



□赵春国 刘福宽 丁 静 邵晓玲

“连续施工21天，两口井70多层，虽然施工难度较大，但射孔一次发射率和一次成功率均为100%。”8月15日，在山东东营胜利济阳国家级页岩油示范区重点井组牛页2号台射孔施工现场，经纬公司胜利测井公司射孔项目部多射5队队长巴黎正带队进行收尾工作。

射孔被誉为油气勘探开发的“临门一脚”，其目的是建立井筒与目的层之间的油气产出通道。长期以来，经纬公司依托中国石化重点实验室——高温高压射孔效能实验室，逐步形成了满足“两深一非一老”（深地深水、非常规、老油田）不同地质条件、储层类型的射孔新技术、新工艺，为油气井高效勘探开发提供了强有力技术支撑。

高导流射孔 自主创新助力老油田增产

7月28日，胜利测井公司利用高导流射孔技术，成功完成胜利工区高89-斜25等多口井施工，助力油田增储上产。

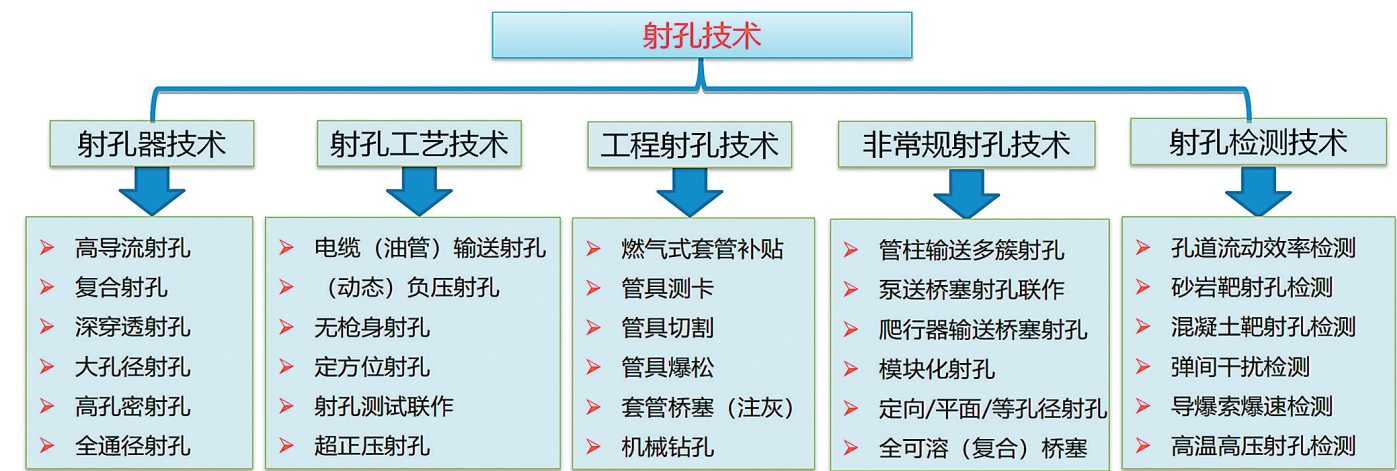
高导流射孔技术是常规射孔大家庭的重要成员，由胜利测井公司自主研发。集团公司专家组鉴定，技术整体达到国际先进水平。其中，基于焓能材料二次爆炸做功提高孔道导流能力的射孔弹达到国际领先水平。

“我们研发的新技术新工艺首先要满足油气生产现实需求。”经纬公司射孔工程高级专家张林说。随着胜利、中原、河南等老油田勘探开发进入中后期，对常规射孔技术创新的要求也越来越高。

项目立项前，张林带领技术人员先后十余次走访胜利油田各单位征求意见，项目团队把突破点放在了新型自清洁射孔弹实验研究上，创新射孔孔道改造技术思路，研究配方配比控制方法，研制出新型药型罩，通过聚能射流在孔道内二次做功，提升有效孔容、流动效率。

不仅如此，针对不同储层的高效射孔完井需求，胜利测井先后成功研制高导流、深穿透、大孔径、高孔密、定方位等系列射孔器，开发完成（动态）负压射孔、电缆（油

射孔技术：踢好油气勘探开发的“临门一脚”



管）输送射孔、射孔测试联作等技术系列，建立形成油气井射孔动态优化系统，实现了高效射孔增产。

截至目前，高导流射孔技术在胜利油田施工1000余口井，平均单井液量提升17%。负压射孔、电缆（油管）输送射孔等常规射孔技术施工井数也不断攀升，受到上游企业高度认可。

一体化泵送射孔 为页岩油气开发“量身定制”

四川盆地是我国第一大页岩气区，针对页岩气泵送射孔施工中存在的井眼轨迹复杂、套变情况多、工具串装配复杂等难题，经纬公司西南测控公司持续攻关，形成了一体化泵送射孔配套工艺系列，大幅提升了泵送射孔的作业效率和安全性，泵送射孔一次成功率从90%提高到99%。

在一体化泵送射孔配套工艺系列中，控制系统是不可或缺的“大脑中枢”。技术人员为研制一体化泵送控制系统，专门根据泵送射孔工艺流程对关键参数的需求，研制出集成化程度高的一体可视化绞车面板，实现深度、张力、磁定位、压力、排量、震动等多参数综合采集与显示，较传统绞车面板优势明显。

除了“大脑中枢”，一体化泵送射孔配套工艺系列也离不开“手和脚”——模块化系列井下工具。团队基于常规射孔枪+接

头的功能性研究，研制了系列模块枪串，同时为解决套管变形导致的工具串阻卡等难题，研发了泵送射孔震击器。

针对以往桥塞结构不稳定、高压密封难、溶解难等难题，团队自主研发制“经纬祝融”全可溶系列桥塞，设计导轨式卡瓦槽、全包围护碗、分体式引鞋，有效应对低温、套变井等生产场景。

一体化泵送射孔配套工艺系列不仅在四川盆地推广应用，而且在陕北煤层气、广西煤层气等区块也发挥了重要作用。截至目前累计施工近400井次，完成泵送射孔约5900段、31000余簇。

值得一提的是，针对深层超深层及非常规页岩油等勘探开发难题，经纬公司持续完善一体化泵送射孔配套工艺系列，建立了温度压力设计指标全国最高、具有国际领先水平的高温高压射孔效能实验室，深入开展射孔效能检测和参数评价。在四川盆地集团公司重点探井福1井顺利完成泵送射孔施工，创亚洲射孔作业井温最高（221摄氏度）纪录；在北疆工区重点井庄深1井完成全国首例超7600米分段桥塞多簇射孔施工，为非常规射孔提供了可借鉴的技术模板。

爆炸松扣和机械切割 解决钻井作业卡钻难题

5月5日，新疆“深地一号”顺北工区，

随着点火按钮按下，司钻房内指重计由184吨恢复到正常悬重169吨，井口震动明显，标志着由胜利测井负责的顺北5-24X井爆炸松扣施工顺利完成，困扰钻井队的钻具卡死难题迎刃而解。

这不是经纬公司第一次展示工程射孔的“绝活”。今年4月，在顺北工区顺北1-13JS井完成油管测卡及机械切割施工，刷新国内机械切割并深最深纪录，一次成功率100%。去年2月，圆满完成顺北6-5X井钻杆切割任务，创造了中国石化切割解卡工艺深度最深、井底温度最高两项工程纪录。

近年来，由于西北、西南等工区地质构造复杂、钻井深度大，钻具遇卡成为常见问题。胜利测井等单位组织技术专家开展超高温高压小井眼爆炸松扣和机械切割等工程射孔技术研究，为施工队伍装备万米高温电缆绞车、耐高温高压测卡仪、爆炸杆等工具，解决卡钻难题。

今年2月，在西南工区中国石化重点井绵竹1井，西南测控公司完成了一项极具挑战性的爆炸松扣施工任务，面对该井井下管柱长达半个月的“卡钻顽疾”，他们在射孔专家谭猛现场指导下，一次性解卡成功，赢得甲方高度赞誉，成为行业标杆案例。

近3年，经纬公司先后完成顺北5-3井爆炸松扣施工、顺北鹰1井切割施工等高难度解卡任务600余次，创国内爆炸松扣、切割施工最深等多项纪录，解卡成功率在96%以上。



江汉油田：限流+后效射孔技术助推页岩气井产能提升

□本报记者 夏 梅 通讯员 肖俊杰 吴 巍

“兴页L190-6-1HF井采用极极限限流射孔技术，试获日产油106.6吨、气2.61万立方米，和邻井相比有明显提升。”8月15日，江汉油田石油工程技术研究院储层改造所副研究员易招波介绍。

近年来，江汉油田持续攻关增产技术，在分段压裂中推广应用极极限限流、后效射孔等优化射孔技术，有效提升了孔眼开启率，增强了裂缝改造效果，实现了单井产能的显著提升。

在涪陵页岩气田开发初期，技术人员按照北美页岩射孔经验采用均匀射孔方式，每簇10~30孔，但井下电视测试发现，仅有约1/3的孔眼能够成功开启。技术人员研究发现，均匀射孔容易形成“优势通道”，导致压裂液流向特定区域，难以开启所有孔眼。“这就像交通分流，将压裂液比作车流、岔路口比作孔眼，如果一段路上岔路太多且条件差异大，车辆会被路面平整且宽的道路引流，导致其他岔路无车可走。”易招波解释。基于这一认识，射孔方式进入“限流射孔”阶段，孔眼开启程度得到明显改善。

然而，技术人员在实践中发现，孔眼数量并非越少越好。过少的孔眼会导致施工压力激增，给地面设备带来安全隐患。经过反复试验，最终确定了极极限限流射孔方案，即在施工管柱的“趾端”，也就是压裂施工的第一段采用多孔数的射孔

方式，后期根据施工中的压力变化，灵活调整后段段的孔数，寻找压力和孔数的最佳平衡点，尽可能让所有孔眼均匀“开启”，形成复杂人工缝网。目前，这项技术已推广应用20余口井，平均单井产量提升10%左右。

面对页岩气开发降本增效的需求，涪陵工区自2022年起大力推行“瘦身井”。“瘦身井”主要指通过优化井身结构设计，在保证安全生产的前提下，适当缩小井眼和套管尺寸，从而降低钻井成本的开发井型，根据埋深等情况分为Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型，每种井型的生产套管尺寸都不同。小井眼对射孔枪、桥塞等井下工具的尺寸要求更严格，为此，技术人员研发了适配不同尺寸套管的射孔枪、桥塞密封工具及桥塞，形成了适配小尺寸套管的专用工具，丰富“瘦身井”配套射孔技术体系。

此外，该油田推广使用后效射孔工艺，通过将穿甲弹的射流效应和热压弹的热压效应结合，实现后效体效应。“后效粒子在孔道内形成漩涡云团并引发螺旋式爆裂，形成了独特的作用机制能够彻底清洁孔道末梢堵塞，形成末端开放的‘菜花状’裂缝。”技术专家介绍。红页3-2HF井应用后效射孔后，裂缝延伸阶段整体施工压力波动较小，更加平稳，试获日产23.8万立方米高产气流，比邻井高出近1倍。目前，红星地区使用后效射孔工艺技术完成了9口井57段的多级射孔施工，气井产量相比邻井均有不同程度提升。

胜利油田：高效射孔工艺赋能页岩油压裂开发

□徐海峰 任厚毅

页岩储层发育微纳米孔隙极为致密，不压裂无自然产能、常规压裂经济效益差，必须依靠大规模体积缝网压裂对地下储层进行深度改造。胜利油田页岩油开采主要采用水平井桥塞射孔联作压裂工艺。造缝过程中，首先需要通过射孔突破套管和水泥环，打开井筒与地层的沟通通道，压裂液接触岩石实现高效破岩。

“射孔技术是实现压裂方案设计的关键一环。”胜利油田石油工程技术研究院专家鲁明晶表示。

压裂是在地层中制造裂缝，为原油顺利开采打下坚实基础。而射孔位置是压裂工艺设计首先需要优化的，它决定了压裂起缝的位置，也是控制裂缝走向的重要手段之一。“射孔处是压裂缝网扩展的起始点，决定了压裂裂缝起裂的效率、竞争扩展情况，以及裂缝延伸的走向。”

理论上，页岩油钻井过程中套管上预留的孔眼同样能够畅通通道，实际上仅仅依靠液体压力，难以通过压裂有效打开储层。“一擦纸撕碎很容易，压碎则特别难。”鲁明晶说。射孔相当于为压裂制造一个薄弱点，能够极大降低储层的破裂压力，有效降低施工难度。

胜利油田普遍采取螺旋式射孔方

式，根据储层改造和压裂设计需求，水平井单段30~60米，布置4~6簇，每簇设置4~10孔。“压裂设计要保证造缝过程中多簇之间互不影响，相当于多个人并肩跑步，不会胳膊相碰，互不干扰。”

射孔、注入前置二氧化碳或酸液、压裂、下桥塞后再射孔……油田每口页岩油井压裂34段、上千个炮眼，若单井施工只能依次进行，施工效率大打折扣。

胜利油田页岩油开发普遍以井组模式为主，射孔与压裂同步配合，采用“拉链式”施工模式。一口井压裂后，实施下步射孔的同时压裂下口井，有力确保了施工效率。

为了有序保障施工进度并实现效益最大化，在页岩油开发过程中，胜利油田、胜利石油工程公司、经纬公司坚持“大生产、大运行”，一体化统筹生产运行，科学匹配各类要素，实现配置最优化。在一体化模式下，目前每天能够有效射孔、压裂三四段，实现了提效降本，民丰注陷实现50美元/桶效益开发。

“射孔射得好、孔眼开得均匀，对于保障压裂效果和施工平稳很重要。”鲁明晶表示，在射孔更优质的情况下，压裂施工排量提得更快，初期施加到储层的净压力更高，改造效果得到保障，施工更加安全可靠。



责任编辑：李佳欣
电 话：59963261
邮 箱：
jyx@sinopec.com
审 校：张春燕
版式设计：王 强

知识链接

射孔是油气田开发中完井阶段的关键技术，核心是通过爆炸或高压射流穿透井下多层障碍（套管、水泥环等），建立地层与井筒的流体通道，以便流体进入井筒。这一技术直接决定油气井的产能。

射孔方式主要根据油层和流体的特性、地层伤害状况、套管程序和油田生产条件来选择。射孔工艺可分为正压射孔和负压射孔，其中用高密度射孔液使液柱压力高于地层压力的射孔为正压射孔；将井筒液面降到一定深度，形成低于地层压力建立适当负压的射孔为负压射孔。

常见的射孔作业有三种方式：常规电缆作业（WCG）、电缆输送过油管射孔（TTP）、油管输送射孔（TCP），各有优缺点。从技术工艺趋势来看，油管输送射孔（TCP）将会越来越广泛使用。

专家视点

射孔技术迎来智能化革命

□经纬公司射孔工程高级专家 张 林

油气井射孔技术作为勘探开发过程中的关键环节，直接决定了油气产能与采收率。当前，随着全球油气勘探向深层超深层和非常规等领域持续推进，作业工艺、施工环境均发生了较大改变，射孔技术正经历革命性变革。

智能化射孔系统的演进必将彻底改变传统射孔作业模式，降低劳动强度，提升作业效率。射孔正从传统人工+机械化作业向全面智能化跃迁，其核心在于构建具备实时感知、自主分析、精准决策能力的射孔器材装配、绞车操作、射孔深度校正等智能射孔作业控制系统。当前，非常规射孔自动化拆卸系统、智能注脂控制系统、电控绞车等技术突破已为这一变革奠定了坚实基础，未来十年将迎来更深刻的智能化革命。

超高温高压射孔将突破260摄氏度/240兆帕的瓶颈，为12000米“深地工程”拓宽油气通道提供技术支撑。中国石化打造了新型超高温炸药及器材研制的国际一流射孔效能实验室，完成了230摄氏度/200兆帕射孔技术研究，实现模拟仿真射孔设计、孔径/穿深等创新突破，保障了我国油气勘探开发向超深井、超高温高压和非常规油气领域的拓展。

射孔优化与油藏地质一体化，为增强油田开发效果和提高采收率提供科学依据。综合分析地震、测井、录井等资料，进行储层特性描述和评价，对岩石力学模拟及裂缝表征分析，结合油气藏开发方案，优选射孔层段和射孔工艺，通过产出剖面测井分析与生产数据拟合，评价指导完井增产施工方案，完善油气藏模拟。实现“一井一策、一层一法”个性化射孔优化，达到“为增产射孔”的目的。

构建民用爆炸物品本质安全体系，消除火工品运输、存储、使用安全风险。推广远程投权+密码起爆模块化电子雷管，避免误操作起爆事故；研制机械手自动化拆装危险性最高的雷管，消除人工接触伤害；开发安全隔离短接，阻止射孔前任何电流通过雷管；研发钝感炸药雷管，从根本上消除起爆药敏感度高、降低安全风险。

这些变革不仅大幅提升作业效率、保障工程安全，更推动射孔技术从“经验依赖”向“智能化数据驱动”的跨越式发展，为我国能源勘探开发提供全新动能。

西北油田：复合增效射孔技术通过极端环境考验

□张 俊 汤继超

近日，塔河油田TKK3-2-6X井传来捷报：102发射孔弹在7米油层中精准穿透，测试初期即实现日产油15.8吨、气5.7万立方米。这项复合增效射孔技术的成功应用，正是西北油田射孔工艺持续突破、向深地要油气的生动缩影。

油气开发的战场，总是向更深、更险的地层延伸。面对超深、高温、高压的极端环境考验，西北油田技术团队一次次交出“破题答卷”。

2019年顺南蓬1井的超高温试验中，常规弹体材料在192摄氏度井底败下阵来。技术人员与厂家连夜攻关，研发出HNS超高温射孔弹——通过改进弹体合金配方和装药结构，穿深精准达标，发射率100%。这项突破不仅解决了当时的难题，更成为顺北地区超深井开发的材料基石。

2021年，TKC1-1H井斜深5698米，射孔井段长达558.5米，夹层厚度131米，需组装7682发深穿透射孔弹和128根89型射孔枪。最棘手的是起爆信号传递，超长井段容易导致断爆。团队创新采用双级冗余起爆方案，在井下分段设置触发装置，24小时实时监控调整布孔密度，最终实现发射率100%，创下国内射孔井段最长纪录。

2021年顺北53-2H井的井底8088米至8092米井段，温度达173.8摄氏度，压力超170兆帕，堪称地下“高压锅”。技术团队联合多方力量，试验耐高温材料，将密封件置于200摄氏度环境下测试24小时，最终优选出适配的耐高温电偶，再以“压力起爆器+延时装置”组合，确保射孔枪在井下18小时高温环境中稳定点火，一举创下国内钻杆传输射孔最深纪录。

技术的落地，离不开管理的护航。2021年起，西北油田推行“清单化”作业模式，将施工流程细化为17类100余项检查标准——从19项安全指标到22条质量规范，从装枪校靶到打压起爆，每一步操作都有章可循。“标准化让风险看得见、控得住，效率自然提上来了。”完井测试管理中心完井测试项目管理部经理李灏说。

如今，西北油田已构建起覆盖超深、高温、高压环境的射孔技术体系：复合增效射孔工艺让石墨系水平井产能显著提升，清单化管理推动施工效率再上新台阶，耐高温射孔弹在192摄氏度环境下稳定工作。石油工程技术研究院钻井研究所党支部书记李林海表示：“下一步，我们将攻关小直径射孔器，目标温度230摄氏度、压力210兆帕，为9000米级超深井开发提供硬核支撑。”