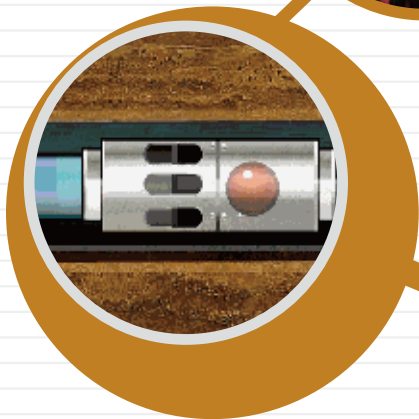




水平井裸眼分段压裂技术

2013 年



中国石油天然气集团公司 科技管理部

裸眼完井水平井分段压裂改造的最佳选择！





目 录

1 简介	3
2 特色技术	4
3 典型案例	10
4 科研装备	14
5 资质与标准	16
6 专家团队	18



中国石油

中国石油天然气集团公司（简称“中国石油集团”，英文缩写：CNPC）是根据国务院机构改革方案，于1998年7月在原中国石油天然气总公司的基础上组建的特大型石油石化企业集团，系国家授权投资的机构和国家控股公司，是实行上下游、内外贸、产销一体化、按照现代企业制度运作，跨地区、跨行业、跨国经营的综合性石油公司，主要业务包括油气业务、石油工程技术服务、石油工程建设、石油装备制造、金融服务、新能源开发等。中国石油天然气集团公司2012年国内生产原油1.1亿吨，生产天然气798.6亿立方米，加工原油1.91亿吨，全年实现营业收入2.69亿元，实现利润1391亿元。

2012年，中国石油在美国《石油情报周刊》

世界50家大石油公司综合排名中位居第4位，在《财富》杂志全球500家大公司排名中位居第6位。

中国石油天然气集团公司履行资源、市场和国际化战略，坚持“主营业务战略驱动，发展目标导向，顶层设计”科技发展理念和“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的指导方针，以国家科技重大专项为龙头、公司重大科技专项为核心、重大现场试验为抓手、重大装备、软件、产品、标准为载体，持续推进科技进步，提升科技创新能力，取得一大批具有自主知识产权的先进实用技术。

水平井裸眼分段压裂技术（CES-TopFrac）就是具有代表性的重大创新成果之一。

奉献能源 创造和谐

1

简介

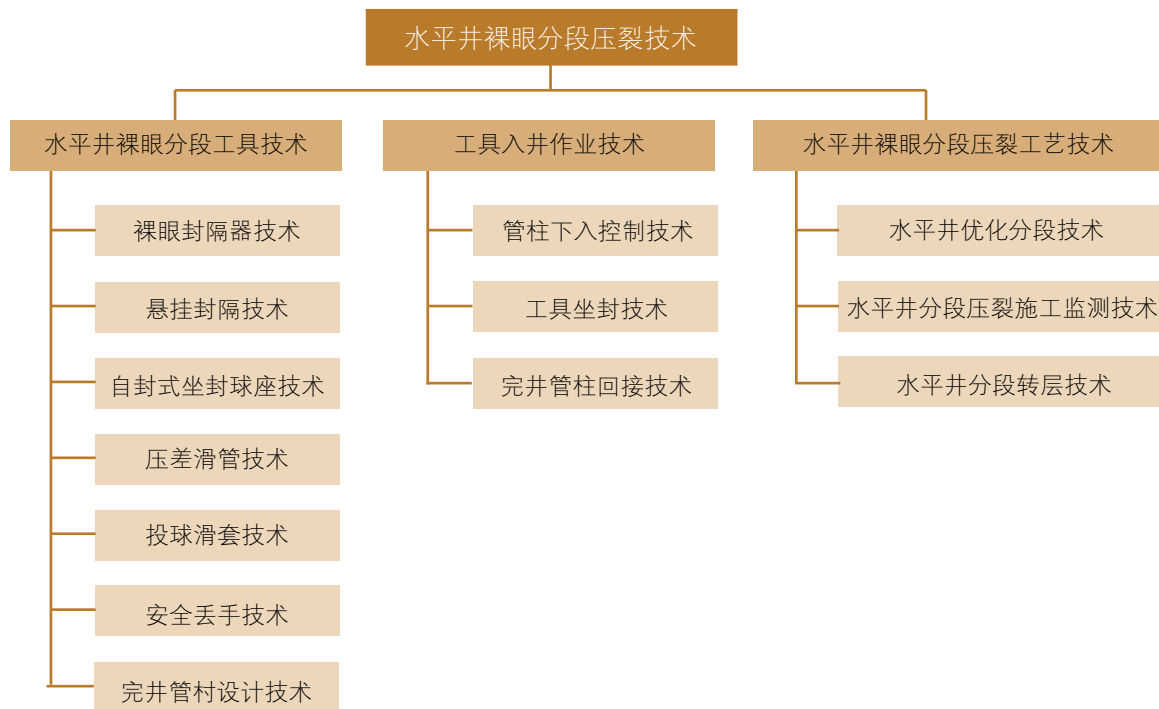
水平井开发是提高油气井产量的重要手段之一,与直井相比,水平井更大限度地暴露储层,大大提高单井产能,最终提高整个油气藏的采收率。

中国石油长期致力于研究如何有针对性地高效改造整个水平井段储层,由于受制于水平井压裂工艺技术的整体技术配套的局限,特别是水平井分段压裂工具及管柱技术的限制,导致水平井增产技术发展缓慢。因此,水平井分段压裂工具及管柱技术是水平井开发技术规模化应用的瓶颈。

水平井裸眼分段压裂技术 (CES-TopFrac) 的成功研发,是在油气勘探开发的关键技术领域取得的一次关键性突破,为低品位储量实现大规模的经济高效动用,提供了有力的技术支撑和保障,极大地提升了中国石油集团的综合服务能力。

自现场应用以来,已成功对 106 口裸眼水平井共进行了 699 段压裂酸化作业,施工成功率 100%,现场应用增产效果显著。

中国石油自主研发水平井裸眼分段压裂技术系列包含 13 项特色技术。

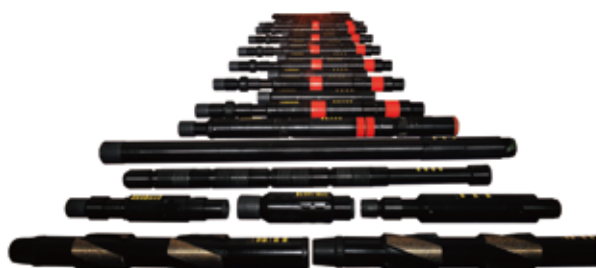


2

特色技术

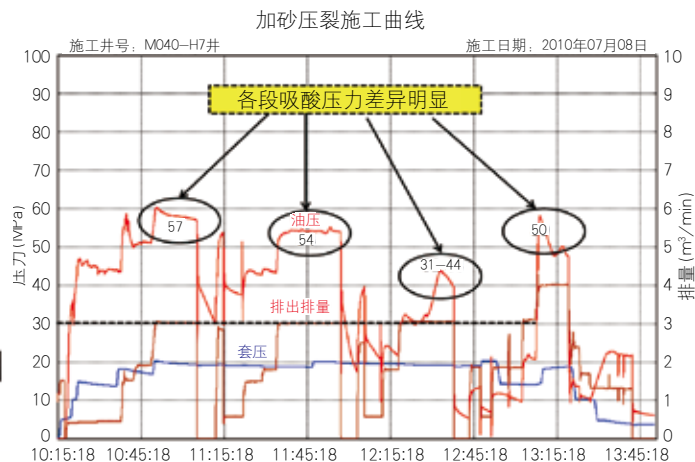
2.1 水平井裸眼分段工具技术

根据水平井裸眼完井分段改造工艺要求和工具管柱的结构特点，研究设计出裸眼封隔器、悬挂封隔器、自封式坐封球座、压差滑套等部件，达到实现封隔器坐封和分隔储层，分段施工转层等目的。

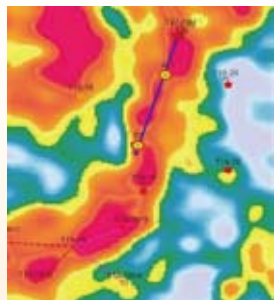
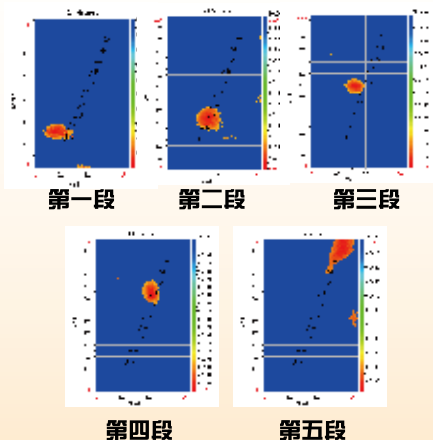


裸眼封隔器技术

裸眼封隔器设计采用双重反向预置压缩式密封技术，增强了裸眼封隔器在裸眼井段坐封密封可靠性，保证了产层的可靠分隔及高效的分段增产改造作业。



裸眼封隔器作用后压力曲线



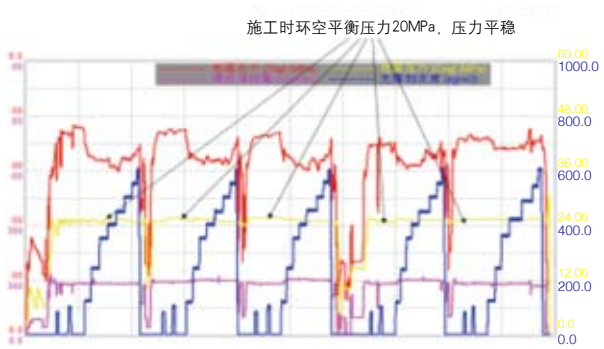
T7-17-19H井井筒方位及储层展布

微地震监测显示：每段均监测到地层破裂时所产生的能量

检测显示 T7-17-19H
裸眼封隔器密封良好

悬挂封隔器技术

悬挂封隔器采取分体式双向卡瓦和带“防突”机构的双向密封设计，具有入井通过性好，安全性高，密封承压可靠的优点。



悬挂封隔器作用后压力曲线

自封式坐封球座技术

采用内关式通道技术，实现工具下入后的循环替液、封隔器坐封及坐封后完井管柱端部的双向封堵。具有替液排量、压力可控可调的优点。

压差滑套技术

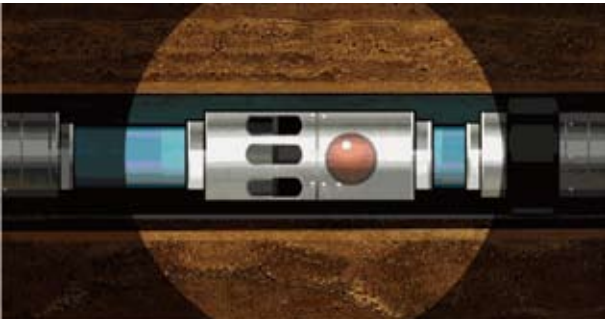
采用双液缸开启设计，打开任一液缸便能开启滑套，增加压差滑套开启动作的可靠性，具有压力可调及开启通道大的优点。



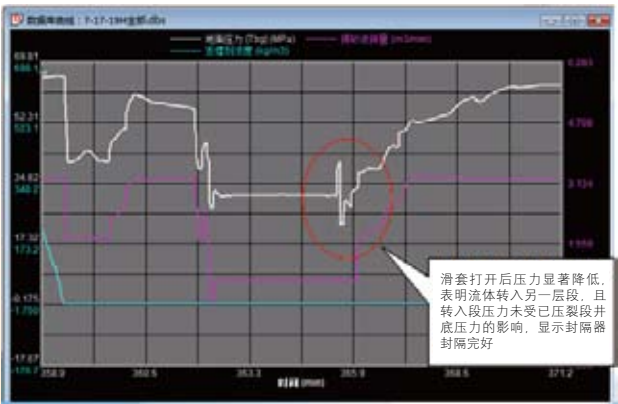
压差滑套的开启

投球滑套技术

通过投球打压，开启压裂通道。该技术的止退和防转机构设计，可防止滑套开启后发生意外关闭，且具有打开可靠、压力可调的特点。



投球滑套的开启



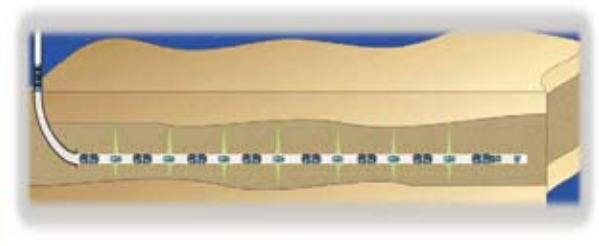
滑套开启—施工压力响应

安全丢手技术

根据悬挂封隔器不同的井斜位置和压井液的使用情况，辅助设置了丢手定压阀，通过管柱内部整体憋压、投球憋压和机械倒扣三种方式解锁丢手，提高了丢手的稳定性和可靠性。

完井管柱设计技术

针对不同的井眼轨迹、地质解释与改造目标要求，采用悬挂封隔器和裸眼封隔器机械封隔，配合各型滑套组合，实现分段增产改造、合测合采完井。该项技术具有下入操作方便，坐封密封可靠，丢手稳定，分段滑套开启明显的特点。



水平井裸眼完井分段改造工具管柱示意图

2.2 工具入井作业技术

工具入井作业技术系列通过现场实践，结合工具的设计结构原理，形成一套完整成熟的工具入井作业过程，有效保障了工具顺利入井，避免复杂情况及井下工具事故。



工具入井图片

管柱下入控制技术

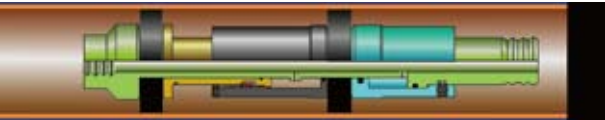
能保证工具管柱入井后安全下放到预定位置的辅助保障技术，并能使摩阻增加值维持在允许的范围。



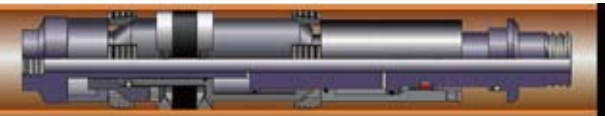
入井管柱组合结构

工具坐封技术

能保证工具管柱中的所有封隔器可靠动作，并实现坐封，形成对目的层段有效分隔。



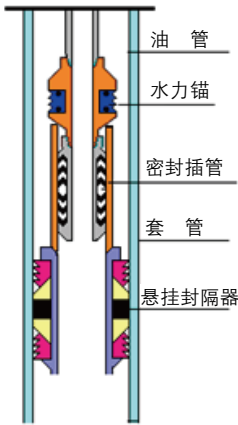
裸眼封隔器坐封示意图



悬挂封隔器坐封示意图

完井管柱回接技术

能在生产油管与悬挂封隔器之间形成有效连接和密封。该项技术的应用能使回接动作易于判定，形成的密封可靠。



完井管柱回接原理

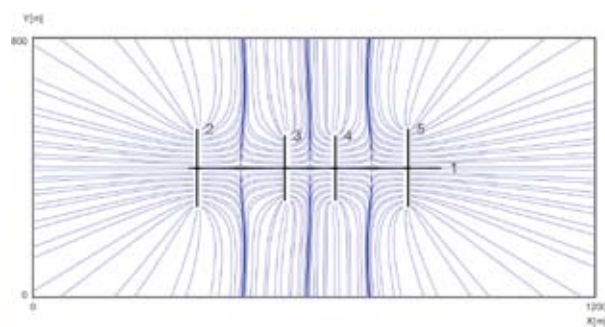


回接工具图

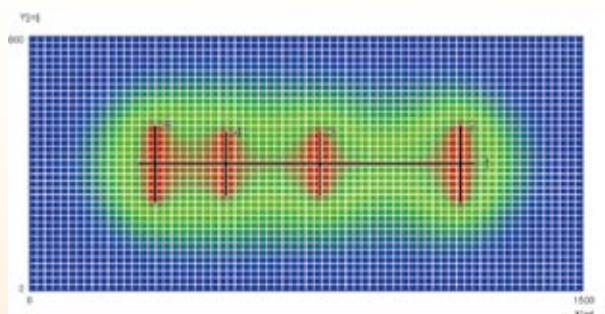
2.3 水平井裸眼分段压裂工艺技术

水平井优化分段技术

以油藏数值模拟为基础，对水平井“多次”模拟裂缝布置方案，进行分段裂缝方案优选、产量和地层压力动态预测的技术。建立水平井+油气藏数值模拟模型，通过网格加密+等效导流能力的方法处理人工裂缝，考察裂缝形态、条数、裂缝长度、导流能力对水平井压后效果的影响规律，从而确定以上参数的优化结果。



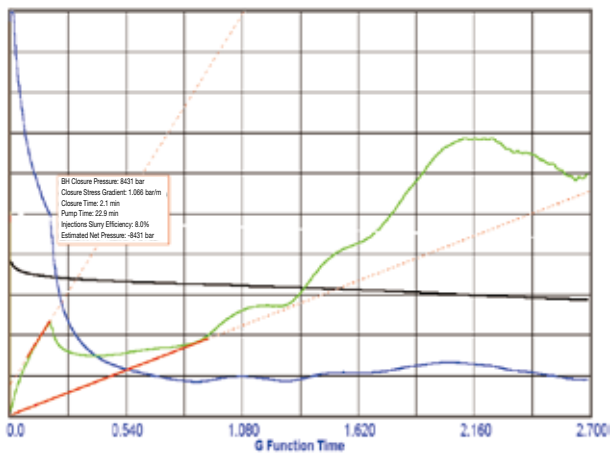
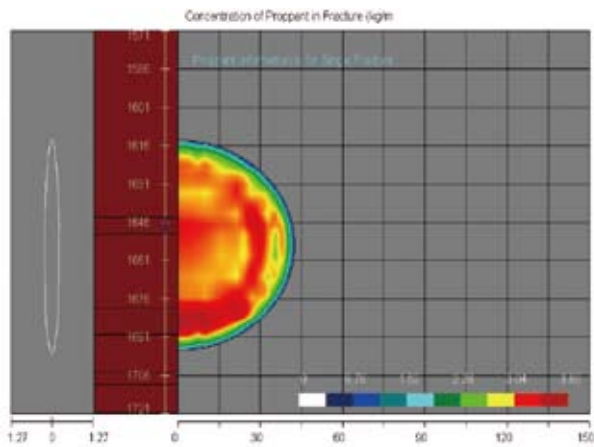
裂缝条数与渗流形态



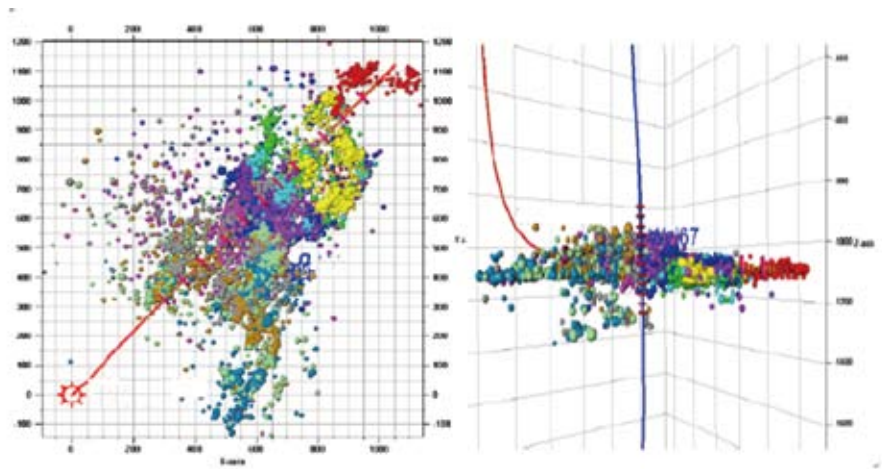
裂缝—油藏渗流压力场

水平井分段压裂施工监测技术

应用 Fracpro-PT 压裂软件来实时监测施工压力和裂缝净压力变化，判断分段压裂滑套是否开启、分段压裂层段是否分开、裂缝延伸是否异常，为压裂施工决策提供直观的压裂施工实时监测技术，基于经典的不同裂缝延伸模型双对数曲线特征图，利用 Fracpro-PT 压裂软件实时监测裂缝净压力变化，根据监测到的裂缝净压力变化趋势，对施工过程中发生的裂缝净压力异常变化及时做出工程方案调整，提高施工成功率和有效率。在配套条件成熟的情况下，采用微地震监测分段压裂裂缝延伸及展布，实时动态调整施工参数是更加直观的监测手段。



施工压力拟合分析及判断



微地震监测分析及判断

水平井分段转层技术

能有效优化地面投球流程，控制投球时间，优质安全完成水平井转层。



分段转层现场管线图

3 典型案例

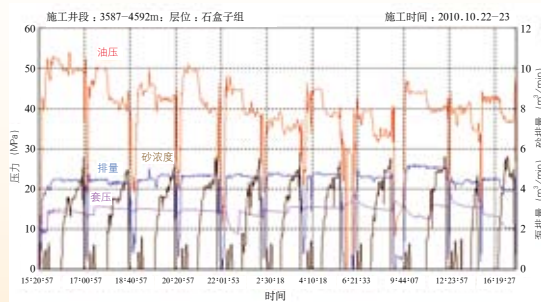
3.1 低渗透砂岩水平井裸眼分段加砂压裂

S75-70-6H 井位于苏里格气田西北部，储层垂深 3402m，储层温度 105℃，水平段长 1005m，储层钻遇率达 80.1%，储层平均渗透率为 0.16mD，平均孔隙度为 8.3%。根据水平

段泥岩和砂岩的岩性差异，采用 12 个裸眼封隔器进行单、双封组合卡层，既控制了起裂点，又充分暴露了储层，储层暴露率为 99.4%。通过施工曲线看出，每段施工泵压的明显差异证明裸眼封隔器的封隔效果良好，转层分段压裂成功。压后测试产量为 $20 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，测试稳定套压为 20.7MPa，无阻流量为 $316.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。



S75-70-6H 井测井曲线及分段情况



S75-70-6H 井分段压裂施工曲线

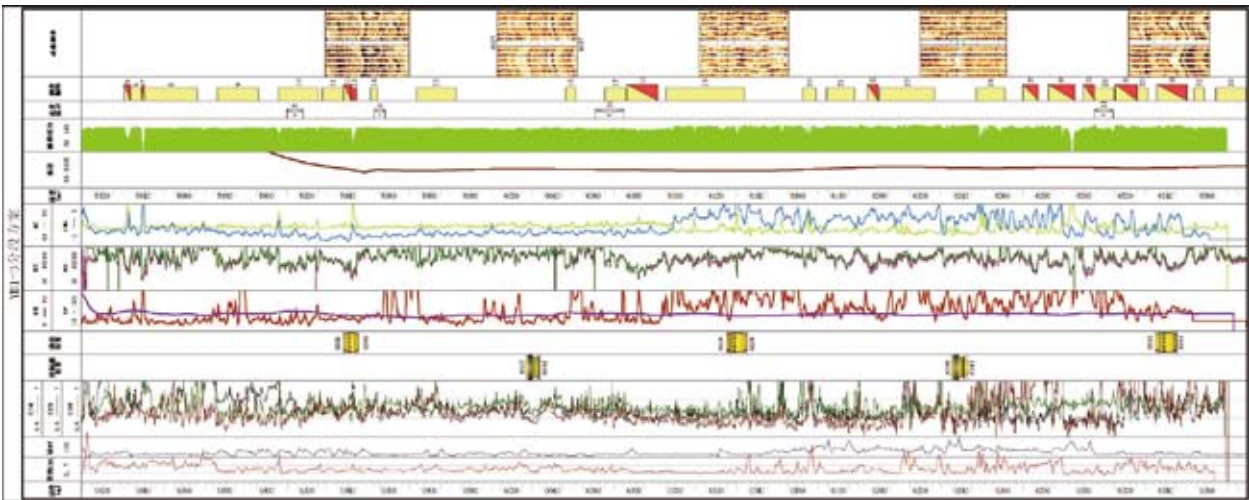


S75-70-6H 井现场施工作业

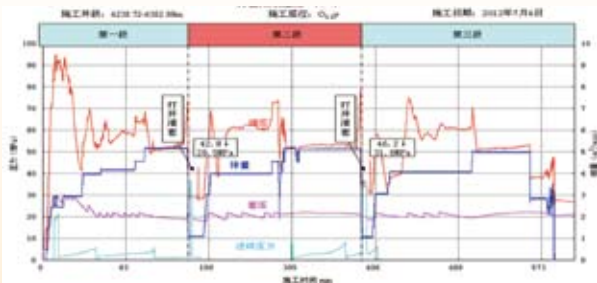
3.2 低渗透碳酸盐岩水平井裸眼分段酸化压裂

YB1-3H 井位于塔里木盆地塔西南坳陷区，是中石化西北石油局的一口开发评价井，储层垂深 5809m，斜深 6382m，储层温度 144℃，水平段长 428.07m，储层平均垂直渗透率 0.37mD。该井 9⁵/₈in 套管仅能承压 34.5MPa。7in 套管悬挂段变形，且多次通井遇阻。最终

确定采用 3 个裸眼封隔器分 3 段进行酸压改造。通过施工总共向地层注入滑溜水 196.4m³，压裂液 880m³，转向酸 140m³，高温胶凝酸 1010m³。从施工曲线分析，每段施工压力差异明显，说明裸眼封隔器达到了有效的封隔作用，两个投球滑套开启的压力响应也十分明显。压后 4mm 油嘴测试，日产油 96t，测试稳定油压 27MPa。



YB1-3H 井测井曲线及分段情况



YB1-3H 井分段酸压施工曲线

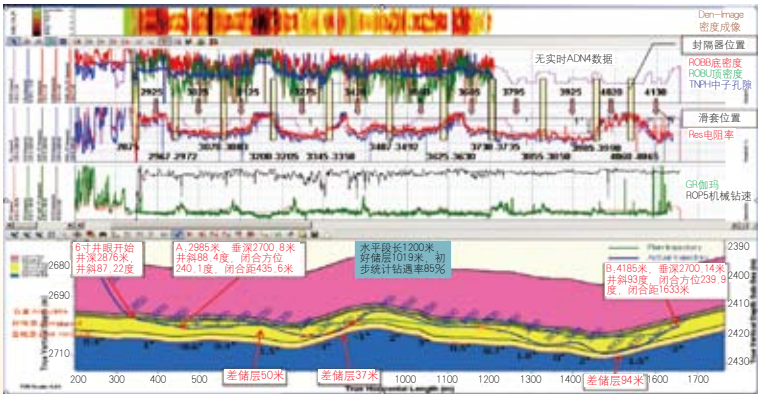


YB1-3H 井现场施工作业

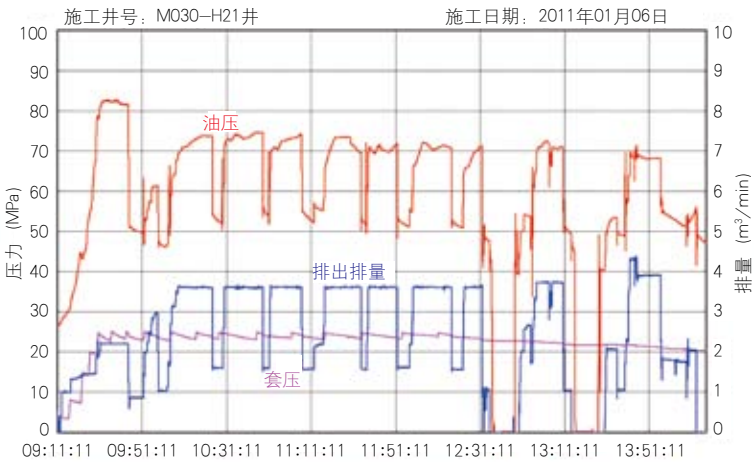
3.3 低渗—非均质碳酸盐岩水平井裸眼分段酸化

M030—H21 井造斜井段全长 1309m，裸眼段长 1309.46m，共解释好储层 1019m，从 A 点 2985m 开始计算，好储层钻遇率为 84.1%。本井最大井斜 96.31°。产层雷 1 中亚段用密度为 1.36 ~ 1.50g/cm³，黏度为 45 ~ 48s 的泥浆钻进，见六次气测异常显示，四次气侵显示，储层区间孔隙度为 3% ~ 15.9%。解释井段为 2876 ~ 4166m，有效储层共 47 段 1099.4m；其中一类储层为 14 段 196.3m、二类储层为 23 段 807.1m、三类储层为 10 段 96.0m。

采用裸眼封隔器分 11 段酸化，注入表活剂转向酸 860m³，施工后获得测试天然气产量为 20×10⁴m³/d。



M030—H21 井测井曲线及分段情况



M030—H21 井分段酸压施工曲线



M030—H21 井现场施工作业

3.4 应用取得的成果

水平井裸眼分段压裂技术的研究成功，极大地推动了水平井技术的应用，是在油气勘探开发的关键技术领域取得的一次关键性突破。该项技术成功问世至今，已在川渝及苏里格地区 106 口裸眼水平井共进行了 669 段压裂酸化作业，成功率达 100%，现场应用增产效果显著。



现场施工作业



现场放喷测试

4

科研装备

中国石油川庆钻探公司井下作业公司具有近 50 年从事油气井井下作业和井下工具、油田化学产品的开发生产和现场服务的历史。拥有配套完善的压裂酸化作业队伍 8 支，压裂泵注设备总水马力 140000HHP，连续油管作业队伍 3 支，引进了 HQ2000 型、FC2251 型压裂机组和 HR10M 连续油管作业机组等各类设备 700 余台套，原值 15 亿元，配套建设了先进的工具生产、

检验设备和油田化学产品生产合成装置。年作业能力达 3000 井次。多次创造和刷新全国乃至亚洲同行业纪录。

公司研制生产的井下工具 60 余种，拥有井下工具技术专利 30 多项，产品通过了 API 认证，是中国石油井下工具生产定点厂家。以尾管悬挂器、分级注水泥器、各型完井和作业封隔器、桥塞、水力喷射工具、各种滑套等为代表。



施工设备



工具加工厂



工具装配机

川庆井下作业公司拥有集团公司专家 2 人，川庆公司专家 3 人，从事压裂酸化技术人员中，高级工程师 34 人、工程师 85 人，硕士 35 人，博士 4 人，博士后 1 人。拥有完善的以 FracproPT、StimPT、WinGohfer、Cerberus 等为代表的压裂酸化—连续油管设计软件、Solidworks 三维机械设计软件和配套完善的液体、工程评价实验室，拥有 RS6000 流变仪、FDS-800—10000 动态滤失仪及自主研发的水平井可视化模拟试验装置等试验设备 50 台套。



FDS-800—10000 动态滤失仪



RS600 流变仪



水平井可视化模拟试验装置

近年来，公司完成工具机械分段、喷射分段、桥塞分段及填砂分段多种工艺类型的水平井分段压裂—酸化施工 200 余井次，具备水平井裸眼分段压裂—酸化的完全自主技术。

5

资质与标准

5.1 企业资质

中国石油川庆钻探公司井下作业公司专门为石油天然气勘探开发提供压裂酸化、连续油管修井、固井工程技术服务，研制和生产井下工具、油田化学添加剂的专业化企业。通过了HSE、ISO9001（2000标准）、ISO14001、API体系认证。



井下作业公司资质证书

5.2 技术专利

水平井裸眼分段压裂技术系列申报国家专利14项，其中发明专利6项已公开。获得实用新型专利授权8项。水平井裸眼分段压裂工具被中国石油授予自主创新重要产品。



中国石油授予自主创新重要产品证书



水平井裸眼分段压裂工具及技术相关部分专利

5.3 技术标准

水平井分段压裂技术现场实施执行下列相关标准：

序号	标准编号	标准名称
1	SY/T 5861—1993	压裂井口保护器
2	SY/T 6120—1995	油井井下作业防喷技术规程
3	SY/T 6334—1997	油、水井酸化设计与施工验收规范
4	SY/T 6283—1997	石油天然气钻井健康、安全与环境管理体系指南
5	SY 6355—1998	石油天然气生产专用安全标志
6	SY/T5289—2000	油井压裂效果评价方法
7	SY/T 5127—2002	井口装置和采油树规范
8	Q/SY 31—2002	压裂工程质量技术监督及验收规范
9	Q/SY 32—2002	酸化工程质量技术监督及验收规范
10	SY/T 5211—2003	压裂成套设备
11	SY/T 6566—2003	水力压裂安全技术要求
12	SY/T 5587.5—2004	常规修井作业规程第 5 部分：井下作业井筒准备
13	SY/T 5087—2005	含硫化氢油气井安全钻井推荐作法
14	SY/T 5225—2005	石油天然气钻井、开发、储运防火防爆安全生产技术规程
15	ST/T 6137—2005	含硫化氢的油气生产和天然气处理装置作业的推荐作法
16	SY/T 6426—2005	钻井井控技术规程
17	SY/T 6610—2005	含硫化氢油气井井下作业推荐作法
18	SY/T 6631—2005	危害辨识、风险评价和风险控制推荐作法
19	SY/T 6277—2005	含硫油气田硫化氢监测与人身安全防护规程
20	Q/SY 1002.1—2007	健康、安全与环境管理体系
21	SY/T 5587.9—2007	常规修井作业规程
22	SY/T 5727—2007	井下作业安全规程
23	SY/T 6203—2007	油气井井喷着火抢险作法
24	SY/T 5289—2008	油、气、水井压裂设计与施工及效果评估方法
25	SY/T 6376—2008	压裂液通用技术条件
26	SY/T 6690—2008	井下作业井控技术规程
27	Q/SY 32—2002	酸化工程质量技术监督及验收规范
28	Q/SY 91—2004	压裂设计规范及施工质量评价方法
29	Q/SY 31—2007	压裂工程质量技术监督及验收规范
30	Q/SY 1145—2008	油气水井压裂施工总结编写规范

因水平井裸眼分段压裂技术研究和应用而新编制技术标准 4 项：

- (1) Q/67579579-6·417-2011，水平井裸眼分段压裂酸化自封式坐封球座；
- (2) Q/67579579-6·418-2011，水平井裸眼分段压裂酸化压差滑套；
- (3) Q/67579579-6·419-2011，水平井裸眼分段压裂酸化封隔器；
- (4) Q/67579579-6·420-2011，水平井裸眼分段压裂酸化投球滑套。



6

专家团队

中国石油有一支技术精湛、经验丰富的完井及井下作业专家队伍，能为不同客户提供高质量的完井配套方案及储层改造系列技术解决方案。



石 林 长期从事油气井钻完井工程技术与装备研究等技术管理工作。先后主持国家 863 项目、国家重大科技专项和集团公司重大科技攻关项目等项目的研究工作。在深井复杂井钻井技术、国产深井电动钻机研制、浅水钻井技术和海洋钻井技术与装备研究等方面取得了突出的成绩。获省部级以上科技奖励 5 项。发表学术论文 10 篇。



伍贤柱 多年从事钻井工程及技术管理工作，具有坚实的专业理论基础和丰富的现场实践经验，技术专家。组织和参与了大量科研项目，先后获得国家科技进步二等奖，国家能源科技奖一等奖，省部级奖 7 项、局级奖 10 项，取得专利 3 项。发表十余篇论文。



徐春春 西南油气田公司副总经理，多年从事勘探、工程技术与监督工作。获得四川省、中国石油科技进步一等奖 2 项；中国石油股份公司技术优秀勘探项目一等奖 1 项；西南油气田公司、四川石油管理局科技成果项目一等奖 5 项，其余科研成果奖近 20 项。发表学术论文 20 余篇。



赵金洲 长期从事压裂酸化理论与技术的研究和开发工作，享受国务院政府特殊津贴。先后负责 50 余项科研项目，成果获国家科技进步特等奖 1 项、国家能源科技进步一等奖 1 项、省部级科技成果奖 14 项；授权发明专利 9 项、授权软件著作权 7 项；发表论文 200 余篇，出版专著 7 部。



叶登胜 多年从事储层改造技术研究及技术管理工作，技术专家。先后负责、参与 40 余项科研项目，获省部级成果 4 项、局级成果 8 项，取得专利 5 项，发表论文 12 篇。



钱 斌 多年从事储层改造技术研究及技术管理工作，集团公司技术专家。先后组织完成 20 余项科研项目研究，获省部级奖励 1 项，局级奖励 4 项，获得 6 项国家专利，发表论文 5 篇。



联系人：刁顺 先生
电 话：86-10-5998-6059
Email: sdiao@cnpc.com.cn

Contact: Mr. Diao Shun
Tel: 86-10-5998-6059
Email: sdiao@cnpc.com.cn



