

液固旋流器分离效率的研究

王立洋¹⁾ 郑之初 郭军 张军 唐驰

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要 对分离效率与液相流速、油水比例和旋流器级数之间的关系进行了系统的实验研究. 通过受力分析从理论上对细颗粒易受参数影响的原因进行了阐述, 并根据量纲分析和实验数据得到了分离效率与 Re 数和 St 数之间的函数关系. 在此基础上, 对液固旋流器的现场应用提出了有价值的建议.

关键词 旋流分离器, 液固分离, 分离效率, 量纲分析

INVESTIGATION ON SEPARATION EFFICIENCY OF LIQUID/SOLID HYDROCYCLONE

WANG Liyang¹⁾ ZHENG Zhichu GUO Jun ZHANG Jun TANG Chi

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Liquid/solid hydrocyclones are widely used in industry and their separation efficiency is an important parameter in evaluating the performance. In this study, the relationships between separation efficiency and liquid velocity, oil/water ratio, as well as stage number are investigated. The reason why particles of smaller-diameter more sensitive to the changes of parameters is explained through a force balance analysis. Moreover, the relationship between separation efficiency and Reynolds number, Stokes number is obtained based on dimensional analysis. Finally, some suggestions are made for the application of liquid/solid hydrocyclones.

Key words hydrocyclone, liquid/solid separation, separating efficiency, dimensional analysis

在油田的实际生产中, 油井产出液内经常含有以颗粒形式存在的固体杂质, 不仅增加了集输系统的能量损耗, 而且有可能堵塞管网, 严重影响了油田的正常运行. 因此, 必须安装除砂装置, 在产出液进入集输系统之前将固体颗粒尽可能多地分离出去.

目前, 油田上使用的除砂装置大致可以分为 3 类, 即过滤式除砂装置、重力式除砂装置和旋流式除砂装置. 其中, 旋流除砂不仅适合对悬浮颗粒进行细分离, 而且具有结构简单、无运动部件、处理时间短、分离效率高优点, 因而在油田上得到了广泛的应用.

虽然旋流分离器已经在工业上得到了广泛的应用. 但是在目前有关旋流器的文献中, 涉及气固分离方面的居多, 液固分离的较少. 倪玲英^[1]利用水和砂作为实验介质, 对 CSQ-56 型旋流除砂器进行了实验研究, 以期得到旋流除砂器的最佳工作条件和

几何参数. 蒋明虎等^[2]为了实现细颗粒砂的分离, 对旋流除砂器的主要结构参数进行了设计, 并且分析了流量和分流比对压力损失的影响. 此外, Wang 等^[3], Nowakowski 等^[4]采用 CFD 技术, 对液-固旋流器进行了数值模拟研究. 可以看出, 目前液固旋流器的研究中缺乏针对油田实际生产的系统性实验和理论研究工作, 而这方面的工作具有非常重要的意义.

“十五”期间, 中国科学院与中国海洋石油总公司对海洋油气开发过程中的若干关键性科技问题进行了合作研究. 由于平台的建设费用巨大, 更加迫切需要高效、紧凑的除砂分离器. 因此, 作为重大合作课题中的子课题之一, 中国科学院力学研究所和中国海洋石油生产研究中心联合开展了油中除砂的研究工作, 初期目标是 80 目以下颗粒的分离效率达到 95% 以上.

2006-04-26 收到第 1 稿, 2006-11-28 收到修改稿.

1) E-mail: wangliyang@imech.ac.cn

1 实验研究

1.1 实验系统

实验在如图 2 所示的液固分离实验平台上进行。实验时，将预先配好的石英砂加入料斗中，通过引射的方式将一定比例的油和水充分混合后再携带石英砂进入旋流器，分离出去的砂通过底流口进入集砂筒。从二级旋流器溢流口流出的混合物中，细颗粒砂将被捕集器捕获，油水混合物流入混合罐，待分离完全后循环至水罐和油罐。

实验介质为 LP-14 白油、水和石英砂，实验参数范围如下：液相混合流速 0~3.0 m/s，液相含水率 0.45~1.0，入口平均颗粒浓度 8~18 kg/m³。

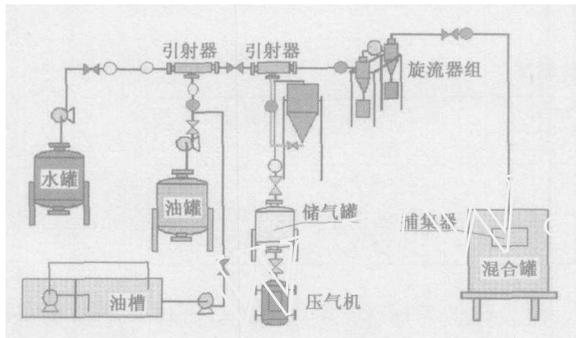


图 2 液固分离实验装置

1.2 实验结果

旋流器的粒级分离效率和分离总效率是人们最为关心的参数^[5~7]。实验中，通过改变入口流速、油水比例以及旋流器级数对旋流器的分离效率进行了研究。

1.2.1 入口流速

图 3 给出了液相流速为 1.2 m/s、1.5 m/s 和 1.7 m/s 时一级旋流器的粒级分离效率，此时液相混合物的含水率为 0.45，颗粒直径分布相同。

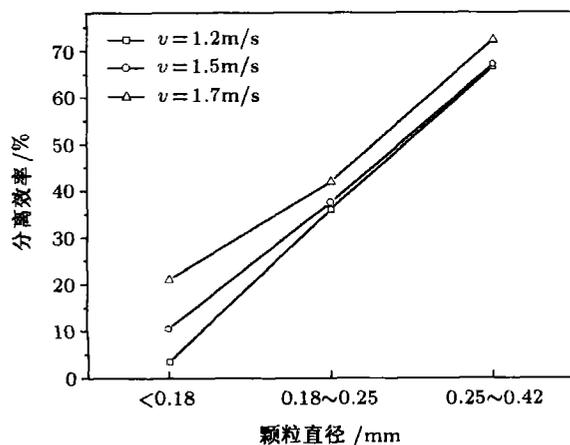


图 3 不同液相流速下的粒级分离效率

可以看出，随着液相流速的增加，不同粒级颗粒的分离效率均有所提高。与粒径较大的颗粒相比，细颗粒砂 (< 0.18 mm) 分离效果的变化更为显著，当流速为 1.2 m/s、1.5 m/s 和 1.7 m/s 时，分离效率分别为 3.42%、10.39% 和 20.88%。因此，增加来液流速可以有效提高细颗粒砂的分离效率。

1.2.2 油水比例

油水比例反映了液相黏度和液相密度对旋流器分离效率的影响。实验中，入口流速保持 1.35 m/s，颗粒直径分布相同，液相混合物的含水率分别为 0.44、0.52、0.89 和 1.0。实验结果如图 4 所示。

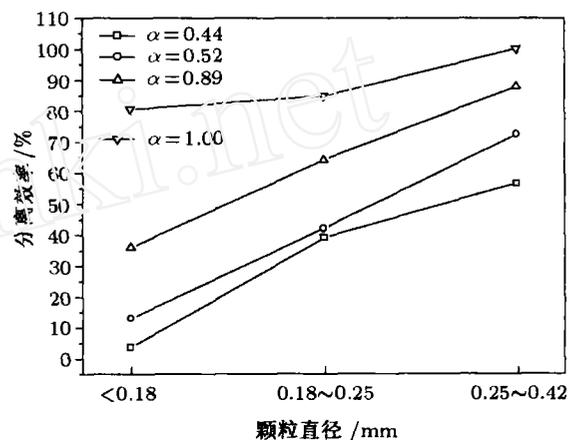


图 4 不同油水比例下的粒级分离效率

显然，随着含水率的上升，旋流器的分离效率是逐渐提高的。从图 4 可以看出，细颗粒砂 (< 0.18 mm) 的分离效果最易受到液相组成的影响，分离效率随着含水率的上升会迅速提高。比较 α 为 0.89 和 1.0 时的结果可知，当来液中含有油时细颗粒砂 (< 0.18 mm) 的分离效率会急剧下降，粒径稍大的颗粒变化幅度虽然相对较缓，但是趋势也很明显。

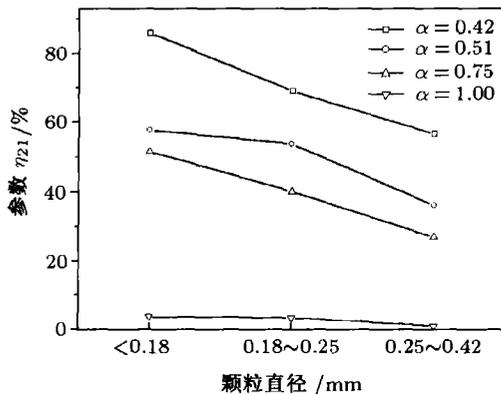
1.2.3 旋流器级数

实际应用中，经常通过增加旋流器级数的方式来提高分离效果。因此实验中也研究了设置二级旋流器对分离效率的影响。为了进行定量比较，引入了参数 η_{21} ，如式 (1) 所示

$$\eta_{21} = 1 / (1 + m_1 / m_2) \quad (1)$$

式中， m_1 和 m_2 分别为一级和二级旋流分离器中被分离颗粒的质量。

图 5 为液相流速 1.5 m/s 时不同含水率下的 η_{21} 值。可以看出，当液相为水时，二级旋流器中分离出

图5 不同含水率情况下的 η_{21}

来的砂很少, 因此设置二级旋流器几乎没有意义。

表1 典型的实验结果

| 液相流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 液相含水率 /% | 实验前粒径质量分布 /g | | | 分离砂质量 /g | 分离总效率 /% |
|---|-------------|--------------|---------|---------|-------------|-------------|
| | | 20~40 目 | 40~60 目 | 60~80 目 | | |
| 1.7 | 41.7 | 1755.5 | 241.5 | 100 | 2058.1 | 98.0 |
| 1.4 | 45.5 | 1370 | 1365 | 774 | 3360.5 | 97.2 |
| 1.3 | 89.0 | 991 | 957 | 297 | 2184.0 | 97.3 |

2 结果分析

2.1 细颗粒砂易受参数影响的原因

在旋流器内, 若忽略粒子之间的相互作用, 则单个颗粒在径向上受到的力主要有离心力 f_c , 向心浮力 f_b 和曳力 f_d , 分别定义为

$$f_c = \frac{1}{2} \rho_p C \frac{\pi d_p^2}{4} v_{pl}^2 \quad (2)$$

$$f_b = \frac{1}{2} \rho_l C \frac{\pi d_p^2}{4} v_{pl}^2 \quad (3)$$

$$f_d = \frac{1}{2} \rho_l C_D \frac{\pi d_p^2}{4} v_{pl}^2 \quad (4)$$

$$C = \frac{4}{3} \frac{d_p}{r} \bar{v}^2, \quad \bar{v} = \frac{v_t}{v_{pl}} \quad (5)$$

式中, d_p 为颗粒直径, m ; r 为运动回转半径, m ; ρ_p 为颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_l 为液相密度, kg/m^3 ; μ_l 为液相黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; v_t 为颗粒切向运动速度, m/s ; v_{pl} 为径向上颗粒与液体间的相对运动速度, m/s ; C_D 为阻力系数, 不同 Re 范围内的阻力系数为^[8]

$$C_D = \frac{24}{Re_{pl}} (1 + 0.15 Re_{pl}^{0.687}), \quad Re_{pl} \leq 1000$$

$$C_D = 0.44, \quad 1000 < Re_{pl} \leq 3 \times 10^5$$

$$C_D = 0.1, \quad Re_{pl} > 3 \times 10^5$$

式中, $Re_{pl} = \frac{d_p v_{pl} \rho_l}{\mu_l}$.

而当 α 为 0.75, 0.54 和 0.42 时, η_{21} 分别为 39.35%, 49.04% 和 70.46%, 对细颗粒砂更是达到了 56.53%, 57.74% 和 85.86%, 表明二级旋流器在整个分离过程中起到了非常关键的作用. 据此可以认为, 在液相黏度较高的情况下, 设置二级旋流器是提高颗粒 (尤其是细颗粒) 分离效率的有效措施.

1.2.4 分离总效率

如前所述, 在旋流器的现场应用中分离总效率是评价分离器性能的重要参数. 表 1 给出了几组典型的实验结果. 由表 1 中的分离总效率数据可以看出, 实验结果超出了预期的目标, 表明旋流除砂器作为一种高效、紧凑的分离器, 非常适合于平台上的油中除砂作业.

假设颗粒为球体, 并且颗粒与流体之间的相对运动处于层流状态, 文献 [9] 推荐采用式 (6) 来计算阻力系数

$$C_D = \frac{24}{Re_{pl}} \quad (6)$$

当颗粒达到沉降速度时, 在径向上离心力、向心浮力和曳力达到平衡, 得到

$$v_{pl0} = \frac{d_p^2 v_t^2 (\rho_p - \rho_l)}{18 \mu_l r} \quad (7)$$

对于某一颗粒, 沉降速度越大, 颗粒被分离的概率也就越高. 由式 (7) 可知, 沉降速度与颗粒直径的平方成正比, 因此与大颗粒相比, 细颗粒的分离过程更加取决于来流的流速和液相组成. 流速越高或者黏度越低, 颗粒被分离的概率也就越大.

2.2 分离效率的预测

影响旋流器分离效率 η 的因素有很多^[10], 主要包括运行参数、物性参数以及旋流器的几何尺寸. 因此, η 可以表示为

$$\eta = f(d, \rho_s, \rho_l, \mu_l, v, c, G, D_o, D_u, L_1, L_2, \dots)$$

对几何结构尺寸一定的旋流器, 通过量纲分析可以得到

$$\eta = f(St, Re) \quad (8)$$

式中

$$St = \left(\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right) \frac{Re}{18\bar{D}^2}, \quad Re = \frac{\rho_l D v}{\mu_l}, \quad \bar{D} = \frac{D}{d}$$

根据实验结果, 图 6 给出了不同 Re 数下粒级分离效率与 St 数之间的关系, 其中 Re 数介于 $10^4 \sim 2.5 \times 10^4$ 之间.

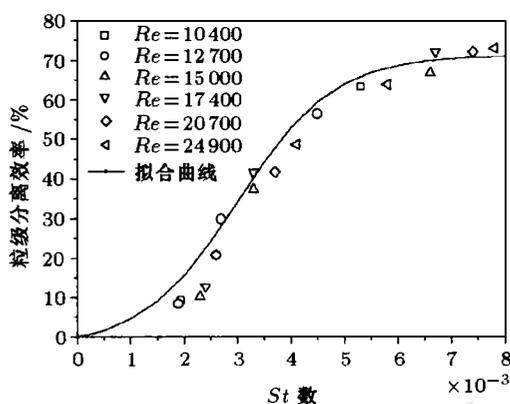


图 6 不同 Re 数下的 η_d - St 关系

值得注意的是, 不同 Re 数下数据点呈现出有规律的“S”形分布. 采用 Sigmoidal 函数对这些数据点进行了拟合, 结果为

$$\eta_d = 71.38 - \frac{73.93}{1 + \exp[(1000 St - 3)/0.87]} \quad (9)$$

图 7 为实验值和式 (9) 计算值之间的比较. 可以看出, 预测值和实验值之间符合程度良好.

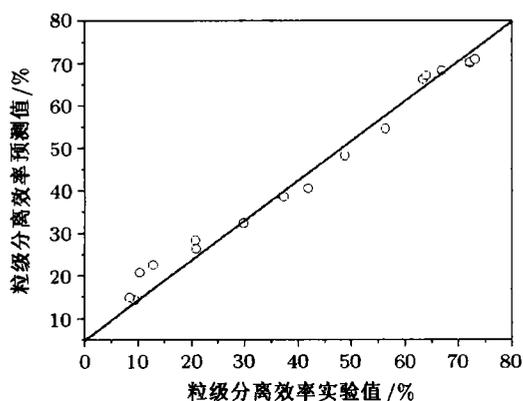


图 7 粒级分离效率实验值和预测值比较

3 结 论

(1) 作为一种高效、紧凑的分离器, 旋流除砂器非常适合平台上的油中除砂作业.

(2) 增加来流流速、降低来液的油水比例可以提高旋流器的分离效率.

(3) 随着液相黏度的增加, 二级旋流器在分离过程中所起到的作用越来越显著.

(4) 与粒径较大的颗粒相比, 细颗粒的分离效果更易受到来流流速、液相组成和旋流器级数的影响.

(5) 对几何尺寸一定的旋流器而言, 分离效率可以表示为 Re 数和 St 数的函数. 当 $10^4 < Re < 2.5 \times 10^4$ 之间时, 粒级分离效率可视为 St 数的单值函数. 利用 Sigmoidal 函数回归得到的方程, 预测值与实验值之间符合程度良好.

参 考 文 献

- 倪玲英. 井口旋流除砂器试验研究. 石油矿藏机械, 2002, 34(3): 22~24 (Ni Lingying. Experimental study of desand-hydrocyclone of wellhead. *Oil Field Equipment*, 2002, 34(3): 22~24 (in Chinese))
- 蒋明虎, 蒋巍等. 细颗粒分离水力旋流器的结构设计及试验. 大庆石油学院学报, 2005, 29(1): 58~60 (Jiang Minghu, Jiang Wei, et al. Structure design and experiments on hydrocyclone separators for small particles. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2005, 29(1): 58~60 (in Chinese))
- Wang B, Yu AB. Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, 2006, 19: 1022~1033
- Nowakowski AF, Cullivan JC, et al. Application of CFD to modeling of the flow in hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 2004, 17: 661~669
- Atakan Avci, Irfan Karagoz. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Aerosol Science*, 2003, 34: 937~955
- Avci A, Karagoz I. A mathematical model for the determination of a cyclone performance. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 2000, 27: 263~272
- Hoffmann AC, Stein LE. *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
- Parker CR. *Aerosol Science and Technology*. New York: McGraw-Hill Inc, Blue Ridge Summit, PA 17294-0701, 1993
- Coelho MAZ, Medronho RA. A model for performance prediction of hydrocyclones. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 84: 7~14
- Svarovsky L, Thew MT. *Hydrocyclones-Analysis and Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992