

文章编号:1000-4092(2020)03-557-07

国内外稠油降黏开采技术发展与应用*

周林碧,秦冰,李伟,王征

(中国石化石油化工科学研究院,北京 100083)

摘要:对稠油进行有效开采的根本措施在于降低稠油黏度,提高其流动性。本文介绍和比较了注蒸汽加热降黏、火烧油层、乳化分散降黏、催化降黏、掺稀降黏及微生物降黏等国内外主要的稠油降黏开采技术的机理、发展及应用状况,总结了各降黏技术的特点以及现阶段的不足,提出了稠油降黏开采技术的发展方向。参42

关键词:稠油;降黏;提高采收率;综述

中图分类号:TE357 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.03.032

随着原油不断被开采利用,全世界的可采油气资源逐渐减少,稀油资源变得越来越紧缺,在很长一段时间内原油价格较低,对稠油进行低成本有效开采显得日益重要。据统计,稠油(包括油砂及天然沥青)的储量约为 1×10^{11} t^[1],约占全球石油总量的70%。其中委内瑞拉稠油资源储量最高,约占世界稠油总量的50%,其次是加拿大,约为32%,随后是俄罗斯、美国和中国^[1]。我国约有70多个稠油油田,探明储量超过40亿吨。这些稠油油藏主要分布在辽河曙光一区、欢喜岭稠油区、高升油田、新疆克拉玛依九区、六东区及凤城油区以及胜利油田单家寺、孤岛、陈家庄等油田。此外,河南井楼、古城等油田,大港枣园、羊三木、王官屯等油田和华北油田等也有稠油区块^[1]。不同区块甚至同一区块不同油井之间的稠油组成差异大,储层性能不同,同一降黏开采技术效果相差大,需要根据稠油性质及储层特征采取不同的开采技术。目前国内外稠油开采过程普遍存在含水上升快、采出率低的问题。我国原油资源较少,原油进口依赖度超过70%,远超过安全红线,因而对稠油进行有效开采,满足日趋增长的能源需求,具有非常重要的战略意义。本文介

绍了国内外现有主要的稠油降黏开采技术的发展情况,为国内从事稠油开采的工作者提供参考。

1 稠油开采主要技术

稠油,尤其是超稠油,黏度高,流动性非常差,难以单靠地层能量实现自然升举。常见的稠油降黏开采方式包括热力降黏、化学降黏、掺稀降黏、微生物降黏等。其中热力降黏主要包括基于注蒸汽开采的蒸汽吞吐(CSS)、蒸汽驱(SF)、重力辅助泄油(SAGD)以及火烧油层等开采方法^[2-3];化学降黏主要包括乳化分散降黏、催化降黏、油溶性降黏剂降黏等^[3-4]。不同的降黏方法有其特定的适用范围,其中,基于注蒸汽开采的CSS、SF适用于油层厚度大(大于10 m)、含油饱和度高、渗透率较大的油藏^[2]。火烧油层要求油藏有一定的含水率,渗透率较高,因而非常适合稠油井蒸汽开采后期的进一步开采^[2];化学降黏大多应用于普通稠油油藏,经济成本低,具有较好的增产效果^[2];掺稀及微生物降黏技术对油藏条件要求较高,应用范围较窄^[5-6]。值得注意的是,随着原油价格变动以及技术的发展,各稠油开采技术的适用范围可能发生变动。不论采取何种

* 收稿日期:2020-04-06;修回日期:2020-05-29。

基金项目:国家重大研发专项课题“高温高盐油田化学驱提高采收率技术研究”(项目编号2016ZX05011)、“陆相页岩油流动机理及开采关键技术研究”(项目编号2017ZX05049003)。

作者简介:周林碧(1985-),女,工程师,讲师,天津大学化学工程专业博士(2019),从事稠油降黏开采及油田采出水处理研究工作,通讯地址:100083北京市海淀区学院路18号院石油化工科学研究院,电话:010-82368046, E-mail:zhoulinbi.ripp@sinopec.com。

降黏开采技术,对稠油进行有效开采的根本措施在于降低稠油黏度,提高其流动性,下文对不同的降黏开采技术特点及应用分别展开论述。

2 热力降黏开采技术

2.1 基于注蒸汽的热力降黏开采技术

稠油注蒸汽开采技术是利用稠油黏度随温度升高而降低的黏温特性,向稠油中注入蒸汽或热水等热量流体来提高地层温度,降低稠油黏度,增加稠油流动性,达到提高稠油采收率效果的一种技术。其机理是稠油温度升高时,稠油中的胶质、沥青质之间的氢键作用力减弱,分子间的 π - π 键结构被破坏,稠油中的超分子结构被破坏,从而使稠油黏度降低。对于低凝原油加热降黏效果也非常显著,随着温度升高,长链蜡基烷烃形成的网状结构被破坏,因而升温是降低稠油黏度非常直接有效的方法。目前,基于注蒸汽的热采降黏方法主要有CSS、SF、SAGD等方法。自1959年委内瑞拉首次将CSS应用于稠油开采后,目前CSS仍是稠油开采的主要方式,我国75%的稠油主要是采用CSS技术开采^[2]。然而,基于注蒸汽的开采技术对油藏条件要求较高,要求油藏厚度不低于10 m,井深低于8000 m,渗透率大于 $0.3 \mu\text{m}^2$,含油饱和度大于40%,对深、超深井($>1000 \text{ m}$)以及注气难度大的高致密油藏不适宜^[2-3]。此外,注蒸汽开采过程中,一旦形成汽窜通道后,蒸汽的波及系数急剧降低,驱油效率变低。同时,随着蒸汽凝析成水,储层内含水量增加,后续注入的蒸汽热量损失大,热量利用率将变得非常低,难以对稠油有效降黏,导致热采效率低,成本大幅增加^[7]。

通过注入不同的化学剂辅助蒸汽驱来提高蒸汽利用率成为蒸汽开采后期的主要方法之一。蒸汽驱过程中加入聚合物等封堵窜流通道,可控制汽窜,提高蒸汽波及面积,增加稠油动用量;加入溶剂或耐高温的化学降黏剂,可进一步提高蒸汽利用率,降低稠油黏度,提高稠油流动性。委内瑞拉、加拿大等稠油区块将化学驱与蒸汽驱结合,改善了注入蒸汽的波及系数,稠油采收率得到显著提高。国内辽河油田、胜利油田、克拉玛依油田等地的稠油区块在蒸汽驱过程中注入化学剂(轻烃类有机溶剂、 CO_2 、降黏剂等),增加了稠油动用面积,稠油采

收率大幅提升。

2.2 火烧油层降黏开采技术

火烧油层又称为火驱,利用注入的空气或其他助燃剂与储层内部分稠油发生氧化燃烧反应,生成 CO_2 并释放出大量热量,使稠油黏度降低、流动性增强。当温度达到一定临界值时,稠油中的重组分发生裂解反应,生成轻组分烃等。在 CO_2 、轻烃及储层内高温汽化的水蒸汽等多重作用下显著提升稠油采收率。与注蒸汽降黏相比,火烧油层的吨油能耗(每产一吨油消耗的成本或耗费的能源)远低于注蒸汽能耗,且避免了注蒸汽过程中产生大量凝析水的问题。

火烧油层降黏开采是目前提高稠油采收率最显著的一种热采技术,但该技术操作过程较难控制,风险较高,导致其长期以来未能成为稠油开采的首选方案。随着火烧油层理论技术及实践经验的积累,21世纪以来,该技术再次受到重视。研究表明^[3],火烧油层降黏开采方法非常适合蒸汽开采后期的油藏开发。国内外对CSS及SAGD后期的稠油井开展了大量火烧油层现场试验,采收率可达60%以上^[8]。近年来我国在新疆油田、胜利油田、辽河油田、吉林油田等地的稠油区块也陆续开展了火烧油层试验,取得了显著成效。如新疆油田从2010~2016年对长期注蒸汽后的废弃油井进行火驱试验,实现稠油持续稳产目标,采收率达到70%以上^[9]。火烧油层具有采收率高、节能减排等优势,随着越来越多的注蒸汽开发井进入末期,火烧油层开采技术的应用将会越来越受到重视。

3 化学降黏开采技术

虽然热采技术广泛用于稠油开采,尤其在加拿大、委内瑞拉、美国等国家的稠油开采中应用广泛,但热采并非适用于所有油藏,全球范围内有一半以上的稠油不适合热采。除提高温度外,还可通过加入相应的化学剂达到降黏目的。根据加入的化学剂类型,化学降黏方式主要分为乳化降黏、油溶性降黏剂降黏和催化降黏等。

3.1 乳化降黏开采

乳化降黏是稠油开采过程中研究和应用最多的化学降黏技术之一。向储层中加入具有界面活性的化学剂,使稠油分散在活性水中形成水包油

(O/W)型乳状液能有效降低稠油黏度。根据注入的化学剂类型,乳化降黏方法可分为表面活性剂乳化、加碱乳化及活性聚合物乳化等。

3.1.1 表面活性剂乳化降黏开采

20世纪60年代,Simon等^[10]在井筒中注入表面活性剂,将稠油分散形成O/W型乳状液,有效降低了井筒和管输阻力。此后,表面活性剂被广泛应用于稠油开采中。表面活性剂乳化降黏提高稠油采收率的作用机理主要分为两方面:一方面是通过降低油水界面张力,在一定温度和扰动作用下使高黏稠油分散在活性水中形成O/W型乳状液,油外相变为水外相,稠油黏度大幅降低;另一方面,表面活性剂具有润湿性,可将油润湿的岩石及管道的表面反转为水润湿,降低流动阻力,提高流动性。在稠油开采中常用到的表面活性剂主要有离子型(阴离子或阳离子型)、非离子型及Gemini表面活性剂,在使用过程中应根据不同的稠油组分和地层特征筛选合适的表面活性剂。一般来说,乳化用表面活性剂应具有适宜的亲水亲油平衡值(一般为7~18),且形成的乳状液有一定的乳化稳定性和易破乳性^[11]。此外,表面活性剂还应与储层有良好的适应性,适应储层特性和地层水矿化度,减少表面活性剂在地层中的吸附和沉淀损失^[11]。阴离子型表面活性剂在砂岩表面上吸附少,成本较低,耐温性能好,在油田开发中应用最早也最广泛^[12]。Duning等^[13]研究了大量阴离子型表面活性剂的耐盐及吸附损失性能,发现磺酸盐型表面活性剂的耐盐性好于羧酸盐型,环烷类表面活性剂的耐盐性及吸附损失性优于脂肪酸类。秦冰^[14]研究了几种典型阴离子型表面活性剂的乳化性能及耐温抗盐性能,进一步证实了环烷酸钠的抗盐能力强于异构十二烷基苯磺酸钠,羧酸盐的耐盐性能不如磺酸盐。阳离子表面活性剂适用于水润湿的碳酸盐地层,通过与附着在岩石表面的油膜中的极性组分以离子对或氢键的方式结合,促使油膜从岩石表面脱落并溶于含有表面活性剂的活性水中,形成增溶胶束,从而使岩石表面反转为水润湿,提高洗油效率。但在长期水驱后,储层中岩石表面一般为负电荷,阳离子表面活性剂在地层中吸附损失大,故阳离子表面活性剂较少单独应用于稠油乳化降黏^[11,15-17]。

虽然离子型表面活性剂具有较好的耐温性,但

不适合矿化度高的油藏。非离子型表面活性剂分子中含有醚基,在水溶液中不会解离出离子,具有较好的抗盐性能,但其耐温性较差。王凯等^[18]将阴离子与非离子型表面活性剂进行复配,并比较了阴离子、非离子及非离子/阴离子型表面活性剂对辽河稠油的降黏性能,发现与阴离子及非离子型表面活性剂单独使用时相比,低浓度的非离子型表面活性剂与 α -烯烴磺酸盐复配后仍具有良好的抗温耐盐性能,室内降黏率最高可达99%以上。Pal等^[19]将阳离子(溴化十六烷基三甲基胺,CTAB)与非离子(Tween60)表面活性剂复配,相比单一类型的表面活性剂,复配体系在临界胶束浓度下的界面张力比同样浓度下CTAB的界面张力低2/3,吸附损失降低3/4。虽然离子/非离子型表面活性剂的组合可提高界面活性,改善耐温性能问题,但矿场应用表明这种复配体系容易在地层运移中出现色谱分离现象,稠油增产效果不明显^[20]。

Gemini表面活性剂是一类由两个或两个以上表面活性剂分子在亲水基或其附近原子用联接基团连接起来的表面活性剂,具有两个亲水和两个亲油基团。这一类表面活性剂相比单头单尾的普通表面活性剂具有更高的界面活性和耐温耐盐性能,在油田应用中具有很大的应用潜力^[21-23]。Hussain等^[24]合成的阳离子-非离子Gemini表面活性剂在高钙镁的矿化水中,90℃下三个月内仍保持稳定,同时该表面活性剂在超低浓度下具有较高的表面活性。Feng等^[25]将CTAB与阴离子-非离子Gemini表面活性剂复配,200 mg/L复配表面活性剂的界面张力小于 10×10^{-4} mN/m。王大威等^[26]合成的Gemini表面活性剂具有较强的降黏性能和界面活性,在油水比为1:1时,0.3%的表面活性剂可将某海上稠油黏度降低约97%,提高稠油采收率10.1%。尽管Gemini表面活性剂的性能比传统的表面活性剂优异,但Gemini表面活性剂体系的合成工艺较为复杂,原材料成本较高,目前主要基于室内研究,尚未在油田现场进行规模化应用。

3.1.2 碱驱降黏开采

除表面活性剂外,在一定条件下加碱也可促进稠油乳化降黏。国内外对无机碱(如NaOH、 Na_2CO_3 、 NaHCO_3)和有机碱(如醇胺类)的乳化降黏作用进行了大量研究。碱对稠油的乳化降黏本质

上与表面活性剂乳化降黏相同。碱与稠油中的天然石油酸(环烷酸、脂肪酸等)反应,原位生成表面活性物质。这些表面活性剂具有乳化作用,在一定条件下促使稠油形成O/W乳化体系,降低稠油黏度^[3,27]。秦冰^[14]将国内典型油田稠油油样中的石油酸分离后,加入一定浓度的碱进行降黏效果对比。与未分离石油酸的油样相比,碱对分离石油酸后的稠油基本无降黏效果,由此可知原油中的天然石油酸在碱降黏过程中具有重要作用。碱的使用浓度会影响降黏效果,过高或过低均难以形成O/W乳状液,甚至可能形成W/O乳状液,增加稠油黏度^[28]。Chen等^[29]比较了无机碱与有机碱在稠油开采中的应用效果,在适宜浓度下,NaOH、Na₂CO₃及乙二胺的加入使油水界面张力明显降低,且相同浓度下有机碱对界面张力的改善优于无机碱。加碱降黏效果由稠油中的天然石油酸的含量决定,对于酸值低的稠油,其乳化效果一般较差。此外,在碱敏储层、碳酸盐储层或矿化度高的储层中均不适宜采用加碱降黏方法。

3.1.3 活性聚合物降黏开采

对于黏度基数高的稠油,分子量较小的表面活性剂即使能使目标稠油的降黏率达80%~90%,甚至95%以上,但剩余黏度仍然较高,水油流度比大,驱替过程中容易出现指进,驱替液波及面积小,难以取得满意的开采效果。Wang等^[30]研究发现单独使用表面活性剂改善油水界面张力并不能有效提高稠油采收率,在表面活性剂降黏开采中加入聚合物后增加驱替相黏度,可明显抑制驱替相指进,有效提高稠油采收率。虽然在实际应用中采用表面活性剂-聚合物多元复合驱,利用表面活性剂降低稠油黏度、聚合物改善流度比来提高采收率,进一步提升稠油开采效果,然而多元复合驱工艺较为复杂,在地层运移中各组分易分离、聚合物的溶解性及自身黏度因素等均影响驱替效果。研究者尝试通过对聚合物进行亲水改性制备活性聚合物,使其同时具有乳化降黏和驱替液增黏作用,取得了一定进展。秦冰等^[31]制备了一种由磺酸、羧酸和聚醚共缩聚合而成的活性聚合物降黏剂。该活性聚合物具有耐高温和耐高矿化度的优点,在高钙镁(2000 mg/L)矿化水中的降黏率大于90%,岩心驱替实验中0.1%缩聚物的驱油效率比水驱提高了17.1%,比同

浓度下石油磺酸盐活性水驱提高7%。这主要是由于该缩聚物溶液具有一定的黏度,增加了油水流动比,扩大了驱替液波及面积,同时该两亲聚合物中多种亲水基团的补偿作用降低了油水界面张力,提高了洗油效率。Liu等^[32]合成的两亲性聚合物降黏剂在超低浓度下的表面张力为 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ mN/m,在油藏温度下对稠油的降黏率约80%,最终采收率比水驱提高12.8%。

虽然活性聚合物具有降黏和抑制指进的优势,但该类聚合物的耐温耐盐性能还需进一步提升。针对不同的油藏特性,通过控制分子结构及分子量开发出适应性更佳的活性聚合物,提高其乳化降黏性能以及洗油效率是活性聚合物降黏驱未来的发展方向。

3.2 油溶性降黏剂降黏

油溶性降黏剂是借鉴降凝剂结构发展而来,根据相似相溶原理设计出适宜的降黏剂分子结构,使其能有效分散胶质与沥青质中的分子聚集体,从而达到降低稠油黏度和提高流动性的目的。国外对油溶性降黏剂的研究报道较少,主要集中在以降凝剂为主的流动改进剂研发,此类流动改进剂多用于改善高凝原油低温流动性,对其他稠油的流动改性效果不明显,在地层温度下甚至有增黏效果。国内研究者借鉴降凝剂结构,对油溶性降黏剂进行了一系列研究。刘佳伟^[33]合成了一种长链双酯-苯乙烯-醋酸乙烯酯三元共聚物,在50℃时0.8%的降黏剂对塔河稠油的降黏率为55.8%。研究中发现分子量对降黏效果的影响很大,长链比短链更具优势,当分子量超过一定值后,降黏效果变差。一般来说,油溶性降黏剂分子同时具有一定的降凝效果。相比水溶性降黏剂需要后期破乳脱水的工艺,油溶性降黏剂降黏工艺简单,无需后续脱水处理环节,具有环保节水的优势,但油溶性降黏剂的降黏效果通常比乳化降黏的效果差,剩余黏度非常高,稠油流动性仍然很差,因而油溶性降黏剂常与掺稀油(溶剂稀释)及蒸汽开采结合使用,单独使用的报道较少^[34]。

3.3 催化降黏

催化降黏是典型的热力降黏和化学降黏相结合的一种稠油改质降黏技术。在蒸汽吞吐过程中向稠油油藏中注入催化剂,在高温和催化剂的共同作用下脱除稠油中的杂质,重组分裂解为轻组分,

从而降低稠油表观黏度。催化降黏又称为水热裂解降黏。过渡金属是最常见的水热裂解催化剂,常以无机盐、金属有机配合物及离子液体的形式存在。1997年,Weissman等^[35]在高温蒸汽注入过程中加入催化剂脱除稠油中的硫,改善了油品的API值。Clark等^[36-37]提出了催化降黏反应过程,指出过渡金属及贵金属盐(如Pt、Ru、Ag等组成的金属盐)可断开稠油组分中的C—S键,加速稠油中有机硫的脱除,生成轻烃、CO₂、H₂及H₂S,使稠油黏度发生不可逆降低。随后国内外陆续开展了大量的应用研究。辽河油田使用过渡金属盐破坏稠油中重组分中的杂原子(S、N、O等),在240℃反应24 h后的稠油黏度最高下降了75%,同时伴随小分子产物生成。邓刘杨等^[38]在催化降黏过程中加入碱(KOH/NaOH),将来自多个不同油田的稠油黏度降低了75%~93%;加入十氢萘等供氢体后,进一步提高了稠油的降黏率。在现场应用中,通过蒸汽提供热量,十氢萘作为供氢体及铁盐催化剂下,14 d内辽河稠油增产4139 t。过渡金属与有机配位体络合制成的金属有机配合物增加了催化剂与稠油的接触面积,可进一步提升催化降黏性能。河南油田现场试验中采用Fe(III)苯磺酸作为催化剂,利用蒸汽提供热量,14 d内两口井分别增产189 t和217 t^[39]。Li等^[40]比较了Fe(III)/Cu(II)与不同的有机磺酸形成的配位体的催化效果,发现有机配位体对催化裂解效果具有较大的影响。对甲基苯磺酸与金属形成的配合物的催化活性强于十二烷基苯磺酸盐,这是由于环烷酸金属配位催化剂与稠油中的非烃组分接触面更大,同时在催化裂化过程中不易生成烷基自由基(烷基自由基之间易结合生成聚合物),因此环烷酸配体比脂肪酸配体的催化性能更佳。

催化降黏主要是通过破坏C—S键,脱除有机硫的方式来达到降黏效果,对N、O等杂原子的脱除效果有限,因而催化降黏一般对高含硫或含硫稠油有效,对低硫稠油效果有限。催化降黏反应条件苛刻,反应温度一般高于200℃,在实际应用中离不开注蒸汽提高温度,且采出后催化剂的分离回收等问题均需要进一步解决,限制了低油价形势下该技术在油田中的规模化应用。

4 掺稀降黏

在稠油中掺入有机溶剂(稀油也可被视为一种广义上的溶剂)也能起到一定程度的降黏作用,该技术被称为掺稀降黏或稀释降黏。掺稀降黏的原理是利用溶剂与稠油相似相溶原理稀释溶解稠油中的胶质与沥青质,增加胶质、沥青质分子之间的距离,使稠油中胶质及沥青质分子之间难以通过氢键及分子色散作用力形成规整团簇结构,从而降低黏度。对于有稀油源的稠油区块,掺稀油降黏是最为便捷有效的一种方式。我国塔河、塔里木、吐哈、辽河、新疆油田等稠油区块均有通过掺稀方式提高稠油采收率的应用。其中,塔河油田稠油区块采用掺稀降黏的井次最多,研究较为深入。掺稀降黏效果与掺稀比有关,掺稀量过小时不能充分破坏稠油中的胶质沥青质聚集体,降黏效果不显著;稀油掺入量过多时,不但造成稀油资源浪费,同时破坏了原油中的胶体分散体系,导致沥青质从稠油中析出。因而应根据稀油及稠油特性,确定最佳配比。郭继香等^[5]对塔河油田的掺稀降黏进行了研究。该区块的平均掺稀比(稀油与稠油的质量比)为1.08:1,掺稀工艺中温度不高于90℃。过高温度易导致稀油中的烃组分挥发,使降黏效果变差。同时,研究发现掺稀降黏工艺中稀油组分并非越轻越好,中质油对特、超稠油的降黏效果比轻质油更显著^[41]。

虽然掺稀降黏具有其他降黏方式难以相比的优势,如工艺简单、见效快,但掺稀降黏也存在管输压力增加和成本高的不足。随着稀油不断开采,稀油资源越来越少,掺稀降黏技术的应用越来越受限制。不少研究者将柴油、生物柴油、甲苯-汽油、轻烃等有机溶剂用于掺稀降黏,但这些溶剂产量较少,成本较高,主要基于室内研究,至今仍未在油田现场大规模应用。

5 微生物降黏

除以上几种主要的降黏技术外,微生物降黏因其成本低、对储层伤害小、二次污染少等优点引起了广泛关注。1926年,Beckman^[42]提出利用微生物提高原油采收率,随后研究者们通过筛选驯化微生物,发现微生物可降解稠油中的重组分,生成的表面活性剂及小分子等代谢产物可使原油黏度降低,

流动性增强。目前,微生物降黏技术在加拿大、美国等油田已进入商业化应用阶段。我国在微生物降黏方面也开展了大量的工作,在大庆油田、胜利油田、辽河油田等进行了较大规模的研究和现场试验。但相较国外的研究进展,我国的微生物降黏技术起步较晚,进展较慢,与国外技术仍有较大差距。微生物降黏主要应用于储层温度 $<77^{\circ}\text{C}$ 、矿化度 $<100\text{ g/L}$ 、深度 $<2439\text{ m}$ 的开发后期老油田,对于高温、高矿化度的稠油油藏,菌种筛选和培养难度大,繁殖缓慢。目前,微生物降黏开采在国内稠油开采中仍被视为一种非主流的降黏开采技术。

6 建议

对稠油资源进行经济有效的开采是当下乃至未来油田工作者的重要研究方向,目前国内外稠油开采的主要方式是通过各种方法降黏开采。不同的降黏开采技术具有自身的优势和不足:(1)基于蒸汽开采的加热降黏是发展最早也是应用最广泛的一种稠油开采方式,其优势在于适合黏度范围宽,但蒸汽开采成本高,开采后期蒸汽利用率低。开发耐高温的化学剂,与蒸汽驱协同作用,控制汽窜提高泄油面积是蒸汽开采的发展方向。(2)火烧油层是一种环保节能的高效开采技术,可对注蒸汽开采后的老油田进一步挖潜增效。与CSS、SAGD及催化剂结合,提高泄油效率和氧气利用率,开发安全可控的操作工艺是推动该技术成为稠油开采常规技术的攻坚方向。(3)乳化降黏可实现稠油冷采,降低开发成本。但目前乳化降黏剂降黏性能与稠油组分的相关性强,应用范围窄,难以驱动高黏度超稠油,采出率低。开发新型的耐盐抗温强、乳化降黏及洗油效果好、具有一定的黏弹性且采出液易破乳的多功能降黏体系是未来乳化降黏的研究方向。(4)催化降黏可实现重油轻质化,是非常有前景的降黏开采方式之一,但该技术对反应温度要求高,催化剂性能需进一步改善,目前现场应用较少。开发低成本、在较低温度下有反应活性的催化剂是催化降黏面临的重要挑战。(5)掺稀降黏仅适用于稀油资源充足的稠油区块,随着稀油资源变少,掺稀降黏的应用范围将受到限制,开发性能优异的油溶性降黏剂可降低掺稀比。(6)国内微生物降黏仍处在探索阶段,深入研究微生物降黏机理,

提高微生物降黏效果,推进微生物降黏矿场应用是微生物降黏的发展方向和目标。

参考文献:

- [1] 包木太,范晓宁,曹秋芳,等.稠油降黏开采技术研究进展[J].油田化学,2006,23(3):284-288.
- [2] DONG Xiaohu, LIU Huiqing, CHEN Zhangxin, et al. Enhanced oil recovery techniques for heavy oil and oilsands reservoirs after steam injection [J]. Appl Energy, 2019, 239 (4): 1190-1211.
- [3] GUO Kun, LI Hailong, YU Zhixin. In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review [J]. Fuel, 2016, 185 (8): 886-902.
- [4] MURAZA O, GALADIMA A. Aquathermolysis of heavy oil: A review and perspective on catalyst development [J]. Fuel, 2015, 157(5): 219-231.
- [5] 郭继香,张江伟.稠油掺稀降黏技术研究进展[J].科学技术与工程,2014,14(36):124-132.
- [6] 刘钦明.微生物-化学复合稠油降黏体系的研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2017:10-15.
- [7] SELBY R, ALIKHAN A A, ALI S M F. Potential of non-thermal methods for heavy oil-recovery [J]. J Can Petrol Technol, 1989, 28(4): 45-59.
- [8] 吴一尘.国内外火烧油层研究进展与应用探析[J].化工管理,2018,30(14):247.
- [9] 王如燕,侯向阳,司远征,等.浅层稠油老区油藏转火驱开采技术[C]//油气田勘探与开发国际会议.西安,2019:11.
- [10] SIMON R, POYNTER W G. Downhole emulsification for improving viscous crude production [J]. J Petrol Technol, 1968, 20(12): 1349-1353.
- [11] SUN Jianghe, ZHANG Fusheng, WU Yanwei, et al. Overview of emulsified viscosity reducer for enhancing heavy oil recovery [J]. Mater Sci Eng, 2019, 479(12): 1-6.
- [12] 张晓梅.多磺酸盐复配体系对稠油降黏条件研究[D].青岛:中国海洋大学,2014:4-6.
- [13] DUNNING H N, JOHANSEN R T. Laboratory evaluation of water additives for petroleum displacement [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1957: 10-12.
- [14] 秦冰.稠油乳化降黏剂结构与性能关系的研究[D].北京:石油化工科学研究院,2001:57-59.
- [15] ESMAEILI S, SARMA H, HARDING T, et al. Review of the effect of temperature on oil-water relative permeability in porous rocks of oil reservoirs [J]. Fuel, 2019, 237(10): 91-116.
- [16] HOU Baofeng, WANG Yefei, HUANG Yong. Mechanistic study of wettability alteration of oil-wet sandstone surface using different surfactants [J]. Appl Surf Sci, 2015, 330(1): 56-64.
- [17] MYERS D. Surfactant science and technology [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005: 1-28.
- [18] 王凯,周文胜,王泰超,等.高效水溶性稠油降黏剂的优选及性能评价[J].油田化学,2019,36(1):152-156.

- [19] PAL N, VAJPAYEE M, MANDAL A. Cationic/nonionic mixed surfactants as enhanced oil recovery fluids: Influence of mixed micellization and polymer association on interfacial, rheological, and rock-wetting characteristics [J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(7): 6048–6059.
- [20] 翁蕊, 杨普华, 罗幼松. 阴离子/非离子表面活性剂复配体系的色谱分离研究[J]. *油田化学*, 2003, 20(2): 163–166.
- [21] 赵福麟. 采油用化学剂的研究进展[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(1): 163–172.
- [22] 林梅钦, 丁波, 郑晓宇, 等. 非离子型 Gemini 表面活性剂的性质[J]. *应用化工*, 2010, 39(4): 467–470.
- [23] 林梅钦, 丁波, 郑晓宇, 等. 季铵盐型 Gemini 表面活性剂水溶液的表面和油-水界面特性[J]. *石油学报(石油加工)*, 2011, 27(4): 617–621.
- [24] HUSSAIN S M S, KAMAL M S, FOGANG L T, et al. Effect of the number of ethylene oxide units on the properties of synthesized tailor-made cationic gemini surfactants for oilfield applications [J]. *J Mol Struct*, 2019, 1196(7): 851–860.
- [25] FENG Haisun, HOU Jirui, MA Tao, et al. The ultra-low interfacial tension behavior of the combined cationic/anionic-nonionic gemini surfactants system for chemical flooding [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2018, 554(7): 74–80.
- [26] 王大威, 张健, 吕鑫, 等. 双子表面活性剂对海上 S 油田稠油降黏性能评价[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 109–113.
- [27] 杨敬一, 何萧, 蔡海军, 等. 凤城稠油中石油酸组成结构分析[J]. *石油炼制与化工*, 2017, 48(2): 106–112.
- [28] BAEK K H, ARGUELLES V F J, OKUNO R, et al. Emulsification of athabasca bitumen by organic alkali: Emulsion phase behavior and viscosity for bitumen/brine/triethylenetetramine [J]. *J Petrol Sci Eng*, 2018, 168(5): 359–369.
- [29] CHEN Zehua, ZHAO Xiutai, WANG Zengbao, et al. A comparative study of inorganic alkaline/polymer flooding and organic alkaline/polymer flooding for enhanced heavy oil recovery [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2015, 469(1): 150–157.
- [30] WANG Xiaoqi, LUO Pen, ZHANG Yiping, et al. Laboratory and simulation study of optimized water additives for improved heavy oil recovery [C]//SPE Heavy Oil Conference. Canada, 2012: 220–223.
- [31] 秦冰, 彭朴, 景振华. 羧酸/磺酸/聚醚三元共缩聚型乳化降黏剂的组成与性能[J]. *石油炼制与化工*, 2002, 33(7): 32–35.
- [32] LIU Z Y, MENDIRATTA S, CHEN X, et al. Amphiphilic-polymer-assisted hot water flooding toward viscous oil mobilization [J]. *Indus Eng Chem Res*, 2019, 58(36): 16552–16564.
- [33] 刘佳伟. 聚合物稠油降黏剂的制备与评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2018: 12–50.
- [34] AHMADI M, CHEN Z X. Challenges and future of chemical assisted heavy oil recovery processes [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2019, 275(11): 1–33.
- [35] WEISSMAN J G. Review of processes for downhole catalytic upgrading of heavy crude oil [J]. *Fuel Process Technol*, 1997, 50(2): 199–213.
- [36] CLARK P, HYNE J. Chemistry of organosulphur compound types occurring in heavy oil sands [J]. *Fuel*, 1984, 63(12): 1649–1654.
- [37] CLARK P D, Dowling N I, Hyne J B, et al. The chemistry of organosulphur compound types occurring in heavy oils [J]. *Fuel*, 1987, 66(10): 1353–1357.
- [38] 邓刘扬, 唐晓东, 李晶晶, 等. 稠油地面催化改质降黏技术的研究进展[J]. *石油化工*, 2016, 45(2): 237–243.
- [39] LI Chen, HUANG Weicheng, ZHOU Chenggang, et al. Advances on the transition-metal based catalysts for aquathermolysis upgrading of heavy crude oil [J]. *Fuel*, 2019, 257(8): 1–14.
- [40] LI J, CHEN Y, ZHOU C, et al. Influences on the aquathermolysis of heavy oil catalyzed by two catalysts with different ligands [J]. *Liq Fuels Technol*, 2015, 33(11): 1246–1252.
- [41] 李业, 敬加强, 陈朝刚, 等. 塔河超深层中质油对稠油降黏的适应性[J]. *油气储运*, 2012, 31(7): 504–506.
- [42] BECKMAN J W. The action of bacterial on mineral oil [J]. *Ind Eng Chem*, 1923, 10(4): 1–3.

Development and Application of Heavy Oil Viscosity Reduction Technology at Home and Abroad

ZHOU Linbi, QIN Bing, LI Wei, WANG Zheng

(Research Institute of Petroleum Processing, Sinopec, Beijing 100083, P R of China)

Abstract: Viscosity reduction and mobility improvement are very crucial in heavy oil recovery. The mechanism, development and application of main viscosity reduction methods at home and abroad were discussed and compared, including thermal treatment based on steam injection, fire flooding, emulsification, catalytic reaction, solvent dilution and microbial viscosity reduction. The characteristics and disadvantages of these methods were summarized. Finally, the development directions of heavy oil viscosity reduction technology were proposed.

Keywords: heavy oil; viscosity reduction; enhanced oil recovery; review