

石油化工配管中高温材料耐腐蚀性提升技术探讨

张睿哲 龚德鑫

惠生工程(中国)有限公司郑州分公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文聚焦石油化工配管高温材料耐腐蚀性提升技术。阐述了高温腐蚀机理、关键影响因素及常用材料耐腐蚀性能,介绍了材料成分优化、表面防护、复合防护、工艺优化与缓蚀等核心技术。构建技术适用性评价指标体系,提出不同工况下的技术选型优化策略。最后展望未来,包括高性能低成本材料研发、智能化长效化防护融合、数字孪生精准防控及绿色耐蚀技术创新,为石油化工配管耐蚀性提升提供参考。

关键词: 石油化工配管; 高温材料耐腐蚀性; 优化策略

引言: 在石油化工领域,配管长期处于高温复杂环境,高温腐蚀问题严重,缩短配管使用寿命,影响装置安全稳定运行,增加运维成本。高温腐蚀涉及氧化、硫化等多种复杂机理,受环境、材料、工艺等多因素影响。不同常用高温配管材料耐蚀性能各有优劣。因此,探讨提升石油化工配管高温材料耐腐蚀性的技术,对保障石油化工行业安全生产、降低运营成本具有重要意义。

1 石油化工配管高温腐蚀基础理论

1.1 高温腐蚀的核心机理

石油化工配管高温腐蚀是介质与管材在高温环境下发生的复杂物理化学作用,核心机理涵盖氧化、硫化、碳化及晶间腐蚀等。高温下管材表面氧化膜若存在缺陷,介质中 O_2 、S、Cl⁻等活性离子会穿透膜层与基体反应,形成易剥落的腐蚀产物,加速基体损伤。硫化腐蚀多由介质中 H_2S 、硫醇等硫化物引发,生成的金属硫化物熔点低、结合力弱,易引发管材穿孔^[1]。晶间腐蚀则源于高温下管材晶粒边界成分变化,形成贫铬区等脆弱区域,导致管材力学性能骤降。高温下介质流速加快会加剧冲刷腐蚀,与化学腐蚀协同作用,进一步缩短配管使用寿命,这一机理在加氢裂化、催化重整装置配管中表现尤为显著。

1.2 配管高温腐蚀的关键影响因素

配管高温腐蚀的关键影响因素可分为环境、材料及工艺三类。环境因素中,温度是核心,温度每升高 $100^\circ C$,腐蚀速率可提升2-3倍,且超过特定温度会引发管材相变,降低耐蚀性;介质成分至关重要, H_2S 、 CO_2 、Cl⁻等含量越高,腐蚀风险越大,同时介质酸碱度会改变腐蚀反应方向。材料因素方面,管材化学成分决定耐蚀基础,铬、镍、钼等元素含量不足会削弱抗氧化、抗硫化能力,而材料内部缺陷如裂纹、夹杂物会成为腐蚀起始点。工艺因素中,配管运行压力升高会加速介质渗

透,流速过快引发冲刷腐蚀,启停工况下的温度波动则会导致氧化膜反复脱落,加剧腐蚀进程,这些因素相互叠加,共同决定配管腐蚀程度。

1.3 常用高温配管材料的耐蚀性能分析

石油化工高温配管常用材料主要包括奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、镍基合金及耐热钢。奥氏体不锈钢如304、316L,含铬镍元素,常温至 $600^\circ C$ 下抗氧化性优良,但在含Cl⁻高温环境下易发生点蚀,316L因添加钼元素,耐蚀性较304显著提升。铁素体不锈钢如430,成本较低,抗氧化性强,但高温下晶粒易粗大,韧性差,适用于中低温、低腐蚀工况。镍基合金如Inconel625,含高比例镍、铬、钼,耐硫化、耐高温性能优异,可在 $800^\circ C$ 以上强腐蚀环境长期运行,但成本较高。耐热钢如12Cr1MoV,通过铬钼合金化提升高温强度,抗氧化性较好,适用于蒸汽管道等工况,但其耐硫化腐蚀能力较弱,需配套防护措施使用。

2 石油化工配管高温材料耐腐蚀性提升核心技术

2.1 材料成分优化与改性技术

材料成分优化与改性技术堪称从源头提升配管耐蚀性的核心手段。它通过精准调整合金元素的比例,或是引入全新的元素,对材料的微观结构与表面性能进行深度改善。以不锈钢为例,精准调控其中铬、镍、钼的含量,能够显著强化氧化膜的稳定性,为配管构建起一道坚固的防护屏障。而添加铌、钛元素,则可以有效抑制晶间腐蚀,形成稳定的碳化物,增强材料的内部结构稳定性。对于镍基合金,引入钨、钽元素可大幅提升其耐硫化、耐氯离子腐蚀的能力,同时优化析出相分布,避免在高温环境下出现脆化现象^[2]。微合金化技术通过添加微量稀土元素,能够细化晶粒、净化晶界,增强材料基体与氧化膜之间的结合力。离子注入改性技术也独具特色,它将铬、氮等离子注入管材表面,形成致密的合金

层,在不改变材料基体性能的前提下,显著提升表面耐蚀性,完美适配高温强腐蚀的复杂工况需求。

2.2 表面防护与改性技术

表面防护与改性技术通过在配管表面精心构建防护层,有效隔绝介质与基体的直接接触,是应用极为广泛的耐蚀提升手段。热喷涂技术可制备出陶瓷、金属陶瓷或合金涂层,像氧化铝、氧化铬涂层等,这些涂层具备耐高温、耐磨损的优良特性,非常适用于高温烟气、蒸汽管道等场景。不过,使用该技术时需保证涂层致密度,防止出现孔隙腐蚀。化学镀技术能在管材表面形成均匀的镍磷合金层,不仅耐蚀性优良,而且镀层与基体结合牢固,对于复杂形状的配管也能轻松应对。渗碳、渗氮及碳氮共渗技术通过改变管材表面的化学成分,形成硬度高、耐蚀性强的渗层,从而提升高温下的耐磨性与抗腐蚀能力。另外,钝化处理可在不锈钢表面形成致密的氧化膜,进一步强化其耐蚀性能,有效延长配管的使用寿命。

2.3 复合防护技术

复合防护技术巧妙地结合了多种单一防护手段的优势,通过协同作用大幅提升配管的耐蚀性能,尤其适配极端高温腐蚀工况。常见的复合方案丰富多样,例如“表面改性+涂层防护”,先对管材进行渗铬处理,形成渗铬层,该层可增强基体与涂层的结合力;再喷涂陶瓷涂层,陶瓷涂层则能有效隔绝介质的侵蚀,二者协同显著提升防护效果。“合金化+钝化处理”适用于不锈钢配管,通过优化合金成分提升基体的耐蚀性,再经钝化处理强化表面氧化膜,从而更好地抵御氯离子的侵蚀。对于镍基合金配管,可采用“离子注入+化学镀”复合技术,形成多层防护结构,兼顾耐高温与耐强腐蚀性能。复合防护技术能够弥补单一技术的不足,如解决涂层易剥落、表面改性耐蚀深度有限等问题,在加氢装置、乙烯裂解炉配管中应用效果十分显著。

2.4 工艺优化与缓蚀技术

工艺优化与缓蚀技术通过合理调整运行参数或添加缓蚀剂,有效降低高温腐蚀速率,是低成本、易实施的耐蚀提升手段。在工艺优化方面,合理控制配管的运行温度与压力至关重要,避免超温超压运行,减少温度波动的频次,可有效减缓氧化膜的脱落与晶间腐蚀的发生。同时,优化介质成分也不容忽视,去除或降低 H_2S 、 Cl^- 等有害杂质的含量,将介质酸碱度调节至中性或弱碱性,能够抑制腐蚀反应的发生。缓蚀技术则是在介质中添加少量高效缓蚀剂,缓蚀剂分子会吸附于管材表面,形成一层保护膜,阻碍腐蚀离子与基体的接触。高温缓蚀剂需具备耐高温、

不易分解的特性,像有机胺类、硫化物类缓蚀剂,可在 $600^{\circ}C$ 以下工况有效抑制腐蚀。将工艺优化与缓蚀技术结合使用,能够实现协同增效,进一步降低腐蚀风险,为配管的长期稳定运行提供有力保障。

3 提升技术的适用性评价与优化策略

3.1 技术适用性评价指标体系

提升技术的适用性评价指标体系涵盖技术、经济、工况适配三大维度,形成多指标综合评价框架。技术指标包括耐蚀性能、使用寿命、施工难度及稳定性,耐蚀性能需通过高温模拟试验验证,使用寿命需满足装置运行周期要求,施工难度需适配现场安装条件,稳定性则考量长期运行下的防护效果衰减情况。经济指标涉及初始投资、运维成本及性价比,对比不同技术的投入与收益,避免盲目选用高成本技术^[3]。工况适配指标包括温度、压力、介质成分等,需确保技术能适配具体工况的腐蚀特性,同时兼顾环保要求,避免防护过程产生有害废弃物。该指标体系可量化评价各技术的适配性,为技术选型提供科学依据。

3.2 不同工况下的技术选型优化

在不同工况下,需要紧密结合腐蚀特性与技术优势,进行极具针对性的技术选型优化。对于高温($700^{\circ}C$ 以上)、强硫化腐蚀的恶劣工况,例如加氢裂化装置配管,镍基合金材料+离子注入复合防护技术是优先之选。镍基合金本身具备出色的耐高温性能,而离子注入技术则能进一步提升其耐硫化能力,二者结合可完美兼顾耐高温与耐硫化性能,确保配管在极端工况下稳定运行。在中温($400-700^{\circ}C$)、含氯离子的工况下,如催化重整装置,316L不锈钢+化学镀镍磷合金技术是较为合适的选择。316L不锈钢具有一定的耐蚀性,化学镀镍磷合金技术则能在其表面形成一层均匀且耐蚀性优良的镀层,二者相互配合,既能有效抵御氯离子的侵蚀,又能平衡耐蚀性与成本。对于低温($400^{\circ}C$ 以下)、低腐蚀的工况,如普通蒸汽管道,耐热钢+热喷涂陶瓷涂层技术可降低投资成本,同时满足基本的防护需求。而对于频繁启停的工况,工艺优化+缓蚀剂技术是首选,它能有效减少温度波动引发的腐蚀,同时配套定期检测维护策略,可确保装置的安全运行。选型时需全面综合考量工况参数、经济预算及运维便利性,实现技术适配性与经济性的有机统一。

4 高温材料耐腐蚀性提升技术的发展展望

4.1 高性能低成本耐蚀材料的研发方向

高性能低成本耐蚀材料是未来研发核心方向,重点聚焦合金成分优化与新型材料体系开发。通过精准调控合金

元素比例,在保证耐蚀性能的前提下,降低镍、钼等贵金属含量,开发经济型镍基合金与不锈钢。探索新型复合材料体系,如陶瓷颗粒增强金属基复合材料,兼顾高温强度与耐蚀性,降低材料制备成本。借助3D打印技术,实现复杂形状配管的一体化成型,减少焊接缺陷,同时通过打印参数优化,改善材料微观结构,提升耐蚀性能。研发再生耐蚀材料,实现废旧配管材料的回收再利用,降低资源消耗,契合低成本、可持续发展需求。

4.2 智能化、长效化防护技术的融合发展

智能化与长效化防护技术的融合的是提升配管腐蚀防控水平的重要趋势。长效化防护技术聚焦新型涂层与改性材料研发,开发耐高温、抗剥落、使用寿命超10年的复合防护层,减少维护频次。智能化技术则通过在配管上安装腐蚀传感器,实时监测腐蚀速率、涂层完整性等参数,结合物联网技术将数据传输至控制系统,实现腐蚀状态的在线监控。融合发展后,可通过智能监测数据反馈,优化防护层维护周期,及时发现局部腐蚀隐患,采取针对性修复措施。同时,开发智能自修复防护技术,当涂层出现微小破损时,自动触发修复机制,形成新的防护层,实现防护效果的长效维持,大幅提升配管运行安全性。

4.3 基于数字孪生的配管腐蚀精准防控技术前景

基于数字孪生的配管腐蚀精准防控技术具有广阔发展前景,可实现腐蚀过程的可视化、预测性管控。通过构建配管数字孪生模型,映射实体配管的几何结构、材料属性、运行工况等信息,结合腐蚀机理模型与实时监测数据,模拟腐蚀演化过程,精准预测不同部位的腐蚀风险。借助模型可优化防护技术选型与施工方案,提前规避高腐蚀风险区域的设计缺陷。在运行阶段,通过数字孪生模型实时更新腐蚀数据,预测腐蚀寿命,制定个性化维护计划,避免过度维护或维护不足。该技术可实现配管腐蚀的精准防控,减少非计划停机,降低运维成

本,在大型石油化工装置中具有重要应用价值。

4.4 碳中和目标下绿色耐蚀技术的创新趋势

碳中和目标推动绿色耐蚀技术向低能耗、低污染、可循环方向创新发展。在材料研发方面,开发环境友好型合金材料,减少生产过程中的碳排放与污染物排放,推广再生耐蚀材料,提升资源循环利用率。表面防护技术聚焦绿色工艺,替代传统高能耗、高污染的热喷涂、电镀工艺,研发水性涂层、生物基缓蚀剂等绿色产品,降低防护过程对环境的影响^[4]。工艺优化方面,通过精准调控运行参数,提升能源利用效率,减少腐蚀废弃物产生,同时研发腐蚀产物回收利用技术,实现污染物资源化。另外,发展低碳监测与维护技术,采用低功耗传感器与智能化运维方案,降低整体碳足迹,助力石油化工行业实现碳中和目标。

结束语

石油化工配管高温材料耐腐蚀性提升技术对行业至关重要。当前,通过多种核心技术已取得一定成果,适用性评价与选型优化策略为技术应用提供指导。展望未来,高性能低成本材料研发、智能化长效化防护融合、数字孪生精准防控及绿色耐蚀技术创新等方向,将进一步推动配管耐蚀技术发展。持续探索创新这些技术,能有效提升配管耐蚀性,保障石油化工装置安全高效运行,助力行业可持续发展。

参考文献

- [1]赵振林.石油化工设备常见腐蚀原因及防腐措施[J].化工设计通讯,2020,46(11):11-12.
- [2]田雨.石油化工设备腐蚀分析及寿命评价方法[J].中国设备工程,2020(08):131-133.
- [3]蔡婕瑶.石油化工配管中高温材料耐腐蚀性提升技术探讨[J].山西化工,2025,45(7):177-179.
- [4]傅文兴.石油化工设备及管道的保温通用性研究[J].化工装备技术,2020,38(02):27-32.