

文章编号:1673-5005(2012)02-0120-05

自激振荡脉冲消泡机制分析与性能优化

倪红坚¹, 王传伟², 艾尼瓦尔³, 王瑞和¹, 王建军⁴

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 胜利石油管理局 钻井工程技术公司, 山东 东营 257064;
3. 新疆油田 井下作业公司, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油大学 化学工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:经济、环保、高效的消泡技术是泡沫钻井液循环利用的基础, 基于该认识, 提出自激振荡脉冲消泡技术。将数值模拟和试验研究相结合, 分析自激振荡脉冲消泡的机制, 探索消泡器性能的优化方法。采用正交试验法, 优选自激振荡脉冲消泡器的结构参数。结果表明: 自激振荡腔内能够形成显著的涡量扰动, 激发局部负压和强烈湍流协同作用, 致使泡沫破裂; 自激振荡脉冲腔室内最大负压的绝对值和最大湍流强度均与消泡效率呈显著的指数相关, 证实了自激振荡脉冲消泡机制; 数值计算与试验结果吻合良好, 提出的消泡技术可行。

关键词:自激振荡; 脉冲射流; 消泡; 数值模拟; 试验研究

中图分类号:TE 245 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.020

Mechanism analysis and performance optimization on self-excited oscillation pulse foam breaking device

NI Hong-jian¹, WANG Chuan-wei², ANWAR³, WANG Rui-he¹, WANG Jian-jun⁴

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Shengli Drilling Engineering and Technology Company, Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying 257064, China;
3. Xinjiang Oilfield Downhole Operation Company, Karamay 834000, China;
4. College of Chemical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Economical, environmental and efficient antifoaming technology is the basis for achievement of foam drilling fluid recycling. Self-excited oscillation pulse foam breaking technology was proposed based on this. By combination of simulation and experiments, self-excited oscillation pulse foam breaking principle was analyzed, and defoaming optimization method was explored. According to orthogonal test, the structure parameters of self-excited oscillation pulse deformer were optimized. The results show that vorticity disturbance can obviously generate and stimulate local vacuum and strong turbulence in self-excited oscillation cavity, which can break foams. The maximum negative value (absolute value) and maximum turbulence intensity in self-excited oscillation cavity were significantly index correlated with defoaming efficiency. The consistence between numerical and experimental results demonstrates that the methods used to analyze self-excited oscillation pulse properties and to optimize deformer structure are feasible.

Key words: self-excited oscillation; pulse jet; foam breaking; numerical simulation; experimental research

泡沫钻井是一种开发低压、低渗等难动用油气藏的有效技术手段, 应用前景广阔^[1]。泡沫钻井过程中, 由于地面泥浆池容积的限制, 泡沫钻井返出液须进行消泡处理。普遍应用的消泡方法是喷洒化学消泡剂, 该方法简单易行, 消泡效率高, 其缺点是消泡后的泡沫液中含有消泡剂成分, 二次起泡和重复利用的

难度大。因此, 目前泡沫钻井液多为一次性使用, 经济性和环保性不强^[1-3]。探寻经济、环保和高效的消泡技术是泡沫钻井液循环利用的基础, 也是泡沫钻井技术发展的方向^[3-4]。笔者提出将自激振荡脉冲技术用于消泡的设想, 并研制原理样机, 采用数值模拟和试验研究相结合的方法, 对自激振荡脉冲消泡器的机

收稿日期: 2011-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174227); 国家“973”重点基础研究发展计划课题(2010CB226703)

作者简介: 倪红坚(1972-), 男(汉族), 湖南株洲人, 教授, 博士, 主要从事石油钻井工具、高效破岩方法与技术、高压水射流理论与技术研究。

制和性能优化的方法进行探索。

1 试验测试

试验工作在中国石油大学(华东)高压水射流研究中心泡沫钻井循环模拟试验装置上完成(图1)。在前期探索性试验的基础上,确定了自激振荡脉冲消泡器原理样机的基本结构尺寸:上喷嘴直径 d_1 为4~6 mm,下喷嘴直径 d_2 为7~13 mm,腔长 L 为30~60 mm,腔径 D 为30~60 mm,振荡腔碰撞壁锥角为 120° ,见图2。

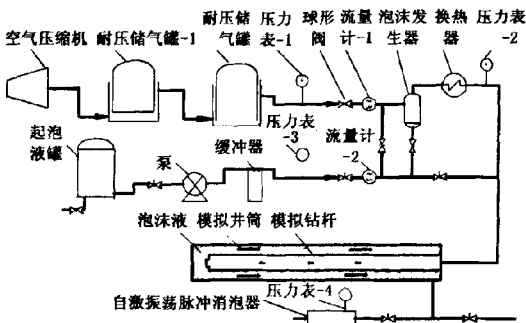


图1 消泡试验装置

Fig.1 Experimental device for foam breaking

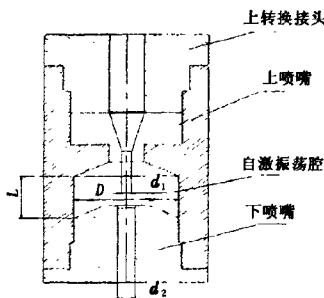


图2 自激振荡脉冲消泡器

Fig.2 Self-excited oscillation pulse foam breaking device

试验材料:起泡剂为SJ-6(东营方圆),稳泡剂为聚丙烯酰胺PAM(胜利油田)。设定起泡剂质量分数为1.5%,稳泡剂质量分数为0.5%。

参照已有研究,以消泡效率^[5]作为评价自激振荡脉冲消泡器工作性能的指标:

$$\eta = 1 - V/V_0. \tag{1}$$

式中, η 为消泡效率; V_0 为单位时间内未经消泡器时泡沫液的体积,mL; V 为单位时间内经消泡器后泡沫液的体积,mL。

V_0 和 V 的数据采样时间为5 min,连续采5个样品,每个样品间隔时间为1 min,去除差值较大的样品,对剩余样品数取平均值,即获得单位时间内泡

沫液的体积。

2 数值模拟

2.1 控制方程

为分析泡沫液在自激振荡腔内的气液两相流动,假设:泡沫液在自激振荡腔内的流场中只有空气和清水两相存在,均视为连续介质;不考虑泡沫的破裂与生成;气液两相与外界无热量交换,两相温度保持不变。泡沫液在自激振荡腔内的流动过程可采用欧拉-欧拉双流体模型^[6-10]描述。

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0.$$

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \bar{F} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_{dr,q} \mathbf{v}_{dr,q} + \alpha_y \rho_y \mathbf{v}_{dr,y} \mathbf{v}_{dr,y}).$$

其中

$$\mathbf{v}_m = \frac{\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q + \alpha_y \rho_y \mathbf{v}_y}{\rho_m}, \quad \rho_m = \alpha_q \rho_q + \alpha_y \rho_y,$$

$$\mu_m = \alpha_q \mu_q + \alpha_y \mu_y, \quad \mathbf{v}_{dr,q} = \mathbf{v}_q - \mathbf{v}_m, \quad \mathbf{v}_{dr,y} = \mathbf{v}_y - \mathbf{v}_m.$$

式中, $\mathbf{v}_m$ 为质量平均速度; ρ_m 为混合密度; α_q 和 α_y 分别为气相和液相的体积分数; $\bar{F}$ 为体积力; μ_m 为混合黏性; $\mathbf{v}_{dr,q}$ 和 $\mathbf{v}_{dr,y}$ 分别为气相和液相的漂移速度。

由气相的连续性方程可得液相的体积分数方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_y \rho_y) + \nabla \cdot (\alpha_y \rho_y \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_y \rho_y \mathbf{v}_{dr,y}).$$

采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对上述方程进行处理,即可分析气液两相流场^[6,10]。

2.2 物理模型

物理模型如图3所示。

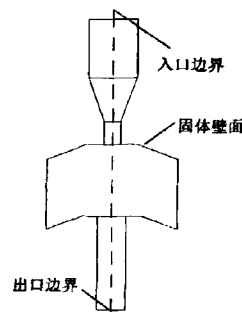


图3 物理模型

Fig.3 Physical model

2.3 边界条件

入口边界条件:采用压力入口,入口压力为 0.5 MPa,确定液相含量为 5%,忽略入口扰动。

出口边界条件:出口为充分发展的湍流,采用压力出口,出口压力为大气压。

壁面条件:采用壁面函数法确定,固体表面处采用无滑移边界条件。

模拟的气液两相流体主要参数:水的密度为 1000 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.005 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;空气的密度为 1.225 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.7894 \times 10^{-2} \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

3 数值结果分析

设定上喷嘴直径 d_1 为 4 mm,下喷嘴直径 d_2 为 11 mm,腔长 L 为 40 mm,腔径 D 为 40 mm,模拟结果如图 4~6 所示。

分析图 4 可以发现,腔室内速度场可分为 5 个区:上喷嘴射流速度核心区(1区)、涡环中心区(2区)、近壁加速区(3区)、边界低速区(4区)、碰撞混合区(5区)。流体经上喷嘴形成高速射流(1区)进入腔室,遇到下游碰撞高压区的阻挡,部分流体扩散并沿腔室壁面附近流动,形成一个以腔室轴线为轴心的原生涡环(2区)。在原生涡环作用下,涡环与壁面之间的流道收窄,使得流体速度增大,形成近壁加速区(3区)。边界低速区(4区)是由涡环对边界死角的抽吸作用形成的。周期性变化的涡环与上喷嘴射流相碰撞,混合形成碰撞混合区(5区),对中心射流产生扰动,混合后流体经下喷嘴流出形成脉冲射流^[11]。

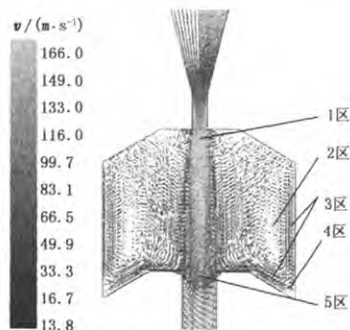


图4 速度矢量图

Fig.4 Velocity vector chart

图 5 显示,流体经上喷嘴加速段压力逐渐降低,腔室内压力场分区明显,可分为上喷嘴出口辐射低压区(1区)、涡环负压中心区(2区)、边界负压区(3区)和碰撞高压区(4区),下喷嘴内压力渐趋下降和

稳定。以腔室轴线为轴心形成的压力呈周期性变化的涡环(2区),对轴线处射流中心产生周期性阻尼,形成水力脉动。上喷嘴出口辐射低压区(1区)的出现是因为腔室中心原生涡环在射流下游形成低压区,导致上喷嘴出口流速急剧上升所致,同时射流的加速也促进了低压涡环的形成。碰撞高压区(4区)的出现是因为流体通过下喷嘴,造成的压力突然上升,并辐射到腔室内部一定区域。流体进入下喷嘴后,流速增大,压力逐渐下降,并逐渐趋近于出口压力。

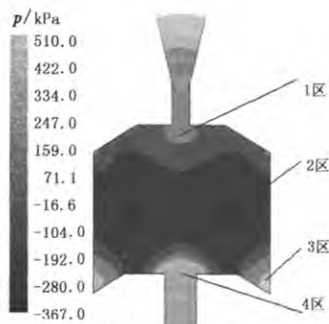


图5 压力场分布

Fig.5 Pressure field distribution

腔室内湍流强度(无因次)分布如图 6 所示。可分为上喷嘴射流低强度区(1区)、涡环中心低强度区(2区)、碰撞混合高强度区(3区)、边界低强度区(4区)和下喷嘴壁碰撞高强度区(5区)。1区为上喷嘴射流核,流体的混合扰动少,多为流体间的滑移,因此湍流强度低;2区为涡环的中心,湍流强度相对较高,沿涡环直径向腔壁湍流强度逐渐降低,在边界处(4区)达到最低;3区为主射流与涡环的碰撞混合区,流体的碰撞、剪切产生剧烈的扰动,湍流强度高。腔室内流体流经下喷嘴时与下喷嘴及腔室壁面发生剧烈碰撞,产生高强度的湍流(5区)。

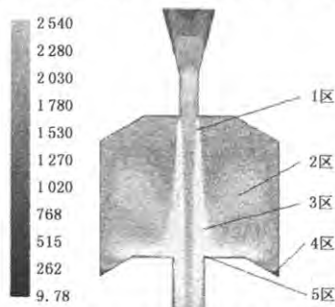


图6 湍流强度场分布

Fig.6 Turbulence intensity field distribution

模拟结果显示,自激振荡腔内能够形成显著的

涡量扰动,激发局部负压和强烈湍流,其中振荡腔内局部负压,使得泡沫膨胀,而强烈的湍流扰动,可对泡沫产生挤压、剪切等作用,上述多种作用协同工作,促使泡沫破裂。图 7 为试验测试的流量为 15.5 L/min 自激振荡腔内负压与消泡效率之间的关系。试验结果与模拟结果一致,证实了自激振荡脉冲消泡的原理可行。

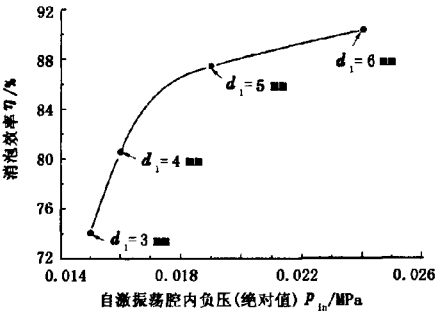


图 7 自激振荡腔内负压与消泡效率之间的关系
Fig. 7 Relationship between negative value in self-excited oscillation cavity and defoaming efficiency

4 性能优化

4.1 结果对比分析

数值计算和消泡试验结果见表 1 和图 8。

表 1 数值模拟与消泡试验结果

Table 1 Results of simulation and experiments

上喷嘴 直径 d_1/mm	下喷嘴 直径 d_2/mm	腔长 L/mm	腔径 D/mm	消泡 效率 $\eta/\%$	腔室内最大 负压绝对值 $p_{\text{max}}/\text{kPa}$	腔室内 最大湍 流强度 J
4	9	50	40	89.3	320	1110
5	9	50	40	72.6	170	710
6	9	50	40	60.3	150	620
4	7	50	40	87.3	220	868
4	9	50	40	89.3	320	1110
4	11	50	40	91.5	420	1590
4	9	30	40	89.1	300	1050
4	9	40	40	91.3	390	1510
4	9	50	40	89.3	320	1110
4	9	60	40	88.6	290	902
4	9	50	30	88.2	280	876
4	9	50	40	89.3	320	1110
4	9	50	50	89.8	326	1220

采用经验模式 $y=\exp(-x/b)+c$ (其中 y 为消泡效率, x 为振荡腔内最大负压绝对值和最大湍流强度, a , b 和 c 为常数) 进行回归分析发现, 自激振荡脉冲消泡器腔室内最大负压的绝对值和最大湍流强度均与消泡效率间呈显著的指数关系(二者相关系数分别为 0.99117 和 0.97604), 随着腔室内最大负压绝对值和最大湍流强度的增大, 消泡效率先是显

著增大, 然后趋于平缓。表 1 中数据还显示, 最大湍流强度和最大负压绝对值互为正相关, 进一步证实了由涡量扰动激发的局部负压和强烈湍流协同消泡的机制。

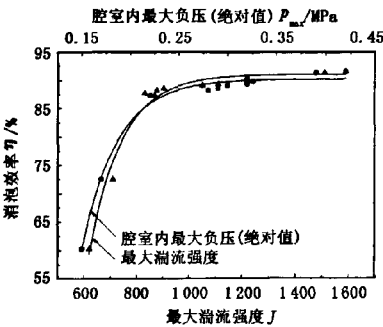


图 8 自激振荡腔室内最大负压绝对值、
最大湍流强度与消泡效率的关系

Fig. 8 Relationship between the maximum negative value (absolute value), the maximum turbulence intensity in self-excited oscillation cavity and defoaming efficiency

4.2 结构优选

针对前期研究筛选确定的自激振荡脉冲消泡器的主要结构参数, 选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验^[12], 对消泡器的结构进行优选, 数值模拟和消泡试验优选结果见表 2。

表 2 自激振荡脉冲消泡器的结构优选正交试验表

Table 2 Structure optimization orthogonal experiment table of self-excited oscillation defoamer

试验 序号	上喷嘴 直径 d_1/mm	下喷嘴 直径 d_2/mm	腔长 L/mm	腔径 D/mm	消泡 效率 $\eta/\%$	腔室内 最大负压 绝对值 $p_{\text{max}}/\text{kPa}$	腔室内 最大湍 流强度 J
1	4	7	30	40	89.23	223.036	965
2	4	9	40	50	90.16	228.828	1105
3	4	11	50	60	89.66	225.417	1048
4	5	7	40	60	84.26	197.401	789
5	5	9	50	40	83.74	195.410	665
6	5	11	30	50	86.36	206.440	607
7	6	7	50	50	71.03	162.765	375
8	6	9	30	60	68.63	158.281	330
9	6	11	40	40	74.03	179.302	529
优选 结构	4	11	40	40	91.26	2310.112	1210

对表 2 中的正交试验设计结果进行极差和方差分析, 分别以消泡效率、自激振荡腔室内最大负压的绝对值和最大湍流强度作为考察指标, 结果发现三者所获得的最优结构一致, 按照影响作用由大到小排序, 依次为上喷嘴直径 d_1 、下喷嘴直径 d_2 、腔径 D 和腔长 L , 结果进一步验证了消泡效率与腔室内最

大负压绝对值和最大湍流强度的相关性。依据正交试验的结果确定了脉冲消泡器的最优结构参数,该结构的腔室内最大负压绝对值、消泡效率和最大湍流强度均优于其他试验结果。

数值计算结果与试验结果吻合良好,证明采用数值与试验相结合的方式,以自激振荡腔室内最大负压的绝对值和最大湍流强度为优选标准,优选消泡器的方法可行,据此可进行消泡器结构设计。

5 结 论

(1) 自激振荡腔内能够形成显著的涡量扰动,激发局部负压和剧烈的湍流协同作用,致使泡沫破裂。

(2) 自激振荡脉冲消泡器腔室内最大负压绝对值和最大湍流强度均与消泡效率呈显著的指数关系,随着腔室内最大负压绝对值和最大湍流强度的增大,消泡效率先是显著增大,然后趋于平缓。

(3) 利用优选的自激振荡脉冲消泡器的结构参数得到的数值计算结果与试验结果吻合良好,本文中优选消泡器结构的方法可行。

参考文献:

- [1] 赵卫红. 欠平衡泡沫钻井技术[J]. 天然气工业, 1999, 19(5): 51-54.
ZHAO Wei-hong. Underbalanced form drilling technology [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(5): 51-54.
- [2] 马文英, 王中华, 曹品鲁. 泡沫流体在油田的应用[J]. 油田化学, 2010, 27(2): 221-225.
MA Wen-ying, WANG Zhong-hua, CAO Pin-lu. Application of foamed fluid in oil field [J]. Oilfield Chemistry, 2010, 27(2): 221-225.
- [3] 刘德胜, 李昭辉, 刘绪礼. 空气泡沫钻井液回收再利用技术[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(1): 11-14.
LIU De-sheng, LI Zhao-hui, LIU Xu-li. Recovery and reuse of air-foam drilling fluid [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(1): 11-14.
- [4] 万里平, 孟英峰, 李永杰, 等. 泡沫流体循环利用研究进展[J]. 钻采工艺, 2010, 33(1): 76-79.
WAN Li-ping, MENG Ying-feng, LI Yong-jie, et al. Research progress of recirculating utilization of foam drilling fluids [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(1): 76-79.
- [5] 郭志伟, 徐昌学, 路遥, 等. 泡沫起泡性、稳定性及评价方法[J]. 化学工程师, 2006, 127(4): 51-54.
GUO Zhi-wei, XU Chang-xue, LU Yao, et al. Foamability and stability of foam and means of evaluating [J]. Chemical Engineer, 2006, 127(4): 51-54.
- [6] 周立行. 湍流两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [7] 连桂森. 多相流动基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [8] 李良超, 王嘉骏, 顾雪萍, 等. 气液搅拌槽内气泡尺寸与局部气含率的 CFD 模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(12): 2396-2400, 2415.
LI Liang-chao, WANG Jia-jun, GU Xue-ping, et al. Computational fluid dynamics simulation of bubble size and local gas hold up in stirred vessel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(12): 2396-2400, 2415.
- [9] 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 7-12.
ZHAO Bin-juan, YUAN Shou-qi, LIU Hou-lin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 7-12.
- [10] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [11] 李江云, 徐如良, 王乐勤. 自激脉冲喷嘴发生机理数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 241-243.
LI Jiang-yun, XU Ru-liang, WANG Le-qin. Numerical simulation of mechanism of the self-excited pulse nozzle [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 241-243.
- [12] 菲诗松, 周纪芎, 陈颖. 实验设计 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.

(编辑 李志芬)