

文章编号:1000-4092(2020)04-738-08

油田深部调剖技术及其应用研究进展*

王翔, 郭继香, 陈金梅

(中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249)

摘要:深部调剖技术是油田克服储层现状,实现深层次、精准化、协同化发展的重要手段。本文在充分分析油藏现有问题的基础上,综述了凝胶型、冻胶型、颗粒型、泡沫型、微生物和其他低成本废弃物深部调剖技术的作用原理及作用方法,指出了各体系的优势及自身存在的问题,总结了各体系在国内外的矿场应用情况,并提出了下一步的发展趋势。参50

关键词:深部调剖;现状;研究进展;矿场应用;发展趋势;综述

中图分类号:TE39:TE357 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.04.029

调剖堵水技术在我国已发展了近70年,油田现场应用的化学剂由油井近井堵水发展为注水井深部调剖,油田的目标导向也逐渐由近井物理屏蔽发展为深部区块综合治理。21世纪以来,经过多年的水驱,油藏储层的非均质性逐渐加剧,流体流度的差异性也逐渐增大,导致地层中形成高渗层、大孔道,水流优势通道明显,注水井注水后窜流、绕流问题突出,无法有效启动中低渗层的剩余油,导致油田产量降低,采出液含水率大大升高。目前,不论从施工工艺还是经济有效性来说,常规调堵技术的缺点都尤为突出,油田现场越来越多的技术难题推动着深部调剖技术不断发展。

1 深部调剖技术研究现状

深部调剖技术的理念来源于困扰现场多年的近井堵塞难题,将“调”和“剖”融为一体,在地层深处作用,因此也叫深部液流转向技术。一般来讲,深部调剖技术的作用半径是普通调剖技术的2倍以上,其调剖有效率也更高,针对不同的储层情况处理的范围也不尽相同,对于高含水的区块可达井距

的1/3左右,而在注水井裂缝较大区块一般在井距的1/2以上^[1],但并非越深越好,由庆等发现在单位体积用剂进入深度为井距的3/10时会出现采收率峰值^[2]。深部调剖技术主要通过运用化学调剖剂来调节储层深部纵向和横向的矛盾,不仅能使水由高吸水量的高渗层向低吸水量的中低渗层间流动,以此来扩大波及系数,驱替因物理性质差异而形成的未波及未动用剩余油;而且也可在封堵两端压差的情况下向深部运移,使注入水在油层深处不断延伸,通过一整套动态过程有效提高油田采收率。与深部调剖技术相比,深部调驱技术的化学用剂更为复杂,虽兼具注入水增黏、原油减阻、油水混相和高渗透层堵塞等综合作用,但施工成本也会大大增加,更易受地层多重因素影响。

1.1 凝胶型深部调剖技术

从80年代伊始,以HPAM为主剂的交联水凝胶在近些年的油田调剖堵水中发挥了重要的作用。油田现场常用的凝胶型深部调剖体系主要包括:弱凝胶调剖体系、胶态分散体系和预交联凝胶颗粒调剖体系。

* 收稿日期:2019-11-11;修回日期:2020-05-16。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“缝洞型油藏堵调及靶向酸压工艺技术”(项目编号2016ZX05014-005-009),国家自然科学基金“超深井超稠油高温高压井筒举升流动规律研究”(项目编号51674274)。

作者简介:王翔(1994-),男,中国石油大学(北京)化学工程专业在读硕士研究生(2018-),从事油田化学及提高采收率技术方面的工作,电话:010-89732129, E-mail: shawnwong1026@163.com。郭继香(1965-),女,教授,博士生导师,本文通讯联系人,通讯地址:102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, E-mail: guojx002@163.com。

1.1.1 弱凝胶调剖体系

弱凝胶是一种由聚合物分子间相互交联形成三维网状结构的凝胶体系,聚合物主要包括阴离子型聚丙烯酰胺、黄原胶和甲基纤维素等,而交联剂主要有 Cr^{3+} 、复合有机柠檬酸铝交联剂和有机酚醛等。由于弱凝胶体系成胶时间长且成胶强度小,调驱液在注入目的地前具有良好的可泵性,通过后续注入水的压力在孔道中可通过“暂堵-突破-再暂堵-再突破”的动态过程缓慢运移,发挥既“调”又“驱”的作用,实现油藏深部调剖^[3]。现场配制弱凝胶注入液所用主剂和交联剂浓度低,在油田大规模实际应用时经济可行,但该体系存在交联时间快、地层成胶效果差和温度适应性不强等问题。

弱凝胶调剖技术最早在胜利油田得到了现场应用,随后在辽河油田、长庆油田和渤海油田等地的矿场试验也都取得了显著的效果。2010年,针对辽河油田油藏层间与层内的矛盾,在油田现场实施了弱凝胶调驱与注采井网综合调整等配套工艺组合技术,油藏水驱开发效果良好,油井含水下降了5%,措施期间累计增油 $8.6 \times 10^4 \text{ t}$ ^[4]。2011年,高春宁等^[5]在HC油田H2区的6个井组开展了弱凝胶调驱先导试验,储层的吸水厚度和动用程度都略有提升,见效井达20口,累积增油为3447 t,有效改善了储层高含水环境。Pan等^[6]从2013年开始,在渤海油田的勃南油田开展先导试验,2013年至2016年间,周边9口生产井累增油达 $15.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.1.2 胶态分散凝胶调剖体系

20世纪90年代,美国的TIORCO公司将胶态分散凝胶(Colloidal Dispersion Gel, CDG)技术应用于油田调剖,随后CDG技术进入快速发展时期。CDG体系是由聚合物分子内部交联形成直径一般在 $0.2 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 之间的柔性胶体粒子的体系,在施工时用水作为分散介质注入地层,在地层环境下发生形变堵塞深部岩石缝道孔喉,从而使深部水在横、纵向延伸,提高原油采收率^[7]。该体系用量少、成本低、自身粒径小,可进入地层深部,但对于该体系的深部调剖能力,因地层情况多变、注入时损失严重,在高温高盐油藏下耐受能力不够,制约其进一步的发展。

在20世纪90年代中后期,国内如中国科学院、中国石油勘探院等多家科研院所对其展开了深入

的研究,大庆、胜利孤东、华北和中原马寨等各大油田也陆续开展了先导试验。Chang等^[8]在1995~2003年在大庆油田进行了首次大规模CDG技术中试,中试结果表明:CDG技术可以有效调节渗透率变化,提高体积波及系数,在中心采区的应用使得原油采收率达到10.5%。魏翠华等^[9]针对胜坨油田高温高盐的油藏条件,采用聚合物KYPAM+交联剂 Cr^{3+} 胶态分散凝胶驱油体系,以CDG数值模拟软件FAPMS优化注入方案,采用三段塞注入,提高原油采收率7.1%,增产油量 $11.4 \times 10^4 \text{ t}$ 。张还恩^[10]在2005年采用低浓度三元共聚物和复合有机交联剂制备了耐温 90°C 、耐盐 $2 \times 10^5 \text{ mg/L}$ (其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量 5000 mg/L)的CDG体系,在中原油田W井组先导试验区采用三段塞注入开展CDG试验,调驱后井组平均日增油7 t,采出液含水率平均下降了3%,评价期内持续增油800 t以上,采收率可提高8.2%。国外如美国、加拿大和南美的诸多国家也广泛应用CDG技术,Diaz报道了在阿根廷的Loma Alta Sur^[11]油田LAS-58区块开展CDG化学剂与配套工艺技术,从2005年11月到2007年10月间,原油累计生产21194 t,增油效果明显。

1.1.3 预交联凝胶颗粒调剖体系

预交联体膨颗粒(PPG)是一类由聚合物先交联后颗粒化形成的吸水树脂颗粒,具有良好的吸水膨胀性能,因此也叫水膨体。PPG通常用于对强非均质地层进行调剖堵水^[11],对油水具有选择性,在孔道移动时颗粒吸水膨胀,膨胀体积可达自身几倍到几十倍,且吸水后的弹性体具有良好的保水效果,但遇油则基本无变化;PPG在地层环境及地层水的剪切作用下可弹性变形,进入深部储层,从而实现深部动态调剖的目的。PPG调剖体系存在颗粒吸水膨胀速率过快而导致的注入压力高、深部运移能力差以及不耐冲刷等问题,不宜在高温油藏中使用。

PPG调剖体系自1997年由中石油勘探院提出后,先后在国内的大庆兴北^[12]、中原文南^[13]、胜利及长庆^[14]等油田得到广泛的应用,但因后期单独使用PPG的矿场作用效果下降,因此又逐渐结合矿场条件综合采用“PPG+弱凝胶”等复合调驱技术^[15-16]和支化改性技术^[17]段塞注入,用以增强PPG的处理效果,稳定增油控水。

1.2 冻胶型深部调剖技术

冻胶对于油田注水井调剖及油井堵水的发展意义重大,冻胶体系为凝胶体系的一种,其含液量高(通常为体积分数的90%以上),强度也更大,受准静态应力作用时显示弹塑性体性质,在弹性极限内受交变应力作用时显示黏弹性体性质。其转变方式可由化学键或物理键交联成胶,且多为地下交联,在国内外现场都有较多应用。

1.2.1 聚合物冻胶调剖体系

聚合物冻胶调剖体系一般是由分子链中含有活性羧基、酰胺基等基团的水溶性聚合物高分子与交联剂铝合物、铬合物、钛合物、锆合物等高价金属离子或低分子醛类组成。在地层孔缝流动过程中随着温度的升高,交联剂缓慢释放,主剂聚合物交联聚合,将大量水包裹在网格结构中形成具有复杂立体网络结构的弹性冻胶。在形成物理堵塞的过程中,会降低高渗透区域的渗透率,使储层的非均质性得以改善,同时注入的体系也会保留一定的岩石吸附与杂质捕集作用,从而增大残余阻力,有效增强调剖效果。冻胶体系的黏弹性好、成本也较低、操作便捷,但在耐温抗盐方面还需有所提升。出于深部调剖的需要,配方上要有有效控制成胶时间与成胶强度之间的关系及储层条件的耐受能力,以段塞工艺提升远井调剖能力。

自20世纪七八十年代以来,冻胶调剖剂在国内蓬勃发展,东部以大庆、胜利^[18-19]为代表的大型油田及中西部的中原、克拉玛依油田等基本都进行了从浅调到深调的矿场试验,作用效果显著。国外如科威特的WFR油田^[20]、美国堪萨斯州中部的Arbuckle油田^[21]的现场应用减水增油效果明显;哈萨克斯坦Kenkiyak油田盐上油藏^[22]在现场试验结束后对比发现调剖前后的投入产出比可达1:2.2,经济回报良好。

1.2.2 热致可逆冻胶调剖体系

1967年Scarpa首次发现了聚N-异丙基丙烯酰胺(PINPAM)的温度刺激响应特性,随后在1978年Tanaka合成了温敏性水凝胶,自此推进了环境刺激响应凝胶的发展。在石油提高采收率方面,热致可逆冻胶调剖剂一般是由疏水缔合聚合物(改性聚丙烯酰胺或纤维素醚等)溶液和颗粒型、聚合物微球型调剖剂组成的复合冻胶体系,因疏水缔合聚合物

的热致可逆性,在一定温度下(低临界温度)分子链收缩缔合,缠绕成立体空间结构,可用于深层调剖,阻止水窜流作用明显,但其耐受性不好,因此体系的复合使用可提高调剖剂对孔道封堵的作用,增强其耐冲刷等性能。国外较先研究出热可逆调堵体系^[23],并于20世纪90年代在West Siberia等油田使用,有效提高了原油采收率;国内如长庆油田的南北杰等^[24]在2008年基于室内实验研究将复合深部调剖体系应用于靖安油田现场12口注水井,日产油增加14.36 t,而含水率降低7.7%,有效解决了水驱效果差、产能损失严重等问题;2010年,李伶东等^[25]采用多复合体系在安塞油田长6油藏多个区块实施“大剂量-小排量-低压力-多段塞”的工艺措施,增油减水效果显著,对油藏稳产起到积极作用。

1.3 颗粒型深部调剖技术

颗粒类堵剂已在油田调堵作业中应用多年,从最开始的刚性体水泥、沉淀颗粒到近些年的柔性体聚合物微球,它的存在为油田调堵作业的顺利实施提供了保障。颗粒类堵剂成本低、封堵的强度及稳定性高,同时耐温耐盐耐剪切,在调剖堵水技术中占有重要一席^[26]。施工过程中的注入压力问题及地层孔喉和颗粒粒径之间的配伍性问题,对于颗粒类堵剂在油田中的应用极为关键。

1.3.1 沉淀颗粒调剖体系

沉淀颗粒调剖体系在国内的应用较早,其主要是通过注入流体在孔道中反应形成颗粒状沉淀封堵地层,按施工方式可分为单液法和双液法两类^[27]。单液法存在反应物一接触就沉淀的问题,为防止沉淀过早产生使得注入压力过大,需采用缓沉剂来抑制反应的过早发生^[28];而双液法通常是以化学剂A-隔离液-化学剂B的方式分段塞注入后在地层条件下反应形成沉淀颗粒,从而对高渗层产生机械堵塞,通常用隔离液来防止反应的过早发生。常用的体系主要是水玻璃与FeSO₄/CaCl₂/MgCl₂/HCl的硅酸盐沉淀体系和在饱和电解质溶液(NaCl、MgCl₂等)中加入非电解质(乙醇等)从而致使溶液中电解质的溶解度降低,部分电解质以盐沉析的形式析出,形成固体沉淀。但是沉淀颗粒调剖体系存在定位封堵性差、成胶韧性不足而只能进行笼统封堵的缺点^[29]。

在20世纪80年代,赵福麟^[30]对沉淀颗粒堵剂作出了系统性分析,并在随后的20年内,将双液法

在胜坨、埕东油田^[31]和大港油田^[32]进行了多次矿场试验,油井增油成效显著。除此之外,大庆油田、冀东油田和塔河油田对硅酸盐化学堵水技术进行了矿场试验,结果表明硅酸盐沉淀颗粒耐温、耐冲刷且封堵率高,现场作用良好^[29]。

1.3.2 柔性覆膜颗粒调剖体系

考虑到无机刚性颗粒对整个储层的伤害,李子豪^[33]提出了一种功能型桥堵颗粒体系,该体系将一级刚性封堵材料和次一级软化材料相结合,使得刚性颗粒表面覆上一层致密的热溶胀树脂膜,该覆膜颗粒在地层窜流通道内通过“架桥-软化黏结-溶胀”形成稳定的桥堵^[34],并在外界的压实作用下形成致密的堆积块,从而有效地阻止地层水的侵入。由于覆膜颗粒的树脂膜在注入地层的过程中易脱落,致使颗粒无法发挥黏结和溶胀的作用,孟祥海等^[35]又提出了双层覆膜颗粒,内层为热溶胀交联树脂膜,外层为刚性树脂保护膜,有效避免了因内膜脱落而导致的封堵率下降的问题,对于渗透率介于 $9000 \times 10^{-3} \sim 15000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 岩心的封堵率大于90%,实现了深源调堵作用。该体系在现场应用不多,2017年李雪娇等^[36]在塔河油田4区西部A42井采取段塞工艺调剖措施,相应油井有效见油减水,预期的应用效果明显。

1.3.3 聚合物微球调剖体系

聚合物微球是由聚合物单体交联、并在一系列添加剂作用下合成的微纳米级弹性聚合物凝胶球体^[37]。其作用机理在于:柔性聚合物微球由流体介质首先注入大孔道地层,并在地层孔隙间以填充或架桥的形式封堵,使地层水转向低渗层;在地层环境的条件下,聚合物凝胶球体发生弹性形变并在压力差的推动下向深油层移动,发生边移动边变形又边封堵的动态过程,在运移过程中不断改变油层中流体的方向,从而有效增大油藏深部油层的波及体积,提高采收率;在改变深水流向的同时微球表面的活性亲油基团会与周边岩石发生物理吸附作用,运移时携带剩余原油。该体系非常符合深部调剖的注入要求,且耐盐也较耐剪切,但高温下易破碎。

近些年,聚合物微球调驱技术在国内的长庆、新疆、吉林和中原等油田开展了矿场先导试验,实施效果良好。其中安塞油田在2016~2018年陆续试验井404口,评价期间增产 $4.43 \times 10^4 \text{ t}$,累降水

$9.81 \times 10^4 \text{ m}^3$,起到了良好的调驱效果。

1.4 泡沫型深部调剖技术

泡沫型深部调剖体系根据组成的不同可分为多相泡沫和冻胶泡沫调剖体系。多相泡沫调剖体系是由气、液、固三相及少量添加剂构成,主要通过三相泡沫在地层岩石孔喉运移时产生的贾敏效应封堵高渗透层,从而提高中低渗层的水驱效率。冻胶泡沫调剖体系是由液相、气相与辅助药剂组成,液相是指聚合物交联溶液(通常会加入一些表面活性剂),气相指 N_2 、 CO_2 等,辅助药剂包括起泡剂、稳泡剂等,注入时溶液优先进入高渗层并通过外输气体发泡形成冻胶泡沫,从而达到调剖的目的。

早在20世纪60年代,我国就已经开始泡沫调剖技术的研究,并先后在东西部的多个主力油田进行了多次矿场试验,现场经验得到了一定的积累。近些年来泡沫深部调剖技术在国内外稠油油藏均有应用,在秦皇岛32-6油田^[38]5个注采井组实施氮气泡沫调驱措施,调驱后注水井井口压力明显上升,含水率下降幅度2%~8%,含水上升势头得到了有效控制,5个井组累计增油 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3$;哈萨克斯坦KMK油田^[39]现场应用82井次,增产原油3.88万吨,取得显著效果;胜利油田的单56超稠油藏^[40]在措施后,氮气的注入压力由5.3 MPa增加到6.3 MPa,含水率由91.5%下降到81.3%,日产油由32.7 t上升到60.7 t,有效期198 d,措施增油2562 t。

1.5 微生物深部调剖技术

1926年,美国科学家Beckman首先研究了微生物在采油中的应用,随后经过90多年的发展,微生物深部调剖技术已成为国内外油田经济适用的提高采收率技术。微生物深部调驱一方面依靠生物菌种及其营养液在油藏地层大孔道中聚集黏结,代谢产物^[41]发挥生物化学作用,使岩石油膜剥离、润湿性改变;另一方面,微生物扩张的生长代谢物质也兼具驱油效果,可以有效降低原油黏度,提高原油采收率。该体系适合于高含水率、低矿化度和低温油藏,但菌种的选择性和适应性一直是微生物驱油技术的难题。

早在70年代国外如北美、中东和北亚等国家陆续将微生物应用于矿场;而国内则在90年代后才开始加快了微生物驱油技术的发展步伐。近些年,我国的东部大庆、胜利、辽河和华北的大港、冀东以及

西北新疆、塔里木等各大油田均开展了微生物在油田中的应用试验^[42],共试井约2000次;其中大庆油田截至2012年底^[43],利用微生物驱油技术累计增油 1.2×10^5 t,单井微生物吞吐518口,取得了良好的效果。国外如美国俄克拉荷马州佩恩县油田、秘鲁西北部塔拉拉海上油田及北海油田也均有区域性试验实施,效果显著^[44]。

1.6 其他深部调剖技术

在如今环境友好的社会中,如何正确处理油田开发过程中的废弃物料是世界各国均亟待解决的问题。近年来国内现场人员考虑到废弃物料的处理费用及油田开发的现状,相继开发出含油污泥调剖体系、废旧钻井液调剖体系和植物油脂/油脚调剖体系,为低成本废弃物的再利用打下了根基。

1.6.1 含油污泥调剖体系

含油污泥是指在油藏开发过程中产生的大量油泥固体废弃物,其是以油泥泥浆为主的混合物,含有许多的有害化学物质。将含油污泥与调剖相结合是废物的再创造过程,其具有的优势是:(1)耐温抗盐耐剪切,本身来源于地层,不伤害储层;(2)节省处理费用,保护环境,响应国家要求。含油污泥调剖体系是使用各种添加剂在地面上先配制乳化悬浮液,随后将悬浮液注入目标地层,在地层的剪切作用下乳化体系逐渐不稳定,释放出的油泥经相互吸附后聚结成团而对孔道造成封堵。该体系的抗温抗盐抗剪切能力良好且费用低,对于注水井的启动压力要求不高^[45]。从2015年至今,该技术在辽河、青海、玉门油田的油藏现场试验96井次,累计利用油泥 25.25×10^4 t,阶段增油24479 t,节约油泥处理费用 1.5×10^8 元,取得了较高的社会效益,且其配套施工工艺也在逐渐地完善,今后还需大力发展。

1.6.2 废旧钻井液调剖体系

废旧钻井液含有大量的油类、黏土、化学试剂和重金属类有毒有害物质,若将其物质直接排放,对整个生态系统会造成巨大的伤害。因此,国内各大油田从自身需求出发,以降低调剖成本和减少环境污染为目的,开发出废旧钻井液调剖体系。废旧钻井液调剖体系是通过在废弃泥浆中加入添加剂,使颗粒均匀分散。废旧钻井液调剖体系注入地层后先与岩石发生吸附作用,而后在添加剂的作用下

形成固化聚集体,聚集体沉降于大孔道中对其进行封堵,以此来提高后续注入水的波及体积^[46]。2009年,曹亚明等^[47]对冀东油田高浅北的2口注水井进行了废弃钻井液调剖体系的现场试验,其中4口对应油井明显见效,共增油362 t。卓龙成等^[48]于2016~2017年,在苏北盆地ZC油田采用废弃钻井液调剖体系对4口井进行了试验,累计注入液达10487 m³,共增产原油358.23 t,节约处理费419万,效益显著。

1.6.3 植物油脂/油脚调剖体系

油脚是指油脂精炼过程中水化脱胶的副产品,主要包括脂肪酸以及脂肪酸甘油酯等天然化合物,天然油脂及其副产物具有生物可降解、污染小、可再生和来源广等诸多优点,在油田调剖堵水中使用可避免对储层造成永久性的伤害,为油田调剖堵水剂的研究提供了新的想法。植物油脚调剖体系的调堵方法^[49]为:(1)利用油脚与酸混合制备油脚交内酯化聚合物,以稠化的聚交内酯对地层孔隙进行封堵,该体系因使用强酸,只适合在低温下使用;(2)利用油脚中脂肪酸的羧基与高浓度高价Ca²⁺、Mg²⁺金属离子配位络合聚集析出或絮凝,以析出或絮凝的颗粒来封堵地层,该体系适合于温度低于150℃的油藏环境;(3)利用油脚与硫磺在地上或者地下反应制得硫磺交联的油脚橡胶对地层大孔道进行封堵,该体系适合在高温油藏环境使用。对于植物油脚磺化橡胶体系,目前还处于室内模拟试验阶段,缺乏现场试验,但提出的低成本物质再利用思路具有继续研究的价值。

2 深部调剖配套工艺技术

目前,通过对国内各大油田油藏特点的研究,总结出以下深部调剖配套工艺技术^[50]:(1)高含水油藏地震描述技术,是通过密集井网间地震资料的分析与研究推断出井间储集层的具体分布;(2)油田调堵剂封堵大孔道数值模拟技术,是利用多学科交叉协作如测井参数法、井口压降曲线检测技术、井间示踪技术和模糊综合评判法等开展大孔道识别研究;(3)示踪数值模拟解释技术,是通过示踪剂的跟踪判断注入流体情况,解释储层参数;(4)施工工艺设计技术,是通过深部调剖剂注入方案的优选达到预期的施工目的;(5)油井、注水井施工工艺配套技术,如今一般是通过控制地面智能泵系

统实现,其自动化程度高,全天候连续注入,可实现大剂量深部调剖需求,有效降低施工成本。

3 深部调剖技术发展趋势

近几十年来油田的不断开发,导致现有油藏特征发生了巨大的转变,随着边、底水的侵扰,油藏高含水的问题逐渐加剧,深部调剖技术吸引了越来越多研究人员的目光。今后的发展趋势包括:

(1)低成本、多功能与长效油田用剂的研发。油田化学的宗旨在于立足于现场,服务于现场,成本、作用效果和适应的油藏环境都是油田现场用剂的直接要求;因此材料科学的发展,势必也会带动油田化学的发展。

(2)相关配套技术及数值模拟优化软件的研发。目前应针对不同地区油藏特征,有目的地研究相关技术及其配套工艺;同时结合现场试验数据及经验,研发对应模拟软件,以达到对油藏储层更为深刻的认识,使深部调剖技术在现场的应用达到最佳效果。

(3)基于现有技术的精细化与协同化运用。油藏环境复杂,针对不同地质条件的油藏不能一概而论,应着手于不同储集层的特点“对症下药”,有效解决油藏深层问题,达到化学调剖的精准应用;单一类型技术的作用效果受多重因素的影响,无法同时解决储层横、纵向的问题,而复合深部调剖技术则从现有技术特点、施工工艺和配套设施出发,经过多角度考虑、多方面思考的协同化运作,最终达到“注得进,堵得住,堵得准”的效果。

4 结语

目前我国油藏的实际情况趋于复杂化,储集层的变化加大了施工的难度,也提高了对油田化学剂的要求。从东部主力油田到西部油田,从高温高矿化度到低渗透、深井等特殊油藏,地层深部的非均质矛盾逐渐加剧,给现场水驱开发的效果带来了巨大的挑战,深部调剖势在必行。对于深部调剖技术的总结与讨论则是为我国油田后期开发奠定了基础,具有长远的战略意义。

参考文献:

[1] 姚俊材. 深部调驱技术的研究与应用[J]. 石油工业技术监督,

2011, 27(10): 8-10.

- [2] 由庆, 赵福麟, 王业飞, 等. 油井深部堵水技术的研究与应用[J]. 钻采工艺, 2007(2): 85-87.
- [3] SU Z, JIANG Z, HUANG G, et al. Mechanism of formation of partially crosslinked polyacrylamide complexes [J]. J Macromol Sci, Part B, 2013, 52(1): 22-35.
- [4] 张宇. 海1块表面活性剂/碱复配体系提高采收率研究[J]. 新疆石油天然气, 2016, 12(4): 56-59.
- [5] 高春宁, 李文宏, 武平仓, 等. 适用于低渗透高矿化度油藏的新型聚合物弱凝胶驱油体系—以长庆油田陇东侏罗系油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5): 40-43.
- [6] PAN G, CHEN J, ZHANG C, et al. Combined Technology of Weak Gel Flooding assisting Thermal Huff and Puff Enhances Oil Recovery for Offshore Heavy Oil Field [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai, UAE, September 26-28, 2016.
- [7] 蒲万芬, 赵磊, 金发扬, 等. 新型胶态分散凝胶在多孔介质中的调驱实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(1): 66-71.
- [8] CHANG H L, SUI X, XIAO L, et al. Successful field pilot of in-depth colloidal dispersion gel (CDG) technology in Daqing oilfield[J]. SPE Res Eval Eng, 2006, 9(6): 664-673.
- [9] 魏翠华. 胜坨油田胶态分散凝胶驱油试验方案优化[J]. 油气地质与采收率, 2008(4): 66-68.
- [10] 张还恩. 适合中原油田高温高盐油藏的胶态分散凝胶驱油技术及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2005(2): 89-91.
- [11] DIAZ D, SOMARUGA C, NORMAN C, et al. Colloidal dispersion gels improve oil recovery in a heterogeneous argentine waterflood [C]// SPE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, USA, April 19-23, 2008.
- [12] 于萌, 铁磊磊, 张博, 等. 预交联凝胶调驱剂的研究现状与应用进展[J]. 合成化学, 2017, 25(7): 623-628.
- [13] 吴志红, 吴静, 刘国胜, 等. 预交联颗粒调驱剂在文南油田的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2005(2): 106-107.
- [14] 马红星, 胥元刚, 魏江伟, 等. 长庆姬塬油田罗1长8油藏调剖工艺技术研究与应用[J]. 石油化工应用, 2013, 32(5): 57-59.
- [15] 赖南君, 陈科, 叶仲斌, 等. 低渗透裂缝型油藏复合堵水剂研制与应用[J]. 油田化学, 2014, 31(3): 366-370.
- [16] 饶鹏, 王健, 蒲春生, 等. 尕斯油田E₃₋₁油藏复合深部调剖技术应用实践[J]. 油田化学, 2011, 28(4): 390-394.
- [17] 刘义刚, 丁名臣, 韩玉贵, 等. 支化预交联凝胶颗粒在油藏中的运移与调剖特性[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(3): 393-399.
- [18] HE Y, XIONG S, YANG Z, et al. The research on cross-linking polymer gel as in-depth profile control agent [J]. Petrol Sci Technol, 2009, 27(12): 1300-1311.
- [19] 安显荣, 刘锐. 有机铬冻胶调剖技术在朝阳沟油田的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004(06): 76-77.

- [20] UDDIN S, DOLAN J, CHONA R A, et al. Lessons learned from the first open hole horizontal well water shutoff job using two new polymer systems: A case history from Wafra Ratawi Field, Kuwait [C]//SPE 13th Middle East Oil Show & Conference, Bahrain, April 5-8, 2003.
- [21] WILLHLTE G P, PANCAKE R E. Controlling water production using gelled polymer systems[J]. SPE Res Eval Eng, 2008, 11(3): 454-465.
- [22] 郭松林. 哈萨克斯坦盐上油藏聚驱前调剖方法研究[J]. 油田化学, 2010, 27(1): 62-65.
- [23] ALTUNINA L K, KUVSHINOV V A. Improved oil recovery of high-viscosity oil pools with physicochemical methods and thermal-steam treatments [J]. Oil Gas Sci Technol, 2008, 63(1): 37-48.
- [24] 南北杰, 张志强, 杨涛, 等. 靖安油田注水井复合深部调剖体系性能研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 190-194.
- [25] 李伶东, 王小平, 梁栋斌, 等. 安塞油田长6油藏堵水调剖效果分析[J]. 内蒙古石油化工, 2014, 40(21): 124-127.
- [26] 李雪娇, 付美龙, 李亮, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏覆膜型体膨胀颗粒堵剂卡封机理微观可视化研究及注入参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 788-795.
- [27] 赵修太, 陈泽华, 陈文雪, 等. 颗粒类调剖堵水剂的研究现状与发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 105-112.
- [28] 马涛, 王强, 王海波, 等. 深部调剖体系研究及应用现状[J]. 应用化工, 2011, 40(7): 1271-1274.
- [29] 马宝东. 单液法无机沉淀调剖体系的研制和性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 90-96.
- [30] 刘怀珠, 李良川, 郑家朋, 等. 硅酸盐化学堵水技术研究现状及展望[J]. 油田化学, 2015, 32(1): 146-150.
- [31] 赵福麟. 堵水剂[J]. 油田化学, 1986, 3(1): 39-50.
- [32] 赵福麟, 张贵才, 孙铭勤, 等. 黏土双液法调剖剂封堵地层大孔道的研究[J]. 石油学报, 1994(1): 56-65.
- [33] 赵福麟, 张贵才, 孙铭勤, 等. 大港油田板828、板9断块调剖剂的选择[J]. 油田化学, 1994, 11(4): 314-318.
- [34] 李子豪. 耐温耐盐自组装深部调驱体系流动机理研究[D]. 中国石油大学(北京), 2016.
- [35] 安昊盈, 侯吉瑞, 程婷婷. 自组装颗粒调驱体系渗透率适应性评价及调驱机理研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 21-31.
- [36] 孟祥海, 黎慧, 张云宝, 等. 自组装颗粒深部调堵体系的性能评价[J]. 油田化学, 2018, 35(2): 231-234.
- [37] 刘鹏虎, 聂安琪, 熊永安. 聚合物纳米微球调驱技术在低渗透油田的应用及效果[J]. 石化技术, 2019, 26(8): 77-78.
- [38] 张吉磊, 李廷礼, 张昊, 等. 海上低幅边底水稠油藏氮气泡沫调驱技术应用效果评价[J]. 钻采工艺, 2019, 42(4): 70-73.
- [39] 张磊, 钟鼎, 秦文冲, 等. KMK油田稠油水平井增产技术研究[J]. 新疆石油天然气, 2017, 13(3): 52-55.
- [40] 曹娉娉, 刘冬青, 张仲平, 等. 胜利油田超稠油蒸汽驱汽窜控制技术[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 739-743.
- [41] 岳庆友, 宋力, 潘一, 等. 微生物驱油技术的应用研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(3): 577-580.
- [42] 杨双春, 韩颖, 王世栋, 等. 微生物提高原油采收率研究进展[J]. 现代化工, 2016, 36(2): 37-41.
- [43] LE J J, WU X L, WANG R, et al. Progress in pilot testing of microbial-enhanced oil recovery in the Daqing oilfield of north China[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2015, 97: 188-194.
- [44] GEETHA S J, BANAT I M, JOSHI S J. Bio-surfactants: production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Bio-catal Agricul Biotechnol, 2018, 14, 23-32.
- [45] 孙同成, 崔亚. 高温高盐油藏深部调驱体系研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2016, 45(2): 99-105.
- [46] 沐永青, 王波, 孙致学. 废弃钻井液调剖堵水剂的制备与研究[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(1): 68-71.
- [47] 曹亚明, 孙桂玲, 张瀚爽, 等. 废弃钻井泥浆调剖技术在高浅北区的应用研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 291-293.
- [48] 卓龙成, 王波, 张金焕, 等. 苏北盆地ZC油田废弃钻井液再利用调剖工艺[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 109-114.
- [49] 伍亚军, 何龙, 王建海, 等. 植物油脂/油脚在油田深部堵水调剖中的应用[J]. 油田化学, 2018, 35(2): 366-374.
- [50] 李宜坤, 李宇乡, 彭杨, 等. 中国堵水调剖60年[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 773-787.

Research Progress of Deep Profile Control Technology and Its Application

WANG Xiang, GUO Jixiang, CHEN Jinmei

(Research Institute of Unconventional Oil and Gas Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, P R of China)

Abstract: Deep profile control technology is an important means to overcome the current situation of reservoir and achieve deep, precise and collaborative development. On the basis of fully analyzing the existing problems of oil reservoirs, this paper summarizes the principles and methods of the deep profile control technology of gel, jelly, granular, foam, microorganism and other low cost wastes, points out the advantages and problems of each system, summarizes the application of various system, in the field at home and abroad, and puts forward the next development trend for China's oil fields.

Keywords: deep profile control; current situation; research progress; field application; development trend; review