

文章编号:1009-3087(2013)05-0160-06

影响自激振荡脉冲射流性能的喷嘴结构参数研究

葛兆龙^{1,2},周哲^{1,2},卢义玉^{1,2},夏彬伟^{1,2},汤积仁^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030;

2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯开采国家地方联合工程实验室,重庆 400030)

摘 要:脉冲射流射孔增产技术可有效改善低渗气藏渗透率,提高产气量。自激振荡喷嘴作为射孔增产技术的核心装置,其结构参数直接决定射孔质量。为得到适用于此技术的最优喷嘴结构,根据流体力学、射流力学、边界层及大涡模拟计算理论,利用大涡模拟方法和 PIV 测试实验研究了不同后喷嘴和前喷嘴直径比、振荡腔长和前喷嘴直径比对脉冲射流的影响规律。将大涡模拟计算结果与 PIV 试验测试结果相结合,建立了适用于低渗气藏射孔增产的自激振荡喷嘴设计准则:前后喷嘴直径比(d_2/d_1)为 1.2 ~ 1.3,腔径比(L/d_1)为 2.3 ~ 3.3。所得结论可作为脉冲射流发生装置的结构设计和优化依据。

关键词:低渗气藏;自激振荡;脉冲射流;大涡模拟

中图分类号:TP69;TE377

文献标志码:A

Study on the Nozzle Structure Parameters Affecting the Performance of Self-excited Oscillation Pulsed Jet

GE Zhao-long^{1,2}, ZHOU Zhe^{1,2}, LU Yi-yu^{1,2}, XIA Bin-wei^{1,2}, TANG Ji-ren^{1,2}

(1. State Key Lab. of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing Univ., Chongqing 400030, China;

2. National & Local Joint Eng. Lab. of Gas Drainage in Complex Coal Seam, Chongqing Univ., Chongqing 400030, China)

Abstract: Pulsed jet can be used to increase gas production, improve the permeability in low permeability gas reservoirs and enhance the yield of wells. According to fluid mechanics, jet mechanics, boundary layer and large-eddy simulation computational theory, the method of large-eddy simulation and the experiment of PIV were used to calculate the influence of ratio before and after nozzles diameter and ratio of oscillation chamber length with before nozzle diameter to the performance of pulsed jet. The design criterion of self-excited oscillation nozzle was established based on the stimulation of LES and PIV experimental results, which the diameter ratio (d_2/d_1) of anterior nozzle to posterior nozzle is 1.2 ~ 1.3 and the chamber length/diameter (L/d_1) is 2.3 ~ 3.3. The conclusions can be used as a criterions in structure design and optimization of pulsed jet.

Key words: low permeability gas reservoirs; self-excited oscillation; pulsed jet; large-eddy simulation

在中国经济和社会发展中,天然气开发和利用占有重要的作用,但目前已探明天然气藏 80% 以上属于低渗气藏^[1-2]。常规射孔增产技术存在压实伤害、射孔深度浅、孔眼直径小、作业时间长、施工效率低等缺点^[3-8]。为提高低渗气藏天然气产量,可采用脉冲射流射孔增产技术。其中,自激振荡喷嘴作为这项技术的核心装置,其性能的高低直接影响到

射孔质量的好坏。国内外众多学者对自激振荡喷嘴结构参数进行了研究:廖振方^[9-10]等研究了自激振荡喷嘴的结构参数对冲蚀效果的影响;李晓红^[11]等人分析了结构参数对自激振荡脉冲射流固有频率特性的影响;裴江红^[12]等研究了射流峰值压力频率和脉冲射流峰值压力以及自激振荡喷嘴结构参数间的相互关系。

由于自激振荡喷嘴结构参数较多,作者在已有研究基础上,选择对射流脉冲效果影响最大的 2 个结构参数直径比(d_2/d_1)与腔径比(L/d_1)进行研究,并将脉冲射流峰值速度作为结构优选标准,采用大涡模拟与 PIV 试验测试相结合的方法,得出适用于低渗气藏射孔增产的自激振荡喷嘴设计准则。

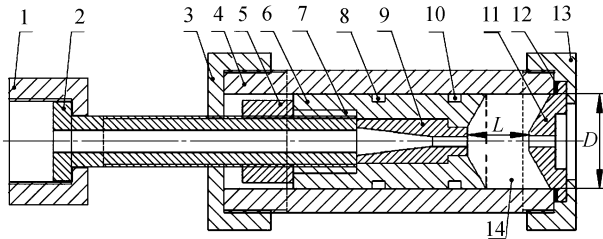
收稿日期:2013-01-13

基金项目:“十二五”国家科技重大专项资助项目(2011ZX05065);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR12240056)

作者简介:葛兆龙(1983—),男,讲师,博士。研究方向:高压水射流理论及其应用。E-mail:gezhaolong@cqu.edu.cn

1 脉冲射流试验装置

试验过程中需进行多种喷嘴结构的更换,操作繁复,耗时长。为简化试验操作,作者根据自激振荡脉冲射流产生机理,设计出具有一定喷射性能且喷嘴内部结构参数可调的脉冲射流试验装置,如图1所示。



1. 连接螺帽;2. 调节螺杆;3. 第一端盖;4. 共振筒;5. 锁紧螺帽;
6. 前喷嘴套;7. 金属螺纹套;8. “O”型密封圈;9. 前喷嘴;
10. “O”型密封圈;11. 后喷嘴;12. 垫圈;13. 第二端盖;14. 振荡腔。

图1 脉冲射流试验装置图

Fig.1 Generation device of pulsed water jet

前喷嘴套内壁腔的左部设有一金属螺纹套,其外壁与共振筒的内壁配合;调节螺杆穿过连接螺帽并依次与第一端盖的中心孔、锁紧螺帽和金属螺纹套配合连接;前喷嘴装在前喷嘴套内壁腔的中右部,后喷嘴装在共振筒的右端和第二端盖之间;前喷嘴的右端、后喷嘴的左端与位于两者之间的共振筒的内壁构成一共振腔室。流体由前喷嘴进入振荡腔,经过振荡调制形成脉冲射流,从后喷嘴射出,作用于低渗气藏储层岩石。

此试验装置可更换不同直径的前喷嘴和后喷嘴,也可通过旋转调节螺杆改变共振腔室的腔长。

2 自激振荡脉冲射流大涡模拟

湍流的数值模拟方法有直接数值模拟(DNS)、雷诺平均模拟(RANS)和大涡模拟(LES)。直接数值模拟对计算机资源要求较高,雷诺平均模拟将变量做均化处理,难以获得射流脉动细节,大涡模拟则介于两者之间,对计算资源要求不高,同时能较好描述脉冲射流的瞬时运动^[13-16]。

作者运用大涡模拟方法对自激振荡脉冲射流进行数值模拟,得到其在不同喷嘴直径比、腔径比下的峰值速度。

2.1 大涡模拟控制方程

在实施大涡模拟方法时,首先经过滤波把大涡

流场和小涡流场分开,以便对大涡流场实施模拟计算,对小涡流场建立模型。在大涡模拟方法中将瞬时流动变量分解成大尺度和小尺度量,其大尺度量可以通过一个在物理区域上的加权积分来表示。

大涡模拟中速度 u_i 经过过滤后可分解为过滤速度 $\bar{u}_i$ 及其偏离 u_i' 之和,亦即分解为大尺度分量 $\bar{u}_i$ 与亚格子尺度分量 u_i' 之和。大涡模拟求解的是以 $\bar{u}_i$ 为变量的大尺度流场的NSE方程组。

本次大涡模拟选用BOX滤波函数:

$$G(|r - r'|) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3}, & |r'_i - r_i| \leq \frac{\Delta_i}{2}; \\ 0, & |r'_i - r_i| > \frac{\Delta_i}{2} \end{cases} \quad (1)$$

对完全N-S方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

进行滤波,得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, τ_{ij} 通过Smagorinsky涡粘性模型来模拟:

$$\tau_{ij} = 2\nu_\tau \bar{S}_{ij} = \nu_\tau \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

定义涡粘性系数:

$$\begin{aligned} \nu_\tau &= (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| = (C_s \Delta)^2 (2S_{ij} S_{ij})^{1/2} = \\ &= (C_s \Delta)^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,Smagorinsky常数 $C_s = 0.1$, 滤波宽度 $\Delta = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}$, Δx , Δy 和 Δz 分别是在 x 、 y 及 z 方向上的网格宽度。

经典的Smagorinsky涡粘性模型一般无法给出准确的近壁区湍流行为,使用时可在壁面附近进行处理。根据Van Driest的指数粘滞函数,将Smagorinsky模型的涡粘系数进行修正,改写成如下形式:

$$\nu_\tau = (C_s D \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (6)$$

其中, D 为近壁衰减函数: $D = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A^+}\right)$ 。

式中, y^+ 表示近壁无量纲距离: $y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$, $A^+ = 25$ 。

将式(4)、(6)代入(3)中,并进行无量纲化,为方便记述,略去符号上面一横,得到控制方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \\ \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_\tau \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right), \\ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 计算对象的几何模型及网格划分

结合国内外学者对已有自激振荡喷嘴结构的研究理论,利用 AutoCAD 和 Gambit 软件设计出自激振荡喷嘴的几何模型,如图 2 所示。



图 2 自激振荡喷嘴计算模型

Fig. 2 Calculation geometry of self-excited oscillation nozzle

为了得到喷嘴结构对脉冲射流的影响规律,针对适用于低渗气藏射孔增产技术的喷嘴尺寸限制,前喷嘴直径 d_1 分别取 1.5、2.0、2.5、3.0 mm,后喷嘴直径 d_2 分别取 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 mm,振荡腔长 L 分别取 3、4、5、7、8、9、11、13、15 mm。

网格质量对 CFD 计算精度和计算效率有重要影响。虽然本次模型计算区域不大,但是由于结构比较复杂,过渡面前后结构变化比较大,所以为了保证网格划分质量和计算准确性,将模型划分为 4 个部分,包括前喷嘴、振荡腔、后喷嘴、外部流场。由于每个部分相对较小,因此采用结构化网格形式,采用四边形网格单元,前喷嘴、振荡腔、后喷嘴区域网格间距 0.1 mm,外部流场区域网格间距 0.2 mm,划分网格数量约为 155 736 个,网格最终划分如图 3 所示。

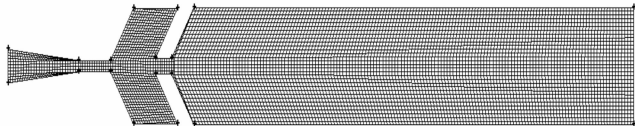


图 3 网格划分示意图

Fig. 3 Mesh diagram

2.3 初始条件和边界条件

- 1) 入口:压力入口,设定常压力 $P_0 = 5 \text{ MPa}$ 。
 - 2) 出口:压力出口,设定压力为大气压 101 325 Pa。
 - 3) 喷嘴和振荡腔两侧:设为壁面条件。
- 其他参数取值如表 1 所示。

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

计算参数	数值
流体初速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0
流体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	998. 2
流体运动粘滞系数 $\nu/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0. 001 003
环境压强 P/Pa	101 325
收敛标准	10^{-3}
时间步长 $\Delta t/\text{s}$	1.0×10^{-5}

2.4 场场计算方法和收敛判据

场场计算方法采用 SIMPLE 算法,即“解压力耦合方程的半隐式方法”,该方法为不可压缩流体 N - S 方程数值求解中应用非常广泛的算法,并且也被成功应用于可压缩流体流场的数值计算中。

在迭代计算的过程中要对解的收敛性进行监视,并在系统达到指定精度后结束迭代计算,系统认为计算结果收敛。监视项目包括连续性、 x - 速率和 y - 速率的残差值,如表 2 所示。

表 2 收敛标准

Tab. 2 Convergence criteria

项目	收敛条件
连续性	0. 001
x - 速率	0. 001
y - 速率	0. 001

2.5 大涡模拟结果分析

根据目前低渗气藏气田磨料射流射孔增产常用喷嘴的结构参数,结合自激振荡脉冲射流产生机理,制定了数值模拟计算方案:以峰值速度作为比较对象,通过改变振荡腔长(L)、前喷嘴直径(d_1)、后喷嘴直径(d_2)3 个参数来优化自激振荡喷嘴结构参数,共 64 种工况,如表 3 所示。

通过大涡模拟计算得到不同工况下水射流脉动速度,其最大值即为峰值速度。对 4 个不同直径(分别是 $d_1 = 1.5 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 2.5 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 3.0 \text{ mm}$)前喷嘴计算获得的脉冲射流峰值速度进行处理,得到不同工况振荡腔长、不同前后喷嘴直径比对应的脉冲射流峰值速度。前喷嘴直径 $d_1 = 2.5 \text{ mm}$ 时的典型处理结果如图 4 所示。

分析可知,不同直径前喷嘴,在同等压力条件下,脉冲射流峰值速度随着后喷嘴与前喷嘴直径比的增大先增大后减小,当后喷嘴与前喷嘴直径比(d_2/d_1)为 1.2 ~ 1.3 时,对应脉冲射流峰值速度最大。

表3 大涡模拟实验64组工况
Tab.3 64conditions of large-eddy simulation

后喷嘴直径 d_2/mm	$d_1 = 1.5 \text{ mm}$				$d_1 = 2.0 \text{ mm}$				$d_1 = 2.5 \text{ mm}$				$d_1 = 3.0 \text{ mm}$			
	L/mm				L/mm				L/mm				L/mm			
	3	5	7	9	4	5	8	11	5	7	11	13	5	7	11	15
1.5	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₁₆
2.0	a ₁₇	a ₁₈	a ₁₉	a ₂₀	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅	a ₂₆	a ₂₇	a ₂₈	a ₂₉	a ₃₀	a ₃₁	a ₃₂
2.5	a ₃₃	a ₃₄	a ₃₅	a ₃₆	a ₃₇	a ₃₈	a ₃₉	a ₄₀	a ₄₁	a ₄₂	a ₄₃	a ₄₄	a ₄₅	a ₄₆	a ₄₇	a ₄₈
3.0	a ₄₉	a ₅₀	a ₅₁	a ₅₂	a ₅₃	a ₅₄	a ₅₅	a ₅₆	a ₅₇	a ₅₈	a ₅₉	a ₆₀	a ₆₁	a ₆₂	a ₆₃	a ₆₄

注: a₁ ~ a₆₄ 分别表示 64 种不同工况。

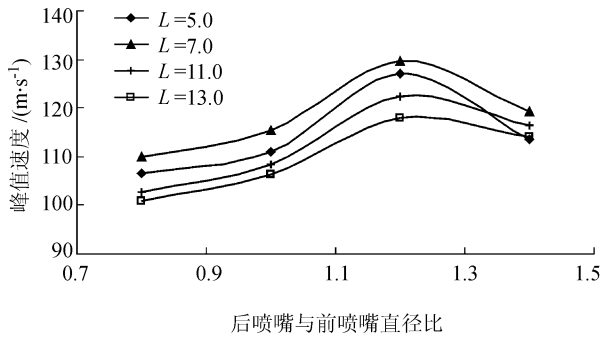


图4 后喷嘴与前喷嘴直径比与峰值速度关系图
Fig.4 Maximum velocity and ratio of before and after nozzle diameter diagram

根据数值模拟结果,对4个不同直径(分别是 $d_1 = 1.5 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 2.5 \text{ mm}$ 、 $d_1 = 3.0 \text{ mm}$)前喷嘴计算获得的脉冲射流峰值速度进行处理,获得不同结构脉冲射流喷嘴振荡腔长和前喷嘴直径比与脉冲射流峰值速度之间关系,图5为前喷嘴直径 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 时的典型处理结果。

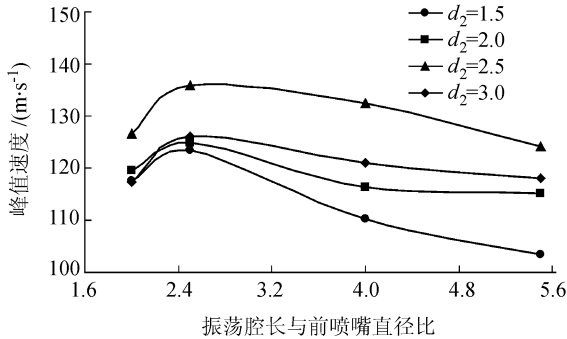


图5 振荡腔长与前喷嘴直径比与峰值速度关系图
Fig.5 Maximum velocity and ratio of oscillation chamber length with before nozzle diameter diagram

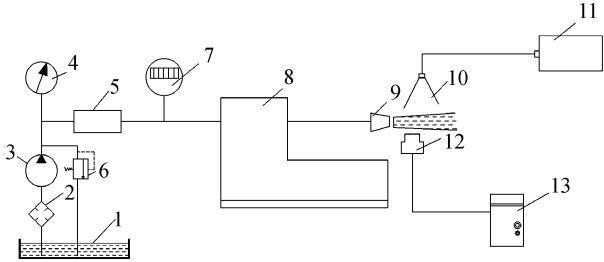
分析可知,不同直径前喷嘴,在相同初始条件下,脉冲射流峰值速度随着振荡腔长度与前喷嘴直径比的增大先增大后减小,当振荡腔长与前喷嘴直径比(L/d_1)为2.3 ~ 3.3时,对应脉冲射流峰值速度最大。

3 PIV 测试试验

用脉冲射流冲蚀岩石效果测试脉冲射流性能的传统方法,操作复杂,随机性大,往往需要大量数据才能近似得到一条拟合曲线。为克服冲蚀试验的不足,并且建立适用于低渗气藏射孔增产的自激振荡喷嘴设计准则,作者采用美国进口PIV(粒子示踪测速)系统对自激振荡喷嘴出口射流流场进行测试,该测试方法不与射流介质直接接触,并可实现射流流场可视化,测试结果准确且操作简单。

3.1 试验装置及原理

图6为试验装置连接示意图,自激振荡喷嘴(图7)固定在自行研发设计的4维水射流测试台上,控制自激振荡喷嘴入口泵压5.0 MPa,激光通过激光发射器由激光臂传送到组合镜头形成片光源垂直照射到喷嘴出口射流,CCD相机拍摄图片输送到计算机,通过Insight 3G软件处理显示,利用Tecplot获得处理结果。



1. 水箱;2. 过滤网;3. 柱塞泵;4. 压力表;5. 稳流器;
6. 溢流阀;7. 涡轮流量计;8. 测试台;9. 脉冲水射流喷嘴;
10. 激光;11. 激光发射器;12. CCD相机;13. 计算机。

图6 测试系统装置连接示意图

Fig.6 Device connection schematic of testing system

实验过程中按要求连接试验装置,调节Insight 3G软件,设定实验过程中参数,获得最佳图像,依次改变自激振荡喷嘴前喷嘴直径、后喷嘴直径以及振荡腔长,对64种工况进行试验,每一种工况自激振

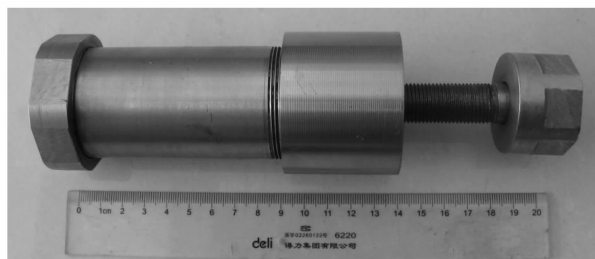


图 7 自激振荡喷嘴

Fig. 7 Self-excited oscillation nozzle

振荡喷嘴出口流场拍摄 100 张流场原始图,图 8 所示为工况 2.5-3.0-7.0 时的流场原始图。利用软件对储存图像进行处理计算,从每一种工况自激振荡喷嘴出口拍摄的 100 张流场图片中,选取 50 张拍摄较优图片,用 Tecplot 软件进行处理,对处理后数据进行分析计算,获得该工况下自激振荡喷嘴出口射流峰值速度。

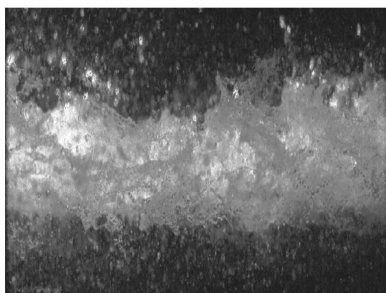


图 8 工况 2.5-3.0-7.0 时流场原始图

Fig. 8 Original flow field chart of 2.5-3.0-7.0

3.2 试验结果

对每种峰值速度对应的自激振荡喷嘴结构参数进行无因次处理,得到不同振荡腔长的自激振荡喷嘴前后喷嘴直径比与脉冲射流峰值速度的关系。前喷嘴直径 $d_1 = 2.5 \text{ mm}$ 时的典型处理结果如图 9 所示。

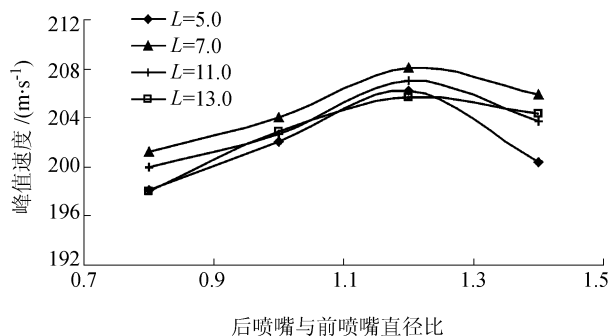


图 9 后喷嘴与前喷嘴直径比与峰值速度关系图

Fig. 9 Maximum velocity and ratio of before and after nozzle diameter diagram

从实验结果分析可知,自激振荡喷嘴内部结构尺寸对射流性能具有很大的影响。不同直径前喷

嘴,在同等压力条件下,脉冲射流峰值速度随着后喷嘴与前喷嘴直径比的增大先增大后减小,当后喷嘴与前喷嘴直径比(d_2/d_1)为 1.2 ~ 1.3 时,对应脉冲射流峰值速度最大。分析其原因,是由自激振荡脉冲射流的形成机理引起的,当前后喷嘴直径相差过大时,就不能使前喷嘴出口处形成的“涡”放大,从而导致自激振荡效果变差,冲蚀效率和性能降低。

根据试验统计结果,对数据进行无因次处理,可获得不同后喷嘴直径的自激振荡喷嘴腔径比(振荡腔长度和前喷嘴直径比)与脉冲射流峰值速度的关系,图 10 为前喷嘴直径 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 时的典型处理结果。

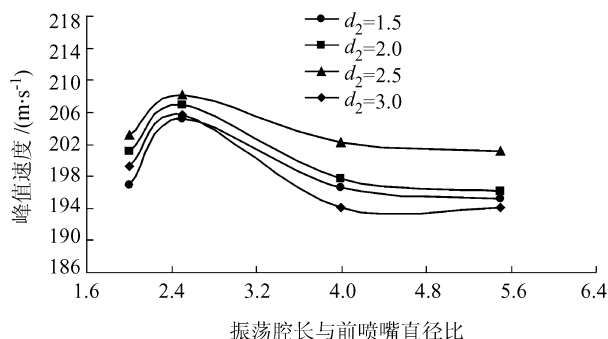


图 10 振荡腔长与前喷嘴直径比与峰值速度关系图

Fig. 10 Maximum velocity and ratio of oscillation chamber length with before nozzle diameter diagram

从实验结果分析可知,振荡腔长的长短是影响自激振荡脉冲射流性能好坏的主要因素之一。不同直径前喷嘴,在相同条件下,脉冲射流峰值速度随着振荡腔长度与前喷嘴直径比的增大先增大后减小,在本文试验条件下,当振荡腔长与前喷嘴直径比(L/d_1)为 2.3 ~ 3.3 时,对应脉冲射流峰值速度最大。分析原因如下:由于自激振荡脉冲射流的形成,要求振荡腔内反馈和扰动之间有确定的相位关系,如果振荡腔长过长或者过短都很难保证有确定的相位使其振荡腔内射流本身产生自激振荡,所以振荡腔长是决定自激振荡脉冲射流性能好坏的因素之一,固定的自激振荡喷嘴直径决定了固定的振荡腔长的范围,从而产生性能较优的自激振荡脉冲射流。

4 结论

利用大涡模拟和 PIV 测试装置对影响自激振荡脉冲射流性能的喷嘴结构参数进行了研究,得出适用于低渗气藏射孔增产技术的自激振荡喷嘴设计准则:

1) 脉冲射流峰值速度随着后喷嘴与前喷嘴直

径比的增大先增大后减小,当后喷嘴与前喷嘴直径比(d_2/d_1)为1.2 ~ 1.3时,对应脉冲射流峰值速度最大。

2) 脉冲射流峰值速度随着振荡腔长度与前喷嘴直径比的增大先增大后减小,当振荡腔长与前喷嘴直径比(L/d_1)为2.3 ~ 3.3时,对应脉冲射流峰值速度最大。

参考文献:

- [1] Shanley K W, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(8):1083-1121.
- [2] Zhao Yan, Wu Shenghe, Xu Zhangyou, et al. Control factors of compacted high-quality sandstone reservoirs of member 2 of Xujiahe formation, upper Triassic in Xinchang gas field of Western Sichuan depression[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2010, 34(4):1-6. [赵艳, 吴胜和, 徐樟有, 等. 川西新场气田上三叠统须家河组二段致密砂岩优质储层控制因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(4):1-6.]
- [3] Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, et al. Unconventional theories and strategies for fracturing treatments of shale gas strata[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(6):1-6. [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 页岩储层压裂改造的非常规理论与技术构想[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2012, 44(6):1-6.]
- [4] Zhang Guangqing, Chen Mian. Complex fracture shapes in hydraulic fracturing with orientated perforations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1):103-107.
- [5] He Yongming, Sun Shangru, Xu Rongwu, et al. Prediction model for fracturing incremental recovery of damaged well in low-permeability reservoir and sensitivity analysis[J]. Journal of the China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2010, 34(3):76-79. [何勇明, 孙尚如, 徐荣伍, 等. 低渗透油藏污染井压裂增产率预测模型及敏感性分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(3):76-79.]
- [6] Cai Wenbin, Li Zhaomin, Zhang Xialin, et al. Horizontal well fracturing technology for reservoirs with low permeability[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1):80-85.
- [7] Zhang X, Jeffrey R G, Bunker A P, et al. Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48:984-995.
- [8] Sun Fujie, Han Shugang, Chen Linsong, et al. Coupling models between fractured horizontal well fluid flow of low permeability gas reservoir and wellbore pipe flow[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(1):32-36. [孙福街, 韩树刚, 程林松, 等. 低渗气藏压裂水平井渗流与井筒管流耦合模型[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(1):32-36.]
- [9] Liao Zhenfang, Tang Chuanlin. Theory of the self-excited oscillation pulsed Jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2):24-27. [廖振方, 唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(2):24-27.]
- [10] Liao Zhenfang, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua. Experiments of the self-excited oscillation pulsed jet nozzle[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(2):28-32. [廖振方, 唐川林, 张凤华. 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验研究[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2002, 25(2):28-32.]
- [11] Li Xiaohong, Yang Lin, Wang Jiansheng, et al. The natural frequency characteristic of the self-excited oscillation pulsed water jet device[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6):641-644. [李晓红, 杨林, 王建生, 等. 自激振荡脉冲射流装置的固有频率特性[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6):641-644.]
- [12] Pei Jianghong, Liao Zhenfang, Tang Chuanlin. Experimental study on characteristics of self-excited oscillation pulsed water jet[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(1):60-63. [裴江红, 廖振方, 唐川林. 自激振荡脉冲射流频率特性实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1):60-63.]
- [13] Xiao Yougang, Zhang Xiaofeng, Kang Zhicheng. Large eddy simulation for fluctuation pressure of high speed train head surface[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(1):227-232. [肖友刚, 张晓缝, 康志成. 高速列车车头曲面脉动压力的大涡模拟[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(1):227-232.]
- [14] Zhang Changbing, Yu Huaquan, Li Wei. Research on 3-D viscous large eddy simulation model for hydraulic turbine[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(3):24-28. [张昌兵, 喻华全, 李伟. 水轮机全三维粘性大涡模拟数学模型研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2006, 38(3):24-28.]
- [15] Xiao Baiqing, Luo Lin, Zhou Zhu, et al. Large eddy simulation of flow in a vortex settling chamber[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(3):30-35. [肖柏青, 罗麟, 周著, 等. 排沙漏斗流场的大涡模拟[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(3):30-35.]
- [16] Lu Jun, Wang Lingling, Ding Quanlin, et al. Three-dimensional large eddy simulation of turbulent jet in JONSWAP waves[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(4):48-54. [鲁俊, 王玲玲, 丁全林, 等. JONSWAP 波环境下湍动射流三维大涡模拟研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(4):48-54.]