0254-6124/2022/42(3)-0455-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIANG Chao, WU Zongyu, HUANG Yiyong, CHENG Yun. Analysis of Influencing Factors of Tank Filling Ratio in Liquid Xenon Refueling Process (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 455–462. DOI:10.11728/cjss2022.03.210611070

液氙加注过程中贮箱充填率影响因素分析*

蒋 超[1] 吴宗谕[2] 黄奕勇[3] 程 云[1]

1(国防科技大学信息通信学院 武汉 430010)

2(国防科技大学空天科学学院 长沙 410073)

3(军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071)

摘 要 液氙在加注过程中可能会出现相变进而降低贮箱的充填率，因此需要了解贮箱充填率的影响因素。采用零维集总参数模型对液氙加注系统进行建模和仿真。基于 AMESim 计算液氮无排气加注过程中贮箱的充填率，其与文献中的实验结果接近。同时，基于 AMESim 搭建液氙加注系统，计算不同入口过冷度、入口压强、壁面温度和热流量条件下贮箱的充填率。结果表明，在相同加注时间条件下，提升入口过冷度、增加入口压强可以提升贮箱的充填率，而管路和贮箱受热会降低贮箱的充填率。

关键词 液氙，加注，集总参数，充填率

中图分类号 V524

Analysis of Influencing Factors of Tank Filling Ratio in Liquid Xenon Refueling Process

JIANG Chao[1] WU Zongyu[2] HUANG Yiyong[3] CHENG Yun[1]

1(*College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan* 430010)

2(*College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha* 410073)

3(*National Innovation Institute of Defense Technology, Chinese Academy of Military Sciences, Beijing* 100071)

Abstract Liquid xenon has low temperature, low latent heat of vaporization and high dynamic viscosity. Due to depressurization or heating, liquid xenon is prone to phase change, forming gas-liquid two-phase flow in the pipeline and the tank, thus reducing the filling ratio of the tank. Therefore, it is necessary to understand the influence factors of the filling ratio of the tank during the refueling process. The zero dimensional lumped parameter model is used to model and simulate the liquid xenon refueling system. Based on AMESim, the filling ratio of the tank in the process of filling liquid nitrogen with no-vent filling is calculated, which is close to the previous experimental results. A liquid xenon refueling system was built based on AMESim, and the filling ratio of the tank was calculated under different inlet

* 国家自然科学基金项目资助（52105290）

2021-06-08 收到原稿，2022-03-23 收到修定稿

E-mail：hexianjc@163.com

subcooling, inlet pressure, pipeline diameter, pipeline wall temperature and tank heat flow. Results show that under the same filling time, increasing the inlet subcooling and the inlet pressure can both improve the filling ratio of the tank, while heating of the pipeline and tank will reduce the filling ratio of the tank.

Key words Liquid xenon, Refueling, Lumped parameter, Filling ratio

0 引言

电推进系统由于具有比冲高和寿命长的优势，适用于深空探测，最常用的工质是氙。目前，氙在贮箱中存储和加注的状态是气态或超临界态。如果使用液氙进行存储和加注，可以有效降低贮箱压力，降低贮箱材料的强度要求，进而降低贮箱质量，增加卫星推进剂的质量，延长卫星寿命。液氙加注可以采用无排气加注方式，系统简单、操作方便，能够避免因排气而造成推进剂浪费。

关于液氙无排气加注的研究相对较少，更多研究的是液氮和液氢等低温工质以及天然气的无排气加注技术。Chato[1] 认为，液体进入贮箱的温度和气液界面传热系数似乎是无排气加注最重要的影响因素，降低壁面初始温度可以遏制加注初期压强突升。Sauter 等[2] 采用集总参数法计算贮箱的无排气加注过程，将贮箱分为四个部分：液体、气体、冷壁面和热壁面。在每个节点处，物理量都是均匀的，不会出现压强曲线振荡的情况。Kim 等[3] 进行了四氟甲烷的无排气加注实验工作。实验表明入口温度和初始壁面温度是影响无排气加注热力学特征的最主要因素。

中国开展无排气加注研究相对较晚。Wang 等[4] 研究了加注结构对低温推进剂无排气加注的影响，发现降低入口压强后加注时间延长，充填率提高。之后又进行了液氮地面无排气加注实验，指出决定无排气加注性能的主要指标是贮箱压强、充填率和加注时间[5]。通过对照实验分析得出，入口温度、贮箱初始温度、入口质量流量、加注口结构、被加注贮箱初始压强是影响无排气加注的主要因素。采用顶部加注模式时，贮箱内推进剂处于热力学平衡状态。Wang 等[6] 理论分析了液氢在地面和微重力条件下无排气加注过程中压强、温度等参数的特性，提出降低入口温度、降低壁面初始温度以及充分混合气液等措施有助于降低被加注贮箱的最大压强。Ma 等[7,8] 使用 Fluent 软件仿真了微重力条件下液氮和液氢的无排气加注过程，两相流模型使用 VOF 模型。通过仿真计算得出，在微重力条件下，气液混合更为均匀，加注口结构对无排气加注性能影响甚微，增加入口过冷度有助于改善微重力条件下无排气加注的可靠性和效率。

目前，关于液氮和液氢等低温工质的加注过程研究多集中在贮箱内，对包含加注管路和贮箱的加注系统热力学分析较少，对加注过程中贮箱充填率影响因素研究也较少。本文借鉴对液氮和液氢等低温工质的无排气加注方式，设计液氙加注系统，对液氙加注过程中贮箱充填率影响因素进行分析。

1 计算模型

液氙加注系统可以简化为三部分，即加注贮箱、管路和被加注贮箱（见图 1）。其中，加注贮箱可视为恒压恒温源，压力和温度固定不变；管路由若干个管路模块组成；被加注贮箱进行零维分析，其压力和温度在贮箱内视为是均匀的，整体随加注过程发生变化。

基于 AMESim 仿真软件计算加注过程中氙在管路和贮箱内的热力学过程。AMESim[9] 内含两相流库，有如下假设：两相流库使用均相流模型，即两相之间无滑移速度（气液速度相等），两相之间处于热力学平衡状态（气液温度和压强相等）；流动是一维的；忽略重力；流体有以下几种状态——过热蒸气或气体、过冷液体、饱和蒸气、饱和液体、气液两相和超临界态，不存在过热液体或过冷气体等亚稳态。AMESim 中氙的物性参数计算使用 MBWR 状态方程。AMESim 基于零维集总参数模型进行建模仿真。零维集总参

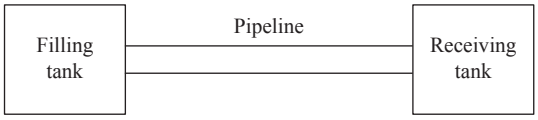


图 1 液氙加注系统

Fig. 1 Refueling system of liquid xenon

数模型是将压强、温度等热力学参数视为一个集总参数, 其没有空间分布, 只随时间发生变化。零维模型在计算增压输送系统中贮箱内的热力学参数时具有较高精度, 对增压性能的预测是可靠的[10]。

AMESim 主要分析手段是采用集总参数模型, 使用模块进行仿真。仿真模型的图标、名称和功能列于表 1。模块满足质量守恒定律和能量守恒定律, 从连续方程和能量方程中导出如下微分方程[9]:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\rho\cdot\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}+\frac{\sum(\dot{m}h)+Q-h\sum(\dot{m})}{V},\tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}=\frac{\sum(\dot{m})-\rho\,\mathrm{d}V}{V},\tag{2}$$

其中,

$$\sum X=\sum_{\text{in}}X-\sum_{\text{out}}X,\tag{3}$$

p 表示压力, t 表示时间, ρ 表示密度, h 表示比焓, $\dot{m}$表示质量流量, Q表示热量, V表示模块体积; $\sum_{\text{in}}X$和$\sum_{\text{out}}X$分别表示流入与流出模块的物理量。

在 AMESim 的模块计算结果中, 可以得到模块内任意时刻的压强 p、温度 T、质量 m 和干度 x。其中, 干度的表达式为

$$x=\frac{m_{\mathrm{g}}}{m}.\tag{4}$$

如果贮箱处于两相流状态, 由压强和温度可以得到当前时刻的液相密度 ρ_{l} 和气相密度 ρ_{g}, 由式(4)可以得到贮箱内气体的质量m_{g}, 则液体的质量为

$$m_{\mathrm{l}}=m-m_{\mathrm{g}}.\tag{5}$$

在已知液体密度ρ_{l} 的情况下, 液体的体积为

$$V_{\mathrm{l}}=\frac{m_{\mathrm{l}}}{\rho_{\mathrm{l}}}.\tag{6}$$

已知液体的体积和贮箱的总体积, 可以求出容性模块的充填率

$$\eta=\frac{V_{\mathrm{l}}}{V_0}\times100\%.\tag{7}$$

其中, V_{l}表示液体的体积, V_0表示贮箱的总体积。

2　验证计算

为了验证 AMESim 计算无排气加注过程的可行性, 将 Matthew 等[11] 和 Wang[5] 关于液氮无排气加注的实验数据与 AMESim 计算结果进行对比。前面 4 组实验来自文献 [11] 在地面做的液氮无排气加注实验, 后面 5 组实验来自文献 [5] 在地面做的液氮无排气加注实验。实验工况列于表 2。

基于 AMESim 搭建仿真平台, 计算贮箱的充填率, 搭建的液氮加注系统如图 2 所示, 入口给定恒定的热力学状态, 采用无排气加注的方式。基于集总参数模型的计算结果见表 3。由表 3 可知, 在相同加注时间的情况下, 基于集总参数模型计算的贮箱充填率与实验测量的充填率误差在 0.3%～5.8% 内。计算值与实验值的误差有一定波动, 可能是因为集总参数模型做了大量简化, 不能精准地模拟两相流过程。液氮无排气加注实验是在地面进行的, 而仿真过程忽略了重力对加注过程的影响, 计算值与实验值的误差在

表 1　AMESim 中两相流库模型

Table 1　Two-phase flow reservoir in AMESim

模块图标	模块名称	功能
	推进剂	确定工质的物性参数
	恒温恒压源	提供恒定的压强和温度, 作为热力学状态确定边界条件
	恒质量和焓流量源	提供恒定的质量流量和比焓, 作为热力学状态确定边界条件
	通用传感器	监测管路截面的流量、干度、密度等流动参数
	管路	计算绝热管路的摩擦压降
	贮箱	计算贮箱内的两相流状态
	恒热流量源	给定热流量
	恒温源	给定恒壁温

表 2 地面液氮无排气加注实验工况

Table 2 No-vent fill experimental conditions of liquid nitrogen

序号	入口温度/K	入口流量/(kg·s^{-1})	初始温度/K	初始压强/MPa	贮箱体积/L	加注时间/s
1	72.8	0.0597	123.9	0.0248	141.58	1891
2	70.0	0.0809	151.7	0.0269	141.58	1416
3	67.8	0.0847	166.1	0.0310	141.58	1289
4	79.4	0.0537	97.8	0.0338	141.58	1873
5	79.0	0.672	107	0.1	180	184
6	87.9	0.442	110	0.1	180	276
7	81.3	0.190	119	0.1	180	472
8	93.5	0.370	155	0.1	180	311
9	79.1	0.508	123	0.1	180	206

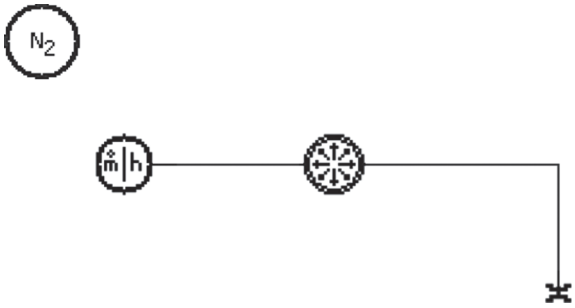


图 2 液氮无排气加注系统仿真模型

Fig. 2 No-vent fill system simulation model of liquid nitrogen

6% 以内, 误差较小, 因此重力对贮箱充填率影响较小, 集总参数模型可以用来仿真液氩无排气加注过程中贮箱充填率的计算。

3 计算分析

在液氩加注过程中, 贮箱内出现两相流态, 氩的物性参数也发生了较大变化。其中, 压强和温度是两个重要的热力学参数, 已知压强和温度时, 可以计算液相和气相氩的密度等物性参数。如果气液两相处于热力学平衡态, 则压强和温度不是相互独立的, 仅可通过温度或者压强计算出氩的气相和液相物性参数。如果已知贮箱内氩的质量和干度, 由式 (7) 可以求出贮箱的充填率。

贮箱内液氩的充填率是氩加注过程的重要参数, 是衡量加注是否成功的重要指标。液氩加注系统中贮箱充填率的影响因素有很多。本文将充填率影响因素分为热力学参数和外部环境两部分, 液氩充填贮箱采用无排气加注方式。基于集总参数模型, 计算不同条件下相同加注时间内液氩加注系统中被加注贮箱充填率的变化。

表 3 贮箱充填率计算值与实验值的比较

Table 3 Comparison of calculated values of the filling ratio with experimental values

序号	实验值/(%)	计算值/(%)	误差/(%)
1	93	96.8	3.8
2	98	96.8	–1.2
3	97	91.2	–5.8
4	90	89.4	–0.6
5	90	86.7	–3.3
6	91.3	90.3	–1.0
7	63.7	63.4	–0.3
8	91	88.3	–2.7
9	73	73.3	0.3

3.1 热力学参数对贮箱充填率的影响

热力学参数主要是指入口过冷度和入口压强, 其对贮箱的充填率可能会产生一定影响。

3.1.1 入口过冷度

计算不同入口过冷度对充填率影响时, 假设流体与壁面没有发生传热, 贮箱与环境没有发生换热, 贮箱体积为 30 L, 管路直径为 4 mm, 管长 2 m。加注贮箱视为是一个恒定的压强源和温度源, 采用了四段管路, 第一段长度 1.3 m, 第二段长度 0.5 m, 第三段长度 0.19 m, 第四段长度 0.01 m, 管路总长度 2 m, 模型如图 3 所示。

为便于分析入口过冷度对液氩加注的影响, 以 1000 s 为加注截止时间, 分析入口过冷度对贮箱压强、温度、质量、干度和充填率的影响, 入口压强 0.4 MPa, 管路和贮箱的初始温度为 167 K, 初始压强为 0.1 MPa。计算结果见表 4 和图 4。由表 4 可知,

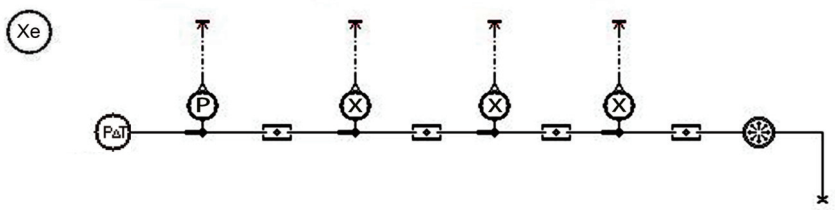


图 3　液氙加注系统仿真模型

Fig. 3　Refueling system simulation model of liquid xenon

表 4　不同过冷度下贮箱的充填率

Table 4　Tank filling ratios with different subcooling degrees

入口过冷度/K	压强/MPa	温度/K	质量/kg	干度	充填率/(%)
0	0.3893	192.5	44.17	0.0111	53.0
1	0.3811	192.0	50.42	0.00796	60.6
2	0.3711	191.4	56.57	0.00562	68.0
3	0.3597	190.7	62.26	0.00390	74.8
4	0.3476	189.9	67.59	0.00260	81.2
5	0.3351	189.0	72.55	0.00162	87.0
6	0.3225	188.1	77.26	0.000843	92.5

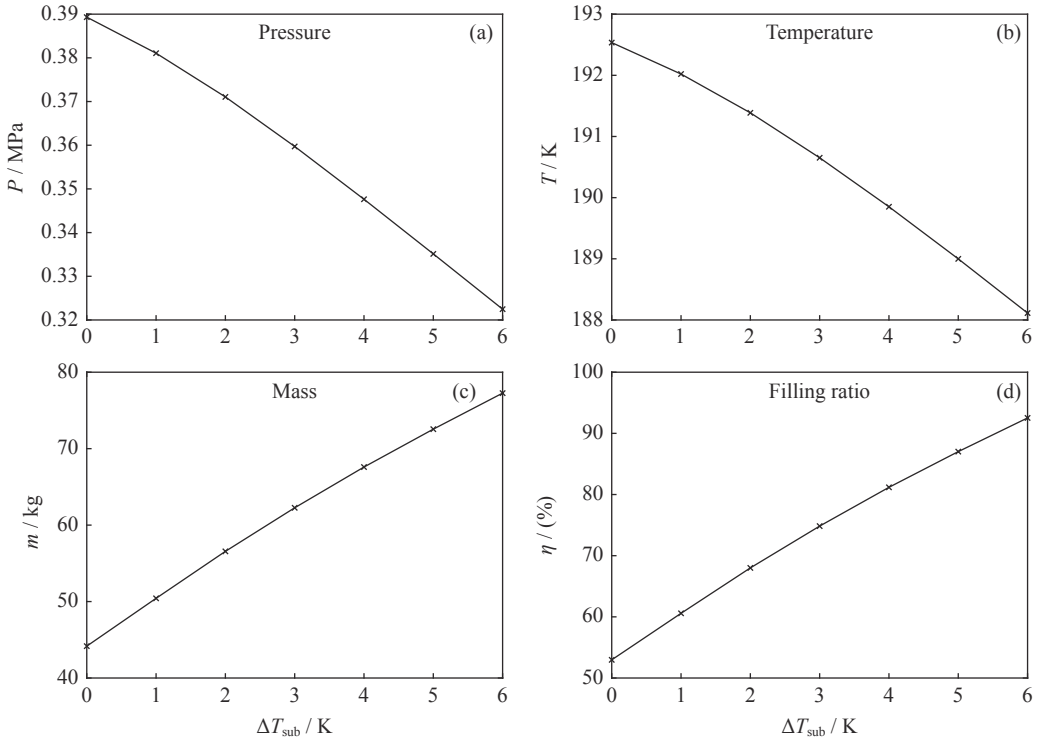


图 4　不同过冷度下被加注贮箱的压强、温度、质量和充填率曲线

Fig. 4　Diagrams of pressure, temperature, mass and filling ratio of receiving tanks with different subcooling degrees

随着入口过冷度的提升,贮箱内压强和温度降低。由图 4 可知,被加注贮箱内的压强、温度、质量和充填率与过冷度呈线性关系。提升过冷度,可以增强推进剂的品质,抑制液体推进剂的相变,减少气体的产生,有效遏制被加注贮箱内压强的上升,可以传输更多的液体推进剂,提升贮箱的充填率。

3.1.2 入口压强

入口压强对贮箱的充填具有重要的影响,在入口过冷度和出口压强不变的情况下,提升贮箱入口的压强实际上是提高了入口的质量流量。贮箱大小和管路的几何参数不变,液氙的加注系统如图 3 所示。为便于分析入口压强对液氙加注的影响,以加注时间 1000 s 为截止时间。管路和贮箱的初始温度 167 K,初始压强 0.1 MPa,入口温度 190.2 K,对应的入口过冷度为 3 K。分析入口压强对贮箱压强、温度、质量、干度和充填率的影响,计算结果见表 5。由表 5 可知,随着入口压强增加,贮箱内的压强和温度上升。在相同加注时间下,提高贮箱的入口压强,可以提升贮箱内的质量,有效提高充填率。由于入口压强增加,管路入口和出口的压强差增大,因此管路中质量流量增加,可以携带更多液体进入贮箱,提升了贮箱的充填率。

3.2 外部环境对贮箱充填率的影响

外部环境对加注影响较大,主要是外界热量的输入会促进液氙发生相变,产生更多气体,抑制了液氙的传输。在被加注贮箱外部环绕管道,通过传输液氮可以冷却贮箱,抑制贮箱内液体推进剂的气化,促进氙气的冷凝,降低贮箱内的压强。管路直径 4 mm,管路长度 2 m,贮箱体积 30 L。贮箱初始压强 0.1 MPa,初始温度 167 K。

3.2.1 管路壁面温度

壁面受热会促使管路液体相变,产生更多气体,来自管路中的气体进入贮箱后会增加贮箱内压强。加注系统如图 5 所示,与图 3 中加注系统相比,管路模块上有恒温模块。管路壁面受到恒温加热,入口压强 0.4 MPa,入口过冷度 5 K,加注时间 500 s,计算不同壁面温度下贮箱的充填率,结果见表 6。由表 6 可知,提升壁面温度会导致贮箱内压强攀升,充填率下降。这是因为管路温度提升,促进了液氙在壁面处的气化,携带大量气体进入贮箱,使得贮箱压强提升,降低了管路入口和出口的压强差,降低了流体传输的流量,进入贮箱的液体变少,充填率会显著下降。

3.2.2 贮箱热流量

随着航天低温技术的发展,可以冷却被加注贮箱来遏制液体的气化并促进气体的冷凝,提升贮箱的充填率。加注系统如图 6 所示。与图 3 中的加注系统相比,被加注贮箱上面设置了恒热流量模块,贮箱受

表 5 不同入口压强下贮箱的充填率

Table 5 Tank filling ratios under different inlet pressures

入口压强/MPa	压强/MPa	温度/K	质量/kg	干度	充填率/(%)
0.2	0.1736	175.0	38.27	0.00719	44.1
0.3	0.2649	183.7	52.26	0.00534	61.6
0.4	0.3597	190.7	62.26	0.00390	74.8
0.5	0.4575	196.5	69.90	0.00251	85.5
0.6	0.5577	201.6	75.74	0.00113	94.1

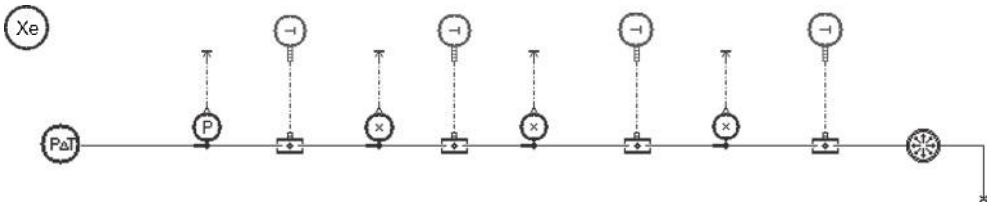


图 5 管壁受热条件下液氙加注系统仿真模型

Fig. 5 Refueling system simulation model of liquid xenon under the condition of pipe wall heating

到了恒热流量的作用。

加注的入口压强为 0.4 MPa, 入口过冷度设为 0。为了便于分析热流量对加注系统的影响, 以加注时间 1000 s 为截止时间, 分析不同热流量对被加注贮箱内压强、温度、质量、干度和充填率的影响。计算结果见表 7 和图 7。由表 7 和图 7 可知, 随着冷却热流量的增加, 贮箱内压强和温度呈线性下降, 贮箱内的质量和充填率上升趋势变得缓慢。这是因为冷却贮箱会降低贮箱的温度, 抑制液氙在贮箱内的沸腾, 促进气氙在贮箱内的冷凝, 降低了贮箱的压强, 可以传输更多液体, 因此贮箱的充填率有所上升。

冷却可以促进充填率的提升, 但是在空间环境中, 贮箱可能会受到太阳辐射, 漏热通过多层绝热结构进入贮箱, 促进贮箱内液体推进剂的气化。加注系统如图 6 所示, 加注时间的停止信号为 1000 s, 计算结果列于表 8。从表 8 可以看到, 漏热会提升贮箱的压强, 降低管路入口和出口的压强差, 进而降低管路内的质量流量, 因此充填率会下降。

4　结论

验证了集总参数模型计算贮箱充填率结果的正确性, 并且计算和分析了入口过冷度、入口压强、管路壁面温度、热流量对贮箱充填率的影响, 主要结论如下。(1) 在相同加注时间下, 提升入口过冷度和冷却贮箱可通过抑制液氙的气化来提升贮箱充填率。(2) 在相同加注时间下, 提升入口压强可以提升沿管路内的质量流量, 进而提升贮箱的充填率。(3) 在相同加注时间下, 管路和贮箱受热会促进液氙的沸腾, 产生大量气体, 促进贮箱内气枕压强的提升, 因此需要对管路和贮箱采取热防护措施。

表 6　不同管壁壁面温度下贮箱的充填率

Table 6　Tank filling ratios under different wall temperatures

壁面温度/K	压强/MPa	温度/K	质量/kg	干度	充填率/(%)
170	0.1577	173.1	52.95	0.00332	60.9
180	0.2362	181.3	44.45	0.00706	52.0
190	0.3455	189.7	28.50	0.0217	33.6

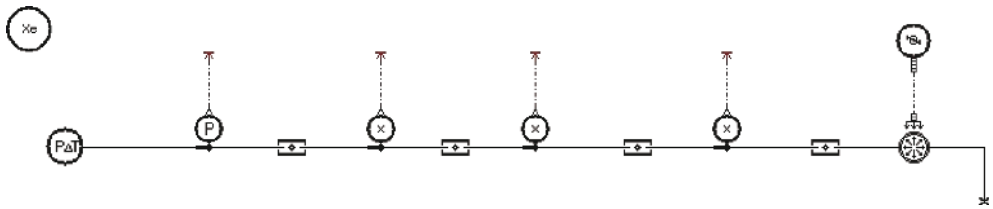


图 6　贮箱受热条件下液氙加注系统仿真模型

Fig. 6　Refueling system simulation model of liquid xenon under the condition of tank heating

表 7　比较不同热流量情况下贮箱内压强、温度、质量和充填率

Table 7　Pressure, temperature, mass and filling ratio of the tank under different heat fluxes

热流量/W	压强/MPa	温度/K	质量/kg	干度	充填率/(%)
0	0.3893	192.5	44.17	0.0111	53.0
–50	0.3629	190.9	54.90	0.00605	65.9
–100	0.3375	189.2	60.63	0.00412	72.6
–150	0.3131	187.4	64.12	0.00311	76.5
–200	0.2897	185.7	66.31	0.00253	78.8
–250	0.2670	183.9	67.66	0.00216	80.0
–300	0.2450	182.0	68.37	0.00193	80.5

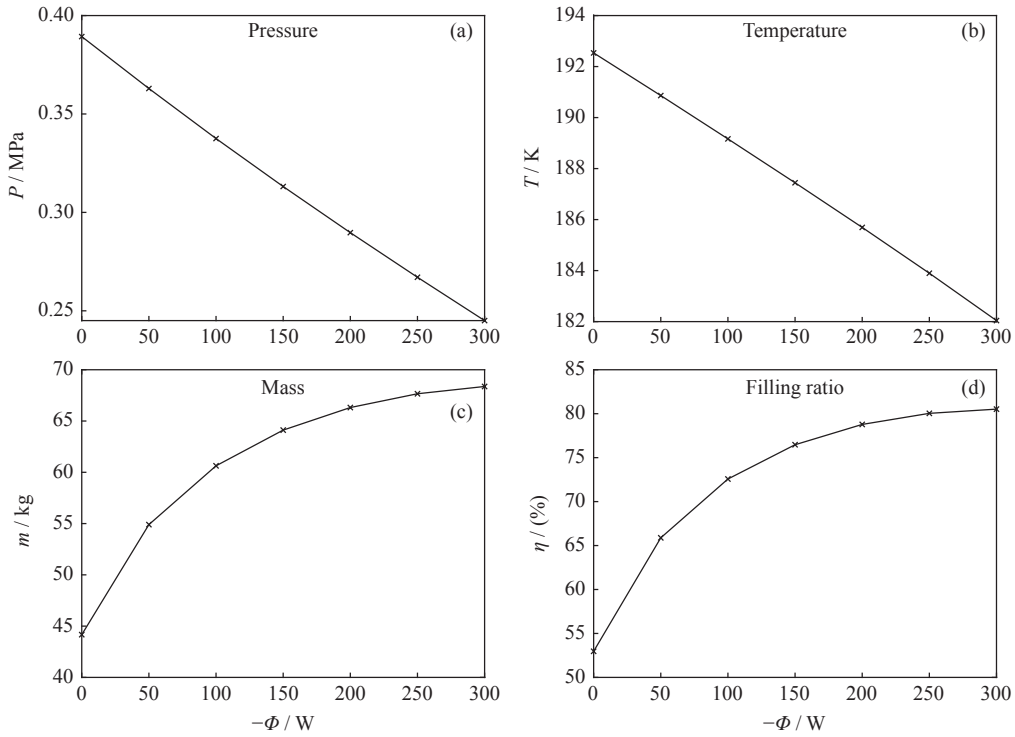


图 7 热流量对贮箱压强、温度、质量和充填率的影响

Fig. 7 Influence of the heat flow ratio on the pressure, temperature, mass and filling ratio of the tank

表 8 不同加热热流量下贮箱的充填率

Table 8 Tank filling ratios under different heating heat fluxes

热流量/W	压强/MPa	温度/K	质量/kg	干度	充填率/(%)
0	0.3893	192.5	44.17	0.0111	53.0
5	0.3921	192.7	42.65	0.0120	52.1
10	0.3948	192.9	40.98	0.0131	49.1
15	0.3976	193.0	39.10	0.0144	46.8

参考文献

[1] CHATO D J. Thermodynamic modeling of the no-vent fill methodology for transferring cryogens in low gravity[C]// Proceedings of the 24 th Joint Propulsion Conference. Boston: AIAA, 1988

[2] SAUTER D, HOCHSTEIN J, FITE L. Computational modeling of cryogenic propellant resupply[C]//Proceedings of the 44 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2006

[3] KIM Y, LEE C, PARK J, *et al*. Experimental investigation on no-vent fill process using tetrafluoromethane (CF_4)[J]. *Cryogenics*, 2016, **74**: 123-130

[4] WANG Caili, WANG Rongshun, LI Yang, *et al*. Comparison of performance about four different filling configurations in no-vent filling process[J]. *Cryogenics*, 2008(5): 35-39,55

[5] WANG Caili. Modeling and experimental study of no-vent fills for cryogenic liquid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012

[6] WANG L, LI Y Z, ZHANG F N, *et al*. Performance analysis of no-vent fill process for liquid hydrogen tank in terrestrial and on-orbit environments[J]. *Cryogenics*, 2015, **72**: 161-171

[7] MA Yuan, WANG Lei, SUN Peijie, *et al*. Numerical investigation of no-vent fill process of cryogens under microgravity condition[J]. *Cryogenics*, 2017(4): 7-13,20

[8] MA Y, LI Y Z, ZHU K, *et al*. Investigation on no-vent filling process of liquid hydrogen tank under microgravity condition[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(12): 8264-8277

[9] AMESim User's Guides[M]. LMS Imagine S. A., 2016

[10] WANG Lei, LI Yanzhong, LI Cui, *et al*. Numerical comparison of three ullage models for the tank pressurization process of liquid rocket during outflow[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, **26**(9): 1995-2001

[11] MORAN M E, NYLAND T W, PAPELL S S. Liquid Transfer Cryogenic Test Facility: Initial Hydrogen and Nitrogen No-Vent Fill Data[R]. Washington: NASA, 1990

(责任编辑: 宋雅娜)