



CO₂干法加砂压裂技术

2016年



中国石油天然气集团公司科技管理部

CO₂ 干法加砂压裂技术

——绿色、高效的储层改造利器！



目 录

1

简 介 / 4

2

特色技术 / 6

3

典型案例 / 10

4

科研装备 / 12

5

资质与标准 / 16

6

专家团队 / 18

7

服务与培训 / 20



中国石油天然气集团公司（简称“中国石油”，英文缩写：CNPC）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 2015 年国内外油气产量当量 2.6 亿吨，原油加工量 1.96 亿吨，成品油销售量 1.74 亿吨，天然气销售量 1290 亿立方米。

2015 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 3 位，在《财富》杂志全球 500 家大公司排名中位居第 4 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。

CO₂ 干法加砂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

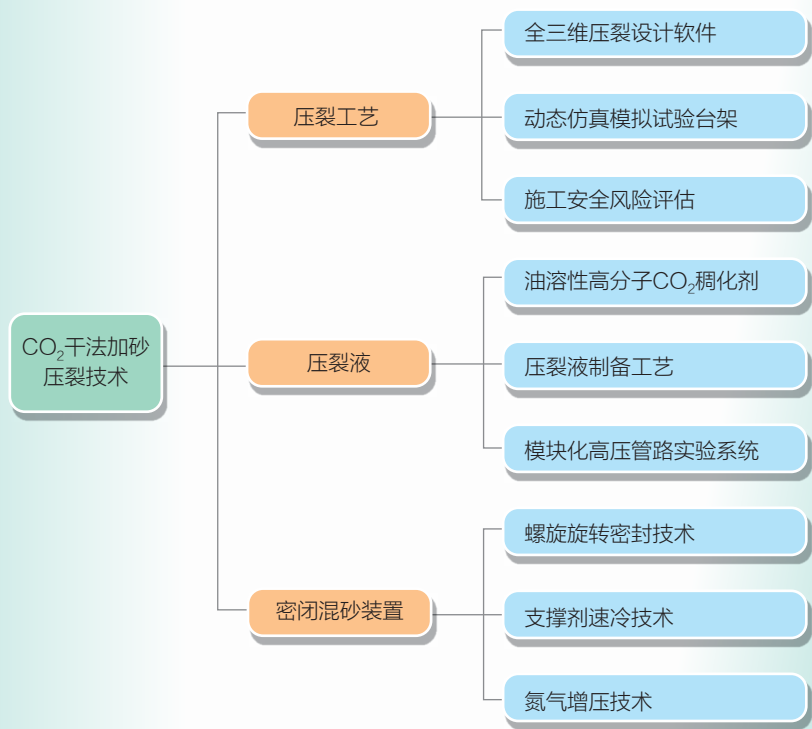
1

简介

CO₂ 干法加砂压裂技术是利用纯液态 CO₂ 作为压裂液的一种“无水压裂”增产改造技术，施工中泵输介质为低温压缩流体，具有温度低、带压储运、带压混砂等特性。CO₂ 干法加砂压裂技术可消除储层水敏伤害和水锁伤害，提高压裂改造效果，具有无残渣、有效保护储层和支撑裂缝、实现自主快速返排、大幅缩短返排周期、节约水资源等特点，有利于页岩气、煤层气吸附天然气的解析。尤其适合于低压、低渗透致密油气藏和水锁、水敏伤害严重的油气藏压裂开发，以及稠油油藏降黏压裂开发。

中国石油集团长期致力于 CO₂ 干法加砂压裂提高低渗透油气田单井产量技术的攻关与推进，形成了 CO₂ 干法加砂压裂工艺、CO₂ 干法压裂液和密闭混砂装置三大技术系列 9 项特色技术，拥有 5 项专利技术。同时，中国石油集团拥有一批优秀的专业技术人才，建设了一流的实验室和现场试验基地，可提供与之相关的 各项技术服务。

CO₂ 干法加砂压裂技术已在鄂尔多斯盆地的长庆油气田成功应用，在单井增产和缩短返排周期方面效果显著。对实现低渗透油气藏的高产、稳产，减少压裂作业耗水量和实现对 CO₂ 循环利用及实现温室气体埋存提供了强有力的技术支撑，成为水力压裂技术的有效补充。



—— 市场应用分布图 ——

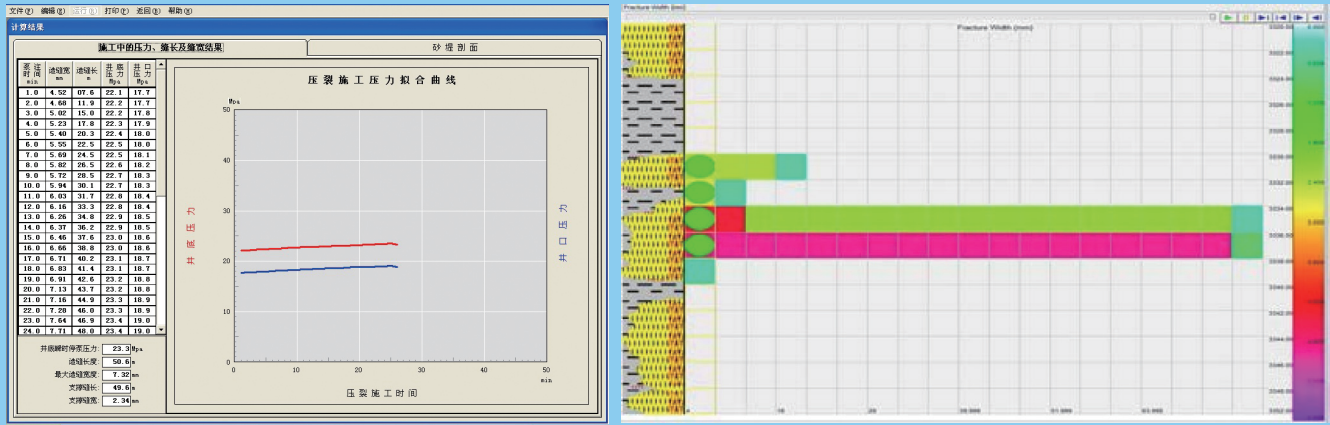
2

特色技术

2.1 CO₂ 干法加砂压裂工艺

在对储层地质资料和钻井、完井资料分析的基础上，通过软件模拟计算、动态仿真模拟试验对 CO₂ 干法加砂压裂工艺进行参数和流程设计，并评估施工安全风险，以保障施工作业的有效性和安全性。

1. 具备 CO₂ 相态模拟功能的全三维压裂设计软件

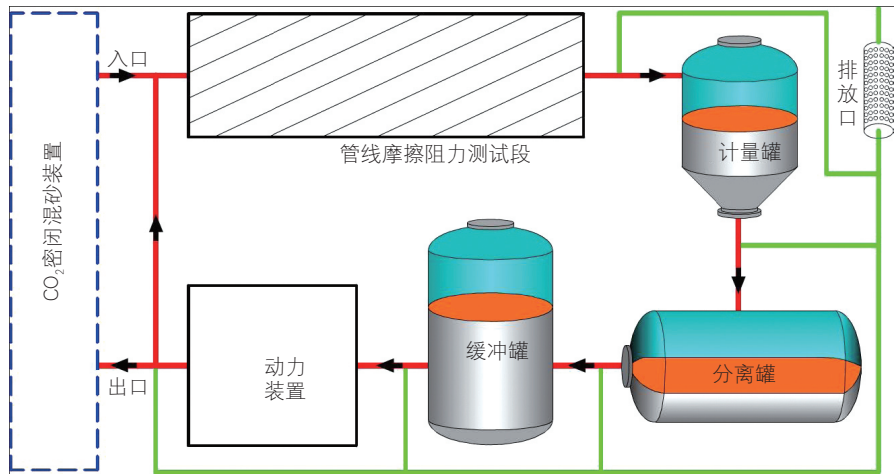


CO₂ 压裂设计软件界面

典型井的裂缝剖面模拟计算结果

2. 动态仿真模拟试验台架

动态仿真地面实验系统，主要由砂液分离罐、缓冲罐、计量罐、增压泵系统、管汇系统、支撑剂回输装置和监测控制系统组成。对压裂施工过程进行动态模拟，以验证井筒管柱和地面流程设计的有效性及其安全性。



动态仿真模拟实验室台架结构示意图

3. 施工安全风险评估方案

施工安全风险评估方案以施工作业人员、井筒管柱和地面压裂流程为对象，在空间上，将风险位置划分为井筒和地面两部分，在时间上贯穿整个压裂作业始终。在内容上，涵盖作业环境的选择，施工材料的组织，井筒管柱的设计，压裂设备的配套、连接及要求，操作人员的劳保要求，压裂施工作业流程，关键作业的操作步骤，压后排液管理，应急处理措施和急救措施等。

CO₂ 干法压裂液主要由液态 CO₂ 与稠化剂组成，具备在室内对 CO₂ 压裂液的各项参数测试、性能评价技术。并实现了在低温、低压条件下稠化剂与液态 CO₂ 的分散相溶性，以及现场精确的加入比例控制。

2.2 CO₂ 干法压裂液技术

1. 油溶性高分子 CO₂ 稠化剂

能大幅增加 CO₂ 的黏度，在稠化剂加量 0.81% ~ 2.5% 条件下，使液体 CO₂ 黏度由 0.1mPa · s 提高到 2 ~ 10mPa · s，极大地提高了 CO₂ 压裂液的效率。

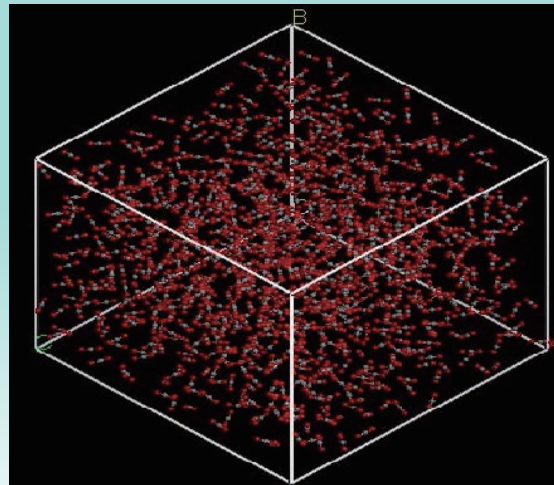
2. 压裂液制备工艺

使液态 CO₂ 与稠化剂在低温、低压工况下充分混合，实现对 CO₂ 稠化剂加量的精确控制。

3. 模块化高压管路实验系统

自主研发的实验系统采用分布式结构，由四大测试功能模块组成，可实现高温、高压条件下压裂液制备及性能测试，为压裂设计提供准确可靠的依据。

拥有自主研发的满足储存液态 CO₂ 条件的耐低温、耐压的密闭混砂装置，最大输砂速度 0.5m/min，工作压力 2.5MPa，工作温度 -20℃。具备数据实时采集与记录功能，满足远程集中控制要求，并形成了三项配套技术。



330K、8MPa 下的 CO₂ 分子体系



CO₂ 稠化剂注入控制装置

2.3 密闭混砂装置

1. 螺旋旋转密封技术

采用柔性悬浮螺旋结构，使用寿命长切可靠性高，解决了大跨度螺旋轴的旋转密封问题，保证了带压工况下密闭混砂装置的密封性。

2. 支撑剂速冷技术

通过独特的设计结构增大 CO₂ 与支撑剂的接触面积，实现支撑剂的快速冷却，既节省了液态 CO₂ 的使用量，又提高了施工作业效率。

3. 氮气增压技术

利用氮气的稳定性为液态 CO₂ 提供强有力地保护，保障 CO₂ 以液态输送到压裂设备，为压裂机组提供了充足的流量供给，可有效提高液态 CO₂ 的供给效率。



有效容积 $2 \times 10\text{m}^3$ 的密闭混砂装置

3

典型案例

CO₂ 干法加砂压裂技术在低压、低渗透，水敏、水锁伤害严重的油气藏开发中取得了显著增产效果。已在鄂尔多斯盆地的长庆苏里格气田、榆林气田、神木气田和姬塬油田进行了现场应用。施工最大井深 3352m，最高井温 107℃，最大单层加砂量 9.6m³，压裂后最高单井无阻流量 6.4×10⁴m³/d，返排周期较水基压裂缩短 50% 以上。



长庆苏里格气田施工现场图

3.1 在“三低”气田的应用

S44-22 储层深度 3245m，平均渗透率 0.75mD，地层压力系数 0.86。储层物性差，存在严重的水锁伤害，通过 CO₂ 干法加砂压裂技术获得了无阻流量 $3.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 工业气流，相比 2 口水基压裂邻井压裂后无产能结果，增产效果显著。



作业现场

3.2 在致密气田的应用

S60 井储层深度 2240m，渗透率 0.01 ~ 0.56mD，孔隙度 7% ~ 10%。致密性储层，水锁伤害严重，水基压裂作业入井液返排困难，储层勘探未见明显突破。通过 CO₂ 干法加砂压裂作业，获得无阻流量 $4.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 工业气流，实现了勘探评价对储层产能的最大发掘，及储层特征的准确评估，该区同层产气量上了一个新台阶。



长庆神木气田施工现场图

4

科研装备

4.1 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室

低渗透油气田勘探开发国家工程实验室建立了完备的压裂工艺、压裂液体系、井下工具与装备等实验测试检测平台。目前，实验室的科研装备及技术能力在低渗透油气田开发领域处于国内领先水平。

1. 主要科研设备

实验室拥有 AFCS-845 型酸蚀裂缝导流能力评价系统、RS6000 模块化旋转流变仪、FOAMSCAN 高温高压泡沫扫描仪、FDS-800-10000 型高温高压岩心流动仪等 50 余台（套）先进的分析测试仪器。

2. 主要软硬件设备

用于地质模拟与分子数值模拟的专业软件 6 套，高性能计算机 20 多台。

2012 年，在中国石油川庆钻探工程有限公司设立 CO₂ 压裂增产研究室，提升了 CO₂ 压裂增产技术研究的平台。

国家工程实验室

National Engineering Laboratory

国家发展和改革委员会



— 高温高压岩心流动测试评价室 —



— AFCS-845 型酸蚀裂缝导流能力评价系统 —



FOAMSCAN 高温高压泡沫扫描仪



RS6000 模块化旋转流变仪



4.2 中国石油油气藏改造重点实验室——CO₂ 压裂增产研究室

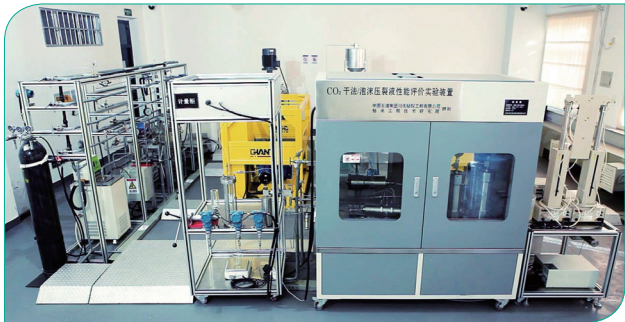
1. CO₂ 干法 / 泡沫压裂液室内流动模拟实验装置

主要功能

- (1) 实现对 CO₂ 干法 / 泡沫压裂液流变性能、对流换热、滤失性能、管路摩擦阻力、岩心伤害等性能的综合测试以及各个单项性能的检测。
- (2) 装置具有操作性强、高参数、多体系、一体化的特点。

主要参数

工作温度	20 ~ 150℃
剪切速率	25 ~ 1500s ⁻¹
工作压力	0.5 ~ 50MPa



CO₂ 干法 / 泡沫压裂液室内流动模拟实验装置



HAAKE MARS III 模块化高级流变仪

2. HAAKE MARS III 模块化高级流变仪

主要功能

- (1) CO₂ 干法 / 泡沫压裂液抗剪切、耐温性能、黏弹性的评价。
- (2) 各种流体微观结构和黏度的测量。

主要参数

控温范围	-40 ~ 200℃
压力范围	常压 ~ 40MPa

3. CO₂ 密闭混砂性能检测及地面流动模拟实验装置

主要功能

- (1) CO₂ 密闭混砂装置性能测试、评价。
- (2) CO₂ 干法压裂液在地面流程内的携砂性能检测。
- (3) CO₂ 管路摩擦阻力测试与评价。
- (4) CO₂ 压裂设备施工参数的系数标校。

主要参数

最大流量	4m ³ /min
工作压力	2.2MPa
工作温度	-30℃
CO ₂ 总容积	30m ³
支撑剂容积	10m ³



CO₂ 密闭混砂性能检测装置



地面流动模拟实验装置

5

资质与标准

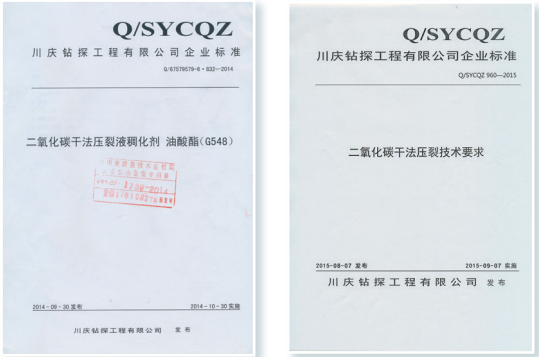
5.1 企业资质

CO₂干法加砂压裂技术的主要研发基地——中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院、长庆井下技术作业公司通过了ISO9001体系认证，建立了完善的环境管理体系、职业健康安全管理体系、质量管理体系认证，取得计量认证证书和CNAS国家实验室认可证书等。



5.2 标准

形成标准 2 项，主要规范了压裂液稠化剂产品检验方法、技术指标和压裂设计、施工作法、安全与质量控制方面。



5.3 专利

拥有国家专利 5 件，其中授权专利 4 件，申请受理专利 1 件。

CO₂ 干法加砂压裂技术专利表

专利名称	专利号 / 申请号
一种螺旋结构	ZL200920305472.2
管道间液体介质混配器	ZL201020583610.6
物料均布装置	ZL201220731924.5
螺旋输送机外筒	ZL201220732277.X
一种基于超临界二氧化碳的压裂液体系及其用途	201310515621.9



6

专家团队



宋振云

教授级高级工程师，高级技术专家。主要从事压裂酸化技术研究，承担并完成十多项国家、中国石油重大研究课题。获得国家发明专利 6 项；在国内外核心期刊和重要学术会议上发表论文 20 多篇。

电话：029-86594676

Email：songzhenyun@cnpc.com.cn



崔明月

高级工程师，中国石油勘探开发研究院廊坊分院采油学科带头人。主要从事储层改造、采油、低渗透油气藏开发，承担并完成 8 项国家、中国石油重大研究课题。获得国家专利 9 项；在国内外核心期刊和重要学术会议上发表 33 篇论文，参与编写专著 2 部。

电话：010-69213447

Email：cmy69@petrochina.com.cn



孙 虎 教授级高级工程师，高级技术专家。主要从事压裂酸化技术研究与应用，承担并完成 8 项国家、中国石油重大研究课题。获得国家专利 8 项；在国内外核心期刊和重要学术会议上发表论文 12 篇。

电话：029-86599022

Email：sunhu@cnpc.com.cn



李志航 高级工程师，技术专家。长期从事压裂液酸化液技术研究，承担并完成 6 项中国石油重大研究课题。获得国家专利 3 项；在国内外学术期刊发表论文 16 篇。

电话：029-86591075

Email：lizhihang@cnpc.com.cn



李前春 高级工程师，技术专家。主要从事石油机械技术研究，承担并完成 5 项中国石油重大研究课题。获得国家专利 13 项；在国内外期刊和重要学术会议上发表论文 12 篇。

电话：029-86594865

Email：liqianchun@cnpc.com.cn



7

服务与培训

具备专业的专家技术团队，拥有实验测试技术、装备、现场施工、安全技术等手册及培训课件。针对用户的不同需求，制订详尽的培训计划，提供 CO₂ 干法加砂压裂全程技术培训服务。

目前，中国石油的 CO₂ 干法加砂压裂技术，可提供包括设计、装备、压裂液、作业和压后评价等一系列完整的工程技术服务。并建立了完善的售后服务体系，专家团队可提供远程技术支持及诊断，可及时有效解决应用中出现的技术问题。

技术服务联系人：宋振云先生

单位：中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院

电话：029-86594676

Email：songzhenyun@cnpc.com.cn





中国石油科技管理部联系人：

刁 顺 先生
电 话：86-10-59986059
Email：sdiao@cnpc.com.cn
diaoshun@sohu.com

中国石油经济技术研究院联系人：

张 丽 女士
电 话：86-10-62065043
Email：zhangli024@cnpc.com.cn

中国石油川庆钻探工程有限公司联系人：

宋振云 先生
电 话：86-029-86594676
Email：songzhenyun@cnpc.com.cn

Contact of Science & Technology Management Department,CNPC：

Mr. Diao Shun
Tel: 86-10-59986059
Email: sdiao@cnpc.com.cn
diaoshun@sohu.com

Contact of CNPC Economics & Technology Research Institute：

Ms. Zhang Li
Tel: 86-10-62065043
Email: zhangli024@cnpc.com.cn

Contact CNPC Chuangqing Drilling Engineering Company Limited：

Mr. Song Zhenyun
Tel：86-029-86594676
Email：songzhenyun@cnpc.com.cn

