# 基于结构特征的LNG低温软管内流场流动特性研究

刘淼儿,李方遒*,程昊,李欣欣

中海石油气电集团有限责任公司,北京 100028

**摘要** 低温软管在浮式液化天然气(LNG)传输系统中是必不可少的一部分,在浮式天然气液化装置(FLNG)和LNG运输船之间进行串靠卸料过程中起到了关键作用。针对低温软管内的波纹管内部流体流动特性进行理论分析和计算流体力学(CFD)数值模型建立,应用FLUENT针对不同工况条件及结构参数下的低温软管开展内流特性模拟计算。通过模拟计算得到一系列管内流动压降及换热系数的变化规律,从而推导低温软管流动换热理论模型,为更加准确、快速地进行工艺计算提供理论基础及参考修正系数。

**关键词** LNG低温软管;结构特征;流动特性;计算流体力学

20世纪70年代以来,全球范围内液化天然气(LNG)产量迅速增加。经济的迅速发展和环境保护的迫切需求促使各国对这种清洁能源的需求量不断增长。从深海中将开采出来的天然气输送到陆地上,需要在LNG生产船和运输船或岸上进行连接。浮式LNG传输装置由于其成本低、环境友好、灵活机动性极好的特点在近些年的LNG传输中得到开发和应用。随着浮式LNG传输装置越来越广泛地应用,对现有的LNG输送技术要求也将更高。目前,国外在LNG低温传输管道的设计、制造和安装方面处于领先地位,而中国还处于初步探索阶段。相关浮式天然气液化装置(FLNG)低温软管输送技术长期被国外几家公司垄断,如果不能突破该项技术实现低温软管输送系统工业化应用,中国的FLNG产业将始终处在难以突破的状态。

## 1 低温软管内部流动特性研究现状

目前,国内外海上应用的LNG输送方式有2种:装卸臂输送和软管输送[1]。刚性装卸臂已广泛应用于LNG外输等的装卸作业中,但随着海上油气田开发不断向深海远洋领域扩展,刚性装卸臂的劣势也逐渐凸显;然而低温复合柔性软管可以很大程度上弥补刚性装卸臂的缺陷[2],可以适应特殊海

收稿日期:2023-12-13;修回日期:2024-03-18

作者简介:刘淼儿,教授级高级工程师,研究方向为天然气液化及浮式天然气液化装置,电子信箱:liume@cnooc.com.cn;李方遒(通信作者),高级工程师,研究方向为海上工程及浮式结构,电子信箱:lifq14@cnooc.com.cn

引用格式:刘淼儿, 李方遒, 程昊, 等. 基于结构特征的LNG低温软管内流场流动特性研究[J]. 科技导报, 2024, 42(13): 118-124;
doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01886

况及远距离装卸等操作条件,因此低温软管在FLNG产业中具有巨大的应用前景。

在FLNG卸载系统中,低温软管需要完成高效、安全传输LNG的基本功能。在FLNG装卸传输过程中,软管内部流体的流动作用会对管道设计和传输运行有着直接影响[3],在复杂多变的海况条件下,管内低温流体流动可能会产生多种流致问题,对管道本身结构及传输过程造成破坏。因此为了保障低温软管实现高效、安全地传输LNG,软管在设计过程中不仅要考虑力学性能,同时需要考虑低温软管内流动特性[4],包括压降、流阻、传热、蒸发量、流速控制等。

2010年,Jaiman等[5]通过对LNG装卸中所应用的低温软管进行计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)建模分析,得到了较为准确的模拟结果,验证了通过CFD数值模拟方法对该问题进行模拟计算准确性,同时为后续软管的结构设计及试验研究提供了可靠的参考。Wang等[6]和Mahmud等[7]分别针对软管结构参数及雷诺数等关键参数对2种正弦型波纹管内部流体流动的影响规律进行分析研究,得到了管内流体的传热及流阻等在关键参数影响下的变化规律。Vicente等[8]在模拟计算的基础上,设计了波纹管流动传热性能试验,得到了结构参数会对流阻及传热系统产生一定的影响。俞惠敏等[9]同样应用试验的手段来对不同波纹结构形式的管道进行研究,得到不同管型下的传热及流动压降等参数的变换规律。聂思皓[10]和喻九阳等[11]对管内流体脉动条件下的波纹管传热性能和阻力系数变化进行研究。朱景彬[12]、丁龙辉[13]对波纹管内的流动传质特性进行模拟研究,发现波纹管几何参数会对流动压降及热量传递产生影响,同时对其影响关系进行探究。王海燕等[14]以实际工程卸料系统工艺参数为基础,构建了LNG低温波纹软管内流体流动的数值模型,通过流动传热机理研究,简单分析了LNG流体在低温波纹软管内的流动特性。

以上研究均对波纹流域内的介质流动特性进行了分析计算,但以实际FLNG卸料过程为出发点,基于结构特征分析LNG低温软管内的压降及换热特性的模拟计算工作仍为空白。本研究以波纹管为内衬层的LNG低温软管(图1)在结构特征下的内部流体流动特性,建立CFD数值模型,应用FLUENT针对不同工况条件及结构参数下的低温软管开展模拟计算,从而得到一系列管内流动压降及换热系数的变化规律。

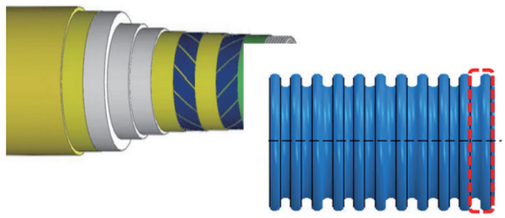

图1　LNG低温柔性软管结构及内衬层波纹管的结构示意

## 2　低温软管内流特性计算的数值模拟方法

在FLNG的装卸输送工作过程中,LNG低温软管内波纹管中的流动介质为液化天然气。在数值模拟计算研究过程中,主要应用LNG这种流体介质,假设它们是完全不可压缩的,同时不考虑相变影响,入口温度约为108 K,压力约为7000 Pa,密度约为450 kg·m$^{-3}$,动力黏度为1.4×10$^{-4}$ Pa·s,运动黏度为3.11×10$^{-7}$ m$^2$·s$^{-1}$。

以波纹类型来划分工程上常用的波纹管,主要有U型、C型、S型、三角型等。由结构设计要求,本文的研究对象为低温软管内的U型波纹管,同时考虑该U型波纹管为非螺旋波纹。针对普通波纹管的轴对称结构特性,建立二维平面波纹管模型如图2所示。

图2中,$R$为波纹管内半径,$L$为波纹管长度,$H$为波纹管的波高,$P$为波纹管的波距。同时,为了分析结构特征对于低温软管内流场流动特性的影响规律,将U型波纹管的结构参数进行拆解。得到U型波纹管的波纹结构特征,U型波纹的波高$H$由一个波纹圆形半径和1/2竖直线段组成,而U型波纹的波距$P$为2倍的该波纹圆形直径。因此,将U型波纹管的几何结构参数波高、波距分解为2个控

图2 波纹管的结构模型

制参数:圆形半径及竖直段长度,同时引入波高与波距的比值$H/P$以表示波纹的褶皱度,如$H/P$越小则褶皱度越小,波纹管越趋于平整,如图2所示。同时,改变波纹圆形半径以改变波纹管的波高波距,如表1所示。

表1 波纹管模型结构参数

| 模型 | 竖直段长度/m | 波纹圆形半径/m | 波高 $H$/m | 波距 $P$/m | $H/P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.006 | 0.005 | 0.008 | 0.02 | 0.4000 |
| 2 | 0.006 | 0.010 | 0.013 | 0.04 | 0.3250 |
| 3 | 0.006 | 0.015 | 0.018 | 0.06 | 0.3000 |
| 4 | 0.006 | 0.020 | 0.023 | 0.08 | 0.2875 |

本研究中的波纹管内径为8寸(204 mm),长度为3.5 m,依据工程实际,LNG传输速度为3~10 $m\cdot s^{-1}$,流量$Q$约为350~1200 $m^3\cdot h^{-1}$。计算得到管内流体流动的雷诺数$Re>10^6$,因此主要研究管道内部复杂湍流流动情况下的换热、流阻和压降特性。模拟计算中设置入口边界条件为速度入口边界,出口边界条件为压力出口边界,壁面设置其壁面热流密度为50 $W\cdot m^{-2}$,湍流模型采用DES模型(RANS子模型为Sparlart-Allmaras)进行模拟计算。

## 3 低温软管内流场数值模拟计算及结果分析

### 3.1 不同流量下的流动换热结果分析

首先,以结构1为研究对象,上述提到软管内的流速为3~10 $m\cdot s^{-1}$,流量为350~1200 $m^3\cdot h^{-1}$。因此,分别设置速度入口为3 $m\cdot s^{-1}$(350 $m^3\cdot h^{-1}$)、5 $m\cdot s^{-1}$(600 $m^3\cdot h^{-1}$)、7 $m\cdot s^{-1}$(850 $m^3\cdot h^{-1}$)、10 $m\cdot s^{-1}$(1200 $m^3\cdot h^{-1}$),其他设置保持不变,分析不同流速(流量)下低温软管的流动换热情况。

选取波纹壁面作为研究对象,分别得到不同流量下的波纹壁面压力、换热系数及温度分布图,如图3~图5所示。由图3可知,无论压力、换热系数还是温度均随着波纹壁面的起伏而上下波动,说明波纹结构对于流场的影响不容忽视。

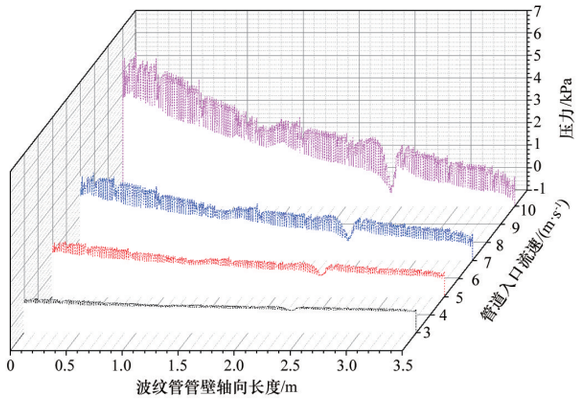


图3 不同流速下波纹壁面处的压力随轴向长度的变化曲线

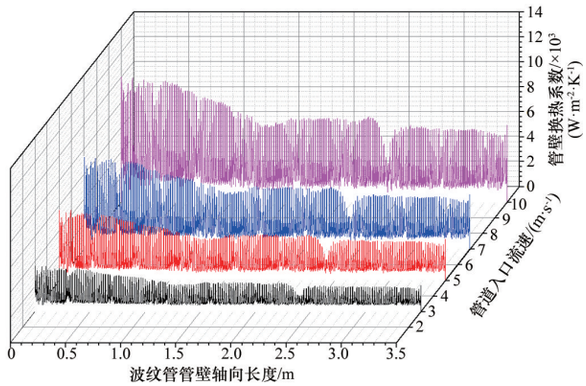


图4 不同流速下波纹壁面处的换热系数随轴向长度的变化曲线

由图3所示,虽然压力会在波纹处发生波动,但波纹壁面处的压力整体上随轴向长度逐渐降低,同时在流速不断提高时,压降也随之增大,即流速越高,压降越大。同样地,分析换热系数随流速的

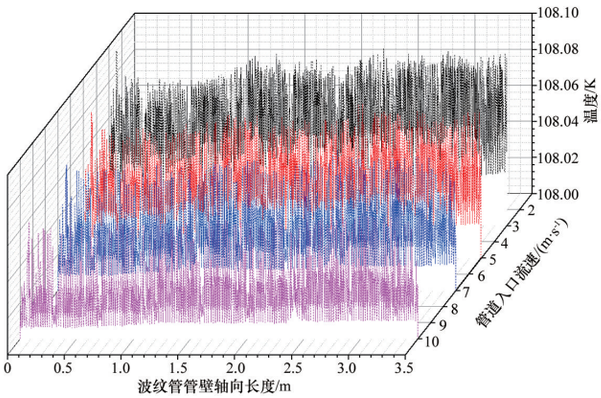


图5　不同流速下波纹壁面处的温度随轴向长度的变化曲线

变化情况如图4所示,换热系数也同样会在波纹处发生波动,但整体上不随轴向长度的变化而变化,这也与稳态换热的工况相匹配,同时在流速不断提高时,换热系数也随之增大,即流速越高,换热系数也越大。然而,温度的变化却与之相反,如图5所示,在波纹处温度也随之波动,但参考其温度平均值可以得到,当流速不断提高时,壁面的平均温度却随之降低,这与压降及换热系数的变化规律相反。为了解释以上种种现象,继续研究不同流速下波纹管波纹处的流体流动情况,当流速不断提高时,边界层及波纹内的流速也均随之提高,提取其流速平均值如图6所示。

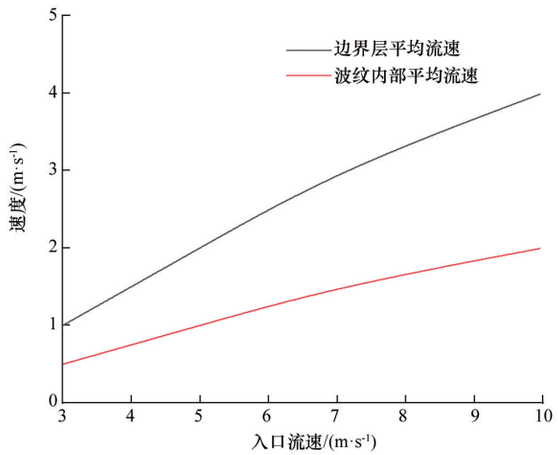


图6　不同流速下边界层及波纹内的平均流速

由此可以得到,当入口流速不断提高时,边界层及波纹内部的平均流速均有所增大,因此压降也会随之增大,而由于边界部分的流速提高,对流换热也有所增强,因此换热系数也随之增大。对流换热系数提高后,壁面与冷源流体的换热增强,但管道外壁面与环境热源的换热不受管内流动影响,因此壁面处的温度随着流速的提高而降低。

### 3.2　不同结构几何参数的计算结果分析

为进一步分析低温软管流动换热在不同结构特征下的变化趋势,继续研究基于波纹管结构特征的流动换热计算问题。

依据表1中所述不同结构参数,建立相应的U型波纹管模型,选取软管入口速度边界条件为7 m·s$^{-1}$,得到压降及换热系数结果(图7、图8)。

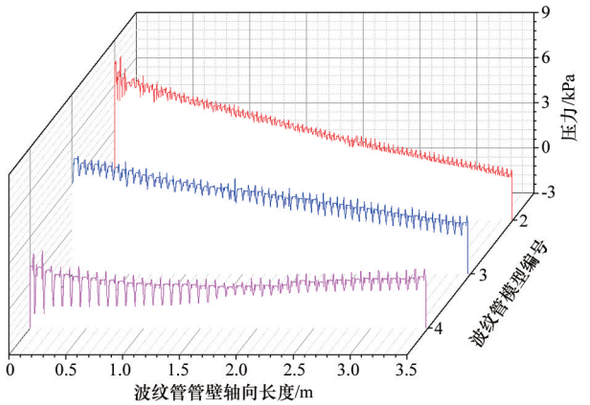


图7　不同结构参数的U型波纹管压降曲线图

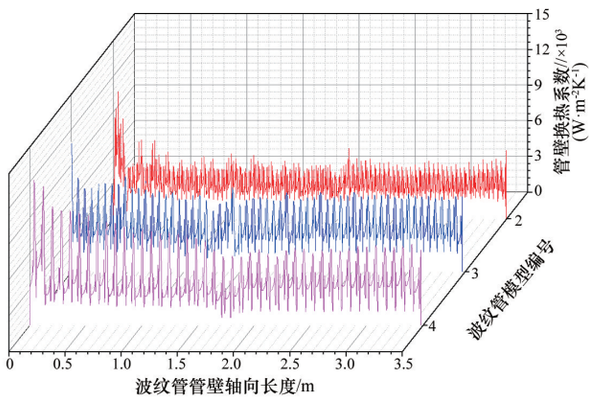


图8　不同结构参数的U型波纹管换热系数曲线图

由图7和图8可知,当U型波纹管的波高、波距增大时,压降随之降低,然而换热系数却随之增大。为分析该现象产生的原因,将不同结构参数下波纹处的速度场云图展示于图9中,以此分析不同波高、波距情况下的流动特性。

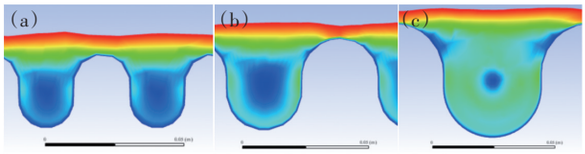


图9 不同结构模型2、3、4的U型波纹处速度场云图

为了清晰地对比不同波纹结构下的速度变化,将速度场云图中的颜色标尺统一设定,最大速度为3.5 m·s$^{-1}$。褶皱程度($H/P$)越小,即管道越趋于平整,在波峰处的壁面分离越晚,由图9可知,模型4的波纹内流速比模型2和3都要高,其流动阻力也随之降低,压降也随着褶皱程度的减小而降低;同理,当波纹内部的流速增大之后,对于对流换热而言也是一种增强,因此对流换热系数随之增大。

由于低温软管的结构设计工作不仅为流动换热计算,结构力学计算也同样重要,因此在优化波纹管结构参数时,需要流体、结构两者兼顾,才能设计出满足实际需求、保证安全的低温软管。

## 4 数值模型验证

上文分析了不同流速下的低温软管流动换热变化趋势,但结果均为定性结果,无法将其应用在后期工艺计算中。在前期进行大量文献调研中发现,几乎没有非常准确的理论公式及经验公式来阐述低温软管内的压降系数。工程中,通常采用沿管道流动过程的平均压降来量化计算普通光滑圆管的流动阻力系数。定义无量纲的平均压强梯度为沿程阻力系数,用$\lambda$表示

$$\lambda = -\frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 L}\Delta P \tag{1}$$

式中,$D$表示管道内径,$\rho$表示管内流体密度,$v$表示管内流体流动速度,$L$表示管道长度;$\Delta P$表示管内压降。由于本研究中的LNG低温软管的流域截面均为圆截面,因此沿程阻力系数仍可采用普通光滑圆管的公式来进行计算,但结果十分不准确,不符合精细化设计的标准。因此,结合以上数值模拟计算结果分析低温软管的压降系数计算公式,由式(1)可计算得到无量纲的流阻系数,如表2所示。

表2 不同流速下低温软管内的流阻系数

| 流速/(m·s$^{-1}$) | 管长/m | 压降/Pa | 管径/m | 流阻系数 |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 3.5 | 1850 | 0.2 | 0.0522 |
| 5 | 3.5 | 5100 | 0.2 | 0.0518 |
| 7 | 3.5 | 10000 | 0.2 | 0.0518 |
| 10 | 3.5 | 20500 | 0.2 | 0.0520 |

由表2可知,当波纹管结构不变时,该无量纲流阻系数也几乎没有变化,均为0.052左右,由公式(1)可以得到压降公式。

为验证该压降系数结果的准确性,调研得到相同结构参数下国外产品[15]的试验压降结果,将本次模拟计算的结果与之进行结果比对,如图10所示,发现结果吻合程度较高,从而验证了模拟结果的准确性,因此,该结果可以直接带入低温软管压降工艺计算公式中进行计算,但该数值并不是低温软管中的唯一压降来源,本次计算中考虑软管为平直状态下的流阻情况,但在低温软管运营过程时,其软管形态为悬挂状或弯曲状,因此还需考虑软管整体形态所产生的流阻系数,叠加波纹形态所引起的流阻系数后计算压降。关于软管形态所产生的压降将在后续研究中体现。

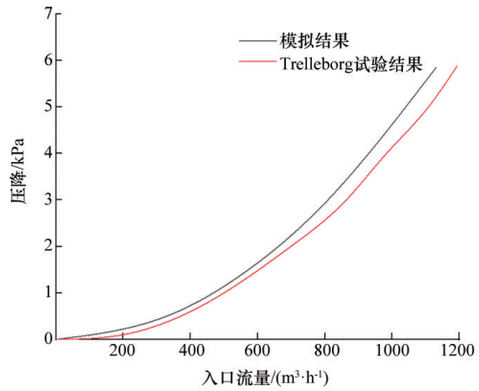


图10 模拟结果与试验结果的验证分析

## 5 结论

总结了FLNG低温软管的内部流动特性的研究现状,针对低温软管内部流体的流动特性进行压降和流阻的理论分析研究,同时应用FLUENT建立波纹管内流场的数值计算模型,并通过运行工况及

几何结构等进行参数分析,得到介质流动参数、管道结构参数对于波纹管道流动换热性能的影响规律。根据以上开展的理论及模拟研究工作,得到如下结论。

(1) 无论压力、换热系数,还是温度均随着低温软管内波纹壁面的起伏而上下波动,说明波纹结构对于流场的影响不容忽视;(2) 当入口流量不断提高时,低温软管内的压降随之增大,换热系数也随之增大;(3) 推导得到低温软管内的波纹管流阻系数计算公式,得到相同结构参数的波纹管流阻系数相同,且该压降系数的准确性已由国外产品的实验数据验证;(4) 分析不同波纹几何参数下的波纹管内流动换热的性能,得到波高、波距越大,其压降越低、换热系数越高的特性。由此可以与结构力学性能相结合,为优化低温软管内波纹管的结构参数打下基础。

同时,FLNG传输装卸过程为耦合海况的动态过程,要在后续研究中考虑软管形态对于流动特性的影响分析,同时考虑摩擦系数、换热系数与波纹形状的定量关系;同时为了保障软管在内流及外部海况的共同作用下不会发生结构破坏及失稳问题,因此,后续计算中要将内流特性与结构进行耦合分析,得到满足运营工况下的软管动态响应分析。

## 参考文献(References)


[1] 李欣欣, 刘淼儿, 杨亮, 等. 低温柔性软管LNG输送技术及其工程应用研究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(6): 121-123.

[2] 张进, 安晨, 高强, 等. 海洋LNG低温软管结构设计与试验研究现状[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(5): 300-310.

[3] 陈克平, 张锁龙. 波纹管管内流动规律与数值模拟研究[J]. 石油机械, 2007, 35(11): 9-13, 80.

[4] 杨亮, 刘淼儿, 刘云, 等. FLNG低温软管技术现状与应用前景分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(6): 810-818.

[5] Jaiman R K, Oakley O H, Adkins J D. CFD modeling of corrugated flexible pipe[C]//Proceedings of ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: ASME, 2010: 661-670.

[6] Wang C C, Chen C K. Forced convection in a wavy-wall channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(12): 2587-2595.

[7] Mahmud S, Sadrul Islam A, Feroz C. Flow and heat transfer characteristics inside a wavy tube[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39(5): 387-393.

[8] Vicente P G, García A, Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(4): 671-681.

[9] 俞惠敏, 蔡业彬. 几种换热管强化传热性能实验分析与比较[J]. 流体机械, 2003, 31(6): 7-10.

[10] 聂思皓. 管内流体脉动条件下波纹管传热和阻力特性研究[M]. 武汉: 武汉工程大学, 2013.

[11] 喻九阳, 聂思皓, 郑小涛, 等. 波纹管内层流脉动传热和阻力特性的数值研究[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(2): 60-64.

[12] 朱景彬. 几何参数对波壁管内流动及传质特性的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[13] 丁龙辉. 海洋复合波纹管内流特性分析与结构优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

[14] 王海燕, 刘淼儿, 杨亮, 等. LNG低温波纹软管内流体流动特性模拟分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(5): 183-189.

[15] Cryoline LNG hose -Trelleborg[EB/OL]. [2023-10-11]. https://www. trelleborg. com/en/fluidhandling/products-and-solutions/gas-transfer/cryoline-lng.

# On flow characteristics of LNG cryogenic hoses based on structural features

LIU Miao'er, LI Fangqiu*, CHENG Hao, LI Xinxin

CNOOC Gas & Power Group Co., Ltd., Beijing 100028, China

**Abstract** Cryogenic hoses are an essential part of floating LNG transfer systems and play a crucial role during the side-by-side offloading process between FLNG units and LNG carriers. With the ongoing development of offshore oil and gas fields moving into deeper waters, LNG cryogenic hoses have a significant and irreplaceable application prospect. This paper conducts a theoretical analysis and establishes a computational fluid dynamics (CFD) numerical model for the fluid flow characteristics inside the corrugated tubes of cryogenic hoses. Using FLUENT, simulations of internal flow characteristics under various operating conditions and structural parameters are performed for cryogenic hoses. The results provide a series of trends in terms of internal flow pressure drops and heat transfer coefficients, derivating a theoretical model for the flow and heat transfer in cryogenic hoses. This model provides a theoretical basis and correction factors for more accurate and efficient calculations. The findings of this work support the design of cryogenic hoses and lay a foundation for industrial production and domestic application of these hoses.

**Keywords** LNG cryogenic hose; structural features; flow characteristics; computational fluid dynamics

（责任编辑　王微）