

# 泡沫酸酸化技术及其在气井酸化中的应用<sup>\*</sup>

李宾飞<sup>1</sup> 李兆敏<sup>1</sup> 徐永辉<sup>1</sup> 林日亿<sup>1</sup> 吴信荣<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学·华东 2. 中国石化中原油田采油工程技术研究院)

李宾飞等. 泡沫酸酸化技术及其在气井酸化中的应用. 天然气工业, 2006, 26(12): 130-132.

**摘要** 在常规酸化过程中, 对于多层非均质地层而言, 由于渗透率的差异, 酸液主要是进入其中的高渗透层, 低渗透层或堵塞严重的地层就不能进酸或进酸太少, 这影响酸化效果。针对上述问题, 对泡沫酸酸化技术进行了研究; 通过室内实验筛选出了耐酸耐盐的起泡剂 DY-1+ SJ-8 和稳泡剂 KMS-2, 并对不同起泡剂浓度下的泡沫酸性能进行了评价, 确定了其使用浓度; 在此基础上进行了泡沫的岩心分流实验, 实验结果表明泡沫流体可以增加低渗透岩心的分流量, 减少高渗岩心的分流量, 使泡沫流体在不同渗透率岩心内均匀推进, 基于此原理, 泡沫酸酸化可以增加中低渗透层的酸液注入量, 减少高渗层的吸酸量, 提高酸化效果。泡沫酸酸化技术在中原油田气井酸化中获得了成功, 增产效果显著, 目前已被中原油田作为气井酸化的推荐工艺加以推广应用。

**关键词** 泡沫酸 增产措施 酸化 分相流动 非均质油气藏

## 一、引言

储层酸化是油气井开发过程中一项重要的增产增注措施。由于重复作业以及储层非均质等因素的影响, 在常规酸化过程中, 酸液将遵循自然选择原则, 即酸液优先进入高渗透层带, 低渗透层或堵塞严重地层不能进酸或进酸太少, 致使按多层酸化设计的酸量主要进入其中的高渗透层, 使高渗透层吸酸过多; 同时酸液不能按设计要求进入低渗透层, 使低渗透层渗透率得不到改善<sup>[1]</sup>。而且, 常规酸化后返排困难, 容易造成二次污染, 达不到增产目的。泡沫酸酸化技术是将常规酸化与泡沫流体相结合, 具有很多常规酸化所不具备的优点, 是一种很有发展前途的增产技术。

## 二、泡沫酸酸化技术简介

泡沫酸酸化技术就是在常规酸液体系中加入起泡剂和稳泡剂, 通过泡沫发生器与气体(一般为氮气或二氧化碳气体)混合, 形成以酸为连续相、气泡为分散相的泡沫体系<sup>[2-4]</sup>, 使得配制的酸化体系兼有泡沫流体性质和酸化能力, 然后注入地层进行酸化。按照泡沫特征值(即泡沫体系中气相体积所占泡沫总体积的百分数)泡沫酸体系可以分为以下三类。

①增能型。泡沫特征值小于 52% 的泡沫酸称为“增能型”。主要是通过氮气压缩的弹性能量, 利于处理液在施工后从地层返排, 同时又因泡沫酸含气体成分高, 液柱压头低, 有助于减少返排的能量需要, 因此“增能型”体系主要用来提高酸化后的返排能力。②泡沫型。泡沫特征值在 52% ~ 90% 的泡沫酸叫做“泡沫型”。这种类型的泡沫酸黏度高、滤失量小、缓速和分流效果好, 主要用来增加酸液处理范围和改善高低渗透层之间的吸酸量矛盾, 提高酸化效果, 尤其适用于酸压增产。③雾化型。泡沫特征值大于 90% 的泡沫酸称为“雾化酸”。此时气相或气中夹液作为连续相, 而酸液则作为分散相。雾化酸像气体一样具有很低的密度、黏度和表面张力, 具有较高的流动能力, 因而易于进入岩石的孔隙间, 使注入压力比常规注酸压力低得多。

通常所用泡沫酸的泡沫特征值为 60% ~ 80%。与常规酸化相比, 泡沫酸酸化具有选择性、缓蚀效果好、容易返排、对产层伤害小等优点<sup>[2-4]</sup>。

## 三、室内实验研究

由于酸液体系以及地层矿物的影响, 因此必须选用耐盐、耐酸的起泡剂和稳泡剂。另外, 为了评价泡沫的分流效果, 有必要进行并联岩心的泡沫分流

\* 本文受到山东省自然科学基金项目“泡沫流体流变性研究与应用”(编号: Q99A16)资助。

作者简介: 李宾飞, 1978年生, 博士研究生。地址: (257061) 山东省东营市中国石油大学石油工程学院。电话: (0546) 8391351。E-mail: upcflying@163.com

实验。

### 1. 起泡剂和稳泡剂的筛选

典型泡沫酸配方包括以下几个部分：土酸酸液(3%~5% HF+15%~18% HCl)+铁离子稳定剂+黏土稳定剂+起泡剂+稳泡剂+缓蚀剂+N<sub>2</sub>。由于泡沫酸的特殊性质(如选择性和返排迅速等)，泡沫酸体系中不必添加酸化前暂堵剂和助排剂等添加剂。

在起泡剂和稳泡剂的筛选实验中，采用搅拌法对发泡剂的起泡能力和形成泡沫的稳定性进行评价。搅拌法是美国工业界评价发泡剂性能的一种常用方法，测定周期短，耗药量少，操作简单，测定结果重复性好，可靠程度高<sup>[5]</sup>。其具体方法是将定量发泡剂溶液倒入量杯中，以规定的速度搅拌一定的时间，记录停止搅拌时泡沫体积(V<sub>0</sub>, mL)和泡沫析出一半液体时的时间(t<sub>50</sub>, s)，用V<sub>0</sub>表示发泡能力，用t<sub>50</sub>表示泡沫稳定性。

经过初选，筛选出东营方圆公司提供的SJ-6、SJ-8和英特化工提供的DY-1等3种起泡剂，在此基础上进行优选。常用的稳泡剂是PAM等起增黏作用的物质，但PAM本身耐酸和耐盐性能较差，经过多方面的调研，选用酸化胶凝剂KMS-2作为增黏剂，来提高泡沫强度。

起泡剂的评价是在50℃的酸液体系中进行的，基液总体积为100 mL，其中盐酸48 mL(38%)、氢氟酸7 mL(40%)、铁离子稳定剂2 mL、缓蚀剂2 mL、起泡剂1~2 mL、KMS-2酸化胶凝剂2 mL，其余为地层水。表1为不同浓度、不同发泡剂的起泡体积及其半衰期，由表中可以看出DY-1+ SJ-8的复配在酸液中具有良好的起泡能力。

表1 不同浓度、不同发泡剂的起泡体积及其半衰期表

发泡剂浓度 (%)	SJ-6		SJ-8		DY-1		DY-1+ SJ-8	
	V <sub>0</sub> (mL)	t <sub>50</sub> (s)	V <sub>0</sub> (mL)	t <sub>50</sub> (s)	V <sub>0</sub> (mL)	t <sub>50</sub> (s)	V <sub>0</sub> (mL)	t <sub>50</sub> (s)
1	480	432	500	490	600	265	600	575
2	450	500	450	755	650	440	750	658

泡沫起作用的阶段主要是在注入阶段。泡沫注入地层以后，则希望其在一定时间后破灭，以利于返排。注入过程中，泡沫在地层孔隙中又是不断破灭与再生的，因此起泡体积相对于半衰期来说要更重要一些。基于以上原因，选择采用1% DY-1+1% SJ-8+2% KMS-2作为起泡剂和稳泡剂的使用浓度。

### 2. 岩心分流实验

岩心分流实验旨在评价泡沫流体在非均质地层中的分流能力。实验流程图如图1所示。实验用水为用0.2 μm滤膜过滤的地层水，泡沫体系为1% DY-1+1% SJ-8+2% KMS-2，气液比为2:1，即泡沫特征值控制在67%左右，实验中所用气体为氮气，两个岩心渗透率分别为2.1 μm<sup>2</sup>和0.7 μm<sup>2</sup>，渗透率级差为3，实验温度60℃。实验步骤如下。

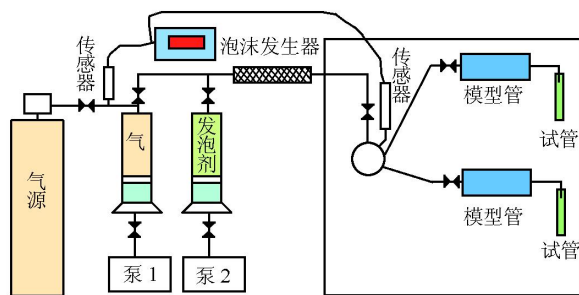


图1 分流实验流程图

(1)用地层水驱替岩心，测量压力和各岩心的分流流量，注入速度4.5 mL/min。

(2)将气体中间容器加入一定压力的气体，用泵将气体和发泡剂泵入泡沫发生器，利用泡沫驱替岩心，起泡液注入速度1.5 mL/min，气体注入速度3.0 mL/min，记录驱替压力变化过程以及不同时间泡沫液体组分的分流流量。

实验结果显示，随着泡沫注入量的增加，注入压力逐渐升高，最后趋于稳定(见图2)。这说明泡沫体

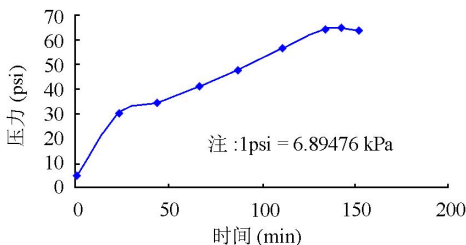


图2 注入泡沫阶段压力变化曲线图

系在岩心中逐渐形成了有效的封堵，分流能力逐渐增强。在水驱阶段，高渗岩心和低渗岩心分流流量之比为3.47:0.9，注入泡沫后高渗岩心和低渗岩心的分流流量逐渐趋于接近1:1，甚至有时出现低渗岩心的分流流量大于高渗岩心分流流量的情况(见图3)，图中时间0处的分流量为注水阶段的分流量，是实测数据，以后为注泡沫阶段的分流量变化曲线，其数值是实测数据的3倍(因为实验中只记录了泡沫体系中水的流量，而泡沫的流量是水的3倍)，以方便与注

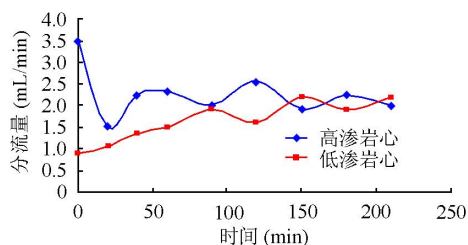


图 3 注入泡沫阶段分流量变化曲线图

水阶段的分流量相比较。图 3 中分流量的交替变化是由于泡沫在岩心中的不稳定渗流所致,表明泡沫在岩心中是不断破灭与再生的。

以上实验结果表明,泡沫流体可以明显降低高渗层的注入量,提高了低渗层的注入量,最终趋于相同,使注入流体在不同渗透率地层内均匀推进。这主要是因为泡沫具有剪切变稀的特性,对于高渗透地层,毛细管半径较大,孔隙对泡沫的剪切作用较弱,泡沫的表观黏度较高,流动阻力大;在低渗透地层,毛细管半径小,剪切作用相对较弱,泡沫表观黏度低,流动阻力较小,从而使泡沫流体在不同渗透率地层的注入量得到调整。泡沫酸化正是利用泡沫流体的这一特性,增加中低渗透层的酸液注入量,提高酸化效果。

#### 四、现场应用

在理论研究和室内实验的基础上,泡沫酸化技术在中原油田成功进行了现场应用,施工过程与常规酸化类似,先注入一定量的前置酸液清洗地层,然后再注入主体泡沫酸,泡沫特征值为 60%~70%,气体采用氮气,施工流程如图 4 所示。在酸化后排酸的过程中,持续循环低密度的泡沫,以降低井底压力,利于残酸返排,提高酸化效果。

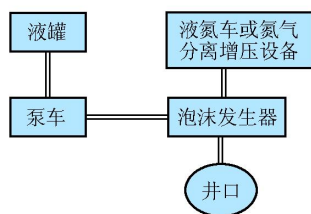


图 4 泡沫酸化地面流程示意图

该技术在油气井和注水井上都成功进行了应用。由于在气井中没有原油对泡沫的影响,更有利于利用泡沫的特性,因此与常规酸化相比,泡沫酸化

化在气井上更具有优势,目前已经被中原油田作为气井酸化的推荐工艺加以推广。表 2 为 5 口井的施工效果统计情况,从表中可以看出,泡沫酸化后气井产量显著提高。

表 2 气井泡沫酸化效果统计表

井号	措施前产气 (m <sup>3</sup> /d)	措施后产气 (m <sup>3</sup> /d)	单井增气 (m <sup>3</sup> )
WC126	0	4400	4400
WC11-18	2000	8100	6100
WC11-26	1000	7500	6500
W203-60	1000	5000	4000
NW13-101	2000	8000	6000

#### 五、结 论

(1)通过室内实验筛选出了耐酸耐盐的起泡剂 DY-1+ SJ-8 和稳泡剂 KMS-2,并对不同起泡剂浓度下的泡沫酸性能进行了评价,确定了其使用浓度,为泡沫酸液体系的确定提供了参考。

(2)实验结果表明,泡沫流体可以提高低渗透岩心的分流量,减少高渗岩心的分流量,使泡沫流体在不同渗透率岩心内均匀推进;基于此,泡沫酸化可以增加中低渗透层的酸液注入量,减少高渗层的吸酸量,提高酸化效果。

(3)泡沫酸化在中原油田气井酸化作业中效果显著,施工井产量大幅提高,目前已经被中原油田作为气井酸化的推荐工艺加以推广,具有很好的发展前景。

#### 参 考 文 献

- [1] 钟双飞, 缙新俊. 泡沫稳定性能评价及泡沫分流效果试验研究[J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(1): 65-66, 76.
- [2] 方敏, 李家龙, 何纶. 欠平衡泡沫流体钻井工艺技术[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 72-74.
- [3] BEHENNA R R. Acid diversion from an undamaged to a damaged core using multiple foam slugs[J]. SPE 30121.
- [4] 钟双飞, 缙新俊. 泡沫暂堵酸化试验研究[J]. 实验技术与管理, 2002, 19(5): 53-56, 60.
- [5] 王渊. 泡沫流体冲砂洗井参数设计[D]. 东营: 中国石油大学, 2001.

(修改回稿日期 2006-07-21 编辑 韩晓渝)