

能源强国调研纵深行

# 重复压裂：“吃干榨净”剩余资源

全国产化重建井筒重复压裂技术日益成熟，有效支撑国内页岩气田老区开发增储上产



涪陵页岩气田页岩气水平井  
重复压裂现场。李占军 摄



本报记者 夏梅 通讯员 骆洪锋

7月17日，焦页21-3HF井圆满完成重建井筒和储层改造施工，试获11.28万立方米/日高产气流，标志着全国产化重建井筒重复压裂技术日益成熟，有效支撑国内页岩气田老区开发增储上产。

重建井筒重复压裂技术是提高涪陵页岩气田老区采收率的重要手段。江汉油田积极突破技术瓶颈，实现该技术全面国产化，推动国内石油行业重复压裂技术迎来新突破。

## 步履维艰，从“卡脖子”到国产化

经过近几年实践探索，重建井筒重复压裂技术已日趋成熟，但说起该技术从无到有、从全进口到全国产化的历程，江汉油田油气产能建设管理中心技术人员深知其中艰难。

“我们最初采取投堵剂和暂堵球的方式进行重复压裂，效果都不好。”该中心完井管理室主任赵昆介绍。2017年，他们试验了3口井，但日产量都不稳定，可采储量提升也不明显，重复压裂只能暂时搁置。3年后，重建井筒重复压裂技术再次进入大家的视野。

重建井筒重复压裂技术是在原有套管中下入尺寸更小的套管，完井后进行再次压裂。该技术的关键点和难点是前期重建井筒，当时国内没有企业进行过此类试验，只有国外某知名油服公司掌握这项技术。于是，江汉油田与该公司合作，率先在国内开展探索实践。

在此背景下，焦页4HF井进行重建井筒重复压裂，工艺、工具和方案都由国外公司主导。全进口不仅费用高，关键技术还被握在别人手里。为此，技术人员全程跟进每口井施工，努力掌握作业工序、了解使用工具及特点，通过自主研发，设计工具、展开试验，不断提升技术水平。

跟了3口井以后，重建井筒技术研发和试验都见到了成效，大家觉得时机已经成熟了。“今年上半年，我们和国外公司在焦页5号平台同台竞技——我们负责焦页5-1HF井，国外公司负责焦页5-2HF井，两口井同时开展重建井

筒重复压裂。”赵昆说。这口井能否成功，关系着能不能摆脱国外的技术依赖，把重建井筒重复压裂技术掌握在自己手中。

作为首口国产化重建井筒重复压裂试验井，焦页5-1HF井备受关注。“从设计到方案，再到每一个工具、液体的选择，全由我们主导，大大小小的问题不少，好在最后收获是巨大的。”赵昆说，“焦页5-1HF井试获14.2万立方米/日高产气流，高于国外公司主导的焦页5-2HF井，这说明我们已很好地掌握了这项技术，再不用受制于人。”

## 联合作战，地质工程一体化科学选井

到底哪些井适合重建井筒重复压裂？“找剩余储量比较多、压裂工艺改造不充分的低产井。”该中心技术管理室主任崔志恒介绍。根据地质工程一体化考量，焦石坝一期低产井最适合开展重复压裂。

早期受制于地质认识和工程工艺技术的局限性，一些井压裂后产量较低。“开发初期对页岩气认识不精准，一口井只知道有气，但没法精准预测有多少气，再加上做不到精细压裂，有些段改造不充分。”该中心完井管理室副主任吴魏说。如今，通过建模数模一体化、气剖面测试等技术，技术人员可精准预测每口井可采储量、剩余储量，评价初次储层改造效果。

把资源“吃干榨净”，也是老区提高采收率的迫切需求。由于页岩高度致密，水平井分段压裂是打开页岩气流动通道的主要手段，改造充分与否直接关系试气产量。随着地质认识加深和精细压裂技术创新，重复压裂逐渐提上日程。哪口井适合重复压裂、重点改造哪些段，技术人员也有了方向。

有了方向，怎么选井是关键。为了选好井，技术人员建立选井流程，对焦石坝一期低产井进行复查，通过“好中选差”“差中选好”的方式筛选。所谓“好中选差”，就是在页岩原生品质好的区域，通过对比，选取试产产量和累产较低、压裂改造强度和规模较差的一类井作为优选潜力井；“差中选好”，则是在一批低产井中，优选地质潜力大的井。

据此，技术人员优选了焦页21-3HF井进行重复压裂。“通过和邻井、高产井对比测井解释结果，该井测井解释TOC（总有机碳）、孔隙度等地质指标与高产井相当。”崔

志恒说，“在分析每一段压裂曲线后，发现该井部分分段加砂强度偏低，具备较大重复压裂潜力。”最终，试气结果证实这套潜力井筛选方法是正确的，也为后续开展重建井筒重复压裂提供了有益借鉴。

## 技术创新，突破瓶颈助力提效降本

7月7日，焦页29-1HF井重建井筒完井，用时仅20天，比计划提前了12天。相比第一口国产化重复压裂井的40多天工期，该井工程提速显著。“在技术逐渐成熟的前提下，我们优化生产运行，让各工序衔接更顺畅，收到了提速效果。”崔志恒说。

工程提速之外，施工成本大幅降低也是重建井筒重复压裂国产化的亮点。据吴魏介绍，前期进口材料费用贵、服务费高，一口井的成本要超过3000万元，现在能控制在2500万元以内。

技术、工具的国产化是降本的关键。江汉油田油气产能建设管理中心以工具材料国产化为切入点，探索重复压裂提效降本。因为是套管中再下套管，在两个套管狭小的环空中用固化水固定，被称为“套中固套”技术。内部小套管外径只有65毫米，原本适用于105毫米的井下工具显然不合适。技术人员根据实际需求重新设计，找厂家定制材料，专门研发了适合小套管的井下工具。“现在连续油管钻塞、螺杆马达等井下工具，都适合小尺寸的套管。”赵昆说。同时，一体化变黏阻水、固化水、固井水泥浆体系等攻关成果，也为重建井筒重复压裂国产化降本提供了技术支撑。

在已经改造过的储层再次精准压裂，并非易事。“以往压裂分段比较粗放，更没有密切割的概念，段距之间改造不充分。我们开展双暂堵密切割精细化压裂，将目的段切得非常细，全部压碎，形成通畅的气体流动通道。”吴魏说。精细压裂的前提是了解水平井分段压裂每一段改造情况和剩余气分布，通过气剖面测试，技术人员可精准刻画压裂改造缝网分布情况，指导精细压裂。

作为国内第一家成功应用重建井筒重复压裂技术的企业，江汉油田将持续提高重复压裂技术适用面，针对老区高累产井开展试验，通过精细刻画立体井网下复杂缝网体系，把剩余资源“吃干榨净”，确保涪陵页岩气田持续稳产上产。

## 一体化攻关加快重复压裂工艺规模化应用

□李远照

页岩气开发是一个认识不断加深、工艺不断迭代的过程。页岩气投产后产量衰减与常规天然气不同，稳产周期相对较短。涪陵页岩气田一、二期开发进程中，对页岩气改造机理的认识不够清晰，单井、井组改造的充分程度与后期投产井EUR（最终可采量）动用不匹配。围绕如何动用单井最大储量、提高气田整体采收率，江汉油田研究形成了页岩气水平井重建井筒重复压裂工艺体系，这对于页岩气开发意义重大，对于早期认识不足导致的改造不充分优质储层动用有着巨大的经济效益。

2021年以来，涪陵页岩气田已完成7口井重建井筒重复压裂工程，其中自有技术应用3井次，工程风险逐渐降低，工艺成熟度逐渐完善。随着工艺逐步推广，工程项目逐步规模化，但成本控制和单井EUR矛盾也越发突出。如何合理控制成本，优化选井实现老井储量最大化动用，是后续工程面临的主要挑战。同时，不断提升核心产品、关键材料的性能也是目前重点工作之一。

重建井筒重复压裂是一项系统工程：优化选井是重复压裂增产的前提，确保重建井筒重复压裂干得成的关键，重复压裂改造机理也与普通新井压裂不同，要经过持续实践。依托涪陵页岩气田良好的地下、地面条件，江汉油田形成了从重建井筒到重复压裂一系列自主创新的工艺技术和推荐做法。特别是在重建井筒工序方面，形成了直翼式树脂套管扶正器、固化水、机-液一体化脱节器的产品设计、生产加工、质量检测全套标准；在重建井筒压裂工藝方面，形成了分段分簇设计、基于老簇干扰分析的重复压裂人工裂缝控制技术及工艺后评估技术，全面解决了“卡脖子”问题。

下一步，江汉油田将持续完善工艺技术管理体系，加强一体化攻关深度，稳步推进关键技术、核心产品迭代升级，大力推进重建井筒重复压裂工艺早日实现规模化应用。

（作者单位：江汉油田油气产能建设管理中心）

## 主要创新点

**页岩气水平井重建井筒重复压裂技术**

■ 页岩气水平井重建井筒重复压裂技术是指对前期产量贡献较低的老井，通过井筒重建，在原有套管中下入尺寸更小的套管，封堵原改造层段，精准挖潜段簇间剩余储量，提高单井采收率的压裂工艺技术。

与传统的全井暂堵转向重复压裂技术相比，该技术可解决投球封堵的次序和位置不准确，以及液体走向规律不明确等问题，能有效提高储量动用率和气藏采收率。



## 重建井筒助力页岩气老井“重生”

□李晴 吴丽萍 高婷

自2013年大规模商业开发至今，涪陵页岩气田累计探明储量近7000亿立方米，投产气井700余口。部分压裂井历经稳产、间开和增压间开多个阶段，进入低产期。为了让这些老井重获新生，江汉石油工程井下测试公司一体化开展重复压裂增产技术研究和应用，通过两年攻关实现了重建井筒重复压裂技术自主化，成为涪陵页岩气田稳产的重要支撑。

重建井筒重复压裂好比“房屋改造”，是在已射孔产出的原井筒中下入小尺寸套管，经过二次固井封堵原有油气通道，然后在未改造的井段进行精准射孔分段压裂，再次改造地层，使老井“重获新生”。

2020年底，江汉石油工程井下测试公司与江汉油田、国外公司联合，率先在涪陵页岩气田开展技术论证与现场试验。“重建井筒重复压裂完全颠覆了以往的重复压裂理念，在国内也没有任何经验可参考借鉴，施工难点很多。我们反复论证、验证方案可行性，开展多次试验，最终，首口试验井获得日产超18万立方米的高产气流。”井下测试公司工程技术研究所所长杜瑞杰介绍，为延

但由于工艺技术复杂、关键工具国内空白、施工费用高及周期长等问题，急需开展自主攻关，打通技术应用“最后一公里”。

在推进重建井筒重复压裂关键技术国产化进程中，该公司与江汉油田建立了高效协同机制，合作组建了多专业国产化工具材料攻关小组，立足涪陵页岩气田地质条件，通过系统分析、重新认识，形成了以动用簇间剩余储量为核的重复压裂一体化服务能力。

重复压裂“干得成”的关键，就是要确保井筒重建成功。套中套是在5.5寸的原井筒内下入3.5寸重建井的井筒套，套管间隙小，扶正器是其中的一套关键装置，相当于在小套管上安装了可移动的“方向盘”。“现有扶正器主要靠机械支撑，套管下入阶段摩阻大、遇阻风险高，均不具备小间隙作业中套管居中度高、摩阻系数小的技术需求。”江汉石油工程试油测试首席专家兼井下测试公司经理袁发勇说。为此，该公司成立直翼式树脂套管扶正器及其制作工艺科研攻关组，研究解决了重建井筒重复压裂施工中现有的套管扶正器技术问题，提供了一种粘贴稳定性好、居中度高、摩阻低、射孔穿透性好的直翼式树脂套管扶正器及安装方法，为延

长页岩气井生命周期、有效提高气藏采收率提供了保障。

经过持续实践，联合攻关小组系统开展井筒重建、重复压裂工艺、井下工具材料国产化等研究，形成了9项关键技术，突破了8项关键工具及材料，全面实现了重建井筒压裂工艺自主化、关键工具和材料国产化，并获得了多项国家发明专利。目前，该公司已逐步完成了所有技术的攻关和成果转化，具备了自主创新的重复压裂一体化服务能力。

2022年12月9日，我国首口采用全自主化工艺技术和工具材料的重建井筒重复压裂气井——焦页5-1HF井成功试获14.2万立方米/日高产气流，测试产量恢复到初次压裂的75.1%，达到国际先进水平，为国内页岩气田老区开发增储上产提供了有效借鉴。江汉石油工程井下测试公司技术人员钟涛介绍。

7月19日，该公司自研重建井筒重复压裂施工的第二口井——焦页21-3HF井圆满完成施工，试获11.28万立方米/日高产气流。同月，第三口井焦页29-1HF井各项指标一次成功率100%，施工周期从32天缩短到20天，全国产化重建井筒重复压裂技术更加成熟。

## 新型环保压裂液体系为地层增能

□王冰 李澎

给地层“补钙”需要用到胶液，其作用类似心脏搭桥手术用到的支架，支撑人造地层裂缝不闭合。加量大、交联时间过快、残渣含量高等问题，导致普通压裂液无法在重建井筒中使用。

“不伤害地层、绿色环保、返排率高，是我们为重复压裂技术研发配套压裂液体系最为重要的先决条件。”钟涛说。

江汉石油工程发展部经理向少华介绍，重建井开发的难点主要有两个：一是重建井本身是已投产老井，长年生产，地层压力亏空，生产能力下降；二是重建井套管尺寸较常规油气井缩减了近30%，压裂液通过套管下入井底的阻力更大。

“重建井筒就像一个底部被阻塞的注射器，压裂液就像注射液，注射器越细，推动注射杆所使用的力就越大。”江汉石油工程页岩气开采技术服务公司技术人员钟涛介绍。

地层压力可将油气通过井筒输送至地表，就像地层的“钙”元素。当地层老化、压力减弱，就像“钙”流失。要想实现在重建井筒内重复压裂，首先要为地层“补钙”。只有先提高地层的“代谢水平”，才能让更多的“气宝宝”蹿出地层，走进千家万户。

有了地层“钙片”，如何克服阻力，顺利将其送到目标地层很关键。为此，该公司科研人员对聚合物减阻剂分子进行了改良，引用分子片段设计理念、采用靶向聚合手段实现了超分子聚集，研发出了FLICK-2S超分子低摩阻连续携沙一体化压裂液体系。

“通常情况下，减阻剂包裹着压裂砂，就像包饺子一样，一张面皮裹着馅儿。而分子片段设计理念是对减阻剂分子结构进行改良，让单分子间呈现串型排列，每个分子都能包裹压裂砂。”钟涛说。分子片段设计理念的引入，让压裂液既像糖葫芦又像元宵，体系减阻率丝毫不受影响且高达75%，指标在行业内名列前端。

不仅如此，为适应“深地工程”需要，科研人员还将体系的耐温范围由常规的45~105摄氏度扩大为30~160摄氏度，适用温范围更广。最高10万ppm（百万分比浓度）的耐盐矿化度，即便含油泥量再高的返排废水，也能实现重复再利用，特别适合严缺水地区油气资源开发。

当前，该公司自主研发的环保低伤害压裂液体系已在国内外3口重建井筒重复压裂施工中成功应用，节省成本约30%，最高日产能达14.2万立方米。