

文章编号:1000-4092(2021)02-368-06

泡沫排水用起泡剂的应用进展*

田雨露¹,王纪伟¹,李加玉²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;2. 中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司,重庆 408014)

摘要:气井起泡剂排水是提高单井产量的一项重要措施,也是国内外各大气田常用且经济可行的重要方法之一。经国内外文献调研,分析了起泡剂作用机理,综述了各类型常用起泡剂的应用进展及优缺点;介绍了耐温型、抗盐型、耐酸碱型、抗H₂S类型、抗凝析油等新型起泡剂的研究进展;分析了起泡剂在制备与矿场应用过程中存在的问题,并提出了未来起泡剂的发展趋势。参50

关键词:起泡剂;排水;机理;发展趋势;综述

中图分类号:TE37 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.02.029

随着气井进入中后期开采阶段,产量全面递减,井底压力降低,气体流速小于临界携液流速,产出水不能及时被排出,积聚在井底,严重时会导致气井水淹停产。例如我国涪陵页岩气田某区块,截至2020年底该区块因井筒积液,急需采取排水措施的井数比例达80%^[1]。起泡剂排水采气是通过套管或油管将起泡剂注入井筒,起泡剂与井筒积液混合后,通过气流的搅拌作用生成大量低密度含水泡沫,气流将泡沫带至地面,从而减少井筒内积液^[2]。起泡剂排水采气工艺的成本较低、设备简单、见效显著、操作便捷,是国内外气田常用且经济可行的重要方法之一。

在美国、墨西哥、加拿大等国家,起泡剂排水采气技术均有较为广泛的应用,且取得了良好的经济效益。美国Alliance页岩气田80口井采用了泡沫排水技术,实现了产气量增加29%^[3]。近年来,起泡剂排水采气技术也在国内长庆气田、苏里格气田、涪陵页岩气田等诸多气田被成功应用,积累了很多宝贵的经验。中国石化川西气田9口井开展起泡剂排

水采气工艺,累计增产 $295 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[4]。目前,起泡剂种类较多、性能各异,笔者对起泡剂的作用机理与种类、常用起泡剂及新型起泡剂的性能与应用现状进行了详细的调研,综述了不同类型起泡剂的特征与适用性等。

1 起泡剂作用机理及种类

1.1 作用机理

起泡剂的主要成分是表面活性剂,泡沫是一种分散体系,其中不溶性气体被液体所包围,故许多气泡被液体间隔开。然而,气相是不连续的分散相,液相是连续的分散相,泡沫形成的必要条件是气相和液相的相互接触,而稳定泡沫的形成,除了气相和液相外,还需要起泡剂的参与^[5]。起泡剂的疏水基伸向气相内部,亲水基伸向液相内部,故而形成吸附膜。起泡剂可有效降低气液表面张力,使吸附膜收缩而形成球体,最终形成气泡。排水采气工艺能否成功应用的关键取决于起泡剂的起泡性能和稳泡性能。起泡性能是指泡沫的数量、泡沫体

* 收稿日期:2020-06-12;修回日期:2021-02-28。

基金项目:国家自然科学基金项目“驱替相自扩大波及体积提高采收率新方法”(项目编号51834005)。

作者简介:田雨露(1992—),女,工程师,中国石油大学(北京)石油战略经济专业硕士(2018),主要从事石油战略经济与油气田开发方面研究。王纪伟(1988—),男,高级工程师,东北石油大学石油与天然气工程专业博士(2018),主要从事油气田开发及规划相关方面研究,通讯地址:102206 北京市昌平区沙河中国石化科学技术研究中心,电话:010-56608432,E-mail:wjw@sinpec.com。

积和泡沫高度,而稳泡性能是指泡沫的持续时间^[6],取决于环境因素和泡沫性质。

泡沫是热力学意义上的不稳定体系,因为泡沫具有较大的气液界面表面积和表面自由能,而表面自由能具有自发地向能量低的方向转移,故泡沫会逐渐破碎,直到气液分离。目前,泡沫的不稳定机理通常有两种:液体排液机理和气体扩散机理。①液体排液机理:Yeongbeom等^[7]认为多个气泡交界区为Plateau边界区,根据Laplace方程,泡沫液体内的压力比Plateau边界区内的压力大,在这种压差的驱使下,液体自液膜流向Plateau边界区,故液膜逐渐变薄,最终泡沫破碎。②气体扩散机理:Ailar等^[8]认为无论采用何种方法起泡,泡沫的大小总是不均的,依据Laplace方程可知,小气泡的压力较大,其中的气体会通过液膜,扩散到大气泡中,故小气泡变小,最终泡沫破碎。从两种泡沫的不稳定机理可知,泡沫的稳定性最终还是取决于液膜的性质,高黏度且富有弹性的液膜,往往可以形成稳定的泡沫。

1.2 起泡剂种类

常用起泡剂按形态可分为固态和液态2种类型,其中,固态起泡剂主要有泡棒、酸棒和滑棒等,气井排水常用的起泡剂大多数为液态起泡剂。常用起泡剂按离子性质可分为非离子型、离子型和两性离子型3种类型。近几年,随着人们对特殊常规气藏及非常规气藏的勘探和开发,针对一些特殊新类型如耐高温型、抗盐型、耐酸碱型、抗H₂S类型、抗凝析油类型等起泡剂的攻关研究也已经逐步提上日程。新型起泡剂既弥补了常用起泡剂性能上的不足,也解决了价格昂贵的问题^[9]。另外,高效低成本类、环保可回收类起泡剂也逐步得到人们的重视。

2 常用起泡剂

2.1 非离子型起泡剂

非离子型起泡剂在气井泡沫排水中应用较为普遍,常用的有聚氧乙烯醚类、多元醇类、脂肪酸醇酰胺类、烷基糖苷类起泡剂。非离子型起泡剂一般是由酚和醇经聚氧乙基化合反应而得,在冷水中易溶解,且受地层水矿化度和化学因素影响较小,不易乳化,抗电解质能力强,且泡沫性质基本不受pH的影响,因此得到了突飞猛进的发展^[10]。Abdulrauf等^[11]研究发现,当矿化度大于30 g/L时,随矿化度的

增大,非离子型起泡剂的泡沫液膜厚度增加,使其稳定性能增强。Wang等^[12]认为非离子型起泡剂在溶液中不发生解离,矿化度对泡沫的半衰期影响甚微。尽管非离子型起泡剂抗盐、抗电解质能力强,但他起泡能力差,使用范围受浊点影响,而且加热时溶解度、浊点均降低,起泡能力变弱^[13]。

2.2 离子型起泡剂

离子型起泡剂包括阴离子型、阳离子型两种类型。相对非离子型起泡剂,离子型起泡剂亲水基的水化能力强,其周围可以形成较厚的水化膜,进而将液膜中的自由水转化为束缚水,致使水的流动性变差,液膜强度增大、稳定性增强^[14]。阴离子型起泡剂的合成工艺简单、来源广、种类多,价格适中、危害程度小、宜工业化生产^[15]。阴离子型起泡剂的水溶性好、起泡能力佳,但抗电解质能力差,遇到高矿化度地层水时会与水中的Ca²⁺、Mg²⁺等多价阳离子反应生成沉淀,导致泡沫稳定性明显变差,严重影响起泡剂的起泡能力和稳定性^[16]。Saeid等^[17]研究发现,在高矿化度地层水中,当质量分数为0.5%时,阴离子型起泡剂的泡沫体积和半衰期达到最大。另外,在高温条件下,阴离子型起泡剂的起泡能力会快速下降。阳离子型起泡剂主要是含氮的有机胺衍生盐类,其起泡稳定性较强,并具有良好的缓蚀性、杀菌性、耐油性和耐盐性。但阳离子型起泡剂在水溶液中会解离出极性阳离子,故受pH影响较大,而且当使用量过多时易产生油水乳化问题,因此其使用条件苛刻。另外,阳离子型起泡剂的合成原料来源少、价格高、不宜工业化生产,故矿场使用很少^[18]。

2.3 两性离子型起泡剂

两性离子型起泡剂是较为特殊的一种起泡剂,其自身同时携带两种阳、阴离子亲水基,可以依据外界环境的酸碱度特征而显现出与之相适应的阳离子性能或阴离子性能。同时,泡沫液膜中异种电荷互相吸引,并富集于液膜表面,形成离子双电子层,可以有效地防止液膜变薄和破裂^[19]。两性离子型起泡剂常见的有:氨基酸类、亚氨基酸类、甜菜碱类、咪唑啉类、烷基氧化胺类等。该类型起泡剂对不同的环境均具有较强的适应性,其亲水基有较好的水溶性,溶解度受电解质、pH的影响较小,而且耐温性好、生物降解好、毒性低、不易发生分解反

应^[20]。Mina等^[21]研究发现在60℃下,质量分数为0.25%的双壬基酚磺基甜菜碱两性离子型起泡剂的泡沫体积高达1056 mL,泡沫半衰期高达722 s。赖小娟等^[22]认为甜菜碱 Gemini 两性离子型起泡剂 M-66 的耐盐性好、与地层水配伍性好,在清水和250 g/L的矿化度水中的携液体积分别达89%、65%。两性离子型起泡剂的缺点是合成成本高,起泡性能低于阴离子型起泡剂和阳离子型起泡剂,故矿场很少使用^[23]。

3 新型起泡剂

3.1 耐温型起泡剂

在高温条件下,分子间作用力变小,液体表面黏度降低、排液增加,气体膨胀、液体蒸汽压增加、液膜变薄,泡膜内的气体更容易穿透薄膜,泡沫更容易破裂^[24-25]。一种空间网状结构的缓慢释放型起泡剂在90℃的水中完全溶解时间高达51 h,温度从60℃升至100℃,起泡剂的起泡高度和携液体积分别从120 mm和77%降至105 mm和56%,起泡剂耐温已达90℃^[26]。武俊文等^[27]在合成的特殊梳状结构 Gemini 起泡剂基础上,加入改性后的纳米粒子充当稳泡剂,制备了耐温150℃的高效起泡剂,该起泡剂利用特殊的梳状结构,可在气液界面形成致密结构,增强泡沫的稳定性,加入的稳泡剂可有效阻止泡沫的聚并。龚浩研等^[28]将椰油酰胺丙基甜菜碱、椰油酰胺丙基羟磺基甜菜碱以及主要活性物复配形成网状分子结构,制备了一种耐温性新型起泡剂,起泡剂的耐温达180℃。

3.2 抗盐型起泡剂

地层水矿化度会影响起泡剂的性能,尤其对阴离子型起泡剂影响特别大。地层水中的离子影响泡沫膜上的电荷分布,使双电子层之间的排斥力下降,泡沫膜变薄的速率加快,影响泡沫的稳定性。地层水矿化度对非离子型起泡剂也有一定的影响,在高矿化度水中,非离子型起泡剂的浊点降低,这样会因为产生新的物质而使得泡沫的稳定性下降^[29]。

通过对比分析泡沫性能,优选起泡剂、稳泡剂和助剂,可复配出抗盐聚合型起泡剂。苏里格气田 S75 井区抗盐泡排剂在矿场试验中的日均增气量35.2%^[30]。赖崇伟等^[31]采用复配方式得到了一种新型聚合物型抗盐起泡剂,该起泡剂在矿化度75 g/L

下具有较好的泡沫性能,当地层水矿化度增至200 g/L、起泡剂质量分数小于1%时,泡沫高度仍达90 mm,携液体积仍达70%;起泡剂质量分数大于1%后泡沫高度则达190~250 mm,3 min后泡沫高度仍达210~350 mm,携液体积也达80%。Kuzielová等^[32]在复配的基础上再植入生物菌株,制得一种生物菌株式起泡剂,抗盐可达650 g/L,在矿化度650 g/L的条件下,泡沫高度可达83.5 mm;倘若在该起泡剂中再添加一种发酵液,泡沫的高度可增至129 mm,起泡剂的起泡能力和稳泡能力均大幅度增强。

3.3 耐酸碱型起泡剂

随着pH的升高,起泡剂的起泡高度、泡沫稳泡性、泡沫携液量先增加后持平再减小,当pH维持在6.78~7.9时,起泡剂的性能最好,原因是在强酸、强碱溶液条件下,H⁺、OH⁻会影响起泡剂的电离作用^[33]。因此,针对特殊类型的酸性、碱性气藏泡沫排水,需要研究特定的起泡剂。

针对具有酸性特征的储层,具有缓蚀作用的起泡剂较为适用。Naden等^[34]合成了新型聚酯类起泡剂,当起泡剂质量浓度为1.5 g/L时,在矿化度0~293 g/L的地层水中的泡沫高度大于185 mm,3 min后泡沫高度大于165 mm,15 min后携液量大于152 mL,腐蚀速率低于0.0076 mm/a,缓蚀率大于80%。在碱性介质中,Wang等^[35]研制的异构长链烷基两性氧化胺起泡剂耐温85℃,抗盐160 g/L,携液体积58.3%,泡沫高度172 mm,现场气井应用中产气量增加26.7%。若要使泡沫在酸性和碱性环境中均较稳定,也可以采用化学复配的方式。周侗^[36]以甜菜碱、十二烷基硫酸钠等为原料,复配得到复杂网状结构的耐酸碱型起泡剂的配伍性较好,适用于酸性、碱性等多种类型的气藏泡沫排水。

3.4 抗H₂S型起泡剂

气井中若含有一定浓度的H₂S,则会产生很强的腐蚀性。H₂S腐蚀以电化学腐蚀为主,H₂S溶于水后易电离呈酸性,酸可使气井管壁形成电化学腐蚀,造成管壁减薄、局部点蚀穿孔等问题,故需要在含H₂S的气井中加入缓蚀剂。缓蚀剂多数为油溶性的,而油溶性的物质又具有消泡作用,不利于泡沫形成,影响泡沫排水的效果^[37]。因此,所研发的起泡剂需要具有抗缓蚀性能,或者起泡剂与缓蚀剂要

具有配伍性。

刘竟成等^[38]以烷基化两性咪唑啉衍生物、钙镁离子络合剂以及高分子稳泡剂为原料,经络合反应配制的高分子抗H₂S型起泡剂的起泡能力、泡沫稳定性均较好,与不含H₂S时的测定结果相比,该起泡剂在饱和H₂S水中的起泡能力和泡沫稳定性基本不变,在70℃、含H₂S的水中,1g/L起泡剂可以使N80钢级钢片的腐蚀速率下降93%。赵朝文等^[39]采用同样的络合方法和原料,不同的配方得到了另一类高分子起泡剂,该起泡剂在含H₂S的池061-1井中,当质量分数为1.5‰时,携液体积达82.75%,仅一个月就增产天然气7.5×10⁴m³,取得了显著的增产效果,并且起泡剂发泡能力、携液率、与地层流体的配伍性好。

3.5 抗凝析油型起泡剂

对于含凝析油的气井,现有起泡剂的排液效果较差。随着凝析油含量的增加,起泡剂的起泡性能和稳泡性能均下降,对于油含量较高的井,采用普通起泡剂排液基本无效。普通起泡剂与凝析油在搅动的过程中会发生乳化作用,形成稳定的乳液,只有多余的未乳化的起泡剂才能与地层水发生起泡作用。此外,凝析油的强消泡作用会制约起泡剂的起泡性能,影响其携液能力,故排液效果很不理想^[40]。

一般羧酸酯类化学药剂具有抗油特征,陈雅溪等^[41]研究发现,羧酸酯起泡剂的泡沫高度为15.4cm,3min后泡沫高度11.8cm,携液量60mL/15min,耐温90℃,将其应用在川渝地区2口凝析油质量含量大于50%的气井中,平均单井产气量增加40%。张太亮等^[42]以马来酸酐、十二醇、水杨酸摩尔比为1.2:1:1、甲基苯磺酸质量用量3%,复配得到的水杨酸盐型起泡剂,当凝析油质量分数达25%、起泡剂用量3000mg/L时,表面张力20.9mN/m,泡沫高度12.6cm。

4 存在问题与发展趋势

目前,针对耐温型、抗盐型、耐酸碱型、抗H₂S类型、抗凝析油等新型起泡剂的研究已经颇为深入,并取得了一定的认识。近几年,随着天然气勘探与开发力度的加强,部分气田的开采条件越来越苛刻,因此,部分学者还依据气藏或气井的特殊需要,

研制了耐Ba²⁺型起泡剂、低压低产气井起泡剂、抗醇型泡排棒等。蒋泽银等^[43]针对高Ba²⁺气藏,研制了脂肪烃基高分子起泡剂,在7口井的泡沫排水矿场试验结果显示气井平均产气量增加2.79×10⁴m³/d。李小可等^[44]针对川渝地区低压、低产气井泡沫排水,研制了碳酸氢盐型起泡剂,该起泡剂起泡能力强、泡沫稳定性好、携液能力强、配伍性好,泡沫高度9.6cm。彭磊^[45]针对含醇气井研制的树脂类泡排棒具有较好的抗醇性,将泡排棒应用在榆林气田泡沫排水,当油套压差小于2MPa时,携液体积为63%。

目前,气田使用的起泡剂量都比较大,投入成本较高,生产气井的深度几千米,如果起泡剂产生的泡沫的稳定性不好,泡沫还没达到井口就会破裂,导致原本携带的液体重新落回井底,不能达到泡沫排水的目的^[46]。李佳欣等^[47]合成了在井筒内可反应生成气体的碳酸盐型高效自生气起泡剂,该起泡剂对矿化度不敏感,携液体积可达53.5%,泡沫高度可达85cm,半衰期增长10~19min。瞿超超等^[48]研究发现,无污染咪唑啉碳酸氢盐起泡剂质量分数为0.2%时,泡沫体积达1000mL。

总的来说,新型起泡剂在一定程度上解决了气藏或气井的特殊需要,满足了其对温度、矿化度、酸碱性、抗H₂S、抗凝析油、耐Ba²⁺型、低压低产、抗醇性等条件的要求。但一般情况下,新型起泡剂的合成过程较为苛刻,需严格控制各步的合成温度、合成时间,以及各成分的用量^[49]。多数新型起泡剂的制备工艺不成熟、成本仍相对较高、适用范围不太明确,各项技术指标均需进一步落实和提高^[50]。新型起泡剂一般气田应用较少,很多起泡剂的性能和稳定性还存在一定的争议性,部分起泡剂产生的泡沫的稳定性不好,泡沫还没达到井口就破裂,部分起泡剂的泡沫稳定性太好,导致泡沫进入分离器,给气体的集输带来影响,需要加入消泡剂进行处理。未来,随着人们对效益、环境的要求,国家大力倡导低碳绿色能源,开发利用价格低、环保的天然气。油田企业需要承担环境保护的重担,在实际的生产工作中既重视对绿色油田的建设需求,又要保证正常的经济收益,高效低成本类型起泡剂、环保可回收类型起泡剂也将成为攻关的热点。

5 结论

非离子型起泡剂抗盐性好,但起泡能力差;离子型中的阴离子型起泡剂价格适中,但抗盐性差;离子型中的阳离子型起泡剂抗盐性好,但不易工业化推广;两性型起泡剂性能较好,但合成成本较高。

对于高温、高盐、酸性或碱性、含 H_2S 、含凝析油等条件较为苛刻的气井排水,新型起泡剂既弥补了性能上的不足,又解决了价格昂贵的问题,适用性较好;但存在制备工艺不成熟,气田应用较少,很多起泡剂的性能和稳定性,还存在一定的争议性等问题。随着石油行业的发展,以及对效益、环境的要求,高效低成本及环保可回收类型起泡剂等,是未来研究的热点。

参考文献:

- [1] 孔朝阳,董秀成,蒋庆哲,等.我国页岩气开发的能源投入回报研究:以涪陵页岩气为例[J].生态经济,2018,34(11):153-158.
- [2] MOHAMMED A, ZUHAIR A, DAVID S. Enhancing the foam stability using surfactants mixtures [C]//SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. Dammam, Saudi Arabia, Apr 23-26, 2018.
- [3] FARINA L, PASSUCCI C, LULIO A, et al. Artificial lift optimization with foamer technology in the alliance shale gas field [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, USA, Oct 8-10, 2012.
- [4] 胡腾.水平井积液规律及泡沫排水采气工艺研究[D].成都:西南石油大学,2015:18-26.
- [5] FARAG A, ROBERTSON T, KEREM M, et al. Foam assist in a gas-lifted oil well [C]//SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition. Manama, Kingdom of Bahrain, Nov 30-Dec 1, 2016.
- [6] ALHASAN F, MING H, ABDULRAHMAN A. Evaluation of foaming agents for EOR application in carbonate reservoirs [C]//SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. Muscat, Oman, Mar 31-Apr 2, 2014.
- [7] YEONGBEOM L, YOUNGCHEOL Y. Study on Methods to enhance properties of polyurethane foam made of new blowing agents [C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA, Jun 25-30, 2017.
- [8] AILAR H, TUAN N, PRIYAN M. How does aluminium foaming agent impact the geopolymer formation mechanism [J]. Cement Concrete Comp, 2017, 80(3): 277-286.
- [9] 李成福,刘科如,郭向东,等.延长气田排水采气效果分析[J].天然气勘探与开发,2015,38(4):52-56.
- [10] AARON S, NGUYEN M, GINGER R, et al. Development of novel foaming agents for high temperature steam applications [C]// Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, Nov 13-16, 2017.
- [11] ABDULRAUF R A. Sequential storage and in-situ tracking of gas in geological formations by a systematic and cyclic foam injection—A useful application for mitigating leakage risk during gas injection [J]. J Nat Gas Sci Eng, 2019, 62: 1-12.
- [12] WANG H, LI J, WANG Z, et al. Experimental investigation of the mechanism of foaming agent concentration affecting foam stability [J]. J Surfactants Deterg, 2017, 20(6): 1443-1451.
- [13] ROBSON C, EVALDO T, ERNANDES T, et al. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix [J]. J Non-Cryst Solids, 2019, 511(3): 177-182.
- [14] 白晓弘.苏里格气田低产气井中后期排水采气工艺技术研究[D].西安:西安石油大学,2009:22-28.
- [15] NUR A, SAHRIM A, RUEY S, et al. Effect of processing temperature and foaming agent loading on properties of polylactic acid/kenaf fiber composite foam [J]. Mater Today, 2019, 7(2): 601-606.
- [16] WU J, JIA W, ZHANG R, et al. The development and field test of high efficient foam unloading agent based on gemini surfactant and nanomaterials [C]//SPE International Conference on Oilfield Chemistry. Galveston, Texas, USA, Apr 8-9, 2019.
- [17] SAEID G, SOHRAB S, JORGEDE B, et al. Using statistical analysis and laboratory testing to evaluate the effect of magnetized water on the stability of foaming agents and foam concrete [J]. Constr Build Mater, 2019, 207: 28-40.
- [18] SIVA M, RAMAMURTHY K, DHAMODHARAN R. Development of a green foaming agent and its performance evaluation [J]. Cement Concrete Comp, 2017, 80(3): 245-257.
- [19] MADHU H, SATISH V. Fabrication of localised aluminium foam by a novel polymeric blowing agent [J]. Mater Charact, 2018, 142(4): 340-351.
- [20] 翟庆红.大庆徐深气田高温泡排剂优选研究[D].杭州:浙江大学,2012:12-18.
- [21] MINA D R, LONG X, ALI T, et al. Synergy of surface-treated nanoparticle and anionic-nonionic surfactant on stabilization of natural gas foams [J]. Colloid Surface A, 2018, 550: 176-185.
- [22] 赖小娟,刘佩,赵倩云,等.一种甜菜碱 Gemini 泡排剂的制备及其性能 [J]. 石油化工, 2018, 47(8): 848-854.
- [23] 王亚魁,姜亚洁,耿涛,等.双酰胺基 Gemini 阳离子表面活性剂的合成及应用性能 [J]. 精细化工, 2019, 36(1): 44-50.
- [24] 张世春.泡排剂性能评价方法及其在苏里格气田的应用研究 [D].西安:西安石油大学,2018.

- [25] 杨亚聪, 田伟, 惠艳妮, 等. 新型氧化铵型抗油起泡剂的合成与研究[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(6): 75-78.
- [26] 惠艳妮, 贾友亮, 田伟, 等. 缓慢释放型起泡剂的研究与应用[J]. 油田化学, 2014, 31(2): 244-246.
- [27] 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.
- [28] 龚浩研. 泡沫排水采气在气田开发中的研究及应用[D]. 西安: 西安石油大学, 2013: 75-91.
- [29] 惠小敏, 张庆生, 王树涛, 等. 甜菜碱/聚合物复配泡排剂性能研究[J]. 油田化学, 2016, 33(2): 316-318.
- [30] 刘广峰, 高燕, 张俊璟, 等. 苏里格气田 S75 井区抗盐抗油耐温型泡排剂研制[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 133-136.
- [31] 赖崇伟. 新型抗油、抗盐起泡剂体系的研究[D]. 成都: 四川大学, 2007: 52-56.
- [32] KUZIELOVÁ E, PACH L, PALOU M. Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 998-1004.
- [33] 蒋泽银, 李伟, 陈文, 等. 酸性气藏泡沫排水复合缓蚀起泡剂研究[J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(2): 70-72.
- [34] NADEN B J. Competitive adsorption of surfactant foaming agents to nanoclays added to cement foams for enhanced strength[J]. Mater Struct, 2016, 49(5): 1667-1675.
- [35] WANG H, LI J, WANG Z, et al. Experimental investigation of the mechanism of foaming agent concentration affecting foam stability[J]. J Surfactants Deterg, 2017, 20(6): 1443-1451.
- [36] 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(北京), 2020, 5-17.
- [37] 胡均志, 李耀, 魏勇, 等. 基于核磁共振技术的气井采出流体乳化物成分分析方法[J]. 油田化学, 2020, 37(3): 531-535.
- [38] 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.
- [39] 赵朝文, 任科, 李力民, 等. UT-1 型起泡剂在磨盘场石炭系气藏的应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(4): 54-57.
- [40] 徐永辉. 泡沫酸特性研究及其应用[D]. 中国石油大学, 2007: 31-39.
- [41] 陈雅溪, 王尧, 李小可, 等. 高含凝析油气井泡沫排液用起泡剂研究[J]. 油田化学, 2013, 30(4): 544-547.
- [42] 张太亮, 张径哈, 张雅丽. 新型水杨酸盐型抗温抗盐起泡剂的合成与性能评价[J]. 油田化学, 2016, 33(1): 137-140.
- [43] 蒋泽银, 刘友权, 石晓松, 等. 川中须家河气藏泡排技术研究与应用[J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(5): 422-426.
- [44] 李小可, 熊颖, 陈大钧. 川渝地区气井井底积液清除工艺技术研究[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(1): 154-157.
- [45] 彭磊. 榆林气田积液气井排水采气工艺优化研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013: 39-46.
- [46] 郭钢, 李琼玮, 李明星, 等. 长庆气田现用泡排剂评价及自生气泡排剂研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(3): 59-66.
- [47] 李佳欣, 张宁波, 周成香. 页岩气井泡沫排水采气技术应用研究: 以平桥南区为例[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(5): 91-97.
- [48] 瞿超超, 刘正中, 殷鸿尧, 等. 新型排水采气用抗凝析油泡排剂[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 865-874.
- [49] LU H, HE Y, HUANG Z. Foaming Properties of CO₂-triggered surfactants for switchable foam control [J]. Dispersion Sci Technol, 2014, 35: 832-839.
- [50] LU H, HE Y, HUANG Z. Synthesis and properties of a series of CO₂ switchable gemini imidazolium surfactants [J]. Tenside Surfact Det, 2014, 51: 415-420.

Application Progress of Foaming Agent for Foam Drainage

TIAN Yulu¹, WANG Jiwei¹, LI Jiayu²

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 102206, P R of China; 2. Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Company, Sinopec, Chongqing 408014, P R of China)

Abstract: The foaming agent drainage of gas well is an important measure to improve the production per well, and it is also one of the most common and economically viable methods for drainage of gas wells at home and abroad. Based on the domestic and foreign literature research, the mechanism of foaming agent was analyzed, the application progress, advantages and disadvantages of various types of common foaming agents were summarized. And the research progress of new foaming agents with temperature resistance, salt resistance, acid and alkali resistance, H₂S resistance and condensate resistance was introduced. The existing problems in the preparation and field application of foaming agents were analyzed, and the development trend of foaming agents in the future was put forward.

Keywords: foaming agent; drainage; mechanism; development trend; review