

文章编号: 1000-7393(2019)06-0773-15

DOI: 10.13639/j.odpt.2019.06.016

中国堵水调剖 60 年

李宜坤¹ 李宇乡¹ 彭杨² 于洋²

1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油西南油气田分公司工程技术研究院

引用格式: 李宜坤, 李宇乡, 彭杨, 于洋. 中国堵水调剖 60 年 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 773-787.

摘要: 记述了中国油田油井堵水、注水井调剖, 以及调驱、深部液流转向等技术的起源、试验、发展、成熟、更替的过程。在这 60 年中, 油井机械封隔器分层堵水技术、水玻璃-氯化钙化学堵水技术、聚丙烯酰胺-黏土注水井调剖技术、膨胀颗粒深部调剖、弱凝胶调驱技术、聚合物微球深部液流转向技术、区块整体调剖 PI、RE、RS 决策技术, 以及近十年发展的水平井化学及机械控水技术、选择性堵水技术等是具有里程碑意义的技术。随着油气田开发程度的加深, 高温、深井、裂缝、海上等油藏的堵水调剖技术, 水平井、气井的堵水技术, 以及智能化学剂技术、高效选择性堵水技术、聚驱后的调驱技术等将会成为研究的重点。

关键词: 堵水; 调剖; 机械堵水; 化学堵水; 调驱; 深部液流转向; 水平井堵水; 决策技术; 智能化学剂; 智能堵水

中图分类号: TE358⁺.3 **文献标识码:** A

Water shutoff and profile control in China over 60 years

LI Yikun¹, LI Yuxiang¹, PENG Yang², YU Yang²

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Petrochina, Beijing 100083, China;

2. Engineering Technology Research Institute of Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610031, China

Citation: LI Yikun, LI Yuxiang, PENG Yang, YU Yang. Water shutoff and profile control in China over 60 years [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 773-787.

Abstract: This paper describes the progress on origin, test, development, maturity for water shutoff, profile control, as well as profile control and flooding, deep fluid diversion and other technologies in China's oil fields. In the past 60 years, the mechanical packer isolation plugging, sodium silicate-calcium chloride plugging, polyacrylamide-clay profile control, swelling particle deep profile control, weak gel deep profile control and flooding, polymer microsphere in-depth fluid diverting, PI, RE and RS block profile control decision making, and the chemical and mechanical water control in horizontal wells and selective water shutoff last ten years are landmark technologies. As the degree of oil and gas field development deepens, water shutoff and profile control technology for high temperature, deep wells, fractures, offshore reservoirs, water shutoff technology for horizontal wells and gas wells, intelligent chemical agent technology, highly efficient selective water shutoff agents technology, profile control and displacement technology after polymer flooding will become the focus of research.

Key words: water shutoff; profile control; mechanical packer water shutoff; chemical water shutoff; profile control and flooding; in-depth fluid diverting; horizontal well water shutoff; decision-making technology; intelligent chemical agent; intelligent water shutoff

0 引言

从 1957 年玉门油田开展油井堵水试验、1961

年大庆油田开展注水井调剖试验至今, 我国油田堵水调剖技术已经历 60 年的发展历程, 大致分以下 5 个阶段^[1-3]。

(1) 20世纪50年代堵水技术开始研究并现场应用。玉门油田最早研究和应用堵水技术,1957年开始封堵水层的研究和试验,1957—1959年6月堵水66井次,成功率61.7%。

(2) 20世纪60年代初—70年代为机械堵水发展阶段。大庆油田在堵水封隔器及其配套工具应用方面做了大量研究并取得重要成果,形成一套采油井机械堵水技术,并在现场进行推广应用。此外,大庆、胜利、华北、江汉、辽河、新疆等各油田都大面积推广应用封隔器及其配套的井下管柱卡堵高含水层,取得了降水增油的好效果。

(3) 20世纪80年代化学堵水蓬勃发展。80年代初,胜利油田与中国科学院合作,研究成功部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)-甲醛交联冻胶堵水技术,并进行了现场应用,这是我国首次将水溶性聚合物交联冻胶用于油井堵水,对促进我国化学堵水技术的发展有重要作用。此后,铁、铝、钛等多价金属离子交联剂,甲撑基双丙烯酰胺、乌洛托品、树脂等有机交联剂与HPAM交联冻胶先后在油田应用。其他水溶性聚合物,如聚丙烯腈、木质素磺酸盐、黄原胶等在油田堵水中也相继应用,增油降水效果显著。

1980年1月21—28日,原石油部开发司在石家庄召开第1次全国油田堵水会议。会议除由各油田汇报堵水工作、交流技术外,还组成了全国油田堵水协调组,协调组每年召开堵水工作会议,每两年开一次全国油田堵水技术交流会。这对推动全国油田堵水技术的发展起了重要作用。1983年石油部首次组织油田堵水技术考察团赴美国考察。通过几年的研究和攻关,并借鉴学习先进经验,我国的化学堵水技术有了很大发展,化学堵水剂已发展了近百个品种,基本满足我国堵水调剖的要求。

(4) 20世纪80年代中期—90年代末期,由油井堵水发展为以注水井调剖为主、堵水调剖并举阶段。1985年在大连举办的第4次全国堵水会议明确提出了油田控水新理念:要有效控制油田出水,不仅要在油井堵水方面做工作,而且更重要的是在注水井调整吸水剖面(调剖)上下功夫,调剖对地层的影响面更大,能更好地改善开发效果。从此调剖技术的研究和应用快速发展。TP-910调剖技术先后在辽河、河南、胜利油田矿场试验成功,然后推向各油田;水玻璃-氯化钙、铬交联聚丙烯酰胺、木质素冻胶等在初期调剖中起了先导作用。在20世纪90年代初中期调剖技术的研究和应用进入了鼎盛时

期。调剖方式由单井调剖发展为油水井对应调堵,进而发展为区块综合调堵;调堵方案设计由经验发展到物模和数模相结合的软件设计;施工设备也研究了专用撬装式大型施工泵及在线施工装置等。

(5) 自2000年以来,深部调驱、“2+3”技术、深部液流转向、微球调驱以及水平井控水技术得到发展。随着油田开发进入高含水特高含水阶段,油藏孔隙结构、油层物性不断发生改变,常规的堵水调剖技术已不适应,深部调驱技术、“2+3”技术、深部液流转向技术、微球调驱技术等应运而生,使我国堵水调剖技术的发展进入一个新阶段。经过近年来的深化研究,聚丙烯酰胺弱冻胶调驱技术、预交联体膨颗粒调驱技术、微球调驱技术等比较成熟,应用规模较大。随着水平井规模应用,开发生产中出现了含水上升快、产量递减快等问题,促进了水平井控水技术的研究和发展。深部调驱技术已经成为我国高含水油田二次开发,改善水驱开发效果提高采收率的一项重要技术。

1 机械堵水

1.1 机械分层堵水技术

1964年冬季,大庆油田组织分层注水会战。1965年研制成功油井分层开采水力自封式551型封隔器、水力密闭式651型封隔器和625型配产器,并投入现场应用。油井机械堵水技术作为分层开采技术的延伸,也开始在油田出现。大庆先后研制应用了四大类堵水管柱:整体式堵水管柱、卡瓦悬挂式堵水管柱、可钻式封隔器插入堵水管柱、平衡式堵水管柱。

1965年,胜利油田研制出自喷井桥式配产器油管支撑堵水管柱,主要由Y111封隔器和KQS配产器组成。

1960—1975年左右,大庆油田处于低含水($\leq 30\%$)开发阶段。1960年开始横切割内部早期注水,保持了地层压力,油井自喷能力强,油田长期高产稳产。但由于渗透率的差异,注入水在纵向及平面上流动很不均衡,形成水窜,出现了层间、层内、平面三大矛盾。为此,20世纪60年代中期开始研究应用了分层采油工艺,形成了以551型油井封隔器和625型同心活动式配产器为主的分层采油工艺。管柱寿命达到3年左右,现场施工成功率达到80%。将油层分成4~5个层段,通过调节油嘴来调节每个层段的采油量,对油井进行分层段采油。从1964年

应用分层采油技术以来,共实施约 2 000 井次,根据 1972 年“146”地区 186 口配产井资料,平均单井日增产原油 2.8 t,日产水量下降 7.15 m³,含水下降 13%。根据中区西部的 20 口配产井统计资料,平均单井日增产原油 6.6 t。分层配产工艺基本解决了由于渗透率差异而造成的层间及平面上产能不均衡的矛盾,达到均衡开采的目的。

1976—1980 年,大庆油田进入中含水(31%~60%)开发阶段。此阶段注入水沿高渗透层突进加剧,油井多层见水,主力油层含水上升快,挖潜越来越困难。为提高工艺成功率、测试调配效率、分采层段数,研制了机械压缩式 752 型和 755 型封隔器、635 型偏心配产器,逐渐取代机械挤压式(851 型)封隔器,配产器由 635 型偏心配产器取代 625 型同心活动式配产器,工艺成功率达 90% 以上。1979 年底,实施油井机械分层采油堵水 314 口井,年降水 1.5×10⁴ m³。据部分井统计,平均每口井降水 41 m³/d,增油 2 t/d,基本达到了中含水期开采控制含水上升的目的。

1980—1990 年,油田进入高含水(60%~80%)开发阶段,大部分油井已经多层多方向见水,不但主力油层高含水,非主力油层中偏好的油层也高含水,堵水的井或层越来越多。油井由自喷逐渐转变为机械采油,为此开发了 645 型滑套式堵水器、丢手分采管柱、可钻式封隔器和插入管柱。堵水管柱由整体式转变为丢手分采或分堵管柱,配产工艺逐渐转变为滑套堵水工艺。丢手管柱克服了整体管柱上下蠕动、影响封隔器的密封性能、堵水效果差的缺点,降低了检泵作业费用和劳动强度。滑套堵水解决了级数多、不动管柱可任意调整堵水层位的问题。可钻式封隔器和插入管柱堵水技术封堵寿命达到 10 年。“六五”期间实施机械堵水 649 口井,共增油 42.5×10⁴ t;“七五”期间平均每年堵水施工 280 口井,共增油 41.5×10⁴ t,平均单井日降水约 20 m³,日增油 2.5 t 左右,工艺成功率在 90% 以上,堵水有效率达 76%。

胜利油田自喷井机械堵水始于 20 世纪 60 年代。1965 年,胜利油田井下作业大队研制出自喷井桥式配产器油管支撑堵水管柱,主要由 Y111 封隔器和 KQS 配产器组成,底部丝堵支撑井底,承受油管自重作用在封隔器上的轴向压缩力,使封隔器上的封隔件受轴向压缩而向径向扩张,以封隔油套管环形空间。该管柱适用于中深井,结构简单、施工操

作方便,下放管柱至井底即可坐封封隔器,上提管柱可使封隔器解封。但最多能应用 2 级封隔器,封隔层之间的层间压力差不宜大于 6 MPa。此后,该类堵水管柱每年现场应用 80 余井次。1968 年,井下作业指挥部研制出机械卡瓦支撑管柱,主要由 KQW 支撑器或 251-6 封隔器(新编号 Y211 封隔器)、251-151 封隔器(新编号 Y111 封隔器)和 KQS 配产器组成。在正常工作状态下,油管自重产生的轴向压缩力使封隔器上的封隔件受压而向径向扩张,以封隔油套管环形空间。该类管柱每年应用 70 余口井。1985 年后,胜利油田研制开发出桥式堵水管柱,主要由 Y211 封隔器、Y341 封隔器与配产器组成。该类管柱每年现场应用 50 余口井。抽油井机械堵水,一般采用丢手管柱结构。20 世纪 90 年代以后,抽油井封隔器有了较大发展。1990 年研制出 Y441 卡封管柱。该管柱主要应用 Y441 型液压封隔器进行卡封,封隔器主要由液压平衡、密封、坐封、解封、锁紧和锚定等部分组成,可实现长井段一次性卡漏、卡层,不动油管检泵;上提解封后泄油通道打开,坐封后套管反打压 5~10 MPa,可对封隔器简单验封。现场应用 900 余井次。1991 年研制出高压防顶丢手封隔器(Y445 封隔器),主要由密封、卡瓦、坐封、解封、锁定机构等部分组成。其性能稳定,操作方便,卡封成功率高;采用双向卡瓦和步进锁定机构,坐封牢固可靠,能承受较高上、下压差;胶筒位于卡瓦上方,防止卡瓦砂埋;丢手可靠,采用外捞形式,打捞方便。该封隔器主要用于封下采上的堵水管柱^[4-5]。

1.2 机械细分层堵水技术

大庆油田进入高含水后期开采以来,层间和平面矛盾十分突出,为解决这些矛盾,必须不断地选择相对高含水层采取堵水措施,以达到稳油控水的目的。同时,堵水还必须与“九五”以后油田工业化应用三次采油技术相衔接配套,要求在实现细分的前提下,既能堵得住,又能解得开。而适应性较强的机械堵水工艺由于其具有成本低、能够实现细分堵水、堵后可调等优点,得到长足的发展和面积的推广应用,为稳油控水目标的实现起到了重要作用,也取得了较好的经济及社会效益。

1.2.1 机械式可调层堵水技术

主要由 KHT-90 滑套开关、Y341-114 封隔器等井下工具组成。其工作原理为:堵水管柱油套通道是靠滑套开关控制;工作筒采用“桥式”通道的结

构,使管内上、下与油套分流,侧向有2个直径15 mm的孔作为油套液流通道;滑套开关可以多级使用,一次下入电动开关测试仪即可完成井下任意一级滑套开关的开关动作,与地面仪表配合完成相应层段产液量及含水率的计量,可以实现任意堵水层段的反复调整。适用于 $\text{O}140\text{ mm}$ 套管、泵外径不大于90 mm的抽油机井分层找水及堵水。但调层操作相对较复杂,在一定程度上影响了调层成功率。

1.2.2 液压式可调层堵水技术

泵抽井液压滑轨可调3层堵水工艺技术管柱主要由Y341-114封隔器、液压滑轨开关、球座、筛管等组成。泵抽井液压式一次性可调多层堵水工艺的堵水管柱主要由丢手接头、Y441-114封隔器、Y341-114封隔器、上下泄压器及堵水器等组成。根据地质情况或找水资料,制定2套堵水方案,首先根据第1套堵水方案组成堵水管柱,下入过程中管柱内外密封,可实现不压井作业。管柱下到预定深度后,油管加压,坐封封隔器,堵水器开始工作,投球后丢手,下泵生产。如发现第1套方案有误,通过地面打压即可完成调层,实现第2套方案,具体步骤为:停泵关闭生产阀门,沿套管加压,作用在堵水器上的压力迫使调层开关下行,当到固定位置时,球座进入扩孔槽张开,钢球下行到第二级堵水器球座上,依次改变每级堵水器的开关状态,达到调层的目的。该技术适用于各种泵抽管柱,包括抽油机、电泵、螺杆泵等管柱。堵水器可以多级使用,可实现一次调多层的目的,但不能反复调层。

1.2.3 重复可调层堵水技术

“十五”期间,油井含水不断上升,地下油水分布愈加复杂,层间矛盾愈加突出,特高含水井越来越多,油井控水措施更为重要。根据能测产液剖面的二次加密井的找水资料对油层含水状况进行了分析,结果表明,每层均为高含水,层间含水差异小,大多数高含水层只是相对的,封堵有效期短。为此,发展了多方案重复可调层堵水技术,重点研制了重复可调层堵水器。通过油套环形空间憋压,单流阀关闭油流通道,压力通过上中心管的传压通道推动活塞下行触发滑套开关一次,调整各个层段堵水器的开关状态,封堵或打开进液通道。在重复可调堵水器中,采用了开关排列组合的方法,下井后初始状态为全关,每打压一次,可得到一种堵水方案所要求的组合状态,从而实现3层段8方案重复可调层堵水,进一步提高了堵水有效率,延长了有效期,适用于各

种泵抽管柱。

“八五”期间,共堵水2316口井,增油 $55.2\times 10^4\text{ t}$,降水 $1560.18\times 10^4\text{ m}^3$,平均单井日降水 65.2 m^3 ,日增油1.81 t。其中可调层堵水技术现场应用了130口井,工艺成功率达到了93.1%,堵水有效率为78.5%。对无效的28口井进行了调层处理,调层成功率为75%,调后堵水有效率达到了94.6%。“九五”期间共实施堵水措施1551口井,堵水技术以机械堵水为主,约占90%,年均有效率为83.12%,年均单井日降水 41.94 m^3 ,日增油1.18 t。“十五”期间完成堵水措施1732口井,4年共降水 $564.8\times 10^4\text{ m}^3$,增油 $9.7\times 10^4\text{ t}$ 。堵水技术以机械堵水为主,约占90%,年均有效率为86.90%,年均单井日降水 27.67 m^3 ,日增油0.68 t,油井堵水取得了较好的降水稳油效果。其中实施多方案重复可调层堵水技术111口井,有效率为97.2%。至2005年6月底,共进行堵水层位调整27口井(29井次),成功25口井(27井次),调整成功率为93.1%。对堵后初期效果不好的5口井进行了调整,成功4口井,通过调整使堵水效果变好。对生产一段时间后堵水效果变差的22口井进行了24井次的打压调整,调成23井次,堵水有效期延长了303 d。

1.3 机械堵水新技术

1.3.1 大庆水平井重复可调机械找水堵水工艺

通过井口打压改变每级可调堵水器的开关状态,一趟管柱实现水平井分层找水、堵水以及堵水方案的多次变更,变更堵水方案时无须起下管柱作业,不受上部举升管柱的限制。管柱中所有需解封的工具均采用上提管柱解封方式,当需要起出堵水管柱时,用油管下入专用打捞锚,捞住丢手封隔器的打捞部分,上提管柱,解封各级封隔器和扶正器。

1.3.2 辽河油田电控机械找堵水工艺

2008年前后,辽河油田开始研究试验电控机械找堵水工艺。此技术要求用双管井口,一根油管下泵,一根油管下电缆。其下入找堵水管柱自下而上结构为:导锥丝堵+尾管+电动开关+封隔器+筛管+电缆脱接器下接头+电缆脱节器释放接头+筛管密封外筒+丢手+磁定位短节+油管,应用磁定位确定工具在井内的位置。通过油管加压坐封封隔器,投球加压,完成丢手,起管柱提出筛管密封外筒和丢手上接头,坐双管井口。下抽油泵,再下入另一油管,深度超过抽油泵深度,安装井口完井。从空油管内外下入控制连接管柱,自下而上结构为:导锥+加重短

节+电缆脱接器上接头+加重杆+电缆,当下至电缆脱接器下接头处时,轻探下接头完成电缆脱接器的对接。使用地面计算机和配套软件进行连接检验,检验合格后,使用计算机控制软件打开一个产层的电动开关,关闭其他层的电动开关。通过对抽油泵井口出液取样判断产层是否为出水层。按以上操作,依次检验各产层的出水情况。完成找水操作后,将所有出水层的电动开关关闭,将油层的开关打开,完成堵水操作。上提电缆,当电缆脱接器上接头提至释放接头处时,电缆脱接器上下接头脱开,继续上提电缆取出井下工具,完成施工。

辽河油田锦 2 区 14-7431 井在 2008 年初含水由 10% 突然上升到 100%,按地质方案要求分三级三层找堵水。下入找堵水管柱,封隔器位置分别为:1 341.2 m、1 355.18 m、1 364.5 m。电缆脱接器下深为 1 339.92 m。加压坐封封隔器后,投球、丢手,起出油管 and 丢手头。坐双管井口,下抽油泵至 1 290 m,再下光油管至 1 298.8 m,装好井口采油树。从光油管内下入控制连接管柱,完成电缆脱接器对接后,由地面计算机控制,按照从下往上的顺序依次进行找水。由生产数据分析为中间层出水,使用计算机控制软件,将中间层开关关闭,将上、下 2 层开关打开,结果日产液 15.8 m³,含水 9%。上提电缆,起出控制连接管柱,完成施工^[6]。

1.3.3 遇油遇水自膨胀封隔器水平井堵水工艺

自膨胀封隔器作为一种新型的封隔器,可根据地层不同的油气含量、井筒条件、作业要求,在井下遇油或水自主膨胀来封隔地层。该封隔器能够适应不规则裸眼形状,膨胀胶筒贴紧井壁,无需靠管柱重力或加压等方式坐封,最终实现油井分层分段效果。工艺特点:(1)自膨胀封隔器可靠性高,没有机械运动部件,现场作业无需专家指导;(2)自膨胀封隔器具有可自动补偿环空间隙功能,热动力式膨胀可持续膨胀以弥补产液冲蚀面造成的空隙,当发生此类故障造成了漏失,即使在较低的压差下,动态膨胀仍然会最终实现密封,该特性使之很适合在裸眼井段中使用,这是该技术相对于其他封隔器技术的最大优点,(3)可代替管外封隔器用于水平裸眼井的完井,该封隔器能够使完井工艺简化,降低完井风险,减少作业费用,(4)避免修井和井下作业,降低维护成本,延长油井寿命^[7-8]。

1.3.4 长庆油田低渗水平井智能机械找堵水工艺

长庆油田水平井产液量低(平均单井液量

9 m³/d)、水平段改造段数多(水平段长 800~1 200 m,改造段数 8~10 段),研究设计了机械分段卡封逐层生产测试找水工艺。其工艺原理是,采用封隔器将水平射孔段密封卡开,每个层段对应安装 1 套智能开关器,智能开关器在地面设定开关采集时间,在井下定时开启和关闭,地面抽油机连续生产,地下单层采油,求出各段产液量、含水率、压力及温度等数据。对于水平井多段间隔出水情况,采用多级机械封隔器组合堵水管柱卡封见水层段,通过多级桥式单流阀生产油层段。其工艺原理是,对应见水层段管柱为“Y441 封隔器+安全接头+Y441 封隔器”,将见水层封堵;对应生产层段的管柱为“Y441 封隔器+安全接头+桥式单流阀+Y441 封隔器”。封隔器坐封后正常生产时,通过桥式单流阀使油管内部与油层段连通,实现出水层段的封堵和油层段的生产^[9]。至 2018 年底,低渗水平井智能机械找堵水工艺在长庆油田实施约 150 口井,效果较好。

2 化学堵水

2.1 20 世纪 50—60 年代化学堵水技术探索与试验

20 世纪 50 年代,我国开始进行油井化学堵水技术的探索和研究。玉门老君庙油田自 1957 年研究松香酸钠选择性堵水,1958 年研究活性稠油堵水、水泥堵水,1959 年在矿场用活性稠油进行堵水作业。玉门油田 1957—1959 年 6 月堵水 66 井次,成功率 61.7%。大庆油田在 20 世纪 60 年代油田开发初期,开展用水泥、活性稠油等化学堵水试验。

2.2 20 世纪 70—80 年代化学堵水技术蓬勃发展

2.2.1 聚丙烯酰胺及交联聚合物堵水

1976 年,中国石油勘探开发研究院开始研究并在胜利油田试验、应用铬交联聚丙烯酰胺堵水剂。至 1991 年,共实施 100 井次,累计增油 18×10⁴ t。

1977—1979 年,胜利油田研制并应用了聚丙烯酰胺选择性堵水剂、甲醛交联聚丙烯酰胺选择性堵水剂。至 1981 年,聚丙烯酰胺选择性堵水剂共实施 48 井次,其中胜坨油田 3-4-18 井累计增油 5 730 t。至 1980 年,甲醛交联聚丙烯酰胺选择堵水剂共实施 54 井次,累计增油 7.0×10⁴ t,其中临盘油田盘 42-2 井累计增油 4 777 t,有效期达到 467 d。

70 年代中期始,大庆油田油井含水上升快,层间矛盾加剧,堵水工作已成为油田亟待解决的问题。由于化学堵水不增加井筒设备,而且便于井下作业。因此,在大力发展机械堵水的同时,也十分重

视化学堵水方法和工艺的研究。1975—1985年,从化学堵剂和工艺上主要开展了油层选择性化学堵水和非选择性化学堵水两大课题的研究。其中选择性堵水主要研究了聚丙烯酰胺溶液堵水、甲基氯硅烷堵水、氰凝堵水。

1979—1983年,大庆油田开展了聚丙烯酰胺水溶液堵水研究。研究工作分3个阶段:第1阶段是研制并测定各种水解度、分子量的聚合物及其化学性能;第2阶段是用人造岩心和天然岩心做选择性堵水实验,并确定出分子量为700万~1000万、水解度为30%的阴离子型聚丙烯酰胺具有最佳选择性堵水性能,平均水相渗透率下降90%,油相渗透率降低10%;第3阶段是矿场试验。1980—1982年共试验10口井,平均单井用量 360 m^3 ,平均每米油层厚度用量 64 m^3 ,平均封堵半径7.5~10.0 m。10口井效果分为2种类型:一种是全井降水增油或降水稳油的有5口,占50%,有效期一般为5个月;另一种是降水又降油的有5口井,占50%。

在选择性堵水研究中,虽然在室内做了大量工作,并且也进入了现场试验,但由于油层内油水流动规律复杂,油层内水油比增高,使选择性化学堵水研究遇到较大难度,多次试验均未取得可供矿场广泛使用的堵剂和工艺。1982年油田含水上升快,自然产能递减严重,为确保油田稳产5000万t,大批自喷井已开始转为机械采油井,使生产压差放大。聚丙烯酰胺堵水剂承受压差较低,在此形势下该方法停止了矿场试验。

1981年,中国石油勘探开发研究院开始研究并在华北油田应用聚丙烯酰胺高温堵水剂。至1990年,共实施125井次,累计增油 $25\times 10^4\text{ t}$ 。1983年,开始应用RP-8201堵水剂,至1990年,共实施102井次,累计增油 $19\times 10^4\text{ t}$ 。

2.2.2 水玻璃-氯化钙堵水

从1974年开始,大庆油田非选择性堵水主要研究了水玻璃和氯化钙堵水、氟硅酸钠堵水,重点突破了水玻璃和氯化钙堵水工艺。水玻璃-氯化钙溶液双液法堵水,是把一定模数的水玻璃溶液和一定浓度的氯化钙溶液以惰性液体隔开,交替挤入高出水层或层段内,使两种溶液在地层内混合,生成不溶于水的硅酸钙固体沉淀物,堵塞岩石孔隙,起到堵水的作用。

堵水工艺为:按设计下堵水管柱,替挤清水胀封,挤堵水剂,替清水,活动管柱并上提至油层上部

10 m,关井候凝24 h,起出堵水管柱,下生产管柱。

水玻璃-氯化钙堵水工艺堵剂货广价廉、作业施工工艺简便,封堵成功率高,有效期长,因此,自1975年以后在油田广泛推广使用。至1985年底,水玻璃-氯化钙堵水共施工563井次,653层,累计降低出水 $184\times 10^4\text{ m}^3$ 。

1982年,胜利油田研制开发出水玻璃复合堵剂。该堵剂适用于封堵窜槽水、炮眼和油井单一水层。至1984年,在胜坨油田胜二区实施16井次,可对比15口井,累计增油5612.3 t。

2.2.3 油基水泥浆、干灰砂、木质素堵水

1978年,胜利油田应用油基水泥浆对埕东油田埕10-7井堵水,日产油由17 t上升到104 t,有效期221 d,累计增油 $1.45\times 10^4\text{ t}$ 。1979年改进油基水泥浆配方,实施12井次、有效8井次,增产原油8624 t,减少产水量 $2.65\times 10^4\text{ m}^3$ 。1980年,为解决油基水泥浆易沉淀等问题,改进其配方后形成稀水泥浆堵水工艺,至1982年共实施21井次,成功15井次,累计增油 $4.07\times 10^4\text{ t}$ 。之后,该工艺在埕东油田被广泛应用。

1978年4月,孤岛采油指挥部研制出适用于出砂严重、高渗水层的高含水油井的具有防砂、堵水双重功效的干灰砂堵水工艺,在孤岛、孤东等油田得到广泛应用。1986—1992年,在孤东油田实施干灰砂堵水352井次,累计增油 $31.96\times 10^4\text{ t}$ 。干灰砂堵水,在选择条件上有一定局限性,对油井堵水无选择性。为此,1979年3月,进行稠油固体粉末堵水研究;同年6月,在孤岛油田进行现场试验,到12月共施工14口井,有效11口,成功率84.6%。至1985年,共施工113井次,可对比106井次,有效70井次,成功率66%,平均有效期270 d,累计增油 $26.55\times 10^4\text{ t}$ 。

1981—1985年,胜利油田采用木质素磺酸钙复合凝胶堵剂,在胜坨油田37口油井上进行堵水试验,成功率86.2%,累计增油 $7.78\times 10^4\text{ t}$,累计降水 $10.93\times 10^4\text{ m}^3$,平均有效期280 d。至1988年11月,在26口油井推广应用,有效率84.6%,累计增油 $1.35\times 10^4\text{ t}$ 。

1984年,甲基氯硅烷选择性堵水剂在孤岛进行现场试验。该堵水剂与水反应生成有机硅聚合物堵塞孔道,并使孔道表面憎水,适用于高含水井堵水,具有一定的固砂作用。至1988年,共试验26井次,成功率94.4%,平均有效期在150 d以上,累计增油 $1.91\times 10^4\text{ t}$ 。1989年,在孤东油田推广该项技术,至

1996 年底, 实施油井堵水 66 井次, 累计增油 2.57×10^4 t。

2.3 20 世纪 90 年代化学堵水技术平稳发展

进入 90 年代, 油井堵水技术的发展放缓, 一是因为油井堵水成功率低、增产幅度小和有效期短; 二是注水井调剖技术迅速兴起并得到广泛应用。但油井堵水, 包括油井堵漏, 是最直接减少油井产水的措施, 因此, 在油田生产中堵水一直是油井重要的增产措施。

1990—1996 年, 胜利油田应用复合离子堵水剂, 在孤岛油田实施 261 井次, 施工有效率 74.1%, 当年累计增油 10.77×10^4 t。对于高孔、高渗和出砂较为严重的馆陶组疏松砂岩油藏, 重点推广应用了具有堵水防砂双重功效的干灰砂堵水技术。1996—2005 年, 在孤东油田实施干灰砂堵水 748 井次, 累计增油 22.81×10^4 t。对于边水活跃、边水水侵严重的油藏, 在乐安油田实施“放弃边部 1、2 排生产井, 在 3、4 排井采用提液的方式控水稳压, 在 5、6 排井整体封堵”提堵结合办法, 抑制边水内侵, 提高整体开发水平。1997—2001 年, 累计实施 81 井次, 累计增油 6.31×10^4 t。对于层间矛盾突出的油井, 推广应用水泥或超细水泥封堵炮眼与油井堵水工艺。1996—2005 年, 在乐安油田、梁家楼油田梁 11 块等实施封堵炮眼、超细水泥堵水施工 148 井次, 累计增油 7.62×10^4 t。

1991—1996 年, 大庆油田应用水玻璃-氯化钙双液法施工 270 口井, 工艺一次成功率 98.5%, 有效率 88.7%, 堵水后油井对比 236 口, 平均单井日降水 56.5 m^3 , 日增油 3.2 t, 含水下降 11.2%。双液法缺点是封堵半径大, 不易解堵, 并且成本高。因此, 开发应用了水玻璃单液法堵水技术。单液法是由水玻璃和固化剂溶液组成, 施工时用混砂车将水玻璃与固化剂溶液按一定体积比混合, 用压裂车将其泵入封堵目的层, 借助地层温度或堵水剂本体的温度, 两者发生化学反应生成不溶于水的水合硅酸盐胶结物, 达到封堵出水层的目的。应用水玻璃单液法施工 44 口井, 工艺成功率 95.7%, 有效率 82.6%, 平均封堵砂层厚度 4.8 m。堵水后油井对比 39 口, 平均单井日降水 33 m^3 , 日增油 3.4 t, 见到了较好的增油降水效果。

在应用水玻璃-氯化钙堵水的同时, 大庆油田研制应用了氰凝堵水、封窜技术。氰凝是过量的多异氰酸酯与端羟基聚醚反应的聚氨基甲酸酯, 遇水即

反应生成不溶于水的凝聚物及二氧化碳气体。利用此原理进行油井堵水。由于氰凝遇水反应快, 施工过程中存在很大风险, 因此采用了特殊的管柱工艺: 堵水管柱采用双层管, 堵水剂由内管携带随堵水管柱下入井中, 挤堵水剂与封隔器坐封分为 2 个通道, 在堵水剂进入油套环空前不与水接触。1991—1996 年现场施工 72 口井, 成功 61 口井。其中油井堵水 45 口, 成功 37 口, 油井封窜 8 口, 成功 8 口, 水井封窜 19 口, 成功 16 口^[10]。

1991—1996 年, 辽河油田与中国石油勘探开发研究院合作, 在锦州采油厂进行活化稠油选择性堵水技术研究和矿场试验。活化稠油由高黏度原油和表面活性剂组成。如果溶在稠油中活性剂的 HLB 值与稠油乳化油包水乳状液所需的 HLB 值一致, 则稠油遇水后即可产生黏度比稠油高得多的油包水乳状液。而在油层, 由于没有水或水很少, 不能形成高黏度的油包水乳状液, 因此油受到的阻力就很小。活化稠油还可以通过增加出水层的含油饱和度来降低水的相对渗透率, 使产水量减少。因此, 活化稠油对油井的出水层有选择性封堵作用。该技术 1991 年开始在矿场试验, 经不断完善, 至 1996 年共实施活化稠油堵水 161 井次, 累计增油 10.88×10^4 t^[10]。

“八五”期间, 华北油田在中小潜山裂缝块状底水油藏用水解聚丙烯酰胺树脂凝胶堵水, 5 年施工 169 井次, 有效 136 井次, 增油 27×10^4 t^[10]。

1995—1998 年, 塔里木油田在轮南油田、桑塔木油田的深井、超深井开展了堵水研究与试验。所用堵水剂主要为水泥、聚丙烯酰胺等。4 年间, 实施堵水 15 口, 16 井次。由于高温、深井、高盐, 找水资料少, 前期试验没有达到预期目的。

1997—1999 年初, 濮城油田在沙二上 4-7、沙二下、沙三及文 51、文 90、卫 317 等油藏开展油井堵水技术的研究及应用。针对油藏地质特点及油井开发生产情况, 工艺与地质紧密结合, 在找水、选井、堵水剂、堵水管柱等方面进行深入研究, 在矿场应用中取得了较好的效果。在堵水剂方面, 重点研究和应用了加入膨胀剂等添加剂的油井水泥、超细水泥体系。2 年共实施油井堵水 24 井次, 有增油效果井 20 井次, 有效率 83.3%。堵水前合计产油 13.2 t/d, 综合含水率 98.5%; 化学堵水后产油 116.0 t/d, 综合含水率 81.9%。阶段累计增油 9 810.8 t, 降水 $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[11-12]。

2.4 自2000年以来化学堵水技术多元发展

21世纪中国油田油井堵水技术呈多元发展趋势,重要的技术有:石油大学(华东)的先进型油井堵水技术,塔河油田碳酸盐油藏油井堵水技术,中国石油勘探开发研究院、冀东油田、大庆油田、青海油田等联合研究与应用的水平井选择性堵水技术。

2000年,石油大学(华东)赵福麟提出了先进型油井堵水的新概念。这个概念下的油井堵水有5个内涵,即油井区块整体堵水、深部堵水、选择性堵水、不同形式来水堵水和与不同措施结合的堵水。这个概念是基于对当时油井堵水的理论与应用的深入分析而提出来的。虽然油井堵水在提高原油采收率中有重要作用,但油井堵水施工井的数量远少于注水井调剖施工井的数量。这主要是由于油井堵水成功率低、增产幅度低、有效期短。产生这些问题的主要原因是由于油井堵水单井进行、堵剂放置在近井地带、没有充分使用选择性注堵剂工艺、对不同形式的来水缺乏足够的应对措施。为了解决油井堵水的问题,应用先进型油井堵水新概念及其相应的技术,2000—2005年在冀东油田、新疆油田、南海油田、胜坨油田、喇嘛甸油田和濮城油田进行了矿场试验,施工了235井次,平均投入产出比达到1:4.86。

2001年开始,塔河油田进行缝洞型碳酸盐岩高含水井堵水工艺尝试,逐步形成了井筒堵水和深部堵水的2种堵水工艺,形成了以不同密度可固化颗粒堵剂和可溶性硅酸盐堵剂为主的2个堵剂系列。至2009年底,井筒堵水累计实施62井次,有效29井次,有效率46.7%,累计增油 9.7×10^4 t;深部堵水累计实施51井次,有效25井次,有效率49.0%,累计增油 15.6×10^4 t。

2003年,胜利油田对开发时间较长、油井普遍高含水的东营组、沙河街组油藏,开展油藏深部堵水。2003—2005年,在胜坨油田应用F908冻胶、YG冻胶和弱冻胶实施堵水28井次,累计增油 1.14×10^4 t,累计降水 1.702×10^4 m³。

2005年中国石油当年新钻水平井201口,水平井总数744口。计划“十一五”期间新钻水平井3300口,总井数达到4000口左右。随着水平井规模应用,开发生产中出现了含水上升快、产量递减快等问题。2006年,中国石油勘探开发研究院、冀东油田、大庆油田、青海油田等联合研究水平井控水技术。2008年中国石油将水平井控水技术研究列

入水平井重大专项中,加大了研究与矿场试验力度。经过研究与矿场试验,形成了水平井氧活化找水技术、水平井选择性化学堵水技术、选择性堵水-二氧化碳吞吐联作控水增油技术。新型高分子水平井选择性堵水剂用于出水层段不清,或不能进行机械或化学分段的水平井堵水,可不动管柱从油套环空注入,或光油管注入。配制简单,注入安全,具有较好的油、水选择性效果。至2019年10月,水平井选择性堵水技术在冀东、青海、新疆、渤海等油田矿场试验应用64井次,平均单井增油约400 t。

G104-5P35井位于高尚堡油田浅层北区高104-5区块Ng6油藏构造高部位,2005年10月13日筛管完井,11月1日投产,生产Ng6小层。2008年7月日产液222.1 m³,日产油2.22 t,含水99%,动液面108 m,分析认为是部分水平段水淹所致。2008年9月笼统注入选择性堵水剂2070 m³。堵水后,日产液由220 m³降到100 m³,日产油由2.2 t升到4.5 t,液面降低45 m。至2012年11月累计增油3380 t,有效期4年。G24-P2井选择性堵水与二氧化碳吞吐联作技术也取得了显著增油效果^[13]。青海昆北油田切12H24-7下井为昆北断阶带切12井区的一口水平井,生产层位为E31,为孔隙和微裂缝双重介质,2012年5月射孔投产。2016年4月堵水施工,注入选择性堵水剂450 m³后,日产液由堵前20.7 m³下降到4.7 m³,日产油由堵前的0.18 t提高到3.1 t,最高5 t,含水率由99.1%下降到34%,最低含水5%,增油降水效果显著。相邻的叠置水平井切12H24-7上井因渗流场改变,初期也见到了增油降水效果^[14]。渤海油田A38H井是一口东营组海上水平井,2007年3月投产,初期日产油142 t。该井储层渗透率 $(100 \sim 5000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度28%~36%。2018年10月平均日产液374.96 m³,日产油22.5 t,含水94%。2018年11月实施不动管柱选择性堵水,从环空注入选择性堵水剂970 m³。堵后日产液降至304 m³,日产油升至31.5 t,最高36.5 t,含水率降到88%,至2019年8月31日增油1400 t(基准日产油量23.63 t),且继续有效。

2015—2019年,塔里木油田、西南油气田、青海油田与中国石油勘探开发研究院联合研究克拉2、龙王庙及涪北气田气井堵水技术。由于气液两相渗流及气井堵水工艺的复杂性,气井堵水比油井更难。目前已完成室内理论及实验研究,择机进行矿场试验。

3 调剖

3.1 调剖剂技术

1981 年 9 月,胜利油田用水玻璃-氯化钙双液法首次在胜坨油田坨 11 断块胜坨 3-8-16 注水井进行试验,对应油井坨 3-8-174 井,累计增油 2 487 t,累计降水 $3.37 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。至 1985 年 7 月,在胜坨油田胜三区坨 11 断块、坨 28 断块、坨 7 断块、胜二区东三段,共实施水井调剖 18 口,成功率 76.9%;受效油井 19 口,累计增油 $2.91 \times 10^4 \text{ t}$,累计降水 $6.16 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均有效期 298 d。至 1989 年 7 月,在胜坨油田胜三区坨 7 断块沙二段上油组、沙二段 10 砂层组,共实施水井调剖 48 井次,成功率 93%,受效油井 79 口,累计增油 $6.16 \times 10^4 \text{ t}$,平均有效期 298 d。

1981—1982 年,大庆油田使用聚乙烯醇 PVA-1799 颗粒、溶胀型聚丙烯酰胺及甲醛交联部分水解聚丙烯酰胺进行注水井调剖。溶胀型聚丙烯酰胺是采用单体丙烯酰胺作基础材料,在一定剂量的 Co-60 辐射源中辐射聚合而成,经烘干粉碎成所需要的颗粒。该聚合物吸水后溶胀能力很强,在其结构中可以保持相当分量的水,使其自身变大,但不溶于水。在油层内物理、化学性质变化不大。对于注水井,特别是套管损坏不能进行分注的井,可以封堵大孔道、高吸水层,调整吸水剖面。至 1985 年,该技术在北 2-3-丙水 97 井、南 3-5-丙水 44 等注水井应用 30 多井次。

1982 年,中国石油勘探开发研究院开始研究 TP-910 调剖剂。该调剖剂的主要组分是 AM、过硫酸盐及 N,N-亚甲基双丙烯酰胺等。单体在地层内发生聚合和交联反应,生产高黏聚合物,封堵高渗透吸水层。适用于 30~90 °C 的砂岩和碳酸盐岩地层注水井调剖和油井堵水。其技术特点主要是聚合反应在地下进行,消除了聚合物黏度大、易降解等弱点;调剖剂黏度与水接近,能像注入水一样优先进入高吸水层段或裂缝,具有选择性调剖作用;由于部分调剖剂溶解时接触的注入水黏度增加,因此,具有调剖和提高驱油效率的双重功能;调剖剂强度和可泵时间可控,用量少,有效期长。胜利油田也在同期开展了同类调剖剂的研究。至 1990 年,在辽河、河南、胜利、大港、吉林等油田试验应用 170 井次,累计增油 $59 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1984 年,胜利孤岛油田开始使用膨润土调剖,至 1989 年累计实施注水井调剖 50 井次,对应见效

油井 95 口,累计增油 $10.49 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1984 年,胜利油田针对砂岩非均质油藏高含水开发期,注入水沿高渗透条带窜流,波及系数小、油井含水上升速度快的情况,试验应用聚丙烯酰胺-乌洛托品-间苯二酚 (HR-PAM) 调剖剂。该剂的化学稳定性好,成胶时间可调,冻胶强度可根据施工需要调整,适用于温度 40~80 °C 的纵向渗透率差异大的正韵律油层的油井堵水和注水井调剖,还可用于多段塞大剂量封堵。在埕东油田 25-10 井实施调剖后,对应油井累计增油 2 282 t,减水 5 295 m^3 ,有效期 310 d。应用该剂调剖 25 井次,累计增油 $3.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1985 年,胜利油田针对高温油藏需求研制出 Na-HPAN 高温调剖剂。该剂以水解聚丙烯腈钠盐为主要原料与交联剂苯酚和甲醛在高温地层条件下发生交联,生成网状聚合物冻胶,具有热稳定性好、成胶时间可控、常温下不交联、地面黏度低、易泵送、冻胶强度高、耐水冲刷、对配制水无特殊要求等特点,适用于温度 90~150 °C 的高温砂岩油藏的油井堵水和注水井调剖。1986 年 5 月投入现场后,在纯梁、河口、东辛等油田,实施 49 井次,累计增油 $17 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1986 年,中国石油勘探开发研究院研究 PIA-601 调剖剂。该剂的主要组分是聚丙烯酰胺、苯酚、六亚甲基四胺。六亚甲基四胺受热缓慢释放出甲醛,甲醛再与聚丙烯酰胺、苯酚反应,生产复合冻胶体。调剖剂的特点是冻胶网状结构中导入了芳香环,提高了热稳定性。甲醛是由六亚甲基四胺受热缓慢释放出来的,因而延长了体系中缩合交联反应时间,以利于进行大剂量深部处理。PIA-601 调剖剂至 1991 年在中原油田、华北油田应用 44 井次,累计增油 $7.447 8 \times 10^4 \text{ t}$ 。

1986 年,胜利油田研究、试验 BD-861 调剖剂。采用聚丙烯酰胺单体 (AM) 地下聚合、交联生成高强度冻胶。该调剖剂适用于温度 40~80 °C 的砂岩油藏的注水井调剖和油井堵水,施工 22 井次,累计增油 $15 \times 10^4 \text{ t}$ 。1987 年开始,聚丙烯酰胺与无机钙盐调剖剂先后施工 16 井次,累计增油 $4.9 \times 10^4 \text{ t}$,减水 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中埕东油田埕 10-6 井调剖后,对应 5 口油井,累计增油 4 870 t。

1989—1998 年,胜利孤岛油田应用 CAN-1 复合离子调剖剂实施注水井调剖 309 井次,油压上升 1~2.5 MPa,对应油井 812 口,受效油井 446 口,受效率 55%,累计增油 $17.25 \times 10^4 \text{ t}$;利用榆树皮粉调剖剂

实施注水井调剖 180 井次,油压上升 2 MPa,对应油井 542 口,受效油井 336 口,受效率 62%,累计增油 11.3×10^4 t。1990 年 6 月—1995 年 11 月,孤东油田实施榆树皮粉调剖 12 井次,取得一定效果,但有效周期较短。

1991 年,胜利油田与石油大学(华东)合作,研发、筛选采用由黏土颗粒悬浮液和高分子絮凝剂溶液组成的黏土颗粒堵剂。现场施工中,将两种化学剂溶液以水为隔离液分别注入地层,两种溶液突破隔离液在地层中相遇发生絮凝作用,产生尺寸较大难以流动的絮凝物,沉积在大孔道内堵塞大孔道,降低了地层的非均质性,改变后续注入水的流动途径,扩大注入水的波及面积,从而提高注水效果。应用大剂量多段塞黏土双液法施工技术和综合应用示踪剂监测等技术,在胜坨油田胜二区沙二段 3 砂层组进行封堵大孔道先导试验。施工设备上配套应用立式电泵及相应的计量配电系统,通过地面高压管线进行多井施工。1991 年 6 月—1992 年 11 月,共实施 12 口井,堵剂用量 2.08×10^4 m³,累计增油 3.88×10^4 t;区块封堵后减少注水量 22×10^4 m³,提高采收率 3.64%。该区块的试验成功,为砂岩油藏高含水期的开发提供了宝贵的技术经验。此后,推广应用黏土颗粒堵剂,逐步形成工业化规模。1992—1993 年,在埕东油田应用河口黏土调剖施工 63 井次,投入堵剂 14 925 m³,累计增油 4.16×10^4 t;1992—1996 年,在孤东油田实施黏土双液法调剖 150 井次,累计增油 6.0×10^4 t;1993—1996 年,在孤岛油田利用黏土悬浮液与部分水解聚丙烯酰胺溶液交替注入油层的方法,实施调剖 28 井次,对应油井受效率 61%,累计增油 1.91×10^4 t。至 2002 年,应用黏土颗粒堵剂实施调剖 225 井次,累计注入堵剂 79.3×10^4 m³,收到较好的增油效果。

1995 年,中国石油勘探开发研究院开始研究体膨颗粒调剖剂。其研究背景为,在地下聚合或交联的调剖剂受多种因素影响,难以保证调剖剂的性能。设想将聚合反应移至地面完成,再将产物破碎注入地层,就可以避免井筒、地层等许多干扰因素,提高调剖效果。因此,开始研究地面聚合的体膨颗粒调剖剂。1996 年底完成室内合成,1997 年进行系统评价。室内研究表明,在合成过程中,可控制膨胀度、强度及耐温性,其膨胀度可控制在 10~200 倍以内,并使其在水中处于悬浮状态,在 20~100 ℃ 范围内不易发生脱水现象,热稳定性较好。1998 年首先

在中原油田开展试验。1999—2004 年,体膨颗粒调剖剂先后在大庆、新疆、大港、华北、冀东、玉门、胜利等油田大量现场应用,取得了良好的增油降水效果。截止到 2004 年 2 月底,在 355 个井组的现场试验中,累计增油 46.73×10^4 t^[15]。

1995 年,石油大学(北京)开始对 HPAM/AICit 凝胶体系进行系统的研究,发现加入柠檬酸铝的不同浓度的部分水解聚丙烯酰胺水溶液可形成交联聚合物溶液(Linked Polymer Solution, LPS)、弱凝胶和凝胶体系。研究表明,在上述几种交联体系中,对提高原油采收率起重要作用的是交联聚合物溶液。交联聚合物溶液是交联聚合物分子线团分散在水中的体系,同时具有胶体和溶液的特性。1998 年 6—11 月,石油大学(北京)与辽河油田高升采油厂合作在高 81 注水井进行了交联聚合物溶液深部调剖矿场试验,注入 260~160 mg/L 交联聚合物溶液 3 110 m³,压力自负压升至 5 MPa。试验结果表明,交联聚合物溶液具有液流改向、深部调剖和驱油的功能^[16]。

1996 年石油大学(北京)、西南石油学院研究 CDG(胶态分散体凝胶)的制备、流变性能,随后在矿场进行试验^[17-19]。

1996—1998 年,濮城油田应用 PI 决策技术,主要使用膨润土-HPAM 体系,对东、南、西区沙二上 2+3 层系实施多轮次调剖。注水井调剖 58 口,276 井次,对应油井日增油 79 t,含水下降了 2.01%,累计增油 4.0×10^4 t,自然递减由调剖前的 26.04% 下降到 -8.92%,综合递减由 19.52% 下降到 -9.7%,增加水驱动用储量 341.5×10^4 t,增加可采储量 53.71×10^4 t,采收率提高了 1.93%,创经济效益 4 656.79 万元,投入产出比 1:4.42,取得了较好的经济效益,并使该层系实现稳产 3 年的目标^[20]。

1998 年,西南石油学院研究弱凝胶体系。弱凝胶是一种低浓度聚合物和交联剂形成的以分子内交联为主、以分子间交联为辅的高分子体系。它是介于聚合物溶液和凝胶之间的过渡体系,其分子尺寸比聚合物溶液中分子尺寸大得多,同时,具有胶体的热力学稳定性。弱凝胶体系具有以下特征:低的聚合物浓度和交联剂浓度,较长的成胶时间(弱凝胶体系的成胶时间可达几十天,有利于体系进入油藏深部),较低的阻力系数,高剪切稳定性。作为具有调剖和驱油作用调驱剂,弱凝胶体系在华北、辽河、吉林、胜利等油田得到广泛应用^[21]。

1999 年,大港油田与天津工业生物研究所合作研究和试验微生物调剖技术。该研究分离出 5 组适应温度在 30~60 ℃,具有耐矿化度、能与地层原生菌相容生长、对 20 μm² 以下的岩心堵塞率大于 90% 的微生物群落。经 5 口井 8 个月的矿场试验,初步统计增油 1 432 t,且受益井继续有效。2001 年吉林油田与日本公司合作,在扶余油田进行微生物调剖、堵水试验。2 口调剖井对应油井增油 4 430 t,4 口堵水井增油 520 t。2004 年大庆油田在聚驱后的萨北北二西西块开展微生物调剖试验。2 口注水井调剖后吸水剖面得到改善,对应油井增油 1 300 t,为聚驱后进一步提高采收率探索了一条新路^[22-24]。

1999 年,胜利乐安油田在水平井用蒸汽泡沫调剖。由于地层的非均质与重力分异作用,注汽过程中,乐安油田较早投产的水平井与邻井间发生明显汽窜现象,造成蒸汽在平面及剖面上推进不均,油层动用程度差。蒸汽泡沫调剖应用于发生汽窜的 5 口水平井,成功率 100%。其中乐安油田放射状水平井区 CNP10 水平井,第 4 周期注汽时,2 口邻井明显发生汽窜现象,平均温度由 60 ℃ 上升至 95 ℃,两直井减少产量 892 t。该井第 5 周期注汽时加入泡沫剂 5 t,并注入氮气 5.6×10⁴ m³,调剖后,周围邻井没有发生明显汽窜现象,CNP10 水平井生产状况也明显好转^[25]。2006 年,辽河油田研究注气水平井高温调剖技术。先注入高温乳化剂,使药剂率先进入水平井前端或易吸汽井段,再注入高温发泡剂,调整吸汽剖面,从而提高注汽效果,提高原油产量。在锦 16—于 H14 井和锦 16—于 H12 井上进行了水平井调剖技术试验,取得了比较满意的效果^[25]。

3.2 调剖决策技术

1997 年前后,随着注水井调剖技术的发展,同时涌现出了 3 个有关区块整体调剖的决策技术。分别为:石油大学(华东)的 PI 决策技术、中国石油勘探开发研究院的 RS 优化决策技术、石油大学(华东)的 RE 决策技术。这些决策技术在全国油田得到了大面积推广和应用,推动了调剖技术的发展。

(1)PI 决策技术。注水井压力指数(Pressure Index)简称 PI,以压力指数值作决策参数,所以该决策技术简称为 PI 决策技术。PI 值是由关井后的注水井井口压降曲线、指定的关井时间和 PI 值的定义式求得。由理论导出,PI 值与地层渗透率反相关。根据区块注水井在相同条件下的 PI 值,可解决区块调剖堵水 6 个重大问题,即判别区块调剖堵水的必要性、

决定区块上需调剖堵水的井、选择适当堵剂用于调剖堵水、计算堵剂用量、评价堵水效果、决定重复施工时间。PI 决策技术具有可操作性强、决策面宽、及时、准确等特点。至 2008 年,PI 决策技术在胜利、中原、华北、辽河、大港、大庆、新疆等油田 50 多个区块、400 多口注水井推广应用^[26-27]。

(2)RS 优化决策技术。该决策技术综合考虑水井吸水能力、油层非均质性和周围油井动态数据进行选井,采用井组模型进行效果预测和经济预测。具有选井、选层、选剂、参数优选和效果预测经济评价等多项功能^[28]。

(3)RE 决策技术。该决策技术利用油藏工程方法,从渗透率变异系数、吸水剖面、注水井注入动态和井口压降曲线等调剖井选择的 4 个依据出发,利用模糊数学方法优选调剖井,利用注水井注入动态数据选择调剖剂种类,采用效果预测图版预测增油降水量^[29]。

3.3 调剖配套技术

根据不同类型油藏的特点,经过多个油田实践,初步总结了保证成功的 6 项配套技术,即:(1)高含水油藏的油藏描述技术;(2)油田堵水调剖,封堵大孔道的数值模拟技术;(3)示踪剂注入和解释技术;(4)优化施工设计技术,在方案优选、处理半径、堵剂用量、颗粒大小的适用范围等方面的研究都取得了新的进展;(5)施工工艺,对油井堵水和注水井调剖的施工工艺进行了总结,其要点为施工前测油井的产液剖面,对注水井施工前测吸水剖面、指示曲线,设计优选施工管柱,按设计要求挤注堵剂或调剖剂,按设计要求关井、开井投产或投注,初期产液量或注入量不宜过大,逐渐恢复正常后按要求时间测采油井产液剖面 and 注水井吸水剖面,取全取准各项数据和资料;(6)注入设备和流程,堵水调剖的注入设备由水泥车、压裂车注入,逐步转化为固定或撬装泵组注入,并设计制造了成套的注入设备和流程。

3.4 2000 年以来深部调剖、调驱技术的发展

2001 年,赵福麟等研究二次采油与三次采油的结合技术,简称“2+3”技术,是在充分调剖、充分发挥二次采油作用的基础上进行有限度三次采油的技术。该技术由 2 项技术组成,即充分调剖技术和有限度三次采油技术。前者有 2 个技术关键:一是调剖充分程度的判别,二是调剖剂系列的建立。后者也有 2 个技术关键:一个是高效驱油剂配方的筛

选,二是驱油剂用量的优化。提出了用注水井井口压降曲线充满度判别调剖充分程度的标准和在有限度三次采油中注入 0.02 PV 的量化指标。“2+3”技术在胜利老河口油田、华北蒙古林油田、中原濮城油田的试验区中取得了较好的结果,证实了该技术的可行性^[30]。

2004年,胜利等油田开始研究聚合物微球调驱技术。聚合物微球是在交联聚合物溶液调剖技术基础上发展出的一项新型深部调驱技术。聚合物弹性微球是粒径在 0.2~20 μm 的活性聚合物凝胶球体。该技术依靠纳米级和微米级遇水可膨胀的微球来逐级封堵地层孔喉,实现其逐级深部调剖堵水的效果。室内研究表明:该技术比聚合物驱提高采收率高 5~8 个百分点;受外界影响较小,如可以直接用污水配制,耐高温高盐;而且高分子微球材料具有配制时与浓度无关、水溶性好、注入时无黏度、无污染、成本较低的优点。

2004年胜利油田在孤岛油田东区 1-14 注水井组进行聚合物微球技术调驱矿场试验。试验区包括 1 口注水井和 11 口对应采油井。注入时设计了 4 段塞的注入方法,注入浓度在 300~1 000 mg/L 范围内调整:12月2日开始注入浓度为 300 mg/L 的第 1 段塞,共注 10 d;后注入第 2 段塞 50 d,浓度为 600 mg/L;第 3 段塞浓度为 1 000 mg/L,注入 30 d;第 4 段塞浓度为 600 mg/L,注入 33 d;2005年4月5日停注微球改注水。微球注入时的平均粒径为 600 nm,60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下 15 d 左右微球平均粒径会膨胀至 4 μm 左右。11 口对应井中 8 口在注入微球后 3~4 个月见效,水井的剖面有很大的改善。且累计增油千吨。该技术已在胜利、大港、青海、长庆及大庆等油田应用^[31]。

2004年,中国石油勘探开发研究院开展研究柔性转向剂,用于深部液流转向,即油藏深部调驱。应用分子设计原理,合成了 SR-3 深部液流转向剂。柔性转向剂的密度可以根据油田注入水的密度进行调整。SR-3 在蒸馏水中稍下沉,在 1.5%NaCl 盐水中半沉半浮。柔性转向剂的粒径可以根据地层大孔道和裂缝的尺寸进行调节。性能评价表明,柔性转向剂产品变形性和韧性好、不易破碎、化学稳定性好。使用多种物理模型深入系统地研究了深部液流转向机理和转向剂的注入、运移、堵塞特征及其影响因素。柔性转向剂通过变形、暂堵、脉动,在地层高渗或水流优势部位产生动态沿程流动阻力,实现

深部液流转向。2005年开始,在吉林油田 G 块、大庆油田南一区东部萨葡油层、大港油田官 74 块、胜利油田孤东 33-2326 井组、辽河油田丙 1-115 井组、新疆头屯河油藏等推广应用。2005年11月在吉林油田新木 G2-1 井组进行首次试验。设计采用 A、B、C 三段塞法注入柔性调剖剂 8 t,共 400 m^3 ,C 段最高浓度 3%。施工时根据注入情况,进行了动态调整,C 段最高浓度提高到 5%,注入调剖剂 8 t,3 个段塞共 300 m^3 。施工时压力上升平缓,初期 5.5 MPa,最后上升到 7.0 MPa。转注后稳定注水压力 5.7 MPa,比调剖前提高了 0.7 MPa。G2-1 对应的 9 口油井有 6 口井初期有明显效果,其中高产液高含水的 G2-01、G1-1、G2-02、G4-1 产液下降,含水略降,低产液相对低含水的 G2-3、G+2-3 产油增加,含水下降。G+2-3 增油效果最好,初期日增油 2.2 t^[32]。2007年采用柔性转向剂 SR-3 在新疆陆梁油田作业区石南 31 井区施工 20 井次、石南 4 井区施工 6 井次、石南 21 井区施工 4 井次,均取得了很好的效果。2008年,柔性转向剂在吐哈油田三塘湖油田 H26-21 井、M201 井和 M18 井进行了现场应用。结果表明,能有效封堵微裂缝,增油减水效果显著。

2007年,冀东油田开始在高尚堡浅层北区 Ng8、Ng12-13 油藏开展水平井大剂量调驱试验。初期设计 6 口水平井调驱,使用有机铬交联体系,设计注入调驱剂 $73.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均单井用量 $12.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2008年由于政策调整,水平井调驱方案改变。水平井调驱是调剖技术的发展,是提高水平井开发效果的新尝试^[33]。

2010—2016年,中国石油在二次开发“三重”技术路线基础上,采用深部调驱技术,改变油层长期注水开发所形成的固有流场,扩大注水波及体积,提高水驱采收率。相继在新疆、辽河、吉林、冀东、大港、玉门、青海、大庆、长庆等九个油区开展二次开发深部调驱试验。试验项目共覆盖含油面积 29.1 km^2 ,地质储量 $4 505 \times 10^4 \text{ t}$ 。九个油区先后有 18 个项目进入现场实施,注剂总井数 219 口,开井数 127 口,年注剂量 $114.18 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计注剂量 $598.7 \times 10^4 \text{ m}^3$;采油井总数 494 口,开井数 358 口,年产油量 $31 \times 10^4 \text{ t}$,年增油 $10.4 \times 10^4 \text{ t}$,累计增油 $40.6 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2013—2018年,中国石油大学(华东)开始在长庆等油田应用冻胶分散体调驱技术。基于地面制备的本体冻胶体系,研究了规模化高效制备多尺度冻

胶分散体的工艺新方法,制备的多尺度冻胶分散体为形状规则、粒径可控(650~5 000 nm)的水相分散颗粒体系,具备低黏度,表面带负电的特点。目前已在国内 11 个油田进行推广应用,施工 513 井次,措施井累计增产原油 16.12×10^4 t,取得了显著的经济效益^[34]。

4 存在问题及发展方向

堵水调剖技术经过 60 年的发展完善,在化学剂技术、施工工艺等方面已比较成熟,但正在开发的油藏的特征是不断变化的,向复杂、困难方向变化;将来开发的油藏比今天的更复杂。堵水调剖技术,特别是能应用的技术总落后于现实的需要。这种需求推动堵水调剖技术的发展。

4.1 主要问题

(1) 堵水调剖调驱的油藏工程研究不够,油藏与工程还没有一体化。

(2) 堵水调剖剂在多孔介质中运移、滞留、封堵机理的微观、定量研究还比较笼统。

(3) 高温(120 ℃以上)深井(5 000 m 以上)堵水调剖化学剂及施工工艺不成熟,直井多层、水平井长水平段机械找堵水工艺复杂。

(4) 水平井快速找水技术以及优异廉价长效的选择性堵水剂技术还没有形成工业规模。

(5) 堵水调剖调驱优化设计技术,即优化设计软件,还没有商业版本。优化设计涉及油藏、化学剂、工艺及效果评价 4 方面内容,主要是最佳剂量设计。

(6) 气井堵水处于起步阶段,需要加大研发与试验力度。

4.2 发展方向

(1) 堵水调剖调驱与油藏工程的紧密结合。

(2) 强度和膨胀时间可控的微球或分散体材料在水驱或聚驱高含水油田调驱提高采收率中得到工业应用,纳米、智能材料有望在堵水调剖剂领域开始应用,裂缝、深井堵水调剖剂研发加强。

(3) 随着现场需求加大和油藏研究技术、物理模拟技术和计算机技术的发展,简洁、实用的堵水调剖优化设计软件被研发出来。

(4) 简单、智能、安全的机械找堵水技术在低渗、少层的油井得到应用。

(5) 选择性堵水技术在水平井、多层直井及海上油井得到工业应用。

(6) 气井堵水技术逐步建立并得到试验、应用。

5 结论

(1) 中国堵水调剖技术已有 60 年历史,经过几代堵水调剖人的辛苦工作,已在找堵水工具、化学剂和工艺方面取得重要成果。

(2) 油田堵水调剖从单井油井堵水,注水井调剖,发展到注、采井组对应调剖堵水,区块整体调剖堵水,再发展到调驱,油井堵水调剖技术随着油田开发的需要而发展,使用方法随着油藏地质特征的变化而变化。

(3) 堵水调剖技术主要包括 4 个内容:堵水调剖油藏研究、堵水调剖化学剂研究、堵水调剖工艺及堵水调剖效果评价方法。其中,化学剂的研究发展最快。每一次化学剂的突破都引起一次堵水调剖的热潮。

(4) 中国东部油田的堵水调剖规模大于西部油田,注水井调剖的规模大于油井堵水,砂岩油藏的堵水调剖规模大于碳酸盐岩油藏,中低温(≤ 90 ℃)油藏的堵水调剖规模大于高温(> 90 ℃)油藏。

(5) 选择性堵水技术是理想的堵水技术,也是先进的堵水技术,从诞生至今都在争议中发展、进步。

参考文献:

- [1] 刘玉章,郑俊德.采油工程技术进展[M].北京:石油工业出版社,2006.
LIU Yuzhang, ZHENG Junde. Progress of oil production engineering Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006
- [2] 沈琛.油田高含水期深部调驱技术文集[M].北京:中国石化出版社,2008.
SHEN Chen. Collection of papers on deep profile control and flooding technology in high water cut stage of Oilfield [M]. Beijing: China PetroChemical Press, 2008.
- [3] 万仁溥.中国采油工程[M].北京:石油工业出版社,2015.
WAN Renpu. China production engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015
- [4] 胡博仲.大庆油田高含水期稳油控水采油工程技术[M].北京:石油工业出版社,1997.
HU Bozhong. Production engineering technology of oil stabilization and water control in Daqing Oilfield during high water cut period [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [5] 刚振宝,卫秀芬.大庆油田机械堵水技术回顾与展望[J].特种油气藏,2006,13(2):9-11.

- GANG Zhenbao, WEI Xiufen. Review and outlook for mechanical water plugging technology in Daqing oilfield [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2006, 13(2): 9-11.
- [6] 李光前. 电控机械找堵水工艺技术研究 [J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(5): 43-45.
LI Guangqian. Study of electrical-mechanical water detection and shutoff technique [J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(5): 43-45.
- [7] 张国文, 钱杰, 刘凤, 等. 水平井控水完井管柱的研究与应用 [J]. *石油机械*, 2012, 41(2): 41-44.
ZHANG Guowen, QIAN Jie, LIU Feng, et al. Research and application of the water control completion string for horizontal wells [J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 41(2): 41-44.
- [8] 张国文, 沈泽俊, 童征, 等. 遇油遇水自膨胀封隔器在水平井完井中的应用 [J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(2): 41-44.
ZHANG Guowen, SHEN Zejun, TONG Zheng, et al. Application of oilwater-swelling packer to horizontal well completion [J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(2): 41-44.
- [9] 郑明科. 低渗透油田堵水调剖技术研讨会论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
ZHENG Mingke. Collection of papers on water shutoff and profile control technology in low permeability oilfield [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [10] 刘翔鹏. 油田堵水技术论文集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
LIU Xiang'e. Collection of papers on water shutoff technology in oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [11] 赵福麟. 油田化学 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
ZHAO Fulin. *Oilfield Chemistry* [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [12] 刘一江. 中原油田采油新技术文集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
LIU Yijiang. Collection of papers on new oil production technologies in Zhongyuan Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [13] 李宜坤, 魏发林, 路海伟, 等. 水平井化学控水技术研究与应用 [J]. *石油工业技术监督*, 2010, 28(3): 50-54.
LI Yikun, WEI Falin, LU Haiwei, et al. Research and application of chemical water control technology in horizontal wells [J]. *PetroChina Engineering Supervision*, 2010, 28(3): 50-54.
- [14] 党杨斌, 李克庆, 张海浪, 等. 昆北油田水平井堵水工艺研究及先导试验 [J]. *化学工程与装备*, 2016, 237(10): 134-137.
DANG Yangbin, LI Keqing, ZHANG Hailang, et al. Study on water shutoff technology of horizontal wells in Kunbei Oilfield and pilot test [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2016, 237(10): 134-137.
- [15] 李宇乡, 刘玉章, 白宝君, 等. 体膨胀型颗粒类堵水调剖技术的研究 [J]. *石油钻采工艺*, 1999, 21(3): 65-68.
LI Yuxiang, LIU Yuzhang, BAI Baojun, et al. Research of expansion grain chemical for water shutoff and profile control [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1999, 21(3): 65-68.
- [16] 李明远, 林梅钦, 郑晓宇, 等. 交联聚合物溶液深部调剖矿场试验 [J]. *油田化学*, 2000, 17(3): 144-147.
LI Mingyuan, LIN Meiqin, ZHENG Xiaoyu, et al. Linked polymer solution as in-depth permeability control agent: laboratory study and field test [J]. *Oilfield Chemistry*, 2000, 17(3): 144-147.
- [17] 韩大匡, 韩冬, 杨普华, 等. 胶态分散凝胶驱油技术的研究与进展 [J]. *油田化学*, 1996, 13(3): 273-276.
HAN Dakuang, HAN Dong, YANG Puhua, et al. Researches and progresses in colloidal dispersion gels for enhanced oil Recoveries [J]. *Oilfield Chemistry*, 1996, 13(3): 273-276.
- [18] 陈铁龙, 吴晓玲, 肖磊, 等. 孔隙阻力因子法评价胶态分散凝胶 [J]. *油田化学*, 1998, 15(2): 164-167, 159.
CHEN Tielong, WU Xiaoling, XIAO Lei, et al. Evaluation of colloidal dispersion gels by using pore resistance factor [J]. *Oilfield Chemistry*, 1998, 15(2): 164-167, 159.
- [19] 罗文利, 吴肇亮, 牛亚斌. 胶态分散凝胶研究的新进展 [J]. *油田化学*, 1999, 16(2): 188-193.
LUO Wenli, WU Zhaoliang, NIU Yabin. The new research progress in colloidal dispersion gel [J]. *Oilfield Chemistry*, 1999, 16(2): 188-193.
- [20] 王元胜. PI 决策技术在中原油田的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(6): 81-83.
WANG Yuansheng. Application of PI decision making technology in Zhongyuan oil field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(6): 81-83.
- [21] 李贵斌, 陈铁龙, 王辉光. 弱凝胶调剖在岔河集油田的应用 [J]. *石油钻采工艺*, 1999, 21(4): 111-112.
LI Guibin, CHEN Tielong, WANG Huiguang. Application of weak gel profile control in Chaheji Oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1999, 21(4): 111-112.
- [22] 高学忠, 魏呐, 宋莹, 等. 利用微生物调剖技术提高原

- 油采收率 [J]. *石油学报*, 1999, 20(5): 54-57.
- GAO Xuezhong, WEI Na, SONG Luo, et al. Enhancing oil recovery by microbial profile control [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(5): 54-57.
- [23] 段景杰, 赵亚杰, 吕振山. 高含水油田微生物调剖技术 [J]. *油田化学*, 2003, 20(2): 175-179.
- DUAN JingJie, ZHAO YaJie, LV Zhenshan. Microbial profile modification technology in high water cut oil-field [J]. *Oilfield Chemistry*, 2003, 20(2): 175-179.
- [24] 郭万奎, 石成方, 万新德, 等. 大庆油田聚合物驱后微生物调剖先导性现场试验研究 [J]. *石油学报*, 2006, 27(增刊): 86-90.
- GUO Wankui, SHI Chengfang, Wan Xinde, et al. Study on pilot test of microbial profile modification after polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(S0): 86-90.
- [25] 姚凯, 催文俊, 郭洪金, 等. 乐安油田砂砾岩稠油油藏水平井热采配套工艺技术 [J]. *特种油气藏*, 2000, 7(3): 30-32.
- YAO Kai, CUI Wenjun, GUO Hongjin, et al. Horizontal well thermal recovery complementary techniques for glutenite heavy oil reservoirs, Le'an oil field [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2000, 7(3): 30-32.
- [26] 李宜坤. 区块整体调剖的 PI 决策技术研究 [D]. 东营: 石油大学(华东), 1996.
- LI Yikun. Study on PI decision-making technique for block-wide profile control [D]. Dongying: University of Petroleum(East China), 1996.
- [27] 周洪涛. 用于区块整体调剖的 PI 决策技术专家系统 [D]. 东营: 石油大学(华东), 1997.
- ZHOU Hongtao. PI decision-making expert system for block-wide profile control [D]. Dongying: University of Petroleum(East China), 1997.
- [28] 白宝君, 唐孝芬, 李宇乡. 区块整体调剖优化设计技术研究 [J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(3): 60-63.
- BAI Baojun, TANG Xiaofen, LI Yuxiang. The optimization technology of block-wide injection profile control [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 60-63.
- [29] 冯其红, 陈月明, 姜汉桥, 等. 模糊数学在区块整体调剖选井中的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(3): 76-79.
- FENG Qihong, CHEN Yueming, JIANG Hanqiao. Application of fuzzy mathematics to block-wide injection profile Control [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(3): 76-79.
- [30] 赵福麟, 张贵才, 周洪涛, 等. 二次采油与三次采油的结合技术及其进展 [J]. *石油学报*, 2001, 22(5): 38-42.
- ZHAO Fulin, ZHANG Guicai, ZHOU Hongtao, et al. The combination technique of secondary oil recovery with tertiary oil recovery and its progress [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(5): 38-42.
- [31] 王涛, 孙焕泉, 肖建洪, 等. 孤岛油田东区 1-14 井组聚合物微球技术调驱矿场试验 [J]. *石油天然气学报*, 2005, 27(6): 779-781.
- WANG Tao, SUN Huanquan, XIAO Jianhong, et al. The pilot test of polymer microsphere technology profile control and flooding in well group 1-14 in East Area of Gudao Oilfield [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2005, 27(6): 779-781.
- [32] 刘玉章, 熊春明, 罗健辉, 等. 高含水油田深部液流转向技术研究 [J]. *油田化学*, 2006, 23(3): 248-251.
- LIU Yuzhang, XIONG Chunming, LUO Jianhui, et al. Study on in-depth fluid diverting in oil reservoirs at high water cut stage [J]. *Oilfield Chemistry*, 2006, 23(3): 248-251.
- [33] 李良川, 骆洪梅, 马静荣, 等. 边底水驱水平井开发油藏调剖物理模拟实验研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2007, 29(7): 68-70.
- LI Liangchuan, LUO Hongmei, MA Jingrong, et al. Physical simulation research for profile control for reservoir development of edgy and bottom water drive horizontal well [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007, 29(7): 68-70.
- [34] 赵光, 由庆, 谷成林, 等. 多尺度冻胶分散体的制备机理 [J]. *石油学报*, 2017, 38(7): 821-829.
- ZHAO Guang, YOU Qing, GU Chenglin, et al. Preparation mechanism of multiscale dispersed particle gel [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(7): 821-829.

(修改稿收到日期 2019-11-04)

[编辑 付丽霞]