

天然气井筒用药剂研究进展与发展趋势



程海宏¹, 余依璐¹, 董洁^{2,3}, 董三宝^{4,*}

¹ 西安长庆化工集团有限公司, 陕西西安 710200

² 中国石化上海高桥石油化工有限公司, 上海 200137

³ 西安石油大学陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室, 陕西西安 710065

⁴ 西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西西安 710065

摘要: 目前, 天然气的开采常伴随井底积液、井筒腐蚀和水合物堵塞等问题, 传统上针对这几个问题的解决方法是分别使用单一化学剂。当气井井筒存在井底积液时, 选用泡排剂实施气井泡沫排液; 为避免气井井筒出现腐蚀, 则选择注入缓蚀剂以保护井筒; 当井筒存在水合物堵塞风险时, 则选择注入水合物防聚剂等化学剂。然而, 现实中以上问题往往同时存在, 若依次单独加入上述三种化学剂则容易出现不配伍等问题。若研发出一种泡排-防聚-缓蚀多种功能一体剂体系, 则能同时解决上述三种问题, 实现一剂多效。目前, 能同时解决上述三个问题的多功能一体剂的研究报道较少。本文结合泡排剂、缓蚀剂、水合物防聚剂的作用机理及发展现状, 提出一种同时具有泡排、缓蚀和抑制水合物聚集的多功能一体剂, 为促进天然气稳产增产提供新策略。

关键词: 泡排; 缓蚀; 水合物防聚; 一体剂

DOI: 10.57237/j.xxxx.2023.01.001

Research Progress and Development Trend of Chemicals Used for Natural Gas Wells

Cheng Haihong¹, Yu Yilu¹, Dong Jie^{2,3}, Dong Sanbao^{4,*}

¹ Xi'an Changqing Chemical Group Co. Ltd, Xi'an, 710200, China

² Sinopec Gaoqiao Petrochemical Co., Ltd., Shanghai, 200137, China

³ Shaanxi Province Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Reservoir Protection Technology of Oilfields, Xi'an Petroleum University, Xi'an, 710065, China

⁴ Xi'an Petroleum University Oil and Gas Field Chemistry Shaanxi Provincial University Engineering Research Center, Xi'an, 710065, China

Abstract: At present, the production of natural gas is often accompanied by problems such as liquid accumulation at the bottom of the well, wellbore corrosion, and hydrate plugging. The traditional solution to these problems is to use a single chemical agent. Usually, foaming agents, corrosion inhibitors and hydrate anti-agglomerants are injected into the wells to mitigate the liquid loading, corrosion and blockage caused by gas hydrate, respectively. However, the issues associated with liquid loading, corrosion and blockages by hydrate often occurs at the same time, there may be compatibility issues among the foaming agents, corrosion inhibitors and hydrate anti-agglomerants. If multi-functional integrated agents are developed,

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目“绿色天然气水合物防聚剂的设计合成及构效关系研究”(2020JQ-775).

*通信作者: 董三宝, dongsanbao@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-13; 接受日期: 2024-02-01; 在线出版日期: 2024-02-04

<http://www.materialsrd.com>

those three problems mentioned above can simultaneously be solved. However, there are few reports regarding the multi-functional integrated agents that can simultaneously solve the above three problems. This article combines the action mechanism and development status of foaming agents for gas well deliquification, corrosion inhibitors and hydrate anti-agglomerants to propose a multi-functional integrated agent that simultaneously has liquid unloading, corrosion inhibition and hydrate anti-agglomeration, providing a new idea to efficiently promote the natural gas production.

Keywords: Foam-based Deliquification; Corrosion Inhibition; Hydrate Anti-aggregation; Integrated Agent

1 引言

随着气田的不断开发,大量气井出现会储层液体流入气井并造成气井水淹的现象,这显然会降低[1]天然气的开采效率,严重时会导致气井停产[2]。为保障天然气的安全高效开采,泡沫排水采气技术被认为是解决井底积液的一种简便可行的方法,该方法在实际生产中得到了广泛的应用。然而,该方法也存在泡排剂单剂使用效果不理想等问题。此外,聚集在井底的地层水含有大量的无机盐及酸性物质,对气井井筒具有一定的腐蚀作用,成为天然气开发过程中的安全隐患。对于井筒腐蚀,加注缓蚀剂是一种有效办法。一般来说加注少量缓蚀剂就可以避免井筒腐蚀的发生。天然气水合物是由笼状水分子及其中的气烃分子组成的固体化合物。在天然气井井筒甚至油气管道中,天然气水合物的形成可能导致井筒及管道堵塞甚至安全事故。水合物防聚剂可以有效抑制水合物晶体聚集成块并堵塞井筒,是一种比较有应用前景的方法。此外,水合物防聚剂受温度(过冷度)影响较小,且在较低浓度条件下即可有效抑制水合物聚集成块。出于提高经济效益考虑,在实际的生产应用中常常将不同类型的抑制剂复配以获得优异的针对水合物生成与聚集过程的抑制效果。

2 天然气开采目前面临的问题

2.1 井底积液问题

天然气开采常受到地层水的干扰,地层水在产气过程中会流入井筒,形成流动障碍,降低天然气的开采效率。当地层能量下降时,井筒内的产液不能被气流顺利携带到地面,形成平常所谓的“气井积液”。除了地层水聚集于井筒,在天然气的开采过程中,井筒热能逐渐降低,高碳气烃组分会形成凝析油,加剧了井底积液状况。若井底积液状况不能及时解除,当井底积液静液柱压力相等于地层压力时,天然气产出将会

受到严重抑制,同时会导致地层产生“水锁”效应,减少储层中油气的渗透率,甚至导致气井的停产[3]。针对此状况,泡排排水采气技术因其工艺简单、除液效率高优点,是所得到的解决井底积液、促进天然气增产的有效办法[4]。

2.2 水合物堵塞问题

天然气水合物是在低温度及一定压力条件下,由水分子定向排列而形成的笼状结构固态物质,当然在这些水分子形成的笼腔也常常束缚有气烃分子(如甲烷、乙烷、丙烷等)。水合物外观虽然与冰相似,但其内部水分子因氢键作用而形成的笼腔结构,与冰晶体结构完全不一样,因而天然气水合物的物化性质与冰完全不相同。常根据水合物的晶体结构分为I型、II型和H型三种结构类型[5]。当温度和压力条件合适时,在天然气开采和后续的集输过程中也常见水合物的生成。水合物的形成极有可能导致井筒、管道的堵塞,使油气生产停顿,甚至会发生严重的安全和环境问题。因此有效地抑制水合物的生成,对于降低管道水合物堵塞风险具有重要的意义,也是深海、高寒地区油气生产过程中亟待解决的问题[6]。化学剂是解决水合物生成和后续堵塞问题的有效办法。

常见的能抑制水合物生成的抑制剂为热力学抑制剂,例如甲醇、乙醇等化学剂。热力学抑制剂能显著改变水合物生成的热力学条件,使得水合物只能在更高压力和更低温度条件下才能生成,有效避免了特定工况条件下水合物的生成及后续的堵塞风险。但是这些热力学抑制剂的加量通常比较高,不够经济,且给产出的气液组分后处理带来极大的困扰。此外,水合物动力学抑制剂(如聚乙烯吡咯烷酮等)也可在一定程度上延缓水合物的生成和堵塞风险,但是该类抑制剂的最大缺点是其性能受过冷度影响很大,在高过

冷度条件下常常失去抑制效果。

除了上述抑制剂,有一种称为水合物防聚剂的化学剂也日益得到了研究人员和现场技术人员的关注。水合物防聚剂本质上来说是两亲类物质,类似表面活性剂。防聚剂的其中一端的官能团可以有效吸附在水合物表面,另一端通常为疏水基团。因而防聚剂的吸附会显著改变水合物表面的亲水亲油特性,使其由亲水特性转变为亲油特性,从而有效抑制了水合物颗粒之间的聚集成块的趋势,大大降低了水合物堵塞的生成风险。水合物防聚剂的最大优点是用量较低,且其性能通常不受过冷度的影响。综上,水合物防聚剂是解决水合物聚集堵塞风险的极具应用前景的方法。

2.3 井筒内腐蚀问题

在气井开采天然气阶段,不同井筒位置的温度、压力、流体持液率、各相流体流速等条件均不一样,这使得井筒内不同深度部位引起腐蚀的主导因素各不尽相同。天然气开发过程中由于地层以及井筒内的高矿化度地层水以及流体中携带的酸性气体,这些因素均会井筒一定程度上的腐蚀[7]。此外,井筒中的水分大多呈环雾流状态,在作业井壁上累积形成水膜,这会加速腐蚀介质对井筒的腐蚀作用[8],管道腐蚀严重时会导致井筒报废及安全事故。因此,预防及解决井筒的腐蚀问题极其重要。预防管材腐蚀的方法很多,其中加注缓蚀剂抑制腐蚀是一种操作简单、效果明显且最具经济性能的举措[9]。在易腐蚀的环境介质中加入少量缓蚀剂即可拥有较高的缓蚀性能,可有效避免金属腐蚀的发生,延长井筒的寿命。

3 国内外研究现状

3.1 泡排剂

最早将泡沫排水采气技术实地使用的是美国俄克拉荷马州和堪萨斯州气田,采用此技术后,使其 200 多因井底水淹导致天然气产量降低的气井的开采率高达 90% [10]。虽然效果显著,但前期的泡排剂仅仅具有起泡能力并不足以应对各种复杂的地层环境。二十世纪 80 年代,Select 公司研究出了油相起泡剂,当然也研发了具有起泡性能和其他多种功能的起泡剂[11]。随后 Champion、Baker Hughes 等公司也分别研发出了可在井筒温度大于 200℃时仍有良好起泡和携液效果的起泡剂,并迅速生产投入使用[12],但同时由于存在

生产成本太高的缺点,并不适合大规模应用[13]。随后,Rhone-Poulenc 公司研发出具有咪唑啉结构的醋酸盐型表面活性剂[14],这种表面活性剂不仅在水相中快速产生优良性质的泡沫,在油相中亦然[15]。2013 年,A. Bureiko 等人对市售聚合物 Aculyn™22 和 Aculyn™33 在 NaCl 存在下的溶液本体和表面流变性进行了实验研究,实验发现两种聚合物溶液的体相黏度和表面黏弹性模量均随着聚合物浓度的增大和盐浓度的减小而增大,且两种聚合物的溶液都表现出非常好的起泡性并可形成稳定的泡沫,具备作为泡排剂而使用的潜质[16]。

1980 年,四川气田将空泡剂和无患子两种泡排剂应用于现场排水采气作业,并同时 16 口实验气井进行后续产能统计,结果显示,经过后续一年期间的开采,总增加的天然气产量为 757.12 万方。然而,这两种泡排剂的缺点是其性能均受到地层温度的严重影响,无患子、空泡剂分别在地层温度高于 90℃、70℃的条件下会逐渐失去良好的起泡和携液能力[17]。1995 年,尹忠[18]针对有水气藏的开发特点,为了提高油气产量成功研制出了 CZP 泡排剂,并在同等实验条件下通过 Ross-Miles 及 Waring-Blender 法对 CZP 泡排剂的起泡、携液和抗凝析油能力进行了系统性评价,发现 CZP 在高温、高矿化度以及更广泛 pH 的条件下依旧能保持较好的性能。

进入 21 世纪,泡排剂由于其具备使用简单、投资资金少、设备配套完整等优点,越来越多的研究和现场技术人员致力于新型泡排剂体系的研发。2001 年,郭学辉[19]等针对中原气田井深、矿化度高、温度高等特点,研究出相应的起泡剂 NJS,实验还发现这种泡排剂与气井缓蚀剂存在良好的配伍和协同能力。2007 年,马成华[20]针对吉林油田采气井井筒高井深、井底温度高、矿化度高的特点,研发了一种新型的泡排剂,此泡排剂不仅具有优良起泡稳泡性、热稳定性,还与地层中的矿化度水有极好的配伍性。2008 年,刘竟成[21]等通过大量的筛选评价实验,成功研发出泡排剂 SP,在 90℃的高温下,SP 泡排剂的起泡和稳泡性能均能达到最佳,且在富含 H₂S 的气井环境中其性质也几乎无变化。冯朋鑫[22]等针对苏里格气田苏 48 区块气井的井底积液问题,通过实验优选出了具有抗油性和耐盐特性的泡排剂 ERD-05,现场试验结果达到了良好的气井排水采气的目的。李谦定[23]等通过正交设计实验法优化复配得到一种新型高效的泡排剂 LYB-1,试验结果表明,LYB-1 泡排剂与地层水具有良好的配伍和缓

蚀性能,是一种具有优良的抗温、抗凝析油性能,同时还具有较强的抗甲醇能力的新环保型泡排剂。胡敏[24]等通过 Ross-Miles 法研制出一种新型抗油耐盐气井泡排剂 HUM-1,室内评价得出该泡排剂能有效降低表面张力,拥有效果良好的抗温与抗盐能力。李进[25]等将 SDS 以及 CKD 进行复配,再在复配体系中加入 FC-03 加强泡沫体系的稳定性,得到了一种同时具有耐油、耐高矿化度、耐高乙二醇性能的泡排剂。2018 年,武俊文[26]等合成了一种 Gemini 型阴离子表面活性剂,并将其作为泡排剂体系的主剂,再与纳米粒子稳泡剂复配,得到了一种拥有高效起泡和携液能力的泡排剂,该泡排剂耐温最高能达到 150℃,耐盐最大能达到 250 g/L,并且具有在含酸性腐蚀气体存在条件下稳定起泡和携液的能力。

需要指出的是,经过研究人员和技术人员对新型泡排剂体系的长期攻关和实践,目前已拥较为成熟的应用于实际泡沫排水技术的泡排剂。然而,以泡排剂为基础的多功能一体剂的研究和应用尚不多见。

3.2 缓蚀剂

Walket R [27]提出在一定条件下,苯三唑(BTA)与盐酸、硝酸、硫酸、磷酸和一些盐溶液结合使用,可作为铜的缓蚀剂。2006 年, W Villamizar [28]等基于电化学阻抗谱(EIS)的测量研究,探索了咪唑啉对碳钢在 3% NaCl 中的腐蚀抑制作用。其研究发现,由于油相的存在,咪唑啉对碳钢腐蚀的抑制作用显著增加,因为咪唑啉既可以作为乳化剂,也可以作为缓蚀剂。2007 年, Asmara Y P [29]等采用化学酸法从柑桔叶和种子中提取出了主要成分,并用于制备高效绿色缓蚀剂。经采用雾盐室和电化学池研究,所制备的绿色缓蚀剂对低碳钢在 3% NaCl 溶液中具备优异的缓蚀效果。在测试过程中, Asmara Y P 等用雾盐室模拟气相条件,用失重法直观评价腐蚀速率并计算腐蚀速率,并用线性极化电阻(LPR)法计算了电化学腐蚀速率。实验均在 pH=7 的自然条件下进行,作用期限为 3 天,结果表明所制备的绿色缓蚀剂对低碳钢腐蚀的缓蚀率达到了 82.39%。Ituen E [30]等将象草提取物与氯化铵(AMC)、碘化钾(PTI)等强化卤化物复配,在 30℃、40℃、50℃、60℃和 90℃下,通过失重法和电化学法研究了复配物在 3.5% HCl 中对碳钢的缓蚀效果。结果表明,象草提取物与氯化铵(AMC)、碘化钾(PTI)均表现出了较好的协同效果,其中象草提取物与 PTI 协同效果更优,产生的缓蚀效率

最高。该缓蚀剂体系为混合型抑制剂,通过自发吸附在碳钢表面产生效果。2023 年,在 Garrido R A S [31]等研究发现,在 3% 的氯化钠溶液中,20 ppm 烟酸对镀锌钢的缓蚀率可达 66.6%,此外,烟酸也表现出作为缓蚀剂的活性,能有效防止镀锌钢在盐水环境中形成点蚀。

1982 年,华中理工大学与四川石油管理局井下作业处合作,成功研制代号为“7701”的酸化缓蚀剂[32],并成功应用于四川省 7000 米深的超深井(井眼温度 196℃),成功解决了中国油井长期存在的酸腐蚀问题。曹楚南[33]院士等采用稳态极化曲线、线性极化电流、交流阻抗等电化学手段研究了在酸性介质中吸附型缓蚀剂的相关电化学参数,讨论了吸附型缓蚀剂作用机理和研究方法的进展,提出了相关的理论模型。郑兴文[34]研究了一种以竹叶提取物为主要原料的环保型缓蚀剂,该类缓蚀剂具有良好的缓蚀性能。邵明鲁[35]等通过溴己烷及乌洛托品合成出季铵盐型缓蚀剂,通过静态失重法得出该缓蚀剂具有极好的缓蚀性能,该季铵盐缓蚀剂与聚乙二醇、丙炔醇等复配之后能表现出更优异的协同效果。

需要指出的是,缓蚀剂发展到目前,已有很多突破,在气井缓蚀剂方面也具有较多应用,但是同时具备缓蚀和其他功能的多功能一体剂的研究报道相对较少。具备起泡、缓蚀等多功能的一体化气井用剂或许是一个不错的选择,对于简化现场施工作业人员的工作量、提升气井管理维护水平具有重要的意义。

3.3 水合物防聚剂

1972 年 Yuliev [36]发现了拥有水合物防聚能力的表面活性剂。之后,法国石油研究院(I.F.P.) [37]申请了系列专利,详细描述了一大批具有作水合物防聚效果的表面活性剂,专利显示非离子型表面活性剂能有效抑制气体水合物的生成。这些防聚剂使用剂量不高(~0.5 wt%)却能明显有效地使水合物晶粒处于分散状态,从而避免了水合物晶粒的聚结成块及堵塞的生成。2000 年,英国石油公司(Baker Petrolite) [38]公布了自主研发的水溶性防聚剂实验数据,该类水合物防聚剂已应用在了位于墨西哥湾的深水油气开采过程。2013 年,美国油藏工程研究所的 Sun M [39]提出了一种基于椰子油酸衍生物的新型表面活性剂,基于 Rocking Cell 的实验测试,该表面活性剂在不同含水率的油水体系中均表现出优异的水合物防聚效果,且在液相中含水率为 100%时仍能有效抑制水合物颗粒的

聚集。他们发现新型表面活性剂在低剂量时(0.2 wt%) 仍可保持水合物颗粒的分散状态, 也提出了一种不同于传统的油包水乳液环境中的水合物防聚机理, 认为无需对油相中的水相进行乳化便可达到水合物防聚效果, 即在纯水环境下该防聚剂仍具有优异的防聚效果。

由于水合物防聚剂的性能不受过冷度的影响, 目前很多油气田都将其投入到现场的应用当中[40]。鉴于水合物防聚剂的成本一般相对较高, 故在实际应用时常采用将不同类型防聚剂复配使用的策略, 复配后的水合物防聚剂产品在工业成本降低的同时, 也可以使水合物防聚效果得到进一步提升[41]。

2008 年, 徐勇军等[42]研究了无机盐对不同类型防聚剂的影响规律, 发现水合物防聚剂的防聚性能与加入的盐浓度呈正相关的关系。2015 年, 闫柯乐等[43]将高压蓝宝石反应釜和在线激光粒度测定两组装置配套, 在油水体系内评价了水合物防聚剂复配体系的防聚性能, 并对防聚机理进行了梳理。2019 年, 蒋善良等[44]对水合物浆液的形貌进行观测, 认为盐的存在对水合物的防聚效果有明显促进作用, 相关结果和徐勇军得到的结果一致。

需要指出的是, 尽管尚未得到大量文献报道, 水合物防聚剂与井筒内缓蚀剂等化学剂可能存在协同作用。因而, 研究出同时具有泡排-缓蚀-水合物防聚性能的一体剂, 必然可以简化现场施工作业人员的工作量、提升气井管理维护水平[45]。

4 一体剂作用原理

将泡排-缓蚀-水合物防聚一体剂注入井筒后, 借助天然气的流动性, 一体剂与井底积液充分混合后形成大量低密度泡沫, 泡沫不断积累上升, 从而达到携带井底液体的作用, 进而达到增加天然气开采效率的目的, 原理如图 1 所示。此外, 一体剂中也有易与金属避免相互作用的官能团, 部分原子(如 N, P, S)的孤对电子可与金属原子空轨道形成配位作用, 可使一体剂牢牢吸附于井筒或管道内壁并形成单层或双层吸附膜, 将管道壁面与腐蚀介质隔开, 避免管道与腐蚀介质的直接接触, 减少腐蚀发生的概率, 机理如图 2 所示。此外, 一体剂中也具有与水合物存在较强亲和力的基团, 可使一体剂较稳定的吸附在水合物表面, 改变水合物晶体的润湿性, 降低水合物的聚集趋势。此外, 一体剂也可吸附于油水界面, 可在一定程度上降低油水间界面张力, 起到乳化作用, 将水相分散凝析

油相中, 降低了分散相水滴转化为水合物颗粒时的尺寸, 进一步降低水合物大块的形成几率, 降低堵塞管道的风险, 相关机理如图 3 所示。

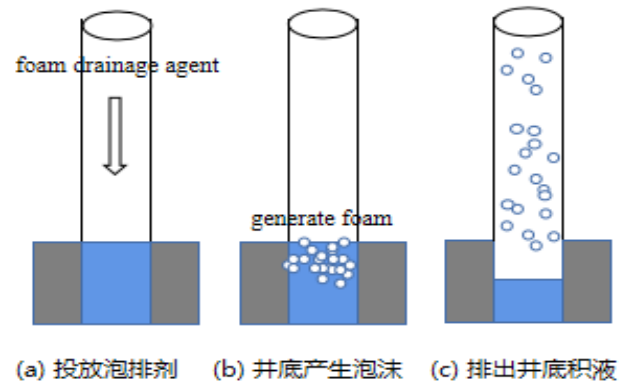


图 1 泡沫排水采气原理图

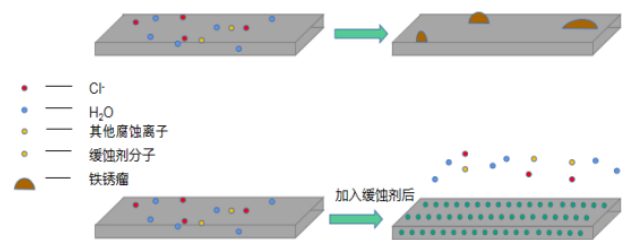


图 2 缓蚀原理图

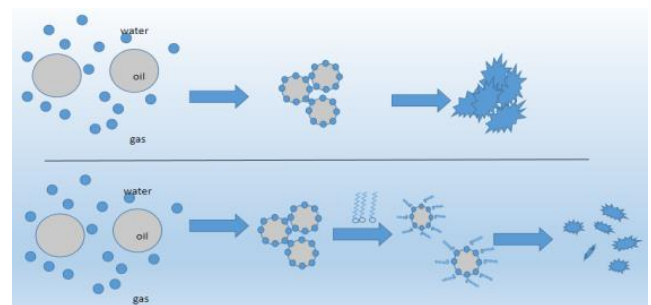


图 3 水合物防聚原理图

5 目前存在问题及发展趋势

泡排剂作为解决井底积液的有效方法, 已经作为经济高效且常用的天然气助采手段[46], 多数研究验证了其经济有效的特点。为了开发出性能良好的泡排剂体系, 可对不同类型的起泡型表面活性剂进行复配。而在天然气开发过程中, 不仅有积液的问题, 在低温高压环境中还可能在水合物以及管道腐蚀问题, 而相关化学剂也常常存在拮抗作用, 如在水合物防聚时

常加入甲醇来缓解水合物的聚集, 甲醇作为防聚剂的协同剂拥有明显效果, 但甲醇也由一定的消泡作用, 不利于泡排剂发挥作用。此外, 气井缓蚀剂对水合物防聚剂性能的影响尚未见深入报道。

当前, 具备缓蚀、起泡双功能的一体剂的研究报道较多, 对于泡排-防聚、水合物防聚-缓蚀等多功能的一体剂研究报道较少[47], 而同时具有针对泡排-防聚-缓蚀多种功能的一体剂的研究则少之又少。故结合表面活性剂类泡排剂、缓蚀剂和水合物防聚剂的特点, 开发出一种新型的同时兼顾着泡排-防聚-缓蚀多种功能一体剂体系具有重要的研究和应用价值, 值得开展持续的探索。

6 结论

目前, 天然气的开采常伴随井底积液、井筒腐蚀和水合物堵塞等问题, 这些问题严重困扰着气井的安全高效生产。针对这些气井生产中的常见问题, 传统上的解决方法是分别使用单一化学剂。例如, 当气井井筒存在井底积液时, 选用泡排剂实施气井泡沫排液; 为避免气井井筒出现腐蚀, 则选择注入缓蚀剂以保护井筒; 当井筒存在水合物堵塞风险时, 则选择注入水合物防聚剂等化学剂。然而, 现实中以上问题往往同时存在, 若依次单独加入上述三种化学剂则不仅工艺繁琐, 也容易出现不配伍等问题其他问题。若研发出一种泡排-防聚-缓蚀多种功能一体剂体系, 则能同时解决上述三种问题, 实现一剂多效。

然而, 能同时解决井底积液、井筒腐蚀和水合物堵塞这三个问题的多功能一体剂的研究报道较少。本文分别总结了泡排剂、缓蚀剂、水合物防聚剂的作用机理及发展现状, 在此基础上提出了一种同时具有泡排、缓蚀和抑制水合物聚集的多功能一体剂的研发设想。若该多功能一体剂研发能得到实质性突破和稳步应用, 则必将会为促进天然气稳产增产提供新的策略性保障, 对简化现场施工工艺、提升气井管理维护水平也具有重要的意义

参考文献

- [1] Zhang T, Wang S Z, Dong C H. Experimental study on the emergency disposal agent for methanol leakage [C]. *Advanced Materials Research*, 2017, 1142: 306-313.
- [2] Zhang H R, Liang Y T, Zhou X Y, et al. Sensitivity analysis and optimal operation control for large-scale waterflooding pipeline network of oilfield [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 154: 38-48.
- [3] Pan F, Zhang Z, Zhang X, et al. Impact of anionic and cationic surfactants interfacial tension on the oil recovery enhancement [J]. *Powder Technology*, 2020, 373: 93-98.
- [4] 邹啁. 产水凝析气井井筒积液分析 [D]. 荆州: 长江大学, 2014.
- [5] 刘庭崧, 刘妮. 醇类抑制剂对甲烷水合物形成的影响 [J]. *原子与分子物理学报*, 2021, 39(1): 7-11.
- [6] 杨芳. 甲醇对两种低温复合型泡排剂性能的影响 [J]. *黑龙江科技信息*, 2013(24): 104-105.
- [7] 李勇, 杨肖曦, 赵磊, 等. 现河注水井井筒腐蚀及其机理研究 [J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2007, 19(1): 66-68.
- [8] Tan G, Yang Z. Analysis of corrosion factors of wellbore and gathering pipelines in zhalaruoer condensate gas field in kazakhstan [J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 2(1): 1-8.
- [9] Brycki B, Szulc A. Gemini surfactants as corrosion inhibitors. A review [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021: 334.
- [10] 韩长武. 天然气井排水采气工艺方法优选 [D]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- [11] 周侗. 低压气井耐温抗盐抗油泡排剂研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [12] Arnaudov L, Denkov N D, Surcheva I, et al. Effect of oily additives on foamability and foam stability [J]. *Langmuir*, 2001, 17(22): 6999-7010.
- [13] Dippenaar A. The destabilization of froth by solids I: The mechanism of film rupture [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1982, 9(1): 1-14.
- [14] 聂淑兰. 无聚合物压裂液使死井复活 [J]. *国外油田工程*, 2000, 16(6): 19-22.
- [15] 杨冠科, 王成. 一种阳离子表面活性剂类清洁压裂液配方设计与性能评价 [C]. 中国采油工程技术及油田化学技术交流大会, 2011.
- [16] Bureiko A, Trybala A, Huang J, et al. Bulk and surface rheology of Aculyn™ 22 and Aculyn™ 33 polymeric solutions and kinetics of foam drainage [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 434: 268-275.
- [17] 饶喜丽. 极端环境下泡排剂的研制及其排水工艺研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2013.
- [18] 尹忠. 泡排剂CZP的泡沫性能研究 [J]. *天然气工业*, 1995, 15(2): 56-59.

- [19] 郭学辉, 刘生福, 王咏梅, 等. 泡排剂 NJS 在中原油田的应用 [J]. 化工时刊, 2001, 15(4): 30-33.
- [20] 马成华. 一种高温泡排剂的实验室评价 [J]. 精细石油化工进展, 2007, 8(12): 37-39.
- [21] 刘竟成, 杨敏, 袁福锋. 新型气井泡排剂 SP 的起泡性能研究 [J]. 油田化学, 2008, 25(2): 111-114.
- [22] 冯朋鑫, 陆利平, 韩勇, 等. ERD-05g 新型泡排剂在苏 48 区块试验效果分析 [J]. 石油化工应用, 2010, 29(6): 28-31.
- [23] 李谦定, 卢永斌, 李善建, 等. 新型高效泡排剂 LYB-1 的研制及其性能评价 [J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 49-52+126.
- [24] 胡敏, 刘祥, 薛丹, 等. 一种新型抗盐耐油型泡排剂的研制 [J]. 广东化工, 2015, 42(9): 10-13.
- [25] 李进, 徐杰, 王明凤, 等. 气井泡排剂 SCF-1 的室内研究 [J]. 当代化工, 2016, 45(10): 2292-2295.
- [26] 武俊文, 张汝生, 贾文峰, 等. 基于 Gemini 表面活性剂及纳米材料的高效泡排剂 [J]. 化学研究与应用, 2018, 30(2): 263-269.
- [27] Abdel-Gaber A M, Rahal H T, Beqai F T. Eucalyptus leaf extract as a eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in sulfuric and phosphoric acid solutions [J]. International Journal of Industrial Chemistry, 2020, 11(2): 123-132.
- [28] Villamizar W, Casales M, Gonzales-Rodriguez J G, et al. An EIS study of the effect of the pedant group in imidazolines as corrosion inhibitors for carbon steel in CO₂ environments [J]. Materials and Corrosion, 2006, 57(9): 696-704.
- [29] Asmara Y P, Suraj V, Siregar J P, et al. Development of green vapour corrosion inhibitor [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 257(1): 012089.
- [30] tuen E, James A, Akaranta O, et al. Eco-friendly corrosion inhibitor from Pennisetum purpureum biomass and synergistic intensifiers for mild steel [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(10): 1442-1447.
- [31] Garrido R A S, Vazquez A E, Campechano-Lira C, et al. Evaluation of a Non-Ionic Gemini Surfactant as Sweet Corrosion Inhibitor for X100 Steel in Sweet Brine Solution [J]. ECS Transactions, 2023, 110(1): 141.
- [32] 郑家桑, 张琼玖, 丁诗健, 等. “7701”酸化缓蚀剂的研究 [J]. 华中工学院学报, 1982(1): 47-56.
- [33] 王佳, 曹楚南, 陈家坚. 缓蚀剂理论与研究方法的进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1992, 4(2): 79-86.
- [34] 郑兴文. 从竹叶中提取硫酸洗缓蚀剂的研究 [D]. 四川理工学院, 2009.
- [35] 邵明鲁, 刘德新, 朱彤宇, 等. 乌洛托品季铵盐缓蚀剂的合成与复配研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(3): 244-250.
- [36] Kelland M A. History of the development of low dosage hydrate inhibitors [J]. Energy & Fuels, 2006, 20(3): 825-847.
- [37] Zhong Y, Rogers R E. Surfactant effects on gas hydrate formation [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(19): 4175-4187.
- [38] Bybee K. Antiagglomerant Hydrate Inhibitors Prevent Hydrate Plugs in Deepwater Systems [J]. Journal of Petroleum Technology, 2000, 52(10): 23-24.
- [39] Sun M, Firoozabadi A. New surfactant for hydrate anti-agglomeration in hydrocarbon flowlines and seabed oil capture [J]. Journal of colloid and interface science, 2013, 402: 312-319.
- [40] 全红平, 李强, 陈唐东, 等. 一种动力学天然气水合物抑制剂合成研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(14): 3986-3989.
- [41] 闫柯乐, 孙长宇, 邹兵, 等. 动力学抑制剂与水合物阻聚剂联用时抑制性能研究 [J]. 现代化工, 2015, 35(6): 95-98.
- [42] 徐勇军, 曾亚龙, 杨晓西, 等. 盐对气体水合物防聚剂作用的影响 [J]. 精细化工中间体, 2008, 38(1): 62-65.
- [43] 闫柯乐, 孙长宇, 姜素霞, 等. 复配型水合物防聚剂性能评价实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(31): 23-29.
- [44] 蒋善良, 陈超, 利观宝, 等. 盐含量对天然气水合物防聚剂性能的影响 [J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 120-125.
- [45] 董三宝, 田茂琳, 徐遥远, 等. 天然气水合物防聚剂研究进展 [J]. 广东化工, 2021, 48(10): 82-85.
- [46] 李农, 刘承华, 艾天敬, 等. 泡排剂的阻垢防垢性研究 [J]. 天然气工业, 2005(S1): 89-91+3.
- [47] 李伟, 蒋泽银, 艾天敬, 等. 抗温抗盐复合缓蚀起泡剂的室内评价及应用 [J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(1): 59-62.