

文章编号: 1000-5862(2020)04-0341-04

LNG 气瓶传热计算方法及实验验证

杨刚¹, 黄思^{2*}, 夏莉¹, 易天坤², 郑任重¹

(1. 广东省特种设备检测研究院, 广东 佛山 528000; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 以液氮为工质, 选取 150 L、330 L 和 450 L 等 3 种规格 LNG 气瓶进行传热计算。采用饱和均质模型, 根据在饱和状态下的热力学关系, 拟合出液氮物性参数与温度的关系并编制程序, 计算得到了气瓶内介质压力随时间的变化规律。通过与有关文献的液氮升压实验数据对比, 验证了该计算模型的有效性。

关键词: LNG 气瓶; 液氮; 饱和均质模型; 升压规律

中图分类号: TE 962 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.04.03

0 引言

液化天然气(LNG)作为一种清洁能源,以低碳环保的优势广泛应用于汽车和船舶等的燃料系统^[1-2]。LNG以液态形式储存在低温气瓶内,当气瓶内部压力达到临界压力时,减压阀将自动开启降低压力以保证气瓶安全^[3]。

近年来国内外学者相继开展了 LNG 气瓶传热方面的研究。R. T. Swim^[4]和 A. F. Schmidt等^[5]分别采用不同的分析方法研究了低温气瓶液体的自增压,并与实验结果进行对比。文献[6-7]采用数值计算方法研究了气瓶内介质的温度和压力等物性参数的变化规律,并将计算结果和实验值进行了对比。谢高峰^[8]和王贵仁^[9]对 15 L 的多层绝热气瓶内压力变化进行了实验研究,并编制了低温气瓶无损储存热力学的计算程序。

虽然众多学者已经对低温容器内压力及温度变化规律作了一定的研究,但到目前为止仍然没有一个能被广泛应用的计算方法,同时实验数据的匮乏也给理论模型的验证增加了困难。此外,由于液氮具有稳定、安全、易操作的特点,被广泛用于 LNG 气瓶的升压实验^[10]。因此,本文以液氮为介质,选取饱和均质的传热模型 LNG 气瓶进行传热计算,得到气瓶内压力随时间的变化规律并经过实验结果验证,为 LNG 气瓶的安全问题提供技术支持。

1 计算模型与方法

1.1 物理模型

选取 3 种常见规格的 LNG 气瓶作为研究对象,几何参数如图 1 和表 1 所示。LNG 气瓶为多层保温结构。在计算中气瓶各层所选取材料的传热系数如表 2 所示。选取液氮为低温介质,其在饱和状态下的物性参数参见文献[11]。

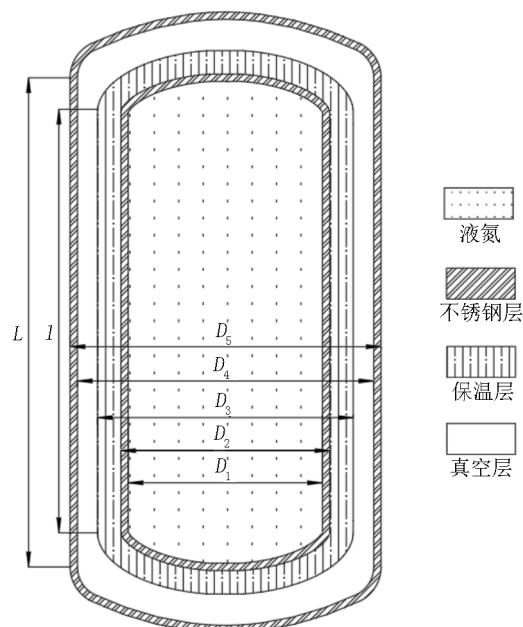


图1 气瓶简图

收稿日期: 2020-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(21878102)和广东省质监局科技(2018CT14)资助项目。

通信作者: 黄思(1962-),男,广西南宁人,教授,博士,博士生导师,主要从事流体机械及工程的研究。E-mail: huangsi@scut.edu.cn

表 1 3 种规格 LNG 气瓶基本参数

产品型号	CDPW500-	CDPW500-	CDPW600-
	150	330	450
气瓶容积 V/L	150	330	450
充装率 $\varphi/\%$	90	90	90
临界压力 $p_{cr}/(\text{MPa})$	1.9	1.9	1.9
L/mm	1 085	1 410	1 565
l/mm	980	1 270	1 410
D_1/mm	410	533	590
D_2/mm	414	539	597
D_3/mm	429	558	619
D_4/mm	446	580	643
D_5/mm	450	586	650

表 2 气瓶各层材料的传热系数 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

项目	材料	传热系数
不锈钢层	0Cr18Ni9	$\lambda_1 = 16^{[12]}$
保温层	铝箔/玻璃纤维纸	$\lambda_2 = 0.045^{[13]}$
真空层		$\lambda_3 = 0.000\ 34^{[14]}$

1.2 低温容器的热力学模型

目前低温无损储存的传热模型主要有饱和均质、均相表面蒸发、热分层和 3 区模型. 由于所研究的 LNG 气瓶的容积较小, 介质较快达到热平衡, 不容易形成温度分层, 故采用饱和均质模型进行计算. 根据热力学定律在 Δt 时间内有如下关系^[15]:

$$Q = (c_{pl}m_l + c_{pg}m_g) \Delta T = \Phi \Delta t, \quad (1)$$

其中 Q 为气瓶吸收的热量, c_{pl} 为液氮比热, c_{pg} 为氮气比热, m_l 为液氮质量, m_g 为氮气质量, ΔT 为 Δt 时间间隔前后气瓶内温差, Φ 为漏热率.

根据氮在饱和状态下的热力学关系^[11], 在 70 ~ 120 K 温度范围内拟合出液氮比热 c_{pl} 、氮气比热 c_{pg} 、压力 p 和汽化潜热 r 与温度 T 的关系:

$$\begin{cases} c_{pl} = 124.557\ 77 - 5.606\ 04T + 0.095\ 6T^2 - \\ 7.210\ 76 \times 10^{-4}T^3 + 2.034\ 54 \times 10^{-6}T^4, \\ c_{pg} = 194.325\ 59 - 8.822\ 81T + 0.150\ 07T^2 - \\ 0.001\ 13T^3 + 3.170\ 3 \times 10^{-6}T^4, \\ p = -0.866\ 93 + 0.038\ 17T - 4.280\ 34 \times 10^{-4}T^2 - \\ 1.701\ 08 \times 10^{-6}T^3 + 3.809\ 29 \times 10^{-8}T^4, \\ r = -488.049\ 87 + 34.359\ 03T - 0.611\ 21T^2 + \\ 0.004\ 73T^3 - 1.408\ 87 \times 10^{-5}T^4. \end{cases} \quad (2)$$

为计算气瓶的漏热率 Φ 作出如下假设: 1) 漏热量仅考虑以热传导的方式, 且全部被气相和液相主体所吸收; 2) 整个气瓶的传热方向为保温层的垂直方向, 气瓶总热阻是多个保温薄层热阻的叠加.

气瓶漏热有圆筒体漏热 Φ_1 和封头漏热 Φ_2 2 个部分^[16]:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \pi (L + l) (T - T_s) / (\ln(D_2/D_1) / \lambda_1 + \\ &\ln(D_3/D_2) / \lambda_2 + \ln(D_4/D_3) / \lambda_3 + \ln(D_5/D_4) / \lambda_1), \\ \Phi_2 &= 2\pi (T - T_s) / ((1/D_1 - 1/D_2) / \lambda_1 + (1/ \\ &D_2 - 1/D_3) / \lambda_2 + (1/D_3 - 1/D_4) / \lambda_3 + (1/D_4 - 1/ \\ &D_5) / \lambda_1), \end{aligned}$$

则总的漏热率为

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \zeta (T - T_s), \quad (3)$$

其中

$$\zeta = \pi (L + l) / (\ln(D_2D_5/D_1D_4) / \lambda_1 + \ln(D_3/D_2) / \lambda_2 + \ln(D_4/D_3) / \lambda_3) + 2\pi / ((1/D_1 - 1/D_2 + 1/D_4 - 1/D_5) / \lambda_1 + (1/D_2 - 1/D_3) / \lambda_2 + (1/D_3 - 1/D_4) / \lambda_3),$$

T_s 为气瓶外环境温度.

将 (3) 式代入 (1) 式得

$$\zeta (T - T_s) \Delta t = (c_{pl}m_l + c_{pg}m_g) \Delta T. \quad (4)$$

1.3 数值计算

采用向前差分格式将 (4) 式进行离散, 对该式左边温度 T 采用初始温度 T^i 和终了温度 T^{i+1} 的平均值计算:

$$\zeta ((T^i + T^{i+1}) / 2 - T_s) \Delta t = c_{pl}^i m_l^i (T^i - T^{i+1}) + c_{pg}^i m_g^i (T^i - T^{i+1}). \quad (5)$$

由 (5) 式得气瓶内介质终了温度 T^{i+1} 的表达式为

$$T^{i+1} = ((2c_{pl}^i m_l^i + 2c_{pg}^i m_g^i - \zeta \Delta t) T^i + 2\zeta \Delta t T_s) / (\zeta \Delta t + 2c_{pl}^i m_l^i + 2c_{pg}^i m_g^i). \quad (6)$$

因此终了的蒸发率 α^{i+1} 、氮气质量 m_g^{i+1} 和液氮质量 m_l^{i+1} 有如下关系^[17]:

$$\alpha^{i+1} = |\zeta ((T^i + T^{i+1}) / 2 - T_s)| / (r^i m_l^i), \quad (7)$$

$$m_g^{i+1} = \alpha^{i+1} m_l^i, \quad m_l^{i+1} = m_l^i - m_g^{i+1}. \quad (8)$$

已知条件有气瓶容积 V 、充装率 φ 和环境温度 T_s 等.

初始条件为

$$m_l^0 = \rho_l^0 V \varphi, \quad T^0 = 77.5\ \text{K}, \quad p^0 = 0.1\ \text{MPa},$$

其中 ρ_l^0 为初始状态液氮密度.

因为气瓶安全阀的起跳压力为 1.9 MPa, 因此当达到这个压力值时计算结束, 计算流程如图 2 所示.

2 计算结果的实验验证

文献[18-19]均以液氮为介质对在表 1 中的 3 种规格 LNG 气瓶采用自然升压法测得压力随时间的变化规律. 因此, 可将本文计算结果与上述的实验结果对比来验证计算方法的有效性(见图 3).

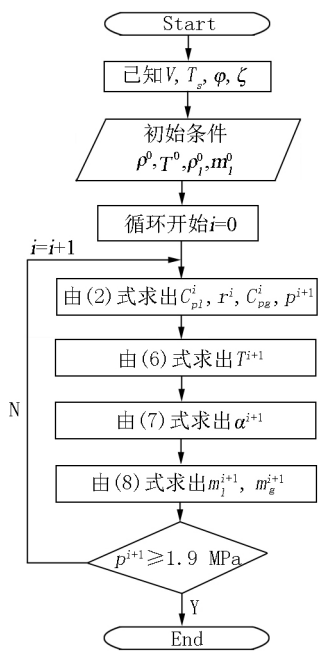


图 2 方法流程图

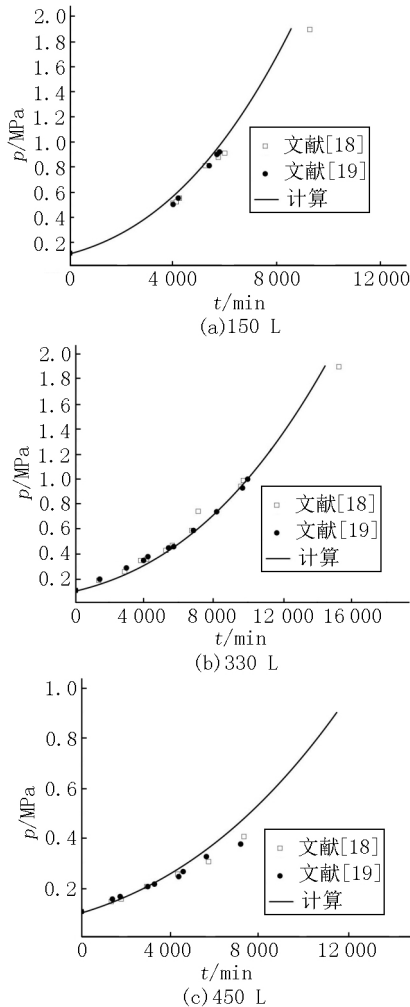


图 3 气瓶内压力随时间的变化规律

由图 3 可见,计算结果与实测数据比较接近,升压规律一致:气瓶内压力前期增长缓慢,但随着时间

的增加,压力上升的速度增快,压力与时间近似有 3 次幂的关系.其中 450 规格的气瓶容积较大引起了温度分层.随着时间的推移,计算值与实测值有一定的偏差.

3 结论

- 1) 本文采用饱和均质模型,拟合介质的热力学参数与温度的关系,编制了 LNG 气瓶传热计算程序,得到了气瓶内压力随时间的变化规律;
- 2) 气瓶内压力前期增长缓慢,随着时间的推移,压力上升的速度增快,压力与时间近似有 3 次幂的关系;
- 3) 计算结果得到了 3 种规格 LNG 气瓶液氮升压实测结果的验证,这表明了本文所采用的计算方法是合理有效的.

4 参考文献

[1] 冯志刚. 车用 LNG 气瓶定期检验工艺及评定标准 [J]. 中国特种设备安全 2013 29(4): 27-31.

[2] 蒋瑞杰. LNG 汽车加气站技术与革新 [J]. 制冷与空调 2012 26(6): 563-566.

[3] 韩涛 祁增禄 康思宇 等. LNG 汽车气瓶的技术要求和工作原理 [J]. 汽车实用技术 2017(16): 192-193 215.

[4] Swim R T. Temperature distribution in liquid and vapor phases of helium in cylindrical Dewars [M] // Timmerhaus K D. Advances in Cryogenic Engineering. Boston: Springer, 1960: 498-504.

[5] Schmidt A F, Purcell J R, Wilson W A, et al. An experimental study concerning the pressurization and stratification of liquid hydrogen [M] // Timmerhaus K D. Advances in Cryogenic Engineering. Boston: Springer, 1960: 487-497.

[6] Boukeffa D, Boumaza M, Francois M X, et al. Experimental and numerical analysis of heat losses in a liquid nitrogen cryostat [J]. Applied Thermal Engineering 2001 21(9): 967-975.

[7] Khemis O, Boumaza M, Ali M A, et al. Experimental analysis of heat transfers in a cryogenic tank without lateral insulation [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2107-2117.

[8] 谢高峰. 低温液体无损贮运理论及实验研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2006.

[9] 王贵仁. 低温容器内压力变化规律的研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2008.

[10] 国家标准化管理委员会. 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:GB/T 18443.5—2010 [S]. 北京:中国标准出版社 2010.
- [11] Yaws C L. Physical properties [M]//Yaws C L. Handbook of Chemical Compound Data for Process Safety. Oxford: Gulf Professional Publishing ,1997: 1-26.
- [12] Calvert J R ,Farrar R A. An engineering data book [M]. 2nd ed. London: Macmillan Publishers Limited ,1999.
- [13] 李倩,曹璇,李晨玉,等. 玻璃纤维保温纸导热系数的理论计算与实验研究 [J]. 中国造纸 2013 ,32(1): 35-41.
- [14] 符锡理. 真空多层绝热理论研究和传热计算 [J]. 低温工程 ,1989(2): 1-11.
- [15] Technical Committee CEN/TC. Cryogenic vessels-methods for performance evaluation of thermal insulation: BS EN 12213—1999 [S]. London: BSI ,1999.
- [16] Shih T M. Numerical heat transfer [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation ,1984.
- [17] 甘在华. 低温容器蒸发率的实验研究 [J]. 广州化工 , 2013 ,41(2): 48-49 ,72.
- [18] 刘晓超. LNG 气瓶传热性能的实验研究及分析 [D]. 镇江: 江苏科技大学 2015.
- [19] 夏莉,劳英杰,李蔚,等. 车用 LNG 气瓶升压规律的研究 [J]. 制冷与空调 2015 ,29(6): 741-743 ,748.

The Calculation Method and Experimental Verification of LNG Cylinder Heat Transfer

YANG Gang¹, HUANG Si^{2*}, XIA Li¹, YI Tiankun², ZHENG Renzhong¹

(1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research ,Foshan Guangdong 528000 ,China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou Guangdong 510641 ,China)

Abstract: Liquid nitrogen is used as the working medium in this study ,and three specifications of LNG cylinders (150 L ,330 L and 450 L) are selected for heat transfer calculation. According to the thermodynamic relationship in the saturated state ,a saturated homogeneous model is adopted to fit the relations between the temperature and the physical parameters of liquid nitrogen and make program. A code is made to get the change law of the medium pressure in the cylinder with time. The validity of the calculation method is verified by comparison with experimental data of liquid nitrogen pressure boost in related literatures.

Key words: LNG cylinder; liquid nitrogen; saturated homogeneous model; pressure increasing rules

(责任编辑:王金莲)

(上接第340页)

The Vibration Measurement and Analysis of Twin-Tower under Flow Loads

GUO Chenguang¹, HUANG Si^{1*}, WEI Yifeng¹, WANG Wenfeng², YE Weiwen², LI Maodong²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou Guangdong 510641 ,China;

2. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute ,Guangzhou Guangdong 510663 ,China)

Abstract: In this study ,the on-site measurement and fluid-solid coupling calculation are performed for a chemical twin-tower with heights of 33 m and 24 m in a petrochemical company to analysis its vibration. The gas phase medium is natural gas and the liquid phase medium is olefin. The anemometer is used to measure the wind speed and direction upstream of the equipment ,the resistance strain gauges are used to measure the axial strain of the stabilizing tower ,the magnetoelectric vibration sensors are used to measure the vibrating speed and displacement of the twin-tower. Dynamic response and natural frequency of twin-tower under internal and external flow loads are obtained. The result shows that the fluid-structure coupling calculation method used in this paper can effectively evaluate the vibration and provide a reference for the safe operation of the multi-tower equipment.

Key words: twin-tower; on-site measurement; strain and displacement; fluid-solid coupling

(责任编辑:王金莲)