



□本报记者 程强 秦紫函

疫情三年,很多领域似乎停下了步伐,但我国油气业界对陆相页岩油的研究和实践从未停歇,并在全多地取得重要突破:从西北准噶尔盆地的芦草沟组到东北松辽盆地的青山口组,从渤海湾盆地的济阳坳陷到北部湾盆地的涠西南凹陷,从中原大地的古近系到青藏高原的古—新近系,从鄂尔多斯盆地的规模建产到华东地区的战略突破……页岩油勘探开发成果如同繁星点点,众星拱月般的新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳三个页岩油国家级示范基地陆续启动建设。



华东油气员工在组装页岩油井射孔枪。
沈志军 摄

我国页岩油资源潜力巨大、勘探成绩喜人

“中国陆相页岩油革命已呈燎原之势!”中国工程院院士孙龙德3月3日在中国陆相页岩油勘探开发关键技术与管理研讨会上感慨。

专家介绍,我国页岩油分布层系多、范围广,资源潜力巨大。据“十三五”全国资源评价,我国中高成熟度页岩油资源量达283亿吨,加快推动页岩油勘探开发,对保障国家能源安全和石油工业长远发展具有重大战略意义。

资源潜力巨大,勘探开发难度也巨大。北美页岩油气储层沉积环境以海相为主,面积大,有机质含量高,成熟度高,油气丰度高,可压裂性强,开发成本低。而我国页岩油以陆相沉积为主,面积相对小,在形成机理、赋存状态、富集规律、资源潜力等方面差异显著。因此,中国陆相页岩油勘探开发不能复制北美地质理论、照搬其工程技术。

多年来,我国各油气田企业强化基础研究,深化对页岩油形成机理和富集规律的认识,加强地质工程一体化攻关,均形成了适合自身页岩油藏特点的“甜点”精细描述技术、大井从水平井优先快钻完井技术、缝网复杂程度最大化的体积压裂模式,适应地下地面要求的特色工厂化作业模式,合理的页岩油井排采生产制度,在多个盆地实现重大突破。

在鄂尔多斯盆地,长庆油田发现了10亿吨级庆城大油田,2022年页岩油产量达221万吨,完全成本控制在55美元/桶左右,规划2040年年产量突破500万吨。

在松辽盆地,劳苦功高的大庆油田已累计产油24.63亿吨,主体油田进入“后油藏”开发阶段。古龙凹陷页岩油则为这个老油

田注入了青春活力:平面连续分布、纵向立体富油,目前已在不同层系、不同成熟度、不同类型页岩油均获得勘探突破,估算页岩油总资源量达数百亿吨。

在准噶尔盆地,新疆油田优选吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为突破口,历经探索发现、先导试验、动用突破、扩大试验四个阶段,建成了陆相页岩油田。目前,吉木萨尔凹陷页岩油年产量61万吨。

在渤海湾盆地济阳坳陷,胜利油田创建济阳页岩油“有机控烃、无机控储、源储一体、二元耦合”二元富集模式,部署实施首个立体开发试验井组樊平1井组(3层楼),目前井组稳定日产油295吨。依托国家级示范区建设,他们实现3层楼到5层楼的突破,部署了9层楼立体评价试验,正对陡坡深陷带巨厚型探索16层楼立体开发。

在渤海湾盆地黄骅坳陷,大港油田沧东5号开发先导试验区9口井平均单井EUR(最终累计采出量)3.51万吨,实现油价50美元/桶下效益开发。该油田规划利用5~7年,部署水平井188口,新建年产能198万吨,年产页岩油100万吨。

在柴达木盆地,英雄岭凹陷是“高原巨厚强改造型”页岩油,其生油条件好,储集性能优,沉积厚度在1000~2000米,估算页岩油资源量21亿吨。青海油田部署的柴平1井257天累计产油1.3万立方米、气159万立方米,实现战略性突破。

在苏北盆地,江苏油田针对高邮凹陷阜二段页岩油勘探重点有利区部署探井,取得页岩油勘探突破,其中,针对阜二段IV亚段部署的花2侧HF井日产油超50吨,累计产油1.1万吨。



华东油气页岩油井沙深2井场。
沈志军 摄

我国陆相页岩油革命呈燎原之势

阅读提示

我国页岩油分布层系多、范围广,资源潜力巨大,但以陆相沉积为主,面积相对小,在形成机理、赋存状态、富集规律、资源潜力等方面与北美海相页岩油差异显著。为助推我国页岩油规模效益开发,3月2日~3日,中国石油学会石油工程专业委员会在西安举办中国陆相页岩油勘探开发关键技术与管理研讨会,两院院士、油田专家、高校学者等700余位参会代表,围绕“交流共享,直面挑战,实现突破”主题,深入交流探讨陆相页岩油基础地质理论研究、勘探开发技术创新与管理创新。本版择要报道。

国内外页岩油高效勘探开发的启示

启示1

地质工程一体化是高效勘探必由之路

页岩油如同致密的磨刀石,油气都蕴藏在其中的微纳米孔隙中,要开采出来,就要把这些孔隙打开,和井筒构建一条条渗流通道,国内外通常采用体积压裂技术构建复杂缝网。

虽然都叫作页岩油,但每个盆地的页岩油都不一样,储层情况也是天差地远,效益开发的“临门一脚”——压裂面临的难题也不尽相同,这就需要强化地质工程一体化攻关,找到地质、工程“双甜点”,有针对性地研发压裂技术、优化开发参数。

条件极佳的古龙页岩油,也有自己的难题:

岩石软,应力差小,多页理,易形成“丰”字形缝网,具有“千层小薄饼”结构特征,纵向差异大,地质“甜点”与工程“甜点”分异。在多因素控制下,裂缝扩不高、延不远。基于此,科研人员开展地质工程协同优化,形成“逆混合施工+高黏主液+大粒径支撑+二氧化碳前置+段内少簇”压裂主体工艺。

中国工程院院士刘合说,工程改造必须结合地质模型,实现单井—平台地质工程协同优化。地质模型实时迭代为工程改造提供了精确地质模型。古龙坳陷仅新增48口井,新迭代地质模型中岩相体积分占比变化就在9%~262%。

相比之下,胜利油田的济阳页岩油则以中

低成熟度为主,原油黏度高,难以流动,规模效益开发面临四大难题:如何大幅度提高流动能力、改造体积、原油置换率和单井EUR。

对此,胜利油田强化地质工程一体化攻关,突破中低成熟度页岩油流动性差的认识,发现原始孔—缝网络发育,增压可进一步扩缝提渗,大幅提高济阳页岩油的流动性;提出二氧化碳复合前置酸强起裂+密切割变黏强扩展的思路,扩大人工裂缝控储体积;提出复杂缝网与高压协同强化渗吸的认识,让更多的压裂液置换原油,有效降低含水率;提出大液造高压补能、精细控流压减敏的认识,部分解决了页岩油产量递减过快、高产时间过短的难题。

启示2

开发试验是技术创新的源泉

加拿大都沃内项目位于西加盆地西部边缘,主力层系为泥盆系都沃内页岩,中国石油2012年进入,2020年成为作业者,开发重点为富含液烃的中高成熟度区带。2022年,该项目产气5亿立方米,凝析油27万吨。

该项目成功的因素有很多,包括利用北

美及时、准确和全面的数据系统实现地质、工程数据共享,10年间单井每米EUR提高48%,每米钻完井成本降低62%;运用市场化机制降低运行成本;提高井筒质量,采用提高套管钢级、增加水泥环厚度等措施消灭套变等。此外,很重要的一条就是开展现场先导试验。目前,北美在多个产区开展现场试验,多数注天然气,部分油公司即将开始现场规模应用。

刘合指出,开发试验是技术创新的源泉,要重视压裂后评估,优化完善配套技术。地下摸不着看不见,压裂情况究竟如何,当前任何一种裂缝监测或模拟方法对认识裂缝形态都存在不确定性,只有综合设计、实施、开发、试验多种手段,才能了解地下真实情况。

中国工程院院士袁士义建议:要尽可能早地补充地层能量,以提高采收率,同时要试验应用气体压裂技术。

启示3

施工参数并非越大越好

西南石油大学副校长郭建春指出,当前体积压裂存在的问题是:裂缝密度和改造体积显著提升,加砂强度提升了2~3倍,但EUR仅增加1.13倍,规模与产量不匹配。

郭建春带领团队发现压裂后大量支撑剂堆积在主裂缝,分支缝进液不进砂,有效支撑体积小;支撑剂平面上输送距离短,纵向上快速沉降在裂缝下部,且砂堤稳定性差。因此,他们研发压裂全缝支撑剂高效铺置技术,已应用近50井次,平均单井产量提高10%~50%。

事实上,油气业界已充分认识到:参数并非越大越好,合理匹配才能收到最好效果。

在古龙页岩油,团队认识到,合理有效的液量是增强压裂效果的保障,单段液量在3000立方米内,裂缝长度随液量增大逐渐增长,但增长速度逐渐减慢,最终缝长趋于平稳。压裂中,缩小簇间距有利于制造复杂缝网,但水平方向渗透性强,不能一味缩小簇间距,簇间距达到一定界限,缩小簇间距仅提高前期采油速度,EUR并未提升。

页岩气开发中,水平段长度不断刷新纪录。但长庆油田发现,当水平段大于1500米后,钻遇无效进尺增加,后期维护治理难度大,他们

因此将水平段长度由1500~2000米优化为1500米。

水平井井距井型也是重要一环。加拿大都沃内项目基于微地震、示踪剂、生产动态分析,定量表征井间干扰强度,发现200米井距的干扰强度为11%~19%、300米井距干扰强度为5%~9%,因此优化井距为300米。实施后,300米井距单井首年累计产油气比200米井距单井提高40%,与400米井距单井产量相近,表明在目前技术条件下,300米井距较为合理。

值得借鉴的是,他们优化平台为双排反向勺形布井模式,既节省平台数,又减少双排间储量动用“死气区”。

启示4

“甜点”评价并非参数越高越好

在加拿大都沃内项目,地质“甜点”评价主要关注TOC(总有机碳)指标——高TOC就是甜点段。该项目主要开发中高成熟度页岩,区带油气比高、油质轻、压力系数高、流动性好。

中国工程院院士赵文智指出,中高熟页岩油是已经形成的油气在烃源岩中的滞留,赋存环境富含黏土矿物,流动通道以微纳米孔隙为

主,结构复杂,这就决定了并非所有滞留烃都可以流出地层。因此,应高度关注滞留烃流动性与流动量评价。

页岩油富集区/段的评价包括决定滞留烃数量充分性的物质基础、决定经流出的流动性、增益经流动性与流动量的储层品质三方面评价,应分类建立评价参数及标准,以指导有利钻探靶体选择。

与常规油藏不同,页岩油藏要关注每一口井的经济性。页岩油经济开发需要三个

条件:单井日产须达到经济门限以上、单井EUR须达到能收回投资以上、甜点区规模能支撑建成最小经济产量并有6~8年稳产期。

页岩油经济可采需要三要素兼备:滞留烃数量要足够大,可动烃数量要大、地层能量场与生产制度合理稳定。

页岩油可动经评价需抓住三个重点:形成滞留烃的物质基础既要足量又要适量,保持滞留烃最大流动量的条件既要优质又要配套、页岩油富集段既要分类评价又要建立不同标准。

启示5

以“上帝视角”审视地下资源

页岩革命的意义不仅在于油气产量的大幅提升,它对油气勘探开发理念也是一次深度革命。页岩从生油变为产油,启发地质工作者们以“上帝视角”审视地下资源——在烃源岩层系中的滞留烃即为页岩油,经过二次运移到致密储层形成致密油,运移到常规储层则形成常规油,这就催生了新的全油气系统地质理论。

经典石油地质学理论的关键要素是生、

储、盖、运、保、区带富集;找油思路是由源到圈、圈闭找油。全油气系统地质理论的关键要素则是源储一体、自我封闭、常非有序分布;找油思路是源储耦合、成因找油。

如准噶尔盆地玛湖凹陷就是常规—非常规油气有序共生,风城组滞留烃形成页岩油,原油向上依次充注形成致密油、常规油。

全油气系统地质理论在北疆二叠系超级盆地得到深度实践。上世纪80年代,在吉木萨尔凹陷按照常规思路,发现了吉7规模稠油油藏、吉17岩性油气藏。2012~2019年,在芦草沟组发现吉木萨尔油田。

2020年,按照全油气系统思路,红旗331井发现了致密油新区带,形成了芦草沟组常规油—致密油—页岩油全类型油藏序次分布的富油区。2021年,发现源下P2_{ij}油藏。吉木萨尔凹陷累计落实三级储量7.23亿吨。

吉南凹陷也获重大进展,纵向上发育1套致密油藏、1套页岩油藏、3套常规砂岩油藏,落实二叠系亿吨级砂岩油藏增储新领域。

因此,树立超级盆地全油气系统思维,有助于成熟探区挖潜与提质增效,超级盆地思维也可适用于所有富油气凹陷。

三个故事

尽管我国陆相页岩油革命已呈燎原之势,但必须保持清醒的头脑,孙龙德院士为此专门作出提醒:“革命尚未成功,同志仍须努力。”并用三个故事阐述了责任、方法论和打破经验论。

第一个故事是谢家荣与《石油》。谢家荣生于1898年,是中国科学院院士、地质学家、矿床学家,被称为“中国找矿最多的人”。他于上世纪30年代出版了《石油》一书,当时就提到:油母页岩可分为两种,页岩之饱浸石油者;页岩中并不含油,然蒸馏之后,则其中有机物质互相化合,而成石油。

孙龙德说:“页岩油”不是新鲜事,其研究已经有近百年的历史;谢家荣可能是研究页岩油的第一人;陆相页岩油开采的责任,落到了我们这一代人的肩上。

第二个故事是约翰·斯诺与英国伦敦霍乱

疫情。约翰·斯诺是麻醉学专家,传染病学、流行病学先驱。1854年秋,伦敦暴发了严重的霍乱疫情,几天之内就有上百人丧命。当时人们认为,霍乱病毒由被污染的空气传播。但约翰·斯诺用数据图形的方式揭示发病规律,最终锁定了一个公共水泵,认定那里就是疫情的源头。当局第二天处理了水泵,疫情得到控制。

孙龙德说:“斯诺用非医学的方法控制了疫情,这启示我们,搞清机理很重要,找到管用的方法是关键。当下的主要任务,就是用管用的方法提高EUR,把页岩油高质量拿出来。”

第三个故事是开尔文与地球年龄计算。英国物理学家开尔文是第一个计算地球年龄的人。根据热力学第二定律,地球在诞生之初

是一个岩浆球,温度随着时间不断降低,直到将热量完全耗散。因此,只要知道岩浆的温度、岩层的导热系数及地温梯度,就能根据公式计算出地球的年龄。他计算的结果是9800万年,显然是错误的,但当时的科学家们都认为无懈可击。开尔文当时并不知道,地球内部的放射性元素也产生大量热量。

孙龙德说:“一定要搞清楚研究的条件和边界,每一个领域都受到专业的限制,现在页岩油研究已经进入纳米尺度,很多技术在快速发展,陆相页岩油本来就是崭新领域,多学科交叉、创新思维非常重要。”

“四个面向”是具体的,把论文写在祖国的大地上也是具体的。”孙龙德说,“这是光荣使命,光荣必须与英雄相得益彰,英雄必以静气和豪气驰骋纵横。”