LNG 低温真空管道真空度测试试验台设计与应用

王强[1] 李纪虎[2] 高文智[1] 刘凯[2] 高奇[2] 曾群锋[2*]
(1. 榆林市特种设备检验检测院 榆林 719000; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

Design and Application of Vacuum Test Bench for LNG Cryogenic Pipeline

WANG Qiang[1], LI Jihu[2], GAO Wenzhi[1], LIU Kai[2], GAO Qi[2], ZENG Qunfeng[2*]
(1. *Yulin Special Equipment Inspection and Testing Institute*, *Yulin* 719000, *China*; 2. *Xi'an Jiaotong University Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System*, *Xi'an* 710049, *China*)

Abstract In order to study the effect of temperature variation on the vacuum of liquefied natural gas (LNG) cryogenic vacuum pipeline, in this paper, a set of high-precision test benches was designed for measuring the vacuum of LNG cryogenic vacuum pipeline based on the surface temperature method and the temperature field principle. This cryogenic vacuum pipeline vacuum test bench uses high vacuum multilayer insulation as the insulation method, an insulation layer consisting of a multilayer reflective layer and heat insulation layer as the insulation material, austenitic stainless steel as the material of cryogenic insulation pipeline, 5A molecular sieve as the adsorbent for adsorbing residual gas, cryogenic liquid container, simulated service pipeline, cryogenic liquid buffer zone, vacuum and temperature test unit to simulate the actual vacuum degree of the vacuum pipeline can be obtained by measuring only the temperature of the outer wall of the vacuum pipeline and the corresponding ambient temperature. The LNG cryogenic vacuum pipeline vacuum test bench designed in this paper solves the problem of being unable to directly measure the pipeline vacuum degree in vacuum pipelines.

Keywords Liquefied natural gas, Low temperature pipeline, Vacuum measurement, Test bench

摘要 为了研究温度变化对液化天然气(LNG)低温真空管道真空度的影响,文章基于表面温度法与温度场原理测量真空度的方法,设计出了一套基于温度法的高精度测量 LNG 低温真空管道真空度试验台。该低温真空管道真空度测试试验台以高真空多层绝热作为绝热方式、以多层反射层和隔热层组成的保温层作为绝热材料、以奥氏体不锈钢作为低温绝热管道的材料、以 5A 分子筛作为吸附残余气体的吸附剂,以低温液体容器、模拟服役管道、低温液体缓冲区、真空度和温度测试单元模拟实际中的真空管道,只需要通过测量真空管道外管外壁温度及对应的环境温度,获得其真空度。文章所设计的 LNG 低温真空管道真空度测试试验台攻克了目前真空管道中无法直接测量管道真空度的难题。

关键词 液化天然气 低温管道 真空度测量 测试试验台
中图分类号: TM924.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202304005

低温液体在工业生产和日常生活中已被广泛应用[1],同时带动了低温真空绝热管道的大量使用[2]。四川深冷设备研究所[3]、上海交通大学制冷与低温研究所[4]、上海宇航系统工程研究所[5]以及波兰罗茨瓦夫技术大学[6]对真空绝热低温管道试验台做了大量研究,他们所设计的试验台主要用于测量低温液体的蒸发率以计算出外管外壁的漏热量,最后计算出表观导热系数与比热流。然而,表观导热系数随着冷热边界温度的不同是会发生变化的[7],并未研究表观导热系数对夹层真空度的影响[8]。

研究发现温度与夹层真空度息息相关,有必要检测管道夹层真空度。有些低温真空绝热管道无真空度检测预留口,而且目前市场上没有相关的试验台[9-13]。然而,真空技术已经在工业和科学研究等

收稿日期: 2023−04−10
基金项目: 国家市场监督管理局科技计划项目(2020MK102);陕西省自然基金面上项目(2022JM-251)
* **联系人:** E-mail: xiaozeng0011@163.com

方面得到了广泛的应用[14-16]。本文研制了一种基于温度法的高精度测量 LNG 低温真空管道真空度试验台，实时检测夹层真空度，同时可用于研究温度变化对 LNG 低温真空管道真空度的影响。

1 试验原理与设计条件

1.1 试验原理

根据低温原理与测试方式，常用的绝热材料热性能测试方式有双平板法、同心圆柱法、同心球法、蒸发率法、焓差测试法、表面温度测量方法[17]。

对于研究低温传输管线上真空多层绝热机理和传热特性，包括不同材料的层密度、层数、开孔率等关键因素，以及不同支撑的漏热量性能分析。相比于表面温度测试方法之外的其他方法，表面温度测量方法操作更为简便且安全，但要求测量的温度计必须是高精度的温度计。本文所设计的 LNG 低温真空管道真空度测试试验台是基于温度场原理与表面温度法，其原理如下：

图 1 为 LNG 真空管道结构及温度分布。

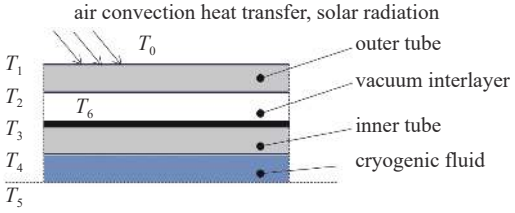


图1 LNG 真空管道结构图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum pipeline

式中，T_0、T_1、T_2、T_3、T_4、T_5、T_6分布为环境、外管外壁与内壁、内管外壁与内壁、流体及温度、隔热层最外层温度。

真空度p与T_0及T_1之间关联[18]：

$$p \propto h_1 r_1 (T_0 - T_1) \propto (T_0 - T_1) \qquad (1)$$

式中，p为真空管道夹层的真空度，Pa；h_1为空气对外管外壁的对流换热系数，$W/(m^2 \cdot K)$；r_1为外管外壁半径，m。

根据式(1)，只需要通过测量真空管道外管外壁温度T_1及对应的环境温度T_0，即可得出真空管道夹层的真空度p。

1.2 设计参数

(1)压力

低温气相管道的设计压力应是最大工作压力的 1.2 倍。对于 LNG 加气站而言，其最大工作压力约为 1.6 MPa，因此 LNG 低温真空管道真空度试验台的设计压力为 1.92 MPa [19]。

(2)温度

输送 LNG 低温介质的管道，其设计温度范围为−196℃~50℃，选取−196℃ 为设计温度[1]。

(3)载荷

管道真空度试验台，其夹层为真空状态，起到保温的作用，需要考虑各种载荷对该真空夹层的影响。这些载荷条件有：由设计压力和设计温度组成的基本载荷条件、内管与外管之间支撑材料引起的重力载荷条件。同时，本文中的实验对象为低温液体，必须得考虑巨大的温度变化引起的温差载荷。本试验台的“模拟服役管道”部分与实际中的 LNG 运输管道一样，其载荷条件定量分析可参考实际中的 LNG 运输管道。

(4)真空绝热低温管道吸附剂选择

由于焊接和封接缺陷及管壁材料气孔、夹渣、裂缝等漏孔的存在，外界空气不可避免地通过漏孔漏入真空夹层，形成残余气体，影响真空夹层的真空度。这些残余气体主要由 N_2、O_2、Ar、He、Ne 等气体组成，需要选择合适的吸附剂对这些残余气体进行吸收，维持真空夹层真空度低于 10^{-2} Pa [20]。

在真空夹层中加入活性氧化铝和分子筛等固体吸附剂，可减少抽气时间，提高低温真空管道夹层的真空度。表 1 中列出了几种常见的吸附剂性能。

分子筛均匀的孔分布使分子筛选择性吸附性能优于活性氧化铝。相比于 5A 分子筛，13X 分子筛吸附性能优于 5A 分子筛，但 13X 分子筛的机械强度及耐磨性稍差，且制作工艺较为复杂，因此价格较高，不宜选取 13X 分子筛作为吸附剂。因此，选择 5A 分子筛作为吸附剂，用丝网包扎固定在真空管道的内管外表面，用于吸附由金属和多层材料释放出的残余气体。

表 1 常见的几种吸附剂性能[21]

Tab. 1 Several common adsorbent properties

吸附剂	形状	大小	表面积/(m^2/g)	微孔面积/(cm^2/g)	疏松密度/(g/cm^3)	微孔平均直径/μm
活性氧化铝	小球	Φ3	287	0.36	0.86	500
分子筛 13X	粉末	1~5 μm	514	1.32	0.53	90~120

2　LNG 低温真空管道绝热设计

低温真空管道的关键之处在于绝热单元的设计, 该绝热单元包含绝热方式与绝热材料的选择, 不同的绝热方式、绝热材料和生产制造工艺影响产品绝热性能。

2.1　低温真空管道绝热

对于真空粉末绝热, 其真空度要求低, 但存在粉末沉淀问题, 这种绝热方式不能满足本文中低温真空管道真空度试验台的设计要求[22]。相比于高真空绝热, 需严格控制生产工艺保证夹层真空度处于高真空状态, 但高真空多层绝热预冷损失少。因此, 本文中 LNG 低温真空管道真空度试验台的绝热方式选择高真空多层绝热方式。

2.2　材料

2.2.1　材料选择

表 2 列出了常用的几种绝热材料组成及制造要求。

表 2　常用的几种绝热材料组成及制造要求

Tab. 2　Composition and manufacturing requirements of several commonly used thermal insulation materials

种类	组成	制造要求
铝箔	由纯铝经过多次压延而成	需要退火处理，表面不氧化，光亮、清洁
玻璃纤维纸	由玻璃纤维编织而成	需用无碱纤维编织及脱脂处理
镀铝涤纶薄膜	真空中镀铝而成	铝层均匀、厚度较小

本文设计的 LNG 低温真空管道真空度测试试验台采用多层反射层和隔热层组成的保温层, 多层反射层和隔热层由双面镀铝涤纶薄膜和玻璃纤维纸组成。纤维纸厚度为 0.06 mm , 双面镀铝涤纶薄膜为 0.0065 mm , 所用多层反射层和隔热层为 6 个组合, 共 30 个组合。

2.2.2　绝热材料的热物理性质

(1)绝热材料的热导率

绝热材料的热导率非常重要, 取决于多个因素, 包括孔隙结构、材料组成和温度等。由于多孔材料内部存在孔隙和空隙, 这些空隙会影响热传导的路径和速率, 从而影响材料的热导率。当温度升高时, 固体相的热导率通常会增加, 而气体相的热导率通常会减小[23]。

在实际应用中, 纤维状绝热材料通常表现出各向同性的特性, 这种各向同性的特性有助于提供均匀的绝热性能。

(2)绝热材料的比热容

由双面镀铝涤纶薄膜和玻璃纤维纸组成的保温材料的比热容是由两种组成材料的比热容加权平均得到的。具体数值取决于双面镀铝涤纶薄膜和玻璃纤维纸的比热容以及它们在组成中的比例。一般来说, 涤纶薄膜的比热容约为 1.4 J/(g·K), 而玻璃纤维纸的比热容约为 0.7 J/(g·K)。

(3)绝热材料的线膨胀系数

绝热材料的线膨胀系数是衡量材料对温度变化的响应程度的重要指标。双面镀铝涤纶薄膜和玻璃纤维纸组成的保温材料线膨胀系数也是由两种组成材料的线膨胀系数加权平均得到的。一般来说, 涤纶薄膜的线膨胀系数约为 8×10^{-6} ~ 20×10^{-6} /℃, 而玻璃纤维纸的线膨胀系数约为 3×10^{-6} ~ 9×10^{-6} /℃。

这样的绝热材料具有轻质且薄型、高效的隔热性能、耐久性和耐高温性, 广泛应用于低温管道的保温隔热, 帮助降低热能损失, 提高管道系统的能源效率, 并确保输送的介质在管道中保持稳定的低温状态。

3　低温管道材料选择与支撑结构设计

本文设计的低温真空管道真空度测试试验台包含有内管和外管, 内外管材料的性能会影响到低温真空管道的保冷性能, 因此, 需要选择合适的材料, 满足试验台的设计要求。

3.1　低温管道材料选择

本文设计的低温真空管道真空度测试试验台流通介质为 LNG 低温液体, 其设计温度为−196℃, 要求其材料具有良好的低温性能。表 3 列出了常用的几种钢管材料。

由表 3 可以得出:

铝合金不宜作为低温管道材料; 9%Ni 钢具有强度较高、韧性好、导热性偏低、线膨胀系数较低, 且管道在低温条件下收缩变形较小等优点, 但其价格昂贵, 其经济性不如奥氏体不锈钢好, 而奥氏体不锈钢具有优异的低温性能、抗腐蚀性能、较低的热膨胀系数、良好的加工性等, 奥氏体不锈钢可用作低温绝热管道。

3.2　低温管道支撑结构设计

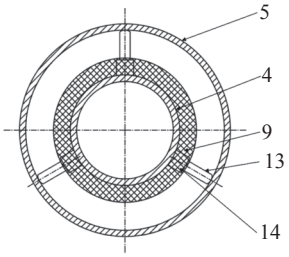
本文设计的低温真空管道真空度测试试验台

表 3 常用的几种钢管材料

Tab. 3 Several common steel pipe materials

材质	9%Ni 钢	奥氏体不锈钢	铝合金
抗拉强度	常温下母材 700 MPa，焊接部分 600 MPa	常温下 500 MPa 以上	三者中强度最低
冲击韧性	−190℃ 时，3.5 kg·cm (2V 冲击试验) 以上	不显示低温脆性	不显示低温脆性
加工性	可用气体切割，坡口等加工容易	现场加热、冷加工、热加工简单，不能用气体切割	冷加工容易，不能用气体切割
焊接性	比铝，合金钢施工容易	三者中最好	三者中焊接施工最困难
比热	约为 420 J/(kg·K)	约为 500 J/(kg·K)	900 J/(kg·K)
导热性	约为 13～16 W/(m·K)	约为 14～16 W/(m·K)	约为 150～230 W/(m·K)
线膨胀系数	约为 11×10^{-6}～12×10^{-6} /℃	约为 15×10^{-6}～17×10^{-6} /℃	约为 23×10^{-6}～24×10^{-6} /℃

包含有内管和外管，模拟服役管道中的外管半径为 89 mm、内管半径为 32 mm，内管与外管之间采用玻璃棒作为支撑，其长度为 57 mm，采用点接触焊接的方式，并用固定环固定，每隔 1 m 设置一组，每组设置三根玻璃棒。采用玻璃棒作为支撑，既可以防止内管变形，又能使因支撑产生的漏热降到最小。低温绝热管支撑结构示意图如图 2 所示。



4-内管；5-外管；9-保温层；13-玻璃棒；14-固定环

4-Inner tube; 5-Outer tube; 9-Insulation layer; 13-Glass rod; 14-Fixing ring

图2 低温真空绝热管支撑示意图

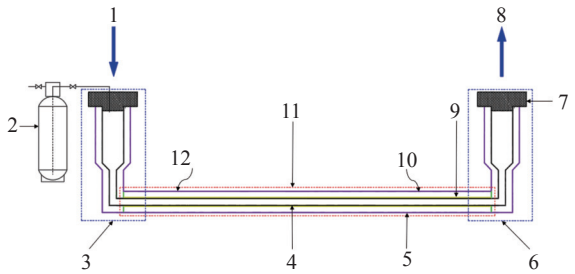
Fig. 2 Schematic diagram of low temperature vacuum insulation tube support

4 LNG 低温真空管道真空度测试试验台设计

本文设计的 LNG 低温真空管道真空度测试试验台主要有：容器、管道、缓冲区、真空度和温度测试单元。本试验台的关键之处在于模拟服役管道和低温液体缓冲区的设计，同时使用真空度和温度测试单元，分别用于测量夹层真空度和模拟服役管道外管外壁温度及监控环境温度。低温真空管道真空度测试试验台整体布局如图 3 所示，整体呈“U”字形。

4.1 模拟服役管道设计

根据现场调研发现，实际中使用的真空管道没有预检测口，因此，研制了真空绝热低温管道真空度测试试验台中的模拟服役管道，如图 3 中的模拟服役管道(11)。



1-低温液体注入口；2-低温液体容器；3-左侧低温液体缓冲区；4-内管；5-外管；6-右侧低温液体缓冲区 2；7-保温板；8-残余气体排出口；9-保温层；10-设置真空计测试口；11-模拟服役管道；12-设置抽真空口

1-Cryogenic liquid injection port; 2-Cryogenic liquid container; 3-Left cryogenic liquid buffer; 4-Inner tube; 5-Outer tube; 6-Right cryogenic liquid buffer 2; 7-Insulation board; 8-Residual gas discharge port; 9-Insulation layer;10-Set vacuum gauge test port; 11-Simulated service pipe; 12-Set vacuum extraction port

图3 低温真空管道真空度测试试验台

Fig. 3 Low temperature vacuum pipeline vacuum test bench

本文设计的模拟服役管道由内管、外管和保温层组成，位于左右两个低温液体缓冲区中间，与左右两个低温液体缓冲区刚性连接，其夹层真空度高于两侧低温液体缓冲区夹层的真空度，用于模拟真实低温真空管道。模拟服役管道(11)的断面图如图 2 所示，该部分包括内管、外管、保温层、玻璃棒和固定环。

另外，模拟服役管道(11)的外管外壁上设计有真空度和温度测试单元。模拟服役管道(11)的外管外壁上的真空计测试口(10)和抽真空口(12)，分别用于测量和调节模拟服役管道(11)夹层的真空度；模拟服役管道(11)的外管外壁上设有温度测试单元，用于测量模拟服役管道(11)外管外壁温度，该温度测试单元由若干个 PT100 贴片温度传感器组成，布置于模拟服役管道(11)的外管(5)外侧，同时使用高精度环境温度计监测环境温度。

4.2　低温液体缓冲区设计

为了保证模拟服役管道中试验的顺利进行, 必须得排除其他外界因素对模拟服役管道的干扰。因此, 本文设计了 LNG 低温管道真空度测试试验台中的低温液体缓冲区, 该部分包含有左侧低温液体缓冲区和右侧低温液体缓冲区, 如图 3 中的左侧低温液体缓冲区(3)和右侧低温液体缓冲区(6)。

本文设计的左侧低温液体缓冲区和右侧低温液体缓冲区结构组成相似, 由内管、外管、保温层和保温板组成, 位于模拟服役管道的两侧, 且左侧低温液体缓冲区设有低温液体注入口, 与低温液体容器连接, 左右两侧低温液体缓冲区夹层真空度低于模拟服役管道夹层的真空度, 给模拟服役管道提供缓冲作用。

低温液体缓冲区的功能如下:

① 左右两侧低温液体缓冲区可以促使模拟服役管道(11)内充满低温液体同时设置保温板(7)能减少低温液体的挥发;

② 进一步使得模拟服役管道夹层真空度稳定, 减小外部因素对模拟服役管道夹层真空度的影响;

③ 设有缓冲区的低温真空管道真空度测试试验台的模拟服役管道(11)外管外壁温度相比没有缓冲区的低温真空管道真空度测试试验台的模拟服役管道外管外壁温度相对稳定, 且外管外壁温度测试点测出的数值大小误差小。

在左右两侧低温液体缓冲区上方, 开有低温液体注入口和残余气体排出口, 低温液体注入口和残余气体排出口可以给模拟服役管道(11)起到排出内管中少量残余气体(空气、汽化后的低温介质等)的作用, 同时低温液体注入口可以给模拟服役管道输送 LNG 低温介质。

4.3　实验步骤

① 将试验台放置于相对密闭的房间, 通过空调调节环境温度;

② 将 PT100 贴片式温度计分布式贴于外管(5)水平管道位置, 如以中轴线为轴间隔 0.5 m 选取贴片位置, 取所有 PT100 贴片式温度计数值的平均值为外管外壁温度;

③ 抽真空口(12)连接真空泵并开始抽真空, 抽至 5×10^{-3} Pa 且数值稳定时封闭好。真空计连接于测试口(10), 获得夹层真空度。

④ 将低温介质由低温液体注入口(1)注入, 注入液体量应保证模拟服役管道(11)内有低温介质。当体系温度稳定时, 即各测量仪器示数在 1 小时内不产生明显变化, 记录此时的外管外壁温度、环境温度、环境湿度、夹层真空度。重复执行这个操作过程, 并不断改变环境温度, 记录不同环境温度情况下的夹层真空度数据。

5　总结

对于实际中使用的 LNG 低温真空管道没有预留检测口, 本文基于温度场原理与表面温度法, 并通过真空绝热管道绝热方式、绝热材料、低温管道材料和吸附剂的选择, 以及模拟服役管道和低温液体缓冲区的设计, 最终设计出了一种 LNG 真空绝热低温真空管道真空度试验台, 可用于研究温度实时变化对 LNG 低温真空管道真空度的影响, 为寻找一种间接真空度测试方法打下基础。

参　考　文　献

[1] Liu Z Y. Research on vacuum-pumping technology of high-vacuum multilayer cryogenic insulation pipe[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013 (刘志盈. 高真空多层低温绝热管道抽真空工艺试验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013(in chinese))

[2] Mao HW, Chen SP, Yang JH, et al. A simplified finite element simulation method of bellows used in HV-MLI cryogenic pipes[J]. Cryogenic Engineering, 2016(5): 64−70 (毛红威, 陈叔平, 杨佳卉, 等. 高空真多层绝热低温管道中波纹管简化有限元模拟方法 [J]. 低温工程, 2016(5): 64−70(in chinese))

[3] Wu TW, Yang L, Liu DQ, et al. Testing of thermal conductivity of vacuum multilayer insulation materials at low temperatures[J]. Cryogenic Technology, 1996(04): 30−32 (吴同文, 杨磊, 刘大群, 等. 低温下真空多层绝热材料导热系数的测试 [J]. 深冷技术, 1996(04): 30−32(in chinese))

[4] Wei W, Wang RS. Experimental study on performance of multilayer insulation blankets using calorimetric method [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2007, 35(1): 21−24 (魏蔚, 汪荣顺. 高真空多层绝热被的性能及其量热器的试验研究 [J]. 低温与超导, 2007, 35(1): 21−24(in chinese))

[5] Zhu HW, Huang YH, Li J, et al. An experimental setup for performance testing of multilayer insulation and preliminary inspection[J]. Cryogenic Engineering, 2012(3): 64-70 (朱浩唯, 黄永华, 李骏, 等. 真空多层绝热性能测试装置及初步实验验证 [J]. 低温工程, 2012(3): 47-51(in chinese))

[6] Polinski J, Chorowski M, Choudhury A, et al. Synthesis of the multilayer cryogenic insulation modelling and mea-

surements[J]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2008, 985(1): 1367−1374

[7] Cheng JJ, Zhu JB, Li ZQ. Analysis on the performance of high vacuum multilayer insulation for cryogenic storage vessel[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2013, 41(2): 11−14 (程进杰, 朱建炳, 李正清. 低温容器高真空多层绝热性能分析 [J]. 低温与超导, 2013, 41(2): 11−14(in chinese))

[8] Shen X. Study on a insulation performance testing system for high vacuum MLI[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013 (沈铣. 高真空多层绝热材料绝热性能测试系统研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2013(in chinese))

[9] Meng Y, Li WK. New development trend of vacuum meters[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1999, 19(2): 116 (孟扬, 李旺奎. 真空计的发展新趋势 [J]. 真空科学与技术, 1999, 19(2): 116(in chinese))

[10] Xiao HR, Liu JK, Deng JN. Novel monitor for on-line measurement of pressure in vacuum interrupter[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2017, 37(1): 106−112 (肖慧荣, 刘建魁, 邓加南. 真空灭弧室真空度在线检测系统 [J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(1): 106−112(in chinese))

[11] Chen RX, Sun ZC, Lv QQ, et al. Characterization of structural mechanics of vacuum-tube with lab-built simulator: an experimental study[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2020, 40(9): 818−826 (陈瑞祥, 孙振川, 吕乾乾, 等. 真空管道结构模拟试验系统研制与试验验证 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(9): 818−826(in chinese))

[12] Li DT, Xi ZH, Wang YJ, et al. Vacuum metrology technology and its space application[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2021, 41(9): 795−816 (李得天, 习振华, 王永军, 等. 真空测试计量技术及其航天应用 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(9): 795−816(in chinese))

[13] Tang Y, Zhang P. Safety analysis of LNG vacuum pipeline leakage based on FLUENT calculation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2021, 41(4): 363−368 (唐莹, 张鹏. 基于 FLUENT 计算的 LNG 真空管道泄漏安全分析 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(4): 363−368(in chinese))

[14] Zeng QF, Yu F. Design of vacuum system for vacuum tribometer[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2013, 33(7): 627−631 (曾群锋, 于飞. 真空摩擦磨损试验机的真空系统设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(7): 627−631(in chinese))

[15] Zeng QF, Dong GN, Yu F. Tribological property in vacuum of high speed steel modified with diamond-like-carbon coatings[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2014, 34(11): 1184−1191 (曾群锋, 董光能, 于飞, 等. Si_3N_4 球/DLC 膜摩擦副在真空环境下的摩擦学行为研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(11): 1184−1191(in chinese))

[16] Zeng QF, Erdemir A, Erylimaz O. Ultralow friction of ZrO_2 ball sliding against DLC films under various environments[J]. Applied Sciences, 2017, 7(9): 938

[17] Deng BC. Research on vacuum multilayer insulation mechanism and heat transfer characteristics of multiple cryogenic transfer line[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (邓笔财. 复合低温传输管线的真空多层绝热机理及传热特性研究 [D]. 中国科学院大学, 2019(in chinese))

[18] Cao HY, Jiang H, Wang Q, et al. Implementation and design of vacuum test platform of the vacuum pipeline based on the principle of temperature field[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2022, 42(10): 726−730 (曹虎银, 姜浩, 王强, 等. 基于温度场原理的真空管道真空度测试系统平台设计与实现 [J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(10): 726−730(in chinese))

[19] Yang M. Cryogenic piping design in LNG plants[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2014(36): 4771−4772 (杨明. LNG 装置中低温管道设计 [J]. 城市建设理论研究, 2014(36): 4771−4772(in chinese))

[20] He Y, Chen CB. Study on the change of vacuum degree in the interlayer of vacuum multilayer insulated pipes[C]. The 10th National Cryogenic Engineering Conference and 2011 Annual Academic Exchange Meeting of China Aerospace Cryogenic Professional Information Network. 2011: 389-392 (何燚, 陈传宝. 真空多层绝热管道夹层真空度变化研究 [C]. 第十届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2011 年度学术交流会论文集. 2011: 389-392(in chinese))

[21] Da DA. Vacuum design manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991 (达道安. 真空设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991(in chinese))

[22] Xu L, Fang RS, Ma QF. Adiabatic Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990 (徐烈, 方荣生, 马庆芳. 绝热技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990(in chinese))

[23] Pan J X. Insulation performance indexes for cryogenic container and their estimation[J]. Cryogenic Engineering, 1997(2): 43−46 (潘俊兴. 低温容器的绝热性能指标及其估算 [J]. 低温工程, 1997(2): 43−46(in chinese))