

# 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组储层水平井压裂效果地质影响因素研究

吕振虎<sup>1</sup>, 张羽鹏<sup>1</sup>, 董景锋<sup>1</sup>, 刘进军<sup>2</sup>, 蔡卓林<sup>1</sup>, 文贤利<sup>1</sup>, 刘吉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国石油新疆油田分公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依

<sup>2</sup>中国石油新疆油田分公司开发公司, 新疆 克拉玛依

<sup>3</sup>北京中科汇诚能源技术有限公司, 北京

收稿日期: 2023年5月9日; 录用日期: 2023年6月13日; 发布日期: 2023年6月21日

## 摘要

准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组碎屑岩储层非均质极强, 影响了储层压裂改造, 严重制约了石油的高效开发。选取玛湖凹陷百口泉组一段的储层样品, 应用岩屑数字化技术, 建立储层岩石物理模型, 结合射孔冲蚀面积, 重点分析研究百口泉组储层压裂效果影响因素。结果表明: 1) 百一段储层矿物组成以石英、钠长石和伊蒙混层为主, 储层非均质性较强, 储层平面孔隙度普遍小于5%, 孔隙类型主要以粒间孔和长石粒内孔为主, 同时发育有大量孔隙; 2) 根据储层矿物成分、孔隙结构建立岩石物理模型, 并利用测井声波进行校准, 结果表明百一段内储层岩石物理参数变化大; 3) 射孔冲蚀面积与储层脆性参数、裂隙发育成正相关关系。脆性参数越好、裂隙越发育, 进液量越大, 压裂效果越好。本研究对玛湖地区百口泉组碎屑岩储层压裂改造, 具有重要的指导及参考借鉴意义。

## 关键词

自动矿物学, 碎屑岩储层压裂改造, 岩石物理模型, 影响因素分析, 准噶尔盆地玛湖凹陷

# Analysis of Geological Factors Affecting Fracturing Effect of Horizontal Wells in Baikouquan Formation, Mahu Sag, Junggar Basin

Zhenhu Lyu<sup>1</sup>, Yupeng Zhang<sup>1</sup>, Jingfeng Dong<sup>1</sup>, Jinjun Liu<sup>2</sup>, Zhuolin Chai<sup>1</sup>, Xianli Wen<sup>1</sup>, Ji Liu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang

<sup>2</sup>Development Company, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang

<sup>3</sup>Beijing SINOZKHC Energy Solution Co., Ltd., Beijing

文章引用: 吕振虎, 张羽鹏, 董景锋, 刘进军, 蔡卓林, 文贤利, 刘吉. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组储层水平井压裂效果地质影响因素研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(6): 624-635. DOI: 10.12677/ag.2023.136059

## Abstract

The Triassic Baikouquan Formation clastic rock reservoir in Mahu Sag of Junggar Basin is highly heterogeneous, which affects the reservoir fracturing and severely restricts the efficient development of oil. We select the reservoir samples of the first member of Baikouquan Formation in Mahu Depression, apply the digital technology of rock cuttings, establish the reservoir rock physical model, combine the perforation erosion area, and focus on analyzing and studying the factors affecting the fracturing effect of Baikouquan Formation reservoir. The results show that: 1) The mineral composition of Baiyi Member reservoir is mainly composed of quartz, albite and Yimeng mixed layer, the reservoir heterogeneity is strong, the reservoir plane porosity is generally less than 5%, the pore type is mainly intergranular pore and feldspar intragranular pore, and a large number of pores are developed at the same time; 2) The petrophysical model is established according to the mineral composition and pore structure of the reservoir, and calibrated by logging acoustic wave. The results show that the petrophysical parameters of the reservoir vary greatly in the Baiyi section; 3) Perforation erosion area has a positive correlation with reservoir brittleness parameters and fracture development. The better the brittleness parameter, the more developed the fracture, the greater the fluid inflow, and the better the fracturing effect. This study has important guidance and reference significance for fracturing and reconstruction of Baikouquan Formation clastic rock reservoir in Mahu area.

## Keywords

Automatic Mineralogy, Fracturing and Reconstruction of Clastic Rock Reservoir, Rock Physical Model, Analysis of Influencing Factors, Mahu Depression, Junggar Basin

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

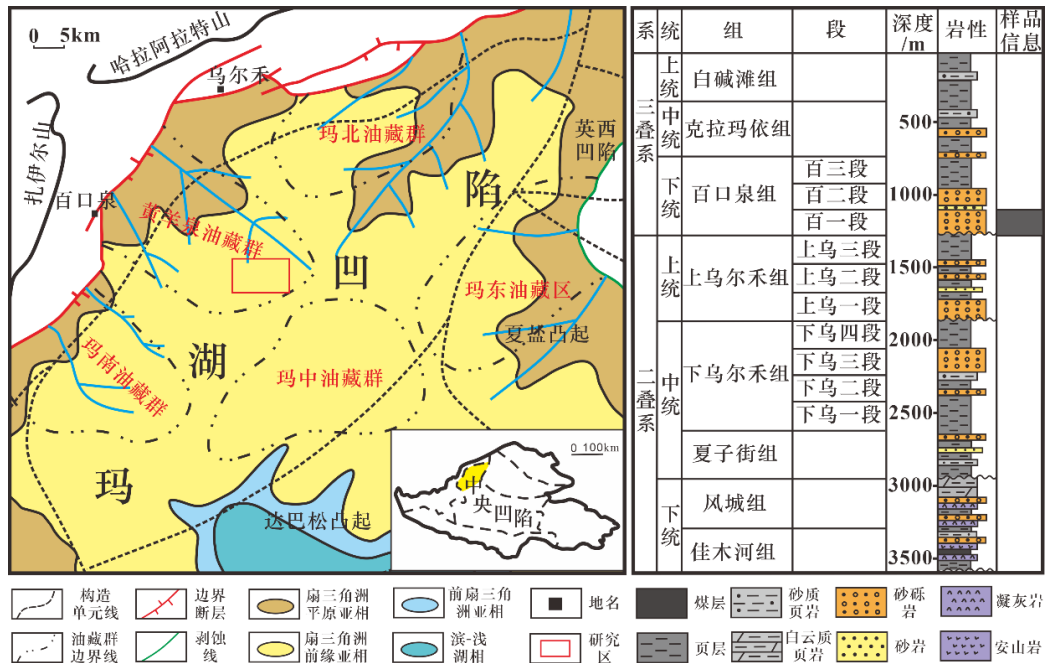
## 1. 前言

石油作为重要的化石能源,其供应量对人类社会经济发展有重要影响[1] [2] [3]。“十三五”期间新探明的石油储量中,70%为低品位资源,因此,对低品位资源的有效开采具有重要意义[4]。准噶尔盆地玛湖凹陷砾岩油藏作为低品位油藏之一,可采资源量较大[5]。前人对玛湖凹陷三叠系百口泉组碎屑岩储层的研究结果表明,整体为扇三角洲沉积体系,发育砂砾岩与泥岩或粉砂岩互层,平均粒径较大,纵向和横向上岩相变化快[6] [7] [8] [9] [10]。受岩相影响,储层物性变化大,孔隙类型复杂,含油性有较大差异[11] [12]。并且在水平井开发过程中,由于砾岩储层非均质性强,储层压裂改造效果不理想,产能差异性十分明显[13]-[18]。

前人的研究主要集中在岩性岩相、储层储集物性、成岩作用、孔隙结构以及工程压裂效果等方向,对于储层压裂改造过程中地质影响因素分析不够深入亦未完全搞清。鉴此,本文以研究区玛18井区为例,应用自动矿物学技术,重点研究碎屑岩储层矿物组成、孔隙及裂隙等控制影响油气开发效果的主要地质要素,在此基础上,通过岩石物理模型计算储层岩石物理参数,进一步开展水平井压裂改造效果地质影响因素的深入分析研究。

## 2. 区域地质概况

玛湖凹陷属于准噶尔盆地的次一级构造单元，位于西北缘断阶带下盘，为克拉玛依逆掩断裂带的山前凹陷，其被乌夏断裂带、中拐凸起、巴松凸起与石英滩凸起等构造带环绕[19]。玛湖凹陷于海西运移末期因板块碰撞形成，晚二叠世发育成为前陆型陆相盆地。盆地整体呈北东向-南西向，盆地面积约为五千平方公里。受到逆掩推覆、挤压、走滑、剥蚀抬升等构造作用影响，玛湖凹陷发育多期断裂，并存在多期地层不整合[20] [21]。



**Figure 1.** Sedimentary facies plan and stratigraphic sedimentary sequence of Baikouquan Formation in Mahu Depression  
**图 1.** 玛湖凹陷百口泉组沉积相平面图及地层沉积序列

玛湖凹陷上古生界及下中生界地层发育比较齐全，自二叠系以来发育包括佳木河组、风城组、夏子街组、下乌尔禾组、上乌尔禾组、百口泉组、克拉玛依组、白碱滩组等多套地层[22] (图 1)。本次研究目的层位为三叠系百口泉组，其与下伏二叠系上乌尔禾组地层呈不整合接触，根据旋回可细分为百一段 ( $T_1b_1$ )、百二段 ( $T_1b_2$ )、百三段 ( $T_1b_3$ ) 三段小层[23] [24]。

玛湖凹陷百口泉组储层岩石类型主要为岩屑砂砾岩为主，砾石成分主要为凝灰岩和花岗岩，填隙物主要为泥杂基，沉积相主要为扇三角洲前缘[25]。储层平均孔隙度在 10% 以下，平均渗透率为 5.54 mD，是典型的低孔低渗碎屑岩储层[26]。储层成岩作用主要以压实和溶蚀作用为主，主要发育粒内溶孔[27]。玛湖地区百口泉组储层发生过三期原油充注，后两期充注使百口泉组成藏[28]。

## 3. 实验原理及方法

### 3.1. 实验原理

自动矿物学技术是一种利用扫描电镜分析矿物成分的方法。首先，在真空条件下，利用扫描电镜产生的高压电子束照射样品表面，通过探测器收集背散射电子，形成背散射电子图像(BSE)，利用 BSE 识别出被环氧树脂保护的岩屑颗粒，在岩屑颗粒上部署网格，在每一个网格点内采集能谱信息。通过 BSE

图像灰度值、能谱化学成分及能谱信息来识别矿物。此外，由于矿物颗粒和孔缝在电子束照射时产生的背散射电子有差异，可以根据 BSE 图像灰度差异识别矿物颗粒和孔缝。然后根据孔缝图像的形状来识别孔隙和裂缝[29] [30] [31]。

### 3.2. 实验方法

实验设备为中科汇诚公司实验室提供的 RoqSCAN 自动矿物分析仪，该设备由卡尔蔡司扫描电镜 (SEM)、布鲁克能谱系统(EDS)及 SmartPI™ 矿物分析软件组成(图 2)。



Figure 2. Experimental instrument  
图 2. 实验仪器

样品制备过程包括以下工作：1) 岩屑洗油，利用洗油剂对岩屑样品进行充分洗油；2) 树脂固定，将样品放入环氧树脂中固定，防止岩屑发生颗粒掉落；3) 剖光，利用机械剖光机或者离子剖光机对样品检测面进行剖光；4) 镀碳，在样品检测面喷碳处理，增加样品表面导电性。

样品测量过程如下：1) 将制备好的样品放入样品台；2) 使用 SmartPI™ 软件选择样品类型对应的数据库，调整图像清晰度；3) 开始自动测量。

实验样品来自于玛湖地区玛 18 井区块百口泉组一段实际地层，利用岩屑数字化技术开展储层特征分析。取样井为水平井 M62XX，取样位置为压裂井段第八段，井深范围为 4389.75~4449.5 m。

## 4. 实验结果

### 4.1. 储层矿物特征

根据实验结果显示(图 3)，总体上，百口泉组一段储层矿物主要以碎屑岩矿物为主，碎屑岩矿物类型多为石英(纯)、石英(风化)和钠长石，石英(纯)是指石英颗粒经过矿物成分识别后，只包含石英，不含有其他杂质成分。石英(纯)含量范围为 11.85%~35.61%，平均值为 24.05%；石英(风化)含量范围为 19.69%~30.93%，平均值为 25.23%，钠长石平均含量为 25.41%。粘土矿物主要为伊蒙混层，平均含量为 17.03%，此外还含有少量的高岭石和绿泥石，碳酸盐类矿物部分深度上含有少量的方解石。重矿物及副矿物主要含有金红石、磷灰石，部分层位含有岩盐和重晶石。随着钻井深度的增加，储层矿物成分变化快，非均质性强。实验结果表明，储层主要以脆性矿物为主。

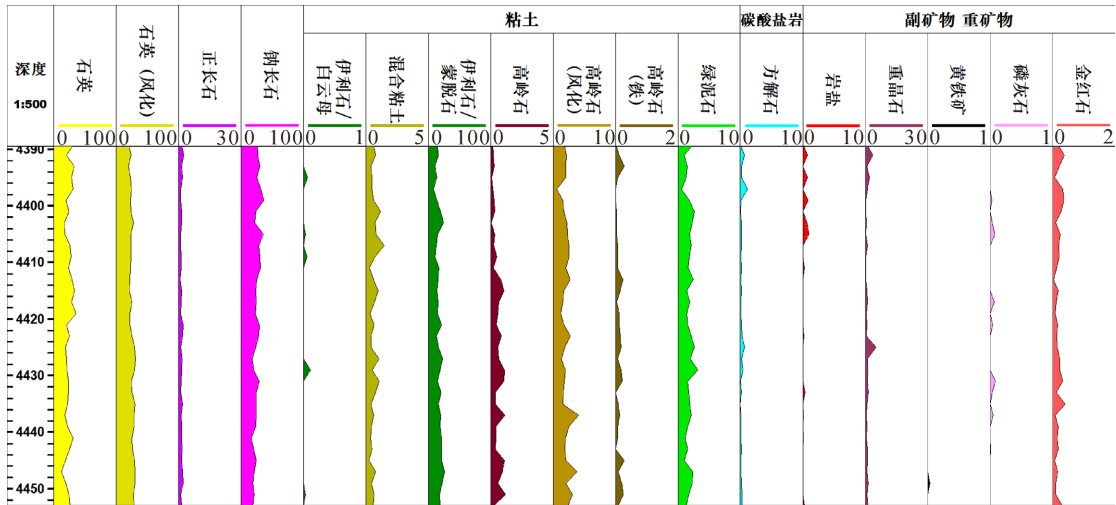


Figure 3. Mineral composition characteristics of Baiyi Formation  
 图 3. 百一段地层矿物成分特征

#### 4.2. 孔隙结构及裂隙发育特征

由于砾岩油藏储层致密、非均质性强，因此评价孔隙结构及裂隙发育情况具有重要意义。百一段地层平面孔隙度普遍小于 5%，平均值为 4.64%，属于致密储层。平面孔隙以小于 200  $\mu\text{m}^2$  的小孔为主，面积分布在 0~10  $\mu\text{m}^2$  的微孔数量最多，孔隙形状以圆形为主(图 4)。在百一段内，裂隙发育不均匀，裂隙数量平均为 4.19，最大值达到 9。孔隙度变化和裂隙发育情况表明，百一段储层非均质性较强。同时，孔隙和裂隙多发育在长石和粘土矿物发育的位置，长石发育越多，孔隙发育越密集，孔隙主要以粒间孔和长石粒内孔为主(图 5)。

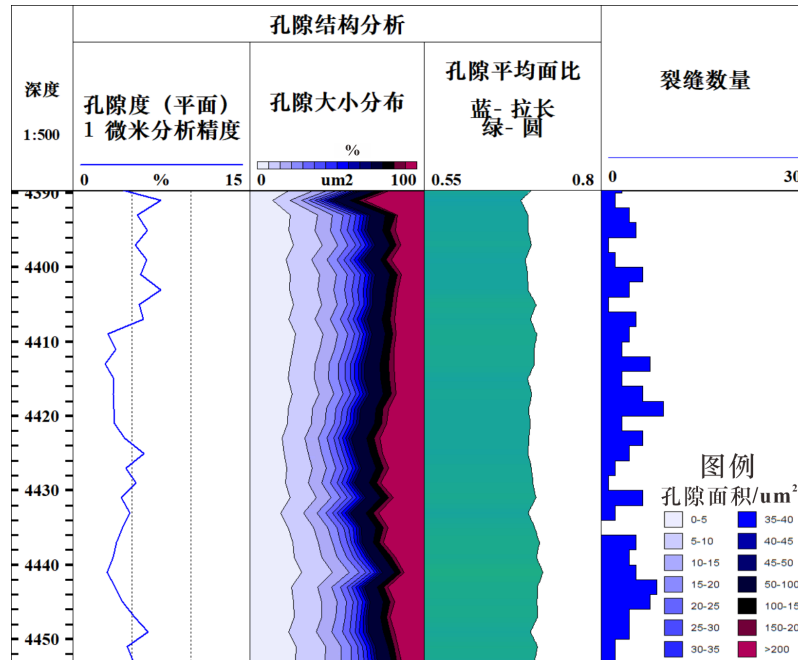
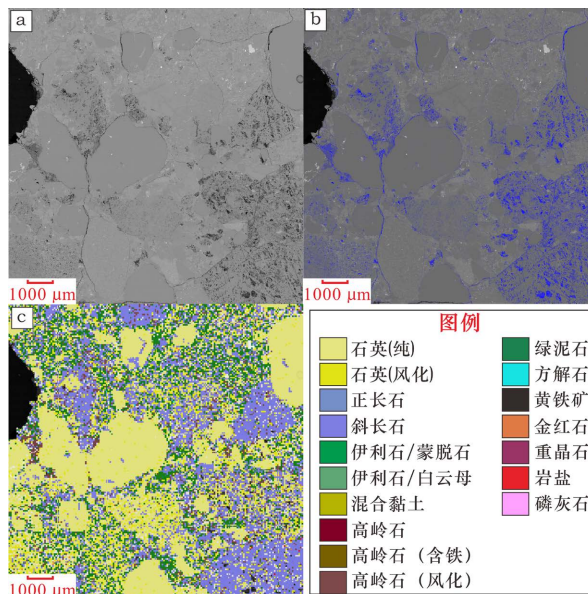


Figure 4. Development characteristics of formation pores and fractures in Baiyi Member  
 图 4. 百一段地层孔隙及裂隙发育特征



(a) 4441 m 背散射电子图像; (b) 4441 m 孔隙蒙特奇图; (c) 4441 m 矿物蒙特奇图

Figure 5. RoqSCAN scanning image of formation samples in Baiyi Member  
图 5. 百一段地层样品 RoqSCAN 扫描图像

## 5. 基于岩屑数字化技术的岩石物理参数计算

### 5.1. 岩石物理模型建立

针对砾岩地层，采用颗粒支撑的微观模式，同时考虑流体对岩石物理性质的影响。其岩石物理模型的建立过程如图 6 所示：1) 将岩石组分均匀混合构成固体基质；2) 用颗粒支撑模型将固体基质变成岩石骨架；3) 向岩石骨架内加入流体，形成饱和流体岩石模型。

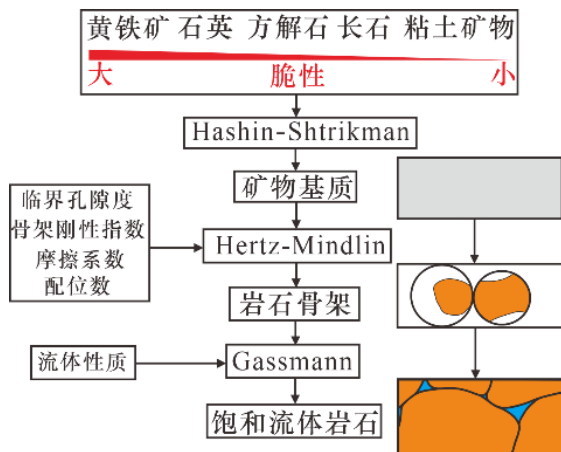


Figure 6. Establishment process of rock physical model  
图 6. 岩石物理模型建立过程

#### 5.1.1. 基质模型

一般，要预测地层的等效弹性模量，要知道各个组分的体积含量、弹性模量和空间几何分布。如果

没有空间几何分布特征,就只能知道等效弹性模量的上下限。Voigt [32]和 Reuss [33]分别提出等效弹性模量的上下界限理论,在此基础上, Hill 提出 Voigt-Reuss-Hill 模型[34]。

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (1)$$

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (2)$$

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (3)$$

式中:  $f_i$  表示第  $i$  个组分的体积含量,  $M_R$  表示第  $i$  个组分的弹性模量。

在此基础上, Hashin 和 Shtrikman 提出了多项介质的等效弹性模量[35]。在双相介质中, 其值为:

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{f_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + f_1 \left( K_1 + \frac{4}{3} \mu_1 \right)^{-1}} \quad (4)$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{f_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + \frac{2f_1 (K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1 \left( K_1 + \frac{4}{3} \mu_1 \right)}} \quad (5)$$

其中  $K_1$ 、 $K_2$  是各组分的体积模量,  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  是各组分的剪切模量,  $f_1$ 、 $f_2$  是各组分的体积含量。当 1 表示体积模量小的组分时, 求解的就是下限。

### 5.1.2. 接触模型

接触模型主要为表征粒状物质的等效弹性特征, 适用于砾岩储层。接触模型应用最多的为 Hertz [36] 和 Mindlin [37] 的接触模型。

$$D_n = \frac{4\mu_m a}{1 - \nu_m} \quad (6)$$

$$D_t = \frac{2}{du_t / dF_t} = \frac{8\mu_m a (1 - F_t / \eta F_n)^{1/3}}{2 - \nu_m} \quad (7)$$

其中  $\nu_m$  加为泊松比,  $\mu_m$  是球体的剪切模量,  $a$  是接触面积的半径;  $F_n$  是外加的法向力,  $F_t$  是切向力,  $\eta$  是摩擦系数。

### 5.1.3. 饱和和流体岩石模型

在实际地层中, 岩石是饱和流体的, 因此岩石物理模型需要预测饱和和流体岩石的弹性模量。Gassmann [38] 提出了饱和和流体岩石的弹性模量公式:

$$K = K_d + \frac{\left( 1 - \frac{K_d}{K_m} \right)^2}{\frac{\varphi}{K_l} + \frac{1 - \varphi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}}, \mu = \mu_d \quad (8)$$

式中:  $K$  是饱和和流体岩石体积模量、 $K_l$  是孔隙流体体积模量、 $K_d$  是岩石骨架体积模量、 $K_m$  是组成岩石的矿物的体积模量、 $\mu$  是饱和和流体岩石的剪切模量,  $\mu_d$  分别是岩石骨架的剪切模量,  $\varphi$  是孔隙度。

## 5.2. 砾岩岩石物理模型校正

根据上述的岩石物理建模方法, 输入地层矿物组分、孔隙结构、裂缝发育情况及地层流体性质就可

以建立砾岩岩石物理模型。模型参数配位数为 9，临界孔隙度取 40%，地层压力系数取 1.2，上覆压力根据平均密度法取 95 MPa，温度取 93 摄氏度，骨架刚性指数(MSI)为  $2.987 * \exp(-0.039 * \text{粘土矿物体积分数})$ 。将岩石物理模型计算所得的密度和声波参数与测井所得的声波进行对比，结果如图 7 所示，模拟声波与实测声波相关度为 0.70，相关度系数表明，砾岩岩石物理模型能够较好的模拟百一段地层的岩石岩石力学参数。

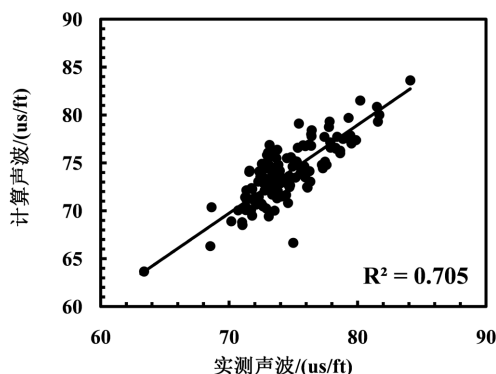
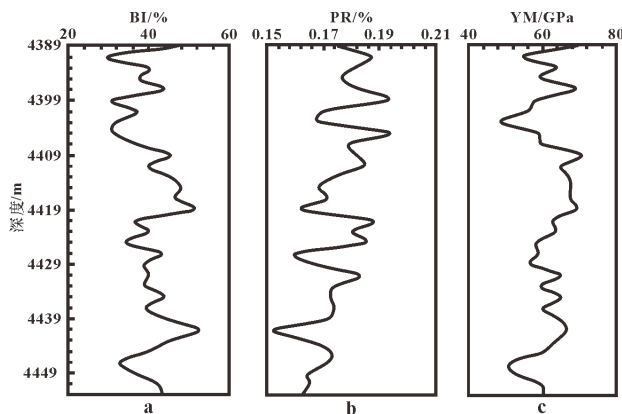


Figure 7. Comparison between model calculated sound wave and measured sound wave  
图 7. 模型计算声波与实测声波对比

### 5.3. 岩石力学参数的计算

一般的，杨氏模量反应岩石的刚性，泊松比表示岩石抗破的能力[39]，根据校正后的岩石物理模型计算杨氏模量、泊松比。研究表明(图 8)，百口泉组一段杨氏模量范围为 48.4~70.49 GPa，平均值为 61.65 GPa；泊松比平均值为 0.17，整体在 0.15~0.2 之间波动，呈现随着井深的增加，泊松比下降的趋势。同时，杨氏模量和泊松比变化较快。



(a) 脆性指数; (b) 泊松比; (c) 杨氏模量

Figure 8. Characteristics of rock mechanical parameters  
图 8. 岩石力学参数特征

脆性指数是指岩石脆性及描述岩爆倾向的参数，Rickman [40]通过对美国 Barnnet 页岩的统计分析，提出了基于归一化的杨氏模量和泊松比的脆性指数：

$$BI_{Rickman} = \frac{1}{2} \left( \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\sigma - \sigma_{\max}}{\sigma_{\min} - \sigma_{\max}} \right) \quad (9)$$



其中,  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  分别代表工区最大、最小杨氏模量和最大、最小泊松比。

对百口泉组的 BIRickman 进行统计, 结果表明: BIRickman 分布在 29.81~52.53% 之间, 平均值为 40.41%。百口泉组脆性参数的变化速度比较快, 非均质性比较强。

## 6. 水平井压裂效果评估

### 6.1. 鹰眼检测原理

鹰眼井下视像系统是利用光纤、测井电缆或者同轴电缆将井下摄像仪器下入井筒中, 在途中进行匀速的照片采集。将拍摄的井下情况直接在地面的监视器屏幕上显示出来, 并利用配套的图片处理软件进行图像的处理, 对井下情况进行直观的展现[41]。在压裂过程中, 鹰眼冲蚀面积与改造效果相关关系如下:

$$P_{pf} = \frac{0.1461Q^2\rho}{A^2N_p^2C_p^2} \quad (10)$$

其中  $P_{pf}$  为炮眼摩阻压力, psi;  $Q$  为排量, bpm;  $\rho$  为携砂液密度, lb/gal;  $C_p$  为射孔释放系数;  $N_p$  为炮眼数;  $A$  为炮眼面积, in<sup>2</sup>;  $V$  为流速, m/s。

流速增大导致冲蚀增加, 射孔半径变大, 流速下降, 摩阻阻力下降, 压差上升, 导流能力加强, 冲蚀面积进一步增加。平均冲蚀面积大, 导流效率高, 改造趋势趋好。

### 6.2. 鹰眼检测技术对压裂效果的评估

利用鹰眼井下监视系统对射孔在压裂过程中的溶蚀情况进行研究, 射孔的冲蚀面积反映了进液量的多少, 玛湖凹陷进液量与射孔的冲蚀面积成正相关关系[42]。表 1 表明, 溶蚀面积较大的主要为第 4 簇, 平均冲蚀面积为 126.01 mm<sup>2</sup>。各簇之间的冲蚀面积的相差较大, 冲蚀面积范围在 21.58~126.01 mm<sup>2</sup>, 说明在每段各射孔的进液量差距较大, 储层改造不均匀。

**Table 1.** Perforation erosion area of the eighth section of well M6285

**表 1.** M6285 井第八段射孔冲蚀面积

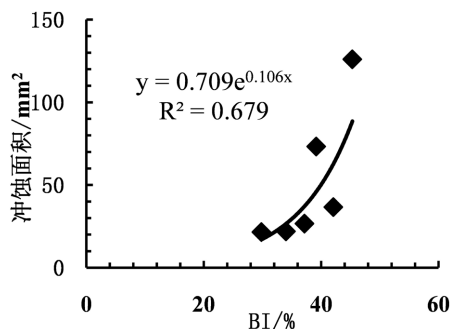
深度/m	簇	平均冲蚀面积/mm <sup>2</sup>
4391	第 1 簇	36.68
4403	第 2 簇	73.29
4413	第 3 簇	22
4425	第 4 簇	126.01
4437	第 5 簇	26.7
4451	第 6 簇	21.58

## 7. 水平井压裂效果地质影响因素

对水平井压裂效果影响因素的评价是后期对砾岩油藏增产改造的关键, 在实验结果的基础上, 结合玛湖地区的地质条件, 将岩石力学参数、裂隙发育、矿物成分作为主要的影响因素进行分析。

### 7.1. 岩石力学参数的影响

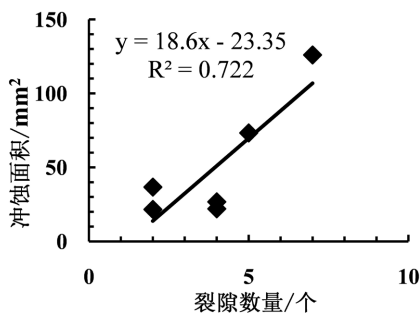
脆性指数主要指岩石在外力作用下发生破裂的性质。研究表明, 冲蚀面积与脆性参数呈自然对数的正相关关系(图 9), 即, 随着脆性参数的变大, 水力压裂过程中, 射孔的冲蚀面积变大, 射孔的进液量更多。说明脆性指数是影响玛湖砾岩油藏压裂效果的重要参数, 脆性参数越高, 压裂后越容易发生裂隙, 进液量越多, 压裂效果越好, 开采的价值越大。



**Figure 9.** Correlation between erosion area and brittleness index  
**图 9.** 冲蚀面积与脆性指数相关性

## 7.2. 裂隙发育的影响

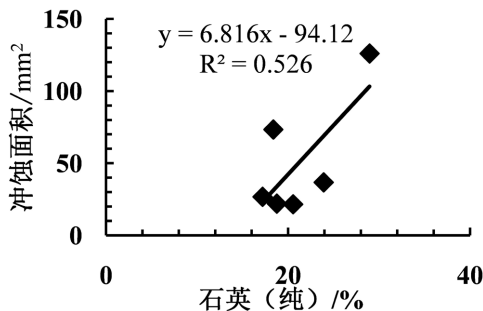
前人研究结果表明, 裂隙的发育与岩石的薄弱面有密切的关系, 一般的, 岩石的薄弱面总是容易发育裂隙。结合射孔的冲蚀面积与裂隙发育条数进行研究, 结果表明, 总体上, 随着裂隙发育的增多, 射孔的冲蚀的面积增大。在百一段内, 裂隙发育多的位置, 压裂效果越好(图 10)。



**Figure 10.** Correlation between erosion area and fracture development  
**图 10.** 冲蚀面积与裂隙发育相关性

## 7.3. 矿物成分的影响

玛湖地区百口泉组的矿物成分主要以石英、长石等脆性矿物为主, 平均含量占比在 70% 以上。脆性矿物含量越高, 储层脆性越强, 有利于裂隙在储层中扩展。研究表明, 石英(纯)含量与射孔冲蚀面积有一定的线性相关关系, 石英(纯)含量越高, 射孔冲蚀面积越大(图 11)。说明石英(纯)矿物含量越高, 在压裂过程中, 有利于裂隙在储层中扩展。



**Figure 11.** Correlation between erosion area and quartz (pure)  
**图 11.** 冲蚀面积与石英(纯)相关性

## 8. 结论

本文使用自动矿物学测量方法, 建立岩石物理模型, 讨论地质条件对工程压裂的影响, 得出以下结论:

1) 玛湖地区百口泉组一段的矿物成分主要为石英(纯)、石英(风化)与钠长石, 粘土矿物主要以伊蒙混层为主, 矿物成分随钻井深度变化快。储层物性差, 主要以小孔为主, 储层普遍发育裂隙, 非均质性强。

2) 结合玛湖地区的地质背景, 建立玛湖地区的岩石物理模型。根据测试结果, 杨氏模量、泊松比和脆性参数随着钻井深度的增加变化速度快, 非均质强。

3) 射孔的冲蚀面积反映了压裂过程中进液量的大小。通过鹰眼检测技术对射孔面积进行描述, 结果表明, 由于百一段储层非均质性强, 各簇之间进液量差距大, 各射孔位置的裂隙。

4) 玛湖地区百一段压裂过程中, 地层脆性参数、裂隙发育与矿物含量对进液量存在影响, 地层脆性参数越大、裂隙越发育, 脆性矿物含量越高, 射孔溶蚀面积越大, 进液量越多, 压裂效果越好。

## 参考文献

- [1] Snow, N. (2013) Shale Gas, Tight Oil to Reshape Global Markets by 2030. *Oil & Gas Journal*, **111**, 25.
- [2] Snow, N. (2012) Continued R&D Essential to Tap US Tight Oil, Panel Told. *Oil & Gas Journal*, **110**, 25-27.
- [3] 陆统智, 曾溅辉, 王濡岳, 等. 柴达木盆地英西地区致密油成藏物理模拟实验[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 256-266.
- [4] 雷群, 胥云, 才博, 等. 页岩油气水平井压裂技术进展与展望[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 166-172, 182.
- [5] 贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 546-560.
- [6] 李军, 唐勇, 吴涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷砾岩大油区超压成因及其油气成藏效应[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 679-690.
- [7] 张顺存, 邹妞妞, 史基安, 等. 准噶尔盆地玛北地区三叠系百口泉组沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 640-650.
- [8] Jia, H.B., Ji, H.C., Li, X.W., et al. (2016) A Retreating Fan-Delta System in the Northwestern Junggar Basin, Northwestern China: Characteristics, Evolution and Controlling Factors. *Journal of Asian Earth Sciences*, **123**, 162-177. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.04.004>
- [9] Kang, X., Hu, W.X., Cao, J., et al. (2019) Controls on Reservoir Quality in Fan-Deltaic Conglomerates: Insight from the Lower Triassic Baikouquan Formation, Junggar Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, **103**, 55-75. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.02.004>
- [10] 康逊, 胡文瑄, 曹剑, 等. 钾长石和钠长石差异溶蚀与含烃类流体的关系: 以准噶尔盆地艾湖油田百口泉组为例[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1381-1393.
- [11] 靳军, 康逊, 胡文瑄, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡百口泉组砂砾岩储层成岩作用及对储集性能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 323-333.
- [12] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127-137.
- [13] 李国欣, 覃建华, 鲜成钢, 等. 致密砾岩油田高效开发理论认识、关键技术与实践: 以准噶尔盆地玛湖油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1185-1197.
- [14] 雷群, 翁定为, 管保山, 等. 基于缝控压裂优化设计的致密油储集层改造方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 592-599.
- [15] 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 等. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474-482.
- [16] Aziz, K., Arbabi, S. and Deutsch, C.V. (1999) Why Is It So Difficult to Predict the Performance of Horizontal Wells. *JCPT*, **38**, 37-45. <https://doi.org/10.2118/99-10-03>
- [17] 邹雨时, 石善志, 张士诚, 等. 致密砾岩加砂压裂与裂缝导流能力实验: 以准噶尔盆地玛湖致密砾岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1202-1209.
- [18] 曹炜, 鲜成钢, 吴宝成, 等. 玛湖致密砾岩油藏水平井生产动态分析及产能预测——以玛 131 小井距立体开发平

- 台为例[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 442-449.
- [19] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 845-861.
- [20] 张仲培, 张宇, 张明利, 等. 准噶尔盆地中部凹陷区二叠系-三叠系油气成藏主控因素与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 559-568.
- [21] 周路, 朱江坤, 宋永, 等. 玛湖凹陷玛中-玛东地区三叠系百口泉组断裂特征及控藏作用分析[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 248-261.
- [22] 谭开俊, 王国栋, 罗惠芬, 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.
- [23] Zhang, C.M., Song, X.M., Wang, X.J., *et al.* (2020) Origin and Depositional Characteristics of Supported Conglomerates. *Petroleum Exploration and Development*, **47**, 292-305. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60047-7](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60047-7)
- [24] Xi, K.L., Cao, Y.C., *et al.* (2021) Diagenetic Variations with Respect to Sediment Composition and Pale-Fluids Evolution in Conglomerate Reservoirs: A Case Study of the Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin, Northwestern China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **197**, Article ID: 107943. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107943>
- [25] 唐勇, 宋永, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷源上致密砾岩油富集的主控因素[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 192-206.
- [26] 张代燕, 户海胜, 王英伟. 准噶尔盆地三叠系百口泉组特低渗砂砾岩储层孔喉结构定量表征[J]. 特种油气藏, 2021, 28(4): 23-30.
- [27] 伍顺伟, 夏学领, 朱世杰. 玛北油田 XIA72 井断块百口泉组钙质砂砾岩成因[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 404-409.
- [28] 齐雯, 潘建国, 王国栋, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区百口泉组储层流体包裹体特征及油气充注史[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(S1): 64-71.
- [29] 李立, 庞江平, 瞿子易. 钻探现场矿物自动化分析技术进展及应用前景[J]. 天然气工业, 2018, 38(6): 46-52.
- [30] 陈明, 唐诚, 欧传根, 等. RoqSCAN 技术在川南页岩气录井中的应用效果分析[J]. 录井工程, 2020, 31(2): 21-28.
- [31] Li, G., Li, G., Wang, Y., *et al.* (2019) A Rock Physics Model for Estimating Elastic Properties of Upper Ordovician-Lower Silurian Mudrocks in the Sichuan Basin, China. *Engineering Geology*, **266**, Article ID: 105460. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105460>
- [32] Voigt, W. (1928) *Lchrbuch der Kristallphysik*. Teubner, Leipzig.
- [33] Reuss, A. (1929) Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizität bedingung für einkristalle. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik aus Mechanik*, **9**, 49-58. <https://doi.org/10.1002/zamm.19290090104>
- [34] Hill, R. (1952) The Elastic Behavior of Crystalline Aggregate. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, **65**, 349-354. <https://doi.org/10.1088/0370-1298/65/5/307>
- [35] Hashin, Z. and Shtrikman, S. (1963) A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behavior of Multiphase Materials. *Journal of Mechanics and Physics Solids*, **2**, 127-140. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
- [36] Love, A.E.H. (1944) *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Dover, New York.
- [37] Mindlin, R.D. (1949) Compliance of Elastic Bodies in Contact. *Journal of Applied Mechanics*, **16**, 259-268. <https://doi.org/10.1115/1.4009973>
- [38] Gassmann, F. (1951) Elastic Waves through a Packing of Spheres. *Geophysics*, **16**, 673-685. <https://doi.org/10.1190/1.1437718>
- [39] 朱颜, 韩向义, 岳欣欣, 等. 致密砂岩储层脆性测井评价方法研究及应用——以鄂尔多斯盆地渭北油田为例[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1239-1247.
- [40] Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., *et al.* (2008) A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *The SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, September 2008, SPE-115258-MS. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- [41] 张治华, 陈照明, 王宝剑, 等. 鹰眼 II 井下视像系统简介[J]. 油气井测试, 2002(6): 70-71+76.
- [42] 臧传贞, 姜汉桥, 石善志, 等. 基于射孔成像监测的多簇裂缝均匀起裂程度分析: 以准噶尔盆地玛湖凹陷致密砾岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 394-402.