

1 引言

低温液体在民用、航空与航天等领域被广泛应用,如液化天然气、液氢及液氧等,其储存和运输设备低温容器需求量快速增长。由于低温液体的特殊性质,即使在低温容器绝热性能良好的情

况下,外界热量仍会漏入容器内,吸热产生蒸发气(Boil-Off Gas, BOG),导致低温容器压力升高。当压力超过安全阀开启压力时,安全阀自动打开排放 BOG,造成能源浪费^[1]。与此同时,低温液体吸热引起热分层导致局部蒸发,增加了控制蒸发量的难度^[2]。为了减少 BOG 直接排放造成的能源浪费,增加低温液体储存和运输周期,有必要

收稿日期:2017-09-12

作者简介:焦纪强(1990-),男,硕士生,主要从事低温储运设备研究。

通讯作者:陈叔平(1964-),男,教授,主要从事低温储运设备、低温传热设备的研究(E-mail: chensp@lut.cn)。

对低温液体吸热产生 BOG 的动态过程展开分析,了解低温液体压力、温度及蒸发率的变化特性。

Scott^[3]等对一小型液氮杜瓦瓶温度分布进行研究,计算了杜瓦瓶压力随时间的变化规律。Y. Rotenberg^[4]提出了低温液体饱和均质模型,认为容器内气相和液相温度处处相等、低温液体饱和压力为气相空间压力。Hastings^[5]等在多目标液氮试验平台上(MHTB)对变密度多层绝热贮箱开展了长达 2 000h 在轨试验,在真空度小于 1.33×10^{-4} Pa 及 305K 热侧温度时液氮的蒸发率为 0.117% /d。李玉星^[6]等以密闭 LNG 储罐为对象,对储罐压力及蒸发率进行测试,给出了不同初始充装率下储罐压力与时间的变化关系,得出了最

优充装率。陈亮^[7]等对液氢贮箱建立了 VOF 计算流体力学模型,得到了压力上升速率与时间的变化关系。程金杰^[8]等针对 ZBO 贮箱建立了低温液体四区模型,运用 C 语言编程得出了贮箱压力和温度的变化规律。

以上关于低温容器压力、温度及蒸发率的研究,大多将低温液体温度场看作是饱和均质的,且对被称为“超级绝热”的高真空变密度多层绝热(Variable Density Multilayer Insulation, VD-MLI)容器研究较少。为此,本文搭建一套低温液体 BOG 再液化试验系统,用于分析高真空 VD-MLI 储罐压力、不同位置的温度及蒸发率与时间的变化规律。

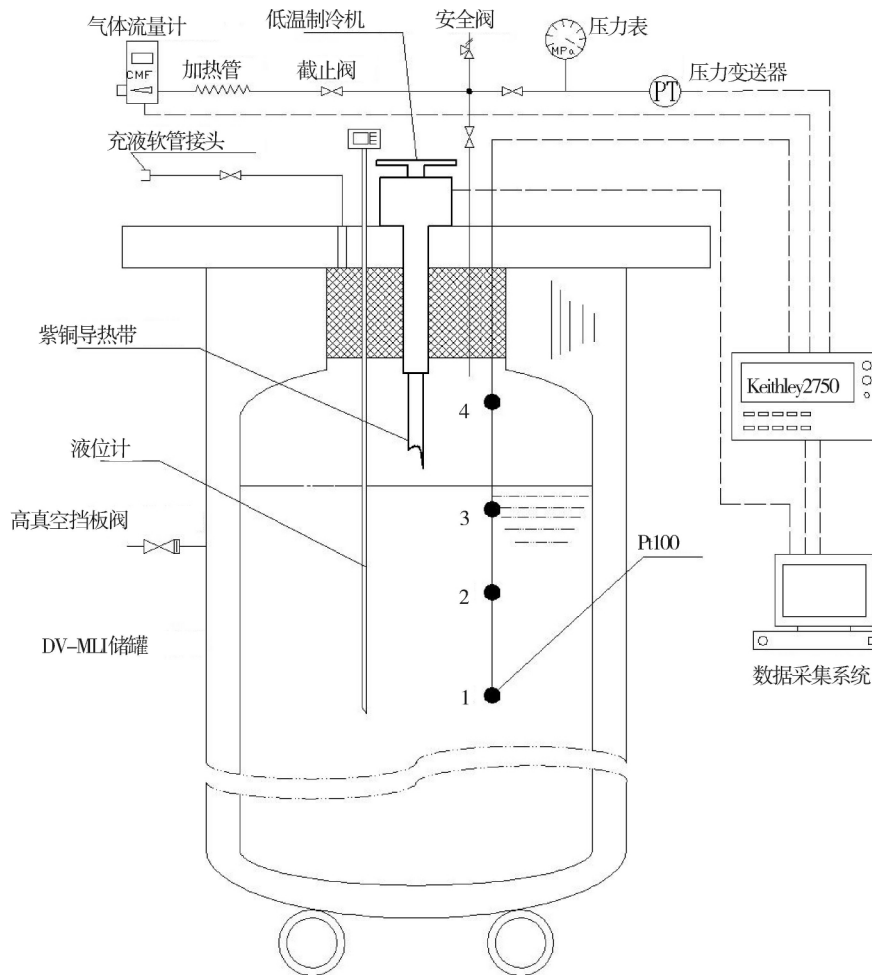


图 1 低温液体 BOG 再液化试验系统示意图

Fig. 1 Diagram of cryogenic liquid BOG re-liquefaction test system

2 试验系统及试验原理

2.1 试验系统组成

图 1 给出了低温液体 BOG 再液化试验系统示意图,主要由液体储存系统、BOG 再液化系统、测量系统和数据采集系统四部分组成。

高真空 VD - MLI 储罐设计压力为 0.3MPa ,公称直径为 400mm ,公称容积为 120L。BOG 再液化系统由低温制冷机和导热带组成。低温制冷机固定在储罐顶部法兰 ,制冷机冷头与导热带连接 ,用来冷凝气相空间的 BOG。低温制冷机的运行通过储罐压力控制 ,当压力上升至设定值时 ,制冷机自动开启 ,压力下降至某一设定值时 ,制冷机自动关闭。

测量系统由压力传感器、温度传感器、Alicat 气体流量计和液位计组成 ,分别测量储罐压力、低温液体温度、BOG 体积流量和液位。其中压力传感器量程为 0 ~ 0.5MPa ,精度为 0.1% ;温度传感器量程为 -200℃ ~ 500℃ ,精度为 0.1℃ ;Alicat 气体流量计量程为 0 ~ 20L/min ,精度为 ± 0.4% ,工作电源电压为 24VDC ;液位计量程为 30mm ~ 1 000mm ,测量精度为 ± 2% 。数据采集系统由多通道 Keithley 2750 数据仪和计算机组成 ,完全实现压力、温度和流量的实时采集。

2.2 试验原理

静态蒸发率测量方法主要有流量计法、称重法、自然升压法和液位计法。本文采用常用的气体流量计法^[9]测试储罐的静态蒸发率。气体流量计法测试蒸发率时 ,流量计出口与大气相通 ,测质量流量为

$$\dot{m} = \frac{\dot{p}v}{ZR_g T} \quad (1)$$

式中 \dot{m} 为 BOG 质量流量平均值 ,kg/s ; p 为流量计入口平均压力 ,Pa ; \dot{v} 为 BOG 体积流量平均值 ,m³/s ; Z 为压缩因子 ; R_g 为气体常数 ,J/(kg · K) ; T 为流量计入口平均温度 ,K。

通过气体流量计测试得出的蒸发率为

$$\alpha_0 = \frac{24 \times 3600 \times \dot{m} \times \varphi}{\rho_L V_e} \quad (2)$$

高真空 VD - MLI 储罐的静态蒸发率^[10]为

$$\alpha_{20} = \alpha_0 \frac{h_1}{h_{lg}} \left(0.7 \times \frac{293.15 - T_s}{T_1 - T_2} + 0.3 \times \frac{293.15^4 - T_s^4}{T_1^4 - T_2^4} \right) \quad (3)$$

储罐漏热量为

$$Q = \dot{m} h_1 \quad (4)$$

式中 : α_0 为测试蒸发率 ,%/d ; φ 为流量计校正系数 ,取 1.006 ; ρ_L 为标准大气压下低温液体的密

度 ,kg/m³ ; V_e 为储罐有效容积 ,m³ ; α_{20} 为静态蒸发率 ; h_1 为试验环境压力下液体的汽化潜热 ,kJ/kg ; h_{lg} 为标准大气压下液体的汽化潜热 ,kJ/kg ; T_s 为标准大气压下液体的温度 ,K ; T_1 为试验时平均环境温度 ; T_2 为试验时储罐内平均压力下对应的液体温度 ; Q 为储罐漏热量 ,kW。

试验时 ,应先用试验介质液氮对高真空 VD - MLI 储罐进行预冷 ,预冷结束后对其充液 ,静置 48h 后进行测试。为了分析储罐内气液相空间的温度分布情况 ,温度测试点的分布情况如图 2 所示。其中 1 号温度传感器距内罐底部 370mm ,1 号与 2 号相距 140mm ,两者测量液相空间不同位置的温度 ; 3 号距内罐底部 720mm ,4 号位于气相空间 ,3 号与 4 号相距 140mm。4 个温度传感器具有独立的信号线并与数据采集系统连接 ,可直观的观测温度动态变化规律。

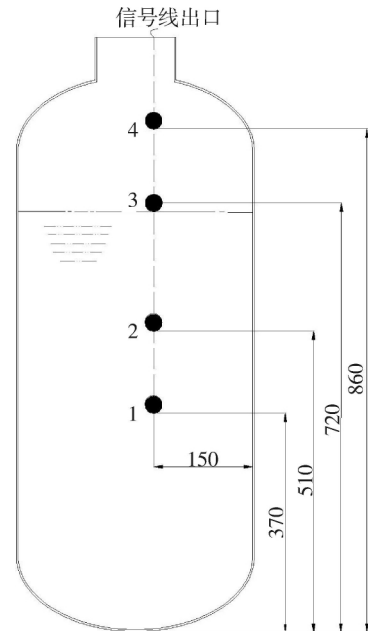


图 2 液氮储罐温度探头分布示意图

Fig. 2 Diagram of temperature test probes' arrangement in liquid nitrogen tank

3 试验结果及分析

储罐的初始充装率为 0.7 ,充液后夹层真空度为 4.5×10^{-3} Pa。试验过程中 ,环境最高温度为 23.2℃ ,最低温度为 19℃ ,大气压为 85.1kPa ,相对湿度为 55.3%。

3.1 储罐压力随时间的变化

图 3 为制冷机关闭状态下储罐压力与时间的变化关系,由图可知,在测试时间 720min 内,储罐压力随时间的增加逐渐上升。480min 之前,压力呈线性上升趋势,上升速率为 10.9Pa/s; 480min 之后,压力上升速率逐渐减缓,为 2.4Pa/s。储罐压力升高至一定值时,气相空间 BOG 冷凝量增加,压力上升速率减小。

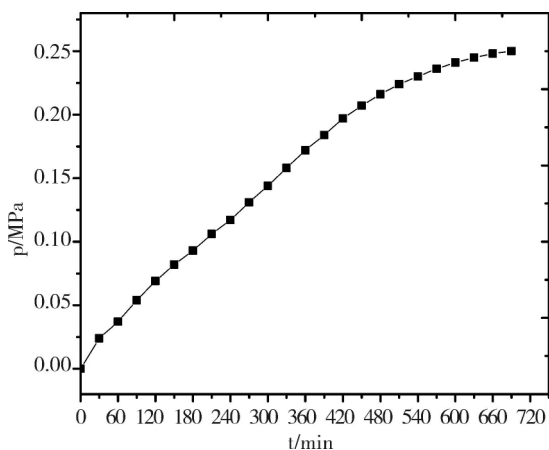


图 3 液氮储罐压力随时间的变化

Fig. 3 Variation of liquid nitrogen tank pressure with storage time

3.2 储罐温度随时间的变化

图 4 显示了制冷机关闭时,储罐内各测试点温度随时间的变化关系。其中, T_1 和 T_2 分别为液相测试点 1 和 2 的温度, T_3 为气液分界面温度, T_4 为气相温度。由图可知,同一时刻,从液相到气相的温度逐渐升高,液相内部的温度 T_1 与 T_2 相差较小,约为 1.2℃,气液分界面的温度高于液相的温度。

随着时间的增加,液相和气液分界面的温度逐渐升高,气相的温度逐渐降低。0~480min 之间,液相温度从 -195.2℃ 升高至 -184℃,气液分界面的温度从 -185℃ 升高至 -172.6℃,两者的上升速率较快,同时气相的温度由 -129℃ 下降为 -136℃,降低了 7℃。480min 后,气相、气液分界面及液相的温度变化趋于平缓,液相测试点 1 与气相测试点 4 的温差趋于稳定,其值约为 45℃。初始阶段,储罐气相空间壁面温度较高,较低温度的 BOG 与较高温度的壁面进行换热,使气相温度升高; 随着时间的推移,壁面温度逐渐降低,BOG 与壁面的换热减弱,气相温度随之降低。

液氮储罐静置 48h 达到热平衡后,每 60min

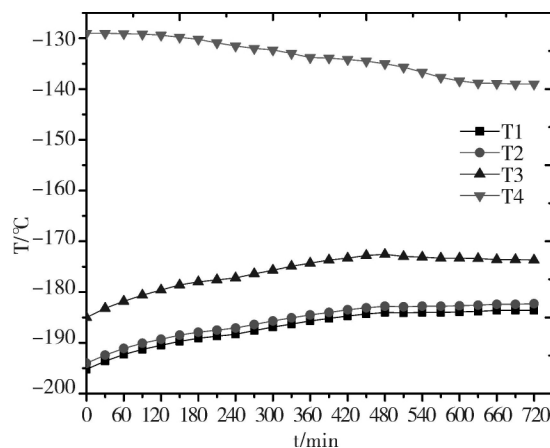


图 4 液氮储罐温度测试点随时间的变化

Fig. 4 Variation of liquid nitrogen tank temperature with storage time

3.3 储罐静态蒸发率计算

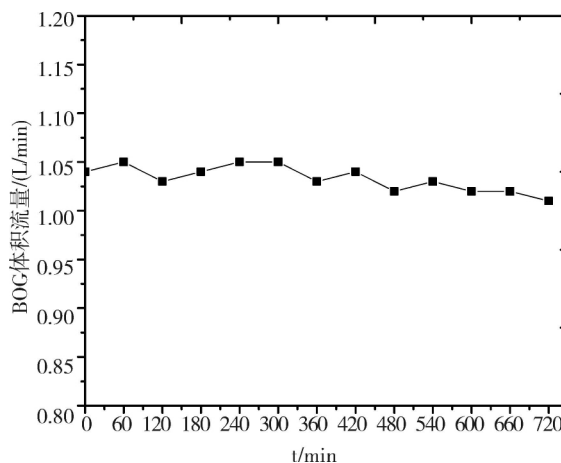


图 5 BOG 瞬时流量随时间的变化规律

Fig. 5 Variation of BOG instantaneous volume flow with time
记录气体流量计的瞬时体积流量、温度和压力。初始充装率为 0.7 时,气体流量计的瞬时流量与时间的变化关系如图 5 所示。由图可知,随着时间的增加,储罐自然蒸发产生的 BOG 流量逐渐减小,且呈上下波动趋势,其最大值为 1.05L/min,最小值为 1.01L/min,这是由于外界环境温度、压力等不确定因素引起的。因此,计算静态蒸发率时,应对有效测试时间段瞬时流量取平均值,以消除不确定因素的影响。

低温液体 BOG 再液化试验系统产生 BOG 的平均流量为 1.033L/min ($0.1722 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), 计算得出高真空 VD-MLI 储罐静态蒸发率为 2.04%/d, 漏热量为 4.1W。

(下转第 45 页)

- current measurement in HTS Bi - 2212 ribbons and round wires [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond. , 2009 ,19(3) .
- [4] Ye L , et al. On the causes of degradation in Bi₂Sr₂Ca-Cu₂O_{8+x} round wires and coils by quenching at 4. 2K [J]. IEEE Trans. Appl. Supercond. ,2013 23(5) .
- [5] 马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望 [J]. 物理 ,2015 ,44(10) : 674 - 683.
- [6] Eijnden N C V D , et al. Axial tensile stress - strain characterization of ITER model coil type Nb₃Sn strands in TARSIS [J]. Supercond. Sci. Technol. ,2005 ,18: 1523 - 1532.
- [7] Vase ,Per , et al. Current status of high - T_c wire [J]. Superconductor Science and Technology , 2000 , 13 (7) : R71.
- [8] Zhang P X , et al. Preparation and properties of (Bi , Pb) - 2223 multifilamentary tapes with Ag - alloy sheath [J]. Physica C: Superconductivity ,2003 ,392: 1011 - 1014.
- [9] 章立源 张金龙,崔广霖. 超导物理学 [M] 北京: 电子工业出版社 ,1995: 189 - 199.

(上接第 31 页)

4 结论

搭建了一套低温液体 BOG 再液化试验系统, 通过试验分析了高真空 VD - MLI 储罐压力、不同位置的温度和蒸发率与时间的变化规律, 主要结论有:

(1) 从液相到气相的温度逐渐升高, 气液分界面的温度高于液相的温度, 液相内部不同位置温度相差较小, 约为 1. 2℃。

(2) 随储存时间的增加, 液相的温度和气液分界面的温度逐渐升高, 气相的温度逐渐降低, 最终达到相对稳定的气液相温度。

(3) 试验条件下, 储罐初始充装率为 0. 7 时, 自然蒸发的 BOG 流量随时间的增加而逐渐减小, 且呈波动趋势, 其平均流量为 1. 033L/min; 储罐的静态蒸发率为 2. 04% / d, 漏热量为 4. 1W。

参考文献

- [1] 谢高峰, 陈叔平, 袁斌, 等. 低温液体无损贮存压力升高的实验与计算 [J]. 低温与超导, 2006 ,34(6) : 437 - 439.
- [2] Matthew J D , Vadim N S , Jacob B , et al. Temperature stratification in a cryogenic fuel tank [J]. Journal of Thermophysics and Heat transfer ,2013 ,1: 116 - 126.
- [3] Scott L E , Robbins. Temperature stratification in a no venting liquid helium dewar [J]. Advances in Cryogenic Engineering ,1960 (5) : 19 - 23.
- [4] Rotenberg Y. Numerical simulation of self - pressurization in a small cryogenic tank [J]. Advances in Cryogenic Engineering , 1989 , 29: 962 - 971.
- [5] Hastings L J ,Hedayat A ,Brown T M. Analytical modeling and test correlation of variable density multilayer insulation for cryogenic storage [R]. NASA /TM 2004 - 213175 ,Marshall Space Flight Center , May 2004.
- [6] 李玉星, 王武昌, 乔国发, 等. 密闭 LNG 储罐内的压力和蒸发率 [J]. 化工学报, 2010 , 61 (05) : 1241 - 1246.
- [7] 陈亮, 梁国柱, 魏一, 等. 低温推进剂贮箱压力变化的 CFD 仿真 [J]. 航空动力学报, 2015 , 30(06) : 1470 - 1477.
- [8] 程进杰, 孙郁, 杨建斌, 等. ZBO 存储低温储箱内的压力变化模拟分析 [J]. 低温与超导, 2014 , 42(1) : 17 - 20.
- [9] 陈联, 孙冬花, 丁栋, 葛瑞宏, 朱建炳. 低温绝热压力容器蒸发率测试方法分析 [J]. 低温与超导, 2016 , 44 (4) : 14 - 17 + 21.
- [10] GB/T 18443. 5 - 2010. 真空绝热深冷设备性能试验方法 第 5 部分: 静态蒸发率测量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. .