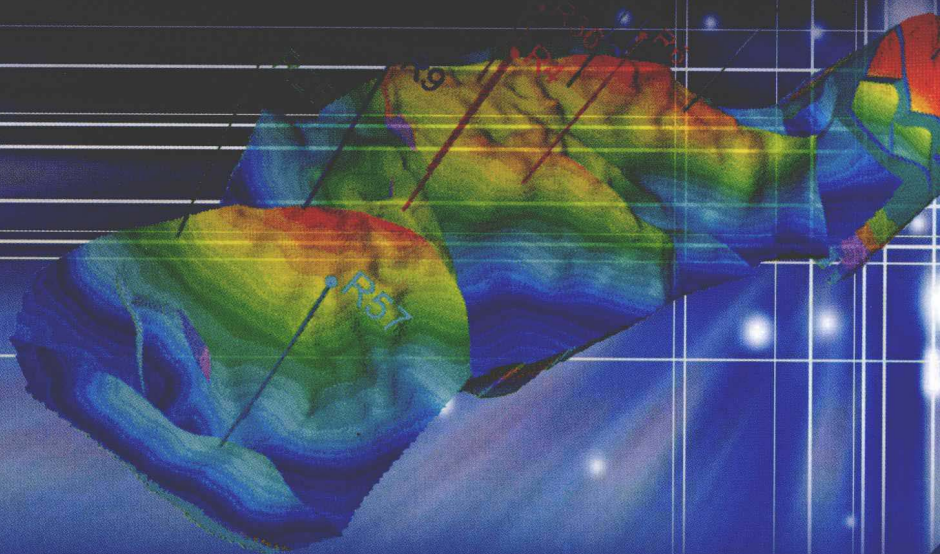




# 特殊类 油藏开发技术文集

王元基 主编



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书精选了中国石油学会石油工程专业委员会 2012 年召开的“特殊类油藏开发技术研讨会”录用的文章 81 篇,从油藏描述、数值模拟、采油技术、提高采收率、井下作业等方面,较全面反映了我国目前在特殊类油藏开发技术方面的应用水平和主要进展,对我国今后该类油藏开发具有借鉴和指导意义。

本书可供从事油田开发工作的科研人员与高等院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

特殊类油藏开发技术文集/王元基主编.

北京:石油工业出版社,2012.9

ISBN 978-7-5021-9268-6

I. 特…

II. 王…

III. 油藏-开发-文集

IV. TE34-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 209076 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)

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

---

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 31.75

字数: 800 千字 印数: 1—1800 册

---

定价: 80.00 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

# 《特殊类油藏开发技术文集》

## 编 委 会

主 编：王元基

副主编：张 勇 孙福街 胡永乐

编 委：胡海燕 罗 伟 郑洪印 唐 磊 田 冀

石成方 崔亚民 王连刚 高永荣

# 前 言

自 2000 年以来,中国石油学会石油工程专业委员会开发工作部先后举办了低渗透油藏开采技术、油田开发中后期提高注水波及体积技术及应用、不同类型油藏开发、复杂结构井开发及应用技术、井间剩余油饱和度监测技术及应用、三次采油技术、高含水油田改善开发效果、油藏地质建模与数值模拟技术、低渗透油田开发技术、高含水储层剩余油分布研究、水平井在油田开发中的应用及研究、改善水驱提高采收率技术等 12 次研讨会;2012 年,将组织召开特殊类油藏开发技术研讨会。

特殊类油藏是指超低渗(储层空气渗透率小于 1mD)砂岩稀油油藏、超稠油(油层温度下脱气油黏度大于 50000mPa·s)油藏、砾岩油藏、石灰岩油藏、火山岩油藏、变质岩油藏及高黏土含量、高矿化度等类型油藏,其年产油预计到 2015 年将达到全国总产量的十分之二。这类油藏具有极其复杂的地质构造、储层结构、油品性质,开采难度大,成本高,对开发技术要求高。为了更好地开发这类油藏,中国石油、中国石化和中国海油三家石油公司积极响应学会的号召,踊跃投稿。经专家评审,筛选出 81 篇结集出版,并从中选择出 31 篇进行会议交流。通过学术交流,必将促进特殊类油藏的技术进步与开发水平的提高,使中国的油田开发技术跻身于世界先进之列。

希望本书结集的论文对相关科技工作者和院校师生有一定的参考与借鉴作用。书中不妥之处,敬请广大学者批评指正。

# 目 录

|                                      |                          |
|--------------------------------------|--------------------------|
| 海拉尔盆地致密裂缝性储层压裂增产技术 .....             | 张玉广 韩 松 尚立涛 (1)          |
| 松辽盆地北部古龙凹陷泥岩储层压裂增产技术探讨 .....         | 张 浩 张玉广 顾明勇 唐鹏飞 范克明 (7)  |
| 贝尔油田凝灰质储层分布特征认识及压裂液的选择 .....         | 杨少英 (12)                 |
| 受井筒热效应影响的深层火山岩气井试井评价方法 .....         | 马华丽 (16)                 |
| 安塞超低渗油田利用试井曲线研究渗流规律 .....            | 张 欢 刘 梅 刘 渊 张 维 (23)     |
| 安塞特低渗透油田人工裂缝三维描述方法探讨 .....           | 王小军 王浪波 刘 梅 张洪军 (30)     |
| 马岭地区长 8 致密油藏地质特征及开发技术探讨 .....        | 李德胜 孟 浩 朱晓燕 冯春燕 (35)     |
| 鄂尔多斯盆地环县—马岭地区长 7 致密油藏描述技术浅谈 .....    | 栾 琴 孟 浩 俄丽华 刘丽娜 (40)     |
| 特低渗透裂缝油藏驱替压力系统评价 .....               | 易 红 王胜华 孟 浩 张莲忠 (48)     |
| 靖安油田五里湾长 6 油藏复合空气泡沫驱采油技术应用效果评价 ..... | 陈弓启 齐怀彦 陈 亮 沈焕文 (54)     |
| 数值模拟跟踪预测技术在低渗透油田开发管理中的应用及效果 .....    | 王小梅 陈 亮 常水涛 邹胜林 (62)     |
| 靖安油田三叠系油藏裂缝识别技术研究及应用 .....           | 康治华 李传浩 陈 亮 杨学武 (69)     |
| 胡尖山油田长 7 油藏井网适应性分析 .....             | 李龙龙 周创飞 刘 梅 陈章顺 (77)     |
| 克拉玛依油田六、七、九区石炭系储层评价研究 .....          | 彭永灿 高 阳 邱子刚 夏 兰 (82)     |
| 特低渗透砂砾岩储层应力敏感性及其对驱油效率影响 .....        | 刘红现 许长福 覃建华 阳 旭 董海海 (95) |
| 克拉玛依油田八区下乌尔禾组油藏水淹体四维描述 .....         | 覃建华 屈怀林 赵逸清 郑云凤 (101)    |
| 车排子油田车 67 井区低渗透低饱和度油藏提高采收率研究 .....   | 徐常胜 周金燕 买买提·加马力 (106)    |
| 风城超稠油双水平井 SAGD 循环预热实践 .....          | 刘 名 雷春艳 邱 敏 李 婷 (111)    |
| 风城油田重检 3 井区齐古组低阻超稠油油藏稳产技术研究 .....    | 张 宇 董鹏翔 何 强 姜 涛 (116)    |

### 重检3井区侏罗系低阻超稠油层的识别及油水分布规律研究

..... 肖芳伟 马哲斌 刘江林 张建兵 (121)

### 准噶尔盆地石西油田石炭系火山岩油藏稳油控水研究

..... 李勤良 饶政 姚鹏翔 陶嫻嫻 (127)

九8区齐古组超稠油油藏二次开发研究 ..... 杜雪彪 郑爱萍 郝超 白川 (134)

超稠油剩余油分布规律研究及采油建议 ..... 于文英 王义刚 (139)

### 蒸汽辅助重力泄油与蒸汽驱联合开发可提高油层动用程度

..... 张丽萍 王中元 姚长江 范世通 (144)

辽河油田多介质组合SAGD(SAGP)技术研究 ..... 王磊 (149)

水力喷射钻孔与蒸汽吞吐联作措施在高3624块砂砾岩油藏的试验研究 ..... 胡胜勇 (155)

杜66区块火驱采油技术研究与实践 ..... 雒红梅 (162)

聚能冲击解堵技术在曙光超稠油区块的研究与应用 ..... 黄剑华 (167)

### 哈拉哈塘油田哈7试验区缝洞型油藏精细描述技术

..... 陈利新 蔡振忠 朱永峰 王连山 郑多明 周能丰 张春磊 (170)

### 轮古碳酸盐岩油藏注气吞吐提高采收率技术研究

..... 罗慎超 江同文 周代余 杨曦 崔仕提 冯积累 (179)

### 轮古碳酸盐岩油气藏缝洞单元划分方法研究——以轮古11井区为例

..... 邓兴梁 刘俊锋 裴广平 李保华 王霞 (185)

低渗透油田控制抽油技术研究 ..... 任玉姝 (192)

扶余油田类稠油提高多周期蒸汽吞吐效果助排试验研究 ..... 邹桂华 高冰 (196)

扶余油田蒸汽吞吐油层剖面吸汽规律认识 ..... 周宇 (201)

莫里青水敏性低渗透油藏压裂技术研究与应 用 ..... 尤元菊 (207)

吉林油区致密油藏体积改造工艺及评价技术 ..... 叶勤友 (212)

### HFE拓频与AIW反演技术在滨深8井区含油砂体刻画中的应用

..... 宗杰 王东林 李付国 王文荣 (218)

### 大港低渗油田高压注水配套技术研究与实践

..... 李洪山 张宏伟 黄大云 宋艳军 翁博 杨天成 (224)

### 同心智能测调一体化分注技术在大港油田的研究与试验

..... 张宏伟 李洪山 舒畅 宋艳军 申煜亮 杜晓霞 (230)

塘沽油田非常规油藏油层改造技术探讨 ..... 程诗睿 程运甫 温晓 付大其 (234)

裂缝型生物灰岩油藏储层研究技术与应用 ..... 刘利勤 吴勇 郭永在 周丽 (239)

枣35火成岩稠油油藏开发模式的研究与实践 ..... 王学立 路永萍 吴金凤 闻宝栋 (244)

北塘次凹致密油开发技术研究 ..... 朱淑英 安振月 程远忠 褚淑敏 (248)

### 歧口凹陷北部非常规油藏特征研究及技术探讨

..... 程远忠 褚淑敏 张绍岭 张利平 (255)

周清庄油田生物碎屑灰岩储层研究 ..... 乔东生 白武厚 程琦 冯国君 (262)

## 埕海油田低孔低渗湖相复杂碳酸盐岩储层综合评价

- ..... 赵连水 常静春 郝丽萍 文得进 (270)
- 不规则裂缝基岩系统分形油藏试井分析方法及应用 ..... 徐建平 卢德唐 (276)
- 乌里雅斯太特低渗透油藏有效开发技术研究
- ..... 郭发军 孟庆春 王亚洲 鲁秀芹 王霞 闫爱华 赵玉芝 (284)
- 任丘雾迷山潜山油藏开发后期储层特征研究 ..... 崔刚 张满库 谢世健 张淑娟 (289)
- 稠油油藏泽 70 断块提高采收率研究与实践
- ..... 孙新瑞 张永 李英联 康寸引 刘波 (295)
- 普通稠油油藏赵 108 断块多轮次调驱实践
- ..... 曾锐 李静 蒋培军 李艳 刘献君 赵尚柱 (305)
- 七个泉油田特低渗难采储量开发调整研究
- ..... 陈晓冬 屈信忠 李江涛 郭宁 魏成章 (314)
- 牛东火山岩油藏地质模型刻画研究 ..... 陈昶旭 王少霞 杨志刚 辛丽珺 (319)
- 超低渗储层分子膜增注技术研究与应用 ..... 李满国 卢红杰 滕力强 李雨龙 (324)
- 火山岩测试速率法解释模型建立与方法验证 ..... 卢红杰 周波 郭建设 赵华 (329)
- XMAC 资料在火山岩压裂井地应力分析中的应用 ..... 卢红杰 郭建设 王春利 (334)
- 不同低渗级别储层的渗流规律研究
- ..... 王锦芳 侯建锋 高小翠 王萍 谢雯 赵昀 (340)
- 具有三次梯度项特征的超低渗油藏渗流模型研究 ..... 刘辉 代琤 刘扬 (345)
- 超低渗岩石非稳态法渗透率测试方法 ..... 冷振鹏 吕伟峰 严守国 李彤 (351)
- 双水平井蒸汽辅助重力泄油注汽井筒关键参数预测模型
- ..... 吴永彬 张霞林 李秀峦 蒋有伟 王红庄 (356)
- 化学强化冷采在深层低渗稠油中的研究与应用
- ..... 于田田 贺文媛 林吉生 王善堂 (367)
- 特低渗透油藏水平井多级分段压裂完井技术研究及应用
- ..... 左家强 李爱山 卢娜娜 隋文 (372)
- 乐安油田潜山油藏开发方式与效果对比评价 ..... 赵凯 (379)
- 春风油田浅薄层超稠油高效开发关键技术研究
- ..... 王金铸 王学忠 乔明全 (384)
- 潍北凹陷孔三段火成岩油藏一体化高效滚动勘探开发技术
- ..... 董冬 牛富玲 张连社 刘海庆 (392)
- 超稠油混注烟道气辅助蒸汽吞吐渗流机理数模研究
- ..... 霍刚 赵洪涛 裴春 范潇 (398)
- 特超稠油 HDCS 强化采油技术 ..... 李豪浩 毕雯雯 胥晓伟 代妮娜 (405)
- 义 104 区块砂砾岩储层改造技术研究与应用 ..... 袁浩仁 王建 (414)
- 郑 411 区块沙三 1 亚段特超稠油吞吐阶段汽窜的防治与利用 ..... 李豪浩 (418)

## 塔河油田缝洞型油藏高产油井见水风险预警评价技术

..... 罗 娟 龙喜彬 巫 波 何新明 (426)

## 塔河油田缝洞型油藏注水替油井失效特征及影响因素分析

..... 李小波 荣元帅 李新华 罗 娟 (435)

缝洞型碳酸盐岩油藏大型复合酸压改造技术研究与应用 ..... 张 烨 杨胜来 (442)

锡林好来地区利用储层预测分析白云质泥岩裂缝发育展布 ..... 王鹏宇 刘 佳 (449)

## 致密砂岩油藏多段压裂油井产能影响因素的油藏数值模拟分析

..... 赵 磊 朱黎明 施玉霞 刘峰刚 (453)

坪北长 9 储层物性断裂对低渗油气藏开发的影响 ..... 金 鑫 漆智先 (461)

## 河南油田超稠油油藏热化学辅助蒸汽吞吐技术研究

..... 李 星 张清军 关群丽 费永涛 黄 郑 (468)

地质条件多级约束下的碳酸盐岩储层建模 ..... 张宇焜 王 晖 范廷恩 刘振坤 (473)

海上碳酸盐岩油气藏开发策略 ..... 姜海梅 田 冀 张晓亮 汪珍宇 (478)

伊拉克 A 油田地质主控因素分析及对油田开发影响 ..... 罗文生 郑洪印 陈英甫 (483)

中东某碳酸盐岩油藏开发特征及开发对策 ..... 郑洪印 王继美 周守信 罗文生 (489)

重质稠油不同介质驱油效率实验研究 ..... 王继美 郑洪印 王令超 王玉龙 (494)

# 海拉尔盆地致密裂缝性储层压裂增产技术

张玉广 韩 松 尚立涛

(中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院)

**摘要:**海拉尔盆地布达特群为基底变质岩潜山储层,岩石类型多样、成分复杂、基质致密,又因构造运动和应力等影响,储层裂缝发育。压裂改造施工压力高,早期发生砂堵比例高,施工难度大。通过对以往压裂砂堵原因分析及近井裂缝复杂性的认识,研究了储层天然裂缝的空间分布规律,建立了天然裂缝空间展布三维分形仿真模型,能够有效预测天然裂缝分布(预测效率为80%)及分析对人工裂缝起裂与延伸的影响,明确了致密裂缝型储层人工裂缝延伸特征及规律,确定了压裂砂堵风险分析方法及现场施工工艺控制措施,施工成功率由73%提高到90%,效果显著。

**关键词:**压裂 裂缝性储层 天然裂缝 裂缝分布

随着海拉尔盆地布达特群裂缝性储层勘探进展,改造目的层平均深度由1650m逐步加深到3000m,施工工况条件复杂,施工成功率仅为75%,措施效果不理想,改造矛盾突出<sup>[1~7]</sup>。

深部布达特群裂缝性储层施工成功率低的原因:一是地层多期发育,形成多组构造裂缝,人工裂缝在延伸过程中与之相交,压裂液快速滤失,导致支撑剂浓缩;二是特殊的岩石结构导致产生的裂缝延伸复杂。其根本矛盾是裂缝模型缺乏预见性,因此,建立了一套适合海拉尔盆地深部布达特群裂缝性储层的三维仿真模型。在天然裂缝精细描述的基础上,通过井震资料结合<sup>[8~15]</sup>,加强天然裂缝分布的宏观认识,实现天然裂缝的微观描述;结合储层改造控制方法形成裂缝性储层压裂增产技术。

## 1 储层压裂敏感因素分析

布达特群为基底变质岩潜山储层,岩石类型多样、成分复杂,平均孔隙度为7.8%,平均渗透率仅为0.15mD,基质致密,储层裂缝发育,同时,储层厚度较大,地应力无明显差异。压裂改造施工压力高,早期发生砂堵比例高,施工难度大。为了分析砂堵原因,统计了历年来布达特群储层压裂情况,分析了岩性、闭合压力解释、差值、绝对误差、瞬时停泵、净压力、近井摩阻、最高砂浓度、闭合时间以及停泵压降等特征参数。

统计结果表明:一是布达特群储层砂堵具有规律性,与停泵压降速度、净压力、近井摩阻、闭合压力梯度等参数(图1至图4)具有敏感的相关性;二是通过深部布达特群储层砂堵规律的分析,可进一步地确认裂缝性油藏改造存在裂缝的复杂性延伸,即形成以不同角度转向或非对称、不等长的多裂缝,应该是一种共性而决非偶然;三是通过砂堵敏感性参数分析,可确定相关参数界限,为现场分析和控制提供依据。

分析施工井停泵后压降数据,砂堵井压降速率明显大于未砂堵井。对于裂缝性储层,在压后停泵的过程中,与人工裂缝相交的天然裂缝在净压力的作用下继续延伸。由于布达特群

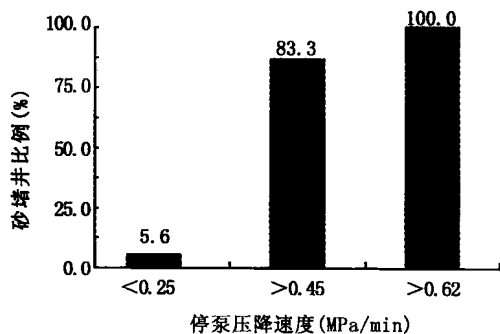


图1 砂堵与停泵压降速度的关系

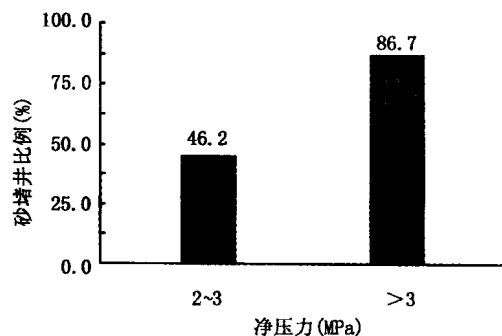


图2 砂堵与净压力的关系

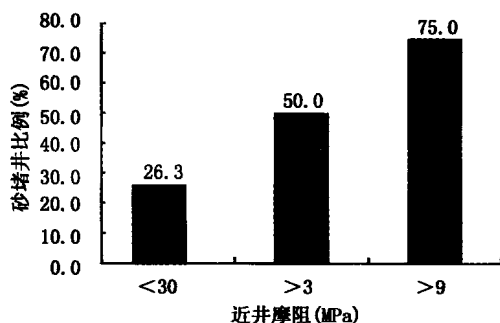


图3 砂堵与近井摩阻的关系

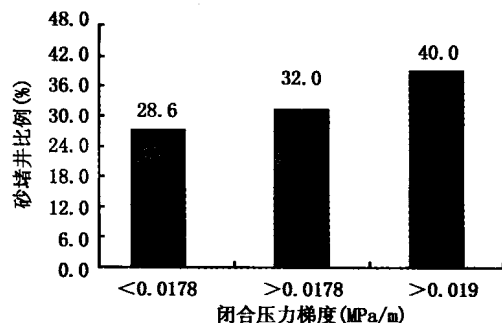


图4 砂堵与闭合压力梯度的关系

储层渗透率低，基质滤失小，因此，在停泵初期，压降速度的快慢主要反映了储层中微裂缝的发育程度。由于地层微裂缝发育，在加砂压裂过程中，压裂液滤失快，导致砂堵。砂堵井除了压降快，同时净压力高，因此，还存在人工裂缝延伸复杂情况。布达特群储层微裂缝发育，微裂缝还可能诱导产生多裂缝和裂缝弯曲等复杂的裂缝形态。由于近井产生多裂缝，多条裂缝竞争有限的缝宽空间，易产生异常高的净压力和近井摩阻。

通过对国内外相关资料调研<sup>[1~7]</sup>以及大量的实验研究，结果表明，压裂施工后近井筒存在复杂的裂缝情况，不仅裂缝扭曲、转向，而且存在多条独立但相互影响的裂缝，得出砂堵敏感性参数界限（表1）。

表1 砂堵敏感性参数界限统计表

| 净压力<br>(MPa) | 近井摩阻<br>(MPa) | 停泵压降速率<br>(MPa/min) | 停泵压力梯度<br>(MPa/m) | 天然裂缝发育条数 |
|--------------|---------------|---------------------|-------------------|----------|
| 3.0~4.6      | 4.0~4.5       | 0.4~0.6             | 0.019~0.023       | ≥3       |

## 2 天然裂缝空间分布特征

布达特潜山天然裂缝是盆地形成初期基底浅变质岩抬升、剥蚀、风化、破碎形成的风化缝，部分被充填后留下的残留裂隙，其产状杂乱，没有一定的规律性。单条裂缝规模较小，以发育微裂缝为主，单裂缝体密度高。储集空间主要为风化淋滤产生的溶蚀孔洞。裂缝最大

宽度可达10mm。裂缝宽度以小于1mm的裂缝为主，占60%以上（图5）。有效缝为中—小裂缝和部分微裂缝。风化微裂缝—溶蚀孔洞型储层的特点是单条裂缝规模较小，以发育微裂缝为主，单裂缝体密度高。

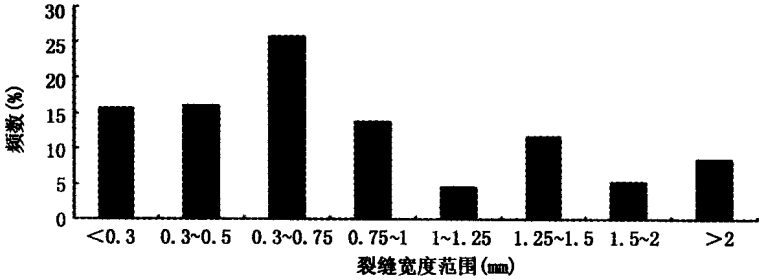


图5 裂缝宽度范围统计图

成像资料表明，裂缝走向一般在NW65°~NE85°之间，裂缝倾角一般为4°~83°，变化范围比较大。从裂缝走向分析可以看出裂缝分布走向的规律性不强，裂缝角度大小不一（图6）。

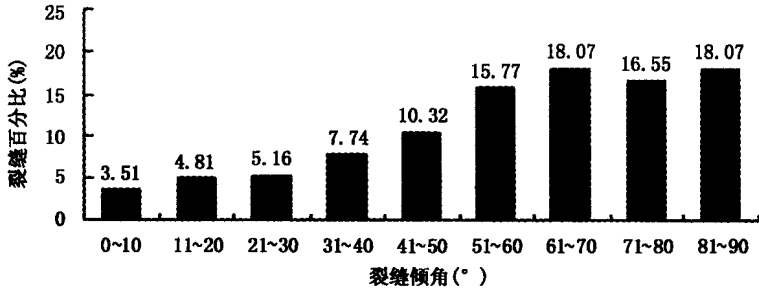


图6 裂缝倾角统计图

岩心观察和微观薄片分析发现，随着泥质、凝灰质含量的降低，钙质含量的增加，裂缝发育程度增强。在凝灰岩中，碳酸盐化使构造缝密度呈增加趋势。

### 3 裂缝性储层天然裂缝三维空间展布模型

在天然裂缝精细描述的基础上，首先通过井震资料结合，加强天然裂缝的宏观认识，实现微观裂缝的定量描述；其次通过地震资料确定天然裂缝分形参数，利用地震偏移剖面的高分辨率分形分维属性，形成天然裂缝三维空间展布储层模型。

岩石裂缝分布的分形规律，不同尺度下裂缝数量的分布规律可以用下式表示：

$$N_i = N_{0i} \delta^{-D_i}$$

式中  $N_i$ ——不同尺度下裂缝数量；  
 $N_{0i}$ ——分形图形中的元素个数；  
 $\delta$ ——测量尺度即最小正方形的网格边长；  
 $D_i$ ——信息维数。

储层中裂缝的总长度与裂缝数量成正比，因此，裂缝的长度也符合幂律关系：

$$L_i = L_{0i} \delta^{-D_i}$$

式中  $L_i$ ——不同尺度下裂缝长度;  
 $L_{0i}$ ——分形图形中的元素个数;  
 $\delta$ ——测量尺度即最小正方形的网格边长;  
 $D_i$ ——信息维数。

岩体中任意一个裂缝面的大小和位置,都可由该裂缝面的中心点位置坐标  $a(x_c, y_c, z_c)$ 、半径  $r$  和法向矢量  $n(l, m, n)$  唯一确定,且有:

$$\begin{aligned} l(x - x_c) + m(y - y_c) + n(z - z_c) &= 0 \\ (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 &\leq r^2 \\ r &= \sqrt{1/\rho \delta_k} \end{aligned}$$

式中  $r$ ——圆盘的半径,可根据圆盘的面积和矩形的面积相等的关系求出。

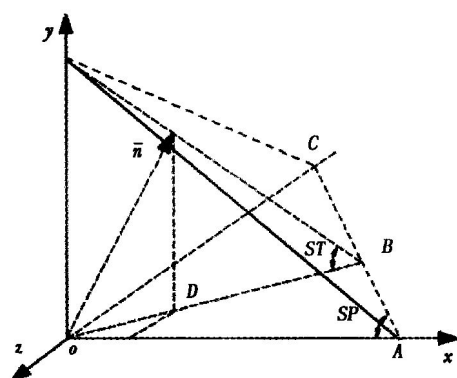


图7 倾角和方位角与法向矢量的关系  
 $\bar{n}$ —三维空间方向矢量;  $ST$ —倾角;  $SP$ —方位角

倾角和方位角与法向矢量的关系见图7。

定量描述岩心天然裂缝发育特征,构成了岩石平面裂缝条数的集合,确定岩心裂缝的分形特征参数。利用分形方法建立井筒垂向地层天然裂缝分形参数,定量描述天然裂缝垂向发育特征。以单井资料做约束,运用分形维数的计算方法,结合已有地震属性进行分析,建立天然裂缝地质仿真模型,辨析精细的层析构造,形成分形剖面。运用分形维数的计算方法,结合已有地震属性进行分析,得到分形剖面,可提高剖面的分辨率,辨析精细的层析构造,而这些精细结构通过简单的地震属性是难以获得的。

利用三维地震分形分维计算预测裂缝的空间展布,结合测井解释的裂缝,最终建立布达特群天然裂缝三维空间展布储层模型。井间的天然裂缝预测,即针对具体施工井,通过裂缝模型预测天然裂缝情况,为近井裂缝的复杂性分析及相应控制措施提供依据(图8)。

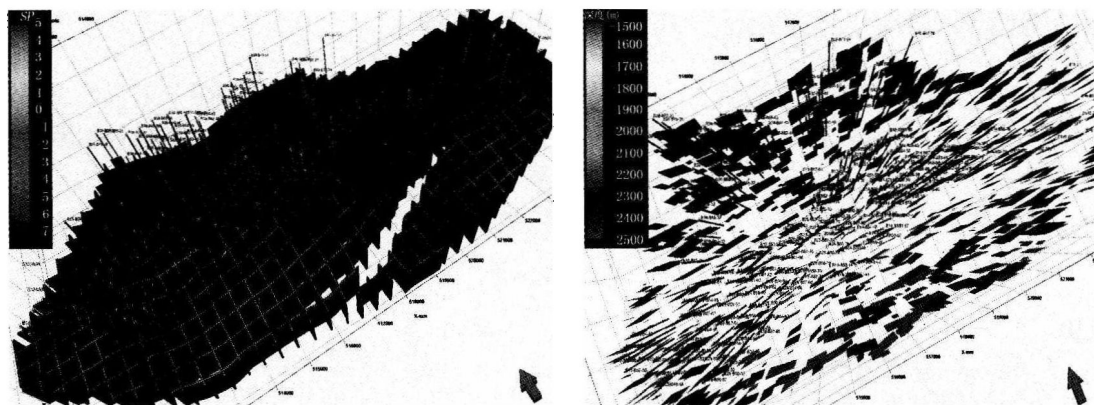


图8 布达特群天然裂缝三维空间展布储层模型

通过岩心资料、地震资料、测井资料，确定天然裂缝分形参数。研究适应的模拟方法，形成天然裂缝三维空间展布储层模型，具有三维可视化模拟输出功能。

## 4 裂缝模型预测精度检验与现场试验

通过三维地震分形分维计算预测天然裂缝，建立了储层裂缝模型，从三维模型可视化可以获得近井地带和远井地带天然裂缝的分布情况。布达特群裂缝模型预测精度检验符合率在80%以上（表2）。

利用布达特群裂缝性储层三维空间展布模型，有效判断近井地带和远井地带天然裂缝的分布，结合裂缝控制方法及改造控制措施，现场试验16口井31层，施工成功率为90.3%。

表2 布达特群裂缝建模预测精度检验表

| 序号 | 井号      | 层位    | 深度<br>(m)     | 裂缝走向<br>(°) | 裂缝倾向<br>(°) | 裂缝发育程度 |    | 分形<br>维数 | 裂缝发育<br>程度次序 | 是否<br>符合 |
|----|---------|-------|---------------|-------------|-------------|--------|----|----------|--------------|----------|
|    |         |       |               |             |             | 预测     | 实测 |          |              |          |
| 1  | BC38-1井 | B42VⅡ | 2614.0~2624.0 | 92          | 80          | 发育较差   | 一般 | 2.45     | 3            | 是        |
| 2  | BD38-2井 | B45Ⅰ  | 2592.0~2602.0 | 103         | 76          | 发育较差   | 一般 | 2.43     | 3            | 是        |
| 3  | BC12-1井 | B31Ⅲ  | 2273.0~2282.0 | 147         | 57          | 发育     | 发育 | 2.68     | 1            | 是        |
| 4  | BC19-1井 | B136Ⅰ | 2773.0~2781.0 | 100         | 67          | 发育较差   | 发育 | 2.55     | 3            | 否        |
| 5  | BC42-2井 | B7    | 2500.4~2509.0 | 101         | 68          | 较发育    | 一般 | 2.47     | 2            | 否        |
| 6  | BA40井   | B99   | 2400.0~2405.0 | 97          | 73          | 发育     | 发育 | 2.78     | 1            | 是        |
| 7  |         | B95   | 2366.0~2370.0 | 112         | 75          | 发育     | 发育 | 2.75     | 1            | 是        |
| 8  | BA42井   | B110Ⅴ | 2548.0~2555.0 | 95          | 69          | 较发育    | 发育 | 2.71     | 2            | 是        |
| 9  | BA38井   | B132  | 2550.0~2556.0 | 30~60       | 60~80       | 较发育    | 发育 | 2.77     | 2            | 是        |
| 10 |         | B127  | 2433.6~2440.0 | 85~90       | 30~50       | 较发育    | 发育 | 2.73     | 2            | 是        |

## 5 结论

(1) 确定了布达特群储层砂堵敏感性参数，为现场快速诊断及控制措施提供了重要的技术参数。

(2) 形成了天然裂缝三维地震解释及预测技术，通过井震结合，可实现天然裂缝解释与预测。

(3) 利用三维地震分形分维计算预测裂缝的空间展布，最终建立布达特群天然裂缝三维空间展布储层模型。通过裂缝模型预测天然裂缝情况，为近井裂缝的复杂性分析及相应控制措施提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] 谢朝阳, 张浩, 唐鹏飞. 海拉尔盆地复杂岩性储层压裂增产技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(5): 57-60.
- [2] 高萍, 李全. 海拉尔盆地裂缝性储集层压力曲线特征分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(3): 38-40.
- [3] 王新江, 张丽萍, 石京平. 海拉尔油田孔隙结构特征分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26

(6): 91-94.

- [4] 牛彦良, 陈友福. 海拉尔盆地贝尔凹陷变质岩潜山裂缝的表征方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25 (5): 1-3.
- [5] 冯志强, 张晓东, 任延广, 等. 海拉尔盆地油气成藏特征及分布规律 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23 (5): 16-19.
- [6] 王丽岩, 孙跃武, 乔秀云, 等. 海拉尔盆地早白垩世孢粉古气候特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27 (5): 38-42.
- [7] 牛文, 梁江平, 江涛, 等. 贝尔凹陷布达特群潜山裂缝发育特征及有力区预测 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25 (4): 21-23.
- [8] 陈征宙, 胡伏生, 方磊, 等. 岩体裂隙网络模拟技术研究 [J]. 岩土工程学报, 1998, 20 (1): 22-25.
- [9] 刘连峰, 王泳嘉. 三维节理岩体计算模型的建立 [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (1): 36-42.
- [10] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 节理岩体的损伤与分形几何的关系 [J]. 西安矿业学院学报, 1995, 15 (4): 294-296.
- [11] 马宇, 赵阳升. 岩体的裂隙分布规律及分形仿真研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 1999.
- [12] 赵阳升, 马宇, 段康康. 岩层裂缝数量分布的相关规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (2).
- [13] 毛宁波, 戴塔根, 常德双, 等. 沉积旋回的地震时频特征、地震分形特征和地震灰色特征研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38 (增刊): 134-137.
- [14] 敖西川. 多产层水力压裂裂缝延伸数学模型研究 [D]. 南充: 西南石油学院, 2004.
- [15] 杜卫平. 薄层多层压裂应力剖面与压裂裂缝形态研究 [D]. 南充: 西南石油学院, 2005.

# 松辽盆地北部古龙凹陷泥岩 储层压裂增产技术探讨

张 浩 张玉广 顾明勇 唐鹏飞 范克明  
(中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院)

**摘要:**随着勘探开发形势的不断发展,一种特殊类型的油气藏——泥岩裂缝油藏越来越引起人们的重视。大庆泥岩裂缝型储层广泛分布于古龙南地区的  $K_1n_2$ 、 $K_1qn_1$  等层位。主要发育在古龙地区青山口组,勘探面积约  $5500\text{km}^2$ ,石油资源量丰富,裂缝性油藏的勘探将是油田新增储量的重要阵地和下一步勘探的重点目标。泥岩裂隙是一种特殊的裂缝性油气藏,由于这类裂隙储层的孔隙度很小,岩石物性参数变化不灵敏,并表现出很强的各向异性,勘探难度很大。通过调研巴肯(Bakken)页岩储层和鹰滩(Eagle Ford)页岩储层,对比储层深度、有效厚度、孔渗条件、汽油比、储层压力系数、原油黏度等物性条件,可知大庆泥岩储层具有特殊性,需在借鉴国外先进技术的同时,开展适应大庆泥岩储层的压裂增产技术。通过开展常规水基压裂液技术、高能气体压裂、清水压裂技术及纤维动态转向压裂技术现场试验,明确该类储层压裂的关键技术,探讨了压裂增产技术的可行性。

**关键词:**松辽盆地 古龙凹陷 泥岩储层 裂缝性油藏 增产技术

大庆泥岩储层广泛分布于古龙南地区的  $K_1n_2$ 、 $K_1n_1$  等层位。区域构造是东倾斜坡,在斜坡背景,发育了哈拉海断裂带和众多断层。青山口组为半深湖—深湖相沉积,为一大套黑色泥岩,夹薄层砂岩及介形虫层等,受沉积压实和断裂诸多因素的影响,局部发育天然裂缝。本文通过与国外页岩油储层及流体特征对比,在国外借鉴增产技术的基础上开展了常规水基压裂、高能气体压裂、清水压裂技术及纤维动态转向压裂技术现场试验,明确了大庆页岩油储层增产改造技术方向。

## 1 古龙凹陷页岩油储层地质特征

古龙地区青山口组地层厚度为  $300 \sim 600\text{m}$ ,主体部位黑色泥岩厚度为  $450 \sim 550\text{m}$ ,泥岩埋藏深、厚度大,有机质丰度高,成熟度高,为泥岩裂缝油藏提供充足的油源。由于成岩作用及构造运动的作用,产生大量裂缝,是形成该区泥岩裂缝油藏的有利条件。裂缝按其成因条件可分为三大类。第一类为异常高压裂缝,古龙地区青山口组泥岩普遍超压,当压力大于泥岩破裂压力时,产生了裂缝;第二类为构造裂缝,由于断裂及构造运动的影响,岩石受到各个方向的应力作用,产生断裂缝,即在拉张、挤压、剪切等构造应力作用下形成的裂缝;第三类为天然沉积、成岩及重力作用产生重力滑动裂缝、天然沉积裂缝(泥裂),以及在成岩过程中,黏土矿物发生脱水转化,颗粒缩小,因为黏土矿物颗粒为层状,脱水后颗粒间距增大,形成极微小的裂缝。

取心可见裂缝含油,电镜扫描可清楚地看到微裂缝,裂缝长短不等,长度几微米到几百微米,宽度为  $2 \sim 10\mu\text{m}$ ,裂缝为主要的储油空间,但裂缝间连通性差。而基质孔隙度一般

为2%~3%，渗透率小于0.05mD，压汞分析表明，大多数孔隙在2000atm时也是不能流动的。为此，压裂增产改造面临的主要对象是含油裂缝，沟通大量天然裂缝，最优化改造裂缝波体积是压裂增产改造技术突破关键。

## 2 国外页岩油储层特征

Bakken 油田在美国境内包括 Elm Coulee、Mondak、Ross、Stanley、Sanish、Parshall 等区块。Bakken 页岩主力产层为两套生油岩之间的灰质页岩，天然裂缝发育，储层为超压地层。储藏深度为2400~3150m，储层孔隙度为5%~12%，渗透率为0.01~0.5mD。Eagle Ford 页岩是一种黑色钙质页岩，有机碳含量高，储藏深度为1200~4300m，储层孔隙度为5%~14%，渗透率为0.001~0.002mD。由于储层天然裂缝发育具有较好的脆性特征，为此以形成网状裂缝为目的，采用滑溜水混合压裂改造。

滑溜水混合压裂沟通天然裂缝强，对于裂缝型储层易形成网状缝，裂缝导流能力较常规凝胶压裂低，古龙凹陷泥页岩与国外页岩储层特征对比表明（表1），Bakken 页岩、Eagle Ford 页岩储层存在以下优势：①储层压力高；②原油黏度低；③油气比高。为此，储层对压裂裂缝导流能力要求相低，适合滑溜水混和压裂。而大庆古龙凹陷页岩油储层压力低，原油油气比为62.6，相对较低，原油黏度较 Bakken 页岩、Eagle Ford 页岩高，为此压裂改造需要较高的导流裂缝才能达到较好的效果。

表1 古龙凹陷泥页岩与国外页岩储层特征对比

| 项目                       | Bakken 页岩         | Eagle Ford 页岩 | 古龙凹陷泥页岩        |
|--------------------------|-------------------|---------------|----------------|
| 主要产层                     | 有机质页岩<br>(天然裂缝发育) | 黑色钙质页岩（脆性岩石）  | 硅质、泥质和钙质页岩的薄互层 |
| 储层深度（m）                  | 2100~3050         | 1200~4300     | 1955.52~2083   |
| 有效厚度（m）                  | 5~50              | 15~100        | —              |
| 储层温度（℃）                  | 118               | 40~175        | 100            |
| 孔隙度（%）                   | 5~12              | 5~14          | 1.1~9.9        |
| 渗透率（mD）                  | 0.01~0.5          | 0.001~0.002   | 0.01           |
| 油气比                      | 89~249.2          | 240           | 62.6           |
| 储层原始压力（MPa）              | 35~56             | —             | 24.316         |
| 储层压力系数                   | 1.6               | 1.4~1.7       | 1.19           |
| 地层原油黏度（mPa·s）            | 0.15~0.45         | —             | 1.9            |
| 原油密度（g/cm <sup>3</sup> ） | —                 | 0.76~0.8      | 0.738          |
| 压裂工艺                     | 滑溜水混合压裂           | 滑溜水混合压裂       | 纤维转向压裂         |

## 3 大庆古龙凹陷页岩油储层以往压裂改造试验

以往大庆油田分别开展了常规水基凝胶压裂、高能气体压裂、滑溜水压裂，但增产改造效果差。

HA16井22号层、23号层采用常规水基凝胶压裂，压后日产油0.334t。主要原因在于常规水基凝胶压裂主要形成较为单一的高导流主裂缝，沟通天然裂缝能力差，改造体积受到限制，导致供给体积小，增产效果差。

G535 井 34 层、A6 井 34 层采用了高能气体压裂，其目的在于通过改造形成网状缝，沟通含油天然裂缝，达到增产目的，G535 井 34 层压后日产油 0.26t，A6 井 34 层压后日产油 0.36t，日产气 1253m<sup>3</sup>，增产效果较差。其原因在于，虽然高能气体压裂排除了外来流体造成的储层伤害因素，能够形成网状缝，沟通天然裂缝，但改造范围小，仅限于近井地带，同时裂缝无支撑剂支撑，导流能力低，而大庆原油黏度较高，油气比低，为此不利于增产。

在开展常规水基压裂、高能气体压裂试验后，结合国外页岩储层增产改造经验，采用了滑溜水压裂改造，沟通天然裂缝，达到形成网状体积裂缝的目的。选取 G651 井 G21 层开展试验，解释井段为 2012.0 ~ 2050.0m，厚 38.0m，岩性为黑色泥岩，测井解释为泥岩裂缝油层，录井解释为油气同层，综合解释为油气层。压前开展小型测试压裂，其 G 函数叠加导函数形态（图 1）显示形成多缝系统，主压裂施工排量为 4.2 ~ 4.45m<sup>3</sup>/min（施工曲线见图 2），采用段塞式加砂加入覆膜降阻支撑剂 10.5m<sup>3</sup>，合计注入滑溜水 859m<sup>3</sup>。压后最终返排率为 72.6%，压后日产油 0.027t，增产效果差。

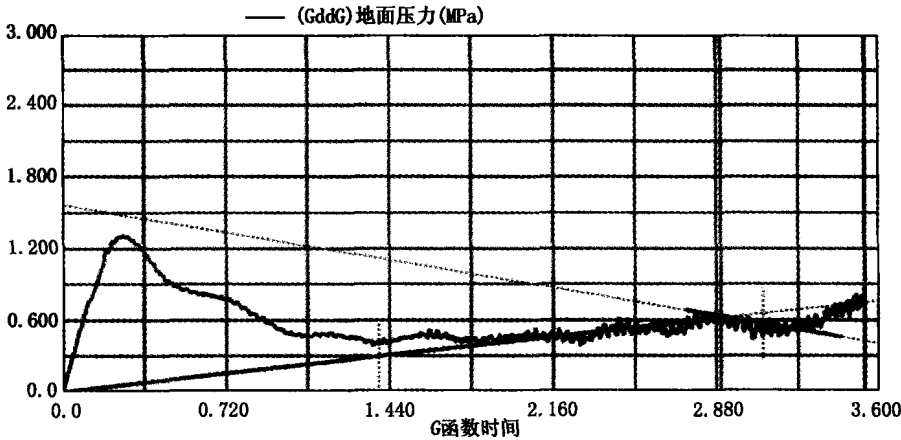


图 1 G651 井 G 函数叠加导函数曲线

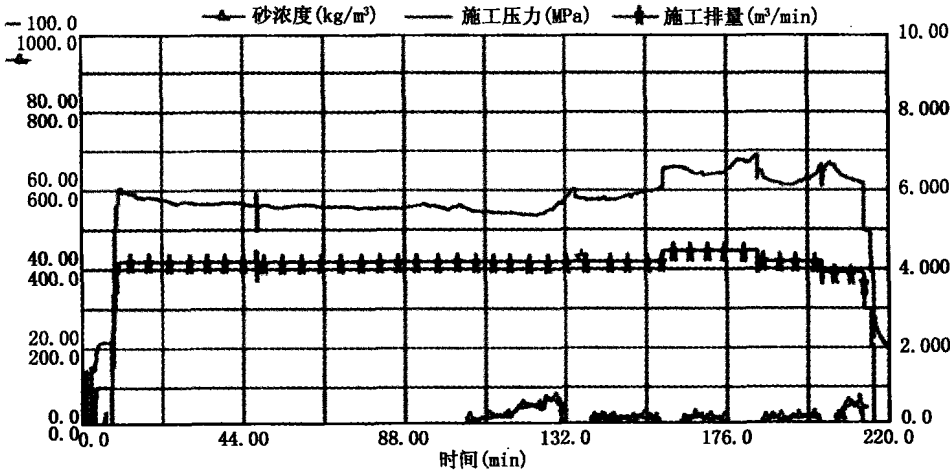


图 2 G651 井主压裂施工曲线

分析认为：滑溜水压裂能够沟通天然裂缝，但携砂能力弱，受支撑剂嵌入的影响，导致部分裂缝闭合，不能形成具有一定导流能力的裂缝通道，导致系统连通性差。