



攻关致密气“卡脖子”技术 增强高质量发展新动能

□西南油气总经理 刘 言

能源是工业的粮食、国民经济的命脉。“双碳”目标下,提高清洁能源天然气的消费占比势在必行。

作为非常规天然气,致密砂岩气开发难度大,但资源占比高,已成为全球天然气勘探开发的重点领域和天然气产量的主要增长点。全球致密砂岩气主要分布在北美、欧洲和亚太地区。美国是目前全球致密砂岩气年产量最多的国家,勘探开发相对成熟。我国致密砂岩气重点分布在鄂尔多斯和四川盆地,其中四川盆地中江气田、川西中浅层气田和鄂尔多斯盆地榆林、大牛地等一批致密砂岩气田已进入开发建产阶段。

四川盆地致密砂岩气是我国天然气增储上产、川渝天然气千亿立方米级产能基地建设的重要阵地,也是四川省“十四五”能源发展规划重点项目之一。

合兴场气田属深层特低孔特低渗致密砂岩大气田,这类气田的勘探开发在国际上无成功经验可借鉴,储量有效动用属世界级难题,33年来始终难以实现规模有效开发。

合兴场气田效益开发主要面临四大挑战:一是多期成藏,气水关系极其复杂,富集高产规律不明,评价建产选区难度大;二是作为产能的主控因素,裂缝精识别和优质储层定量预测难度大;三是特低孔裂缝性致密砂岩气藏非均质性极强,分类评价及针对“甜点”钻井部署难度大;四是岩石破裂压力高,完井改造提升产能难度大。

近年来,西南油气依托集团公司重大科技攻关项目,开展多学科协同攻关,以地质地震一体化预测为基础、地质工程一体化为手段、技术经济一体化为目标,重点解决选好区、描好缝、布好井、压好井等“卡脖子”技术难题。

西南油气迭代升级致密碎屑岩勘探开发特色技术系列,创新融合常规天然气与页岩气成藏理论与技术,形成超深层致密砂岩气富集规律及效益开发技术体系,取得了老层系新领域的重大突破,首次实现了四川盆地须家河组气藏规模效益建产。

合兴场气田高质量勘探和效益开发的成功实践,提升了我国致密砂岩气藏开发关键技术自主创新能力,对我国乃至全球深层特低孔致密气规模效益开发具有借鉴推广意义。同时,四川盆地致密气全部在四川成都、德阳、绵阳当地销售,为地方经济发展、民生保障与节能减排作出重要贡献。

下一步,西南油气将持续打造超深层碳酸盐岩、深层页岩气、深层致密砂岩气三大领域特色理论技术,全力推进海相深层页岩气有效开发技术、气藏水侵前缘预测及气井控水技术两项中国石化原创技术策源地建设,助力深地工程和川渝千亿立方米级天然气国家基地建设,构建环境友好、节能减排的油气生产体系,加快形成新质生产力,增强高质量发展新动能。

(薛 婧 整理)

全力开拓须家河组 致密砂岩气勘探新阵地

□黄彦庆

致密砂岩气通常指分布于孔隙度小于10%、渗透率小于0.001平方微米砂岩中的天然气。中国致密砂岩气资源主要分布在鄂尔多斯和四川两大盆地,其中四川盆地须家河组成藏条件优越,勘探开发潜力大。由于致密砂岩物性差,往往不能自然建产,多属于难动用储量。

“十二五”以来,中国石化天然气开发实现跨越式发展,持续保持快速增长的势头。但随着开发深入推进,天然气稳产难度很大。为了确保增储上产,有必要开展四川盆地须家河组致密砂岩气勘探开发攻关。2018年以来,中国石化石油勘探开发研究院四川中心与西南油气紧密配合,对川西拗陷新场须二深层致密砂岩气藏难动用储量开展联合攻关。

2022年以来,石勘院四川中心全面支撑在川企业致密气勘探开发。提出了川西拗陷须家河组“右行左阶”走滑压扭构造新认识,明确梓潼凹陷弱变形区具有“有利岩石相控储、走滑压扭带控富”的成藏富集规律,提出潼深1井挖潜建议,实施后获产7.22万立方米/日,支撑该地区670亿立方米预测储量提交;建立了川东北须家河组有效裂缝体发育模式和“双源差异供烃、缝储耦合控富”成藏模式,发现元陆171等井挖潜建议,获产119万立方米/日,支撑该地区489亿立方米探明储量提交。

此外,优化迭代形成致密碎屑岩裂缝体智能化预测及基岩储层分频重构预测技术,实现了“甜点”精准预测;提出多口开发和评价井位建议,支撑了川西新场—合兴场地区1330亿立方米探明储量提交,落实了10亿立方米/年产能建设阵地。

接下来,需要持续深化四川盆地须家河组烃源层段生烃潜力评价、有效储层形成机理研究、断裂分期分级评价及其控藏作用研究;进一步完善致密砂岩气区带评价方法,优选川西和川东北评价区储量升级目标,以及川东南北勘探程度区新增储量目标,全力拓展须家河组致密砂岩气勘探新阵地。

(作者单位:中国石化石油勘探开发研究院)

打破桎梏 “磨刀石”变“金饭碗”

西南油气历经33年求索,川西合兴场难动用致密气储量直接实现“高效动用”,我国新添千亿立方米级大气田



新盛201-1井压裂施工现场。刘淑石摄

能源经纬

□薛 婧 张 玲 严焕榕

今年初,我国西南地区新添千亿立方米级大气田——位于四川盆地的合兴场气田1330.12亿立方米探明地质储量通过自然资源部专家组审定。

西南油气上下为之振奋,这可是他们苦苦求索了30余年的难动用储量,如今一举迈过“有效动用”的门槛,直接实现“高效建产”,获集团公司2023年度规模储量商业发现特等奖和高效新区产能建设项目特等奖。

“信心比黄金更重要!”提起打开难动用储量效益开发之门的“金钥匙”,西南油气开发管理部高级专家叶泰然说,“坚定信心,求新求变。”

三十三载恍如梦

四川盆地致密砂岩气资源量9.53亿立方米,商业开发主要集中在侏罗系沙溪庙组、蓬莱镇组,而分布广、厚度大的三叠系须家河组资源量高达6.79万亿立方米,却一直未能实现规模商业建产。

“照理说,一个千亿立方米探明储量大气田,应该建成30亿立方米/年产能。”叶泰然说。此前在四川盆地须家河组已发现广安、安岳、合川、新场等多个探明储量超千亿立方米的大气田,累计探明储量0.94万亿立方米,但2022年总产量仅15.7亿立方米,长期以来表现为“有储量无产量、有气无田”。

为什么会这样?这要从四川盆地独特的地质状况说起。由地壳运动和构造演化形成的四川盆地是我国四大盆地之一,从高空俯瞰,整体呈椭圆形,看上去像一个陨石坑。

当地壳板块发生碰撞时,彼此都会受到水平方向的挤压力作用,大量岩石发生变形,地球表面产生“褶皱”,其中高高隆起的区域形成山脉。在造山运动中,地壳不同区域的抗挤压能力不同,有些区域更容易隆起,有些区域却几乎不受影响,这种几乎不受影响的区域被称为“克拉通”。四川盆地所在的区域就是一个“克拉通”,周围区域不断隆起,久而久之,就形成了一个盆地。四川盆地地质年代久远,有几亿年历史,虽然表面看起来颇为“平整”,但在边缘区域,地下岩层被这些多方向、多次次的强力挤压得密密实实。

“这里属超深层特低孔致密砂岩气藏,尚无规模效益开发先例,这条难路我们一走就是30多年,从没想过放弃。”叶泰然说,“相比国内外类似气藏,位于四川盆地西缘的合兴场气田,埋藏深度在4500~5500米,平均孔隙度只有3.7%,平均渗透率0.07毫达西,砂体累计厚300~400米,气水关系极为复杂。在油气行业,大家普遍认为致密砂岩孔隙度小于5%就是气藏效益开发的‘死亡线’,而且合兴场气田的渗透率甚至是全球同类气藏最低的,实现效益开发挑战空前。”

1988年,西南油气部署的川合100井在须家河组二段测试获得日产天然气20多万立方米,落实了川西拗陷中段由孝泉、新场、合兴场、高庙子、丰谷等多个局部构造共同形成的一个大型隆起带——新场构造带,具有较大的勘探潜力。以该井为引领,为评价3个局部构造部署了6口评价井,先期3口井获工业气流,后续3口井失利,川西须二气藏勘探按下“暂停键”。

2000年,西南油气重振旗鼓,在新场构造部署的新851井测试获天然气无阻流量超150万立方米/日,日产天然气38万立方米。为整体评价新场构造,西南油气先后部署了28口井,并于2009年探明了川西拗陷第一个整装千亿立方米致密砂岩大气田——新场气田。

2010~2013年,西南油气复制“新场”模式,在合兴场部署了7口井,却始终无法突破效益关。

高产井旁打出多口低效井,目标到底在哪?实施44口井,有效井占比仅23%,效益建产目标不清、工程“甜点”预测技术



新盛201井站员工维护输气阀。

罗楚璇 摄



新盛202井开井前,值班员工检查储液罐。

宋 军 摄

缺乏、差异化开发技术对策缺乏、针对性压裂改造技术缺乏……在巨大的质疑声中,川西须二气藏勘探开发再次叫停。

但科研人员的基础研究和系统攻关没有止步。他们围绕储量有效动用的诸多挑战,下决心逐个解开“枷锁”。

柳暗花明又一村

“搞不清成藏富集规律,难以精准预测,导致效益建产目标不明确。”叶泰然说,“选好区、描好藏是攻关重点。”

当科研攻关遇到瓶颈时,往往暗示着应该换一条路径翻越高峰。

西南油气科研团队走遍了龙门山前及周围所有的须家河组露头剖面,用手触摸致密砂岩的纹理构造,用心体会独特的沉积特征;梳理分析新场构造带全部取芯井岩芯资料,用手中的放大镜仔细观察一块块“磨刀石”,从岩性组分、沉积构造、裂缝发育等方面开展精细到厘米级的描述,穿点成线及面,细细探究“磨刀石”的前生今世。

2021年,他们迎来了转机。西南油气执行董事郭彤楼带领科研团队分析比对大量实验资料,发现油气的高速运移通道也能够储集规模巨大的天然气,于是将常规气与页岩气成藏理论、技术有机融合,创新提出了输导体成藏理论。

何为输导体?简单来讲,就是连接烃源岩和圈闭的桥梁。在强烈的地壳运动作用下,刚性地层破裂形成断层,柔性地层形变产生褶皱,断层和褶皱旁会出现无数裂缝——这些输导要素在三维空间组合形成输导体,成为油气运移的通道。

在油气生成的过程中,常会出现异常高压,类似“水满自溢”。这种天然驱动力,将油气驱赶到断层、微小裂缝中,就像在水杯里插入一根根吸管,油气经由“吸管”逐步向储集层推进。随着运移距离增加,驱动力逐渐降低,油气受自封闭作用在“吸管”内滞留。因此,由“断层、不同尺度裂缝、高渗基岩储集层”三位一体构成的天然气储集体,既是油气运移的通道,也是天然

气储集的主要场所。

科研团队认为,在燕山运动(侏罗纪到白垩纪时期中国广泛发生的地壳运动)早中期、新场构造带岩石致密化前,中低熟油气就进入了当时的构造高部位常规储集层;历经亿万年来沧海桑田,岩石逐渐致密后,晚期高温天然气又沿断层、不同尺度裂缝及高渗基岩储集层运移,并滞留其中。因此时空叠合下,在古今构造高部位、输导带中上部,也就是新场构造带东部——合兴场地区,天然气富集程度最高。

他们发现,虽然规模缝网体系中赋存大量天然气,但像香肠一样肥瘦不均,裂缝体展布具有强非均质性,不同级别的断裂对油气富集控制作用不同:东西向断裂形成于燕山运动期,其伴生的多数裂缝已被次生矿物充填,有效性较差;喜马拉雅运动(中国境内新生代的造山运动)期形成的南北向断裂,因形成时间较晚,有效性较好,是天然气优势运移通道。他们建立分类评价标准,以渗透率、孔隙度为基础,以裂缝大小及类型、有效裂缝密度等的关键,将储层分为四类,明确Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类“甜点”为攻关建产目标。

解决了储层致密与成藏关系问题,落实了油气富集区,科研团队继续深化地质—地球物理—工程多学科一体化攻关,开展校企合作,采用先进的物理解释技术,使地球物理老资料清晰成像,同时多维度呈现断层、褶皱、裂缝储集体的空间变化,分级评价、精细刻画,创新形成了多属性融合的断裂裂缝体精细刻画技术、分频重构反演优质储层预测技术,新井断裂缝体钻遇成功率高达100%,储层厚度识别能力由20米精确至10米,储层物性预测吻合率由75%提升至93%。

吹尽狂沙始到金

在地质—地球物理—工程一体化攻关取得成功,西南油气勘探用开探索、开发滚动建产,一体化部署实施钻井15口。但在评价部署新盛201井时,科研人员犯了难——到底该沿着断层面打,还是钻穿断

层面?

“针对不同类型‘甜点’,需要匹配差异化开发技术对策,不能盲人摸象、以偏概全。”叶泰然说。此前,川西须家河组气藏开发部署都循着“大断层要躲、小断层要靠,防止断层成为地层水推进的高速通道”的思路进行,效益井占比一度只有25%。

随着富集高产规律、气水关系、裂缝发育等新认识逐渐深化,他们建立建模数模一体化模型,通过技术经济一体化确定不同“甜点”类型井型、井距、水平段长度及合理配产制度,形成了“大断层要靠、小断层要穿,充分动用断褶皱缝体储量”的差异化开发部署思路,采用直井、定向井多层兼驱,优选地质工程“双甜点”,创新形成深层高应力致密砂岩气藏钻井完井关键技术,钻井成功率达100%。

新盛201井最终采取“近断层面”模式钻井,轨迹半径控制在断层上盘200米以内,轨迹方向靠近断层走向,在揭开须二砂顶时钻遇裂缝型气层,“甜点区”精准中靶,测试无阻流量高达288万立方米/日,创川西陆相并产量新高。该井于2022年7月投产,已累计生产天然气超2亿立方米,一年多的累计产量已超过前期实施并新盛1井10年的产量。

“高产来之不易!”西南油气工程技术研究院须家河压裂技术团队负责人王兴文介绍,“川西须家河组气藏埋藏深、储层致密,天然气就像被锁在一个个又密又硬的细小岩石孔隙中,几十年来都是‘铁板一块’——难压开、难加砂、难高产、难稳产。”采用常规压裂技术不仅造缝难度大,而且造出的缝往往又窄又小,无法满足效益开发需要,破解压裂难题至关重要。

“思路转变是破解难题的必由之路。只能想办法增加造缝数量,形成一张地下‘交通网’,最大限度连通周围的天然气。”王兴文带着团队顺着这个思路持续创新完善压裂造缝工艺技术,采用物理实验和数字模拟相结合的方式,创新提出了大排量施工开储层、高强度加砂支撑人工裂缝的压裂工艺,大幅提高造缝能力。同时,他们深化地质工程“双甜点”优选方法,识别原生断层、裂缝最密集的区域,通过人工造缝,使这些宽窄不一的通道在地下融会贯通。

早期采用的胍胶压裂液黏度太大,极易堵塞通道。科研团队攻关形成一体化造缝携砂压裂液体系——可根据不同裂缝规模匹配液体配方,在施工现场实时调整黏度。建“通衢大道”时把压裂液调黏稠,建“羊肠小道”时稀释降低黏度,避免堵塞的同时实现了裂缝沟通数量大幅提高。

科研人员不断求新求变,系统推进合兴场气田快速上产,单井平均无阻流量是前期的3倍,4口井无阻流量超百万立方米,累计建设产能超10亿立方米/年,连续两年实现产量翻番,2023年天然气产量突破10亿立方米,实现整体效益最大化,储量由“难动用”一举越过“有效动用”,直接实现“高效动用”。

如果把在Ⅰ类断裂缝区储层“指哪打哪”比作吃肉,那么接下来储量规模更大、品位更低、裂缝相对欠发育的Ⅱ、Ⅲ类区就是啃硬骨头。西南油气提出“评价动用Ⅱ类、攻关突破Ⅲ类”的思路,深入研究高渗基岩“甜点区”,甩开部署丰谷110井、丰谷111井,均测获超5万立方米/日气流,证实了合兴场气田须二段裂缝欠发育区同样具有良好的勘探潜力,明确了储层具有“横向连片分布、纵向多套叠置、整体大面积含气”的特点。目前,针对东西向大断裂、低序级断裂区及微裂缝发育的基岩储层区,西南油气实施的5口评价井均获高产,落实了新的规模建产阵地。

“要知好不知满,深刻认识目标的复杂性和艰巨性,积极稳妥推进须二气藏整体动用。”3月11日,在西南油气勘探开发技术交流会上,郭彤楼叮嘱科研人员,既要坚定信心,看到须家河组气藏难动用储量效益开发的广阔前景,又要求新求变、不懈攻关,将一块块“磨刀石”变成“金饭碗”,铸成效益开发的“聚宝盆”。