

文章编号:1004-3918(2020)04-0580-06

低温推进剂加注管道流动特性模拟研究

刘宗虎, 王富强

(西安航天动力试验技术研究所, 西安 710100)

摘要: 以某航天低温推进剂加注系统为研究对象,按照加注系统实际尺寸建立了低温推进剂真空加注管路三维仿真模型。依据实际加注工序与参数,利用Fluent仿真模拟软件研究了推进剂在不同的进/出口压力下的加注动态特性。模拟结果表明,加注管道进/出口压力对加注效率有直接影响,在出口压力一定时,进口压力越大,加注管道进口速度越大;随着加注过程进行,出口压力逐渐升高,加注管道出口速度变小;管道特性模拟结果和试验结果吻合度较高。该方法可用于加注系统方案的设计及加注工艺参数的优化。

关键词: 推进剂; 加注管道; 流动特性; 模拟

中图分类号: TB 611

文献标识码: A

Simulation Study on Flow Characteristics of Cryogenic Propellant Filling Pipeline

LIU Zonghu, WANG Fuqiang

(Xi'an Aerospace Test Technology Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Taking a spaceflight cryogenic propellant filling system as the research object, a three-dimensional simulation model of the cryogenic propellant vacuum filling pipeline was established according to the actual size of the filling system. Based on the actual filling process and parameters, the Fluent simulation software was used to explore the filling dynamic characteristics of propellants under different inlet/outlet pressures of the filling pipeline. The results show that the inlet/outlet pressure of the filling pipeline has a direct impact on the filling efficiency. Under the condition of a certain outlet pressure, the larger the inlet pressure is, the higher the inlet speed of filling pipeline is. As the pressure rises, the outlet speed of filling pipe decreases. The simulation results of the pipe characteristics agree with the experimental measurement results. This method can be used for the design of the filling system scheme and the optimization of the filling process parameters.

Key words: propellant; filling pipeline; flow characteristics; simulation

航天的发展水平是国家综合国力和科技水平的体现,近年来,我国已突破掌握载人天地往返、空间出舱、空间交会对接、组合体运行、航天员中期驻留等载人航天领域重大技术。而推进剂作为航天器的“血液”,是实现航天器顺利发射、姿态控制以及轨道保持与机动的基础^[1]。此外,推进剂加注贮量直接关乎航天器服役年限,如运载火箭中液体推进剂的质量占起飞质量的90%左右^[2]。因此,发展推进剂加注技术能使航天器的寿命大幅延长,也是对太空资源开发和利用的重要保障^[3]。

低温推进剂的加注^[4-5]是指在将液体燃料由地面贮罐通过加注管道运送至箭上燃料贮罐过程。在加注过程中,阀门的快速开闭将不可避免地产生过高的压力波动,两端的压差和温度变化也会影响加注系统的效率,必须通过合理系统设计和试验验证确定最佳的加注工艺参数。高芳等^[6]计算了某型低温液体推进剂

收稿日期: 2019-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51301132)

作者简介: 刘宗虎(1965-),男,高级工程师,主要从事机械设计及液体火箭发动机试验技术

火箭发动机实验台系统供应管路的预冷充填过程,分析比较了仿真与实验的结果,为发动机和实验台系统的改进及新系统的设计提供了依据;李永等^[7]针对排气式在轨加注方法,对航天器在轨加注过程的流体传输行为进行数值模拟和地面试验研究,得到加注过程中加注贮箱和被加注贮箱质心分布的变化情况以及不同时刻压力变化情况;高明等^[8]为了在缺乏故障样本的情况下提高液体火箭发动机推进剂加注系统的可靠性和安全性,进行了加注系统的建模和仿真,验证了面向对象法能快速搭建系统模型,并取得有效的事故仿真结果;黄兵等^[9]讨论了影响低温推进剂加注特性的主要因素,研究表明在快速加注阶段,推进剂趋于饱和状态,系统参数变化受加注流量影响显著;唐强等^[10]对加注过程中温度、压力、流量、液位等参数进行了仿真预示,通过与试验数据对比,证明了系统全流程动态特性仿真的可行性和有效性. 虽然众多学者从各个方面对加注系统加注效果进行了研究分析,但对实际加注系统中操作参数(压力)变化及其对流速的影响研究甚少. 因此本文参照加注系统实际结构尺寸,建立加注推进剂真空管道三维仿真模型,并采用正压加注和真空加压相结合的方法进行推进剂加注试验. 利用 Fluent 仿真模拟软件研究了推进剂在不同进/出口压力条件下的加注动态特性,从而可以对加注系统方案和工艺流程设计提供理论指导.

1 加注系统工作原理

图 1 为加注系统工艺模型简图,推进剂介质贮存在介质贮罐 V1 中,且使用挤压式气体增压方式(高压氮气)进行增压,产品贮罐 V2 及加注管道使用气垫卸压方式卸至真空. 介质贮罐 V1 经流量计、真空加注管路、过滤器与产品贮罐 V2 相连.

加注系统流程分为三个部分^[11]:①气垫卸压,在进行推进剂加注前,首先对加注管路和产品贮箱 V2 进行气垫卸压,使得两者压力相同;②加注管道填充,对介质贮罐 V1 增压后,利用介质贮罐与加注管道之间的压力差,实现加注管路填充过程;③加注过程,保持介质贮罐 V1 内压力不变,直至产品贮罐 V2 内的推进剂加注完成.

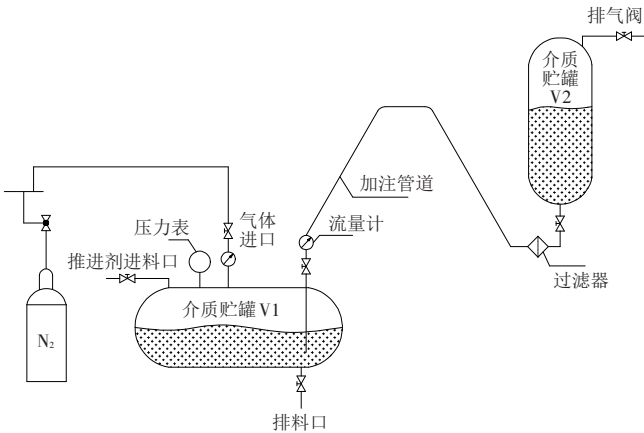


图 1 推进剂加注示意图
Fig.1 Schematic diagram of propellant filling

2 仿真模型

2.1 流体力学模型

根据加注管道内推进剂流动情况,为了简化模型便于求解,在建立数学模型中做如下假设^[12-14]:①流体为不可压缩的牛顿流体;②流体流动看成为连续流动且在流动过程不发生相变;③流动是均匀的;④进出口界面压力分布均匀.

2.2 控制方程

1)连续性方程^[15]

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的具体表述形式,第 k 相的连续性方程表达式如下:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_k \vec{v}_k) = \sum_{p=1}^n m_{pk} \vec{v}_k, \tag{1}$$

式(1)中: ρ_k 为第 k 相的密度; t 为时间; $\vec{v}_k$ 为速度; p, n 为分散相的数目; m_{pk} 为质量源项,由于不涉及两相之间的传递,因此 $\sum_{p=1}^n m_{pk} = 0$.

2)动量守恒方程^[16-17]

流动系统的动量守恒方程表达式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \vec{v}_k) + \nabla \cdot (\rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k) = m_{\rho_k} \nu_{\rho_k} + \nabla \cdot \vec{\tau}_k - (\nabla P - \rho_k F_L - \rho_k F_{VM} - \rho_k F_k) + \vec{R}_{pk},$$

(2)

式(2)中: ∇ 为散度; $\vec{v}_k$ 、 $\vec{v}_k$ 分别为不同方向上的速度; ν_{ρ_k} 为重力方向上的速度; $\vec{\tau}_k$ 为应力张量; P 为混合相的压力; F_L 为升力; F_{VM} 为虚拟质量力; F_k 为外部的体积力; $\vec{R}_{pk}$ 为相间的作用力, 主要为摩擦力、内聚力、压力及其他的影响力, 并且服从 $\vec{R}_{pk} = -\vec{R}_{kp}$ 和 $\vec{R}_{kk} = 0$.

2.3 几何模型与网格划分

加注管道的具体结构尺寸如图2所示, 由图可知加注管道关于中心轴对称, 内径为10 mm. 利用三维建模软件SolidWorks 建立加注管道的及计算域的三维模型, 如图3所示. 将该模型导入ICEMCFD 软件中进行网格划分, 由于该加注管道尺寸较大但较为简单, 因此采用四面体结构性网格进行划分, 并对拐角处进行网格加密处理, 提高计算的精度^[18], 如图4所示.

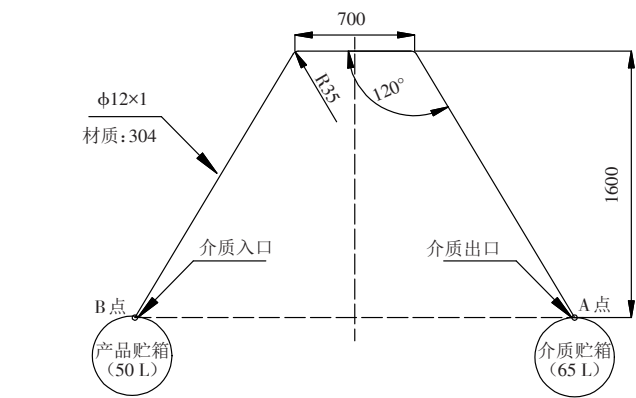


图2 加注管道结构图

Fig.2 Filling pipe structure diagram

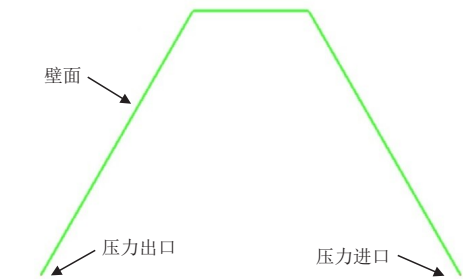


图3 加注管道三维模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the three-dimensional model of the filling pipeline

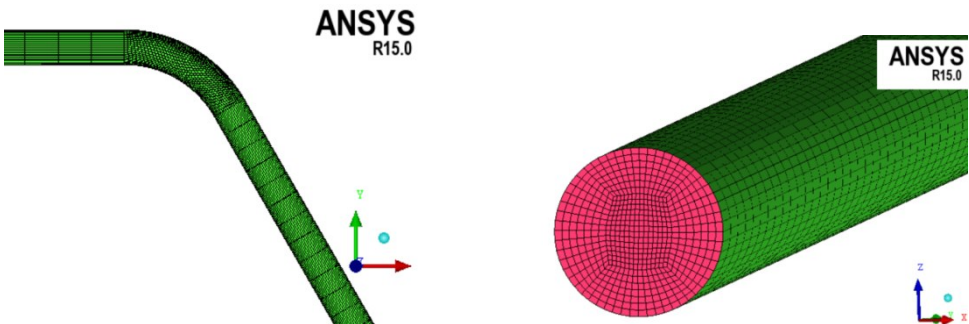


图4 加注管道拐角(左)和压力进/出口(右)局部放大示意图

Fig.4 Partially enlarged schematic diagram of filling pipe corner (left) and pressure inlet / outlet (right)

2.4 边界条件

对于单一管道内流动问题, 忽略固液接触面的速率滑移^[19], 管道的壁面材质是不锈钢, 流体介质采用Fluent 自定义介质(与推进剂性质一样), 随着工作压力和温度的变化, 流体的各物理特性参数也在变化. 流体介质密度(20 ℃)为1.13 g/cm³、黏度(20 ℃)为32 500 cP. 计算域边界条件为压力进口、压力出口, 层流模型, 压力和速度的耦合算法采用SIMPLE 算法^[20-21].

3 模拟结果及分析

3.1 不同进口压力下流动特性

为了优化得到最佳的操作条件,保持加注管道出口压力不变,分别模拟进口压力为0.4、0.5、0.6 MPa 下的推进剂流动情况. 当进口压力为0.5 MPa 时,加注平稳后,加注管道压力云图如图5所示,速度云图如图6所示,加注管道进口处不同时间下速度分布云图如图7所示. 其中不同颜色表示速度(压力)数值的大小.

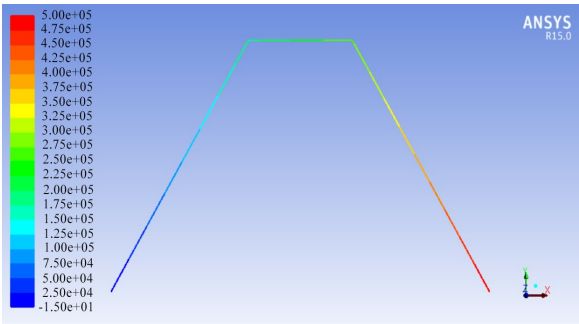


图5 加注管道压力分布云图

Fig.5 Cloud map of filling pipeline pressure distribution

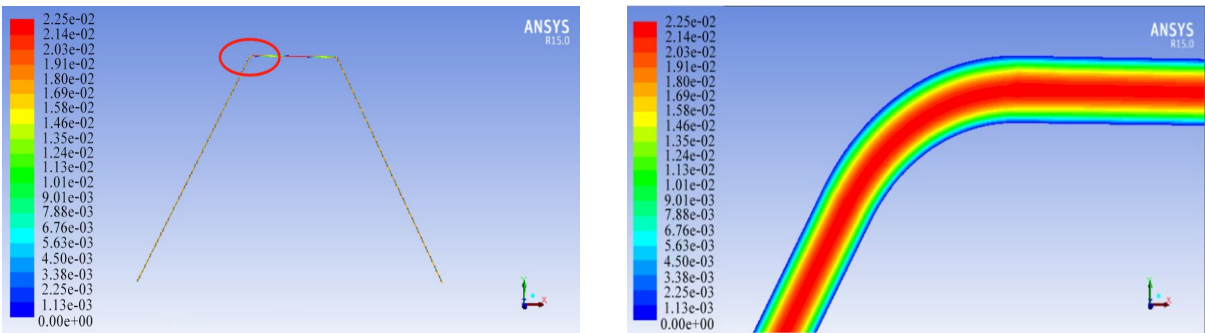


图6 加注管道速度分布云图

Fig.6 Cloud diagram of filling pipeline speed distribution

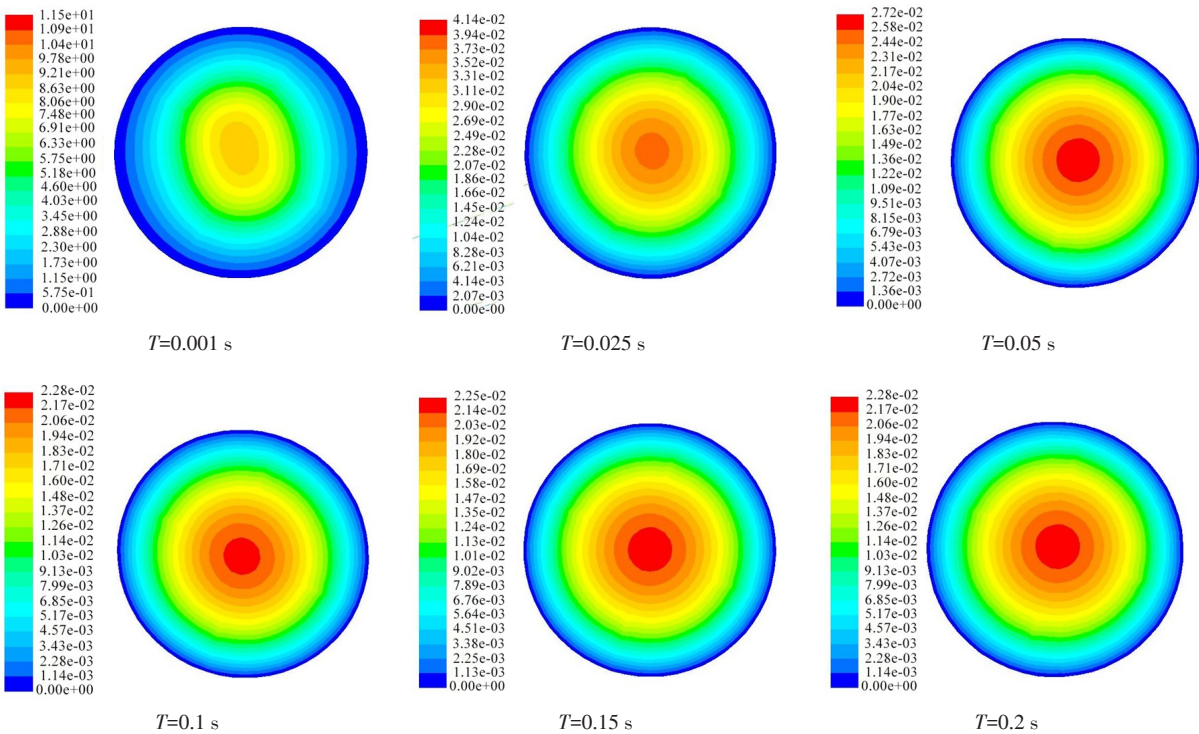


图7 加注管道不同时间下速度分布云图

Fig.7 Cloud diagram of velocity distribution at different times in the filling pipeline

图5为加注管道 xy 截面压力分布云图。由图5可知,加注管道进口压力(表压)为0.5 MPa,出口压力(表压)为-15 Pa时,沿加注管道进口至出口方向推进剂介质流动压力不断下降。这是因为推进剂在运动过程中,其自身黏性和管壁间的相互作用,管壁面区域流体产生沿程阻力损失,使得管道内流体速度逐渐减小,继而导致管道内总压力的不断下降,最终和加注管道出口压力相同^[22]。

图6为加注管道 xy 截面速度分布云图。由图6可知,当推进剂加注达到平稳状态时,沿加注管道管程方向内具有相同的流体速度分布特点:加注管道壁面流速较低,管道中心速度较高,且在管道转角处也没又出现流体涡流、回流等现象。由此可说明此管道设计合理,适用于推进剂加注系统。

图7为加注管道进口截面不同时间下速度分布云图,由图7可知,在不同时刻,加注管道进口处的推进剂流动情况不同,主要呈现出随着时间的增加,管道进口处的流速先降低后趋于平稳状态。当 $T=0.001$ s时,加注管道内流体流速较高为4.358 8 m/s,壁面流速较低且占管道截面的区域较大,中心处流体速度最高,但流速分布不均匀;当 $T=0.025$ s时,加注管道内流体流速降低至0.021 4 m/s,且流速分布也较为不均匀;当 $T=0.15$ s时,加注管道内流体平均流速趋于稳定至0.013 2 m/s,流速分布也达到稳定状态。其原因可能是在较高的压力下,当加注管道进口阀门瞬间打开,推进剂迅速进入管道中,即入口速度较大,随着流体的继续流动,流体与管壁之间的作用力增强,使得流速降低而后平稳,为了防止加注初始时,进口速度过大对加注系统平稳的影响,故可合理设置进口压力,避免进口流速急剧改变情况发生。

介质贮罐内压力的大小会直接影响推进剂的加注效率^[23],为此探究了贮罐压力在0.4、0.5、0.6 MPa条件下,对加注管道出口流速的影响。结果如图8所示,由图8可以看出,随着时间的增加,整个加注过程推进剂流速呈现先急剧下降而后保持不变,且随着介质贮罐内压力增加,加注管道出口流速也相应地增加。若单从提高加注效率考虑,实现快速加满产品贮罐的要求,可通过增加介质贮罐压力的措施实现,但如果加注流量过大,可能造成大量低温推进剂迅速进入产品贮罐对产品贮罐造成强烈冲击,使得温度上升,增加推进剂蒸发^[24]。因此,在本加注系统中,可选用0.5 MPa进行加注。

3.2 不同出口压力下流动情况

随着加注过程的进行,产品贮罐的液位会逐渐上升,相应的贮罐内气枕压力也会逐渐增加^[25]。因此,研究了进口压力0.5 MPa条件下,不同出口压力下的加注管道出口速度变化情况,如图9所示。

由图9可知,出口压力直接影响着加注速率,即随着加注管道出口压力的增加,推进剂加注管道出口流速逐渐降低,并且降低十分显著,呈线性关系。当加注管道出口压力10 000 Pa时,出口流速为0.012 9 m/s;当加注管道出口压力150 000 Pa时,出口流速为0.009 24 m/s,即流速降低1.4倍。因此,为了保证推进剂平稳且高效的加注进程,在维持进口压力(介质贮罐内气枕)不变的条件下,有必要对加注管道出口压力(产品贮罐内气枕)进行调整,降低其出口压力。此外,对于得到的回归方程,可以用于预测最佳的加注速率,满足实际加注要求。

3.3 加注模拟验证

推进剂加注过程是一个复杂的过程,加注效果受到加注设备结构和操作参数等各种因素的影响,为了

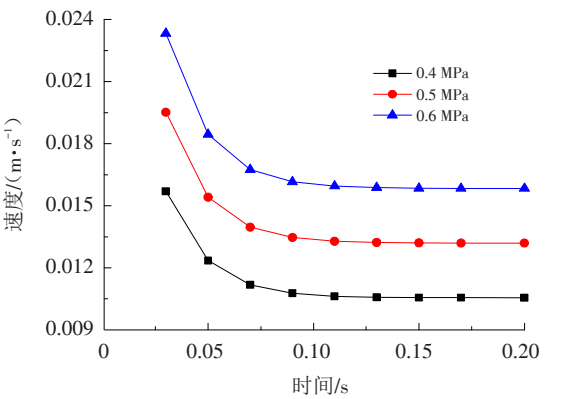


图8 加注管道不同压力下速度图

Fig.8 Speed chart of the filling pipeline under different pressures

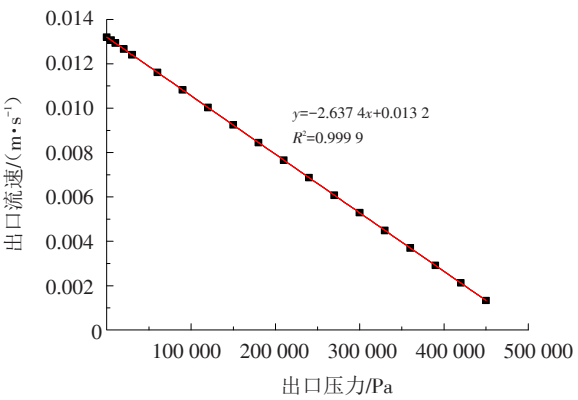


图9 加注管道不同出口压力下的流速

Fig.9 The flow rate at different outlet pressures in the filling pipeline

验证上述模拟的合理性,故对其进行试验验证. 由于实际加注过程中产品贮罐内压力一直改变,加注管道出口速度不易测量,故结合现有试验条件,对加注管道进口压力下的流速进行研究,结果如表1所示.

由表1可知,在实际加注压力工况范围内,对加注管道进口压力分别为0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 MPa条件下进口速度模拟结果与试验结果进行对比,发现两者的相对误差在5%以内,说明该模型可准确预测实际实验情况^[26].

4 结论

按航天推进剂加注管道实际尺寸和介质特性参数进行了低温推进剂加注流程动态三维仿真模拟,得到了加注管道不同进/出口压力对加注过程的影响,得到以下结论:

1)推进剂加注管道进口压力一定时,加注管道进口流速随时间呈现先急剧下降、后趋于平稳;为了防止加注初始时进口速度过大对加注系统平稳的影响,故可合理设置进口压力,避免进口流速急剧变化的情况发生,保证加注安全性. 2)加注管道出口压力一定时,加注管道进口压力越大时,加注管道进口流速越大,所需加注时间越小;为了保证航天推进剂加注效率(速率一般<2 kg/min)和加注系统的安全,可选用加注管道压力为0.5 MPa. 3)随着推进剂加注过程的进行,加注管道出口压力变大,加注管道出口流速变小,使得推进剂加注效率变低. 因此,需要在加注过程中对介质贮罐进行泄压操作. 4)此仿真模拟结果具有较高的精度,可用于该加注系统方案的优化和工艺流程设计.

参考文献:

[1] 李乐. 推进剂微重力加注稳定性仿真分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 41–45.
[2] 潘忠文,邢誉峰,朱礼文,等. 运载火箭动力学建模中液体推进剂模拟技术[J]. 中国科学(技术科学), 2010, 40(8): 920–928.
[3] 张敏,杭观荣. 电推进-空间推进技术的革命[J]. 中国航天, 2016(2): 7–12.
[4] 邵业涛,罗庶,王浩苏,等. 低温推进剂深度过冷加注技术研究及对运载火箭性能影响分析[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(2): 18–25.
[5] 杨永忠,白奉天,郑林. 火箭发射场新型低温加注系统加注过程仿真研究[J]. 低温工程, 2018(2): 39–44.
[6] 高芳,陈阳,张振鹏. 低温液体推进剂充填管路的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007(1): 108–113.
[7] 李永,胡齐,潘海林,等. 推进剂在轨加注流体传输过程的数值模拟和地面试验研究[J]. 空间控制技术与应用, 2011, 37(4): 54–57.
[8] 高明. 推进剂加注系统建模与故障模式仿真分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
[9] 黄兵,黄辉,田玉蓉,等. 低温液体运载火箭推进剂加注过程分析[J]. 低温工程, 2015(4): 62–66.
[10] 唐强,黄玲艳,陈世超. 低温推进剂加注流程动态特性仿真[J]. 低温工程, 2019(2): 35–40.
[11] 柳海波. 液体发射药火炮加注系统仿真研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
[12] 李宁,潘卫明. 液氧加注数值计算模型[J]. 低温工程, 2008(3): 26–29.
[13] 杨巧文. 管内单相流动与传热特性的研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017.
[14] 戚展飞,佟立丽,曹学武. 复杂管段流动压降数值模拟研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(S1): 119–122.
[15] 侯亚飞,李伟,柳士开,等. 加氢反应器气液分配器数值模拟与结构优化[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(5): 97–102.
[16] 王继红,王树刚,张腾飞,等. 水平90°弯管内冰浆流体流动特性的数值模拟[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(4): 581–586.
[17] 岑康. 液体管道瞬变流动分析及其应用研究[D]. 成都:西南石油大学, 2006.
[18] 崔亮. 基于ANSYS FLUENT Meshing的复杂模型网格划分[J]. cad/cam与制造业信息化, 2014(4): 56–58.
[19] 周剑锋,顾伯勤,邵春雷. 微管道中压力驱动液体流动的边界速度滑移[J]. 科学通报, 2010(30): 94–101.
[20] 徐江荣,岑可法. 有限分析法Simple类算法比较计算[C]/中国工程热物理学会燃烧学学术会议. 青岛: 2001: 181–184.
[21] 陈中涛. 虹吸式屋面雨水排水系统水力研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
[22] 高志强,王慧,张晓艳,等. 基于CFD的沿程阻力系数的计算[J]. 山西科技, 2019, 34(2): 118–121.
[23] 李亦健,高旭,陈虹,等. 低温推进剂加注系统置换介质的相似性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 703–708.
[24] 聂万胜,庄逢辰. 推进剂初始温度影响液体火箭发动机燃烧稳定性的数值模型[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(4): 32–37.
[25] 王天祥,陈虹,雷刚,等. 液氧增压器挤压加注输送可行性试验[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(5): 58–61.
[26] 付琳,翟金国,包春风,等. 聚氨酯低压混合器内流场的数值模拟和实验研究[J]. 化学工程, 2017, 45(5): 56–61.

(编辑 康 艳)