

柔性非金属软管的研究现状

向东¹ 李铁兵¹ 惠文彬² 孙莹璐³ 刘向东³

1 国家石油天然气管网集团有限公司西部管道有限责任公司

2 国家管网集团东北公司大庆输油气分公司

3 中国科学院长春应用化学研究所

DOI:10.32629/etd.v6i5.16915

[摘要] 柔性非金属软管是一种以高分子聚合物、纤维增强骨架、胶黏剂及特殊功能涂层组成的可弯折可盘卷管道,能够在高压环境下实现流体传输,具有质量轻、可快速操作、方便运输存储、耐腐蚀等特点,广泛应用于石油化工、航空航天、医疗器械、市政工程等众多领域^[1]。随着工业技术的不断进步和各行业对流体传输要求的日益提高,柔性非金属软管的性能和质量受到了越来越多的关注。其研究现状涉及到复合材料、制造工艺、性能测试等多个方面,对于推动相关行业的发展具有重要意义。

[关键词] 非金属; 柔性软管; 纤维增强; 复合材料

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A

Research Status of Flexible Non-Metallic Hose

Dong Xiang¹ Tiebing Li¹ Wenbin Hui² Yinglu Sun³ Xiangdong Liu³

1 West Pipeline Co., Ltd. of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd.;

2 Daqing Oil and Gas Transportation Branch of National Pipeline Network Northeast Company

3 Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences

[Abstract] Flexible non-metallic tube is a bendable and coiled pipeline composed of polymer, fiber-reinforced skeleton, adhesive, and special functional coating. It can achieve fluid transmission under high pressure environment and has the characteristics of light weight, quick operation, convenient transportation and storage, corrosion resistance, etc. It is widely used in many fields such as petrochemicals, aerospace, medical equipment, municipal engineering, etc. With the continuous advancement of industrial technology and the increasing demand for fluid transmission in various industries, the performance and quality of flexible non-metallic hoses have received more and more attention. Its research status involves multiple aspects such as composite materials, manufacturing processes, and performance testing, which is of great significance for promoting the development of related industries.

[Key words] Non-metallic; Flexible tube; Fiber-reinforced; Composite materials

引言

2024年全球软管市场规模约为45亿美元,预计到2034年将达到69亿美元,复合年增长率为4.4%。其中,柔性非金属软管作为金属软管的重要组成部分,其市场规模也呈现出稳步增长的趋势。在石油、化工、航空航天等领域对高压流体传输需求的推动下,柔性非金属软管具备可盘卷运输的优势,可应用于大震巨灾后管道应急抢修、非开挖穿插钢管修复、海上油气田采输及基础设施等各个领域,其市场需求不断扩大。

我国柔性高压软管的市场也在快速发展。以石油工业为例,2024年中国石油工业用柔性软管的市场规模达到86亿元人民币,较2023年同比增长6.8%。其中,高压柔性软管由于技术门

槛较高,市场集中度相对较高,2024年高压柔性软管在整体市场中的占比约为58%,市场规模达到50亿元人民币,预计2025年将达到54亿元人民币。随着中国工业化进程的加速和各行业对高端装备的需求增加,柔性高压软管在中国市场的前景十分广阔。

1 柔性高压软管的技术研究现状

1.1 材料研究

柔性非金属复合软管由外至内包括外树脂保护层、有机纤维承压层、内胶层,是一种轻量化、可盘卷运输、快速铺设的高性能管材,其重量仅为钢管的1/5~1/10,施工速度提升3倍以上,具有耐腐蚀、长寿命、易施工存储、维护成本低等优势^[2]。各层之间通过特定的复合工艺结合在一起,以实现软管的综合性

能。在一些高压液压软管中,增强层可能由多层钢丝编织或缠绕组成,以提高软管的耐压性能。同时,内胶层和外胶层的厚度和性能也会根据具体应用场景进行优化设计。添加导静电金属丝可以实现其抗静电性能。

内胶层直接与传输的流体接触,需要具备良好的耐腐蚀性、耐油性和密封性。目前,常用的内胶层材料有聚乙烯(PE)、热塑性聚氨酯(TPU)、丁腈橡胶(NBR)、氟橡胶(FKM)等。例如,在石油工业的酸化压裂场景中,德石股份的超耐磨酸化压裂软管采用UPE+HNBR材质做内衬层,不仅可以耐受强酸碱腐蚀,还可以满足含砂量30%的工况下使用寿命不少于2000小时的要求。增强层是柔性高压软管承受压力的关键部分,传统的增强层材料主要是钢丝编织或缠绕。随着技术的发展,一些新型材料也逐渐应用于增强层,如芳纶纤维等。芳纶纤维具有高强度、轻量化的特点,用其替代传统钢丝增强层,可以减轻软管的重量并提高柔韧性。此外,还有一些企业采用高强度合成纤维与钢丝混合增强的方式,以提高软管的综合性能。外胶层主要起到保护增强层和内胶层的作用,需要具备良好的耐磨性、耐候性和耐油性。常见的外胶层材料有氯丁橡胶(CR)、乙丙橡胶(EPDM)、聚氨酯(PU)等。一些特殊应用场景下,还会使用具有阻燃、防静电等功能的外胶层材料。

1.2 成型工艺

1.2.1 编织与缠绕工艺

增强层是柔性复合多层材料的核心承力层,编织和缠绕是增强层制造的主要工艺^[3]。传统的编织工艺采用机械编织设备,将纤维按照一定的规律编织在内胶层外。随着技术的进步,出现了一些新型的编织工艺,如电子编织技术,可以实现更精确的编织角度和密度控制,提高增强层的均匀性和性能。缠绕工艺则是将钢丝或纤维缠绕在内胶层外,形成增强层。缠绕工艺的优点是可以根据软管的压力要求和使用工况,灵活调整缠绕的层数和角度,以达到柔性软管的安全使用强度要求。

1.2.2 接头制造工艺

接头是柔性高压软管与其他设备连接的关键部件,其质量直接影响软管的使用安全性和可靠性。接头的制造工艺包括接头的设计、加工和装配等环节。在接头设计方面,需要考虑与软管的连接方式、密封性能和机械强度等因素。常见的接头连接方式有法兰连接、螺纹连接和快速接头连接等^[4]。在加工工艺方面,需要保证接头的尺寸精度和表面质量,以确保与软管的紧密配合。装配工艺则需要确保接头与软管的连接牢固可靠,同时保证密封性能良好。例如,德石股份的双功能区接头扣压技术确保接头与管体结合强度提升50%,杜绝脱扣风险。

1.3 性能测试与评估

1.3.1 压力测试

压力测试是评估柔性高压软管耐压性能的重要手段^[5]。通过对软管施加一定的压力,观察软管是否出现泄漏、破裂等现象,以确定软管的耐压极限。压力测试可以采用静态压力测试和动态压力测试两种方式。静态压力测试是将软管固定在测试设备

上,缓慢施加压力,观察软管的性能变化。动态压力测试则是模拟软管在实际使用中的压力变化情况,对软管进行循环压力测试,以评估软管的抗疲劳性能。

1.3.2 拉伸测试

软管材料的拉伸性能是确定软管整体力学性能所需要的基本参数。一般采用电子万能拉伸试验机对软管样条分别进行轴向和环向两个方向的拉伸试验,以获得复合软管材料本体的拉伸强度及断裂伸长率。

1.3.3 耐腐蚀测试

耐腐蚀测试主要用于评估软管内胶层和外胶层对不同化学介质的耐受能力。软管在运行过程中长时间与内部液体接触,内部液体会进入材料中,造成材料拉伸强度、断裂伸长率和硬度等物理化学性能发生变化同时,软管材料中的某些可溶性化学成分,在易溶性液体中易被抽走,从而改变软管材料的性能,因此测试材料在浸泡后的性能具有重要意义。将软管浸泡在特定的化学介质中,经过一定的时间后,观察软管的外观变化、性能指标如硬度、拉伸强度等的变化,以确定软管的耐腐蚀性能。

1.3.4 脆性温度试验

输油软管运行时暴露在自然环境中,如果环境温度过低,材料会脆化,受到冲击时会产生裂纹甚至断裂,影响管道密封性,造成泄漏。因此通过在规定温度下冲击试样,判断是否产生破坏来测定管体材料的脆性温度,具有重要意义。试验主要目的是得到软管复合材料在一定条件下受冲击产生破坏时的最高温度,观察试样在规定温度下是否出现断裂、裂纹及肉眼直接可见微孔。

1.3.5 磨损试验

柔性软管在贮存运输时,会呈现盘卷或者折叠的状态,在安装过程中跟地面发生摩擦,会造成基体材料的损伤,增加纤维层暴露的风险。为了模拟便于定量模拟管体与地面的磨损速率,推荐通过沙子冲刷管体来模拟软管与地面之间的相对滑动磨损试验的目的是测得不同冲刷速度下,软管材料的磨损速率及厚度变化。磨损速率由试样重量的减少来确定。

2 柔性高压软管的应用研究现状

2.1 石油工业

在石油工业中,柔性高压软管是油气输送系统中的关键组件。它广泛应用于陆地油气田的集输系统、海上平台及深海管道系统等。在陆地油气开采中,中低压柔性软管用于一般的油气输送,而高压柔性软管则主要用于压裂作业等需要高压输送流体的场景。在海上油气开发中,柔性高压软管因其安装便捷、维护成本低等优势,成为深海油气输送系统中的核心组件。例如,在深海油气田的开发中,需要使用高压柔性软管将海底的油气资源输送到海上平台^[6]。

2.2 工程机械

工程机械如挖掘机、装载机、起重机等设备中,液压系统是其重要的组成部分。柔性高压软管用于连接液压泵、液压缸等液压元件,实现高压液体的传输。随着工程机械向大型化、智能

化方向发展,对柔性高压软管的性能要求也越来越高。需要软管具备更高的耐压性能、抗疲劳性能和柔韧性,以满足工程机械在复杂工况下的工作需求。

2.3 航空航天

在航空航天领域,柔性高压软管用于燃油输送、液压系统和环境控制等关键系统。由于航空航天设备对安全性和可靠性的要求极高,因此对柔性高压软管的性能要求也非常严格。航空航天用的柔性高压软管需要具备轻量化、高强度、耐高温、耐低温等特性,同时还需要满足严格的防火、防静电等安全标准。例如,在飞机的液压系统中,需要使用高性能的柔性高压软管来保证液压系统的正常运行,确保飞机的操控性能和安全性。

2.4 其他领域

除了石油工业、工程机械和航空航天领域,柔性高压软管还在其他一些领域得到应用。例如,在矿山设备中,用于高压液压系统的流体传输;在冶金机械中,用于高温、高压环境下的流体输送;在汽车工业中,用于汽车的制动系统、燃油系统等。随着各行业对装备性能要求的不断提高,柔性高压软管的应用范围还将不断扩大。

3 柔性高压软管的发展趋势

3.1 高性能化

随着各行业对装备性能要求的不断提高,柔性高压软管将朝着高性能化方向发展。这包括提高软管的耐压性能、耐腐蚀性、耐磨性能和抗疲劳性能等。例如,在材料方面,将不断研发和应用新型的高性能橡胶材料、增强材料等,以提升软管的综合性能。在结构设计方面,将采用更优化的多层结构和非粘结型结构等,提高软管的性能和可靠性。

3.2 智能化

随着物联网、大数据等技术的发展,柔性高压软管也将朝着智能化方向发展。未来的柔性高压软管可能会集成传感器等智能元件,实现对软管的压力、温度、磨损等状态的实时监测和反馈。通过智能化的监测系统,可以及时发现软管的潜在问题,提前进行维护和更换,提高设备的运行安全性和可靠性。例如,德石股份将推进压裂软管产品与智能监测的集成,实现实时健康管理。

3.3 轻量化

在一些对重量有严格要求的领域,如航空航天、新能源汽车等,柔性软管的轻量化发展趋势明显。通过采用新型的轻量化材料如芳纶纤维等替代传统的钢丝增强层,以及优化软管的结构设计,减少材料的使用量,降低软管的重量,同时保证软管的性能不受影响。

3.4 绿色化

随着全球对环境保护的重视程度不断提高,柔性高压软管也将朝着环保化方向发展。这包括采用环保型的橡胶材料和添加剂,如生物基橡胶、可降解添加剂等,减少对环境的污染。同

时,在软管的制造工艺和回收利用方面,也将更加注重环保,实现可持续发展。

4 结论

柔性高压软管作为一种关键的工业部件,在石油、化工、机械、航空航天等众多领域有着广泛的应用。目前,其市场规模不断扩大,技术研究也取得了显著的进展。在材料研究方面,新型的高性能材料不断涌现;在结构设计方面,多层结构和非粘结型结构等不断优化;在制造工艺方面,编织、缠绕、硫化等工艺不断改进;在性能测试与评估方面,也形成了较为完善的测试体系。然而,随着各行业对装备性能要求的不断提高,柔性高压软管仍面临着诸多挑战,如在极端工况下的性能提升、智能化监测技术的进一步完善等。未来,柔性高压软管将朝着高性能化、智能化、轻量化和环保化的方向发展,以满足不同行业的需求,为全球工业的发展提供更加可靠的支持。同时,国内企业也应不断加强技术创新和研发投入,提高产品质量和性能,在国际市场竞争中占据更有利的地位。

[参考文献]

- [1] A H, I N, C G I, et al. Research on mechanical and geometrical characteristics of materials used for flexible tubing production[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 72401: 2004-01-2004.
- [2] 王洪峰, 哈峰凯, 朱紫琦. 内穿插柔性复合软管在非开挖领域的应用[J]. 非开挖技术, 2023(4), 57-60.
- [3] 侯卓健, 刘丰, 单忠德, 等. 不同导向结构材料对复合材料柔性导向三维织造层厚的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7): 60-64.
- [4] 王元, 莫仁杰, 王勇. 纤维增强复合柔性软管的失效与修复[J]. 中国造船, 2019(60): 244-251.
- [5] 李风, 张绍东, 王观军, 等. 玻纤带增强黏合型HDPE内衬柔性复合管性能试验研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(S1): 74-77.
- [6] 吕长亮. 某海上油田混输柔性软管首次在线通球分析研究[J]. 石油和化工设备, 2021, 24(09): 20-22.

作者简介:

向东(1985--),男,汉族,四川广安人,本科,党总支书记,高级工程师,研究方向: 应急与维抢修。

李铁兵(1985--),男,汉族,四川省射洪县人,本科,高级工程师,研究方向: 油气长输管道维抢修业务。

惠文彬(1987--),男,汉族,甘肃宁县人,本科,工程师,研究方向: 站场设备设施维修、维护,油气管道维抢修复产。

孙莹璐(1995--),女,汉族,山东省蓬莱县人,博士,助理研究员,研究方向: 高分子柔性复合材料研究。

刘向东(1982--),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,研究方向: 高分子多层复合材料。