

在用 LNG 低温真空绝热容器漏热量监测

李正清, 何 丹, 王田刚, 蔡宇宏, 刘筱文
(无锡泓瑞航天科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: LNG低温真空绝热容器在使用过程中因真空绝热夹层内材料放气、漏气以及夹层材料的老化、松散等原因, 可导致低温容器真空绝热性能下降, 致使低温容器内的低温液体的蒸发量增加, 造成液体的浪费, 此时储罐蒸发率可能超过要求, 使得储罐不能继续使用。论文介绍了一种简单的方法对低温容器的漏热量进行实时监测, 若储罐漏热量超过限定值时报警提醒, 确保低温容器的使用安全、人员安全。

关键词: 低温; 真空绝热; 漏热

中图分类号: TB61

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2016)01-0053-03

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2016.01.012

USING LNG CRYOGENIC VACUUM HEAT REJECTED VOLUME LEAKING HEAT DETECTED

LI Zheng-qing, HE Dan, WANG Tian-gang, CAI Yu-hong, LIU Xiao-wen
(Wuxi Hongrui aerospace Technology Co., Ltd, Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: Performance of LNG cryogenic vacuum heat rejected volume decreased, because of gas releasing or leaking of the volume wall material, or old and loose interlayer material. And cryogenic volume evaporation will increase, which result in volume set at dangerous state. Therefore it is necessary to detect cryogenic volume performance via simple method, in order to ensure safety of person and reduce the waste of LNG liquid. Detected equipment will alarm if the cryogenic volume evaporation exceeds the limit.

Key words: cryogenic; vacuum heat rejected; heat leaking

0 引言

随着液化天然气(LNG)行业的快速发展, 使得与其配套的贮存和运输设备也出现了前所未有的快速增长之势。特别是近几年来, 随着我国液化天然气的推广普及, 存贮、运输LNG的低温设备形式已多样化, 需求量也迅速增加。近期的大气污染和雾霾等恶劣气候状况影响, 使得国家在清洁能源利用方面的支持力度加大, 政策性扶持条件增多, 诸多条件推动了我国以LNG为动力能源的运输设备产业的迅猛发展, LNG低温设备的需求量急剧增加。

LNG储罐盛装的低温液化天然气处于深低温状态, 特点是液体温度低、气化潜热小、气液体积比大、蒸发后局部浓度大, 由此决定了低温容器必须具备良好的绝热性、密闭性及安全可靠。对低温液体和低温容器的使用、管理不慎有可能造成火

灾、爆炸、窒息等严重事故, 给国家和人民财产造成损失。因此通过实时监测LNG低温容器的漏热量来监测低温容器真空绝热性能, 确保低温容器的使用安全是非常必要的。

1 物理模型

低温真空绝热容器中的LNG外部漏热主要由内外容器壳体间支撑及管道的导热、真空绝热夹层内气体对流换热及内外壁间辐射换热导致其内储罐压力、温度的升高, 通过实时监测内储罐内LNG压力、温度变化情况, 可进行低温容器漏热量的计算分析, 确定低温容器的漏热量。

首先在LNG储罐顶部和底部设置温度压力传感器, 测量储罐内LNG的饱和蒸气压力和温度, 并通过饱和温度和压力的关系式确保测试值的准确性。LNG储罐放置一段时间后, 漏热导致容器内饱

收稿日期: 2015-10-14

作者简介: 李正清(1984-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事真空低温技术及检测。E-mail: ahanda-nwpu@163.com。

和温度和压力升高,蒸气密度增大,同时容器内 LNG 的温度也升高。因此通过计算容器内饱和蒸气压及 LNG 内能的变化就能够确定 LNG 储罐的漏热量。

2 方案设计

在用 LNG 低温真空绝热容器漏热监测方案设计如图 1 所示,低温真空绝热容器在静置或运动过程中(运输槽车),因漏热和液体晃动作用等影响会使低温容器内的压力升高,因此在低温真空绝热容器的顶部和底部各设置一组温度和压力的传感器,测量容器内温度及压力的变化。

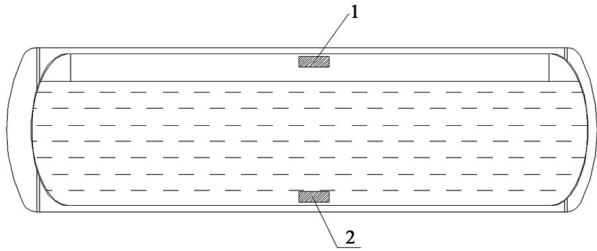


图1 低温容器漏热量监测示意图
1. 温度压力传感器A; 2. 温度压力传感器B

2.1 确认测试数值有效

低温真空绝热容器内 LNG 液体饱和压力与温度的关系如式(1)^[2]所示,将温度压力传感器 A 测得的数值代入式(1),如满足式(1),即两边计算值相等,且温度传感器 A 与 B 的差值在误差允许范围内,则认为测得的温度压力正确有效。

$$\lg \frac{p}{133.32} = 14.6667 - \frac{570.97}{T} - 3.3373 \lg T + 2.1999 \times 10^{-9} T + 1.3096 \times 10^{-5} T^2 \quad (1)$$

式中: p 为传感器 A 测试饱和蒸气压; T 为饱和蒸气压力对应的温度。

2.2 低温介质质量计算

低温容器中的介质包括低温液体与气体,初始时刻低温介质总质量由式(2)^[2]确定

$$m = \rho_g V_g + \rho_l V_l \quad (2)$$

其中气体及液体的体积可由液位计通过计算得出,也可采用温度压力传感器中 A 与 B 的压差计算低温容器内液体及气体体积, LNG 密度由式(3)^[2]计算:

$$\rho_l = 159.98 \times 0.2881^q \quad (3)$$

式中: $q = -\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{0.277}$ 。

LNG 饱和蒸气的密度由式(4)^[2]计算。

$$\rho_g = 2000 \times [0.11206 - 0.0006064(T - 273.15)] - \rho_l \quad (4)$$

一段时间后因漏热温度及压力均发生变化,但容器内总质量不变,此时容器内气体及液体的体积可通过方程组(5)进行计算。

$$\begin{cases} \rho_g V_g + \rho_l V_l = m \\ V_g + V_l = V \end{cases} \quad (5)$$

2.3 低温介质内能计算

低温容器内介质的内能由液体及气体内能组成,由式(6)计算:

$$U = U_g + U_l \quad (6)$$

其中液体或气体的内能通过温度及定压比热由式(7)^[3]计算:

$$U = mc_p T \quad (7)$$

式(7)中天然气气体的定容比热容与定压比热容的关系为 $c_v = c_p / 1.32$, 比热容 c_p 由式(8)^[1]液态定压比热容与式(9)^[1]气态定压比热容计算。

$$c_{pl} = 62.5 \times (-0.018 + 1.1982T - 9.8722 \times 10^{-3} T^2 + 3.1670 T^3) \quad (8)$$

$$c_{pg} = 62.5 \times (34.942 - 3.9957 \times 10^{-2} T + 1.9184 \times 10^{-4} T^2 - 1.5303 \times 10^{-7} T^3 + 3.9321 \times 10^{-11} T^4) \quad (9)$$

2.4 低温介质内能变化

一段时间内低温介质内能的变化即为低温容器的漏热量,可以通过式(10)进行计算。

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (10)$$

2.5 低温容器蒸发率计算

低温容器真空绝热性能的优劣由容器的静态蒸发率确定,不同绝热形式、容积的蒸发率指标可参照 GB/T 18442 的要求。其衡量标准为每天蒸发的液体占有效容积的比值(%/d),且标准中一般按照液氮的蒸发量来衡量,因此需要将漏热量转化为液氮的蒸发量,并获得低温容器的蒸发率 α ^[8]。

$$\alpha = 24 \frac{Q}{\rho \Delta t} \cdot \frac{1}{V_a} \times 100\% \quad (11)$$

3 计算及结果分析

某一储存 LNG 低温容器内胆容积为 30 m³,有效容积为 27.5 m³的真空粉末绝热低温容器。初始时刻温度压力传感器 A 和 B 的值分别为 P_{A1} 、 T_{A1} 和 P_{B1} 、 T_{B1} ,此时液位高度对应的液体体积为 20.0 m³,放置 1.5 h 后,因漏热导致其温度、压力升高,此时温度压力传感器 A 和 B 的值分别为 P_{A2} 、 T_{A2} 和 P_{B2} 、 T_{B2} ,相应的液位高度对应的液体体积为 20.53 m³,具体如表 1 所列。

表1 1.5 h前后温度压力传感器值

P_{A1}/Pa	T_{A1}/K	P_{B1}/Pa	T_{B1}/K
1 040 000	150.00	1 047 015	155.00
P_{A2}/Pa	T_{A2}/K	P_{B2}/Pa	T_{B2}/K
1 259 000	155.00	1 266 015	155.00

将表1中的参数代入式(1)~(9)计算得到各参数值如表2所列。

表2 低温容器漏热及蒸发量计算

初始时刻	参数值	1.5 h后	参数值
气体质量/kg	163.30	气体质量/kg	186.92
液体质量/kg	7 158.00	液体质量/kg	7134.38
气体定压比热容/ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	2.908 3	气体定压比热容/ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	3.125 7
液体定压比热容/ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4.047 4	液体定压比热容/ $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4.214 5
气体内能/kJ	359.79	气体内能/kJ	442.62
液体内能/kJ	28 971.29	液体内能/kJ	30 067.84
总内能/kJ	29 331.08	总内能/kJ	30 510.46
漏热量/kJ		1179.38	
蒸发率(按液氮计算) (%/d)		0.426	

由表2的计算可知,该低温容器目前漏热量换算液氮的静态蒸发率为0.426%/d,按GB/T 18442的规定,该低温容器的规定静态蒸发率值为0.445%/d,满足设计要求。按照目前在用低温容器定检静态蒸发率指标为规定值2倍的要求,当传感器测得低温容器蒸发率超过规定值2倍时,进行报警,然后对低温容器全面检修,确保低温容器的使用安全。

4 结论

目前国内低温真空绝热容器在使用过程中,尚

未对其性能进行有效的全程监测,按照国家低温容器使用规范要求,每隔3~5年需要进行定检,定检过程较为繁琐、周期长,且不能对低温容器的使用性能形成实时有效监管。在用LNG低温真空绝热容器漏热量监测通过对低温真空绝热容器内温度及压力实时监测,建立反映低温容器综合性能的静态蒸发率与温度及压力参数之间的关系,实现低温真空绝热容器性能的实时监测,并将测量的结果通过无限网络等实时传输到监控室,存在超标时及时报警并处理,确保低温容器的使用安全及人员安全。

参考文献:

- [1] 黄永华,陈国邦.低温流体热物理性质[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [2] 陈国邦,包锐,黄永华.低温工程技术[M].数据卷.北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 华自强,张忠进.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 陈叔平,任永平,殷劲松,等.撬装式LNG汽车加气站的应用[J].燃气与热力,2010,30(10):B11-B14.
- [5] 朱保国,李晓明,宋启祥,等.液化天然气储罐安全技术分析[J].石油化工设备,2010,39(1):86-89.
- [6] 张安,陈联,丁栋,等.绝热深冷设备真空性能的检测方法分析[J].真空与低温,2014,20(5):295-297.
- [7] 温永刚,王先荣,陈光奇,等.VIP绝热性能及其影响参数分析[J].真空与低温,2009,15(3):165-169.
- [8] 中国国家标准化管理委员会.GB24159-2009.焊接绝热气瓶[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [9] 中国锅炉压力标准化委员会.GB/T 18443-2010.静态蒸发率测量[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [10] 国家低温容器质量监督检验中心.GB/T18443-2001.静态蒸发率测量[S].北京:中国标准出版社,2001.