



奋进新征程 | 建功新时代 | 牢记嘱托 再立新功 再创佳绩 喜迎二十大

## 核心阅读

作为气藏开发最重要的工程技术之一,压裂工艺近年来不断革新进步,成为油气高质量勘探和效益开发必备的攻坚利器。四川盆地是世界上最早发现和利用天然气的地区,但由于资源秉赋差、地质构造复杂、工程难度极大,大量的天然气储量仍封存在地下。西南油气针对致密砂岩、海相碳酸盐岩和深层页岩气不同特点的储层,攻关形成了须家河组致密气藏精细分层大型压裂技术、川西致密砂岩气藏水平井高效压裂关键技术、超深层海相碳酸盐岩气藏差异化定点酸压关键技术等一系列压裂技术,实现气田高质量勘探和效益开发。

## 建设地下“新蜀道” 亿方好气“压”出来



中江气田压裂改造施工现场。

雷永生 摄

薛婧 尹琅 王峻峰 邓艺平  
缪耐杰 简高明

彭州6-3D井通过衬管完井完成10段酸化改造,测试获天然气日产量约74万立方米,取得超深井和平段分段能力新突破。”

“中江气田14口新井运用高密度裂缝立体压裂技术,助推气田日产量突破420万立方米,创历史新高。”

“丰谷110井顺利完成7段9簇加砂压裂施工,测试获天然气日产量5.32万立方米,对须家河二段裂缝欠发育区储量升级应用具有重要意义。”

近日,西南油气的办公楼大厅,正中的巨型电子屏上正在滚动播放近期生产动态。捷报频传,它们都提到了“压裂”。相较于油气勘探开发领域各种生涩难懂的专业词汇,“压裂”相对容易理解——通过地面设备泵注液体提升压力,使地层产生裂缝,形成油气流动的“高速公路”,加快油气产能释放。

作为气藏开发最重要的工程技术之一,压裂工艺近年来不断革新进步,成为油气高

质量勘探和效益开发必备的攻坚利器。改变了全球油气供需格局的北美页岩油革命,正是得益于以“低成本水平井钻完井技术+大规模水力压裂技术”为核心的工程技术突破。

知之非艰,行之惟艰。四川盆地是世界上最先发现和利用天然气的地区,总资源量达78万亿立方米,驻地于此的西南油气似乎占尽天时地利。然而,事实并非如此。

“我们的区块‘小、散、边、差、少’,都是难啃的骨头!”西南油气工程技术管理部科研人员钟森说,“资源秉赋差、地质构造复杂、工程难度极大,大量的天然气储量仍封存地下。”

西南油气的勘探开发区主要集中在川西、川东北和川南地区,涉及致密砂岩、海相碳酸盐岩和深层页岩气三大领域,探明天然气储量中,未动用储量占比高。

“针对储层不同特点,升级与之匹配的压裂工艺是我们一直努力的方向。”钟森说道。

针对埋深3000米以浅的中浅层致密气藏,他们借鉴非常规开发模式,以提高裂缝

复杂性、降低流动阻力、增加改造体积为目标,在沙溪庙、蓬莱镇组气藏大力推广多尺度高密度裂缝体积压裂技术;根据不同储层特征,配套使用前置液氮泡沫压裂、加密井低伤害压裂、高效暂堵、纤维防砂等技术,单井产量较常规工艺平均提高83%。

针对埋深超过4000米的须家河组深层致密气藏,他们借鉴页岩气体积压裂思路,以沟通天然裂缝、预防出水为目标,精细化识别裂缝、气水关系,依托超高压装备,纵向精细分层,横向波及远端,沟通更多层、更大范围的天然裂缝形成缝网,在新盛101-1井、丰谷110井等9口井应用“桥塞封隔分段+多簇射孔+超高压”压裂工艺,取得须家河组油气勘探新突破。

针对埋深6000米以深的超深碳酸盐岩气藏水平井或大斜度井开发,他们优选衬管完井工艺,采取提升泥浆性能、模拟通井等措施确保井筒畅通,保障衬管及完井管柱顺利下入,采用“滑套分流+多级暂堵+交替注入”的酸化工艺,在彭州6-3D井、新深102D井等15口井成功应用,有力支撑元坝气田、川西气田、河坝气田的产能建设项目。

如今,压裂技术“打怪升级”的脚步仍未停歇,提速提效降本、深层页岩气压裂技术优化、海相气藏完井改造一体化攻关……都是亟待工程技术人员破解的难题。“只有把勘探开发技术做到极致,才能实现高质量勘探和效益开发,实实在在掌握在手里!”钟森说。



## 关键技术

## ● 须家河组致密气藏精细分层大型压裂技术

攻关纵横向裂缝密度设置、裂缝建造和长期高导流裂缝保持等关键技术,创新形成“大排量+大规模+多梯度变黏压裂液+组合粒径加砂”为关键的精细分层复合型压裂技术,实现单井多层次叠加,沟通天然裂缝,构建复杂裂缝系统,增大改造体积。

## ● 致密砂岩气藏高密度裂缝立体压裂技术

构建非均质致密砂岩气藏长水平段压裂三维地质模型,创新形成以“高密度裂缝优化配置、变尺度裂缝立体压裂和低吸附变黏压裂液”为核心的高密度裂缝立体压裂技术。可提高裂缝复杂性,最大程度动用储量。

## ● 超深层海相碳酸盐岩气藏差异化定点酸压关键技术

建立碳酸盐岩定量化可压性评价方法,形成基于可压性分级的降压工艺优化技术。创新长井段碳酸盐岩定点分段设计方法,利用油管多级滑套实现点分流改造,形成长井段衬管井多级油管准定点分流酸压工艺,实现长井段甜点有效识别及改造。

◀ 井站员工观察新井生产运行情况。袁鹏 摄

## 建成“新蜀道”为“虚家伙”正名

“上有六龙回日之高标,下有冲波逆折之回川。”蜀道之难,与巴蜀独特的地理位置息息相关,四川盆地是一个被群山包围的巨大凹陷,盆地西部横断山脉属于青藏高原,正是剧烈的板块挤压造就了“窗含西岭千秋雪”的盛景。

地下3500~5600米深处,须家河组致密砂岩气藏分布范围广、资源潜力大,但在水平向板块挤压、垂直向上部地层的重压下,岩石就像压缩饼干一样异常坚硬致密。天然气储集在比发丝还细的岩石孔隙之中,多年来科研人员一直无法有效建立连通储层的“地下蜀道”,储量未动用率高达90%。“虚家伙”由此得名。

“常规压裂改造后,裂缝仅形成一条主干道,而且极易闭合。”西南油气高级专家刘林眉头紧锁,压裂技术难题犹如剑门关摆在研究团队面前,一夫当关,万夫莫开。

“既然道路单一,就想办法多修几条。”刘林用铅笔划过储层地质挂图,“须家河组纵向跨度几百米,我们一米一米分析地质工程甜点、一段一段优化工程方案,不信找不到出路!”

2019~2021年,在新场一合兴场须家河组气藏开发试验区内,地质工程一体化团队评价裂缝发育情况、分析地层压力变化、开展可压性评价,终于找到几个重要“甜点”。

为了将微米级储层有效压开,他们借鉴非常规气藏开发工程技术思路,采用体积压裂进行储层改造,利用高压液体将岩石“打碎”形成复杂裂缝,并铺置支撑剂防止裂缝闭合。

为了将“地下蜀道”建成高速公路,他们经过数百次室内试验、建模模拟,提出了“精细分层+桥塞分段+大排量+高强度”的压裂思路,单段加砂量提升了两番多,施工排液量提升两倍以上。

“不同于传统压裂液,变黏压裂液不再需要提前配置,而且能根据储层特征实现黏度实时调控。”刘林介绍。

几项特色工艺技术在新盛1井区3口井应用,合计日产气超42万立方米,其中,新盛101井获无阻流量68.3万立方米/日,投产后稳定日产气超20万立方米,对加快推进合兴场须家河二段气藏动用储量效益开发具有重要意义,但距离整个气藏达到效益开发指标还有距离。

“思路是对的,但是缝高不够。”刘林说。针对这个问题,他们进一步增加桥塞分段数、扩大规模、运用自悬浮支撑剂等,创新形成精细分层复合大型压裂技术并成功应用在丰谷110井。

6月8日,西南油气部署在川西坳陷丰谷构造带变形区的丰谷110井,采用精细分层分簇、超深穿透射孔、超高压大排量、低砂比连续加砂、变黏压裂液等特色工艺,顺利完成7段9簇压裂施工,测试获5.32万立方米/日工业气流,取得须家河二段裂缝欠发育区孔隙型储层新类型勘探重大突破。

## 在地下6000米穿起“巴罗达珍珠”

在2007年4月的一个拍卖会上,一串由68颗完美珍珠穿成的名为“巴罗达珍珠”的项链,拍出了709万美元的天价。在川西气田6000米以深的地下,储量甜点犹如散落的“巴罗达珍珠”,璀璨而珍贵。

6月的川西平原,茵茵秧苗拔节生长。彭州6-3D井放喷池熊熊火焰接近20米高,这场与超深层碳酸盐岩气藏的博弈,胜者是西南油气压裂科研人员。

川西气田深如“地下珠峰”,薄如“纸片”,密如“磨刀石”,集超深、高温、高压、高含硫于一体。要想从中将天然气快速高效地开采出来,无疑是世界级难题。

在6000米以深的地下,钻井轨迹穿行于含气储层,井眼通道类似参天大树的树干。酸化压裂,就是利用酸液与碳酸盐岩的溶蚀反应,形成众多弯曲细长树枝状的酸蚀裂缝,让封存在岩石孔隙里的天然气都有进入井眼的可能。

“开发川西气田,最让人头疼的就是储层压不开。”西南油气副总工程师杨永华说,“2016年,彭州113井酸压施工时,限压120兆帕,试挤260次都不能压开地层,难以建立有效的流动通道。”

如何降低破裂压力、压开储层采出资源,是摆在储层改造团队面前最紧迫的问题,也是最难啃的“硬骨头”。为了打开禁锢川西气田有效开发的枷锁,研究团队对每口施工井进行“全身体检”。

“首先要分类研究,明确不同储层被有效压开的难易程度,一味使用高压力,有可能破坏储层,因此要采取差异化的设计施工。”团队成员分析对比先导试验井数据,逐步理清了攻关思路。

经过一年持续攻关,他们终于找到雷口坡组储层可压性主控因素,大胆提出川西气田超深储层可压性评价方法,成功预测气井压开难易程度,实施符合率高达90%以上,找到了解锁气藏的“金钥匙”。

“宝库”打开了,但储层“甜点”有好有坏,如何识别并穿起散落在宝库里的“巴罗达珍珠”,是摆在科研团队面前的又一难题。

他们通过“甜点”识别技术找准“巴罗达”,在海量数据中找出识别优质储层的关键因素,创新建立了多参数定量评价方法及评价标准,填补了理论空白。

他们采用立体酸压工艺,穿成“珍珠项链”。纵向上,他们通过三维定点布酸,改变多个储层的酸化剖面,让酸液充分流动,精准实现优质储层充分改造,井眼像穿珍珠一样把每个地质工程“甜点”穿起来;横向,通过酸液与压裂液交替注入技术,使裂缝在储层内充分扩展,保证酸蚀缝长,提升裂缝复杂程度,形成茂密的“树枝网”。

新技术在川西气田集成应用后,主体区气井产量较前期井平均提升近60%。气田一期产能建设项目的首口超深长水平井——彭州6-3D井在酸压施工中,9个分流滑套随着完井管柱下入7456米,“多级暂堵+交替注入”技术顺利实施,地质工程“甜点”深度改造,“气龙”喷涌,日无阻流量高达225万立方米,相较前期同构造开发井提高1.76倍。

## 让两亿年前的“气”无处可藏

最近,刚出土的“青铜神坛”“玉璋”让世人再次惊叹古蜀文明博大精深,三星堆无疑是四川德阳最亮眼的名片。但很多人不知道,德阳还有另一张名片——地下2000~3000米的中浅层致密砂岩气藏,面世30余年,依然在造福着一方百姓。

中浅层致密砂岩气藏囊括了马井、新场和中江等6个大中型气区,在地质工程人员的共同努力下,2007年以来,取得了年产气25亿立方米稳产15年的可喜成果。但是随着气藏滚动扩边勘探评价,部分储层表现出孔隙降低、河道变窄、非均质性增强的特征,想获得更多天然气无异于大海捞针,以前的常规压裂工艺已无法实现效益开发。

“只有不断迭代升级压裂工艺,精细布缝、精准支撑、精确输送,想方设法沟通每一处裂缝系统,才能榨尽每一米钻遇储层。”西南油气工程研究院压裂中心主任王兴文说。

如果把致密气藏的储集空间比作人体器官、把天然裂缝系统比作动脉血管,那么立体压裂便是形成大量毛细血管、联通动脉和各个器官、让血液充分流动起来的关键技术。

研究团队围绕人工裂缝网络优化设计、技术构建、建造措施等方面展开攻关,最终形成以“轴向密切割、径向促均衡、垂向控缝高”促进改造体积全控制的高密度裂缝优化配置技术,裂缝间距由常规分段的50~100米降为10~15米,控制体积超95%,有效实现人工裂缝覆盖程度、储量控制程度最大化,让储层“活”起来。

裂缝渗流通道虽然打开了,但在闭合应力的作用下,就像“自动门”一样,因此需要支撑剂让它保持常开。以往使用的单一粒径支撑剂难以精准进入多个尺度的裂缝通道实现有效支撑。对此,研究团队形成了“多粒径组合、变黏压裂液、连续强加砂”的多尺度裂缝强支撑技术,并成功应用于江沙318HF井,完成11段61簇体积压裂施工,压后日无阻流量超百万立方米,刷新了川西中浅层致密砂岩储层改造产量纪录。

压裂液是携砂支撑剂进入裂缝渗流通道的关键载体。面对越来越高的施工要求,压裂液既要满足“低黏度”大排量降低施工摩擦需要,又要满足“高黏度”大砂比携砂性能要求,相互矛盾的施工需求为压裂液性能研究提出了新的挑战。

为破解压裂液“变黏”难题,油化研究团队通过大量试验,自主研发溶解速度快、携砂性能好、黏度可调节、耐温抗盐低伤害的低吸附变黏压裂液配方,辅以智能设备,实现压裂液加注远程控制、实时调节、精确加入,现场试验5井次,平均降阻率超80%。

除此之外,针对不同储层特点,他们精耕细作,不断加大新工艺的研发推广力度,确保川西中浅层低品位致密砂岩储量升级动用,让形成于两亿年前的侏罗纪气藏无处可藏。