

# 低温容器夹层真空度对内罐压升率的影响研究

付启亮<sup>1</sup>, 陈叔平<sup>1</sup>, 金树峰<sup>1</sup>, 李文奇<sup>1</sup>, 白彪坤<sup>1</sup>, 赵高逸<sup>1</sup>, 孟岳<sup>1</sup>, 杨雯<sup>1</sup>, 朱鸣<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

**摘要:** 针对低温容器夹层真空失效工况, 建立了低温容器夹层真空度与通过内罐壁面热流密度的理论模型, 结合 ANSYS-FLUENT 软件对某立式低温容器内的液氮蒸发过程进行了仿真模拟, 研究了初始充满率为 50% 时, 低温容器内罐空间温度及压力随夹层真空度变化的规律。结果表明, 随着夹层真空度降低, 通过低温容器内罐壁面的平均热流密度增大, 内罐中液体温度升高速率增大; 当夹层真空完全失效时, 内罐压升率分别是夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa、1 Pa 和 10 Pa 时的 10.4 倍、5 倍和 1.2 倍。

**关键词:** 真空失效; 压升率; 仿真模拟; 低温容器; 潜水器

中图分类号: TB657 文献标识码: A DOI: 10.16711/j.1001-7100.2020.03.011

## Effects of interspace vacuum of cryogenic vessel on pressure rise of inner tank

Fu Qiliang<sup>1</sup>, Chen Shuping<sup>1</sup>, Jin Shufeng<sup>1</sup>, Li Wenqi<sup>1</sup>, Bai Biaokun<sup>1</sup>, Zhao Gaoyi<sup>1</sup>, Meng Yue<sup>1</sup>, Yang Wen<sup>1</sup>, Zhu Ming<sup>2</sup>

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. China Special Equipment Testing and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at loss of vacuum of cryogenic vessels interspace, a theoretical model between vacuum degree of cryogenic vessels interspace and heat flux density through the inner tank wall was established. The liquid nitrogen evaporation process in a vertical cryogenic vessel was simulated by ANSYS-FLUENT software, the variations of temperature and pressure of the inner tank with vacuum degree of the interspace were studied when the initial filling rate was 50%. The results show that with the vacuum degree decreases of the interspace, the average heat flux through the tank wall of the cryogenic vessel increases, and the temperature rise rate of the liquid in the inner tank increases; when the interspace vacuum completely fails, the pressure rise rate of the inner tank is 10.4 times, 5 times and 1.2 times faster than that of the condition when the interspace vacuum is  $10^{-3}$  Pa, 1 Pa and 10 Pa respectively.

**Keywords:** Loss of vacuum, Pressure rise rate, Simulation, Cryogenic vessel, Submersible

## 1 引言

安装有低温容器的潜水器, 在航行过程中因某些突发事故, 使低温容器遭受碰撞、管路泄露等状况时, 可能会造成低温容器夹层真空度降低, 甚至完全失效, 使得通过环境漏入低温容器的热负荷迅速增加。由于低温液体沸点低、气液体积比大及热膨胀性大, 漏入的热量使得低温液体大量蒸发, 导致内罐压力快速升高, 对船体和人员的安全造成严重威胁, 此时需要通过泄放内罐中气体以降低内罐压力。由于潜水器作业环境及任务的特殊性, 低温容器在水下发生夹层真空失效这一

紧急工况时较在陆地更难处理, 内罐中气体不能直接泄放到潜水器内部或深海中<sup>[1]</sup>。当外部条件允许就地上浮时, 潜水器可立即就地上浮排气, 降低低温容器内罐压力; 当外部条件不允许就地上浮时, 潜水器需驶离低温容器夹层真空失效事故发生地点, 到达允许其上浮地点时再上浮排气。在潜水器上浮或驶离事故发生地点的过程中, 内罐压力快速升高。能否成功处理潜水器中低温容器夹层真空失效这一事故, 内罐压升率是非常关键的影响因素。

国内外许多学者<sup>[1]</sup>对低温容器夹层真空度良好或真空完全失效工况下的传热过程或内罐压

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805601) 资助。

作者简介: 付启亮(1992-), 男, 硕士生, 研究方向为低温储运技术及设备。

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)。

力升高规律做了大量研究。Pomeroy<sup>[2]</sup>等对比研究了低温容器真空失效前后的蒸发率。Moreno-Blanco<sup>[3]</sup>等研究了车载氢气瓶真空失效后的压力升高规律,对车载氢气瓶真空失效事故提出了两种解决方案。Zheng<sup>[4,5]</sup>等研究了四种绝热结构在不同程度夹层真空失效后的绝热性能,指出气冷屏在夹层真空失效后依然具有较好的绝热作用。Zhu<sup>[6]</sup>等通过实验研究了七种不同破空气体对真空失效下高真空多层绝热低温储罐的漏热影响。赵一力<sup>[7]</sup>搭建了用于液氮无损储存的实验平台,研究了液氮容器在制冷机开启和关闭两种工况下容器内部流体压力、温度等参数的变化规律。谢高峰<sup>[8]</sup>等搭建了用于模拟高真空多层绝热低温容器夹层真空完全失效的试验台,研究了初始充满率和夹层绝热层数对完全真空失效工况下低温容器压力升高规律的影响。

上述学者研究了高真空多层绝热低温容器夹层真空度良好或真空完全失效后其内罐压力的升高规律,或分析了低温容器夹层真空度与其绝热性能之间的关系,但针对潜水器用低温容器在不同程度夹层真空失效下的内罐压力升高规律鲜有研究。本文将建立低温容器夹层真空度与通过内罐壁面热流密度的理论关系,针对容积为 110 L 的某立式液氮低温容器建立二维轴对称模型,通过 ANSYS-FLUENT 软件对该容器内液氮在不同夹层真空度下的蒸发过程进行仿真研究,得出低温容器多层绝热体平均表观导热系数、内罐壁面热流密度和内罐空间温度、压力随夹层真空度变化的规律,为处理潜水器中低温容器夹层真空度失效这一紧急工况提供理论依据。

## 2 热流密度

高真空多层绝热低温容器主要通过多层绝热体、支撑结构、管路系统漏热<sup>[9]</sup>,即:

$$Q_{tot} = Q_{MLI} + Q_s + Q_p \tag{1}$$

式中  $Q_{tot}$  为低温容器总漏热量, W;  $Q_{MLI}$  为多层绝热体总漏热量, W;  $Q_s$  为支撑结构漏热量, W;  $Q_p$  为管路系统漏热量, W。总漏热量折算成低温容器内罐壁面的热流密度为:

$$q_{tot} = \frac{Q_{tot}}{\bar{A}} \tag{2}$$

$$\bar{A} = \sqrt{A_i A_o} \tag{3}$$

式中  $q_{tot}$  为通过低温容器内罐壁面的热流密度, W/m<sup>2</sup>;  $\bar{A}$  为平均传热面积, m<sup>2</sup>;  $A_i$  为内罐内表面积, m<sup>2</sup>;  $A_o$  为外罐内表面积, m<sup>2</sup>。

### 2.1 多层绝热体漏热

通过多层绝热体的漏热包括层间辐射传热、残余气体传热和层间固体导热<sup>[10,11]</sup>,其中层间残余气体传热方式与夹层真空度有关<sup>[12]</sup>。当夹层真空度高于 10 Pa 时,残余气体的传热方式可按导热考虑,按文献[11]进行计算;当夹层真空度低于 10 Pa 时,以自然对流换热进行计算较为合理。

(1) 当夹层真空度高于 10 Pa 时,通过多层绝热体单位面积的漏热量

$$Q_{MLI} = \int_{T_c}^{T_h} \frac{\bar{\lambda} \bar{A}}{\delta} dT \tag{4}$$

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_r + \bar{\lambda}_g + \bar{\lambda}_s \tag{5}$$

式中  $Q_{MLI}$  为通过多层绝热体的漏热量, W;  $\bar{\lambda}$  为多层绝热体的平均表观导热系数, W/(m·K);  $T_h$  为环境温度, K;  $T_c$  为液氮温度, K;  $\delta$  为绝热层厚度, m;  $\bar{\lambda}_r$  为辐射传热的平均表观导热系数, W/(m·K);  $\bar{\lambda}_g$  为残留气体导热的平均表观导热系数, W/(m·K);  $\bar{\lambda}_s$  为层间固体导热的平均表观导热系数, W/(m·K)。

1) 层间辐射传热的平均表观导热系数

$$\bar{\lambda}_r = \frac{\sigma(T_h + T_c)(T_h^2 + T_c^2)\delta}{\left[ \frac{2}{\varepsilon_0} - 1 + N \left( \frac{2}{\varepsilon_s} - 1 \right) \right]} \tag{6}$$

式中  $\sigma$  为玻尔兹曼常数;  $\varepsilon_0$  罐体发射系数;  $\varepsilon_s$  反射屏发射系数;  $N$  多层绝热体反射屏层数。

2) 残留气体导热的平均表观导热系数

$$\bar{\lambda}_g = \left( \frac{\alpha}{2 - \alpha} \right) \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \sqrt{\frac{R}{8\pi M T_m}} \frac{\delta}{N + 1} P_m \tag{7}$$

式中  $\alpha$  为残留气体分子与屏面碰撞传热的适应性系数;  $\gamma$  为残留气体绝热指数;  $R$  为通用气体常数;  $M$  为残留气体的相对分子质量;  $T_m$  为层间平均温度,  $T_m = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$ , K;  $P_m$  为夹层真空度, Pa。

3) 由于间隔物的导热系数变化对低温容器真空丧失后的绝热夹层传热影响较小<sup>[12]</sup>,故层间

固体导热的平均表观导热系数可用式(8)计算:

$$\bar{\lambda}_s = 2.3 \times 10^{-3} P_c^{0.45} \quad (8)$$

式中  $P_c$  为层间单位面积压紧力, Pa。

(2) 当夹层真空度低于 10 Pa 时, 通过多层绝热体的漏热量

$$Q'_{MLI} = K \bar{A} (T_h - T_c) \quad (9)$$

$$K = \frac{1}{\frac{\delta_{Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{\delta_{IL}}{\lambda_{IL}} + \frac{1}{h}} \quad (10)$$

式中  $Q'_{MLI}$  为夹层真空度低于 10 Pa 时通过多层绝热体的漏热量,  $W/m^2$ ;  $K$  为夹层间的传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\delta_{Al}$  为铝箔的总厚度, m;  $\lambda_{Al}$  为铝箔的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\delta_{IL}$  为隔热层的总厚度, m;  $\lambda_{IL}$  为隔热层导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $h$  为夹层间自然对流传热系数, 其值与夹层压强和温度有关,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

### 2.2 支撑结构漏热

假设支撑结构的导热系数为定值, 则通过支撑结构的漏热量

$$Q_s = n \int_{T_{sc}}^{T_h} \frac{\lambda_s A_{s1}}{l_{s1}} dT + \int_{T_{sc}}^{T_h} \frac{\lambda_s A_{s2}}{l_{s2}} dT \quad (11)$$

式中  $\lambda_s$  为支撑结构的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $A_{s1}$  为径向支撑的传热面积,  $m^2$ ;  $T_{sc}$  为径向支撑的冷端温度, 即绝热层最外层的温度, K;  $l_{s1}$  为径向支撑的长度, m;  $n$  为径向支撑的数量;  $A_{s2}$  为轴向支撑的传热面积,  $m^2$ ;  $l_{s2}$  为轴向支撑的长度, m。

### 2.3 管路漏热

低温容器通过管路漏热的方式主要有两种: 一种是通过管体导热(如加、排液管), 这类管路直接与低温液体接触, 其漏热量可通过式(13)计算; 另一种是通过管路漏热, 该方式较为复杂, 除了管体导热外, 还有与内罐中蒸发气体的对流换热, 这类管路主要为各种接管(如压力表接管), 其漏热量可以通过式(14)计算, 即:

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} \quad (12)$$

$$Q_{p1} = \int_{T_c}^{T_h} \frac{\lambda_p A_{p1}}{l_{p1}} dT \quad (13)$$

$$Q_{p2} = \int_{T_c}^{T_h} \frac{A_{p2}}{\frac{l_{p2}}{\lambda_p} + \frac{1}{h_p}} dT \quad (14)$$

式中  $\lambda_p$  为管体材料的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $Q_{p1}$

为与蒸发气体无对流换热的管路漏热量,  $W$ ;  $Q_{p2}$  为与蒸发气体有对流换热管路的漏热量,  $W$ ;  $A_{p1}$  为无对流换热管路的传热面积,  $m^2$ ;  $A_{p2}$  为有对流换热管路的传热面积,  $m^2$ ;  $l_{p1}$  为无对流换热管路导热长度, m;  $l_{p2}$  为有对流换热管路导热长度, m;  $h_p$  为管体和内罐中蒸发气体的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ 。

## 3 数值模拟

### 3.1 模型建立

本文研究对象为液氮低温容器, 其内罐中温度、压力等参数的变化规律是本文的重点研究内容, 为简化问题, 仅针对内罐建模, 忽略壁厚。该容器内罐上下封头均为标准椭圆形封头, 筒体为圆筒, 内径 400 mm, 罐体高 942 mm, 材质为 S30408 不锈钢。考虑到内罐具有回转体结构特点, 同时为节约计算成本, 将内罐简化为二维轴对称模型, 如图 1 所示。图中  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  三点为模拟数据监测点, 其中  $P_1$ 、 $P_2$  位于中轴线上,  $P_3$  位于壁面处。对该二维模型划分网格, 共计 23 342 个节点, 46 369 个网格面, 23 029 个网格单元, 如图 2 所示。

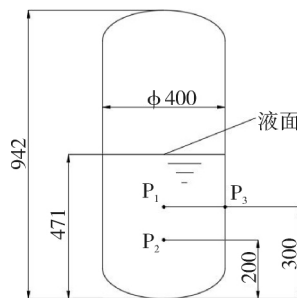


图1 内罐结构示意图

Fig.1 Structural diagram of inner vessel

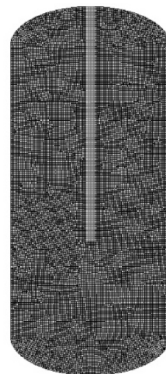


图2 模型网格

Fig.2 The grid of model

### 3.2 边界条件

由于多层绝热体包扎松紧程度、与支撑结构接触与否及壁面各处存在温差等因素影响,导致通过内罐壁面各处的热流密度存在差异。为方便计算,将通过壁面的总漏热量以平均热流密度的方式加入边界条件。设定环境温度 293 K,液氮初始温度 77 K,多层绝热体厚度 0.03 m,根据式(1)~(14)得出夹层不同真空度下通过内罐壁面的平均热流密度,如表 1 所示。

表 1 不同夹层真空度下热流密度

Tab.1 Heat flux under different operations

夹层真空度/Pa	平均热流密度/(W/m <sup>2</sup> )
10 <sup>-3</sup>	4
1	11
10	76
10 <sup>5</sup>	96

### 3.3 初始条件

初始压力、初始温度以及初始充满率<sup>[13]</sup>等因素均会影响低温容器压升率。本文重点关注夹层真空度对低温容器压升率的影响,对每种工况均设置相同的初始条件。在 FLUENT 中,通过其 Patch 功能设置容器内上半部分空间为氮气,下半部分空间为液氮,即液氮的初始充满率为 50%,初始绝对压力 0.1 MPa,初始温度 77 K。

### 3.4 计算方法

本文用 FLUENT 中瞬态压力求解器的混合物模型(Mixture)模拟液氮在密闭容器中的蒸发过程。通过用户自定义函数(UDF)指定气液两相之间的传质过程,能量源项通过混合物能量方程指定。速度压力耦合方式采用 SIMPLE 算法。

## 4 结果及分析

### 4.1 热流密度

设定多层绝热体层数、层间单位面积压紧力及残留气体绝热指数等不变,只改变夹层真空度,根据式(1)~(14)计算得出通过内罐壁面的平均热流密度随夹层真空度的变化关系,如图 3 所示。由式(5)~(10)计算得到不同夹层真空度下多层绝热体的平均表观导热系数,并分别计算了辐射传热、残留气体传热和隔热层导热占总漏热量的比例随夹层真空度的变化关系,如图 4 所示。

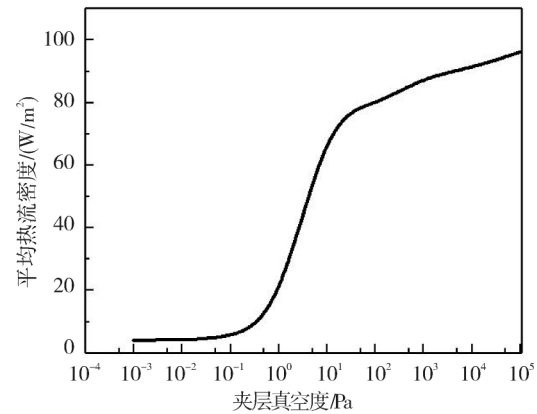


图 3 平均热流密度随夹层真空度的变化

Fig.3 The change of average heat flux with interspace vacuum degree

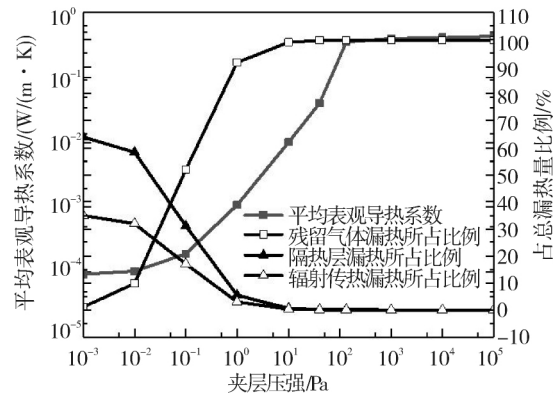


图 4 平均表观导热系数及各漏热形式占比随夹层真空度的变化

Fig.4 The change of average apparent thermal conductivity coefficient and heat leakage type proportion with interspace vacuum degree

理论计算发现,通过支撑件和管路系统的漏热量随夹层真空度的降低变化较小,可视为定值,但通过多层绝热体的漏热量随夹层真空度的降低变化较大。由图 3 可知,通过内罐壁面的热流密度随夹层真空度降低而增大。根据对通过内罐壁面平均热流密度的影响强弱程度,夹层真空度可分为高于 10<sup>-2</sup>Pa、10<sup>-2</sup>Pa~10 Pa 和低于 10 Pa 三个区间。当夹层真空度高于 10<sup>-2</sup>Pa 时,通过内罐壁面的热流密度在 4 W/m<sup>2</sup>左右,夹层真空度降低对通过容器内罐壁面的热流密度影响较小。当夹层真空度处于 10<sup>-2</sup>Pa~10 Pa 区间时,通过内罐壁面的热流密度随夹层真空度降低迅速增大。如夹层真空度为 10 Pa 时,热流密度已达 76 W/m<sup>2</sup>,分别是夹层真空度为 10<sup>-1</sup>Pa 和 1 Pa 时的 19 倍和 7 倍。当夹层真空度低于 10 Pa 时,夹层真空度的

变化对通过内罐壁面的热流密度的影响减小。

由图 4 可知, 残留气体漏热占多层绝热体总漏热量的比例随夹层真空度下降而增大, 隔热层漏热和辐射传热漏热占多层绝热体总漏热量的比例随夹层真空度下降而减小, 多层绝热体平均表观导热系数随夹层真空度的变化趋势与图 3 中通过内罐壁面的热流密度随夹层真空度的变化趋势类似。

这是因为当夹层真空度高于  $10^{-2}$  Pa 时, 夹层漏热以层间固体导热和辐射传热为主, 通过残留气体的漏热量低于夹层总漏热量的 10% (从图 4 中可以看出, 在  $10^{-3}$  Pa 时, 该比例低于 2%)。当夹层真空度处于  $10^{-2}$  Pa~10 Pa 区间时, 通过残留气体的漏热量迅速增大, 占夹层总漏热量的比例从低于 2% 上升到高于 90%, 因此通过内罐壁面的热流密度和多层绝热体平均表观导热系数随着夹层真空度降低而迅速增大。当夹层真空度低于 10 Pa 时, 漏热以自然对流传热为主, 夹层中气体的自然对流系数成为影响漏热的主要因素, 夹层真空度继续降低对通过内罐壁面的热流密度和多层绝热体平均表观导热系数的影响不大。

### 4.2 温度场

通过仿真模拟得到低温容器内罐在夹层真空度分别为  $10^{-3}$  Pa、1 Pa、10 Pa 和  $10^5$  Pa (夹层真空完全失效) 下不同时刻的温度分布云图如图 5 所示。

由图 5 可知, 不同夹层真空度下, 在紧邻壁面区域最先出现升温现象, 逐步向内罐中心传递热量, 内罐内部温度升高, 且内部温度以轴线对称分布; 温度从上到下逐渐降低, 在上封头紧邻壁面处出现最高值。

对比 a、b、c 和 d 图得: 内罐中流体温度升高速率随着夹层真空度的降低而增大。(1) 当夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 时, 内罐中流体温度变化较小。

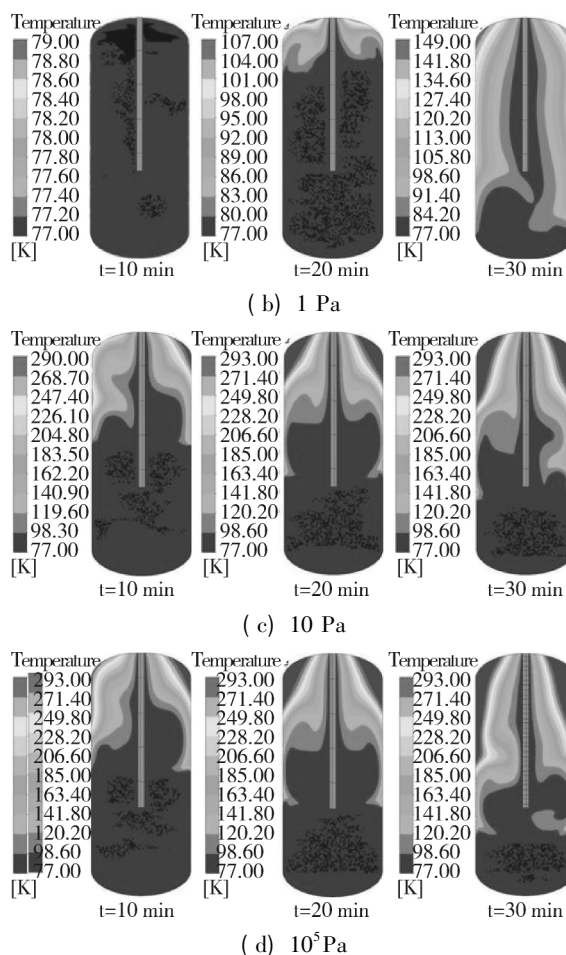
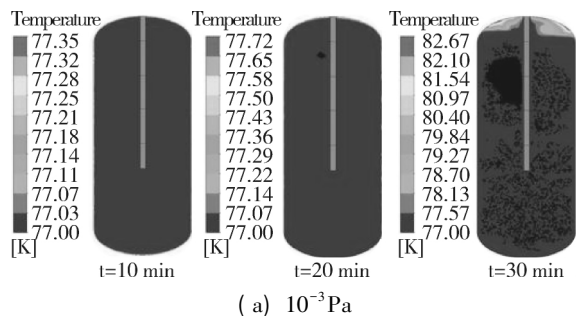


图 5 内罐温度场分布图

Fig.5 The temperature distribution of inner vessel

$t = 20$  min 时, 紧邻壁面区域的温度略有升高, 上升幅度小于 1 K;  $t = 30$  min 时, 内罐中流体最高温度为 82.67 K, 近上封头处小范围区域沿轴向出现温度分层现象。(2) 当夹层真空度为 1 Pa 时, 流体温度变化较真空度为  $10^{-3}$  Pa 时剧烈。在  $t = 20$  min 时, 内罐中流体最高温度为 107 K, 上升幅度较大, 内罐上部区域出现明显的温度分层现象; 在  $t = 30$  min 时, 内罐中最高温度达 149 K, 上升幅度为 79 K, 内罐中大部分区域沿径向和轴向均出现温度分层现象。(3) 当夹层真空度为 10 Pa 时, 内罐中流体靠近壁面的部分区域温度和环境温度相等, 轴向及径向温度分层现象较夹层真空度为 1 Pa 时更为明显。(4) 当夹层真空度为  $10^5$  Pa 时, 内罐中流体温度变化较前三种工况更为剧烈。 $t = 10$  min 时内罐上部在径向和轴向均出现温度分层现象,  $t = 20$  min 和  $t = 30$  min 时出现温度分层现象的区域进一步扩大, 温度进一步升高。

通过监测  $P_1$  和  $P_2$  两点温度,绘制液氮温度(以此两点温度平均值为液氮温度)的变化趋势图,如图 6 所示。通过监测  $P_3$  点温度,得到内罐壁面温度(以下简称壁面温度)随时间的变化关系,如图 7 所示。

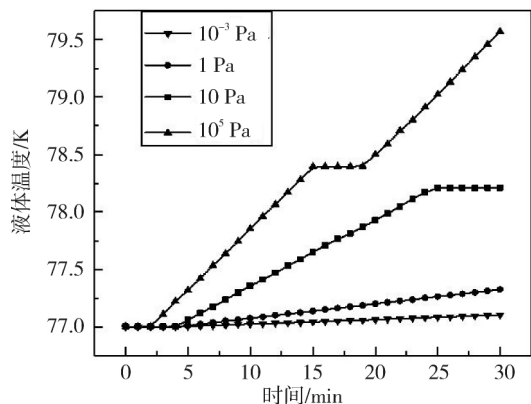


图 6 液体温度随时间的变化

Fig.6 The change of liquid temperature with time

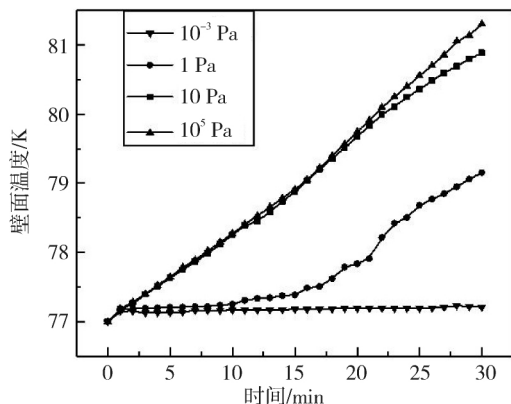


图 7 壁面温度随时间的变化

Fig.7 The change of wall temperature with time

由图 6 可知,液氮温度升高速率随夹层真空度降低而增大。(1)当夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 时,液氮温度在 30 min 内几乎没有变化,低温容器绝热性能良好。(2)当夹层真空度为 1 Pa 时,液氮温度在 30 min 内升温 0.3 K。(3)当夹层真空度为 10 Pa 时,液氮温度在 0—25 min 内明显升高,升温 1.2 K;在 25 min 后升高趋势趋于平缓。经分析,在 0—25 min 内,随着液氮蒸发,内罐中压力随之升高,饱和温度变大,液氮温度持续升高;在 25 min 后,液氮温度变化趋于平缓。(4)当夹层真空度为  $10^5$  Pa 时,液氮温度在 0~15 min 内明显升高,升温 1.4 K;在 15~20 min 内温度变化趋于平缓;在 20 min 后,液氮温度明显升高。

由图 7 可知,壁面温度升高速率随夹层真空

度降低而增大。(1)当夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 时,壁面温度在 30 min 内维持在 77 K 附近,低温容器绝热性能良好。(2)当夹层真空度为 1 Pa 时,壁面温度在 0~10 min 内几乎没有变化  $t=10$  min 时开始升高  $t=30$  min 时达到 79.1 K,较初始时刻温度升高 2.1 K。(3)当夹层真空度为 10 Pa 和  $10^5$  Pa 时,在 0~21 min 内壁面温度均持续升高,趋势一致;在 21 min~30 min 内,后者的壁面温度升高速率略大于前者;在  $t=30$  min 时两者的壁面温度十分接近,分别为 80.9 K 和 81.3 K,证明当夹层真空度低于 10 Pa 后,夹层真空度对低温容器绝热性能影响不大。

### 4.3 压力场

由于模拟时间较短,液氮蒸发量较小,气液两相分别所占空间比例变化较小,气液分界面的位置几乎不变 0~30 min 内的压力分布云图如图 8 所示。

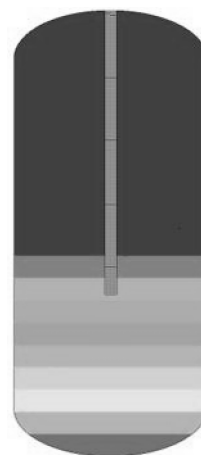


图 8 内罐压力场分布图

Fig.8 The pressure distribution of inner vessel

夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa、1 Pa、10 Pa 和  $10^5$  Pa 时内罐中气相压力随时间的变化关系如图 9 所示。

由图 9 可知,内罐中压力升高速率随夹层真空度降低而增大。(1)当夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 时,内罐中压力在 30 min 内升高 0.032 MPa,升高速率为 1.07 kPa/min。(2)当夹层真空度为 1 Pa 时,内罐中压力在 30 min 内升高 0.066 MPa,升高速率为 2.2 kPa/min,较夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 时有所增大。(3)当夹层真空度为 10 Pa 时,内罐中压力在 30 min 内升高 0.267 MPa,升高速率为 8.9 kPa/min,较前两种工况有大幅度增大,分别是夹层真空度为  $10^{-3}$  Pa 和 1 Pa 时压力升高速率的 8.3

倍和4倍。(4)当夹层真空度为 $10^5$  Pa时,内罐中压力在30 min内升高0.332 MPa,升高速率为11.07 kPa/min,较夹层真空度为 $10^{-3}$  Pa和1 Pa时压力升高速率大幅度增大,仅是夹层真空度为10 Pa时的1.2倍,说明对高真空多层绝热低温容器而言,当夹层真空度等于或低于10 Pa时,内罐中压力升高速率较大。

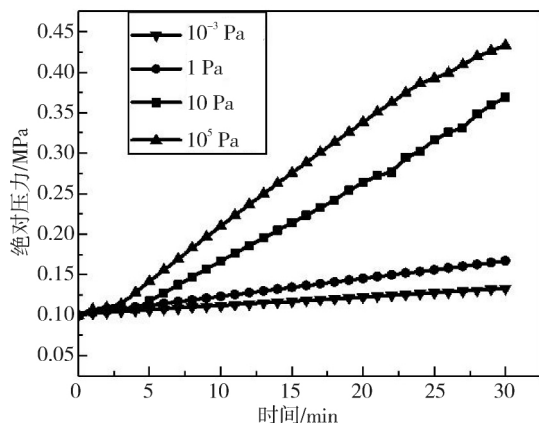


图9 内罐中压力随时间的变化

Fig.9 The change of inner vessel pressure

假设潜水器潜深1000 m,上浮速度6 m/s<sup>[14]</sup>,低温容器安全阀开启压力0.9 MPa,低温容器夹层真空完全失效。当外部条件允许潜水器在低温容器夹层真空完全失效后立即上浮时,潜水器上浮至水面需要近3 min,在该过程中内罐压力上升至0.164 MPa,远低于安全阀开启压力,此时有较充足的时间处理这一紧急事故。当外部条件不允许就地上浮时,潜水器需驶离低温容器夹层真空完全失效事故发生地点,到达允许其上浮地点时再上浮排气。由前述分析可知,低温容器内罐压力在夹层真空完全失效后达到安全阀开启压力需90 min。在低温容器内罐压力达到安全阀开启压力之前,潜水器需在水下航行找到允许上浮地点处理这一紧急事故。

## 5 结论

通过对容积为110 L的某高真空多层绝热低温容器在不同夹层真空度下内罐壁面热流密度进行理论计算,并对该容器内部液氮蒸发过程进行仿真模拟,得出如下结论:

(1)内罐壁面的平均热流密度和内罐中液氮温度升高速率随低温容器夹层真空度降低而增

大。当夹层真空度高于 $10^{-2}$  Pa时,通过内罐壁面的平均热流密度随夹层真空度的降低几乎不发生变化,夹层真空度处于 $10^{-2}$  Pa~10 Pa之间时对通过内罐壁面的平均热流密度影响较大,夹层真空度低于10 Pa时对通过内罐壁面的平均热流密度影响较小。

(2)低温容器内罐中压力升高速率随夹层真空度降低而增大。夹层真空完全失效时,内罐压力在30 min内升高0.332 MPa,升高速率是夹层真空度为 $10^{-3}$  Pa时的10.4倍。对现代潜水器的潜深和上浮速度而言,当外部条件允许潜水器在低温容器夹层真空完全失效后立即上浮时,有较充足的时间上浮至水面处理该事故;当外部条件不允许就地上浮时,潜水器需尽快找到允许上浮的地点处理该事故,事故发生后允许水下航行时间与安全阀开启压力有关。

本文仅研究了初始充满率为50%,初始压力为0.1 MPa的低温容器在不同夹层真空度下压力升高规律,对不同初始充满率及不同初始压力下低温容器的压力升高规律需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 李大鹏. 潜艇 AIP 装置的废气排放与处理 [J]. 中外船舶科技, 2016(2): 26-29.
- [2] POMEROY K O, REED M L, LOMANTO B, et al. Cryostorage tank failures: temperature and volume loss over time after induced failure by removal of insulative vacuum [J]. Journal of assisted reproduction and genetics, 2019: 1-8.
- [3] MORENO-BLANCOJ C, ELIZALDE-BLANCAS F, GALLEGOS-MUÑOZ A, et al. The potential for avoiding hydrogen release from cryogenic pressure vessels after vacuum insulation failure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(16): 8170-8178.
- [4] ZHENG J, CHEN L, WANG J, et al. Thermodynamic analysis and comparison of four insulation schemes for liquid hydrogen storage tank [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 526-534.
- [5] ZHENG J, CHEN L, WANG J, et al. Thermodynamic modelling and optimization of self-evaporation vapor cooled shield for liquid hydrogen storage tank [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 74-82.
- [6] ZHUM, WANG R S. Experimental investigation of the

influence of different leaking gases on the heat transfer in a HVMLI cryogenic tank after SCLIV [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(7-9): 331-335.

- [7] 赵一力. 低温液体无损储存系统蒸发相变过程仿真与实验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [8] 谢高峰, 汪荣顺, 魏蔚. 高真空多层绝热低温容器完全真空丧失后升压规律的试验研究[J]. *压力容器*, 2011, 28(4): 12-17.
- [9] 任金平. 基于高真空 VD-MLI 技术的低温容器传热及结构分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
- [10] HUANG Y, WANG B, ZHOU S, et al. Modeling and experimental study on combination of foam and variable

density multilayer insulation for cryogen storage[J]. *Energy*, 2017, 123: 487-498.

- [11] 符锡理. 真空多层绝热液氢容器夹层真空度变化对蒸发率影响的计算[J]. *低温与特气*, 1994(2): 14-16.
- [12] 谢高峰. 高真空多层绝热低温容器完全真空丧失实验及传热机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [13] 王武昌, 李玉星, 孙法峰, 等. 大型 LNG 储罐内压力及蒸发率的影响因素分析[J]. *天然气工业*, 2010, 30(7): 87-92+137-138.
- [14] 《深度军事》编委会. 现代潜艇大百科(图鉴版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 3-5.

(上接第 10 页)

实验结果显示, 被测器件在液氮温区可正常运行, 但是其性能会明显劣化, 温度越低劣化越严重。当温度降低时, 零栅压漏电流和栅极泄漏电流降幅明显, 断态损耗降低, MOS 栅结构的可靠性提高; 阈值电压增幅明显, 所需驱动功率增大; 导通电阻显著增大, 通态损耗大幅增加; 漏-源极击穿电压降低; 开通时间变化不明显; 关断时间相对降低; 开关损耗显著增加。

碳化硅功率 MOSFET 较高的界面态密度和较差的沟道迁移率是导致其在低温下性能劣化的主要原因。在极低温下使用碳化硅功率 MOSFET 时, 应重新测定其安全区域, 提高驱动功率, 校核发热, 并降压使用。

#### 参考文献:

- [1] 陈治明, 李守智. 宽禁带半导体电力电子器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] RABKOWSKI J, PEFTITSIS D, NEE H. Silicon Carbide power transistors: A new era in power electronics is initiated[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2012, 6(2): 17-26.
- [3] BIELA J, SCHWEIZER M, WAFFLER S, et al. SiC versus Si—evaluation of potentials for performance improvement of inverter and DC-DC converter systems by SiC power semiconductors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(7): 2872-2882.
- [4] MORYA A, GARDNER M C, ANVARI B, et al. Wide bandgap devices in ac electric drives: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Transactions on Transportation E-*

lectrification, 2019: 1-1.

- [5] 胡高宏. 功率 MOSFET 低温特性研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2005.
- [6] 杨广辉. 功率 MOSFET 低温动态特性研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2005.
- [7] PATTERSON R L, HAMMOUD A, ELBULUK M. Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(2-3): 231-236.
- [8] COLMENARES J, FOULKES T, BARTH C, et al. Experimental characterization of enhancement mode gallium-nitride power field-effect transistors at cryogenic temperatures[C]. 2016 IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WBPD). IEEE, 2016.
- [9] CHOWDHURY S, HITCHCOCK C W, CHOW T P. Comparative evaluation of commercial 1200V SiC power MOSFETs using diagnostic I-V characterization at cryogenic temperatures[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 897: 545-548.
- [10] BALIGA B J. Fundamentals of power semiconductor devices[M]. New York: Springer Science + Business Media, 2008.
- [11] 刘驰. 功率 MOSFET 击穿特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [12] 冯耀兰. 薄膜 SOI 材料 MOSFET 的高温泄漏电流[J]. *固体电子学研究与进展*, 1998(4): 415-419.
- [13] SOMETANI M, OKAMOTO D, HARADA S, et al. Temperature-dependent analysis of conduction mechanism of leakage current in thermally grown oxide on 4H-SiC[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(2): 024505.