

纤维增强复合材料管道在石油行业中的应用

邱国恒¹, 刘柳薪², 卢晓英², 刘刚^{1,3}, 姚佳楠^{1*}

- 纤维材料改性国家重点实验室, 东华大学先进低维材料中心, 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620;
- 中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102200;
- 北京化工大学先进装备与技术研究院, 北京 100029)

摘要: 纤维增强树脂基复合材料的应用可较大幅度地减轻结构重量, 延长使用寿命, 提高应用过程中的安全性并减少对环境的影响。随着复合材料原材料及复合材料结构制造技术的日益成熟以及自动化制造设备的不断完善, 复合材料已广泛应用于各个领域。近年来, 纤维增强树脂基复合材料在石油化工领域逐渐受到广泛关注, 大量应用在石油运输、石油储罐、海洋浮动平台等方面。在石油运输领域, 传统金属管道面临诸多挑战, 在运输过程中产生的腐蚀和磨损都会造成重大损失, 降低管道的结构完整性, 而对于腐蚀的保护采用有机涂层和阴极保护来减缓, 或采用缓蚀剂来抑制, 这大幅度提高了材料的投入成本。纤维增强树脂基复合材料管道具有优异的强度和刚度特性以及较高的耐腐蚀和耐冲蚀性能, 成为替代传统金属管道的首选材料。本文综述了纤维增强树脂基复合材料管道的研究进展以及复合材料管道在石油化工领域的具体应用, 并对纤维增强树脂基复合材料在管道领域的发展进行了展望。

关键词: 纤维增强; 复合材料; 管道; 石油化工

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1007-9815(2024)06-0011-15

Application of Fiber Reinforced Composite Pipeline in the Petroleum Industry

QIU Guoheng¹, LIU Liuxin², LU Xiaoying², LIU Gang³, YAO Jianan^{1*}

- State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, Center for Advanced Low-dimension Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
- China National Petroleum Corporation Petrochemical Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China;
- Institute of Advanced Equipment and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The use of fiber-reinforced resin matrix composites significantly reduces the weight of structures,

作者简介: 邱国恒 (1997—), 博士研究生, 研究方向为高性能树脂基复合材料, 电子邮箱: 1239742@mail.dhu.edu.cn。

extends their service life, improves safety during work, and reduces their impact on the environment. With advancements in manufacturing technology and automated equipment, composite materials have become widely used in various fields. In recent years, the petrochemical industry has shown great interest in composite materials, using them for oil transportation, storage tanks, offshore platforms, and more. Traditional pipelines have faced challenges such as corrosion and wear, causing significant losses and reducing their structural integrity. To protect against corrosion, organic coatings and cathodic protection or inhibitors have been used, which increases material costs. Fiber-reinforced composite pipes offer excellent strength, stiffness, corrosion resistance, and erosion resistance, making them an ideal replacement for traditional pipes. This paper reviews the research progress of fiber-reinforced resin matrix composite pipelines and their application in the petrochemical industry. It also discusses the prospects of fiber reinforced resin matrix composites in pipeline development.

Keywords: fiber reinforced; composites; pipeline; petrochemical industry

0 引言

纤维增强树脂基复合材料自出现以来快速发展,已经在航空、航天等多个领域成为了主要的结构材料,大量应用纤维增强树脂基复合材料是衡量新一代航空技术水平先进性的重要标志之一,更是降低成本、提高性能和市场竞争力的重要因素之一。纤维增强复合材料是将几种材料组分与纤维组分结合在一起,因此可以提供单独组分所不具备的性质,是一种优于传统材料的单组分特性的理想材料^[1-2]。自2000年起,纤维增强树脂基复合材料正在被不断地开发和使用的^[3-5];同年,全球市场对纤维增强树脂基复合材料的年需求量约为2万吨;次年,年需求量约达到6万吨;预测到2030年,每年的需求量达到10~14万吨。目前,在工程应用中主要使用的是纤维增强树脂基复合材料,它们因高刚度、高强度和可调控特性而受到关注,成品层压板可以通过设计铺层角度和铺层数量而实现不同的性能。因此,纤维增强复合材料在各个行业都有很广泛的应用,如图1所示,包括航空航天、汽车、石油、天然气、航海、可再生能源、现代医学、微纳技术等复杂的民用和机械工程领域,从航空航天到体育用品领域,几乎所有的工程领域都用到了它们^[6-9]。现阶段,石油化工行业作为我国的支柱

产业,与国民经济息息相关,是我国工业经济必不可少的重要产业之一。随着行业规模的不断扩大,高端产品的需求量增加,工艺技术也随之不断更新,新设备、新材料、新型催化剂等产品正逐渐地应用在石油化工行业中,使得装置规模越来越大,自动化程度越来越高,对于一些材料、零件、设备需要满足在特定环境下的使用要求。

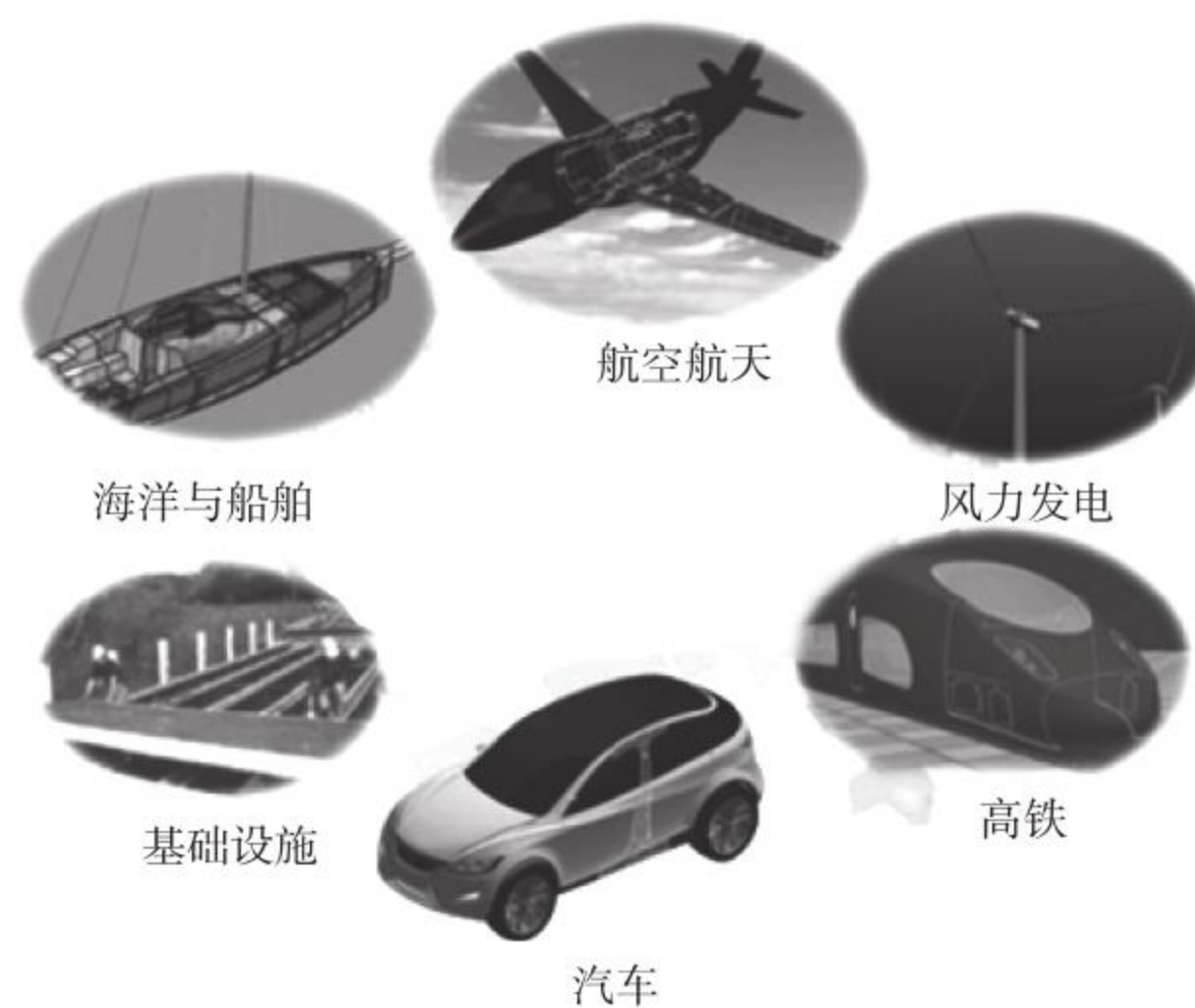


图1 纤维增强复合材料的应用领域

自1948年开始,纤维增强复合材料管道就开始应用于石油、天然气行业,相较于其他的工程材料,其综合应用成本更低^[10-12]。纤维增强复合材料管道的基体树脂包括热固性或热塑性树脂,并根据应用要求选取合适的纤维增强体,充分发挥复合材料轻质高强、耐环境性、耐化学性、及

可设计性等，扩大了复合材料管道在工程中的应用范围，并很好的满足市场多样化的应用需求，并且可以与含有附加组件的管道进行互连^[13-14]。与传统使用的钢铁材料相比，复合材料管道的维护成本降低了 40%~50%。现阶段应用的复合材料管道主要包括高压玻璃钢管、钢骨架聚乙烯塑料复合管、纤维增强热塑性复合材料连续管、柔性复合管和复合增强钢管。其中，纤维增强热塑性复合材料管道（RTP，Reinforced Thermoplastic Pipeline），基本上采用 3 层结构，如图 2 所示。内层一般为不易腐蚀、不易磨损的聚合物内衬，中间层是起到保证管道强度的纤维增强层，外层是具有密封和防护作用的聚合物保护层。RTP 管有很高的强度和韧性，在陆地和浅海的石油天然气开采、海底输水管道、消防管道及城镇输水管网中使用居多。柔性复合管包括柔性复合高压输送管、连续增强塑料复合管和塑钢复合耐高压油田专用管。这三种管道均为连续软管，柔性好、寿命长，铺设管线的条件要求低，没有焊接接口的存在。此种管材主要用于油田注水、管线注醇、油气集输等方面。而复合增强钢管综合了钢材的强度与玻璃纤维等塑料材料的韧性，利用钢管承受轴向力和弯曲应力，利用玻璃纤维增强提高钢管的承压能力^[15]。本文综述了纤维增强树脂基复合材料管道在石油化工领域的具体应用，并对纤维增强树脂基复合材料在管道领域的发展进行了展望。

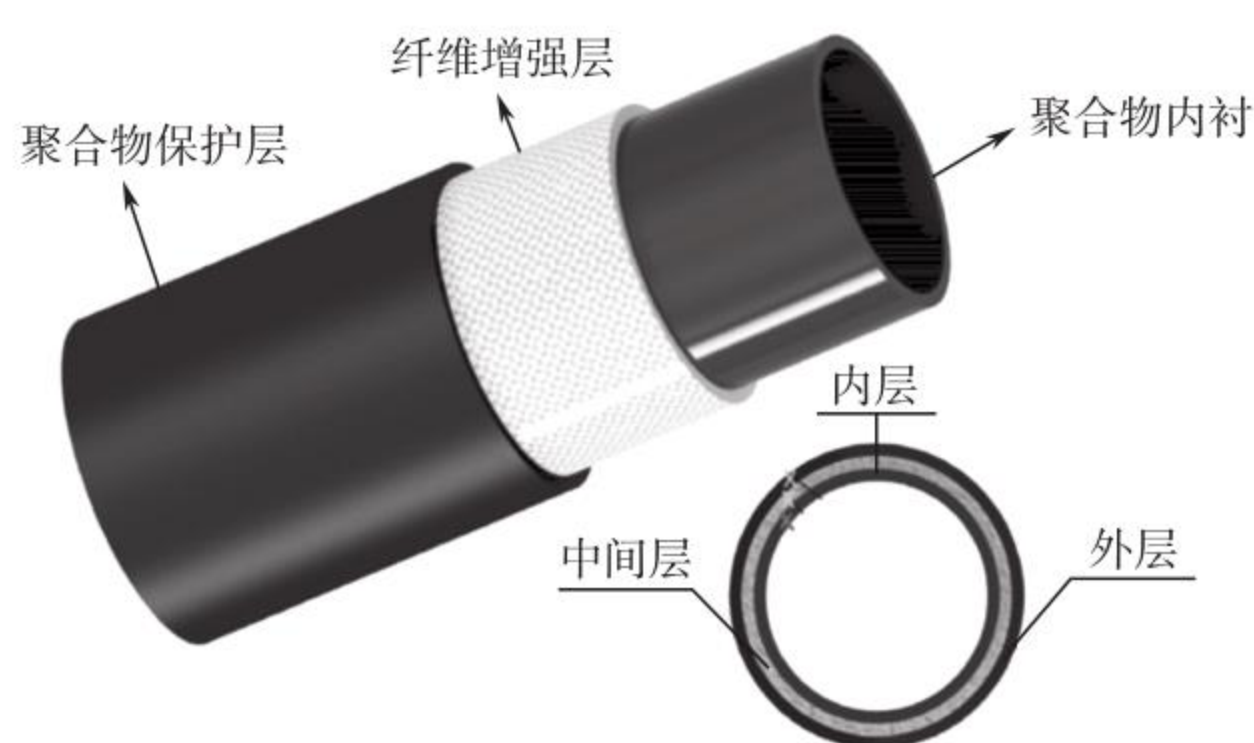


图 2 复合材料管道的结构示意图

1 复合材料管道的研究进展

迄今为止，在研究过程中发现复合材料管道所表现出的优异性能已经在工程应用中逐步得到了证实。油田井下用高压玻璃钢管，在世界发达国家已经研究和应用几十年了，其中，美国是最早研制和应用高压玻璃钢管的国家。早在 20 世纪 50 年代中期，罗克埃兰德（Rock Is IJand）石油和精炼公司引进了纤维缠绕玻璃钢高压油管 and 油井套管生产线，管线采用螺纹连接，用于石油工业。以前我国石油工业几乎全部采用钢管，但钢管耐腐蚀性能不佳，一口油井式注水井管防腐处理后也只能用 3~5 年时间，而高压玻璃钢井下油管耐腐蚀，使用寿命在 15~20 年间，是钢管的 4~5 倍。在石油和天然气行业中，虽然复合材料管道已经应用在运输和收集系统中很长时间，但在替代金属管道进行大量应用之前，仍需要解决一些技术问题和实际操作问题^[16]。基于目前的技术还不能完全达到所期望的作业目标，特别是在高压力和恶劣条件下应用的成本问题，因此需要寻找纯金属管道或复合管道的替代品，以提高可靠性和耐用性。纤维增强树脂基复合材料因其具有轻质、耐腐蚀、承压能力强等优点是替代现有常规管道的理想材料，其密度、强度、模量、疲劳性能和破坏机制等性能受纤维种类、体积分数、长度和取向等因素的影响^[17]。在纤维增强树脂基复合材料的工程应用中，使用最多的是玻璃纤维、碳纤维和芳纶；所用树脂可以分为热固性和热塑性树脂，其中，热固性树脂在石油和天然气行业中得到了广泛的应用，因为它具有良好的力学性能、收缩率、固化性能、耐腐蚀性、耐热性等^[18]。热固性树脂易于在管壁上成型，固化速度快，耐腐蚀，是领域内常用的选择，使用最多的热固性树脂包括环氧、聚酯、乙烯基酯、酚醛、聚氨酯、聚酰胺等。但是与热塑性树脂相比，热固性树脂通常也表现一定的局限性，虽然热固性树脂在原材料获取和制造成型方面成本较低，但

热塑性树脂也具有更好的耐化学性和更低的吸水率，这使得它们特别适合海上使用，并具有显著的可回收性^[19]。同时一些热塑性树脂可以利用聚乙烯作为基体材料应用于石油和天然气工业。图3表明了热固性树脂和热塑性树脂在复合材料管道中的使用比例^[14]。

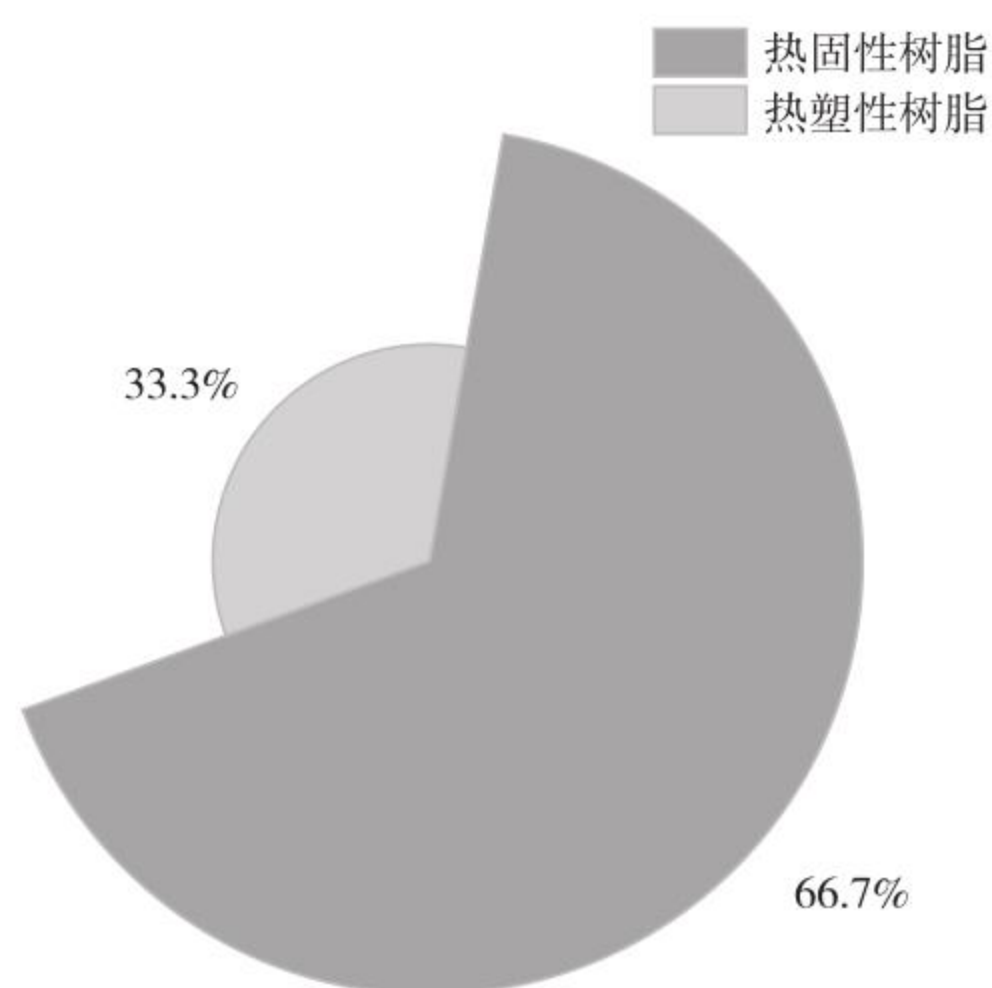


图3 热固性树脂和热塑性树脂在复合材料管道中的使用比例

美国石油协会^[20]的一项研究测试了复合材料管道的力学性能，包括抗拉强度、爆破压力和轴向疲劳测试。结果表明，复合材料管道具有与钢管道相当的强度，更加轻便灵活，同时还表现出优异的耐化学、耐腐蚀和抗紫外辐射的能力，并随着时间的推移保持其力学性能。其中 Alabtah 等人^[21-24]在传统管道中添加纤维增强聚合物材料以消除基体开裂并提高了防腐蚀性能。Kruijer M. P. 等人^[25]在实验室条件下测试了复合材料管道的耐磨性能。实验将复合材料管道暴露在研磨材料中测试并计算其重量损失，结果说明了复合材料管道具有优异的耐磨性能。Bakar M A A 等人^[26]在实验室条件下对复合材料管道的抗冲击性能进行了测试。实验将一个摆锤冲击到复合材料管道上，并测量冲击过程中所吸收的能量。结果表明，复合材料管道具有优异的抗冲击性能，具有较高的能量吸收值。YuK 等人^[27]采用标准方法测试，对复合材料管道的耐腐蚀性能进行了测试。测试内容包括将复合材料管道放置在不同

类型的腐蚀性液体中，测量其重量损失并观察表面形貌，结果说明复合材料管道具有优异的抗腐蚀性能。Wang 等人^[28]采用标准测试方法，在实验室条件下对复合材料管道的抗疲劳性能进行了测试。实验对钢管复合材料立管进行循环应力加载，记录试验件破坏时的循环次数。结果表明，复合材料管道具有优异的抗疲劳性能，其疲劳寿命可使用100年。

综合以上研究成果表明，纤维增强复合材料在管道领域的应用优势是显而易见的。由于其优越的力学性能、耐腐蚀性、耐疲劳性、易加工性、优越的阻尼特性和重量轻等特点，可以成为新一代替代或修复传统管道的理想材料。使用复合材料管道还可以降低生产成本，更方便安装、铺设并具有更长的使用寿命。此外，可以通过改变一些设计变量，如纤维种类、基体种类、铺层顺序、复合材料厚度和纤维取向，来满足在不同服役环境下的使用要求，充分优化这些设计的变量可以提高复合材料管道的性能，并实现更大的减重。

2 复合材料管道的应用

近年来，纤维增强树脂基复合材料在海洋和近海工业中的应用越来越广泛。尤其是在管道、立管、应力接头和流体处理等方面，由于复合材料具有高的比强度、比刚度、良好的耐久性、低导热性和良好的耐腐蚀性，因此比金属材料具有许多突出的优势^[29-31]。在海洋领域中，纤维增强复合材料正被考虑用于制造各种一级和二级结构。对于海上浮动设备上安装的一级结构主要包括立管、桁架和缆索，是能够连接浮式平台和海下结构的一种浮动系统。二级结构包括，浮动平台上的直升机桥梁、管道系统、住所、人行道、楼梯等^[32-33]。其中立管是将海上浮动设施或钻井平台与水下钻探系统和生产系统进行连接的管道，其长度和柔韧性需要能够承受住海下结构和海上浮动平台之间产生的相对位移，以及波浪运动和海流作用带来的影响，并将长期处于承受高静态载

荷和动态载荷的严苛服役环境，同时沿立管长度方向受到的荷载也不均匀。因此立管被认为是海上管道、钻井和生产系统中最关键的部件也是海上作业中最关键的部件。在生产过程中，这些立管长且相对较薄，一般使用深度为 4 km，典型直

径为 100~300 mm。同时还用于将泥浆输送至地表的钻井，或用于输送烃类、控制液或气体的生产。根据作业深度范围的不同，可以选择采用不同的立管构型。图 4 示意性地显示了一系列平台和不同的立管构型的作业深度^[34]。

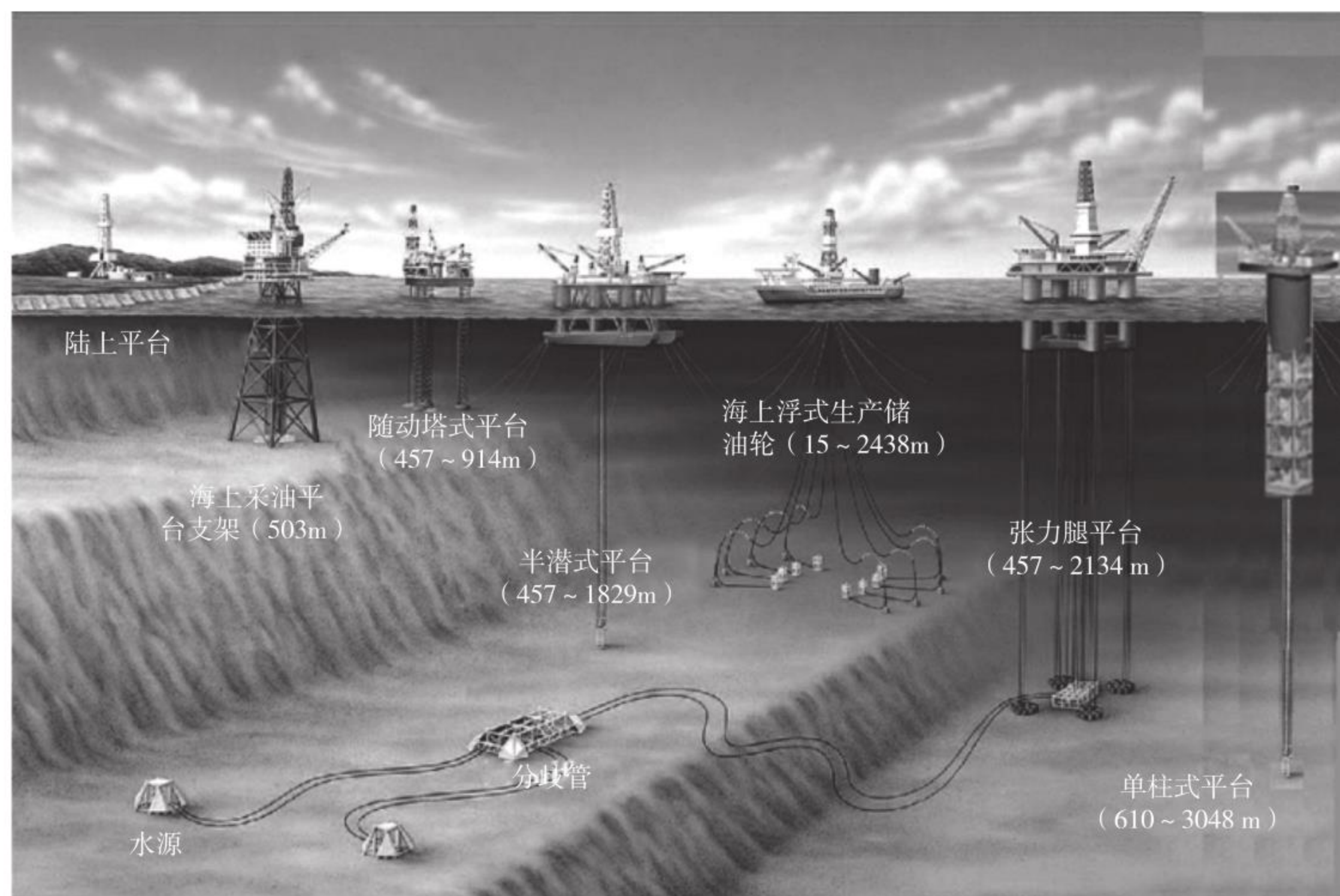
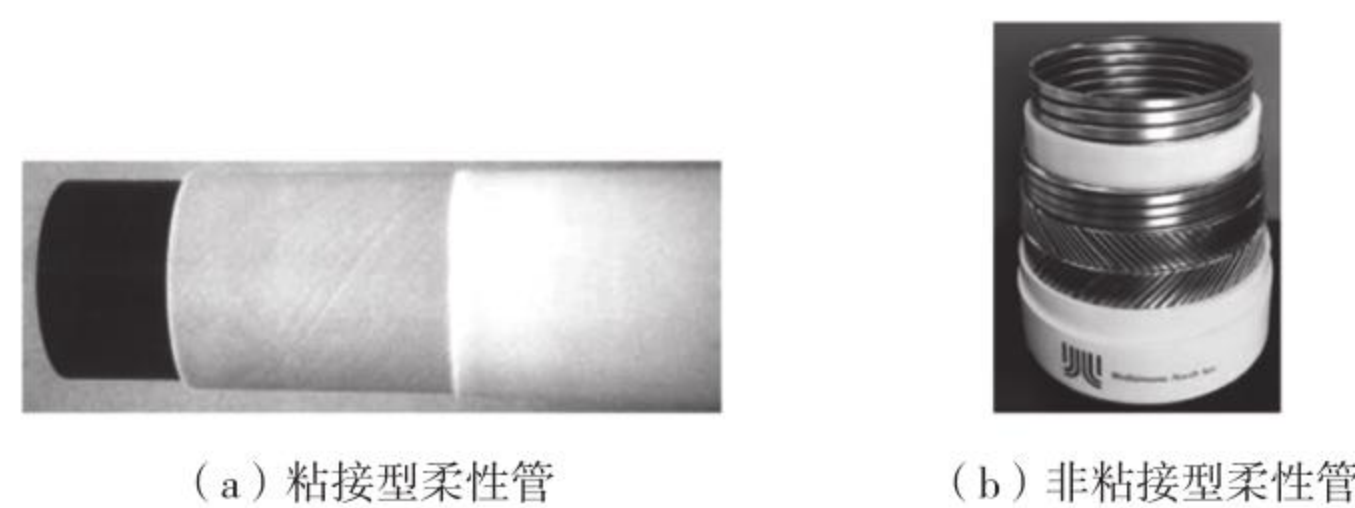


图 4 复合材料立管的作业领域

其中，复合材料立管可以分为两种主要类型：粘结型柔性管和非粘结型柔性管，如图 5 所示。粘结型柔性管是由几层组成，层与层之间采用粘结固定，不会产生相对位移。非粘结型柔性管是由几个独立的层组成，层与层之间没有固定的连接，允许层与层之间产生相对位移。粘接立管通常包括内衬层、中间加强层和外覆盖层。其中内衬层的主要作用是防止漏液和压力介质的泄漏，外衬层由热塑性或热固性材料或金属合金制成，用来保护增强层免受任何形式的外部冲击或干扰。中间增强层由纤维组成，纤维提供了高的承受内压的能力^[35]。非粘结型柔性立管通常包含一个内部的钢骨架层，以防止立管的屈曲和坍塌；钢制压力铠装层，防止内部流体的腐蚀；抗磨损同质层，为隔水管提供轴向和弯曲刚度，外层聚合物层用于外部保护^[36-37]。由于粘结型柔性管的制造

过程需要硫化，制造长度也受到限制，常用于距离较短的工程应用，如漂浮管、跨接管等。因此非粘结型柔性管成为了大部分工程的主要应用形式。



(a) 粘接型柔性管

(b) 非粘接型柔性管

图 5 粘结型柔性管和非粘结型柔性管

自 20 世纪 80 年代以来，人们曾多次尝试用玻璃纤维复合材料立管取代钢立管。法国石油研究所和法国国家航空宇航公司在 20 世纪 80 年代进行了海上复合管道的开创性研究^[38]。研究内容

分析表明,使用复合材料管线替换后,总质量降低了24%,同时重量的减轻也减小了海流作用的影响,作用在立管上的外动力也随之减少。20世纪90年代中期,美国商务部启动了一项相关计划,开发、生产和测试大型复合材料管道结构,资助了两个项目来研究玻璃纤维增强复合材料立管在深海中的应用,分别侧重于钻井和生产立管^[39]。尽管具体应用的环境有所不同,但这些项目提出了共同的目的,旨在预测复合材料管道的失效模式和评估在极限条件下分析方法的可靠性,并证明制造工艺的稳定性,建立生产计划和成本评估的度量标准。目前,从安全角度考虑,钢材料立管不允许应用于超过1 000 m的深度;与钢立管相比,复合材料立管的质量要小得多,也是唯一适用于1 500 m以上深度的立管材料。大量研究表明,在水深超过1 500 m的服役环境中,纤维增强树脂基复合材料具有非常大的应用潜力^[40]。如在一个深海1 500 m的作业平台,用钢制缆绳的重量约为6 500吨,用纤维增强复合材料缆绳重量仅为1 000吨。同时,前者最大深度只能到1 500 m左右,而后者可用到3 000 m的深海油田^[41]。Ochoa和Salama^[42]认可了复合立管的潜在应用,并将这种能力扩展到3 000 m的深度。Tarnopol'skii Y M等人^[43]对钢和复合材料立管的研究表明,传统的钢立管的用量将达到9万吨,而用类似的复合立管替代仅需约2万吨。Ward等^[44]报告了钢和复合材料立管的失效模式和危险性的风险分析。结果表明,复合立管比钢制立管具有更好的抵抗多种失效模式的能力,包括爆裂、坍塌、内衬的轴向屈服等。

然而,要在海洋立管中成功地应用复合材料,仍需要进行大量的测试和鉴定。还需要对产品在海水中的耐久性进行评估。在Venkatesan等人^[45]的研究中,观察到碳纤维增强聚合物复合材料在长期暴露于清水和海水中后仍保持较好质量,并且在不同温度下具有显著差异。许多研究者也一致认为,碳纤维增强聚合物复合材料的长期抗拉强度在海水的服役环境下短期内降低到原始强度

的80%~95%之间^[46-48]。Morooka, C. K等人^[49]对碳/PEEK(聚醚醚酮)热塑性复合材料的另一项研究也发现,其轴向抗拉强度不受沸水的影响,但其横向抗拉强度受到影响。经沸水处理后,材料的抗拉强度降低。研究确定,为了避免失效,热塑性复合材料的最高使用温度必须远低于聚合物基体的玻璃化转变温度。除了碳纤维,还有其他纤维,如玻璃纤维和芳纶,以及其他合成高性能纤维也经常用于复合材料,例如Spectra纤维、超高分子量聚乙烯纤维、PBO纤维、M5纤维和PEEK纤维。然而,在海底条件下,材料的选择非常依赖于用这些纤维增强的复合材料的性能,因为抗拉强度的降低会导致复合材料立管的性能严重下降^[50-54]。

近些年,复合材料立管在实验室环境和现场操作条件下都得到了广泛的研究和测试,证明了其优异的力学和耐环境性能。Magma Global公司在2013年较早获得了复合材料立管的合格品。OCYAN和Magma Global有效地配置了巴西盐下油田纤维增强的m-pipe复合材料管道,如图6所示^[55]。m-pipe由PEEK和碳纤维复合而成,由于其低重量、高强度、灵活性和标准化设计,有效地简化了海底建筑的结构形式。m-pipe在深海油田的环境下不会腐蚀或降解,并具有非常好的耐高压和耐高温性能。Magma Global公司一直在通过利用m-pipe的独特优势来优化和简化立管设计,其目标是达到简单、低成本的立管设计,并且能够在2 000 m及以下的深度进行应用,压力范围从低压至138 Pa。

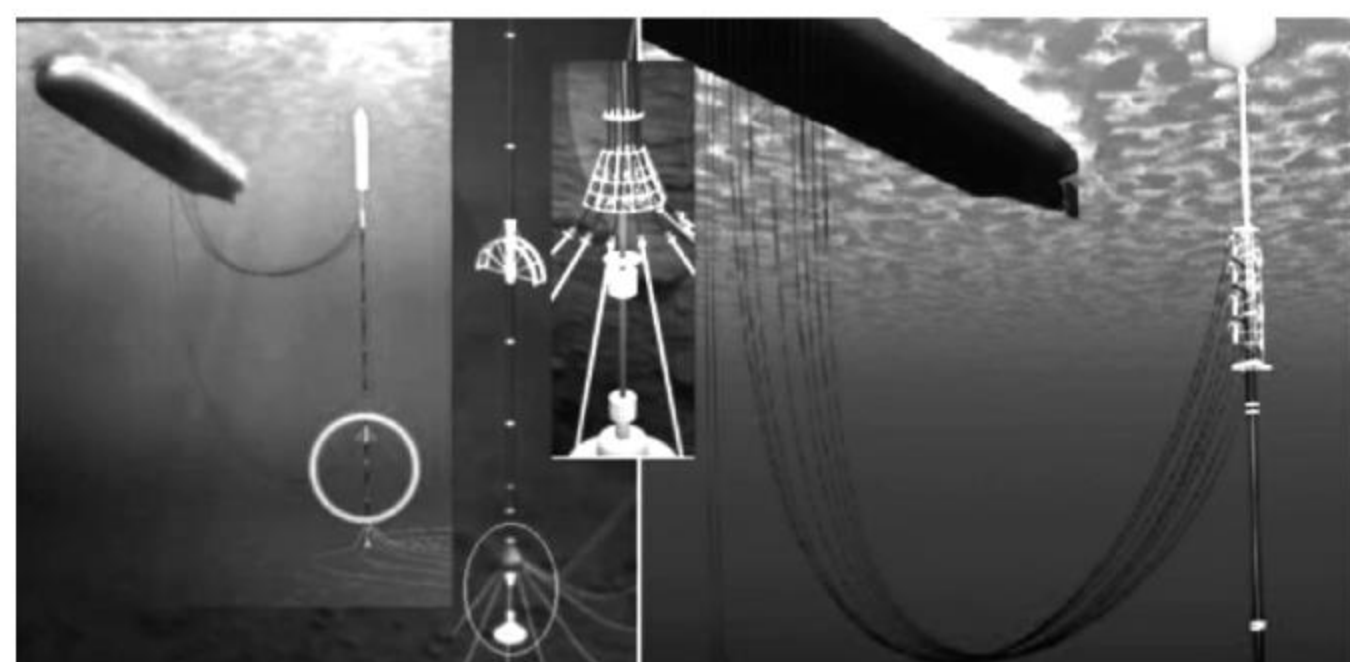


图6 m-pipe复合材料管道应用示意图

TransCanada Pipeline 公司是北美地区天然气和原油运输和储存的领先者。自 20 世纪 90 年代中期以来, TransCanada Pipeline 公司一直在开发和测试一种名为复合材料增强管线的产品, 2001 年冬天, TransCanada Pipeline 公司在艾伯塔省北部布法罗溪的分支上安装了 2 km 长的外径为 0.61 m 的复合材料增强管线。选择的复合材料管道具有较高的力学性能和耐腐蚀性能, 与钢制管道相比, 这种复合增强管线的使用节约了材料成本, 整体的减重降低了运输成本。此外, 由于采用了更薄的钢管, 焊接成本也随之减少, 与传统钢管的使用成本相比, 混合复合增强管线的使用可节省大约 20% 的成本。并且 TransCanada Pipeline 公司于 2001 年 6 月安装的 50 m 试验段中, 首次展示了复合材料增强管线装置中的外壳结构全部利用复合材料, 如图 7 所示^[56]。该装置的目的是在实际管道运行条件下验证弯曲、连接和耐腐蚀性能。图 8 显示了 TransCanada Pipeline 公司利用 CRC-Evans 国际管道公司研制的弯管机, 在现场试验中成功地实现了在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的低温弯管, 结果表明复合材料增强管线弯曲所需的力明显低于高强度钢管。



图 7 复合材料增强管线试验段



图 8 寒冷天气弯曲试验

BP-巴基斯坦公司计划建造 1.524 km 长、直径为 102 mm 的纤维增强复合材料管道, 将巴基斯坦 Badin 地区与发掘的一个石油井相连接^[57]。该管道采用双层结构, 利用热塑性树脂作为内衬, 外层使用无碱玻璃纤维和碳纤维增强环氧树脂基复合材料, 如图 9 所示。复合材料管道铺设后达到了预期效果, 降低了输送过程中存在的潜在风险, 该材料的使用简化了现场铺设操作, 管道的安装速度也达到了 0.5 km/h。

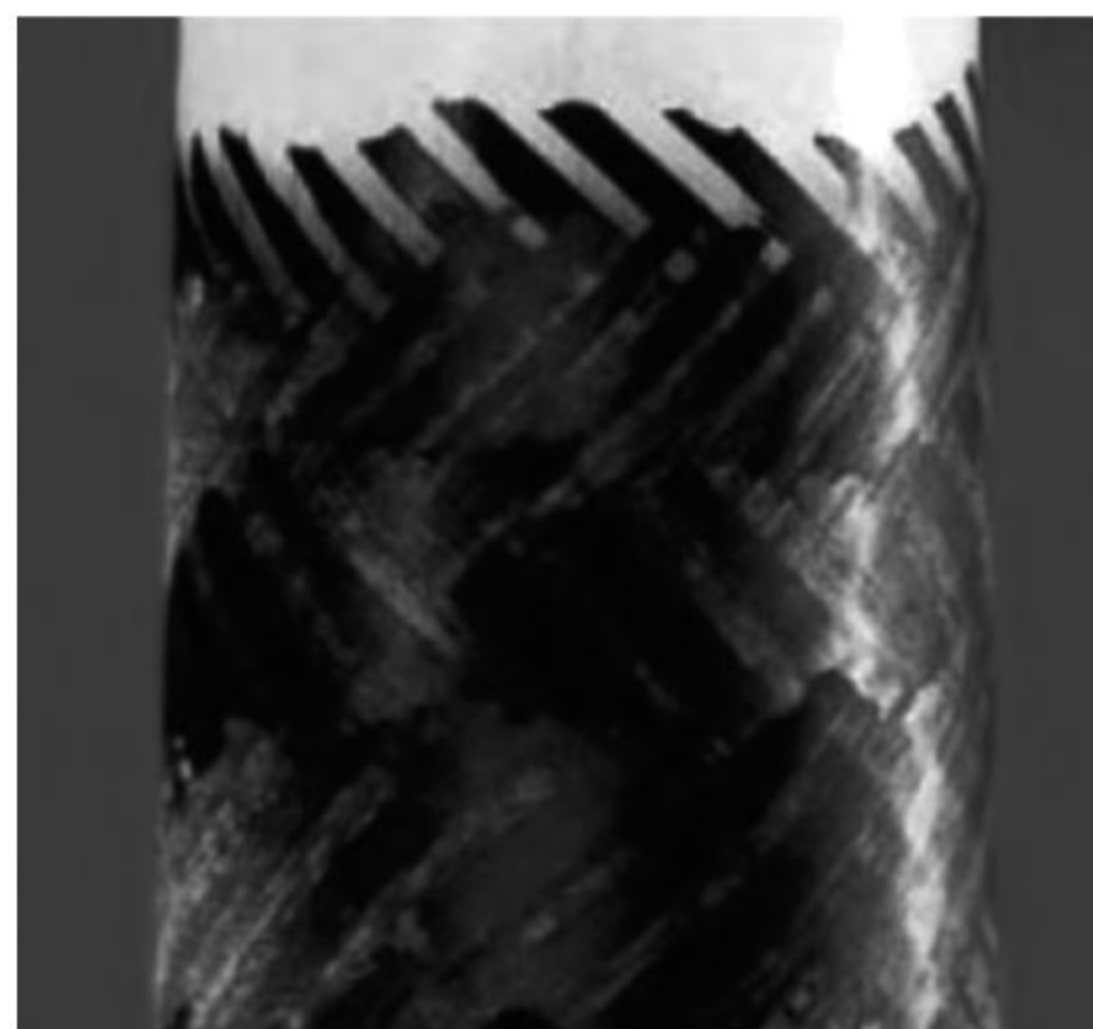


图 9 热塑性内衬和碳/无碱玻璃纤维

美国宾夕法尼亚州 PolyFlow 公司生产的热塑性柔性管线, 应用于西弗吉尼亚州西北部的丘陵地区^[58], 由于地形地貌影响, 管道需要承受高达 500 psi (约 3.5 MPa) 的操作压力。同时, 这些管道与钢管相连, 并在过渡区采取保护措施, 与钢管采用焊接工艺进行连接, 在焊接过程中控制焊缝温度不超过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如图 10 所示。



图 10 热塑性柔性管焊接到钢管道

国内在纤维增强树脂基复合材料管道方面起步较晚，1995 年哈尔滨玻璃钢研究所与美国 Smith 公司合作成立哈尔滨斯达玻璃钢有限公司，开始了玻璃钢管道的生产制造，并首次将高压玻璃钢管应用到我国的大庆油田中。而在我国的西南油气田分公司蜀南气矿，玻璃钢管道也得到了使用，并且 2007 年的取样检测结果表明其强度保持率大于 85%，表现出的良好状态。中国石油管材研究所依托中国石油课题，通过对非金属管的选材、结构设计和制备技术研究，开发出抗硫非金属管新产品（图 11），并在塔里木油田 ZG262-H1 得到成功试用（图 12）。该井 H_2S 平均含量高达 $22\ 900\ mg/m^3$ ，在试用 1 年后对其进行检测评价，结果表明该管材满足酸性气体集输工艺使用要求^[59]。

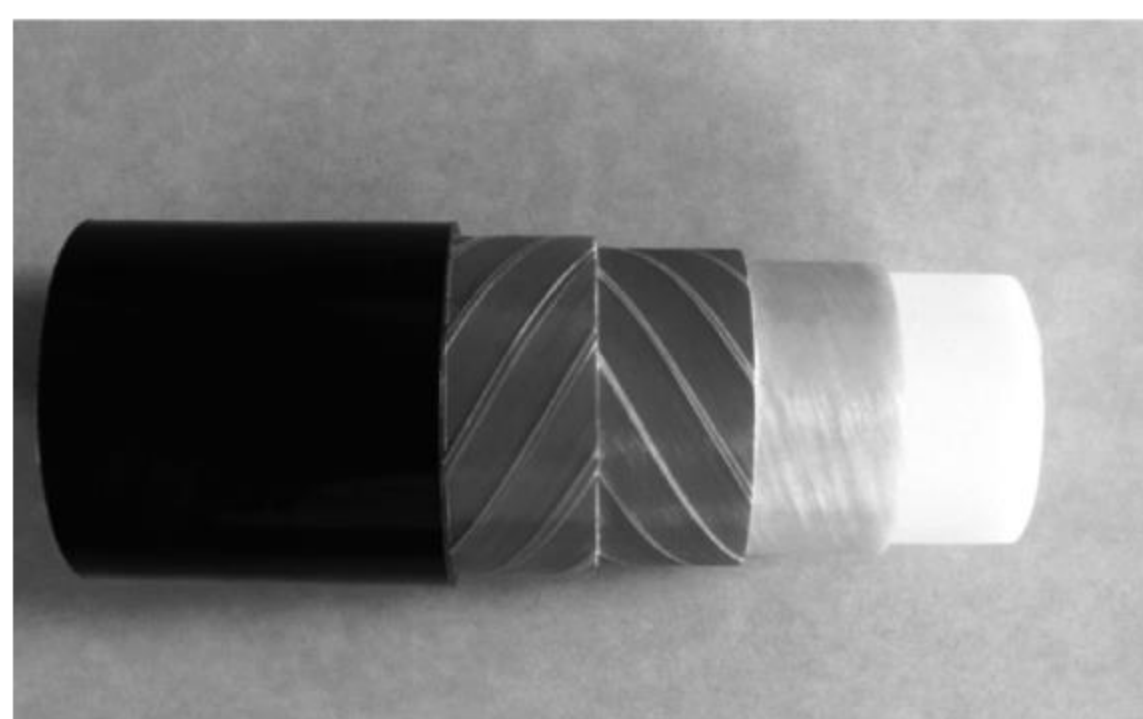


图 11 玻璃纤维增强聚偏氟乙烯连续管



图 12 抗硫非金属管现场应用

在井下应用方面，国内非金属管制管企业已开发出井下用非金属复合连续管，并且得到成功应用。其中长庆油田、胜利油田等将该类非金属复合连续管应用到注水系统，新疆油田在采油系统中进行试用（图 13）^[60]。与传统管道相比，复合材料管道被认为是一种有吸引力的替代材料。这与其优越的耐腐蚀性、高强度和柔韧性相关。通过控制增强材料的种类、数量和方向来调节力学性能使复合管成为高压条件下应用的理想材料。



图 13 采油用非金属连续管（新疆油田）

3 复合材料管道修复

对于修复混凝土、金属支柱这种水下结构材料，也是纤维增强树脂基复合材料在海洋环境中广泛的应用之一。在输油气管道使用过程中，由于输送的油气以及管道外面环境因素的影响，不可避免的会产生腐蚀现象。管道的腐蚀严重时不仅会导致油气的泄漏，更有可能引起火灾、爆炸，威胁人身安全，造成环境污染，带来巨大的经济损失。纤维复合材料修复补强技术作为一种高效快捷的新型修复技术，已经在油气管道维护和大修中得到应用。由于其无需焊接（没有明火）的操作特点，极大地降低了操作的风险性，并且无需中断管道运行。在 20 世纪 70 年代，国外开始用纤维复合材料来修复补强压力管道或容器；在 90 年代之前，主要是用来修复补强二氧化

碳管道、消防队员的呼吸气瓶及轻型气瓶；90年代之后，美国及北欧国家才把此项技术应用到油气输送管道的修复补强^[61]。因此，当非必要更换整个管道的情况下，使用复合材料修复管道是非常好的选择^[62-63]。碳纤维复合材料补强技术用于管道补强具有如下技术优点。

- (1) 免焊不动火，可在带压运行状态下修复。
- (2) 施工简便快捷，操作时间短。
- (3) 碳纤维弹性模量与钢的弹性模量十分接近，有利于复合材料尽可能多的承载管道压力，降低含缺陷管道的应力水平，限制管道的膨胀变形。
- (4) 碳纤维的抗拉强度高，用于管道修复具有极高的安全性；并且碳纤维复合材料的抗蠕变性能优异，其强度随着服役时间增加基本保持不变。
- (5) 碳纤维复合材料补强层厚度小，方便后续的防腐处理。
- (6) 碳纤维补强缠绕、铺设方式灵活，可对环焊缝和螺旋焊缝缺陷补强，还可对弯管、三通、大小头等不规则管件修复。
- (7) 其可以用于腐蚀、机械损伤和裂纹等缺陷修复补强，也可用于整个管段的提压增强处理，应用范围广。

一些研究表明，纤维增强树脂基复合材料可以用于修复钢制管道是非常经济、实用的措施，一般是通过对其外表面添加复合材料包裹层进行修复，许多研究人员评估了这种修复方法对于存在部分腐蚀和严重腐蚀管道的修复有效性^[64-66]。Ahankari C 等人^[67]通过静水压力和吸湿性试验研

究了玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料用于海洋管道修复应用，如图 14 所示。结果表明，修复管在 85 °C 海水中浸泡 40 天后环向应力由近 289 MPa 增加到 358 MPa，但强度下降 43%，弹性模量下降 15%。

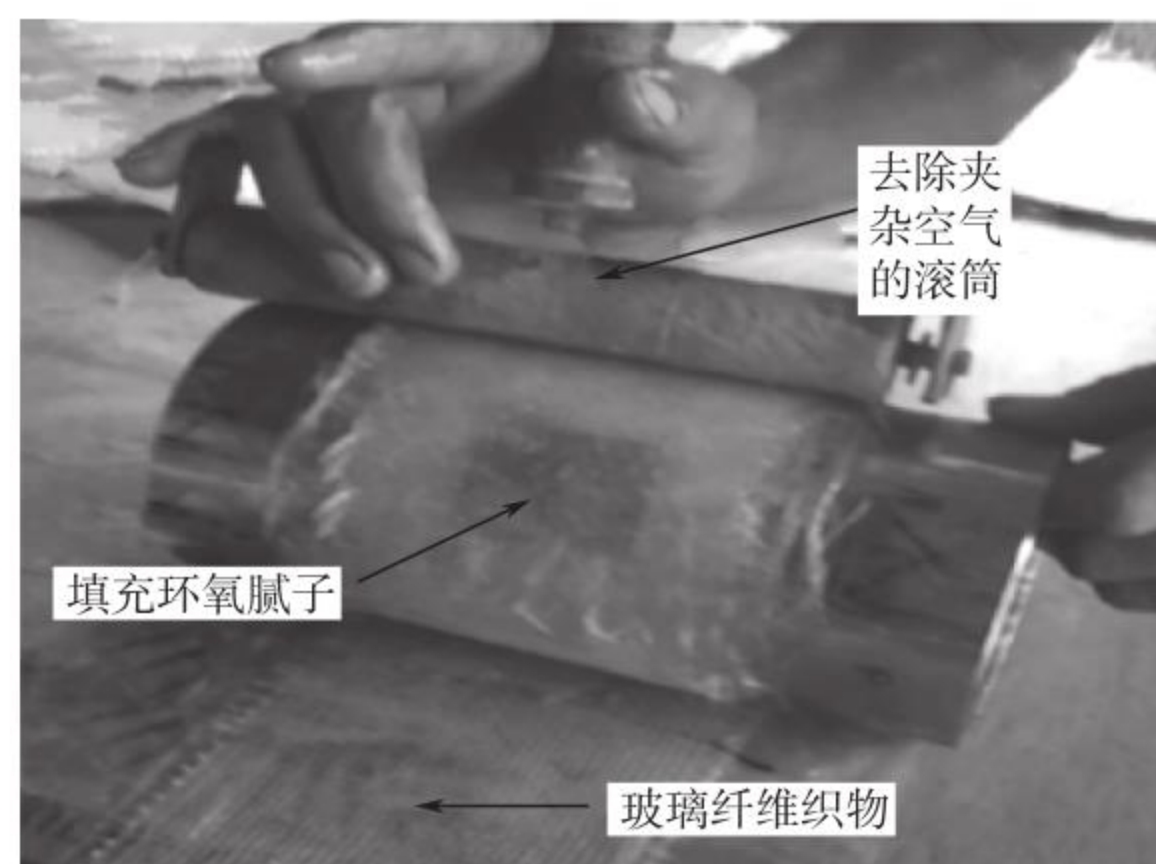


图 14 玻璃纤维增强环氧树脂修复海洋管道

Alexander 等人^[68]研究了用碳纤维增强复合材料修复海上钢质立管，以承受拉伸、弯曲、内压和外部静水压力载荷的可行性，如图 15 所示。纤维材料采用无碱玻璃纤维，用来防腐蚀、抗冲击以及防磨损。环氧树脂被用于在管道外表面粘接碳纤维外壳。修复后进行了爆破压力测试和四点弯曲测试，结果证明了复合材料修复系统的可靠性和安全性。图 16 显示了 Mahdi 等人^[69]利用碳纤维增强复合材料修复陆上钢制管道，分别在 $\pm 47^\circ$ 和 0° 、 90° 方向包裹碳纤维织物-环氧树脂体系，研究了陆上损坏金属管道修复后的内部压力行为，说明了 $\pm 47^\circ$ 修复方向的管道比 90° 环形绕管具有更高的内压承受能力。



图 15 碳纤维增强复合材料修复海上钢质立管

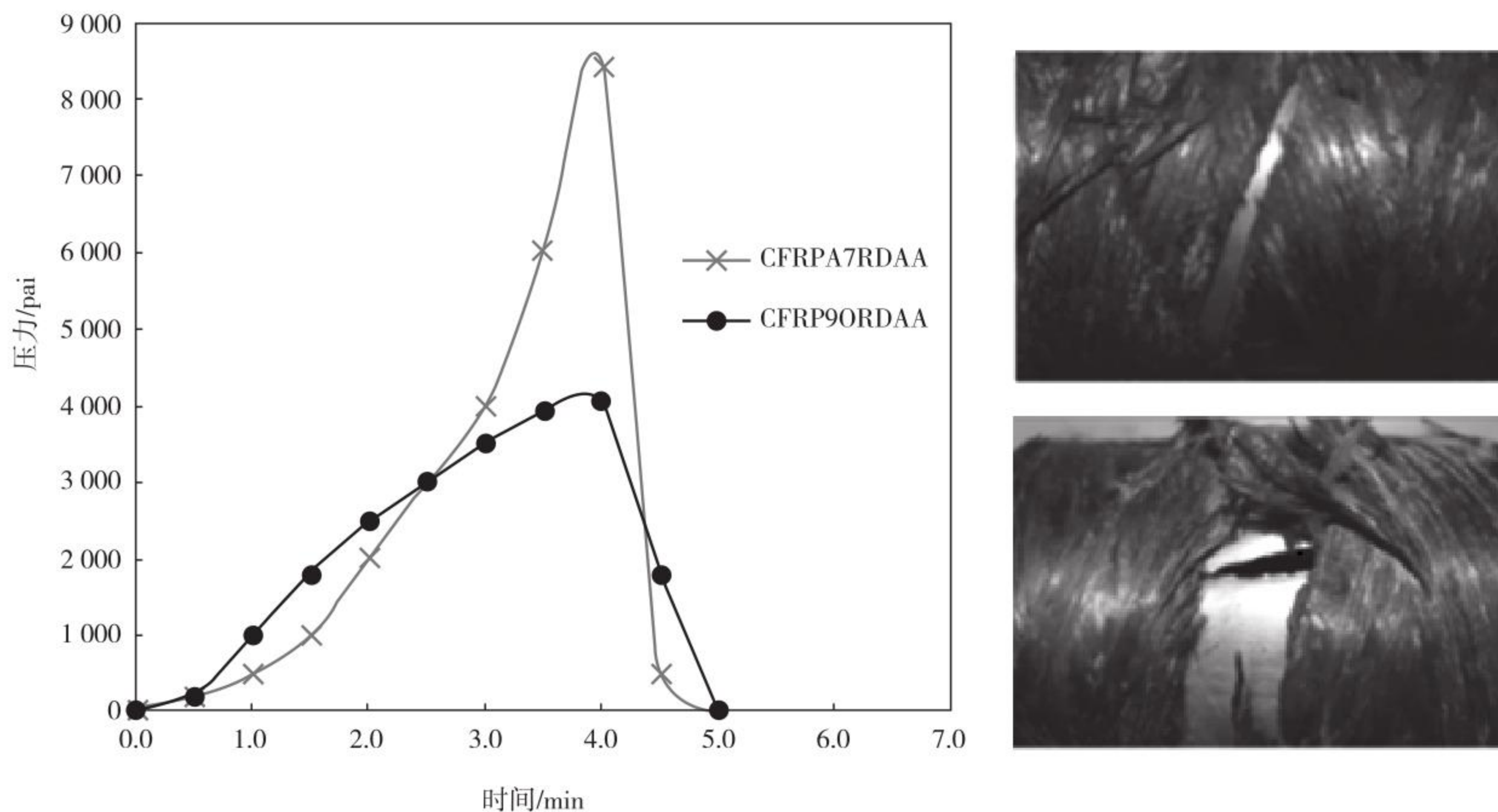


图 16 碳纤维增强复合材料修复陆上钢制管道

Zhang 等人^[70] 研究了一种用于石油传输的耐腐蚀塑料合金复合管。内衬层为聚氯乙烯树脂，外层为玻璃纤维增强热固性树脂基复合材料，可调节管道的周向压力。考虑到纤维增强复合材料的耐高压能力和耐腐蚀性，对其失效压力进行了研究，证明了纤维增强复合材料在修复受损管道、提高爆破压力和减少应变方面是可靠的。Kakaei 等人^[71] 研究了玻璃纤维增强复合材料对地下钢管的加固效果，如图 17 所示。结果表明，采用玻璃纤维复合材料加固埋深达 2.5 m 的埋地内压管道，提高了管道的抗破坏能力，最大等效应变降低了近 35%。由 Clock Spring 公司生产制造的 Clock Spring 系列管道修复复合材料则为增强纤维与聚酯树脂组成的复合材料，其中增强纤维有碳

纤维和玻璃纤维两种。Clock Spring 管道修复材料主要由高强度填料、强力胶、催化剂、复合套筒组成，这些组件均可在工厂预制，现场安装工艺简单、快捷。目前主要应用在北美、欧洲等国家的陆海油气管道上，如图 18 所示。Armor Plate 公司开发并生产的 Armor Plate 管道修复复合材料 APPW 主体由树脂、腻子 and 增强纤维 (Armor Fiber®) 组成。这种管道复合材料可根据不同管道的损坏情况，现场进行相应修复材料的制作和管道的修复，十分适合于情况复杂的环境，如图 19 所示。除此之外，还有 Power Wrap 公司的 PowerSleeve、Beacon Energy Service 公司的 Compo-siSleeve™ 等管道修复复合材料也在世界各大油气田有所应用。

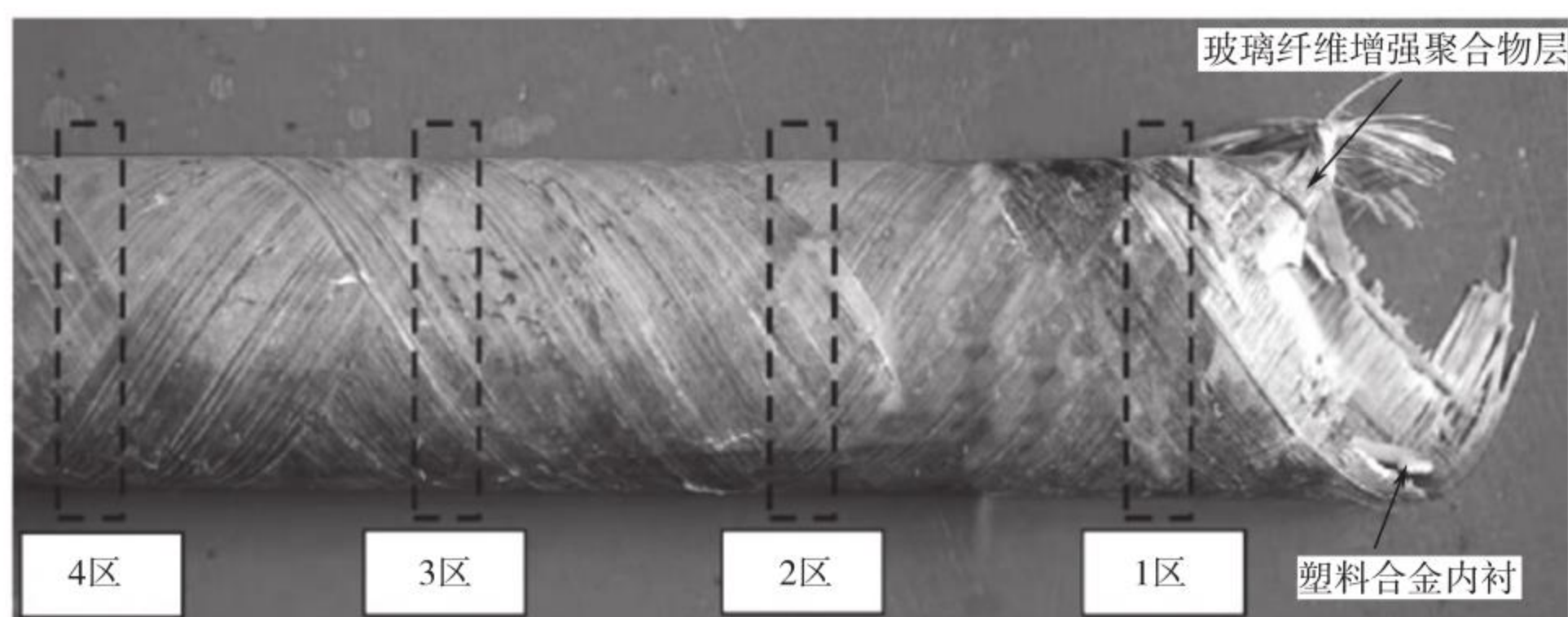


图 17 玻璃纤维增强复合材料加固地下钢管



图 18 Clock Spring 公司生产的用于管道修复的复合材料

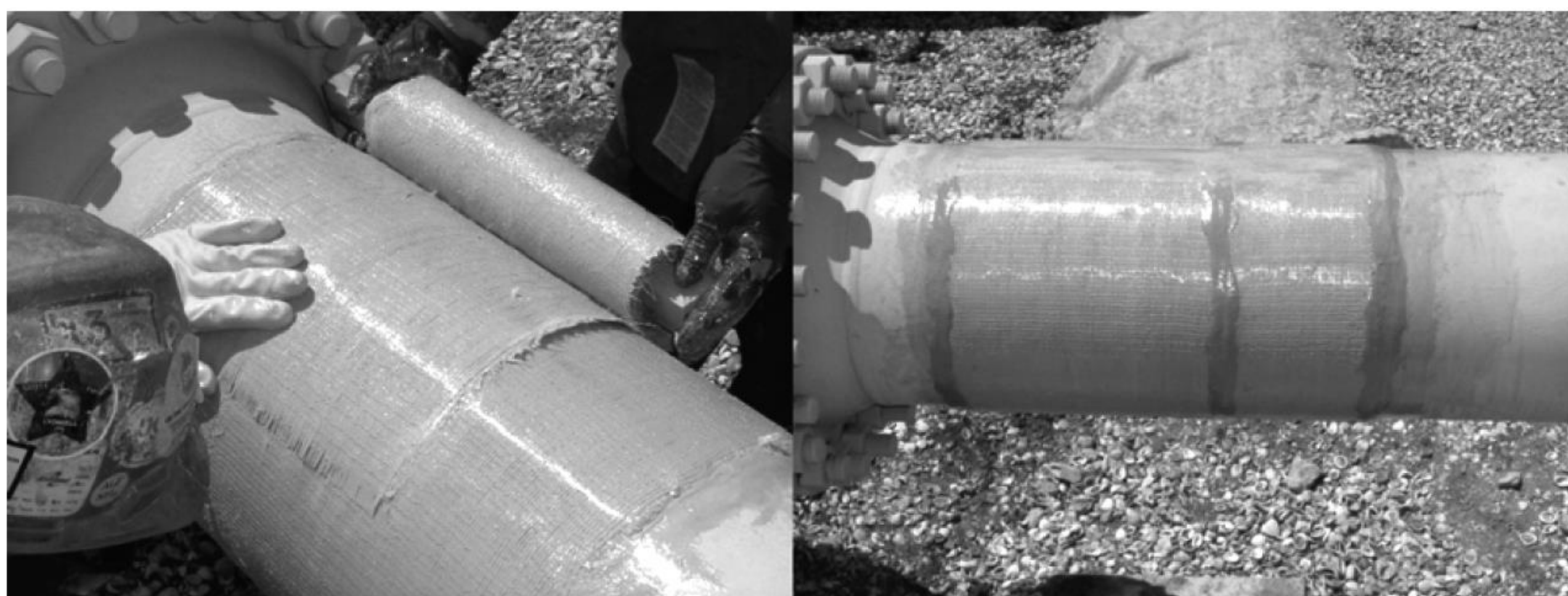


图 19 Armor Plate 公司开发并生产的管道修复复合材料

纤维增强树脂基复合材料既可用于修复，也可用于管柱操作平台的管道或水下结构，还可用于建造输气管道和浮式平台构件，如立管和钢索以及支撑结构。其得益于低重量、高力学性能和耐侵蚀性海水环境，已被证明是近海应用中金属的合适替代品。然而，迄今为止，由于纤维增强复合材料在实际修复中还需要面临更多实际的挑战，金属套筒仍然是最常采用的解决方案，而复合材料则适用于一些风险可控的领域。随着复合材料技术的不断进步和复合材料制造成本的不断降低，其在输油气管道领域的应用必将越来越广泛，同时也将极大提高输油气管道的使用寿命，降低修复成本，可在显著提高使用安全性的同时，

创造更高的经济效益。

4 结语

本文概述了纤维增强复合材料在管道领域的相关研究，以及在石油化工和石油天然气工业中的应用。近年来，在石油和天然气工业以及其他领域，如航空、汽车、民用基础设施、海洋等，纤维增强复合材料是当今的首选材料。在过去的几十年中，纤维增强复合材料变得越来越重要，纤维增强复合材料的出现彻底改变了复合材料设计方法。这些设计方法可以潜在地用于制造需要承受各种苛刻和复杂的载荷以及复杂的物理、化

学等环境条件的材料。在复合材料的应用方面也出现了新领域,这涉及使用复合材料对管道进行修复和改造。各种实际应用表明,纤维增强复合材料可用于修复和延长管道的生命周期,具有非常高的成本效益。由于世界能源资源正在迅速枯竭,在深海和极深海进行勘探的需求已成为一个新的现实,同时也是一个巨大的挑战。其挑战不仅在于开发能够承受深水中恶劣载荷和环境条件的结构部件,而且还包括在这种复杂和恶劣条件下监测结构健康的有效方法。在此,对纤维增强复合材料管道领域的应用提出了一些建议。

(1) 可以用纤维增强复合材料替代生产油气井的陆上生产运输线,通过消除 H_2S 和 CO_2 等流体中的有毒成分造成的腐蚀,提高生命周期总成本,在最具有挑战性的环境条件下承受高温高压。

(2) 在炼油厂中,为了尽量减少被污染产品腐蚀的风险,通常采用铜制管道,但仍没有达到令人满意的效果。可以选择纤维增强复合材料来作为替代,因为其具有更强的抗腐蚀性,足以承受这些复杂条件。

(3) 在钻井过程中,钢、铜质管道虽然具有良好的抗压、抗爆等力学性能,但无法避免腐蚀所带来的影响,可以采用有较好的抗压强度、抗挤压力和抗腐蚀性能的纤维增强复合材料进行代替。

参考文献

- [1] PIMENTA S, PINHO S T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook[J]. Waste Management, 2010, 31(2): 378-392.
- [2] MUJAHID Z M M. Effects of processing parameters for vacuum-bag-only method on void content and mechanical properties of laminated composites [J]. Polymer Composites, 2021, 42(2): 567-582.
- [3] VAFAEI D, HASSANLI R, MA X, et al. Sorptivity and mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with seawater and dredged sea-sand[J]. Construction and Building Materials, 2020.
- [4] H. AHMADI, MILAD SHAKIBA, S. R. MORTAZAVI, et al. Feasibility of using Static-Cast Concrete Transmission Poles fully reinforced with glass-fibre reinforced polymer bars and stirrups: A case study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023: 100746.
- [5] LI J H, HUANG X D, DURANDET Y, et al. A review of the mechanical properties of additively manufactured fiber reinforced composites[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021, 1067(1): 012105.
- [6] MUJAHID Y, SALLIH N, MUSTAPHA M, et al. Effects of Processing Parameters for Vacuum-Bagging-Only Method on Shape Conformation of Laminated Composites [J]. Processes, 2020, 8(9) (2020) 1147.
- [7] MUJAHID Y, SALLIH N, ABDULLAH M Z. A comparison of single-vacuum-bag and double-vacuum-bag methods for manufacturing high-quality laminated composites [C]//Advances in Manufacturing Engineering: Selected articles from ICMPE 2019. Springer Singapore, 2020: 457-467.
- [8] ATTAF B. Ecodesign criteria for composite materials and products[J]. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2013, 5(1): 69-80.
- [9] TOH W, TAN L B, TSE K M, et al. Material characterization of filament-wound composite pipes[J]. Composite Structures, 2018, 206: 474-483.
- [10] LIU W, WANG S. Analytical prediction of buckling collapse for reinforced thermoplastic pipes based on hoop stress analysis of crushed rings[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106203.
- [11] TEE K F, KHAN L R. Reliability analysis of underground pipelines with correlations between failure modes and random variables[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and

- Reliability, 2014, 228(4): 362–370.
- [12] BENMOKRANE B, HASSAN M, ROBERT M, et al. Effect of different constituent fiber, resin, and sizing combinations on alkaline resistance of basalt, carbon, and glass FRP bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(3): 04020010.
- [13] KUMARASAMY S, ABIDIN M S Z, BAKAR M N A, et al. Effects of high and low temperature on the tensile strength of glass fiber reinforced polymer composites [C]//*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018, 370(1): 012021.
- [14] KARIM M A, ABDULLAH M Z, DEIFALLA A F, et al. An assessment of the processing parameters and application of fibre-reinforced polymers (FRPs) in the petroleum and natural gas industries: A review[J]. *Results in Engineering*, 2023: 101091.
- [15] 李晓平, 李愚, 王弗玺, 等. 非金属复合材料管道综述[J]. *石油工业技术监督*, 2017, 33(10): 1–4.
- [16] LANEY P. Use of composite pipe materials in the transportation of natural gas[J]. *INEEL Field Work Proposal*, 2002 (4340–70).
- [17] LIM K S, AZRAAI S N A, NOOR N M, et al. An overview of corroded pipe repair techniques using composite materials[J]. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2015, 10(1): 19–25.
- [18] SOUTIS C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 412(1–2): 171–176.
- [19] HAWILEH R A, ABU-OBEIDAH A, ABDALLA J A, et al. Temperature effect on the mechanical properties of carbon, glass and carbon-glass FRP laminates[J]. *Construction and building materials*, 2015, 75: 342–348.
- [20] PUTRA I W, SHAHRUHASLAN T M, TAN C C, et al. Long term internal pressure strength of spoolable reinforced plastic pipe and comparison of qualification requirement based on API specification 15S and DNVGL ST F119 [C]//*Offshore Technology Conference Asia*. OTC, 2020: D012S001R078.
- [21] ALABTAH F G, MAHDI E. The effect of sizing optimization on the interface between high strength steel and fiber reinforced composite [J]. *Composite Structures*, 2021, 266: 113740.
- [22] MAXINEASA S G, TARANU N. Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP[M]//*Eco-efficient repair and rehabilitation of concrete infrastructures*. Woodhead Publishing, 2018: 673–721.
- [23] ROSEMAN M, MARTIN R, MORGAN G. Composites in offshore oil and gas applications[M]//*Marine Applications of Advanced Fibre – Reinforced Composites*. Woodhead Publishing, 2016: 233–257.
- [24] ZHANG X, LI H, QI D, et al. Failure analysis of anticorrosion plastic alloy composite pipe used for oilfield gathering and transportation [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 32: 35–43.
- [25] KRUIJER M P, WARNET L L, Akkerman R. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP) [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(2): 291–300.
- [26] BAKAR M A A, MUSTAFFA Z, IDRIS N N, et al. Experimental program on the burst capacity of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under impact of quasi-static lateral load [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 128: 105626.
- [27] YU K, MOROZOV E V, ASHRAF M A, et al. A review of the design and analysis of reinforced thermoplastic pipes for offshore applications[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(20): 1514–1530.
- [28] WANG D, ZHANG Z, WANG Q. Study on fatigue failure of glass fibre-reinforced thermoplastic pipe[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(4): 045203.
- [29] MENICONI L C M, REID S R, Soden P D. Preliminary design of composite riser stress joints [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(5): 597–605.
- [30] SALAMA M M, STJERN G, STORHAUG T, et al. The first offshore field installation for a composite riser joint

- [C]//Offshore technology conference. OTC, 2002: OTC-14018-MS.
- [31] SMITH K L, LEVEQUE M E. Ultra-deepwater production systems[R]. Conocophillips, 2005.
- [32] WOOD C A, BRADLEY W L. Determination of the effect of seawater on the interfacial strength of an interlayer E-glass/graphite/epoxy composite by in situ observation of transverse cracking in an environmental SEM [J]. Composites science and Technology, 1997, 57 (8): 1033-1043.
- [33] BEYLE A I, GUSTAFSON C G, KULAKOV V L, et al. Composite risers for deep - water offshore technology: Problems and prospects. 1. Metal-composite riser [J]. Mechanics of composite materials, 1997, 33 (5): 403-414.
- [34] HUANG C. Structural health monitoring system for deep-water risers with vortex - induced vibration: Nonlinear modeling, blind identification, fatigue/damage estimation and vibration control [M]. Rice University, 2013.
- [35] GIBSON A G. The cost effective use of fibre reinforced composites offshore [J]. 2003.
- [36] STANDARD B, ISO B. Petroleum and natural gas industries—Design and operation of subsea production systems [J]. gas industries, 2006, 13628: 10.
- [37] 安世居, 梁威. 国外海洋复合柔性软管研究 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2013(17): 1-8.
- [38] DORGANT P L, BALINT S W, RODENBUSCH G, et al. System selection for deepwater production installations [C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2001: OTC-12966-MS.
- [39] BEYLE A I, GUSTAFSON C G, KULAKOV V L, et al. Composite risers for deep - water offshore technology: Problems and prospects. 1. Metal-composite riser [J]. Mechanics of composite materials, 1997, 33 (5): 403-414.
- [40] SALAMA M M, MERCIER J A. Aramid composite well riser for deep water offshore structures; U. S. Patent 4, 728,224 [P]. 1988-3-1.
- [41] 孙微, 贺福. 碳纤维复合材料在海底油田领域中的应用 [J]. 高科技纤维与应用, 2009, 34(2): 35-37.
- [42] OCHOA O O, SALAMA M M. Offshore composites: Transition barriers to an enabling technology [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65 (15 - 16): 2588-2596.
- [43] Tarnopol' skii Y M, Kulakov V L, Mungalov D D. Composites in offshore technology in the next century [J]. Mechanics of composite materials, 1999, 35: 365-372.
- [44] Ward E G, Ochoa O O, Kim W, et al. A comparative risk analysis of composite and steel production risers [J]. Texas A&M University, 2007.
- [45] VENKATESAN R, DWARAKADASA E S, RAVINDRAN M. Study on behavior of carbon fiber-reinforced composite for deep sea applications [C]//Offshore technology conference. OTC, 2002: OTC-14325-MS.
- [46] Composites in construction: a reality [C]. American Society of Civil Engineers, 2001.
- [47] YE J, CAI H, LIU L, et al. Microscale intrinsic properties of hybrid unidirectional/woven composite laminates: Part I experimental tests [J]. Composite Structures, 2021, 262: 113369.
- [48] YE J, WANG Y, LI Z, et al. Failure analysis of fiber-reinforced composites subjected to coupled thermo-mechanical loading [J]. Composite Structures, 2020, 235: 111756.
- [49] MOROOKA, C. K. COELHO, F. M. SHIGUEMOTO, et al. Dynamic behavior of a top tensioned riser in frequency and time domain. In Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, 28 May-2 June 2006.
- [50] D' ALMEIDA A, BARRETO D W, CALADO V, et al. Thermal analysis of less common lignocellulose fibers [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2008, 91: 405-408.
- [51] ELLYIN F, MASER R. Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubu-

- lar specimens[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(12): 1863–1874.
- [52] HUANG G, SUN H. Effect of water absorption on the mechanical properties of glass/polyester composites [J]. *Materials & design*, 2007, 28(5): 1647–1650.
- [53] AKTAŞ A, UZUN İ. Sea water effect on pinned-joint glass fibre composite materials [J]. *Composite structures*, 2008, 85(1): 59–63.
- [54] AFSHARI M, SIKKEMA D J, LEE K, et al. High performance fibers based on rigid and flexible polymers[J]. *Polymer Reviews*, 2008, 48(2): 230–274.
- [55] 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.
- [56] TAHERI F. Advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites for the manufacture and rehabilitation of pipes and tanks in the oil and gas industry[M]//Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications. Woodhead Publishing, 2013: 662–704.
- [57] KHAN A A, NAEEM M, ASIF M. Use of Spoolable Reinforced Composite (SRC) Pipe for Transfer of Low Pressure Oil & Gas in BP Pakistan [C]//SPE/PAPG Annual Technical Conference. OnePetro, 2005.
- [58] POLYFLOW INC. (2012) ‘Thermoflex Oil Gathering Line Installation’ [Z]. Retrieved May 2012, from Polyflow inc.
- [59] 张冠军, 齐国权, 戚东涛. 非金属及复合材料在石油管领域应用现状及前景 [J]. *石油科技论坛*, 2017, 36(02): 26–31,37.
- [60] 齐国权, 李鹤林, 李循迹, 等. 油田非金属管国内标准的发展与应用 [J]. *油气储运*, 2014, 33(10): 1029–1033.
- [61] 李长春, 杨加栋, 张晓灵, 等. 纤维复合材料在海洋油气输送管道修复补强中的应用研究 [J]. *石化技术*, 2016, 23(10): 80–81.
- [62] CHAUSSEPIED J E C, HUVEY M, ODRU P, et al. Tube of composite material for drilling and/or transport of liquid or gaseous products, in particular for offshore oil exploitation and method for fabrication of such a tube; U. S. Patent 5,443,099 [P]. 1995–8–22.
- [63] GRAHAM-JONES, J. Marine applications of advanced fibre-reinforced composites [M]. Woodhead Publishing, 2015.
- [64] JUNIOR M M W, REIS J M L, DA COSTA MATTOS H S. Polymer-based composite repair system for severely corroded circumferential welds in steel pipes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 81: 135–144.
- [65] ALEXANDER C, FRANCINI B. State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipelines [C]//International Pipeline Conference. 2006, 42614: 823–830.
- [66] ALEXANDER C, BEDOYA J. An updated perspective on using composite materials to reinforce offshore pipelines and risers [J]. *Proc. of IOPF*, 2011: 1–18.
- [67] AHANKARI S, PATIL A. Sea water effect on mechanical performance of steel pipes rehabilitated with glass fiber reinforced epoxy composites [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22: 2490–2498.
- [68] ALEXANDER C, OCHOA O O. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(2): 499–507.
- [69] MAHDI E, ELTAI E. Development of cost-effective composite repair system for oil/gas pipelines [J]. *Composite Structures*, 2018, 202: 802–806.
- [70] ZHANG X, LI H, QI D, et al. Failure analysis of anticorrosion plastic alloy composite pipe used for oilfield gathering and transportation [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 32: 35–43.
- [71] KAKAEI R, HAJIAZIZI M. The effect of GFRP on reinforcing the buried and internally pressurized steel pipes against terrorist attacks [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, 189: 104273.