



自激脉冲射流 在喷射钻井中的应用研究*

蒋祖军**

廖荣庆

(西南石油地质局地勘总公司)

(西南石油学院)

内容提要 脉冲射流能够在能级相同的情况下增大射流的瞬时冲击力,可以提高射流的辅助破岩和清除岩屑的效果。本文介绍了利用流体动力学和水声学的基本原理在特殊喷嘴结构中产生自激脉冲射流的机理,通过实验研究了腔室结构参数和回压等因素对自激效果的影响规律。

主题词 自激脉冲射流 钻头喷嘴 喷射钻井 应用 研究

大量研究表明,射流的结构不同,冲击方式不同,给物体表面所产生的压力及其分布规律也不同,其冲击效果也截然不同。其中自激脉冲射流是在当前喷射钻头喷嘴研究中的一个热点课题。

脉冲射流能更充分地发挥水锤效应,在能量级别相同的情况下能有效地提高射流对井底的峰值打击力,使作用于岩石单位面积上的射流能量更大。故脉冲射流就是利用一定的发生装置,将在一定时间内由压力源提

观察井2口,水井1口,集、输设施完备,绝大部分井在完井时都进行了酸化。气藏储量可靠,本文取数值模拟储量进行实例计算。按Y气田B气藏实际投资构成气藏投资总额,将相应的经济参数代入计算公式,得到最低采气速度为2.02%。

Y气田B气藏的实际采气速度为8%,大大地高于用经济计算方法确定的最低采气速度,说明该气藏开发确定的采气速度是合理的。

用经济计算方法确定气田开发的最低采气速度,为研究气田合理采气速度提出一个

定量指标。对新气田的开采初期,在没有更多依据确定其产能时,运用这个方法计算气藏最低产能,具有一定实际意义。

本文在撰写过程中曾蒙四川石油管理局地质勘探开发研究院钟孚勋高级工程师的热情帮助和指导,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 A. II. 克磊洛夫等. 油田开发设计. 北京: 中国工业出版社, 1964
- 2 赵国良. 工业经济管理. 成都: 四川科技出版社, 1987

(本文收稿 1991-09-20)

* 蒋祖军同志在西南石油学院学习期间参加了自激脉冲射流的部分研究工作,本文即据其研究内容整理而成——编者注。

** 610081,成都市北一环路四段。

供的能量储存起来,然后在极短的时间内把能量传递给工作介质,并将工作介质发射出去,以获得较动力源压力高得多的脉冲射流,所谓自激脉冲,就是依靠流体本身在合适的流体结构中产生振动。它不需动密封,无外加驱动装置和活动部件,具有节省能量、易于调节等特点。

产生自激脉冲的机理

我们采用的物理模型如图1所示。

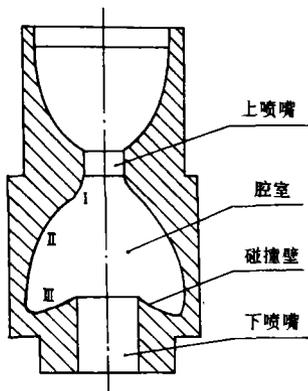


图1 自激振动的物理模型

图1的物理模型是由上喷嘴、下喷嘴和二者之间的多曲面振荡腔组成的。将振荡腔分成3个区域：I为初始分离区，II为剪切发展区，III为碰撞区。

当一股稳定的高压射流自上喷嘴射入振荡腔时,由于射流速度比腔内流体的速度大,于是在二者的交界面附近存在着一个速度梯度极大的剪切层。在区域II的剪切层内,因剪切流动产生涡流,由于是轴对称的射流,故涡流以涡环的形式产生和运动。在涡旋的产生和运动过程中,由于旋涡破碎和涡量变化而对主流的流动产生扰动。这些扰动随射流向下游传播的过程中,由于剪切层的不稳定性对扰动具有选择性的放大作用,不同的频率成分得到不同程度的放大。当这些放大后的

扰动到达下游后与碰撞壁相撞时,一方面激励碰撞区III内射流剪切层的横向脉动,另一方面通过腔内流场以高速向上反射到初始分离区I。初始分离区又受到腔壁的限制,在其附近形成壁垒,导致了旋涡破碎,引起新的扰动。如果是有效反馈,就使初始分离区I附近产生的新扰动与原扰动同相位,增强了该区域扰动的不稳定性。这些扰动又继续向下游传播、放大,在下游的区域III内又产生新的更大的扰动。如此周而复始,循环以复,又构成了一个压力扰动信号的产生、放大、碰撞、反馈回路的行为。剪切层的大幅度振荡便要波及到射流核心,在振荡腔内形成一个脉动压力场。由于该脉动压力场是处于有限的固体边界内,流体能量只是在射流内部交换,这便决定了振荡腔出口处的射流是压力和速度连续脉动的涡环流,同时产生高强度空化。

由上述分析可知,对腔内流场产生影响的压力扰动主要来自两方面:一是射流剪切层中的有序轴对称扰动与碰撞壁及区域I的腔壁相互作用时激发产生的;二是涡对的相互卷并而产生的。而在我们采用的喷嘴结构中,除了往下的主流外,还会形成一定回流,这样一则增大了剪切层的速度梯度,使涡环强度增大,二则增加了涡对相互卷并的机会,这都有利于产生和加强振荡腔内的压力脉动,并增大空化强度。

此外,由水声学可知,射流运动过程中将磨发一个声学场,处于密封腔内的该声场必然发生声学激荡。如果声学激荡的相位能与腔内的脉动压力相耦合,则可加剧射流的压力脉动。

自激振动的理论分析

根据前人的研究表明,自由剪切层的不稳定性对扰动的放大作用与初始扰动的幅值

无关,与马赫数无关,与剪切层本身的雷诺数无关,仅取决于由下式定义的 Strouhal 数

$$S_D = fD/U \text{ 或 } S_L = fL/U \quad (1)$$

其中: U —射流速度;

f —扰动波频率;

L —距离;

D —喷嘴直径。

当 S_D 在某一范围内时,如果扰动频率满足关系式 $f = S_D U/D$,剪切层不稳定性对此范围的扰动具有放大作用。

旋涡上的某一点在瞬时 t 的位置为 x ,如图 2。

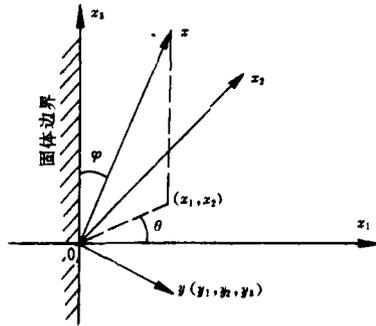


图 2 旋涡与固体边界相互作用示意图

经一段时间的运动后与固体边界相互作用产生的声压⁽²⁾为

$$P\left(x, t + \frac{x}{c}\right) = \frac{\rho a^2 U^{3/2} \Gamma}{4(2\pi c)^{1/2} L^2} \frac{\sin \frac{\theta}{2} (\sin \varphi)^{1/2}}{x} D_i^{1/2} g(t) \quad (2)$$

$$\text{其中 } D_i^{1/2} g(t) = \int_{-\infty}^t \dot{g}(s) \frac{ds}{[\pi(t-s)]}$$

a —涡旋半径;

Γ —涡环强度;

ρ —流体密度;

c —声速。

在旋涡与旋涡之间还要相互作用产生噪声。对于非均匀平均流的不稳定波所产生的

声压⁽²⁾,有

$$p = \frac{\in B \delta^2(o) M^{3/2} \omega^{3/2}}{2(2\pi r)^{1/2}} e^{i(\omega t - \frac{x}{c})} \times (Q_{11} \cos^2 \theta + 2iQ_{12} \cos \theta \sin \theta + Q_{22} \sin^2 \theta) + O(M^4) \quad (3)$$

其中: $\theta = \cos^{-1}(x/r)$; $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$;

$B = \exp\left[i \int_0^x a(x) dx\right]$; $\lambda = c(L/U) = \frac{L}{M}$

M —马赫数; ω —角频率;

\in —很小的扩散参数;

Q_{11}, Q_{12}, Q_{22} —涡旋运动的三个参数;

δ —边界层的特性厚度;

λ —旋涡之间的距离。

自激脉冲射流的实验研究

1. 实验装置及测试原理 如图 3。

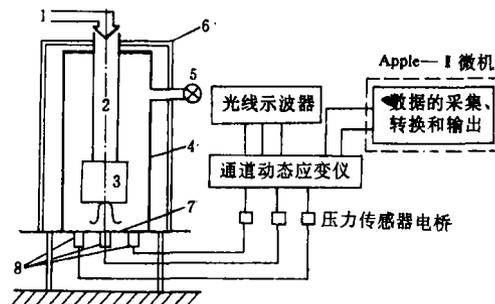


图 3 实验的测试装置及原理图

图中由(1)将工作介质泵入钻杆(2),然后在自激振荡腔(3)发生振荡后冲击在测试底盘(7)上,经井筒(4)从溢流阀(5)将流体排出去。井底的压力经电阻式压力传感器(8)将信号传给示波器,示波器即输出井底压力曲线。同时还将信号传输给 Applet I 微机进行处理,由微机进行数据的采集、转换和打印。井筒和钻杆都由实验架(6)支撑和控制。

2. 实验内容

如表 1 所示。

表1 实验内容

喷嘴组合	腔长 L/d_1	喷距 (mm)	回压 (MPa)	流量 (L/s)
$d_1=6, d_2=7.2$	0, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6	50, 70,	1.3, 3	3.12
$d_1=6.6, d_2=8$		90, 110		
$d_1=8, d_2=10$				

其中喷嘴直径单位为 mm, d_1 为上喷嘴直径, d_2 为下喷嘴直径。

3. 实验观察和分析

(1) 射流发出的噪声。当喷嘴直径较大时发出的噪声较小, 当喷嘴直径较小时发出的噪声较大; 射流的脉动幅度越大, 发出的噪声越大; 腔长增加, 噪声减小。

由(2)、(3)式知, 旋涡与边界和旋涡之间相互作用的声压均随射流速度的增大而增大, 随腔室中 L 的增大而减小。因而在流量一定的情况下, 喷嘴直径小, 射流速度大, 噪声就大; 腔室越长, 噪声越小。

(2) 压力脉动频率变化。在同一喷嘴组合下, 腔长增加, 频率呈减小的趋势; 在同一腔长时, 喷嘴直径减小, 频率呈上升的趋势。

由(1)式可知, $S_L = fL/U \propto L/d_1$ 。而在喷嘴直径不变、流量一定的情况下, U 为定值, 则 $f \propto \frac{1}{d_1}$ 。又 $S_L = N/(S_D + 1.16)^{0.1}$, 即近似有

$S_L \propto \frac{1}{S_D}$, 则 $S_L \propto \frac{L}{d_1} \propto S_D = \frac{U}{fd_1}$, 故 $f \propto \frac{1}{L}$ 。

(3) 峰值密度的变化。在喷嘴组合一定的情况下, 峰值压力越大, 峰值的密度越小。

这是因为压力源所提供的能量是一定的, 喷嘴每一次发射的能量越大, 则需要积蓄的时间越长。

(4) 峰值压力的变化。峰值压力包括最大峰值压力和平均峰值压力, 如图4。

而最大峰值压力 p_{max} 和平均峰值压力 \bar{p}_{max} 随腔长的变化规律分别如图5和6所示。

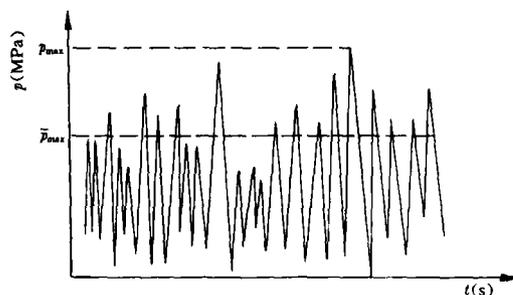
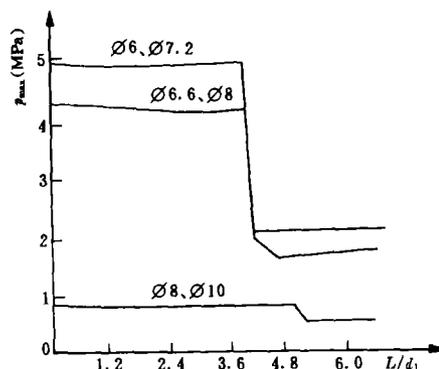
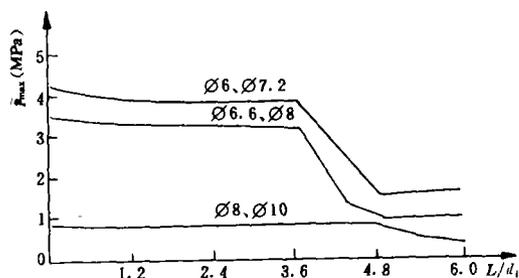


图4 脉冲射流压力随时间的变化规律

图5 $p_{max} - L/d_1$ 曲线图6 $\bar{p}_{max} - L/d_1$ 曲线

由图5和6两组曲线可知, p_{max} 和 \bar{p}_{max} 随 L/d_1 的变化趋势基本相同, 但 p_{max} 却比 \bar{p}_{max} 大得多。在同一喷嘴组合下, p_{max} 随 L/d_1 变化到某一定值(约为 $L/d_1 = 3.6$ 左右)后的下降幅度也要比 \bar{p}_{max} 的下降幅度大得多。

分析其原因, 是由于自激振动射流加强了气蚀作用。旋涡运动越剧烈, 压力脉动越

大,同时气蚀作用也越强。由文献〔1〕知气蚀指数 $\sigma_1 \approx \frac{\lambda}{2\pi\delta}$,而对一定型式的喷嘴、射流液体和速度而言, δ 是一定的。对振动射流,其 λ 与射流直径 d 属于同一数量级,即对于一定的喷嘴组合而言, σ_1 基本相同,因而在外界条件相同时,气泡在井底爆炸时所产生的破裂压力基本相同,所以在一定范围内 p_{\max} 变化不大。而当腔长增加到一定值后,压力扰动不能形成有效反馈,旋涡运动明显减弱,空化强度减小,因而此时的峰值压力也就要小许多。

通过上面的分析,我们认为在示波器记录纸上所出现的异常高的峰值压力,主要是由于空化作用生成的气泡破裂时所产生的异常高压作用在井底的结果。而平均峰值压力虽然也包括气蚀作用产生的高压,即井底的压力脉动是空化作用和瞬时脉动压力共同作用的结果,但主要还是射流本身的压力脉动所产生的。

由峰值压力的变化规律可知,自激振动腔对扰动的放大作用在某一范围内都有效,而超过这一范围则明显减弱。这对现场应用极为有利。

(5)压力脉动率的变化。压力脉动率的定义为: $\delta_p = (\text{平均峰值压力} - \text{平均最小压力}) / \text{泵压}$ 。根据定义,我们就得到了 $\delta_p \sim L/d_1$ 变化曲线,如图7所示。

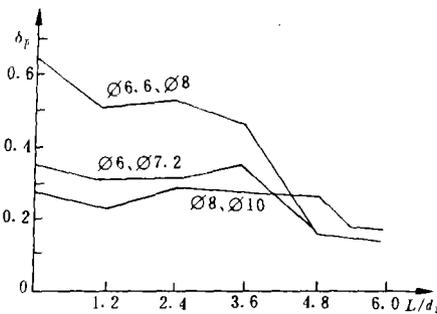


图7 $\delta_p \sim L/d_1$

它反映了自激振动系统的压力脉动幅值相对于该喷嘴组合下的泵压的大小。由 $\delta_p \sim L/d_1$ 曲线看出,泵压高时的压力脉动率不一定大。在所实验的三组喷嘴中,在 $L/d_1 \leq 3.6$ 内,喷嘴组合为 $\phi 6.6$ 、 $\phi 8$ 时的压力脉动率比同等条件下(即 L/d_1 相同)的其它喷嘴组合要大得多,因而该喷嘴的自激振动效果较为理想。

这是由于实验中的流量保持不变,因而喷嘴直径的大小就决定了自激振动腔内的射流速度。在腔室结构一定的情况下,射流速度就直接决定了压力扰动波的产生和反射,也决定了扰动波的频率。由此也就决定了射流边界层的不稳定性及其对扰动波的选择性放大作用。因而在实验条件下存在一最佳喷嘴组合,在该组合下的扰动波将被剪切边界层强烈放大,使压力脉动率较大。

(6)环空回压对自激振动的影响。在其它条件相同的情况下加上回压后,井底的压力脉动较小,此时的噪声也要小得多。这是由于加上回压后,射流的能量衰减就极为严重,周围的介质对射流的干扰大,其峰值压力被周围的液体吸收一部分。但是在自激振动射流的等速核内仍可感受到较大的压力脉动。本文后述的岩心冲蚀实验将证明这一点。

(7)喷距的影响。喷距增大,峰值压力呈下降的趋势。这是因为能量的衰减随喷距的增加而增加。

(8)井底射流的压力分布。定义井底压力比为 $p_r = \bar{p}_{(1)\max} / \bar{p}_{(0)\max}$ 。其中 $\bar{p}_{(1)\max}$ 为井底距射流中心25mm处的压力传感器上所感受到的平均峰值压力; $\bar{p}_{(0)\max}$ 则为射流中心处的平均峰值压力,如图8的 $p_r \sim L/d_1$ 曲线。

由此可见,在实验条件下, $\phi 6.6$ 、 $\phi 8$ 喷嘴所产生的自激脉冲射流的能量最为集中,因而它在井底形成的压力梯度越大。

由前面的分析可知, $\phi 6.6$ 、 $\phi 8$ 喷嘴的自激效果最为理想,其自振频率与腔室的固

有频率最为接近,使腔内接近共振状态,大大强化了射流的脉动。射流的峰值速度和能量也相对较大,射流的能量密集较好。否则,自振频率太大或太小,都会影响自激效果,使射流的能量较为分散。

岩心冲蚀实验

为了验证脉冲射流的性能,用一批岩性相同的岩心进行了冲蚀实验。其冲蚀结果如图9所示。

在图9中, H 是喷距, h 是中心冲蚀坑的深度, φ 是冲蚀坑的平均直径, R 是冲蚀坑周

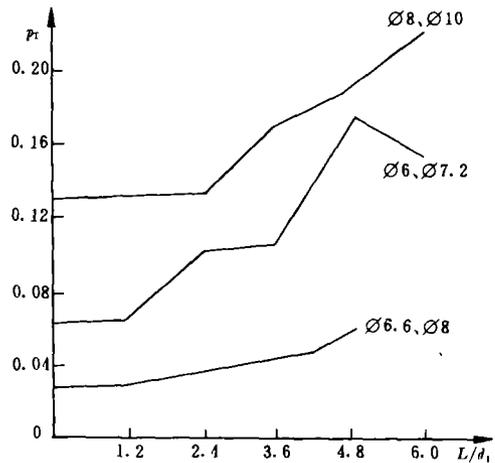


图8 P_r-L/d_1 曲线

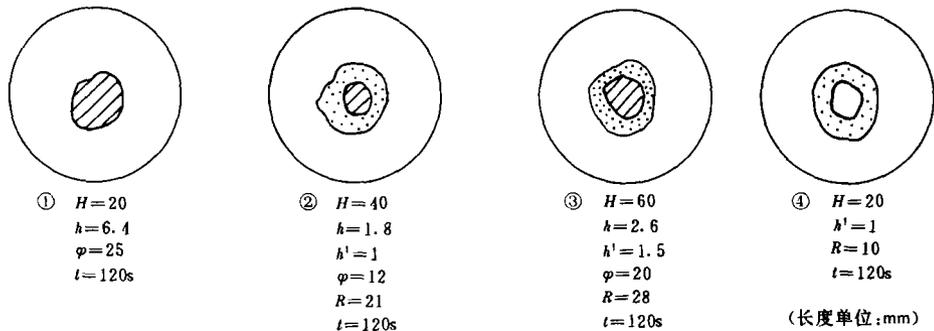


图9 岩心冲蚀结果示意图

围的蚀斑分布半径, h' 是蚀斑深度, t 为冲蚀的时间。其实验条件是: $d_1=\text{Ø}6, d_2=\text{Ø}7.2, L/d_1=3.6$,泵压为12MPa,前3组的回压为零,第四组的回压为1.5~1.8MPa。

第1组,由于喷距较小,冲击点在射流的等速核内,此时是脉冲射流直接破岩;第2组,岩心在等速核之外,此时的能量衰减较大,而射流边界层的气蚀现象尚未充分发挥作用;第3组,由于喷距较大,边界层的空化现象在射流的运动过程中不断加强,在到达较远的岩心后气泡破裂,对岩石产生较大的冲蚀破坏作用;第4组,由于加上了回压,射流能量衰减较为严重,此时主要是空化作用

冲蚀岩心表面。

由冲蚀实验结果,我们可以得到以下几点看法:

(1)根据实验发现,无论在岩心冲蚀面的中心有无蚀坑,其周围在一定半径内一般都会出现蚀斑。在一定范围内,喷距越大,这种现象越明显。这表明射流的边界层在冲蚀过程中起着重要作用;

(2)因为射流的自振产生了大结构的涡环流和高强度的空化,而射流中空泡的起始、长大和破裂需要一定的时间和条件。空泡生成后随射流的运动而长大,当运动到几倍于喷嘴直径的位置时;射流速度减小,压力增

大,到一定程度时,空泡集中破裂,对岩石产生最大的冲蚀破坏作用。因而在一定的外界条件下,存在一最优喷距,此时空化强度的增大和瞬时脉动压力的共同作用产生较大的压力激荡,使冲蚀破坏效果较理想;

(3)由于脉冲射流中的气蚀现象将会引起射流的额外能量损失,即使如此,自激脉冲射流的冲蚀效果明显比平稳射流好得多。实验表明,同样的岩心,在高达 12MPa 时平稳射流冲击时间再长也无明显的直接破岩作用。而图 9 所示的脉冲射流的最大峰值压力仅有 5.5MPa、最小压力甚至为零,但它冲蚀岩心仅 120s,在岩心冲蚀面上就出现了明显的冲蚀坑或蚀斑,有的深达 6.4mm,即使加回压后效果也十分明显。

脉冲射流在喷射钻井中的应用前景

通过实验表明,当自激脉冲射流的压力达到峰值时,射流的动量和速度都相当大,抵御外界干扰的能力强,能量较集中,衰减较小。同时,由于脉冲射流的压力是不断地变化的,一则增加了井底射流冲击压力的不均匀性,二则由于压力脉动的幅值较大,从而在井底会不断地形成一个瞬时真空,对岩屑产生“抽吸作用”,这些对驱出井底凹坑中的岩屑

尤为有利。此外,它还会对井底岩石产生卸载破坏,而且可以在岩石内部产生交变应力,这也有利于岩石的破碎。

总之,自激脉冲射流无论是辅助破岩,还是清洁井底都具有得天独厚的优越性,这对提高钻井速度和降低钻井成本都具有非常重要的意义。美国流体公司已成功地把自振气蚀射流用于石油钻井和船身及车辆清洗,国内从 1989 年底在中原、四川、新疆等油田也开始了自激脉冲射流喷嘴的井下实验,已取得了令人满意的效果。工业实验结果表明,在不同条件下,它可以提高钻速 35.5%~77%,单只钻头进尺提高了 6.7%~44.1%,而且该喷嘴无需对现有钻头做任何改进,直接可以投入现场应用,具有可观的经济效益。

参 考 文 献

- 1 W. E. 约翰逊, A. F. 康恩等. 自振气蚀射流. 高压水射流, 1983, 7
- 2 G. L. 查海姆, P. F. 杰诺克斯, H. L. 列. 自振气蚀射流的流动显形和数字模拟. 高压水射流, 1985, 2
- 3 廖振方, 黄东胜. 自激振动射流喷嘴装置的研究. 高压水射流, 1986, 2

(修改回稿 1991—11—12)

天然气放喷测试燃烧工艺的重大改进

天然气放喷测试是勘探生产中必不可少的一道工序。几十年来,一直采用水平燃烧的传统方法。这种方法克服不了天然气燃烧时产生的强烈热辐射和大量泥浆及其它污染物对周围环境的直接危害,破坏了生态环境,给当地人民带来经济损失。

近年来,四川石油管理局川西南矿区的广大技术人员围绕改进天然气放喷测试的燃烧方法,进行了探索和改进。高级工程师、矿环委会副主任贺鼎元同志运用物理原理,提出将燃烧管立起来(约高 10m),并在燃烧管底部侧面装一台气液分离器,采用地面点火,高空燃烧的方法,比较好地解决了水平燃烧方法解决不了的问题。通过分离后的泥浆还可以回收利用。在包 32、包 33 和自 27 井进行试验,均达预期目的。

目前,该矿有关部门正对噪声污染问题进行进一步研究。

蔡仲华

Chen Yuanqian: A Method for Predicting the Recovery of Gas Condensate Reservoirs, NGI 12(2), 1992:29~35

Based on the principle of material balance, a method for predicting the recovery of the constant volume and water drive gas condensate reservoirs is presented in this paper, and the relational expression between the total recovery of gas condensate reservoir and the recoveries of the dry gas and condensate is also proposed.

Subject Headings: material balance method, gas condensate reservoir, recovery, prediction method.

Ren Wenzian: An Economic Evaluation Method Determinating the Lowest Gas Production Rate in Gas Field Development, NGI 12(2), 1992:36~37

Based on the requirement for the production rate of gas field in investment recovery period in economic management, the lowest production rate of gas field is calculated by use of the economic evaluation method, which furnishes a quantitative index for studying the reasonable production rate of gas field in this paper.

Subject Headings: gas field development, gas production rate, economics, calculation method.

DRILLING/PRODUCTION TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

Jiang ZuJun and Liao Rongqing: A Study of the Application of Self-excited Pulsed-jet Flow to Jet Drilling, NGI 12(2), 1992:38~44

Pulsed jet can strengthen the instantaneous impulsive force of the jet under the condition of same energy level and can raise the ability of auxiliarily crushing rocks and removing cuttings. In this paper, the mechanism of self-excited pulsed jet emerged in nozzle with special texture is introduced by use of the basic principles of hydrodynamics and hydroacoustics, and the rules influencing self-excited effects by cavity-chamber structure parameters and back pressures etc. are analyzed through test.

Subject Headings: Self-excited pulse jet, nozzle of bit, jet drilling, application, study.

Geng Xinyu: A Grey Decision Method for Reasonably Choosing Drilling Rig, NGI 12(2), 1992: 45~47

In this paper, a new method for reasonably choosing drilling rig is provided according to the principle of grey decision of grey system theory and verified through example. Its result indicates that this method is feasible in practice.

Subject Headings: fuzzy mathematics, grey decision, choice of drilling rig, evaluation.