

跨越“山海” 深地“探气”

近20年来,在四川盆地深层、超深层矿权区,中国石化先后发现并探明了普光、元坝、川西等海相气田和威荣、綦江等页岩气田,实现中国海相深地勘探理论和实践的重大突破



元坝1井。

余海峰 摄

能源经纬

□贺彦 薛婧文/图

2月9日,勘探分公司部署在重庆市綦江区东溪镇的綦页深1井,已钻进至4219米,即将在4911米处完钻,有望实现4500米以深超深层页岩气的突破。

此外,元深1井在8866米灯影组四段完钻,有望形成规模资源接替阵地,带动海相下组合超深层勘探进展;巴中1HF井首次在侏罗系河道砂岩获高产油气流……这些都标志着中国石化“深地工程·川渝天然气基地”又获新进展。

国际上通常将常规油气埋深超过4500米的地层定义为深层,埋深超过6000米为超深

层,埋深超过8000米为特深层。我国深层、超深层油气资源达671亿吨油当量,占全国油气资源总量的34%。

世界上已发现的油气储量90%赋存在深层海相层系,我国仅占10%。以海相沉积为主体的四川盆地,是我国最丰富的深层油气盆地之一,具有资源丰度高、规模大、整体储量大等特点,虽历经近70年勘探,但由于存在诸多世界级勘探开发难题,一直未有大发现。

近20年来,中国石化通过勘探思路转变和理论技术创新,在深层、超深层先后发现并探明了普光、元坝、川西等海相气田和威荣、綦江等页岩气田,实现了中国海相深地勘探理论和实践的重大突破。

探索“地下四姑娘山”

2006年发现中国最大海相整装大气田——普光气田,平均埋深5100米

地质研究。

随着分析、评价逐步深入,科研人员很快突破前人“占高点、沿长轴、打扭曲”的勘探思路,建立陆棚、台缘礁滩储层沉积模式,揭示深层碳酸盐岩优质储层发育的机理,建立油气富集的“复合控藏”模式,并在低于高点1300米的位置部署普光1井。

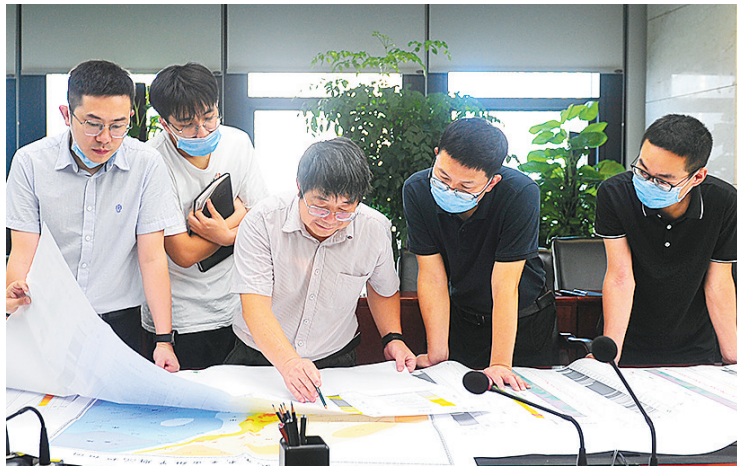
2003年,普光1井喜获日产42万立方米气流,实现南方海相碳酸盐岩油气勘探战略性突破。

“依靠海相油气勘探理论和技术”的创新,在前人认为不利的勘探区,快速、高效、安全地发现了国内埋藏最深、储层最厚、丰度最高、规模最大的海相整装大气田,我们经历了艰苦卓绝的奋斗。”集团公司

高级专家黄仁春说。

普光气田的发现,实现了我国海相勘探理论和实践的重大突破,形成以复杂山地深层碳酸盐岩储层预测为核心的勘探技术,指导了相邻探区的勘探,相继取得了河坝、毛坝、双庙等构造勘探的重大发现,不仅为国家“十一五”重大工程“川气东送”奠定了资源基础,让老一辈油气工作者“川气出川”的夙愿得以实现,更让中国碳酸盐岩油气勘探理论与实践水平进入了世界前列。

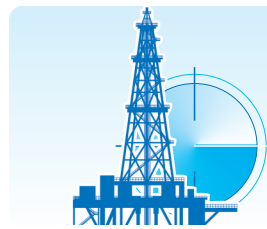
截至2022年底,普光气田累计产气超千亿立方米,惠及长江沿线80多个城市数千家企业近两亿人口,为长江经济带源源不断注入绿色发展动能。



集团公司高级专家黄仁春(右三)带领科研人员开展海相寒武系地层对比划分研究。

征服“地下贡嘎”

2014年发现世界首个超深层生物礁大气田——元坝气田,平均埋深6600米
2015年发现新类型潮坪相白云岩气田——川西气田,平均埋深超6000米



普光气田的熊熊火炬,照亮了南方海相勘探的光明前景,但国内埋深大于6000米的超深层资源一直未取得重大突破,国外也鲜有经验。

元坝地区是盆地内一个被“遗忘”的区块。这里无构造背景、成藏条件复杂,海相目的层埋藏超深,勘探前景不被看好。与普光气田不同,元坝气田埋深更大、储层更复杂、隐蔽性更强。

面对平均6600米埋深、7套复杂压力系统、近150兆帕高压、160余摄氏度高温、5%~23%硫化氢等世界级难题,2006年以来,勘探分公司依托16项国家和省部级科研课题开展系统攻关,逐渐形

成以“相控三步法”为代表的超深层生物礁优质储层发育和富集机理等新认识,以及复杂山地储层地震勘探、钻完井测试等技术。2007年10月,在元坝地区7000米左右深度,勘探分公司以长兴组大型生物礁滩为勘探对象部署的元坝1井获日产50.3万立方米高产气流。全球首个超深层生物礁大气田——元坝气田浮出水面。

“点上突破”带动“面上开花”,技术成果推动了四川盆地天然气勘探,为中国石化发现兴隆场、河坝场等气田和川西海相气田,以及南江—黑池梁地区超深层大型勘探目标的突破奠定了基础,更为塔里木盆地、渤海、南海

生物礁勘探提供了可借鉴的成功经验和技

术,推动了塔中顺南地区的超深层重大突破。

2015年,勘探分公司部署的元坝7井在6900米以深试获日产天然气105万立方米,实现了“元坝之下找元坝”的新突破。

截至目前,勘探分公司在元坝地区已完成6000米以深的超深探井33口,其中超7000米的19口,元坝气田累计生产天然气200多亿立方米,硫黄近200万吨。

作为四川盆地海相碳酸盐岩演化阶段的最末一套层系,雷口坡组历来是天然气勘探的重点层系。“我们奔着再发现一个普光的目标,在川西海相寻找礁滩型气

藏,却在历经三次认识转变后,发现了一种全新类型储层——潮坪相白云岩薄互层碳酸盐岩。”西南油气勘探开发研究院勘探三所所长来晓波说。

20世纪70年代,四川盆地龙门山前构造带中坝雷三气藏被发现。之后,科研人员沿着龙门山前带向南探索,历经30余年却未能再次取得勘探重大突破。几代勘探工作者不断总结经验,突破认识禁锢,加大风险勘探力度,加强地球物理勘探攻关及区域地质研究,锁定了天然气成藏有利区。

2010年,川西拗陷新场构造第一口石油天然气科学探索井——川科1井经射孔酸压测试,获

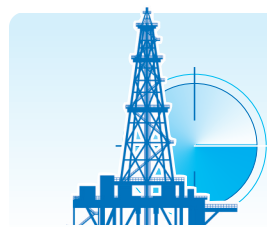
日产天然气无阻流量42.65万立方米,取得了川西雷口坡组天然气勘探重大突破。

随后,他们展开局部评价和甩开勘探。科研人员反复观察研究5口井雷口坡组的上干片岩石薄片,从微观世界里发现了龙门山前构造带彭州地区地下6000米的一张“千层饼”——川西气田雷口坡组潮坪相白云岩气藏,累计提交探明储量超千亿立方米,展示出巨大的天然气勘探潜力。

目前,川西气田年产气约20亿立方米、硫黄超13万吨,首批次11口井已全部完钻,4座脱硫站正在建设中,计划今年9月全面建成投产。

勇闯页岩气深层“禁区”

2018年发现千亿立方米页岩气田——威荣页岩气田
2022年拿下万亿立方米资源阵地——綦江页岩气田



2009年前后,受美国页岩气勘探开发热潮的启示,国内掀起了第一轮页岩气勘探热潮,并先后在四川盆地3000米以浅取得页岩气勘探突破,但埋深超过3500米的深层页岩气尚无实质性突破。威荣页岩气田主体埋深超3700米,地质情况错综复杂,受传统地质理论禁锢,国内外几乎没有经验可借鉴,实属天然气勘探“禁区”。

“威荣页岩气田位于四川省内江市和自贡市境内,与其他页岩气田相比,特点就是‘深’。”西南油气勘探开发研究院院长熊亮介绍。

2011~2013年,西南油气科研人员进行开展了四川盆地页岩气选区评价研究,足迹踏遍四川盆地及周缘,行程近3万公里。他们复查老井资料,重新解释地震剖面,首次提出了海相深层页岩气“三元”富集理论,明确了富集高产

主控因素,圈定了川西南的威远—荣县探区为龙马溪组页岩气勘探的有利区,优选龙马溪组作为页岩气勘探的主攻目标。

页岩气新层系勘探在2015年迎来重大突破。水平井威页1HF井成功在井底压力130兆帕的高强度施工压力下建成并投入测试,获得日产15.71万立方米工业气流,由此拉开威荣页岩气田勘探开发评价大幕。

在威页1HF井的实钻资料基础上,西南油气以商业发现为目标,实施了威荣页岩气田5台10井的整体评价方案,狠抓储层精细评价、科学优选水平井靶窗、多学科协同精准控制水平井轨迹、强化压裂工艺攻关,逐步实现了深层页岩气商业产能突破。2018年3月,威荣页岩气田提交探明储量1246.78亿立方米,成为我国第一个深层千亿立方米页岩气田。目前,威荣气田二期产能建设正

加快推进。

同样在四川盆地,勘探分公司将目光投向更深层的页岩气藏。

“中国石化在四川盆地矿权内的深层、超深层页岩气资源量5.8万亿立方米,占总资源量的75%以上,潜力巨大,是亟待突破和实现资源战略接替的重要领域。”勘探分公司总地质师魏志红介绍。该公司科研人员以中国南方海相页岩气“二元富集”理论认识为指导,精细开展川东南地区老井复查、二三维地震解释及连片构造和埋深图编制,研究深层优质页岩展布和现今构造特征,明确了四川盆地川东南盆缘复杂构造区林滩地、丁山、东溪构造是走出涪陵气田、走向新区带的有利目标。

2013年,勘探分公司利用常规风险探井——隆盛2井开展深层页岩气探索,该井在埋深大于4300米的五峰组—龙马溪组系统

取芯,钻遇35.5米厚的优质泥页岩。之后,他们利用该井并眼实施侧钻水平井——丁页2HF井,这是当时国内最深的页岩气探井。2013年12月,该井测试获日产10.5万立方米页岩气流,取得国内埋深大于4000米深层页岩气的首次发现,拉开了国内深层页岩气勘探序幕。

丁页2HF井揭示了深层页岩气具有“高流体压力、高孔隙度、高含气量”的特征,具有良好的勘探潜力,同时,科研人员面临深层页岩气压裂难度大、现有工艺装备不能满足深层页岩气压裂需要等难题,开展深层页岩气富集机理、关键能力等攻关势在必行。

对此,集团公司设立中国石化首个深层页岩气(丁山—东溪)攻关试验区,由勘探分公司牵头,联合石油勘探开发技术研究院、石油工程技术研究院、石油物探技术研究院、石油工程公司组成

联合攻关团队,依托国家重大专项、集团公司项目和中国地质调查局项目,围绕丁山断鼻、东溪高陡构造等深层页岩气有利目标,实行产学研一体化、地质工程一体化,开展关键理论、技术研发和应用攻关,逐渐揭示了深层页岩气富集机理,建立了“超压富气”模式,形成了深层页岩气“甜点”预测和压裂监测技术等。

2022年6月18日,綦江新场构造首口钻并新页1井在五峰组—龙马溪组试获日产53.19万立方米高产页岩气流,是中国石化埋深大于3500米深层页岩气测试最高稳定产量。这标志着中国石化实现了丁山、东溪、新场地区深层页岩气测试产量从10万立方米到20万立方米再到50万立方米的跨越,落实了中国石化第二个万亿立方米页岩气资源阵地,也是中国石化在四川盆地发现的第三个超千亿立方米页岩气田。

□李双建

四川盆地天然气资源非常丰富,居全国之首。据最近一次全国油气资源动态评价,四川盆地常规天然气(含致密砂岩气)地质资源量达20.7万亿立方米,约占全国总量的22.4%;页岩气地质资源量71.8万亿立方米,约占全国总量的51.7%。中国石化四川盆地矿权区内拥有深层天然气资源量15万亿立方米,具有很大勘探潜力,是天然气未来增储上产的重要领域。

2000年以来,中国石化通过深化基础研究和技术研发,在四川盆地深层海相碳酸盐岩常规天然气和深层页岩气领域均获得了巨大勘探发现。

在深层海相碳酸盐岩勘探领域,提出“三元控储”理论,突破了5000米以下超深层难以发育优质储层的传统认识,在纵向上拓宽了勘探空间。建立起“多元供烃、复合控藏”新认识,科学指导勘探部署。突破了超深弱反射层地震采集处理技术瓶颈,超深有效储层预测精度大幅提高,预测结果与实钻符合率达93%,储层厚度预测绝对误差1~3米。针对超深层多压力系统造成的喷、漏、垮塌等复杂问题,突破传统做法,首创特种井身结构,研发非常规井身结构,形成与之配套的技术,钻井工程成功率大幅提高。

在深层页岩气勘探领域,围绕深层页岩气高产井培育,在地质认识和主体技术方面取得了突破性进展。地质认识方面,揭示了南方海相深层页岩气生储和保存机理,进一步深化了“二元富集”规律新认识;建立了深层页岩气“超压富气”模式,明确“优质页岩、高流体压力、微裂缝发育、低地应力”是深层页岩气“甜点”评价的关键要素。在储层含气性预测方面,初步形成以有机碳含量、脆性指数和含气性叠前地震量预测为核心的页岩气“甜点”地球物理预测技术体系,预测精度大幅提高。在钻完井工程工艺方面,通过井身结构优化+高效PDC钻头+旋转导向,水平井钻井周期逐年缩短;初步形成了垂深4000~4500米“多段少簇、大排量、大排量、强加砂、双暂堵”压裂主体工艺技术体系,为深层页岩气产量不断提高提供了有力技术保障。此外,压裂装备、工具及材料实现国产化,大幅降低施工成本。

在一系列理论与技术的指导下,中国石化在四川盆地先后发现并探明了普光、元坝、川西3个深层海相碳酸盐岩气田和威荣、綦江两个大型深层页岩气田,引领了中国深层海相常规—非常规天然气的勘探发现,为“川气东送”国家重大工程的立项和实施提供了重要的资源保障。

尽管已经取得了大量的油气勘探发现,但是从地质资源条件来看,四川盆地仍具有巨大的勘探潜力。四川盆地多为多构造旋回叠合盆地,海相层系沉积时代长、地层保存完整、生储盖组合多样,且受晚期巨厚的陆相沉积影响,先前沉积的海相地层埋深普遍超过5000米,因此,四川盆地深层海相油气具有多样和广阔勘探前景。中国石化在震旦系古裂陷周缘、寒武系—奥陶系古隆起围斜区和二叠系—三叠系台内滩等领域均具备万亿立方米级地质储量的天然气勘探潜力,是未来增储上产的重要领域。

随着碳酸盐岩常规气向10000米深层和页岩气向4500米深层勘探进军,我们将面临前所未有的地质与工程理论技术挑战,在以下四个方面亟须加强科技攻关:一是随着深度增加,储层储集性能总体降低,但是局部构造条件下,储层储集性可以得到保持或者增强,因此,深层储层保持机理需要攻关研究;二是多期构造变动和流体相态转变造成成藏过程复杂,油气保存与富集规律有待深化研究;三是深层储层与围岩地震响应差异区分度低,造成目标刻画和流体预测难度大,亟须加强高分辨率地震采集、处理一体化技术攻关;四是深层—超深层具有高温、高压、压力系统复杂等特点,超深井安全高效钻井和储层改造难度大,深地勘探的系列配套工程工艺技术都需要迭代更新。

随着中国石化“深地工程·川渝天然气基地”正式挂牌,四川盆地深层—超深层勘探进入了新的阶段,未来将以“深地基地”建设为牵引,进一步聚焦油气高效勘探开发生产实践中的关键问题,开展原创性基础理论研究、关键技术研发,支撑和引领深层天然气获得更大发现。

(作者为石油勘探开发研究院专家)