

量纲理论在粒子冲击钻井系统粒子分离效率研究中的应用

王亦道¹ 张 杨^{1*} 温林荣² 颜廷俊¹

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 中石化集团公司 胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘 要: 通过量纲分析对粒子冲击钻井分离系统实验台所得到的实验数据进行处理分析, 结果发现钢质粒子损失率随着泥浆流量、黏度以及钢质粒子所占比例的增大而增大。量纲模型中表征几何特征、工作状态、泥浆流体特征以及流量等参数是主要影响因素。根据分析本文还提出了适用于多种泥浆工况下钢质粒子损失率的经验公式。

关键词: 量纲分析; 粒子冲击钻井; 筛分效率; 钻井液

中图分类号: TE249

引 言

随着石油资源被大量开采, 坚硬地层下的石油开采成为钻井技术的难点之一, 粒子冲击钻井技术正是为了解决上述问题而设计的一种新型钻井技术。Curlett 等^[1]受射弹冲击破岩思想的启发, 采用钻井泥浆的水力能量作为驱动力, 用高速球型钢粒子来破碎坚硬的岩石, 提出了粒子冲击钻井技术的概念。目前国际上进行该项技术开发的公司只有美国粒子冲击钻井技术公司, 其在 2006 年 11 月 30 日的第二次商业性实验中, 钻速达到常规钻井速度的 3.5 倍以上, 证明粒子冲击钻井在高效钻进硬地层方面具有巨大的潜力。

经济的迅速发展使得我国对石油的需求逐年增多, 而随着我国浅层油气资源的不断枯竭势必要求发展深层坚硬地质条下的钻井技术^[2], 因此粒子冲击钻井技术在我国钻井中的可行性研究势在必行。在粒子冲击钻井系统中, 钢质粒子高速弹射入岩层后, 钢质粒子随着被冲击破碎的岩石碎屑一起混合到钻井液之中, 并伴随着泥浆的循环流动由地下返回到地面。考虑到经济性、连续性等诸多因素, 钢质粒子应该尽可能的重复使用。然而, 在粒子冲击钻井的粒子回收分离过程中必然会伴随一定量钢质粒子损失。随着钢质粒子损失的累积, 会使得有效冲

击岩层的钢质粒子减少, 从而影响钻井的钻进速度。如何及时补充损失的钢质粒子、简单有效的将钢质粒子从钻井液中分离回收、保证钻井系统的连续工作, 成为粒子冲击钻井技术所面临的重要问题。目前, 由于粒子冲击钻井系统整体属于研发起步阶段, 国内外对于钢质粒子损失这一领域的研究基本上是空白^[3]。这也是本文所进行的实验研究的意义所在。

1 量纲分析模型的建立

量纲分析是在数学领域建立模型的一种方法, 量纲分析可以正确分析各变量之间的关系, 简化实验设计和数据整理。根据量纲齐次性原则和 π 定理, 量纲分析可以在较为复杂的物理模型中找到和某个物理量最为相关的一些主要物理量, 发现物理量之间存在的内在关系^[4]。已有研究证明, 通过量纲分析不仅可以检查反映物理现象规律的方程在量纲方面的正确性, 而且可以提供寻找物理规律的线索^[5-6]。

应用量纲分析首先要确定对因变量产生影响的所有参数。经分析可得影响钢质粒子损失的相关物理量主要有: a 为钢质粒子单位时间的损失质量, D 为振动筛网格边长 (3 mm), D' 为振动筛直径 (1000 mm), d_1 为钢质粒子的直径 (2.5 mm), d_2 为岩屑的平均直径 (约 3.5 mm^[7]), b 为振动筛的振幅 (5.5 mm), ρ_1 为钢质粒子的密度 (7800 kg/m³), ρ_2 为岩屑的密度 (2500 kg/m³), ρ_3 为泥浆的密度 (1050 ~ 1060 kg/m³), Q 为泥浆的流量, γ 为泥浆的黏度, σ 为泥浆的静切力, A_1 为钢质粒子的质量流速, A_2 为岩屑的质量流速, f 为振动筛的振动频率 (1460 Hz)。质量

收稿日期: 2010-12-23

第一作者: 男, 1986 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: qzyang6199@163.com

的量纲为 M , 时间量纲为 T , 长度量纲为 L 。应用 π 定理可得

$$a = f(D, D', d_1, d_2, b; \rho_1, \rho_2, \rho_3; Q, \gamma, \sigma; A_1, A_2; f) \quad (1)$$

式(1)各参数的量纲分别为

$$MT^{-1}, L, L, L, L, L, ML^{-3}, ML^{-3}, ML^{-3}, L^3T^{-1}, ML^{-1}T^{-1}, ML^{-1}T^{-2}, MT^{-1}, MT^{-1}, T^{-1}$$

取 d_1, A_1, f 为基本量对方程(1)进行无量纲化

其量纲分别为:

$$d_1 - L; A_1 - MT^{-1}; f - T^{-1}$$

无量纲化后的方程为

$$\frac{a}{A_1} = f\left(\frac{D}{d_1}, \frac{D'}{d_1}, 1, \frac{d_2}{d_1}, \frac{b}{d_1}; \frac{\rho_1}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}, \frac{\rho_2}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}, \frac{\rho_3}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}; \frac{Q}{d_1^3 f}, \frac{\gamma}{A_1 d_1^{-1}}, \frac{\sigma}{A_1 d_1^{-1} f}; 1, \frac{A_2}{A_1}, 1\right) \quad (2)$$

其中 $\frac{a}{A_1}$ 即为钢质粒子的损失率。采用幂函数方式拟合方程, 方程的一般形式可写作

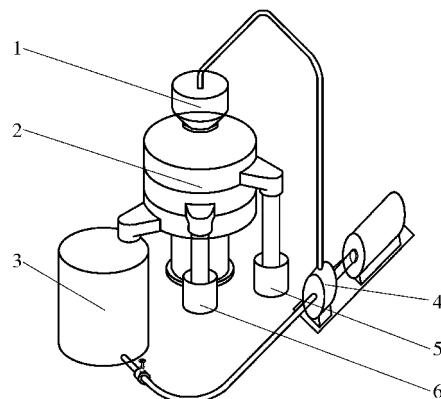
$$\frac{a}{A_1} = k \left(\frac{D}{d_1}\right)^{x_1} \left(\frac{D'}{d_1}\right)^{x_2} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{x_3} \left(\frac{b}{d_1}\right)^{x_4} \left(\frac{\rho_1}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}\right)^{x_5} \left(\frac{\rho_2}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}\right)^{x_6} \left(\frac{\rho_3}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}}\right)^{x_7} \left(\frac{Q}{d_1^3 f}\right)^{x_8} \left(\frac{\gamma}{A_1 d_1^{-1}}\right)^{x_9} \left(\frac{\sigma}{A_1 d_1^{-1} f}\right)^{x_{10}} \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{x_{11}} \quad (3)$$

2 粒子分离系统实验数据的获得

进一步确定量纲方程中各项系数需要实验数据的支持, 本文所需数据均由实验方法获得。首先对方程(3)中相关变量进行分析, 影响钢质粒子分离效率的因素包括设备因素以及实验原料因素。实验台中设备相关的情况基本是固定的, 即: $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = 0$, 因此本文主要研究泥浆流量、黏度以及钢质粒子与岩屑比例等实验原料因素对筛分效率的影响。

实验台工作原理如图1所示。泥浆在泥浆槽内配制并由渣浆泵输运至加料斗^[8], 钢质粒子、岩屑等与泥浆在加料斗中混合均匀^[9], 然后进入振动筛进行分离。上层筛网网眼直径约 3 mm, 因此较大岩屑与粘连的少数钢质粒子被筛出^[10], 收集在大粒子槽中。大粒子槽中的钢质粒子即是分离过程中损失的部分; 下层筛网直径约 2 mm, 绝大部分钢质粒子和尺度相近的岩屑都收集在小粒子槽中。剩余泥浆由振动筛最下层的出口流回到泥浆槽中, 泥浆槽与

泥浆泵之间用管路联通, 使得泥浆可以循环利用。之后小粒子槽中的颗粒经过磁选机便可将钢质粒子选出。实验条件的选择及钢质粒子损失率结果如表1所示。



1—加料斗; 2—振动筛; 3—泥浆槽; 4—渣浆泵; 5—大粒子槽; 6—小粒子槽

图1 粒子冲击钻井分离系统实验台工作原理图

Fig. 1 Schematic illustration of the particle impact drilling separation system

表1 多种粒子质量配比(岩屑与钢质粒子的质量之比)实验情况下的钢质粒子的损失率

Table 1 Extent of loss of steel particles for different particle mass ratios

黏度/ mPa·s	流量/ L·s ⁻¹	钢质粒子损失率/%					
		1:3	3:7	2:3	1:1	3:2	7:3
1	1	2.067	2.000	2.083	2.100	1.875	1.833
	0.5	1.533	1.500	1.583	1.600	1.375	1.167
26	1	2.400	2.357	2.250	2.200	2.125	1.833
	0.5	1.867	1.786	1.750	1.700	1.625	1.500
35	1	2.733	2.571	2.417	2.400	2.225	2.167
	0.5	2.067	2.000	1.917	1.900	1.750	1.667
43	1	3.667	3.429	3.417	3.300	3.125	3.000
	0.5	2.733	2.642	2.583	2.500	2.375	2.167
51	1	3.133	3.143	2.917	2.800	2.623	2.500
	0.5	2.733	2.642	2.583	2.500	2.375	2.167

3 量纲方程的拟合

根据在实验中得出的多种情况下钢质粒子损失率等数据, 利用 SAS 软件可按量纲方程的形式进行拟合。钢质粒子损失率与各个物理量之间的函数关系式为

$$\frac{a}{A_1} = 1.995 \times 10^{-18} \left(\frac{\rho_1}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}} \right)^{14.79385} \left(\frac{\rho_3}{A_1 f^{-1} d_1^{-3}} \right)^{4.86040} \left(\frac{Q}{d_1^2 f} \right)^{20.28636} \left(\frac{\gamma}{A_1 d_1^{-1}} \right)^{0.01369} \left(\frac{\sigma}{A_1 d_1^{-1} f} \right)^{0.28240} \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{-0.10589} \quad (4)$$

其中,方程左边为钢质粒子的损失率,右端一共有11个无量纲参量。拟合后的方程曲线及实验点如图2~3所示,其中粒子比例定义为岩屑与钢质粒子的质量流速之比,实际生产中它是由钻探地层岩石的硬度等物理性质决定的。

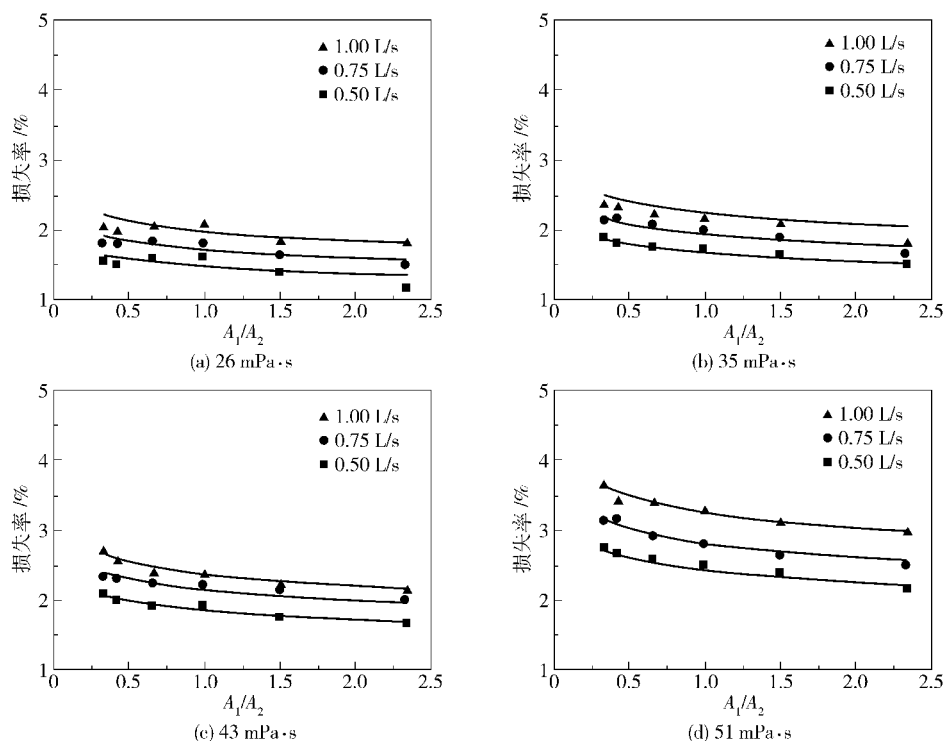


图2 4种泥浆黏度下粒子比例—钢质粒子损失率曲线

Fig. 2 Plots of extent of loss of steel particles vs. particle ratio for four different drilling fluid viscosities

从图2总体上看,钢质粒子的损失率随着泥浆流量的增加而增加,并随岩屑在粒子总量中所占比例的增加而减小。其原因在于,泥浆流量的增加导致单位时间内振动筛处理量的增加,因此提高了筛分不完全的钢质粒子从上层被筛出的机率。岩屑所占比例的增加会导致钢质粒子在泥浆中含量的相对下降而造成损失率的下降。

图2中还可以看出,在泥浆黏度值为26,35,43 mPa·s(图2(a),2(b),2(c))时钢质粒子损失率的曲线较为平缓,而泥浆黏度为51 mPa·s(图2(d))图中钢质粒子损失率曲线相对陡峭。其次,图2(a),图2(b)和图2(c)中曲线的分布相对密集,而在图2(d)中3条曲线的分布相对分散。以上两点均说明了较高泥浆黏度下钢质粒子损失率对流量的变化更加敏感。为了更清楚的表现黏度对钢质粒子损失率的影响,按流量分类的图线如图3所示。

图3中可以看出,在泥浆流量和粒子比例均相同的情况下,泥浆黏度越大钢质粒子的损失率也随之越高。这是因为泥浆黏度的增加会造成泥浆中的钢质粒子与岩屑更容易结块,从而导致小直径的钢质粒子变成大块的粒子团而不易通过筛孔。此外,51 mPa·s的曲线明显离其他3条曲线较远,这说明当黏度达到一定程度后粘连作用的增强会使损失率大幅增加。

通过量纲分析还可以得出,影响筛分效率的因素有很多,这些因素包括:几何特征,振动筛等设备工作参数,泥浆的流量和流动性质,钢质粒子和岩屑的质量流量以及表征惯性的密度等。由于保证无量纲控制参量相同的情况下,作为因变量的钢质粒子损失率也是相同的^[3]。因此对于类似问题的分析,本文所得到的量纲方程仍具有一定的参考意义。

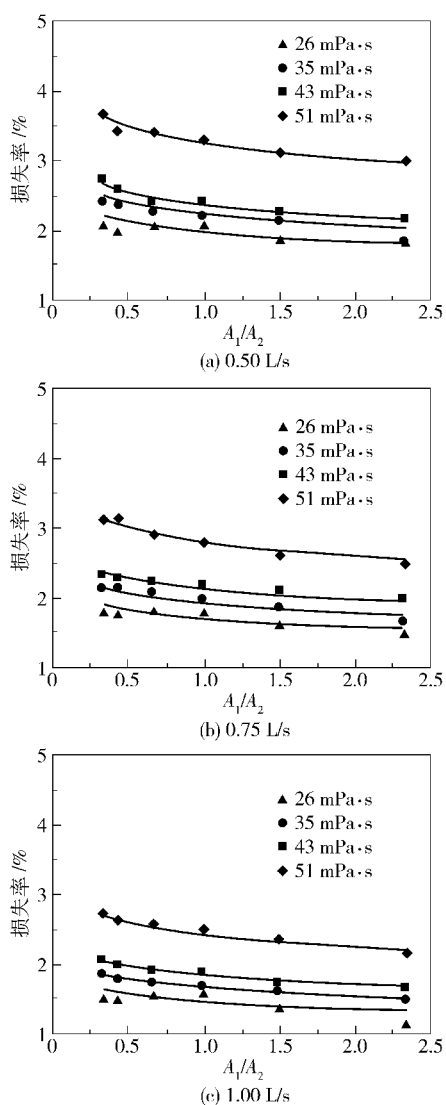


图3 3种泥浆流量下粒子比例—钢质粒子损失率曲线

Fig.3 Plots of extent of loss of steel particles vs. particle ratio for three different drilling fluid fluxes

4 结论

(1)分析发现钢质粒子的损失率随泥浆流量、泥浆黏度以及钢质粒子在粒子总量中所占比例的增大而增大。

(2)回收筛分过程中钢制粒子在粒子总量中所占比例对粒子损失率的影响较小,因此可以判定钻进速度对钢制粒子损失率影响不大。

(3)在实验数据的基础上,量纲分析还进一步得到了钢质粒子损失率与各个因素之间的无量纲函数关系。在一定设备的条件下泥浆流量(包括钢质粒子的添加速度)和黏度等是影响筛分效率的主要因素。实际生产中可以根据粒子比例、钻井液的流

体性质和流量等情况,采用此方法确定钢质粒子的补充量和补充速度。

参考文献:

- [1] Curlett H B, Sharp D P, Gregory A. Formation cutting method and system: US, 6581700B2[P]. 2003-06-24.
- [2] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 793-802.
Zhu G Y, Zhang S C. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 793-802. (in Chinese)
- [3] 陈嘉璈, 张杨, 温荣林. 粒子冲击钻井系统研究初探[J]. 石油机械, 2010, 38(5): 8-10.
Chen X Q, Zhang Y, Wen R L. A preliminary exploration of the particle impact drilling system[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(5): 8-10. (in Chinese)
- [4] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
Tan Q M. Dimensional Analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 易先中, 王利成, 魏慧明, 等. 钻井岩屑粒径分布规律的研究[J]. 石油机械, 2007, 35(12): 1-4.
Yi X Z, Wang L C, Wei H M, et al. Research of drilling cuttings size distribution regularity[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(12): 1-4. (in Chinese)
- [6] 姜玲, 王小兵. 用量纲分析法求解柱塞下行阻力[J]. 复杂油气藏, 2008, 1(1): 66-68.
Jiang L, Wang X B. Utilize dimensional analysis to solve downgoing resistance of plunge [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2008, 1(1): 66-68. (in Chinese)
- [7] 付泽民, 莫健华, 陈伟, 等. 基于量纲分析法的金属板材折弯回弹数学模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 53-58.
Fu Z M, Mo J H, Chen W, et al. Springback Model for Air-bending of Sheet Metal Based on Dimensional Analysis Method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 53-58. (in Chinese)
- [8] 施里宇, 李天太, 张喜凤, 等. 温度和膨润土含量对水基钻井液流变性的影响[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 20-22.
Shi L Y, Li T T, Zhang X F, et al. Effects of temperature and clay content on water-based drilling fluids' rheological Property [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 20-22. (in Chinese)
- [9] 奇林格雷 G V, 沃布切 P. 钻井和钻井液[M]. 徐云

英, 张绍槐, 孙维林, 等, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987.

Chilingarian G V, Vorabutr P. Drilling and drilling fluids [M]. Xu Y Y, Zhang S H, Sun W L, et al, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987. (in Chinese)

[10] 布兰特 L K, 洛夫 B. 泥浆振动筛[M]. 李祖圣, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987.

Brandt L K, Love B. Shale shake [M]. Li Z S, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987. (in Chinese)

Application of dimensional analysis in determining the screening efficiency of a particle impact drilling separation system

WANG YiXiao¹ ZHANG Yang¹ WEN LinRong² YAN TingJun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration Sinopec Corporation, Dongying Shandong 257017, China)

Abstract: Experimental data from a separation system involving particle impact drilling has been analysed using dimensional theory. It was found that the extent of loss of steel particles increased with increasing flux and viscosity of the drilling fluid and steel particle ratio. In the dimensional model, the geometric features, working state of the apparatus and parameters of the drilling fluid were found to be the decisive factors. Furthermore, an empirical formula has been proposed to describe this relationship.

Key words: dimensional analysis; particle impact drilling; screening efficiency; drilling fluid