

埋地油气管道腐蚀机理研究及防护

张东阳 (深圳智高博实工程有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 文章通过分析埋地油气管道腐蚀的机理提出了针对性的防护措施, 首先研究了埋地管道受压、溶解及微生物腐蚀的机理并对各腐蚀类型的形貌特征进行比较, 然后针对腐蚀机理提出了阴保护、电化学防护、密封防护和抑菌防护等具体的防护措施, 这些防护措施可以通过阻断或干扰管道与外界环境的接触有效延长管道的使用寿命, 文章旨在为油气管道的安全可靠运行提供理论支持与工程指导。

关键词: 埋地油气管道; 腐蚀机理; 受压腐蚀; 溶解腐蚀; 微生物腐蚀

0 引言

埋地油气管道的安全运营对能源生产与利用具有重要意义, 但是管道在使用过程中易受自然环境的侵蚀影响发生腐蚀故障, 严重影响其安全运营, 为此有必要深入研究埋地管道腐蚀的机理并针对性提出防护措施, 以下拟通过分析不同类型的埋地管道腐蚀机理提出相应的防护策略以延长管道的使用寿命。

1 埋地管道主要腐蚀类型

1.1 受压腐蚀

受压腐蚀是指管道金属材料在外加压力作用下发生的局部耗损或破坏, 根据压力来源可以分为土体压力引起的受压腐蚀和内压应力引起的受压腐蚀, 土体压力受土体自重、外部载荷以及土层收缩膨胀的影响大小和分布常年变化, 土体压力在管道的下部及两侧作用较大上部作用较小, 内压应力主要来源于管道中的传输介质, 按照行业可分为油气管道内压力、热力管道内压力和水管道内压力条件, 内外压力共同作用下管道金属易在弯头、法兰、焊缝等局部产生永久性变形并出现微小裂纹, 进而扩展演变为破坏, 土体中的潮湿性也会影响受压腐蚀行为, 干燥土体主要是机械性磨损, 而潮湿土体中的水分可以渗透到微裂纹中, 在压力作用下迅速扩展加重局部腐蚀, 所以埋地管道的受压腐蚀是一个综合作用的结果, 受压腐蚀的形貌特征可归类为裂纹腐蚀和补口, 裂纹腐蚀表现为细长裂纹或疲劳断口, 两侧呈 45 度倾角, 具有腐蚀性溶解的特征, 这类裂纹常从表面小裂纹发展而来, 补口腐蚀呈不规则形状, 边缘呈外撇状, 周围可见应力轻微变形的痕迹, 两类形貌特征表明受压腐蚀存在明显的方向性与空间异向性。

1.2 溶解腐蚀

溶解腐蚀作为埋地油气管道面临的重大腐蚀挑战

之一, 它的发生不仅影响管道的结构完整性还可能导致严重的安全事故, 溶解腐蚀根据其反应机制的不同可细分为化学溶解和电化学溶解两大类, 化学溶解或称无电化学溶解涉及管道金属材料与腐蚀介质直接作用发生的化学反应, 这种情况下金属材料在没有电流作用的条件下直接溶解如被强酸或强碱直接腐蚀, 这种腐蚀过程的特点是金属材料的表面均匀减薄, 腐蚀界面平整, 缺乏明显的定向性和选择性, 导致材料的整体减薄, 而不是在特定区域形成腐蚀坑, 相对于化学溶解电化学溶解则更为复杂, 它在含有电解质的腐蚀介质中进行, 依靠金属间的电势差形成腐蚀电池, 在这一过程中金属表面的电子过渡导致金属发生氧化进而溶解, 电化学溶解的形态特征与电流的分布密切相关, 通常表现为表面的散状坑洞, 这些坑洞有时沿着金属的晶界或应力集中区域排列形成沟道状的溶蚀带, 展示了一定的定向性, 与化学溶解相比电化学溶解的随机性更强, 腐蚀痕迹更加不规则, 这种不规则性增加了对管道腐蚀行为预测的难度, 同时也为防腐保护措施的制定带来了挑战。

2 各类腐蚀的比较

2.1 发生条件

埋地管道的腐蚀类型主要有受压腐蚀、溶解腐蚀和微生物腐蚀三类, 这些腐蚀的发生与土壤环境条件、管道自身条件以及腐蚀光环电化学反应有关, 受压腐蚀的发生与土体的压力状态和管道的力学状态密切相关, 土体中若含有可溶性盐分, 在压力作用和溶液浸蚀效应下会加速受压腐蚀区的破坏, 另外焊缝、装配间隙、表面凹坑等应力集中区更易成为受压腐蚀的起始点, 溶解腐蚀的发生则与土壤溶液的化学成分及性质有关, 如 pH 值、含氧量、含盐量、电导率等都是影响因素, 微生物腐蚀的发生条件更为复杂, 需要土

壤中存在腐蚀相关微生物、水分、营养物质等，并且温度、pH值等参数在一定范围内，除环境条件外管道自身状态也影响腐蚀发生，比如防腐涂层完整性差、存在裂纹或机械损伤都会加剧上述腐蚀，而管道材料的化学成分和微观组织则决定其自身抗腐性能，总体来说复杂土壤环境加速了各类腐蚀的发生与演化。

2.2 形貌分析

尽管埋地管道存在不同类型的腐蚀，但全部腐蚀都会在一定条件下发生并导致管道金属材料的损耗，从腐蚀形貌特征来分析可以将腐蚀划分为均匀腐蚀、局部腐蚀和各向异性腐蚀三类，均匀腐蚀指腐蚀作用均匀分布在表面，如大部分溶解腐蚀属此类，这类腐蚀全面减少了材料的有效厚度，局部腐蚀则表现出腐蚀部位的空间局限性如受压腐蚀易发生在焊缝和凹坑处，这类腐蚀深度大，对管道的损害更严重，各向异性腐蚀的方向性最强如微生物沟渠腐蚀和裂纹腐蚀，可以快速渗透扩展导致贯通漏洞，这三类腐蚀可以单独存在也可以共生存在，综合作用导致管道损坏。

3 埋地管道阴极防护

3.1 阴极防护原理

阴极防护是利用外加的直流电力在金属表面形成阴极电位，使金属表面上发生阴极极化现象，在金属表面形成一层保护性沉积膜起到隔离金属与腐蚀介质直接接触的作用，外加电流会使金属表面电位负移，电位负移至一定值后金属表面会发生还原反应，金属离子、水分子及溶解氧会参与反应生成羟基、氢气及其他反应产物，这些产物会沉积在金属表面形成致密的保护膜，这层保护膜的形成功能阻隔了金属与外界腐蚀介质的直接接触，防止了腐蚀反应的发生，阴极防护的效果与外加电流的大小、时间长度密切相关，电流过小则保护电位不足，过大又会造成过度极化现象，因此需要选择合适的电流值，另外防护电流中断会导致金属缓慢去极化至可以发生腐蚀的电位，因此需要提供持续的电流以维持保护膜的稳定存在，总得来说阴极防护通过电化学原理阻断金属与腐蚀介质之间的接触，可以有效抑制腐蚀反应的发生。

3.2 典型材料

埋地管道阴极防护常用的典型材料主要有两大类，即作为电源的阳极材料和作为传导介质的复合胶体材料，阳极材料要求具备便于安装的形状、电势低于受体、电导率高、使用寿命长等性能，目前应用较多的有高硅铁合金阳极、热缩塑阳极、完全降解阳极、

混合金属氧化物阳极等，这些材料可提供持久的防护电流，阳极自身消耗缓慢，使用寿命可达15~30年，复合胶体材料作为阴极防护系统的传导介质使用，要求具有封闭性强、电导率高、粘结牢固等特性，典型材料包括误导性胶体、水泥基胶体、环氧树脂基胶体等，这些胶体材料可以在阳极与受体管道间提供优良的电子传导通道，此外传导油墨、导电涂料和回填材料也用于辅助阴极防护，改善防护效果。

4 电化学防护

4.1 原理

电化学防护是利用外加电流或电位的方法在金属表面形成一层被动化保护膜，使其与腐蚀介质相隔离，从而达到防护金属不腐蚀的目的，这种防护方法的基本原理是在金属表面形成电化学双电层，利用其能量屏障阻碍电子向金属表面转移，从而抑制金属溶解腐蚀的发生，电化学防护可以分为陶瓷防护、荧光防护、阳极保护和阴极保护等类别，陶瓷防护是在金属表面镀一层陶瓷化合物薄膜，荧光防护在表面形成荧光盐沉积层，阳极保护利用电流牺牲金属阳极材料以保护主体金属，而阴极保护则是外加电流在金属表面还原出保护性沉积层，尽管防护机理略有不同但都遵循电化学双电层屏蔽作用的基本原理，利用人工电能形成保护性膜层隔断金属与腐蚀介质的接触，从而达到防止或减缓腐蚀的作用。

4.2 方法

电化学防护的主要方法包括阳极保护法、阴极保护法和荧光保护法，阳极保护法是利用牺牲阳极向受保护金属管道提供电子减缓管道的溶出过程从而防腐，阳极材料需选择电势低于受保护管道、耐腐蚀性和导电性优良的金属，常用的有硅铁阳极、铝合金阳极和镁阳极，阴极保护法则是在外加电流在管道表面形成一层热力学稳定的保护层，其降低了管道的腐蚀电位，可以使管道阴极极化至不发生腐蚀的程度，保护层材料主要有水合氧化铁、磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐等，荧光保护法是利用荧光盐的阴极还原形成保护层的一种特殊阴极保护法，荧光层封闭致密、导电性佳、防护效果优异，杂化法综合应用这些单一方法的优势也是管道电化学防护的重要手段。

5 密封防护

5.1 防水帽原理

防水帽是利用封堵材料在管道损坏部位形成防水隔离层的一种防腐方法，它的基本原理是利用防水材

料的低渗透性完全阻断腐蚀介质像管道金属表面的渗透,从而阻断管道金属和腐蚀介质之间的接触,防水帽材料需满足橡塑性优异、耐压性强、化学稳定性高的要求,工作原理是先对管道损坏部位进行清洗和处理除去腐蚀产物和污染层,暴露新的金属基体,然后在其表面涂覆或包裹防水材料形成连续的防水层封堵隔离,常用的防水材料有热固性橡胶、聚氨酯橡胶、环氧树脂、聚苯硫醚、环氧乙烷、戊二醛树脂、丁基橡胶等,这些材料可与玻璃纤维网或聚酯网等支撑材料复合提高其机械强度,防水帽在密封效果好的同时还需确保与基体的良好粘结,避免应力集中引起的裂纹脱落。

5.2 涂层材料

涂层材料是在管道表面直接喷涂或刷涂形成一层相对致密的防护涂层以隔绝金属与外界腐蚀介质之间的接触,达到防腐蚀的目的,防腐涂层的基本要求有高抗渗性、优越的附着力和机械强度等,常用的涂层材料可分为聚合物涂层、水泥涂层和金属/陶瓷复合涂层三大类,聚合物涂层主要包括环氧、聚氨酯、丙烯酸树脂和聚乙烯等高分子涂料,具有工艺简单、使用寿命长的优点,水泥涂层以水泥砂浆和聚合物添加剂为主,具备裂隙自动愈合、耐碱等特点,金属/陶瓷复合涂层在金属离子交联的聚合物基体中引入微/纳米陶瓷颗粒,综合了聚合物涂层的耐候性与陶瓷涂层的高温抗烧蚀性能成为新一代涂层材料,这些涂层在涂覆时需要严格控制工艺参数,保证涂层无故障且与底材粘结牢固。

6 抑菌防护

6.1 杀菌剂

杀菌剂是利用其毒杀或抑制管道内微生物的生长繁殖从而抑制或减缓微生物腐蚀的一类防护措施,常用的杀菌剂可分为氧化剂、醛类、硝基化合物、氨基化合物和有机磺类等,氧化剂利用其强氧化性质破坏细菌蛋白质和细胞壁如臭氧、过氧化氢和高锰酸盐,醛类通过与细胞内氨基化合物发生反应破坏其代谢过程如甲醛和戊二醛,硝基化合物和氨基化合物通过细胞内外渗透压差损伤细胞结构,有机磺类可结合细菌酶干扰细胞活性,广谱抗生素、重金属离子和季铵盐也具杀菌作用,这些杀菌剂的使用可以单独使用也可以联合使用以利用它们的协同增效提高杀菌率,杀菌剂的使用须严格控制浓度范围,低于最小抑菌浓度则无法抑菌,而高于最大使用浓度则会对人体和管道材

料产生毒害作用。

6.2 抗菌涂料

抗菌涂料通过在管道内壁喷涂或刷涂含有抗菌剂的涂料制成含抗菌活性成分的涂层可以杀死附着生长的微生物或抑制其生长繁殖,从而起到防微生物腐蚀的作用,抗菌涂料可大致分为无机抗菌剂型和有机抗菌剂型,无机抗菌剂型如含银无机抗菌涂料,其利用银离子的高效抗菌性抑制菌群生长,此类涂料具有耐磨性佳、持久抗菌等优点,但涂层难度大、耐酸碱腐蚀性较差,有机抗菌剂型如含醋酸铜有机溶剂型抗菌涂料和含季铵盐抗菌水性涂料等,抗菌成分来自于有机分子官能团,抗菌持久期短但涂装操作简易,两类涂料可根据使用条件选择也可复配使用,发挥协同增效作用,抗菌光催化涂料是一类新型抗菌涂料,其含有的光催化剂激发后可产生强氧化活性种抑制细菌生长,这类涂料在光照条件下抗菌性能显著,是埋地管道日后防腐蚀涂料发展的新方向。

7 结束语

通过上述分析可以看出,针对埋地管道不同的腐蚀机理可以采取相应的防护措施来延缓或抑制腐蚀的发生与扩散,这些防护措施的应用有助于延长管道的使用寿命,确保埋地油气管道的安全高效运行。

参考文献:

- [1] 王冰.埋地油气混输管道的腐蚀机理与防护策略[J].全面腐蚀控制,2022,36(03):122-123.
- [2] 张宗前,常礼明,胡光兴.埋地金属油气管道的腐蚀机理与防护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(21):56-57.
- [3] 熊相军.油气水三相混输海底管道腐蚀机理研究及防护对策[J].化工管理,2021,(16):148-149.
- [4] 张树海.埋地油气管道腐蚀机理分析及防护探讨[J].全面腐蚀控制,2020,34(01):81-82.
- [5] 黄海波,李庆敏.长输油气管道腐蚀机理及防护技术分析研究[J].粘接,2019,40(11):33-37.
- [6] 王文辉.埋地油气管道腐蚀速率预测及剩余寿命研究[D].西安建筑科技大学,2019.
- [7] 李宇霆.埋地油气管道腐蚀机理研究及防护措施[J].全面腐蚀控制,2022,36(2):121-122.
- [8] 林新宇,吴明,程浩力,等.埋地油气管道腐蚀机理研究及防护[J].当代化工,2011,40(1):53-55,59.
- [9] 李春燕,张强,李春玲,等.油气管线钢腐蚀研究现状[J].精密成形工程,2022,14(12):96-108.