

# 南海北部湾A油田水力脉冲酸化技术研究与应用

孙东征<sup>1</sup>, 许发宾<sup>1</sup>, 李 龙<sup>1</sup>, 马 磊<sup>1</sup>, 郭盼阳<sup>1</sup>, 黄维安<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江

<sup>2</sup>中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2025年9月29日; 录用日期: 2025年10月27日; 发布日期: 2025年11月27日

## 摘 要

针对南海西部南海北部湾A油田高温高盐储层特征, 开展定向水力脉冲酸化技术研究, 重点探讨了常规酸化体系在水平井应用中存在的酸岩反应不可控、管柱腐蚀严重、摩阻损失大及二次伤害风险高等技术瓶颈。通过开展酸液溶蚀性试验、酸岩反应速度测试、酸液腐蚀速度测试、酸岩反应产物及状态分析以及酸液降阻率测试, 同时开展酸液配伍性、表面张力、稳铁、防膨、破乳等常规性能评价, 优化设计酸液配方。根据实验结果构建酸化配方: 12%盐酸 + 2%氢氟酸 + 3%AC + 0.5%AB较为适合北部湾储层, 酸后岩心孔隙度提高3.6倍, 连通孔隙比例提高了26.6%, 孔喉半径峰值提高25%, 储层物性的改善与黏土矿物的降低具有的相关性。研究成果为海上深层低渗油藏高效开发提供了新型酸化解决方案, 现场试验阶段单井最大超配产82%, 具有显著的技术经济价值。

## 关键词

高温高压储层, 水力脉冲酸化, 多氢酸酸液, 可溶桥塞, 连通孔隙

## Study and Application of Hydraulic Pulse Acidification Technology in Beibu Gulf A Oilfield of South China Sea

Dongzheng Sun<sup>1</sup>, Fabin Xu<sup>1</sup>, Long Li<sup>1</sup>, Lei Ma<sup>1</sup>, Panyang Guo<sup>1</sup>, Wei'an Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong

<sup>2</sup>School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

Received: September 29, 2025; accepted: October 27, 2025; published: November 27, 2025

文章引用: 孙东征, 许发宾, 李龙, 马磊, 郭盼阳, 黄维安. 南海北部湾 A 油田水力脉冲酸化技术研究与应用[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1514-1527. DOI: 10.12677/me.2025.136167

## Abstract

This study is aimed at the characteristics of high-temperature and high-salt reservoir in Beibu Gulf A Oilfield in the western part of South China Sea, and carries out the research on directed hydraulic pulse acidizing technology. Based on the engineering characteristics of reservoir physical properties, mineral composition and horizontal well section length in the target block, the study focuses on overcoming the technical bottlenecks of conventional acidizing system in horizontal well application, such as uncontrollable acid-rock reaction, serious corrosion of tubing and columns, large friction loss, and high risk of secondary injury. We optimize the design of acid formulation by conducting acid corrosivity test, acid rock reaction speed test, acid corrosion speed test, acid rock reaction product and state analysis and acid resistance reduction rate test, and at the same time, we carry out the evaluation of acid compatibility, surface tension, iron stabilization, anti-expansion, emulsion breakage and other conventional performance. According to the experimental results, the acidizing formula: 12% hydrochloric acid + 2% hydrofluoric acid + 3% AC + 0.5% AB is more suitable for Beibu Gulf reservoir, the porosity of the core increased by 3.6 times after the acid, the proportion of connected pores increased by 26.6%, and the peak pore-throat radius increased by 25%, and the correlation between improvement of the physical properties of the reservoir and the reduction of clay minerals was found. The research results provide a new type of acidizing solution for the efficient development of offshore deep low-permeability reservoirs, and the maximum over-allocated production of a single well is 82% in the field test stage, which has significant technical and economic value.

## Keywords

High-Temperature and High-Pressure Reservoir, Hydraulically Pulsed Acidizing, Polyhydroacidic Acid, Soluble Bridging Plugs, Connected Pores

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

南海西部南海北部湾 A 油田作为我国海上深层低渗油藏开发的战略接替区,其储层具有高温(130℃)、高矿化度( $18 \times 10^4$  mg/L)及强非均质性特征[1] [2]。在此地质背景下,后期注水开发进一步诱发了储层伤害,主要表现为伊蒙混层等黏土矿物(含量达 18.7%)运移膨胀及方解石等碳酸盐垢(方解石含量 12%~24%)沉积堵塞,导致近井地带渗流能力急剧恶化[3]。针对此类问题,常规酸化措施存在酸岩反应动力学失控,活性酸有效作用距离短[4];地层流体中高浓度铁离子在酸液耗尽后易形成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  等胶体二次沉淀,造成储层伤害[5];长水平井段(达 2100 m)对管柱的均匀布酸及安全防护提出极高要求,传统缓蚀剂在高温下的效能衰减使得腐蚀速率( $>5.2$  g/m<sup>2</sup>·h)难以满足安全标准[6]。尤其水平井段长达 2100 m 的工程条件,对酸化体系的缓蚀性能(缓蚀率 $>95\%$ ) [7]、降阻效率(降阻率 $>40\%$ ) [8]及自转向能力提出了更高要求。

近年来,国内外学者针对高温储层酸化技术开展系列研究:Smith 等[9]提出有机酸-螯合剂复合体系可延缓酸岩反应速率;Chen [10]开发纳米级缓蚀剂使腐蚀速率降低 76%;Liu 团队[11]通过微乳液技术实现酸液降阻率提升至 35%。然而,现有研究多聚焦单一性能优化,缺乏对复杂储层条件的协同调控机制[12] [13],特别是高黏土含量储层中酸液-矿物多相反应动力学研究仍存在空白[14] [15]。本文针对南

海北部湾 A 油田储层特征, 构建一个机理协同的技术系统, 创新性地将水力脉冲波场的物理解堵、传质强化功能, 与精心设计的智能化学酸液体系的深部溶蚀、自转向及长效防护性能进行一体化集成。阐明脉冲波场与智能酸液在复杂孔喉结构中的协同作用机制, 填补多相反应动力学研究的空白。形成一套适用于海上长水平井高温低渗储层的高效酸化技术体系, 并为同类复杂油气藏的绿色、经济开发提供可复制的理论范式与工程实践支撑。在现场应用中, 不同井段平均渗透率改善因子在 1.7 以上, 5 口井均超配产, 最大超配产 82%。

## 2. 实验方法

### 2.1. 酸液溶蚀性试验及酸浓度优选

用研究区储层的岩粉, 采用不同浓度的多种酸液体系在 90℃ 条件下与储层岩粉进行反应, 溶蚀时间 0.5~12 小时, 测定酸对岩粉的溶蚀率。

实验方法: 利用失重法测定酸液对岩粉的溶蚀率, 按下式进行计算:

$$\text{溶蚀率}(\%) = \frac{\text{溶蚀前岩粉重量}(\text{g}) - \text{溶蚀后岩粉重量}(\text{g})}{\text{溶蚀前岩粉重量}(\text{g})} \times 100\% \quad (1)$$

### 2.2. 酸液与各种表面活性剂的表面张力测定

利用 JZ-200 自动界面张力仪, 实验温度 25℃, 将配制好的配方酸液装入测定器皿中, 放入测定仪支架上, 稳定 15 分钟后清零数据, 按测定键测定各酸液的表面张力。

### 2.3. 铁离子稳定剂的性能评价

采用邻菲罗啉法, 实验仪器 722 型分光光度计和酸度计, 铁离子稳定剂: SA1-7、WD-8 和 HW1-7。

### 2.4. 粘土稳定剂的防膨性能评价

利用 WZ-1 型页岩膨胀仪, 采用 CNPC 页岩膨胀推荐测定方法。实验采用钠膨润土进行, 在 105℃ 下烘干 4 小时, 然后取出试样置于干燥器中冷却, 称取 50 克在岩样成形机上制成薄片, 采用膨胀仪测定各种溶液对试样的线膨胀率。选用 SA-18、WD-5、HW5 三种粘土进行实验, 对加有粘土稳定剂的酸液进行评价, 选出稳定粘土效果好的粘土稳定剂。

### 2.5. 酸液腐蚀速度测试

实验方法: 失重法, 实验程序和标准参照 SY/T5405-1996 “酸化缓蚀剂评价指标和实验方法”。

AC 系列为作为主体酸, AC 系列提供 H<sup>+</sup> 离子, 缓慢溶蚀碳酸盐岩地层, 其反应速度较盐酸慢, 有利于深部酸化。复配的缓蚀剂通过在金属表面形成吸附膜, 有效抑制酸液对井下管柱的腐蚀。AB 系列为铁离子稳定剂能与地层中溶出的 Fe<sup>3+</sup> 等高价金属离子形成稳定的水溶性络合物, 防止其在地层 pH 值升高时形成 Fe(OH)<sub>3</sub> 胶体沉淀堵塞孔道。防乳化剂则能降低油水界面张力, 防止酸液与地层原油形成顽固乳状液。SA 系列为表面活性剂, 通过吸附在岩石表面, 降低界面张力, 显著降低酸液体系的表/界面张力, 提高返排效率。同时, 其具有助排、抗污泥等综合性能。酸液: 6% HCl、6% HCl + 1.5% HF、6% HCl + 8% HBF<sub>4</sub>、3% HCl + 3% SA601 + 4% SA701

### 2.6. 水力脉冲酸化工艺原理与技术参数

水力脉冲酸化工艺基于流体压力脉冲动力学原理, 通过井下专用脉冲发生器将连续注入的酸液调制成为特定频率(5~15 Hz)和振幅(3~8 MPa)的正弦压力波序列。该技术主要利用三种效应协同作用: 首先, 压

力脉冲产生的强烈剪切力直接剥蚀并清除近井地带的物理堵塞物；其次，通过频率优化使其与地层岩石产生谐振，从而解除深部孔喉的微观堵塞；最后，脉冲扰动显著增强了酸液在储层孔隙中的对流与传质效率，克服了常规酸化中主要依赖扩散的局限，从而实现更深、更均匀的溶蚀。本研究中，所有关键参数均依据南海北部湾 A 油田目标储层的岩石特性、破裂压力及室内岩心流动实验结果进行优化设定，以确保在有效解堵的同时保障施工安全与储层稳定性。

## 2.7. 酸化流动实验方法

### 1) 实验条件

北部湾储层岩心，实验温度：90℃，实验围压：1.5~2 MPa，实验回压：1 MPa，驱替压力：根据岩心渗透率确定，实验基液：3% NH<sub>4</sub>Cl。

### 2) 模拟步骤

(a) 注入 3% NH<sub>4</sub>Cl，确定岩心的基准渗透率；(b) 注入前置液盐酸配方，测定前置液酸化过程中岩心渗透率的变化；(c) 分别注入处理液(土酸)，测定各种处理液酸化过程中岩心渗透率的变化；(d) 注入后置液配方，测定后置液酸化过程中岩心渗透率的变化；(e) 注入 3% NH<sub>4</sub>Cl，确定酸化后岩心的渗透率。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 酸液溶蚀性试验及酸浓度优选

根据表 1 储层岩粉溶蚀数据，储层岩粉盐酸的溶蚀率在 2.16%~4.15%之间，盐酸对储层岩石的溶蚀率较低，说明该油田储层碳酸盐岩含量较少，随着盐酸浓度增加，岩粉溶蚀率有一定程度地增加，但增加幅度不大。

储层岩粉土酸的溶蚀率在 17.06%~19.67%之间。HF 浓度大于 3%后，HF 酸浓度增加，岩粉溶蚀率增加不大。

Table 1. Soluble rock powder data in block reservoirs

表 1. 研究区储层岩粉溶蚀数据

酸液	滤纸重(g)	岩粉重(g)	溶后重(g)	溶蚀量(g)	溶蚀率(%)
6% HCl	1.0367	10.0829	10.9017	0.2179	2.16
8% HCl	0.9971	10.0473	10.6845	0.3599	3.58
10% HCl	1.0847	10.018	10.7423	0.3604	3.60
15% HCl	1.0480	10.0111	10.6080	0.4511	4.51
6% HCl + 0.5% HF	1.0135	5.0127	5.1708	0.8554	17.06
6% HCl + 1.0% HF	0.9088	5.0601	5.0756	0.8933	17.65
6% HCl + 1.5% HF	0.9351	5.0510	5.1043	0.8818	17.46
6% HCl + 3.0% HF	0.9209	5.0444	4.9732	0.9921	19.67
6% HCl + 6% HBF <sub>4</sub>	0.9660	10.0110	10.1900	0.7870	7.86
6% HCl + 8% HBF <sub>4</sub>	0.9705	10.0202	9.8948	1.0959	10.94
6% HCl + 10% HBF <sub>4</sub>	0.9719	10.013	9.7120	1.2729	12.71
6% HCl + 12% HBF <sub>4</sub>	0.9740	10.0523	9.5942	1.4321	14.25

续表

3% HCl + 3% SA601 + 3% SA701	0.9647	10.1155	9.7235	1.3567	13.41
3% HCl + 3% SA601 + 4% SA701	0.9625	10.0812	9.574	1.4697	14.58
3% HCl + 3% SA601 + 5% SA701	0.9698	10.1057	9.5411	1.5344	15.18
3% HCl + 3% SA601 + 6% SA701	0.9717	10.043	9.5178	1.4969	14.90
3% HCl + 3% SA601 + 6% SA701	0.9628	10.0251	9.2362	1.7517	17.47

### 3.2. 助排剂优选

采用 SA5-5、WD-12、HW5-5 三种助排剂分别加入 6% HCl、6% HCl + 8% HBF<sub>4</sub>、6% HCl + 1.5% HF、3% HCl + 3% SA601 + 4% SA701，表面张力实验结果见表 2。

从以上三种表面活性剂的表面张力测定表明，各种表面活性剂在鲜酸和残酸中都有很好降低酸液表面张力的作用。可以看出，在氟硼酸和土酸中，各种助排剂的表面张力都低，且在鲜酸和残酸中变化不大，性能较稳定，其中以 SA5-5 最好。

**Table 2.** Surface tension measurement of surfactants

**表 2.** 表面活性剂的表面张力测定

酸液	表面活性剂类型及用量	表面张力(mN/m)	
		鲜酸	残酸
12%盐酸 + 2%氢氟酸 + 3% AC + 0.5% AB	1% SA5-5	24.3	26.9
	1% WD-12	25.1	31.4
	1% HW5-5	24.8	27.5
12%盐酸 + 3%氢氟酸 + 2% AC	1% SA5-5	20.2	24.1
	1% WD-12	21.5	25.2
	1% HW5-5	21.3	24.9
10%盐酸 + 1%氢氟酸 + 7% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1% SA5-5	21.7	24.5
	1% WD-12	22.0	27.1
	1% HW5-5	21.9	26.6
10%盐酸 + 3%氢氟酸 + 5% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1% SA5-5	24.0	26.5
	1% WD-12	24.1	27.5
	1% HW5-5	24.4	26.9
水	蒸馏水的表面张力为: 72.4 mN/m	72.24	

### 3.3. 铁离子稳定剂优选

由表 3 铁离子稳定剂在残酸液中稳定铁量可知，未加铁离子稳定剂的酸液，稳定铁量低，只有 47.2%。而加有铁离子稳定剂的酸液，稳定铁离子量均在 80%以上。当 pH=3.5 时，SA1-7 稳定铁量分别为 84.9%，其次为 WD-8，稳定铁量为 82.6%，HW1-7 稳定铁量为 80.6%。因此，三种铁离子稳定剂都具有较好的稳

定铁离子能力，在酸液配方中均可选用，依据效果优先选用 SA 系列。

**Table 3.** Various iron ion stabilizers stabilize iron content in residual acid solution  
**表 3.** 各种铁离子稳定剂在残酸液中稳定铁量

序号	pH = 1 时酸液含铁总量 (ppm)	铁离子稳定剂类型与用量	pH = 3.5 时稳定铁量 (ppm)	稳定铁量百分数 (%)
1	1362.08	无	643.2	47.2
2		1% SA1-7	1156.2	84.9
3		1% WD-8	1125.7	82.6
4		1%HW1-7	1097.4	80.6

### 3.4. 粘土稳定剂优选

表 4 不同粘土稳定剂防膨效果筛选实验结果表明三种防粘土稳定剂具有较好的防膨效果，与淡水相比有较大的降低：

(1) SA-18 粘土稳定剂终膨胀率降低了 38.67%；WD-5 粘土稳定剂终膨胀率降低了 32.68%；HW-5 粘土稳定剂终膨胀率降低了 32.19%。

(2) 三种粘土稳定剂中，SA-18 最好，WD-5 和 HW-5 相差不大。

酸液中采用三种粘土稳定剂(WD-5、HW-5、SA-18)均可，其中，SA-18 粘土稳定剂效果最好，膨胀率最低，能有效控制粘土膨胀，抑制水敏伤害，建议优先使用。

**Table 4.** Screening of anti-swelling effects of different clay stabilizers  
**表 4.** 不同粘土稳定剂防膨效果筛选

液体类型	土样	粘土稳定剂浓度(%)	24 小时膨胀率(%)	终膨胀率降低值(%)
淡水	膨润土	无	97.85	
SA-18 溶液	膨润土	1	60.01	38.67
WD-5 溶液	膨润土	1	65.87	32.68
HW-5 溶液	膨润土	1	66.35	32.19

### 3.5. 缓蚀剂优选

根据表 5 缓蚀剂的缓蚀性能评价的三种缓蚀剂腐蚀速率较低，其中以 SA1-3 缓蚀剂的缓蚀效果最好，其平均腐蚀速度小于 3 g/(m<sup>2</sup>·h)，达到行业要求的一级标准。

**Table 5.** Evaluation of corrosion inhibitor performance  
**表 5.** 缓蚀剂的缓蚀性能评价

酸液	缓蚀剂	使用浓度(%)	实验温度(°C)	平均腐蚀速度(g/m <sup>2</sup> ·h)	腐蚀现象
SY-2	SA1-3	1%	90	1.5461	均匀腐蚀
	WD-11	1%	90	1.6658	均匀腐蚀
	HW1-3	1%	90	1.9997	均匀腐蚀

续表

	SA1-3	1%	90	2.3564	均匀腐蚀
SY-3	WD-11	1%	90	4.6361	均匀腐蚀
	HW1-3	1%	90	4.8163	均匀腐蚀
	SA1-3	1%	90	2.5645	均匀腐蚀
SY-4	WD-11	1%	90	2.2456	均匀腐蚀
	HW1-3	1%	90	3.1809	均匀腐蚀
	SA1-3	1%	90	2.0171	均匀腐蚀
SY-5	WD-11	1%	90	3.4864	均匀腐蚀
	HW1-3	1%	90	4.6512	均匀腐蚀

### 3.6. 酸化前后 SEM 分析

通过图 1~3 酸化前后电镜扫描看出，酸化前岩心表面覆盖着粘土矿物，岩石表面有蚀变现象；多氢酸酸化后岩心较好的保持原有形状，骨架没有明显的颗粒脱落并明显扩大了孔喉半径，起到了解堵功效；而土酸酸化后的岩心变得松散，颗粒脱落，虽然明显扩大了孔喉半径，但也造成了明显的骨架破坏。

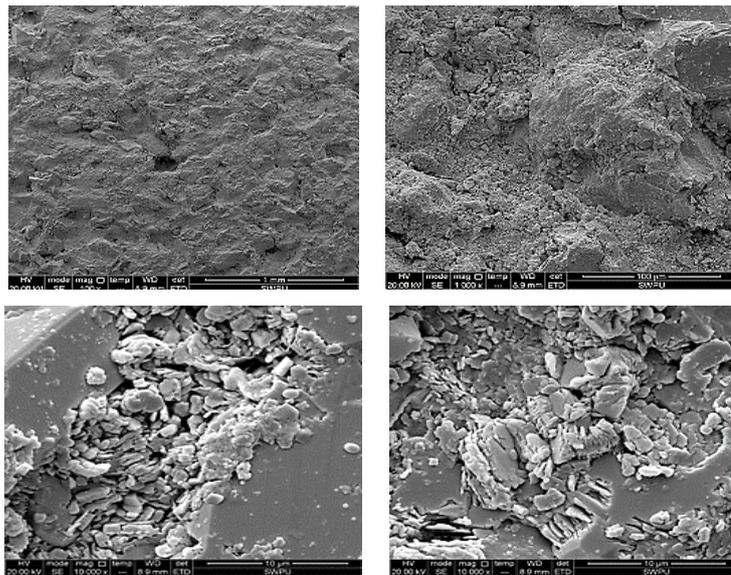
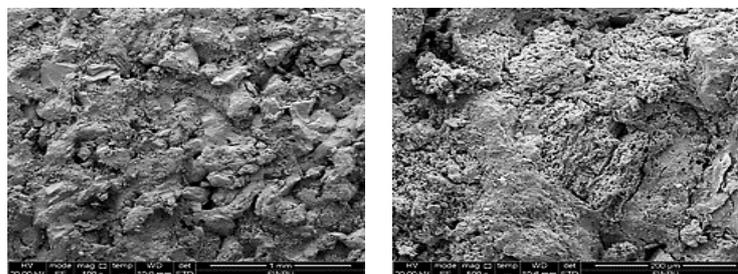
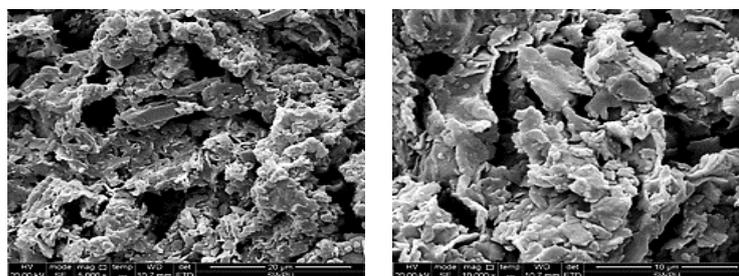
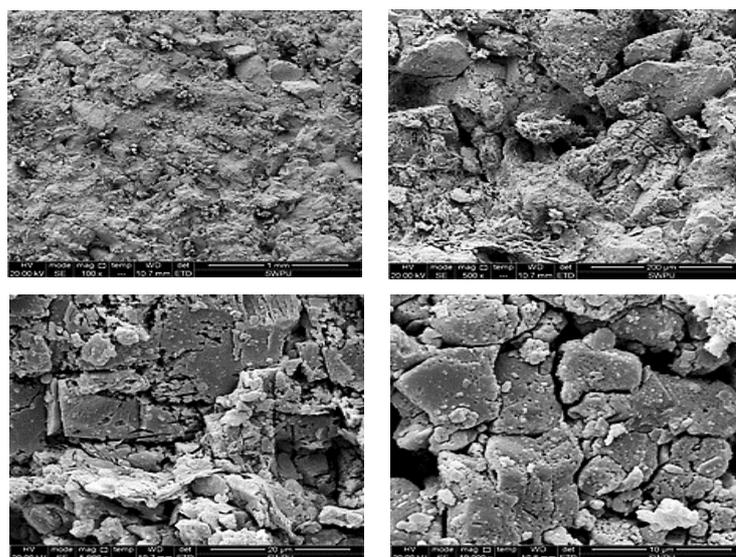


Figure 1. Images of core end faces at different magnifications before acidizing  
图 1. 酸化前岩心端面倍数大小不同照片





**Figure 2.** Images of core end faces at different magnifications after mud acid acidizing  
**图 2.** 土酸酸化后岩心倍数不同端面照片



**Figure 3.** Images of core end faces at different magnifications after multi-hydrogen acid acidizing  
**图 3.** 多氢酸酸化后岩心倍数不同端面照片

### 3.7. 酸化前后 XRD 分析

针对图 4~6 酸化前后矿物分析能谱实验数据以及表 6 反应后矿物产物质量含量可以看出:

(1) 土酸酸化后的岩石表面, F、K、Si、Al 有所增加, 说明在岩石表面有氟硅酸盐沉淀生成; Ca、Mg、Fe、S 的量减少, 说明这些离子进入了酸液, 当酸液浓度降低时, 溶液在储层深处形成氟化钙、氟化镁及硫化铁等二次沉淀。

(2) 多氢酸酸化后的岩石表面, Na、Al、Fe、Si、Mg 都有所降低、说明多氢酸对粘土矿物有很好的溶蚀效果, 而且多氢酸对含二氧化硅的矿物也有很好的溶蚀作用; Ca、Mg 的量在增加, 说明多氢酸对这两种离子有很好的螯合作用, 能够把他们稳定在粘土矿物表面。因此多氢酸与土酸从微量元素相比, 多氢酸具有较好的防治沉淀生成和稳定粘土矿物的作用。

以上实验结果表明常规土酸会造成比多氢酸严重得多的岩石骨架破坏; 多氢酸具有很好的防止沉淀和稳定粘土矿物的优越性能。因此, 基于多氢酸液缓速、低伤害、稳定粘土矿物的能力以及目标油田储层胶结较疏松, 建议选用多氢酸体系。

### 3.8. 酸化后储层微观特征分析

应用 X-射线衍射分析发现研究区储层主要黏土矿物为石英、钾长石、白云石类, 其中 9~18 号样品

中黏土总量 13.8%，其中石英占 78.3%、钾长石占 7.3%、白云石类占 0.6%；9-21 号样品中黏土总量 10.6%，其中石英占 83.2%、钾长石占 5.9%、白云石类占 0.3%。

针对样品 CT-2775.44-B 酸化前孔隙分布情况见图 7，并通过 CT 扫描发现该样品由 Z 轴方向逐层面孔隙率分析可知，整体波动较小，面孔率基本维持在 1.44%~11.93%之间，平均面孔率 6.42%。

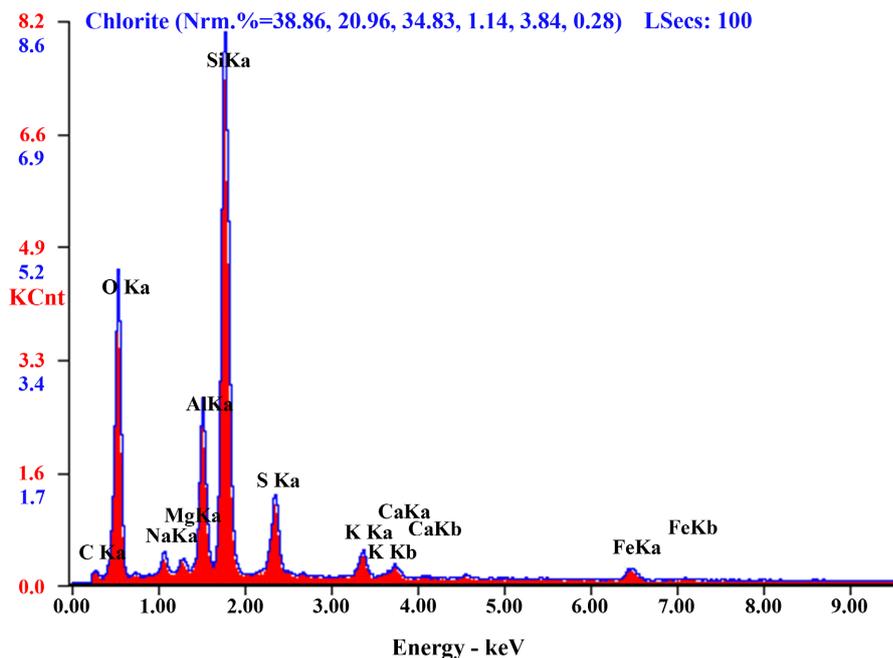


Figure 4. Energy spectrum analysis of original minerals  
图 4. 原始矿物能谱分析

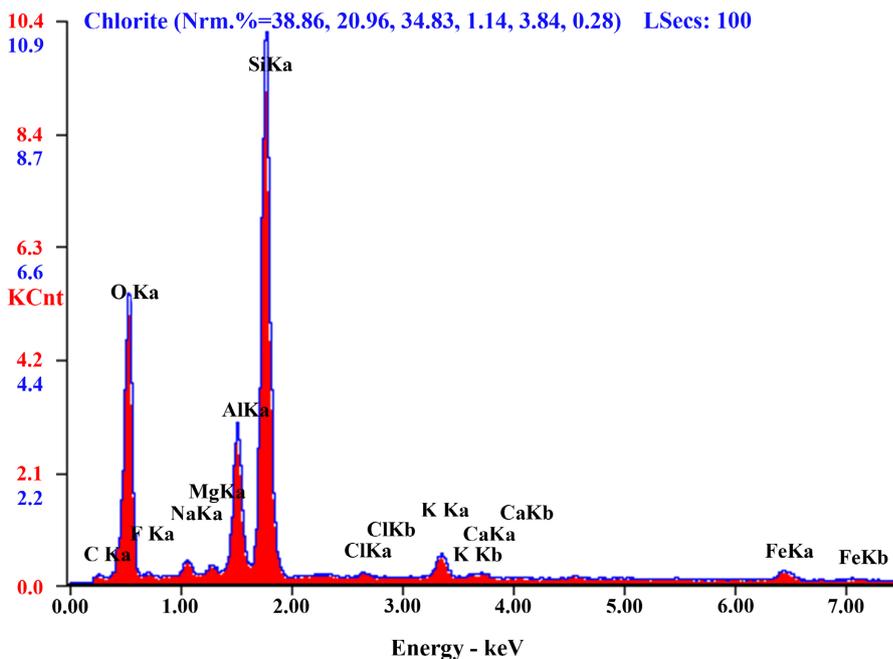


Figure 5. Energy spectrum analysis after mud acid acidizing  
图 5. 土酸酸化后能谱分析

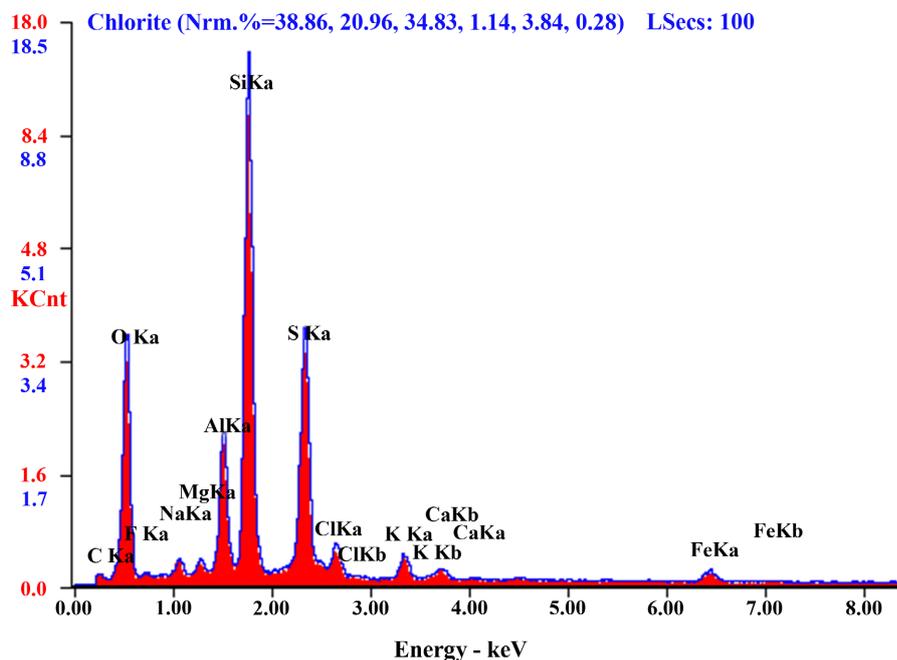


Figure 6. Energy spectrum analysis after multi-hydrogen acid acidizing  
 图 6. 多氢酸化后能谱分析

Table 6. Mass content of mineral products after reaction  
 表 6. 反应后矿物产物质量含量

酸液	C	O	S	Na	Al	Si	K	Mg	Ca	Cl	F
原始矿物	5.28	40.49	5.83	1.71	8.27	37.63	2.17	0.96	1.24	0.00	0.00
土酸	6.84	41.30	0.00	1.25	8.46	34.63	2.52	0.55	0.00	0.00	1.31
多氢酸	6.27	35.14	15.30	1.06	6.51	25.18	2.26	0.86	1.23	2.97	0.65

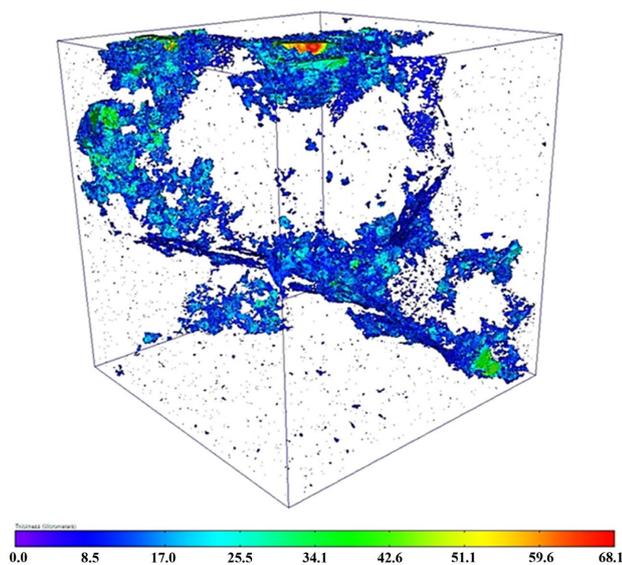


Figure 7. Pore distribution of sample CT-2775.44-B  
 图 7. 样品 CT-2775.44-B 孔隙分布

针对样品 CT-2775.44-B 酸化后孔隙分布情况见图 8，并通过 CT 扫描发现该样品由 Z 轴方向逐层面孔隙率分析可知，整体波动较小，面孔率基本维持在 8.73%~34.76%之间，平均面孔率 16.42%。

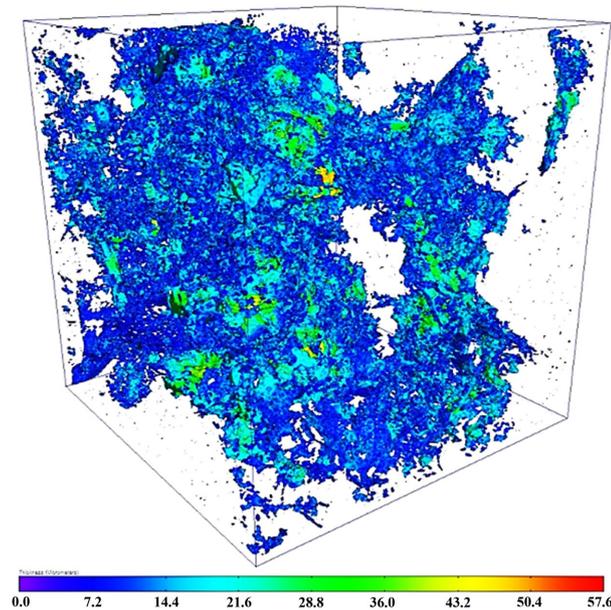


Figure 8. Pore distribution of sample CT-2775.44-B after acidizing  
图 8. 酸化后样品 CT-2775.44-B 孔隙分布

Table 7. Pore connectivity percentage of sample CT-2775.44-B after acidizing  
表 7. 酸化后样品 CT-2775.44-B 孔隙连通百分比

物质	体积, $\mu\text{m}^3$	体积百分比(%)	体积, $\mu\text{m}^3$	体积百分比(%)
总孔隙	$6.77 \times 10^7$	6.39	$1.73 \times 10^8$	16.35
连通孔隙	$5.94 \times 10^7$	5.61	$1.65 \times 10^8$	15.62
不连通孔隙	$8.30 \times 10^6$	0.78	$7.73 \times 10^6$	0.73

通过表 7 得知 CT 扫描发现酸化后岩心孔隙结构有了明显的改善，且其联通孔隙体积百分比明显增加。酸前酸后对比结果表明，岩心孔隙度提高 3.6 倍，连通孔隙比例提高了 26.6%，酸后储层孔隙孔喉半径峰值提高了 25%，酸后岩样黏土含量降低。

### 3.9. 岩心流动试验评价结果

实验选用 SA 系列添加剂组合的多氢酸酸液配方进行实验，酸液配方见表 8：

Table 8. Experimental liquid formula for multi-hydrogen acid acidizing  
表 8. 多氢酸酸化实验液体配方

酸液类型	酸液配方
前置液	12% HCl + 1% SA1-3 + 1% SA1-7 + 1% SA-18 + 1% SA1-1 + 1% SA5-5
处理液	12% HCl + 3% SA601 + 3%~4% SA701 + 1% SA1-3 + 1% SA1-7 + 1% SA-18 + 1% SA1-1 + 1% SA5-5
后置液	2% HCl + 1% SA1-3 + 1% SA1-7 + 1% SA-18 + 1% SA1-1 + 1% SA5-5

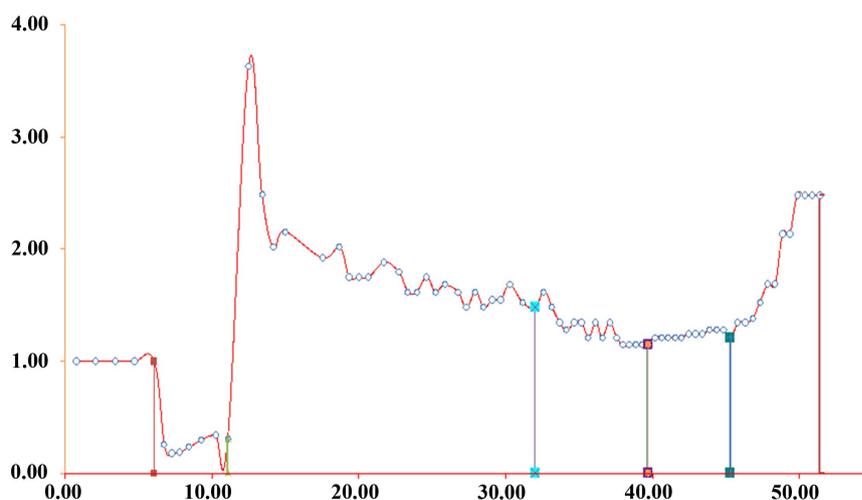
采用酸化效果实验仪进行岩心流动模拟实验，得到酸化后渗透率恢复结果如表 9 所示，结合岩心溶蚀实验、酸液配伍性实验，破乳实验及表面张力测定、铁离子含量的测定等结果，筛选出最佳酸液配方。

**Table 9.** Permeability recovery results of artificial core after multi-hydrogen acid acidizing  
**表 9.** 人造岩心多氢酸酸化渗透率恢复结果

层位	温度/°C	酸液浓度	K/K <sub>0</sub>					
			基液	前置液	处理液	后置液	正驱基液	反驱基液
研究区储层	90	12%	1	0.3410	1.5481	1.1442	1.4808	2.4828

图 9 实验结果表明，采用多氢酸酸化，酸化后岩心渗透率增产倍比较高，增加幅度大。观察实验后的岩心，未发现出砂现象。表明多氢酸具有稳定微粒的特点。因此，采用多氢酸酸化，造成储层二次伤害小，对于胶结疏松的储层，能起到稳定微粒运移的作用，比较适合研究区储层酸化。

酸化对北部湾油藏流三段储层具有明显改善效果。其中酸后岩心孔隙度提高 3.6 倍，连通孔隙比例提高了 26.6%；孔喉半径峰值提高 25%，储层物性的改善与黏土矿物的降低(酸液与黏土矿物反应)具有的相关性；12%盐酸 + 2%氢氟酸 + 3% AC + 0.5% AB 的酸液配方较为适合北部湾储层。



**Figure 9.** Effect curve of multi-hydrogen acid acidizing on artificial core  
**图 9.** 人造岩心多氢酸酸化效果曲线

#### 4. 现场应用

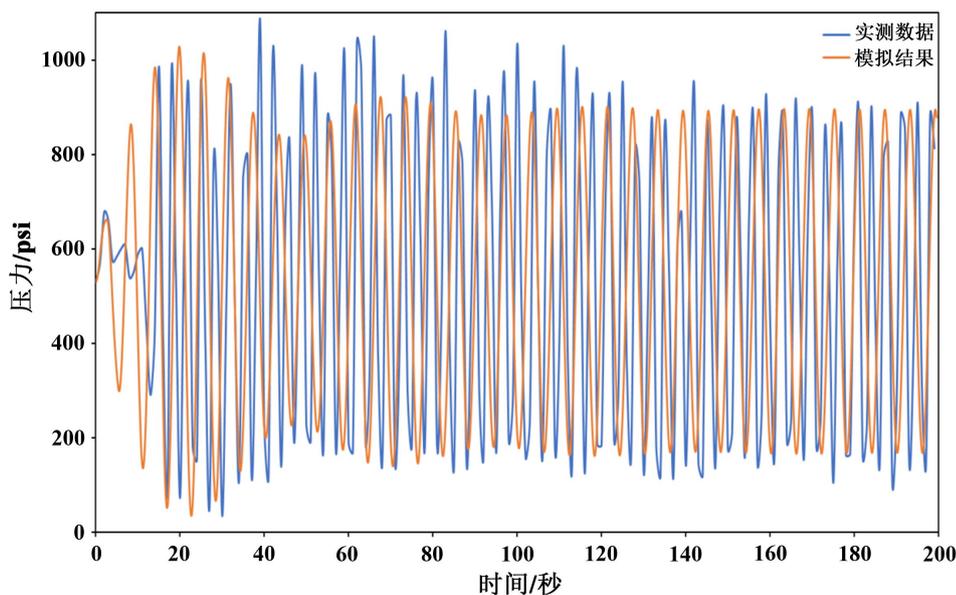
通过理论研究，为实现化学与力学耦合作用效果，设计采用水力脉冲酸化工艺，利用水力脉冲所产生的压力波对近井地带堵塞物施加反复的压力振荡，进而使得堵塞物在振动压力的作用下发生位移、剥落直至堵塞解除，最大化改善孔渗特性，不同深度渗透率改善结果如表 10 所示。

水力脉冲酸化工艺在南海西部油田 5 口成功应用，单口井入井酸液 20 m<sup>3</sup>，在南海北部湾 A 油田采用水力脉冲酸化施工作业，根据不同井筒长度的施工参数组合如下表 11 所示，模拟和实测数据对比结果如图 10 所示，振动频率 10~15 次/分钟，井口排量在 1.0~1.5 m<sup>3</sup>/min，5 口井均超配产，最大超配产 82%。

**Table 10.** Chemical composition of soluble metal materials

**表 10.** 多氢酸酸化实验液体配方

序号	井筒长度, m	施工参数		平均渗透率改善因子
		频率, 次/分钟	排量, 立方米/分钟	
1			0.5	1.780
2	3000	10	1.0	1.856
3			1.5	1.901
4			0.5	1.780
5	3000	15	1.0	1.856
6			1.5	1.901
7			0.5	1.779
8	3000	30	1.0	1.855
9			1.5	1.900



**Figure 10.** Comparison of tensile strength of six metals

**图 10.** X 井脉冲作业实测数据与设计数据对比

## 5. 结论

(1) 常规土酸会造成比多氢酸严重得多的岩石骨架破坏, 当酸液浓度降低时, 溶液在储层深处形成氟化钙、氟化镁及硫化铁等二次沉淀。

(2) 采用多氢酸体系, 造成储层二次伤害小, 对于胶结疏松的储层, 能起到稳定微粒运移的作用, 比较适合研究区储层酸化。

(3) 水力脉冲酸化工艺对北部湾油藏流三段储层具有明显改善效果, 实现了化学与力学耦合作用效果, 值得类似油田推广应用。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“引入可靠性理论研究层理性页岩力-化-渗-热耦合井壁稳定化学调控方法与机理”(项目编号 52374026)。

## 参考文献

- [1] 李明, 张伟, 王强. 南海西部高温高盐储层地质特征与开发挑战[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 56-62.
- [2] 刘士亮, 吴健, 张恒, 等. 南海西部特低渗油气藏储层特征及流体识别方法探讨[J]. 海洋石油, 2024, 44(3): 88-93.
- [3] 张合文, 邹洪岚, 丁云宏, 等. 非均质碳酸盐岩储层差异化控流均衡酸化技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 112-118.
- [4] 孟欣, 袁珍, 杨琛皓. 苏里格气田致密性砂岩储层深度改造技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(2): 181-183.
- [5] 王瑞, 陈志刚, 周涛. 高矿化度油藏酸化过程中铁离子沉淀控制机理[J]. 油田化学, 2020, 37(4): 23-28.
- [6] 美国石油学会. API5CT-2018 套管和油管规范[S]. 华盛顿: API 出版社, 2018.
- [7] 柳杰, 高强, 王紫旋, 等. 耐高温盐酸酸化缓蚀剂的研制及其缓蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(7): 29-35.
- [8] Guo, H., Zhang, L. and Wu, C. (2022) Friction Reduction Mechanism of Nanoparticle-Enhanced Acidizing Fluid. *SPE Journal*, **27**, 3015-3027.
- [9] Smith, J., Brown, K. and Johnson, R. (2018) Organic Acid-Chelating Agent Systems for High-Temperature Stimulation. *SPE Production & Operations*, **33**, 234-245.
- [10] Chen, W. (2020) Nano-Scale Corrosion Inhibitors for Acidizing Tubulars. *Corrosion Science*, **168**, 108-119.
- [11] Liu, Y., Wang, Q. and Zhang, F. (2021) Microemulsion-Based Acidizing Fluid with Self-Diverting Characteristics. *Energy & Fuels*, **35**, 6123-6132.
- [12] Johnson, R.J., Folwell, B.D., et al. (2017) Reservoir Souring-Latest Developments for Application and Mitigation-ScienceDirect. *Journal of Biotechnology*, **256**, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.04.003>
- [13] Basafa, M. and Hawboldt, K. (2019) Reservoir Souring: Sulfur Chemistry in Offshore Oil and Gas Reservoir Fluids. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **9**, 1105-1118. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0528-2>
- [14] Zhou, L. and Huang, M. (2021) Quantum Chemistry Analysis of Acid Additive Molecules. *Journal of Molecular Liquids*, **334**, 116-125.
- [15] Zhang, Y., Liu, X. and Wang, T. (2019) Dynamic Analysis of Acid-Rock Reaction Kinetics in Heterogeneous Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **182**, 106-115.