

石油化工管道小口径接管腐蚀机理分析及其防护对策

柳星雨 (武汉检安石化工程有限公司, 湖北 武汉 430082)

摘要: 小口径接管因其径小壁薄、结构特殊, 在石油化工装置中易成为腐蚀失效的薄弱环节。本文通过富气平衡罐液位计接管腐蚀穿孔及重整车间热电偶接管泄漏两个典型案例, 深入分析了保温层下电化学腐蚀、材料选择不当引发晶间腐蚀等多种失效机理。分析表明, 小接管腐蚀是材料、设计、工艺、环境及管理多因素耦合作用的结果。据此, 文章系统地从优化选材与结构设计、严格控制制造安装质量、实施针对性监控维护、构建完善防腐管理体系四个维度, 提出了综合性的防护对策, 为提升装置完整性提供重要参考。

关键词: 石油化工装置; 小接管; 腐蚀机理; 防护对策; 保温层下腐蚀; 晶间腐蚀

中图分类号: TE986 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0141-03

Corrosion mechanism analysis and protective measures for small-diameter connections in petrochemical pipelines

Liu Xingyu (Wuhan Jian'an Petrochemical Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430082, China)

Abstract: Small-diameter piping, characterized by their narrow diameter, thin walls, and unique structural features, often become vulnerable to corrosion failure in petrochemical facilities. This study examines two representative cases: corrosion-induced perforation in liquid level gauges of gas-rich balance tanks and leakage in thermocouple piping within reforming units. Through these analyses, we explore multiple failure mechanisms, including electrochemical corrosion beneath insulation layers and intergranular corrosion caused by improper material selection. The findings demonstrate that corrosion in small-diameter piping results from the combined effects of material quality, design flaws, manufacturing processes, environmental factors, and management practices. Accordingly, the paper proposes a comprehensive set of protective measures across four dimensions: optimizing material selection and structural design, rigorously controlling manufacturing and installation quality, implementing targeted monitoring and maintenance, and establishing a robust corrosion prevention management system. These recommendations provide crucial references for enhancing facility integrity.

Key words: small pipe; corrosion mechanism; protection countermeasures; corrosion under insulation; intergranular corrosion; petrochemical plant

小口径接管在石油化工装置十分常见^[1]。如设备和管线上的引压管、仪表液位计接管、排凝管、低排阀接管、仪表热电偶套管等, 通常处于设备或管道接管的第一道阀门内侧, 具有径小、壁薄的特点。小接管的质量关乎到装置能否长期高效平稳的运行。

1 石油化工管道小口径接管的腐蚀案例及相应的原因分析

某装置吸收稳定系统富气平衡罐 D-205 设计壁厚 18mm, 操作压力 1.2MPa, 温度 35℃, 主体材质 16MnR, 主要介质汽油、硫化氢气体、油气以及少量水, 外部做除锈刷漆处理并包 60mm 岩棉保温。D-205 在某次试压过程中发现双法兰液位计上部引压管腐蚀穿孔。

1.1 外观检查

容器外观检查发现, 此容器共有液位计两组, 每组包含一台玻璃板液位计和一台双法兰液位计, 分别安装在罐本体和脱水包上, 引压管共有八根, 除最顶部双法兰的引压管严重腐蚀穿孔外, 其余引压管也存在不同程度的锈蚀。对切除下的液位计接管检查, 发现安装时所做涂料防腐层完全脱落, 管壁表面有 1.5mm 锈层, 从液位计下截止阀往内, 腐蚀逐渐加剧, 靠近

罐壁处有大小不一的蚀坑, 最深处管壁已腐蚀穿孔; 接管内壁检查, 内壁光滑, 无明显蚀坑, 判断为外壁腐蚀导致接管穿孔泄漏。



图 1 腐蚀实例

1.2 原因分析

该容器为富气平衡罐, 主要介质为汽油、H₂S、油气及少量的水, 主要的功能为压缩富气经空冷、水冷后提供气液分离的场所。在操作过程中, 装置根据底部液位计的界面的高度, 打开罐底脱水阀, 所以底部接管的介质与上部接管的介质不同, 底部接管表现为间断的水和液态烃, 而水与液态烃的物理性质有所不同。交替变化过程中, 外保温与管壁之间的缝隙渗入空气, 由于液态烃的沸点较低, 当环境温度高于液态烃沸点时, 空气中的水分凝结, 形成小的液滴, 促

表 1 送检样本化学成分及国家有关标准值

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
送检样本	0.246	0.42	0.78	0.026	0.011	17.95	7.6	0.043
0Cr18Ni10Ti (GB222-84)	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.030	17.0 ~ 19.00	9.00 ~ 12.00	≥ 5×C%
1Cr18Ni9Ti (GB222-84)	≤ 0.12	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.030	17.0 ~ 19.00	8.0 ~ 11.00	5×(C%-0.02) ~ 0.80

进外保温吸水,形成潮湿的环境,造成管壁外表面形成电化学腐蚀;空气的渗透由外向内,形成变化的温度场,管壁的温度变化由外向内逐渐变低,因此,靠近管壁处冷凝水较多,腐蚀也最严重,主要的腐蚀机理为:由于氧与金属表面形成氧化膜后,形成氧化膜下缺氧的活化阳极区,外部富氧阴极区,构成充气不同的电池,形成电化学腐蚀,导致氧化膜下形成蚀坑。

主要反应为:

阳极区: $\text{Fe}-2\text{e}=\text{Fe}^{2+}$

阴极区: $2\text{H}_2\text{O}+\text{O}_2+2\text{e}=4\text{OH}^-$

$\text{Fe}^{2+}+2\text{OH}^-=\text{Fe}(\text{OH})_2$

氢氧化亚铁在水及氧的进一步催化作用下,逐渐氧化成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2+\text{OH}^-=\text{Fe}(\text{OH})_3$

当环境温度低于液态烃罐的温度后,造成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 释放水份,形成 Fe_2O_3 ,在管壁的外表面形成一定的锈层,锈层形成的同时造成了管壁的垢下腐蚀。

$2\text{Fe}(\text{OH})_3=\text{Fe}_2\text{O}_3+3\text{H}_2\text{O}$

随着罐的运行时间的延长,接管表面的垢层逐渐增厚,受腐蚀程度越来越重,最终导致局部腐蚀穿孔。断面的宏观形貌可以分为萌生区、扩展区和快速腐蚀区。萌生区和扩展区处于同一平面内且表面比较平整,而快速扩展区呈现出源于萌生区的阶梯状特征,断口较为粗糙。在裂纹萌生区与扩展区内,通过观测形貌,可以看到表面被腐蚀的痕迹,接管表面有明显的腐蚀产物,对该区进行分析。S、O 的含量较大对材质组织有很大的影响,可以判断发生了硫化物腐蚀。

从腐蚀扩展区的宏观形貌,可以看到当萌生区和扩展区达到一定的尺寸时,腐蚀产生快速扩展,导致接管快速的腐蚀。同时由于接管腐蚀后仍处于湿硫化氢的腐蚀环境中,所以在更加快速的在扩展区的腐蚀面上也发生硫化物腐蚀。原有保温采用 40mm 泡沫石棉板,吸水性能较高,造成管壁凝结水无法吸出,造成水的聚集。

某重整车间在检修之后开工时其热电偶接管处发生泄漏。该设备工作温度为 280℃;工作压力为 8.0MPa;工作介质为 H_2 , H_2S , 氨,柴油及少量的水。泄漏部位位于接管与设备的连接处。将接管取样送质量监督检验站进行化学成份分析,结果见表 1。

从表 1 可见,接管材料的 C 含量大大超过奥氏体

不锈钢的标准值,而且 Ni, Ti 含量不足。但其他主要元素的含量均在奥氏体不锈钢控制标准之内。

为了进一步证实接管材料的微观组织,进行材料的微观组织分析:接管材料的微观组织为奥氏体+碳化物,晶粒度为 7 级,在奥氏体组织的晶界上分布有许多碳化物。接管材料的含碳量大大超标该材料也为奥氏体不锈钢,但由于碳含量的超标以及其他因素,所以在晶界上形成了碳化物。

原因分析:由于接管材料的含碳量大大超标(超过 100% ~ 200%),以及 Ni, Ti 含量不足,在接管进行焊接加工时,焊接热影响区过饱和的碳会从奥氏体中析出,而形成碳化铬。因本例事故中碳含量太高,碳化铬的形成使得很多晶界处成了极端贫铬区,这些区域在一定的介质条件下会产生晶间腐蚀,而留下很多孔洞。在投用中孔洞内外贯穿造成泄漏。

2 石油化工管道小口径接管腐蚀的内在机理分析

要想系统性地预防小接管腐蚀,就不能仅仅停留在对表面现象的简单归因上,而要深入去剖析其腐蚀发生的多个关键因素以及它们复杂的相互作用机制^[2]。小接管并非独立存在,它的腐蚀是材料本身、环境介质、机械应力、结构设计、制造工艺以及操作维护等多种因素共同耦合作用的结果^[3-5]。

2.1 材料学视角

小接管选材失误是诱发腐蚀的内在根源,在案例二中,热电偶接管材料的碳含量严重超出标准,而镍、钛等稳定化元素含量却不足,这直接致使材料抗晶间腐蚀的能力丧失,在焊接或者设备运行经过敏感温度区间时,过饱和的碳会与晶界附近的铬结合形成碳化铬析出物,造成晶界区域出现“贫铬区”。贫铬区的电极电位远远低于奥氏体基体,在与含氯离子、硫化氢等介质接触时,贫铬区作为阳极会优先发生溶解,形成网状晶间腐蚀裂纹,这种腐蚀有很强的隐蔽性且发展速度快,一旦发生,材料的强度和韧性几乎会完全丧失,在压力作用下很容易引发泄漏甚至断裂,另外如果小接管材质与母材不匹配,或者没有依据介质特性选用抗应力腐蚀开裂或抗氢致开裂的专用材料,那么就会从源头上埋下巨大的腐蚀隐患。

2.2 结构与设计要素

结构与设计要素对小接管的腐蚀行为有着非常关

键的影响,小接管一般是直接焊接在设备或主管道上,这种结构特点决定其存在多种腐蚀诱发点,其一,不合理的连接结构,像普遍采用的承插焊结构,会在根部不可避免地形成缝隙,腐蚀性介质很容易渗入这个狭窄缝隙并处于滞留状态,由于浓度差的存在,会引发严重的缝隙腐蚀。要是采用对接焊并保证全焊透,那么就能从根本上消除这一隐患,其二,小接管因为刚度相对较小,更容易受到来自主管道的流体诱导振动、压力脉动或者设备机械振动的影响,这种交变应力作用会在接管根部应力集中区域形成疲劳微裂纹,裂纹尖端为腐蚀介质提供了侵入通道,同时应力会破坏金属表面的保护膜,加快腐蚀进程,形成腐蚀疲劳,其破坏力比静态腐蚀与纯机械疲劳的简单叠加要高很多。另外设计时若没有充分考虑介质的流动方向与状态,在小接管根部形成涡流、滞流或者局部冲蚀,也会加剧局部腐蚀。

3 石油化工管道小口径接管腐蚀的防护对策

3.1 优化材料选择与结构设计是预防小接管腐蚀的根本前提

在材料选择这件事情上要给予充分重视,不能因为接管口径小并且壁薄,就降低其选材的标准,其材质以及壁厚应当不低于所连接的设备或者管道本体的要求,并且要针对特定的腐蚀环境进行升级,对于操作介质是湿硫化氢环境的小接管,要严格依照相关标准选用有抗氢致开裂以及抗硫化物应力开裂性能的钢材。对于存在连多硫酸应力腐蚀开裂风险的奥氏体不锈钢接管,可以考虑选用稳定化型号或者超低碳型号,在强腐蚀性介质或者高温高压工况下,就算成本有所增加,也应当评估采用更高级别合金比如双相不锈钢、镍基合金的必要性,从源头提升接管的本质抗腐蚀能力,在结构设计方面,应当优先采用对接焊结构完全取代承插焊结构,因为对接焊可实现全焊透,平滑的焊缝过渡可有效避免承插焊根部难以避免的缝隙以及介质在该处滞留积聚引发的缝隙腐蚀。同时在管道设计阶段应当优先选用支管座、半管接头等整体补强型管件,这些管件凭借整体锻造或者厚壁加强的方式有效降低接管根部的应力集中系数,对于可能因为流体扰动、压力脉动或者机械振动导致疲劳的小接管,要在设计中考虑增设合理的支撑来限制其振动幅度,计算其固有频率以避免与外界激振力发生共振,这是防止腐蚀疲劳失效的关键设计措施。

3.2 严格控制制造与安装工艺质量是确保小接管完整性的核心环节

焊接属于小接管跟设备或者主管道连接时的关键制造工序,其质量可直接决定接管的服役安全状况,要制

定并且严格执行经过评定的焊接工艺规程,严格审查焊工资质,保证其拥有小口径薄壁管焊接的特殊技能,焊接时要精确控制热输入量、层间温度等关键参数,防止因热输入过大致使焊接接头区域组织劣化、晶粒粗大或者析出有害相,降低其耐腐蚀性能。针对奥氏体不锈钢材料的焊接,特别要留意采取有效措施防止焊道氧化,控制线能量以减少碳化物的析出敏感性,焊接完成后要进行无损检测,鉴于小接管角焊缝的结构复杂程度,应综合运用磁粉检测或者渗透检测来检查表面及近表面的裂纹、未熔合等缺陷,对于对接焊缝的根部质量可考虑采用射线检测以保证全焊透。对于有消应力要求的焊缝,要进行焊后热处理以降低残余应力,这对预防应力腐蚀开裂很关键,在保温施工这个安装环节,要保证保温材料填充密实、防水层完整无缝,特别要注意接管与阀门等不规则部位的处理,优先选用憎水性强、氯离子含量低的优质保温材料,并且保证金属保护壳的密封性,从根本上切断保温层下腐蚀所需的水分和氧气供给通道。

4 结论

小接管腐蚀问题严重威胁石油化工装置的安全运行,其腐蚀失效是材料本身性能、局部结构设计、制造焊接工艺、特定操作环境及维护管理等多重因素作用的结果,有效防护必须采取系统的综合策略,从设计选型的源头把关,在制造安装环节严格控制质量,在运行期间实施有针对性的监控,建立全生命周期的管理制度。将技术措施与管理体系相结合,才能实现对小接管腐蚀风险的长效控制,保障装置的长周期平稳运行。

参考文献:

- [1] 陈泰劭,范桂利,朱致远.酸性水汽提装置双相钢管线腐蚀失效分析与防护措施[J].涂层与防护,2024,45(04):19-28.
- [2] 官庆想,刘小辉.石化装置小接管隐患分析及检测与管理对策[J].石油化工腐蚀与防护,2024,41(02):22-26.
- [3] 唐飞月亮,王波,张文泽.石化设备小接管结构损伤模式分析及检测方案[J].化工机械,2023,50(03):297-302+325.
- [4] 张芾,高峯,肖守睿,等.炼化装置细小接管技术管理现状分析与展望[J].石油化工设备,2023,52(03):84-87.
- [5] 葛品.油品码头小接管的泄漏风险分析及对策[J].化工技术与开发,2023,52(03):89-91.

作者简介:

柳星雨(1998.6—),男,汉族,湖北武汉人,本科,助理工程师,研究方向:石油化工检维修。