

石油工程技术对油气勘探的支撑与未来攻关方向思考

——以中国石化油气勘探为例

马永生, 蔡勋育, 赵培荣

(中国石油化工集团公司, 北京 100728)

摘 要:“十二五”期间,中国石化油气勘探取得重大突破,其中地震勘探技术、超深井钻完井技术、水平井分段压裂技术及测井录井技术的创新发展起到了关键支撑作用。对未来油气勘探中存在的寻找石油储量战略接替困难、新增储量品位下降、埋藏深度增加、复杂勘探对象对工程技术的要求越来越高等技术难题进行了详细分析,认为中国石化油气勘探发展方向主要集中在陆相隐蔽油气藏、海相油气藏、致密碎屑岩油气藏、山前带油气藏、火成岩油气藏、海域及非常规油气资源等 7 大领域,并分析了 7 个领域面临的主要技术挑战,指出了物探技术、井筒技术及测井录井技术的主要攻关方向。

关键词:油气勘探;工程技术;技术需求;发展方向;中国石化

中图分类号:TE11 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)02-0001-09

The Support of Petroleum Engineering Technologies in Trends in Oil and Gas Exploration and Development—Case Study on Oil and Gas Exploration in Sinopec

MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong

(China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing, 100728, China)

Abstract: During the 12th “Five-Year Plan”, great breakthroughs in oil and gas exploration were made in Sinopec and technological innovative developments in seismic exploration, ultra-deep well drilling and completion, horizontal well staged fracturing, mud logging and well logging provided crucial support. Nevertheless, some technical challenges will be encountered in oil and gas exploration in the future. For example, it is hard to find new oil reserves for strategic replacement, the quality of new reserves is degraded, and burial depths increase while the geological complexity of exploration targets requires a higher engineering technical requirement. Sinopec has committed to oil and gas exploration that will mainly target seven kind of reserves including continental subtle reservoirs, marine reservoirs, tight clastic reservoirs, piedmont reservoirs, igneous reservoirs, sea and unconventional oil and gas resources (shale gas). This paper presents a analysis of the main technical challenges in these seven types of reservoirs and identifies the major technical research directions in geophysical exploration, borehole stability, mud logging and well logging.

Key words: oil and gas exploration; engineering technology; technical requirements; development direction; Sinopec

石油天然气作为我国重要的战略资源,直接关系到国家和社会稳定。石油天然气工业的发展史,也是一部石油工程技术的振兴史,每一次石油工程技术的跨越,都带来了油气储量及产量的快速增长。近年来,由于水平井分段压裂等工程技术的突破性进展,突破了长久以来油气商业开采的储层下限,实现了油气工业由常规油气向非常规油气的重

大跨越,正在深刻地改变着世界能源的格局。

截至 2014 年底,中国石化在全国拥有近四分之

收稿日期:2016-02-24。

作者简介:马永生(1961—),男,内蒙古土默特左旗人,1984 年毕业于武汉地质学院地质学专业,1990 年获中国地质科学院沉积学专业博士学位,中国工程院院士,主要从事储层沉积学、油气勘探研究与管理工。E-mail:mays@sinopec.com。

一的油气勘查区块,此外还有约 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 页岩气矿权区。矿权区块具有数量多、面积小、优质资源区块少、分布广而散的特点,位于富油气大盆地的矿权区块面积仅占盆地面积的 27.9%,并且大多数分布在盆地的边缘与腹部,其他矿权区多位于油气地质条件较差的西部中小盆地和高演化程度的南方地区。“十二五”期间,中国石化围绕陆相断陷盆地隐蔽油气藏、海相碳酸盐岩油气藏及致密碎屑岩油气藏 3 大油气勘探领域,依靠理论研究及工程技术进步,在涪陵焦石坝地区、川西海相雷口坡组、塔中北坡顺托地区、准噶尔盆地西北缘、鄂尔多斯盆地南部(以下简称鄂南)及东海西湖深层获得一系列重大的油气勘探突破,并在东部富油凹陷、塔里木盆地和四川盆地获得 13 个油气新发现,确保了东部硬稳定、西部快上产,石油产量持续稳定,天然气快速发展,非常规油气获得大突破。在油气勘探突破与发现过程中,石油工程技术的不断创新与进步,发挥了至关重要的支撑作用。

1 石油工程技术对油气勘探的支撑作用

“十二五”以来,面对异常复杂的油气勘探开发对象,中国石化按照针对目标发展适用技术、针对难点攻克关键技术的思路,注重自主创新,强化攻关研究,加大推广应用,进一步加强了关键技术与配套技术的攻关集成。通过技术攻关,形成了高精度三维地震勘探技术,复杂地表、复杂构造地震勘探技术,复杂储层预测技术,超深层、高温高酸性钻完井及测试技术,3 500 m 以浅页岩气勘探开发技术等一系列特色工程技术,并在石油工程关键装备及工具研制方面取得了重要进展,有力地支撑了中国石化油气增储上产。

1.1 地震勘探技术

1.1.1 东部油区高精度三维地震技术实现工业化生产

东部油区勘探始于 1955 年,至今已走过了 60 多年的勘探历程,整体达到较高勘探程度阶段,油气资源探明程度超过 50%。油气勘探由构造油气勘探转向隐蔽油气藏勘探,岩性地层油气藏等已占新增储量的 60% 以上。针对东部油区圈闭目标小、储层薄、地质体复杂的特点,发展形成了“健全波场、全

过程保幅”的高精度三维地震技术^[1],并在东部油区进行了推广应用,油气勘探取得了明显效果。“十二五”期间,东部油区高精度三维地震勘探面积累计达 $8\,404 \text{ km}^2$,新增探明储量和控制储量 $19.6 \times 10^8 \text{ t}$,为东部老油区的产量“硬稳定”起到了关键性支撑作用。

通过应用高精度三维地震技术,济阳拗陷地震资料频带拓宽 $8 \sim 23 \text{ Hz}$,分辨率明显提高,深层地质目标成像更加清晰,带动了地震资料解释精度的不断提高:储层预测深度误差由 5.00%~10.00% 减小至 3.75%;储层厚度预测误差由 10%~20% 减小至 10% 以下;河流相砂体预测吻合率由 79% 提高到 87%;浊积砂体符合率提高了 20%;滩坝砂岩钻探成功率达 93%。岩性地层及复杂小断块等隐蔽油气藏领域相继获得 10 个规模商业发现,发现 5 个 $5\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 规模增储区。

苏北盆地通过应用高精度三维地震技术,实现了从常规勘探向高精度立体勘探转变、从构造高带向两侧和外缘拓展、从整装富集油藏向断块群规模油藏转移、从热点地区向有利的低勘探程度地区转移的局面,岩性上倾尖灭、湖底扇等隐蔽油气藏勘探取得重大发现,相继发现了邵伯、俞垛-华庄、曲塘等 6 个千万吨级储量区块。

1.1.2 黄土塬三维地震勘探技术取得突破

鄂尔多斯盆地是我国西部地区的富油气盆地,中国石化在鄂南地区中生界拥有石油资源量达 $15 \times 10^8 \text{ t}$ 左右。由于地处黄土塬地区,表层巨厚的黄土干燥疏松,激发和接收条件差,地震波衰减严重,地震成像质量差。为此,开展了以黄土塬区高效激发技术为核心的黄土塬三维地震勘探技术攻关,建立了黄土塬区地震采集与处理技术体系方法与流程,形成了以黄土塬区精细静校正、叠前保幅去噪技术为代表的黄土塬地震处理技术体系,获得了主频 38 Hz 以上、满足 15 m 厚度砂体预测要求的地震数据资料,有效支撑了鄂南致密油的高效勘探开发。“十二五”期间,中国石化在鄂南多层系取得石油勘探重大突破,发现了中国石化最大的低渗透致密油田——红河油田,新增探明、控制储量 $3 \times 10^8 \text{ t}$ 以上。

1.1.3 准噶尔盆地北缘山前带三维地震勘探技术取得新进展

山前带油气勘探具有地表及地下构造复杂的特点。为此,在准噶尔盆地北缘的哈山地区,在地震采集方面,通过充分调研地表条件,按照“分片激发方

式一致”、“可操作”和“单炮记录高质量”三原则,因地制宜选择激发方式,最大程度地发挥井炮和可控震源的各自优势,提高资料品质,发展形成了井震联合激发技术。在地震处理方面,形成了基于特征层约束的融合层析建模和多 GPU 协同的叠前逆时深度偏移高效处理 2 项技术,即针对复杂地下构造解释难题,形成多元标定明结构、断裂识别定格架、理论指导建模式、正演模拟搞优化和综合手段建模型的解释方法。通过复杂山前带三维地震技术攻关,在哈山地区的浅层超剥带、中深层冲断带、外来推覆体连续取得勘探重大突破,落实了亿吨级石油储量,相继发现了春晖和阿拉德油田,打破了该地区 10 多年来油气勘探停滞不前的局面。

1.1.4 储层识别、描述与预测技术取得积极进展

“十二五”期间,中国石化在四川盆地礁滩相勘探中借鉴发现普光气田的经验,在开江-梁平陆棚西侧发现元坝气田^[2-3]。元坝地区长兴组、飞仙关组礁滩相目的层埋深达 7 000 m,比普通光气田深 1 000~2 000 m,具有沉积微相变化快,礁滩相储层横向展布复杂多变,储层厚度相对较薄的特点^[4]。针对上述特点,中国石化进行了技术攻关并取得重要进展:突破了超深弱反射层地震采集处理技术瓶颈,有效提高超深层反射能量和分辨率;形成了“井震互馈、微相建模、等时约束、多元优化”的地震微相和沉积微相精细刻画技术;首创了基于孔缝二元结构模型的孔构参数反演技术,用于预测常规反演无法识别的超深层礁滩相“低孔高渗高速”Ⅲ类储层,大幅度提高了超深层储层预测精度;形成了超深生物礁储层高精度气水识别技术,较好地解决了超深层礁滩相储层气水识别难题。部署在预测高产富集带内的 10 口探井试产均获日产百万方高产天然气流,探井、评价井成功率高达 92.3%。

在塔里木盆地,随着勘探向塔河油田西部地区拓展,针对非均质性极强的缝洞型碳酸盐岩储层,在前期研究与应用的基础上,进一步完善了地震缝洞储层预测技术方法,包括模型正演、振幅变化率技术、相干体技术、地震反射特征分析技术、地震测井联合反演技术、古水系古地貌分析技术、趋势面技术和多属性叠合分析技术等,并创新了叠前时间偏移处理、分频混色和多属性叠合技术。在此基础上,认识到塔河油田西部地区碳酸盐岩储层预测方法存在南北差异性,实现了缝洞空间展布、有效储集空间和溶洞充填性质的有效识别,提高了储层预测精度及

钻探成功率,为塔河油田西部地区勘探突破和规模增储起到了关键支撑作用。

针对川西陆相致密砂岩气藏的地质与地球物理特征,按照“相控找砂、砂中找优、优中找富”的技术思路开展储层预测研究。相控找砂,即应用多域多属性相带空间刻画技术精细刻画河道边界,落实优势相带;砂中找优,即应用叠后多属性非均质刻画和地质统计学反演储层定量预测技术实现相控下的优质储层预测;优中找富,即应用叠后吸收衰减与叠前弹性参数反演流体识别技术开展含气性检测,并结合“储层条件、疏导条件、保存条件”综合预测油气富集区。建立了从宏观到微观、从定性到定量、相带—储层—含气性—甜点逐步逼近的地球物理气藏综合预测技术体系,在此基础上优选储层厚度大、物性好、含气性好区域,通过随钻高精度反演和时深转换实现井眼轨迹全程动态调控,大幅提高了储层钻遇率和钻井成功率。

1.2 超深井钻完井与测试技术

塔里木、四川盆地海相碳酸盐岩油气藏是中国石化油气增储的重要领域,其目的层埋深均超过 6 000 m,目的层上覆岩层岩性多变,既有坚硬的石英砂岩,又有流动性快的盐膏层和高压盐水层;地质构造条件复杂,岩层产状变化快;存在高温、多套压力系统等复杂环境。如何能够优质、安全、快速钻至目的层,并能完成储层改造、测试任务是勘探获得发现的关键。“十二五”期间,中国石化开展了超深井钻完井及测试技术攻关,为塔河外围、塔中北坡、四川盆地元坝、川西海相油气资源的突破发现与探明提供了关键技术支撑。

1.2.1 超深井钻井提速显著,钻井成功率明显提高

在塔里木盆地,针对超深钻井存在的高地应力及膏泥岩蠕变引起井壁失稳导致钻井复杂时效长,奥陶系碳酸盐岩地层易漏失导致钻井时效短,沙井子组含砾砂岩、开派兹雷克组火山岩等地层钻井速度慢等技术难题,经过技术攻关与实践,形成以井身结构优化为核心,以 PDC 钻头优化技术、“PDC 钻头+螺杆”钻井技术、深井固井技术、深井钻井液技术为配套的超深井优快钻井技术,并研发了高效堵漏材料及防漏堵漏技术。与“十一五”末超深井钻井相比,平均钻井周期缩短 15.2%,机械钻速提高 18.9%。

在四川盆地元坝、川西地区,针对超深(7 000 m)、高温(155 ℃)、高压(70 MPa)、高含硫(平均

5.77%)、平面和纵向上物性差异大、完井经济性和安全性矛盾突出的问题,首创特种井身结构、发展非常规井身结构,有效解决了多压力系统地层、复杂地层的封隔难题,并对超深井大井眼气体钻井、高温高压大位移井等钻井技术进行集成创新,有效提高了超深井钻井速度和成功率。川东北地区钻井成功率达到100%,直井平均井深7 024 m,定向井平均水平位移1 000 m。

1.2.2 超深井测试技术取得进展

针对超深探井储层埋藏深、温度高、破裂压力高、高含硫、测试风险高的难点,通过技术攻关,形成了超深、高温碳酸盐岩储层改造技术,主要包括:针对破裂压力梯度大于2.2 MPa/100m储层改造的高破裂压力储层改造技术;通过“水力压裂+酸压”复合改造提高高闭合压力储层长期导流能力的高效复合酸压技术;研制了密度为1.8 g/cm³的抗硫加重酸液体系,大幅提高了压裂后产能;研发出整体式、耐高压FF级采气井口及地面安全联动装置,确保安全环保。

1.3 水平井分段压裂技术

借鉴北美页岩气勘探开发的成功经验,2009年以来,中国石化在开展页岩气地质评价研究的同时,开展了以水平井分段压裂技术为核心的工程技术的引进与核心技术自主攻关。通过技术攻关,水平井分段压裂技术取得重大突破,形成了3 500 m以浅页岩气勘探开发技术系列,并拥有了一批行业标准与技术专利。在水平井分段压裂技术方面,形成了水平井簇射孔、可钻式桥塞、电缆泵送桥塞、连续油管钻塞等配套工艺,实现长水平段缝网压裂,并创出一系列施工纪录:最长水平段2 130 m,最多压裂段数26段,最大入井液量50 783 m³,最大加砂量1 366 m³。在水平井优快钻井技术方面,形成了空气钻、泡沫钻、清水钻、“PDC钻头+螺杆”复合钻等技术,钻完井速度不断加快,涪陵地区单井完井周期已由2013年的平均95 d缩短至45 d;同时,针对中国山地特点,形成了丛式井批量钻井,同步交叉压裂等“井工厂”作业模式,与单井施工相比,施工效率提高50%。在装备工具自主研发方面,研制了适应山地“井工厂”作业环境的步进式、轨道式整体运移钻机、以3000型压裂泵车为代表的配套压裂设备以及各式桥塞等系列井下工具,打破了国外垄断,降低了生产成本。上述技术攻关成果为中国石化成功实现北

美以外地区首个页岩气田——涪陵页岩气田的发现、探明和成功商业开发提供了重要的技术支撑。

1.4 测井录井技术

“十二五”期间,针对日益复杂的勘探开发目标,中国石化不断加强测井、录井资料地质应用的攻关研究,已形成泥页岩、碳酸盐岩、火成岩、致密砂砾岩等复杂储层测井、录井评价技术。在装备自主研发方面,研制了抗高温小直径井下测井仪、电成像仪和脉冲中子能谱仪等关键装备,研发了系列综合录井仪和开发井录井仪,初步搭建起井场信息综合平台。仅2014年,中国石化完成探井测井解释12 451层,录井解释32 802 m(共计4 958层),为准确、及时提供地下地质信息,及时评价、发现油气层及储量申报提供了技术支撑,为老区稳产、新区碳酸盐岩和页岩油气勘探开发突破发挥了重要作用。

2 油气勘探面临的主要挑战

“十二五”期间,虽然中国石化油气勘探取得了快速发展和重大突破,但未来油气勘探还面临着严峻挑战。

1) 寻求石油储量战略接替仍然是未来勘探面临的主要挑战。受地质条件、资源贫富差异、对地下认知能力和资源获取工程能力的制约,“十二五”期间,中国石化石油勘探虽然取得一系列新发现,但导向性大突破、大发现和优质规模商业发现不多,主要集中在3类油藏:以深层、薄互层、低丰度、致密为主的低渗油藏;以薄层、强敏感、底水、超稠等为主的稠油油藏;以塔河缝洞型碳酸盐岩“弱反射区”小型缝洞体为主的特殊类型油藏。“十三五”期间,预计石油勘探发现仍以这3类油藏为主,寻找规模性石油储量接替阵地将是石油勘探面临的重要挑战。

2) 天然气勘探面临着诸多难题,勘探难度大。“十二五”期间,中国石化天然气勘探不断取得大突破、大发现,形成了四川、鄂尔多斯盆地两大规模增储上产区和东海、塔里木盆地两个规模增储潜力区,天然气储量呈现快速增长态势,具备持续大发展的资源条件。但天然气勘探仍面临着诸多难题:陆相领域,存在着油气成藏分布规律认识、储层识别与富集高产带预测以及提高单井产量的工程技术难题;海相领域,存在着超深储层致密化、成藏过程复杂、目标难以识别、工程施工难度大等世界性难题,勘探难度进一步加大。

3) 新增储量品位下降,埋藏深度增加。石油方面,以东部油区为例,新增石油地质储量中低渗、特低渗储量所占比例持续增长,其中新增控制致密油储量所占比例由“十一五”的 26% 增长至“十二五”的 49%,“十二五”期间,新增中低渗、特低渗控制石油地质储量已占新增石油储量的 75%,中深层储量所占比例由“十五”期间的 35% 上升到“十二五”的 57%。天然气方面,新增天然气储量丰度不断降低,新增探明储量丰度由“十五”期间的 $4.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 下降到“十二五”期间的 $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

4) 复杂油气勘探对象与绿色、可持续发展的需求对工程技术提出了更高要求。当前油气勘探正由陆地转向海洋,由平原转向山地、沙漠、高原等条件复杂地区,勘探目标层的深度不断增加、地质条件更加复杂,为确保勘探目标的发现需要高精度、高密度三维地震技术,海量数据的目标处理与特殊处理技术,更深、特殊结构井钻井及更大规模的储层改造技术,石油工程的施工工作量将大幅增加,按照现有的技术水平,施工成本也将相应大幅度增长。与此同时,国际原油市场供求关系发生重大变化,油价正处于低迷期,社会对油气勘探开发的环保要求不断提高。油公司油气勘探开发的绿色、可持续发展对石油工程技术提出了更为苛刻的要求。

3 未来油气勘探主要领域与工程技术攻关需求

根据剩余资源潜力、已有勘探成果、油气分布规律、油气勘探技术准备等综合分析和评价优选研究,“十三五”期间,中国石化油气勘探发展方向主要集中在陆相隐蔽油气藏、海相碳酸盐岩、致密碎屑岩、山前带、火成岩、海域及非常规油气资源等 7 大领域,其中陆相隐蔽油气藏、海相油气藏、致密碎屑岩油气藏是“十三五”期间的重点增储领域,山前带、火成岩油气藏、海域及非常规油气资源将是未来的突破、接替领域。

3.1 陆相隐蔽油气藏领域

陆相隐蔽油气藏领域以东部陆相断陷盆地中新生代为代表,东部陆相断陷盆地是我国主要石油生产区,已相继在松辽、渤海湾等盆地发现一批特大型油田。东部陆相断陷盆地勘探始于 1955 年,目前在油气成藏认识、勘探部署思路、技术方法等方面已相对成熟,断陷盆地探明程度超过 50%,已由构造圈

闭勘探进入隐蔽油气藏勘探阶段,但仍具有年均新增石油储量 $1.0 \times 10^8 \text{ t}$ 的潜力,是“十三五”期间中国石化石油增储的重点领域。陆相隐蔽油气藏重点增储领域主要为断陷盆地斜坡带、洼陷带、复杂断块以及潜山。

陆相隐蔽油气藏的主要勘探难点为:1) 勘探目标更加隐蔽复杂。以济阳拗陷为例,在富油凹陷内仍存在大面积的储量空白区,获得油气发现的可能性极高,但该空白区多处于构造结合部、沉积相变带、地层超剥复杂区域,现有勘探技术难以满足需求。2) 勘探目的层不断加深。济阳、东濮、苏北等地区断陷盆地勘探已转向斜坡带、洼陷带岩性、地层圈闭以及潜山,深层地震面临着进一步提高地震资料空间分辨率、成像精度方面的技术挑战。3) 储量品位下降、技术经济性变差。中低渗透储层、薄砂体岩性地层以及地层-岩性圈闭占有较大比例,针对低渗透复杂地质体精细描述和评价、大幅度提高油气产能的井筒关键技术急需攻关。

陆相隐蔽油气藏工程技术主要攻关方向为:1) 针对深部地层复杂地质体三维地震采集、处理解释技术;2) 复杂岩性区、复杂断块区、复杂超剥区的精细地质建模和储层预测技术;3) 复杂断块、薄互层砂体及大位移井随钻地质导向与精细控制技术;4) 低渗透、致密砂岩储层改造及油层保护综合配套技术;5) 滩海区复杂储层改造及试油工艺技术。

3.2 海相碳酸盐岩油气藏领域

我国海相碳酸盐岩分布面积约 $450 \times 10^4 \text{ km}^2$,根据新一轮油气资源评价,海相碳酸盐岩储层油气资源量为 $380 \times 10^8 \text{ t}$ 油气当量,占我国油气资源量的 34%。我国在海相碳酸盐领域已连续发现了塔河、塔中、轮古、哈拉哈塘、任丘等亿吨级油田,以及靖边、普光、元坝、安岳等千亿方级气田。截至 2014 年,我国在海相碳酸盐领域累计石油探明储量 $25.7 \times 10^8 \text{ t}$,占全国石油探明储量的 7.5%,累计天然气探明储量 $2.95 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全国天然气探明储量的 27%。海相碳酸盐岩领域油气探明率仅为 15%,油气勘探仍有较大潜力。

中国石化海相碳酸盐岩领域油气资源量为 $193 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,其中石油 $81 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气 $11.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,“十三五”期间具备年均新增石油储量 $(3\ 000 \sim 5\ 000) \times 10^4 \text{ t}$ 、天然气储量 $(500 \sim 1\ 000) \times 10^8 \text{ m}^3$ 的潜力。塔里木、四川、鄂尔多斯西部三大盆地深层广泛分布的海相地层是油气勘探的重点,南

盘江、黔南桂中、楚雄、青藏等海相地层分布区是进一步探索的地区。

海相碳酸盐岩领域主要勘探难点为:1)勘探目的层埋藏深,勘探成本高,周期长。我国海相碳酸盐岩的时代老,主要以下古生代为主^[5]。塔里木、鄂尔多斯、四川和渤海湾盆地的目的层埋深多超过6 000 m,在现有技术条件下钻井周期长,成本高。例如,塔中北坡地区钻井成本高达1.7万元/m,单井投资均在1亿元以上。2)经历多期构造改造,储层非均质性强,储层目标识别难。中国大陆是由多个小陆块组成,从古生代至今,已经历了多期碰撞、拼合。古老的海相碳酸盐岩地层经历了多期构造叠加,也经历了多期、多类型的成岩改造作用,导致储层类型多,非均质性强,现有的地震识别技术难以满足勘探需求。3)高温、高压环境对钻井、测井、储层改造、测试技术提出更高要求。以塔中的顺托地区为例,勘探目的层奥陶系埋深达到6 000~8 000 m,地层压力172 MPa,地层温度207℃,现有的测井、测试设备已经难以满足需求。

海相碳酸盐岩油气藏领域工程技术攻关方向为:1)复杂地区超深层碳酸盐岩高精度三维地震采集、处理和解释技术;2)超深层定向井、水平井优快钻井技术;3)高温、高压、易漏、易窜地层高效固井技术;4)高温、高压条件下测井、测试技术;5)高温、高压条件下储层酸化改造技术。

3.3 致密碎屑岩油气藏领域

我国拥有丰富的致密碎屑岩油气资源,根据2010年全国动态资源评价结果,我国四川、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、塔里木、柴达木、准噶尔等盆地致密碎屑岩有利勘探面积 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$,致密砂岩气可采资源量 $(9 \sim 12) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、致密油可采资源量 $(9.8 \sim 12.0) \times 10^8 \text{ t}$ 。中国石化拥有致密砂岩气资源 $2.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在四川、鄂尔多斯、塔里木等盆地,已探明致密砂岩气储量中,地层渗透率 $<1.0 \text{ mD}$ 的探明储量为 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,地层渗透率 $<0.1 \text{ mD}$ 的探明储量为 $2.512.54 \times 10^8 \text{ m}^3$;拥有致密砂岩油资源 $51.6 \times 10^8 \text{ t}$,主要分布在松辽、渤海湾、塔里木、准噶尔、南襄、江汉和苏北等盆地,已探明地层渗透率 $<5.0 \text{ mD}$ 的致密砂岩油储量为 $8.0 \times 10^8 \text{ t}$,探明程度较低。随着勘探开发技术进步,“十三五”期间致密砂岩油气资源将成为中国石化重要的增储上产领域。

致密碎屑岩油气藏的主要勘探难点为:1)储层

非均质性强,“甜点”识别技术尚未成熟。我国致密碎屑岩储层多为海陆过渡相、湖相三角洲、陆相河道、冲积扇沉积,具有砂体厚度相对较薄、横向变化快的特点。同时我国致密砂岩发育区多经历晚期构造运动,致密储层甜点主要为砂体与裂缝发育的叠加区,相关的裂缝预测、薄砂体识别技术等针对性“甜点”识别技术须进一步攻关。2)砂体厚度小,横向变化快,需确保水平井眼能准确的在厚度小、横向变化快的砂体中穿行,这对水平井井眼轨迹控制技术提出了更高要求。3)油气藏压力、气水关系复杂对测井识别技术带来挑战。我国致密碎屑岩油气压力系数变化大,存在超压、负压情况,且油气水分布复杂,砂体中普遍含水。如何准确识别油气层,是当前测井面临的主要难题。4)深层致密砂岩储层改造难度大。例如,川西须家河组致密砂岩油气藏由于位于龙门山前带,地层处于异常高压区,储层岩性以致密石英砂岩为主,地层破裂压力高,储层改造难度大。

致密碎屑岩油气藏领域工程技术攻关方向为:

1)致密砂岩油气藏的地球物理“甜点”识别技术;2)陆相致密砂岩水平井、定向井井眼轨迹控制技术;3)致密砂岩定向井、水平井优快钻井技术;4)深层高破裂压力、复杂致密储层改造技术;5)低成本直井多层压裂技术、低成本水平井分段加砂压裂技术及酸化压裂技术。

3.4 山前带油气藏领域

我国中西部地区发育山前冲断带15个,石油资源量 $78.7 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气资源量 $9.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。自1998年发现克拉2气田、青西油田等大型油气田以来,陆续在库车、塔西南、准西、吐哈北缘、柴西、川北、川西等山前冲断带取得重要油气勘探进展,累计石油探明储量约 $20 \times 10^8 \text{ t}$ (探明率25%)、天然气探明储量 $1.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (探明率11%)。近期中国石化在准西北缘哈山地区、龙门山等山前带雷口坡组地层取得重大油气发现,展示了良好的勘探前景。“十三五”期间主要勘探领域为龙门山、准北缘、米仓-大巴、天山南及淮南缘等山前带地区。

山前带油气藏的主要勘探难点为:1)如何获取高质量地震成像资料是制约山前带勘探突破的关键。由于山前带往往处于山区,地形条件复杂,地震波场十分复杂,地震资料信噪低,成像质量差,因此地震技术攻关是山前带油气勘探突破的核心。在已经取得勘探突破的山前带地区,均为通过地震技术攻关取得了高质量的地震成像资料,为圈闭的准确

识别奠定了坚实基础。2) 钻井面临地层产状复杂、破碎、漏失、高压等难题。3) 储层改造面临高压、裂缝发育等不确定因素。4) 由于地表及地下条件异常复杂, 导致工程施工投资大, 风险高。

山前带油气藏领域工程技术攻关方向为: 1) 复杂地表及地质条件下的地震采集、处理和解释技术; 2) 针对深层、高陡、高研磨地层的优快钻完井技术; 3) 针对破碎性、裂缝性及窄密度窗口地层的安全钻完井技术; 4) 复杂地质条件下测井评价技术; 5) 深层高破裂压力、复杂储层改造技术。

3.5 非常规油气资源领域

3.5.1 页岩气

我国拥有海相、陆相、海陆过渡相多个类型的富有机质页岩, 页岩气资源丰富。2012年3月1日, 国土资源部公布中国页岩气地质资源量 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可采资源量 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。同年, 中国工程院认为我国页岩气可采资源量为 $(10 \sim 13) \times 10^{12} \text{ m}^3$ [6]。中国石化矿权区内的页岩气可采资源量 $7.23 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中四川盆地及周缘可采资源量 $3.97 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (埋深 3 500 m 以浅页岩气可采资源量 $2.58 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 埋深 3 500~4 500 m 页岩气可采资源量 $1.39 \times 10^{12} \text{ m}^3$), 占比 55%。目前, 中国石化已在 3 500 m 以浅具有高地层压力系数的涪陵焦石坝地区成功实现了页岩气的商业化开发, 并形成了以水平井分段压裂技术为主的配套石油工程技术体系 [7]。“十三五”期间, 页岩气主要增储上产领域包括川东南、川南-川西南地区下志留统及下寒武统海相页岩, 突破领域包括四川盆地陆相、海陆过渡相页岩, 南方地区海相地层。与北美页岩气相比, 我国海相页岩具有热演化程度高、经历多期构造改造的特点; 陆相页岩具有非均质性强、有机质丰度偏低、热演化程度偏低和黏土含量偏高的特点。

页岩气的主要勘探难点为: 1) 盆地内地层压力系数高的海相页岩有利区多处于 3 500 m 以深的深层、超深层, 与之相适应的工程技术尚需攻关; 2) 3 500 m 以浅海相页岩受后期改造作用影响, 保存条件相对较差, 大多数地区地层压力系数为常压, 页岩气产量相对较低, 如采用现有工程技术, 过高的成本制约了常压页岩气的勘探; 3) 陆相页岩非均质性强, 页岩气产量递减快, 目前尚未形成适应性开发技术。

页岩气领域工程技术攻关方向为: 1) 多类型泥页岩“地球物理甜点”预测技术; 2) 复杂构造条件下

水平井井眼轨迹控制技术; 3) 深层、超深层水平井分段压裂技术; 4) 绿色、低成本水平井分段压裂技术; 5) 微地震裂缝监测等压裂监测技术。

3.5.2 页岩油

页岩油资源是我国未来重要的石油接替资源, 我国页岩油资源主要分布在松辽、渤海湾等东部陆相断陷盆地和西部的准噶尔、四川、鄂尔多斯等大型盆地的中生代湖相页岩, 初步估算页岩油可采资源量大约为 $(30 \sim 60) \times 10^8 \text{ t}$ [8]。中国石化探区初步估算页岩油地质资源量为 $85.43 \times 10^8 \text{ t}$, 可采资源量 $6.44 \times 10^8 \text{ t}$, 主要分布在东部断陷盆地中生代和四川盆地中生代地层。“十二五”期间, 中国石化应用水平井分段压裂技术对泌阳凹陷、东营凹陷等地区的页岩油资源进行开发, 但尚未取得商业性发现。“十三五”期间, 中国石化页岩油重点勘探领域为泌阳凹陷核 3 段、沾化凹陷(沙 1 下、沙 3 下)及东营凹陷(沙 3 下、沙 4 上)湖相页岩 [9]。

页岩油的主要勘探难点为: 1) 湖相泥页岩非均质性强, 黏土矿物含量高; 2) 有机质成熟度较低, 原油密度高、黏度大; 3) 采用现有水平井分段压裂技术进行开发, 初期有较高产量, 但产量递减快, 难以取得规模性商业发现; 4) 适应湖相页岩油开发的配套工程技术还有待进一步攻关。

页岩油工程技术攻关方向为: 1) 页岩油“地球物理甜点”综合预测技术; 2) 低成本水平井分段压裂技术; 3) 无水压裂等新型压裂技术; 4) 原油原位降黏技术。

3.6 火成岩油气藏领域

勘探实践表明, 紧邻沉积盆地生烃凹陷受裂缝、风化等作用改造的火成岩储层, 具备有利成藏条件, 是油气勘探的重要领域。我国火成岩油气勘探历史已超过 50 年, 先后在渤海湾盆地辽河东部凹陷、松辽盆地深层、准噶尔盆地发现了徐深、克拉美丽等一批亿吨级规模的油气田。研究认为, 我国火成岩分布面积广, 预测有利勘探面积为 $36 \times 10^4 \text{ km}^2$, 火山岩总的油气资源量在 $60 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量以上 [10]。目前我国火成岩勘探领域有准噶尔盆地石炭系一二叠系、松辽盆地侏罗系—白垩系、三塘湖盆地石炭系一二叠系和渤海湾盆地侏罗系—古近系火山岩; 接替领域有塔里木盆地二叠系、吐哈盆地石炭系一二叠系和四川盆地二叠系火山岩等。在中国石化矿权区内, 松南深层、准噶尔、渤海湾、塔里木盆地都存在火

成岩储层发育的有利区,是未来油气勘探重要的接替领域。

火成岩油气藏的主要勘探难点为:1)火山爆发类型多,火山岩相及火山岩储层叠置方式十分复杂。通过地球物理技术攻关,目前可以较好地识别火成岩体的轮廓,但是火成岩体内部储层变化规律描述、储层物性预测、裂缝及孔隙发育区预测、含油气富集区预测等技术还没有完全突破。2)火成岩类型多,岩石结构、构造复杂,储集空间多样化,有效储层测井评价技术尚未成熟。3)火成岩储层岩石坚硬、可钻性差,钻井提速难度大。4)火成岩储层岩石抗压、抗拉强度大,储层孔、洞、缝的发育程度和连通程度差别大,火成岩储层改造存在施工压力高、流体滤失量大、砂堵概率高等难题。

火成岩油气藏领域工程技术攻关方向为:1)火成岩体储层地震、非震综合地球物理识别技术;2)火成岩体裂缝识别技术;3)火成岩有效储层测井评价技术;4)火成岩快速钻井技术;5)火成岩储层改造技术。

3.7 海域

中国海域拥有各类沉积盆地 26 个,面积为 $161 \times 10^4 \text{ km}^2$,具有广阔的油气勘探前景。我国海域油气勘探始于 20 世纪 50 年代,至今已发现商业性油气田 163 个,累计探明石油地质储量约 $40 \times 10^8 \text{ t}$,探明率为 20.4%;累计探明天然气地质储量 $8\,365 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明率为 7.3%;初步估算我国天然气水合物远景资源量为 $116 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[6],主要分布在东海、南海地区。

中国石化海域探区主要分布在东海陆架、琼东南、北部湾、南黄海等盆地,面积达到 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,近期在北部湾、东海陆架取得了油气新发现,展示了海域探区良好的油气勘探前景。“十三五”期间,中国石化海域油气勘探重点增储地区为东海盆地西湖凹陷及北部湾,重点突破地区为琼东南,重点准备地区为东海南部及南黄海等。海洋油气勘探开发具有高风险、技术密集等诸多特点,勘探装备和技术对勘探发现和效益起着至关重要的作用。

海域油气勘探的主要难点为:1)中国石化在滩海、浅海技术装备拥有一定能力,但需进一步完善配套;2)海域油气勘探正在由浅水向中、深水拓展,对勘探设备、技术提出了更高要求;3)天然气水合物等新型资源勘探技术尚未形成。

海域油气勘探工程技术攻关方向为:1)配套、完

善滩海、浅海领域装备、技术体系;2)形成具有中、深水勘探能力配套技术与装备;3)开展天然气水合物勘探配套技术的前期预研究。

4 结束语

全球石油工业的发展表明:工程技术的每一次革命,都伴随着全球油气产量和储采比的一个大的飞跃。近年来高精度三维地震、水平井分段压裂等工程技术的进步,正在引领全球第四次石油技术革命,并促进了勘探思维大转变^[11-12]。当前油气勘探正呈现出 8 大转变:从储油层到生油层,从局部圈闭到大面积、全盆地,从构造、岩性油气藏到常规、非常规油气聚集,从高点找油气到下凹(洼)勘探,从优质储层到多类型储层,从中、深层目标到中、深层、超深层目标,从高、中品位油气资源到高、中、低品位油气资源,从滩浅海、中深水域到浅海、中深水域乃至深海等。石油工程技术将是实现转变的重要保障,面对中国石化未来油气勘探开发的诸多难题,亟需消化吸收先进石油工程技术并重点开展以下 3 方面的技术攻关:

1) 物探技术。主要包括提高地震勘探精度的高密度、宽方位、宽频带地震采集技术,面向复杂地表、复杂构造、复杂储层的偏移成像处理技术,满足致密砂岩、碳酸盐岩礁滩相和缝洞储层的识别与评价技术,针对地层物性和流体预测的多波多分量三维地震勘探技术、时延地震技术、井中地球物理技术,面向非常规页岩气勘探的岩石物理测定与分析技术、“甜点”预测技术和微震压裂监测技术。

2) 井筒技术。主要包括面向非常规油气藏及低效市场的高效钻完井及改造技术,针对断块、薄互层及大位移井的随钻地质导向与精细控制技术,针对破碎性、裂缝性及窄密度窗口地层的井筒信息一体化融合的安全钻完井技术,针对深层、高陡、高研磨地层的优快钻完井技术,针对高温、高压、易漏、易窜地层的高效固井技术,中深水钻完井技术,针对深层、超深层碳酸盐岩储层的高效、环保压裂酸化技术,超深层、超高温高压条件下的测试与解释技术。

3) 测井、录井技术。主要包括针对超高温、超高压、特殊钻井工艺等复杂井况条件的测井技术,具备实时性和较强地层评价能力的随钻测井技术,满足复杂储层探测和描述的成像测井以及井间剩余油动态监测技术,基于井旁特征评价、流体性质识别、产能评价的综合评价技术及智能软件,满足储层改

造需求的高效清洁射孔技术系列,针对非常规油气藏等复杂地质体的岩性、流体参数采集评价技术,基于综合解释评价技术的一体化软件平台,集随钻地层压力评估、流体分析、工程监测于一体的高端综合录井仪。

上述工程技术攻关,不仅是中石化,也是国际油气勘探中面临的亟需解决的工程技术难题。不断扩大深层、非常规、深水等油气勘探开发新领域,实现降本增效和绿色低碳是石油工程技术面临的新要求和发展新趋势。与此同时,通用科学技术飞速发展,新材料、新工艺、新技术不断涌现,信息、制造、材料、控制等学科的技术成果消化吸收—移植应用—有机融合于石油工程领域,为石油工程技术创新提供了捷径。石油工程技术正在向信息化、实时化、智能化、集成化和绿色化方向发展,为未来油气勘探新领域不断拓展继续发挥重要技术支撑作用。

参 考 文 献

References

- [1] 赵殿栋. 高精度地震勘探技术发展回顾与展望[J]. 石油物探, 2009, 48(5): 425-435.
ZHAO Diandong. Review and prospect on high-precision seismic exploration technique[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(5): 425-435.
- [2] 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 477-480.
MA Yongsheng, GUO Xusheng, GUO Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang Gas Field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting[J]. Geological Review, 2005, 51(4): 477-480.
- [3] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 347-354.
- [4] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 元坝气田长兴组—飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1001-1011.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1001-1011.
- [5] 马永生. 中国海相碳酸盐岩油气资源、勘探重大科技问题及对策(摘要)[J]. 海相石油地质, 2000, 5(1/2): 15.
MA Yongsheng. China's marine carbonate oil and gas resources, exploration important technology problems and countermeasures[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2000, 5(1/2): 15.
- [6] 谢克昌, 邱中健, 金庆焕, 等. 中国非常规天然气开发利用战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 8-12.
XIE Kechang, QIU Zhongjian, JIN Qinghuan, et al. Strategy research of China's unconventional gas development and utilization[M]. Beijing: Science Press, 2014: 8-12.
- [7] 马永生, 冯建辉, 牟泽辉, 等. 中石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 22-30.
MA Yongsheng, FENG Jianhui, MOU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in SINOPEC[J]. Engineering Science, 2012, 14(6): 22-30.
- [8] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [9] 张林峰, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩油可动性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 641-649.
ZHANG Linye, BAO Youshu, LI Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: a case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 641-649.
- [10] 张光亚, 邹才能, 朱如凯, 等. 我国沉积盆地火山岩油气地质与勘探[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 30-38.
ZHANG Guangya, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Petroleum geology and exploration for volcanic reservoirs in the sedimentary basins of China[J]. Engineering Science, 2010, 12(5): 30-38.
- [11] 邱中建, 邓松涛. 中国油气勘探的新思维[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊1): 1-5.
QIU Zhongjian, DENG Songtao. New thinking of oil-gas exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(supplement 1): 1-5.
- [12] 翟光明, 王世洪, 何文渊. 近十年全球油气勘探热点趋向与启示[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊1): 14-19.
ZHAI Guangming, WANG Shihong, HE Wenyuan. Hotspot trend and enlightenment of global ten-year hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(supplement 1): 14-19.

[编辑 陈会年]