



水力喷射压裂技术

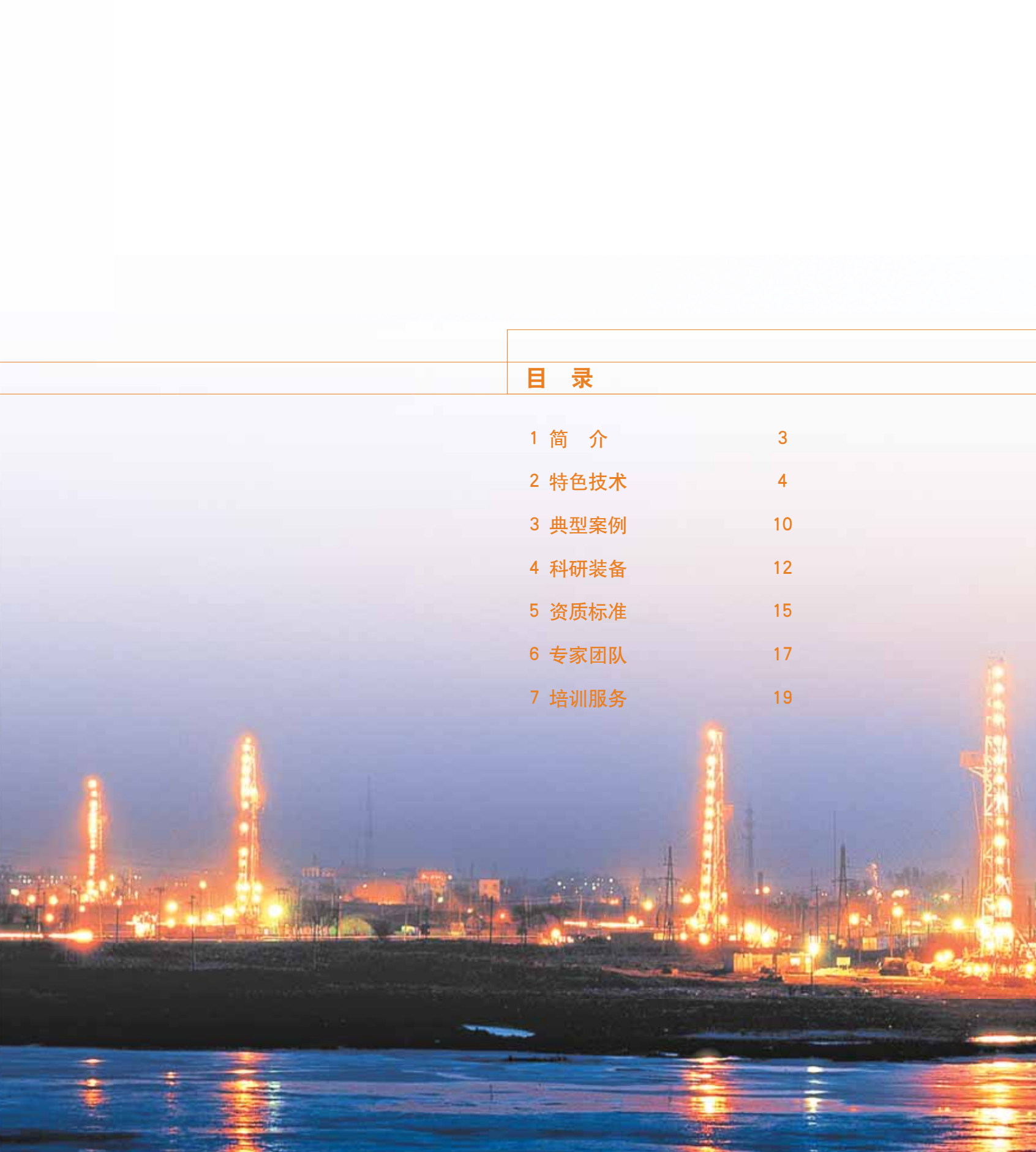
2014 年



中国石油天然气集团公司 科技管理部

水力喷射压裂技术——开启低渗透油气田的“金钥匙”！





目 录

1 简 介	3
2 特色技术	4
3 典型案例	10
4 科研装备	12
5 资质标准	15
6 专家团队	17
7 培训服务	19



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2013年国内生产原油1.13亿吨，生产天然气888.4亿立方米，加工原油1.46亿吨，全年实现营业收入2.76万亿元，实现利润1880亿元。

2013年，中国石油在世界50家大石油公司综合排名中位居第4位，在全球500家大公司排名中位居第5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。

水力喷射压裂技术就是具有代表性的重大创新成果之一。

奉献能源 创造和谐

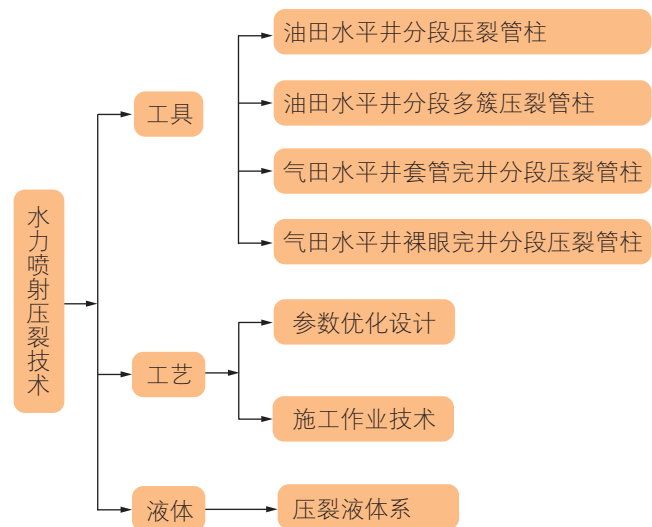
1 简介

水力喷射压裂是一项集射孔、隔离、压裂于一体的水平井分段压裂技术，其基本原理是依靠水力喷射产生的增压效应使地层起裂形成裂缝，油管携砂液通过喷嘴喷射泵入裂缝，环空泵入液体进行压力补偿，完成储层改造。

与限流压裂、填砂胶塞分段压裂等传统技术相比，水力喷射压裂技术可用于裸眼、套管等多种完井方式，具有施工风险小、效率高、成本低等特点，一趟管柱可完成多段压裂，缩短施工周期，降低储层伤害。该技术获国家授权专利 10 项，工艺管柱获第十九届全国发明展览会铜奖，是中国石油天然气集团公司自主创新重要产品。在长庆油田累计应用 1172 口井 9032 段，油田水平井实现了一趟管柱施工 8 段，单井增产是直井的 3 倍以上；气田水平井实现了 4 寸半套管一次分压 10 段、6 寸裸眼一次分压 23 段，工具成本为其他工具的 1/5，单井增产是直井的 5 至 8 倍。整体工艺技术达到了国际领先水平。



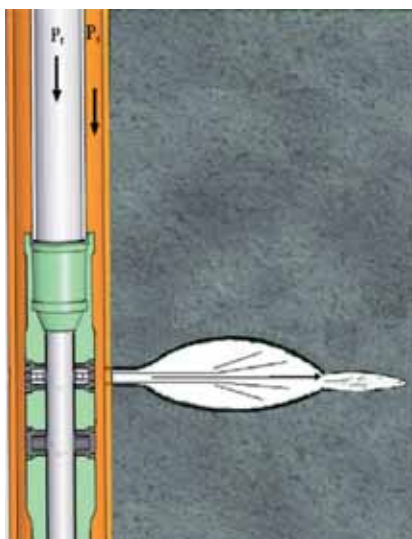
中国石油水力喷射压裂技术在国内得到普遍应用



水力喷射压裂技术框架图

2

特色技术



水力喷射压裂技术示意图



水力喷射压裂现场施工

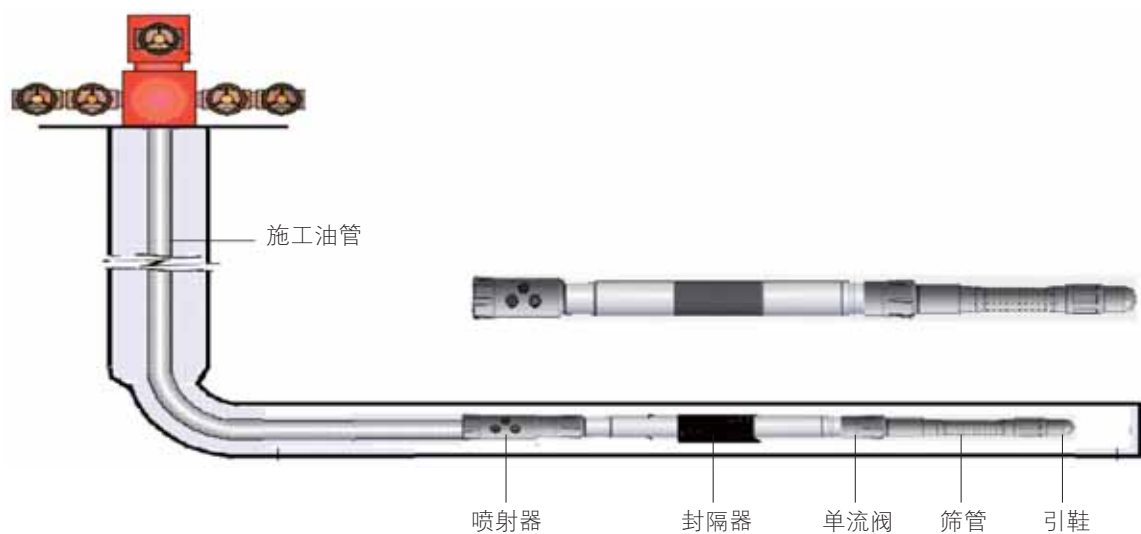
2.1 油田水平井压裂管柱

油田水平井水力喷射分段压裂及分段多簇压裂管柱系列主要由喷射器、封隔器、单流阀、眼管等部件组成。

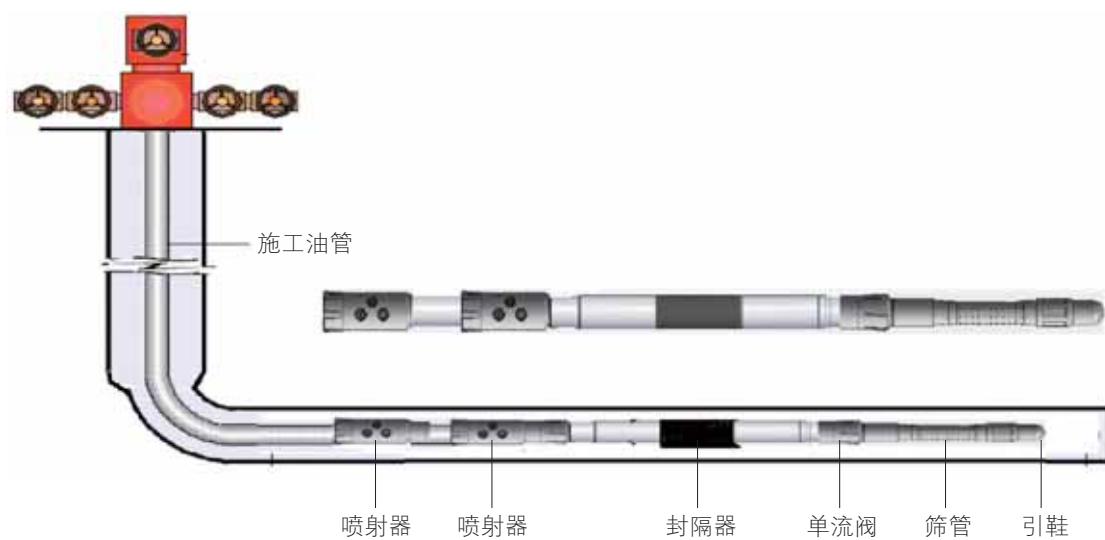
技术特色与优势

(1) 油田水平井水力喷射分段压裂管柱适用于 5.5in 套管固井完井，承压 70MPa、耐温 120℃，一趟管柱最高施工 8 段，采用拖动可实现无限级压裂；

(2) 油田水平井水力喷射分段多簇压裂工艺管柱适用于 5.5in 套管固井完井，承压 70MPa，耐温 120℃，一趟管柱可完成 2 段 4 簇压裂改造，可实现对储层的立体改造。



油田水平井水力喷射分段压裂管柱示意图

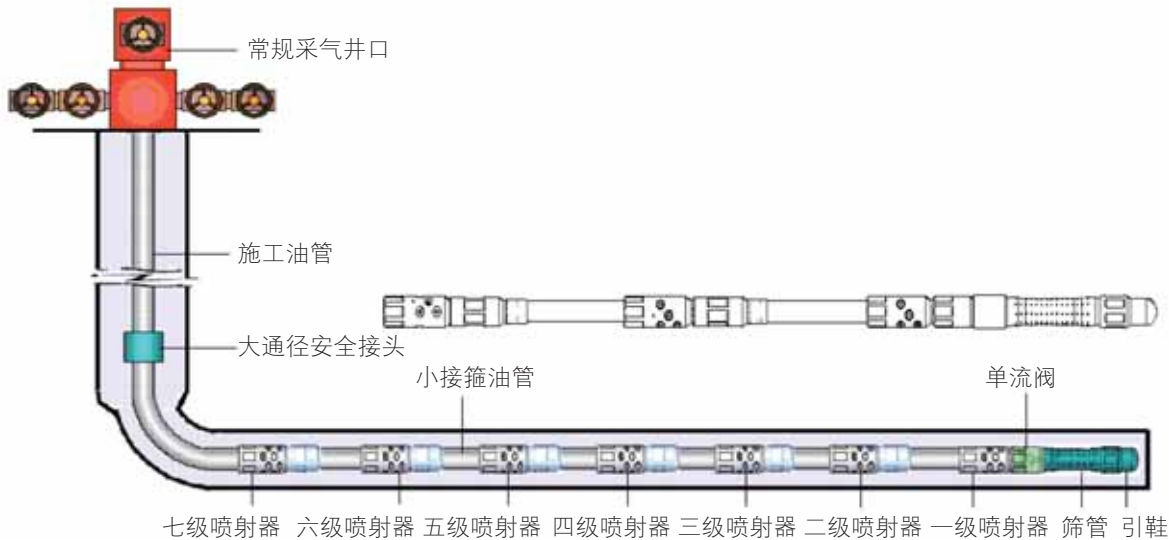


油田水平井水力喷射分段多簇压裂管柱示意图

2.2 气田水平井压裂管柱

气田水平井不动管柱水力喷射压裂管柱主要由滑套式喷射器、滑套工作筒等部件组成，在不动管柱情况下通过投球可依次完成多段改造。

气田水平井不动管柱水力喷射压裂管柱适用于 4.5in 套管、6in 裸眼两种完井方式，承压 70MPa、耐温 120℃，4.5in 套管可一次分压 10 段，6in 裸眼可一次分压 23 段。



气田水平井水力喷射压裂工艺管柱示意图

2.3 核心工具及性能

1. 喷射器



工作温度：150℃；
 工作压力：70MPa；

本体及喷嘴压帽材质：42CrMo；
 喷嘴材质：硬质合金 YJF03X 或者 ROCTEC500；
 喷嘴硬度：HRA93。

2. 小直径封隔器



最大直径：108mm；
 承压：≤ 70MPa；

耐温：≤ 120℃；
 抗拉：不低于 65t；
 重复坐封能力：10 次以上。

3. 安全丢手

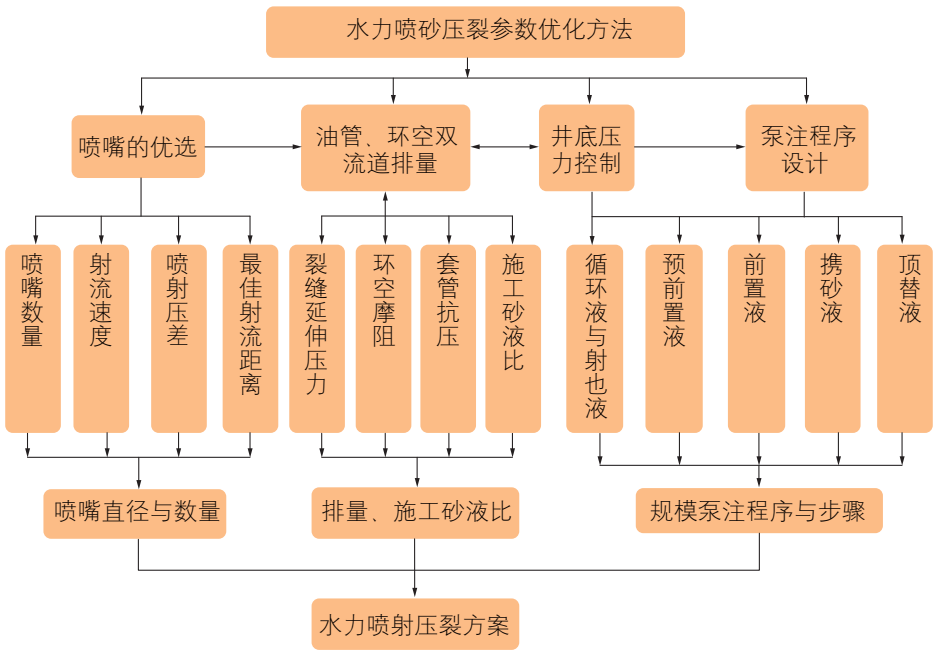


材质：35CrMo；
 承压：≤ 70MPa；
 抗拉：不低于 65t；
 投球启动压力：15 ~ 20MPa；
 脱手拉力：4 ~ 8t。

2.4 参数优化设计

1. 设计流程优化

设计流程优化主要包括：喷嘴数量的优化、油管与环空双流道排量的优化以及裂缝延伸压力的控制以及泵注程序的设计等。



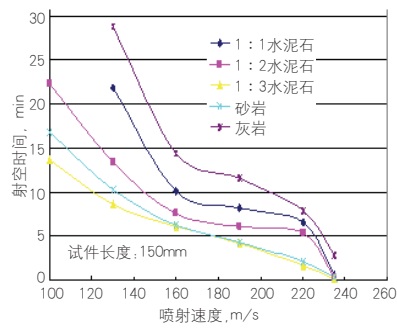
2. 喷射参数优化

对临界喷射速度、射流增压、喷射介质等喷射参数进行优化设计，为实现水力喷射压裂裂缝起裂、延伸及自动隔离提供理论依据。

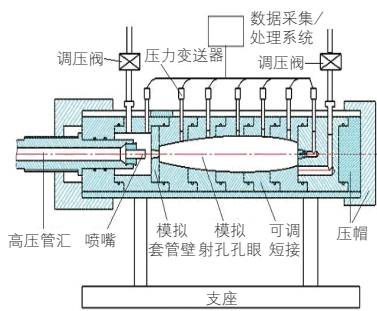
临界喷射速度：在 130 ~ 200m/s 均可以实现水力喷射穿孔破岩的目的，随排量增大，射孔深度明显增加。

射流增压：在喷射速度 160 ~ 220m/s 条件下，可实现射流增压 6 ~ 10MPa。

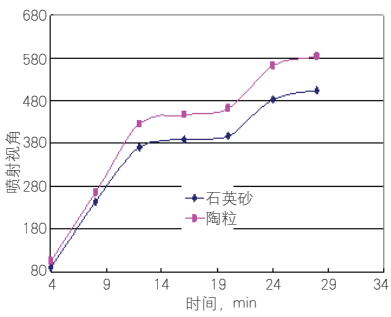
喷射介质：油田喷射作业采用石英砂、气田喷射作业采用陶粒。



不同流速下射穿定长试件
实验结果



水力喷射射孔及孔内压力
分布规律试验台架



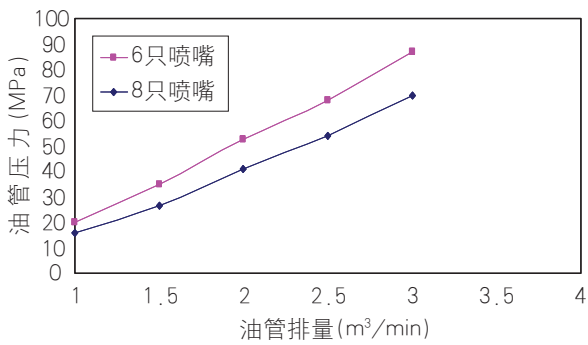
水力喷射磨料类型对喷射
深度的影响

3. 施工参数优化

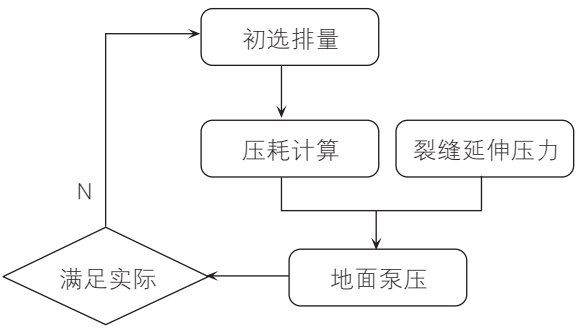
通过优化油管排量、裂缝延伸压力控制与环空排量，确保水力喷射压裂管柱施工安全、工艺可靠。

油管排量：井口限压 60MPa 条件下，使用 6 只喷嘴，油管排量 2.2m³/min，使用 8 只喷嘴，排量 2.7m³/min。

裂缝延伸压力控制与环空排量：根据地层裂缝延伸压力确定所需要的井底压力，计算泵注的环空排量。



油管压力与施工排量的关系曲线



环空参数优化流程

2.5 施工作业技术

针对油气田储层特征、完井方式、工艺管柱等方面存在差异，综合考虑井控风险、作业工艺的特殊需求，形成了水力喷射压裂施工作业技术系列。

1. 油田水力喷射压裂工艺技术

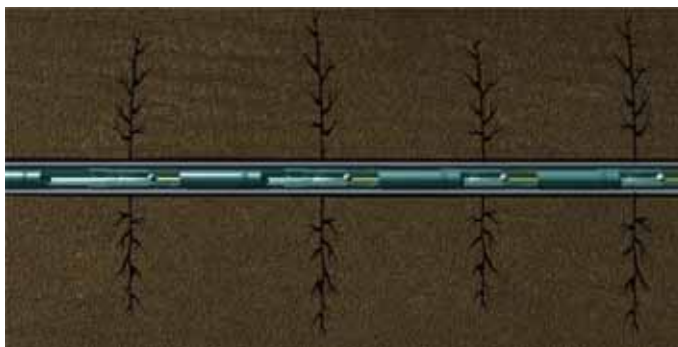
利用油管下入水力喷射压裂工具串，将喷射器对准第一个改造段，完成第一段水力喷砂射孔、压裂，然后拖动管柱到第二个改造段，实施第二段水力喷砂射孔、压裂，依次类推，通过拖动管柱完成剩余层段的改造，最后抽吸求产。



油田水力喷射压裂工艺流程示意图

2. 气田水力喷射压裂工艺技术

利用油管一次下入水力喷射压裂工具串，将各喷射器分别对准改造段，首先完成第一段水力喷砂射孔、压裂，通过投球打开第二级喷射器滑套，同时封堵下部通道，实施第二段水力喷砂射孔、压裂，依次类推，在不动管柱情况下完成剩余层段的改造，最后合层排液求产。



气田水力喷射压裂工艺流程示意图

3

典型案例

3.1 水力喷射压裂技术在长庆油田实现了工业化规模应用

水力喷射压裂技术在长庆油田累计应用 1172 口井 9032 段，油田水平井实现了一趟管柱施工 8 段，增产效果为直井的 3 倍以上；气田水平井实现了 4 寸半套管一次分压 10 段、6 寸裸眼一次分压 23 段，增产效果为直井的 5 至 8 倍。该技术助推了长庆低渗油气藏开发方式的重大转变，已成为油气田水平井改造的主要技术手段。

A 井为长庆油田致密油藏一口水平井，水平段长 1535.13m，完钻井深 3725m，完钻层位 ##。该井采用油田水力喷射分段多簇压裂管柱完成 20 段 40 簇压裂施工，累计加砂 1058m³，累计入地液量 16046.7 m³，试油日产纯油 184.05 m³，创造了国内致密油藏水平井压裂段数、单井加砂量和入地液量等 3 项新纪录。



A 井水力喷射压裂施工现场（油田）

B 井为苏里格气田的一口水平井，水平段长 1500m，完钻井深 5032m，该井采用气田水平井不动管柱水力喷射压裂管柱，首次实现了 6in 裸眼条件下一趟管柱连续分压 15 段，创造了该技术的新纪录。测试无阻流量高达 $128 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，是同区块直井产量的 7.8 倍。



B 井水力喷射压裂施工现场（气田）

3.2 吉林油田应用水力喷射压裂技术开展先导性试验获得成功

为了评价水力喷射压裂技术的适应性，在吉林油田开展了 2 口井的先导性试验。单井最高设计 9 段，采用环空加砂压裂方式，均一趟管柱完成，单趟管柱最高拖动 8 次，工作时间长达 900min。该技术的成功应用为吉林油田水平井分段压裂技术提高了新手段，与该油田前期采用的裸眼封隔器分段压裂、套内封隔器分段压裂技术相比，具有施工可靠、无需投球压裂、成本低、压后保持井筒全通径无需打捞或钻磨等措施，具有很好的应用前景。



× × 井水力喷射压裂施工现场（吉林油田）

4

科研装备

4.1 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室

4.2 标志性实验设备

低渗透油气田勘探开发国家工程实验室是中国唯一的低渗透油气田国家级实验室。现有固定人员 187 人,其中中石油集团公司专家 8 人,博士 29 人,教授级高工 22 人。实验室建筑面积 15000m², 配套有国内、国际领先的各类重大仪器设备 120 多台套, 总投资 4654.63 万元, 实验装备能力达到国内领先水平。



低渗透油气田勘探开发国家工程实验室主楼

1. MTS-815 三轴岩石力学测试系统



MTS-815 三轴岩石力学测试系统实物图

MTS-815 三轴岩石力学测试系统可以模拟地层温度压力条件进行杨氏模量、泊松比、抗拉强度、压缩系数、断裂韧性等岩石力学参数测试, 以及地应力测定, 为认识地层岩石的破裂特性、进行水力加砂压裂设计提供准确的输入参数。

2. 井下工具实验检测系统



井下工具实验检测系统布局图



系统远程控制终端

井下工具实验检测系统主要用于油井、注水井封隔器及其它井下配套工具的性能检测试验(包括坐封、解封载荷,耐压耐温性,剪切压力,密封性,反洗通道开启性能,投捞性等),为直井多层、水平井多段压裂井下配套工具的研发评价提供了实验平台。

3. 水平井井下工具实验装置



水平井井下工具实验装置实物图

水平井井下工具实验装置能够完成对水力喷射压裂管柱配套工具的机械性能、密封性能测试和高压大排量液体循环试验,提供多流道高压水平段模拟测试井筒,具有可视井筒功能,能直观地观察工具的动作状况。

4. 水力喷射压裂模拟起裂实验装置



水力喷射压裂模拟起裂实验现场图

水力喷射压裂模拟起裂实验装置能够对水力喷射压裂管柱进行性能评价，考察排量和喷射时间等因素对关键工具的影响，并检测成孔形态、孔深及裂缝起裂后的形态，深化裂缝形态认识，提高水力喷射压裂管柱优化设计的针对性，为水力喷射压裂的机理研究与现场施工控制提供依据。

5 资质标准



水力喷射压裂拥有集团公司企业标准 1 项、油田分公司企业标准 2 项,获已授权国家专利 10 项。获第十九届全国发明展览会铜奖、中国石油天然气集团公司自主创新重要产品。

标准：

- Q/SY 1460—2012 水平井分段压裂工艺技术规范
- Q/SY CQ3449—2012 油田水力喷砂压裂工艺操作规范
- Q/SY CQ3447—2012 气田水平井不动管柱水力喷砂分段改造工艺操作规范

专利：

- 200810105642.2 自破胶液体胶塞水平井分段射孔压裂工艺及胶塞
- ZL200620113021.5 新型水力喷射器
- ZL200720173194.0 不动管柱分层水力喷射射孔与压裂一体化管柱
- ZL200920108820.7 水平井多段拖动压裂工艺管柱
- ZL201020275485.2 不动管柱水力喷射分层压裂一体化管柱

资质标准

ZL201020520348.0	裸眼完井水力喷砂不动管柱分段压裂工艺管柱
ZL201020569352.6	水力喷射射孔压裂气举排液一体化工艺管柱
ZL201020605206.4	裸眼水平井分段改造管柱
ZL201120169285.3	水平井水力喷射多簇分段压裂管柱
ZL201120264146.9	裸眼水平井不限级数分段压裂井下管柱



6

专家团队



沈忠厚

中国工程院能源与矿业工程学部院士。主要从事高压水射流理论与技术的研究工作，美国《高压水射流》杂志咨询委员会委员、中国劳保学会水射流专业委员会副主任委员、《水动力研究及进展》与《石油钻采工艺》杂志编委。先后获国家科技进步二等奖 1 次、国家发明三等奖 1 次、省部级科技进步一等奖 2 次和二等奖 3 次，获中外专利 13 项，在中外刊物发表论文 70 余篇，出版英文专著 1 部、中文专著 2 部。

电话：0546-8391616



李根生

教授，博士生导师。主要从事高压水射流在石油工程中的理论与应用研究等工作，973 项目首席科学家，“国家杰出青年科学基金”获得者，国家“百千万人才工程”第一、二层次人选，享受国务院“政府特殊津贴”专家，“孙越崎能源大奖”获得者。获国家发明专利 20 余项，论文 200 余篇。

电话：010-89733935

Email：ligs @cup.edu.cn



慕立俊

高级工程师，高级技术专家。主要从事低渗透油气藏压裂酸化等增产技术研究、超低渗透油藏开发重大技术攻关等工作，先后组织和参与了国家级、中国石油集团（股份）公司重大项目 6 项、油田公司项目 20 多项。获国家专利 32 项，核心刊物发表论文 30 余篇。

电话：029-86590699

Email：mulj_cq@petrochina.com.cn



赵振峰

教授级高工，高级技术专家，主要从事油气田储层改造、增产工艺等方面研究工作。研究形成了以“压前诊断、优化设计、中导长缝、低伤害压裂液、压后控制放喷强制裂缝闭合”为主要内容的超低渗压裂技术模式。获专利 32 项，专著一部，发表论文 20 余篇。

电话：029-86590688

Email：zzf_cq@petrochina.com.cn



李宪文

教授级高工，技术专家，主要从事压裂酸化为主的增产技术与试验工作。率先开展研究并规模应用了水力喷射压裂、多级注入酸压、二氧化碳压裂、碳酸盐岩水力加砂压裂、多级加砂压裂、多缝压裂等新工艺、新技术。获专利 34 项，合作出版著作 1 部，发表论文 30 余篇。

电话：029-86590698

Email：lxw_cq@petrochina.com.cn



付钢旦

高级工程师，技术专家，主要从事压裂工艺、采油工艺、采气工艺及配套工具技术研究工作。组织研发了气井分压合采工艺及管柱、水力喷砂压裂工艺及管柱、裸眼封隔器分段压裂工艺及管柱等多项油气井改造系列化工艺与工具。获国家专利 43 项，发表论文 20 余篇。

电话：029-86590770

Email：fgd_cq@petrochina.com.cn



桂捷

高级工程师，技术专家，主要从事油气田储层改造工具、采油（气）井下作业工艺及工具的研究工作。负责组织完成了气井分压合采、水力喷砂压裂、裸眼封隔器分段压裂等多层多段改造工具的研发。获国家专利 37 项，发表论文 18 篇。

电话：029-86590675

Email：gj_cq@petrochina.com.cn



张矿生

技术专家，主要从事油气田储层改造、增产工艺及采油工艺研究工作。在致密油气直井分层压裂、水平井分段压裂、低成本低伤害压裂液方面形成多项成果。获省部级科技进步奖 3 项，油田公司级科技进步奖 5 项，撰写论文 8 篇。

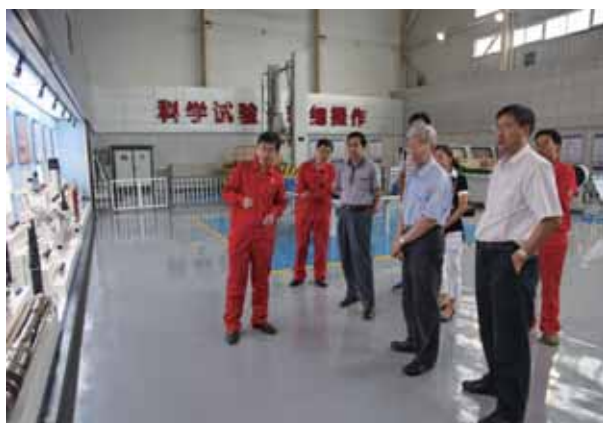
电话：029-86590796

Email：zks_cq@petrochina.com.cn

7

培训服务

拥有专业的培训服务队伍，针对用户的不同需求，制定相应的培训计划，服务手段多样，能够提供室内工具装配讲解、现场作业培训、模拟装置演示等一条龙服务。拥有详尽的培训课件和指南手册，软硬件相结合，用于现场实际操作人员的培训，形象生动，直观易懂。建立了完善的售后服务体系，拥有专业技术人员 24 小时待命服务，可提供远程技术支持和诊断，及时有效解决产品问题。



联系人：

付钢旦	电话：029—86590770	Email：fgd_cq@petrochina.com.cn；
桂捷	电话：029—86590675	Email：gj_cq@petrochina.com.cn；
张矿生	电话：029—86590796	Email：zks_cq@petrochina.com.cn。



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

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



