

自激振荡脉冲喷嘴的实验研究

王嘉松* 廖荣庆 陈德颀

(西南石油学院开发系)

内容提要 本文对自激振荡脉冲喷嘴振荡腔的几何尺寸进行寻优,发现腔室内腔长的几何尺寸对振荡效果的影响大于腔径的影响;对轴心压力衰减规律的探索,证明其有效喷距为喷嘴入口直径的9~15倍;设立的模型可以作为评价动态压力信号的波形特征、频率结构及能量分布的参考。

主题词 脉冲射流 振荡腔 波形分析 频谱分析 有效喷距

中原、四川、大庆、塔里木、江汉等八个油气田的井下试验统计表明,在相同条件下自激振荡脉冲喷嘴钻头与普通喷嘴钻头相比,机械钻速提高33.5%~77%,单只钻头进尺提高6.7%~44.1%,仅57只钻头就节约直接钻井成本80.89万元,在应用的同时,它仍有待于钻头界去探索和研究。实验表明,喷嘴振荡腔的几何尺寸明显影响着振荡效果。

喷嘴的设计

为了考查振荡腔的横向尺寸与纵向尺寸对振荡效果的影响,探寻振荡腔的合理尺寸,我们首先选取已研究过的各种最优条件,并按腔径 D_1 与腔长 L_1 的二因素三水平的正交方案进行设计,得到一系列不同腔室的脉冲喷嘴。

实验装置与方法

本实验是在西南石油学院喷射实验室实验架上进行的。2台注塞泵将清水经高压管线泵入喷嘴,产生高压射流,通过两套对比的测定方法来衡量射流作用效果。一套是射流

冲击接有压力传感器的测试底盘,测定轴心压力;另一套是让其直接冲蚀人造岩心,测定冲蚀坑体积与深度,来衡量脉冲射流的破岩能力。

压力测试信号的分析方法

以前是以脉冲最大幅值或最大振幅差,来作为衡量射流压力能量大小的指标,这已不能满足实际的需要。

对于特定的脉冲射流测试信号,它既非确定信号,也非完全的周期信号,而是由各种周期成分迭加而成的复杂信号,也可视为平稳随机信号,如图1所示。

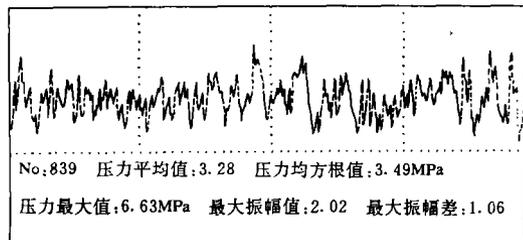


图1 脉冲喷嘴的动态压力测试曲线

这就促使我们建立并研制一套能完整、可靠地评价这种信号的波形特征、频率结构和能量分布的分析软件。该软件主要包括信号的概率分布估计、波形特征量计算、频率分析以及传感器标定、数据拟合等功能。

1. 波形分析

对于满足各态历经的随机过程的信号,如果数据总体服从正态分布,那么用均值、方差 2 个统计量就可完整描述数据总体的统计特性。因为均值 μ 、方差 σ^2 和均方根 s 有如下关系: $s^2 = \mu^2 + \sigma^2$, 所以一定的 μ 和 σ 就唯一地确定了 s , 即用 μ 和 s 可完整描述数据总体特征。对于作用于井底的实际射流, 有时还注重其能量最大值。于是可以选取平均值 p_{mean} 、均方根值 p_{rms} 、最大值 p_{max} 3 个指标作为波形分析的基本指标。

为了正文分析的方便, 我们还可作进一步简化, 即把 3 个指标综合起来转化为一个综合指标 p_k , 用下式表示。

$$p_k = w_1 p_{\text{mean}} + w_2 p_{\text{rms}} + w_3 p_{\text{max}}$$

其中: w_1 、 w_2 、 w_3 为权重, 依据它们受重视的程度分别取 0.3、0.3、0.4, 这意味着决定波形特征的平均值、均方根值共占 60%, 而反映信号最大能量的最大值将占 40%。于是, 最终归结为对信号的平均值、均方根值和最大值以及综合指标的分析。

2. 频谱分析

脉冲射流的振荡频率和振幅大小是我们一直很关心的二个关键性参数, 如何确定它们的大小, 这是复杂的频谱分析方面的内容。频谱分析是对信号在频率域上的分析, 可以反映信号的频率成分和频率结构, 揭示系统的振动特性、激励特性等客观规律, 可以从另一方面提供更为丰富的有用信息。考虑到实际情况, 我们研制了频谱分析的程序, 作为整个软件的重要组成部分, 用它能对 4096 个数据点进行运算分析, 得到 2048 条谱线, 尽可能利用计算机 (IBM-286) 内存, 提高信号的

频率分辨率。

轴心动压力测试分析与评价

我们的根本目的是要探寻振荡腔几何尺寸的影响状况以及脉冲射流的衰减规律, 因此, 实验过程中要保证输入条件(如水力参数、喷嘴的其它有关参数)的同一性, 同时考查了泵压(排量)改变的影响和喷距变化的影响。

1. 波形分析结果与评价

(1) 正交实验结果分析限于篇幅, 现仅给出喷嘴入口直径 $D_1 = 7\text{mm}$, 喷距 $H_1 = 60\text{mm}$ 时, 在泵压 p_r 为 4MPa 和 5.8MPa 两种情况下, 得到的实验结果正交分析表(表 1 和表 2)。

表 1 实验结果正交分析表

喷嘴 编号	实验因素		实验结果			综合指标
	$D_1(D_1/D_1)$	$L_A(L_A/D_1)$	$\frac{p_{\text{mean}}}{p_{\text{com}}}$	$\frac{p_{\text{rms}}}{p_{\text{com}}}$	$\frac{p_{\text{max}}}{p_{\text{com}}}$	$\frac{p_k}{p_{\text{com}}}$
3-1-1	20(2.9)	14(2.0)	1.00	1.12	2.19	1.51
3-1-2		21(3.0)	0.75	0.81	1.58	1.10
3-1-3		28(4.0)	0.60	0.64	1.03	0.79
3-2-1	26(3.7)	14(2.0)	0.69	0.86	2.08	1.30
3-2-2		21(3.0)	0.70	0.75	1.44	1.01
3-2-3		28(4.0)	0.79	0.82	1.40	1.04
3-3-1	32(4.6)	14(2.0)	0.87	0.99	2.18	1.43
3-3-2		21(3.0)	0.75	0.83	1.71	1.16
3-3-3		28(4.0)	0.70	0.74	1.33	0.96
转化 指标	$p_{20} = 1.13$	$p_{14} = 1.41$	注: 上喷嘴直径 $D_1 = 7\text{mm}$ 泵压 $p_r = 4\text{MPa}$ 喷距 $H_1 = 60\text{mm}$			
	$p_{26} = 1.12$	$p_{21} = 1.09$				
	$p_{32} = 1.19$	$p_{28} = 0.96$				
极差	0.06	0.45				

结果表明:

①腔径与腔长明显存在优劣差别, 腔长的影响比腔径大;

②在同等条件下, 最佳与最差喷嘴结构相比, 平均值、均方根值、最大值相差 20%~180%, 证明喷嘴的合理设计至关重要;

表 2 实验结果正交分析表

喷嘴 编号	实 验 因 素		实 验 结 果				综合指标
	$D_1(D_1/D_1)$	$L_1(L_1/D_1)$	$\frac{P_{max}}{P_{min}}$	$\frac{P_{min}}{P_{max}}$	$\frac{P_{max}}{P_{min}}$	$\frac{P_1}{P_{min}}$	
3-1-1	20(2.9)	14(2.0)	1.31	1.48	2.83	1.97	
3-1-2		21(3.0)	1.03	1.13	2.14	1.50	
3-1-3		28(4.0)	1.00	1.06	2.02	1.43	
3-2-1	26(3.7)	14(2.0)	0.99	1.18	2.54	1.67	
3-2-2		21(3.0)	0.90	0.99	2.04	1.38	
3-2-3		28(4.0)	1.13	1.18	1.90	1.45	
3-3-1	32(4.6)	14(2.0)	1.19	1.38	2.78	1.88	
3-3-2		21(3.0)	1.12	1.23	2.35	1.65	
3-3-3		28(4.0)	1.05	1.12	2.01	1.46	
转化 指标	$p_{20}=1.63$	$p_{14}=1.84$	注: 上喷嘴直径 $D_1=7\text{mm}$ 泵压 $p_0=5.8\text{MPa}$ 喷嘴: $H_1=60\text{mm}$				
	$p_{26}=1.50$	$p_{21}=1.51$					
	$p_{32}=1.60$	$p_{28}=1.65$					
极差	0.13	0.33					

③随着泵压的升高,射流的各个特征值也随之相应增加,与低压相比其增幅规律是一致的,因而并不影响最佳喷嘴的确定。

结果解释:

由泵源和剪切层引起的初始脉冲和扰动的射流进入轴对称谐振腔以后,一方面轴心部分的射流下行,冲击靶物,是能量的一部分;另一方面这种射流又是被剪切层包裹着的,由于粘性、速率差、质量、动量和热交换等作用,使剪切层不稳定,且越向下游,剪切层逐渐加厚这种不稳定的剪切层部分流体碰撞下游壁,引起新的扰动,并以声波的速度向上游剪切层初始分离区反馈,遇阻后又以另一速度向下游传播,波及射流核心,形成脉动压力场。

这样剪切层中同时存在轴对称型和螺旋型波的增长,当受到射流内部和外部流体间速度差的作用时,这些不稳定波的运动便产生了一个物质面的卷起。旋涡运动在环境流体中诱导出一个流速场,这个流速场又将环境流体卷入射流,最后的结果,是一系列的剪切层流体与射流流体形成的“胶状旋滚”被平均流带向下游,从而起到了源源不断地利用剪切层流体而达到增幅的作用。

然而,反馈放大作用的结果是千差万别

的,与上喷嘴直径 D_1 、泵源腔室的结构及几何尺寸、流体性质等都有关系。仅从腔室几何尺寸来考查,我们在理论上推导过,喷嘴系统的谐振频率(固有频率)是入口段长 L 、直径 D_1 、腔室容积 V 的函数。当其它条件相同时,一定腔室容积的喷嘴具有一定的谐振频率,喷嘴系统对射流能量的放大具有选择性,只有与谐振频率相接近的扰动频率的脉动才具有放大作用。如果腔室设计不合理,就是一个很大的阻流器,起不到良好的振荡效果。可以这样认为,最佳脉冲喷嘴是对边界层流体的最佳利用,它有效地俘获了扰动频率而增幅,因而它对能量的利用效果最好。

实验结果表明,腔长 L_1 的影响很显著。事实上,如果腔长太短,从上喷嘴直径(D_1)喷出的射流尚无足够剪切层与下游壁碰撞,其反馈效果不够强烈,振荡效果欠佳;如果腔长太长,则射流变得非常紊乱,不能引起合适的反馈,因而不能产生强烈的自激振荡,这时的腔室就是一个很大的阻流器。只有当 L_1/D_1 在某一适当范围时,才能满足反馈条件,才能产生强烈的谐振。

(2)轴心衰减规律的探寻

设计了实验条件下的六种喷距:20、30、60、90、120、150mm。实验结果表明,脉冲喷嘴存在最佳喷距,我们称为有效喷距,即喷嘴能量能得到最佳利用的出口距井底的距离。实验条件下,这个有效喷距范围较宽,一般在60~90mm之间,即喷嘴入口直径的9~15倍,这远远大于普通喷嘴等速核长度。当喷距超过120mm后,射流能量迅速衰减,其变化规律可用 n 次多项式拟合,发现用抛物线($n=2$)逼近它们的离差最小,得到这样一个拟合方程:

$$\frac{p}{p_0} = A_0 + A_1\left(\frac{p}{p_0}\right) + A_2\left(\frac{p}{p_0}\right)^2$$

式中: p ——任意喷距下的压力平均值, MPa;

p_0 ——喷嘴距为 20mm 时的压力平均值, MPa;

A_0, A_1, A_2 ——拟合系数。

上述表明,使用脉冲喷嘴能使有效能量得到比较好的利用。

我们认为,脉冲喷嘴之所以具有这样宽的有效喷距,是因为下喷嘴出口的射流是比上喷嘴出口射流放大的脉动射流。射流的放大以及所包含的螺旋型涡的产生、长大和消失,需要一定的时间和空间。它们有一个逐渐发展壮大过程,在一段空间内,包含旋涡的轴心射流被厚厚的剪切层所包裹,可以很稳定地向下游运动,当它运动到一定距离后,剪切层愈厚且愈不稳定,它受到外层淹没液相及其速度和粘滞力的影响,而使其能量迅速衰减,越往后阻力越大,紊动度越大,衰减越快。

2. 频谱分析结果与评价

泵压为 5.8MPa, 喷嘴距为 60mm 时,图 1 中曲线的自动率谱见图 2。

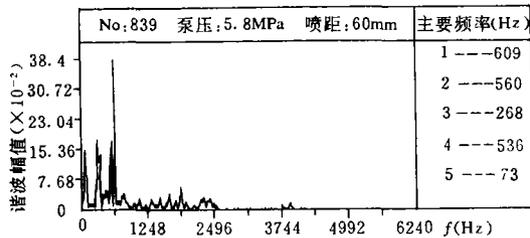


图 2 图 1 曲线中的自动率谱图

通过各种情况下的谱分析,可以得出如下结论:

① 泵压增加,主要频率有所减小(频率左移),而幅值显著增大;

② 腔长增加,频率成分增多,能量开始比较稳定,而后迅速衰减;

③ 腔径增加,频率的变化不如腔长变化时明显且频率比较小,能量的变化也不如腔长大;

④ 喷嘴距增加,主频率左移,即由高向低,

而幅值则缓慢增加而后迅速衰减,存在最佳喷距。

实验发现,产生最大脉动的腔长为 $L_n/D_1 = 2.0 \sim 3.0$ 之间,此时脉动频率整个比较稳定而且脉动幅值最大,这是由于包含有不同频率成分的扰动随射流向下游传播时,将导致各个频率成分不同程度的放大,与谐振频率相接近的那些频率成分将得到集中的放大。在最佳腔长处,扰动的放大效果最好。

但当 L_n/D_1 继续增大时,由于射流在腔内变得非常紊乱,到达碰撞壁的剪切层能量逐渐减弱,不足以形成有效反馈条件,各频率成分的脉冲幅值将骤然下降。

而改变腔径的影响不是很大,这可能由于腔径的尺寸本身变化不是很大,对剪切层的利用没有产生太大的变化所致。

从波形分析与频谱分析的结果来看,二者的结论是一致的。

冲蚀人造岩心结果与评价

在泵压为 14MPa, 喷嘴距为 60mm, 时间取 50s 的条件下,对机械物理性能一致的人造岩心进行冲蚀试验。每个喷嘴冲蚀岩心 3 次,用石英砂充填法测量冲蚀坑体积,用直尺测量深度,最后取平均值,结果如表 3。

表 3 人造岩心冲蚀实验结果

编号	冲蚀坑平均体积(cm^3)	冲蚀坑平均深度(mm)	备注
1-1-1	9	24	①条件参数: $D_1 = 5\text{mm}$, $p = 14\text{MPa}$ $H_1 = 60\text{mm}$; ②冲蚀坑直径一般为 14~22mm
1-1-2	5	17.6	
1-1-3	仅有蚀斑	仅有蚀斑	
1-2-1	7	16.9	
1-2-2	5.8	19.7	
1-2-3	仅有蚀斑	仅有蚀斑	
1-3-1	8	18.7	
1-3-2	8.5	20.9	
1-3-3	0.3	1.7	
普通-1	3.2	14.2	

结果表明:喷嘴腔室尺寸明显存在优劣

确定气藏储量及地层压力的交绘图法

龚久和* 任迪昌

(西南石油地质局华川公司)

内容提要 对于一些难以关井测压的裂缝性异常高压气井(藏),可以采用物质平衡法与弹性二相法储量计算的交绘图法,确定了气藏地质储量和地层压力。实例计算表明,该方法简便易行。

主题词 气藏 储量 地层压力 物质平衡法 弹性二相法 交绘图法

概 述

在油气勘探开发工作中,往往由于多方面的原因使一些井无法关井测压。另外,对一些重点生产井,若为测压而关井,便会给生产造成影响,在经济上也得不偿失。因此,在不关井的情况下确定气藏储量及地层压力等参数,便成了一个重要的研究课题。天然气藏,

尤其是裂缝性气藏,其储量大小的确定本身就有一定的难度,人们一般采用物质平衡法或弹性二相法来解决这个问题。然而,无论是物质平衡法还是弹性二相法,都要求已知气藏不同时期的地层压力。实际上,这两种方法计算的储量级别均较高,对一个气藏而言,二者的计算结果应该是一致的,故我们可以考虑将这两种方法联立求解。

差别,喷嘴腔长过大,则冲蚀效果很差,仅有冲蚀后的蚀斑;最佳喷嘴得到的冲蚀坑体积和深度分别是普通喷嘴的2.8和1.7倍。这与轴心动压力测试结果基本一致。

结 论

(1)脉冲喷嘴振荡腔的腔长的影响大于腔径,最佳腔室的喷嘴与最差腔室的喷嘴相比,能量提高20%~180%。目前,仍需以实验结果作为设计的依据。

(2)脉冲喷嘴的最优喷距是上喷嘴直径 D_1 的9~15倍,能量衰减规律满足抛物线型。

(3)频谱分析表明,腔长越长,频率成分越多,能量由稳定发展而后迅速衰减;腔径改变对频率和能量的影响不如腔长的影响大。

熊继有、孙文涛同志也参与了本文实验研究,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 廖荣庆. 钻头水力系统的研究与高压水射流技术的应用. 高压水射流, 1990
- 2 W. 罗迪. 湍浮力射流与羽流. 海洋出版社, 1991

(本文收稿 1992-05-12)

stone with porosity more than 10% is studied as well as the hydrocarbon potential of member Xiang-4 is also evaluated.

Subject Headings: Central Sichuan, hydrocarbon potential evaluation, Bajiaochang Gas field, member Xiang-4, geological characteristic, parameter forecast, reservoir description.

DRILLING/PRODUCTION TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

Fu Guoqiang: **A Way to Raise the Drilling Speed of Gas Wells in the Central Part of San-Gan-Ning Basin**, NGI 12(6), 1992: 40~45

In view of raising the drilling speed of gas wells in the central part of the basin, the influence of the casing programme, hydraulic and mechanical parameters, polymer drilling fluid and well cementation by direct pumping and backsqueezing, etc., on the drilling speed is summarized and analyzed. It is pointed out that to raise drilling speed, systems engineering must be done well and a complete set of technique must be formed.

Subject Headings: central part of Shan-Gan-Ning Basin, natural gas, drilling, drilling speed.

Qiao Kangni: **Developing the Technology and Technique of Directional Drilling in High and Steep Structure to Raise the Success Ratio of Exploratory Wells**, NGI 12(6), 1992: 46~51

In view of the characteristics of the high and steep structures in eastern Sichuan region, such as high dip angle, many faults, deep buried pays, hard rocks and extreme difficulty in drilling, etc., a set of the technology and technique of directional drilling in high and steep structure which fits in with the characteristics of this region is summarized. So that, the success ratio of exploratory wells on high and steep structure is greatly raised.

Subject Headings: eastern part of Sichuan, high and steep structure, directional well, drilling technique.

Shi Zhonghua, Fu Xiaoquan and Du Chengming: **Application and Development of Directional Drilling Technique in Sichuan Region**, NGI 12(6), 1992: 52~55

In this paper, the development history and actual level of directional drilling technique in Sichuan are generalized, the problems solved by using directional drilling technique in recent years are summarized and the positive proposals for comprehensively applying and developing this technique and technology are put forward.

Subject Headings: Sichuan region, directional drilling, prospect, economic benefit.

Wang Jiasong, Liao Rongqing and Cheng Dejie: **Laboratory Study of Self-exciting Oscillation Pulse Nozzle**, NGI 12(6), 1992: 56~59

In this paper, the geometric size of the oscillating chamber of self-exciting oscillation pulse nozzle is optimized. It is found that the influence of the length of interior chamber on oscillation effect is greater than its diameter. An exploration of axle centre pressure attenuation rule proves that the effective injection distance is 9~15 times as much as the diameter of nozzle entry. The model designed can be regarded as the reference for evaluating the waveform feature of dynamic pressure signal, frequency

structure and energy distribution.

Subject Headings: pulse jet, oscillation chamber, waveform analysis, frequency spectrum analysis, effective injection distance.

Gong Jiuhé and Ren Dichang: **Intersecting Plat Method for Determining Reserves and Formation Pressure of Gas Reservoir**, *NGI* 12(6), 1992: 60~62

For some fractured gas wells or gas reservoirs with abnormal high pressures which are difficult to shut in for pressure measurement, an intersecting plat method for reserve estimation by the material balance and the second phase of elasticity may be used to determine the geological reserves and formation pressures. An account for an example indicates that this method is convenient and easy.

Subject Headings: gas reservoir, reserve, formation pressure, material balance method, method of second phase of elasticity, intersection plat method.

Zeng Shunpeng: **Application of the Matching Technique of Massive Fracturing to Deep Oil and Gas Reservoirs with Low Permeability**, *NGI* 12(6), 1992: 63~65

This paper comprehensively summarizes the advantages of matching technique of massive fracturing developed widely in China at present. In view of the characteristics of deep oil reservoir with low permeability in Punan Oil Field and its development situation, the massive fracturing test had been done. The result shows that the matching technique of massive fracturing pays a role of overally increasing production in the development of oil and gas fields especially deep oil and gas reservoirs with low permeability, showing a good prospects.

Subject Headings: massive fracturing, matching technique, optimization of technique, oil and gas reservoir with low permeability, evaluation of test.

STORAGE/TRANSPORTATION/SURFACE CONSTRUCTION

Chen Wenzhong and He Yuguí: **Understanding of Speeding up the Construction of Production Capacity of Sichuan Natural Gas**, *NGI* 12(6), 1992: 66~68

According to the practice of construction of production capacity of Sichuan natural gas in many years, this paper analyses the characteristics and problems of construction of production capacity, and emphasizes some problems which must be paid attention in doing it best at present. It can be available for reference when making polices and working.

Subject Headings: Sichuan, natural gas, construction of production capacity, understanding.

Luo Yaoguang and Li Subi: **Discussion on the Corrosion Reasons of Type-SL Water Sleeve Stove**, *NGI* 12(6), 1992: 69~74

Type-SL water sleeve stove is the main heating equipment in CE gas field. Because of some reasons in design and application, it makes water sleeve stove get various degree corrosion and some is quite serious. This paper discusses on the reasons of corrosion and proposes some suggestions for improving.

Subject Headings: SL-water sleeve stove, corrosion mechanism, corrosion control.