

# 缓蚀剂在油气井生产中的应用探析

周艺颖

(滨州乾坤化工机械有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘要** 油气井开采过程中容易产生腐蚀现象, 不仅会降低设备使用寿命, 而且会增加运营成本及安全风险。所以, 对腐蚀控制策略进行研究和运用具有重要意义。缓蚀剂是腐蚀控制最主要的方法, 本文在阐述缓蚀剂对油气井开采的重要意义的基礎上, 对油气井开采过程腐蚀控制策略进行深入探讨, 其中包括管材的选择和优化、表面处理技术、电化学保护技术和缓蚀剂应用等方面。另外, 本文对缓蚀剂进行了较深的归类, 从化学组成、电极过程的作用、保护膜的特点和作业类型几个角度解释了缓蚀剂的作用机理, 旨在对缓蚀剂在油气井生产过程中的使用和研究起到综合借鉴和指导作用。

**关键词** 缓蚀剂; 油气井生产; 腐蚀控制; 表面处理技术; 电化学保护技术

中图分类号: TE3

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0115-03

缓蚀剂种类多、作用机理比较复杂, 因此如何科学、合理地选择缓蚀剂、深刻认识缓蚀剂作用机理已成为油气井腐蚀控制领域迫切需要解决的课题。为此, 本研究探讨油气井生产过程中缓蚀剂分类及作用机制, 以期对油气井生产中缓蚀剂的选择及应用提供理论指导及参考作用, 具有重要的现实意义。

## 1 缓蚀剂在油气井生产中的重要意义

缓蚀剂作为油气井生产广泛使用的化学添加剂, 其核心作用是在腐蚀性环境下有效地延缓或阻断金属设备损坏进程。在化学上, 缓蚀剂可以通过在金属表面或者腐蚀介质中的作用形成保护性薄膜, 而使腐蚀速率显著下降并延长器件使用寿命<sup>[1]</sup>。在油气井开采的真实情景下, 地下环境复杂多变, 金属设备及管道经常要面对高温、高压、高盐度及各种化学物质的腐蚀, 致使腐蚀问题特别严重。所以, 使用缓蚀剂是很重要的, 不仅直接影响油气井生产安全稳定, 而且深刻地影响运营成本与经济效益。

## 2 油气井生产中的腐蚀控制策略

### 2.1 管材选择与优化

油气井开采过程中, 腐蚀控制作为关键工作, 直接影响生产安全、设备寿命和运营成本等。为达到有效腐蚀控制的目的, 各种策略在实践中得到了广泛的应用, 而管材选择和优化则是第一个也是最根本的环节<sup>[2]</sup>。管材是油气井生产的核心部件, 管材的材料、性能以及耐腐蚀性等, 直接关系着整个体系的稳定性以及耐久性。因此, 在挑选管材的过程中, 必须深入考虑井下可能存在的腐蚀性环境, 包括温度、压力、

酸碱度和流体成分等多方面的因素, 以确保所选择的管材在长时间的使用过程中能够保持良好的抗腐蚀性能。除材质选择外, 管材优化是腐蚀控制策略的一个重要环节。其中包括在管材表面喷涂防腐涂层, 添加合金元素增强耐腐蚀性等特殊加工, 并通过先进制造工艺减少管材内部缺陷及应力集中点等措施降低腐蚀概率。另外, 可通过对管材设计及结构进行优化, 例如, 加大壁厚及使用耐腐蚀接头及连接方式, 进一步提高管材整体系统抗腐蚀能力<sup>[3]</sup>。

### 2.2 表面处理技术

表面处理技术主要是在金属设备或者管材表面经过特殊处理, 使其形成耐腐蚀性优良的保护膜, 有效地隔绝腐蚀介质和金属基体之间的直接联系, 极大地延缓了腐蚀进程。表面处理技术方法很多, 镀层技术由于技术成熟, 效果显著, 得到了广泛的应用。采用电镀、热镀或化学镀等技术, 在金属表层沉积如锌、镍、铬等耐腐蚀金属或合金, 能有效增强其对腐蚀的抵抗力<sup>[4]</sup>。除镀层技术外喷涂技术还是表面处理技术的一个重要分支。它是用喷涂设备在金属表面均匀喷涂防腐涂料, 使金属表面产生致密防腐层。这类涂料一般含有丰富的耐腐蚀树脂、颜料及填料等, 能在井下恶劣环境下长期稳定防腐。此外, 渗氮和渗硫等新型表面处理技术逐渐被用于油气井开采。这些技术改变了金属表面化学成分及微观结构, 赋予了金属表面较高硬度及耐腐蚀性, 使得金属表面在井下恶劣环境下展现出更加优异的抗腐蚀性能。

### 2.3 电化学保护技术

电化学保护技术主要是根据电化学原理将金属设

备或者管材电位变化至钝化状态或者形成保护膜,来有效地延缓或者阻断腐蚀过程。电化学保护技术有两类,一类是牺牲阳极阴极保护法,另一类是外加电流阴极保护法。牺牲阳极阴极保护法,是通过将电位更负的金属(即牺牲阳极)与被保护金属设备或管材连接,使得腐蚀介质中的腐蚀电流主要流向牺牲阳极,从而保护被连接的金属不受腐蚀。该方法结构简单、不需要外部电源、便于维修,已广泛用于油气井的生产<sup>[5]</sup>。外加电流阴极保护法,是利用外部电源将阴极电流供给受保护的金属设备或者管材,将它们的电位下降到腐蚀电位之下,以达到阴极保护的目的。该方法适合远距离、大面积金属设备或者管材防护,防护效果更可靠、更持久。但对外部电源要求高、控制系统也比较复杂,所以,实际使用时要考虑到成本及维修问题。

#### 2.4 缓蚀剂的应用

缓蚀剂是能有效延缓或防止金属在腐蚀性环境下发生腐蚀的化学物质之一,它是通过使金属表面生成保护膜而改变腐蚀反应历程或者吸附到金属表面上,显著减小了腐蚀速率,进而提高了设备的使用寿命,减少了运营成本及安全风险。

在油气井开采的真实情景下,地下环境复杂多变、金属设备及管道经常要面对高温、高压、高盐度及各种化学物质的腐蚀,致使腐蚀问题特别严重。所以,使用缓蚀剂是很重要的。通过对缓蚀剂进行科学合理的选择,可针对不同作业环境及需要形成有针对性的腐蚀控制方案,以保证油气井连续高效开采。缓蚀剂使用范围不限于某一种设备或者管材,它可广泛用于油气井开采过程中的每一个环节,其中包括钻井、完井、采油和集输。不同作业阶段可根据腐蚀介质性质、温度、压力等因素选择合适缓蚀剂类型及浓度,使腐蚀控制效果最优。另外,缓蚀剂的使用也可以与其他的腐蚀控制方法结合起来,从而构建一个综合的腐蚀控制系统。在各种策略配合下,油气井开采腐蚀控制水平可进一步提高,保证了装置长期平稳运行。

### 3 缓蚀剂的分类与作用机理

#### 3.1 化学组成分类

缓蚀剂是油气井生产过程中被广泛使用以延缓或制止金属腐蚀所使用的化学物质之一,它具有种类多、作用机制复杂等特点。就其化学组成而言,缓蚀剂可粗略地划分为无机缓蚀剂与有机缓蚀剂两大类型,它们对油气井的生产造成了不同程度的影响。

无机缓蚀剂是以无机盐或者氧化物为主的缓蚀剂,它的机理大多是建立在金属表面生成一层紧密的保护膜来隔离腐蚀介质和金属之间直接的接触。这种缓蚀剂一般耐高温和高压性能较好,适合井下环境比较恶

劣的现场使用。常用的无机缓蚀剂主要有铬酸盐、亚硝酸盐和硅酸盐,这些缓蚀剂能在金属表面生成一层稳定的氧化膜或者沉淀膜,从而有效地延缓腐蚀速率。

有机缓蚀剂主要由有机化合物构成,并且其工作原理表现出更多的复杂性和多样性。这种缓蚀剂的有机分子一般含极性基团与非极性基团两种类型,能通过吸附作用与金属表面牢固结合,从而形成致密有机保护膜。同时,有机缓蚀剂的一些组分也能在腐蚀介质中同离子或者分子进行化学反应而改变腐蚀反应过程,使腐蚀速率下降。常用的有机缓蚀剂主要有胺类、醛类和醇类,这些缓蚀剂在各种腐蚀环境下都显示了卓越的缓蚀性能。

除化学组成不同外,无机缓蚀剂与有机缓蚀剂的作用机理有明显区别。无机缓蚀剂的作用主要是靠在金属表面生成一层保护膜与腐蚀介质隔离,有机缓蚀剂更多的是靠吸附作用及改变腐蚀反应历程延缓腐蚀的进行。这一区别,使无机缓蚀剂与有机缓蚀剂应用于油气井生产时,其应用场景与优点各不相同。

#### 3.2 电极过程影响分类

缓蚀剂作用机制与缓蚀剂在电极过程中的作用有密切关系,按缓蚀剂在金属腐蚀电极工艺中的作用可分为阳极型、阴极型及混合型三类。

阳极型缓蚀剂的作用主要是抑制金属阳极的溶解过程,从而延缓腐蚀的发生。这种缓蚀剂可吸附于金属表面并形成致密保护膜,使金属表面金属离子不能进入腐蚀介质。同时,阳极型缓蚀剂的部分组分也能与金属离子生成难溶化合物,从而进一步延缓金属阳极溶解过程。常用的阳极型缓蚀剂主要有铬酸盐和钼酸盐,这些缓蚀剂被广泛用于油气井生产过程中保护金属设备不被腐蚀。

阴极型缓蚀剂的主要作用机制是通过抑制金属阴极的活动来延缓腐蚀过程。这类缓蚀剂能够吸附在金属表面,形成一层具有疏水性的保护膜,从而阻止腐蚀介质中的去极化剂(如氧气)到达金属表面,减缓金属的阴极过程。同时,阴极型缓蚀剂的部分组分也能和去极化剂反应使之浓度下降,从而进一步延缓了金属腐蚀速率。常用的阴极型缓蚀剂主要有锌的盐类和胺类,对油气井的生产具有相同的控制腐蚀作用。

混合型缓蚀剂融合了阳极型和阴极型缓蚀剂的各自特性,能有效地抑制金属在阳极和阴极过程中的行为。这种缓蚀剂一般都含有各种有效成分,能同时在金属阳极与阴极上发挥作用,形成一层较为紧密的保护膜,使金属腐蚀速率得到较为有效的延缓。常用的混合型缓蚀剂主要有一些有机磷化合物和含氮有机物,这些缓蚀剂广泛应用于油气井生产。

### 3.3 保护膜特征分类

缓蚀剂效果与金属表面生成保护膜的特性有密切关系。缓蚀剂按保护膜的膜特性及形成机制可分为三类：氧化膜型、沉淀膜型及吸附膜型。

氧化膜型缓蚀剂是以促进金属表面致密氧化膜的生成为主，从而延缓腐蚀。这种缓蚀剂的有效成分能与金属离子反应，产生稳定氧化物，使金属表面被覆上一层具保护作用的氧化膜。高氧化膜能有效地隔绝腐蚀介质和金属直接接触，延缓了腐蚀反应。常用的氧化膜型缓蚀剂有铬酸盐、亚硝酸盐，这些缓蚀剂在金属表面生成的氧化膜稳定性好、耐腐蚀性强，可对金属起到长期防护作用。

沉淀膜型缓蚀剂的作用机制是通过在金属表层生成沉淀膜来降低腐蚀速度。这种缓蚀剂的有效成分能在腐蚀介质中同离子反应产生不溶性沉淀物，使金属表面被覆上一层起隔离作用的沉淀膜。沉淀膜也能有效地隔绝腐蚀介质和金属直接接触而减小腐蚀速率。常用的沉淀膜型缓蚀剂有硅酸盐、磷酸盐，这些缓蚀剂在金属表面生成的沉淀膜致密、附着力强，可对金属进行有效腐蚀防护。

吸附膜型缓蚀剂的工作原理是在金属的表面生成吸附膜，从而有效地延缓腐蚀过程。该类缓蚀剂有机分子含极性基团与非极性基团，可通过吸附作用与金属表面牢固结合，从而形成致密有机保护膜。高吸附膜能有效地阻碍腐蚀介质直接与金属接触，也能使金属表面电荷状态及能级发生变化，腐蚀反应活性下降。常见的吸附膜型缓蚀剂，如胺类、醇类、醛类等有机化合物，在金属表面形成的吸附膜具有很高的稳定性和耐腐蚀性，可以为金属提供长期的腐蚀保护。

### 3.4 作业类型分类

油气井开采时，缓蚀剂依据不同作业类型及工艺需求，其使用亦呈现多样化特征。根据作业类型划分，缓蚀剂可分为钻井液缓蚀剂、酸化缓蚀剂及压裂液缓蚀剂三大类，这些缓蚀剂对其作业环节起到了至关重要的腐蚀控制作用。

钻井液缓蚀剂专门用于钻井作业。钻井时钻井液作为循环流体不但起着携带钻屑和冷却钻头等作用，而且要使井壁上生成一层膜来保护井壁免受侵蚀。该钻井液缓蚀剂能有效地延缓钻井液中腐蚀性成分对金属设备及管材的侵蚀，保证钻井作业顺利进行。该类缓蚀剂一般分散性好、稳定性好，能均匀地分布于钻井液中并形成一层高效保护膜。常用钻井液缓蚀剂主要有无机盐类和有机胺类，这些缓蚀剂能在井下高温高压条件下稳定缓蚀。

在油气井的酸化处理过程中，酸化缓蚀剂被广泛

使用。酸化处理就是向油井中注入酸性溶液使井壁周围堵塞物溶解而增加油气井产量。但是，酸性溶液对于金属设备及管材有很强的腐蚀性。酸化缓蚀剂能有效地延缓酸性环境下金属腐蚀速率和保护井内设备免受损坏。该类缓蚀剂一般抗酸性能突出、高温稳定性好、能在强酸性及高温环境中保持高效缓蚀效果。常用酸化缓蚀剂主要有有机胺类和醛类，这些缓蚀剂对酸化作业起到了控制腐蚀的作用。

压裂液缓蚀剂是一种专门为油气井进行压裂作业的缓蚀剂。压裂作业就是将高压流体注入井体内，在井壁上产生裂缝从而达到增加油气井产量的目的。但压裂液的腐蚀性成分对金属设备及管材也有相同的腐蚀作用。压裂液缓蚀剂能在高压、高温井下环境下有效地延缓金属腐蚀速率，使井内设备免遭损坏。该类缓蚀剂一般抗压性能较好、高温稳定性较高，能在高压、高温环境中保持高效缓蚀效果。常用压裂液缓蚀剂主要有无机盐类和有机磷化合物，这些缓蚀剂对压裂作业腐蚀控制起到至关重要的作用。

## 4 结束语

文章通过深入探究油气井开采过程中缓蚀剂的使用情况，从缓蚀剂化学组成、电极过程效应、保护膜特征以及作业类型几个角度综合划分缓蚀剂类别，论述了各种缓蚀剂的工作原理以及它们在油气井生产中的实际应用。结果表明：不同类型缓蚀剂的作用机理及应用场景有所差别，但是，均对油气井生产起到了显著的腐蚀控制效果。所以，在实际使用过程中要针对特定作业环境、工艺需求以及设备材质进行科学合理的缓蚀剂选择，并且对缓蚀剂的作用机理以及保护膜的特点进行深刻认识，从而达到更加准确的腐蚀控制以及设备保护。本研究结果对提高油气井生产腐蚀控制水平，延长设备使用寿命，降低运营成本等方面都有重要指导意义。

## 参考文献：

- [1] 蔡斌, 罗刚, 李三喜, 等. 抗高温缓蚀剂 HSJ-M 在油气井环空保护液中的应用研究[J]. 化学与生物工程, 2023, 40(08):65-68.
- [2] 谢萍毅, 蔡潇潇, 李春江, 等. 一种油气井用环空保护液缓蚀剂、制备方法和使用方法:CN202110320298.4[P]. 2021-07-20.
- [3] 焦其正, 付朝阳, 王丽荣, 等. 油气田用咪唑啉类缓蚀剂浓度的检测方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(06):131-133.
- [4] 中国科学院金属研究所. IMC-系列缓蚀剂防腐技术[EB/OL]. <http://www.irgrid.ac.cn/handle/1471x/660366#>.
- [5] 范鑫. 缓蚀剂在油气井生产中的应用研究进展[J]. 山东化工, 2022(04):51.