

文章编号: 1000-8241(2019)04-0361-07

海洋柔性复合管气体渗透及冷凝研究进展

王凯¹ 王立佳² 陈晶华³ 茅磊¹ 宇波¹

1. 北京石油化工学院·深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室; 2. 海洋石油工程股份有限公司设计公司;
3. 中海油研究总院有限责任公司工程研究设计院

摘要: 海洋柔性复合管具有可设计性强、经济性好、动力特性优良等特点,尤其适用于深水油气藏的开发。基于柔性复合管较为特殊的多层复合结构,综述了目前国内外关于其气体渗透及冷凝相关的研究成果,着重对安全隐患、传热传质机制、预测模型、环空冷凝及气液迁移、腐蚀失效等方面进行了评述。针对现有成果应用于深水条件下渗透速率预测存在精度不高、环空冷凝液形态尚不明确等问题,指出今后应着重开展3个方面的研究:①“流-固-质-海水”多场热质耦合的气体渗透冷凝模型;②环空局部水蒸气滴状冷凝过程、分布特征及金属构件“腐蚀-疲劳”耦合行为预测;③环空气体监测、调控系统优化及可靠性评价。(图4,参35)

关键词: 油气输送; 柔性复合管; 深水; 气体渗透; 环空冷凝

中图分类号: TE83

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.04.001

Research progress on gas permeation and condensation of marine flexible composite pipe

WANG Kai¹, WANG Lijia², CHEN Jinghua³, MAO Lei¹, YU Bo¹

1. Beijing Institute of Petrochemical Technology//Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas Development; 2. Offshore Oil Engineering Co. Ltd. Design Company;
3. Engineering Research & Design Institute, CNOOC Research Institute Co. Ltd.

Abstract: The marine flexible composite pipes are quite suitable for the development of deepwater oil and gas reservoirs due to the excellent characteristics of design abilities, economics and dynamic behaviors. In this paper, the domestic and foreign research results on gas permeation and condensation were reviewed based on the special multilayer composite structure of flexible pipe. And safety hazard, heat and mass transfer mechanism, prediction model, annulus condensation, gas and liquid migration and corrosion failure were mainly discussed. Finally, in view of that the prediction accuracy of the permeation rate is low and the condensate form in annulus is undefined when existing research results are applied to deepwater conditions, it was proposed to focus on the following three aspects in the future researches, i.e., the gas permeating and condensing model of the multi-field heat and mass couplings in the flow-solid-mass-seawater system, the prediction of the condensation process and distribution characteristics of local water vapor in annulus and the corrosion-fatigue coupling behavior in metal components, and the annulus gas monitoring, control system optimization and reliability evaluation. (4 Figures, 35 References)

Key words: oil and gas transportation, flexible composite pipe, deepwater, gas permeation, annulus condensation

随着海洋石油生产从浅水向深水逐步发展,对海洋石油设备的要求也越来越高。柔性复合管具备可设计性强、经济性好、高挠性、抗疲劳、耐腐蚀、易敷设等诸多特点,在海洋石油领域得到了越来越广泛的应用^[1-4]。与传统的硬质钢管相比,使用柔性复合管可使

管道的整体造价降低20%~50%^[5]。特别是在深水浮式生产系统中,柔性复合管更是生产立管的首选甚至唯一方案,据统计,迄今全球80%的动态立管均采用柔性复合管^[5]。目前,海洋柔性复合管的设计、生产、安装基本由法国Technip集团公司、英国Wellstream

油田服务控股公司及丹麦 NKT Flexibles 公司垄断,在结构设计、加工制造、敷设安装等各个方面均进行了专利保护^[3]。中国在“十一·五”期间开展了柔性复合管的国产化工作,但多数研究尚限于结构设计和力学性能方面^[6-12]。丁楠等^[13]通过调研后综述了国外关于柔性复合管的气体渗透行为,以及围绕渗透机理、测试特点、预测模型、调控措施等方面的研究进展。张冬娜等^[14]对柔性管内衬高密度聚乙烯的 CO₂ 和 CH₄ 渗透行为进行了实验研究。以法国石油研究院为代表的国外研究机构,针对柔性复合管的环空条件及性能保障开展了一系列的理论、实验及数值模拟研究,取得了阶段性成果,但由于研究时间较短,对某些复杂问题作了较多简化,应用到工程实际中具有一定的局限性,尚需深入研究。在此,通过调研国内外关于海洋柔性复合管气体渗透及冷凝的研究成果,着重对安全隐患、传热传质机制、环空冷凝及气液迁移等方面进行评述,指出亟待开展的重点工作,以期后续研究提供借鉴。

1 结构及气体渗透

柔性复合管多用于深海油气田的开发,一般由多层高强度的金属层和高阻隔性的聚合物层通过非黏结方式组合而成,其主要用于深水油气田开发的海洋立管和海底管道。管体由内至外为骨架层、内压密封层、抗压铠装层、抗拉铠装层及外保护层(图 1)。内压密封层用于保证管孔内部流体的密封,外保护层用于保护管体免受海水等外部环境的影响。内压密封层和外保护层均为聚合物阻隔材料,位于这两层材料之间的多层孔状结构称为环空,主要由承受内压和轴向拉伸载荷的金属增强材料构成,如钢制的线、带、互锁铠甲等。环空的孔隙率一般为 5%~15%。此外,在金属层之间还设置了防磨层,用以避免相互接触金属之间的磨损;根据温度需要,也可在外保护层内侧设置保温层,防磨

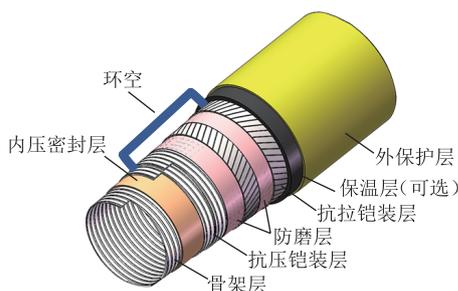


图 1 柔性复合管结构示意图

层和保温层会对气体渗透起到一定的阻碍作用。

在油气输送过程中,会有部分小分子气体(通常为气态水、CH₄、CO₂ 及 H₂S)以极低的速率渗透进内压密封层和外保护层,在环空中长时间积聚、冷凝、迁移,当累积到一定程度时,可能通过力学和腐蚀作用而影响管道结构的性能,甚至引起管道失效,如过盈压力造成外保护层鼓胀甚至破损;冷凝水在 CO₂/H₂S 作用下形成腐蚀性环境,诱发环空金属材料发生腐蚀,在腐蚀-疲劳的耦合作用下缩短管道服役寿命^[14-15]。此方面的安全形势不容乐观,据 Oil & Gas UK 统计^[16],2010 年全球柔性复合管在生产运行阶段发生的 106 起失效事故中,大部分发生在深水,其中外保护层破坏远超其他原因,占比高达 35%,环空金属腐蚀失效占比也超过了 10%。这均与小分子气体在柔性复合管的多层管壁中的渗透、冷凝及迁移行为密切相关。

目前,对渗透机理的认识趋于一致。物质对聚合物的渗透性取决于透过物的种类、聚合物的结构与性能、透过物与聚合物的相互作用。根据物理化学的吸附理论^[17],气体对聚合物层的渗透机理为:小分子在聚合物表面吸附→溶解→小分子在高浓度一侧的聚合物表面达到溶解平衡→由于浓度梯度的存在,小分子向聚合物另一侧扩散→解吸。由此能较好地解释柔性复合管的渗透冷凝过程(图 2),内管多相流场中的气态水、CO₂、H₂S、CH₄,在浓度梯度推动下,相继渗透进入内外聚合物阻隔层(图 1 内压密封层和外保护层)。在压力作用下,环空金属与阻隔层局部的贴体行为会对渗透产生一定的屏蔽效应,并促使物质的扩散方向发生改变。由于外保护层的渗透速率远小于内压密封层的渗透速率,气体在环空不断积聚。环空过盈压力会造成外保护层鼓胀甚至破损,需要周期性排气泄

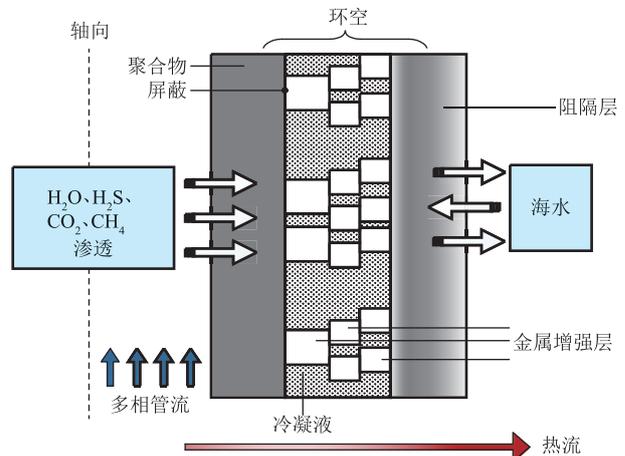


图 2 柔性复合管气体渗透冷凝物理过程示意图

压。同时,在管流与海水温差的驱动下,径向热损失使得环空温度低于管流温度,如果管内高温水蒸气渗透到相对低温的环空环境,且水蒸气含量高于当地温压条件对应的饱和含量,水蒸气就会在环空内发生冷凝。 CO_2 和 H_2S 溶解到冷凝液中形成酸性介质,腐蚀环空金属增强材料,在涡激振动作用下进一步发生腐蚀-疲劳失效。由此可见,在设计阶段预留充足的腐蚀裕量尤为重要。

Makino等^[18]首次基于Fick扩散定律,建立了内压密封层与外保护层的渗透差值模型,用于预测环空中气体压力随时间的增长关系。该模型未考虑以下因素:①金属增强层几何特征对渗透的屏蔽效应;②气体冷凝等热力学相态变化;③环空排气泄压的影响。比较渗透模型的计算结果与实测结果,证明气体在柔性复合管中的渗透行为是符合气体在聚合物中的渗透机理的。在此基础上,假设不对渗透气体加以控制,将导致外保护层破损失效的环空压力作为判据,对直径为101.6 mm、压力为34.5 MPa的柔性复合管进行寿命预测,结果表明预测的失效时间显著低于预期服役寿命。

Kristensen^[19]在Makino模型的基础上,较为系统地建立了柔性复合管的渗透模型。该模型包括一维平板、圆筒非稳态渗透模型、二维圆筒非稳态渗透模型、二维管壁稳态导热模型,考虑金属增强层几何结构对渗透的屏蔽影响,采用有限差分法对模型进行了离散求解,利用Visual C++语言编制了程序,可用于工程实际中柔性复合管的渗透数值模拟。与Makino模型相似,Kristensen模型也未考虑环空中水蒸气的冷凝以及周期性排气泄压的影响。

针对上述模型所作的大量简化假设,Benjelloun-Dabaghi等^[20]进行了较大改进,并建立了较为系统的柔性复合管气体渗透模型:①几何模型,计算环空中金属增强层的几何尺寸;②热塑性模型,考虑温度对聚合物层气体溶解度、扩散系数的影响;③传热模型,计算管壁各层的温度梯度分布;④传质模型,计算小分子气体在聚合物层的溶解度分布以及与时间相关的透过量;⑤相平衡模型,考虑环空中气体的冷凝影响,采用改进的PR状态方程进行闪蒸计算,预测气液相平衡浓度;⑥排气模型,考虑了排气前后环空中气体量的变化。采用有限单元法对模型进行了离散求解,利用Matlab语言编制了计算程序。

Last等^[21]基于试验和现场测试,发表了Round

Robin柔性复合管气体渗透计算联合工业项目的模型检验成果,其针对BP Amoco、Chevron、Shell等石油公司以及NKT Flexibles、Norsk Hydro、Wellstream等柔性复合管生产商,用于预测环空中气体及冷凝液的8个模型,采用一系列的中尺度、全尺度试验及生产现场的测试数据,对模型特点和预测结果进行了较全面的评价。这些模型的共同特征为:①溶解机理基于Henry定律,扩散机理基于Fick定律;②忽略混合气体中不同组分之间的相互作用;③渗透系数的温度效应采用Arrhenius型方程描述;④假设气体不发生化学反应,未考虑腐蚀引起的物质消耗,因此难以预计 CO_2 和 H_2S 的消耗速率。评价结果表明:①模型预测结果在总体上与测试结果保持一致,从腐蚀速率的角度衡量,多数预测结果偏保守;②相对于气体分压而言,基于逸度的预测结果更接近实测值;③相对于非塑化材料而言,针对塑化材料的预测结果更接近实测值;④不同模型的冷凝水预测结果偏差较大,在冷凝临界条件下结果偏差更大;⑤忽略大分子气体的渗透时,环空压力的预测结果偏保守;⑥根据瞬态模型的预测结果, CO_2 和 H_2S 渗透到环空中的分压均存在峰值,这对在设计阶段避免金属增强材料的氢致开裂和应力腐蚀破裂至关重要;⑦实验室和油田数据均表明,从环空排出气体的成分中检测到氢气,表明环空中的金属发生了腐蚀,其氢气含量可以用于间接推算 CO_2 和 H_2S 的消耗速率。然而,该文献中并未给出这8个模型的数学表达式。

Mello等^[22]构建了柔性复合管气体渗透二维机理模型,采用有限容积法进行了数值求解,并编制了模拟程序,能够自动生成计算所需的结构化网格。但与Benjelloun-Dabaghi模型相比,Mello模型总体上并无太多创新,仅出于改进数值计算的收敛性,在相平衡计算等方面作了简化。

2 传热传质机制

柔性复合管的传热实质是多相管流对流换热、内复合管壁(骨架层和内压密封层)热传导、环空金属材料热传导、环空孔隙自然对流、相变放热、外复合管壁(外保护层)热传导、管外海水对流换热的多场耦合问题(图3)。Kristensen等^[19-20,22-23]建立的传热模型采用圆柱坐标系下的二维导热方程,忽略了金属层之间

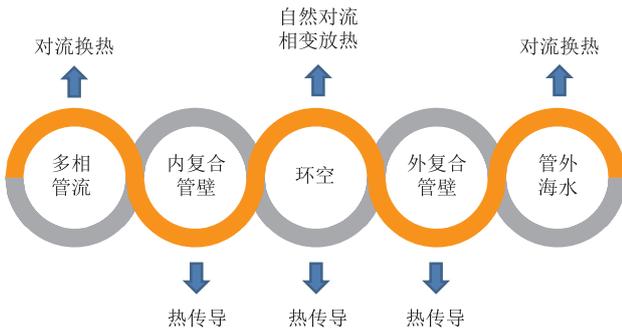


图3 柔性复合管传热示意图

的热阻,取第一类边界条件,即认为管道内外壁温度已知,不予考虑多相管流与管内壁、海水与管外壁之间的对流换热,同时忽略了环空腔体内的自然对流换热与相变放热的影响。然而,内外管壁温度仅是耦合传热过程的一组中间变量,由于对流换热热阻的存在,内外管壁温度与管流、海水温度存在一定差别,尤其是多相管流的不同流型可能会显著改变对流换热系数。此外,环空中的自然对流、冷凝放热也可能对传热过程以及气液迁移、相变规律产生重要影响。

柔性复合管的传质是多相管流中小分子气体在内压密封层内侧吸附,在内压密封层中渗透,在环空中冷凝、排放以及3场作用下的迁移(浓度场作用下的分子扩散、温度场作用下的热扩散、重力场作用下的沉降),在外保护层中渗透、在外保护层外侧解吸并被海水冲刷带走的多场耦合问题(图4)。国外学者依据渗透机理开展了中、小尺度的模拟实验以及全尺度的现场试验,获得了一系列气体分子在聚合物中的渗透实测数据^[24-27]。Makino等^[18-20,22-23]先后建立了柔性复合管的气体渗透模型,由于问题的复杂性,在建模时仅考虑了管壁温度、屏蔽作用、环空冷凝、排气泄压、滞后效应等因素,而将模型所需要的管道沿线压力、温度分布简

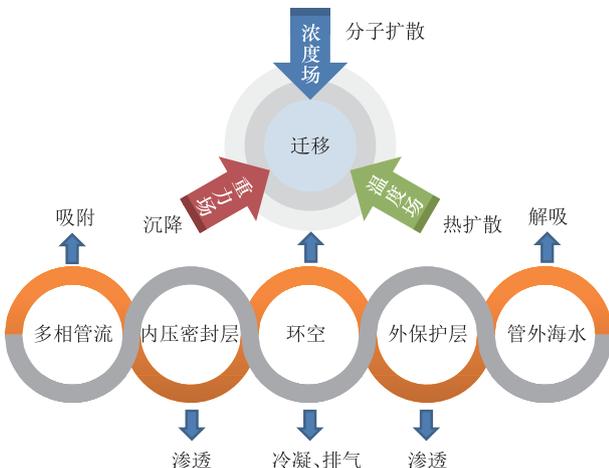


图4 柔性复合管传质示意图

单取其最大值或平均值代替,尚未考虑管内多相流对渗透的影响。而在实际的多相流传质过程中,流型决定了输送介质与管内壁接触的主导相态,不同相态对内压密封层表面溶解、吸附小分子气体的影响显而易见。尽管Last等^[21,28]利用中尺度、全尺度试验数据及现场测试数据,对模型检验的结果总体趋好,但这些数据并非在深水条件下取得,试验采用的管道长度与深水中千米甚至数千米的立管长度相比,存在2~3个数量级差异。管道越长,管内流动状态对渗透影响的叠加效应越明显,将这些模型直接用于预测深水管道时,其结果的有效性值得商榷。

3 环空中的气体冷凝及迁移

目前,针对柔性复合管环空冷凝的研究成果不多,主要集中于水蒸气冷凝产生的液量。在实验研究方面,Andersen等^[24]通过两套不同尺度的实验系统研究了环空水蒸气的冷凝量及其影响因素。实验证实水蒸气会渗透至聚合物层,然后在环空中发生冷凝而润湿金属表面,即环空条件是腐蚀性的。为了测试环空所凝结的液态水量,通过控制环空条件而使水蒸气全部冷凝。结果表明,由于水蒸气分压随温度而升高,当管孔温度升高时,环空中冷凝水相对甲烷的含量也随之上升;当管孔压力升高时,甲烷压力随之上升而水蒸气压力保持不变,因此环空中冷凝水相对甲烷的含量减小;单位体积甲烷渗透聚合物层对应的水蒸气透过量高于当地温度对应的水蒸气饱和含量,表明水蒸气在环空中必然发生冷凝。在模型方面,Benjelloun-Dabaghi等^[20]基于热力学相态平衡原理,采用PR状态方程修正水蒸气的冷凝量进行了预测。

环空冷凝是研究金属材料腐蚀的基础。Ropital等^[29]首次采用试验方法考察了环空冷凝水量对CO₂腐蚀速率的影响,测试选取冷凝水体积与金属表面积之比(V/S)为0.25~100 mL/cm²,结果表明:腐蚀速率随V/S的降低而降低;当V/S取最小值时,平均腐蚀速率仅为0.005 mm/a。Clements^[30]利用公开发表的腐蚀数据拟合出腐蚀速率与V/S的对数关系曲线,并将曲线外延至低V/S区间,结果表明:在CO₂分压约0.1 MPa的条件下,当V/S取0.03 mL/cm²时,典型的腐蚀速率为0.15 μm/a;当V/S取0.2 mL/cm²时,典型的腐蚀速率为4.6 μm/a。通过该方法得到的腐蚀速率

可认为是稳定值,比初始值略低。需要指出的是,与 Taravel-Condât 等的全尺寸疲劳试验的测试数据相比, Clements 得到的结果显著偏低,且未考虑环空水蒸气冷凝过程所需漫长时间的影响。尽管学者们^[29-31]较重视环空凝液量对 CO₂ 腐蚀速率的影响,但相关研究均是基于膜状冷凝假说,认为冷凝水能够完全润湿金属表面,并在表面形成完整均匀的液膜,由此认定材料发生的是均匀腐蚀,进而得到如下结论:V/S 对腐蚀速率有非常显著的影响。然而,环空冷凝液的具体形态有待进一步确认,通过分析冷凝水和金属表面的性质(表面能、表面结构等),可知水蒸气发生滴状冷凝的概率更大,这从相变强化传热领域的相关研究成果也能得到印证^[32-34]。若水蒸气在环空发生的是滴状冷凝,则腐蚀形态应属于局部腐蚀,腐蚀速率与单个液滴厚度相关,严重程度可能超过基于 V/S 得到的均匀腐蚀。

由上述柔性复合管环空中的传质机制可知,冷凝水在重力作用下可能克服液固界面张力,沿着金属表面向下推移,并在局部积聚而加重腐蚀,甚至可能产生水合物。Eriksen 等^[35]首次对柔性立管环空冷凝液的迁移现象进行了定性探讨。由于在正常条件下环空水蒸气的冷凝量极小,平摊到金属表面其厚度仅能够维持在微米量级,因此,冷凝液的宏观迁移更可能出现在管道停输后,随着环空不断冷却而加速饱和水蒸气的凝析;冷凝液的宏观迁移也可能出现在周期性排气泄压过程中,小液滴在排气阀小孔附近发生多次滞留积聚。由于深水柔性立管的长度较长,环空气液相之间的相对迁移对压力、温度分布的影响较大,而目前的迁移研究仅局限于管壁渗透方面,尚未考虑在非平衡态内外场联动作用下环空整体气液相的迁移规律,以及不同悬挂构型对迁移的影响。

4 结论

柔性复合管设计中采用的气体渗透理论和方法尚未考虑管内多相流特别是流型的影响,传热计算未考虑封闭腔体内自然对流的影响,难以保证深水中以千米计的柔性立管的预测精度。现有研究在预测环空气液相总量之后,尽管已认识到迁移现象的重要性,但尚未从量上探讨气液相在浓度场、温度场、重力场以及排气泄压、停输冷却、涡激振动等非平衡内外场联动作用下的迁移规律,而这对深水条件下环空可能存在的

水合物风险研究至关重要。在气体渗透到环空的过程中,水蒸气由于热力学条件改变而发生冷凝,冷凝液的形态和尺度是影响金属腐蚀的关键因素,然而针对环空冷凝的研究较晚,目前仍假定冷凝水在金属表面成膜状等厚分布,基于此条件得到材料的均匀腐蚀速率,与一些实验结果相比偏于乐观,需要进一步从机理上查明冷凝液的实际形态和分布特征。鉴于上述原因,未来亟待开展以下研究工作:

(1) 针对海洋柔性复合管常见的管壁结构,构建在稳定运行、排气泄压及停输冷却条件下,管内基于多相流流型的流动与传热、多组分输送介质气液相平衡、管内介质-复合管壁-管外海水交互换热、小分子气体对聚合物层双向渗透、环空混合气体相变冷凝以及气液相在浓度场、温度场、重力场作用下联动迁移的非稳态模型。针对模型强非线性造成离散求解的收敛性和健壮性挑战,研究高效、稳健的数值计算方法,并在环空整体气液相总量预测结果的基础上,开展环空多孔连通密闭腔体内气液相整体迁移特性,自由悬链线、波形、S形等典型悬挂构型立管环空的温压分布与动态响应规律,水合物风险预测及控制等方面的研究。

(2) 根据对环空局部水蒸气冷凝量的热力学预测结果,基于动力学、界面化学理论揭示在环空多孔连通密闭腔体内,水蒸气滴状冷凝的形成条件及其成核、生长、合并、滑落过程,研究液滴的随机运动行为与液滴分布的自相似性,结合实验数据和随机分形理论定量表征液滴的空间分布和尺度分布,进而开展金属构件腐蚀-疲劳耦合行为的预测。

(3) 基于环空气体的组分、压力等实时监测数据,采用压力和冷凝液 pH 值的“双重标准”,优化调控系统的临界放空压力、放空频率、爆破隔膜压力的确定方法。根据可靠性原理,建立调控系统失效模型,研究失效概率对压力等关键参数的敏感性,使之能够更全面、客观地反映柔性复合管服役寿命的可预知性和不确定性。

参考文献:

- [1] CAO J, LI T J, YE W. Application of flexible risers in South China Sea[C]. Rhodes: International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016: 125-131.
- [2] 余志兵,何宁,高嵩.深水油气田开发中的柔性立管系统[J].管道技术与设备,2014(1):28-30.

- YU Z B, HE N, GAO S. Flexible pipe risers system in deepwater oil & gas development[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2014(1): 28-30.
- [3] 潜凌, 李培江, 张文燕. 海洋复合柔性管发展及应用现状[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(2): 90-92.
- QIAN L, LI P J, ZHANG W Y. Development and applications of marine composite flexible pipe[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2): 90-92.
- [4] LI X Z, JI H T, ZHANG B, et al. Design of flexible riser for FPSO in South China Sea[C]. Rhodes: International Ocean and Polar Engineering Conference, 2016: 109-116.
- [5] 唐建华, 王琳, 曲杰. 适用于浅海小口径复合软管的接头形式研究[J]. 中国海洋平台, 2012, 27(4): 29-31, 49.
- TANG J H, WANG L, QU J. Research for end fitting of small-bore composite flexible pipes in shallow water[J]. China Offshore Platform, 2012, 27(4): 29-31, 49.
- [6] 陈伟民, 李依伦, 姜春晖, 等. 深水浮式平台垂荡运动与水下柔性立管涡激振动的动力耦合[J]. 海洋工程, 2016, 34(3): 1-9, 79.
- CHEN W M, LI Y L, JIANG C H, et al. Impact of top-end heave on vortex-induced vibration of submarine riser for deep-water platform[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(3): 1-9, 79.
- [7] 宋磊建, 付世晓, 于大鹏, 等. 剪切流下发生涡激振动的柔性立管阻力特性研究[J]. 力学学报, 2016, 48(2): 300-306.
- SONG L J, FU S X, YU D P, et al. Investigation of drag forces for flexible risers undergoing vortex-induced vibration in sheared flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(2): 300-306.
- [8] 郭有松, 陈希怡, 王德禹, 等. 非黏结柔性立管轴对称载荷作用下的结构响应和数值分析[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 504-510, 515.
- GUO Y S, CHEN X Q, WANG D Y, et al. Analytical and numerical investigation on the structural response of flexible risers under axisymmetric load[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 504-510, 515.
- [9] 高云, 付世晓, 杨家栋, 等. 细长柔性立管涡激振动疲劳损伤分析[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(8): 1270-1277.
- GAO Y, FU S X, YANG J D, et al. Fatigue damage analysis of vortex-induced vibration of a long flexible risers[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(8): 1270-1277.
- [10] 王俊高, 付世晓, 许玉旺, 等. 振荡来流下柔性立管涡激振动响应特性试验研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(4): 419-429.
- WANG J G, FU S X, XU Y W, et al. Experimental investigation on vortex-induced vibration of a flexible cylinder in oscillatory flow[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(4): 419-429.
- [11] 赵林, 段文静. 海洋柔性立管疲劳试验及其失效检测探究[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 109-114.
- ZHAO L, DUAN W J. Research on the fatigue test and detection method for marine flexible risers[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(3): 109-114.
- [12] 祝效华, 雷清龙, 刁飞, 等. 径向夹持载荷作用下海洋柔性管骨架层的静力特性研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(5): 76-82.
- ZHU X H, LEI Q L, DIAO F, et al. Study on the static characteristics of marine flexible riser skeleton layer under radial clamping loads[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(5): 76-82.
- [13] 丁楠, 戚东涛, 魏斌, 等. 海洋柔性管气体渗透机理及其防护措施的研究进展[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 112-116.
- DING N, QI D T, WEI B, et al. Latest research progress in gas permeation behavior of subsea flexible pipes and its prevention measures[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 112-116.
- [14] 张冬娜, 李厚补, 戚东涛, 等. 柔性管内衬高密度聚乙烯的气体渗透行为研究[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 104-110.
- ZHANG D N, LI H B, QI D T, et al. Gas permeation behaviors of high-density polyethylene as a liner material of flexible pipes[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 104-110.
- [15] SHEN Y J, JUKES P. Technical challenges of unbonded flexible risers in HPHT and deepwater operations[C]. Hawaii: International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015: 343-349.
- [16] BAI Y, BAI Q. Subsea pipeline integrity and risk management[M]. New York: Gulf Professional Publishing, 2014: 102-124.
- [17] 金日光, 华幼卿. 高分子物理[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 56-76.
- JIN R G, HUA Y Q. Polymer physics[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 56-76.
- [18] MAKINO Y, OKAMOTO T, GOTO Y, et al. The problem of gas permeation in flexible pipe[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1988: 537-542.
- [19] KRISTENSEN S B. Diffusion in flexible pipes[D]. Denmark:

- Technical University of Denmark, 2000: 11-36.
- [20] BENJELLOUN-DABAGHI Z, HEMPTINNE J C, JARRIN J, et al. MOLDI™: A fluid permeation model to calculate the annulus composition in flexible pipes[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 2002, 57(2): 177-192.
- [21] LAST S, GROVES S, TARAVEL-CONDAT C, et al. Comparison of models to predict the annulus conditions of flexible pipe[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2002: 1-10.
- [22] MELLO P E B, NETO T F B, GODINHO C A, et al. Development of a computer program for the simulation of gas permeation through the walls of flexible pipes[C]. Uberlandia: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010: 1-7.
- [23] FROST S R, BUCHNER S. A permeation model to calculate the pressure accumulation of bore gases in the annulus of flexible flowlines or risers[C]. London: Conference of Oilfield Engineering with Polymers, 1996: 29-38.
- [24] ANDERSEN T R, SKAR J I, HANSTEEN C. Permeability of methane, carbon dioxide and water in PA11 & PVD used for flexible pipes[C]. Houston: Corrosion 1999 Conference, 1999: 410.
- [25] SATO Y, YURUGI M, FUJIWARA K, et al. Solubilities of carbon dioxide and nitrogen in polystyrene under high temperature and pressure[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1996, 125: 129-138.
- [26] FLACONNÈCHE B, MARTIN J, KLOPFER M H. Permeability, diffusion and solubility of gases in polyethylene, polyamide 11 and poly(vinylidene fluoride)[J]. *Oil & Gas Science and Technology*, 2001, 56(3): 261-278.
- [27] CAMPION R P, MORGAN G J. The accurate measurement of elevated pressure gas permeation through polymers based on new specimen geometries[J]. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2004, 20(4): 351-374.
- [28] TARAVEL-CONDAT C, GUICHARD M, MARTIN J. MOLDI™: a fluid permeation model to calculate the annulus composition in flexible pipes: validation with medium scale tests, full scale tests and field cases[C]. Cancun: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2003: 37193.
- [29] ROPITAL F, TARAVEL CONDAT C, SAAS J N, et al. Methodology to study the general corrosion of steel armours in simulated conditions of flexible pipe annulus influence of confinement and evaluation of the PH[C]. London: EUROCORR 2000, 2000: 1-7.
- [30] CLEMENTS R. Corrosion assessment prediction for a confined flexible pipe annulus[C]. Edinburgh: EUROCORR 2008, 2008: 268.
- [31] REMITA E, ROPITAL F, KITTEL J. Experimental and theoretical investigation of the uniform corrosion in the annulus of offshore flexible pipelines[C]. Houston: Corrosion 2008 Conference, 2008: 08538.
- [32] 吴玉庭, 杨春信, 袁修干, 等. 珠状凝结换热的数学物理模型及数值模拟[J]. *计算物理*, 2001, 18(4): 334-340.
- WU Y T, YANG C X, YUAN X G, et al. Mathematical and physical model and numerical simulation of dropwise condensation heat transfer[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2001, 18(4): 334-340.
- [33] WU Y T, YANG C X, YUAN X G. Drop distributions and numerical simulation of dropwise condensation heat transfer[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44(23): 4455-4464.
- [34] 梅茂飞. 滴状凝结液滴生长及传热的分形分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 25-73.
- MEI M F. Fractal analysis of droplet growth and heat transfer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 25-73.
- [35] ERIKSEN M, ENGELBRETH K I. Outer cover damages on flexible pipes-corrosion and integrity challenges[C]. San Francisco: International Conference on Ocean, 2014: 24147.
- (收稿日期: 2018-09-09; 修回日期: 2019-01-30; 编辑: 杜娟)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“深水油气柔性立管多场热质耦合迁移及冷凝机理研究”, 51704027; 北京市高水平创新团队建设计划项目“油气储运安全节能输送创新团队”, IDHT20170507.

作者简介: 王凯, 男, 1982年生, 副教授, 2009年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气管道输送及流动安全保障技术的研究工作。地址: 北京市大兴区清源北路19号, 102617。电话: 13488827549。Email: wang_kai@bupt.edu.cn