

# Study on Rock Mechanic Characteristics and Fracturing Countermeasures of Glutenite Reservoirs in Mahu Depression

Hongyong Hao, Xingyu Yang, Li Niu, Shenghao Guo, Zhanling Sun, Dongmei Xu, Jingrun Xu, Hongmei Zhou

Institute of Experimental Testing, Xinjiang Oilfield Company, Petro China, Karamay Xinjiang  
Email: 634114638@qq.com

Received: Oct. 27<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In the glutenite reservoirs of Baikouquan Formation in Mahu Depression, reserves were high, but the porosity and permeability were poor, and single well production was low with high cost, so horizontal well + fracturing was the effective development measure for the reservoirs. Because of unclear understanding of the *in-situ* stress and rock mechanic characters, the effect of fracturing and reconstruction was constrained. The laboratory acoustic and mechanical tests revealed that there existed the characters of high stress difference in two directions, high minimum horizontal principal stress, small elastic modulus of rock cores and low hardness, fracturing reconstruction could not produce complex fracture networks. Therefore, it was recommended to use dense cut sectional volume fracturing for expanding the fracturing volume, pretreatment with prepaid-fluid acid squeezing combined with small diameter slugs for reducing the difficulty in fracturing and sand adding operation, rationally enhancing the proppant thickness and using slip water to produce long and complex fractures for the purpose of improving the efficiency of fracturing reconstruction. The volume fracturing was carried out in 22 well sections for Well MaHW1325, and 23,700 m<sup>3</sup> fracturing fluid and 1702 m<sup>3</sup> proppant were used for fracturing operations by the end of 2015. By the end of late August, 2017, Well MaHW1325 produces for 528 d with accumulated oil production of 12,786.8 t, and the average daily oil production is 24.2 t, and good effect is obtained in production. It indicates that the fracturing reconstruction program is successful. It has a high value for popularization in the block.

## Keywords

Junggar Basin, Mahu Depression, Glutenite, Rock Mechanics, Countermeasure for Fracturing, Experimental Study

---

# 玛湖凹陷砂砾岩储层岩石力学特征与压裂对策研究

郝红永, 杨兴渝, 牛 丽, 郭晟豪, 孙占玲, 徐冬梅, 徐景润, 周红梅

中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依

作者简介: 郝红永(1986-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事采油工艺方面的研究工作。

Email: 634114638@qq.com

收稿日期: 2017年10月27日; 录用日期: 2017年12月12日; 发布日期: 2018年8月15日

## 摘 要

玛湖凹陷百口泉组砂砾岩油藏储量大, 但储层孔渗差、单井产量低、综合开采成本高, “水平井 + 压裂”是开发该类储层的有效措施, 由于对其地应力和岩石力学特征认识不清严重制约了压裂改造的有效性。通过室内声学、力学试验发现玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储层存在两向地应力差高、最小水平主地应力高、岩心弹性模量小、硬度低等特点, 压裂改造无法形成复杂缝网, 推荐采用密切割分段体积压裂工艺增大改造体积、采用前置液挤酸预处理结合小粒径段塞方式减少压裂加砂施工难度、适当加大支撑剂铺设厚度以及近井地带使用滑溜水造长复杂缝等措施提高改造效果。结合以上压裂施工建议, 2015年底顺利完成了对试验井MaHW1325井22段体积压裂, 入井压裂液23,700 m<sup>3</sup>、支撑剂1702 m<sup>3</sup>, 截止到2017年8月下旬MaHW1325井累计生产528 d, 累计产油12,786.8 t, 平均日产油24.2 t, 生产效果好, 说明压裂改造方案成功, 在该区块具有极高推广价值。

## 关键词

准噶尔盆地, 玛湖凹陷, 砂砾岩, 岩石力学, 压裂对策, 试验研究

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北缘断阶带下盘, 东抵达巴松凸起与夏盐凸起, 西靠乌夏断裂带, 南接中拐凸起, 北达石英滩凸起与英西凹陷(图 1) [1]。近期勘探成果发现玛湖凹陷百口泉组具有扇控大面积含油特征, 2014 年仅玛湖凹陷玛 131 井区块上交探明储量近亿吨, 虽然勘探成果颇丰, 但根据大量薄片资料分析发现玛 131 井区块百口泉组储层平均孔隙度仅为 10.1%, 平均渗透率仅有 0.9 mD, 属于典型的低孔特低渗较差孔隙结构储层, 单井产量低, 开发难度大[2] [3]。

测井解释发现玛湖凹陷百口泉组储层厚度达 200 m 左右, 根据内部岩性旋回特征自下而上分为百口泉组一段、百口泉组二段、百口泉组三段, 主要岩性为砂砾岩夹泥岩, 砂砾岩厚度大, 属于低孔特低渗较差孔隙结构。为实现对玛湖凹陷百口泉组油藏的高效开发, 计划在该区块大规模推广应用水平井压裂

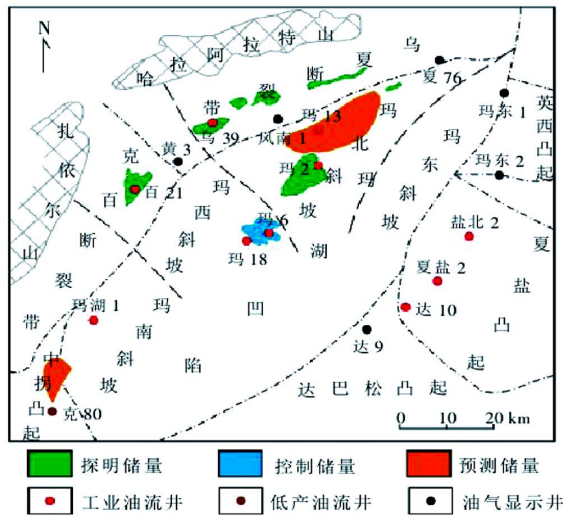


Figure 1. The structural position of Mahu Depression  
图 1. 玛湖凹陷构造位置

改造技术。由于目前对砂砾岩油藏储层的岩石力学特性认识尚不清楚，制约了对该油藏地应力、储层脆性和压裂缝网扩展机理等的研究，影响了压裂施工的针对性和有效性。因此，通过对玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储层岩石力学试验研究，掌握储层地应力、岩石力学特性，对于制定该区块合理的压裂施工方案以及最终的大规模、高效开发具有重要指导意义。

## 2. 岩石力学试验及试验结果

在同一块岩样上取 1 个垂直方向与 3 个水平方向(各相隔 45°)直径 25 mm 的岩心，利用声发射测试仪测试求取取心点的地应力大小；利用 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机模拟储层应力环境测试岩心弹性参数；利用岩石硬度仪和支撑剂嵌入试验仪分别测试储层岩心硬度和支撑剂嵌入情况，为最终合理的压裂施工方案设计提供有力数据支撑。

### 2.1. 声发射 Kaiser 效应试验

声发射 Kaiser 效应法测定地应力：在实验室通过对地层岩心进行匀速加载，用声发射仪接收岩心受载过程中岩心所发出的声波信号，由于岩心在地下受到三向应力作用，所以要在不同方向取心进行试验，通常在室内对取自现场的岩心进行取心时要在垂直方向取 1 块，在垂直岩心轴线平面内相隔 45°取 3 块(如图 2)，由上述 4 个方向岩心进行试验测得 4 个方向的正应力，利用式(1)可确定取心深度地层岩石所处的地应力，试验结果见表 1。

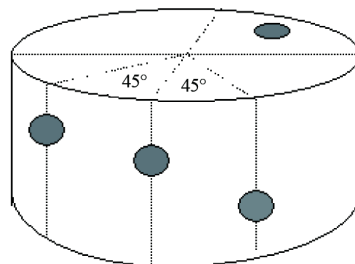


Figure 2. The schematic diagram of drilling coring in acoustic emission Kaiser effect test  
图 2. 声发射 Kaiser 效应试验岩样取心示意图

**Table 1.** The Kaiser core test results of Baikouquan Formation in Mahu Depression**表 1.** 玛湖凹陷百口泉组岩心声发射 Kaiser 试验结果

井号	层位	深度/m	岩性	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	两向应力差/MPa
玛 133	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3300.00	砂砾岩	64.31	53.01	11.30
玛 137	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3262.17	砂砾岩	74.22	58.08	16.14
玛 139	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3294.98	砂砾岩	70.97	54.89	16.08
玛 154	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3054.77	砂砾岩	65.26	50.11	15.15

注: T<sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>表示百口泉组 2 段 1 砂组。

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sqrt{1 + \tan^2 2\theta} + \alpha p_p - p_c \\ \sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sqrt{1 + \tan^2 2\theta} + \alpha p_p - p_c \\ \sigma_v = \sigma_{\perp} + \alpha p_p - p_c \\ \tan 2\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_3} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  水平向岩心 Kaiser 点应力, MPa;  $\sigma_{\perp}$  为垂直方向岩心的 Kaiser 点应力, MPa;  $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$  分别为最大、最小水平主地应力, MPa;  $\sigma_v$  为上覆地层压力, MPa;  $p_p$  为地层孔隙压力, MPa;  $\alpha$  为有效应力系数, 1;  $p_c$  为围压, MPa。

## 2.2. 三轴应力试验

岩石三轴应力试验采用 TAW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验机进行, 全套装置由加温恒温系统、高压三轴室、围压加压系统、轴向加压系统以及数据采集控制系统等 5 个主要部分组成。通过围压系统匀速加载围压模拟岩心地层环境条件下所处应力环境, 测试岩心弹性参数, 试验结果见表 2。

**Table 2.** The Results of triaxial mechanical test of cores in Baikouquan Formation of Mahu Depression**表 2.** 玛湖凹陷百口泉组岩心三轴岩石力学试验结果

井号	层位	取心深度/m	岩性	围压/MPa	试验结果	
					弹性模量/GPa	泊松比/1
玛 13	T <sub>1b<sub>3</sub></sub>	3018.00	砂砾岩	10	24.31	0.212
玛 131	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3190.11	砂砾岩	10	25.42	0.220
玛 133	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3300.00	砂砾岩	10	27.42	0.191
玛 137	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3263.24	砂砾岩	30	27.94	0.207
	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3292.25	砂砾岩	30	27.43	0.194
玛 139	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3298.77	砂砾岩	30	27.18	0.188
	T <sub>1b<sub>3</sub></sub>	3021.69	砂砾岩	30	23.69	0.185
玛 154	T <sub>1b<sub>2</sub><sup>1</sup></sub>	3055.08	砂砾岩	30	22.79	0.249

注: T<sub>1b<sub>3</sub></sub>表示百口泉组 3 段。

岩心受压破坏后多呈现裂缝扭曲现象, 典型结果见图 3。



Figure 3. The test result of core compressive and failure test  
图 3. 岩心抗压破坏试验结果图

### 2.3. 硬度试验

利用压入硬度仪对取得的玛 137 井百口泉组不同深度岩心进行硬度试验，并按照压入硬度分级标准进行分级，试验结果见表 3。

Table 3. The test results of core hardness detection in Well Ma137

表 3. 玛 137 井岩心硬度测试结果

取心深度/m	岩性	压入硬度/ $10^8$ MPa	硬度级别	硬度类别
3262.92	砂砾岩	2.46	2	软
3263.00	砂砾岩	2.44	2	软
3263.15	砂砾岩	2.82	3	中软
3264.04	砂砾岩	1.94	2	软
3264.11	砂砾岩	1.74	2	软
3265.17	砂砾岩	0.92	1	软

### 2.4. 支撑剂嵌入试验

利用岩心支撑剂嵌入试验仪匀速加载 52 MPa，对 20~40 目低密高强度陶粒支撑剂进行玛 139 井百口泉岩心嵌入试验，利用显微镜观察发现砾石单体嵌入量较低，约 25%粒径；基质部分嵌入量较深，可达 100%粒径。

## 3. 试验结果分析与砂砾岩储层压裂对策

1) 4 组声发射 Kaiser 效应试验得到的玛湖凹陷百口泉组储层最大、最小两向应力差为 11.30~16.14 MPa，最大、最小两向应力差较高，致使地层下储层岩石趋于偏塑性，水力压裂形成体积复杂缝的可能性极小，为最大限度扩大渗流面积，实现各级裂缝的有效支撑，推荐采用密切割方式的分簇射孔分段体积压裂工艺[4]。

2) 统计分析 8 组岩石三轴应力试验结果发现，玛湖凹陷百口泉组储层岩心静态弹性模量 22.79~27.94 GPa，静态弹性模量均小于 28.00 GPa，水力压裂形成的人工裂缝形态以平面缝为主，近井带推荐采用滑溜水尽可能造复杂裂缝，且大位移水平井改造层段较长，应适当提高排量，充分压开地层。

3) 4 组地应力测试点最小水平主地应力为 50.11~58.08 MPa, 压裂施工后闭合压力较高; 6 组压入硬度试验表明玛湖凹陷百口泉组储层岩石硬度属中软~软级别, 储层岩石较软; 4 组玛 139 储层岩心支撑剂嵌入试验表明砾石单体嵌入量约 25%粒径, 基质部分嵌入量达 100%粒径, 支撑剂总体嵌入较深。为达到理想压裂改造效果, 推荐适当加大加砂规模, 提高支撑剂铺置浓度[5] [6]。

4) 另外, 玛湖凹陷百口泉组储层砾石发育、分选差, 岩石应力试验中发现岩心受压破坏时易引起裂缝扭曲, 这会造成近井筒摩阻较大、前置液阶段起泵泵压高, 推荐采用前置酸预处理措施和多段塞方式降低近井筒摩阻, 从而降低施工压力、降低造缝难度。

#### 4. 现场实施效果

MaHW1325 井是玛湖凹陷玛 131 井区百口泉组油藏首口开发试验水平井, 水平段长度达 2007 m, 针对玛湖凹陷百口泉组低孔特低渗砂砾岩储层地应力以及岩石力学特征, 2015 年 12 月完成了对 MaHW1325 井进行桥塞-分簇射孔 22 段体积压裂, 采用前置液挤酸预处理、小粒径段塞等方式减少加砂施工难度, 为实现压裂改造效果采取适当提高施工排量、加大支撑剂铺设厚度以及近井地带滑溜水造复杂裂缝等措施。施工排量 6~10 m<sup>3</sup>/min, 施工最高压力 86 MPa, 入井压裂液总计 23,700 m<sup>3</sup>, 入井支撑剂总计 1702 m<sup>3</sup>, 分段施工排量和最高压力见图 4。

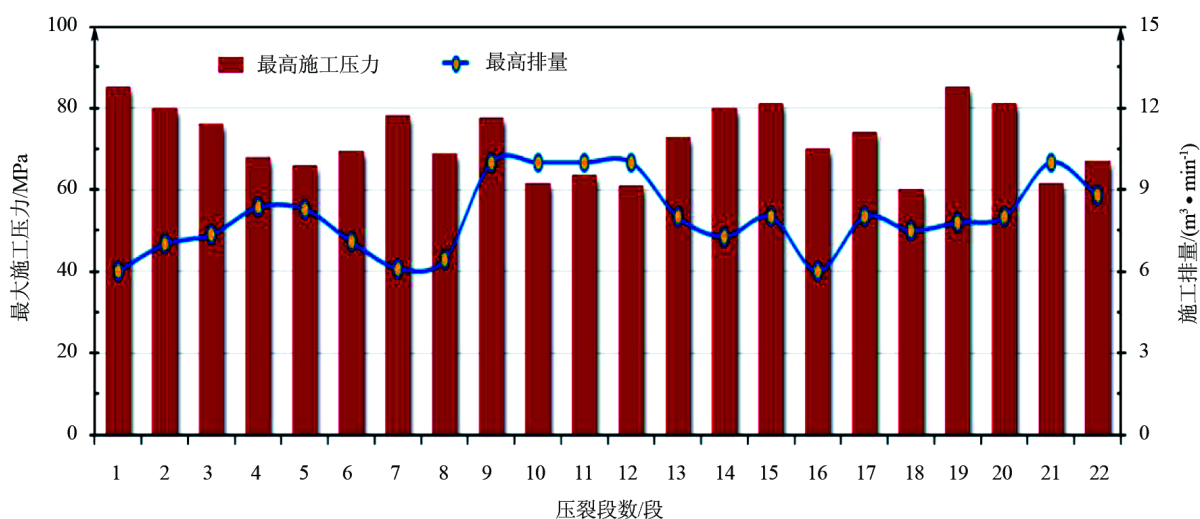


Figure 4. The sectional statistics of maximum pump pressure and displacement of Well MaHW1325

图 4. MaHW1325 井最高泵压与施工排量分段统计

截止到 2017 年 8 月下旬 MaHW1325 井生产 528 d, 累计产油 12,786.8 t, 平均日产油 24.2 t, 产油量和压力均保持稳定, 生产效果较好, 证明试验井 MaHW1325 井的压裂改造方案比较成功, 对玛湖凹陷百口泉组低孔特低渗砂砾岩油藏高效开发具有重要指导意义。

#### 5. 结论与建议

1) 玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储层两向地应力差高, 岩石储层岩心弹性模量小, 压裂形成人工裂缝形态以平面缝为主, 很难实现各级裂缝的有效支撑, 推荐采用密切割分段体积压裂工艺增大改造效果; 同时, 近井带推荐采用滑溜水尽可能造长、复杂裂缝; 储层岩石硬度级别为软~中软, 为达到理想压裂改造效果, 需要适当加大加砂规模, 提高支撑剂铺置厚度。

2) 砂砾岩储层压裂破坏时易引起裂缝扭曲, 极易造成近井筒摩阻较大, 推荐采用前置酸预处理措施

和多段塞方式降低近井筒摩阻，降低施工压力。

3) 试验井 MaHW1325 井产液量、产油量和压力均保持稳定，生产效果较好，证明试验井 MaHW1325 井的压裂改造方案比较成功，对玛湖凹陷百口泉组低孔特低渗砂砾岩油藏大规模高效开发具有重要指导和借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 单祥, 徐洋, 郭华军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷玛北斜坡玛 131 井区块三叠系百口泉组储层敏感性评价[J]. 地质科技情报, 2017, 36(1): 176-182.
- [2] 谭开俊, 王国栋, 罗慧芬, 等. 准噶尔盆地玛湖斜坡区三叠系百口泉组储层特征及控制因素[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(6): 83-88.
- [3] 梁则亮, 张顺存, 旷红伟, 等. 准噶尔盆地西北缘车拐地区三叠系储层特征研究[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 15-20.
- [4] 黄波, 谢斌, 李佳琦, 等. 吉木萨尔二叠系致密油岩石力学特性参数分析与压裂对策[J]. 岩土科学技术与工程, 2016, 16(25): 67-74.
- [5] 王海涛, 蒋廷学, 李远照, 等. 页岩气水平井压裂分段分簇综合优化方法[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(2): 218-221.
- [6] 蒋廷学, 贾长贵, 王海涛, 等. 页岩气网络压裂设计方法研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 36-40.

[编辑] 黄鹂

**Hans 汉斯**

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)