

文章编号:1673-5005(2011)06-0076-05

# 自吸环空流体式自激振荡脉冲射流性能分析与优化

倪红坚<sup>1</sup>, 马琳<sup>1</sup>, 艾尼瓦尔<sup>2</sup>, 杜玉昆<sup>1</sup>, 王瑞和<sup>1</sup>, 陈伟<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 新疆油田 井下作业公司钻井分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**为了充分利用井底水力能量提高钻速,提出自吸环空流体式自激振荡脉冲射流钻井技术。采用大涡模拟与试验研究相结合的方法,分析自吸环空流体式自激振荡脉冲射流的调制机制及射流调制工具的结构参数对射流性能的影响。采用正交试验法进行数值模拟试验,优选射流调制工具的结构参数。结果表明:结构参数对射流性能影响显著,结构合理的吸入式自激振荡射流的性能明显优于非吸入式脉冲射流;射流调制工具出口脉冲射流速度脉动值与破岩深度之间呈显著的线性相关,脉动值越大,射流破岩效果越好。数值计算结果与试验结果吻合良好,表明所用研究方法可行。

**关键词:**射流钻井; 自激振荡; 大涡模拟; 岩石破碎; 正交试验; 结构优选

**中图分类号:**TE 248 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2011.06.012

## Performance analysis and optimization of self-excited pulsed jet suck-in annulus fluids

NI Hong-jian<sup>1</sup>, MA Lin<sup>1</sup>, ANWAR<sup>2</sup>, DU Yu-kun<sup>1</sup>, WANG Rui-he<sup>1</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Drilling Company of Downhole Operation Company, Xinjiang Oilfield, Karamay 834000, China)

**Abstract:** The pulsed water jet drilling technology suck-in annulus fluids was proposed to take full use of the bottom-hole hydraulic power and promote the rock breaking efficiency. The large eddy simulation numerical analysis method was adopted together with laboratory experiments to analyze the modulation mechanism of self-excited pulsed jet suck-in annulus fluids and the effect of structural parameters change on the jet performance of the modulator. The multi-factor orthogonal simulation experiments were done and the pulsed structure was optimized according to the fluctuating velocity. The results show that the structural parameters significantly influence the jet performance, and the suck-in modulator with a rational structure is superior to non-suck-in one. In addition, the bigger the outlet fluctuating velocity of the modulator, the better the rock-breaking effect, and there is a good linear correlation between them. The simulation results agree well with the laboratory experimental data, which indicates the feasibility of the structure optimization of the self-excited pulsed water jet.

**Key words:** jet drilling; self-excited pulse; large eddy simulation; rock breaking; orthogonal experiment; structure optimization

发展破岩钻井新方法,以有效提高钻井速度是油气钻探的重要研究方向。研究和实践均证实,脉冲射流可改善井底岩石的受力状况,强化井底岩屑的净化,明显提高钻井速度<sup>[1-3]</sup>。脉冲射流的性能与

调制方法密切相关,寻找高效调制方法,对射流性能进行优化是脉冲射流钻井技术发展的关键。但是,射流调制工具结构一般较复杂,优化脉冲射流性能涉及的因素较多、试验量大,而且受制于研究条件,

收稿日期:2011-05-31

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2010CB226703);国家自然科学基金项目(50974130)

作者简介:倪红坚(1972-),男(汉族),湖南株洲人,教授,博士,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。

大尺寸的射流调制工具往往得不到充分的试验分析,因此探索一种准确高效的脉冲射流性能优化方法就显得非常迫切<sup>[46]</sup>。笔者以自吸环空流体式自激振荡脉冲射流钻井工具为例,采用大涡模拟和试验研究相结合的方法,对脉冲射流性能分析和优化的方法进行探索,为脉冲射流性能分析与优化提供依据。

## 1 自吸环空流体式自激振荡脉冲射流工具的结构原理

图1为设计的一种新型自吸环空流体式自激振荡脉冲射流钻井工具,其工作原理是利用射流的卷吸作用在自激振荡腔的中心两侧区域形成低压区,在该低压区与环空压差的作用下,环空流体被吸入到工具内部,与主射流混合。混合后的流体经过自激振荡腔调制,经钻头喷嘴形成脉冲射流,作用于井底岩石,改善井底岩石的受力状况,强化岩屑的清洗,提高破岩效率。

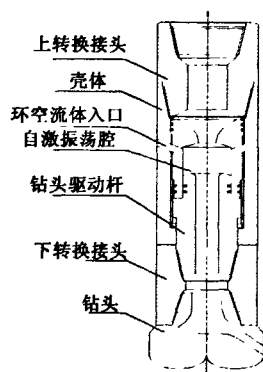


图1 钻井工具示意图

Fig.1 Schematic diagram of drilling tool

## 2 大涡模拟

目前湍流的数值模拟方法主要有直接数值模拟方法(DNS),雷诺平均法(RANS)和大涡模拟方法(LES)。自激振荡脉冲射流流场复杂,涉及流体的自激振荡、动态特性等多方面因素,各因素相互联系且共同影响着射流的性能。目前国内外对自激振荡流场特性的描述主要采用雷诺时均方法,对流场的脉动效应及动态特性研究较少。

湍流大涡模拟是介于雷诺平均方法和湍流直接数值模拟间的湍流数值计算方法,其基本思想是把包括脉动在内的湍流瞬时运动通过某种滤波方法分成大尺度运动和小尺度运动,大尺度运动通过求解微分方程直接求出,小尺度运动对大尺度运动的影

响通过次网格模型来模拟<sup>[7-8]</sup>。因此,在复杂流动的模拟中可以得到很多雷诺时均方法无法获得的湍流运动的细微结构和流动图像,被广泛认为是一种非常有前景的湍流数值模拟方法。本文中利用大涡模拟对自吸环空流体式自激振荡脉冲射流进行数值仿真分析,更加深入地了解自激振荡射流流场的振荡特性及动态特征。

### 2.1 控制方程

目前LES模拟主要用于不可压缩流体,针对本次研究,选用连续性方程和N-S方程作为大涡模拟的基本控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中, $i$ 为三维直角坐标系中的坐标方向, $i=1,2,3$ ;  $j$ 为三维直角坐标系中的速度分量方向, $j=1,2,3$ ;  $u_i$ 和  $u_j$  分别为  $x_i$  和  $x_j$  方向上的速度,  $\text{m/s}$ ;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  为流体的动力黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

在计算中,需要对N-S方程进行滤波,首先利用滤波函数将流动变量分解成大尺度量  $f(x,t)$  和小尺度量  $f'(x,t)$ :

$$f(x,t) = \bar{f}(x,t) + f'(x,t). \quad (3)$$

其中

$$\bar{f}(x,t) = \int G(x,x') f(x',t) dx'.$$

式中, $G(x,x')$ 为给定的核函数,称为滤波函数。将式(3)代入N-S方程和连续性方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

即可得到大尺度量  $\bar{f}(x,t)$  满足的大涡模拟方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j. \quad (6)$$

式中, $\tau_{ij}$ 为湍流亚网格应力。

若  $\tau_{ij}$  为亚网格张力,须封闭模型:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}. \quad (7)$$

其中

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \mu_i = \rho L_s^2 |\bar{S}|,$$

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}), C_s = 0.1,$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} C_s^{[9-11]}.$$

式中,  $\mu_i$  为亚网格湍流黏性力;  $\bar{S}_{ij}$  为亚网格湍流张量旋率;  $L_s$  为网格的混合长度;  $\kappa$  为常数;  $d$  为到最近的壁面的距离;  $V$  为计算单元的体积。

## 2.2 物理模型

基本假设: 模拟时采用的流体介质为清水, 且为不可压缩流体; 水相为连续介质, 其在空间有连续的速度、压力分布和等价的输运性质; 与外界无热量交换, 温度保持不变。

物理模型如图2所示。

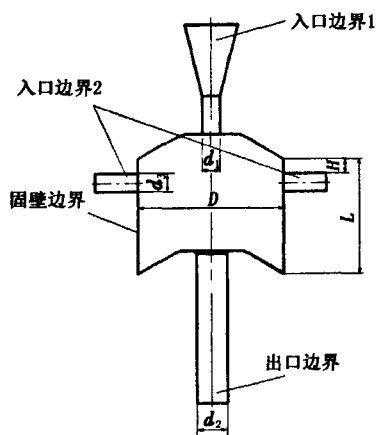


图2 物理模型

Fig. 2 Physical model

入口边界: 考虑到室内破岩试验条件, 取入口边界1处压力为15 MPa, 入口边界2处压力为0 MPa。

出口边界: 设为压力出口, 压力为0 MPa。

壁面边界: 壁面条件采用壁面函数法, 固体表面采用无滑移边界条件。

基于自激振荡脉冲射流调制工具的结构特征, 本次模拟采用局部加密的方式, 将自激振荡腔室内的网格加密, 以更好地观察流场变化。考虑到初始化时间、数值耗散以及计算精度等因素影响, 压力速度耦合方式采用SIMPLEC算法, 设置的计算时间步长为0.05 s, 清水为流体介质, 密度为1000 kg/m<sup>3</sup>, 动力黏度为1 g/(m·s)。

## 3 破岩试验装置

试验在中国石油大学(华东)高压水射流研究中心完成, 试验装置见图3, 试验用射流调制工具见图4。射流介质为清水, 试验岩石为石英砂(白石英

砂粒度0.3~0.6 mm, 颗粒棱角尖锐, 石英含量99%, 密度3100 kg/m<sup>3</sup>)与普通建筑水泥(GB175-2007; 强度等级为42.5)按灰砂比1:2.5混合制成, 抗压强度8.7 MPa。射流冲击岩石时间设为120 s, 射流喷距为3.3倍喷嘴出口直径。

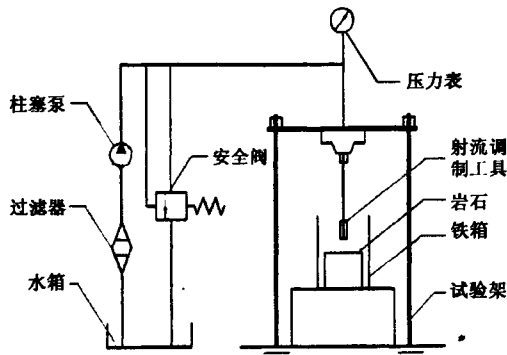


图3 破岩试验装置示意图

Fig. 3 Sketch map of rock-breaking experimental device

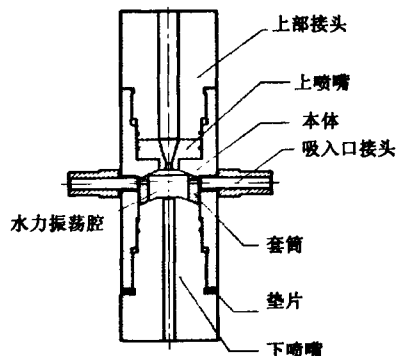


图4 调制工具装配图

Fig. 4 Modulation tool assembly drawing

## 4 大涡模拟结果分析

图5(a)为自吸环空流体式自激振荡脉冲射流调制工具腔室内的压力分布(上喷嘴直径 $d_1$ 、下喷嘴直径 $d_2$ 、腔长 $L$ 、腔径 $D$ 、引入口位置 $H$ 、引入口直径 $d_3$ 、泵压 $p_p$ ,  $d_1 = 5$  mm,  $d_3/d_1 = 1.2$ ,  $d_2/d_1 = 1.8$ ,  $D/d_1 = 12$ ,  $D/L = 1.5$ ,  $H/d_1 = 0$ ,  $p_p = 15$  MPa)。从图5(a)中可以看出, 压力场可分为4个区: 上喷嘴出口低压1区, 中心汽化低压2区, 边界负压3区和碰撞高压4区<sup>[12-13]</sup>。其中最关键的是2区, 该区会形成一对压力呈周期性变化的涡环, 对轴心处的射流中心形成周期性阻尼, 在出口处产生流速脉动, 同时该负压区保证了环空流体的引入。1区是由于中心涡环在腔室下游形成负压区, 导致上喷嘴出口流速急

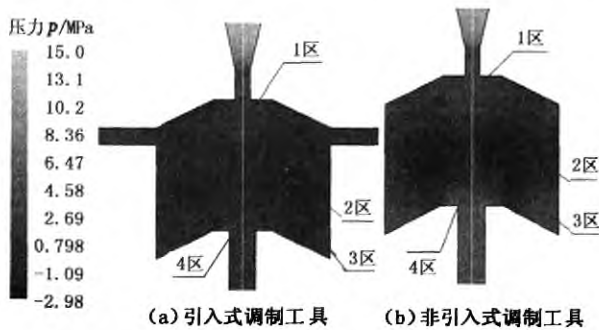


图 5 调制工具压力场分布

Fig.5 Pressure field distribution of modulation tool

剧上升,同时射流的加速促进了低压涡环的形成。腔室内流体进入空间较小的下喷嘴时,对来流产生阻挡作用,压力升高,形成了碰撞高压 4 区。将环空流体入口堵住,腔室内的压力分布见图 5(b)。与图 5(a)对比可以发现,二者腔室内流体的自激振荡规律一致,但是出口流速和出口流速的平均值与脉动幅值差异显著(图 6)。模拟研究结果还发现,如果射流调制工具结构参数不匹配( $d_1=6\text{ mm}$ ,  $d_3/d_1=1$ ,  $d_2/d_1=1.3$ ,  $D/d_1=10$ ,  $D/L=1.7$ ,  $H/d_1=0$ ,  $p_p=15\text{ MPa}$ ),将会在引入口与腔室的连接处产生小的次生涡(图 7),次生涡的出现增加了额外的压力损失,对自激振荡脉冲射流产生抑制作用,使出口处流速脉动幅值明显减小(图 6)。

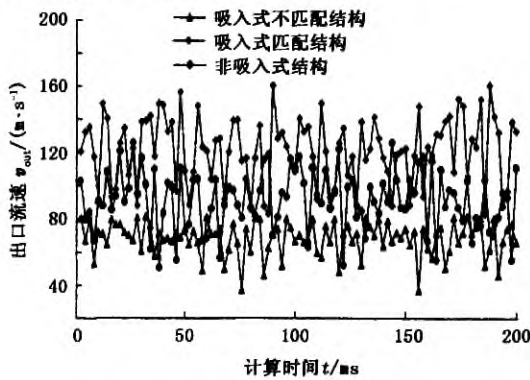


图 6 出口流速脉动情况

Fig.6 Exit velocity fluctuation

上述 3 种射流调制工具所调制出的射流破岩的试验结果见表 1。表 1 数据证实了吸入环空流体强化脉冲射流性能的可行性,而且提示射流调制工具的结构因素对射流破岩效果影响显著,必须深入分析自吸环空流体式自激振荡脉冲射流的调制规律,避免不利结构。大涡模拟结果与试验结果一致,证明采用大涡模拟分析自激振荡式脉冲射流性能的方法可行。

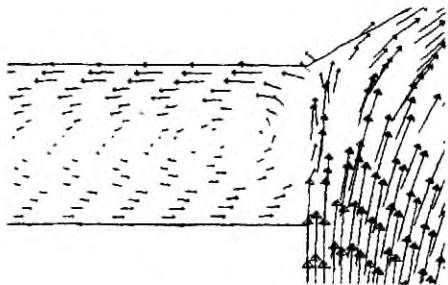


图 7 次生涡速度场

Fig.7 Secondary vortex velocity field

表 1 射流破岩试验结果( $p_p=15\text{ MPa}$ )

Table 1 Results of rock-breaking efficiency ( $p_p=15\text{ MPa}$ )

| 类型       | 引入口流量<br>$Q/L$ | 破岩深度<br>$h/mm$ | 冲蚀体积<br>$V/mL$ |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| 非吸入式结构   | 0              | 8.3            | 3.75           |
| 吸入式匹配结构  | 51.4188        | 14.3           | 6.24           |
| 吸入式不匹配结构 | -10.9503       | 5.3            | 2.15           |

5 性能优化

5.1 结果对比分析

数值计算和射流破岩试验结果(破岩深度为试验结果)见表 2( $d_1=5\text{ mm}$ ,  $D=60\text{ mm}$ ,  $p_p=15\text{ MPa}$ )。

表 2 数值模拟与破岩试验结果

Table 2 Results of numerical simulation and lab experiment

| 序<br>号 | $d_2/d_1$ | $D/L$ | 出口流<br>速脉动<br>$v_{out}/$<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 出口压<br>力脉动<br>$p_{out}/$<br>MPa | 下截面<br>压力脉<br>动 $p_{un}/$<br>MPa | 下截面<br>流速脉<br>动 $v_{un}/$<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 破岩<br>深度<br>$h/mm$ |
|--------|-----------|-------|--------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|
| 1      | 1.4       | 2.0   | 13.30                                            | 3.02                            | 2.94                             | 21.36                                             | 11.6               |
| 2      | 1.4       | 1.7   | 12.22                                            | 3.17                            | 2.56                             | 22.54                                             | 11.2               |
| 3      | 1.4       | 1.5   | 9.88                                             | 3.09                            | 2.41                             | 20.15                                             | 10.6               |
| 4      | 1.4       | 1.3   | 13.20                                            | 2.93                            | 3.58                             | 25.64                                             | 14.5               |
| 5      | 1.4       | 1.2   | 19.80                                            | 3.56                            | 3.69                             | 27.68                                             | 14.1               |
| 6      | 1.6       | 2.0   | 11.17                                            | 2.63                            | 3.07                             | 22.11                                             | 10.8               |
| 7      | 1.6       | 1.7   | 19.94                                            | 4.26                            | 3.28                             | 23.99                                             | 13.4               |
| 8      | 1.6       | 1.5   | 9.52                                             | 3.11                            | 3.11                             | 23.08                                             | 10.1               |
| 9      | 1.6       | 1.3   | 15.57                                            | 3.26                            | 3.94                             | 23.17                                             | 12.3               |
| 10     | 1.6       | 1.2   | 10.60                                            | 2.24                            | 1.85                             | 20.31                                             | 9.8                |
| 11     | 1.8       | 2.0   | 14.85                                            | 3.42                            | 4.07                             | 23.41                                             | 12.1               |
| 12     | 1.8       | 1.7   | 26.62                                            | 5.08                            | 5.22                             | 27.55                                             | 17.5               |
| 13     | 1.8       | 1.5   | 20.15                                            | 3.89                            | 4.21                             | 26.31                                             | 14.3               |
| 14     | 1.8       | 1.3   | 26.36                                            | 4.56                            | 4.89                             | 29.63                                             | 17.7               |
| 15     | 1.8       | 1.2   | 19.98                                            | 4.03                            | 4.06                             | 24.84                                             | 14.0               |
| 16     | 2.0       | 2.0   | 13.75                                            | 3.94                            | 3.55                             | 23.65                                             | 14.5               |
| 17     | 2.0       | 1.7   | 19.78                                            | 3.83                            | 3.97                             | 28.42                                             | 15.5               |
| 18     | 2.0       | 1.5   | 24.05                                            | 4.63                            | 4.52                             | 21.09                                             | 16.2               |
| 19     | 2.0       | 1.3   | 22.34                                            | 4.25                            | 4.13                             | 24.62                                             | 15.9               |
| 20     | 2.0       | 1.2   | 19.52                                            | 3.97                            | 4.26                             | 25.87                                             | 15.8               |

采用统计学原理分析射流调制工具出口流速脉动值、出口压力脉动值、自激振荡腔室的下截面压力脉动值和下截面流速脉动值与破岩深度的对应关系,分析发现,射流调制工具出口流速脉动值与破岩

深度之间具有显著的线性关系,出口压力脉动值和腔室内的下截面压力脉动值与破岩深度之间也存在

一定的线性关系,但拟合效果较差,下截面流速脉动值与破岩深度之间线性关系不明显(图 8,表 3)。

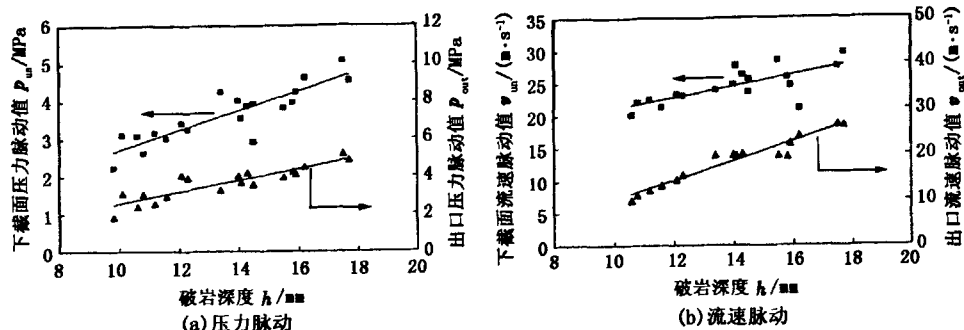


图 8 压力脉动及流速脉动与破岩深度的关系

Fig. 8 Relationship between velocity fluctuation, pressure fluctuation and rock-breaking depth

表 3 线性回归分析结果

Table 3 Results of linear regression analysis

| 脉冲射流性能参数 | 岩石成孔深度回归方程               | 相关系数 $R^2$ |
|----------|--------------------------|------------|
| 下截面压力脉动  | $h=0.259p_{un}+0.121$    | 0.7550     |
| 出口压力脉动   | $h=0.303p_{out}-0.465$   | 0.7700     |
| 下截面流速脉动  | $h=0.8291v_{un}+12.999$  | 0.5510     |
| 出口流速脉动   | $h=2.1222v_{out}-11.108$ | 0.9448     |

## 5.2 结构优选

筛选确定了影响环空流体吸入式自激振荡脉冲射流调制工具的主要结构参数:下喷嘴直径  $d_2$ 、腔长  $L$ 、腔径  $D$ 、引入口位置  $H$  和引入口直径  $d_3$ 。以射流调制工具出口流速脉动值作为评价标准,选用  $L_{16}(4^5)$  正交表进行试验<sup>[14]</sup>,对射流调制工具结构进行优选,模拟结果和射流破岩试验结果见表 4。

表 4 调制工具结构优选正交表( $d_1=5\text{ mm}$ ,  $p_p=15\text{ MPa}$ )

Table 4 Orthogonal table of structure optimization of modulation tool( $d_1=5\text{ mm}$ ,  $p_p=15\text{ MPa}$ )

| 序号   | $d_2/\text{mm}$ | $L/\text{mm}$ | $D/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $d_3/\text{mm}$ | 流速脉动 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 破岩深度 $h/\text{mm}$ |
|------|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1    | 9               | 35            | 55            | 8             | 8               | 20.43                                 | 13.5               |
| 2    | 9               | 45            | 60            | 6             | 7               | 25.10                                 | 17.4               |
| 3    | 9               | 40            | 65            | 0             | 5               | 22.53                                 | 16.1               |
| 4    | 9               | 30            | 50            | 4             | 6               | 20.14                                 | 12.7               |
| 5    | 7               | 35            | 60            | 0             | 6               | 13.08                                 | 9.3                |
| 6    | 7               | 45            | 55            | 4             | 5               | 14.16                                 | 10.1               |
| 7    | 7               | 40            | 50            | 8             | 7               | 11.27                                 | 8.3                |
| 8    | 7               | 30            | 65            | 6             | 8               | 8.67                                  | 6.1                |
| 9    | 8               | 35            | 65            | 4             | 7               | 15.12                                 | 10.6               |
| 10   | 8               | 45            | 50            | 0             | 8               | 16.86                                 | 12.3               |
| 11   | 8               | 40            | 55            | 6             | 6               | 19.74                                 | 14.3               |
| 12   | 8               | 30            | 60            | 8             | 5               | 14.31                                 | 10.3               |
| 13   | 10              | 35            | 50            | 6             | 5               | 21.36                                 | 15.4               |
| 14   | 10              | 45            | 65            | 8             | 6               | 21.44                                 | 15.1               |
| 15   | 10              | 40            | 60            | 4             | 8               | 21.23                                 | 14.8               |
| 16   | 10              | 30            | 55            | 0             | 7               | 20.77                                 | 14.9               |
| 优选结构 | 9               | 45            | 55            | 6             | 6               | 26.23                                 | 17.7               |

对表 4 中的正交试验设计结果进行极差和方差

分析,发现环空流体吸入式自激振荡脉冲射流调制工具的结构参数对考察指标(出口流速脉动和破岩深度)的影响规律一致,按照影响作用的大小,依次为下喷嘴直径  $d_2$ 、腔长  $L$ 、开孔直径  $d_3$ 、开孔位置  $H$  和腔径  $D$ 。依据正交试验的结果确定了脉冲射流调制工具的最优结构参数,该结构的出口流速脉动值和破岩深度均优于其他试验结果。数值计算结果与试验结果相吻合,证明采用大涡模拟与试验相结合的方式,以调制工具出口流速脉动值为优选标准优选调制工具的方法可行。

## 6 结 论

(1)结构参数对射流性能影响显著,结构合理的吸入式自激振荡射流的性能明显优于非吸入式脉冲射流。

(2)射流速度的脉动值与破岩深度之间呈显著的线性相关,射流速度的脉动值越大,射流的破岩效果越好。

(3)以射流调制工具出口射流速度的脉动值作为优选标准,优选的射流调制工具的结构参数,其数值计算与试验结果吻合良好。

(4)所用的大涡模拟与试验研究相结合,优选自吸环空流体式自激振荡脉冲射流调制工具结构的方法可行,为实际技术的发展和类似射流调制工具的结构设计和优化提供了依据。

## 参考文献:

- [1] 王瑞和. 高压水射流破岩机理研究[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.

(下转第 94 页)

- 石油勘探与开发, 1999, 24(4): 66-67.
- YAO Jun, LIU Ying-cai. Modified IPR equation for vertical and inclined wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 24(4): 66-67.
- [17] 孙大同, 田树宝. 不同井斜角油井修正 IPR 曲线研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 53-55.
- SUN Da-tong, TIAN Shu-bao. A study of IPR curve in slanted wells with different angle of deviation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 53-55.
- [18] GILL H, ISSAKA M B, AL-ZAYER R M. Pressure transient behavior of horizontal and slant wells intersecting a high permeability layer[R]. SPE 105616, 2007.
- [19] 陈要辉, 阎铁, 毕雪亮. 油藏斜井三维势分布理论研究[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 90-93.
- CHEN Yao-hui, YAN Tie, BI Xue-liang. Theoretical research on 3D potential distribution of slanted wells in different types of reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(3): 90-93.
- [20] OUYANG L, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions[J]. SPE Journal, 1998, 3(2): 124-133.
- (编辑 李志芬)

(上接第 80 页)

- [2] 李根生, 沈忠厚. 高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 96-99.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 96-99.
- [3] LIU H, WANG J, KELSON N, et al. A study of abrasive characteristics by CFD simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(153/154): 488-493.
- [4] 王希勇, 熊继有, 张艺瀚. 新型水力增压理论研究[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 58-62.
- WANG Xi-yong, XIONG Ji-you, ZHANG Yi-han. Theoretical study of novel hydraulic pressurizing device[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 58-62.
- [5] IYOHO A W, SUMMER D A, LDECKI Greg. Petroleum applications of emerging high-pressure water jet technology[R]. SPE 26347, 1993.
- [6] NI Hong-jian, WANG Rui-he, ZHANG Yan-qing. Numerical simulation study on rock breaking mechanism and process under high pressure water jet[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(12): 1595-1604.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [8] 刘顺隆, 赵仕厂, 郑洪涛, 等. 离子点火器三维燃烧场的大涡模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(4): 464-467.
- LIU Shun-long, ZHAO Shi-chang, ZHENG Hong-tao, et al. Large eddy simulation of 3D combustion field in plasma generator[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(4): 464-467.
- [9] DAI Y, KOBAYASHI T, TANIGUCHI N. Large eddy simulation of plane turbulent jet flow using a new outflow velocity boundary condition [J]. JSME International Journal, 1994, 37(2): 242-253.
- [10] 容易, 张会强, 王希麟. 气固两相圆湍射流流动的大涡模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(2): 240-243.
- RONG Yi, ZHANG Hui-qiang, WANG Xi-lin. Large eddy simulations of gas-particle turbulent round jet flows [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47(2): 240-243.
- [11] 王尊策, 时培明, 吕凤霞. 复合式水力旋流器内部流场的数值模拟[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 125-128.
- WANG Zun-ce, SHI Pei-ming, LÜ Feng-xia. Numerical simulation of internal flow field in compound hydrocyclone[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 125-128.
- [12] 虞育松, 李国岫. 喷孔内流对射流初始扰动影响的大涡模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(1): 161-164.
- YU Yu-song, LI Guo-you. Large eddy simulation of the effect of nozzle internal flow on spray initial perturbations [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(1): 161-164.
- [13] 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.
- [14] 茆诗松, 周纪芄, 陈颖. 实验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- (编辑 李志芬)