doi:10.11911/syztjs.2023113

**引用格式：** 彭芬, 张宝, 杨鹏程, 等. 库车山前超深巨厚致密砂岩纵向细分层改造技术 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 187-193.
PENG Fen, ZHANG Bao, YANG Pengcheng, et al. Vertical subdivision layer stimulation technology for ultra-deep and super-thick tight sandstone in Kuqa Piedmont [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 187-193.

# 库车山前超深巨厚致密砂岩纵向细分层改造技术

彭 芬[1]， 张 宝[1]， 杨鹏程[2]， 薛浩楠[2]， 彭建新[1]， 盛志民[2]

（1. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆库尔勒 841000; 2. 中国石油集团西部钻探工程有限公司井下作业公司, 新疆克拉玛依 834000）

**摘 要：** 塔里木油田库车山前白垩系储层为超深巨厚裂缝性致密砂岩储层，天然裂缝发育，非均质性强，已改造井产气剖面测试显示常规笼统改造纵向厚储层动用不充分，产能释放不彻底。为了解决这一问题，对于油层厚度大且中间有明显隔层的井可实施分层压裂，提高纵向改造程度。通过工程地质一体化研究，利用多种测井数据，建立了一套多尺度近远井裂缝精细识别方法；基于钻井漏失量与产量关系认识，建立了一套综合考虑构造位置、钻井井漏、裂缝发育情况、力学活动性等资料的储层评估分类方法；通过双封隔器管柱力学精细校核，增加伸缩管，优化暂堵材料粒径，形成了“机械+暂堵”软硬分层压裂技术。该技术实现了巨厚储层高效动用，应用 20 口井，改造后单井产气量由 $6.7\times10^4$ $m^3/d$ 提高至 $34.0\times10^4$ $m^3/d$，平均增产 4 倍，提产效果显著，为巨厚致密砂岩储层高效开发提供了技术支撑。

**关键词：** 库车山前；超深厚储层；致密砂岩；复合分层；精细改造

**中图分类号：** TE357.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 1001–0890(2024)02–0187–07

# Vertical Subdivision Layer Stimulation Technology for Ultra-Deep and Super-Thick Tight Sandstone in Kuqa Piedmont

**PENG Fen[1], ZHANG Bao[1], YANG Pengcheng[2], XUE Haonan[2], PENG Jianxin[1], SHENG Zhimin[2]**

(1. *Oil and Gas Engineering Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang,* 841000*, China*; 2. *Downhole Operation Company, CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Karamay, Xinjiang,* 834000*, China*)

**Abstract:** The Cretaceous system in Kuqa Piedmont of Tarim Oilfield is a super-deep and super-thick fractured tight sandstone with developed natural fractures and strong heterogeneity. The gas production profile test of stimulated wells shows that the conventional general stimulation of vertical thick reservoirs is not sufficient, and the production capacity is not completely released. In order to solve these problems, layered fracturing technology can be implemented for wells with large reservoir thicknesses and obvious interlayers, which can also enhance the performance of vertical stimulation. A set of fine identification methods for multi-scale fractures of near and far wells was established by using multi-logging data through engineering and geology integration research. Based on the relationship between lost circulation and production, a set of reservoir evaluation classification methods was established, which comprehensively considered the structural location, lost circulation in drilling, fracture development, mechanical activity, and other data. Through fine mechanical checking of double packer pipe string, expansion pipe was added, and the grain size of temporary plugging material was optimized, forming a soft and hard layered fracturing technology featuring “mechanical + temporary plugging”, thus realizing the highly efficient production of the super-thick reservoir. The technology was applied to 20 wells, and the production of a single well was increased from $6.7\times10^4$ $m^3/d$ to $34.0\times10^4$ $m^3/d$ after stimulation, with the production remarkably increasing by four times on average. The technology provides strong technical support for the efficient development of super-thick tight sandstone reservoirs.

**Key words:** Kuqa Piedmont; ultra-deep and super-thick reservoir; tight sandstone; composite layering; fine stimulation

**收稿日期：** 2023-02-23；**改回日期：** 2024-01-12。

**作者简介：** 彭芬（1988—），女，湖南湘阴人，2010 年毕业于长江大学勘查技术与工程专业，2013 年获中国石油大学（北京）油气井工程专业硕士学位，高级工程师，主要从事储层改造方面的研究工作。E-mail: 13619956582@163.com。

塔里木油田库车山前白垩系储层为高压高温超深裂缝性致密砂岩储层，具有基质低孔（5%～7%）、低渗（0.01～0.10 mD）、天然裂缝发育（0.5～3.0 条/m）、储层厚度大（150～300 m）及地层压力系数高（1.60～1.90）等特征[1–4]。研究区储层裂缝整体发育，纵向跨度大（120～300 m），层内和层间非均质性强，全面动用有效储层难度大。前期应用缝网压裂技术改造后发现，部分改造井存在局部供气特征，因此亟需升级储层改造工艺，彻底释放产能。

对于巨厚且多薄层集中分布或地质条件复杂的储层，分层改造是实现其纵向高效动用的有力手段。国内多个区块已开展过相关研究，如为了提高单井产量，延长稳产期，长庆、云南保山等砂岩气藏利用纵向分层压裂技术，在降低开发成本的同时均提高了气藏产能[5–6]。库车山前的前期实践表明，超深高温高压储层受 ϕ127.0 mm 或 ϕ139.7 mm 完井井身结构的限制，采用机械分层仅能分 2 级，无法满足巨厚储层改造需求，且施工压力和风险高，施工后钢球返排困难，改造后无法供液；若采用暂堵转向分层改造工艺，层间应力差过大（大于 6 MPa）或过小（小于 3 MPa），均会使暂堵分层改造效果不理想。同时，目前储层纵向分层不合理、横向近远井裂缝发育情况认识不清，导致分层改造工艺不精细，库车山前部分单井改造后单井产量没有达到配产需求。针对这些问题，笔者提出一种针对超深厚储层的“机械+暂堵”纵向细分层改造技术：首先，基于工程地质一体化研究，建立了一套多尺度近远井储层裂缝精细识别方法；然后，通过分层压裂工具研发和工艺优化，根据单层单策的设计原则，优化每层的改造液体规模，最终实现了库车山前厚储层高效动用。

## 1　超深厚储层精细评估方法

库车前陆盆地储层具有埋藏深（6 000～8 098 m）、地层压力高（105～136 MPa）、温度高（150～188 ℃）、地应力高（最小水平主应力 90～130 MPa）、施工泵压高（一般超过 100 MPa）等特点。主力储层为白垩系巴什基奇克组，储层纵向跨度达 120～300 m，纵向应力差较大（个别储层大于 20 MPa），层间非均质性较强，储层改造难以实现均匀改造。储层天然裂缝发育程度不一，对改造效果影响大[7]。

由于纵向上各储层间存在地应力差异、矿物成分复杂、薄层漏失大、部分层缺失、物性差异、压裂改造程度差异等原因，若采用多层合压的方式，会使一些薄层难以压开或压开程度有限，导致增产幅度小，而高渗厚层却因压裂液和支撑剂进入的量大，实际缝长远大于设计缝长，压裂后含水量增大[8]。

为了缓解这一矛盾，对于储层厚度大且中间有明显隔层的井可实施分层压裂工艺，分层治理。具体思路为：1）借助测井成像、远探测声波和地震技术解释不同距离裂缝发育情况，用于指导储层裂缝精细预测；基于钻井漏失量与产量关系认识，结合储层裂缝发育情况，建立储层评估分类图版，将储层进行分类，指导后续精细改造作业；2）为实现超深厚储层的精细改造，降低超深井下入多封隔器导致的安全风险，设计机械硬分层+暂堵软分层的复合分层精细改造工艺；3）为确保新工艺顺利实施，优化分层压裂完井管柱和暂堵材料。

### 1.1　中远井区储层裂缝精细预测

库车山前勘探实践表明，白垩系储层天然裂缝是影响产量的主控因素，对储层裂缝的识别主要通过成像测井资料，局限在于虽能认识近“井壁”天然裂缝，但对远井裂缝发育情况认识不清楚。储层改造不仅要充分激活近井储层天然裂缝，同时需要沟通远井处优质裂缝带[9–11]。为了识别远井地带天然裂缝，更加明确和优化分层改造目标，引入地震建模和远探测等测井数据，建立了一套中、远井区储层裂缝精细预测方法。为完成储层裂缝精细评估，在原有成像测井和漏失等为主的近井储层评估的基础上，引入远探测声波测井和地质力学建模等手段[12–15]，可实现近井（0～3 m）、中远井（3～30 m）、远井（30～300 m）区储层裂缝的精准预测（见图 1），指导射孔井段和定量化改造工艺设计，为横向裂缝集中改造、纵向科学分段提供依据，全方位沟通井周优质裂缝系统，动用储层。

### 1.2　压裂前储层分类评估

库车前陆区天然裂缝发育，对天然裂缝一般通过成像测井和岩心观察和钻井过程中不同程度的漏失认识[16–17]。井漏是从工程角度认识储层，库车山前迪那、大北、克深等气藏统计结果表明，漏失量越大，漏速越高，单井产量越高[18]，因此，笔者采用钻井液完井液等的漏失量表征天然裂缝有效性（开度）。根据克深气藏改造井的地质特征，选用 Huang Jinsong 等人[19] 的视开度计算方法，计算克深气藏漏失井的裂缝视开度在 0.2～1.0 mm，而 FMI 成像解释的克深 2 气藏裂缝的开度峰值为 0.06 mm，克深 8 气藏裂缝的开度峰值为 0.2 mm，视开度计算结果与解

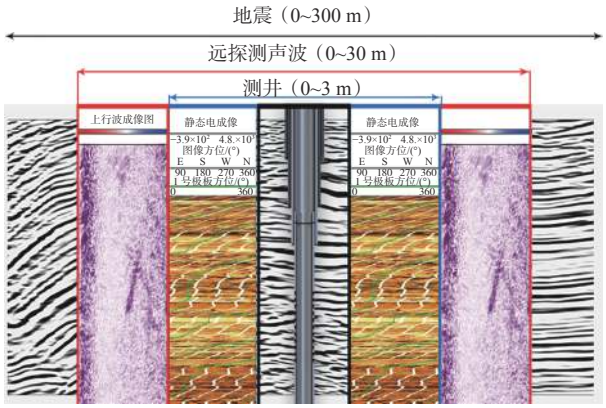



图 1　测井成像、远探声波、地震技术解释不同距离裂缝示意

Fig.1　Interpretation of fractures with different distances by logging imaging, remote sonic wave, and seismic techniques

释结果基本一致（如图 2 所示），裂缝视开度计算结果与改造后无阻流量成正比，和漏失量与无阻流量成正比[20–21]。

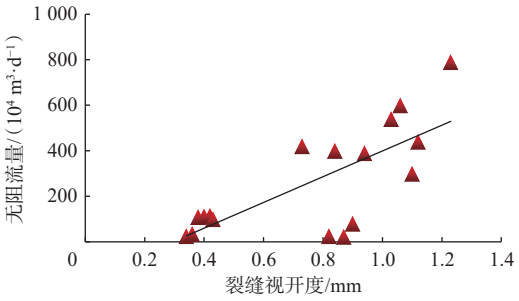



图 2　克深 2 和克深 8 气藏裂缝视开度与无阻流量的关系

Fig.2　Relationship between apparent fracture opening and unimpeded flow for Keshen 2 and Keshen 8 reservoirs

基于对钻井漏失量与产量关系的认识，综合考虑构造位置、钻井井漏（漏点数量、漏点分布、漏失量）、裂缝发育情况、力学活动性等资料，建立了地质工程一体化的储层评估分类方法，将储层划分为 3 类（见表 1）。

表 1　库车山前气藏白垩系巴什基奇克组储层评估分类

Table 1　Reservoir evaluation classification of Cretaceous Bashijiqike Formation in gas reservoir in Kuqa Piedmont

| 储层分类 | 井的位置 | 岩心裂缝特征 | 成像解释（SLB成像数据） | 井漏 | 代表井/区 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ类储层 | 构造高部位 | 裂缝以半充填或未充填为主，裂缝开度大 | 裂缝密度>0.4条/m，应力–裂缝夹角<30° | 漏失量400～1 200 $m^3$，漏点5～15个，且纵向均匀分布 | 克深8区块，B132井，博孜3井 |
| Ⅱ类储层 | 构造高部位 | 裂缝以半充填或未充填为主，裂缝开度大 | 裂缝密度>0.3条/m，应力–裂缝夹角<30° | 漏失量30～400 $m^3$；漏点3～5个，且纵向均匀分布 | B241井，C104井 |
| Ⅲ类储层 | 构造较低部位 | 裂缝不发育或少量的张剪缝，裂缝尺度小，充填性好 | 裂缝密度<0.3条/m，应力–裂缝夹角>30° | 漏失量0～30 $m^3$，单个漏点或无漏失 | B605井，C506井 |

## 2　巨厚储层软硬复合分层工艺

为实现巨厚储层全面改造，降低在超深井下入多封隔器的安全风险，进一步提高单井产能，提出了“机械硬分层+暂堵软分层”的复合分层精细改造工艺，在常规改造工艺基础上形成了多封隔器管柱配置，用可溶球代替钢球，优选不规则多级暂堵颗粒代替以往的球形规则暂堵颗粒，降低多封隔器下入安全风险，使厚储层改造更加彻底，大幅提高储层泄流面积，助力提产提效。

### 2.1　多封隔器分层压裂完井管柱配置工艺

2010—2013 年，库车山前进行过多次多封隔器分层压裂试验，提产效果比笼统压裂好，但试油改造作业风险大，如 X-1 井改造期间封隔器心轴拉断，X-2 井压裂用钢球未全部返出。为了解原因，对 X-1 井拉断封隔器心轴进行了深入分析，认为需要考虑环空内外压力和温度改变引起的环空体积变化。模拟了改造期间双封隔器之间环空压力及封隔器受到载荷的变化情况，结果表明，改造过程中封隔器间环空压力变化幅度非常大（见图 3）；封隔器受到的载荷呈先急剧上升、后缓慢下降趋势，导致封隔器受载恶化，封隔器受到的载荷超出了信封曲线，导致双封隔器在作业中失效。

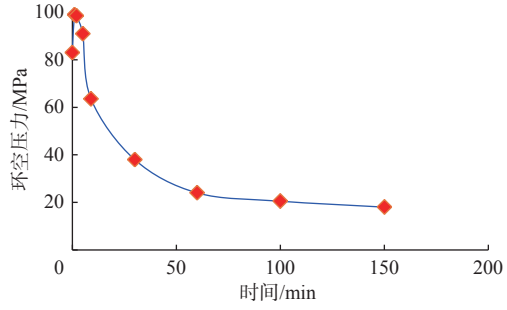



图 3　改造期间双封隔器之间环空压力随时间的变化

Fig.3　Changes in annular pressure between double packers during transformation with time

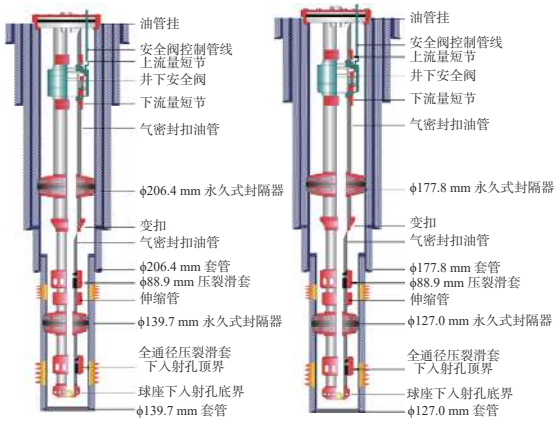
为避免封隔器因轴向载荷过大而失效，研究后提出，在双封隔器之间加装弹性伸缩短节，以减缓管柱轴向载荷冲击，避免封隔器失效：可通过控制伸缩短节销钉的数量来确保伸缩短节在压裂作业前处于闭合状态，而在压裂作业时，确保伸缩短节处于拉开状态，避免压裂时封隔器之间轴向力过大，造成封隔器失效。同时，采用一个球座投一个钢球的方法，可以确保坐封多个封隔器，避免了不同尺寸不同型号封隔器需要单个坐封的情况。封隔器具体参数见表 2。

**表 2　库车山前储层分层压裂常用封隔器技术参数**

**Table 2　Technical parameters of commonly used packers for layered fracturing in reservoir in Kuqa Piedmont**

| 生产套管组合 | 完井封隔器组合 | 封隔器内径/mm | 坐封压力/MPa | | | 球座打开压力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 最小 | 最大 | 设计 | |
| ϕ206.4 mm套管+ϕ139.7 mm套管（悬挂） | ϕ206.4 mm永久式封隔器 | 73.66 | 19.995 | 68.948 | 48.000 | 53.32 |
| | ϕ139.7 mm永久式封隔器 | 58.62 | 31.233 | 59.226 | 48.000 | |
| ϕ177.8 mm套管+ϕ127.0 mm套管（悬挂） | ϕ177.8 mm永久式封隔器 | 73.25 | 27.410 | 59.590 | 38.000 | 43.63 |
| | ϕ127.0 mm永久式封隔器 | 48.51 | 26.200 | 59.295 | 38.000 | |

通过优化配置，形成 2 套多封隔器分层压裂完井管柱，能够增大管柱通径，保障试油压裂作业中管柱的安全。一套是 ϕ206.4 mm+ϕ139.7 mm 复合套管井：油管挂+气密封扣油管+上提升短节+上流量短节+安全阀+下流量短节+下提升短节+气密封扣油管+ϕ206.4 mm 永久式封隔器+气密封扣油管+伸缩管+ϕ88.9 mm 压裂滑套+ϕ139.7 mm 永久式封隔器+全通径压裂滑套+气密封扣油管+球座。另一套是 ϕ177.8 mm+ϕ127.0 mm 复合套管井：油管挂+气密封扣油管+上提升短节+上流量短节+安全阀+下流量短节+下提升短节+气密封扣油管+ϕ177.8 mm 永久式封隔器+气密封扣油管+伸缩管+ϕ88.9 mm 压裂滑套+ϕ127.0 mm 永久式封隔器+全通径压裂滑套+气密封扣油管+球座。2 套多封隔分层压裂完井管柱的结构如图 4 所示，相关技术参数见表 2。




（a）ϕ206.4 mm+ϕ139.7 mm 复合套管井　（b）ϕ177.8 mm+ϕ127.0 mm 复合套管井

**图 4　库车山前多封隔分层压裂完井管柱**

**Fig.4　Completion pipe string of multiple packers for layered fracturing in Kuqa Piedmont**

## 2.2　多封隔器管柱压裂滑套投球工艺

为解决分层压裂滑套的钢球返排难度大的问题，提出采用可溶球代替钢球，分层压裂施工作业后球自动溶解，不需要返排。可溶球表面涂有特殊保护膜材料（厚度为 0.05 mm 的 Zr 和 Ce），可以保证可溶球在压裂施工过程中不溶解；施工完成后，保护膜缓慢溶解完后本体才与溶液接触溶解，而本体材料的溶解速度比保护膜快，可以快速溶解。

图 5 为塔里木油田研发的可溶球在 70 ℃、1.2% KCl 溶液中的溶解情况。从图 5 可以看出，经过 22 h 的溶解，可溶球外径由 63.0 mm 减小至 51.0 mm，48 h 后减小至 32.0 mm，72 h 后全部溶解，说明可溶球具有良好的可溶解性能。这既保证了分层压裂时滑套的精细开关控制，又可以省去压裂后钢球返排的步骤，极大地提高了施工效率。

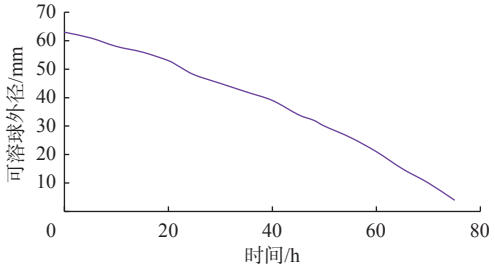



**图 5　可溶球在 70 ℃、1.2% KCl 溶液中的溶解情况**

**Fig.5　Solubility of soluble spheres in 1.2% KCl solution at 70 ℃**

## 2.3　软分层暂堵材料优化

现阶段分层施工条件下，库车山前储层埋深小于 7 000 m 的井能优化完井管柱配置，下入双封隔

器，实现机械 2 分层；但对于埋深大于 7 000 m 的井，双封隔器下入困难，不能实现厚储层动用。因此，提出采用不同粒径的暂堵颗粒进行架桥暂堵，进行层间转向提高分层效果，暂堵颗粒在施工完成后一定时间内自动降解，不会对地层产生伤害，从而提高储层改造程度，提高产能[22-23]。改造施工过程中的转向压力和漏失速度如图 6 所示，转向压力越高，暂堵效果越好，漏失速度越高，地层渗透性越好，暂堵效果和地层渗透性基本呈负相关。

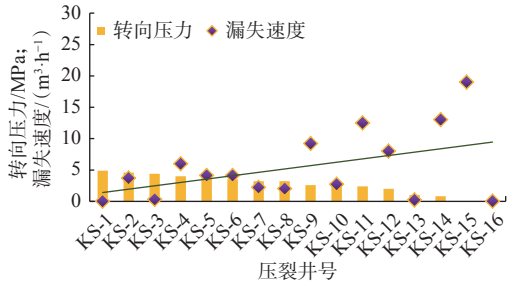



图 6　压裂井的转向压力与漏失速度

**Fig.6　The turning pressure and leakage rate of fractured wells**

沉积学研究认为，砂岩分选性越好，圆度越高，渗透性越好。为增大颗粒间接触面积，降低渗透性，用不规则块状颗粒架桥；同时，根据炮眼直径（8.0 mm），考虑颗粒在高压流体下变形的因素，增大粒径范围至 10.0 mm，进一步降低渗透空间，建立更好的低渗带。恒定压差 15 MPa 下暂堵剂的承压效果如图 7 所示，可以看出，该条件下暂堵剂承压效果无降低趋势，完全满足现场施工要求。

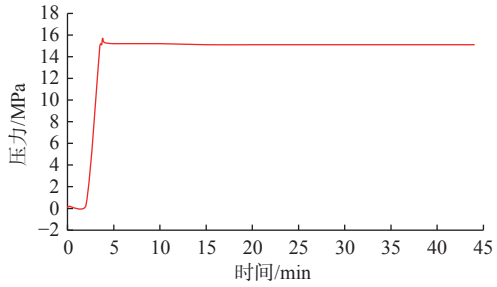



图 7　暂堵剂承压试验结果（15 MPa）

**Fig.7　Pressure bearing test results of temporary plugging agent（15 MPa）**

## 3　现场应用

克深 E 井是库车山前一口探井，其目的层上方发育 2～3 套断层，采用大斜度井避开断层，应用储层精细评估方法，考虑钻井漏失、测井、裂缝发育等方面，综合评价储层为Ⅲ类储层。改造 6 805～7 020 m 井段（斜厚 215.0 m/垂厚 96.6 m），结合数值模拟结果和管柱配置需求，采用 ϕ177.8 mm+ϕ127.0 mm 永久式组合封隔器硬分层、暂堵软分层和可溶球等配套工艺，分 4 层依次改造，液体总规模 2 600 $m^3$，加砂量 170 $m^3$，排量 5～6 $m^3$/min。GOHFER 软件压裂模拟结果显示，水力裂缝高度达 90 m，纵向上错落布置，覆盖优质储层，实现储层高比例动用（见图 8）。

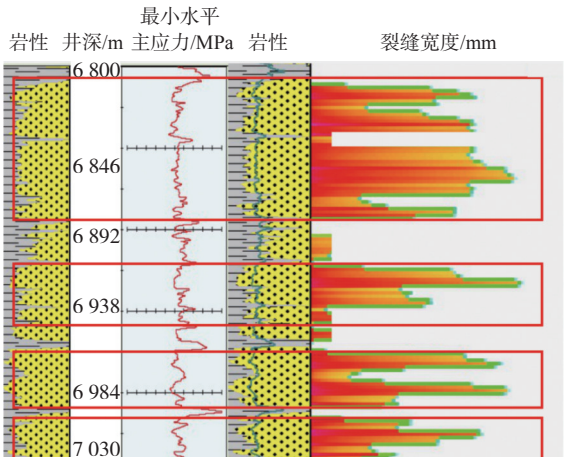



图 8　克深 E 井软硬分层压裂裂缝参数模拟结果

**Fig.8　Simulation results of fracture parameters for soft and hard layered fracturing in Well Keshen E**

克深 E 井改造过程中管柱、工具未见异常，施工顺利，压裂后用 ϕ9.0 mm 油嘴求产，油压 75.7 MPa，折算日产气量 74.2×$10^4$ $m^3$，折算无阻流量 264.7×$10^4$ $m^3$/d，相对改造前无阻流量提高了 9 倍。克深 E 井漏失、裂缝发育和用液强度均不强于邻井，但从该井与邻井改造和投产数据可以看出，在储层物性条件和改造强度不优于邻井的条件下，其改造后无阻流量相对邻井提高了 11 倍（见表 3）。

截至目前，超深巨厚致密砂岩纵向细分层改造技术已在塔里木油田库车山前应用 20 口井，通过裂缝精细预测、储层分类评估、复合分层等手段，暂堵升压平均为 12 MPa，达到了纵向精细改造的效果，改造后平均单井产气量由 6.7×$10^4$ $m^3$/d 提高至 34.0×$10^4$ $m^3$/d，平均增产 4 倍，极大地提升了改造效果。库车山前部分应用井的暂堵效果如表 4 所示。

## 4　结论与建议

1）为实现近井、中远井、远井区储层的精细分类，采用储层裂缝精细预测方法和储层分类评估方法，定量化改造工艺设计，为横向裂缝集中改造、纵向上科学分段提供重要指导，全方位沟通井周优质

表 3　克深 E 井与邻井改造和投产数据对比

Table 3　Comparison of stimulation and production data for Well Keshen E and adjacent wells

| 井号 | 改造工艺 | 解释油气层厚度/$m^3$ | 总漏失量/$m^3$ | 孔隙度, % | 裂缝密度/（条·$m^{-1}$） | 用液强度/（$m^3·m^{-1}$） | 加砂强度/（$m^3·m^{-1}$） | 改造前无阻流量/（$10^4m^3·d^{-1}$） | 改造后无阻流量/（$10^4m^3·d^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 克深A | 笼统酸压 | 114.5 | 26.3 | 7.21 | 0.180 | 20.43 | | 0 | 24.13 |
| 克深C | 笼统酸化 | 94.5 | 619.7 | 6.83 | 0.740 | 20.00 | | 118.49 | 35.64 |
| 克深B | 笼统压裂 | 116.0 | 214.1 | 9.47 | 0.958 | 32.50 | 1.54 | 8.52 | 7.82 |
| 克深E | 机械+暂堵复合分层压裂 | 115.5 | 2.7 | 7.33 | 0.180 | 23.20 | 1.47 | 29.40 | 264.67 |

表 4　库车山前部分井暂堵升压效果统计

Table 4　Statistics of temporary plugging and pressure ramp-up in partial wells in Kuqa Piedmont

| 井号 | 改造井段/m | 改造工艺 | 暂堵材料粒径/ mm | 暂堵升压/MPa |
|---|---|---|---|---|
| A-1 | 5412.00～5525.00 | 暂堵酸压 | 1～5, 5～10 | 12.8 |
| A-2 | 5524.00～5620.00 | 暂堵酸压 | 1～5, 5～10 | 5.2 |
| A-3 | 6805.00～6937.00 | 机械分层+暂堵转向压裂 | 1～5, 5～10 | 7.0 |
| | 6959.00～7020.00 | | 1～5, 5～10 | 8.9 |
| A-4 | 6112.00～6197.50 | 暂堵加砂压裂 | 1～5, 5～10 | 13.0 |
| A-5 | 7677.00～7760.50 | 暂堵加砂压裂 | 1～5, 5～10 | 11.3 |
| A-6 | 6267.00～6336.00 | 暂堵加砂压裂 | 1～5, 5～10 | 8.0 |
| A-7 | 6873.00～6991.00 | 暂堵加砂压裂 | 1～5, 5～10 | 6.2 |
| A-8 | 7177.00～7259.50 | 暂堵酸压 | 1～5, 5～10 | 20.5 |
| 平均 | | | | 10.3 |

裂缝系统，实现储层井周裂缝精细评估。

2）为了增加分层数量，降低超深井下入多封隔器的安全风险，通过优化多封隔器管柱配置、研发可溶球、优选粒径 1～5 mm 和 5～10 mm 暂堵颗粒组合，形成了“机械硬分层+暂堵软分层”精细改造技术，提升了库车山前巨厚储层改造效果。

3）超深巨厚致密砂岩储层纵向细分层改造技术已在库车山前应用 20 口井，改造后单井产量平均增产 4 倍，实现了深层气藏巨厚储层的高效增产，对于类似超深厚储层的增产改造具有推广应用价值。

4）目前分层效果评价主要根据暂堵转向压力、施工压力等参数综合确定，地下实际分层效果确定手段尚不明确，建议根据测试产能情况、裂缝监测结果来确定改造后的分层效果。

## 参　考　文　献

## References


[1] 王俊鹏，曾联波，周露，等. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层储层裂缝发育模式及开发意义 [J]. 地球科学，2023，48（7）：2520–2534.
WANG Junpeng, ZENG Lianbo, ZHOU Lu, et al. Development model of natural fractures in ultra-deep sandstone reservoirs with low porosity in Kelasu Tectonic Belt, Tarim Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2520–2534.

[2] 江同文，孙雄伟. 库车前陆盆地克深气田超深超高压气藏开发认识与技术对策 [J]. 天然气工业，2018，38（6）：1–9.
JIANG Tongwen, SUN Xiongwei. Development of Keshen ultra-deep and ultra-high pressure gas reservoirs in the Kuqa foreland basin, Tarim Basin: understanding points and technical counter-measures[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(6): 1–9.

[3] 王振彪，孙雄伟，肖香姣. 超深超高压裂缝性致密砂岩气藏高效开发技术：以塔里木盆地克拉苏气田为例 [J]. 天然气工业，2018，38（4）：87–95.
WANG Zhenbiao, SUN Xiongwei, XIAO Xiangjiao. Efficient development technologies for ultradeep, overpressured and fractured sandstone gas reservoirs: a cased study of the Kelasu Gas Field in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 87–95.

[4] 刘群明，唐海发，吕志凯，等. 超深层气藏裂缝发育模式及水侵规律：以塔里木盆地克深 2、9、8 气藏为例 [J]. 天然气地球科学，2023，34（6）：963–972.
LIU Qunming, TANG Haifa, LYU Zhikai, et al. Study on gas-water distribution and water invasion law under different fracture development models in ultra-deep gas reservoir: taking Keshen 2, 9 and 8 gas reservoirs of Tarim Basin as examples[J]. Natural Gas

Geoscience, 2023, 34(6): 963–972.

[5] 赵炜. 煤系气藏多层合采井口产量变化规律实验研究 [D]. 北京：中国石油大学(北京), 2020.
ZHAO Wei. Experimental study on the change rule of multilayer combined-production wellhead in coal measure gas reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.

[6] 常玉翠. 煤储层和致密层耦合产气机理及合采效果评价 [D]. 北京：中国石油大学(北京), 2019.
CHANG Yucui. Mechanism and effect evaluation of commingled production of CBM reservoir and tight gas reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.

[7] 彭永洪, 陈飞, 李彦召, 等. 库车山前大斜度井储层改造试验与认识 [J]. 钻采工艺, 2021, 44(3)：33–36.
PENG Yonghong, CHEN Fei, LI Yanzhao, et al. Experiment and cognition of reservoir stimulation in highly-deviated well in Kuqa foreland basin[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(3): 33–36.

[8] 黄有泉, 王金友, 张宏岩, 等. 大庆油田 ϕ100 mm 套损井精细压裂工艺技术 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(5)：618–622.
HUANG Youquan, WANG Jinyou, ZHANG Hongyan, et al. Fine fracturing technology for ϕ100 mm casing damaged wells in Daqing Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 618–622.

[9] 翁定为, 杨战伟, 任登峰, 等. 提高超深裂缝性储层改造体积技术研究及应用 [J]. 世界石油工业, 2023, 30(4)：55–62.
WENG Dingwei, YANG Zhanwei, REN Dengfeng, et al. Application and improvement of ultra-deep fractured reservoir stimulated volume technology[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(4): 55–62.

[10] 雷群, 杨战伟, 翁定为, 等. 超深裂缝性致密储集层提高缝控改造体积技术：以库车山前碎屑岩储集层为例 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5)：1012–1024.
LEI Qun, YANG Zhanwei, WENG Dingwei, et al. Techniques for improving fracture-controlled stimulated reservoir volume in ultra-deep fractured tight reservoirs: a case study of Kuqa piedmont clastic reservoirs, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 1012–1024.

[11] 毛哲, 曾联波, 刘国平, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系深层致密砂岩储层裂缝及其有效性 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6)：1212–1221.
MAO Zhe, ZENG Lianbo, LIU Guoping, et al. Characterization and effectiveness of natural fractures in deep tight sandstones at the south margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1212–1221.

[12] YANG Xiangtong, PAN Yuanwei, FAN Wentong, et al. Case study: 4D reservoir geomechanics simulation of an HP/HT naturally fractured reservoir[R]. SPE 187606, 2017.

[13] 祁晓, 张璋, 李东, 等. 基于阵列声波测井技术的海上砂岩储层压裂效果评价方法 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(6)：128–134.
QI Xiao, ZHANG Zhang, LI Dong, et al. Evaluation of fracturing effects in offshore sandstone reservoirs based on array acoustic logging technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(6): 128–134.

[14] 蔡明, 章成广, 韩闯, 等. 微裂缝对横波衰减影响的实验研究及其在致密砂岩裂缝评价中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(1)：45–52.
CAI Ming, ZHANG Chengguang, HAN Chuang, et al. Experimental research of effect of microfracture on shear wave attenuation and its application on fracture evaluation in tight sand formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(1): 45–52.

[15] 赖锦, 王贵文, 孙思勉, 等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4)：1712–1724.
LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1712–1724.

[16] 谢海龙. 塔里木山前构造复杂地质条件下的钻井液技术在大古一井的应用 [J]. 钻采工艺, 2008, 31(1)：135–137.
XIE Hailong. Application of high density mud in Well DG-1 in Tarim mountain front[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 135–137.

[17] 陈雪峰, 李博, 张晓兵, 等. 塔里木山前构造盐膏层随钻扩眼钻井技术应用与认识 [J]. 西部探矿工程, 2022, 34(9)：96–99.
CHEN Xuefeng, LI Bo, ZHANG Xiaobing, et al. Application and understanding of drilling while drilling technology for salt gypsum layer in Tarim piedmont structure[J]. West-China Exploration Engineering, 2022, 34(9): 96–99.

[18] 侯冰, 陈勉, 卢虎, 等. 库车山前下第三系漏失原因分析及堵漏方法 [J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(4)：40–44.
HOU Bing, CHEN Mian, LU Hu, et al. Cause analysis of lost circulation and plugging method in Paleogene of Kuqa piedmont structure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(4): 40–44.

[19] HUANG Jinsong, GRIFFITHS D V, WONG Sau-Wai. Characterizing natural-fracture permeability from mud-loss data[J]. SPE Journal, 2011, 16(1): 111–114.

[20] 许闯麟. 碳酸盐岩裂缝—孔隙性地层钻井液漏失模型 [J]. 特种油气藏, 2016, 23(6)：133–135.
XU Kailin. Mud loss model in carbonate fracture-pore formation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6): 133–135.

[21] 孙致学, 姜宝胜, 肖康, 等. 基于新型集成学习算法的基岩潜山油藏储层裂缝开度预测算法 [J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(3)：32–38.
SUN Zhixue, JIANG Baosheng, XIAO Kang, et al. Prediction of fracture aperture in bedrock buried hill oil reservoir based on novel ensemble learning algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 32–38.

[22] 邹国庆, 熊勇富, 袁孝春, 等. 低孔裂缝性致密储层暂堵转向酸压技术及应用 [J]. 钻采工艺, 2014, 37(5)：66–68.
ZOU Guoqing, XIONG Yongfu, YUAN Xiaochun, et al. Temporary plugging and diverting acid fracturing technology and its application in low porosity and fractured reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(5): 66–68.

[23] 刘豇瑜, 张亚红, 张晖, 等. 高强度纤维复合暂堵剂试验研究及现场应用 [J]. 石化技术, 2017, 24(8)：101–104.
LIU Jiangyu, ZHANG Yahong, ZHANG Hui, et al. Experimental research and application of high strength fiber composite plugging agent[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(8): 101–104.

[编辑　令文学]