

# 基于分形理论的多因素耦合酸蚀裂缝导流能力预测模型研究

郑环<sup>1</sup>, 李沁<sup>1,2</sup>, 任杰<sup>1</sup>, 张琴<sup>1</sup>, 罗志彬<sup>1</sup>

<sup>1</sup>成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川 成都

<sup>2</sup>油气藏地质及开发全国重点实验室(成都理工大学), 四川 成都

收稿日期: 2025年2月24日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月16日

## 摘要

导流能力是衡量碳酸盐岩酸压效果的关键参数, 其稳定性和持久性直接影响深层、高温高压碳酸盐岩储层的改造效果。然而, 由于岩石力学性质、矿物组成及储集空间特征等多因素的耦合作用, 酸蚀裂缝的导流能力难以精准预测。为此, 本文基于分形理论, 结合实验测定与数学建模, 构建了多因素耦合酸蚀裂缝导流能力预测模型。研究结果表明, 渗透率是主控因素, 其增加可显著提升导流能力(40%~136%), 远超其他参数。矿物组成亦起关键作用, 方解石和白云石含量的增加可分别提升导流能力(5.30%~23.90%), 而非碳酸盐岩矿物含量增加则导致导流能力下降(8.5%~15.2%)。此外, 杨氏模量与导流能力呈正相关, 每增加10 GPa可提升1%~52%, 而泊松比呈负相关, 每增加0.02使导流能力降低1%~5%。相比之下, 孔隙度的影响相对较小, 每增加1%仅提升约1%。本研究为酸蚀裂缝导流能力的精确预测提供了理论支持, 可为酸压施工优化提供重要参考。

## 关键词

碳酸盐岩, 裂缝空间, 导流能力, 预测模型

## Research on the Prediction Model of Multi Factor Coupled Acid Fracture Conductivity Based on Fractal Theory

Huan Zheng<sup>1</sup>, Qin Li<sup>1,2</sup>, Jie Ren<sup>1</sup>, Qin Zhang<sup>1</sup>, Zhibin Luo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>National Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development (Chengdu University of Technology), Chengdu Sichuan

文章引用: 郑环, 李沁, 任杰, 张琴, 罗志彬. 基于分形理论的多因素耦合酸蚀裂缝导流能力预测模型研究[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 525-537. DOI: 10.12677/ojns.2025.133056

## Abstract

Conductivity is a key parameter to measure the effect of acid fracturing in carbonate rocks, and its stability and durability directly affect the transformation effect of deep, high-temperature and high-pressure carbonate reservoirs. However, it is difficult to accurately predict the flow-conducting capacity of acid fracture due to the coupling of multiple factors, such as rock mechanical properties, mineral composition and reservoir space characteristics. For this reason, this paper constructs a multifactor coupled acid-etched fracture flow capacity prediction model based on fractal theory, combining experimental measurement and mathematical modelling. The results show that permeability is the main controlling factor, and an increase in permeability can significantly increase the flow capacity (40%~136%), which is much higher than other parameters. Mineral composition also plays a key role, as the increase of calcite and dolomite content can enhance the flow conductivity (5.30%~23.90%), while the increase of non-carbonate rock mineral content leads to the decrease of flow conductivity (8.5%~15.2%). In addition, Young's modulus was positively correlated with the hydraulic conductivity, with each increase of 10 GPa enhancing it by 1%~52%, while Poisson's ratio was negatively correlated, with each increase of 0.02 decreasing hydraulic conductivity by 1%~5%. In contrast, the effect of porosity is relatively small, with only about 1% enhancement per 1% increase. This study provides theoretical support for the accurate prediction of the flow conductivity of acid-etched fractures, which can provide an important reference for the optimization of acid pressure construction.

## Keywords

Carbonate Rock, Crack Space, Conductivity, Prediction Model

Copyright © 2025 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. 引言

碳酸盐岩储层蕴藏着全球约 48%的原油和 28%的天然气,单井产量高,在油气工业中备受关注。酸压工艺是碳酸盐岩储层改造的关键技术之一,而酸蚀裂缝导流能力已成为评价酸压效果的重要指标[1]。裂缝形态、岩矿组成、孔渗特性和岩石力学参数等因素都会影响导流能力,其准确预测对优化酸压设计至关重要[2]。

酸蚀裂缝导流能力的研究可追溯至 20 世纪 70 年代,最早的 N-K 模型[3] [4],基于溶蚀岩石的等效导流能力。随后,“钉床”模型[5]和 Walsh 模型[6]分别考虑裂缝粗糙度与随机粗糙颗粒的影响。Tsang & Witherspoon [7]采用孔隙模型描述裂缝几何形态,提出基于立方定律的导流能力计算方法。Gong [8]利用光反射成像技术,建立了闭合压力、裂缝形态与导流能力之间的联系。Mou [9]在 N-S 方程基础上模拟裂缝刻蚀形态及非均质性,并在此基础上,Deng [10] [11]进一步考虑裂缝粗糙度、几何形态和闭合应力的影响,提出更复杂的模型。近年来,研究者还关注酸液体系、地应力、岩石力学等对导流能力的影响,并研究水力梯度、裂缝粗糙度、裂缝夹角及尺度效应在单一裂缝中的非线性流动规律[12]-[15]。

当前研究仍存在两大问题:(1) 裂缝空间表征方法存在局限,现有方法多基于单面粗糙度、分形维数、峰态值等参数,无法全面反映裂缝的真实三维形态,而吻合度虽然能描述闭合特征,但不能有效刻画空间形态。(2) 导流能力模型仍以经验或改进模型为主,未能充分考虑酸蚀裂缝空间形态、岩石力学特性、

闭合应力及裂缝接触状态的综合作用, 亟需建立更加完善的多因素耦合预测模型, 以提高对酸蚀裂缝长期导流能力的预测精度。

## 2. 酸蚀裂缝导流能力预测模型理论研究

酸压裂缝导流能力预测模型的研究始于 20 世纪 70 年代, 国内外学者通过理论推导与经验假设不断优化模型, 以提升预测精度。目前, 主要的预测模型包括:

### (1) N-K 模型

Nierod 等基于白云岩圆柱岩心酸压实验提出 N-K 模型, 该模型假设裂缝为理想缝宽, 并考虑岩石嵌入强度、裂缝宽度及闭合应力对导流能力的影响。其计算公式为:

$$C_f = 1.46 \times 10^7 \omega_i^{2.446} e^{-C\sigma} \quad (1)$$

其中:

$$C = \begin{cases} (1.39 - 1.3 \ln S_f) \times 10^{-3} & S_f < 137.9 \text{ MPa} \\ (3.8 - 0.28 \ln S_f) \times 10^{-3} & S_f > 137.9 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $C_f$ ——酸压裂缝导流能力,  $\text{mD} \cdot \text{m}$ ;  $\omega_i$ ——裂缝理想缝宽,  $\text{m}$ ;  $\sigma$ ——闭合应力,  $\text{MPa}$ ;  $S_f$ ——岩石上覆压力,  $\text{MPa}$ 。

该模型考虑了岩石嵌入强度、裂缝缝宽、闭合应力对导流能力的影响, 后续发展的导流能力预测模型多是在此基础上进行引用并不断改进。

### (2) “钉床”模型

Gangi 假设裂缝面由不同长度的束状棒体组成, 推导出随闭合应力变化的导流能力计算公式:

$$C_f[\sigma] = C_{f0} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma}{M} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中:  $C_{f0}$ ——闭合应力为  $\sigma$  时的酸压裂缝导流能力,  $\text{mD} \cdot \text{m}$ ;  $C_{f0}$ ——闭合应力为 0 时的酸压裂缝导流能力,  $\text{mD} \cdot \text{m}$ ;  $M$ ——粗糙高度分布均方根, 无因次;  $m$ ——粗糙体分布函数特征值, 常数( $0 < m < 1$ )。

### (3) Walsh 模型

Walsh 基于酸压实验研究流体流经酸蚀裂缝的层流特性, 并提出以下计算公式:

$$\frac{C_f}{C_{f0}} = \left[ 1 - \frac{\sqrt{2\eta}}{\omega_0} \ln \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \right]^3 \quad (4)$$

式中:  $\eta$ ——粗糙高度分布均方根, 无因次;  $\omega_0$ ——闭合应力为 0 时的裂缝缝宽,  $\text{m}$ 。

该模型将酸蚀裂缝面形态特征参数视为定值, 考虑闭合应力对导流能力的影响, 同时与“钉床”模型相似。鉴于裂缝面形态特征参数获取困难, 以及未给出缝宽的计算方法, 导致该模型应用受限。

### (4) Gong 模型

龚明结合狭缝立方定律与裂缝粗糙度特征, 提出基于应力影响的导流能力计算方法:

$$C_f = C_{f0} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma}{1+\gamma} \right) \cdot \left( \frac{2\sigma}{C_\gamma} \right) \right]^6 \quad (5)$$

式中:  $\sigma_\gamma$ ——杨氏模量,  $\text{MPa}$ ;  $\gamma$ ——酸蚀裂缝面粗糙度分布曲线特征参数, 常数(通常取 4);  $C$ ——应力校正系数。

### (5) Mou 模型

牟建业基于 N-S 方程, 考虑岩石矿物成分与渗透率非均质性, 推导出裂缝导流能力公式:  
不同闭合压力作用下裂缝导流能力:

$$\omega k_f = \alpha e^{-\beta \alpha_c} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ ——闭合应力为 0 时的导流能力, mD·m;  $\beta$ ——杨氏模量, 无因次;  $\alpha_c$ ——闭合应力, MPa。

#### (6) J. Deng 模型

J. Deng 在 Mou 模型基础上, 进一步考虑裂缝面粗糙度与几何形态影响, 提出二维流体分布模型:

$$C_f = \frac{q \mu x_f}{h_f \Delta p} \quad (7)$$

式中:  $q$ ——流速, m<sup>3</sup>/d;  $\mu$ ——流体粘度, mPa·s;  $\Delta p$ ——压降, MPa;  $x_f$ ——缝长, m;  $h_f$ ——缝高, m。

目前, 对于酸蚀裂缝空间形态及变形机理的研究仍不完善, 缺乏有效的空间表征参数。未来研究应进一步揭示岩性物性对酸蚀裂缝导流能力的影响, 并建立多因素耦合预测模型, 以提升酸压裂缝的长期导流能力预测精度。

### 3. 多因素耦合酸蚀裂缝导流能力预测模型研究

#### 3.1. 模型研究基本原理

酸蚀裂缝导流能力受地质特征与工程参数共同影响。工程参数主要包括酸液类型、浓度、粘度及酸岩反应时间, 地质特征涉及岩石矿物成分、力学性质、储层非均质性、孔隙度、渗透率及温度等。

本文基于空间曲率与分形维数理论, 利用裂缝面非均匀刻蚀特征, 将岩性、物性及力学性质与导流能力关联。通过控制酸液条件, 分析岩石矿物成分、孔隙度、渗透率对裂缝面分形维数的影响, 并建立相关关系。进一步引入平均曲率假设各向同性渗流, 结合流体力学公式, 推导包含空间曲率、裂缝面吻合度、岩石力学参数等因素的数学模型, 建立多因素耦合的酸蚀裂缝导流能力预测模型。

#### 3.2. 岩石岩性、物性与裂缝面分形维数关系研究

##### 3.2.1. 岩石矿物组成与孔渗特征研究

碳酸盐岩沉积过程复杂, 矿物组成与结构高度非均质。本文选取川中蓬莱气区灯影组白云岩和鄂尔多斯盆地奥陶纪马家沟组灰岩, 采用 X 衍射分析岩石矿物成分(实验装置见图 1), 岩性分类见表 1。通过孔渗测定实验(实验装置见图 2), 获取岩样孔隙度和渗透率, 结果见表 2。X 衍射结果如图 3 所示。



**Figure 1.** Sample after rock fragmentation (left) and X-ray diffraction analyzer (right)  
**图 1.** 岩石破碎后样本(左)与 X 衍射实验分析仪(右)



Figure 2. Gas porosity meter (left) and gas permeability meter (right)  
图 2. 气测孔隙度仪(左)与气体渗透率测定仪(右)

通过 X 衍射实验和孔渗测定实验，获得岩石岩性物性参数：

Table 1. X-ray diffraction experiment results  
表 1. X 衍射实验结果

| 岩心编号 | 矿物种类和含量% |      |     |      | 岩性    |
|------|----------|------|-----|------|-------|
|      | 白云石      | 方解石  | 石英  | 黏土矿物 |       |
| 1    | 90.5     | 8    | 1.5 | 0    | 含灰云岩  |
| 2    | 91.7     | 6.2  | 2.1 | 0    | 含灰云岩  |
| 3    | 93.1     | 6.3  | 0.6 | 0    | 含灰云岩  |
| 4    | 89.7     | 9.5  | 0.8 | 0    | 含灰云岩  |
| 5    | 87.9     | 12.1 | 0   | 0    | 含灰云岩  |
| 6    | 2.2      | 91.8 | 6   | 0    | 含云灰岩  |
| 7    | 6        | 90.2 | 1.6 | 2.2  | 含云灰岩  |
| 8    | 26.8     | 72.8 | 0   | 0.4  | 含泥云灰岩 |
| 9    | 27.1     | 71.3 | 1   | 0.6  | 云质灰岩  |
| 10   | 30.4     | 61.9 | 0   | 7.7  | 云质灰岩  |

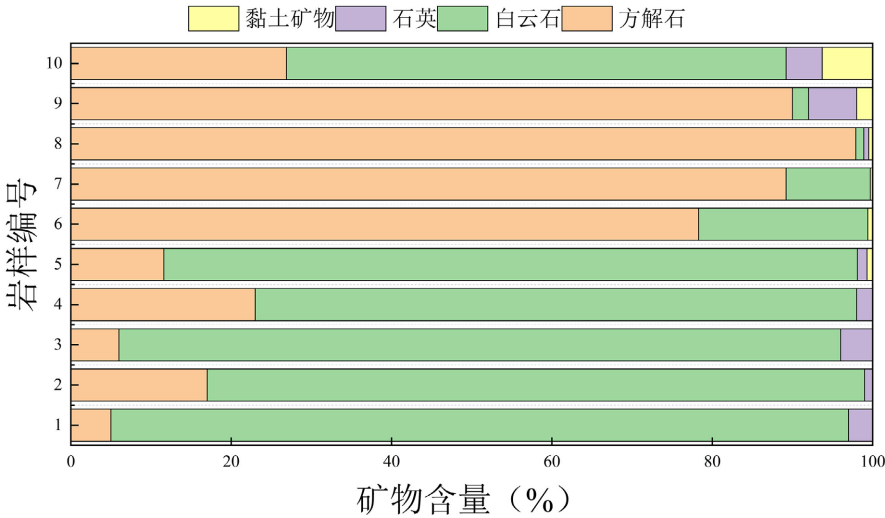
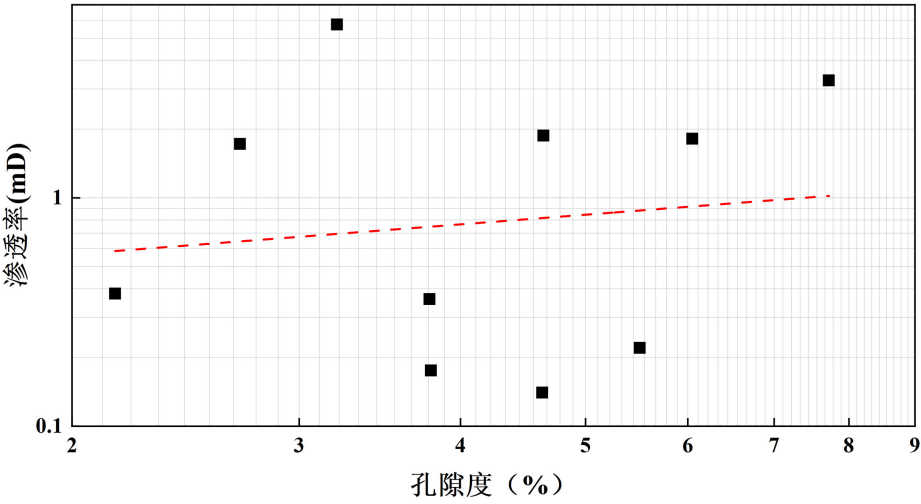


Figure 3. X-ray diffraction experiment results  
图 3. X 衍射实验结果图

**Table 2.** Experimental results of pore permeability measurement  
**表 2.** 孔渗测定实验结果

| 岩心编号 | 孔隙度%  | 渗透率(mD) | 岩性    |
|------|-------|---------|-------|
| 1    | 3.795 | 0.175   | 含灰云岩  |
| 2    | 2.7   | 1.72    | 含灰云岩  |
| 3    | 3.785 | 0.36    | 含灰云岩  |
| 4    | 4.64  | 1.87    | 含灰云岩  |
| 5    | 5.51  | 0.22    | 含灰云岩  |
| 6    | 4.63  | 0.14    | 含云灰岩  |
| 7    | 2.16  | 0.38    | 含云灰岩  |
| 8    | 7.72  | 3.26    | 含泥云灰岩 |
| 9    | 3.21  | 5.72    | 云质灰岩  |
| 10   | 6.05  | 1.81    | 云质灰岩  |

从实验结果可以得到，灯影组灯二段储层主要以白云岩为主，夹杂少量方解石和其他矿物；马家沟组马五段储层碳酸盐岩矿物占比 90%以上，夹杂少量泥质和碎屑。灯二段白云岩孔隙度 2.7%~5.51%，渗透率 0.175 mD~1.87 mD；马五段灰岩孔隙度 2.16%~7.72%，渗透率 0.14 mD~5.72 mD，对实验数据进行拟合分析，见图 4。

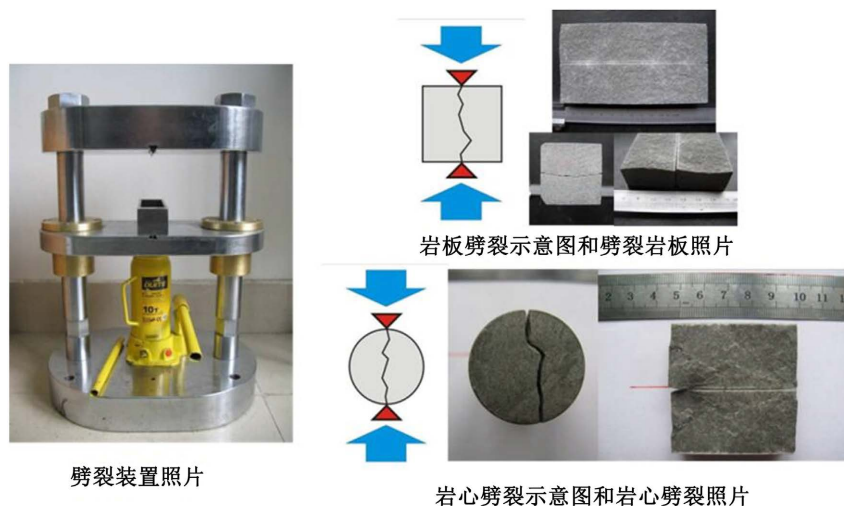


**Figure 4.** Double logarithmic correlation chart of porosity and permeability  
**图 4.** 孔隙度、渗透率双对数相关性图

从图中可得，在双对数坐标系中，岩样孔隙度、渗透率相关性很差，无明显相关规律。

### 3.2.2. 裂缝面分形维数研究

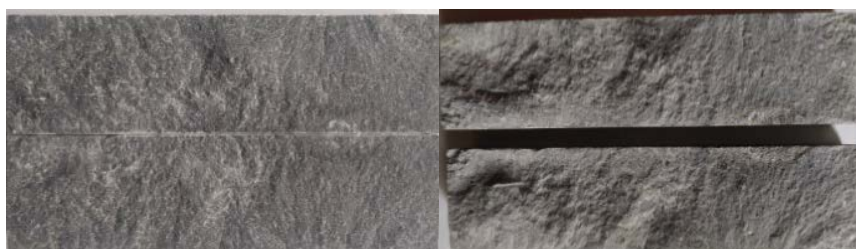
本节研究首先使用巴西劈裂法劈裂岩板(140 mm × 38 mm × 32 mm)获取岩石裂缝面(见图 5)；然后使用酸液驱替装置酸蚀岩板，获得岩板酸蚀裂缝面(见图 6)；再用三维扫描装置数字化岩石裂缝面，在 MATLAB 中使用自编程序计算酸蚀裂缝面分形维数。



**Figure 5.** Brazilian splitting method experimental instrument

**图 5.** 巴西劈裂法实验仪器

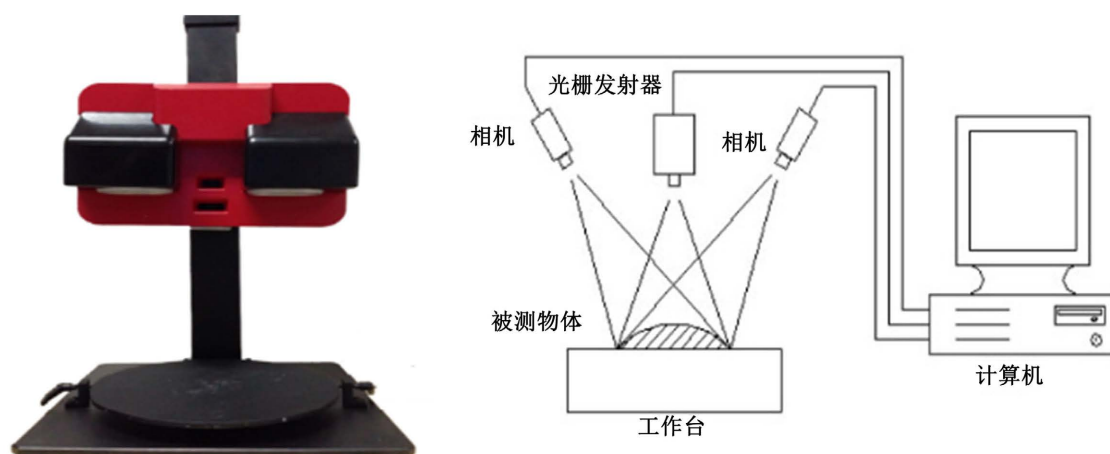
将岩板劈裂后,清洗、称重、烘干,然后放入酸液驱替实验装置中,使用 20%浓度的胶凝酸驱替五分钟,获取酸蚀裂缝表面,清洗、称重、烘干,计算酸岩反应速率。



**Figure 6.** Rock plate diagram after splitting and acid etching

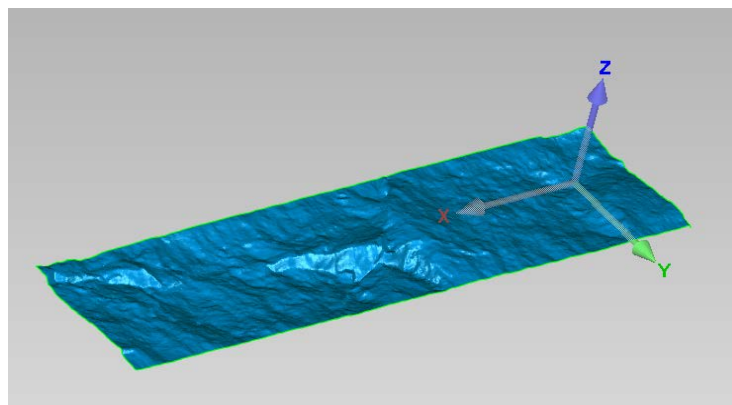
**图 6.** 劈裂后和酸蚀后岩板图

采用新型三维光学扫描仪(TNS)来获取酸蚀裂缝面的三维点云信息(如图 7),通过 Geomagic Studio 软件实现对酸蚀裂缝面的三维数字化(如图 8)。



**Figure 7.** New 3D optical scanner and schematic diagram

**图 7.** 新型三维光学扫描仪和原理图



**Figure 8.** Digitized results of rock plate fracture surface after acid etching  
**图 8.** 酸蚀后岩板裂缝面数字化结果

将扫描酸蚀裂缝面获取的点云数据处理后导入 MATLAB 软件, 使用基于盒维法的自编程序计算酸蚀裂缝面分形维数。

通过 Pearson 相关系数法, 建立酸蚀裂缝面分形维数与岩石矿物成分含量、孔隙度、渗透率的相关线性关系, 结果如下:

$$D = -0.115 \times X_1 + 0.495 \times X_2 - 0.179 \times X_3 + 0.38 \times \varphi + 0.838 \times K \quad (8)$$

其中:  $D$  为分形维数;  $X_1$  为白云石含量;  $X_2$  为方解石含量;  $X_3$  为非碳酸盐岩矿物;  $\varphi$  为孔隙度;  $K$  为渗透率。

分形维数与白云石含量呈负相关( $r = -0.115$ ,  $p = 0.042 < 0.05$ ), 与方解石含量呈正相关( $r = 0.495$ ,  $p = 0.036 < 0.05$ )。其与非反应矿物含量显著负相关( $r = -0.179$ ,  $p = 0.008 < 0.01$ ), 与孔隙度正相关( $r = 0.380$ ,  $p = 0.027 < 0.05$ ), 与渗透率呈显著正相关( $r = 0.838$ ,  $p < 0.01$ )。

### 3.2.3. 酸蚀裂缝面空间曲率与分形维数关系研究

曲率衡量曲线上某点的弯曲程度, 即该点沿曲线方向的变化速率。对于复杂空间体, 曲率不再是固定值, 常用最大曲率、最小曲率、平均曲率和高斯曲率等参数表征空间形态变化。根据定义, 曲率描述二维空间中曲线的特性, 可通过任意点的倾角与弧长变化率之比计算:

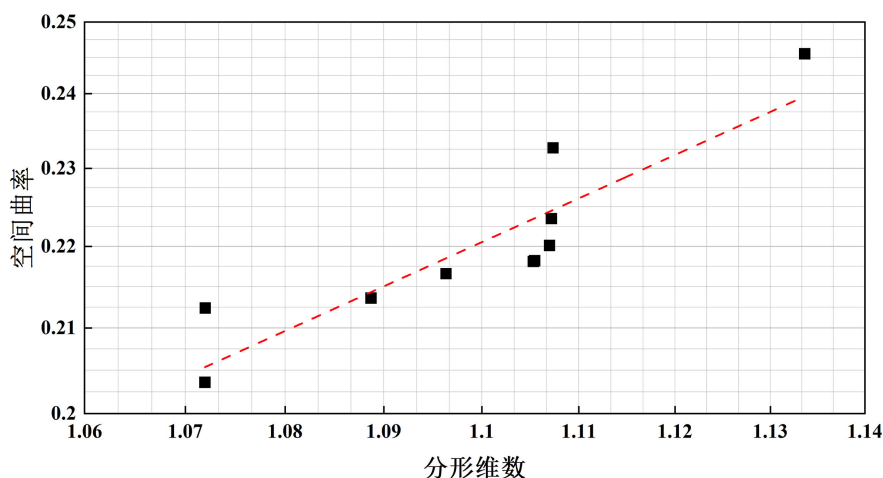
$$K = \frac{d\theta}{ds} = \frac{\left| \frac{dy^2}{dx^2} \right|}{\left[ 1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (9)$$

结合最小二乘法将裂缝面空间上的分布情况拟合成数学模型, 再利用有限差分法计算拟合曲面方程系数, 得到:

$$K_a = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n k_3(i, j)}{mn} \quad (10)$$

基于此计算原理, 利用扫描获得的酸蚀裂缝面点云数据和自编空间曲率计算程序, 在 MATLAB 中计算得到酸蚀裂缝面空间曲率参数。

分形维数和空间曲率都是从三维空间的角度表征酸蚀裂缝面形态, 本节将研究酸蚀裂缝面分形维数与空间曲率的相关关系, 来更全面、准确地描述酸蚀裂缝面空间形态(如图 9)。



**Figure 9.** Correlation between fractal dimension and spatial curvature in double logarithmic coordinates

**图 9.** 双对数坐标下分形维数与空间曲率相关性图

双对数坐标系拟合结果表明, 分形维数与空间曲率变化趋势相似, 说明二者在表征酸蚀裂缝面形态方面具有一致性。基于计算结果, 对分形维数与空间曲率进行线性拟合, 得到关系式:

$$K_a = 0.563 \times D - 0.398 \quad (11)$$

以分形维数为自变量、空间曲率为因变量进行线性回归分析,  $R^2 = 0.799$ , 表明分形维数可解释空间曲率 79.9% 的变化。F 检验结果 ( $F = 31.847$ ,  $p = 0.000 < 0.05$ ) 表明模型显著, 分形维数的回归系数为 0.563 ( $t = 5.643$ ,  $p = 0.000 < 0.01$ ), 表明其对空间曲率具有显著正向影响。综上, 分形维数对空间曲率影响显著且为正相关。

### 3.2.4. 基于酸岩反应溶蚀量的酸蚀裂缝宽计算方法研究

前文利用平均曲率、平均缝宽和分形维数量化裂缝空间形态, 并据此建立基于空间形态参数的导流能力模型。参考张紫薇(2019)的导流能力预测模型, 空间曲率与酸蚀裂缝导流能力的关系如下:

$$W_{kf} = \frac{(pK_a + q)^3}{4\alpha} \left( \frac{1-c}{1+c} \right) \left( \frac{E}{E + P9} \right)^4 \quad (12)$$

再考虑岩石岩性、物性、岩石力学参数和裂缝形态之后, 基于前文推导的数学模型, 建立多因素耦合酸蚀裂缝导流能力模型:

$$W_{kf} = \left[ -96.996 \times \frac{(2.616X_1 + 0.706X_2 - 1.233X_3 + 0.654\phi - 2.535K)^3}{4\alpha} + 181.8 \right] \left( \frac{1-c}{1+c} \right) \left( \frac{E}{E + Pv} \right)^4 \quad (13)$$

式中,  $X_1$  为矿物白云石含量, %;  $X_2$  为矿物方解石含量, %;  $X_3$  为矿物非碳酸盐岩矿物含量, %;  $\Phi$  为孔隙度;  $K$  为渗透率, mD;  $\alpha$  为形状因子(裂缝取 3);  $c$  为吻合度;  $E$  为杨氏模量, GPa;  $P$  为闭合应力, MPa;  $v$  为泊松比。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 岩石岩性对导流能力的影响

本节探讨矿物成分含量对酸蚀裂缝导流能力的影响。在固定孔隙度(0.7)、渗透率(1 mD)、吻合度(0.7)、杨氏模量(50 GPa)、泊松比(0.25)和闭合应力(10 MPa)的条件下, 逐步调整白云石、方解石及非碳酸盐岩含量, 计算导流能力变化规律(如图 10)。

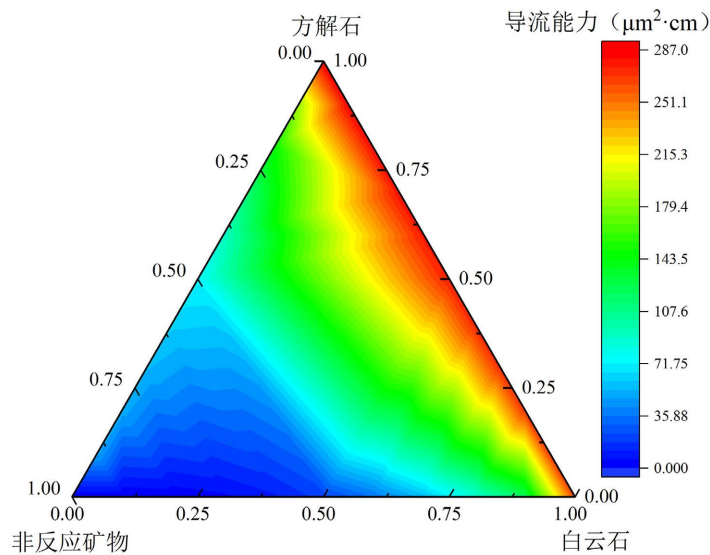


Figure 10. Influence of mineral composition content on flow capacity  
图 10. 矿物成分含量对导流能力的影响

实验结果表明，酸蚀裂缝的导流能力受岩石矿物成分的显著影响。方解石和白云石的含量均与导流能力呈正相关，而非碳酸盐岩矿物含量则呈负相关关系。其中，方解石的溶蚀速率较快，能更有效地形成粗糙且高导流能力的酸蚀面，因此对导流能力的提升作用强于白云石。在非碳酸盐岩矿物含量相同时，方解石增加 10%时，导流能力提升 11.93%~23.90%；白云石增加 10%时，导流能力提升 5.30%~10.04%。此外，随着单一易溶蚀矿物(方解石或白云石)含量的增加，导流能力提升速率加快，可能是由于酸蚀形成的非均匀刻蚀面增强了流体通道的连通性。而非碳酸盐岩矿物难以被酸溶蚀，导致裂缝结构难以显著优化，进而限制了导流能力的提升。

4.2. 岩石物性对导流能力的影响

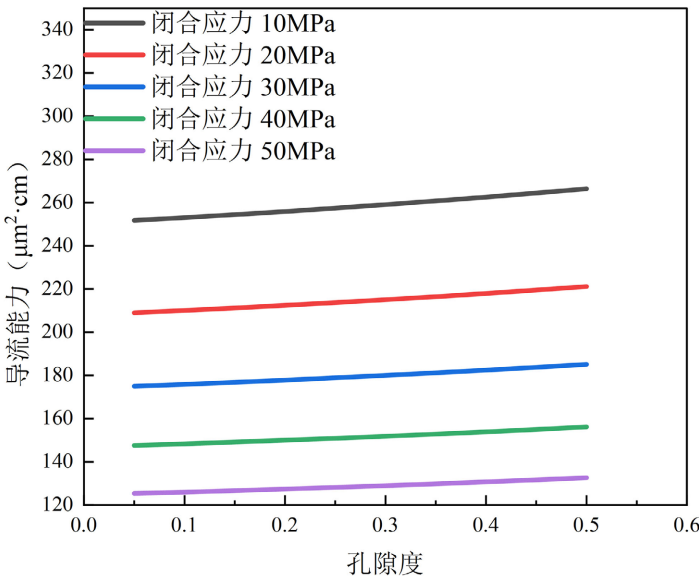


Figure 11. Influence of porosity on flow conductivity under different closure stresses  
图 11. 不同闭合应力下孔隙度对导流能力的影响

本节将探究孔隙度、渗透率对酸蚀裂缝导流能力的影响规律,只改变孔隙度、渗透率数据,矿物含量成分、岩石力学参数设为固定值。根据前文数据将白云石含量设置为 0.6,方解石含量设置为 0.2,非碳酸盐岩矿物含量成分设置为 0.2,吻合度 0.7,杨氏模量设置为 50 GPa,泊松比设置为 0.25,闭合应力设置为 10~50 MPa,分别改变孔隙度、渗透率的数值,计算裂缝导流能力,分析变化规律(如图 11,图 12)。

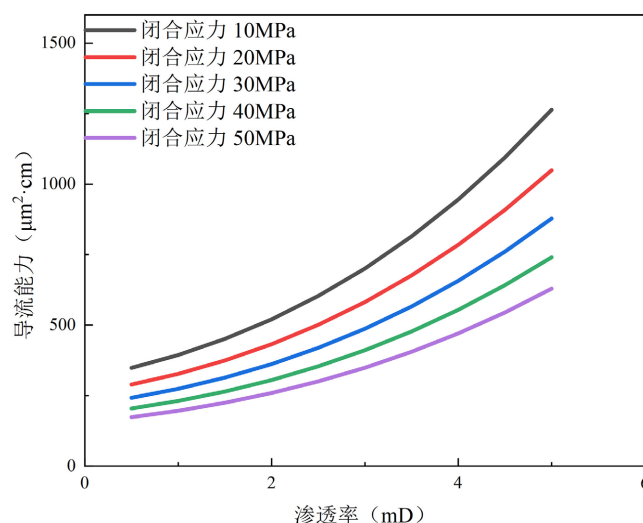


Figure 12. Influence of permeability on diversion capacity under different closure stresses

图 12. 不同闭合应力下渗透率对导流能力的影响

计算结果表明,孔隙度对导流能力影响较小,整体呈正相关,而渗透率影响显著,且其提升幅度随渗透率增加而增大。孔隙度每增加 1%,导流能力提高约 1%;渗透率每增加 1 mD,导流能力提升 40%~136%。闭合应力增加 10 MPa 时,导流能力下降约 15%~17%。总体而言,较高的孔隙度和渗透率增强岩石的流体输运能力,从而提高导流能力,符合实际规律。

#### 4.3. 岩石力学参数对导流能力的影响

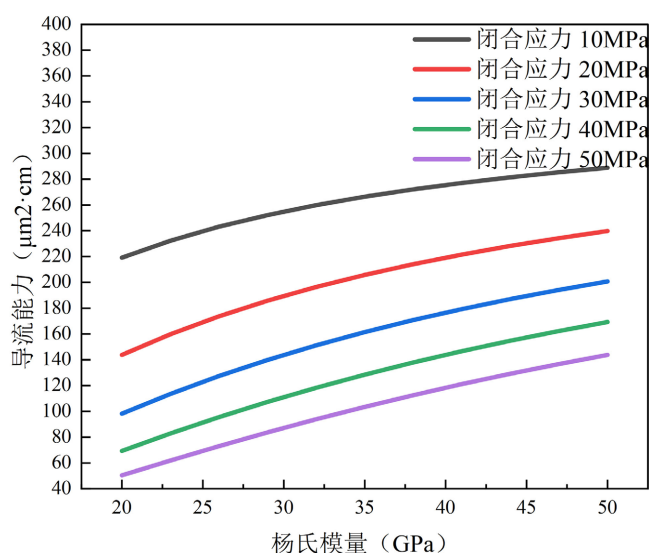
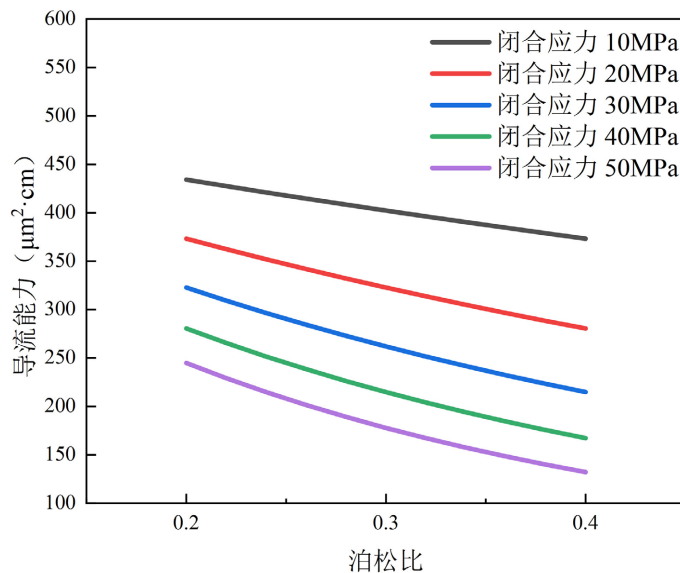


Figure 13. Influence of Young's modulus on flow capacity under different closure stresses

图 13. 不同闭合应力下杨氏模量对导流能力的影响

本节将探究岩石力学参数对酸蚀裂缝导流能力的影响规律,只改变杨氏模量、泊松比数据,吻合度、闭合应力设置为固定值,矿物成分含量、孔隙度、渗透率也设为固定值。根据前文数据将白云石含量设置为 0.7,方解石含量设置为 0.2,非碳酸盐岩矿物含量成分设置为 0.1,吻合度 0.7,孔隙度设置为 0.7,渗透率设置为 1 mD,分别改变杨氏模量、泊松比的数值,计算裂缝导流能力,分析变化规律(如图 13,图 14)。



**Figure 14.** Influence of Poisson's ratio on diversion capacity under different closure stresses  
**图 14.** 不同闭合应力下泊松比对导流能力的影响

计算结果表明,导流能力随杨氏模量增加而增强,且在杨氏模量较小时增幅较大,较大时增幅减小。杨氏模量每增加 10 GPa,导流能力提升约 1%~52%,而闭合应力增加 10 MPa,则导致导流能力下降 8%~52%。泊松比增加会降低导流能力,每增加 0.02,导流能力下降约 1%~5%,闭合应力增加 10 MPa 时,导流能力下降 14%~20%。总体来看,杨氏模量较小时,岩石抗变形能力弱,导流能力变化较大;当杨氏模量达到 50 GPa,泊松比对导流能力影响较小。整体趋势表明,岩石力学参数对裂缝导流能力的影响相对有限。

### 基金项目

本文研究内容来自国家自然科学基金联合基金项目四川深层页岩智能传控靶向复合压裂基础研究(资助编号: U20A20265)。

### 参考文献

- [1] 张紫薇. 碳酸盐岩酸蚀裂缝空间演化规律研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [2] 曹海涛. 基于分形理论裂缝面形态特征及渗流特性研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [3] Barton, N. (1973) Review of a New Shear-Strength Criterion for Rock Joints. *Engineering Geology*, 7, 287-332. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(73\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6)
- [4] Nierode, D.E. and Kruk, K.F. (1973) An Evaluation of Acid Fluid Loss Additives Retarded Acids, and Acidized Fracture Conductivity. *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, Las Vegas, 30 September-3 October 1973, SPE-4549-MS. <https://doi.org/10.2118/4549-ms>
- [5] Gangi, A.F. (1978) Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 249-257.

- 
- [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90957-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90957-9)
- [6] Walsh, J.B. (1981) Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **18**, 429-435. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90006-1)
- [7] Tsang, Y.W. and Witherspoon, P.A. (1981) Hydromechanical Behavior of a Deformable Rock Fracture Subject to Normal Stress. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **86**, 9287-9298. <https://doi.org/10.1029/jb086ib10p09287>
- [8] Gong, M. (1997) Mechanical and Hydraulic Behavior of Acid Fractures Experimental Studies and Mathematical Modeling. The University of Texas.
- [9] 牟建业, 张士诚. 酸压裂缝导流能力影响因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 69-71.
- [10] Deng, J., Mou, J., Hill, A.D.D. and Zhu, D. (2012) A New Correlation of Acid-Fracture Conductivity Subject to Closure Stress. *SPE Production & Operations*, **27**, 158-169. <https://doi.org/10.2118/140402-pa>
- [11] Deng, J. (2010) Mechanical Behavior of Small-Scale Channels in Acid-Etched Fractures. *Dissertations & Theses—Gradworks*, **16**, 216-234.
- [12] 白翔. 基于刻蚀形态数字化表征的酸蚀裂缝导流能力研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [13] 李莹. 裂缝间距分布规律对导流能力的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [14] 孙骏. 利用分形方法研究裂缝面形貌特征[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [15] 陈玉婷. 基于缝间形态表征的酸蚀裂缝导流能力研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.