

导热带对低温容器内 BOG 再液化过程影响研究

于春柳¹, 顾颖², 任金平¹, 任永平³, 张琪¹

(1. 陇东学院化学化工学院, 庆阳 745000;
2. 天华化工机械及自动化研究设计院有限公司, 兰州 730060;
3. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050)

摘要: 采用有限元分析软件对容器内 BOG 再液化过程进行数值模拟, 研究制冷机开启后导热带对流体温度场和速度场影响规律。结果显示: 由于导热带长度不同, 容器中产生过冷液氮的位置不同, 温度场和速度场分布也有很大差异; 开始流体温度分层明显, 流动比较剧烈, 形成了沿导热带两侧对称分布的多个涡旋, 随后温度场和速度场分布趋于均匀, 流动减缓, 涡旋逐渐消失; 但是在同一时刻, 随着导热带长度的增大, 温度分层减弱, 导热带两侧对称分布的涡旋减少, 温度和速度分布趋于均匀所需时间变短。说明导热带除传输冷量外, 还可平衡流体温度场和速度场分布, 消除温度分层和涡旋, 防止低温液体翻滚。

关键词: 低温容器; 导热带; 低温液体; 闪蒸气; 再液化

中图分类号: V511+.6 文献标识码: A DOI: 10.16711/j.1001-7100.2021.12.012

Study on the effect of thermal strap on BOG reliquefaction process in cryogenic vessel

Yu Chunliu¹, Gu Ying², Ren Jinping¹, Ren Yongping³, Zhang Qi¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China;
2. Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation Co., Ltd, Lanzhou 730060, China;
3. College of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The reliquefaction process of BOG in a vessel was numerically simulated by using the finite element analysis software in order to study the influence law of the thermal strap on the temperature field and the velocity field of the fluid after the refrigerator was opened. The results show that the location of the supercooled liquid nitrogen in the vessel is different due to the different length of the thermal strap and the distributions of the temperature field and the velocity field are also very different. At the beginning the fluid temperature stratification is obvious and its flow is relatively intense, forming a number of vortices symmetrically distributed along both sides of the thermal strap, then the distributions of temperature and velocity fields tend to be uniform, the flow slows down, and the vortices gradually disappear. However, at the same time, with the increase of the length of the thermal strap, the temperature stratification weakens, the eddy symmetrically distributed on both sides of the thermal strap decreases, and the time required for the temperature and velocity distribution to be uniform becomes shorter. These indicates that the thermal strap not only transmits cold capacity, but also balances the distributions of fluid temperature field and velocity field of the fluid, eliminating temperature stratification and eddy, and preventing the tumbling of cryogenic liquid.

Keywords: Cryogenic vessel, Thermal strap, Cryogenic liquid, Boil off gas, Reliquefaction

1 引言

随着低温工程技术的发展, 液化天然气、液氢、液氮等低温液体燃料能源和制冷剂广泛应用

于各种工业生产和人们生活领域^[1], 使低温液体的需求量和地面贮存量不断增大。但是受周围环境的影响, 尽管对贮存低温液体的容器采取了高性能的绝热措施, 蒸发仍不可避免, 周围环境热量漏入低温容器内, 被低温液体吸收后引发蒸发, 产

收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 甘肃省科技计划(17YF1GM045)、甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019B-156、2021A-125)、陇东学院青年科技创新基金(XYZK202006)资助。

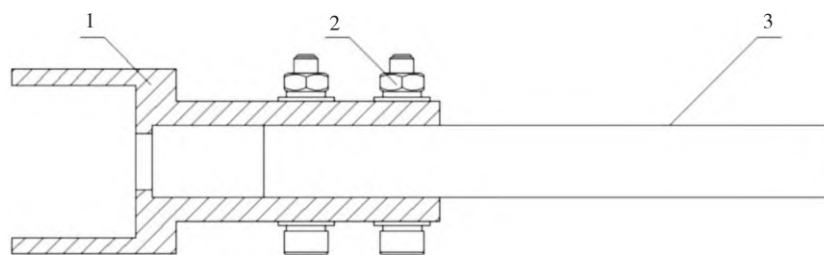
作者简介: 于春柳(1986-), 女, 讲师/硕士, 主要研究方向为低温储运技术及设备。

生闪蒸气(BOG),随着BOG的不断产生,容器内压力升高,对容器产生不利影响。如果将BOG排出,不仅缩短了低温液体贮存周期,还造成燃料浪费和环境污染^[2]。为了减少BOG的产生,采用制冷机与导热带耦合的方法从低温容器内移出周围环境漏热,对BOG冷凝再液化,是目前实现低温液体无损贮存的有效方法之一。在该方法中导热带作为典型的冷量传输介质,作用在冷源(制冷机冷头)和冷却对象(低温液体和BOG)之间,是BOG再液化过程中的关键换热设备^[3]。2020年碳中和、碳达峰目标的提出,对低温液体燃料能源和制冷剂的无损贮存提出了更高的要求,需要进一步深入研究和分析导热带对低温容器内BOG再液化过程的影响。本文采用有限元分析软件,对容器内BOG再液化过程进行数值模拟,通过分析制冷机开启后不同导热带长度对流体温度场和速度场影响规律,实现导热带对制冷机冷量高效的传输,提高低温液体BOG再液化效率。

2 导热带设计及结构

低温制冷机与导热带耦合的方法从容器内移出周围环境漏热,对低温闪蒸气冷凝再液化,导热带作为冷量传输的热耦合元件,主要作用是将制冷机的冷量最大限度地传递给容器内部流体,其

用热阻小的固体导热材料制成,被直接固定在制冷机冷头上,要求导热带在低温下具有导热系数大、热阻和密度小、抗振性能好、结构简单、加工容易的特点。目前,空间遥感器上常用的高导热产品主要为铝制槽道热管、铜块、铝块、铜质导热索、铜箔导热带、石墨导热带等^[4]。铝制槽道热管柔性不好,在航天器发射过程中振动会引起制冷机冷头的谐振,影响其它组件;铜块、铝块及铜质导热索性能稳定、工艺简单、易加工,但是其密度大、传热能力一般、热膨胀系数大,在温差变化较大时容易产生较大的热应力;石墨导热带热阻低、密度小、热膨胀系数小,但石墨的成型加工性差,成本高^[5-6]。相比较,铜箔导热带具有导热系数大、热阻和密度小、抗振性能好、结构简单、加工容易的特点,被认为是低温制冷机与导热带耦合的BOG再液化技术理想的导热带。该低温制冷机与导热带耦合的方法所选导热带采用紫铜箔逐层叠加焊接而成,长度为600 mm、宽度和厚度均为24 mm,导热带通过螺栓紧固件与导热带支架相连,导热带支架另一端与低温制冷机冷头相连,如图1所示^[7]。导热带将制冷机产生的冷量输出给贮箱内的低温液体和BOG,对低温液体冷却和BOG冷凝,冷凝液滴在重力的作用下落回容器内液相区域。



1 - 导热带支架; 2 - 螺栓紧固件; 3 - 铜箔

图1 紫铜箔导热带连接结构

Fig. 1 Copper foil thermal strap structure

3 模型建立与边界条件

为了便于分析和研究,对实际模型作必要的简化和假设:①忽略外容器、夹层和各种附件,简化后的数值模型由内容器和导热带组成,将低温容器各部分漏热量以热流密度的形式加载到对应内容器外表面,制冷机冷量也以热流密度的形式加载到导热带上端表面;②将导热带按内部组织

均匀、表面光滑的紫铜块处理,忽略与冷头和流体接触热阻,忽略因两端温差引起的导热系数差异,表面为恒定热流表面;③介质为液氮,假定其为不可压缩流体,BOG(液氮低温闪蒸气)为Boussinesq气体,液氮及BOG初始温度设置为80 K,且内部均匀统一;④忽略制冷机运行过程中自身发热影响。

内容器为圆筒壁结构,由内外容器和绝热层

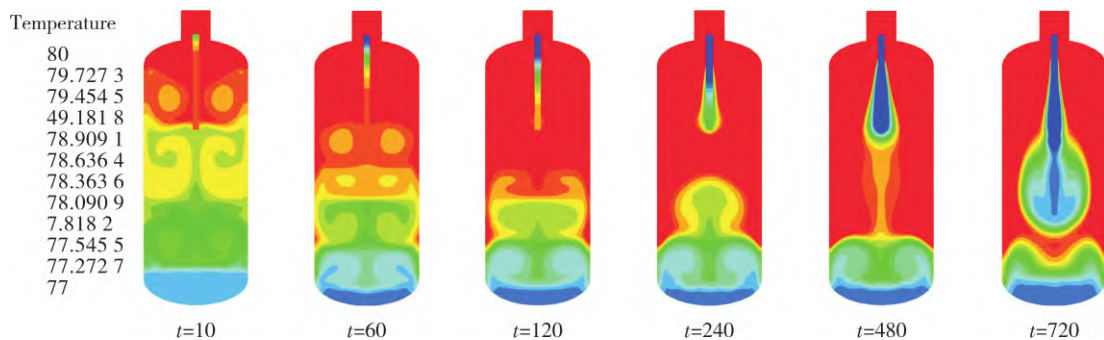
组成, 容积 80 L、最高工作压力 0.3 MPa、设计温度 77 K、材料 S30408, 模拟计算充满率为 75%, 建立导热带长度分别为 600 mm、450 mm、300 mm 三种计算模型。低温容器总漏热量 4.5 W, 转化后径管截面、上封头表面、筒体表面, 下封头表面热流密度分别为 330.3 W/m^2 、 1.5 W/m^2 、 3.5 W/m^2 、 1.5 W/m^2 。制冷机 77 K 时输出功率 10 W。紫铜箔导热带、液氮、BOG 物性参数采用 Ansys Workbench 软件提供的, 紫铜箔导热带与液氮及 BOG 边界设置为耦合边界, 环境温度为 293 K。采用 C 语言编写液化相变函数程序, 通过用户自定义函数 (UDF) 定义相变模型。液氮与导热带边界设置为耦合边界。

4 模拟结果及分析

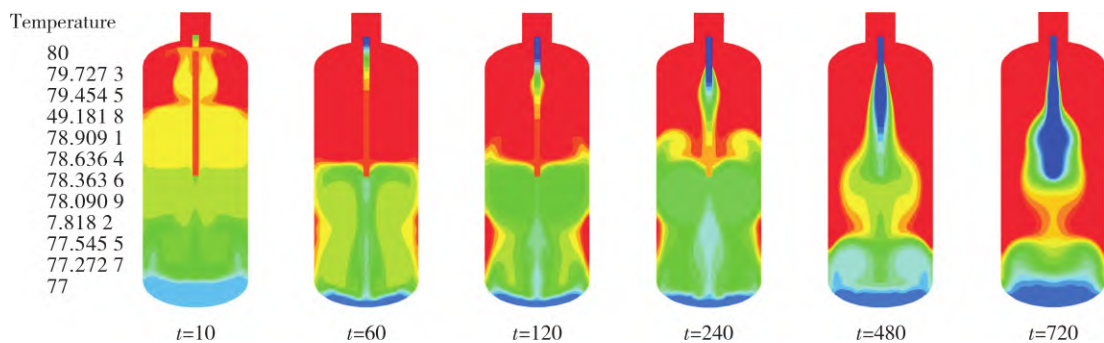
4.1 温度场随时间变化过程

图 2 为容器内流体温度场随时间变化云图, 显示了充满率为 75%, 导热带长度分别为 600 mm、450 mm、300 mm 的低温容器内流体不同时间段的温度场分布情况。从图中可以看出, 容器

内流体温度场沿导热带呈现对称分布, 在制冷机冷量的作用下, 容器内流体温度开始降低, 从容器顶部到底部温度有明显的分层现象; 240 ~ 720 s 导热带传输的冷量开始作用周围流体, 在导热带周围逐渐形成沿径向和轴向分布明显的温度场, 而且沿这两个方向分布的温度场不断的在向周围扩展, 轴向的扩展速度比径向的快, 径向液氮区扩展比 BOG 区快; 从图 2(a) 中 720 s 温度场云图可以看出, 长度为 300 mm 的导热带, 在容器内形成了底部和中部两团过冷液氮区, 使流体温度场分布极不均匀, 造成液氮翻滚, 而 720 s 时图 2(c) 中温度场分布相比图 2(b) 均匀, 图 2(b) 相比图 2(a) 均匀。可见由于导热带长度不同, 容器中产生过冷液氮的位置不同, 温度场分布也有很大差异; 开始流体温度分层明显, 随后温度场和速度场分布趋于均匀, 但是在同一时刻, 随着导热带长度的增大, 温度分层减弱, 温度分布趋于均匀所需时间变短。而且导热带除有传输冷量的作用外, 还有平衡容器内流体温度场分布、消除流体温度分层、防止低温液体翻滚的作用。



(a) 导热带长度 300 mm



(b) 导热带长度 450 mm

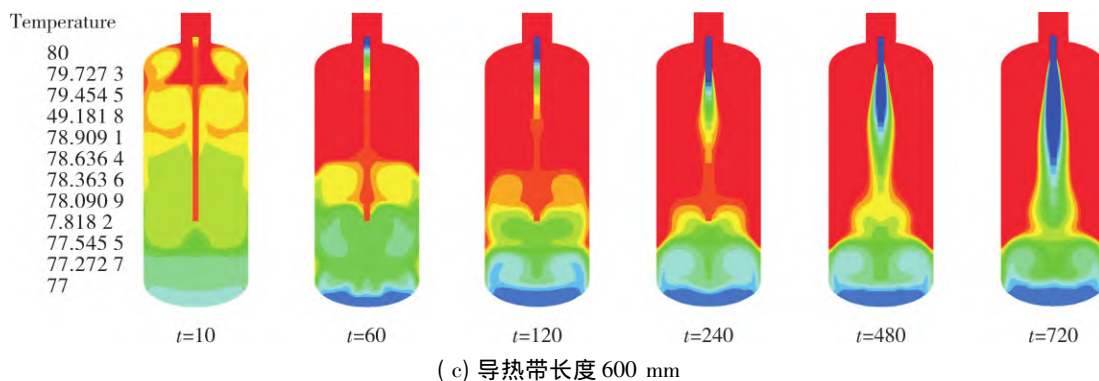


图 2 容器内流体温度场随时间变化云图

Fig. 2 Cloud diagram of fluid temperature field change with time

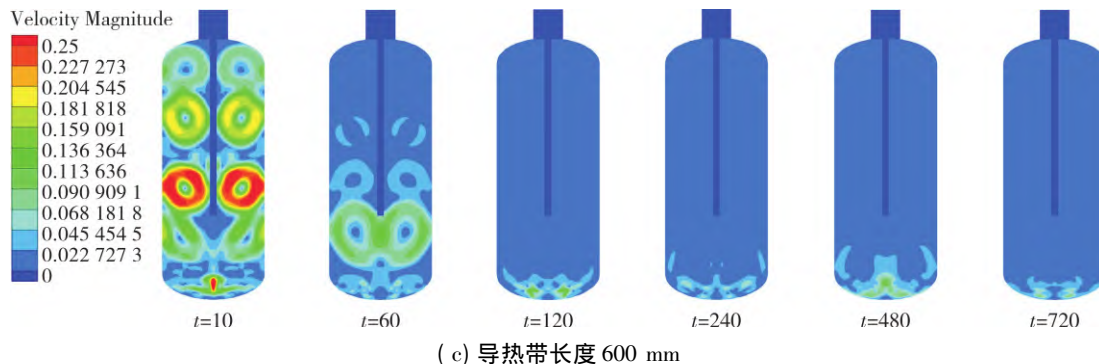
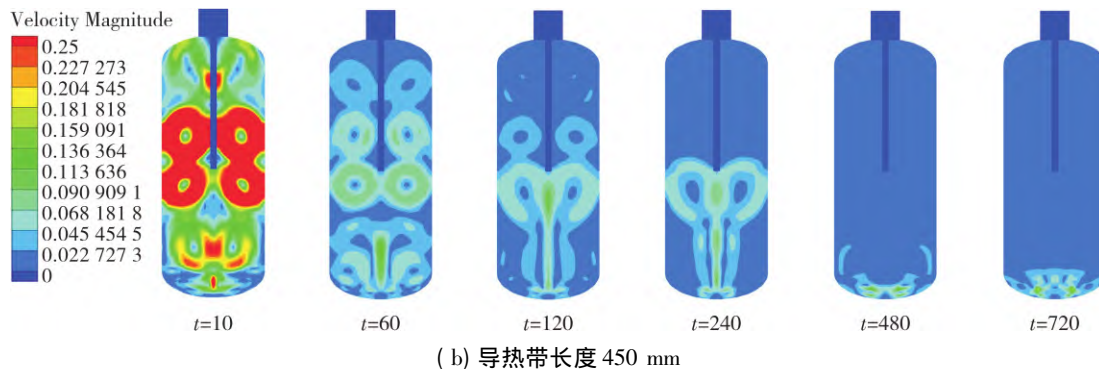
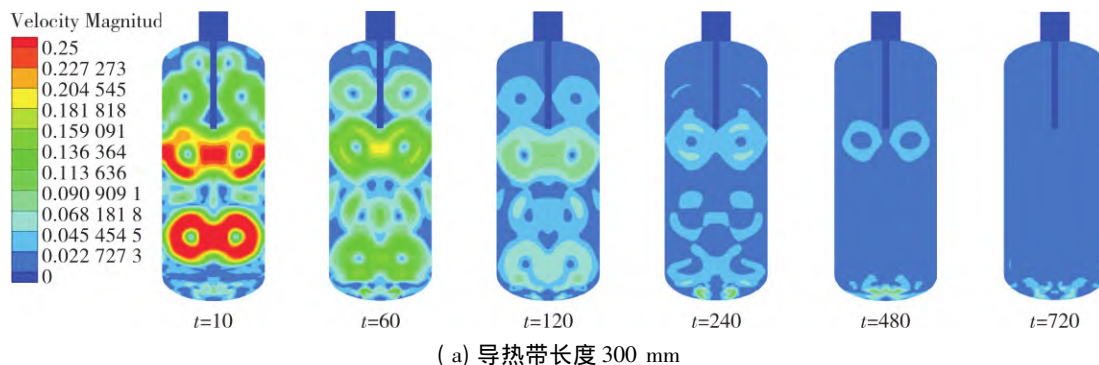


图 3 容器内流体速度场随时间变化云图

Fig. 3 Cloud diagram of fluid velocity field change with time

4.2 速度场随时间变化过程

图 3 为容器内流体速度场随时间变化云图，

显示了充满率为 75% ,导热带长度分别为 600 mm、450 mm、300 mm 的低温容器内流体不同时

间段速度场分布情况。从图中可以看出,开始容器内流体流动相对比较剧烈,在导热带两侧形成了多个涡旋,这些涡旋沿导热带呈现对称分布,分析原因,开始制冷机产生的冷量集中在容器中心轴线位置,而在容器壁处有环境漏热,这使容器内沿径向从流体中心到容器壁之间形成了比较大的温差,该温差导致了上述结果。随后速度场分布趋于均匀,流动减缓,涡旋逐渐消失,但是在同一时刻,随着导热带长度的增大,导热带两侧对称分布的涡旋减少,速度分布趋于均匀所需时间变短。说明导热带尺寸对容器内 BOG 再液化过程速度场分布有影响,导热带越长容器内流体速度场分布越均匀。

5 结论

低温制冷机与导热带耦合的方法是目前实现低温液体无损贮存的有效方法之一,在该方法中导热带作为闪蒸气再液化过程中的关键换热设备,起传输制冷机冷量的作用。本研究采用 Ansys Workbench 有限元分析软件,数值模拟研究了制冷机开启后导热带对低温容器内流体温度场和速度场的影响,得到结论如下:

(1) 在制冷机冷量的作用下,容器内流体温度逐渐降低,从容器顶部到底部温度有明显的分层,开始流体流动比较剧烈,形成了沿导热带两侧

对称分布的多个涡旋,随后温度场和速度场分布趋于均匀,流动减缓,涡旋逐渐消失;

(2) 受导热带尺寸的影响,容器中产生过冷液氮的位置不同,温度场和速度场分布也有很大差异,在同一时刻,随着导热带长度的增大,温度分层减弱,导热带两侧对称分布的涡旋减少,温度和速度分布趋于均匀所需时间变短。

参考文献

- [1] 毕明树,代钰莹,高雪,等. 混凝土表面低温液氮气化过程预测模型[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(02): 511-517.
- [2] 任金平,于春柳. 制冷机和导热带耦合作用的低温容器内 BOG 蒸发过程模拟分析[J]. 低温工程, 2020(04): 47-51.
- [3] 孙述泽,许国太,王田刚,等. 一种双臂型低温导热带的性能研究[J]. 低温与超导, 2013, 41(05): 10-12.
- [4] 王阳,高长春,孟庆亮,等. 石墨膜导热带在空间遥感器低温光学上的应用[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(S1): 16-21.
- [5] 王俊伟. 镀层石墨/铝复合材料的热传导机制与力学性能研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2017.
- [6] 姜峰,孔林,柏添,等. 一种高性能柔性导热带设计[J]. 航天器工程, 2019, 28(05): 89-95.
- [7] 任金平,陈叔平,于春柳,等. 一种基于小型斯特林制冷机的可移动式低温液体 BOG 再液化装置: 中国, 201920289595.5 [P]. 2019-11-19.

(上接第 57 页)

- [4] Chen P, Cleland D J, Lovatt S J, et al. An empirical model for predicting air infiltration into refrigerated stores through doors[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 799-812.
- [5] Micheaux T L, Ducoulombier M, Moureh J, et al. Experimental and numerical investigation of the infiltration heat load during the opening of a refrigerated truck body[J]. International Journal of Refrigeration, 2015(54): 170-189.
- [6] 田绅,邵双全,张坤竹,等. 冷库库门的非稳态 RANS 模型渗风研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(03): 63-69+107.
- [7] Carneiro R, Gaspar P D, Silva P D. 3D and transient numerical modelling of door opening and closing processes and its influence on thermal performance of cold rooms[J]. Applied Thermal Engineering, 2017(113): 585-600.
- [8] Nahor H B, Hoang M L, Verboven P, et al. CFD model of

- the airflow, heat and mass transfer in cool stores[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 368-380.
- [9] Hayes F C, Stoecker W F. Design data for air curtains[J]. ASHRAE Journal, 1969(1): 153-168.
- [10] 李艺哲,谢晶. 大型冷库内温度场的数值模拟与优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(06): 139-142+179.
- [11] 谢晶,缪晨,杜子峥,等. 冷库空气幕性能数值模拟与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(07): 189-195.
- [12] 刘广海,吴俊章,FOSTER A,等. 多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(04): 309-316.
- [13] KaiSirén. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain—part I[J]. Energy & Buildings, 2003, 35(6): 681-695.