

大型 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充分析与实践

童文龙¹ 田连军¹ 傅诚铁² 钟海¹

1. 广东珠海金湾液化天然气有限公司, 广东 珠海 519001;

2. 中海福建液化天然气有限公司, 福建 莆田 351100

摘要:大型 LNG 全容储罐常采用珍珠岩进行绝热保冷,投用后由于运行时间累积、储罐压力波动、罐内设备启停及卸料过程中引起的震动等,储罐内、外罐间珍珠岩会出现不同程度的不均匀沉降,若不及时处理将影响储罐保冷效果,严重时损坏储罐内部结构,对生产运营造成较大安全隐患。结合珠海 LNG 接收站对大型 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充实践,开展珍珠岩填充置换装置、储罐压力控制、珍珠岩填充高度、评估方式等分析研究,探讨 LNG 全容储罐珍珠岩沉降表象及其在线填充过程控制,总结大型 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充方法和经验,为其它 LNG 接收站全容储罐开展珍珠岩在线填充提供参考。

关键词:大型 LNG 全容储罐;珍珠岩;沉降;在线填充

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.01.015

Analysis and Practice of Online Filling of Perlite in Large LNG Tank

Tong Wenlong¹, Tian Lianjun¹, Fu Chengtie², Zhong Hai¹

1. Guangdong Zhuhai Golden Bay LNG Ltd, Zhuhai, Guangdong, 519001, China;

2. CNOOC Fujian LNG Co., Ltd, Putian, Fujian, 351100, China

Abstract: Large LNG full tanks are insulated by perlite. The accumulation of running time, the fluctuation of tank pressure, the vibration caused by the start-up and shutdown of equipment in the tank and the unloading process will lead to the uneven subsidence of perlite in varying degrees. If not handled in time, it will affect the cooling effect of the storage tanks and damage the storage tanks seriously. Based on the on-line filling practice of perlite in large LNG tank at Zhuhai LNG receiving station, the perlite filling replacement device, pressure control of storage tank, filling height of perlite, and practical evaluation methods are analyzed and studied. The perlite settlement representation of LNG storage tanks and the control of on-line perlite filling process are discussed. The on-line perlite filling method and experience of large LNG full storage tanks are summarized, which provides reference for carrying out perlite online filling by other LNG receiving stations.

Keywords: LNG full tank; Perlite; Settlement; Online filling

收稿日期:2018-08-07

基金项目:国家科技重点专项“液化天然气储罐及管道事故应急与装备技术”(2017 YFC 0805805)

作者简介:童文龙(1983-),男,湖北黄冈人,工程师,学士,主要从事液化天然气接收站项目运营管理和项目建设工作。

0 前言

自2006年广东大鹏LNG项目投产以来,国内相继投产了约19座LNG接收站,投用 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 及以上大型LNG全容储罐超过40个,另有十几个大型LNG全容储罐即将投用或正在建设中。大型LNG全容储罐均采用珍珠岩进行绝热保冷,投产运营之后会出现不同程度的珍珠岩沉降,若不及时处理将会损坏储罐内部结构,对生产运营安全造成较大隐患^[1-4]。结合珠海LNG接收站3座 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ 全容储罐珍珠岩在线填充实例,探讨运行中的LNG全容储罐珍珠岩沉降现象和检测手段,研究LNG全容储罐在线填充珍珠岩的控制技术,提炼和总结大型LNG全容储罐珍珠岩在线填充方法和经验,有效降低LNG全容储罐珍珠岩在线填充的安全风险。

1 珍珠岩填充目的及储罐结构

LNG全容储罐保冷结构是储罐结构中重要组成部分,珍珠岩填充质量直接关系储罐投产后的保冷效果,LNG低温储罐可分为单包容、双包容和全包容3种形式, $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG全容储罐主要由内罐、外罐组成,通常情况下操作压力为 $5 \sim 25.0 \text{ kPa}$,内罐操作温度为 -162°C ^[5-6],内罐材质为9% Ni低温钢,直径约80 m,高度约35 m,底板厚度约5 mm;外罐由钢筋混凝土承台、预应力混凝土墙体、钢筋混凝土罐顶组成,钢筋混凝土承台与预应力混凝土墙体、预应力混凝土墙体与钢筋混凝土罐顶连接处均采用混凝土刚性连接;内、外罐之间夹层(环形空间)的厚度约1.0 m,填充300 mm的弹性毡和700 mm膨胀珍珠岩粉末的保冷层,弹性毡紧贴内罐壁板,具有一定的弹性,用来吸收内罐运行时珍珠岩对内罐的挤压力,膨胀珍珠岩粉末填充至钢筋混凝土穹顶下方,以保证环形空间及悬浮吊顶处的保冷效果^[7-10],LNG全容储罐保温结构见图1,按照设计要求,每座储罐BOG日蒸发率不大于0.05%^[11]。

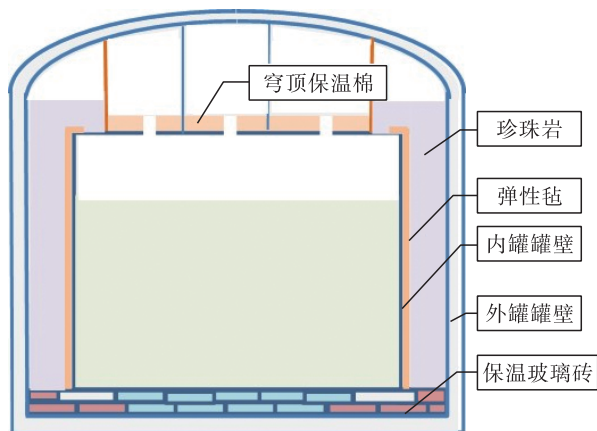


图1 LNG全容储罐保温结构

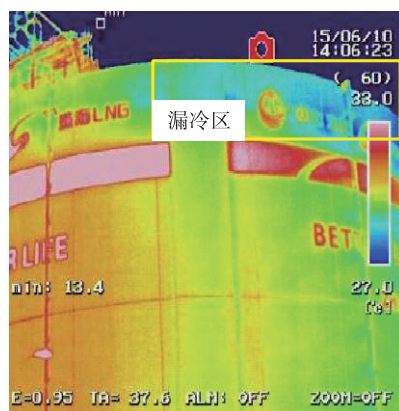
2 珍珠岩沉降原因分析及检测

2.1 沉降原因分析及表象特征

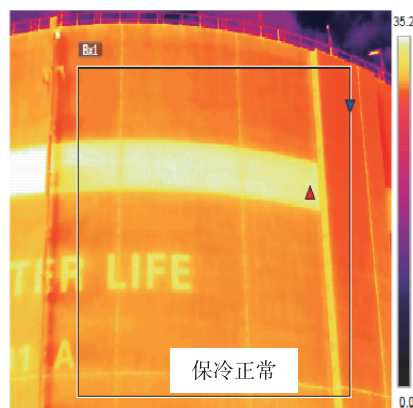
LNG全容储罐投用后,操作压力控制在 $15 \sim 25 \text{ kPa}$ 之间,液位控制在 $2 \sim 32 \text{ m}$ 之间。储罐运行时间累积、操作压力和液位的波动、内罐冷缩变形、罐内设备启停及卸料引起的震动等都会导致储罐珍珠岩出现不同程度的不均匀沉降,从而影响储罐保冷层保冷效果。储罐珍珠岩沉降的主要表象特征为:储罐部分外表出现不均匀结露;部分区域出现青苔;储罐BOG蒸发量明显增加,出口管线BOG温度升高;储罐内部部分温度监测点出现异常变化。

2.2 沉降检测

储罐内部无可窥视系统,无法判断珍珠岩沉降情况,更无法开启储罐进行勘测,只能通过储罐外表结露、长青苔、BOG温度升高等表象初步判断储罐珍珠岩是否发生沉降。为了更科学和客观地判断储罐珍珠岩沉降情况,借助立体红外热成像技术^[12-13],在储罐液位较高或液位较低时对储罐外壁表面进行全面红外热成像 α 可见光图像拍摄检查,监测储罐外壁传热情况。由于罐壁内外温差巨大,存在明显的热传递现象,如果保温层不均匀或缺失,会形成罐壁表面热量传递快慢的差异。保温效果差的区域,热量传递速度较快,表面温度低,对外



a) 热成像漏冷区检测情况



a) 热成像正常区检测情况

图2 储罐立体热成像图

辐射的红外线能量少,在拍摄的红外热图像上表现为温度低的冷区;保温效果好的区域,热量传递速度较慢,表面温度高,对外辐射的红外线能量多,在拍摄的红外热图像上表现为温度高的热区。保温层状况的差异性形成罐壁表面的温度分布差异,红外摄像仪通过获取被拍摄储罐罐壁表面的红外辐射能量,显示出其温度分布状况,形成罐壁表面具有温度分布信息的红外热图像照片。通过分析红外热图像照片,确定漏冷的具体方位、漏冷面积、漏冷程度、漏冷分布状态等,对珍珠岩填充顺序、预估填充量等填充方案的制定提供直观依据。储罐立体热成像见图 2,储罐顶部部分区域颜色较深表示漏冷严重,可以判断出罐内珍珠岩的沉降;部分区域颜色均匀温度正常,可以判断出该部分珍珠岩保持正常。

3 大型 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充

3.1 在线填充难点

珍珠岩在线填充安全等级要求高,罐内充满低温 BOG,在线填充时需防止氧气、水分等随珍珠岩进入储罐,低温 BOG 排出罐外造成冻伤和发生爆炸;在线填充时如果储罐内外压差过大易造成珍珠岩飞溅,颗粒破损,降低保温效能^[14],使填充质量不受控制(与建设期珍珠岩填充不同,运行期珍珠岩在线填充无法开展振捣夯实操作);压差过小容易使珍珠岩在填充管道内堵塞;储罐压力过低 BOG 蒸发量较大,存在放空风险;储罐压力过高,作业过程中罐内天然气容易泄漏。

3.2 在线填充作业解决方法及思路

1) 填充前充分干燥和置换。珍珠岩直接由罐外填充至罐内,极易将空气中氧气、水分等带入储罐,对储罐正常运营产生较大影响,填充前需要采用特殊装置对珍珠岩进行干燥置换,该装置结构主要分为填料仓和填充驱动管道两部分,见图 3。珍珠岩通过填料仓顶部加料口

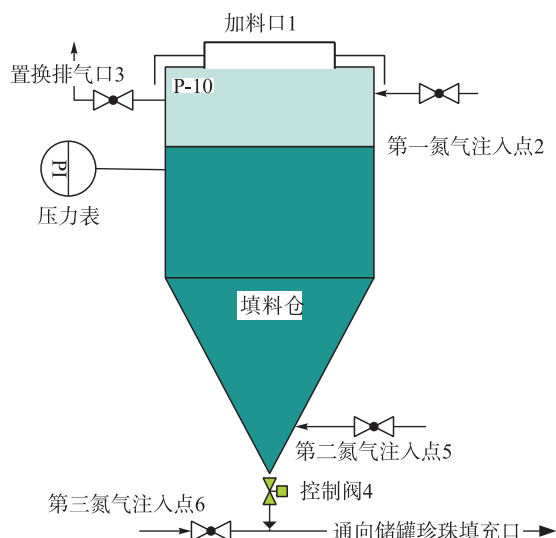


图 3 全密封式珍珠岩填充置换装置

1 填充至填料仓后,关闭加料口,开启氮气口 2、5 和排气口 3,对填料仓珍珠岩进行氮气置换和干燥,直至排放口检测露点合格,氧气含量 $\leq 4\%$,关闭进气口 2、5,排气口 3;置换合格后维持填料仓压约 13 kPa,开启填充控制阀 4,缓慢开启氮气进气口 5,将填料仓中珍珠岩送入填充管道,开启氮气进气口 6 将管道中珍珠岩送入储罐填充口进行填充作业,填充完成后关闭控制阀 4 及氮气进气口 5、6,开启排气口 3 对填充仓进行泄压,泄压完成后开启填充仓顶盖 1 进行下一轮珍珠岩填充。珍珠岩填充过程中采用气体驱动方式将珍珠岩送入储罐^[15-17],为了保证珍珠岩在线填充效果及填充安全,在线填充时控制 LNG 全容储罐最大压力为 10 kPa,控制填料仓最大压力 15 kPa。

2) 控制 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充过程中的压力。LNG 全容储罐投用后将压力控制在 15 ~ 25 kPa 之间,按要求珍珠岩在线填充时储罐压力控制在 10 kPa 内,通过 HYSYS 软件初步模拟和计算,若将储罐压力由 20 kPa 降至 10 kPa,每吨 LNG 将闪蒸 BOG 约 25 m³^[18-19],短时间内接收站无法完全处理该部分 BOG 只能通过火炬放空。为减少损失,实行技术改造,采用单罐提前降压,减少放空,确保填充期间储罐压力要求。

3) 合理确定珍珠岩在线填充量。采用储罐立体热成像技术可以确定珍珠岩沉降的区域,估算预填充量,绘制储罐珍珠岩填充分布图,见图 4,再根据储罐结构和沉降区域计算大概填充量。在填充前需对插入储罐的填充管道标上多处记号标识,当填充至大概填充量时,拔出填充管道检查记号标识,以判断珍珠岩填充情况,当检测不能满足要求时继续填充,直至填充到符合条件满足要求时停止作业。

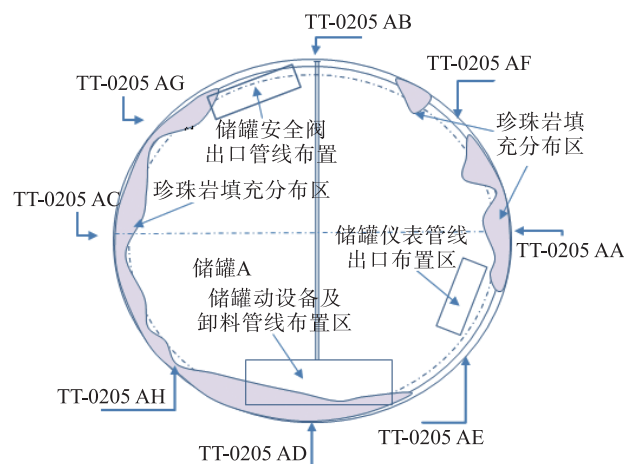


图 4 根据热成像情况绘制的珍珠岩填充分布

4) 精准测量珍珠岩填充高度。珍珠岩填充完成后,需对填充高度进行准确测量,为防止罐内低温 BOG 泄漏和大量珍珠岩喷出,无法采用常规方式测量,通过技术改造,采用“毛细血管法”测量珍珠岩填充情况^[20],见图 5。珍珠

岩填充完成后抽出填充管,在隔离阀法兰顶面安装密封弹性垫片(中间开孔直径10 mm),将6 m长薄壁铜管(壁厚2 mm,顶部装有球阀)底部从弹性垫片中间空垂直插入,打开隔离球阀,铜管垂直缓缓下探,打开铜管顶部球阀,观测铜管顶部球阀冒气情况,均匀冒出珍珠岩后,停止下探深度并在铜管上做好记号,关闭隔离阀,拔出铜管,即可计算出填充高度。设定测量铜管标识处的下探深度为 L ,假设罐外阀门组总成高度1 000 mm,储罐填充口至珍珠岩顶部高度设计要求 $\leq 2\,400\text{ mm}$,当 L 测值 $=1\,000\text{ mm}+2\,400\text{ mm}\leq 3\,400\text{ mm}$ 时,证明某填充口合格^[21-23]。

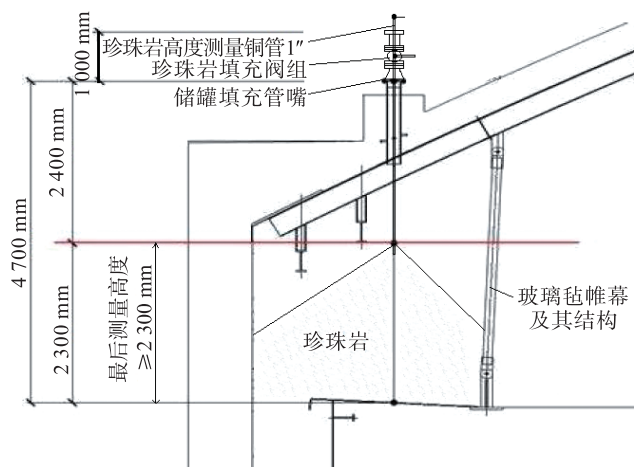


图5 “毛细管法”测量珍珠岩填充高度示例

4 珍珠岩在线填充实践

4.1 在线填充前开展储罐降压操作

为减少BOG火炬放空,通过技术改造和工艺优化,珠海LNG接收站采用“单罐降压,双罐控压”操作方式,见图6,即控制储罐B、C中BOG出口阀门开度,维持储罐B、C处于正常压力状态(20~24 kPa),将集中BOG处理富裕能力对储罐A进行降压,降压完成后根据实际工况,维持储罐A压力在10 kPa内,调整储罐B、C中BOG出口阀门,维持接收站BOG系统的正常运行,避免了火炬放空。

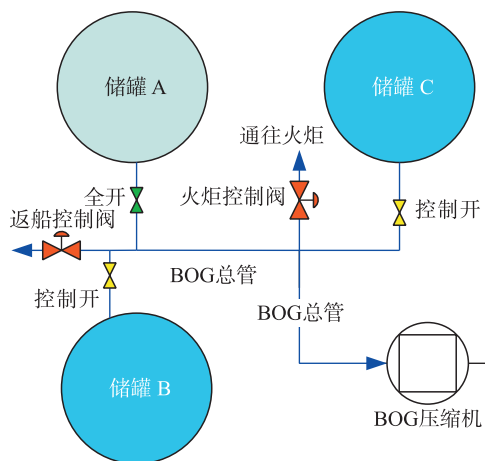


图6 单罐降压,双罐控压流程

4.2 阀组及管线安装

每座储罐在建设中都留有珍珠岩填充口,珍珠岩填充前需要安装填充阀组,在安装过程中应采取有效接地防静电措施,布置干粉灭火器材,选择防爆作业工具等,确保作业全过程安全。安装时首先拆除储罐填充口原有盲板,然后用橡皮塞堵住储罐填充口,清理法兰面;再从下向上依次安装填充阀组、填充管线、阀门总成(下为6"变4"的变径法兰连接4"球阀,1"=2.54 cm)、4"沉头法兰、封板(填充作业时封板拆除),填充软管(填充作业时球阀开启,平时关闭)依次穿过沉头法兰和阀门总成进入储罐填充位置,见图7~8。

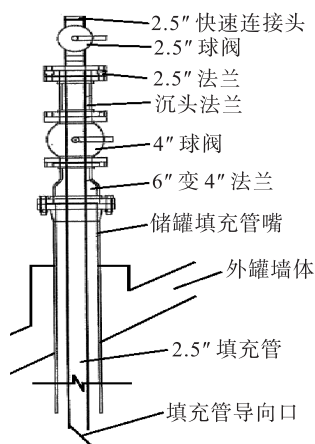


图7 阀组安装



图8 阀组安装后实物

4.3 珍珠岩在线填充过程控制

填充设备放置在储罐顶部填充作业区域,将已发泡的珍珠岩填充至珍珠岩料仓,每次填充装料 1.2 m^3 (6袋),关闭填料仓入口进行氮气置换干燥,置换测试合格后,开启氮气驱动珍珠岩经填充软管进入储罐,完成填充后对填料仓降压,重新向填料仓填充珍珠岩,依此操作,直至测得填充高度满足设计要求为止。填充工艺流程见图9。

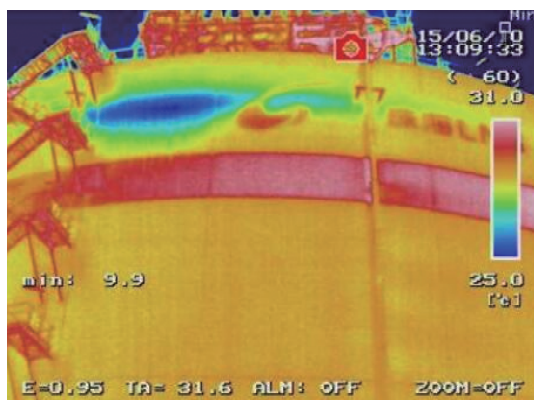


图11 填充前漏冷区域热成型图(左上蓝色)

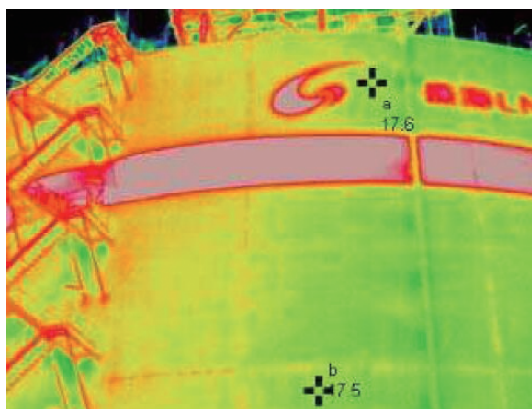


图12 填充后漏冷区域消失

5 结论

1) 现场操作过程中能够通过储罐外观表象、罐内监控点的异常变化及工艺异常情况,初步判断 LNG 全容储罐珍珠岩是否沉降。

2) 通过储罐热成像图能够分析出储罐珍珠岩沉降情况和评估填充效果,在制定填充方案和填充实践过程中有较大参考意义。

3) 采用“毛细管法”能够精准测量珍珠岩填充高度,降低安全风险。

4) 全密封式珍珠岩置换填充设备能够满足 LNG 储罐的珍珠岩在线填充要求。

5) 采取“单罐降压,双罐控压”的方式能够控制储罐压力,避免火炬放空。

6) 建设期在储罐顶部珍珠岩预留口加装永久球阀,可以降低阀组及管线安装风险。

7) 设计过程中在储罐顶部增设内部温度监测点,可以开展珍珠岩沉降预警。

参考文献:

[1] 王 冰,陈学东,王国平.大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展[J].天然气工业,2010,30(5):108-112.

Wang Bing, Chen Xuedong, Wang Guoping. Design of Large Low-temperature LNG Storage Tanks and New Progress in Its Construction Technology [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (5): 108-112.

[2] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2004.

Gu Anzhong, Lu Xuesheng, Wang Rongshun. Technology of Liquefied Natural Gas [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[3] 张应武,左绪银.膨胀珍珠岩的真空充填技术与储罐结霜现象的分析[J].特种设备安全技术,2005,(2):24.

Zhang Yingwu, Zuo Xuyin. Vacuum Filling Technology of Expanded Perlite and Analysis of Frost Phenomenon in Storage Tank [J]. Safty Technology of Special Equipment, 2005, (2): 24.

[4] 孔令海,黎文锋,邓文源,等.LNG接收站储罐冷却过程中蒸发气体的零排放技术[J].天然气工业,2017,37(5):81-85.

Kong Linghai, Li Wenfeng, Deng Wenyuan, et al. BOG Zero Emission Technology in the Process of Tank Cooling in LNG Terminals [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (5): 81-85.

[5] 甄 洁.LNG储罐膨胀珍珠岩填充技术及施工质量的控制[J].油气储运,2016,35(4):417-421.

Zhen Jie. Perlite Expansion & Filling Technology for LNG Storage Tanks and Relevant Quality Control [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35 (4): 417-421.

[6] 殷劲松,马小红,陈叔平.大型 LNG 储罐关键技术[J].煤气与热力,2011,31(7):13-17.

Yin Jinsong, Ma Xiaohong, Chen Shuping. Key Technology of Large LNG Storage Tanks [J]. Gas & Heat, 2011, 31 (7): 13-17.

[7] 袁中立,严伦江.LNG低温储罐的设计及建造技术[J].石油工程建设,2007,33(5):19-23.

Yuan Zhongli, Yan Lunjiang. Low Temperature LNG Storage Tank Design and Construction Technology [J]. Petroleum Engineering Construction, 2007, 33 (5): 19-23.

[8] 吴旭维,吴志星,胡云峰,等.大型 LNG 低温储罐的干燥与置换[J].煤气与热力,2012,32(7):B 04-B 07.

Wu Xuwei, Wu Zhixing, Hu Yunfeng, et al. Drying and Conversion of Large-scale LNG Cryogenic Tank [J]. Gas & Heat, 2012, 32 (7): B 04-B 07.

[9] 叶忠志.LNG储罐保冷工程施工技术[J].石油和化工设备,2012,15(12):25-27.

Ye Zhongzhi. Cold Insulation Construction Works for LNG Tank [J]. Petrol and Chemical Equipment, 2012, 15 (12): 25-27.

[10] 唐志和.LNG储罐保冷施工技术[J].石油工程建设,2011,37(4):46-49.

- Tang Zhihe. Cold Insulation Construction Technique of LNG Storage Tanks [J]. Petroleum Engineering Construction, 2011, 37 (4): 46-49.
- [11] 全国天然气标准技术委员会. 液化天然气(LNG)生产、储存和装运:GB/T 20368-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- China National Gas Standardization Technology Committee. Production, Storage and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG): GB/T 20368-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [12] 李杰, 劳英杰. 红外热成像技术在低温压力容器检验中的应用[J]. 广州化工, 2014, 42(15): 9-10.
- Li Jie, Lao Yingjie. Application of Infrared Thermal Technology in Cryogenic Vessels Inspection [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42 (15): 9-10.
- [13] 劳英杰. 红外热成像技术在低温绝热压力容器定期检验中的应用[J]. 化学工程与装备, 2012, (8): 176-178.
- Lao Yingjie. Application of Infrared Thermal Technology in Periodic Inspection of Cryogenic Insulated Pressure Vessels [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012, (8): 176-178.
- [14] 秦凯凯, 俞祖明, 倪家利, 等. 5000 m³ LNG 储罐膨胀珍珠岩充填技术[J]. 新技术研究与推广, 2009, (12): 39-41.
- Qin Kaikia, Yu Zuming, Ni Jiali, et al. Expanded Perlite Filling Technique for 50000 m³ LNG Storage Tank [J]. Research and Promotion of New Technology, 2009, (12): 39-41.
- [15] 李宏男, 高指林, 李建永. LNG 大型低温储罐膨胀珍珠岩填充技术[J]. 深冷技术, 2013, 42(6): 20-22.
- Li Hongnan, Gao Zhiling, Li Jianyong. Expanded Pearlite Filling Technique for LNG Large-Sized Low-Temperature Storage Tank [J]. Cryogenic Technology, 2013, 42 (6): 20-22.
- [16] 杨帆, 张超, 屈长龙, 等. 大型 LNG 储罐现场珍珠岩膨胀填充技术[J]. 煤气与热力, 2015, 35(2): 13-18.
- Yang Fan, Zhang Chao, Qu Changlong, et al. Technology for On-Site Perlite Expansion and Filling of Large LNG Storage Tank [J]. Gas & Heat, 2015, 35 (2): 13-18.
- [17] 崔福志. 中小型 LNG 低温储罐珠光砂填充技术[J]. 中国化工贸易, 2015, (12): 91.
- Cui Fuzhi. Expanded Perlite Filling Technique for Middle and Small Low-Temperature Storage Tank [J]. China Chemical Trade, 2015, (12): 91.
- [18] 胡小波, 魏玉迎. 大型 LNG 储罐 BOR 测试方法与计算[J]. 油气储运, 2012, 31(增刊1): 4-8.
- Hu Xiaobo, Wei Yuying. Testing Principle of BOR and Its Calculation for Large-scale Full-Capacity 16 × 10⁴ m³ LNG Storage Tank [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31 (Suppl 1): 4-8.
- [19] 王洪文, 詹正坤. 物理化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Wang Hongwen, Zhan Zhengkun. Physical Chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [20] 范宜仁, 任海涛, 邓少贵, 等. 毛细管理论在低阻油气层油气运移与聚集机理中的应用[J]. 测井技术, 2004, 28(2): 104-107.
- Fan Yiren, Ren Haitao, Deng Shaogui, et al. Application of Capillary Theory in the Migration and Accumulation Mechanism of Oil/Gas in Low-resistivity Zone [J]. Well Logging Technology, 2004, 28 (2): 104-107.
- [21] 曹学文, 彭文山, 王萍, 等. 大型 LNG 储罐罐壁隔热层保冷性能及其优化[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 0369-0375.
- Cao Xuewen, Peng Wenshan, Wang Ping, et al. Cold Performances of Insulation Layers in Large LNG Storage Tanks and Its Optimization [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35 (4): 0369-0375.
- [22] 杨江辉, 何登滨, 姜雨欣, 等. LNG 储罐珍珠岩绝热层沉降数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(7): 89-91.
- Yang Jianghui, He Dengbin, Jiang Yuxin, et al. Numerical Simulation of Perlite Adiabatic Layer Settlement of LNG Tank [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38 (7): 89-91.
- [23] 杜亮坡, 郭磊, 东志红, 等. LNG 全容式储罐内珍珠岩侧压力计算[J]. 石油化工设备, 2013, 42(6): 47-49.
- Du Liangpo, Guo lei, Dong Zhihong, et al. Calculation Perlite Side Pressure of Liquefied Natural Gas Full Containment Tank [J]. Petro-chemical Equipment, 2013, 42 (6): 47-49.