

在地下千米来一场“枪战”，这一油气技术是怎么做到的

油气深埋在地下深处
从几百米、几千米甚至到上千米
看不见摸不着
想要从地下采出到地面
并不是一个简单的过程
涉及了众多复杂的工程技术

其中
有人说勘探最重要
因为它练就了“火眼金睛”，发现了油气藏
有人说钻井最重要
因为它修建“油气”通向地面的人工通道
然而，还有一项技术同样至关重要
但常常被忽视
那就是射孔技术

01 从“狂轰乱炸”到“指哪打哪”

在大众的印象中

钻井后油气就像水井中的水一样流进井筒

其实不然

在钻井过程中

泥浆将不可避免地侵入堵塞井壁地层

如果再下套管、注水泥固井

地层中的油气将“无路可走”

射孔

正是在钻井结束、完井过程中

建立井筒与油气储层之间的通道

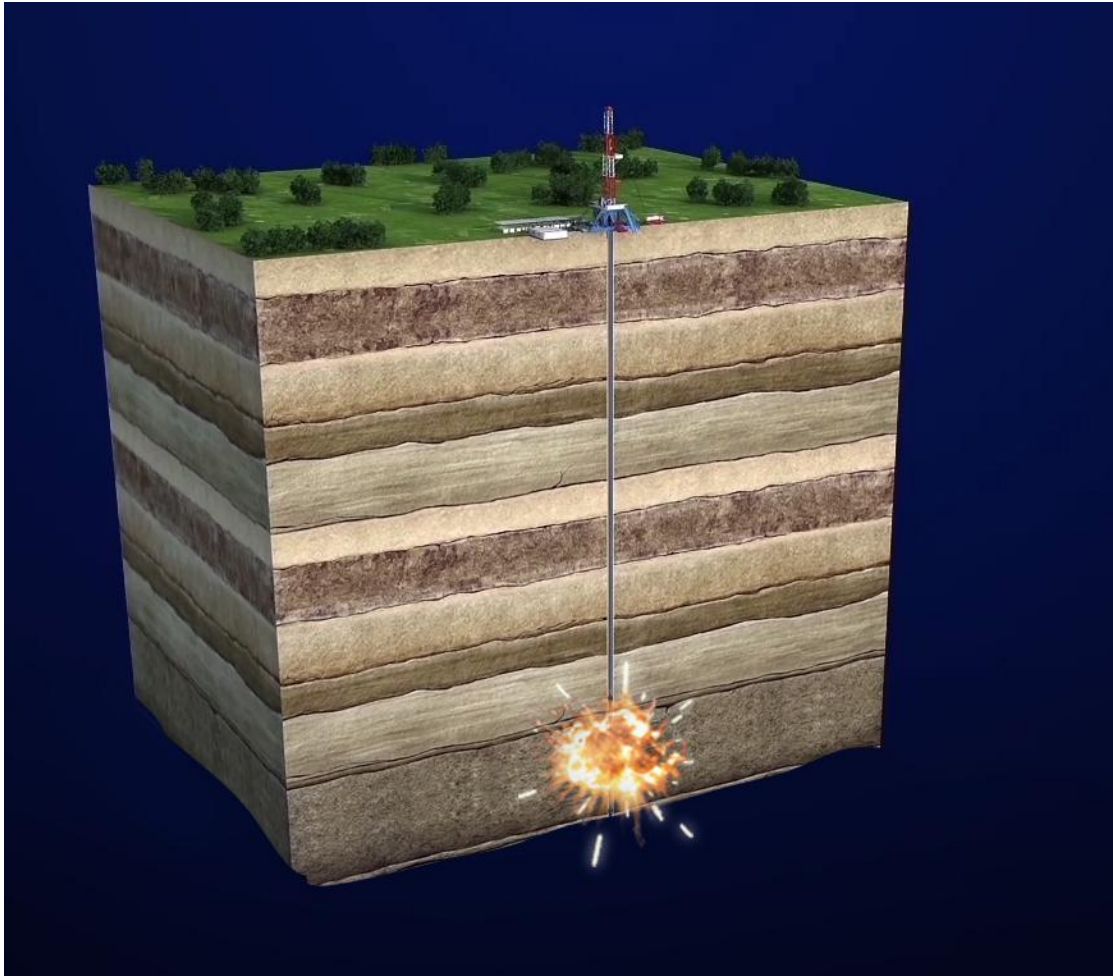
以促使储层中的油气流入井筒的工艺过程

因此被誉为油气勘探的“临门一脚”



▲“临门一脚”出油气，射孔破开地下油气最后一道门（动图）

为了踢好这一脚
射孔技术经历了数百年的演变
在石油工业发展的早期
一些新钻井产量低、甚至不出油
一名叫 Edward A. L. Roberts 的退役军人
创造性地将炸药下入井底直接引爆
这种看似简单粗暴的方式
不仅消除了井底周围的堵塞物
还让岩石产生了裂缝
为油气流入井筒“炸”出通道



▲ 爆破式“破门”的方式风险不可控，可能让油井报废

1902 年

美国工程师想到了一种更“温顺”的打孔方式

用机械刀片在套管上旋转钻孔

让孔洞成为石油流动的通道

射孔技术最早的雏形就此诞生

遗憾的是

这种穿孔方式速度慢、成本高

水泥环超过 25mm 厚时效果不佳

为了提高射孔质量和效率

一个叫 Sidney W Mims 的石油工人

创造性地想到用子弹来射孔

20 世纪三十年代初

Lane-Wells 公司在老油井中试用子弹射孔技术

发现其施工工效高、不破裂套管、孔眼规整

应用后油井产量立竿见影

自此以后

完井技术开始进入套管射孔完井时代

直到上世纪 50 年代

为了进一步提高射孔的穿透性能

石油公司 Well Explosives 将反坦克武器——聚能射孔弹

能击穿金属装甲的特性迁移到射孔领域

联合研制了大名鼎鼎的聚能射孔技术

其穿透力强、射孔效率高

能够实现“指哪打哪”的精准作业效果

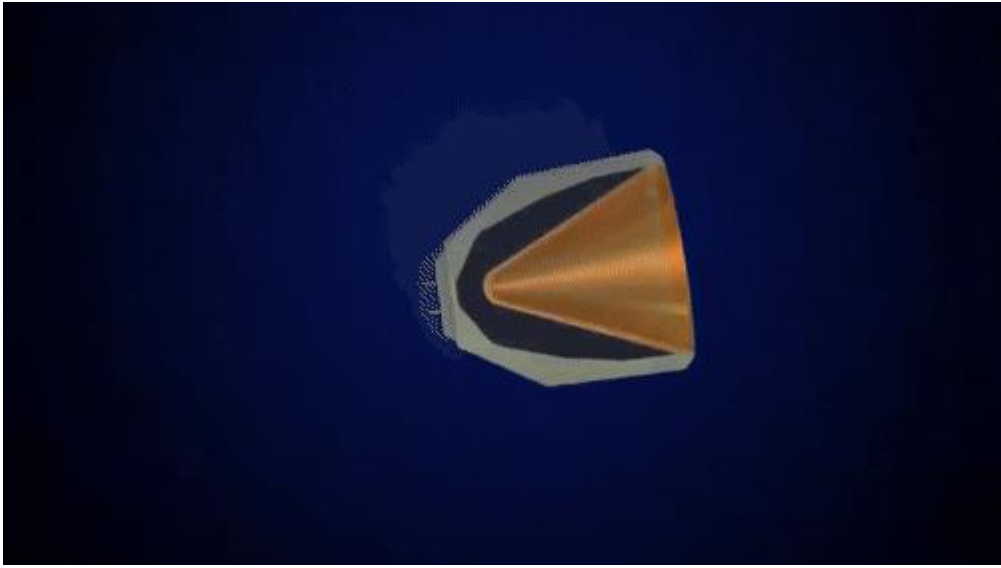
很快发展成应用最普遍的射孔技术

02 没有最深，只有更深

技术如流，环境为岸
随着油气藏高效开发的需要
人们不断在聚能射孔技术基础上改进迭代
特别是向两个“纵深”发展

一个是射孔深度越来越深
前面提到钻井时会污染井壁地层
业内为了提高石油天然气的开采效率
不仅要求射孔击穿套管、水泥环
还要能穿过污染带，尽可能深地进入储层
这对射孔弹性能提出了新的挑战

射孔弹是聚能射孔器的核心部件
主要是弹体、炸药、药型罩三大部分构成
其依靠主炸药爆炸后产生金属射流
速度高达 7000 米/秒，甚至上万米/秒
也就是 20 到 30 倍音速
相当于目前世界上最顶尖高超音速导弹的飞行速度
能够轻松击穿套管壁和地层岩石



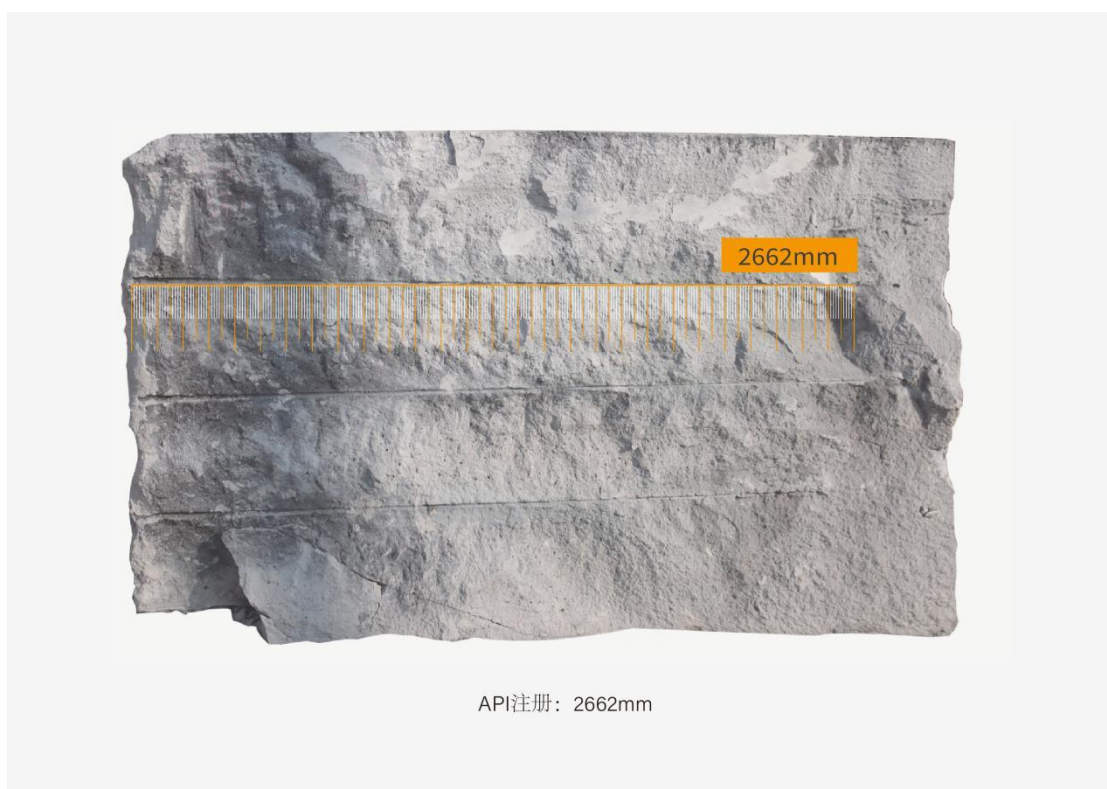
▲射孔弹起爆，射流沟通地层示意图（动图）

从上世纪 50 年代开始
由于我国工业基础薄弱，以及国外技术垄断
越来越多的企业从外购、仿制开始
到自主研制聚能射孔弹
从落后到追赶，逐步缩小差距
持续 30 余年的迭代升级
让中国射孔穿深一步步走在世界前列

1998 年，原四川石油管理局
现中国石油集团测井有限公司（下称“中油测井”）
研发的 127 型射孔弹
经中国石油大庆石油化工有限公司计量检定测试中心检测

穿深达到了 1059mm
成为国内第一个穿孔深度突破 1 米的 127 型射孔弹
“先锋”射孔弹就此诞生

2010 年，“先锋”射孔弹突破 1.5 米大关
2017 年，“先锋”射孔弹以 1986 毫米穿深打破世界纪录
2022 年，“先锋”超深穿透射孔弹穿深 2258 毫米
引领我国的射孔工业进入了 2 米时代

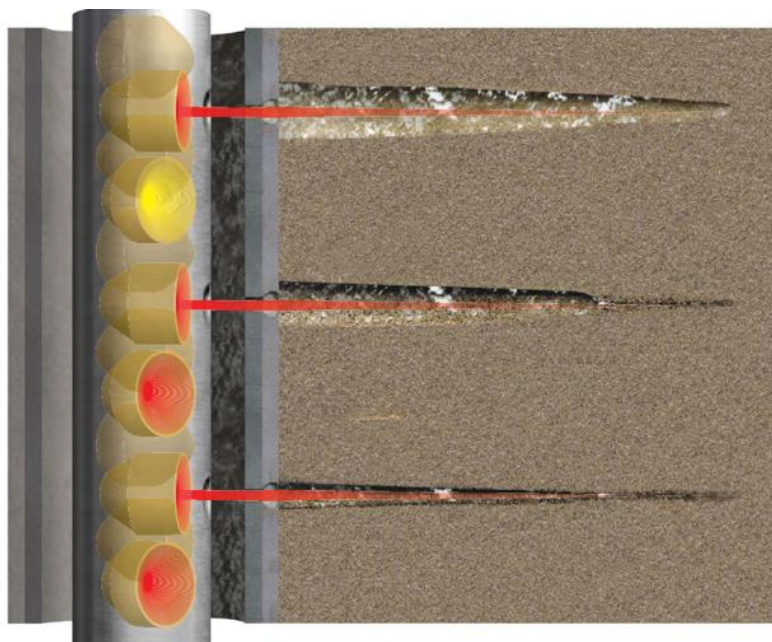


▲射孔弹的“中国深度”持续在国际上拔得头筹

2024 年

中油测井“先锋”89 型、102 型、127 型射孔器
分别以平均穿深 1732 毫米、1986 毫米、2662 毫米的成绩
通过美国石油协会认证
一次又一次刷新全球同类型射孔器穿深纪录

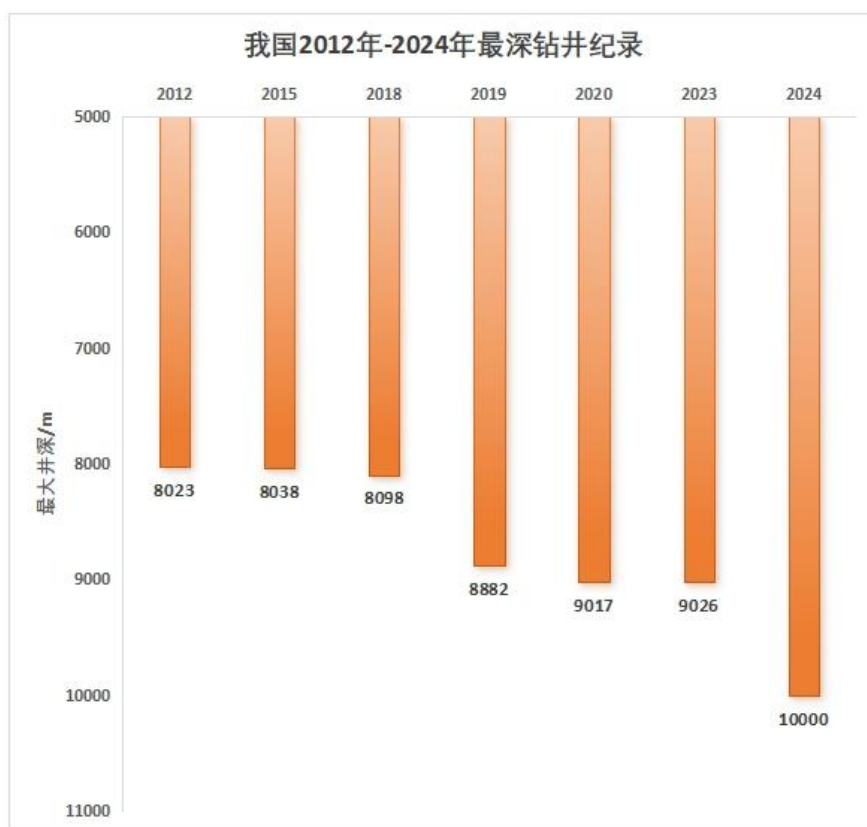
相比常规射孔器
“先锋”超深穿透射孔器
能更大程度地诱导压裂裂缝与天然裂缝的沟通
降低储层破裂压力以及水力压裂实施难度
适用于低渗、低孔、高致密油气层的射孔作业



▲高穿深能更多地沟通天然裂缝，增大油气泄流面积

二是射孔作业井深越来越深

随着我国油气勘探开发的不断深入
超深层油气勘探开发开始向万米进军
新钻井的井底压力和温度不断突破新高
因此射孔器的性能必须足够强大
以无惧井底“水深火热”般的苛刻环境



▲我国超深层油气勘探开发已全面跨入 8000m 时代

针对这一现实，2012 年
中油测井突破了射孔弹结构、药型罩结构与配方等多项难题
定型了全系列 160°C/140MPa 射孔器材

此后数年

“先锋”高温超高压射孔器系列不断升级迭代

到今年 9 月

中油测井新发布的“先锋”超高温超高压射孔器系列

最大耐温从 160°C/48h 提升至 260°C/72h ,

相当于在 25%的岩浆温度中保持 3 天不失效

最高耐压从 140MPa 突破之 245Mpa

相当于马里亚纳海沟最深处海底静水压力的 2 倍

最大作业深度突破 12000m

能够满足目前国内外绝大多数高温高压井

及超深井的施工需求



▲“先锋”超高温超高压射孔器产品组成示意（动图）

03 从“一”到“多”的突破

到 21 世纪初期

我国常规油气藏射孔技术已经基本赶上国际步伐

甚至有的可以说“有过之而无不及”

但是当美国页岩革命爆发的消息传来之际

发现我国非常规油气藏射孔技术处于空白

且该领域射孔技术被绝对封锁

不同于常规油气藏射孔的一次下井一次点火

非常规油气藏储层岩石非常致密

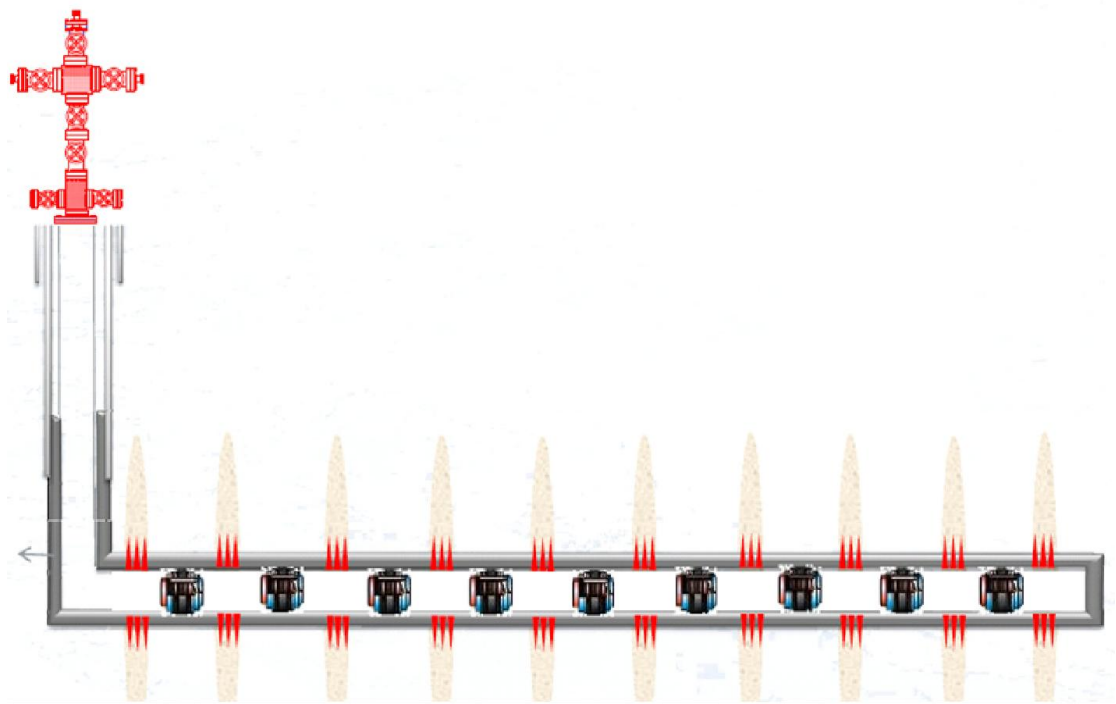
油气在其中难以流动

为了提高储层改造效果和采收率

需要一次下井多级点火，对储层精准分段射孔

再进行分段压裂

这项非常规油气藏射孔技术被称为桥射联作技术



▲桥射联作技术是目前非常规油气水平井效益开发的唯一有效手段

为解决非常规气藏开发
掌握属于自己的非常规油气藏射孔技术
我国的科研人员又开启了新的攻坚之路
从实验室到现场，从理论成果到现实转化
终于在 2010 年 7 月
中国第一口非常规气井 W201 井
完成了国内首套桥射联作技术作业
日产气达 2000 立方米
中油测井技术团队为这一技术取了响亮的名字

“先锋”桥射联作技术



▲“先锋”桥射联作技术作业示意

一战成名天下知

先锋桥射联作技术自问世以来

从四川起源辐射全国

陆续进入壳牌、中国石化等页岩气作业区块

为页岩气勘探开发蹚出了一条新路

2018 年年底开始

中油测井以提升作业能力、时效、效果

降低施工复杂、降低劳动强度为目标

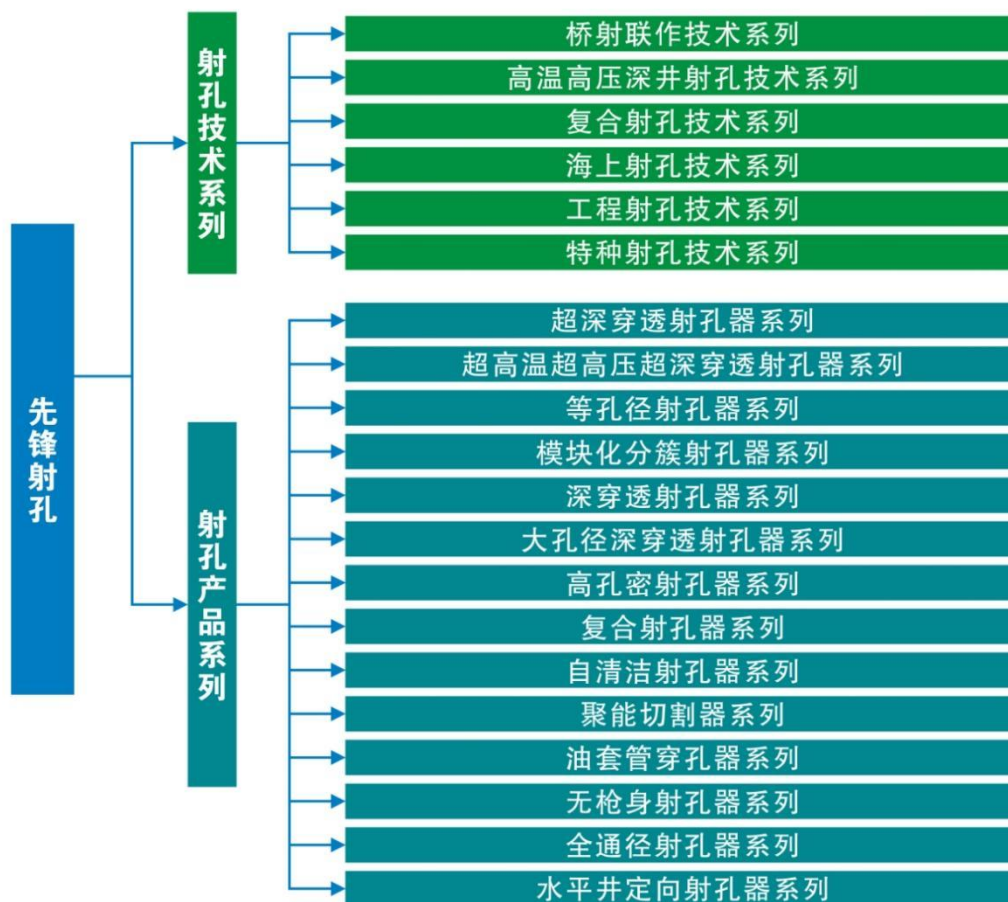
对桥射联作技术进行升级换代

历时三年的时间
打造了以“地面模块化装配、井口快速换装、
全井筒高效输送、等孔径多簇射孔”
为特色的桥射联作技术 2.0
将国内桥射联作技术提升至国际领先水平

04 端稳能源饭碗

一路走来
伴随着国内石油工业的蓬勃发展
越来越多油服企业投身于技术创新的大潮中
在这股创新浪潮的推动下
射孔技术家族日益壮大

作为行业内的佼佼者
中油测井旗下“先锋”射孔品牌
发展出了六大系列 37 类射孔技术
十四大系列 130 余种射孔产品
射孔整体指标跻身全球先进行列
满足了不同场景、不同条件下的作业需求



▲“先锋”射孔品牌家族族谱

当然

像中油测井这样的企业并不孤单

在能源行业的广阔天地里

还有许多同样坚持创新、勇于探索的企业

它们以向新而行的姿态

不断推出新技术、新产品

为行业持续发展注入了源源不断的活力

助力我们将能源的饭碗端得更稳、更牢