

# 低渗透油气藏 增产技术新进展

—— 2008年油气藏增产改造学术研讨会论文集

张士诚 主编

DISHENTOU YOUQICANG ZENGCHAN JISHU XIN JINZHAN

石油工业出版社



# 低渗透油气藏增产技术新进展

——2008年油气藏增产改造学术研讨会论文集

张士诚 主编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书收集了2008年中国石油大学(北京)与石油学会联合主办的2008年油气藏增产改造学术研讨会的有关论文。内容包括:水力压裂与酸压工艺及配套技术、压裂酸化应用材料以及其他增产技术及相关研究。

本书可供从事油气井增产技术的相关技术和管理人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

低渗透油气藏增产技术新进展:2008年油气藏增产改造学术研讨会论文集/张士诚主编. —北京:石油工业出版社,2009.4  
ISBN 978-7-5021-7074-5

I. 低…

II. 张…

III. 低渗透油层-石油开采-国际学术会议-文集

IV. TE348-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第046725号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: [www.petropub.com.cn](http://www.petropub.com.cn)

编辑部:(010) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

---

2009年4月第1版 2009年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:16.25

字数:413千字

---

定价:58.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

近年来，随着低渗透油田勘探力度的增加，我国的科技人员继续在低渗透油气藏渗流机理研究、新工艺和新技术创新及应用等方面取得了新进展，并且不断突破新领域，取得了许多创造性的新成果，但同时也面临一些亟需解决的新问题。为了提高国内低渗透油（气）田增产开发技术水平，同时给科研院所及油田企业技术人员建立一个学术和技术交流平台，2008年9月由中国石油学会和中国石油大学（北京）再次共同发起并组织了“2008年油气藏增产改造学术研讨会”。

油气藏增产改造学术研讨会已分别于2002年和2005年各举行过一次，本次为第三届油气藏增产改造学术研讨会。本次会议有130名在油气藏增产改造领域的优秀技术人员出席，是一次反映最新技术成果的高水平学术研讨会。与会代表分别来自中石油、中石化、中海油等20多个油田单位和中石油勘探开发研究总院、廊坊分院和中石化勘探开发研究院，以及中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、大庆石油学院、西南石油大学、西安石油大学、重庆科技学院等10多家高等院校和研究单位。本次研讨会在收到的若干论文中筛选出11篇论文进行了大会交流，40篇论文进行了分会交流，论文内容涵盖了当前压裂、酸化理论和机理，工作液体系与评价，优化设计方法，实验分析方法，施工监测和评价以及相关配套工艺技术等方面的最新研究和应用成果。经过专家评审筛选了其中42篇论文出版成集，论文集旨在展示研究人员近几年在各自领域的最新研究成果，总结取得的经验，探讨解决制约低渗透油气藏开采技术瓶颈问题，以期能给更多的研究人员提供更好的交流和学习材料。

通过技术交流会，近几年国内在低渗透增产工艺及技术方面主要取得了以下几方面的新进展：首先，国内几个低渗透油气田逐渐形成并完善了自己的特色工艺技术，如以大庆油田为代表的火山岩压裂技术及水平井压裂和酸化工艺技术、胜利油田为代表的低孔特低渗薄互层大型压裂工艺技术、川西为代表的致密气层深井超深井的高破裂压力压裂工艺技术、海拉尔盆地为代表的泥灰岩重复压裂工艺技术、塔里木盆地和川东北（普光）为代表的高温高压深层碳酸盐岩大型酸压及水力加砂压裂工艺技术、鄂尔多斯盆地为代表的低压低渗油气藏压裂配套工艺技术；二是特殊压裂工艺技术的推广和应用，如转向压裂工艺技术、前置酸加砂压裂技术、前置段塞压裂技术、纤维加砂压裂技术、连续油管压裂技术、清水加砂压裂技术、二氧化碳压裂技术等有了更多的实践尝试；三是在新材料研制及应用方面取得了新的进展，如新型阴离子清洁压裂液在几个油田应用取得非常好的压裂效果，特别是深井敏感性气层压裂大幅度提高气

井产量，选择性支撑剂在应用中也有了阻水增油的效果报道；四是特殊油气藏的压裂技术获得了新的进展，如裂缝性油气藏压裂、凝析油气藏压裂等方面不断完善形成新的工艺技术。另外酸压、酸化方面，无论是酸压机理还是配套的工艺技术都有了新的进展，尤其是酸压技术，在以往基础上，深层耐高温高压的材料研制及应用方面均有突破，酸加砂压裂及酸液返排技术有了更多的新尝试。

最近几年，压裂伤害理念方面也有了新观点。传统观念认为，压裂液对地层基质的伤害（滤失深度和滤入区的伤害）是影响产能的主要原因，而压裂液的水不溶物及残渣对裂缝导流能力伤害对产能影响较小；最新的研究结果表明，裂缝导流能力的伤害是影响压裂井产能的主要因素，而压裂液对地层基质的伤害对产能影响很小，对于实际测试的伤害率产能下降甚至不超过3%；另外，压裂液伤害对常规低渗油藏压裂井产能的影响较致密地层要严重一些。

压裂酸化技术尽管在一些领域的某些方面取得一定的成绩，但是也应清醒地看到，随着油气勘探开发的不断深入，特别是含有特低渗透致密储层、高温超深储层、复杂岩性储层、缝洞和裂隙储层等的复杂油气藏及水平井、大位移井等复杂结构井的增多，压裂、酸化改造的油气藏越来越复杂，酸化、压裂改造难度越来越大。另外，随着海上勘探开发力度的增大，对压裂酸化理论和技术的发展与应用都提出了许多需要攻克的难题。这些都对现有的增产改造技术提出了新的挑战。具体表现如下：

一是复杂岩性地层的增产改造仍然是当前和今后一段时间的研究重点和难点。近几年在复杂岩性储层压裂改造技术方面取得了长足的进步，复杂岩性储层施工成功率和效果明显提高，但是对于复杂岩性储层裂缝的起裂和延伸机理的认识还不够，处理措施还缺乏理论上定量评价和指导，今后应加强与岩性特点相关的储层综合评价和室内破裂机理研究，建立裂缝扩展和延伸理论模型，指导和完善复杂岩性储层压裂技术。二是进一步加强水平井、复杂结构井的增产改造理论与技术研究。主要包括低渗透油藏水平井、直井联合开发整体压裂井网优化、水平井限流法压裂流量分配定量研究、水平井分段压裂井筒温度场计算，非达西渗流和复杂地层裂缝条件下的压裂裂缝参数优化问题还没有解决，需要进一步加强研究。三是关注海上低渗透油气藏的水力加砂压裂技术研究。我国海上油田目前主要采用酸化解堵增产技术，但随着海上低渗透油气藏的开发，海上水力压裂已提到议事日程。由于受环境的影响，海上低渗透油气藏与陆上相比有很多不同，如井型、井网类型的差异对整体压裂方案设计的影响、受设备的影响能否使用海水配制压裂液、大型水力压裂设备的摆放、压裂液的排放以及工艺技术等都需要进行探索和研究。四是煤层气藏的水力压裂增产改造，由于我国的煤层气藏基本上都是低渗透、低压气层，煤层气藏的高效开发除了要深入了解煤层气的解吸和渗流机理外，还需要根据煤层的特点研究变形

介质裂缝扩展机理、压裂液对煤层的伤害机理以及支撑剂优化设计等。五是新材料、新工具的研制，在压裂材料方面，各种低伤害压裂液的应用井数还较少，支撑剂的质量性能还不够稳定，需要扩大新型低伤害压裂液的应用力度，不断降低成本，开展清水压裂和低密度支撑剂的研究与应用。六是在酸压及酸化方面，理论研究及技术应用还是有很大的发展空间，特别是缝洞型碳酸盐岩酸压裂缝扩展机理及滤失规律研究不够，目前酸压条件下的酸蚀蚓孔模型及滤失模型的建立还有待进一步攻关。

论文集的出版得到了各相关单位及科研技术人员的大力支持，论文的编排和整理过程中得到了中国石油大学（北京）压裂研究室研究生李林地、牟善波、张景臣、韩秀玲等同学的大力协助，在此一并表示感谢。

张士诚  
2009年2月

# 目 录

## 第一部分 水力压裂与酸压工艺及配套技术

- 大牛地低压致密气田压裂工艺技术 ..... 邢景宝 靳宝军 郑锋辉等 (3)
- 整体压裂配套技术在大庆外围低丰度扶杨储层的应用  
——以大庆油田州 201 区块为例 ..... 张玉广 张永平 王兆跃等 (13)
- 低渗透油气层水平井压裂改造技术 ..... 孙良田 李宗田 (18)
- 超深、高破压碳酸盐岩储层深度酸压改造技术  
研究与应 用 ..... 耿宇迪 张 焯 米强波等 (25)
- 塔河油田碳酸盐岩储层水力压裂机理研究 ..... 李林地 张士诚 张劲等 (31)
- 西峰特低渗透油层深部酸化解堵关键因素分析 ..... 范 耀 刘易非 赵振峰 (36)
- 冀东油田低渗透油藏压裂工艺技术应用情况 ..... 牛增前 曹骥骥 贾红战等 (43)
- 大庆低渗透油田水平井压裂优化设计研究与应用 ..... 张永平 刘方明 唐鹏飞 (48)
- 大庆低渗透油层水平井分段酸化技术研究与应用 ..... 梁亚宁 张士诚 李胜利等 (56)
- 水平井压裂裂缝延伸规律研究 ..... 张 波 曲占庆 温庆志等 (61)
- 低渗透薄互层压裂缝高扩展及控制技术研究 ..... 牟善波 张士诚 卢海兵等 (68)
- 塔河油田碳酸盐岩储层人工隔层缝高控制技术 ..... 王培义 李宗田 苏建政等 (73)
- 人工隔层控缝高压裂技术在海拉尔油田的研究与应用 ..... 王贤君 韩 松 李存荣等 (78)
- 低渗透油田薄夹层压裂界限试验研究 ..... 从德军 段致睿 (83)
- 低渗透油田薄差层压裂技术研究与应用 ..... 陈永明 敬 新 (89)
- 低渗透垂直缝油田重复压裂技术研究与实践 ..... 罗兰强 王 学 段致睿等 (93)
- 碳酸盐岩油藏水力压裂关键技术研究 ..... 王益维 张士诚 李宗田等 (100)
- 不同类型油气井压裂选井选层影响因素分析 ..... 刘长印 (106)
- 考虑反凝析伤害的水力压裂优化设计 ..... 韩丹岫 李相方 (113)

## 第二部分 压裂酸化应用材料

- 变粘酸压技术研究及在塔河油田中应用 ..... 张 焯 (119)
- 线性类泡沫压裂液研究与现场试验 ..... 任 山 黄小军 刘林等 (123)
- 特低渗透扶杨层裂缝长期导流能力实验研究 ..... 于永波 邓素玉 于光华 (128)
- 压裂用发泡剂 DG-ZCY-09 的研究与应用 ..... 隋向云 王津建 张平等 (132)
- 冻胶酸体系的研究与应用 ..... 王津建 贾 雁 徐新俊等 (138)

一种底水油藏压裂改造用新型下沉式转向剂研究与应用 … 张 平 赵 文 王娟等 (144)

### 第三部分 其他增产技术及相关研究

- 水平井限流法压裂技术存在问题及对策 …………… 邢庆河 张士诚 马新仿 (153)
- 水平缝水力压裂数值模拟研究 …………… 潘林华 张士诚 张劲等 (157)
- 水力压裂裂缝监测技术进展 …………… 黄志文 李宗田 张汝生等 (163)
- 应用试井资料优选压裂井技术研究 …………… 费洪涛 费红岩 崔宝军等 (170)
- 分层压裂返排井口压力预测模型研究 …………… 胡景宏 何顺利 赵金洲等 (177)
- 低渗小断块压裂增注效果评价研究 …………… 刘 睿 姜汉桥 周琦等 (182)
- 高含水厚油层层内控水提高采收率压裂技术研究 …………… 李 涛 陈秋欣 李波等 (188)
- 低频声波振动采油技术在低渗透油田适应性探讨 …………… 刘 彬 赵丽娟 刘志梅 (195)
- 产量不稳定法评价增产措施效果 …………… 崔丽萍 何顺利 宁波等 (199)
- 迪那气田裂缝性储层特征研究及应用 …………… 付道明 吴晓东 牟善波等 (204)
- 大牛地气田大斜度井双封分层压裂投产管柱  
研究与应用 …………… 陈付虎 秦玉英 靳宝军等 (210)
- 连续油管压裂技术进展与机理研究 …………… 王海涛 李相方 (214)
- 微生物采油技术现场应用及效果分析 …………… 文守成 李秀生 何顺利等 (220)
- 清水压裂增注技术研究及现场试验 …………… 曾志林 张传华 侯志东 (223)
- 多波多分量微地震监测技术 …………… 许 卫 (229)
- 双子表面活性剂的溶液性能及其在海上油田  
应用的前景分析 …………… 张凤英 鄢捷年 杨 光 (238)
- 注 CO<sub>2</sub> 提高采收率影响 CO<sub>2</sub> 注入能力的因素分析 …………… 李 虎 李相方 (242)
- 空气泡沫体系封堵能力影响因素实验研究 …………… 王 庆 吴晓东 王杰祥 (248)





# 第一部分



# 水力压裂与酸压 工艺及配套技术



# 大牛地低压致密气田压裂工艺技术

邢景宝 靳宝军 郑锋辉 杨安林 张孟东

(中石化华北分公司)

**摘要:** 大牛地气田为低压、低孔、低含气饱和度的致密气田。经过多年的实验和实践,建立了不同储层的低伤害压裂液体系、造长缝压裂工艺技术、多层段的有效改造技术、压裂效果的定量评价技术等,并且对裸眼和套管水平井进行了压裂改造的探索试验,均见到了非常明显的效果,这将对类似气田的压裂工艺具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 大牛地气田 低伤害压裂液 造长缝压裂 水平井压裂

## 1 引言

中石化华北分公司的大牛地气田位于鄂尔多斯盆地北部伊陕斜坡,其上古生界自下而上发育了太1、太2、山1、山2、盒1、盒2和盒3七套气层,气层纵向上交错叠合发育,平面上连片分布,储层非均质性较强,气藏内部差别较大。该区气藏一般埋深2520~2879m,主要目的层孔隙度为6.8%~7.9%,渗透率为0.325~0.906mD,地层压力系数为0.85~0.99,含气饱和度平均为57%,是一个典型的低压、低孔、低含气饱和度的致密气藏。该气田的规模勘探始于2001年,2003年开始进行开发先导性试验,2004年进入开发准备,2005年进入大规模开发阶段,2005年底已建成日产气近 $300 \times 10^4 \text{m}^3$ ,年产天然气 $10 \times 10^8 \text{m}^3$ 的生产能力。到2007年已累计探明储量已达 $3293.04 \times 10^8 \text{m}^3$ ,三级储量合计 $7035.66 \times 10^8 \text{m}^3$ ,目前仅动用 $1018.84 \times 10^8 \text{m}^3$ 的探明储量,已建成年产 $20 \times 10^8 \text{m}^3$ 的生产能力,是中石化向北京、山东、河南供气的主要气源地。

目前在大牛地气田采取的主要增产措施是进行加砂压裂,针对低压致密气藏特点,我们以提高单井产量为目的,遵循保护与改造并举的技术路线,以追求压裂缝长最大化、压裂液伤害最小化、多层段改造有效化、效果评价定量化为技术目标,建立了不同储层的低伤害压裂液体系、造长缝压裂工艺技术、多层段的有效改造技术、压裂效果的定量评价技术等,并且针对水平井进行了套管水平井的机械分段压裂工艺和裸眼水平井喷砂射孔压裂工艺的探索试验,均见到了非常明显的效果,对产能建设任务的全面完成和单井产量的稳步提高以及下步建产方式的确定提供了重要的技术支持。

## 2 低伤害压裂液体系

压裂液对储层的伤害主要表现在四个方面:

- (1) 压裂液残渣对储层孔喉和压裂裂缝的堵塞伤害;
- (2) 压裂液破胶化水后的对储层的水锁伤害;
- (3) 压裂液的酸碱性对储层的敏感伤害;
- (4) 压裂液与地层水不配伍引起的结垢伤害。

针对上述伤害因素,华北分公司形成了低稠化剂浓度+氮气增能助排压裂液体系、防止

结垢压裂液体系、降低水锁伤害压裂液体系等。

### 2.1 低稠化剂浓度+氮气增能助排压裂液体系

低浓度羟丙基瓜胶压裂液体系是指在保持压裂液的粘度满足施工条件的同时，降低稠化剂的浓度，减少压裂液残渣，降低其对支撑裂缝和储层的伤害。根据大牛地的地质特点优选出了低稠化剂浓度的压裂液体系：

基液：0.45%羟丙基瓜胶（一级）+1.0%氯化钾+0.1%甲醛+0.2%助排剂+1%起泡剂+0.2%pH值调节剂（ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ）

交联液：BCL-61（A：B=100：6）

交联比：100：0.3

液氮量：6%~9%

破胶剂：过硫酸铵（APS），0.01%~0.08%（现场追加）；胶囊破胶剂（NBA-101），0.01%~0.05%（现场追加）。

这套压裂液体系具有延迟交联、耐剪切、携砂性能好、低伤害、易返排等优点。经过多年的应用，证明这套压裂液体系适合于大牛地气田盒2、盒3的地层。

### 2.2 防止结垢压裂液体系

通过对大1、大23、大35、大47井区的24口井的地层水以及2个区块的配液水进行的全离子含量分析，尤其是对其中的钡、锶、硫进行检测：大1井区的盒2、盒3层含量相对较低，其他井区盒2、盒3层有一定含量，整个区块的山西组、太原组钡、锶离子含量较高，浓度高达2908g/L，配液用水及压裂液用的破胶剂过硫酸铵在水溶液中与钡、锶离子很容易生成硫酸钡锶沉淀，堵塞地层。

采用地层水优选出了阻垢率较好的硫酸钡锶阻垢剂，并且与目前使用的低稠化剂浓度+氮气增能助排压裂液体系配伍性较好。经过100多井次的现场应用取得了非常明显的效果。

### 2.3 降低水锁伤害压裂液体系

实验表明（表1）大牛地气田储层水锁伤害达到69.0%~96.3%，平均为83.75%，水锁伤害较为严重。有必要采取措施，以降低压裂液破胶化水后水锁伤害影响。

表1 储层水锁伤害实验结果

储层	空气渗透率 (mD)	水锁伤害后空气渗透率 (mD)	伤害率 (%)
盒1	0.273	0.01	96.3
	0.203	0.013	93.6
山1	0.327	0.078	76.1
	0.306	0.095	69.0

根据水锁伤害特点和低渗气藏特征，研制了针对水锁伤害的处理剂MGR-2气井水伤害处理剂。

从实验结果（表2）可以看出，水锁对于气井伤害较大，反向通入一定孔隙体积不经化学剂处理的盐水，对岩心气相渗透率将产生比较严重的影响，反通纯盐水后，岩心气相渗透率大幅度下降，渗透率保留率仅有23%左右；一般的表面活性剂对解除水锁伤害具有一定

的作用，实验表明反通加入 8% 活性剂的盐水后，渗透率保留率在 50%~60% 左右；而针对水锁研究的 MGR-2 水伤害处理剂对于气井水锁具有较好的预防作用，实验中反通加入 8% 水伤害处理剂的盐水后，渗透率保留率高达 85% 以上。这说明在易发生水锁伤害的低渗透气藏使用 MGR-2 水伤害处理剂，将提高压裂酸化等作业效果。

表 2 水锁伤害实验结果

岩心号	水锁伤害实验介质	初始气相渗透率 (mD)	伤害后气相渗透率 (mD)	渗透率保留率 (%)
X502-3	1.5%NaCl 盐水	7.097	1.628	22.94
X502-1	1.5%NaCl 盐水	7.832	1.961	25.04
X502-8	1.5%NaCl 盐水 +8%活性剂 PW	7.895	4.014	50.84
X502-6	1.5%NaCl 盐水 +8%活性剂 PW	8.622	4.985	57.82
X502-2	1.5%NaCl 盐水 +8%MGR-2 水伤害剂	8.220	7.249	88.19
X502-5	1.5%NaCl 盐水 +8%MGR-2 水伤害剂	7.988	6.993	87.54

配伍性实验表明，MGR-2 水伤害处理剂与压裂液配伍性好（表 3），将水伤害处理剂加入到前置液中，在返排过程中可有效地降低毛细管力，减少贾敏效应，降低压裂液滤液对储层的伤害程度，提高压裂液返排效率，减少压裂液返排时间，改善低渗透气藏压裂效果。

表 3 MGR-2 水伤害处理剂与压裂液配伍性及伤害率实验结果

配 方	性 能 指 标						滤液对储层伤害率 (%)
	粘度 (mPa·s)	滤失性		流变性		破胶化水性 (mPa·s)	
		初滤失量 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	滤失系数 (m/min <sup>1/2</sup> )	<i>n</i>	<i>k</i>		
压裂液	107.4	1.05×10 <sup>-3</sup>	5.2×10 <sup>-4</sup>	8.96	0.29	1.83	21.2
压裂液+8% MG-2	105.6	1.1×10 <sup>-3</sup>	5.6×10 <sup>-4</sup>	8.73	0.31	1.76	12.4

#### 2.4 不同储层的低伤害压裂液体系

根据以上实验和现场实践，形成了不同储层的低伤害压裂液体系（表 4）。

表 4 不同储层的低伤害压裂液体系

层 位	压裂液体系
盒 3、盒 2	低稠化剂浓度+氮气增能助排体系
盒 1	8%水锁伤害处理剂+0.5%阻垢剂压裂液体系
山 2	8%水锁伤害处理剂+0.5%阻垢剂压裂液体系
山 1	8%水锁伤害处理剂+1.0%阻垢剂压裂液体系
太 2	8%水锁伤害处理剂+1.0%阻垢剂压裂液体系
太 1	1.0%阻垢剂压裂液体系

### 3 造长缝压裂工艺技术

对于低压、低孔、致密的大牛地气田来说，增加泄气面积有利于压裂效果的提高，为此进行了压裂缝长优化设计，确定了不同储层不同渗透率区间的优化缝长，采用优化射孔技术、前置段塞或双段塞技术、中低密度高导流能力支撑剂的优化、上下缝高控制技术、放喷速度控制技术等，自 2006 年全面应用后获得了较好的压裂效果，并且现场压裂缝长的测试表明缝长达到了设计的要求（表 5）。

表 5 压裂裂缝缝长现场测试结果

井号	层位	裂缝方位 (°)	裂缝长度 (m)	测试时间 (年.月.日)
大 26	太 1	30	247	2007. 4. 25
		225	271	
D12-6	山 1	30	107	2007. 4. 28
		225	283	
D1-1-158	太 2	60	189	2007. 5. 5
		255	143	
大 44	太 1	45	125	2007. 5. 20 砂堵
		240	86	
D1-1-153	山 1	75	183	2007. 5. 24
		255	197	
	山 2	75	192	
		255	186	
D66-1	太 1	75	229	2007. 6. 7
		255	203	
D66-3	山 2	60	249	2007. 6. 10
		240	214	
D1-1-160	盒 1	30	197	2007. 6. 16
		210	253	
D66-6	太 2	75	257	2007. 8. 24
		263	226	
D10-9	山 1	60	203	2008. 6. 26
		255	217	

### 4 多层段的有效改造技术

随着主力层位的动用完毕，需要打开较多的低品位层位生产，为了提高气层动用程度、缩短作用周期、减少作业过程对储层的污染，建立了机械分层压裂工艺技术、限流压裂工艺技术、投球压裂工艺技术、大斜度井的机械分压工艺技术和不压井作业+连续油管分层压裂工艺技术。

#### 4.1 机械分层压裂工艺技术

该分压合采管柱主要由反洗井循环阀、Y111-114 封隔器、完井式滑套喷砂器、Y221 型封隔器、敞口喷砂器和承托筒组成，并在封隔器中心管内设置了防砂管，从而避免了压裂施工过程中出现砂堵造成水力锚爪难以回位而导致卡堵事故。该类型封隔器是单向卡瓦支撑、转管柱下放压缩胶筒坐封、上提解封。具有结构简单、性能可靠等特点，目前进行了 111 井次的应用，成功率 89.3%，不仅实现了多层段的有效改造，而且降低了作业成本。

#### 4.2 限流压裂工艺技术

限流压裂工艺是一次施工压开多层段的压裂方法，通过限流布孔可达到多个欲处理层段实现同时处理的目的，由于限流压裂施工工艺能在一次施工过程中，在同一井口压力下压开多个薄油层，因此减少了压裂施工次数，简化了压裂施工工艺，提高了压裂经济效益。

目前共进行了 24 井次的限流压裂工艺实验，从压后的井温测试来看，射孔层段均全部压开，实现了有效改造的目的。

#### 4.3 投球压裂工艺技术

对于两个以上的射孔层段进行压裂时，压裂液先进入低地应力段。压开这一层后，把封堵球加到顶替液中，当封堵球与孔眼接触，即阻止了压裂液进入，从而在孔眼内造成压差，使得堵球严密封堵这一层的孔眼，可对第二层进行压裂。如此重复，直到把所有层段处理完毕。压后井底压力下降，堵球在孔眼内外压差作用下脱离孔眼，洗井或随自喷油气流带出地面。

目前共进行了 11 井次的压裂施工，并且从压后的井温测试验证了投球分压的两层全部压开。

#### 4.4 大斜度井的机械分压工艺技术

因受地方关系和成本影响，会越来越多地采用大斜度井作为主要的建井手段，而大斜度井的机械分压无法采用直井所用的 Y221-114+Y111-114 封隔器，因为 Y221-114 封隔器是通过旋转加压坐封、Y111-114 封隔器加压坐封，这两种封隔器在斜井中，由于油管旋转加压，很难保证作用力直接作用到封隔器的剪断销钉上，致使封隔器坐封效果很差，无法保证正常的施工。

通过广泛调研，开发研制了 Y241-114 高温、高压、大反洗排量压裂封隔器，以满足大斜度井的压裂需要。Y241-114 封隔器坐封方式采用的是液压坐封，液体的压力不会因井斜度的大小而改变受力方向的，所以坐封可靠。由水力锚、Y241 型封隔器、节流喷砂器、坐封球座、割缝筛管、安全接头等组成的分层压裂管柱及配套工具能够适用于深井任意层压裂，工艺简单，安全可靠。

2007 年共在 30°以上的斜井中应用了 6 井次，分压全部成功。

#### 4.5 不压井作业+连续油管分层压裂工艺技术

利用喷砂射孔器从连续油管内进行喷砂射孔，而后从环空进行加砂压裂，压裂结束后欠顶替形成砂塞封隔已压裂层段，上提连续油管至第二射孔段进行喷砂射孔、环空压裂、砂塞封隔，这样依次压裂多个层段，总体压裂结束后冲砂至人工井底，提出连续油管后采用不压井作业装置下入生产管柱进行排液生产。该工艺的优点是：能使每个小层都得到有效的压裂改造，从而使整口井的压裂增产效果更好；一次下管柱可以压裂多达十几个气层；不需要压

井从而减轻或避免对油气层伤害；大大缩短作业时间等。

2007年10月分别对D12-10井山1、山2和D66-4井太1、太2、盒1、盒3共2井6层采用连续油管水力喷砂射孔、环空压裂、砂塞封隔方式进行了压裂，并采用不压井作业装置下生产管柱，工艺获得成功。

## 5 压裂效果的定量评价

### 5.1 储能系数与无阻流量的关系

储能系数是储层有效厚度、孔隙度和含气饱和度的乘积，它是储层物性的综合指标。通过分析2005年、2006年盒3层的储能系数与压后无阻流量的关系，其线性关系明显。

(1) 2005年大1井区盒3层。

由于多射孔段压裂存在部分射孔段没有压开的问题，所以为研究储能系数与无阻流量的关系，选取单射孔段压裂井来分析。统计了盒3层60井次的单射孔段储能系数与压后无阻流量的关系（图1）。

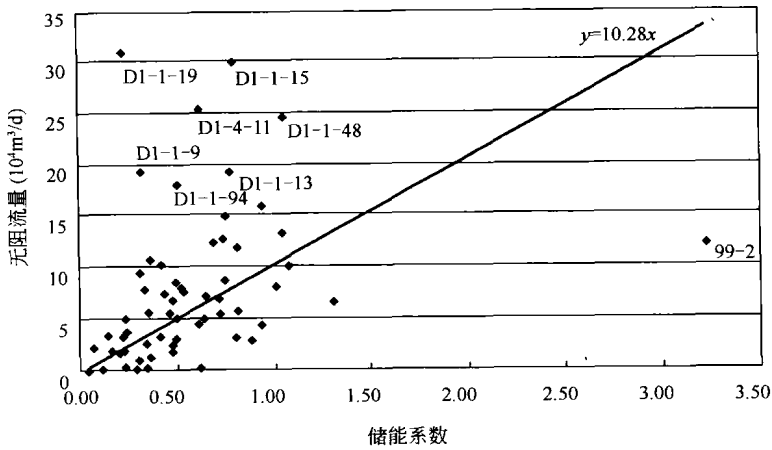


图1 盒3层单射孔段储能系数与无阻流量关系图

从图1可以看出，盒3层单射孔段储能系数与压后无阻流量成正相关关系，即储能系数越大，气井压后的无阻流量越高。

(2) 2006年盒3层。

2006年在大1井区共进行了43井次的盒3层压裂，其压裂层的储能系数与无阻流量的关系曲线见图2，成正相关关系。

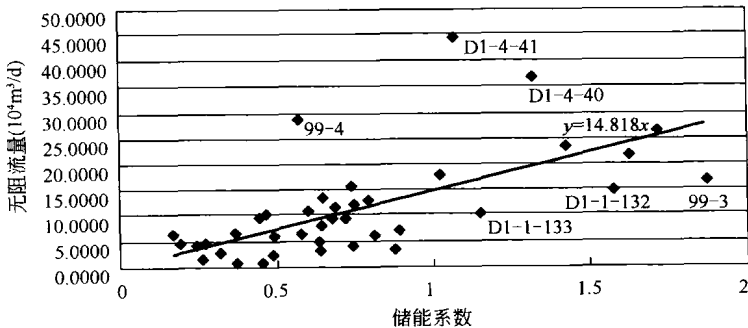


图2 2006年大1井区盒3层储能系数与无阻流量关系曲线图



## 5.2 缝长×储能系数与无阻流量的关系

压裂裂缝形成的缝长是压裂工艺的集中体现，不仅反映了压裂液的携砂和滤失性能，而且是压裂层上下隔层的应力状态、压裂施工参数等的综合结果。若不考虑储能系数则很难分析缝长与无阻流量的关系，下面引入了缝长×储能系数来研究其与压后无阻流量的关系。

这里使用的是2006年盒3层43井次的储能系数与无阻流量的统计（见图3）。从图3可以看出，线性关系非常明显。

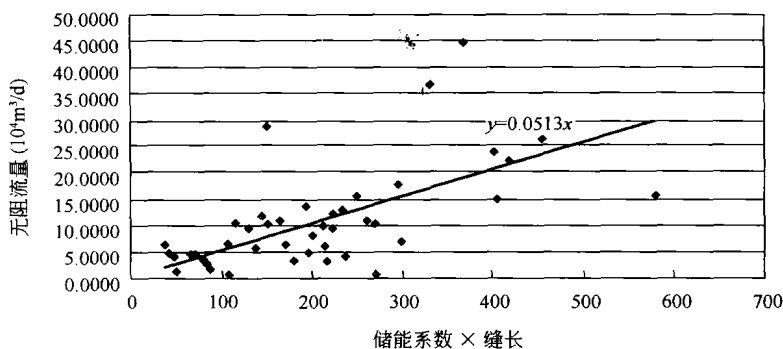


图3 2006年大1井区盒3层储能系数×缝长与无阻流量的关系

根据上述分析，我们可以用各区块的储能系数与无阻流量的线性关系来预测其通过压裂措施可获得的无阻流量，通过缝长×储能系数与无阻流量的线性关系来评价储层的综合压裂效果等，这就基本达到了定量评价压裂效果的目的。

## 5.3 压裂效果的定量对比

以大1井区盒3层、山西组与2005年压裂效果进行对比，其有关数据对比，如表6所示。

表6 大1井区盒3、山西组压裂效果对比表

时间	层位	压裂井次	总无阻流量 ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	总有效厚度 (m)	储能系数	平均每井次 无阻流量 ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	平均每米 无阻流量 ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )	平均每个储能 系数的无阻流量 ( $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )
2005年	盒3(单射孔 段压裂井)	60	471.2697	572.1	34.55	7.8545	0.8293	13.6402
	山1	49	115.9236	701.4		2.3658	0.1653	
2006年	盒3	43	469.7639	585.14	31.103	10.9247	0.8028	15.1035
	山1	28	135.5011	447.3	17.162	4.8393	0.3029	7.8954
2007年	山西组	46	247.4023		25.32	5.3783		9.7710

从表6可看出，2006年全面实施造长缝压裂技术和多层段有效改造技术后，盒3和山1层的效果好于2005年；2007年应用防垢压裂液体系、降低水锁伤害压裂液后山西组的压裂效果好于2006年。

## 6 水平井的改造工艺

### 6.1 套管水平井机械分段压裂工艺技术

DP35-1井在完钻后为解除近井堵塞于2006年1月进行了酸洗处理和液氮气举，但测试无阻流量只有 $0.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为利于采取增产措施并避免水平井眼坍塌，采用了 $4\frac{1}{2} \text{ in}$