

文章编号:1009-9603(2021)04-0113-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.04.014

# 奥陶系深层碳酸盐岩酸压机理与深度酸压工艺优化

牟春国, 邝 聃, 何 平, 王历历

(中国石油长庆油田分公司 油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**奥陶系深层碳酸盐岩已成为长庆天然气勘探的重要领域,但与常规白云岩储层相比,奥陶系深层碳酸盐岩储层埋藏深、储层致密、灰质含量高,酸岩反应速度快,常规酸压改造酸蚀裂缝长短,单井产量较低,需开展酸压机理研究和深度酸压工艺优化,提高酸压改造效果。针对储层地质特征和酸压改造需求,通过开展酸岩反应动力学实验、酸蚀程度评价、酸压数值模拟,明确了不同白云石含量碳酸盐岩储层酸岩反应机理的差异性:随着白云石含量的降低,灰质含量的增加,反应速度加快,岩石表面酸蚀程度高,但酸蚀裂缝长度降低,应强化不同白云石含量碳酸盐岩储层改造的差异化设计。以“先造压裂缝、后酸蚀”的改造思路,优化形成了“前置液造缝、多体系酸液交替注入、缝内转向”为核心的深度酸压技术,通过酸液和压裂液共同作用,形成水力裂缝、酸蚀裂缝与基质溶孔连通的裂缝网络,现场试验取得较好增产效果。

**关键词:**奥陶系;碳酸盐岩;白云岩;酸蚀裂缝;非均匀刻蚀;深度酸压

中图分类号:TE357.2

文献标识码:A

## Acid-fracturing mechanism and deep acid-fracturing technique optimization of Ordovician deep carbonate rocks

MOU Chunguo, KUANG Dan, HE Ping, WANG Lili

(Oil and Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an City, Shaanxi Province, 710018, China)

**Abstract:** Ordovician deep carbonate rocks have become an important field of natural gas exploration in Changqing. However, compared with the conventional dolomite reservoirs, the Ordovician carbonate reservoirs are deeply buried and tight with high limestone content and fast acid-rock reaction. Conventional acid-fracturing is confronted with short acid-etched fractures and low single-well production. Therefore, it is necessary to study acid-fracturing mechanism and optimize the deep acid-fracturing technique to improve the acid-fracturing effect. In accordance with the reservoir geological characteristics and the demand for acid-fracturing, the kinetic experiments of acid-rock reaction, the evaluation of acid etching, and the numerical simulation of acid fracturing were carried out to clarify the differences in the acid-rock reaction mechanism of carbonate reservoirs with different dolomite contents: With the decrease in dolomite content and increase in limestone content, the acid-rock reaction is accelerated with severer acid etching on the rock surface, while the length of acid-etched fractures witnesses a decline. Hence, the differential design of carbonate reservoirs with different dolomite contents should be strengthened. The deep acid-fracturing technology with the core of “hydraulic fracture generation by prepad fluid, alternative acid injection by multi-system, and internal fracture turning” was optimized based on the idea of “forming hydraulic fractures first and then conducting acid etching”. Through the joint action of acid solution and fracturing fluid, a fracture network connecting hydraulic fractures, acid-etched fractures, and matrix dissolved pores was formed. In the field test, our technology has played a role in raising production.

**Key words:** Ordovician; carbonate rock; dolomite; acid-etched fracture; non-uniform etching; deep acid-fracturing

收稿日期:2020-12-22。

作者简介:牟春国(1981—),男,四川广元人,高级工程师,硕士,从事油气井压裂改造及增产技术方面的研究。E-mail:mgc\_cq@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目47“致密气富集规律与勘探开发关键技术”,课题6“致密气高效开采增产工艺技术”(2016ZX05047006)。

近年来,鄂尔多斯盆地奥陶系深层碳酸盐岩已成为长庆油田天然气勘探的重要领域,并取得了较大进展。马五<sub>6</sub>段、马五<sub>7</sub>段累积完钻试气井165口,整体上单井产量较低,只有10口井获得高产;马三、马四段地层压力系数较高,平均达到32.6 MPa,累积完钻试气井41口,其中18口井获得低产气流。与靖边气田风化壳碳酸盐岩储层相比,奥陶系深层尤其是马三、马四段气层埋藏深、储层致密、灰质含量高,常规酸压改造因规模较小、工艺参数不合理,改造后酸蚀缝长较短、裂缝导流能力较低,平均单井试气产量仅为 $0.52 \times 10^4 \sim 2.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。需在开展酸压机理研究的基础上,优化酸压工艺技术,实现储层深度酸压改造,提高单井产量。

中外学者围绕提高酸蚀裂缝导流能力开展了大量的研究工作。BARRON等考虑了缝宽、酸浓度、反应时间、缝高等参数对酸和天然大理石的影响<sup>[1]</sup>。WALSH发现岩心非均质性和地层围压将影响酸蚀后的裂缝导流能力<sup>[2]</sup>。MIRZA等研究认为裂缝壁面的不均匀几何形态是影响裂缝导流能力的关键因素<sup>[3]</sup>。POURNIK等研究了残酸对裂缝刻蚀形态的影响,发现残酸、鲜酸造成的裂缝刻蚀形态存在一定的差别<sup>[4]</sup>。齐宁等实现了裂缝性碳酸盐岩油藏储层尺度的酸化数值模拟,为开展白云岩大尺度酸压数值模拟提供了可能<sup>[5-6]</sup>。目前改善酸蚀裂缝导流能力研究多是基于灰岩而开展的<sup>[7]</sup>,对于灰质白云岩储层酸压效果差、非均匀刻蚀程度低、压后导流能力低等问题,尚未开展深入研究<sup>[8-11]</sup>。为此,笔者针对奥陶系深层碳酸盐岩储层地质特征,开展酸压机理研究与评价,通过酸蚀裂缝导流实验和数值模拟研究,揭示奥陶系深层灰质白云岩储层非均匀刻蚀机理,指导酸压改造工艺技术与参数的优化设计。

## 1 储层地质特征及改造难点

奥陶系深层碳酸盐岩马五<sub>6</sub>—马五<sub>10</sub>段气藏埋深为3 100~4 200 m,其中马五<sub>7</sub>、马五<sub>9</sub>段岩性以粉

晶白云岩为主,晶间孔、溶孔发育,平均孔隙度为5.0%,平均渗透率为0.53~0.74 mD;马五<sub>6</sub>、马五<sub>8</sub>、马五<sub>10</sub>段岩性以粉晶白云岩、含膏白云岩为主,晶间孔、溶孔较发育,平均孔隙度为3.06%,平均渗透率为0.53 mD。马三段—马四段气藏埋深为3 200~4 400 m,发育白云岩薄夹层,马三段平均孔隙度为2.5%,平均渗透率为0.33 mD;马四段晶间孔较发育,局部发育微裂缝,平均孔隙度为2.8%,平均渗透率为4.76 mD。

奥陶系深层碳酸盐岩酸压改造存在的主要问题为:①灰质含量高,尤其盆地中东部马四段发育白云岩薄夹层,部分发育云质灰岩、灰岩,酸岩反应速度快。②储层致密,与常规白云岩储层相比,酸蚀裂缝表面更均匀,不利于形成非均匀刻蚀沟槽或蚓孔,酸蚀裂缝导流能力低。③气层埋藏深,闭合应力较高,酸蚀裂缝闭合后导流能力下降幅度大,改造效果较差。为此,在开展岩心酸岩反应机理实验、酸蚀表面刻蚀评价的基础上,优化酸压改造工艺,实现储层深度改造,提高酸蚀裂缝泄流面积。

## 2 酸岩反应机理

### 2.1 酸岩反应动力学实验

影响酸压改造效果的关键因素是酸蚀裂缝的有效长度和导流能力。对于奥陶系深层碳酸盐岩储层,常规酸压的酸液与岩石反应较快,酸液的有效作用距离变短。要开展深度酸压改造,从本质上改变酸岩反应过程,控制反应速度,降低酸液滤失,提高酸液作用距离。

为了明确白云岩、灰岩的酸岩反应动力学差异,选取白云石含量分别为7%、56%、75%和90%的4种岩样,在酸液质量分数为20%,实验温度为90℃,转速为500 r/min的条件下开展酸岩反应动力学实验研究。实验结果(表1)表明:相同条件下,白云岩的酸岩反应速度远小于灰岩,两者相差1个数量级;灰质白云岩的反应速度介于灰岩、白云岩之间。

表1 不同条件下酸岩反应动力学实验结果

Table1 Kinetics experiment results of acid-rock reaction under different conditions

岩性	白云石含量/%	反应前质量/g	反应后质量/g	质量差/g	酸液浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	浓度差/(mol·L <sup>-1</sup> )	反应速度/(10 <sup>-6</sup> mol·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	lgC <sub>0</sub>	lgJ
灰岩	7	13.78	7.18	6.60	6.02	0.132 0	18.526 3	0.861	-4.732
灰质白云岩	56	15.85	13.37	2.48	6.02	0.049 6	6.961 4	0.861	-5.157
灰质白云岩	75	14.08	12.62	1.46	6.02	0.029 2	4.098 25	0.861	-5.387
白云岩	90	14.74	13.40	1.34	6.02	0.026 8	3.761 4	0.861	-5.425

在不同温度、不同酸液质量分数、不同转速条件下开展不同白云石含量的碳酸盐岩与酸液的反应速度评价。从图1可看出,灰岩、白云岩的酸岩反应速度与酸液质量分数、温度呈正相关,当温度达到90℃以上时,温度对白云岩的酸岩反应速度的影响趋于稳定;酸岩反应速度随转速增加而增大,当转速达到500 r/min以上时,酸岩反应速度变化趋于稳定,转速变化对白云岩的酸岩反应速度影响较小。

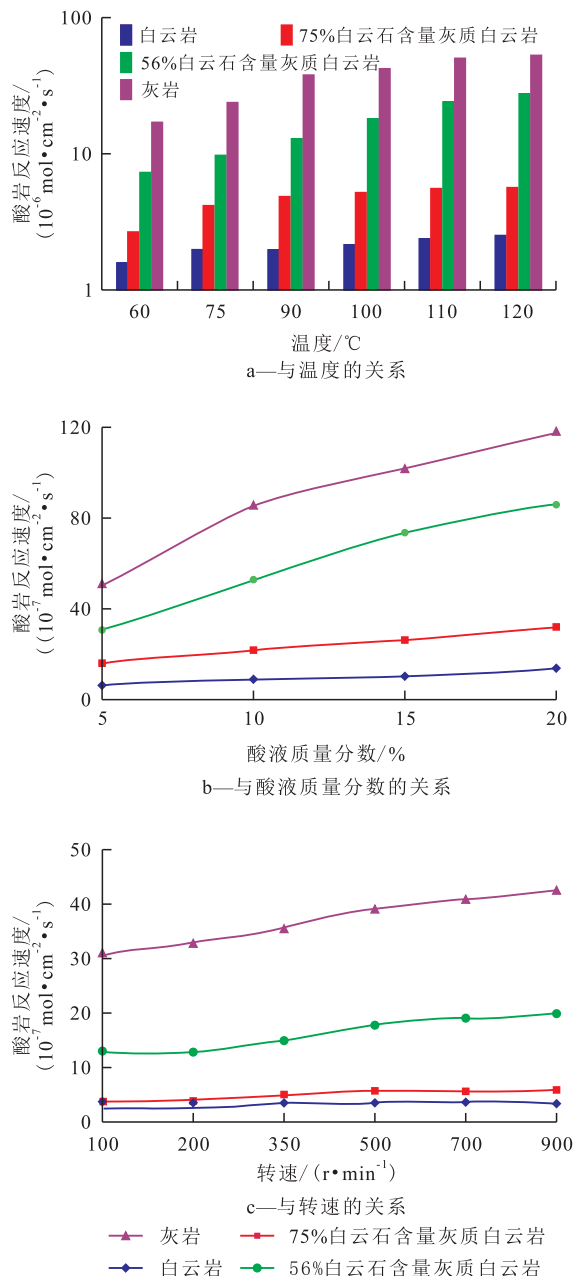


图1 不同白云石含量的碳酸盐岩酸岩反应速度与温度、酸液质量分数、转速的关系

Fig.1 Relations of reaction rate of carbonate rocks with different dolomite contents with temperature, acid concentration, and rotation speed

## 2.2 酸岩酸蚀表面特征评价

选取奥陶系深层碳酸盐岩岩心(白云石含量分

别为56%和75%)切片17组进行三维激光扫描,按照不同酸液质量分数(5%,10%,15%,20%)、不同温度(60,75,90,100℃)、不同转速(100,200,350,500和900 r/min)开展酸岩反应,再将反应后的岩心切片进行激光扫描,得到岩心表面酸蚀下降高度。

不同白云石含量的碳酸盐岩刻蚀程度评价 选取白云石含量分别为56%和75%的碳酸盐岩在实验温度为90℃、转速为500 r/min条件下进行酸岩反应,评价酸蚀表面刻蚀程度。结果表明:不同白云石含量的碳酸盐岩酸蚀后均能形成非均匀刻蚀,灰岩含量高的岩样刻蚀程度较高。随着白云石含量增加,刻蚀越偏向于面溶蚀,而白云石含量较少时倾向于点溶蚀。

不同酸液质量分数、温度、转速的刻蚀程度评价 选取白云石含量为75%的碳酸盐岩在不同酸液质量分数、温度、转速条件下进行反应,评价酸蚀表面刻蚀程度。实验结果表明:随着酸液质量分数的升高,酸蚀下降高度分别集中在-0.4,-0.6,-0.8和-1.2 mm,表明随着酸液质量分数增加,刻蚀程度越大;随着温度的升高,酸蚀下降高度分别集中在-0.6,-0.8,-1.2和-1.3 mm,表明温度越高,刻蚀程度越大,酸岩反应速度越快;随着转速的升高,酸蚀下降高度分别集中在-0.6,-0.65,-0.9,-1.3和-1.4 mm,且随着转速增加,岩石表面越凹凸不平,刻蚀程度越大。

## 2.3 白云岩酸压数值模拟

酸压作为碳酸盐岩储层最常用的改造措施,酸蚀裂缝的有效长度和导流能力决定酸压改造的效果。研究发现,灰质含量影响岩石矿物组分,岩石矿物组分影响酸岩反应速度,不影响岩石孔隙结构<sup>[12-14]</sup>。白云岩和酸液发生反应后,岩石表面越平坦均匀,酸蚀裂缝导流能力越低。改善白云岩储层酸压效果的关键在于提高改造裂缝的长度和导流能力。采用数值模拟的方式,研究不同岩性和酸液反应的裂缝酸蚀形态,确定表面反应速度、储层白云石含量、酸液注入速度和酸液质量分数对裂缝长度和导流能力的影响。

假设碳酸盐岩储层长度为 $L$ ,宽度为 $W$ ,中间由一条宽度为 $W_f$ 的水力裂缝连接至井筒。酸液自井筒,经裂缝垂流入储层。裂缝的流动阻力较小,压降几乎为0。酸液在裂缝壁面不同位置的流速为 $U_0$ ,在裂缝壁面的浓度随位置的变化而变化。酸液在地层中的流动符合达西定律,压力分布满足不可压缩流体的连续性方程;氢离子在流体中的浓度分布满足对流扩散方程;岩石组分变化满足白云石和



方解石的含量变化方程。

酸岩反应速度方程式为：

$$J = KC_0^m \quad (1)$$

当反应级数  $m = 1$  时,纯白云岩和纯灰岩在温度为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、转速为  $500\text{ r/min}$  条件下得到酸岩反应速度常数。同等条件下,灰岩的酸岩反应速度常数  $K_c = 55.8 \times 10^{-3}\text{ mm/s}$ ,处于传质控制模式;白云岩的酸岩反应速度常数  $K_{Mg} = 2.4 \times 10^{-3}\text{ mm/s}$ ,两者相差 23.3 倍,白云岩处于表面反应控制模式。

酸蚀裂缝长度 如图 2 所示,不同岩性储层酸蚀后均能形成一定长度酸蚀裂缝,灰质含量高的储层酸岩反应速度快,酸蚀裂缝距离短;白云岩酸岩反应速度慢,酸蚀裂缝距离较长。

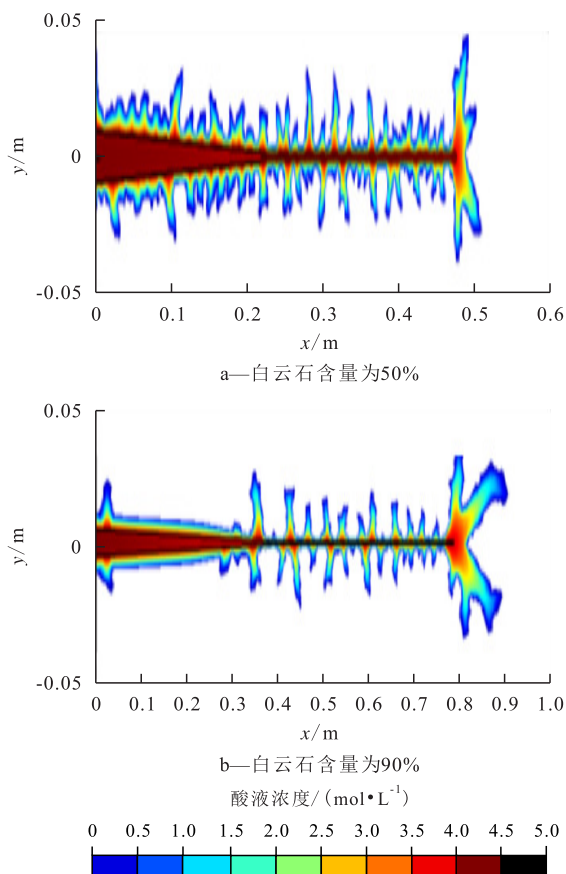


图 2 不同白云石含量碳酸盐岩酸蚀裂缝长度模拟

Fig.2 Simulation of acid-etched fracture length in carbonate rocks with different dolomite contents

非均匀刻蚀程度 不同岩性储层酸蚀后均能形成非均匀刻蚀,白云石含量越低的储层酸液刻蚀程度较高。白云石含量大于  $95\%$  时,裂缝壁面和近裂缝地层溶蚀均匀;白云石含量大于  $75\%$  时,裂缝壁面溶蚀均匀,近裂缝地层出现高渗透通道;白云石含量小于  $50\%$  时,裂缝壁面形成不均匀刻蚀沟槽。

不同表面反应速度下的酸蚀裂缝形态模拟结果(图 3a)表明:表面反应速度越高,酸蚀裂缝非均

匀刻蚀程度较高,但整体导流能力偏低;表面反应速度越低,酸蚀裂缝导流能力越高。不同酸液流速下的酸蚀裂缝形态模拟结果(图 3b)表明:提高注入速度,储层出现均匀溶蚀的趋势,高渗透通道增多、变细;裂缝壁面溶蚀效果变差,尤其是白云石含量超过  $95\%$  的地层。较低的流速有利于酸液与白云岩充分反应,在裂缝壁面形成具有一定强度的刻蚀槽。不同酸液浓度下的酸蚀裂缝形态模拟结果(图 3c)表明:注入相同量的氢离子,酸液浓度对模拟结果影响不大。这是因为数值模拟将酸岩反应级数定为 1,若白云岩与酸液的反应级数大于 1,提高酸液浓度对改善裂缝壁面溶蚀有效,否则效果不大。综合上述分析,各因素影响程度由大到小为:表面反应速度、酸液流速、酸液浓度。

天然裂缝对酸蚀裂缝形态的影响 奥陶系深层碳酸盐岩储层天然裂缝较为发育,天然裂缝对酸蚀裂缝长度、裂缝导流能力影响较大<sup>[15]</sup>,从而影响酸压改造效果和试气产量。天然裂缝的条数、裂缝倾角、与酸蚀裂缝的距离都对酸压改造效果有较大的影响。

由图 4a 的模拟结果可知,在裂缝型白云岩储层中,酸液能迅速穿过储层中的天然裂缝,天然裂缝的存在会使酸液更快突破地层,减少酸液用量。随着储层中天然裂缝的增加,酸液突破时间减少,酸液用量减少,即天然裂缝越多,酸压改造效果越好。

裂缝倾角是指裂缝内酸液流动方向与垂直方向的夹角,即裂缝与  $y$  轴方向的夹角。由图 4b 的模拟结果可知,裂缝倾角越小,酸液突破时间越短,酸液用量越小,酸压效果越好。

由图 4c 的模拟结果可知,在裂缝型白云岩储层中,对于垂直缝(垂直于人工裂缝,倾角为  $0^\circ$ ),酸液能迅速穿透,利于酸液突破,其与人工裂缝的距离越短,酸液突破时间越短,酸液用量越小,酸压效果越好;对于水平缝(平行于人工裂缝,倾角为  $90^\circ$ ),其主要作用是连通相对较近的酸蚀通道,在一定程度上会增加酸液的消耗,降低酸压后裂缝壁面的稳定性,其与人工裂缝的距离越短,酸蚀通道越易沟通,酸液量越大,酸压效果越差。

### 3 酸压工艺优化设计

以提高酸液作用距离,增大酸蚀裂缝非均匀刻蚀程度和酸蚀裂缝导流能力为目标,按照“先造压裂缝、后酸蚀”的酸压改造思路,通过酸液和非反应的压裂液共同作用,形成水力裂缝、酸蚀裂缝与基

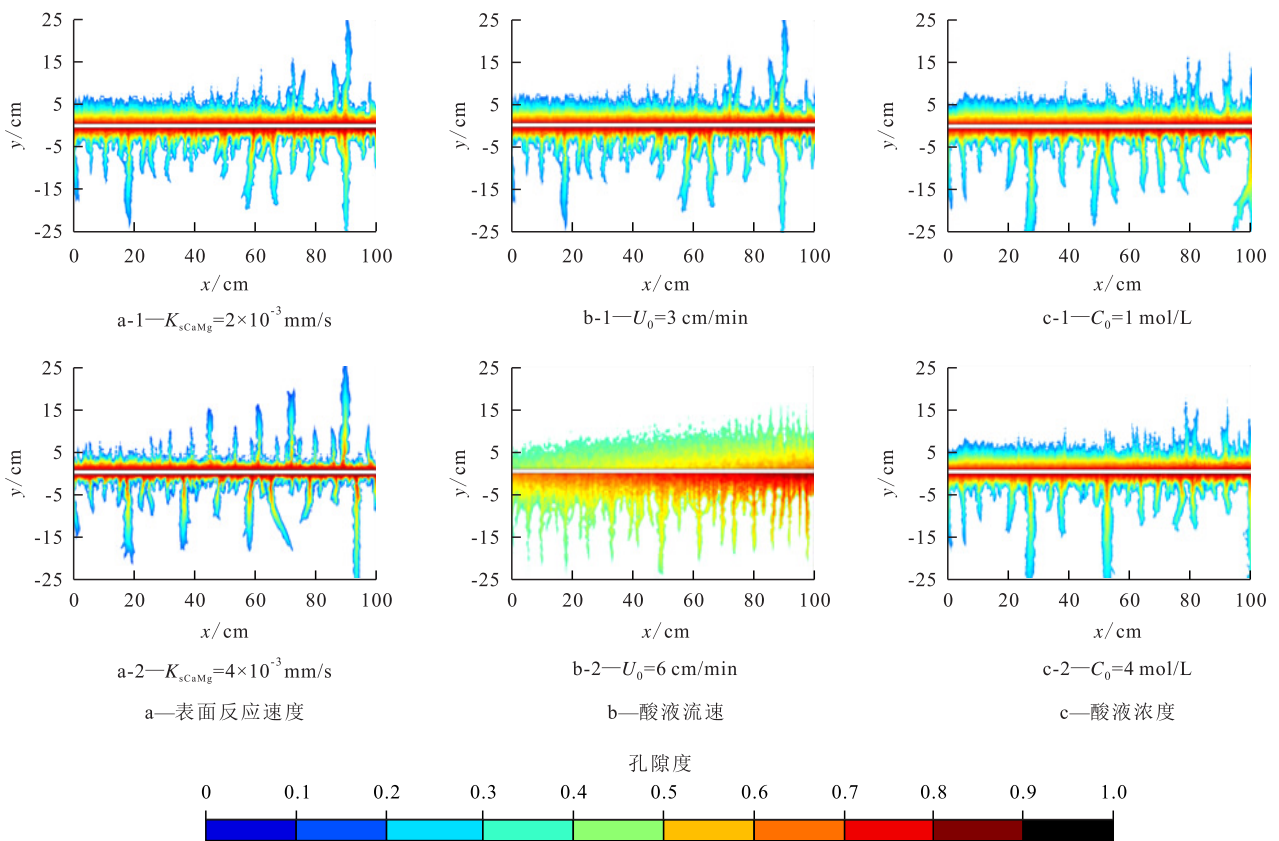


图3 不同条件下酸蚀裂缝酸蚀程度模拟

Fig.3 Simulation of acid etching of fractures under different conditions

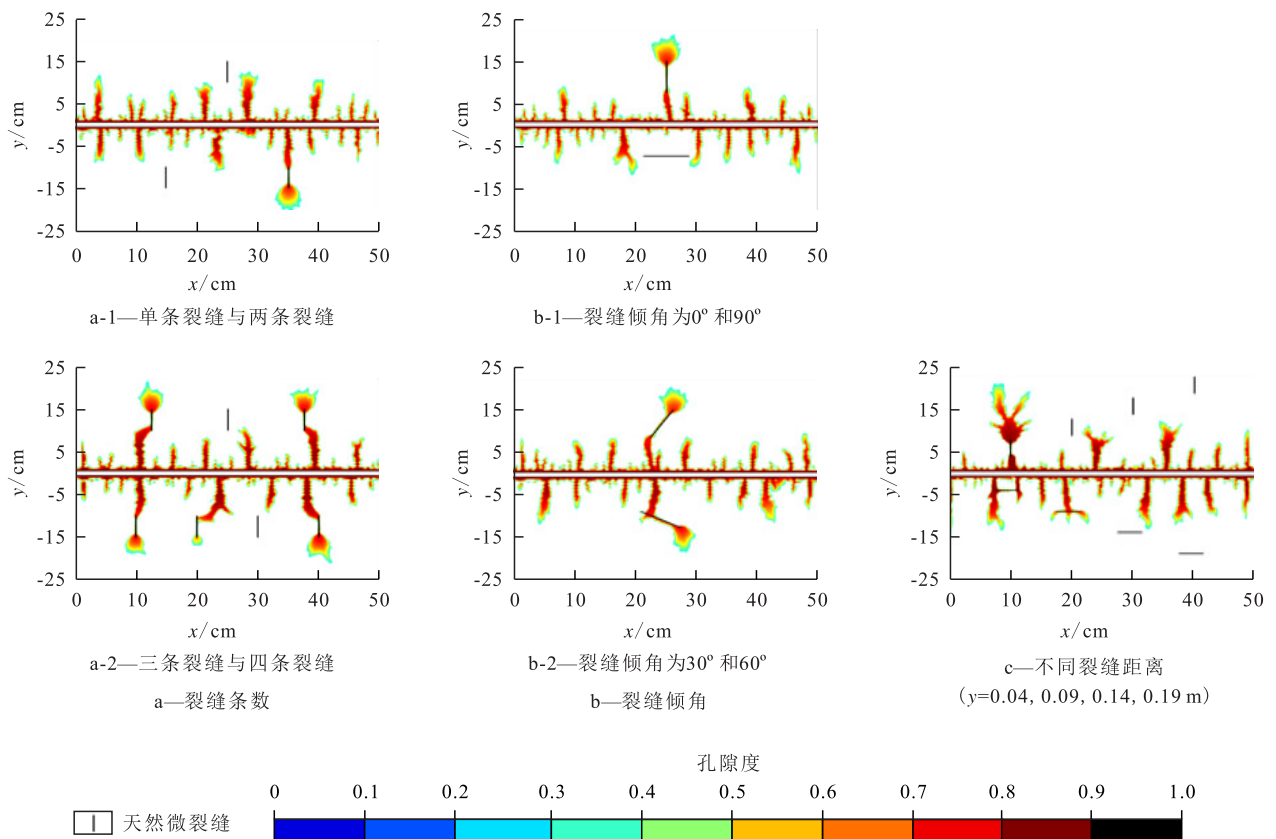


图4 天然裂缝条件下酸蚀裂缝形态模拟

Fig.4 Simulation of acid-etched fracture shapes under natural fracture conditions

质溶孔连通的裂缝网络。主要做法为:①采用非反应型流体作为前置液在酸压前注入地层,形成较长人工压裂改造裂缝。②采用多种酸液交替注入,降低岩石表面与酸液的反应速度,提高酸液的穿透距离。③通过转向酸实现裂缝缝内暂堵转向,提高储层改造程度。④采用较大排量注入,实现酸液快速向储层深度推进,减少酸液与岩石表面的接触反应时间,降低酸液滤失和酸岩反应速度,实现储层深度酸蚀,提高改造深度。

**酸液量优化** 取奥陶系深层马四段岩心,进行不同酸液量的酸蚀裂缝导流能力对比,模拟结果(表2)表明,在不同闭合压力条件下,随着酸液量的增加,酸蚀裂缝导流能力增大;储层埋藏越深,闭合压力越高,酸蚀裂缝导流能力越小。因此,在满足入地酸液返排出井筒减少储层伤害的前提下,可尽量提高酸液量,增大酸压改造强度。

表2 不同酸液量的酸蚀裂缝导流能力对比

Table2 Comparison between conductivity of acid-etched fractures with different acid contents mD·m

模拟酸液量/m <sup>3</sup>	20 MPa		30 MPa		40 MPa	
	酸蚀前	酸蚀后	酸蚀前	酸蚀后	酸蚀前	酸蚀后
100	3.5	112.5	1.9	112.5	0.8	23.1
200	3.7	234.9	2.6	134.2	1.3	43.4
300	10.4	326.7	6.2	182.3	2.3	75.8
400	7.6	383.4	3.7	203.4	2.1	82.1

并对不同酸液量的酸蚀裂缝长度进行数值模拟,模拟结果表明,增大酸液量,有利于增加酸蚀缝长,提高酸蚀裂缝泄流面积,优化单层酸液量为200~300 m<sup>3</sup>。

**注入级数优化** 随着注入级数的增加,酸蚀距离增加,当注入级数达到3级以后,酸蚀距离及导流能力增加幅度不大,优选注入级数为3~4级(图5)。

## 4 现场应用及效果评价

2019—2020年,苏里格气田开展多体系复合酸

表3 陕X1井多体系复合酸压试气效果对比

Table3 Comparison between gas testing of multi-system compound acid fracturing in Well Shaan X1

井号	厚度/m	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	声波时差/( $\mu s \cdot m^{-1}$ )	含气饱和度/%	测井解释	改造工艺	酸液量	注入级数	排量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ )	产气量/( $10^4 m^3 \cdot d^{-1}$ )
试验井	陕X1	5.4	1 897.01	152.76	49.59	气层	复合深度酸压 滑溜水为100 m <sup>3</sup> 稠化酸为180 m <sup>3</sup> 转向酸为140 m <sup>3</sup>	3	3.0~4.0	5.62
对比井	陕B1	5.1	324.20	161.84	40.70	气层	组合酸压 稠化酸为89.0 m <sup>3</sup> 降阻酸为26.4 m <sup>3</sup>		3.0~1.5	2.24
	陕B2	1.2	1 552.23	155.72	33.33	差气层	多级注入酸压 稠化酸为100 m <sup>3</sup> 交联酸为100 m <sup>3</sup>	2	3.0~3.5	1.31

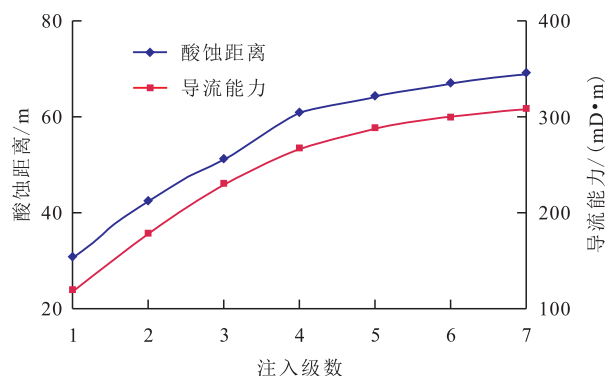


图5 不同注入级数下裂缝延伸与导流能力

Fig.5 Fracture extension and conductivity at different injection levels

压试验5口井,平均产气量为 $4.62 \times 10^4 m^3/d$ ,对比6口邻井平均产气量 $2.93 \times 10^4 m^3/d$ ,增产效果较为明显。其中,陕X1井试气获日产气量 $5.62 \times 10^4 m^3/d$ (表3),对比邻井平均日产气量 $1.77 \times 10^4 m^3/d$ ,增产效果较为显著。酸压模拟结果表明,陕X1井酸蚀缝长为86.5 m,平均裂缝闭合宽度为8.2 mm,平均裂缝导流能力为175 mD·m;陕B2井酸蚀缝长为52.6 m,平均裂缝闭合宽度为5.4 mm,平均裂缝导流能力为134 mD·m;陕X1井通过酸压工艺和改造参数的优化设计,酸蚀缝长和裂缝导流能力对比陕B2井增大,表明该井改造效果较好。

## 5 结论

奥陶系深层碳酸盐岩埋藏深、温度较高、储层致密、灰质含量高,酸岩反应速度较白云岩快,且随着酸液浓度、温度、转速的增大,酸岩反应速度均增大。白云岩储层中天然裂缝较为发育,酸液沿着裂缝面进行反应,造成酸液滤失增大,酸蚀裂缝长度变短。通过优化“前置液造缝、多体系酸液交替注入、缝内转向”的酸压工艺技术,提高了酸蚀裂缝长度,增大了非均匀刻蚀程度和酸蚀裂缝导流能力,现场应用取得明显的增产效果。下步在持续优化



酸液体系缓速性能和酸压工艺技术的基础上,进一步提高酸压改造效果,提升单井试气产量。

### 符号解释

- $C_0$ ——酸液浓度, mol/L;  
 $J$ ——酸岩反应速度, mol/(s·cm<sup>2</sup>);  
 $K$ ——酸岩反应速度常数, mm/s;  
 $K_{C_a}$ ——方解石酸岩反应速度常数, mm/s;  
 $K_{M_g}$ ——白云岩酸岩反应速度常数, mm/s;  
 $K_{s_{C_a M_g}}$ ——白云岩表面反应速度常数, mm/s;  
 $m$ ——反应级数;  
 $L$ ——储层长度, cm;  
 $U_0$ ——注入速度, cm/min;  
 $W$ ——储层宽度, cm;  
 $W_f$ ——裂缝宽度, cm, 取值为2;  
 $x$ ——酸蚀缝长, m;  
 $y$ ——酸蚀缝宽, m。

### 参考文献

- [1] BARRON A N, HENDRICKSON A R, WIELAND D R. The effect of flow on acid reactivity in a carbonate fracture[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, 14(4): 409-415.
- [2] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(5): 429-435.
- [3] MIRZA S B, KUNAK O A, GONG M. A systematic experimental study of acid fracture on conductivity[R]. SPE 31098, 1996.
- [4] POURNIK M, LI L, SMITH B, et al. Effect of acid spending on etching and acid-fracture conductivity[J]. *SPE Production & Operations*, 2013, 28(1): 46-54.
- [5] 齐宁, 陈国彬, 李振亮, 等. 基于分步算法的裂缝性碳酸盐岩油藏大尺度酸化数值模拟[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 348-362, 371.  
 QI Ning, CHEN Guobin, LI Zhenliang, et al. Numerical simulation of large-scale acidification in fractured carbonate reservoirs based on a step-by-step algorithm[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 348-362, 371.
- [6] QI Ning, CHEN Guobin, LIANG Chong, et al. Numerical simulation and analysis of the influence of fracture geometry on wormhole propagation in carbonate reservoirs[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 198(4): 124-143.
- [7] 柳明, 张士诚, 牟建业. 碳酸盐岩酸化径向蚓孔扩展形态研究[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 106-110.  
 LIU Ming, ZHANG Shicheng, MOU Jianye. Dissolution pattern of radial wormhole model in carbonate acidizing[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 106-110.
- [8] 张倩, 李年银, 李长燕, 等. 中国海相碳酸盐岩储层酸化压裂改造技术现状及发展趋势[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(2): 1-7.  
 ZHANG Qian, LI Nianyin, LI Changyan, et al. Overview and trend of acid-fracturing technology for marine carbonate reservoirs in China[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(2): 1-7.
- [9] 任岩, 李晓明, 晏信飞, 等. 川中磨溪地区致密碳酸盐岩储层可压裂性预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(2): 164-170.  
 REN Yan, LI Xiaoming, YAN Xinfei, et al. Fracability prediction for tight carbonate reservoirs in Chuazhong Moxi area[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(2): 164-170.
- [10] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 13-23.  
 YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen1 in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 13-23.
- [11] 游利军, 孟森, 高新平, 等. 碳酸盐岩储气库储层微粒运移对酸化的响应[J]. *断块油气田*, 2020, 27(5): 676-680.  
 YOU Lijun, MENG Sen, GAO Xinping, et al. Response of fines migration to acidizing in carbonate underground gas storage[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(5): 676-680.
- [12] 陈昱林, 曾焱, 段永明, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层孔隙结构特征及储层分类[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(5): 621-631.  
 CHEN Yulin, ZENG Yan, DUAN Yongming, et al. Pore structure characteristics and reservoir classification of dolomite reservoirs in fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(5): 621-631.
- [13] 商志垒, 武静, 尚凡杰, 等. 巴西桑托斯盆地盐下碳酸盐岩油藏硅化作用成因及其对储层的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(6): 20-29.  
 SHANG Zhilei, WU Jing, SHANG Fanjie, et al. Silicification geneses and their effects on pre-salt carbonate reservoir in M Oilfield, Brazil Santos Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(6): 20-29.
- [14] 王振洲, 张春雷, 高世臣. 利用决策树方法识别复杂碳酸盐岩岩性——以苏里格气田苏东41-33区块为例[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(6): 25-33.  
 WANG Zhenzhou, ZHANG Chunlei, GAO Shichen. Lithology identification of complex carbonate rocks based on decision tree method: An example from Block Sudong41-33 in Sulige Gas Field[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(6): 25-33.
- [15] 赵立强, 高俞佳, 袁学芳, 等. 高温碳酸盐岩储层酸蚀裂缝导流能力研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2017, 7(1): 20-26.  
 ZHAO Liqiang, GAO Yujia, YUAN Xuefang, et al. Research on flow conductivity of acid etched fracture of carbonate reservoir under high temperature[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2017, 7(1): 20-26.