

硫回收装置中腐蚀问题与防护技术研究

王 俊

国家能源集团宁夏煤业有限公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750409

摘 要：硫回收装置通过热反应、克劳斯催化及SCOT尾气处理，实现酸性气体H₂S的高效转化与硫磺回收。然而，装置面临高温硫腐蚀、露点腐蚀及应力腐蚀等严峻挑战。为有效应对硫回收装置中复杂多变的腐蚀问题，我们采取了多项先进防护技术，包括精选耐腐蚀材料、应用高性能涂层、合理使用缓蚀剂及优化工艺流程，以确保装置长期安全稳定运行，高效回收硫磺，并显著降低环境污染。

关键词：硫回收；腐蚀；防护技术

引言

硫回收装置作为化工行业中处理酸性气体的重要设备，其工艺原理基于H₂S的部分燃烧与催化转化，旨在实现硫磺的资源化回收。然而，在高温、高压及腐蚀性介质的作用下，装置内部易发生多种腐蚀问题，严重影响设备的安全性与使用寿命。因此，深入研究硫回收装置的腐蚀机理及防护技术，对于保障装置稳定运行、提升硫回收效率具有重要意义。

1 硫回收工艺原理

硫回收过程是一个复杂而精细的化工过程，其核心在于将酸性气体中的硫化氢（H₂S）有效转化为硫磺，以减少环境污染。在硫回收装置中，H₂S首先进入热反应段，与引入的空气进行部分燃烧。这一过程中，部分H₂S燃烧生成单质硫，同时部分转化为二氧化硫（SO₂）。这一步骤采用了分流法，旨在优化燃烧效率和硫转化率。随后，含SO₂和未反应H₂S的气体进入克劳斯催化反应段。在低温催化条件下，SO₂和H₂S在催化剂的作用下发生催化转化反应，生成更多的单质硫。克劳斯单元因此分为热反应段和低温催化反应段，两者协同作用，提高了硫的总回收率。为了处理克劳斯尾气中的残余硫化物，SCOT（Sulphur Conservation and Tail Gas Treatment）工艺被引入。该工艺采用钴钼催化剂，将尾气中的硫化物加氢还原为H₂S。H₂S通过醇胺脱硫溶液吸收法被提浓，实现回收再利用。这步骤提高了硫的回收效率，还降低了尾气中的残余硫含量。经过SCOT工艺处理后的尾气，其残余硫含量已降至极低水平。尾气被送入焚烧炉进行最终处理。焚烧炉的高温条件能够确保尾气中的残余硫被完全燃烧，生成无害的二氧化碳和水蒸气，满足环保排放要求。在硫回收装置的整个运行过程中，腐蚀问题是不可忽视的重要方面。因此，针对腐蚀问题的防护技术研究同样至关重要。通过合理的材料选择、腐蚀

监测与检测以及应急处理与修复等措施，有效减少腐蚀的发生，确保硫回收装置的安全稳定运行。

2 硫回收装置中的腐蚀问题

2.1 高温硫腐蚀

（1）高温硫腐蚀主要在硫冷凝器、燃烧炉和尾气焚烧炉等高温区域出现。这些部位在硫回收装置中处于关键位置，如果发生腐蚀问题，会对整个装置的运行产生重大影响。当温度超过31℃时，碳钢材质的设备面临高温硫化腐蚀的威胁。在这样的高温环境下，硫化氢开始分解，其中产生的活性硫具有很强的腐蚀性。（2）活性硫与金属铁发生化学反应，生成硫化铁（FeS），其反应式为H₂S+Fe→FeS+H₂。硫化铁这种腐蚀产物具有特殊的性质，它的结构疏松，缺乏紧密性和稳定性。这就导致它无法在金属表面形成有效的保护膜，如同一个有漏洞的盾牌，无法抵御腐蚀性介质的持续攻击。因此，金属表面持续暴露在腐蚀性环境中，使得腐蚀过程不间断地进行，对设备的损害逐渐累积。（3）在高温条件的影响下，活性硫会引发腐蚀，非活性硫的分解也会加剧这过程。非活性硫在高温下分解，增加了腐蚀性物质的浓度和活性，使高温硫腐蚀的情况变得更加复杂和严重。这种双重作用下的腐蚀问题，使得硫回收装置在高温部位的设备面临严峻考验，必须重视对高温硫腐蚀的研究和防护^[1]。

2.2 露点腐蚀

硫回收装置中的腐蚀问题非常突出，其中露点腐蚀是种常见且极具破坏性的腐蚀类型。露点腐蚀主要发生在硫冷凝器出口、尾气分液罐及冷却水系统等低温部位。当过程气中含有二氧化硫和水蒸气时，二氧化硫在低温下与水蒸气结合生成硫酸。硫酸的露点腐蚀是一个复杂的过程，涉及气液相变浓度和温度的变化。在这一过程中，硫酸与金属反应生成硫酸盐，由于无保护膜生

成,导致设备连续不断地遭受腐蚀。温度越低,硫酸露点腐蚀越严重。露点腐蚀的机理主要是电化学腐蚀。当烟气中含有二氧化硫时,在一定的温度和湿度条件下,会与水蒸气反应生成硫酸。硫酸露点腐蚀主要发生在烟气温度降至硫酸露点以下时,硫酸液滴沉积在金属表面,加速了金属的腐蚀过程。这种腐蚀通常表现为金属表面的均匀减薄或局部穿孔,严重影响设备的使用寿命和安全性。露点腐蚀影响设备的正常运行,还导致环境污染和安全事故。因此,研究露点腐蚀的防护技术具有重要意义。常用的防护措施包括选用耐腐蚀材料、采用防腐涂层、加强设备维护等。如不锈钢、镍基合金、钛合金等材料具有良好的耐腐蚀性能,适用于制造硫回收装置的关键部件。还采用复合材料、涂层技术等手段提高金属材料的耐腐蚀性能。露点腐蚀是硫回收装置中常见的一种腐蚀类型,其发生与过程气中的二氧化硫和水蒸气含量密切相关。分析露点腐蚀的机理和影响因素,采取合理的防护措施,有效减缓腐蚀进程,保障硫回收装置的安全稳定运行^[2]。

2.3 应力腐蚀

(1) 热应力腐蚀是硫回收装置中常见的腐蚀形式。这主要是由硫冷凝器管板两侧受热不均匀,导致温度差异明显,产生热应力。这种应力会加速金属材料的腐蚀速率,甚至引发开裂,对设备的稳定运行构成威胁。

(2) 焊接应力腐蚀也是硫回收装置中不可忽视的问题。在设备的制造和安装过程中,焊接是不可避免的环节。焊接过程中产生的残余应力,特别是换热管与管板连接部位的残余应力,会增加该区域的腐蚀敏感性。当这些应力与腐蚀介质(如湿 H_2S 环境)共同作用时,会导致严重的应力腐蚀开裂。(3) 湿 H_2S 环境中的硫化物应力腐蚀开裂及连多硫酸应力腐蚀开裂也是硫回收装置中常见的腐蚀形式。在湿 H_2S 环境中, H_2S 离解产生的氢原子会渗入金属内部,引发金属氢脆和开裂。当奥氏体不锈钢表面产生的硫化铁与氧、水反应时,会生成连多硫酸。这种酸性强且腐蚀性高的物质会加剧应力腐蚀开裂的风险,对设备的长期稳定运行构成严重威胁。硫回收装置中的应力腐蚀问题涉及多个方面,包括热应力腐蚀、焊接应力腐蚀、湿 H_2S 环境中的硫化物应力腐蚀开裂及连多硫酸应力腐蚀开裂等。因此设计和运行硫回收装置时,充分考虑这些腐蚀因素,并采取相应的防护措施,以确保设备的安全稳定运行^[3]。

3 硫回收装置腐蚀防护技术

3.1 材料选择

硫回收装置腐蚀防护技术中,材料选择至关重要。

对于耐蚀金属材料来说,其是预防腐蚀的关键环节。合适的耐蚀金属材料能够显著提升装置的抗腐蚀能力。以316L不锈钢为例,这种不锈钢在硫回收装置中展现出良好的耐腐蚀性。在硫及其化合物存在的环境下,它凭借自身的材料特性形成一定的防护,减缓腐蚀速度,保障装置在相对稳定的状态下运行。而镍基合金,特别是Inconel系列,更是在高温与强腐蚀并存的恶劣工况下表现卓越。硫回收装置中的高温部位,如燃烧炉等关键区域,面临着活性硫、高温等多种因素导致的严重腐蚀威胁,Inconel系列镍基合金能够在此类极端环境下保持优异的耐蚀性能,为这些关键部位筑牢防护壁垒,确保装置的核心部分不受腐蚀破坏。除了金属材料,非金属材料在硫回收装置中也占据重要地位。聚四氟乙烯以其优异的化学稳定性脱颖而出,它对硫回收过程中涉及的多种腐蚀性介质都具有强大的抵抗力。无论是酸性还是其他具有腐蚀性的化学物质,聚四氟乙烯都能有效抵御,保护装置免受侵蚀。玻璃钢同样有着不可替代的作用,它将良好的耐腐蚀性和足够的强度完美结合。在硫回收装置中,这种特性使其非常适合用于制作管道和储罐等设备。管道需要承受内部介质的腐蚀和一定的压力,储罐则要长期储存可能具有腐蚀性的物质,玻璃钢材料的应用能够满足这些设备的需求,保障它们在长期使用过程中不被腐蚀损坏,维持硫回收装置的正常运行。

3.2 涂层防护

涂层防护技术是硫回收装置腐蚀防护的重要手段。有机涂层如环氧树脂涂层、聚氨酯涂层等在金属表面形成一层保护膜,阻止腐蚀性介质与金属直接接触。这些涂层具有良好的附着力、耐腐蚀性和耐磨性。在硫回收装置中,可对设备的外表面和一些内部构件进行涂层防护。无机涂层如陶瓷涂层、搪瓷涂层等具有耐高温、耐磨损和耐腐蚀的特点。如陶瓷涂层通过热喷涂等方法涂覆在设备表面,提高设备在高温、腐蚀环境下的使用寿命。有机涂层通常由树脂、颜料、填料和助剂组成,通过化学反应或物理作用在金属表面形成一层致密的保护层。这层保护层可以有效隔离腐蚀性介质,防止其侵蚀金属基体。环氧树脂涂层因其优异的附着力和耐腐蚀性,广泛应用于化工设备的防腐处理。聚氨酯涂层则以其良好的耐磨性和柔韧性,适用经常受到机械磨损的部位。无机涂层则以其独特的物理化学性质,在高温、强腐蚀环境中表现出色。陶瓷涂层是一种典型的无机涂层,它由高纯度的陶瓷粉末经过特殊工艺制备而成,具有极高的硬度和耐磨性。通过热喷涂技术,将陶瓷涂层均匀地涂覆在设备表面,形成坚固的防护层。搪瓷涂层

也是一种常见的无机涂层,它通过高温烧结工艺,使玻璃质釉料牢固地附着在金属表面,形成一层光滑、耐腐蚀的保护层。在实际应用中,涂层防护技术需要根据具体的工况条件选择合适的涂层材料和施工工艺。如高温、高压环境下,应选用耐高温、耐压的陶瓷涂层;在酸性介质中,应选用耐酸性能好的环氧树脂涂层。涂层的施工质量也直接影响到防护效果,因此须严格控制施工过程中的每个环节,确保涂层的完整性和均匀性^[4]。

3.3 缓蚀剂的应用

(1) 吸附型缓蚀剂通过物理或化学吸附的方式,紧密地附着在金属表面,形成一层保护膜。这层保护膜能够有效地隔绝腐蚀性介质与金属的直接接触,减缓或抑制腐蚀反应的进行。如含有氮、硫、磷等元素的有机缓蚀剂,因其特殊的分子结构和化学性质,在金属表面形成稳定的吸附层,提高金属的耐腐蚀性能。(2) 成膜型缓蚀剂则是通过与金属表面发生化学反应,生成一层致密的保护膜来防止腐蚀。这类缓蚀剂通常含有能够与金属离子形成化学键的活性成分,如铬酸盐等。铬酸盐缓蚀剂能够在金属表面形成一层坚固的铬酸盐保护膜,具有优异的耐腐蚀性能。由铬酸盐的环境危害性,其使用受到越来越多的限制。因此,目前正致力于研究和开发更环保、更高效的替代缓蚀剂,以满足硫回收装置对腐蚀防护的迫切需求。(3) 吸附型缓蚀剂和成膜型缓蚀剂在硫回收装置的腐蚀防护中发挥着重要作用。通过合理选择和应用缓蚀剂,提高设备的耐腐蚀性能,延长使用寿命,降低维护成本,为硫回收装置的长期稳定运行提供有力保障。

3.4 工艺优化

硫回收装置腐蚀防护技术中,工艺优化是极为关键的环节。对工艺参数的控制,其严格程度直接关系到装置的腐蚀情况。硫回收装置的温度、压力、流量等参数必须精准把控,因为任何微小的波动都可能引发局部腐蚀问题。如温度的突然变化导致某些腐蚀性介质在局部凝结,压力的异常波动或许会使原本稳定的反应环境

失衡,而流量的改变也可能造成某些区域反应物浓度异常,这些情况都会增加腐蚀风险。通过先进的自动化控制系统,实时对这些参数进行监测,如果发现异常,立即进行调整,使装置始终在稳定的条件下运行,最大程度地减少因工艺参数波动而产生的腐蚀隐患;改进工艺流程对于降低腐蚀风险也有着重要意义。对硫回收工艺流程的优化,核心目标是减少腐蚀性介质的产生或积聚。以气体净化环节为例,通过优化这环节,可以降低进入硫回收装置的杂质含量。杂质在硫回收过程中可能会参与复杂的化学反应,生成更多腐蚀性物质,或者为腐蚀反应提供更有利的环境。因此,通过改进工艺流程,降低杂质含量,从源头上减少腐蚀介质,有效降低整个硫回收装置的腐蚀风险,延长装置的使用寿命,保障其稳定、高效地运行^[5]。

结束语

综上所述,硫回收装置的腐蚀问题与防护技术是一个复杂而关键的领域。通过材料选择、涂层防护、缓蚀剂应用及工艺优化等综合措施,可以有效应对装置面临的腐蚀挑战,提升设备的安全性及可靠性。未来,随着材料科学、表面工程及智能化技术的持续进步与创新,硫回收装置的腐蚀防护技术将更趋完善,为化工行业的绿色、高效、可持续发展提供坚实有力的技术支持与保障。

参考文献

- [1]李长恩.硫磺回收装置腐蚀机理与防护技术研究[J].设备管理与维修,2024(5):92-94.
- [2]由召举,梁春阳,耿继常,等.硫磺回收装置运行中的腐蚀问题分析及对策[J].石油化工腐蚀与防护,2023,40(3):33-51.
- [3]孙佳钰.硫磺回收装置中硫致腐蚀的研究进展[J].全面腐蚀控制,2023,37(4):25-31.
- [4]赵小存.硫回收湿法制酸装置运行中存在的问题及解决措施[J].硫酸工业,2022(11):14-18.
- [5]许清鑫,许东哲.硫磺回收装置的腐蚀及防护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(16):37-38.