

# 发泡多孔介质对泡沫粒径的影响

何金钢<sup>1</sup>, 王德民<sup>1</sup>, 宋考平<sup>2</sup>, 袁琳<sup>3</sup>

(1. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163000; 2. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318;  
3. 大庆油田第一采油厂, 黑龙江大庆 163000)

**摘要:**通过泡沫粒径测量实验和发泡多孔介质的恒速压汞实验研究不同长度、不同孔隙结构发泡多孔介质的发泡效果, 确定泡沫粒径的最小表征单元和泡沫生成稳定时需要的“扰动单元”数量。结果表明:当单幅图像中的泡沫数量高于120时, 泡沫粒径的变异系数将趋于稳定, 能够消除泡沫粒径的影响;采用扰动单元和扰动单位的概念能更准确地从泡沫产生机理上评价发泡多孔介质的发泡能力, 且当扰动单元数量达到 $100 \pm 20$ 个时, 泡沫的变异系数小于0.5, 泡沫的粒径均质程度较好;泡沫平均粒径约为主流喉道直径的1.23~1.51倍, 均小于平均孔隙直径, 在相同的多孔介质中一旦产生能够起到较好的封堵作用。

**关键词:**泡沫粒径; 发泡多孔介质; 恒速压汞; 扰动单元; 最小表征单元

**中图分类号:**TE 357.46 **文献标志码:**A

**引用格式:**何金钢, 王德民, 宋考平, 等. 发泡多孔介质对泡沫粒径的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015, 39(5):173-182.

HE Jingang, WANG Demin, SONG Kaoping, et al. Influence of foam porous media on bubble size[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5):173-182.

## Influence of foam porous media on bubble size

HE Jingang<sup>1</sup>, WANG Demin<sup>1</sup>, SONG Kaoping<sup>2</sup>, YUAN Lin<sup>3</sup>

(1. Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163000, China;  
2. College of Petroleum Engineering in Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;  
3. The NO. 1 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163000, China)

**Abstract:** The foaming effect of porous media with different length and pore structure was studied using the bubble size measurement and foam porous medium constant speed mercury injection, through which the minimum characterization of bubble size and the amount of "disturbance unit" needed for stable bubble generation were determined. The results show that when the numbers of bubbles in a single image are more than 120, the variation coefficient of bubble particle size will stabilize, and the influence of bubble particle size can be eliminated. Using perturbation and disturbance units can be more accurate evaluation from the mechanism of bubble foam foaming capacity of porous media. It is found that when disturbance unit quantity reaches to  $100 \pm 20$ , and the bubble variation coefficient is less than 0.5, the bubble size homogeneous degree is better. Also the average particle size is 1.23-1.51 times larger than the bubble mainstream throat diameter, which is less than the average pore diameter. Therefore, the foam can have good blocking capability once it can be generated in the same porous medium.

**Keywords:** bubble size; foam porous media; constant speed mercury injection; disturbance unit; minimum characterization of unit

泡沫流体在石油工业中应用广泛<sup>[1-3]</sup>。在泡沫驱油的过程中,采用气液同注、交替注入在地下成泡

的方式,但是在室内物理模拟实验中往往采用低界面张力流体通过发泡多孔介质进行发泡<sup>[4]</sup>。发泡多孔介质发泡性能将直接影响泡沫粒径和均质程度,影响泡沫与含有残余油岩心的孔隙结构的匹配关系,进而影响驱油效果。笔者通过泡沫图像分析统计泡沫的粒径和泡沫粒径分布关系,与泡沫发泡多孔介质的孔隙结构进行对比,确定发泡多孔介质孔隙结构对泡沫粒径的影响程度和相关关系,提出扰动单元和扰动单位的概念,进一步确定影响泡沫生成的最小单位和达到稳定时所需扰动单位的数量。

## 1 研究方法

### 1.1 泡沫粒径观察装置和实验材料

实验设备包括:平流泵,恒温箱,气体质量流量控制器,回压阀,压力表,气瓶,耐压透视窗,ASPE-730 压汞仪。

泡沫粒径图像采集装置采用在泡沫驱实验装置尾端安装耐压透视窗,通过显微镜放大泡沫微观结构。渗流泡沫结构图像实时采集的实验流程如图 1 所示。观察装置如图 2 所示。

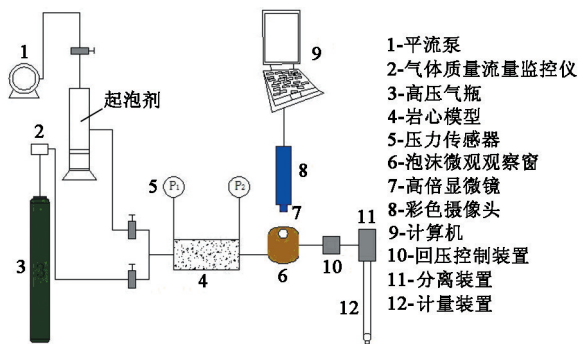


图 1 实验装置

Fig.1 Experiment device



图 2 中间观察装置(0~10 MPa)

Fig.2 Observation device

发泡多孔介质为人造浇铸岩心,岩心直径为  $\Phi 2.5$  cm,长度分别为 3、7、15 和 30 cm,渗透率分别为 0.200、0.500、1.000 和 2.000  $\mu\text{m}^2$ 。

模拟用水为模拟大庆油田矿化度 6.778 g/L 的地层水,发泡剂为甜菜碱表面活性剂 EB26,有效含量 40.00%,稳泡剂为 WP212,有效含量为 90.40%。注入气体为氮气,纯度为 99.9%。注入速度为 0.3 mL/min,气液比为 3。回压设置为 1 MPa,泡沫粒径测试测量 3 次,计算平均值。

### 1.2 图像处理方法

#### 1.2.1 图像预处理

图像的预处理就是去除图像中的无用信息,突出有用信息。首先采用亮度调节、对比度调节,最后采用中值滤波消除噪音。

#### 1.2.2 图像的分割

阈值选取是图像处理的基础,阈值分割方法包括最大熵法、p-参数法、判别分析法、迭代阈值法等。判别分析法和迭代阈值法由于没有考虑像素的空间分布,未能达到很好的分割效果<sup>[5-6]</sup>。本次研究采用最大熵值法进行图像阈值的划分。

熵是信息论中不确定性的度量,是对数据所含信息量大小的度量。熵最大值时,信息获取量最大。图像最大熵分割法是应用信息论中熵的概念与图像阈值化技术。选取适当的阈值将图像灰度分为 2 类,这 2 类的平均熵之和最大时,分割后的图像信息量最大。

#### 1.2.3 泡沫结构的识别

泡沫结构图像中大部分泡沫呈现比较规则的圆形,气泡外部液体呈不规则连片分布。图像阈值分割后根据各连片分布区域形状特征进行统计,当满足圆度大于 0.5 和连片分布区域面积大于  $5 \times 5$  像素点时,定义为泡沫。泡沫结构识别前后的效果对比如图 3 所示。根据泡沫圆度进行识别后,消除了液膜部分的影响。最后采用图像边界提取方法,将泡沫图像的边界进行提取,通过图像统计进行泡沫特征参数的分析。

### 1.3 泡沫结构特征参数计算方法

在泡沫结构识别基础上,对识别图像中各个独立的气泡进行标记,可通过标记对象的计数获得泡沫数目。根据二维图像中气泡平面大小与观察窗的厚度求取等效球形泡沫的等效直径。泡沫体积和等效直径计算表达式如下:

$$V = Ah, D = \left(\frac{6Ah}{\pi}\right)^{1/3}$$

式中,  $A$  为气泡二维面积;  $V$  为泡沫体积;  $h$  为泡沫厚度;  $D$  为泡沫等效直径。

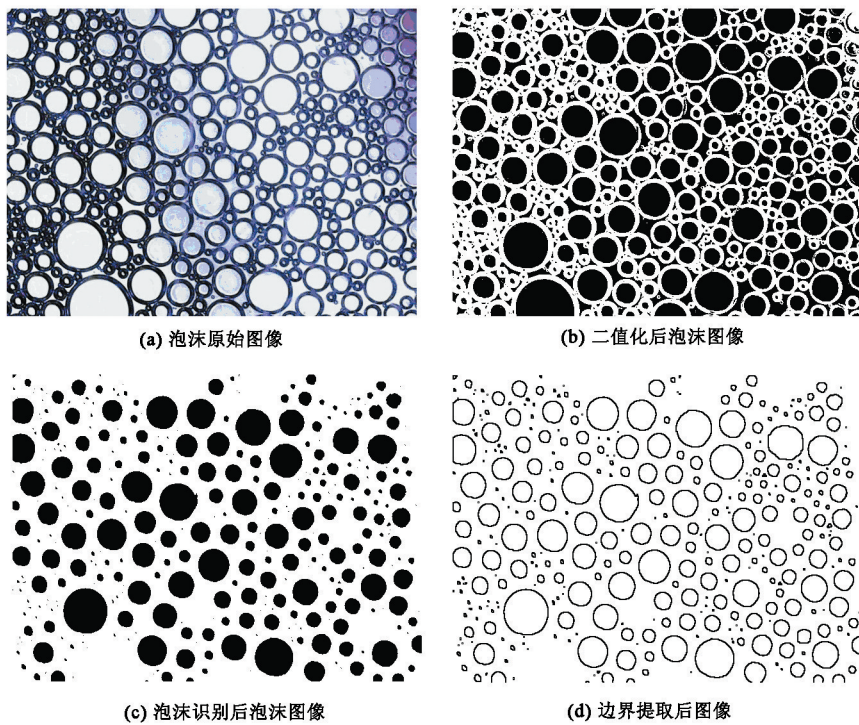


图 3 泡沫图像处理过程

Fig. 3 Bubble image processing

变异系数是衡量数据中各观测值离散程度的一个统计量,它定义为标准差与平均数的比值,计算泡沫粒径的变异系数的公式为

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^n A_i h_i,$$

$$C_v = \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{(n-1)} \right]^{1/2}}{\bar{D}}.$$

式中,  $C_v$  为泡沫变异系数;  $D_i$  为第  $i$  个气泡的直径;  $n$  为气泡个数。

#### 1.4 泡沫最小表征单元的确定

当图像放大倍数过大时,图像内泡沫数量较少,因此其泡沫的代表性将变差,易造成个别泡沫对整体泡沫性质影响过大的现象。当放大倍数较小时,泡沫信息量足够大,但是受到图像像素的约束,小泡沫由于像素点过少,可能当做异常点被消除。选取合适的图像尺寸使其能够代表泡沫的宏观特性,需要进行表征单元分析。泡沫粒径参数的表征单元分析采用通过泡沫数量和泡沫变异系数来确定,以此消除泡沫粒径的影响。

(1) 选取图像左上角点,以此点为起点开始选取有且只有 2 个有效的泡沫,并计算泡沫粒径的变异系数;

(2) 继续选取 3、4、5、...、100、... 个泡沫,并计算泡沫粒径的变异系数;

(3) 建立泡沫个数与泡沫粒径变异系数的关系图。

泡沫图像统计结果见表 1。

表 1 泡沫图像统计结果

Table 1 Results of bubble image statistical

图像编号	统计泡沫数量	变异系数稳定泡沫数	变异系数稳定值
1	353	110	0.425
2	640	100	0.451
3	378	120	0.496
4	358	100	0.532
5	340	120	0.467

采用 5 幅不同粒径的泡沫图像进行分析(图 4、5),确保图像分析的可靠性。当所有的曲线同时趋于稳定时对应的泡沫数量为最小表征单元。随着泡沫数量的增大,泡沫粒径变异系数的波动趋于稳定,5 幅图像达到稳定时的泡沫数量有所差异,但是当泡沫的数量大于 120 后泡沫粒径变异系数都趋于一个稳定的数值,因此在本次研究中确定的最小泡沫表征单元是 120 个泡沫。在之后的泡沫参数统计过程中,只要单幅图像中的泡沫数量高于 120,泡沫参数具有较好的统计学意义,可以进行不同粒径泡沫间的参数对比。

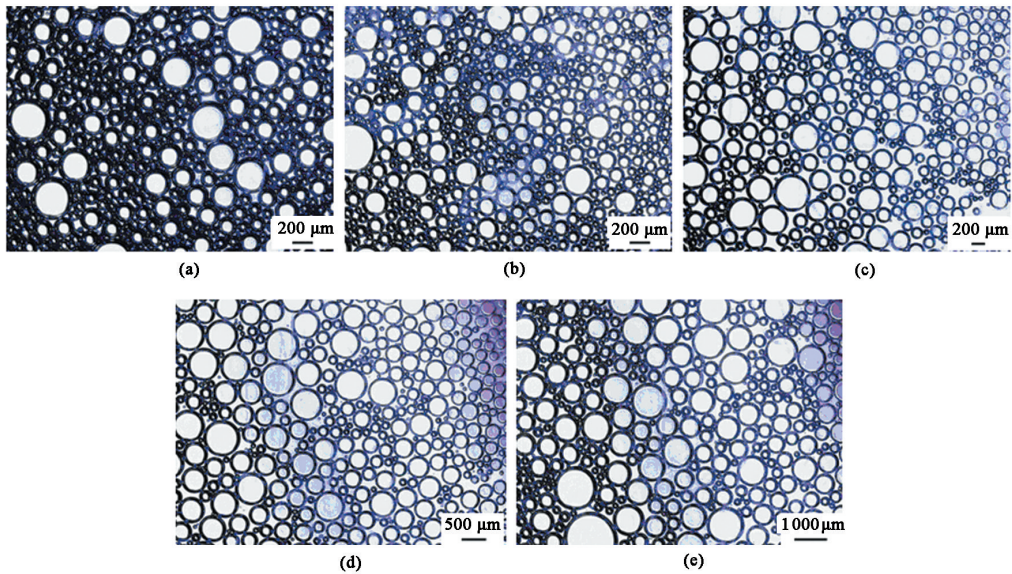


图4 不同粒径的泡沫图像

Fig.4 Different size of bubble

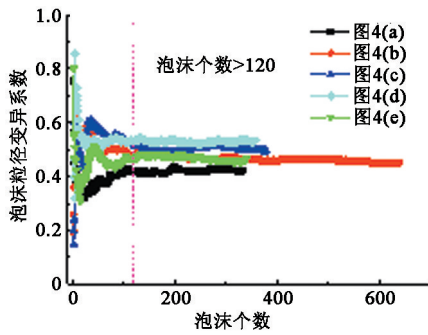


图5 泡沫数量与泡沫变异系数的关系

Fig.5 Relationship between bubble numbers and bubble variation coefficient

## 2 结果分析

### 2.1 发泡多孔介质的压力

发泡多孔介质两端的压差(图6)结果表明,发泡多孔介质的长度越大,发泡多孔介质两端的压差越大,两端压差上升幅度越大,表明泡沫在多孔介质中具有周期性生成和运移的特征。渗透率越小使得气相与水相的通过能力越差,由于多孔介质的阻碍和相渗的原因,压差增幅越大。随着注入注入孔隙体积倍数的增加,压差变化明显,在初期阶段,压差的增幅没有明显的规律,甚至出现异常,由于在初期多孔介质中没有充填,因此气相和液相在初期阶段为分布过程。在末期阶段,由于在多孔介质中的后端生成泡沫的阻塞作用,使得气相和液相的分布逐渐均衡,在末期时表现为随着渗透率的减小压差增

加的趋势。不同长度的发泡多孔介质受到沿程阻力的影响使得压差具有差别。

### 2.2 泡沫粒径分布特征

泡沫粒径分布曲线(图7)表明,不同发泡多孔介质产生的泡沫呈现出正态分布的特征,在相同长度时,发泡多孔介质的渗透率越小,正态分布的特征越明显。在相同渗透率发泡多孔介质的对比中表明,发泡多孔介质的长度越大,泡沫粒径的分布更趋近于正态分布,且峰值普遍较高。泡沫粒径分布的主峰一般与平均泡沫粒径值相同。

表2为不同长度、渗透率发泡多孔介质产生泡沫粒径的测量的结果。结果表明,在发泡多孔介质的渗透率相同时,泡沫粒径受到发泡多孔介质长度的影响,发泡多孔介质长度越大最小泡沫粒径越大,最大泡沫粒径越小,泡沫粒径平均值越小,计算得到的变异系数越小,意味着泡沫的粒度分布更均匀。

在相同发泡多孔介质长度的条件下,泡沫粒径受到发泡介质渗透率的影响,发泡多孔介质渗透率越大最小泡沫粒径越大,最大泡沫粒径越大,泡沫粒径平均值越大,计算得到的变异系数越大,意味着泡沫的粒度分布趋向于不均匀。

不同渗透率和长度的发泡多孔介质与变异系数之间的关系表明,长度和渗透率均为控制发泡多孔介质发泡能力的参数(图8)。图8表明,变异系数受到两种参数的控制,但为综合效应的影响,单个参数对于发泡性能的影响因素并没有显著的规律。

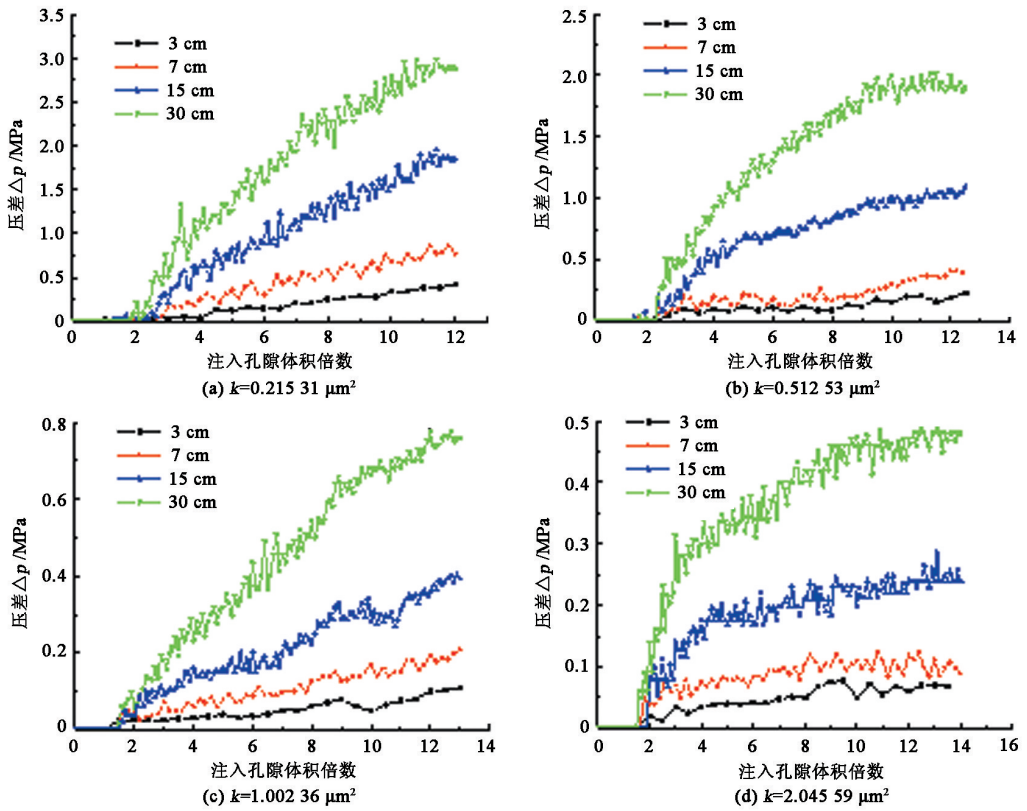


图 6 发泡多孔介质两端的压差

Fig. 6 Foam porous medium pressure difference

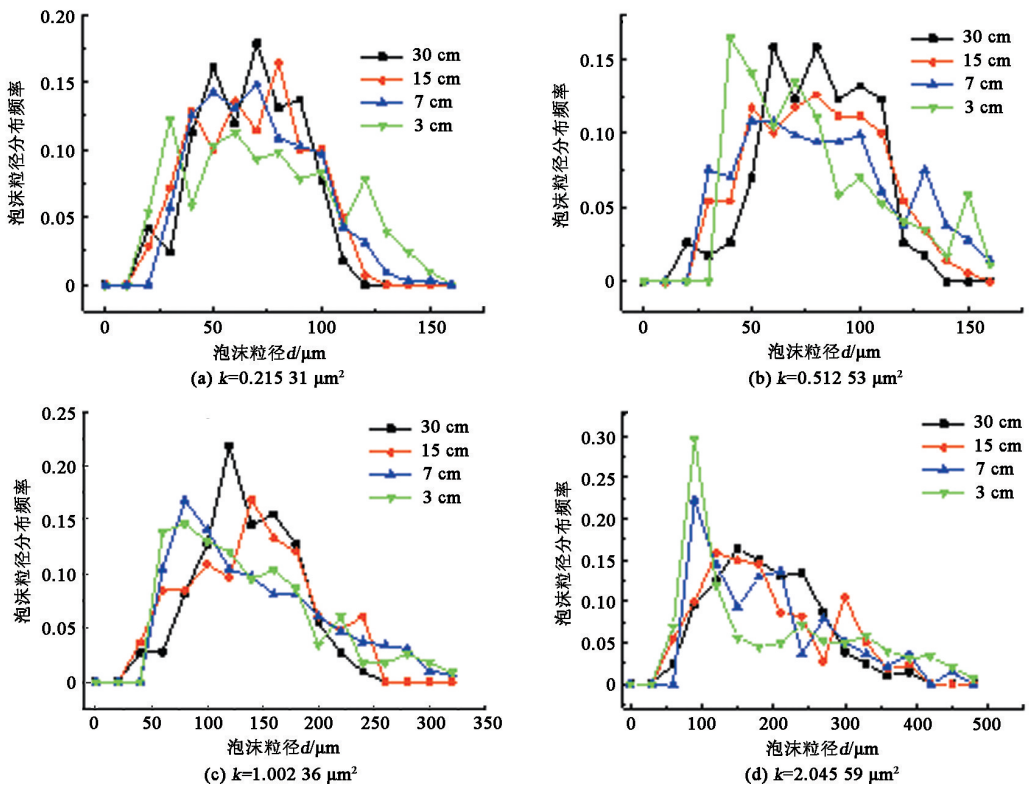


图 7 不同长度、不同渗透率发泡介质泡沫粒径分布

Fig. 7 Bubble size distribution by different length, different permeability foaming media

表2 不同发泡多孔介质泡沫粒径分布特征

Table 2 Bubble size distribution characteristics of different foaming porous media

渗透率/ $\mu\text{m}^2$	长度/ cm	最小直径分布和 均值/ $\mu\text{m}$	最大直径分布和 均值/ $\mu\text{m}$	平均直径分布和 均值/ $\mu\text{m}$	变异系数分布 和均值
0.215 31	3	13.77 ~ 16.98/14.89	149.15 ~ 152.45/150.44	67.12 ~ 69.23/68.58	0.559 ~ 0.562/0.560
	7	14.27 ~ 16.48/15.36	143.01 ~ 146.42/145.18	63.12 ~ 65.23/64.95	0.432 ~ 0.435/0.433
	15	14.76 ~ 18.45/17.58	110.12 ~ 120.11/115.15	62.12 ~ 62.85/62.44	0.332 ~ 0.336/0.335
	30	18.56 ~ 26.12/25.16	95.12 ~ 96.89/96.56	61.01 ~ 61.45/61.28	0.229 ~ 0.230/0.230
0.512 53	3	17.78 ~ 19.12/18.01	160.24 ~ 164.12/162.85	77.15 ~ 82.12/80.41	0.596 ~ 0.599/0.598
	7	18.17 ~ 22.28/19.81	175.12 ~ 178.23/177.32	77.53 ~ 79.22/78.81	0.487 ~ 0.491/0.490
	15	19.12 ~ 21.22/20.02	161.13 ~ 163.38/162.12	74.01 ~ 76.31/75.15	0.389 ~ 0.392/0.391
	30	22.75 ~ 24.83/23.60	120.12 ~ 125.31/122.82	71.32 ~ 77.54/74.36	0.289 ~ 0.290/0.290
1.002 36	3	21.57 ~ 30.13/28.82	257.12 ~ 263.23/260.48	128.89 ~ 133.25/130.29	0.647 ~ 0.651/0.651
	7	21.79 ~ 39.12/31.05	246.12 ~ 280.15/261.51	127.12 ~ 131.25/130.89	0.519 ~ 0.522/0.521
	15	22.59 ~ 38.98/31.05	245.98 ~ 302.56/294.63	124.12 ~ 130.59/127.96	0.431 ~ 0.434/0.433
	30	34.54 ~ 43.54/40.12	248.94 ~ 266.45/258.42	123.49 ~ 127.59/126.28	0.349 ~ 0.354/0.352
2.045 59	3	30.45 ~ 45.98/39.15	345.45 ~ 378.82/354.09	169.49 ~ 182.65/177.12	0.681 ~ 0.715/0.701
	7	23.59 ~ 56.58/40.52	389.12 ~ 423.78/405.23	171.59 ~ 189.51/175.88	0.546 ~ 0.568/0.561
	15	32.16 ~ 49.98/38.95	419.12 ~ 457.64/437.23	170.45 ~ 176.59/174.05	0.499 ~ 0.511/0.510
	30	29.56 ~ 46.15/40.05	345.79 ~ 374.64/360.45	168.24 ~ 175.12//173.85	0.439 ~ 0.452//0.450

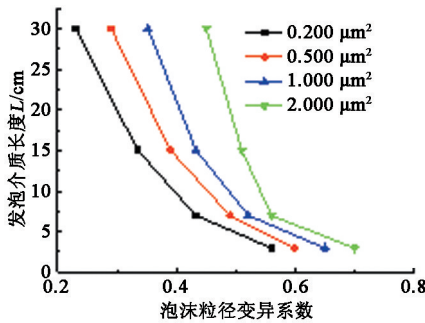


图8 不同渗透率和长度的发泡介质与变异系数

Fig.8 Relationship between coefficient of variation and foaming medium by different lengths and different permeability

### 2.3 扰动单元

泡沫的发泡介质通常采用多孔介质, Ransohoff等<sup>[7-9]</sup>研究得到泡沫在多孔介质中生成的微观机理为缩颈分离,液膜滞后,薄膜分断。泡沫的生成与多孔介质的孔隙结构密切相关。结果表明,随着发泡多孔介质长度增加、渗透率减小,泡沫生成的均匀程度逐渐增加(变异系数逐渐减小),因此当发泡多孔介质为无限长时或渗透率小到一定程度(流体可流动下限)时,发泡的效果最佳。但是根据泡沫微观生成机理,假设无限长的发泡多孔介质仅由一个孔隙或喉道组成则其并不能对低界面张力流动体系产生扰动,仅能够在末端接触大气时产生一个泡沫。同时如果渗透率小到一定程度(流体可流动下限)时,假设仅为一根毛细管,则也仅能够在毛细管尾端产生一个泡沫。因此以上两个极限情况时的假设均与实验结果的推论相悖。考虑低界面张力流动体系产生扰动的次数是

能够产生泡沫以及发泡效果好坏的关键。

扰动单元定义为在一个流动通道上由岩石骨架颗粒组成的孔隙和喉道的一组扰动结构。天然岩心和四颗粒组成的粒间孔理想简化模型的扰动单元如图9和10所示,其中红色区域内为一个扰动单元,

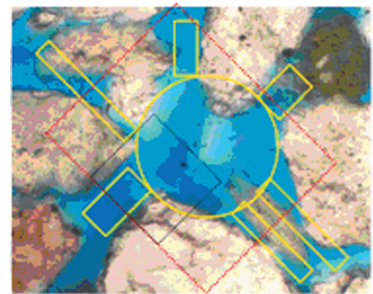


图9 天然岩心的扰动单元和扰动单位示意

Fig.9 Natural core disturbance unit and disturbance unit element

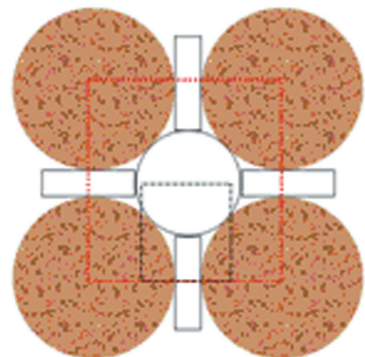


图10 理想模型的扰动单元和扰动单位示意

Fig.10 Ideal model disturbance unit and disturbance unit element

由一个孔隙(黄色圆形区域)和多个喉道(黄色长方形区域)组成。由于一个扰动单元存在若干喉道与一个孔隙相连通的情况,因此一个连通喉道与一个孔隙定义为扰动单位(黑色虚线区域),一个扰动单位对流体流线扰动一次,一个扰动单元中存在多个扰动单位。扰动单元的长度为一个喉道长度与一个孔隙直径之和,低界面张力流动体系在扰动单元和扰动单位的作用下通过缩颈分离、液膜滞后、薄膜断裂的作用产生液泡,因此评价发泡多孔介质的性能应评价其在长度上扰动单位的数量。通过恒速压汞实验结果能够得到岩石的孔隙结构相关参数,可以计算扰动单位的数量,进而确定发泡多孔介质控制发泡能力的关键因素。

## 2.4 扰动单元尺寸的计算

扰动单元中的孔隙简化为等直径圆球度为 1 的圆球,因此单个孔隙的体积通过孔隙平均半径计算得到  $V_{\text{孔}}$ :

$$V_{\text{孔}} = \frac{4}{3} \pi r_p^3.$$

天然岩心实际扰动单元的图像分析结果表明,在平面上喉道以缩颈型喉道和弯片状喉道为主,喉道的长度与孔隙的直径相近,因此喉道的长度为  $r_p$ ,由于在流动过程中主流喉道为低界面张力流动体系流动的主要通道,能够产生扰动的主要空间,因此喉道的直径为恒速压汞测量到的主流喉道半径  $r_M$ ,可以流通的喉道的体积  $V_{\text{喉}}$  为

$$V_{\text{喉}} = \pi r_M^2 r_p.$$

由于恒速压汞能够确定出孔隙和喉道的体积及其百分比  $\varepsilon$ ,可以计算出喉道与孔隙数量的比值。在此基础上通过计算大于主流喉道的进汞饱和度能够确定主流喉道占有的比例  $\alpha$ ,进而确定与孔隙相连的主流喉道数量  $N$ 。

$$N = \alpha \varepsilon \frac{V_{\text{孔}}}{V_{\text{喉}}}.$$

由于在流动空间上流动的方向是 6 方向,因此在认为孔隙结构均质的情况下,将连通喉道数均匀的劈分到 6 个空间方向上,因此一个渗流方向上能的喉道数量为  $N_{\text{单}}$ :

$$N_{\text{单}} = \alpha \varepsilon \frac{V_{\text{孔}}}{3 V_{\text{喉}}}.$$

在岩心流动方向,认为一个孔隙和一个喉道为一个扰动单元,其长度为  $4r_p$ 。同时一个扰动单元中的扰动单位的数量是喉道连接孔隙的数量  $N_{\text{单}}$ 。计算岩心长度  $L$  上的扰动单位的数量为  $N_{\text{扰}}$ :

$$N_{\text{扰}} = \frac{LN_{\text{单}}}{4r_p} = \alpha \varepsilon \frac{Lr_p}{r_M^2}.$$

## 2.5 扰动单位的计算

恒速压汞是由 Yuan 等<sup>[10]</sup>提出并发展应用的一种微观孔喉特征研究方法,在极低并且恒定的压汞速率下(ASPE-730 压汞仪注入速度为 0.000 1 和 0.000 05 mL/min),使用高敏感度压力测量仪器记录注汞压力变化。恒速压汞不同于常规压汞实验之处在于,汞以恒定的速率不断注入,填充孔隙中半径更小的部分<sup>[11-12]</sup>,注入端压力随之升高,随着汞突破喉道进入孔隙,压力发生突降,之后下一个孔隙被填满,压力再次上升。可以通过高精度的压力测量分辨驱替过程中通过孔喉空间半径的微小变化,从进汞过程的压力涨落获得喉道的数量分布<sup>[13-16]</sup>,且能够同时得到孔隙、喉道的大小及其分布频率。研究中进汞速度采用 0.000 05 mL/min,整个压汞过程为准静态过程,压力最高至 7 MPa 时,驱替时汞对于岩石的接触角为 140°,与空气的界面张力为 485 mN/m。岩心的恒速压汞曲线如图 11 所示,统计发泡多孔介质的孔隙结构参数如表 3 所示,计算得到的扰动单元的相关参数如表 4 所示。

表 3 岩样孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters

样号	孔隙度 $\Phi/\%$	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	主流喉道 半径 $r_M/\mu\text{m}$	平均孔隙 半径 $r_p/\mu\text{m}$	总孔/喉 体积比 $\varepsilon$	微观均质 系数 $\alpha$	分选系数 $S_p$	峰态 $K_p$	歪度 $S_{kp}$
1	26.10	213.12	26.17	169.124	0.698	0.016	2.497	2.043	0.874
2	27.10	502.23	29.112	173.612	0.719	0.017	3.187	2.063	1.285
3	29.18	1 030.75	42.632	183.512	0.741	0.017	3.467	2.555	1.542
4	31.61	2 023.76	61.363	192.385	0.894	0.018	4.399	3.789	1.836

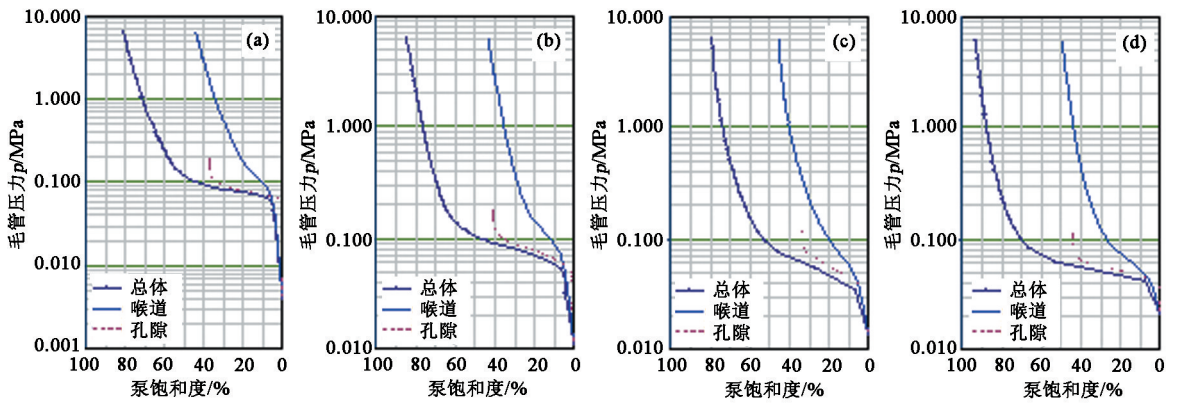


图 11 恒速压汞与进汞曲线

Fig. 11 Rate-controlled mercury penetration mercury intrusion curve

表 4 岩样孔隙结构参数计算值

Table 4 Calculated pore structure parameters

样号	总孔隙进汞饱和度/%	总喉道进汞饱和度/%	总孔/喉道体积比 $\varepsilon$	主流喉道比例 $\alpha$	孔隙体积/ $\mu\text{m}^3$	喉道体积/ $\mu\text{m}^3$	计算连通喉道数	渗流方向连通喉道数	扰动单元长度/ $\mu\text{m}$
1	37.038	43.927	0.843	0.0753	20252.755	363699.2	4.855	1.618	676.50
2	41.837	44.444	0.941	0.0758	21908.246	462012.2	3.702	1.234	694.45
3	35.824	45.238	0.792	0.0753	25873.894	1047287	2.293	0.764	734.05
4	44.505	49.755	0.894	0.0754	29811.375	2274647	1.077	0.359	769.54

2.6 扰动单位对发泡的影响

不同渗透率、不同长度的发泡多孔介质的扰动单位的数量统计结果如表 5 所示。扰动单位的数量与泡沫粒径的变异系数如图 12 所示,进行指数函数拟合后得到拟合曲线(图 13),拟合曲线的最小相关系数达到 0.9652,针对 4 个数据点进行拟合的置信度均大于 99%。

表 5 扰动单位的数量

Table 5 Statistical results of disturbance unit element

渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	单方向连通喉道数	扰动单元长度/ $\mu\text{m}$	岩心长度/ $\text{cm}$	扰动单元数	扰动单位数	泡沫变异系数
0.21531	8.29	195.294	3	44.35	71.77	0.56
			7	103.47	167.46	0.433
			15	221.73	358.84	0.335
			30	443.46	717.69	0.23
0.51253	5.89	202.724	3	43.20	53.32	0.598
			7	100.80	124.40	0.49
			15	216.00	266.58	0.39
			30	432.00	533.16	0.29
1.00236	4.25	226.144	3	40.87	31.24	0.65
			7	95.36	72.89	0.521
			15	204.35	156.19	0.433
			30	408.69	312.38	0.352
2.04559	2.05	253.748	3	38.98	13.99	0.7
			7	90.96	32.65	0.56
			15	194.92	69.97	0.51
			30	389.84	139.94	0.45

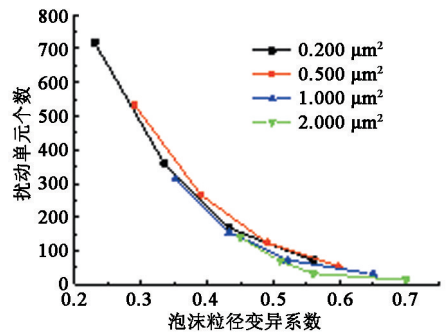


图 12 扰动单元和变异系数之间的关系

Fig. 12 Relationship between coefficient of variation and disturbance unit element

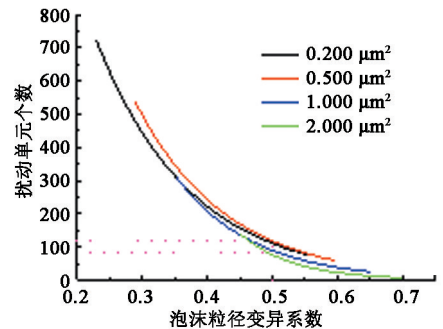


图 13 扰动单元拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves of disturbance unit

对比不同渗透率不同长度的发泡多孔介质的扰动单位数量与泡沫粒径变异系数的拟合曲线形态表



明,曲线基本呈现出重合的状态,说明泡沫粒径的分散程度仅随着扰动单元数量变化。实验现象表明发泡稳定性与发泡多孔介质的长度和渗透率相关,但是实质上是扰动单元控制着发泡多孔介质发泡的性能。当粒径变异系数的变化率趋于稳定时,且变异系数的数值小于 0.5 时,认为发泡介质的发泡性能较为稳定,此时的扰动单元为形成稳定泡沫的临界扰动单元,对应扰动单元的数量为  $100 \pm 20$  个,发泡能够达到稳定。

### 2.7 扰动单元对泡沫粒径的影响

采用扰动单元和扰动单位评价发泡介质的性能表明,发泡介质的渗透率影响着喉道的大小,进而影响着泡沫的粒径,但是泡沫粒径的均匀程度却没有受到渗透率的影响,而完全取决于孔隙结构特征(扰动单位数量),不同渗透率情况下相同个扰动单元依然能够产生相类似的粒径变异系数的泡沫。

图 14 和表 6 通过对比泡沫粒径与主流喉道半径之间的关系表明,泡沫平均粒径与主流喉道直径呈 1.23-1.51 倍的关系。其平均泡沫粒径小于孔隙的平均粒径,但是并没有发现明显的相关关系。当均匀发泡时,粒径与喉道半径之间的关系相关性良好,因此认为主流喉道半径与发泡粒径之间具有良好的相关关系。

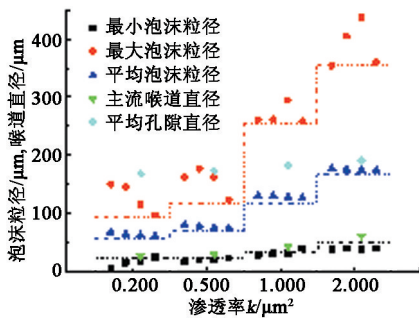


图 14 不同渗透率发泡介质的泡沫粒径

Fig. 14 Different permeability foaming media and bubble size

表 6 泡沫粒径与孔隙结构之间的关系

Table 6 Relationship between bubble diameter and pore structure

发泡多孔介质	泡沫平均直径/ $\mu\text{m}$	主流喉道直径/ $\mu\text{m}$	泡沫粒径喉道比	平均孔隙直径/ $\mu\text{m}$	泡沫粒径孔隙比
1	64.31	52.340	1.23	338.248	0.190
2	77.18	58.224	1.33	347.224	0.222
3	128.86	85.264	1.51	367.024	0.351
4	175.23	122.726	1.42	384.770	0.455

泡沫的粒径与地层的匹配关系是进行泡沫驱的基础,体现在泡沫的封堵产生的孔隙级调剖和泡沫

变形时产生的界面膜弹性对残余油的作用。在地下条件时能够经过足够的扰动单位产生较为稳定的泡沫,但是在室内实验中,采用气液同注在多孔介质中发泡,扰动单位的数量势必会影响发泡效果,因此需要准确地评价泡沫驱各方案的效果时,希望得到与地下较为接近的泡沫条件,发泡多孔介质的扰动单位数量必须大于临界扰动单位数量。同时泡沫粒径与喉道之间的关系表明,平均泡沫粒径大于喉道直径,当泡沫进入相同渗透率的地层时,泡沫能够起到有效的封堵作用。平均泡沫粒径大于主流喉道半径,因而大于多数喉道直径,泡沫通过时会产生泡沫形状的变形。因此在泡沫界面膜黏弹性的作用下能够产生类似聚合物驱的微观力的效果,进行“黏弹性”驱油。

### 3 结论

(1)采用泡沫数量与泡沫粒径变异系数计算泡沫图像最小表征单元,只要单幅图像中的泡沫数量高于 120 个,泡沫粒径变异系数将趋于稳定,图像具有较好的统计学意义,可以进行不同粒径泡沫间的数据对比。

(2)发泡多孔介质的长度和渗透率综合影响着发泡的多孔介质的发泡性能,采用扰动单元和扰动单位的概念能更能准确地从机理上评价发泡多孔介质的发泡能力。发泡多孔介质中的扰动单位数量达到  $100 \pm 20$  时,泡沫的均质程度较佳。

(3)泡沫平均粒径与主流喉道直径呈 1.23 ~ 1.51 倍的关系,均小于平均孔隙直径,在泡沫界面膜黏弹性的作用下能够产生类似聚合物驱的微观力的效果,进行“黏弹性”驱油。

### 参考文献:

[1] 韩慧慧,赵群,穆爽书,等. 聚合物驱后进一步提高采收率途径的研究[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(5):81-84.  
HAN Peihui, ZHAO Qun, MU Shuangshu, et al. Study on further EOR after polymer flooding [J]. PGODD, 2006,25(5):81-84.

[2] 王增林,王其伟. 强化泡沫驱油体系性能研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):49-51.  
WANG Zenglin, WANG Qiwei. Performance of foam in the forced foam flooding system [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004,28(3):49-51.

[3] 李兆敏,孙茂盛,林日亿,等. 泡沫封堵及选择性分流

- 实验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 115-118.
- LI Zhaomin, SUN Maosheng, LIN Riyi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 115-118.
- [4] 付继彤, 张莉, 尹德江, 等. 强化泡沫的封堵调剖性能及矿场试验[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(5): 47-49.
- FU Jitong, ZHANG Li, YIN Dejiang, et al. The performance of plugging and profile control and field experiment of enhanced foam [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(5): 47-49.
- [5] 侯健, 李振泉, 杜庆军, 等. 多孔介质中流动泡沫结构图像的实时采集与定量描述[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 658-662.
- HOU Jian, LI Zhenquan, DU Qingjun, et al. Real-time acquisition and quantitative description of flowing-foam texture images in porous media [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 658-662.
- [6] 张顺康, 陈月明, 侯健, 等. 岩心 CT 微观驱替实验的图像处理研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(1): 10-12.
- ZHANG Shunkang, CHEN Yueming, HOU Jian, et al. Image processing for CT microscopic core flooding experiments [J]. PGODD, 2007, 26(1): 10-12.
- [7] MAST R F. Microscopic behavior of foam in porous media [R]. SPE 3997, 1972.
- [8] OWETE O S, BRIGHAM W E. Flow behavior of foam: a porous micromodel study [J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(3): 315-323.
- [9] RANSOHOFF T C, RADKE C J. Mechanisms of foam generation in glass-bead packs [J]. SPE Reservoir Engineering, 1988, 3(2): 573-585.
- [10] YUAN H H, SWANSON B F. Resolving pore space characteristics by rate controlled porosimetry [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(1): 17-24.
- [11] TOLEDO P G, SCRIVN L E, DAVIS H T. Pore-space statistics and capillary pressure curves from volume-controlled porosimetry [J]. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(1): 46-54.
- [12] 柴智, 师永民, 徐常胜, 等. 人造岩芯孔喉结构的恒速压汞法评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(5): 770-774.
- CHAI Zhi, SHI Yongmin, XU Changsheng, et al. Pore-throat structure evaluation of artificial cores with rate-controlled porosimetry [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5): 770-774.
- [13] 何顺利, 焦春艳, 王建国, 等. 恒速压汞与常规压汞的异同[J]. 断块油气田, 2011, 15(2): 235-237.
- HE Shunli, JIAO Chunyan, WANG Jianguo, et al. Discussion on the differences between constant-speed mercury injection and conventional mercury injection techniques [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 15(2): 235-237.
- [14] 王金勋, 杨普华, 刘庆杰, 等. 应用恒速压汞实验数据计算相对渗透率曲线[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 66-69.
- WANG Jinxun, YANG Puhua, LIU Qingjie, et al. Determination of relative permeability curves using data measured with rate-controlled mercury penetration [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 66-69.
- [15] YUAN H H. Advances in apex technology: determination of cementation exponent and absolute permeability [J]. The Log Analyst, 1991, 32(5): 557-570.
- [16] YUAN H H. Pore-scale heterogeneity from mercury porosimetry data [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 6(2): 233-240.

(编辑 刘为清)