

防腐层与阴极保护联合技术在燃气管道中的应用

申利芬

津燃华润燃气有限公司天津市宝坻分公司 天津 301800

摘要：本文聚焦于防腐层与阴极保护联合技术在燃气管道中的应用。阐述燃气管道腐蚀问题的严峻性与防腐重要性后，分别介绍防腐层技术和阴极保护技术的原理、特点，深入分析二者联合应用的协同作用机制，包括优势互补方式。最后对联合技术的发展趋势进行展望，旨在为燃气管道的安全运行和长效防腐提供理论支持与实践指导。

关键词：防腐层；阴极保护；燃气管道；联合技术；防腐应用

引言

燃气作为重要的能源，其输送管道的安全稳定运行关乎国计民生。然而，燃气管道在长期运行中，会受到土壤、水分、化学物质等多种因素侵蚀。以常见的氯化物土壤环境为例，其中的氯离子会加速金属管道的电化学腐蚀过程，导致管道腐蚀穿孔，进而引发燃气泄漏事故。据统计，因管道腐蚀造成的燃气泄漏事故中，约70%是由于电化学腐蚀引起。这类事故不仅会造成能源浪费和经济损失，还可能引发火灾、爆炸等严重安全事故，对人民生命财产安全构成巨大威胁。因此，采取有效的防腐措施保障燃气管道的安全至关重要。防腐层与阴极保护联合技术作为一种综合防腐手段，在燃气管道防腐领域得到广泛应用，能充分发挥两种技术优势，为燃气管道提供更为可靠、持久的防护。

1 防腐层技术

1.1 防腐层的作用原理

防腐层是涂覆在燃气管道外表面的一层隔离材料，其核心作用是将管道金属与周围腐蚀性介质隔离开来。从电化学原理看，腐蚀发生需要形成腐蚀电池，即存在阳极、阴极、电解质溶液和电子通路。防腐层通过形成一道物理屏障，阻止腐蚀性离子、水分和氧气等与管道金属接触，有效切断腐蚀电池的电路，降低腐蚀电流。例如，在潮湿的土壤环境中，若没有防腐层，金属管道表面会形成无数微小的腐蚀电池，加速腐蚀；而有了防腐层，可显著减缓或抑制电化学腐蚀反应的发生。

1.2 常见防腐层材料及特点

目前，常用的燃气管道防腐层材料包括石油沥青、环氧煤沥青、聚乙烯（PE）、三层聚乙烯（3PE）等^[1]。

石油沥青防腐层：成本低，每平方米材料成本约10-15元；施工方便，可采用热涂或冷涂工艺。但耐温性能较差，在温度超过60℃时，易软化流淌；且易老化，在紫外线照射和氧化作用下，一般3-5年就会出现老化现

象，适用于温度较低、腐蚀性较弱的土壤环境。

环氧煤沥青防腐层：结合了环氧树脂的耐化学腐蚀性和煤沥青的防水性，具有较好的附着力，附着力可达1-2级（按国家标准划分）；耐腐蚀性较强，在中等腐蚀性土壤中，使用寿命可达10-15年。但施工工艺要求较高，需严格控制涂装厚度和涂装间隔时间，且环保性能有待提高，施工过程中会释放一定量的挥发性有机化合物（VOC）。

聚乙烯防腐层：具有良好的绝缘性能，体积电阻率可达 10^{14} - $10^{16}\Omega \cdot \text{cm}$ ；耐化学腐蚀性强，能抵抗多种酸、碱、盐的侵蚀；抗机械损伤能力好，在受到一定外力冲击时，不易破损。使用寿命长，在正常环境下可达20-30年，广泛应用于各种土壤环境。

三层聚乙烯（3PE）防腐层：融合了环氧粉末的附着性、胶粘剂的粘结性和聚乙烯的抗机械损伤性。其环氧粉末层厚度一般为50-100μm，胶粘剂层厚度为170-250μm，聚乙烯层厚度为1.8-3.7mm。综合性能优异，是目前燃气管道防腐的主流选择，在复杂土壤环境下也能为管道提供长期可靠的防护。

2 阴极保护技术

2.1 阴极保护的原理

阴极保护技术基于电化学原理，是一种高效防腐技术。在电化学腐蚀过程中，金属作为阳极发生氧化反应（ $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ ）而失去电子，逐渐被腐蚀。阴极保护的核心是通过向被保护的燃气管道施加直流电流，改变管道金属表面的电位，使其降低至腐蚀电池的阴极区。当金属处于阴极区时，氧化反应受到抑制，金属不再容易失去电子，从而达到防止腐蚀的目的^[2]。

阴极保护主要分为牺牲阳极法和外加电流法两种方式。牺牲阳极法是将电位更负的金属（如镁、锌、铝等）与被保护管道通过导线连接在一起。例如，镁合金牺牲阳极的开路电位一般为-1.5V至-1.7V（相对于饱和硫

酸铜电极），在电化学腐蚀过程中，它们会优先作为阳极发生氧化反应（ $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ ）而逐渐消耗，同时为管道提供阴极保护电流。这种方法不需要外部电源，安装相对简单，适用于小型管道或局部区域的防腐保护。

外加电流法则是通过外部直流电源将电流引入被保护管道，使管道成为阴极。同时，需要设置辅助阳极将电流返回电源，形成一个完整的电流回路。辅助阳极材料常用高硅铸铁，其具有良好的导电性和耐腐蚀性。外加电流法能够对长距离、大面积的燃气管道进行集中保护，保护范围可达数十公里甚至上百公里，且可以通过调节电源的输出参数来精确控制保护电流的大小，保护效果更加可靠。

2.2 阴极保护技术的优势与局限性

阴极保护技术优势明显。其一，保护范围广泛，不受管道形状与尺寸制约。无论是直线管道，还是城市地下纵横交错的复杂管网，都能经合理设计布局实现有效保护。其二，保护效果可靠。通过精准控制保护电流大小与分布，让管道金属表面维持良好保护状态。按相关标准，管道保护电位在-0.85V至-1.2V（相对于饱和硫酸铜电极）时，金属腐蚀速率极低。其三，该系统能实时监测和调整保护参数，如管道保护电位、电流密度（一般控制在20-100 $\mu A/m^2$ ），依据实际情况优化，确保管道处于最佳保护状态。

不过，阴极保护技术也有局限性。牺牲阳极法中，阳极材料会逐渐消耗，需定期更换。镁合金牺牲阳极寿命5-10年，锌合金的10-15年，这增加了维护成本，还可能影响管道正常运行。外加电流法虽保护效果佳，但需建立专门电源设备与辅助阳极系统，初期投资大，一套完整系统可能达数十万元甚至上百万元。且该系统对施工与维护技术要求高，需专业人员操作管理。此外，阴极保护产生的电流可能干扰周围金属结构，如地下电缆、其他管道等，引发电化学腐蚀。例如电流密度过大时，会加速地下电缆绝缘层老化。所以，设计阴极保护时，要充分考虑周围环境，采取设置绝缘接头、排流保护等合理措施，避免对其他设施造成不良影响。

3 防腐层与阴极保护联合技术的协同作用

3.1 优势互补

防腐层和阴极保护技术在燃气管道防腐中各自具有独特优势，二者联合应用能够实现优势互补，形成更加完善的防腐体系。防腐层作为第一道防线，直接将管道金属与周围的腐蚀性介质隔离开来，能有效减少腐蚀的发生几率。以3PE防腐层为例，其致密的结构可阻止99%以上的水分和氧气渗透到管道表面，大大降低了腐蚀的

可能性。同时，防腐层的存在还可以降低阴极保护电流的需求。研究表明，在有良好防腐层的情况下，阴极保护电流密度可降低至10-20 $\mu A/m^2$ ，相比无防腐层时可降低50%-80%，从而减小了阴极保护系统的规模和能耗，降低了运行成本。

阴极保护则作为第二道防线，为防腐层提供了重要的补充和保障。在实际运行过程中，防腐层可能会因为各种原因出现局部破损，如施工过程中的划伤、管道运行过程中的机械损伤等。据统计，在燃气管道使用过程中，防腐层破损率约为5%-10%。一旦防腐层破损，管道金属就会暴露在腐蚀环境中，容易发生腐蚀。此时，阴极保护系统能够及时发挥作用，为破损部位的管道金属提供阴极保护电流，使该部位的金属表面电位降低至阴极区，抑制氧化反应的发生，防止腐蚀的进一步扩展。通过二者的协同作用，可以大大提高燃气管道的防腐效果，有效延长管道的使用寿命，确保管道的安全运行。

3.2 协同保护机制

防腐层与阴极保护联合技术的协同保护机制体现在多个方面。首先，防腐层的存在降低了管道表面的腐蚀活性^[3]。由于防腐层隔离了管道金属与腐蚀性介质的直接接触，减少了金属表面的电化学反应活性点，使得阴极保护电流能够更集中地作用于防腐层破损部位。例如，在有防腐层的情况下，阴极保护电流在破损部位的分布更加均匀，可使破损部位的金属得到更充分的保护，提高了阴极保护的效率。

其次，阴极保护产生的极化作用可以抑制防腐层破损部位周围的金属腐蚀。当阴极保护电流作用于管道金属时，会使金属表面发生极化，降低金属的腐蚀速率。根据塔菲尔公式，极化作用可使金属的腐蚀电流密度降低数倍甚至数十倍。这种极化作用不仅能够保护破损部位的金属，还能减缓腐蚀产物的生成和扩散。腐蚀产物的减少可以避免其对防腐层的进一步破坏，从而保护防腐层的完整性，延长防腐层的使用寿命。

此外，阴极保护还可以降低防腐层与管道金属之间的界面电阻。界面电阻的存在会影响阴极保护电流的传导，降低保护效果。通过阴极保护的作用，可以使防腐层与管道金属之间的结合更加紧密，降低界面电阻。例如，在实施阴极保护后，界面电阻可从原来的数千欧姆降低至数百欧姆，增强防腐层的附着性能。这样一来，防腐层能够更好地发挥隔离作用，进一步提高整个防腐体系的防腐效果。

4 防腐层与阴极保护联合技术的发展趋势

4.1 新材料的应用

随着材料科学的不断发展和创新，新型防腐层材料和阴极保护材料将不断涌现，为燃气管道防腐带来新的机遇。例如，高性能的纳米防腐涂料具有独特的纳米结构和优异的性能。纳米材料的小尺寸效应和表面效应使其具有极高的反应活性，能够在管道表面形成一层致密、均匀的保护膜，其孔隙率可低至0.1%以下，具有优异的耐腐蚀性、耐磨性和自修复性能。当防腐层出现微小破损时，纳米材料能够自动迁移到破损部位进行修复，恢复防腐层的完整性，大大提高了防腐层的可靠性和使用寿命。在阴极保护方面，新型的牺牲阳极材料和辅助阳极材料也在不断研发中。一些新型的合金牺牲阳极材料，如铝合金-锌-钢-镁合金，其电位更负、电流效率更高，电流效率可达95%以上，能够在更长的时间内为管道提供稳定的阴极保护电流，减少阳极更换的频率，降低维护成本。

4.2 智能化监测与管理

利用物联网、大数据和人工智能等先进技术，实现对燃气管道防腐层和阴极保护系统的智能化监测与管理将成为未来的发展趋势。通过在管道上安装各类高精度传感器，如绝缘电阻传感器（精度可达 $\pm 0.1\text{M}\Omega$ ）、保护电位传感器（精度可达 $\pm 1\text{mV}$ ）、电流传感器（精度可达 $\pm 0.1\%\text{FS}$ ）等，能够实时采集防腐层绝缘电阻、管道保护电位、阴极保护电流等关键参数，并将这些数据通过无线传输技术传输至监控中心。在监控中心，利用大数据分析技术对采集到的数据进行深度挖掘和分析，建立管道腐蚀预测模型。通过对历史数据和实时数据的对比分析，能够提前预测管道可能出现的腐蚀问题，并及时发出警报。例如，当监测到某段管道的保护电位偏离正常范围时，系统可自动发出警报，提示工作人员进行检查。同时，人工智能技术可以根据数据分析结果提供相应的维护建议，如调整阴极保护参数、安排防腐层修复等，实现防腐工作的精准化和智能化。这种智能化监测与管理系统能够大大提高管道防腐的效率和可靠性，减少人工巡检的工作量和成本，保障管道的安全运行。

4.3 绿色环保技术

在环保要求日益严格的背景下，研发绿色环保的防腐层和阴极保护技术将成为未来的重要发展方向。在防

腐层方面，开发无溶剂、低挥发性有机化合物（VOC）排放的防腐涂料是关键。传统的防腐涂料在生产和施工过程中会释放大量的VOC，对大气环境造成污染，危害人体健康^[4]。而无溶剂、低VOC排放的防腐涂料采用新型的环保树脂和固化剂，VOC含量可降低至50g/L以下，在保证防腐性能的同时，大大减少了有害物质的排放，符合环保要求。

在阴极保护方面，优化阴极保护系统的设计和运行参数，降低能耗，提高能源利用效率是重要的环保措施。例如，采用高效的电源设备和智能控制系统，根据管道的实际保护需求精确调节输出电流，避免能源的浪费。同时，研发新型的辅助阳极材料，减少阳极反应过程中产生的有害物质，降低对环境的影响。通过这些绿色环保技术的应用，能够实现燃气管道防腐与环境保护的协调发展。

结束语

防腐层与阴极保护联合技术在燃气管道防腐中具有不可替代的作用。通过充分发挥防腐层和阴极保护技术的优势，实现二者的协同作用，能够有效提高燃气管道的防腐效果，延长管道的使用寿命，保障管道的安全运行。实际工程应用中的技术细节与数据充分证明了该联合技术的可靠性和有效性。随着新材料、智能化技术和绿色环保技术的不断发展，防腐层与阴极保护联合技术将不断完善和创新，为燃气管道的防腐事业提供更强大的技术支持，推动燃气行业的可持续发展。在未来的燃气管道建设和维护中，应进一步推广和应用该联合技术，加强技术研发和管理创新，确保燃气管道的安全稳定运行，为经济社会发展做出更大贡献。

参文文献

- [1]潘东民,于银海.强潮流海域长输气管道带压修复方案设计及应用[J].中国海上油气,2019,31(01):146-154.
- [2]郭子胥.采用干空气干燥长输气管道的施工技术探究[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(01):227-228.
- [3]刘莫函.长输气管道设计优化模型建立与计算研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2018,36(05):802-804.
- [4]王伟.天然气长输管道阴极保护的有效性影响因素探讨[J].化工管理,2016(29):12-15.