

引文: 杨泰鸿, 刘军鹏, 武昌旭. LNG 低温波纹软管流动及传热特性数值模拟[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1410-1418.

YANG Taihong, LIU Junpeng, WU Changxu. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics of LNG cryogenic corrugated hoses[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1410-1418.

LNG 低温波纹软管流动及传热特性数值模拟

杨泰鸿¹ 刘军鹏¹ 武昌旭^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院; 2. 阿尔伯塔大学土木与环境工程学院

摘要: LNG 波纹软管具有较好的柔性力学特性及柔顺性, 但受其轮廓结构及传热系数较大的影响, 会导致 LNG 运输过程中产生较大的热损, 降低输送效率。为此, 采用数值模拟方法, 分别对 LNG 在光管和 5 种不同结构参数的波纹软管进行的输送流动和传热特性进行分析, 探究波纹高度、波纹间距、雷诺数等对管道传热特性的影响规律, 并采用综合热力性能指标 (Performance Evaluation Criteria, PEC) 对管道传热特性进行表征。结果表明: 波纹软管比光管具有更高的努塞尔数和摩阻系数, 具有更好的传热特性; 波纹软管内努塞尔数随雷诺数的增大而增大, 摩阻系数随雷诺数的增大而减小, 并在高雷诺数下逐步稳定; 相同雷诺数下, 波纹软管努塞尔数随波纹高度的增大而增大, 随波纹间距的增大而减小, 同时摩阻系数与波纹高度、波纹间距的变化成正比, 其中波纹高度的影响最大。研究成果可为 LNG 低温波纹软管的工程应用及其结构优化设计提供理论指导。(图 13, 表 3, 参 23)

关键词: LNG; 低温波纹软管; 光管; 传热性能; 流动特性; 数值模拟

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1410-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.011

Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics of LNG cryogenic corrugated hoses

YANG Taihong¹, LIU Junpeng¹, WU Changxu^{1,2}

1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing);

2. Faculty of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta

Abstract: LNG corrugated hoses have better flexible mechanical properties and compliance. However, due to the influence of its outline structure and the large heat transfer coefficient, large heat loss is caused during LNG transportation, with the transportation efficiency reduced. Therefore, the flow and heat transfer characteristics of LNG in the plain tube and the corrugated hoses with 5 types of different structural parameters were analyzed with the numerical simulation method. Meanwhile, the influence laws of the corrugation depth, corrugation pitch and Reynolds number on the heat transfer characteristics of the hoses were explored, and the heat transfer characteristics of the hoses were characterized with the thermal performance evaluation criterion (PEC). The results show that: The corrugated hoses have higher Nusselt number, greater friction coefficient and better heat transfer characteristics than the plain tubes. The Nusselt number in the corrugated hoses increases with the increase of Reynolds number, while the friction coefficient decreases with the increase of Reynolds number and becomes stable at high Reynolds number. Under the same Reynolds number, the Nusselt number of the corrugated hoses increases with the increase of the corrugation depth, but decreases with the increase of the corrugation pitch. Besides, the friction coefficient is proportional to the change of the corrugation depth and pitch, and the corrugation depth has the greatest influence. Generally, the research results could provide theoretical guidance for the engineering application and the structural optimization design of LNG cryogenic corrugated hoses. (13 Figures, 3 Tables, 23 References)

Key words: LNG, cryogenic corrugated hose, plain tube, heat transfer performance, flow characteristics, numerical simulation

LNG 是高效低碳、燃烧污染排放较少的清洁能源, 是中国达成“碳达峰”战略目标不可或缺的重要

资源, 其主要储存在深海中^[1-2]。浮式液化天然气 (Floating Liquefied Natural Gas, FLNG) 生产系统是

目前深海油气田开发的主流模式,其中 LNG 低温波纹软管是实现 LNG 输送的核心装备之一。LNG 低温波纹软管具有重量轻、补偿性高等特点,可满足恶劣海况下的输送要求,并可以降低运营成本^[2-3],采用 LNG 低温软管进行 LNG 装卸已成大势所趋。

海上 LNG 低温波纹软管连接在 FLNG 与油轮之间,其内径较大,通常为 0.2~0.4 m。在卸料过程中,LNG 实际通流量约为 1 000~4 000 m³/h,受船体晃动及软管结构的影响,软管内流体流动时会存在扰动^[4]。因此,针对 LNG 卸料系统中的波纹软管,需对管内流体特性及传热机理进行研究,降低传热系数及压力损失,从而提高输送效率。针对波纹软管内部流体的流动特性,王海燕等^[5]建立了 LNG 低温波纹软管中流体流动的数值模型,并基于流动传热机理分析其流动特性,研究了软管入口、出口处波纹对流体壁剪切力和流体压力的影响。杨志勋等^[6]采用数值模拟的方法建立了不同结构参数的 C 形波纹软管模型,对不同流量下的软管摩阻系数及压降进行了对比分析。苏桐等^[7]分析超临界 LNG 在螺旋形微细通道内的流动情况,发现其流动特性主要受质量通量和热流密度的影响。LNG 卸料一般采用单相流稳定输送,介质组成主要为液态甲烷和少量烃类。为此,杨帆^[8]通过 LKP 方程建立了 LNG 相平衡方程,分析了不同输入压力下 LNG 比热容、密度及导热系数随温度的变化规律,结果表明单相流状态下各参数受压力的影响较小,而对温度的变化较为敏感。许卫国^[9]对螺旋形波纹软管进行数值模拟,分析了结构参数对导热油流动和传热特性的影响,并基于场协同理论分析了波纹软管局部换热效果,发现在相同条件下波纹软管总体传热系数比光滑软管增加了 55%~250%,平均努塞尔数是其当量直径光滑管的 1.63~2.64 倍。虽然波纹软管具有更好的柔顺力学特性及柔顺性,可以实现不同方向和角度的自由弯曲,较光管更适用于复杂的管道布置和连接,但其传热系数更大,导致 LNG 运输过程中产生的热损更大,温度上升更快,因此增加了不必要的能量损失和成本。另外波纹软管的轮廓结构会使管内 LNG 在运输过程中产生涡流和湍流,导致管道内部的压力损失增加,降低了 LNG 的输送效率^[10]。为深入了解强化换热的本质,Guo 等^[11]对比分析了对流换热与有内热源的导热特性,发现流体的流动特性对其换热性能的影响不同。Siddiqua 等^[12]基于数值方法分析了两个波面所引起的

自然对流,采用有限差分法求解控制方程,并计算得到了局部努塞尔数和摩阻系数。

上述研究主要针对复合缠绕型软管、螺旋型波纹软管的换热性能和流动机理,多是从基本能量方程出发,基于两相沸腾传热关联式进行理论分析,而对临界压力及温度时流体的流动和传热特性研究较少,同时在数值模拟时忽略了管内回流及外部环境对流传热的实际工况。如何准确描述计算流体动态模型的低温流动及传热状态,仍是当前研究的难点。

为此,基于当量分析法,利用 Fluent 软件建立 LNG 低温波纹软管几何模型,计算得到不同几何参数低温波纹软管内 LNG 的速度场、温度场及综合传热系数,进而与光管分析结果进行对比分析,提出合理化建议,以期 LNG 低温波纹软管的工程应用提供理论指导。

1 当量分析法

低温波纹软管具有非圆形横截面,不同的波纹形状会产生不同的管道横截面形状,在描述管道中 LNG 的流动特性时,主要对管道复杂段内部流体的摩阻系数及由此引起的压降进行计算。

低温波纹软管中,管内流动可以通过促进混合及增加流体与热源或热汇的接触面积来强化换热。然而,在某些情况下,流动可能对换热没有实质性的贡献,甚至可能会削弱换热^[4]。从场协同原理的基本概念出发,分析速度场与温度梯度场间的协同作用,对 LNG 波纹软管内流场进行当量分析^[13],建立直角坐标系下二维边界层流动方程:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; c_p 为流体的定压比热容, J/(kg·K); k 为导热系数; T 为流体温度, K; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度分量, m/s。

将式(1)中的对流项比拟为内热源,此热源为流场的函数,对公式两边积分 dy 并改为矢量形式:

$$\int_0^{\delta_i R} \rho c_p (U \cdot \nabla T) dy = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w \quad (2)$$

式中: δ_i 为边界层厚度, m; R 为软管半径, m; U 为速度, m/s。

引入各无量纲物理量:

$$\bar{U} = \frac{U}{U_\infty}, \nabla \bar{T} = \frac{\delta_t}{T_\infty - T_w} \nabla T, \bar{y} = \frac{y}{\delta_t} \quad (3)$$

式中： \bar{U} 为流体速度矢量； U_∞ 为自由来流速度，m/s； T_∞ 为自由来流温度，K； T_w 为壁面温度，K。

将能量方程在边界层内积分可以得到：

$$Nu = RePr \int_0^1 (\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}) d\bar{y} \quad (4)$$

式中： Nu 、 Re 、 Pr 分别为努塞尔数、雷诺数及普朗特数。

上式中边界层内的 Nu 是无量纲速度与无量纲温度在整个计算域中的积分，通过改变速度场与温度场的协同程度，实现降低强化换热的目的，反映了软管的传热性能。摩擦阻力系数 f 则反映软管的流动特性，是流体产生阻力的根本原因，其表达式为：

$$f = \frac{2 \Delta p d}{\rho u^2 L} \quad (5)$$

式中： L 为软管长度，m； d 为软管直径，m； Δp 为软管两端压力损失，Pa。

用综合热力性能指标 (Performance Evaluation Criteria, PEC) 作为相同功耗下强化换热性能的评价方法^[14]，其计算式为：

$$C_{PE} = \frac{Nu_1/Nu_0}{(f_1/f_0)^{1/3}} \quad (6)$$

式中： C_{PE} 为 PEC 值； Nu_1 、 Nu_0 分别为波纹管、光管的努塞尔数； f_1 、 f_0 分别为波纹管、光管的摩阻系数。

2 数值模拟

2.1 几何模型

综合考虑已有文献中的数据^[15]，并基于 Technip-FMC 公司产品，建立 LNG 低温波纹管模型(图1)。LNG 低温波纹管管内径为 192 mm，无保冷层时为 4 层，内衬层为 316L 不锈钢波纹管，铠装层由聚氨酯纤维组成，密封层为涤纶布(表 1)。防磨层选用碳纤维增强塑料，其重量较轻且导热系数小，对于 LNG 运输具有较好的保冷效果。

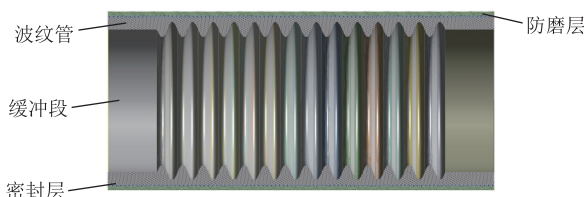


图1 LNG低温波纹管示意图
Fig. 1 Structure of LNG cryogenic corrugated hoses

表1 LNG低温波纹管结构参数表
Table 1 Structural parameters of LNG cryogenic corrugated hoses

管层(由内到外)	名称	内径/mm	厚度/mm
1	波纹管	192	2
2	铠装层	196	6
3	密封层	224	5
4	防磨层	232	6

分析波纹管不同几何参数之间的关系，以确定有限元模型独立和相互依赖的参数。软管截面(图2)由两个圆弧(圆弧2、圆弧4)及3条线段(线段1、线段3、线段5)组成，关键几何参数包括内半径 R 、波纹高度 H 、波纹间距 D 、倾角 a 及壁厚 t 。

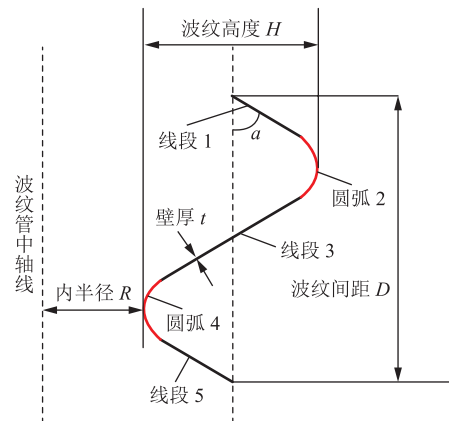


图2 LNG低温波纹管截面示意图
Fig. 2 Cross section of LNG cryogenic corrugated hoses

选择 ASTM 316L 钢作为波纹管材料，该材料在室温及 LNG 工况下均具有足够的延展性与断裂韧性，同时具有很好的抗疲劳和耐腐蚀性能^[16-18]，且易加工成型。由此建立一种光管、5种波纹管模型，并设置其几何参数(表2)。

表2 LNG低温光管及波纹管几何参数表
Table 2 Geometric parameters of LNG cryogenic plain tube and corrugated hoses

软管类型	软管编号	波纹间距/mm	波纹高度/mm	壁厚/mm	H/D
光管	I			2	
	II	20	32	2	0.625 0
	III	14	32	2	0.437 5
波纹管	IV	26	32	2	0.812 5
	V	20	40	2	0.500 0
	VI	20	24	2	0.833 0

LNG 在波纹管中输送时，过高的输送压力会导致 LNG 流动压降和流动阻力增加，较高的温度会使 LNG 黏度增大，进而影响 LNG 流动特性。同时，输送压力和温度还会影响 LNG 热传递速率，较高的输送

压力会增加软管壁的热交换,较高的输送温度会使 LNG 沸腾传热从而增强换热。因此,为使 LNG 以单相液的形式流动,选取美国国家标准与技术研究院 REFPROP 数据库中的数据,控制其输送温度为 112 K,输送压力为 4.59 MPa^[19]。

2.2 网格划分

在对 LNG 低温波纹软管进行预冷传热特性的数值计算时,网格的数量、质量对计算结果影响很大,良好的网格是保证计算准确性的前提。为有效模拟管层间的非线性接触和相互作用属性,各层结构均采用实体单元进行建模。相较于六面体网格,四面体和楔形单元形状的网络可以在降低布种尺寸的同时,尽可能地减少单元总数,增加计算效率,从而更好地模拟复杂的层间非线性接触。对直线段区域稀疏布种,粗略划分,以减少计算时间,布置波纹软管节点(图 3)。同时避免使用长、窄等不规则元素,确保波纹软管网格的均匀性,划分波纹软管网格(图 4)。

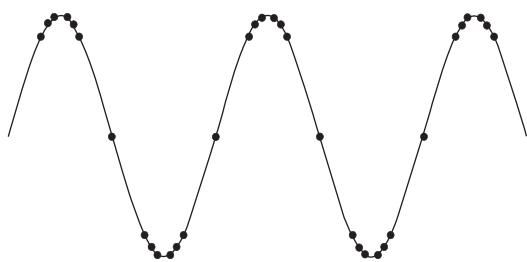


图 3 LNG 低温波纹软管截面节点布置示意图
Fig. 3 Nodes layout in the cross section of LNG cryogenic corrugated hoses

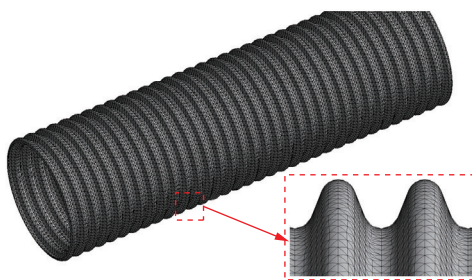


图 4 LNG 低温波纹软管网格划分图
Fig. 4 Meshing of LNG cryogenic corrugated hoses

将网格质量控制在 0~1,为验证数值模拟结果的网格无关性,选择了 $24 \times 10^4 \sim 29 \times 10^4$ 之间 5 个不同的网格数量,进行同一工况下的模拟计算。结果表明,当网格数量从 245 954 增至 290 459 时,压力计算结果的相对误差小于 1%,说明增加网格数量并没有显著改变计算结果。因此,为了保证计算精度且计算效率较高,选用网格数量为 245 954 的模型进行模拟分析^[20-21]。

2.3 材料属性及边界条件

对 LNG 低温波纹软管内 LNG 流动与传热的数值模拟计算做如下假设:① LNG 在水平管中流动,忽略体积力且壁面无滑移;② LNG 不可压缩且处于稳定状态;③ LNG 充满整个管,进出口界面的温度、速度分布均匀;④ 波纹软管进口处截面的 LNG 温度和速度分布均匀,流动参数沿流通截面均匀分布^[22-23]。

对于充分发展的高雷诺数湍流,且流动过程存在大量二次流,RNG $k-\epsilon$ 模型可较好地模拟 LNG 进入管内产生旋转流的现象,因此选择 RNG $k-\epsilon$ 模型并设定 LNG 热物性参数(表 3)。

表 3 LNG 热物性参数表
Table 3 Thermal physical parameters of LNG

工作温度/K	定压比热容/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度/ $(10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
112	2.56	422.93	9.75	0.22

软管入口采用速度边界条件,出口采用 outflow 自由流出边界条件;设置外部对流环境,温度为 300 K,层间传热采用耦合设置。

3 结果分析

3.1 速度场和温度场分布

设置入口温度为 112 K、速度为 1 m/s,在后处理中得到软管 II 内的速度场与温度场分布,采用场协同理论分析管内流动及换热特性。由 LNG 低温波纹软管 II 轴向速度分布云图(图 5)可见,在管内流体的中心截面,流动速度呈现从中心向壁面递减的分布趋势。在管道的中心区域,流体的轴向速度最大;在靠近管道壁面的区域,由于黏性效应的作用,流体速度逐渐降低并趋近于 0,直至在管道壁面处降为 0,导致在近壁面

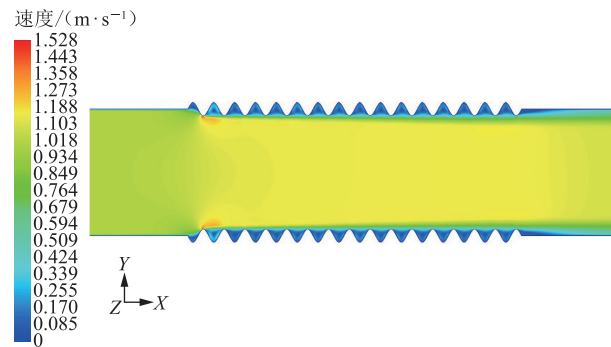


图 5 LNG 低温波纹软管 II 轴向速度分布云图
Fig. 5 Axial velocity distribution of LNG cryogenic corrugated hoses II

处形成较大的速度梯度。入口处速度变化幅度较大,设置缓冲段使之逐渐趋于平稳,在软管中段沿轴线呈对称分布。在流体通过波纹时产生涡旋,使流体在壁面上发生分离,引起流体在边界层的扰动。随着雷诺数的增加,流动由层流迅速转为湍流。此外,除入口波纹软管处边界层作用使管内沿径向产生一定的速度梯度外,流体流线主要沿轴线方向分布。在波谷位置区域流动速度小,这是由于正弦形壁面导致流体通截面改变,从而使速度迹线产生周而复始的改变。由波峰、波谷截面处速度流线图(图6)可以看出,波纹软管内波峰靠近壁面处形成多处漩涡,在一定程度上强化了壁面的换热特性,而波谷中间位置的流线趋于平稳,壁面处漩涡不明显,因此,改善波纹软管流动换热性能可从波谷位置入手。

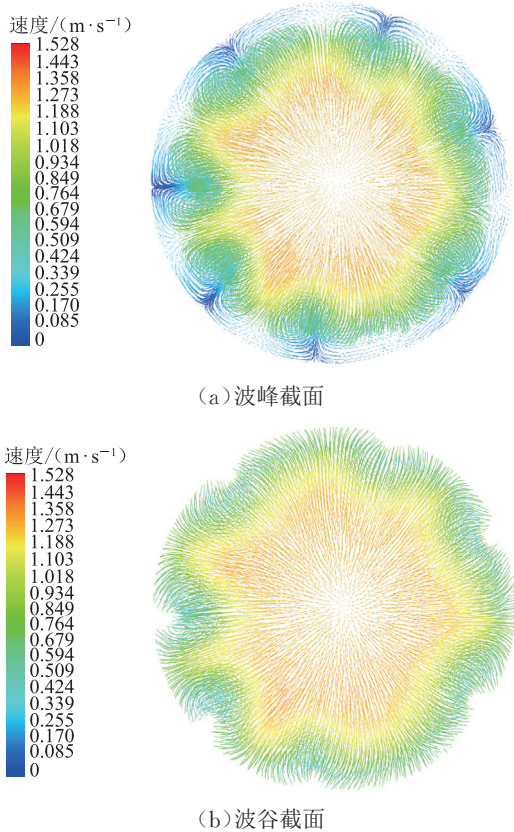


图6 LNG低温波纹软管II波峰与波谷截面处速度流线图
Fig. 6 Velocity streamline at peak and trough section of LNG cryogenic corrugated hoses II

由LNG低温波纹软管II温度分布云图(图7)可见,沿波纹软管径向方向,流体温度变化较为剧烈,在波纹软管壁面附近温度梯度很大。入口速度为1 m/s时,流体将产生湍流脉动效应,再加上波谷引起流体旋转流动增加湍流强度,导致其径向速度分量增加,产生的离心力使流体以较高的速度冲向壁面,降低边界层

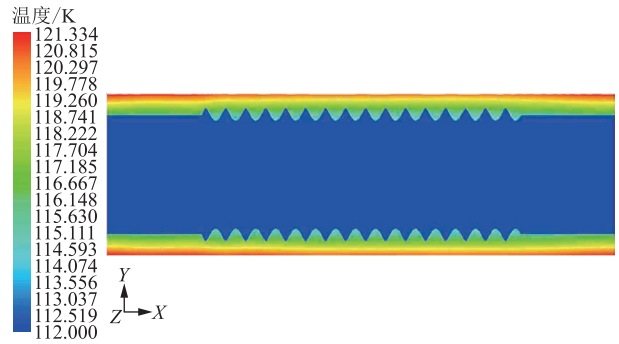


图7 LNG低温波纹软管II温度分布云图
Fig. 7 Temperature distribution of LNG cryogenic corrugated hoses II

厚度,加速了对流换热。对比光管(软管I)与波纹软管II温度迹线(图8)可见,光管内壁面温度为112.572 K,波纹软管II内壁面温度为117.727 K,波纹软管与外界的换热效果优于光管。这是由于波纹软管内壁凸起引起的扰动作用可使流体沿径向的温度梯度变大,从而促使热边界层充分发展,且速度场与温度场之间也具有很好的协同性。这种协同作用促进了热量在管道中的传递和均匀分布,提高了传热效率。

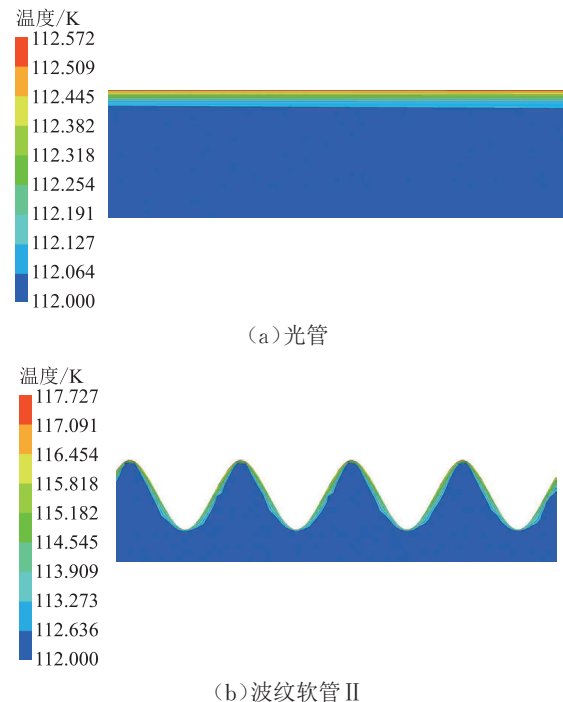


图8 LNG光管与波纹软管II温度迹线图
Fig. 8 Temperature trace of LNG plain tube and corrugated hoses II

模拟得到LNG低温波纹软管II径向湍动能分布(图9),分析湍动能与热边界层之间的相互作用。可见,湍动能在靠近壁面处较高,中心处较低。说明波纹软管的结构作用可以改变流体的换热特性,这是由于连续的正弦形波纹对流体的扰动增强,平均速度呈线

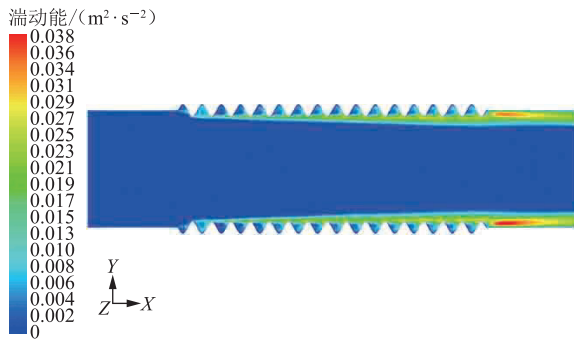


图9 LNG 低温波纹软管 II 径向湍动能分布云图
Fig. 9 Radial turbulent kinetic energy distribution of LNG cryogenic corrugated hoses II

性增加,换热能力增强的同时摩擦阻力也相对减小。在波纹软管的波纹区域,流体沿径向的湍动能先增大再减小,在波纹软管中心区域,流体湍动能较低。在波峰处,流体到达附着点,热边界层厚度最小,因而形成小部分的湍动能梯度,随着流体的流动出现回流涡旋。在流体离开波纹软管时由于连续的波纹结构突然消失,流体会产生非常剧烈的扰动,掺混作用增强,形成沿速度方向的横向涡,因而产生较大的湍动能。

3.2 结构参数对波纹软管摩擦阻力和传热性能的影响

设置入口速度分别为 0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s、2.5 m/s、3 m/s, 计算得到入口雷诺数分别为 413 963、827 926、1 241 889、1 655 852、2 069 815、2 483 728。在上述 6 种不同入口雷诺数下, 分别比较光管及 5 种不同结构参数波纹软管的流动与传热特性, 分析结构参数(波纹高度、波纹间距)对管道性能的影响。由 LNG 光管及 5 种不同结构波纹管内流动努塞尔数随雷诺数的变化曲线(图 10)可知, 随着雷诺数的增大, 努塞尔数也随之增大, 这与普通介质的强制对流传热规律相符。高雷诺数下, 努塞尔数增大速度有所变缓, 这是设置了缓冲段的缘故。随

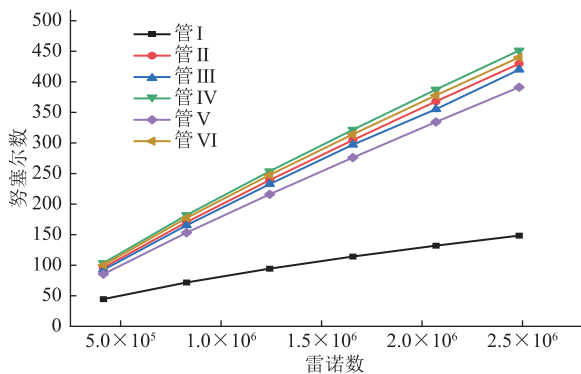


图 10 LNG 光管及 5 种不同结构波纹管内流动努塞尔数随雷诺数的变化曲线
Fig. 10 Variation of Nu in LNG plain tube and 5 types corrugated hoses of different structures with Re

着雷诺数的增大, 波纹软管内流体的流动速度增大, 导致波纹软管壁面形成的热边界层厚度减小, 从而降低了对流热阻, 提高了波纹软管内对流换热系数。同时, 当波纹高度增大或波纹间距减小时, 努塞尔数也会增加, 这是因为波纹软管内的流体流动更加剧烈, 提高了对流传热的效率。因此, 通过减小管内波纹轴向与径向的比例, 可以进一步增加努塞尔数, 提高波纹软管的对流换热效率。

在流体管内流动过程中, 流体与管壁之间存在摩擦力, 这种摩擦力会产生压力损失, 即压降。波纹结构会改变流通截面, 从而增大流体的摩擦系数, 导致更大的压降。由 LNG 光管及 5 种不同结构波纹软管内流动摩擦系数随雷诺数的变化曲线(图 11)可见, 波纹间距越大, 摩擦系数也越大。相同波纹间距的波纹软管, 随着波纹高度的增大, 摩擦系数也增大。随着雷诺数的增大, 摩擦系数逐渐减小, 这是因为流速增大, LNG 黏性作用减小。波纹的存在会导致近壁面流体产生环向流动和涡旋运动, 进而产生较大的摩擦阻力损失。

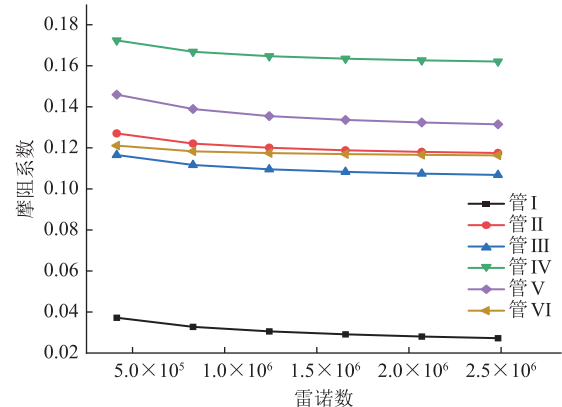


图 11 LNG 光管及 5 种不同结构波纹管内流动摩擦系数随雷诺数的变化曲线
Fig. 11 Variation of f in LNG plain tube and 5 types corrugated hoses of different structures with Re

在波纹软管中, 流体流速增大会导致雷诺数增大, 管道壁面对流体的黏滞作用减小, 从而导致摩擦系数减小。然而, 由于波纹的存在, 流体在近壁面处会产生环向流动和速度分布的变化, 这会使流体流动的复杂性增加, 导致摩擦系数的变化不再是简单的单调函数。当雷诺数进一步增大时, 摩擦系数会趋于某一稳定值, 这是由于流体流动的复杂性达到了一定的稳态, 不再受结构参数和雷诺数的影响。可见, 波纹软管的摩擦系数是一个复杂的函数, 受到多种因素的影响。这些特性和现象对于波纹软管的设计和 optimization 具有重要意义。

义。例如,可以通过优化波纹结构,选择合适的波纹高度、波纹间距等来减小流体在管内的摩擦损失和压降,从而提高管道的输送效率。

3.3 综合传热性能对比分析

以 PEC 值衡量管道的传热性能,光管的 PEC 值为 1,对比不同结构波纹软管的 PEC 值随雷诺数的变化情况(图 12)。可见,随着雷诺数增大,PEC 值呈现逐渐增大的趋势,且不同结构波纹软管的 PEC 值均大于 1,这表明所有波纹软管的综合传热性能均优于光管。当流体速度增大时,波纹软管内部的对流换热强度也会增加,因此热量会更快地从高温区域传递到低温区域,从而改善了管道内部的传热性能。但是,当流体速度过高时,管道内部的摩擦损失也会增加,同时流体的湍流强度也会增加,从而影响管道内部的传热性能^[24]。

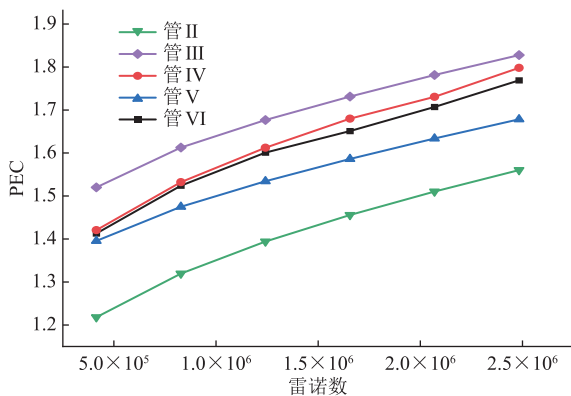


图 12 不同结构 LNG 波纹软管 PEC 值随雷诺数的变化曲线
Fig. 12 Variation of PEC in LNG corrugated hoses of different structures with Re

在同一波纹间距下,波纹高度越大,PEC 值呈现先减小再增大的变化趋势,这表明波纹高度的增大会导致管道内部的摩擦损失增加,从而降低管道的传热性能,但增至一定程度后传热性能低于摩擦损失增加量。在相同波纹高度的情况下,随着波纹间距的增加,PEC 值呈现先减小再增大的趋势。由此,引入波纹高度与波纹间距之比(H/D)用于探讨管道综合传热性能的影响因素。分析 LNG 波纹软管在不同雷诺数下 H/D 与 PEC 值的变化关系(图 13),可知同一雷诺数下,随着 H/D 的增大,PEC 值呈现不规则的变化,先减小再增大而后又减小,说明 LNG 低温波纹软管存在最佳的 H/D 。因此,不同结构波纹软管的传热性能评价需要考虑多个参数的综合影响,包括流体速度、摩擦损失、波纹高度及波纹间距等。在选择管道结构时,需要根据具体应用情况综

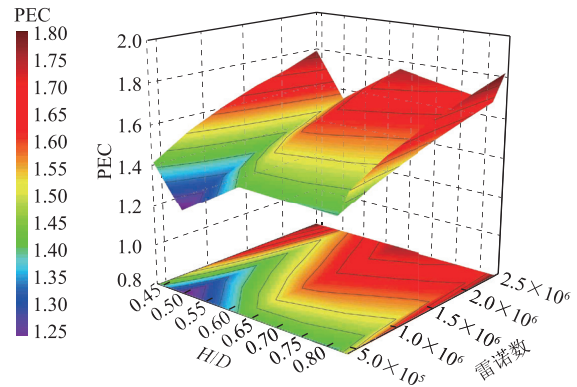


图 13 LNG 波纹管不同雷诺数下 H/D 与 PEC 值变化关系图
Fig. 13 Relation between H/D and PEC in LNG corrugated hoses at different Re

合考虑这些参数的影响,以实现最佳的传热性能和能量利用率。

在 LNG 管道中,如果 PEC 值过大,可能会导致 LNG 在管道内部发生汽化和蒸发,使管道内部的压力和温度增大,给管道运行的安全性和可靠性带来威胁。如果 PEC 值过小,则会导致能量浪费和成本增加。对于超低温管道,过高的 PEC 值不利于管道内温度和压力的控制,在实际设计中,需要综合考虑管道材料选取、保冷层设计及环境条件等因素,以确定最适合的 PEC 值范围,既要保证流体的传热效率,又要保证管道运行安全可靠。

4 结论

对 LNG 低温波纹软管的流动特性和传热特性进行数值模拟,得到波纹软管内流体速度、温度的分布状态,并采用场协同理论,结合边界层换热的实际情况,分析了结构参数、边界层厚度及位置等因素对 LNG 低温波纹软管传热性能的影响,得到以下结论:

(1) 相比于光管,波纹软管具有较好的传热特性,主要是由于波峰和波谷的存在使近壁面处的流体形成涡旋,从而破坏了热边界层,增强了传热能力,但管壁对流体的扰动会导致流动阻力和压力损失的增加。

(2) 与光管相比,波纹软管具有更高的努塞尔数和摩擦系数。努塞尔数随着雷诺数的增大而增大;摩擦系数随雷诺数的增大逐渐减小,在高雷诺数下逐渐变得平稳,不受结构和雷诺数的影响。在相同雷诺数下,5 种结构波纹软管的努塞尔数随波纹高度的增大而增大,随波纹间距的增大而减小,摩擦系数同样也受波纹

高度和波纹间距的影响,较大的波纹高度和波纹间距均会使摩阻系数增大。

(3) 波纹高度与波纹间距之比对 PEC 值有影响,且存在最佳的 H/D 值,在实际设计中,需要综合考虑管道材料选取、保冷层设计及环境条件等因素以确定最适合的 PEC 值范围。

(4) 研究成果在工程上可为 LNG 低温波纹软管结构的优化设计提供指导。但在实际工况中, LNG 船间晃动可能对管道内部流体的流动和传热性能产生一定的影响,由于缺少工程数据同时考虑到模型的复杂性,未来还需要对上述情况开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 张剑波,孙小辉,单正锋,付玮琪,刘争,孙宝江,等. 海域天然气水合物试采井筒中水合物二次生成风险预测及防治[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 31-40. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.06.004.
- ZHANG J B, SUN X H, SHAN Z F, FU W Q, LIU Z, SUN B J, et al. Prediction and prevention of hydrate reformation risk in trail production pipes of offshore natural gas hydrate[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 31-40.
- [2] 冯德华, 蔡耀光, 余焱群. 海洋纤维增强复合柔性管拉伸性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 146-152. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.04.018.
- FENG D H, QI Y G, YU Y Q. Tensile properties of marine fiber reinforced composite flexible pipes[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 146-152.
- [3] 杨亮, 刘淼儿, 刘云, 李欣欣, 范嘉堃, 许佳伟, 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. DOI: 10.12087/oect.2095-7297.2019.06.11.
- YANG L, LIU M E, LIU Y, LI X X, FAN J K, XU J W, et al. Analysis on current situation and application prospect of FLNG cryogenic hose technology[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(6): 810-818.
- [4] JAIMAN R K, OAKLEY O H, Jr, ADKINS J D. CFD modeling of corrugated flexible pipe[C]. Shanghai: ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2010: 661-670.
- [5] 王海燕, 刘淼儿, 杨亮, 陈杰, 许佳伟, 范嘉堃. 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. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2019.05.021.
- WANG H Y, LIU M E, YANG L, CHEN J, XU J W, FAN J K. Simulation and analysis of flow characteristics for the fluid in low-temperature LNG corrugated flexible pipe[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(5): 183-189.
- [6] 杨志勋, 阎军, 熊飞宇, 丁龙辉, 岳前进. 液化天然气低温波纹柔性管的流动特性[J]. 油气储运, 2017, 36(9): 1089-1094. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.09.018.
- YANG Z X, YAN J, XIONG F Y, DING L H, YUE Q J. Flow characteristics of cryogenic liquefied natural gas in corrugated flexible pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(9): 1089-1094.
- [7] 苏桐, 刘滢钰, 张咏鸥. 超临界 LNG 在螺旋形微通道中的流动传热特性[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(10): 61-67. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2022.10.012.
- SU T, LIU Y Y, ZHANG Y O. Flow and heat transfer of supercritical LNG in spiral microchannel[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(10): 61-67.
- [8] 杨帆. LNG 真空多层绝热管道输送及安全性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- YANG F. Research on transportation and security of LNG vacuum multilayer insulation pipe[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [9] 许卫国. 导热油螺旋波纹管内流动和传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- XU W G. Investigation of heat transfer fluid in internally ribbed tubes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [10] BRAC J, ODRU P, GÉREZ J M. Flow and thermal modelling in cryogenic flexible pipe[C]. Kitakyushu: The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2002: ISOPE-I-02-142.
- [11] GUO Z Y, TAO W Q, SHAH R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797-1807. DOI: 10.1016/j.ijhe.2004.11.007.
- [12] SIDDIQA S, HOSSAIN M A. Natural convection flow over wavy horizontal surface[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5: 743034. DOI: 10.1155/2013/743034.
- [13] 冷学礼, 张冠敏, 田茂诚, 程林. 场协同原理在对流换热中的应用

- 用方法[J]. 热能动力工程, 2009, 24(3): 352-354, 411.
- LENG X L, ZHANG G M, TIAN M C, CHENG L. Methods for applying field synergy principle in convection heat exchange[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(3): 352-354, 411.
- [14] 周俊杰, 陶文铨, 王定标. 场协同原理评价指标的定性分析和定量探讨[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 45-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6833.2006.02.011.
- ZHOU J J, TAO W Q, WANG D B. Qualitative analysis and quantitative discussion of index for field synergy principle[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science Edition), 2006, 27(2): 45-47.
- [15] 张进, 安晨, 高强, 李方遒, 魏代锋, 段梦兰, 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. DOI: 10.12087/oet.2095-7297.2020.05.08.
- ZHANG J, AN C, GAO Q, LI F Q, WEI D F, DUAN M L, et al. Research status of structure design and experiment of offshore LNG cryogenic hose[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(5): 300-310.
- [16] 刘秋升, 李琼, 李永良, 张颖, 刘波. 波纹管结构参数对流动特性影响的数值模拟[J]. 节能, 2018, 37(12): 49-52.
- LIU Q S, LI Q, LI Y L, ZHANG Y, LIU B. Numerical simulation of influence of corrugation structure parameters on flow characteristics[J]. Energy Conservation, 2018, 37(12): 49-52.
- [17] 谭秀娟, 王尊策, 孔令真, 李森. 套管式换热器波纹管的数值模拟及结构参数优化[J]. 化工机械, 2013, 40(1): 77-81. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6094.2013.01.021.
- TAN X J, WANG Z C, KONG L Z, LI S. Numerical simulation and structural parameter optimization for double-tube heat exchanger bellows[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2013, 40(1): 77-81.
- [18] WIGGERT D C, TIJSSELING A S. Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(5): 455-481. DOI: 10.1115/1.1404122.
- [19] 江和敏, 管义锋. 超临界 LNG 在新型船用换热器冷通道内流动换热特性研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(3): 43-49. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2023.03.008.
- JIANG H M, GUAN Y F. Research on flow heat transfer characteristics of supercritical LNG in the cold passage of a new marine heat exchanger[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(3): 43-49.
- [20] 胡卓焕, 黄天科, 张乐毅, 杨茉. LNG 输送管道耦合传热的数值模拟[J]. 化工学报, 2015, 66(增刊 2): 206-212.
- HU Z H, HUANG T K, ZHANG L Y, YANG M. Numerical simulation of coupled heat transfer for LNG pipeline[J]. CIESC Journal, 2015, 66(S2): 206-212.
- [21] GIACOSA A, MAURIES B, LAGARRIGUE V, et al. Joining forces to unlock LNG tandem offloading using 20' LNG floating hoses: an example of industrial collaboration[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2016: OTC-27132-MS.
- [22] 胡正祥. 螺旋管内传热与流动性能的场协同研究[J]. 化学工程与装备, 2021(3): 14-15. DOI: 10.19566/j.cnki.cn35-1285/tq.2021.03.006.
- HU Z X. Field collaboration study on heat transfer and flow performance in spiral tube[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(3): 14-15.
- [23] 曹兴, 孔祥鑫, 王凯, 程爱平, 李庆领. 螺旋管内传热与流动性能的场协同分析[J]. 化工机械, 2018, 45(1): 96-101, 113. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6094.2018.01.024.
- CAO X, KONG X X, WANG K, CHENG A P, LI Q L. Analysis of field synergy of heat transfer and flow performance within helically-coiled tubes[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2018, 45(1): 96-101, 113.
- (收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-06-09; 编辑: 张静楠)
-
- 基金项目:** 国家自然科学基金面上项目“考虑残余应力的柔性立管复合抗拉铠装线强度失效机制”, 52171286.
- 作者简介:** 杨泰鸿, 男, 1997 年生, 在读硕士生, 2021 年毕业于青岛农业大学机械设计制造及其自动化专业, 现主要从事海洋工程装备与技术方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 13127051186。Email: 13127051186@163.com
- 通信作者:** 刘军鹏, 男, 1986 年生, 研究员, 博士生导师, 2017 年博士毕业于巴西里约热内卢联邦大学海洋工程专业, 现主要从事海洋软管设计理论与方法、海洋工程技术与装备方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路 18 号, 102249。电话: 15210040151。Email: liujp@cup.edu.cn



开放科学(资源服务)标识码(OSID):