DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.050

深水油气开采用海洋立管研究进展与展望

王潇[1]，韩伟[1]，李拔[2*]，翁宇庆[3]，贾书君[2]，刘清友[2]，张赢[1]，王雪[2,4]，曹宇曦[2,5]

（1. 中国产业基础能力发展战略研究院，北京 100081；2. 钢铁研究总院有限公司，北京 100081；3. 中国金属学会，北京 100081；4. 中国石油大学（北京）新能源与材料学院，北京 102249；
5. 昆明理工大学冶金与能源工程学院，昆明 650500）

摘要：海洋立管作为连接海洋平台和海底管道的关键装备，是深水油气开采全系统中重要而又薄弱的环节，事关海洋石油工业高质量发展；在深水油气资源开发受到广泛关注的时代背景下，系统梳理深水油气开采用海洋立管的研究与应用情况并前瞻未来发展，兼具理论研究和工程实践参考价值。本文从抗疲劳、耐腐蚀两方面分析了深水油气开采用海洋立管的严苛服役性能要求，针对钻井隔水管、钢悬链立管、张力腿平台筋腱立管3种最为典型且应用广泛的海洋立管形式，综述了相应研究现状，比对了国内外相关产品的差距并展望了对应的发展方向。整体上，深水油气开采用海洋立管作为高风险、高难度、高附加值的石油钻采装备，制造工艺复杂、技术含量高，相关核心材料和技术一直被国外企业垄断；国产海洋立管材料存在强度波动大、断裂韧性低、抗疲劳能力不足等问题，难以全面满足严苛复杂的海洋服役条件，制约了我国海洋石油工业的发展水平。亟需系统布局，引导上下游企业与高校、科研院所联合开展相关产品的基础研发与工程应用研究，加快实施海洋立管制造全产业链的协同创新。

关键词：海洋立管；钻井隔水管；钢悬链立管；张力腿平台筋腱立管；抗疲劳；耐腐蚀
中图分类号：F426；　　**文献标识码：**A

Marine Risers for Deepwater Oil and Gas Exploitation: Research Progress and Prospect

Wang Xiao[1], Han Wei[1], Li Ba[2*], Weng Yuqing[3], Jia Shujun[2], Liu Qingyou[2], Zhang Ying[1], Wang Xue[2,4], Cao Yuxi[2,5]

(1. Chinese Academy of Strategic Studies on Industrial Competency, Beijing 100081, China; 2. Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. The Chinese Society for Metals, Beijing 100081, China; 4. College of New Energy and Materials, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 5. School of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: As key equipment connecting offshore platforms to subsea pipelines, marine risers are a critical component of the overall system for deepwater oil and gas exploitation and are crucial for the high-quality development of the marine oil industry. In the context of attaching more attention to the development of deepwater oil and gas resources, this study reviews the research and application of marine risers in deepwater oil and gas development and looks forward to future development, which has reference

收稿日期：2024-10-24；**修回日期：**2024-12-17
通讯作者：*李拔，钢铁研究总院有限公司高级工程师，研究方向为微合金结构钢的基础理论研究和工程应用技术开发；
E-mail: balicugb@sina.com
资助项目：中国工程院咨询项目“海洋装备用关键材料创新发展战略研究”(2023-HY-18)
本刊网址：sscae.engineering.org.cn

values for both theoretical research and engineering practices. In this paper, the strict requirements for service performances of marine risers are analyzed in terms of fatigue resistance and corrosion resistance. A review of the current status of three typical and widely used marine risers (i.e., drilling risers, steel catenary risers, and tension-leg platform tendon risers) is provided. Meanwhile, these marine rises in China and abroad are compared, and their development directions are prospected. Overall, marine risers are a type of oil drilling equipment that have high risks, extreme difficulty, and high added values. Owing to the complex manufacturing processes and high technical contents, the core materials and technologies of marine risers have been monopolized by large companies outside China. Riser materials of China have problems including large fluctuations in strength, low fracture toughness, and insufficient fatigue resistance, failing to meet the stringent and complex marine service conditions and thus restraining the development of China's offshore oil industry. Therefore, a systematic layout is urgently needed to guide upstream and downstream enterprises to jointly carry out basic and application research on related products with universities and research institutes, so as to realize collaborative innovation across the entire industrial chain of marine riser manufacturing.

Keywords: marine riser; drilling riser; steel catenary riser; tension-leg platform tendon riser; fatigue resistance; corrosion resistance

一、前言

海洋蕴藏了全球超过70%的油气资源，深水是油气开采的重要接替区，全球深水区潜在石油储量约为1000亿桶。提高海洋资源开发和综合管理能力，事关经济社会发展和国家能源安全。在海洋油气产业高质量发展的背景下，越来越多的深水油气资源被勘探和发现[1,2]。然而，面对超深水（水深≥1500 m）、深层（埋深≥3500 m）、远海（离岸≥500 km）等更加极端复杂的环境条件，我国的深水油气资源钻采集输关键技术和装备仍有明显不足。深水油气田开采需要使用大量的海洋管路结构（如生产管线、海底管道、海洋立管等）将海上油田的各个生产环节紧密地联系起来，因而海洋管路结构一直是海洋开采装备的研发重点。

完整的海洋油气资源输送系统主要包括海洋平台、海洋立管、海底管道3个部分。海洋平台按照水深和生产方式可分为固定式平台、移动式平台：前者依靠打桩或自身质量固定于海底，后者可移动井位。海底管道水平铺设于海床，用于运输油气。海洋立管是油气开采过程中的关键装备，“自上而下”地连接海洋平台和海底管道[3~5]，根据海洋油气开采的应用形式可分为钻井立管、生产立管、结构立管。钻井立管是连接水面上钻井平台、海底处井口设备的立管装备，可视为井口的延伸，主要用于隔离海水、引导钻具、循环钻井液等。生产立管具有多种结构形式，如顶部预张力立管、钢悬链立管（SCR）、柔性立管、塔式立管等。结构立管以张力腿平台（TLP）用筋腱立管为代表，在平台服役过程中起到系泊作用，提供足够的刚度，控制平台升沉、横摇、纵摇周期，满足平台在海洋环境中生产操作的需求，保证平台服役安全[5]。

海洋立管在服役过程中承受形式多样、机理复杂的载荷，如浮体运动产生的载荷，管体自身质量，内部油气通过时的压力，波浪载荷、洋流载荷等海洋环境载荷，可能导致立管发生碰撞、波频振动、涡激振动、参激振动等。这些情况可能引起海洋立管疲劳损伤甚至失效断裂，威胁工程的安全服役和海洋的生态系统稳定。此外，海洋环境是一种复杂的腐蚀环境，包含海水、海洋大气、海洋微生物、附着生物及其代谢产物等腐蚀介质，如具有高盐、富氧特性的海水是导致海洋立管腐蚀的重要因素。对于深海立管，各种循环载荷的耦合作用通常会加剧腐蚀，加之疲劳与腐蚀交织，可能出现更为严重的腐蚀疲劳损伤。相应地，具备良好的耐蚀性是海洋立管设计选材的核心性能要求之一，

在深水油气开采系统中，立管长度可从数百米到数千米，而在海底井口、平台底部以外没有其他的固定支撑。显然，既往的浅水立管形式及应用经验无法沿用或简单拓展至深水工程中。深水服役环境的复杂性，使海洋立管成为整个深水油气开采系统中最为薄弱的部分，导致相应海洋立管设计与制造过程占据了较高的投资份额。海底管道服役期通常不低于20年，工程运行也要求采用免维护或少维护设计，这就需要采用高性能材料来保持海洋立管的可靠性。增强海洋立管的抗疲劳性能，可以放宽管道管理过程中对管跨段长度、支撑条件等的要求，降低海底管道管理和运营成本；同步提高海洋立管的耐蚀性能，能够加强管道全寿命周期内的服役安全性。

材料直接影响海洋立管的性能、安全性和使用寿命，是海洋立管能够安全、高效地执行设计功能的核心所在。本文从抗疲劳、耐腐蚀角度分析深水油气开采环境对海洋立管提出的严苛性能要求，较

为系统地梳理钻井隔水管、SCR、TLP筋腱立管3类典型海洋立管的研究进展，研判相关产品的国内外差距情况，展望未来海洋立管研发和应用方向，以推动海洋立管关键材料和技术革新，保障海洋工程高质量发展。

二、深水油气开采用海洋立管的严苛性能要求分析

对于典型的深海油气钻采集输系统（见图1），海洋立管的长度可从数百米到数千米，在海底井口、平台底部的链接位置以外没有固定支撑，面临更高的水压、更剧烈的洋流、更复杂的海底地质条件，安装与维护也需要借助专业的设备和技术手段。陆地和浅海油气资源逐渐枯竭，因而深海钻井成为获取新油气资源的重要途径。在工程实践中，深海钻井的水深不断增加，如全球最先进的第六代钻井平台“海洋石油982”钻井平台的最大作业水深、最大钻井深度分别达到1800 m、9144 m[1,2]。更大的钻采深度加剧了海洋立管工作条件的恶劣程度，海洋中的各种随机载荷都会影响立管的使用寿命。

深水油气开采用海洋立管长期服役于深海环境，持续承受来自海风、洋流、浪涌、海床动态变化等自然因素以及平台运动、管内流体流动等非自然因素导致的疲劳载荷作用，海洋环境的腐蚀性作用。海洋立管在长周期内安全且可靠服役，需要具有以下性能特征：高强度以抵抗极端环境压力，良好的性能稳定性以维持长期的结构完整，高抗疲劳性能以应对频繁的载荷变化，优异的低温韧性以适应深海低温环境，良好的耐蚀性能以抵御海洋环境腐蚀作用。此外，海洋用管道的尺寸精度要求相较陆地用管道更为严苛，以满足深海作业的高精度要求并保障整个系统的稳定运行[1,5]。

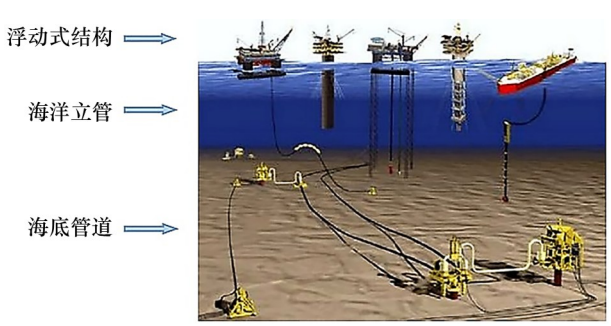

图1　海洋油气钻采集输系统示意图

（一）抗疲劳性能

在海风、洋流、浪涌、顶张力等交变载荷的长期作用下，深水油气开采用海洋立管的管体及焊缝可能产生疲劳裂纹，进而因疲劳失效发生重大安全事故[6]。海洋立管疲劳破坏是裂纹逐渐扩展的过程，引发立管结构疲劳破坏的因素很多且具有随机性。作用在海洋立管上的载荷，按照时变情况可分为静载荷、变载荷、冲击载荷等类型。引起立管动态响应的主要动载荷是波浪、洋流、顶部浮体运动。在洋流作用下，立管受到横流向、顺流向的脉动流体力，浮体在波浪、洋流、海风等环境载荷的作用下连同立管系统一起进行复杂的运动，都将引起立管振动并产生周期性的应力，进而出现管道疲劳损伤等问题。研究不同海洋环境下海洋立管结构的振动响应及疲劳特性，具有重要的理论和实际意义[7~10]。

近年来，针对典型海洋立管的疲劳问题进行了较多的模拟和分析，涵盖海洋立管的波致疲劳、涡激振动疲劳、浮体运动致疲劳等。海洋立管的波致疲劳指立管在波浪载荷作用下，因波浪引起的交变应力作用产生的疲劳损伤。涡激振动疲劳指当海水流经立管时在立管两侧交替形成脱落的漩涡，如漩涡的脱落频率与立管的某一阶固有频率相近，将引起立管的共振现象；这种共振会导致立管产生大幅度的周期性振动，进而引发疲劳损伤。浮体运动致疲劳指浮体（如浮式生产储油装置、TLP等）在波浪、洋流等海洋环境载荷的作用下进行复杂的动态运动，这些运动通过立管顶部的连接装置传递给立管并对立管产生交变应力，长期作用后导致立管出现疲劳损伤。

在波致疲劳方面，立管在随机波浪作用下，随机响应的瞬态部分对管道系统长期运行的疲劳损伤率影响较小，而波浪荷载引起的疲劳损伤在立管的上部较为严重[10]。在涡激振动疲劳方面，深海立管在剪切流环境下的疲劳分析需同时考虑顺向振动和横流振动[11,12]。波浪与洋流的叠加将增加低频应力，明显扩大深海立管的组合疲劳损伤；即使洋流速度、波浪速度不大，立管受到的影响也不可忽略[13,14]。在浮体运动导致的疲劳方面，平台运动幅值及周期对海洋立管疲劳损伤具有重要影响[15]。动态有限元与神经网络相结合的分析方法，可显著提

高立管疲劳寿命预测的精度及效率[16]。

海洋立管所处环境复杂，同一系统中的立管可能受到不同类型的疲劳耦合损伤。以SCR疲劳损伤为例，触地点、悬挂区域是管线轴向应力最大的位置，原因是触地点处的面内曲率及弯矩最大、立管悬挂点处受到重力的作用最大[17]。触地点最容易发生疲劳损伤，这是由于SCR受到土体吸力作用、海床刚度及浮体垂荡运动幅度的影响，形成了复杂的受力环境。立管顶端柔性接头部分承受轴向拉力、交变弯矩、平台运动等的复杂作用，容易出现涡激振动损伤[17]。波致疲劳损伤、涡激振动疲劳损伤在总疲劳损伤中的贡献度处于同一水平，而平台的浮体运动引起的立管疲劳损伤相较涡激振动、波致运动要小很多[18]。

国际上提出了一些海洋立管相关的标准规范，如美国石油协会的API RP 2RD（1998年）、挪威船级社的DNV OS F201（2010年）、美国船级社的ABS 123（2008年）、中国船级社的《海洋立管系统检验指南2020》。海洋立管的疲劳分析主要采用基于S-N曲线的方法、基于疲劳裂缝扩展理论的方法[19,20]：DNV、API规范对两者均进行详细说明，而ABS规范重点对前者进行解释。在应用基于S-N曲线的方法时，ABS、DNV规范均对名义应力幅的评估、S-N曲线的选择、厚度修正系数的确定、应力集中系数的确定、累积疲劳破坏的确定等主要步骤给出了详细说明；API规范没有阐明相关应用步骤，而是介绍应力幅累积疲劳损伤确定过程，以明确S-N曲线为重点。在应用基于疲劳裂缝扩展的方法时，通常采用API规范中基于Paris疲劳裂纹扩展准则的断裂力学方法，要求构件在服役期间的疲劳裂纹不能超过估算的临界裂纹尺寸[20,21]。

（二）耐腐蚀性能

海洋环境是腐蚀性较强的自然环境，腐蚀也是海洋立管失效的主要原因之一。海洋立管作为海上油气田生产系统的重要组成部分，安全性和稳定性事关整个海上油气田的安全生产。研究海洋立管腐蚀机理，制定有效的防腐措施，对保障海上油气田安全生产具有重要意义。掌握海洋立管在不同环境条件下的腐蚀规律及影响因素，针对性采取提升材料性能、优选缓蚀剂、改进防腐涂层、加强阴极保护等防腐措施，将有效延缓立管的腐蚀速率并延长使用寿命，减少更换和维修频率，兼顾安全性提高和生产成本降低。中国海油海底管道事故统计结果显示，腐蚀导致的海底管道失效事故占比达到37%[22]。

海洋环境对海洋装备材料具有不同的腐蚀机理，可据此划分出海洋大气区、浪花飞溅区、海洋潮差区、海水全浸区、海底泥土区等区域类型。海洋立管连接海面作业平台和海底油气输送管道，服役环境涉及海洋腐蚀环境的全部区域，又因各类区域中的腐蚀机理有所不同，导致立管纵向的腐蚀速度存在明显差异。一般认为，浪花飞溅区、海洋潮差区是导致立管腐蚀最为严重的区域[23~25]。腐蚀的实质是材料与环境发生了交互作用，可将海洋立管的腐蚀分为内腐蚀、外腐蚀两类。

从材料的角度看，输送介质是造成海洋立管内腐蚀的主要因素，影响显著的介质有CO_2、H_2S。① CO_2通常来自油井产出物，是油田生产中常见的杂质介质，我国部分海上油气田的产出物中含有较高比例的CO_2。CO_2腐蚀是海洋管道内腐蚀的最常见形式之一，这是因为CO_2溶于水形成弱酸，会对管材（钢铁）造成明显的电化学腐蚀。② 越来越多的油气管道输送介质中含有H_2S，如我国部分海上油气资源同样含有较高的H_2S。一方面，H_2S在水中的溶解度通常比CO_2更高，在水中发生电离而使介质呈现酸性，导致管道内部发生点蚀或均匀腐蚀，出现管道内壁点蚀穿孔、厚度减薄等腐蚀破坏。另一方面，电离产生的HS^-、S^{2-}易吸附在钢的表面并加速析氢反应，析出的氢原子进入钢中并在夹杂物、微裂纹等缺陷位置聚集；氢原子相遇并形成分子后将会产生数百兆帕的膨胀应力，显著增大金属材料的晶格界面内压力甚至导致界面开裂。此外，管道在服役过程中不可避免地承受各种应力，应力和H_2S会发生相互作用导致腐蚀加速，从而产生H_2S应力腐蚀开裂。③ 当输送介质中含有H_2S时，也会对CO_2腐蚀起到促进作用[26~28]。④ 海洋中种类多样的微生物容易在立管表面附着形成生物膜，微生物在膜内的活动会加快和加重管道的腐蚀过程。例如，硫酸盐还原菌可在长期缺氧的环境中生长，能够将硫酸盐、亚硝酸盐还原成H_2S，进而诱发管线钢的微生物腐蚀。

海洋立管的外腐蚀主要来自海水腐蚀和土壤腐蚀等，腐蚀形式与海水深度、海底地形有关[28,29]。

随着海水深度的增加，海洋立管周围的海水流速、含氧量、静水压力都发生显著变化。随着静水压力的增加，海水中Cl^-的活性增大、离子迁移速度增加、材料自身的活性提高、金属表面吸附离子的数量增多，都加速了立管的腐蚀。含氧量随着海水深度的增加呈先降低后升高趋势，对于管线钢这类在海水中不发生钝化的金属材料，氧含量的增加会显著加速腐蚀。海水流速的变化会改变管材的表面状态，虽然深水的流速比较缓慢，但深海错综复杂的地形可能使立管遭受高速水团的冲刷，从而减小立管表面的氧扩散层厚度，导致腐蚀产物层的剥落甚至出现电化学腐蚀和机械冲刷磨损的联合作用。海洋立管通常带有外涂层，外涂层能够隔离立管与周围的海水环境，减少或阻止腐蚀介质的直接接触，进而延长立管的使用寿命。然而，外涂层本身可能存在针孔、气泡等缺陷，这些缺陷往往是立管腐蚀的起点；随着时间的推移，涂层可能会老化、脱落而降低防腐效果，海水的温度、盐度、pH 等都可能损害涂层并影响防腐性能。此外，立管在海洋环境中可能遭受撞击、磨损等物理损伤，这些损伤往往破坏涂层、导致立管暴露在腐蚀环境中[29]。

在海上油气开采过程中，采出的流体含有油、气、水等成分，在海洋立管中以多相流形式混合流动；立管内部可能存在固体颗粒（如砂粒）流动，进一步形成更为复杂的多相流。多相流在立管中的流动会引起管道振动，不仅可以影响立管的稳定性，而且能够导致管道的疲劳损坏。多相流在立管中的流动特性复杂多变，流型、流量、速度、密度等参数均会发生变化，直接影响立管的输送效率与安全性；特别是流体中存在固体颗粒，对管道的冲刷作用将加剧管道损伤。例如，钻井隔水管在导液、导泥过程中面临泥沙颗粒对管体的冲刷，出现磨损的位置处腐蚀将加剧，最终形成立管的磨蚀破坏[30~32]。

海洋平台长期在复杂的海洋环境中服役，环境存在特殊性而致平台设计（预估）的环境参数较难完整反映服役期间受到的荷载信息。随着平台服役时间的积累，各种疲劳载荷和内 / 外腐蚀导致海洋立管的结构安全问题凸显。对应地，采用先进技术手段对海洋立管进行实时监测成为发展趋势[33~35]。以智能监测技术应用为代表，综合运用传感器（监测立管振动）、数据分析（识别涡激振动特征并通过控制算法进行立管振动抑制）、机器学习（精确判断立管损伤位置）等，对海洋立管状态进行实时监测、分析和预警，辅助工程师及时发现立管可能存在的问题，提高海洋工程的安全性。

三、深水油气开采用海洋立管的研究现状

（一）钻井隔水管

钻井隔水管是连接海上钻井装置和海底井口的钢管、海洋油气钻采过程中的必要装备之一，作为下放与回收井口防喷器等水下设备的载体，起到隔绝海水，引导钻杆、套管等钻具，构成钻井液循环通道，为各种管线（如高压节流和压井管线、泥浆补充管线、液压传输管线等）提供支撑等作用（见图2）。钻井隔水管系统主要由卡盘 / 万向节、分流器、上部挠性接头、伸缩节、隔水管短节、填充阀、隔水管母管、节流与压井管线、液压管线、钻井液增压管线、浮力块、终端接头、下部挠性接头、底部隔水管总成（LMRP）、井口防喷器（BOP）、隔水管接头等组成[36]，在深水钻井上应用时容易损坏，直接影响深海油气开采的安全性。

美国、法国、挪威、俄罗斯等国家的专业公司在钻井隔水管系统的设计和制造方面具有市场垄断地位。① 美国的 Cameron 公司、VetcoGray 公司在

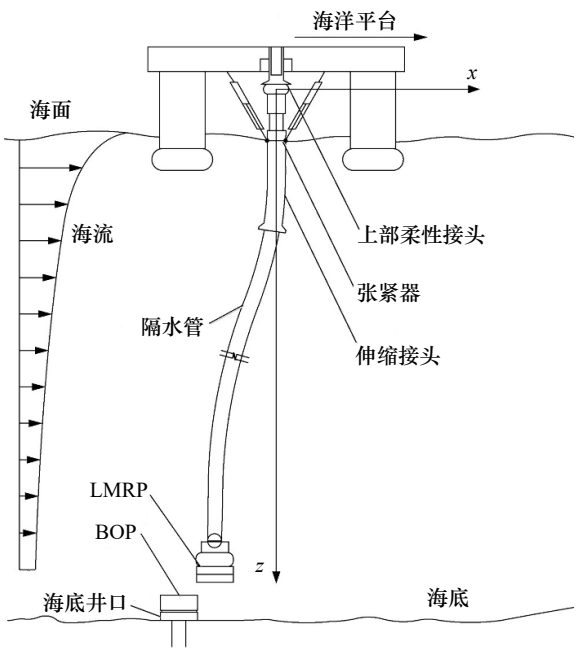

图2　钻井隔水管结构示意图

深水钻井隔水管技术方面具有显著优势，拥有完善的全球服务网络，是世界上规模最大的制造企业。Cameron公司的钻井隔水管产品具有高强度、高耐蚀、性能稳定等优点，适应深海钻井的严苛环境；还可根据客户的具体需求，提供定制化的钻井隔水管解决方案。VetcoGray公司采用创新设计理念，在钻井隔水管系统中配置了MR-6E型接头，显著提高了钻井隔水管的连接速度和安装效率，在世界各地的深海钻井项目中得到广泛应用。② 自20世纪80年代起，海洋油气勘探开发转向更深水域，传统的法兰连接隔水管系统不再适应深水钻井高压力压井和节流管线连接的需求。法国的石油研究院和Framatome公司联合开发了夹式隔水管（即CLIP隔水管），在接头处采用独特的夹式连接设计，相比传统的法兰连接可显著提高连接效率、减少非钻井时间，在多艘钻井船上得到成功应用。③ 挪威Aker Kvaerner公司在钻井隔水管领域具有丰富的工程经验，根据不同水深和钻井条件提供多种规格的隔水管产品，常用的外径尺寸有185/8 in（1 in≈25.4 mm）、16 in、21 in、24 in，单根长度为15~16 m。钻井隔水管配备了由复合泡沫塑料制成的浮力块，可提供相当于单根隔水管90%~95%湿重的浮力，从而减轻平台载荷；安装了填充阀等压力平衡装置，以应对外部海水压力大于隔水管内钻井液压力的情况，防止海水挤毁隔水管。④ 俄罗斯ZAO公司开发了铝合金钻井隔水管，满足深水和超深水钻井的需求，在国际市场上得到广泛认可。在满足强度要求的前提下，铝合金隔水管比钢制隔水管更轻，能够减轻海上钻井装置的载荷，允许平台在更大水深的海域进行钻井作业，如钻井船上试用铝合金隔水管，钻探深度达到980 m且过程中未出现任何故障。然而，ZAO公司的铝合金隔水管采用了法兰连接，在安装效率方面存在一定的局限性[37–42]。

国内市场上的钻井隔水管主要依靠进口，价格昂贵（1根18 m长的隔水管进口价格超过一百万元），明显制约了我国海洋石油工业的发展规模。例如，“海洋石油981”深水半潜式钻井平台具备勘探、钻井、完井、修井等作业功能，最大作业水深为3000 m，最大钻井深度为1×10^4 m，但隔水管、浮力块、上部挠性接头以及隔水管送入管、卡盘等专用设备均为挪威Aker Kvaerner公司产品。近年来，国内系统研究了海洋钻井隔水管的服役环境，与实地勘测相结合，对海洋钻井隔水管的服役工况形成了更深入的理解，也开展了隔水管部件用管材、法兰等核心材料的研发和工业试制工作。例如，山东豪迈机械制造有限公司自主研发的深海钻井用隔水管单根接头等已应用于“海洋石油982”钻井平台，张家港海锅新能源装备股份有限公司为“海洋石油982”钻井平台提供了隔水管的关键锻件；宝鸡石油机械有限责任公司突破了钻井隔水管系统的系列关键技术，成为国际上少数具备钻井隔水管设计和制造能力的企业之一。

钻井隔水管服役环境复杂，受到各种相互作用力的影响，在设计时需要进行准/静态性能分析（如载荷分析、应力分析、极限载荷制定、隔水管结构设计等）和非线性动力学分析（如时域和频域分析、线性和非线性波浪理论、悬挂模式影响轴向动态方向、波致疲劳性能分析等）。钻井隔水管的力学特性是国内外研究的关注点，代表性的工作有：系统评估钻井平台的静态水平偏移、动态船舶运动、水流力及波浪力导致的隔水管形变与应力变化情况[43]；基于有限元方法预测隔水管的结构行为响应[40]；通过时域、频域二维有限元方法分析环境力引起的隔水管的位移和应力变化[44]；建立横向、轴向位移耦合的非线性自由振动方程，分析钻井船横摇和升沉运动情况下隔水管的非线性动力学特性[45]；建立隔水管横向振动的微分方程，获得海浪作用力下隔水管的动态力学响应[46]；建立隔水管与井口耦合的静力学模型，研究上浮平台位移和浮力块张力产生的隔水管形变规律[47]；采用集中质量的振型叠加法分析隔水管动力响应[48]；通过隔水管井口系统的模拟实验装置，分析井口附近的涡激振动响应规律[49]。

对于钻井隔水管系统，材料依然是制约国产化的关键因素，尤其是国产主管材料、配套的高强韧性接头的综合性能尚不能满足设计需求，与国外产品相比存在较大差距。当前，深海钻井隔水管主管材料主要为API 5L X80管线钢，正在向X100、X120等更高强度级别发展。对国外某X80钢级深水钻井隔水管主管进行解剖分析的结果[39]表明，该主管采用粒状贝氏体+铁素体的双相组织设计，具有优异的综合性能，表现出良好的性能稳定性、优异的低温断裂韧性、高的几何尺寸精度控制等。国

内对深海钻井隔水管用钢进行了试验研究，采用贝氏体铁素体+粒状贝氏体 / 粒状贝氏体+准多边形铁素体的复合组织设计，制备的X80级实验钢板基本力学性能满足指标要求；但未报道制管、环焊、全尺寸疲劳等方面的研究结果，导致工程适用性有待验证[50]。与之类似，采用低碳高锰的合金设计、传统针状铁素体组织设计的X80直缝埋弧焊管也能够通过钻井隔水管单根试验验证，但未报道全尺寸疲劳等相关试验结果，导致工程适用性有待验证[51]。值得指出的是，对于海底管线钢这种需要承受较大的结构变形、塑性变形的高应变管线钢，显微组织设计普遍采用双相钢的技术路线，即“软相+硬相”的双相组织设计方法，高应变能力由软相组织来保障，强度依靠硬相组织提供支撑，从而保证强度和塑性的良好配合；上述X80直缝埋弧隔水管母材仍然采用传统的针状铁素体组织，可能存在塑性不足的问题。

（二）钢悬链立管

SCR是刚性管道，集海底管线、立管等功能于一体，从海上浮式平台近乎垂直地悬挂下来，形状呈悬链线状；一端连接浮式生产装置，另一端连接井口或管汇，不需要采用柔性接头或应力接头的连接形式，显著降低了水下施工的难度和工作量。顶部张力式立管可搭配采油树实施钻井、完井、修井等工作，缺点是不能配合浮体作较大的漂移运动，且在水深增加后顶张力、浮体垂荡运动的补偿难度加大，适用水深<1500 m工况。柔性立管由金属和聚合物复合而成，相比钢管具有可设计性、易弯曲、易铺设、可回收、更适应海洋环境等优点，缺点是制造成本高，不适应深水油气田高温、高压的生产条件。相比同种用途的顶部预张力立管、柔性立管，SCR展现出显著的成本优势[52,43]。采用SCR作为TLP的外输系统（管径为30~50 cm），与顶张力立管相比可降低约1.5亿英镑的成本；对于导管架平台的集输系统（管径为15~20 cm），采用SCR后成本可减少1亿英镑；即便在浮式生产系统（管径为15~25 cm）中，使用SCR也能实现约50%的成本降低。与柔性立管相比，SCR在管材成本方面可降低90%的成本。基于SCR的系统无需额外的顶张力补偿装置，对浮式生产系统在海洋环境中的漂移与升沉运动展现出良好的适应性。正是基于显著的成本效益、对浮体运动的高度兼容、对高温和高压等极端工作环境的良好适应，SCR脱颖而出，逐步成为深水油气开采领域的优选立管系统，成功应用于TLP、半潜平台、单柱式平台、浮式生产和储运系统等深水油气开采场景。

国外在钢悬式立管研究方面时间较长、深厚积累。Shell公司在墨西哥湾的TLP上成功安装了世界上首条SCR（1994年），随后该技术迅速在多个海上油气田得到应用，目前已有数十条SCR投入运营。鉴于SCR是深水立管领域的新产品，美国、英国、挪威、巴西等国家联合开展相关研究工作[53]，英国Subsea 7公司、法国Technip-FMC公司、卢森堡Tenaris公司处于技术领先位置。

国内的SCR研究处于起步阶段，主要开展了SCR相关的设计和模拟工作[54~58]。在分析输送介质、各种载荷及平台位置等因素对半潜式平台SCR强度影响规律的基础上，发现立管顶部是最危险部位，SCR悬挂点附近和触地点区域是强度敏感位置[59]。靠近上端浮体立管区域的疲劳特性研究表明，柔性接头刚度对SCR的疲劳寿命具有较大的影响[54]。在陵水17-2气田项目（作业水深为1200~1560 m）中，国内首次开展了SCR系统设计，首次研发了10 in、12 in的X65级SCR管材，相关技术指标达到国外同类管材水平；国产12 in SCR首次获得应用，总长度为1650 m（含疲劳区应用120 m）（见图3）。也要注意到，国产管材主要应用于SCR的躺地段，而竖直部分的SCR管材均由国外企业提供，

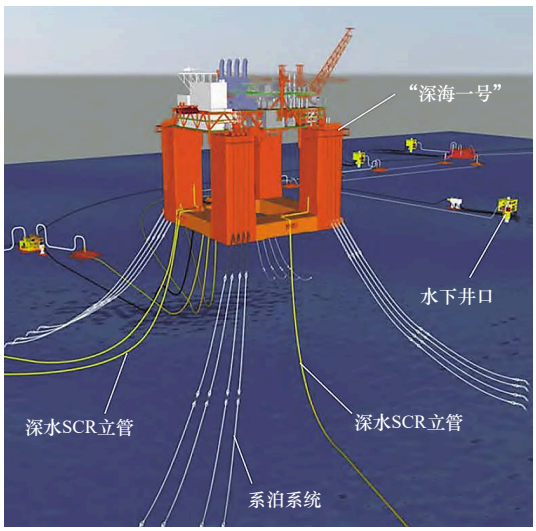

图3 “深海一号”能源站及深水SCR模型图

总计进口长度为26.6 km、质量超过6000 t的X65QO级SCR。国产立管材料仍然存在强度波动大、抗疲劳能力不足、断裂韧性偏低等问题，不能完全适应海风、波浪、涡激振动、变载荷等复杂服役条件；在深水油气开发进入增长期的背景下，攻关SCR相关的瓶颈技术十分迫切。

（三）张力腿平台筋腱立管

TLP的设计原理是利用半顺应、半刚性平台产生远大于结构自重的浮力，抵消自重后产生的剩余浮力与预张力保持平衡，从而提供平稳安全的海上工作环境。在各类深海油气钻采平台中，TLP属于垂直系泊的顺应式平台，采用了创新的海洋浮式结构，由多条平行且持续保持张力的张力腿作为系泊系统，垂直锚定于海底（见图4）。TLP的关键部分包括：① 平台主体，作为海上作业的主要空间；② 张力腿系泊系统，由高强度的张力腿组成，将平台稳固地连接至海底，确保平台的稳定和安全；③ 锚桩基础，包括打入海底的桩基础或吸力沉箱，为张力腿提供稳固的支撑；④ 生产系统，包括立管、井口设备等，用于开采和输送海底油气资源。TLP的4个关键部分协同工作，可在恶劣海洋环境中高效、安全地服役[60~62]。

TLP通过垂直方式系泊，由筋腱立管将平台固定于海底，最大应用水深超过1500 m。张力腿筋腱是TLP的核心部件，用于连接平台上部浮体和海底

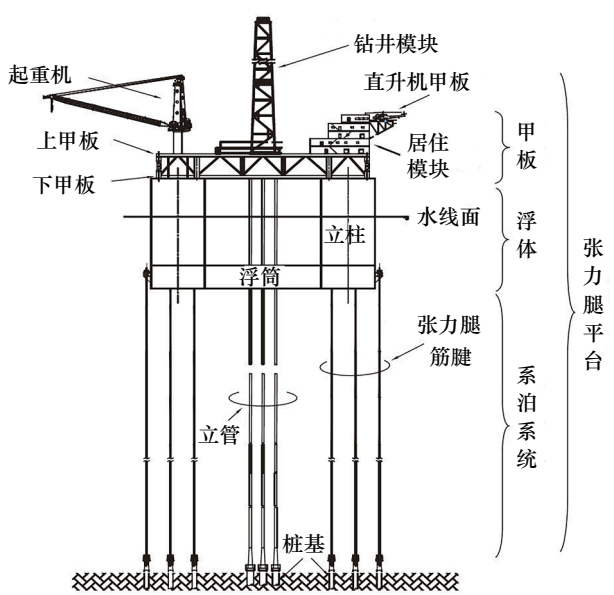

图4　TLP结构示意图

锚固系统。从严格定义的角度看，筋腱管是平台结构用管（管中不含油气介质），并不属于“立管”范畴，但服役工况（与顶张紧式立管相似）、材质选择、制备工艺等均与深水立管相近，故文中一并讨论。TLP在服役期间要承受1500 m水深的恶劣工作条件，加之存在固定载荷、海洋环境载荷、惯性载荷、工况载荷、流体静力载荷等的耦合作用，筋腱立管在极端载荷、结构疲劳的作用下容易发生失效断裂，将导致油气田设备严重破坏并造成经济损失[63]。因此，对张力腿筋腱材料的强度和韧性均提出了极高的控制要求，张力腿筋腱造价通常占平台总造价的25%~40%。张力腿筋腱的选材类型有锚链、钢丝绳、纤维（聚乙烯、碳纤维）、钢管等，其中钢管具有高的强度和疲劳寿命，安全性和稳定性也好，是首选材料[64,65]。例如，墨西哥湾系列TLP项目均采用厚壁筋腱立管，包括OD 660.4 mm×33.02 mm的X60钢管、OD 812.8 mm×38.1 mm的X65钢管、OD 711.2 mm×30.48mm的X70钢管；评价试验结果和生产过程表明，在严格的生产公差控制范围内，每根筋腱管都具有优良的可焊性和断裂韧性，支持墨西哥湾相关项目创造了快速连续建造TLP的世界纪录[66]。

TLP代表了海洋工程技术革新，支持海洋资源探索与利用向更深、更远的海域迈进。TLP研究始于1954年提出的张力索组平台概念，形成了1种倾斜的索系泊海洋平台[67,68]。1974年，美国深海石油公司在加利福尼亚海域附近安装了1座试验平台Deep Oil X-1（质量约为650 t），进行了5年的理论分析和试验研究，确立了现代TLP系统的发展基础[69]。1984年，美国Conoco公司在位于北海的Hutton油田建设了世界首座TLP平台（工作水深为157 m），标志着TLP技术开始在油气生产领域得到广泛应用。1999年，TLP作业水深提高至1158 m，显著拓展了深海油气勘探开发的边界。2003年，首座增强型TLP安装投产，巩固了TLP在深海油气开发领域的领先地位。目前，世界共有约30座TLP服役，作业区域水深为47~1425 m，遍布各大海上石油产区，成为深海采油领域的重要技术支撑，在深海开发中发挥着不可替代的作用。

TLP技术及应用难度较高，国内尚无TLP的工程应用，国内的筋腱立管研究处于探索阶段，以数值模拟和失效分析为主。在非极端条件下模拟TLP

的动态稳定性和持久性发现，如 1 根筋腱立管断裂，相邻筋腱的最大张力将显著增加，可能导致 TLP 失效[70,71]。在国际市场上，TLP 筋腱立管主要由日本 Sumitomo 公司、德国 Europipe 公司供应，相关产品及服务价格昂贵，如工程用 36 in X70 TLP 筋腱管道的采购价格为 7 万元/t，接近 36 in 普通 X70 直缝管道的 10 倍。当前，除了传统式 TLP，其他类型 TLP 均受到国际专利保护，国内没有可直接替换产品，不利于我国海洋油气开发，因而自主研发新型 TLP 十分迫切。

（四）油气开采用海洋立管材料国内外差距分析

国外企业在海洋立管材料方面积累了大量的专利技术和丰富的生产经验，拥有先进的生产技术和设备，能够批量生产适用于各种水深和工况的海洋立管材料，提供的产品具有良好的耐腐蚀性、抗疲劳性能、地形适应性、连续长度、安装便利性。相应地，国外产品在性能、可靠性、效益方面具有较强的竞争力，占据着全球海洋立管材料市场的主导地位，在深海、超深水工程应用方面更是具有特殊优势。

由于国内基础研究和工程应用启动偏晚，技术积累也不充分，国内的海洋立管核心材料和关键技术相较国际先进水平存在一定的差距。国内虽然能够自主生产部分品种的海洋立管材料，但在部分关键指标水平、尺寸精度控制、产品性能稳定性等方面仍存在较大差距（见表 1），主要原因是缺乏上述材料及核心技术的系统性基础研究。国内企业在海洋立管材料的生产技术上处于追赶发展阶段，部分技术尚未自主突破；能够生产的海洋立管材料仅适用浅海工程，而对深海、超深水工程的适应性不佳；受限于技术和生产能力，国产海洋立管材料的市场占有率不高。在多重因素的作用下，国内大部分深海、超深水工程用海洋立管材料仍然依赖进口。

四、深水油气开采用海洋立管材料发展展望

（一）钻井隔水管

钻井隔水管由多个单根隔水管连接而成，单根隔水管由主管与隔水管接头焊接而成。其中，主管属于低碳微合金化钢，由控轧控冷工艺、直缝埋弧焊接工艺制备而成，显微组织主要是细小的针状铁素体 / 粒状贝氏体；隔水管接头属于中碳调质钢，由锻造和调质热处理工艺制造而成，显微组织主要是回火索氏体。主管、隔水管接头所用制备工艺得到的显微组织均具有良好的强韧性匹配，但是主管、隔水管接头分属完全不同的两类钢种。低碳微合金化控轧控冷钢具有良好的焊接性，而中碳调质钢因碳当量较高而致焊接性较差，通常需要采用低热输入的焊接方式，这种异质焊接的连接方式对焊接工艺提出了极高要求。环焊接头的低温断裂韧性、疲劳性能均明显低于母材，导致接头成为隔水管失效断裂的主要位置、隔水管系统中最为薄弱的

表 1　油气开采用海洋立管材料的关键指标和国内外差距对比

应用对象	关键指标		进口依赖度	进口国别	国内技术成熟度
	国内水平	国外水平			
钻井隔水管	X80 钢级，−10 ℃条件下焊接接头 CTOD≥0.254 mm；部件全尺寸疲劳寿命约为 3×10^5 次（涉及异质焊接）	X80~X100 钢级，−10 ℃条件下焊接接头 CTOD≥0.38 mm；部件全尺寸疲劳寿命超过 5×10^5 次（涉及异质焊接）	70%	美国、挪威、法国、俄罗斯	5
SCR	X65 钢级，−10 ℃条件下管体及焊接接头 CTOD≥0.254 mm；管体边缘存在带状组织，部件全尺寸疲劳寿命约为 2×10^6 次	X65、X70 钢级，−10 ℃条件下管体及焊接接头 CTOD≥0.38 mm；具有高的组织均匀性和洁净度；部件的全尺寸疲劳寿命接近 3×10^6 次	100%	卢森堡、法国	5
TLP 筋腱立管	暂无相关产品	X70 钢级，具有特厚壁（≥30 mm），良好的强度、韧性和疲劳性能匹配，高的纵向强度，良好的焊接性	100%	日本、德国	2

注：CTOD 表示裂纹张开位移法。

环节。深海钻井隔水管环焊接头的显微组织和硬度表征分析结果显示，在主管热影响区出现了软化区，而在接头热影响区同时出现了不同程度的局部硬化区和局部软化区，即环焊接头同时存在脆化和软化问题[72]。在环焊过程中，焊缝余高引起的应力集中是导致海洋隔水管环焊接头疲劳性能降低的主要因素之一[73]。由表1可见，国产钻井隔水管的低温断裂韧性、全尺寸疲劳寿命等核心指标均与国外产品存在较大差距。

在隔水管导液、导泥的过程中，大颗粒、高密度的浆体会对管体造成磨蚀破坏。磨蚀是腐蚀介质和磨料共同作用于材料表面并造成材料迁移的复杂过程。在磨蚀条件下，材料的失重总量超过纯腐蚀、纯磨损两方面的失重之和，说明介质的腐蚀作用、磨料的机械作用发生交互影响，一定程度上起到相互促进的作用[74,75]。在深海钻井隔水管的设计过程中，尚未针对耐磨蚀性能提出明确指标，而是采用增加壁厚的方式留出磨损余量。随着钻井作业水深的增加，为了防止外部静水压力或者内部设计压力造成的立管压缩变形或管壁破裂，隔水管的壁厚也在不断增加以提高管壁的抗挤毁能力。上述两方面原因使深海钻井隔水管的壁厚显著增加，导致焊接难度进一步加大。虽然将管材强度等级提高到X100~X120即可显著提高隔水管的耐磨蚀性能，并且能够减小壁厚、减轻质量，但是强度等级的提高将激化管线钢及焊接接头的强韧化矛盾。

深海钻井隔水管材料的系统性研究涉及隔水管的强韧塑化、抗疲劳以及耐磨蚀的耦合机制，管体及接头材料成分设计与组织精准调控，隔水管用钢板、钢管及配套接头的制备，管材与接头的强韧化匹配等关键核心技术。国内尚未开展相关工作，而国外出于技术垄断鲜有报道。

（二）钢悬链立管

我国在陵水气田首次实现SCR的自主研发设计，其中在躺地段应用了国内产品，但在竖直部分仍选用了进口产品。国产SCR的抗疲劳性能以及性能波动范围与稳定性等仍需进一步提升。深水SCR的最大挑战来自动态疲劳，以30年设计服役年限计算，SCR将受到超过1×10^8次的循环疲劳载荷作用，包括平台运动引起的波致疲劳、平台涡激运动疲劳、立管涡激振动疲劳、立管安装导致的疲劳损伤。部件的全尺寸疲劳试验是评价SCR管材疲劳性能的主要方法。国内某深水工程用API 5L X65 SCR在低、中、高应力水平下的全尺寸疲劳寿命测试结果显示，API 5L X65管线钢在高应力下的环焊接头疲劳寿命达到2.1×10^6次，满足BS 7608（1993）D标准要求[60]。作为比照，国外相同钢级SCR对应的疲劳寿命接近3×10^6次。在保证良好强韧性的同时，获得高的抗疲劳性能是SCR产品研制的核心追求。

SCR服役环境条件恶劣，加之大部分悬挂立管长度内需要实施隔热、抑制涡激振动等处理，导致整个立管结构都承受很高的应力[59]，需要将壁厚增加40%，这就加大了环焊施工难度和环焊接头的服役安全性。进一步提高SCR的强度水平，可以提高立管的抗压能力，也有利于减小壁厚。陵水17-2气田项目中SCR采用的是X65钢级，而一些新项目已经提出X80级（管径为24 in）SCR管材的应用需求。可见，高钢级、大口径的SCR管材将是未来重要的发展方向。

（三）张力腿平台筋腱立管

TLP受到的海水浮力远大于结构自重，产生的预张力全部作用在张力腿筋腱上，导致筋腱立管在服役时始终处于纵向承载的绷紧状态。筋腱立管需有足够的纵向强度，以防止过度的垂向共振响应（垂荡/纵摇/横摇），确保平台的运动性能。P110钢级立管的顶张力仅为X65钢级立管的60%[56]，选用高钢级的材料虽然会增加立管造价，但能够以减薄壁厚的方式平衡立管造价的增加。然而，高强度管材在海水中的应力腐蚀问题将趋于严重，焊接难度增加也导致安装效率下降。

迄今为止，TLP项目的最大水深为墨西哥湾项目的1432 m，长期以来被视为TLP服役的极限水深。然而，待开发的大型油气田（特别是位于墨西哥湾的油气田）水深约为1829~2134 m，驱动着新概念TLP研究，拟将服役水深提高到1524~2286 m。在服役水深进一步加大后，筋腱立管在承载平台负荷外，也将承受更高的静水压力，导致API 5L X70筋腱立管的壁厚设计要求达到40 mm[76]。可见，良好的强度、韧韧和疲劳性能匹配，高的纵向强度，优良的焊接性、特厚壁将是未来深水TLP筋腱立管的主要发展方向。

整体上，我国深水油气开采用海洋立管系统滞

后于世界先进水平，其中海洋立管用钢研制时间较短是重要原因之一。目前，深海能源开发高端装备用钢相关核心技术仍然缺乏，跨行业协作机制未能建立，用户需求与材料研发明显脱节。一些行业用户宁愿走进口采购的捷径，也不愿意承担国产化相关的进度和技术风险。随着近年来冶金装备的国际一流化发展以及高品质特殊钢技术的更多储备，特别是基于陆上长输管材丰富且坚实的研发基础，国内研发团队有把握在一定的周期内研制出高性能的深海能源开发材料及产品。鉴于海洋开发已上升为国家战略，需要“产学研用”密切协同，推进深海工程装备国产化制造，引导行业用户有意识地使用国产深海能源开发装备用钢。

五、结语

深水油气开采用海洋立管在海洋复杂多变的恶劣环境下服役，长期受到海风、海浪、洋流等交变载荷的影响，会持续受到各种疲劳损伤；严酷的海洋环境对立管造成腐蚀，也是立管失效破坏的主要原因之一。因此，深水立管需要高的抗疲劳性能和良好的耐蚀性。隔水管是海洋钻井装备上重要而又薄弱的环节，SCR 是深海油气开采浮动生产系统的关键组成部分，张力腿筋腱是 TLP 的核心部件。相关海洋立管的关键技术长期被国外企业垄断，国内市场的进口依赖度超过 70%，售价昂贵且存在供应链安全风险，不利于我国海洋石油工业的高质量发展。

国产海洋立管材料在性能上已在追赶并逐步接近国际先进水平，但部分关键指标水平、尺寸精度控制能力、产品性能稳定性等存在差距。整体来看，深水油气开采用海洋立管材料与产品面临着技术门槛高、研发周期短、基础研究匮乏等问题。亟需针对海洋立管关键材料与核心技术，系统布局基础研究；引导产业上下游企业与高校、科研院所联合开展相关产品开发与应用研究；实施海洋立管制造全产业链的协同创新，涵盖材料、设计、制造、使用、维护等环节，提高自主产品的质量控制能力、批量应用经济性；应用物联网、大数据、人工智能等信息技术，提高智能化制造、供应链优化管理能力。此外，鉴于深水油气开采用海洋立管材料与产品存在技术门槛高、市场需求量较小导致的供需矛盾，有必要构建政策积极扶持、市场机制合理调节相结合的运行模式，更高效率地推动海洋立管材料和产品的技术创新与工程应用。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 24, 2024; **Revised date:** December 17, 2024

Corresponding author: Li Ba is a senior engineer from the Iron and Steel Research Institute Co., Ltd. His major research fields include the basic theory research and engineering application technology development of micro-alloyed structural steel. E-mail: balicugb@sina.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Innovative Development Strategy of Key Materials for Marine Equipment” (2023-HY-18)

参考文献

[1] 蒋德鑫, 张厚和, 李春荣, 等. 全球深水 – 超深水油气勘探历程与发展趋势 [J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 1–12.
Jiang D X, Zhang H H, Li C R, et al. Global deep-and ultra-deep-water oil and gas exploration: Review and outlook [J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 1–12.

[2] IHS Markit. EDIN datebase [DB/OL]. [2022-01-10]. https://edin.ihsenergy.com/portal/home.

[3] 周国平. 南海之深水海洋工程装备技术特征剖析 [J]. 海洋工程装备与技术, 2014, 1(2): 95–102.
Zhou G P. Technical features analysis for deepwater ocean engineering equipment used in the South China Sea [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2014, 1(2): 95–102.

[4] 崔青. 海洋平台发展现状及前景 [J]. 石化技术, 2018, 25(6): 213.
Cui Q. Development status and prospect of offshore platforms [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(6): 213.

[5] Amaechi C V, Chesterton C, Butler H O, et al. Review of composite marine risers for deep-water applications: Design, development and mechanics [J]. Journal of Composites Science, 2022, 6(3): 96.

[6] Drumond G P, Pasqualino I P, Pinheiro B C, et al. Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review [J]. Ocean Engineering, 2018, 148: 412–425.

[7] 张杰. 深海立管参激 – 涡激联合振动与疲劳特性研究 [D]. 天津: 天津大学(博士学位论文), 2014.
Zhang J. Study on combined vibration and fatigue characteristics of deep-sea riser under parametric excitation and vortex excitation [D]. Tianjin: Tianjin University (Doctoral dissertation), 2014.

[8] 段金龙. 含内流深海立管涡激振动特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学(博士学位论文), 2018.
Duan J L. Study on vortex-induced vibration characteristics of deep-sea riser with internal flow [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Doctoral dissertation), 2018.

[9] 王远岑. 海洋立管多模态涡激振动分岔研究 [D]. 天津: 天津大学(博士学位论文), 2019.
Wang Y C. Research on multi-modal vortex-induced vibration bifurcation of marine riser [D]. Tianjin: Tianjin University (Doctoral

dissertation), 2019.

[10] Srinil N. Multi-mode interactions in vortex-induced vibrations of flexible curved/straight structures with geometric nonlinearities [J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(7/8): 1098–1122.

[11] Yang Y B, Qin Z H, Zhang Y H. Random response analysis of hydraulic pipeline systems under fluid fluctuation and base motion [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 186: 109905.

[12] Sun L, Liu C F, Zong Z, et al. Fatigue damage analysis of the deepwater riser from VIV using pseudo-excitation method [J]. Marine Structures, 2014, 37: 86–110.

[13] 范佰明, 嵇春艳, 张强, 等. 波流联合作用下深海立管疲劳寿命计算方法研究 [J]. 船海工程, 2008, 37(2): 91–94.
Fan B M, Ji C Y, Zhang Q, et al. Study on calculation method of deep-sea riser's fatigue life under wave and current combined operations [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(2): 91–94.

[14] 吴剑国, 陈育, 阮伟东, 等. 波频和慢漂组合作用下钢悬链线立管疲劳损伤研究 [J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 1–11.
Wu J G, Chen Y, Ruan W D, et al. Study on the fatigue damage of SCR with vessel wave frequency and slow drift combined motions [J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(6): 1–11.

[15] Wang J G, Fu S X, Baarholm R, et al. Fatigue damage of a steel catenary riser from vortex-induced vibration caused by vessel motions [J]. Marine Structures, 2014, 39: 131–156.

[16] 李传凯. 钢悬链线立管静力及波激疲劳分析 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2008.
Li C K. Static and wave-induced fatigue analysis of steel catenary riser [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Master's thesis), 2008.

[17] 万子诚. 钢悬链线立管疲劳损伤及疲劳可靠性研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学(硕士学位论文), 2018.
Wan Z C. Study on fatigue damage and fatigue reliability of steel catenary riser [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology (Master's thesis), 2018.

[18] 高云. 钢悬链式立管疲劳损伤分析 [D]. 大连: 大连理工大学(博士学位论文), 2011.
Gao Y. Fatigue damage analysis of steel catenary riser [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Doctoral dissertation), 2011.

[19] Pan Y, Zheng L X, Yang S C, et al. A review of fatigue analysis of marine flexible risers [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 246: 213555.

[20] Bolanos R B, Rivera J E, Campos D. Fatigue analysis of risers [C]. Calgary: The 4th International Pipeline Conference, Parts A and B, 2002.

[21] Souza G, Gonçalves E. Fatigue performance of deep water rigid marine risers [C]. Honolulu: The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 1997.

[22] 王红红, 刘国恒. 中国海油海底管道事故统计及分析 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 157–160.
Wang H H, Liu G H. Statistics and analysis of subsea pipeline accidents of CNOOC [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 157–160.

[23] 王伟, 孙有辉, 栾陈杰, 等. Reel铺设弯曲过程对X65海管焊接接头耐H_2S应力腐蚀性能的影响 [J]. 焊接技术, 2018, 47(12): 18–21.
Wang W, Sun Y H, Luan C J, et al. Effect of reel laying and bending process on resistance to H_2S stress corrosion of X65 sea pipe welded joints [J]. Welding Technology, 2018, 47(12): 18–21.

[24] 郎东旭, 王立秋, 李勇. 石油平台海管立管腐蚀修复 [J]. 涂料工业, 2019, 49(4): 75–79.
Lang D X, Wang L Q, Li Y. Corrosion repairing of offshore platform riser [J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(4): 75–79.

[25] 李虎. 某平台海管立管腐蚀现状及防护措施 [J]. 涂层与防护, 2020, 41(8): 11–13, 22.
Li H. Corrosion and protection of pipe riser of offshore platform [J]. Coating and Protection, 2020, 41(8): 11–13, 22.

[26] 张金龙. 南海某混输海管腐蚀机理分析 [J]. 河南科技, 2020, 39(31): 40–42.
Zhang J L. Analysis of corrosion mechanism of a mixed transportation submarine pipeline in South China Sea [J]. Henan Science and Technology, 2020, 39(31): 40–42.

[27] 韩一峰, 朱烨森, 陈皖滨, 等. 海管焊接接头腐蚀特性及监测方法研究进展 [J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 98–108.
Han Y F, Zhu Y S, Chen W B, et al. Research progress on corrosion characteristics and monitoring methods of submarine pipeline weldment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 98–108.

[28] 任鹏炜, 唐兴颖, 覃祖安, 等. 深海环境因素对管线钢腐蚀行为影响研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42(5): 492–508.
Ren P W, Tang X Y, Qin Z A, et al. Research progress of the influence of deep-sea environment factors on corrosion behavior of pipeline steel [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 492–508.

[29] 梁云. 海管内检测与海管防腐蚀策略探讨 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27(3): 164–167.
Liang Y. Discussion on in-sea pipeline inspection and pipeline corrosion prevention strategy [J]. Petro & Chemical Equipment, 2024, 27(3): 164–167.

[30] Rincon H, Shadley J, Rybicki E, et al. Erosion-corrosion of carbon steel in CO_2 saturated multiphase flows containing sand [C]. San Diego: CORROSION 2006, 2006.

[31] 曹学文, 王凯, 尹鹏博, 等. 多相流管线内腐蚀直接评价方法在国内的现场应用 [J]. 表面技术, 2018, 47(12): 1–7.
Cao X W, Wang K, Yin P B, et al. Application of multiphase flow internal corrosion direct assessment methodology for pipelines in China [J]. Surface Technology, 2018, 47(12): 1–7.

[32] Silva C A, Varela L B, Kolawole F O, et al. Multiphase-flow-induced corrosion and cavitation-erosion damages of API 5L X80 and API 5DP grade S steels [J]. Wear, 2020, 452: 203282.

[33] Amaechi C, Reda A, Ja'e I, et al. Guidelines on composite flexible risers: Monitoring techniques and design approaches [J]. Energies, 2022, 15(14): 4982.

[34] Zhang Y L, Chai S H, An C, et al. A new method for optimal sensor placement considering multiple factors and its application to deepwater riser monitoring systems [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110403.

[35] 金学义, 董海涛, 何轲, 等. 中国深水钻井隔水管监测技术研究进展 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 136–147.

Jin X Y, Dong H T, He K, et al. Research progress of China's deep water drilling riser monitoring technology [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(5): 136–147.

[36] 畅元江, 陈国明, 鞠少栋. 国外深水钻井隔水管系统产品技术现状与进展 [J]. 石油机械, 2008, 36(9): 205–209.
Chang Y J, Chen G M, Ju S D. Present situation and progress of deepwater drilling riser system products abroad [J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(9): 205–209.

[37] 王进全, 王定亚. 国外海洋钻井隔水管与国产化研究建议 [J]. 石油机械, 2009, 37(9): 147–150.
Wang J Q, Wang D Y. Suggestions on overseas offshore drilling riser and domestic research [J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(9): 147–150.

[38] 姜继帅. 深水钻井隔水管系统力学特性研究 [D]. 大庆: 东北石油大学(硕士学位论文), 2023.
Jiang J S. Study on mechanical characteristics of deepwater drilling riser system [D]. Daqing: Northeast Petroleum University (Master's thesis), 2023.

[39] 牛爱军, 毕宗岳, 牛辉, 等. 国外深水钻井隔水管发展现状及主管性能分析 [J]. 焊管, 2015, 38(9): 6–11.
Niu A J, Bi Z Y, Niu H, et al. Development status of overseas deepwater drilling riser and main pipe performance analysis [J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 38(9): 6–11.

[40] Albino J C R, Almeida C A, Menezes I F M, et al. Dynamic response of deep-water catenary risers made of functionally graded materials [J]. Mechanics Research Communications, 2021, 111: 103660.

[41] 陈锟. 深水钻井隔水管力学特性与疲劳分析 [D]. 荆州: 长江大学(硕士学位论文), 2022.
Cheng K. Analysis on mechanical characteristics and fatigue of deepwater drilling riser [D]. Jingzhou: Yangtze University (Master's thesis), 2022.

[42] 王冬石. 深水钻井隔水管系统关键技术研究与发展建议 [J]. 石油机械, 2018, 46(7): 39–44.
Wang D S. Key technology advances and development suggestion for deepwater drilling riser system [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(7): 39–44.

[43] Burke B G. An analysis of marine risers for deep water [J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(4): 455–465.

[44] Patel M H, Sarohia S, Ng K F. Finite-element analysis of the marine riser [J]. Engineering Structures, 1984, 6(3): 175–184.

[45] Klaycham K, Athisakul C, Chucheepsakul S. Nonlinear response of marine riser with large displacement excited by top-end vessel motion using penalty method [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(4): 2050052.

[46] 贾星兰, 方华灿. 海洋钻井隔水管的动力响应 [J]. 石油机械, 1995, 23(8): 18–23.
Jia X L, Fang H C. Dynamic response of marine drilling riser [J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(8): 18–23.

[47] 李旭. 深水钻井隔水管与井口耦合力学分析 [D]. 荆州: 长江大学(硕士学位论文), 2024.
Li X. Coupling mechanics analysis of riser and wellhead in deep water drilling [D]. Jingzhou: Yangtze University (Master's thesis), 2024.

[48] 田鹏勇. 隔水管横向振动特性的仿真研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学(硕士学位论文), 2014.
Tian P Y. The simulation research of riser transverse vibration characteristics [D]. Qinhuangdao: Yanshan University (Master's thesis), 2014.

[49] 孟彦鑫, 付世晓, 任浩杰, 等. 计及海底井口影响的隔水管涡激振动响应特性试验 [J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 128–134.
Meng Y X, Fu S X, Ren H J, et al. VIV response characteristics experiment of riser influenced by deep-water wellhead [J]. Ship Engineering, 2020, 42(3): 128–134.

[50] 张帅, 任毅, 王爽, 等. 海洋深水钻井隔水管用钢试验研究 [J]. 上海金属, 2016, 38(5): 1–5.
Zhang S, Ren Y, Wang S, et al. Experimental investigation of deep water drilling riser steel [J]. Shanghai Metals, 2016, 38(5): 1–5.

[51] 牛爱军, 户志国, 牛辉, 等. 高尺寸精度深水钻井隔水管用直缝埋弧焊管性能研究 [J]. 焊管, 2017, 40(7): 1–5.
Niu A J, Hu Z G, Niu H, et al. Performance research on longitudinal submerged arc welded pipe with high dimensional accuracy used for deepwater drilling riser [J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(7): 1–5.

[52] 黄维平, 孙传栋, 唐世振, 等. 深水顶张式生产立管的浪致疲劳研究 [J]. 中国海洋平台, 2009, 24(3): 26–30.
Huang W P, Sun C D, Tang S Z, et al. Study on wave-induced fatigue of deep water production ttr [J]. China Offshore Platform, 2009, 24(3): 26–30.

[53] 黄维平, 白兴兰, 李华军. 国外深水钢悬链线立管研究发展现状 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 290–294.
Huang W P, Bai X L, Li H J. State of the art of research and development of overseas deepwater steel catenary risers [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(2): 290–294.

[54] Martins C D A, Higashi E, Silva R. A parametric analysis of steel catenary risers: Fatigue behavior near the top [C]. Seattle: The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000.

[55] Hatton S A, Willis N. Steel catenary risers for deepwater environments [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 1998.

[56] 黄维平, 李华军. 深水开发的新型立管系统——钢悬链线立管(SCR) [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(5): 775–780.
Huang W P, Li H J. A new type of deepwater riser in offshore oil & gas production: The steel catenary riser, SCR [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(5): 775–780.

[57] 侯静, 黄兆力, 胡平, 等. 深水钢悬链立管的开发 [J]. 宝钢技术, 2021 (6): 61–67.
Hou J, Huang Z L, Hu P, et al. Development of deep-water steel catenary riser [J]. Baosteel Technology, 2021 (6): 61–67.

[58] 王安庆. 钢质悬链线立管力学特性与疲劳损伤分析 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2011.
Wang A Q. Analysis of mechanical characteristies and fatigue damage of SCR [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (Master's thesis), 2011.

[59] 张学辉, 徐爱进, 程永明, 等. 中国南海半潜式平台钢悬链线立管的强度研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(4): 266–273.

Zhang X H, Xu A J, Cheng Y M, et al. SCR strength study for the application of SCR to semi-submersible platform in the South China Sea [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(4): 266–273.

[60] 王会峰, 何宁, 李旭, 等. 钢悬链线立管全尺寸疲劳试验方法研究 [J]. 中国造船, 2022, 63(4): 192–198.
Wang H F, He N, Li X, et al. Study on full scale fatigue test of steel catenary riser [J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(4): 192–198.

[61] Ikeda T, Ohnishi K, Yamamoto A, et al. UOE-formed tendon pipes for deep water oil & gas exploration in the Gulf of Mexico [C]. Honolulu: The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, 1997.

[62] 闫功伟. 新型深吃水多柱延伸式张力腿平台的概念设计与耦合运动响应分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2013.
Yan G W. Conceptual design and coupled motion response analysis of a new type of deep draft multi-column extension tension leg platform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (Doctoral dissertation), 2013.

[63] 孙昊天. 极端海况下张力腿平台筋腱振动特性数值预报研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(硕士学位论文), 2023.
Sun H T. Research on numerical prediction of vibration characteristics of TLP tendons under extreme sea conditions [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (Master's thesis), 2023.

[64] 苗文举, 肖丽娜, 许靖. 张力腿平台筋腱设计及强度校核 [J]. 船舶标准化与质量, 2018 (1): 45–48.
Miao W J, Xiao L N, Xu J. Design and strength check of tension leg platform (TLP) tendons [J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2018 (1): 45–48.

[65] 于洪旭. 深水顶张紧式立管壁厚与材料选择研究 [J]. 石油和化工设备, 2016, 19(1): 26–29.
Yu H X. Study on wall thickness and material selection of deep water top tension riser [J]. Petro & Chemical Equipment, 2016, 19(1): 26–29.

[66] Schwinn V, Schuetz W, Fluess P, et al. Prospects and state of the art of TMCP steel plates for structural and linepipe applications [J]. Materials Science Forum, 2007, 539–543: 4726–4731.

[67] Takeuchi I, Nishimoto K, Nagase, M, et al. Development, prequalification, and production history of 60 ksi UOE steel tendon pipe for AUGER tension leg platform [C]. Copenhagen: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1995.

[68] 鲍莹斌, 李润培, 顾永宁. 张力腿平台研究领域和发展趋势 [J]. 海洋工程, 1998, 16(4): 17–26.
Bao Y B, Li R P, Gu Y N. Research field and development trend of tension leg platform [J]. The Ocean Engineering, 1998, 16(4): 17–26.

[69] 李牧. 南海张力腿平台优化选型研究 [D]. 天津: 天津大学(硕士学位论文), 2010.
Li M. Study on optimal selection of tension leg platform in South China Sea [D]. Tianjin: Tianjin University (Master's thesis), 2010.

[70] Kim M H, Zhang Z. Transient effects of tendon disconnection on the survivability of a TLP in moderate-strength hurricane conditions [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2009, 1(1): 13–19.

[71] 李森, 李泽邦, 张宁, 等. 张力腿筋腱焊接接头的断裂韧性 [J]. 工程与试验, 2023, 63(3): 51–53.
Li S, Li Z B, Zhang N, et al. Fracture toughness of welded joint of tension leg tendon [J]. Engineering & Test, 2023, 63(3): 51–53.

[72] 贺龙威, 韩涛, 宋立新, 等. 深水钻井隔水管焊接接头组织与硬度分析 [J]. 焊接技术, 2019, 48(2): 18–20.
He L W, Han T, Song L X, et al. Microstructure and hardness analysis of welded joints for deep water drilling risers [J]. Welding Technology, 2019, 48(2): 18–20.

[73] 余钊辉, 党恩, 朱安达, 等. 海洋隔水管对接环焊缝接头高周疲劳性能研究 [J]. 焊管, 2013, 36(10): 11–15.
Yu Z H, Dang E, Zhu A D, et al. Research on high cycle fatigue property for butt circumferential weld of marine riser [J]. Welded Pipe and Tube, 2013, 36(10): 11–15.

[74] 宋凤明, 杜林秀. 浆体输送用磨蚀钢的研究进展 [J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(2): 1–6.
Song F M, Du L X. Development of corrosive-abrasion resistant steel used for slurry transportation [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(2): 1–6.

[75] 宋凤明, 杜林秀, 孙国胜, 等. 海水浆体中钢的磨蚀行为 [J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(3): 244–250.
Song F M, Du L X, Sun G S, et al. Erosion-corrosion behaviour of steel in sea water slurry [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(3): 244–250.

[76] Reepmeyer O, Schuetz W, Liessem A, et al. Very heavy wall X70 DSAW pipes for tension leg application [C]. Honolulu: The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003.