十年磨一剑 砥砺创辉煌

中国石化綦江页岩气田勘探创新发展纪实

黄勇 谢红斌 段华 王强 王玮

2022年11月18日,中国石化勘探分公司提交的綦江页岩气田首期探明地质储量1459.68亿立方米通过自然资源部专家组审定,标志着我国又一个超千亿立方米的整装页岩气田诞生。

綦江页岩气田位于重庆市綦江区和贵州省习水县境内,处于四川盆地川东南盆缘复杂构造区,是这一领域发现的首个中深层—深层页岩气大气田。

四川盆地埋深3500—5000米的深层页岩气资源量11.4万亿立方米,是我国页岩气增储上产的重点领域。深层页岩气勘探主要面临深埋高温高压条件下页岩气成储成藏认识不清、复杂构造区页岩气层埋深跨度大和"甜点"预测难度大、大型压裂难以形成复杂缝网等三个世界性难题,是制约深层页岩气高质量勘探和效益开发的关键问题。

面对深层页岩气这块"硬骨头",勘探分公司十年磨一剑,发展了页岩气成藏富集理论认识,形成了"看得准、打得快、压得开、能高产"的可复制的关键配套技术。

三个阶段,引领国内页岩气勘探迈向更深禁区

綦江页岩气田的勘探发现历经探索、发展、成熟三个阶段。

探索阶段:初试牛刀,实现深层页岩气勘探重大突破。

标志性成果:国内首口针对深层页岩气获得工业气流的页岩气井——丁页2井。填补了国内深层页岩气压裂工艺及工具的空白,打破了国外在装备及工具领域的垄断地位。

丁山地区油气勘探起步较早,主要以二叠系茅口组和震旦系灯影组为主要勘探对象,但均未实现商业突破。中国工程院院士、时任勘探南方分公司总经理郭旭升以焦页1井突破为契机,要求开展了四川盆地及周缘地区页岩气整体评价工作,从而发现丁山地区五峰组—龙马溪组深水陆棚相优质页岩发育,整体展布稳定,具有形成页岩气大气藏的良好物质基础。

2013年7月,勘探分公司决定利用原常规天然气探井隆盛2井直井眼进行侧钻,这就是当时国内的第一口超深页岩气水平井丁页2HF井。

电缆射孔泵送桥塞分段压裂联作工艺是世界级的难题。当时,丁页2井井下温度高达146摄氏度,井底压力高达140兆帕,而国内外施工工具最高抗压能力仅为105兆帕。在外国公司单方面"宣布"退出合作后,勘探南方分公司联合参建单位通力合作,不断攻关新技术,成功创造了集团公司射孔井底压力最高纪录和国内深井页岩气层电缆射孔分段压裂新纪录,打破了国外公司在高温高压深井页岩气层施工上的独家垄断,填补了国内深井页岩气层分段施工的空白。



地质人员开展野外地质调查

2013年12月,测试日产气量10.42万方,实现丁山页岩气勘探突破。

发展阶段:攻坚克难,初步形成深层页岩气压裂工艺技术。

标志性成果:綦江页岩气田第一个深层页岩气试验区——东溪深层页岩气试验区。通过一体化攻关,理论认识、关键技术和现场试验取得积极进展,初步揭示了深层页岩气富集机理,建立了"超压富气"模式,指导了目标优选,落实了有利目标区,分别在丁山、东溪深层部署丁页4、5井和东页深1井;探索形成了"密切割、增净压、促缝网、保充填"1.0版缝网压裂工艺技术,实施井产能大幅提升,有效推进了深层页岩气勘探进程。

2019年1月,东页深1井试获日产气31.18万方。东页深1井是四川盆地首口埋深大于4200米的高产页岩气井,其突破表明深层页岩气具有压力系数高、含气性好的良好地质条件,突破了埋深超4000米以深压裂工艺技术,为深层页岩气勘探开发奠定了技术基础,实现中国石化4200米以深深层页岩气勘探重大突破。

成熟阶段:持续攻关,实现深层页岩气商业勘探突破。

标志性成果:綦江页岩气田日产量最高井丁页7井,突破了川南埋深超4400米的深层页岩气高产气流关。其压裂装备、工具及材料全部实现了国产化,大幅降低了施工成本,实现了降本增效的预期目标。

勘探分公司针对深层页岩埋深大、地应力高、水平应力差大、塑性强、压裂难以形成复杂缝网等难点,加强了深层页岩气成藏、甜点预测技术及压裂工艺攻关,形成了深层页岩气甜点评价技术及压裂工艺方案。2022年1月,丁页7井试获日产42.8万方高产页岩气,实现了丁山深层页岩气勘探重大突破,深层页岩气压裂技术逐步成熟。

自此,中国石化涪陵页岩气田之外第二个万亿方资源阵地,实现了川东南盆缘复杂构造区新场南—东溪—丁山—林滩场整体连片,评价埋深小于5000米有利面积1585平方千米,资源量11930.5亿方。

汇聚力量,引领国内深层页岩气勘探理论发展

丁页2HF井突破后,深层页岩气仍然存在富集高产主控因素不清,深层页岩气"甜点"关键参数预测技术及高效压裂技术和装备深层页岩压裂难度大,现有工程工艺、装备远不能满足深层页岩气压裂的需要等问题。

2017年2月,中国石化成立深层页岩气技术攻关领导小组,在綦江页岩气田丁山—东溪地区设立中国石化首个深层页岩气攻关试验区,由勘探分公司牵头,中国石化三大研究院、石油工程公司参加,汇集国内优势力量组成联合攻关团队,按照"地质工程一体化,勘探开发一体化"的攻关思路,系统开展深层页岩气基础地质理论研究和关键技术攻关。

"深层页岩气具有良好的勘探潜力,评价川东南深层页岩气资源量超2万亿方。"勘探分公司代表、党委书记胡东风表示,"我们的研究成果支撑了盆缘复杂构造区首个中深层—深层页岩气田——綦江页岩气田的勘探发现。"

"储"在哪里?——建立了深层优质页岩储层发育模式,揭示了深层页岩气具备良好的勘探潜力。

针对盆缘"双复杂"地区页岩气成藏规律认识不清的问题,攻关团队依托国家和中国石化科研项目,以及国家重点实验室平台,通过超1320米长的系统取心以及超10000项次的分析化验,开展深层深水陆棚相页岩孔隙发育与保持机理研究,建立了深层优质页岩储层发育模式,揭示了深层页岩气具备良好的勘探潜力。开展深层深水陆棚相页岩孔隙发育与保持机理研究,首次发现埋深近6000米的超深层深水陆棚相优质页岩依然具有高孔、有机质孔发育的特征;"储层流体超压"和"石英抗压保孔"联合作用,有利于压裂缝—粒间孔—纳米级有机孔的高效连通,创新形成深层页岩气"超压富气"新认识,建立了深层页岩气高产富集模式。

"甜"在哪里?——突破了深层页岩气"甜点"地震预测技术瓶颈。

针对复杂构造区页岩气层埋深跨度大、"甜点"预测难度大的问题,攻关团队在川东南盆缘复杂区采集了满覆盖面积3662平方千米的深层页岩气高精度三维地震资料,收集川南地区600多口页岩气井的钻井资料,开展深层页岩岩石物理测试及建模研究,突破了深层页岩气"甜点"地震预测技术瓶颈,创新形成了基于扰动体积模量的压力系数预测技术、适应深层复杂构造的双约束含气量预测技术、各向异性增强的裂缝五维地震预测技术以及区域应力背景约束的水平应力差预测技术等多项特色技术组成的地震预测技术系列,含气量预测相对误差小于5%,水平应力差预测吻合度大于80%,有效提高了地震预测精度。

持续攻关,引领深层页岩气压裂技术突破

针对前期探井测试产量低、不稳定的问题,攻关团队依托中国石化"十条龙"科研项目,潜心研究深层页岩气破岩模式及缝网形成机理,开展压裂装备改进攻关,研发深层页岩气压裂测试装备,满足了深层页岩气水平井高压安全施工的需要。

"通"向哪里?——深层页岩气高应力储层压裂工艺技术。针对深层页岩地应力高、两向应力差大、转向困难、难以穿透多个层理等问题,创新形成了以多段少簇、大液量、高排量、中强加砂、双暂堵、一体化滑溜水变粘交替注入等技术对策为核心深层页岩"密切割、增压扩体、均衡延展、保充填"立体缝网压裂2.0版技术方案,提产效果显著。

——配套了深层页岩气压裂装备及材料。研发140兆帕带金属密封高抗压页岩气井压裂测试井口以及抗高压压裂及电缆泵送配套装备,满足了深层页岩气水平井超高压压裂及泵送施工需要。

——形成了高应力储层大规模压裂实施与评价技术。建立了"四控一防"现场大规模加砂压裂施工技术,严格控制砂比和段塞长度。

——形成了完整的安全风险清单和管控措施。坚持习近平总书记"绿水青山就是金山银山"理念,打造"全排查、深分析、细管控、实整改"的安全环保管理模式,有效保障施工全过程安全、高效、环保。

这些研究成果有力支撑和指导了四川盆地五峰组—龙马溪组深层页岩气选区评价、井位部署、水平井钻探等,实现了埋深4000—4500米深层页岩气勘探重大突破,落实了川东南盆缘复杂构造区万亿方富集区带,为向埋深大于4500米超深层页岩气拓展奠定了基础。

2020年4月,勘探分公司"海相天然气勘探创新团队"入选中华人民共和国科学技术部"创新人才推进计划重点领域创新团队",也是中国石化唯一推选单位。

綦江页岩气田建成后,将极大推动国内页岩气产业的发展,对实施绿色低碳战略、促进地方经济发展具有重要的社会效益。



大规模压裂施工现场



试气点火现场