

# 海拉尔油田高应力储层测试压裂分析

何琛<sup>1,2</sup>, 蒋建方<sup>1,2</sup>, 张明慧<sup>3</sup>, 吴浩兵<sup>3</sup>, 金玲<sup>1,2</sup>, 冯章语<sup>1,2</sup>

- 1. 中国石油大学非常规油气科学技术研究院 北京 102249
- 2. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 北京 102249
- 3. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院 黑龙江大庆 163453

通讯作者: Email: jif8989@126.com

项目支持: “十三五”国家科技重大专项课题“低渗-致密油藏高效提高采收率新技术”(2017ZX05009-004)

引用: 何琛, 蒋建方, 张明慧, 等. 海拉尔油田高应力储层测试压裂分析[J]. 油气井测试, 2020, 29(2): 62-68.

Cite: HE Chen, JIANG Jianfang, ZHANG Minghui, et al. Test fracturing analysis of high stress reservoirs in Hailar Oilfield [J]. Well Testing, 2020, 29(2): 62-68.

**摘要** 随着储层改造深入, 施工工况愈加复杂, 高停泵压力梯度、高闭合应力、低砂比严重制约了储层评价与开发效果。为进一步优化主压裂设计, 提高大庆海拉尔油田南屯组储层压裂砂比、降低砂堵率, 采用 FracproPT2011 压裂软件, 对该区高应力储层 15 口井进行小型测试压裂解释与分析, 结合对地层特征的认识, 完成了南屯组高应力储层 15 口井的主压裂施工设计优化与实施。优化后的主压裂施工参数说明, 南屯组储层平均砂比由原来的 7% 提高到 13.6%, 最高砂比由 13.7% 提高到 25.4%, 砂堵率由 40% 降低到 13.3%, 提高了压裂施工效果。海拉尔油田南屯组高应力储层小型测试压裂分析提升了主压裂施工优化设计与矿场实施效果, 对类似致密岩、砂砾岩等高停泵压力、高应力储层的作业具有一定指导意义。

**关键词** 海拉尔油田; 小型压裂; 高停泵压力; 高应力梯度; 砂比; 砂堵率; 应用效果

**中图分类号:** TE357      **文献标识码:** B      **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.02.011

## Test fracturing analysis of high stress reservoirs in Hailar Oilfield

HE Chen<sup>1,2</sup>, JIANG Jianfang<sup>1,2</sup>, ZHANG Minghui<sup>3</sup>, WU Haobing<sup>3</sup>, JIN Ling<sup>1,2</sup>, FENG Zhangyu<sup>1,2</sup>

- 1. Institute of Unconventional Oil and Gas Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
- 2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
- 3. Research Institute of Oil Production Engineering, PetroChina Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163453, China

**Abstract:** With the deepening of reservoir reform, the construction conditions are more and more complicated. The high pressure gradient when pump stopping, high closed stress and low sand ratio severely restrict the evaluation and development of reservoirs. The small test fracturing interpretation and analysis of 15 wells in the high stress reservoir were carried out with FracproPT2011 fracturing software to optimize the main fracturing design and improve the reservoir fracturing sand ratio and reduce the sand blocking rate of the Nantun formation in Daqing Hailar Oilfield. Based on the analysis and understanding of the characteristics of the strata, the design and implementation of the main fracturing construction of 15 wells in the high-stress reservoir of the Nantun formation were completed. The optimized main fracturing construction parameters show that the average sand ratio of the Nantun formation reservoir increased from 7% to 13.6%, the highest sand ratio increased from 13.7% to 25.4%, the sand blocking rate decreased from 40% to 13.3%. The effect of fracturing construction is improved. This paper has certain guiding significance for the operation of high-stop pump pressure and high-stress reservoirs in tight rock and glutenite formation.

**Keywords:** Hailar Oilfield; small fracturing; high stop pump pressure; high stress gradient; sand ratio; sand blocking rate; application effect

大庆海拉尔油田贝中区块南屯组储层属于超低渗透、致密油藏, 埋藏深, 以暗色泥岩和粉砂岩为主, 泥质含量较高, 部分区块可生成油页岩, 是大庆海拉尔油田的重要生油层段<sup>[1]</sup>。储层岩性复杂, 岩

石塑性强, 且构造发育, 闭合应力大, 裂缝难以起裂和延伸, 停泵压力梯度高。多而薄的储层导致人工裂缝形态复杂, 缝高难以有效控制, 动态缝宽窄, 临界砂比低, 7% 砂比就会出现明显的压力上升, 最高

砂比仅为 13.7%,压裂施工难度大<sup>[2-4]</sup>。近年,随着储层改造的加深,施工工况愈加复杂,改造强度低的问题越来越突出,增产效果不理想<sup>[5-6]</sup>。高停泵压力梯度、高闭合应力、低砂比严重制约了储层评价与开发效果,已经成为当前海拉尔油田高应力储层增产改造的主要难题之一。

小型测试压裂分析作为认识储层特征、优化主压裂施工参数、提高压裂施工效率的有效手段,已经被国内外油田广泛应用<sup>[7-9]</sup>。为强化压裂优化设计对储层的针对性和适宜性,测试压裂分析对地质条件复杂、施工难度大的储层进行压裂尤为重要<sup>[10-12]</sup>。国内外大量相关文献表明,小型测试压裂分析为及时调整、优化主压裂设计提供了重要依据,显著提高了压裂施工的效果<sup>[13-15]</sup>。雷群<sup>[16]</sup>在长庆油田应用小型测试压裂技术,获得油井的破裂压力、闭合压力、闭合时间、压裂液的滤失系数等参数,并配合井温测井,确定地层最大排量条件下的裂缝高度、区块的压裂模式,为压裂优化设计提供了依据,提高了长庆油田储层改造成功率。张华丽等<sup>[17]</sup>利用小型测试压裂分析得到了江苏油田 S20-26 施工井的闭合应力、近井筒弯曲摩阻、射孔孔眼摩阻、液体滤失系数和油藏渗透率等参数,在此基础上对主压裂施工参数进行了调整,取得了较好效果,提高了施工成功率。张有才等<sup>[18]</sup>介绍了小型测试压裂分析技术在海拉尔油田复杂岩性储层压裂中的应用成果,形成了近井高摩阻、高停泵压力梯度及天然裂缝的识别与处理三项技术,提出了需要进一步研究解决的具体问题和技术难点,整体上提升了海拉尔油田施工成功率。但对于南屯组具有高停泵压力的力学特征及天然裂缝发育的高应力储层,以及它对施工影响的研究还存在不足,现场施工难度依然很大,需要进一步提高针对性与指导性。本文采用 FracproPT2011 压裂软件,分析了海拉尔油田南屯组储层 15 口井的高应力特征,并以此为依据优化了该区块的主压裂设计。

## 1 南屯组储层压裂地质概况

南屯组储层是大庆海拉尔油田的一个主力层系,以暗色泥岩、粉砂岩为主,部分地区可生成油页岩,是海拉尔油田的重要生油层段,分布较广;储层孔隙度最大值为 23.8%,最小值为 1.1%,平均为 10.4%,主要分布在 4%~14% 之间;渗透率最大值为  $276 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最小值为  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为

$3.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,主体小于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于特低孔超低渗储层;原油相对密度为 0.854 3,原油黏度为 9.24 mPa·s,地层温度梯度为 3.3 °C/100 m、压力梯度为 0.91 MPa/100 m。总体渗透性差,需要通过压裂施工才能获得产能;岩性致密、复杂,高渗地带天然裂缝发育,增大了压裂液滤失和施工难度。

## 2 小型测试压裂方法与步骤

为有效认识储层特征、优化主压裂施工参数、提高压裂施工效率,对南屯组高应力储层施工井进行了小型测试压裂。

### 2.1 小型测试压裂方法

对压裂目标井进行压裂液的升、降排量和关井测压设计与施工,并在小型测试压裂过程中获得每秒时间点对应的排量和压力;要求在变排量过程中获得稳定的排量和压力。停泵后,关井测压 30~60 min,直至压力趋于稳定。X1 井南屯组 N1023-1021 号储层测试压裂施工曲线如图 1 所示。该井设计实施了 5 升 4 降的阶梯排量注入测试,压后关井测压降 56 min,最后压力基本稳定。

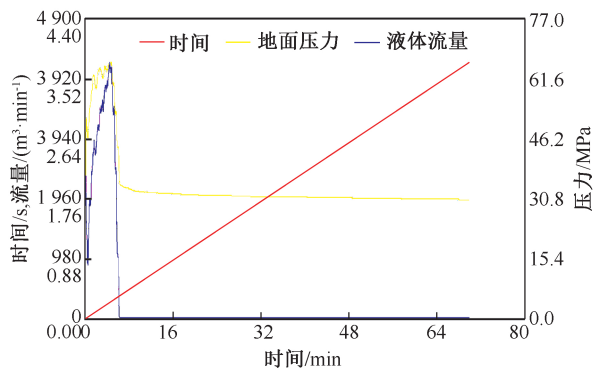


图1 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂曲线  
Fig.1 Mini-frac testing curve of No.1023-1021 intervals in Well X1

### 2.2 小型测试压裂分析步骤

小型测试压裂分析通常按以下程序进行:打开 FracproPT 文件→打开数据库数据文件→调入测试压裂采集的.DBS 数据文件→设置模型的参数信道→输入井筒结构参数→设定热传导参数→输入地层物性、岩性、力学性质等参数→选择或编辑压裂液性能参数→根据测试压裂测定数据设置泵段→运行测试压裂模拟程序→进行小型测试压裂分析(瞬时停泵压力、平方根函数、G 函数、双对数函数)→迭代计算管柱、孔眼、近井筒摩阻→拟合净压力,分析储层渗透性和滤失性。

### 3 南屯组储层小型测试压裂现场分析

采用 FracproPT2011 软件和测试压裂分析方法,拟合分析了南屯组高应力储层 15 口井的小型测试压裂数据。本文以 X1 井南屯组 N1023-1021 号储层测试压裂数据为例进行分析。

#### 3.1 X1 井小型测试压裂分析

依据小型测试压裂的方法步骤,对 X1 井进行了闭合应力分析、摩阻分析、储层渗透性和裂缝滤失性分析。

##### 3.1.1 闭合应力分析

X1 井南屯组 N1023-N1 021 号储层射孔井段为 2 651.0~2 616.4 m,储层中深 2 633.7 m,砂岩厚度 7.7 m,有效厚度 2.9 m,射孔跨距 34.6 m,共射 12 孔(在一个层段内,任意相邻二个射孔的方向对称相反),射孔弹型为 DP33RDX-5,相位角  $180^\circ$ 。根据 X1 井 N1023-1021 号储层停泵后的测试压裂压力数据,采用 FracproPT2011 压裂软件,首先,进行瞬时停泵压力分析,这是小型测试压裂分析的基础,在瞬时停泵压力曲线上选作测定井底压力曲线的切线,确定井底瞬时停泵压力及其梯度和地面瞬时停泵压力,如图 2 所示,图内红色直线所标位置为停泵时的压力点;其次,在平方根曲线上,根据不同的压降斜率作测定井底压力曲线的两条切线,如图 3 所示,图内粉色直线为两条切线的交点,确定闭合应力及梯度、闭合时间、隐含的携砂液效率、估算的净压力等相关值;最后,分别在 G 函数曲线上通过作泵压的叠加函数导数的切线、在双对数曲线上作压力差的迭加导数的切线,分别求取上述相关参数,如图 4、图 5 所示。

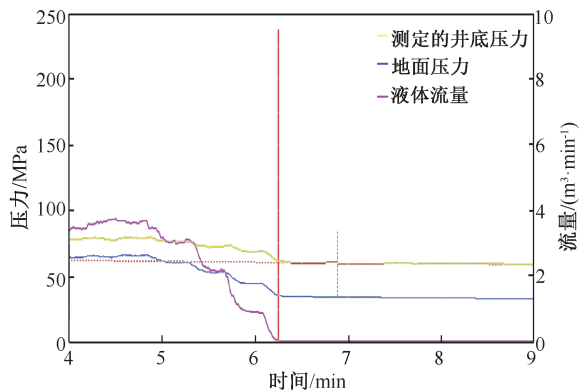


图 2 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂瞬时停泵压力分析

Fig.2 Instantaneous pump stop pressure analysis of mini-frac testing in No.1023-1021 intervals of Well X1

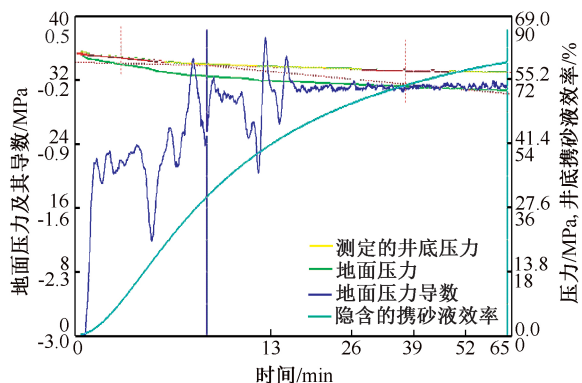


图 3 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂平方根函数分析  
Fig.3 Square root function analysis of mini-frac testing in No.1023-1021 intervals of Well X1

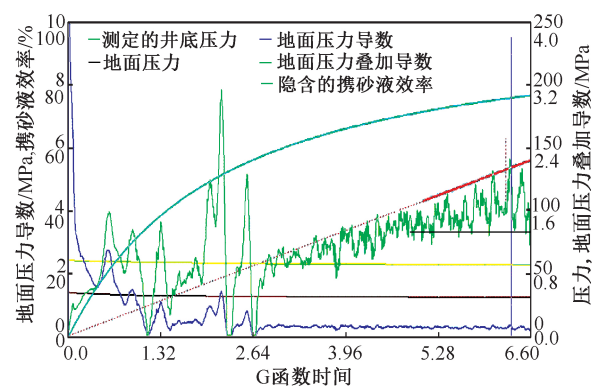


图 4 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂 G 函数分析  
Fig.4 G function analysis of mini-frac testing in No.1023-1021 intervals of Well X1

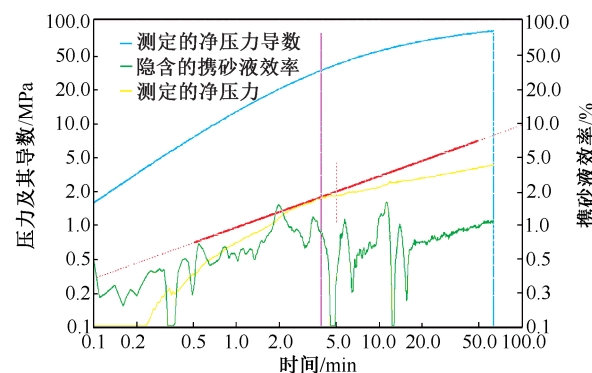


图 5 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂双对数函数分析  
Fig.5 Double logarithmic function analysis of mini-frac testing in NO.1023-1021 intervals of Well X1

根据上述三种方法确定的相关值,取平均值作为最终的闭合应力分析值,结果见表 1。可见,三种分析方法的计算结果比较接近,平均井底闭合应力及其梯度分别为 57.94 MPa 和 0.022 0 MPa/m,为高闭合应力地层;平均地面、井底瞬时停泵压力分别为 34.36 MPa 和 60.44 MPa,对应的地面和井底瞬时停泵压力梯度分别为 0.013 1 MPa/m 和



0.022 9 MPa/m,为高停泵压裂压力施工井;裂缝估计净压力为 2.50 MPa,比较低,表明停泵后裂缝延伸不明显。

表 1 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂  
闭合应力与净压力分析结果  
Table 1 Results of mini-frac testing closed stress and net  
pressure analysis in No.1023-1021 intervals of Well X1

油层中部 深度/m	解释方法	井底瞬时 停泵压力 梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	闭合 应力/ MPa	闭合应力 梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	计算净 压力/ MPa
2 633.7	平方根	0.022 9	58.45	0.022 2	2.00
	G-函数	0.022 9	56.73	0.021 5	3.71
	双对数	0.022 9	58.64	0.022 3	1.80
	平均值	0.022 9	57.94	0.022 0	2.50

3.1.2 摩阻分析

利用 FracproPT2011 压裂软件,选取阶梯降排量测试中压力排量相对稳定的 5 组数据,在摩阻分析图中,一条绿线和一条红线为一组排量与压力降,将第一条绿线移动到第一个压力和排量相对稳定,且靠近排量开始下降的地方,将第一条红线移动到排量刚刚降下来且排量和压力相对稳定的地方,用同样的方法将其他几组绿线和红线调好,直到最后那条红线对应的排量为 0。根据上述分析方法,分析解释了 X1 井 N1023-1021 层注压裂液阶段的近井筒弯曲摩阻和射孔孔眼摩阻,摩阻分析解释如图 6 所示。

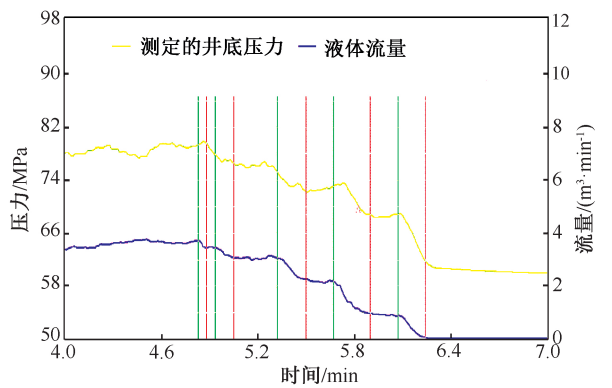


图 6 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂摩阻分析  
Fig.6 Analysis of mini-frac testing friction in  
No.1023-1021 intervals of Well X1

其中,近井筒弯曲摩阻为 14.03 MPa,表明地层裂缝存在一定弯曲或多条微裂缝,易出现桥塞砂堵,不利于高砂比作业,可通过在主加砂压裂初期增加粉砂或粉陶降低由于多裂缝滤失引起的竞争;通过增加段塞,打磨裂缝弯曲面,以及增加前置液比例等措施来降低该类摩阻<sup>[19]</sup>;射孔孔眼摩阻为

1.70 MPa,压裂时随着压裂液和支撑剂的注入会逐渐解除,也可以通过增加射孔数量、清洁孔眼等措施减小<sup>[20]</sup>。

3.1.3 储层渗透性和裂缝滤失性分析

根据前文解释的闭合应力相关参数以及经验,反复调试 X1 井 N1023-1021 段地层参数,拟合模型计算的净压力曲线和测定的净压力曲线,直至两条曲线基本重合或比较接近为止,如图 7 所示,储层渗透性和裂缝滤失性分析结果:油层中部深度 2 633.7 m,储层闭合应力梯度 0.022 MPa/m,隔层应力梯度 0.022 9 MPa/m,有效渗透率  $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,滤失系数  $9.87 \times 10^{-4} \text{ m/min}^{0.5}$ 。可见,储隔层闭合应力梯度分别为 0.022 0 MPa/m 和 0.022 9 MPa/m,应力差小,压裂过程中难以形成有效遮挡层,对裂缝高度控制不利。因此,在保证一定携砂能力的前提下,通过优化施工排量,减小裂缝高度在纵向上的过度延伸。解释储层有效渗透率为  $0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,裂缝综合滤失系数为  $9.87 \times 10^{-4} \text{ m/min}^{0.5}$ ,偏大,与多缝因子 2.5 相吻合,说明储层发育有一定程度的天然裂缝,也与近井筒弯曲摩阻较大(多缝竞争)解释结果相一致。

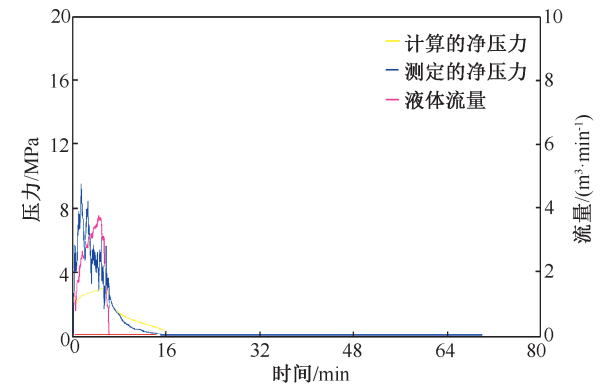


图 7 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试净压力拟合  
Fig.7 Net pressure fitting results of mini-frac testing in  
No.1023-1021 intervals of Well X1

3.2 X1 井主压裂设计优化和现场实施

根据 X1 井 N1023-1021 号储层小型测试压裂数据分析结果,采用 FracproPT2011 三维压裂软件,对 X1 井 N1023-1021 号储层主压裂施工参数进行了优化,结果如下:排量  $3.6 \text{ m}^3/\text{min}$ ,压裂液量  $233.4 \text{ m}^3$ ,前置液 23.46%,平均砂比 13.2%,最高砂比 21.0%,最高砂浓度  $391 \text{ kg/m}^3$ ,设计加砂量  $20 \text{ m}^3$ ,实际加砂  $20 \text{ m}^3$ 。可见,通过优化设计降低了排量,提高了高前置液百分数和砂比、铺砂浓度。优化后模拟计算的裂缝参数与产能预测结果:半缝长 108.2 m,缝

高 18.2 m, 平均缝宽 0.43 mm, 平均铺砂浓度 248 kg/m<sup>3</sup>, 裂缝导流能力 14.3 μm<sup>2</sup>·cm, 地层渗透率 0.20×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>, 压后初产预测 18.35 m<sup>3</sup>/d。裂缝几何尺寸基本实现了对缝高的控制, 具备了一定的裂缝长度和导流能力。

对 X1 井 N1023-1021 号储层完成小型测试压裂分析, 并进行主加砂压裂施工参数优化后, 在现场按照优化设计的各项施工参数, 对该井进行了主加砂压裂施工。N1023-1021 号层压裂测试曲线及施工曲线如图 8 所示。以 0.7 m<sup>3</sup>/min 替挤井筒, 替出井内液体, 封隔器坐封, 20~105 min 进行测试压裂。地面瞬时停泵压力 34.36 MPa, 井底瞬时停泵压力为 60.44 MPa。主压裂初始施工排量为 4.0 m<sup>3</sup>/min, 压力 65.6 MPa, 排量降低到 3.2 m<sup>3</sup>/min 后压力下降到 57 MPa, 加入胶塞 6.0 m<sup>3</sup>, 处理微裂缝, 降低滤失, 携砂液过炮眼进地层后, 压力由 57 MPa 上升到 59 MPa。加砂前, 施工排量控制在 3.6 m<sup>3</sup>/min, 低砂比过炮眼后压力平稳, 逐渐小级差提高砂比施工。21% 砂比到达井底后, 压力快速上升到 65 MPa, 保持该砂比施工直至结束, 顺利完成加砂 20 m<sup>3</sup>。在整个主压裂施工过程中, 按照优化设计方案执行, 各项施工参数的性能指标与设计大体一致, 降低了排量, 提高了前置液比例, 在不发生砂堵的前提下提高了砂比(铺砂浓度), 实现了优化的缝长和导流能力。

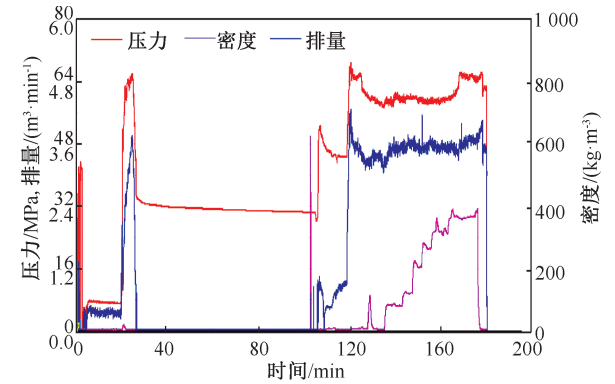


图 8 X1 井 N1023-1021 号层压裂测试曲线及施工曲线  
Fig.8 Fracturing test curve and construction curve in No.1023-1021 intervals of Well X1

3.3 南屯组储层测试压裂和优化施工参数统计

采用上述方法, 分析了南屯组储层 15 口高停泵井的小型测试压裂相关参数, 并以此为依据, 优化了该区块的主压裂施工设计, 统计结果见表 2、表 3。

表 2 南屯组储层 15 口高停泵井小型测试主要参数  
Table 2 Main parameters of mini-frac testing for 15 high shutdown pump wells in Nantun group reservoir

井号	井底停泵 压力梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	闭合 应力/ MPa	闭合应力/ 梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	弯曲 摩阻/ MPa	孔眼 摩阻/ MPa	渗透率/ (10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )
X1	0.022 9	57.94	0.022 0	14.03	1.70	0.200
X2	0.019 9	36.89	0.019 6	6.35	2.78	0.129
X3	0.023 7	44.38	0.023 2	1.42	1.89	0.104
X4	0.024 5	44.06	0.022 3	5.67	0.85	0.203
X5	0.019 5	46.40	0.018 3	8.55	2.26	0.132
X6	0.020 4	48.96	0.018 7	3.65	0.96	0.221
X7	0.020 1	51.48	0.019 3	12.74	1.69	0.414
X8	0.018 0	29.46	0.015 4	3.45	2.86	0.014
X9	0.020 1	36.46	0.018 8	6.73	2.44	0.520
X10	0.019 2	30.51	0.015 4	6.87	1.94	0.226
X11	0.021 6	39.47	0.017 6	14.36	2.78	0.465
X12	0.018 8	40.80	0.016 4	7.24	1.85	0.188
X13	0.026 9	50.25	0.020 1	1.63	1.69	0.069
X14	0.021 8	60.94	0.021 0	9.75	1.42	0.225
X15	0.020 0	41.94	0.017 7	3.17	1.68	0.193

表 3 南屯组储层 15 口高停泵井主要施工参数  
Table 3 Main construction parameters of 15 high shutdown pump wells in Nantun group reservoir

井号	施工压力/ MPa	停泵压力/ MPa	平均砂比/ %	最高砂比/ %	最高砂浓度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
X1	60.0	62.0	13.2	21.0	391
X2	34.3	21.2	13.8	18.0	385
X3	31.4	22.1	14.6	21.7	374
X4	47.0	45.8	15.1	23.2	394
X5	17.6	4.6	10.2	18.4	362
X6	13.9	5.2	11.6	17.9	358
X7	22.4	32.0	14.7	23.2	405
X8	38.0	15.0	14.3	21.2	373
X9	41.4	25.8	15.7	22.8	425
X10	38.5	20.7	14.6	21.3	390
X11	38.0	26.0	14.7	21.6	417
X12	30.5	28.9	13.9	22.2	382
X13	50.5	28.8	12.3	25.4	413
X14	54.2	39.9	13.8	21.7	392
X15	48.6	25.8	11.8	22.4	398

可见, 井底瞬时停泵压力梯度大于 0.018 0 MPa/m, 属于高停泵压裂压力井, 分布在 0.018 0~0.026 9 MPa/m 之间, 大于 0.020 MPa/m 的井占比 60%, 表明压裂施工的泵压高、井底停泵压力梯度大, 作业难度大; 该值较大差异也反映储层之间在地层应力上的非均质性, 在较大施工难度的基础

上,增加了复杂性。储层闭合应力梯度分布在 $0.0154\sim0.0232\text{ MPa/m}$ 之间,通常情况下与地层最小水平主应力梯度相当,地层复杂时为裂缝贯穿地层的最小水平主应力的平均值,远高于常规砂岩储层。以此认为,大庆海拉尔油田南屯组储层为高应力储层。近井地带均有弯曲摩阻,范围在 $1.42\sim14.36\text{ MPa}$ 之间,变化范围大,大于 $4.0\text{ MPa}$ 的占比66.7%,认为地层多裂缝或裂缝弯曲现象比较严重,主加砂压裂过程中可通过粉陶、增黏来降滤,支撑剂段塞打磨等技术进行有效处理。射孔孔眼摩阻主要集中在 $1.5\sim3.0\text{ MPa}$ 之间,通过优化射孔,增加射孔数以及段塞均有助于减小。渗透率分布在 $0.014\times10^{-3}\sim0.520\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,小于 $0.1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占13.3%, $0.1\times10^{-3}\sim0.2\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间的占40%, $0.2\times10^{-3}\sim0.3\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间的占26.7%,大于 $0.3\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占20%,主要分布在 $0.1\times10^{-3}\sim0.3\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,占比66.7%,说明储层具有特低渗属性,且物性上显示较强的非均质性。

从优化后的主压裂施工参数和现场施工情况看,以往该区块临界砂比低,平均砂比只有7%左右,最高砂比仅有13.7%,压裂施工难度大。但通过小型测试压裂分析并优化了该区块压裂施工参数后,平均砂比提高到13.6%,最高砂比提高25.4%;以往该区块对10口井进行了压裂施工,低砂比下砂堵4口井,砂堵率为40%。经过小型测试压裂分析并以此优化设计后,对该区块15口井进行了压裂施工,仅有2口井发生了砂堵,砂堵率由原来的40%降低到13.3%。可见,利用小型测试压裂分析认识储层特征,并以此进行施工参数优化后,在该高应力储层压裂中提升了施工质量,取得了较好的现场效果。

## 4 结论

(1)小型测试压裂分析证实,大庆海拉尔油田南屯组为高闭合应力储层,具有高施工压力与高停泵压力、窄裂缝宽度及低砂比施工特征,水力压裂施工难度较大。

(2)南屯组小型测试分析结果与认识提升了主压裂施工优化设计与矿场实施效果,最高砂比从13.7%提高25.4%;砂堵率由40%降低到13.3%,整体提高了压裂施工效果。

(3)南屯组小型测试压裂分析与主压裂优化设计工作对类似致密岩、砂砾岩等高停泵压力、高应

力储层的作业具有一定的指导意义。

致谢:在论文撰写过程中,课题组成员们给了很大帮助,在此表示感谢。

## 参考文献

- [1] 康德江,庞雄奇,付广,等. 海拉尔盆地贝尔凹陷潜山油气成藏特征[J]. 天然气工业,2008,28(9):28-31.  
KANG Dejiang, PANG Xiongqi, FU Guang, et al. Characteristics of hydrocarbon pooling in buried hill of beier sag in the Hailaer basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9):28-31.
- [2] 肖丹凤,张宗雨,韩松,等. 海拉尔深部南屯组高含泥储层压裂增产技术[J]. 大庆石油地质与开发,2012,31(1):101-105.  
XIAO Danfeng, ZHANG Zongyu, HAN Song, et al. Fracturing stimulation technology for high shale-content reservoirs in lower Zuunbayan formation in the deep of Hailer basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2012,31(1):101-105.
- [3] 邓贤文. 海拉尔油田复杂岩性储层体积压裂技术的应用[J]. 油气井测试,2015,24(4):47-49.  
DENG Xianwen. Application of volume fracturing technology for complex lithologic reservoir in Hailar Oilfield [J]. Well Testing, 2015,24(4):47-49.
- [4] 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.  
XIE Chaoyang, ZHANG Hao, TANG Pengfei. Complex lithologic reservoir fracturing production stimulation technique in Hailaer basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006,25(5):57-60.
- [5] 吴浩兵. 海拉尔油田南屯储层压裂施工分析及处理措施[J]. 石油地质与工程,2013,27(4):103-104.  
WU Haobing. Fracturing operation analysis and treatment measures of Nantun reservoir of Hailaer Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013,27(4):103-104.
- [6] 苏博鹏. 海拉尔油田压裂技术现状与发展趋势[J]. 油气井测试,2017,26(6):52-55.  
SU Bopeng. Current situation and developing trend of fracturing technology in Hailar Oilfield [J]. Well Testing, 2017,26(6):52-55.
- [7] 张彬奇. 测试压裂分析技术在渤海B油田的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):33-37.  
ZHANG Binqi. Application of mini-frac analytical technique in B Oilfield of Bohai [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):33-37.
- [8] 王起龙. 测试压裂技术在复杂压裂井的应用[J]. 长江大学学报(自科版),2014,11(20):105-107.  
WANG Qilong. Application of test fracturing technology in

- complex fracturing wells [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(20): 105-107.
- [9] 王成旺, 陆红军, 陈宝春, 等. 超低渗透储层小型压裂测试方法改进与应用 [J]. 油气井测试, 2011, 20(5): 49-51.
- WANG Chengwang, LU Hongjun, CHEN Baochun, et al. Improvement and application of small fracturing test method in ultra-low permeable reservoir [J]. Well Testing, 2011, 20(5): 49-51.
- [10] 陈超峰, 朱雪华, 杨晓儒, 等. 低压裂缝性储层小型测试压裂改造技术 [J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 35-41.
- CHEN Chaofeng, ZHU Xuehua, YANG Xiaoru, et al. Smallscale test fracturing technology for low-pressure fractured reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 35-41.
- [11] 吴浩兵, 王贤君, 张浩, 等. 断块油藏低渗透薄互储层有效动用压裂技术研究 [A]. 西安石油大学、陕西省石油学会 2018 油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2018) 论文集 [C]. 西安石油大学、陕西省石油学会: 西安华线网络信息服务有限公司, 2018: 353-362.
- WU Haobing, WANG Xianjun, ZHANG Hao, et al. Study on effective production fracturing technology of low permeability thin mutual reservoir in fault block reservoir [C]. 2018IFEDC International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development, 2018: 353-362.
- [12] 李蕴哲, 任泽, 王永刚. 小型压裂测试在海上探井压裂的应用与分析 [J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 53-55, 59.
- LI Yunzhe, REN Ze, WANG Yonggang. Application and analysis of minifrac test in offshore exploratory well [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 53-55, 59.
- [13] 薛成国, 何青, 陈付虎, 等. 测试压裂分析方法在富县探区的应用研究 [J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(1): 54-57.
- XUE Chengguo, HE Qing, CHEN Fuhu, et al. Research on application of mini-frac analytical method in Fuxian exploration area [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(1): 54-57.
- [14] 杨丽娜, 陈勉, 张旭东. 小型压裂理论模型进展综述 [J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(2): 45-48.
- YANG Lina, CHEN Mian, ZHANG Xudong. Summarize of the theoretical models about mini-fracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(2): 45-48.
- [15] 曾博, 王莉, 张晓伟. 小型压裂测试分析方法在页岩气开发中的应用 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 151-155.
- ZENG Bo, WANG Li, ZHANG Xiaowei. Application of minifrac analysis in the development of shale plays [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 151-155.
- [16] 雷群. 测试压裂在长庆低渗透油田的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(4): 73-75.
- LEI Qun. Application of testing fracturing in Changqing Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(4): 73-75.
- [17] 张华丽, 周继东. 小型压裂分析在江苏油田 S20-26 井的应用 [J]. 复杂油气藏, 2009, 2(3): 73-75.
- ZHANG Huali, ZHOU Jidong. Application of mini-fracturing technology in S20-26 well of Jiangsu Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2009, 2(3): 73-75.
- [18] 张有才, 戴平生, 王磊, 等. 测试压裂分析诊断技术在海拉尔油田的应用 [J]. 油气井测试, 2005, 14(3): 37-39.
- ZHANG Youcai, DAI Pingsheng, WANG Lei, et al. Application of testing fracture diagnose tech in Hailar Oilfield [J]. Well Testing, 2005, 14(3): 37-39.
- [19] 李升芳, 殷玉平, 王进涛, 等. 降低压裂施工摩阻技术研究 [J]. 石油化工应用, 2014, 33(12): 77-78, 97.
- LI Shengfang, YIN Yuping, WANG Jintao, et al. Research on reducing friction of fracturing [J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(12): 77-78, 97.
- [20] 李达, 贾建鹏, 滕飞启, 等. 压裂施工过程中的井底压力计算 [J]. 断块油气田, 2013, 20(3): 384-387.
- LI Da, JIA Jianpeng, TENG Feiqi, et al. Calculation of bottomhole pressure during fracturing [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(3): 384-387.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:** 何琛, 男, 1993 年出生, 中国石油大学(北京)油气田开发工程在读硕士研究生, 从事油气田开发工程室内试验与矿场生产相关研究。电话: 010-89734612, 17792205704; Email: 15502929189@163.com。通信地址: 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 邮政编码: 102249。