

喷射钻井中井底岩面最大水功率 和最大冲击力工作方式

张绍槐 姚彩银

(西南石油学院)

摘 要

本文首次把解决现代工程技术问题行之有效的“黑箱(black box)”理论用来研究井底射流流场。用一种新的全尺寸实验(即井底岩面①水力能量测试实验)直接测得三牙轮钻头下射流到达井底岩面的水功率和冲击力。建立了计算井底水功率和冲击力的经验公式,提出了以井底岩面获得最大水功率和最大冲击力为喷射钻井水力程序设计准则的两种新的最优工作方式。

本文在所实验的条件下,获得了井底岩面最大水力能量的功率分配比值(R_N)和全喷距(135毫米)下射流水力能量衰减系数的范围等极值条件。在同样的条件下,以井底岩面最大水力能量优选的最优排量比钻头最大水力能量的最优排量约提高 7.5% 左右。并从理论和实践上证实了适当提高排量和强化机泵的必要性的。

引 言

从1960年肯达尔(Kendall)和戈因斯(Goins)提出钻头最大水功率、最大冲击力和最大喷射速度^[1]以来,国际上一些科研单位和学者做过井底流场流动规律、对称与不对称井底流场的特性^[2~6]和排屑能力^[7]等三方面的实验研究。迄今为止,还没有人直接测量过三牙轮钻头射流到达井底岩面的水力能量(水功率和冲击力),因而,许多喷射钻井水力分析和计算工作不得不把计算点放在钻头喷嘴出口处。但是,反映射流对地层产生作用的应该是射流到达井底岩面的水力能量。现有三牙轮钻头的喷距一般都大于100毫米,这个喷距不小,对井底岩面水力参数影响较大,这就使我们考虑着这样两个问题:

第一,三牙轮钻头下实际射流的水力能量从喷嘴出口到达井底岩面时在数量上有多大的损失?

第二,以钻头最大水力能量进行水力程序设计所优选的水力参数(如 Q_{opt} 、 d_{opt} 、 R_N 等)是不是真正的最优值。如果能以井底岩面最大水力能量来优选水力参数的话,最优水力参数值是多少?两者之间又有多大的差别呢?

为了解决以上两个问题,我们作了下述三方面的研究工作:

① 井底岩面定义为钻进过程中钻头钻出的瞬时井底岩石表面。

1. 在“黑箱”理论的指导下，用 $8\frac{1}{2}$ ”三牙轮钻头和模拟井眼造成一个实际的井底射流流场的条件，做全尺寸钻头的台架实验。用一个专门的测量装置直接测得射流到达井底岩面的水功率和冲击力的实验数据。
2. 在实验数据的基础上，借助于系统辨识的理论方法建立井底岩面水功率和冲击力的数学模型（经验公式）。
3. 依据这些经验公式分别建立并求解了井底岩面最大水功率(max Nrs)和井底岩面最大冲击力(max Frs)非线性规划数学模型，从而提出了max Nrs和max Frs两种新的最优工作方式。

台架实验测井底岩面水力能量

转动着的三牙轮钻头下贴附井壁的淹没非自由多股射流形成的井底射流流场是一个非常复杂的流场（如图1所示）。对这样复杂的流场，流体力学和湍流射流理论都不能从理论上解决它。我们只能而且可以把它当作一个模糊系统来研究。

井底岩面不仅是钻头的工作面，而且是射流的作用面。正是射流到达井底岩面的水力能量才起着克服“压持效应”和进行水力清岩、水力破岩等作用。因而，我们最关心的是射流到达井底岩面的水力能量以及钻头喷嘴和井底岩面之间水力能量的转换关系和衰减规律，而不是射流的中间过程。

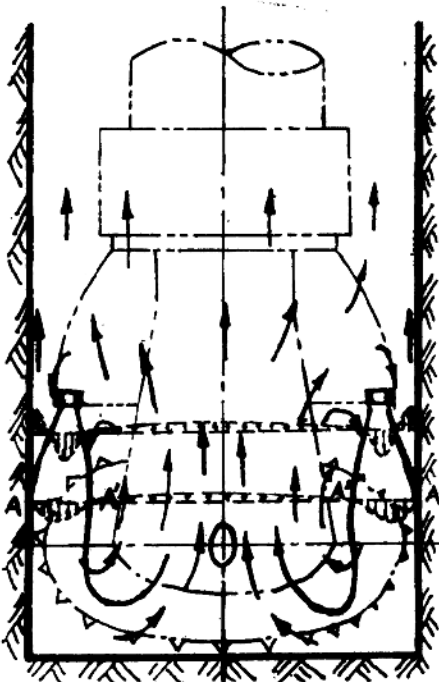


图1 三牙轮钻头下贴附淹没非自由射流流场示意图

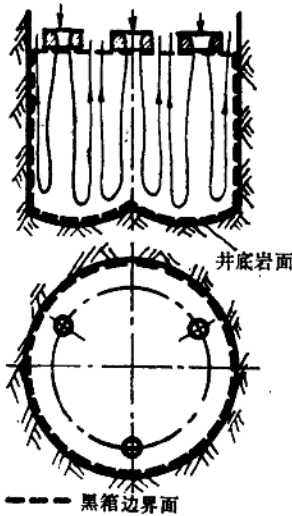


图2 井底“黑箱”示意图

用“黑箱”理论可以进行上述研究工作，用一个“黑箱”把钻头喷嘴出口平面、井底岩面和一个理想圆柱面（尺寸与井径相等）所围成的空间（即非常复杂的井底射流流场这个模糊系统）装起来（如图2所示）。把喷嘴出口和井底岩面的水力能量分别作为“黑箱”的输入和输出信息。我们的任务之一是要根据这些输入/输出信息来建立能模拟这个“黑箱”的数学模型（如图3所示）。数学模型的模拟量与实测量之间的偏差应在实际工程所要求的误差范围之内。

喷嘴出口的水力能量（水功率和冲击力）已有理论计算公式。井底岩面的水力能量要由实验测定。

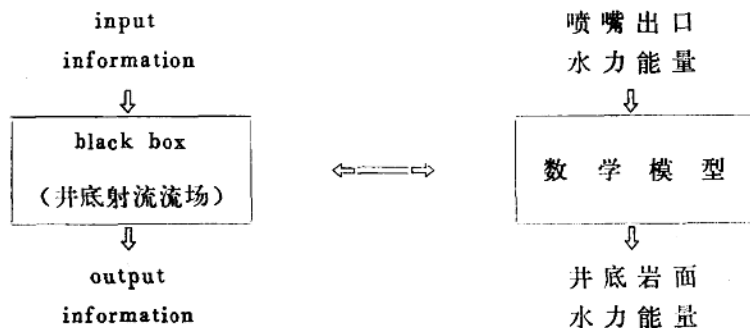


图3 井底射流流场系统方法的数学描述

为了得到符合实际的结果，选用一只 $8\frac{1}{2}$ "（216毫米）三牙轮钻头和模拟井眼做全尺寸实验（如图4所示）。

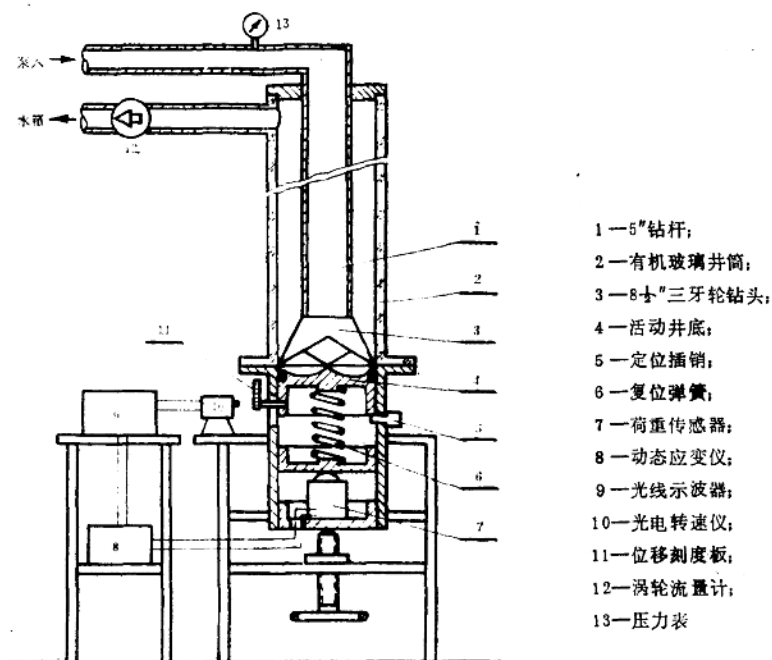


图4 井底岩面水力能量测量原理图

在测量装置中有一个专用活动井底。专用活动井底配光电转速仪和荷重传感器检测出射流到达井底岩面的水功率和冲击力。用动态应变仪接光线记录示波器来记录实验曲线。

实验用水作循环液。通过改变喷嘴当量直径 (d_e) 和排量 (Q) 而得到一系列水功率和冲击力的实验数据。为便于观察井底水力能量的变化规律, 把实验数据整理成数据图 (如图 5、图 6 所示)。

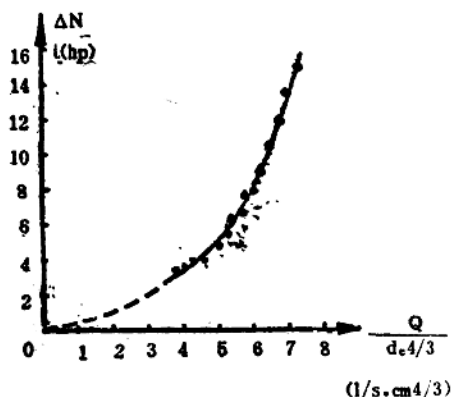


图 5 井底水功率衰减实验数据图

$$\Delta N = N_n - N_{rs}$$

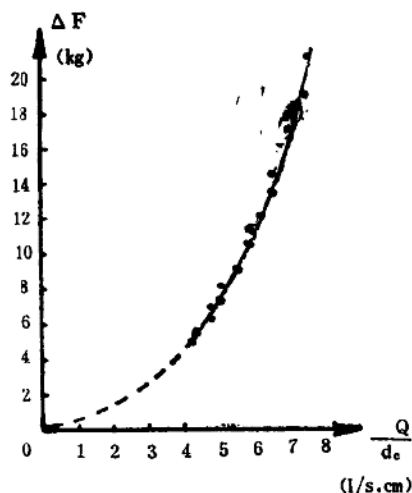


图 6 井底冲击力衰减实验数据图

$$\Delta F = F_n - F_{rs}$$

测量装置是用四等标准法码标定的, 用高斯 (Gauss) 法合成的误差小于或等于 1.51%。

建立井底岩面水功率和冲击力的数学模型

本文采用“黑箱”法, 分两步建立数学模型。

第一步, 用 π 定理和量纲分析建立初始模型

$$y = f(\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2, \dots, \alpha_n x_n) \quad (1)$$

式中 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 和 y 都是变量, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 是系数。

基于实验数据, 用最小二乘法估计出模型中的系数 $\{\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_n\}$ 后, 得到:

$$\hat{y} = f(\hat{\alpha}_1 x_1, \hat{\alpha}_2 x_2, \dots, \hat{\alpha}_n x_n) \quad (2)$$

其误差为

$$E = y - \hat{y} \quad (3)$$

分析井底射流流场的特性可知:

$$\Delta N = f(v_0, \rho, l) \quad (4)$$

式中 v_0 ——喷嘴出口射流速度, m/s;

ρ ——钻井液密度, $g \cdot s^2/cm^4$;

1——喷距, cm,

设 a_1, a_2, a_3, a_4 分别为 $\Delta N, v_0, \rho, l$ 的指数。

得量纲齐次方程

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -4 & 1 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} = 0 \quad (5)$$

其解向量是

$$[a_1, a_2, a_3, a_4]^T = [1, -3, -1, -2]^T$$

井底岩面水功率的 π 因子

$$\pi = \frac{\Delta N}{v_0^3 \rho l^2}$$

$$\Delta N = C_N \rho l'^2 \frac{Q^3}{d_e^4} \quad (6)$$

式中 $l' = l/d_e$ 是无因次喷距;

d_e ——喷距当量直径, cm, $d_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}$,

Q ——排量, l/s,

C_N ——待定系数。

由最小二乘法和实验数据得 $C_N = 3.074 \times 10^{-4}$ 。这时, 标准差 $\sigma = 1.998$, 相对误差为 4.3%。

所以,

$$\Delta N = 3.074 \times 10^{-4} \rho l'^2 \frac{Q^3}{d_e^4} \quad (7)$$

同理可得

$$\Delta F = 2.73 \times 10^{-3} \rho l'^2 \frac{Q^2}{d_e^2} \quad (8)$$

(8) 式的标准差为 3.178, 相对误差为 6.23%。

可见, (7)、(8) 两式精度较低。但它们已经使“黑箱”变得“半透明”了。

第二步, 用系统辨识加“白噪音”“滤波”的方法提高模型精度

由(3)式得

$$y = f(\hat{\alpha}_1 x_1, \hat{\alpha}_2 x_2, \dots, \hat{\alpha}_n x_n) + E \quad (9)$$

参考(7)式, 设

$$\Delta N = \alpha_3 \rho l'^2 \frac{Q^3}{d_e^4} + \sum_{i=0}^2 \alpha_i \rho l'^2 \left(\frac{Q}{d_e^{4/3}} \right)^i$$

$$= \sum_{i=0}^3 \alpha_i \rho l'^2 \left(\frac{Q}{d_e^{4/3}} \right)^i \quad (10)$$

用最小二乘法, 并将实验数据输入计算机处理后得到,
井底岩面水功率数学模型

$$\Delta N = (0.1315 \rho \frac{Q^3}{d_e^4} - 1.114 \rho \frac{Q^2}{d_e^{8/3}} + 3.299 \rho \frac{Q}{d_e^{4/3}}) \times 8.7665 \times 10^{-3} l'^2$$

$$= 1.153 \times 10^{-3} \rho l'^2 \frac{Q^3}{d_e^4} + E_N$$

或者写成

$$N_{rs} = N_n - (1.153 \times 10^{-3} \rho l'^2 \frac{Q^3}{d_e^4} + E_N) \quad (11)$$

同理可得,

井底岩面冲击力数学模型

$$F_{rs} = F_n - (4.19 \times 10^{-3} \rho l'^2 \frac{Q^2}{d_e^2} + E_F) \quad (12)$$

式 (11) 和式 (12) 中

N_{rs}, F_{rs} ——分别是井底岩面水功率, 马力和冲击力, (kg);

$E_N = \rho l'^2 \frac{Q}{d_e^{4/3}} (2.892 \times 10^{-2} - 3.766 \times 10^{-3} \frac{Q}{d_e^{4/3}})$ 是井底岩面水功率修正项, 马力;

$E_F = \rho l'^2 (4.9 \times 10^{-3} - 8.96 \times 10^{-3} \frac{Q}{d_e})$ 是井底岩面冲击力修正项, kg;

$N_n = \frac{Q}{7.5} [P_s - (mL + n)Q^2]$ 是喷嘴出口射流的水功率, 马力;

$F_n = 1.428 CQ \sqrt{\gamma [P_s - (mL + n)Q^2]}$ 是喷嘴出口处射流的冲击力, kg;

P_s ——泵压, kg/cm²;

L ——井深, m;

m ——与 L 有关的循环压耗系数, kg·s²/10⁶cm⁹;

n ——与 L 无关的循环压耗系数, kg·s²/10⁶cm⁸;

c ——喷嘴流量系数(无因次);

γ ——钻井液重度, g/cm³

Q ——排量, l/s;

ρ ——钻井液密度 g·s²/cm⁴;

d_e ——喷嘴当量直径, cm, $d_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}$;

l' ——无因次喷距, $l' = l/d_e$, l 是喷距, cm。

(11) 和(12) 两式的模拟误差分别为0.95%和0.72%。它们的因次正确, 而且物理意义也比较清晰, 射流到达井底岩面的水功率和冲击力都随无因次喷距的增加而减小。

井底岩面最大水功率、最大冲击力工作方式

由循环管路水力能量传递规律、井底岩面水功率和冲击力数学模型(11)和(12)式以及钻井实际约束条件可以导出下列井底岩面最大水功率和井底岩面最大冲击力非线性规划数学模型:

1. 井底岩面最大水功率非线性规划数学模型

$$\left\{ \begin{array}{l} \max N_{rs} = \frac{Q}{7.5} [P_s - (mL + n)Q^2] - \\ - 1.564 \times 10^{-6} \frac{l^2 C^3}{\sqrt{\gamma}} [P_s - (mL + n)Q^2]^3 - \\ - 3.457 \times 10^{-5} l^2 \sqrt{\frac{C^5}{Q^2}} \sqrt{\gamma [P_s - (mL + n)Q^2]^5} + \\ + 1.244 \times 10^{-5} l^2 \sqrt{\frac{C^7}{Q}} \sqrt{\frac{1}{\gamma}} [P_s - (mL + n)Q^2]^7 \\ Q_s \leq Q \leq Q_r, \quad P_s \leq P_r \\ P_s, Q_s, Q > 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

2. 井底岩面最大冲击力非线性规划数学模型

$$\left\{ \begin{array}{l} \max F_{rs} = 1.428 C Q \sqrt{\gamma [P_s - (mL + n)Q^2]} - \\ - 5.17 \times 10^{-6} l^2 C^2 [P_s - (mL + n)Q^2] + \\ + 5.498 \times 10^{-6} \frac{l^2 C}{Q} \sqrt{\gamma [P_s - (mL + n)Q^2]} - \\ - 1.054 \times 10^{-5} l^2 \sqrt{\frac{C^3}{Q}} \sqrt{\gamma [P_s - (mL + n)Q^2]^3} \\ Q_s \leq Q \leq Q_r, \quad P_s \leq P_r \\ P_s, Q_s, Q > 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

式(13)和式(14)中

Q_r 、 P_r ——分别是泵的额定排量(l/s)和额定压力kg/cm²;

Q_s ——环空携岩最小排量, l/s;

其它符号与公式(11)和(12)中的相同。

井底岩面最大水功率和最大冲击力非线性规划解的存在条件分别是井深(L)大于或等于各自的临界井深。临界井深是隐式,为便于工程上使用,用数值计算后绘成图7和图8。

用黄金分割法编写的“NF”计算机程序成功地求解了max N_{rs} 和max F_{rs} 非线性规划问题。用中国胜利油田和华北油田的钻井资料,在电子计算机上处理后得到下列结果:

1. 当井深大于或等于临界井深时,可获得井底岩面最大水功率和最大冲击力。max N_{rs} 时,喷嘴功率分配比(R_N)为0.63,全喷距(135毫米)内水功率衰减值为0.86;max F_{rs} 时,喷嘴功率分配比(R_N)为0.45,全喷距内冲击力衰减值为0.89。

2. 井底岩面最大水力能量工作方式的最优排量比钻头最大水力能量工作方式的最优排量略提高7.5%左右(其它条件都相同)。其理论解释是,因为新的工作方式(前者)所指的全循

环“管路”比原有工作方式（后者）所指的全循环“管路”多了全喷距这一段（更符合实际）。这就从理论上提出，真正的最优排量要比肯达尔和戈因斯理论为基础目前还在使用的原有水力程序设计出的“最优排量”适当高一点，因而进一步强化机泵是必要的。

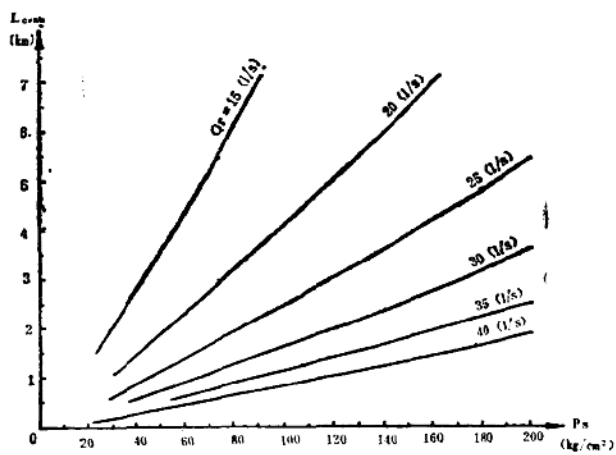


图 7 井底岩面最大水功率临界井深图

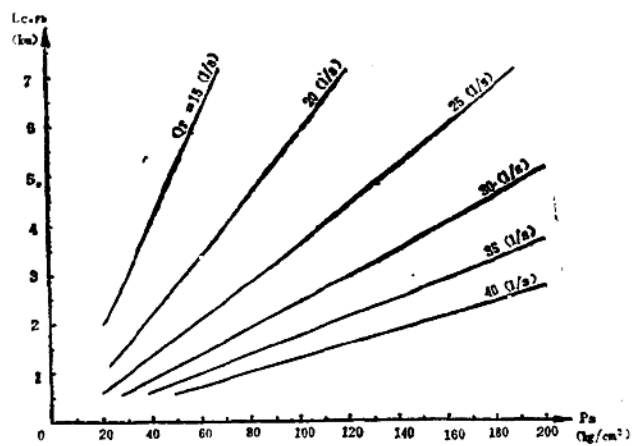


图 8 井底岩面最大冲击力临界井深图

对胜利油田一百多口井和华北油田32口井的实际钻井资料作多因素方差分析得知，当钻井实际用的排量比钻头最大水力能量工作方式优选的最优排量提高7~10%时，机械钻速提高较显著。可见，本文提出的新理论已在实践中得到初步证实。

结 论

1. “黑箱”理论是研究井底射流场行之有效的方法之一。
2. 用全尺寸钻头台架实验直接测量射流到达井底岩面的水力能量是一种新的实验方

法。本文以实验数据建立的井底岩面水力能量经验公式为基础,同时考虑钻井实际约束条件建立了 $\max Nrs$ 和 $\max Frs$ 非线性规划数学模型,从而提出了两种新的最优工作方式:井底岩面最大水功率和井底岩面最大冲击力工作方式。

3. 获得 $\max Nrs$ 的条件是,当井深(L)大于或等于其临界井深($L_c \cdot n_b$)时,喷嘴功率分配比值 $R_N = 0.63$,这时全喷距(135毫米)下水射流的功率衰减比值(N_{rs}/N_n)为0.86;获得 $\max Frs$ 的条件是,当井深(L)大于或等于其临界井深($L_c \cdot F_b$)时,喷嘴功率分配比值 $R_N = 0.45$,这时全喷距(135毫米)下水射流的冲击力衰减比值(F_{rs}/r_n)为0.89。在实际钻井中,控制 $R_N = 0.46 \sim 0.63$ 是合理的。

4. 井底岩面最优工作方式与钻头喷嘴最优工作方式相比,在井深、泵压、泥浆性能、钻柱和井身结构等完全相同的条件下, $\max Nrs$ 的最优排量比钻头喷嘴最大水功率的最优排量略提高7.38%; $\max Frs$ 的最优排量比钻头喷嘴出口最大冲击力的最优排量略提高7.54%。

结 束 语

本文的全尺寸实验是用水和 $8\frac{1}{2}$ "(21.6厘米)钢齿三牙轮钻头做的。继续用泥浆和其它尺寸、类型的钻头做对比实验,可以检验和修正经验公式(11)和(12)中的系数。使它们具有更广泛的适用性。

参 考 文 献

[1] Kendall, H.A. & Goins, W.C., "Design and Operation of Jet-bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity", Pet. Trans., AIME (1960), Vol. 219, PP238~247.

[2] 张绍槐, "喷射钻井井底流场的试验架研究及单喷嘴钻头的井下试验", 石油钻采工艺, 1983年第5期, 第1~13页。

[3] Henri Cholet, "Improved Hydraulics for Rock Bits", SPE7516, (1978).

[4] "New Drilling Tools: Improved Hydraulics for Rock Bits", 法国石油科学研究院 (IFP), Ref. 27965, (1977).

[5] Tibbitts, G.A., Sandstrom, J.S., Black, A.D. and Green, S.J., "The Effects of Bit Hydraulics on Full-Scale Laboratory Drilled Shale", SPE 8439, 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, September 23-26, 1979.

[6] 廖荣庆(执笔), "喷射钻头井底流场特性的研究与应用", 石油学报, 第5卷, 1984年第3期, 第85~93页。

[7] 徐华义, "单喷嘴能提高机械钻速", 西南石油学院学报, 1982年第3期, 第66~76页。