

# 双金属复合管在海洋石油管道中的应用探讨

肖三雄 王齐君 郑 艳(西安市产品质量监督检验院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 随着全球能源需求增长, 双金属复合管在海洋石油管道系统中的应用日益凸显, 其通过内外层不同金属材料的冶金结合, 兼具耐腐蚀和高强度特性, 有效应对深海高压、低温、高盐度等极端环境挑战。该材料在提升管道使用寿命、降低成本及增强安全性方面展现出巨大潜力, 推动了海洋油气行业的技术革新与可持续发展。通过优化连接技术、防腐技术、耐磨性能及构建综合性能评价体系, 双金属复合管在保障系统安全、延长使用寿命的同时, 降低了建设和维护成本, 为海洋石油开采提供了强有力的技术支持。

**关键词:** 双金属复合管; 海洋石油管道; 耐腐蚀性

随着全球能源需求的增长及海洋油气资源开发的不断深入, 传统单一材料的石油管道已难以满足日益严苛的海洋环境要求, 特别是在深海高压、低温、高盐度及存在腐蚀性介质的复杂条件下, 管道材料面临着前所未见的挑战; 双金属复合管凭借其独特的冶金结合技术, 将耐腐蚀合金与高强度碳钢的优势集于一体, 不仅有效解决了单一材料在抗腐蚀、机械强度及经济性方面的局限性, 更以其卓越的综合性能成为了海洋石油管道系统中不可或缺的关键材料, 其在提升管道系统使用寿命、降低成本及增强安全性等方面展现出的巨大潜力, 正逐步推动着海洋油气行业的技术革新与可持续发展。

## 1 双金属复合管概述

### 1.1 双金属复合管的定义与结构

双金属复合管是由两种不同金属材料通过冶金结合而成的新型管材, 一般内层选用耐腐蚀的不锈钢或镍基合金, 外层则用成本较低且机械强度高的碳钢或低合金钢。这种设计使管材同时拥有优秀的抗腐蚀能力和机械性能, 并保持了经济性。

双金属复合管多呈圆筒状, 依据需求也可定制形

状, 内层抵御介质腐蚀, 外层抵抗外部压力与机械应力。生产过程中需经过拉伸、弯曲和冲击等测试确保质量。因其优越特性, 该管材广泛应用于化工、海水淡化及海洋工程等领域, 尤其适合于海洋石油管道系统, 能有效应对海水和原油中的腐蚀性物质, 延长使用寿命, 降低维护成本, 提升安全性与经济效益。在深海采油平台和海底输油管道中, 双金属复合管是关键材料。

### 1.2 双金属复合管的性能特点

双金属复合管作为一种先进的材料解决方案, 在海洋石油管道的应用中展现了其独特的性能优势。这类管道通常由外层耐腐蚀合金与内层成本较低但强度高的钢材构成, 通过冶金结合的方式形成一个整体, 既具备了外层材料优异的抗腐蚀性、耐磨性和耐高温高压性能, 又保持了内层材料良好的机械强度及加工性能, 如表 1 所示。

双金属复合管的关键性能特点包括但不限于以下几点: 第一, 其显著提升了管道系统的使用寿命, 尤其是在海水、盐雾等恶劣环境下的防腐蚀能力; 第二, 它能够有效降低整个管道工程的成本, 因为只需要在关键部位使用昂贵的合金材料; 第三, 由于内外层材

表 1 双金属复合管性能特点及相关参数

性能特点	描述	相关参数
抗拉强度	表示材料抵抗断裂的能力	500 MPa
屈服强度	材料开始发生塑性变形的应力点	300 MPa
耐腐蚀性	对特定环境下的抗腐蚀能力	在 3% NaCl 溶液中 1000 小时无明显腐蚀
热膨胀系数	温度变化时尺寸的变化率	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
导热系数	材料传导热量的能力	40 W/(m · K)
使用温度范围	材料适用的温度区间	-20°C 至 +250°C

表 2 双金属复合管与纯不锈钢管和碳钢管的性能特点比较

性能指标	双金属复合管	纯不锈钢管	碳钢管
耐腐蚀性	非常好（内层不锈钢）	非常好	一般
强度与刚性	良好（外层碳钢）	一般	非常好
耐温性（℃）	200-400	800-1500	100-300
热传导率（W/m · K）	15-30	16-24	40-60
安装成本（相对）	低	高	低

料的合理搭配，使得该类管道在承受高压流体输送时表现出色，能够适应深海等极端条件下的作业要求；除此之外，双金属复合管还具有较好的焊接性和成型性，便于现场施工与维护。

## 2 海洋石油管道环境与材料要求

### 2.1 海洋石油管道的环境特点

海洋石油管道通常铺设于海底或穿越海洋环境，这些环境条件极为苛刻，包括但不限于深海高压、低温、高盐度海水以及可能存在的硫化氢（H<sub>2</sub>S）和二氧化碳（CO<sub>2</sub>）等腐蚀性介质。此外，海底地形复杂多变，管道需要承受来自海流冲击、海底滑坡等地质活动的影响，这些因素都对管道的结构完整性和使用寿命提出了严峻挑战。

深海环境压力巨大，温度极低，普通钢材易脆化，氯离子加速腐蚀，H<sub>2</sub>S可导致应力腐蚀开裂和氢致开裂，威胁管道安全。设计和选材时需考虑这些因素，确保材料在极端条件下稳定，保障石油输送系统的可靠性和安全。双金属复合管，内层耐蚀合金与外层高强度碳钢组合，是应对这些挑战的理想选择之一。

### 2.2 海洋石油管道的材料性能要求

在海洋石油管道的设计与施工中，为了确保管道的安全性和长期可靠性，材料必须具备优秀的耐蚀性、抗压强度、韧性及良好的焊接性能。

①耐腐蚀性。在海洋环境中，材料不仅要抵抗海水的化学侵蚀，还需对抗海生物附着造成的生物腐蚀以及由海流引起的冲刷腐蚀。因此，采用具有优异耐蚀性的合金材料成为必然选择。

②材料应具有良好的机械性能。考虑到海底复杂的地形和深水压力，所选材料还应拥有足够的抗拉伸和抗压缩能力，以防止在安装过程中或运行期间因外部负载而导致变形甚至破裂。此外，良好的韧性可以保证材料在受到冲击时不轻易断裂，这对于预防意外事故尤为重要。

③焊接性能。良好的焊接性能意味着能够实现无

缝对接，减少泄漏风险，并且便于现场施工操作，提高建设效率。双金属复合管结合了不同金属的优点，如内层可选用耐蚀性强的不锈钢，外层则使用具有良好机械性能的碳钢或合金钢，这样既满足了耐蚀需求又兼顾了成本控制，是海洋石油管道的理想选择。

### 2.3 双金属复合管在海洋环境中的优势分析

海洋石油管道所处的环境复杂多变，对材料的要求极为苛刻。双金属复合管在此环境中具有以下优势：

①耐腐蚀性强。双金属复合管外层采用不锈钢、镍基合金等耐腐蚀材料，能够有效抵抗海水、微生物等腐蚀介质的侵蚀，延长管道使用寿命。

②高强度。双金属复合管的内层通常采用碳钢等高强度材料，能够满足管道输送过程中的压力要求，确保管道安全运行。

③良好的耐温性。双金属复合管能适应海洋环境中温度变化较大的特点，保持管道性能稳定。

④经济效益显著。相较于单一不锈钢管道，双金属复合管的成本更低，且安装、维护方便，降低了海洋石油管道的整体运营成本。

如表 2 所示，双金属复合管在海洋石油管道中的应用具有明显的优势，有助于提高管道系统的安全性和经济效益。

## 3 双金属复合管在海洋石油管道中的应用策略

### 3.1 设计与选型原则

在设计与选型双金属复合管用于海洋石油管道时，需要遵循一系列严格的原则以确保系统的安全性、可靠性和经济性。选择材料时，必须考虑输送介质特性，如腐蚀性、温度和压力，以确定内层耐蚀合金和外层结构钢的材质。设计复合管时，应强化其抗腐蚀性和机械强度，以应对海洋环境的侵蚀、冲击和腐蚀。连接方式也至关重要，需确保接口密封性和强度，通常采用焊接或机械接头。选型时，还需考虑施工、维护和运营成本，综合评估以选择最合适的双金属复合管规格和型号，确保海洋石油管道系统高效稳定运行。

### 3.2 安装与施工要求

为应对海洋环境的腐蚀性，复合管安装必须遵循设计规范，确保密封性和抗腐蚀性。施工前要检查双金属复合管无损伤且达标。使用专业工具和技术进行安装，避免操作不当导致损坏。在海底复杂地形下，采用S-lay或J-lay技术减少应力，保证管道稳定安全。设置支撑结构，如柔性接头，吸收外力，保护管道性能。施工后进行全面质量检测，包括压力和泄漏测试，确保管道系统安全可靠，满足长期使用。这些措施都是为了最大限度地发挥双金属复合管的优势，提高海洋石油开采的效率和安全性。

### 3.3 维护与管理措施

为确保海洋石油管道中双金属复合管的长期稳定运行，必须定期监测管道腐蚀，使用超声波和磁粉检测技术评估管道健康；建立严格操作规程和专业培训操作人员，确保正确执行检查和应对措施；构建环境监控系统，通过智能化管理系统预测故障并制定维修计划，保障管道安全可靠，延长使用寿命。同时，加强与科研机构合作，优化材料性能和施工工艺，提升管道抵抗海洋恶劣条件的能力。

## 4 双金属复合管在海洋石油管道中的性能优化

### 4.1 连接技术的优化

在海洋石油管道中使用双金属复合管时，优化连接技术至关重要。采用先进的焊接技术和合适的密封材料可以提升管道在海洋环境中的可靠性和耐久性。优化焊接参数和选择适当的填充材料与保护气体能减少焊接缺陷，提高焊缝质量，并增强抗腐蚀能力。高性能密封圈或密封胶可形成有效的防水防腐屏障，确保管道系统安全。这些技术的综合应用增强了双金属复合管的连接强度和抵抗盐雾侵蚀及海水冲击的能力，为海洋石油管道提供稳定工作条件。

### 4.2 防腐技术的提升

在海洋石油管道中应用双金属复合管能够显著提高防腐性能，通过优化内外层金属材质的选择与结合工艺，进一步增强了管道对海水腐蚀及海底复杂环境的抵抗力。采用高耐蚀合金作为内层材料，不仅有效隔离了外部腐蚀介质，还减少了内部原油成分对管道的侵蚀；外层则利用高强度钢材提供足够的机械支撑与保护，同时结合新型涂层技术，如熔融环氧粉末涂层或聚氨酯涂层等，实现双重防护效果，从而大幅度延长了管道使用寿命，降低了维护成本，为海洋石油输送系统的长期稳定运行提供了可靠保障。

### 4.3 耐磨性能的增强

在海洋石油管道中应用双金属复合管能够显著提升系统的耐磨性能，这主要得益于其内层选用的高硬度材料如高铬铸铁或硬质合金等，这些材料具有优异的抗磨损能力。通过优化复合工艺，如采用离心铸造或爆炸复合技术，可以进一步提高内层与外层金属之间的结合强度，从而增强整体结构的耐磨性和耐腐蚀性，有效延长管道的使用寿命。此外，针对不同海域环境的具体条件进行定制化设计，比如调整复合管的壁厚或是改进表面处理工艺，都能够更好地适应复杂多变的工作环境，确保在长期服役过程中减少磨损，进而保障海洋石油输送的安全性和经济性。

### 4.4 综合性能评价体系构建

在海洋石油管道中应用双金属复合管时，为了实现其综合性能的全面优化，有必要构建一个科学合理的综合性能评价体系，该体系应涵盖材料的耐腐蚀性、机械强度、焊接性能以及服役环境适应性等多个方面，通过量化各项指标并设定权重，可以系统评估双金属复合管的整体表现，从而指导材料的选择与工艺改进；同时，还需考虑长期服役条件下的稳定性和维护成本，确保在复杂多变的海洋环境中，双金属复合管能够保持优良的传输效率与结构完整性，最终实现经济效益与安全性的双重保障。

## 5 结论

综上所述，双金属复合管凭借其独特的结构设计与卓越的性能特点，在海洋石油管道系统中展现出无可比拟的优势，不仅有效应对了深海高压、低温、高盐度及腐蚀性介质等极端环境挑战，而且通过优化连接技术、提升防腐性能、增强耐磨能力以及构建综合性能评价体系等措施，实现了对传统单一材料管道的超越，在确保系统安全性和延长使用寿命的同时，大幅降低了建设和维护成本，为海洋石油开采的高效与可持续发展提供了强有力的技术支持。

### 参考文献：

- [1] 闫可安,许天旱,韩礼红,等.双金属复合管的研究现状与发展趋势[J].化工技术与开发,2020,49(10):45-50.
- [2] 刘亮.双金属复合管海水腐蚀机理研究[J].涂层与防护,2023,44(10):7-10+15.

### 作者简介：

肖三雄（1982-），男，壮族，广西桂林人，工程师，本科，学士，研究方向：检验检测。