

文章编号:1000-4092(2023)04-743-07

油藏深部调剖-驱油技术*

孙天宇¹, 邵明鲁¹, 赵红雨³, 常爱莲², 浮历沛¹, 廖凯丽¹

(1. 常州大学石油与天然气工程学院、能源学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学机械与轨道交通学院、智能制造产业学院, 江苏 常州 213164; 3. 中国石化胜利油田分公司油气开发管理中心, 山东 东营 257000)

摘要:深部调剖-驱油技术是提高油藏采收率的重要手段。首先从水窜关键问题分析及残余油高效驱替关键问题分析两个方面, 阐述了油藏深部调剖-驱油的两个主要矛盾: 调剖剂注入性与油藏深部水窜通道封堵的矛盾以及深部调剖与剩余油驱替的矛盾。重点综述了油藏深部调剖技术的原理以及在低渗透油藏中的研究应用, 指出了各技术的优势及存在问题, 并分析了我国深部调剖-驱油技术发展趋势。

关键词:深部调剖; 驱油; 综述; 发展趋势; 综述

文献标识码: A DOI: 10.19346/j.cnki.1000-4092.2023.04.027

中图分类号: TE357.46

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 前言

我国油田大多属于陆相沉积, 储层非均质性严重, 注水开发效果普遍不理想, 尤其是对于孔喉细小、结构复杂、裂缝发育的低渗特低渗油藏, 水窜现象更为严重和普遍^[1-2]。与常规中高渗油藏相比, 低渗特低渗油藏在水驱开发过程存在以下问题: 注水压力高、油井产量递减快、含水率上升快、油井水淹后治理困难、剩余油驱动困难、采收率低等。因此, 如何有效防治油田注入水的水窜, 提高波及系数、增加驱油效率是高效开采剩余油、提高原油采收率的关键, 也是缓解我国日趋严重的石油供求矛盾、保障国家石油安全的迫切需求^[3]。油藏深部调剖技术作为一类治理水窜、改善开采效果、提高采收率的重要技术, 已被广泛应用于高含水、特高含水油藏^[4-6]。该技术通过调控驱替剖面、封堵高渗透通道, 从而达到明显提高波及体积、有效驱替残余油/剩余油的目的, 已成为我国低渗特低渗油藏实现“控水稳油”的一项关键技术。

1 油藏调剖-驱油关键问题分析

1.1 水窜关键问题分析

水窜是低渗特低渗油藏开发中普遍存在的突出问题。由于油藏主导的水窜机理和类型的不同, 其治理方法也不同, 明确油藏水窜机理是进行有效深部调剖的首要任务^[7]。目前, 水窜类型分为以下4类^[8]: (1)指进水窜: 在驱油过程中, 因驱油剂与原油驱替前缘不稳定, 任一随机的微小扰动随时间发展成前缘的局部突进而形成的水窜, 也可将其称为前缘非稳定突进; (2)非均质水窜: 因储层非均质性导致的驱替前缘沿低渗流阻力方向、条带、区域或层位快速运移而形成的水窜, 称为前缘非均质突进; (3)重力水窜: 在油层的垂向方向上, 由于驱替介质与被驱替介质之间密度差引起的重力分离会导致前缘重力突进, 最终形成重力水窜; (4)水动力水窜: 经长期水驱冲刷的主流区残余油饱和度很低, 作为渗流通道的孔喉尺寸增大, 形成连通油水井的低流阻渗流区, 注入的水在这一区域内快速、无效

* 收稿日期: 2022-11-09; 修回日期: 2022-12-20。

基金项目: 江苏省自然科学基金“超分子自组装油藏调剖体系的构建与自适应封堵机制”(项目编号 BK20220622)。

作者简介: 孙天宇(1998—), 男, 常州大学油气田开发工程专业在读硕士研究生(2021—), 从事提高采收率与采油化学方面研究, 通讯地址: 313164 江苏省常州市武进区常州大学机械石油楼344室, E-mail: 18012612381@163.com。

流动,称为水动力水窜。

对于指进水窜,水窜形成、发生在油水交界的前缘,而不是在已形成的水流通通道中,其治理的技术思路是增大驱油剂的黏度,降低油水流动比、实现流度控制。而对于非均质水窜,注入水沿油藏中高渗带(裂缝)向油井无效、高速流动,增大驱油剂的黏度不能有效治理非均质水窜,治理非均质水窜的方案应为油藏深部调堵,其深部调剖技术的思路、原理、方法完全不同于抑制指进水窜的技术思路。低渗油藏中各种类型裂缝的存在以及复杂孔隙结构造成的微观非均质性,使得低渗油藏水窜治理的研究重点应为深部调剖^[9-10]。

普遍而言,调剖剂向油藏深部的顺利注入及到达深部后的有效封堵能力是实现油藏深部调剖的必要条件。不论是室内模拟实验还是油田生产实践,均已证实在低渗油藏中调剖剂的注入性与调剖剂在油藏深部调剖性能要求之间存在着比在中高渗油藏中更为突出的矛盾,这一矛盾的解决已成为各类油藏尤其是低渗油藏水窜治理的技术瓶颈^[11]。

1.2 残余油高效驱替关键问题分析

油藏中的残余油和水驱后油藏中的残余油根据其形成和驱替机理可分为:孔喉残余油、油膜、孔喉水动力滞留油和微观非均质残余油。孔喉残余油是指以非活塞式驱油方式为主的油藏中,被驱替的油相大多占据在孔道中部,一旦遇到细孔道或喉道后,由于“卡断”作用而在孔道中形成的残余油,其驱替条件是降低驱油剂与残余油之间的界面张力以及改善润湿性。油膜是一类因黏附力而被吸附在储层岩石矿物表面的残余油,其驱替条件是以分散或剥离的方式克服原油与孔隙壁面黏附力;孔喉水动力滞留油是储层中被毛管力圈闭滞留的油滴、油珠和油块,由于储油岩石孔隙介质是非常复杂的孔隙网络,大小分布极不均匀,连通结构极为复杂,通道曲折折,粒间空隙常由孔和喉道组成,这些油滴、油珠和油块等是水驱后残余油在岩石孔隙中存在的重要形式,其驱替条件是降低油水间界面张力,使驱替水动力学压力大于上述毛管力差;微观非均质残余油是一类因储层中的微观非均质性而在微观低渗(或致密)区域形成的残余油,其驱替条件是增强驱油剂进入微观低渗区域的压力条件、降低驱油剂进入微观低渗区域的阻力^[12]。不同

类型残余油的形成机制不同,对驱油剂性质要求也不同,因此,提高油藏微观驱油效率的前提应首先明确残余油的类型,然后针对不同类型残余油进行驱油剂的研发、筛选。

由于水洗区残余油高度分散以及残余油类型多样,因此,油藏水窜区提高驱油效率难度大。另外,由于水窜通道的形成,驱油剂难以波及剩余油,从而造成油藏尤其是低渗藏和稠油油藏的剩余油难以启动。

2 油藏深部调剖技术的研究进展

深部调剖是改善油藏非均质性、实现油藏高效稳产的重要手段之一。如图1所示,其调剖机理是向非均质油藏中注入化学调剖剂,由于水窜通道渗流阻力较小,调剖剂优先进入高渗层或水窜裂缝中,并在水窜层产生封堵,使后续水发生绕流,扩大后续水波及体积,改善油藏非均质性,达到防治水窜、挖潜剩余油从而提高采收率的目的。

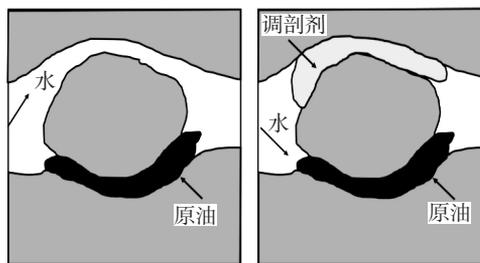


图1 深部调剖机理示意图

2.1 凝胶型深部调剖技术

聚合物凝胶调剖体系常以分子链中含有活性羧基、酰胺基等基团的水溶性聚合物为主剂,并辅以铝合物、铬合物、钛合物、锆合物等高价金属离子或低分子醛类交联剂配制而成,形成的三维网状结构凝胶体系具有一定的黏弹性,该体系向油藏深部运移时能起到调剖和驱油协同作用^[13]。

自20世纪80年代以来,凝胶型调剖剂在我国快速发展,如大庆油田、胜利油田、克拉玛依油田、中原油田等油田相继开展从浅调到深调的矿场试验,并取得良好的控水效果;国外的科威特WFR油田、美国Arbuckle油田的凝胶型调剖剂在矿场应用中的降水增油效果显著;哈萨克斯坦Kenkiyak油田在采用凝胶体系进行深部调剖后,投入产出比可达1:2.2,获得了良好的经济回报。凝胶在孔喉介质运

移过程中,由于孔喉的空间局限性,胶体会受到挤压拉伸,且自身能通过形变穿过孔喉,所以流动能力较强,又因具有一定的强度,后续水会发生绕流,扩大波及体积,使得微观波及效率得以较大提高^[14]。弱凝胶体系具有“边运移边封堵”特性,在油藏深部调剖中具有巨大的应用潜力。Zhou等^[15]用HPAM、有机铬化合物交联液和凝胶添加剂制备了一种凝胶体系,该体系对高渗透层的封堵率达95%,而对低渗透层的封堵率低于7%,且该凝胶体系具有良好的耐盐耐温性能和抗剪切能力,在大庆油田H区块低渗透油藏的应用结果显示复合含水率下降4.66%、井组平均产量增加21%。Zhou等^[16]还研究了超高相对分子质量HPAM/水溶性酚醛弱凝胶体系,筛选了适合低渗透油藏驱替的HPAM的最佳相对分子质量为 1100×10^5 。驱替实验显示,剩余油在小孔隙中形成大油滴,并以油流的形式被驱出。在大庆油田低渗透储层Pu125区块的试验结果显示,采用超高相对分子质量HPAM/水溶性酚醛弱凝胶调剖驱体系调剖后单井增产1400 t,全区综合含水降低7.16个百分点,采收率提高3.58个百分点,有效提高了低渗透油田的采收率。Wu等^[17]研制的配方为5%HPAM+0.3%糠醛交联剂+0.1%稳定剂+0.3%凝胶促进剂+0.1%高温稳定剂六水氯化钴(CCH)的HPF-Co凝胶体系,具有良好的耐高温性能,经过90 d老化后仍然具有良好的三维网状结构。实验结果表明,HPF-Co凝胶体系对低渗透断裂岩心的平均封堵率超过98%。有关弱凝胶体系在油田深部调剖成功的案例仍较少,尤其是在致密-低渗油藏中未有矿场试验成功的报道。其主要原因有:体系组分的损失,成胶不理想;抗剪切能力差,在地层介质中推进较长距离后,凝胶被剪切破碎而丧失封堵能力,且剪切破碎的凝胶块难以重新交联^[18]。

2.2 多相泡沫调剖技术

两相泡沫调剖技术和三相泡沫调剖技术是两种重要的泡沫深部调剖技术^[19],其作用机制主要是贾敏效应,当泡沫体系通过油藏孔喉介质的孔道时,泡沫在孔道中发生形变,形变后的泡沫对后续流体的流动产生阻碍作用,且阻力随泡沫量的增加而逐步变大,从而实现封堵大孔道的目的^[20]。Wang等^[21]针对低温高盐度的低渗透裂缝性储层研制了

由耐盐的氟碳发泡剂、耐油性强的QL甜菜碱、聚合物以及产生低界面张力的BS甜菜碱组成的两相复合泡沫调剖体系,驱替实验结果显示,该体系对渗透率为 300×10^{-3} 和 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心的封堵率超过50%。Bu等^[22]以甲基苯乙烯(MSt)和甲基丙烯酸甲酯(MMA)为单体、二乙烯基苯(DVB)为交联剂、OP-10为乳化剂,过硫酸铵(APS)为引发剂,采用乳液聚合法制备了平均颗粒为80 nm的交联聚合物纳米微球泡沫稳定剂,并通过正交实验筛选了三相泡沫的最佳配方。该三相泡沫具有良好的耐温、耐盐性能,驱油实验表明,三相泡沫体系的平均驱油效率,在单岩心实验中为16.1%,在双岩心实验中为21.7%。在低渗透岩心中的阻力系数大于在高渗透岩心的,但两者的剩余阻力系数较小,且相差不大,说明该三相泡沫体系对特低渗透率储层具有良好的调剖能力,对低渗透层伤害较小。但是,泡沫体系的强度较弱,且在地层条件下的稳定很差,极易发生破裂,导致封堵有效期较短。

2.3 体膨颗粒调剖技术

体膨颗粒是一种吸水膨胀型的颗粒类调剖剂,对于非均质性矛盾突出、水窜严重的地层,其控水、稳油成效尤为显著^[23]。体膨颗粒通常是由有机单体与黏土颗粒复合而成,或通过机械方法对凝胶块进行造粒制备得到。颗粒通过地层孔喉时附着在岩石表面,吸水后体积膨胀封堵孔喉,进而增大后续水的渗流阻力。当驱动力较大时,膨胀的颗粒可整体突破并继续向前运移,作用于更前端的大孔道,从而起到逐级调剖作用^[24]。另外,体膨颗粒工业量化生产操作方便,油田施工也相对便捷,其颗粒的耐温、耐盐性能也可根据实际情况作出相应调整,故体膨颗粒适用于复杂油藏的高渗油层深部调剖。Wang等^[25]采用溶液聚合法,用丙烯酰胺单体、交联剂与过硫酸钾制备了预制颗粒凝胶PPGs。预制颗粒凝胶PPGs具有良好的耐温耐盐性能和膨胀性能,在低渗透油藏的现场应用中,表现出良好的堵漏作用。但是针对低渗透油藏的深部调剖,需使用不同粒径的PPGs进行调剖才能获得较好的效果。You等^[26]制备了一种新型酚醛树脂分散颗粒凝胶PDPG。PDPG颗粒稳定性较好,能在油藏深部高温高盐的环境下容易团聚,对高渗透通道进行封堵,且PDPG颗粒生产效率较高,有利于工业应用,

矿场试验结果显示,组日均产油量由29.7 t逐渐提高到35.4 t,平均含水率由56.2%降为54.4%。但是,体膨颗粒调剖的有效期较短,后续注水压力不能长久维持;且对于低渗透油藏,存在难以注入的问题,所以该深部调剖技术并未获得普遍使用^[27]。

2.4 含油污泥调剖技术

含油污泥具有可回收利用率高、应用广等特性,一直是人们关注的焦点,其主要组分有胶质、石蜡和固相颗粒等^[28]。当含油污泥乳状液运移到油藏深部后,由于剪切、稀释作用,含油污泥乳状液中的各相分离,分离出的各组分依靠桥接作用聚沉成较大尺寸的团簇,并黏附在地层孔喉表面,并使其尺寸缩小。增大后续水流阻力系数的同时改变液流流向。另外,污泥乳液中的液滴在孔喉中也具有较强贾敏效应^[29]。近几年,对于含油污泥调剖的研究较多。青海油田部分区块采用添加悬浮剂的含油污泥进行调剖,井组的产液量上升,含水率下降,累计增油达87.7t^[30]。朱英月等^[31]研究了一种由含油污泥、悬浮剂和交联剂组成的调剖体系。该体系具有良好的抗老化性能,且室内实验结果显示,其封堵率达到94%。谢建勇等在准东油田采取了3种污泥调剖体系对油藏裂缝进行封堵,结果显示,悬浮体系、冻胶体系和固化体系的组合使用具有良好的稳定和封堵性能。含油污泥调剖技术实现了对含油污泥的资源再利用,成本较低^[32]。但是含油污泥的组分较为复杂性,其乳化后的乳滴尺寸也存在较大差异性,因此,将含油污泥应用于油藏调剖存在一定风险^[33]。且受到油藏条件的限制较大,对低渗透油藏进行深部调剖容易堵塞地层。

2.5 就地聚合凝胶调剖技术

就地聚合凝胶调剖体系的研发思路为:以聚丙烯酰胺或丙烯酰胺单体为配液基础,再加入具有特定性能的单体、交联剂以及其他辅助试剂,然后将凝胶溶液泵入油藏中,使凝胶溶液在地下交联生成具有一定黏弹性和强度的凝胶块^[34]。由于配制的凝胶溶液初始黏度较低,与水的黏度相近,因此,凝胶溶液的注入性良好^[35]。目前,关于就地聚合凝胶封堵材料的报道也较多,例如,唐孝芬团队研发的TP调堵体系,蒲万芬团队研发的XN-PP封堵体系等。针对就地聚合凝胶体系成胶时间过快的的问题,岳湘安团队分别研究了SR&NI ATRP引发体系、

ARGET ATRP引发体系和含微囊引发剂的就地聚合凝胶体系,均有效延长了就地聚合凝胶体系的成胶时间,且含微囊引发剂的就地聚合凝胶体系能够顺利进入平均渗透率为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心,对低渗透油藏具有良好的调剖作用^[36]。虽然,就地聚合凝胶体系的注入性良好,但其对成胶环境的要求较高,受到多种因素影响,如:色谱分离、吸附、稀释、矿化度、pH值等,尤其是高温条件下成胶时间的调控极为困难,这也导致凝胶溶液的成胶强度难以控制,进而对水窜通道的封堵能力有限,这也限制了就地聚合凝胶体系的应用^[37]。

2.6 聚合物微球调剖技术

聚合物微球是在无机颗粒调剖剂基础之上逐步形成的具备良好应用前景的深部调剖剂。通过对聚合物微球分子结构的优化,可显著提高其耐温耐盐性能,并且在微球配制施工中可用污水配制,不仅减少污水处理量,还节约清水;另外,聚合物微球施工过程中受外界影响也较小^[38]。聚合物微球的调剖机理为:未溶胀的弹性聚合物微球被注入地层后,在渗透压的作用下吸水膨胀,膨胀后的微球尺寸大大增加,这些溶胀的微球通过吸附、架桥作用封堵地层孔喉。当驱替压力较大时,形成的封堵会被突破,致使聚合物微球在更前端重新形成新的封堵,进而实现逐级深部调剖堵水的目的^[39]。但是,在施工应用时存在以下难点:油藏孔喉半径分布较散,难以匹配合适粒径的微球,尤其是对于致密-低渗裂缝性油藏,裂缝发育程度较高,依据尺寸匹配关系优选的聚合物微球调剖剂在裂缝中运移阻力小,不能起到封堵作用。此外,大多采用反相乳液聚合法制备聚合物微球,因此,聚合物微球在水中的分散性较差^[40]。Zhang等^[41]采用蒸馏-沉淀聚合法,利用丙烯酰胺、丙烯酸和甲基丙烯酸甲酯制备了纳米级聚合物微球。该聚合物微球表现出良好的耐盐性和抗剪切性,并具有良好的渗吸后选择性进入能力,适用于低渗透油藏底部的深部流体分流。岩心驱替实验表明,对于渗透率为 $10 \mu\text{m}^2$ 的非均质岩心有良好的调剖作用。Zou等^[42]将一种原位聚合物微球(ISPM)乳液注入地层中通过聚合形成可用于调剖控制的微球,多点压力测量实验和电镜结果表明,ISPM乳液在低渗透磁导芯中具有良好的注入性,ISPM乳液可以在微小孔隙中聚合形

成微球,有利于进入低渗透油藏的深部位置进行封堵。

2.7 微生物调剖技术

微生物在地下能够以糖类物质为营养源,代谢产生不溶于水的聚合物。这些代谢产物在水窜通道中聚集黏结,从而有效堵塞油藏中的高渗通道。另外,由于微生物代谢产物可以降低原油黏度,因而,微生物代谢物具有调剖-驱油的双重功能^[43]。20世纪70年代,国外已将微生物调剖技术应用于油田矿场,如美国佩恩县油田、秘鲁北海油田,并已取得显著经济效果。近年来,我国大庆、胜利、塔里木等油田也已开展微生物调剖-驱油先导试验,均取得良好经济效益。大庆油田通过选用与地层孔喉半径、渗透率大小相匹配的蜡状芽孢杆菌和短短芽孢杆菌在外围低渗透油藏进行了微生物调剖试验,试验期间,日产油由33.6 t增至44.8 t,含水率由65.7%降至62.7%^[44]。应用短短芽孢杆菌和蜡状芽孢杆菌等菌种在大庆朝阳沟低渗透油田开展的微生物调剖试验也取得理想效果,生产井日产量增加36 t,日产油量增加16.1 t,含水率下降6.6%,一年内累计增油5800 t^[45]。长庆油田在塞169油藏采用微生物调剖,使得该低渗透油藏的含水下降,驱油效率提升5.46%~11.93%^[46]。在冯66-72、西25-15和王16-5等低渗透油藏区块也开展了微生物调剖试验,均取得良好的增油效果^[47]。但是,在高温高矿化度条件下,微生物调剖技术存在菌种选择难、适应性差的难题,限制了微生物调剖技术的进一步应用^[48-49]。

2.8 复合调剖技术

随着油田开发不断深入,单一型深部调剖体系面临的问题愈加严峻。在油藏高温高盐的恶劣环境下,单一调剖体系自身的不足以及特殊材料调剖的高昂价格,使得单一调剖体系难以满足生产需求。将两种或两种以上的调驱体系通过复配得到复配体系,利用单一体系间的协同作用克服单一调剖体系的不足,具有广阔的应用前景。张文喜等^[50]研究了一种双相复合凝胶调剖体系,该体系的各组分在大孔道中通过耦合形成低分子初聚体,然后通过水化反应形成具有高强度的胶体进行封堵,能优先对渗透率较大的孔道进行封堵。毕台飞等^[51]在安塞油田采用PEG-1凝胶+聚合物微球复合调剖技术,使平均单井组累计增油83.6 t,累计降水142.6 m³,井组含水率快速上升的趋势得到有效遏制,有效扩

大水驱波及体积。Cai等^[52]以复合材料HDSX-1、N1-2和聚合物AP-P4为主剂研发了一种凝胶泡沫复合调剖驱油体系,该体系具有黏度低、配制容易、注入性好、交联反应慢、强度高、长效等特点。室内双管驱油实验最终采收率达35.01%,提高了23.69个百分点。油田试验结果显示,原油增产899 t,平均含水下降5%。Yang等^[53]研究了纳米微球、单相凝胶颗粒(PEG)和交联本体凝胶膨胀颗粒(CBG-SP)对低渗透油藏的调剖作用。实验结果显示,在渗透率为 $50 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透通道中,平均粒径为100 nm纳米微球的深部调剖效果较好,采用含聚乙二醇(PEG)、CBG-SP和纳米微球的多段塞有利于提高低渗透油藏的采油效果。Wang等^[54]也考察了纳米微球、PEG、CBG-SP对低渗透裂缝性储层的深度调剖能力,结果显示,小颗粒(平均粒径为100 nm)纳米微球表现出相对优异的调剖控制效果,PEG适合在低渗透裂缝性储层中发挥“堵控”作用,而CBG-SP能够实现井区附近“堵驱”的效果。虽然复合调剖体系的调剖效果优于单一体系,但是单一调剖体系间的协同机理尚未完全明确,而复配体系的良好协同作用离不开单一体系间良好的配伍性。

综上可知,油藏调剖技术种类较多,每一种调剖技术具有各自优势的同时也存在一定的缺点。不论是大量油田生产实例还是模拟实验结果均证实,在实际油藏中,现有常规调剖剂技术水窜治理效果普遍不理想,调剖剂注入性与其深部封堵能力之间的尖锐矛盾已成为油藏深部调剖技术亟待突破的关键问题,亟需有针对性的新技术^[55]。

3 结束语

油藏深部调剖-驱油技术面临两大矛盾:调剖剂注入性与油藏深部水窜通道封堵的矛盾以及深部调剖与剩余油驱替的矛盾。深调的突出矛盾要求调剖剂要具有尽可能低的注入阻力和尽可能高的水流通道封堵强度;而不同类型油藏残余油对于驱油剂的乳化能力、界面张力、增溶能力要求不同。目前,常规深部调剖-驱油技术已无法满足日益复杂的开发条件,今后的油藏调剖-驱油技术发展趋势包括以下几个方面:

(1) 研发以解决注入性与油藏深部水窜通道封

堵矛盾为目的新型调剖剂。传统的调剖技术对于历经长期开采和多轮次调剖的常规油藏,尤其是对于低渗等复杂油藏的适应性普遍较差,调剖剂的注入性与其对油藏深部水窜通道封堵能力之间的突出矛盾是制约各类油藏水窜治理效果的技术瓶颈。因此,研发兼具优良注入性和强封堵能力的深部调剖剂已成为高含水油藏高效开发的迫切需求。

(2)由于低渗透油藏的渗透率较小,调剖剂的颗粒直径必须足够小才能进入低渗透油藏的深部进行调剖,且调剖剂必须具有较好的选择封堵性。低渗透油藏与中高渗油藏相比,其有效通道明显小于常规油藏,因此,在优先封堵高渗透通道的同时要避免阻塞低渗透通道。

(3)先注入粒径较小的调剖剂使其进入低渗透油藏深部,再逐步注入较大粒径的调剖剂,更容易对油藏深部的高渗透通道进行封堵。除了将合成好的调剖剂注入地层,还可以将合成调剖剂的乳液注入地层,利用地层的高温、高压和高盐的环境进行反应,在高渗透通道中生成封堵物质。该方法能较好地使调剖剂进入油藏深部,但是由于油藏的环境较为复杂,实际使用过程中需要精准控制反应的发生,这是一大难点。

我国油田已进入高含水、高采出程度的“双高”阶段,开发效果逐年变差,受沉积、储层物性及非均质性等因素的影响,剩余油分布状况复杂、残余油类型多样,尤其是低渗特低渗油藏的大规模开发,对油藏调剖-驱油技术提出了更高的要求。因此,面对日益复杂苛刻的油藏条件,明确油藏深部调剖-驱油技术面临的技术瓶颈,探究驱油体系对不同类型残余油作用机制,探索提高驱油效率的微观机理,是目前高含水油田稳产增产所面临的极大挑战。

参考文献:

- [1] 胡文瑞,魏漪,鲍敬伟.中国低渗透油气藏开发理论与技术进展[J].石油勘探与开发,2018,45(4):646-656.
- [2] 袁士义,王强.中国油田开发主体技术新进展与展望[J].石油勘探与开发,2018,45(4):657-668.
- [3] 雷群,翁定为,罗健辉,等.中国石油油气开采工程技术进展与发展方向[J].石油勘探与开发,2018,46(1):139-145.
- [4] MA K, LI A, GUO S, et al. Techniques for improving the water-flooding of oil fields during the high water-cut stage [J]. Oil Gas Sci Technol, 2019, 74: 69-80.
- [5] 李承龙,苗志国,李照永,等.大庆长垣外围特低渗透油藏开发效果综合评价方法[J].特种油气藏,2019,26(4):97-102.
- [6] 侯思伟,王毅,饶政,等.高含水油藏深部调剖驱油机理实验研究[J].科学技术与工程,2020,20(32):13163-13167.
- [7] 袁铨.低渗油藏注水开发水窜机理及控制方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
- [8] 苏旭杰,卢金蓉,尹晏彬,等.低渗透油藏水窜机理及影响因素研究:以鄂尔多斯盆地X区为例[J].内蒙古石油化工,2020,46(10):122-124.
- [9] 杨洁.裂缝性低渗透油藏调剖工艺适应性评价及效果分析[J].石化技术,2022,29(5):60-62.
- [10] LI X, WANG J, NI J, et al. Compatibility evaluation of in-depth profile control agents for low-permeability fractured reservoirs [J]. Gels, 2022, 8(9): 8090575.
- [11] CAO W, XIE K, LU X, et al. Effect of profile-control oil-displacement agent on increasing oil recovery and its mechanism [J]. Fuel, 2019, 237: 1151-1160.
- [12] KANG W L, ZHOU B B, ISSAKHOV M, et al. Advances in enhanced oil recovery technologies for low permeability reservoirs [J]. Pet Sci, 2022, 194: 107529.
- [13] 张继红,相建昌.弱凝胶调驱体系微观驱油机理研究[J].化学工程师,2020,34(4):34-38.
- [14] 贺杰,岳湘安,丁名臣,等.多孔介质中弱凝胶运移封堵特征[J].油田化学,2015,32(2):190-194.
- [15] ZHOU Z, ZHAO J, ZHOU T, et al. Study on in-depth profile control system of low-permeability reservoir in block H of Daqing oil field [J]. J Pet Sci Eng, 2017, 157: 1192-1196.
- [16] CUI C, ZHOU Z, HE Z. Enhance oil recovery in low permeability reservoirs: Optimization and evaluation of ultra-high molecular weight HPAM/phenolic weak gel system [J]. J Pet Sci Eng, 2020, 195: 107908.
- [17] LI Y K, HOU J R, WU W P, et al. A novel profile modification HPF-co-gel satisfied with fractured low permeability reservoirs in high temperature and high salinity [J]. Pet. Sci, 2023.
- [18] JIA H, XIE D S, KANG Z. Secondary surface modified laponite-based nanocomposite hydrogel for gas shutoff in wellbore [J]. J Pet Sci Eng, 2020, 191: 107116.
- [19] LIU W, LI Z M, LI J, et al. Research on in-depth profile control of multiphase foam system [J]. Pet Sci Technol, 2012, 30(21): 2246-2253.
- [20] ZHONG X, LIU D X, SHI X F, et al. Characteristics and functional mechanisms of clay-cement stabilized three-phase nitrogen foam for heavy oil reservoir [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 170: 497-506.
- [21] ZHANG C, WANG P, SONG G, et al. Optimization and evaluation of binary composite foam system with low interfacial tension in low permeability fractured reservoir with high salinity [J]. J Pet Sci Eng, 2018, 160: 247-257.
- [22] ZHOU M, BU J, WANG J, et al. Study on three phase foam for

- Enhanced Oil Recovery in extra-low permeability reservoirs[J]. *Oil Gas Sci Technol*, 2018, 73: 55.
- [23] ZHAO G, YOU Q, TAO J P, et al. Preparation and application of a novel phenolic resin dispersed particle gel for in-depth profile control in low permeability reservoirs[J]. *J Pet Sci Eng*, 2018, 161: 703-714.
- [24] 陈宇豪,王克亮,李根,等.大粒径调剖颗粒封堵机理及深部运移性能评价[J].*岩性油气藏*, 2019, 31(1): 159-164.
- [25] XU B, WANG Y. Profile control performance and field application of preformed particle gel in low-permeability fractured reservoir [J]. *J Pet Explor Prod*, 2021, 11(1): 477-482.
- [26] ZHAO G, YOU Q, TAO J, et al. Preparation and application of a novel phenolic resin dispersed particle gel for in-depth profile control in low permeability reservoirs[J]. *J Pet Sci Eng*, 2018, 161: 703-714.
- [27] DAI C L, LIU Y F, ZOU C W, et al. Investigation on matching relationship between dispersed particle gel (DPG) and reservoir pore-throats for in-depth profile control [J]. *Fuel*, 2017, 207: 109-120.
- [28] 武建明,刘进军,王洪忠,等.火烧山油田含油污泥调剖工艺技术研究与应[J].*石油与天然气化工*, 2020, 49(5): 87-91.
- [29] 杨昌华. 污泥凝胶颗粒调驱剂的研制及应用[J]. *油田化学*, 2018, 35(3): 422-426.
- [30] 从生伟,郭利霞,王辉等.青海油田含油污泥调剖技术应用[J].*石油石化节能*, 2022, 12(01): 21-23.
- [31] 朱英月,梁雪蕊,朱荣娇等.胜利孤东油田含油污泥调堵体系的制备与评价[J].*化学工业与工程*, 2020, 37(05): 14-21.
- [32] 谢建勇,石彦,武建明等.含油污泥调剖体系在裂缝性油藏的应用[J].*油田化学*, 2021, 38(04): 627-633.
- [33] 芦英俊,欧阳峰,王营营.油田含油污泥调剖体系封堵能力研究[J].*工业水处理*, 2018, 38(11): 88-91.
- [34] YADAV U S, MAHTO V. In situ gelation study of organically crosslinked polymer gel system for profile modification jobs [J]. *Arab J Sci Eng*, 2014, 39(6): 5229-5235.
- [35] JIA H, YANG X Y, ZHAO J Z. Development of a novel in-situ-generated foamed gel as temporary plugging agent used for well workover: affecting factors and working performance[J]. *SPE J*, 2019, 24(4): 1757-1776.
- [36] 邵明鲁,岳湘安,贺杰.微囊引发剂控制聚合凝胶体系成胶实验研究[J].*油气藏评价与开发*, 2020, 10(6): 33-39.
- [37] ZHANG L, PU C S, ZHENG L M, et al. Synthesis and performance evaluation of a new kind of gel used as water shutoff agent[J]. *J Pet Explor Prod Technol*, 2016, 6(3): 433-440.
- [38] YANG H B, HU L L, CHEN C, et al. Influence mechanism of fluorescent monomer on the performance of polymer microspheres[J]. *J Mol Liq*, 2020, 308: 113081.
- [39] LIN M Q, ZHANG G Q, HUA Z, et al. Conformation and plugging properties of crosslinked polymer microspheres for profile control[J]. *Colloids Surf A*, 2015, 477: 49-54.
- [40] YANG H B, KANG W L, YIN X, et al. Research on matching mechanism between polymer microspheres with different storage modulus and pore throats in the reservoir[J]. *Powder Technol*, 2017, 313: 191-200.
- [41] ZHAO F, ZHANG H, WU Y, et al. Preparation and performance evaluation of polymeric microspheres used for profile control of low-permeability reservoirs[J]. *J Chem*, 2020, 2020: 5279608.
- [42] ZOU J, YUE X, DONG J, et al. Novel in-depth profile control agent based on in-situ polymeric microspheres in low permeability reservoir [J]. *J Dispersion Sci Technol*, 2020, 41 (8) : 1254-1264.
- [43] 魏睿.低渗透油田高含水期微生物驱油技术完善与应用[J].*化工设计通讯*, 2018, 44(6): 50-50
- [44] 付现平,朱琳琳.大庆外围低渗透油藏微生物采油提高采收率技术研究[C]//西安石油大学陕西省石油学会. 2018: 2114-2118.
- [45] 郭万奎,侯兆伟,石梅,等.短短芽孢杆菌和蜡状芽孢杆菌采油机理及其在大庆特低渗透油藏的应用[J].*石油勘探与开发*, 2007, 34(1): 73-78.
- [46] 庄建,陆灿阳,张旭,等.塞169低渗透油藏微生物活化水驱机理及群落分布规律[J].*特种油气藏*, 2022, 29(1): 147-153.
- [47] 汪卫东.微生物采油技术研究进展与发展趋势[J].*油气地质与采收率*, 2021, 28(2): 1-9.
- [48] LOURDES R S, CHENG S Y, CHEW K W, et al. Prospects of microbial enhanced oil recovery: Mechanisms and environmental sustainability [J]. *Sustain Energy Technol Assess*, 2022, 53: 102527.
- [49] 刘向伟,傅波,田育红,等.低渗透油田本源微生物调剖驱油技术研究及应用[J].*石油化工应用*, 2012, 31(4): 95-96.
- [50] 张文喜,徐国瑞,王晓龙,等.双相复合凝胶堵水体系研究与应用[J].*石油化工应用*, 2020, 39(12): 48-53.
- [51] 毕台飞,易永根,田永达,等.复合调剖技术在安塞油田的探索与应用[J].*化学工程与装备*, 2019(5): 170-172.
- [52] GU X, CAI G, FAN X, et al. Evaluation of foam gel compound profile control and flooding technology in low-permeability reservoirs[J]. *Processes*, 2023, 11(8): 2424.
- [53] LI J, WANG Z, YANG H, et al. Compatibility evaluation of in-depth profile control agents in dominant channels of low-permeability reservoirs[J]. *J Pet Sci Eng*, 2020, 194: 107529.
- [54] LI X, WANG J, NI J, et al. Compatibility evaluation of in-depth profile control agents for low-permeability fractured reservoirs [J]. *Gels*, 2022, 8(9): 8090575.
- [55] 于波,田育红,周冰欣.低渗透油田提高采收率技术研究及应用[J].*石油化工应用*, 2010, 29(7): 35-38.

(下转第760页。to be continued on p.760)

Discrimination of Common Confusing Words in Editing Work

LIN Zhangbi, YANG Mingjiao

(Polymer Research Institute, Editorial Office of Oilfield Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, P R of China)

Abstract: In order to reduce the word errors, several groups of easily confusing terms commonly used in daily editing were analyzed, including “配制(preparation)” and “配置(configuration)”, “瓜尔胶(guar gum)” and “胍胶(guanidine gum)”, “黏度(viscosity)” and “粘度(viscosity)”, three structural auxiliary words, and “氨(ammonia)”, “胺(amine)” and “铵(ammonium)”. By analyzing the interpretation of preparation and configuration, “preparation” should be used when involving the preparation of solution in periodical. “Guar gum” was a standard technical term, so “guanidine gum” should not be used in oil and gas industry. “Viscosity” was a physical property of a fluid, so it should be written as “黏度”. Three structural auxiliary words, such as “的”, “地”, “得”, should be distinguished, which made written language accurate. By analyzing the definition, structure and properties of ammonia, amine and ammonium, as well as the common examples of chemical reagent names in the field of oilfield chemistry, this paper provided reference for the correct and standardized use of scientific and technical workers and periodical editors.

Keywords: *preparation; configuration; guar gum; guanidine; stick; viscosity; structural auxiliary word; ammonia; amine; ammonium; discrimination*

(上接第749页。continued from p. 749)

Research Process of In-depth Profile Control and Oil Displacement Technology

SUN Tianyu¹, SHAO Minglu¹, ZHAO Hongyu³, CHANG Ailian², FU Lipei¹, LIAO Kaili¹

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, School of Energy, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, P R of China; 2. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, School of Urban Rail Transportation, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, P R of China; 3. Gas Development Management Center, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong 257000, P R of China.)

Abstract: In-depth profile control and oil displacement technology is an important tool to improve the recovery rate of the oil reservoir. Through analysis of the key problems of water channeling and efficient displacement of residual oil, two major contradictions of in-depth profile control and oil displacement technology were explained from two aspects: the contradiction between the injectivity of the profile control agent and the blockage of the deep water breakthrough channels, and the contradiction between in-depth profile control and the displacement of remaining oil. In this paper, the principle of deep profile control technology and its application in low permeability reservoir were reviewed, the advantages and problems of each technology were pointed out, and the development trend of in-depth profile control and oil displacement technology in China was analyzed.

Keywords: *deep profile control; oil displacement; review; development; review*