

□本报记者 王孝群  
通讯员 贺彦文/图

近日,勘探分公司页岩气勘探再结硕果——在四川盆地东部复兴地区提交陆相页岩油气预测储量1040亿立方米。

至此,勘探分公司躬耕页岩气领域12年,累计提交页岩气储量超万亿立方米,其中,探明储量7926.41亿立方米、预测储量2435.63亿立方米。

从白手起家到硕果累累,勘探分公司以解决油气核心需求为己任,集中资源攻克页岩气勘探开发关键核心技术,先后在涪陵、綦江、元坝、道真等地取得海相中浅层、深层页岩气、陆相页岩油气及盆外残留向斜常压页岩气等多个领域的勘探重大突破及商业发现,为提升能源供给质量和自我保障能力作出了积极贡献。

## 沉睡数亿年 一醒惊天下

勘探分公司躬耕页岩气领域12年,累计提交页岩气储量超万亿立方米



东深2井压裂施工现场。

## 1 一场骗局?

进入新世纪以来,北美页岩气蓬勃发展,但到2011年,我国先后实施了120余口页岩气勘探井,效果均不理想,业内一度出现“页岩气是一场骗局”的悲观论调。

有此论调,因为页岩堪称“最复杂的岩石”:它是由粒径小于0.0625毫米的颗粒碎屑、黏土、有机质等组成的,孔隙度仅为4%,孔隙直径仅为0.01~0.1微米,比新冠病毒0.1微米的直径还小,页岩气就藏匿于这些纳米级孔隙中。

地质条件也不同。勘探分公司总地质师魏志红说,北美地台是一个完整的大盘子,而四川盆地年代老,经历了多期构造运动叠加改造,像一个摔碎的大盘子,页岩气散落在错综复杂的“迷宫”中,令诸多国际公司折戟于此。

因此,想要实现中国的页岩气勘探突破,决不能照搬北美经验,必须具体问题具体分析。2009年,勘探分公司相继成立了页岩气项目管理部、勘探研究院页岩气勘探研究室,正式踏上页岩气攻关之旅。

“求木之长者,必固其根本”。科研人员知道,唯有扎实开展基础研究,坐稳、坐热“冷板凳”,才有希望取得大突破。四川盆地是中国页岩气资源最丰富的盆地之一,攻关团队按照“立足盆内、突破周缘、准备外围”的思路,以四川盆地及周缘为重点,精耕细作。

他们一边调研国外页岩气成功经验,一边系统复查40余口井老井资料、6500多千米老二维地震、25条露头剖面、10万余个分析测试数据,实测60条近3万米页岩露头剖面,剖析3口页岩气浅井,开展1万多项次分析测试研究。

勘探研究院页岩气室首任主任、现任勘探分公司页岩气项目部经理刘若冰说,科室设立“页岩气小讲坛”,每周开展一次内部学术交流,还不定期与中国地质大学等高校,以及bp、埃克森美孚、康菲、雪佛龙等国际石油公司开展交流,拓宽思维。

## 2 转向海相

在复查元坝气田常规老井时,科研人员发现,川东北地区湖相地层侏罗系大安寨段有较好的泥页岩,因此论证部署了几口重点陆相页岩气探井,虽然都获得页岩气流,但湖相泥页岩有机质丰度相对低、相带变化快、非均质性强,气井产量低,难以实现商业开发。

作为陆相的一种,湖相页岩气勘探失利没有阻挡科研人员的步伐。刘若冰带领团队开展“勘探南方探区页岩气选区及目标评价”项目攻关,初步查明了元坝和涪陵地区陆相和海相页岩气的主控因素,提出了总有机碳( TOC)保存条件是四川盆地周缘下古生界页岩气成藏的主控因素等新观点。

在这一观点启发下,勘探分公司转变思维,将主要目标由陆相调整为海相。

勘探分公司页岩气专家张汉荣2010年曾在美国做访问学者,在AAPG(美国石油地质学家协会)年会上首次接触到了页岩气。2011年初,国内页岩气勘探正处于低谷,张汉荣“临危受命”,成为海相页岩气攻关组组长。

随后,她参加中美页岩气联合研究小组,对川西南地区进行野外地质考察,发现南方海相下寒武统、下志留统海相页岩与北美具有相似的特征。

如今的四川盆地,在距今4.2亿年的奥陶纪是一片巨大的海洋,包括笔石在内的海生无脊椎动物空前繁荣,海浪经年累月冲刷,全球板块拼合挤压,火山活动频繁,加之海侵作用影响,沉积发育富硅高碳的优质页岩。页岩,是像书页一样一片一片的沉积岩,分布其中的大量笔石表皮、硅质放射虫体腔内发育大量微纳孔隙,是重要的油气储集空间。

但是,四川盆地构造改造强、演化程度高,即使有页岩也不一定有页岩气,关键要看保存条件。

作为当时勘探分公司页岩气项目部经理,魏志红带领攻关团队,依托“上扬子及滇黔桂区页岩气资源调查评价与选区”等4个国家及中国石化重大科研项目,厘定页岩厚度、有机碳含量、脆性指数等18项参数,创新构建了选区评价体系,评价五峰组-龙马溪组下部是页岩气有利层段,优选了涪陵焦石坝等28个有利区。

## 3 二元富集

2011年盛夏,勘探分公司论证部署了第一口海相页岩气参数井焦页1HF井。

但前期研究认为,焦石坝地区保存条件差,常规油气勘探不被看好。

攻关团队认为,焦石坝地区虽然整体保存条件差,但海相龙马溪组页岩层稳定性好。

中国工程院院士、勘探分公司原总经理郭旭升说,普光、元坝气田成功前,也是不被看好,勘探就要敢想敢闯,不被前人认识误导,何况元坝地区陆相页岩气层埋藏深,有4000多米,而焦石坝海相页岩气层埋深浅,只有2000多米,钻井压裂成本要低得多。

2012年11月28日,焦页1HF井试获日产20.3万立方米不含硫化氢的优质高产页岩气流。“沉睡数亿年,一醒惊天下”,这口井为当时低迷的页岩气勘探带来了生气,成为中国页岩气勘探开发的里程碑。

因榨菜出名的涪陵,又因页岩气而备受世界瞩目,这里诞生了除北美地区外全球首个千亿立方米级储量规模的页岩气田,相当于一个亿吨级油田。

攻关团队没有迷失在成功的喜悦中,他们深知:找到海相页岩气富集的“大粮仓”,并不意味着就“探囊取物”了,在之前的页岩气勘探热潮中,多支专业队伍有备而来却空手而归,就是因为仅注重“富集”而忽视了“保存条件”这个关键变量。

相较于北美简单的“大盘”,在四川盆地这个“碎盘”,富集和保存条件都极其复杂。

攻关团队精细解剖焦页1HF井,开展古地理地貌恢复,重塑了页岩气生成、滞留、散失过程,建立了页岩气保存模型和五种页岩气逸散破坏模型,进一步揭示了保存条件对页岩气富集的控制作用,首次提出“二元富集”理论,即深水陆棚优质泥页岩发育是页岩气“成烃控储”的基础,而良好的保存条件是页岩气“成藏控产”的关键。

作为该理论的主要构建者之一,魏志红说,“二元富集”理论指导页岩气勘探从焦石坝主体走向外围,从浅层走向中浅层、深层,以及外围构造复杂区,不断扩容页岩气“大粮仓”。

## 4 挺进深层

2012年,现任勘探研究院总地质师魏祥峰当时刚刚博士毕业,就幸运地赶上了焦页1HF井突破。年底,集团公司在成都召开页岩气推进会,会后几位页岩气专家商量,让隆盛1井(后来的丁页2HF井)加深一下,看下芯,说不定能实现盆地周缘的突破。

加深钻探的建议,源于攻关团队的精细研究。他们重新绘出四川盆地及周缘五峰组-龙马溪组早期沉积相图,赫然发现中国石化矿权区主体分布在页岩气有利区内,这与前人的研究大相径庭!

此前,丁山地区被认为位于浅水陆棚相带,是页岩气勘探“冷区”。与焦石坝页岩气藏2250~3500米的埋深相比,丁山地区页岩气层底界埋深近4500米,地质条件更复杂。

在攻关“四川盆地及周缘海相页岩气选区与重点目标评价”等项目过程中,科研人员发现,丁山地区实际上位于深水陆棚沉积相带,于是大胆提出在常规井的基础上加深钻探丁页2HF井的建议,一旦突破,将解放川东南1000多平方公里的区带。

果不其然,丁页2HF井加深后,钻遇61米厚的优质泥页岩。但在“临门一脚”压裂时,却遭遇了“步步惊心”。

该井是当时国内最深的页岩气探井,垂深超过4400米,地层温度高达146摄氏度、压力近140兆帕,而当时国内外测井工具最高抗压仅105兆帕。

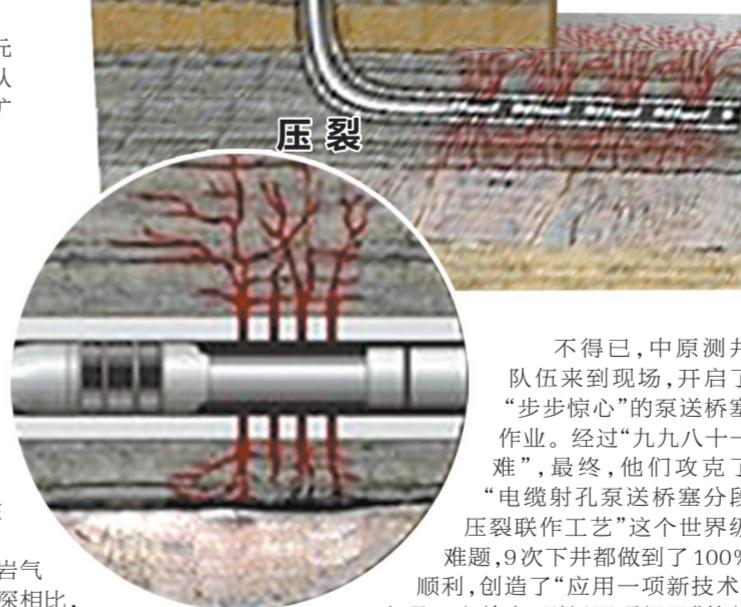
现场总指挥、勘探分公司总工程师李真祥经常夜不能寐,焦急上火。压裂第一段,仅上了不到两立方米砂就“堵死”了,现场人员全蒙了。

承担压裂施工的中原井下负责人说:“施工难度是世界级的,每一步都如履薄冰。”

没有任何经验可借鉴,对加砂造缝情况完全不了解,实际与预测差距大,只能摸着石头过河。

好不容易结束第二段施工,本该上“射孔联作”了,可合作的外国公司(全球最大的油服公司之一)却因该井压力太高、施工没有把握,不干了。

那时,桥塞射孔联作工艺被几家国际大公司垄断,属于“卡脖子”技术。



不得已,中原测井队伍来到现场,开启了“步步惊心”的泵送桥塞作业。经过“九九八十一难”,最终,他们攻克了“电缆射孔泵送桥塞分段压裂联作工艺”这个世界级难题,9次下井都做到了100%顺利,创造了“应用一项新技术、实现三个首次、刷新四项纪录”的佳绩,打破了国外公司技术垄断。

2013年12月,丁页2HF井试获日产页岩气10.5万立方米,实现深层页岩气突破。

2015~2017年,攻关团队研究发现,川东南地区綦江东溪、石龙峡等5排高陡构造为深层页岩气勘探有利目标,具备万亿立方米资源基础。

深层页岩气“粮仓”众多,但高压、高温、高应力“三高”症状明显,首选哪里才能突破新领域?魏祥峰说,经过反复论证对比,认为东溪构造有地震资料品质好、单断控制、断层点清楚、断距相对小、主体无明显破碎带、埋深小于4500米、资源量大等有利条件。

深层页岩气储气能力会变差吗?团队经过近半年攻关,建立了吸附气计算模型,惊喜地发现超压深层气藏具有持续“超压富气”特征,且超压对微裂缝发育有促进作用,为井位论证奠定了理论基础。

2019年,四川盆地首口埋深大于4200米的页岩气井东深页1井,试获日产超31万立方米高产页岩气流,令国内外同行眼前一亮。

该井的突破,基本落实东溪-丁山地区5000米以浅有利区块面积700多平方千米、地质资源量5300多亿立方米,有力推动了中国石化川东南探区超2万亿立方米深层页岩气的勘探开发。

## 6 重返陆相

近几年,四川盆地及周缘地区海相页岩气勘探开发如火如荼,但海相中浅层有利目标储备不足。为寻找新的“大粮仓”,勘探分公司树立“勘探无禁区”理念,重启陆相页岩气研究。

早在2017年,勘探分公司就未雨绸缪,在突破深层页岩气的同时,组建陆相页岩气攻关团队,依托“四川盆地侏罗系页岩气整体评价与目标优选”项目,开展老井复查及选区工作。

页岩气室副主任陈斐然博士说,陆相页岩油气资源禀赋先天不足,目标层段多、甜点层较薄、非均质性强、预测难度大,且脆性指数低、油气相态复杂,压裂与开采难度更大。

越走越窄的路,也许机会更多。攻关团队重新梳理四川盆地侏罗系20多口取芯井及元坝90余口过路井的资料,运用多种手段开展定性分析和定量研究,剖析陆相页岩油气富集的主控因素,寻找油气“粮仓”,锁定甜点目标。

最终,攻关团队明确半深湖优质页岩是物质基础,保存好、地层超压是成藏保障,微裂缝发育是高产关键,为涪页10井、泰页1井及元页3井等一批重点井的部署提供了支撑。

勘探分公司试气专家李文锦说,陆相地层相对年轻,页岩气成熟度低,且储层含气含油,如此“害羞”的储层要实现高产突破,实属不易。

为了畅通页岩气逸出通道,他们敢想、敢试、敢干,探索形成了湖相深层“超密切割、高强度加砂、暂堵转向、均衡压裂”高效压裂关键技术。

2021年,泰页1井在涪陵北部复兴地区凉高山组试获日产油9.8立方米、气7.5万立方米;元页3井在元坝地区千佛崖组测试获日产油15.6立方米、气1.18万立方米,实现了陆相页岩油气勘探重大突破。

如今,从海相到陆相,从中浅层到深层、超深层,从盆内到盆外,勘探分公司掌握的金钥匙越来越多,未来,更深更隐蔽的页岩气也将被一一揭开神秘面纱。