

卧式分离器固体颗粒分离性能试验研究

许仁辞

广州发展集团股份有限公司, 广东 广州 510000

摘要:为提高卧式分离器的固体颗粒分离性能,采用单因素和正交法实验研究了液位、入口液体流量、颗粒粒径对分离器固体颗粒分离效果的影响。结果表明:粒径大于 65 μm 的颗粒分离效果较好,受液位高度影响不明显;随着液位高度增大至 0.5 D,在流量小于 60 L/h 时,分离效率逐步增大到 90%;排液口颗粒中位粒径相对稳定在 6~18 μm ;三种变量对分离效率的影响大小依次为:颗粒粒径、液位、入口液体流量;在显著性水平 $\gamma=0.05$ 条件下,颗粒粒径影响最为显著。研究能为卧式分离器固体颗粒分离性能的调节提供参考。

关键词:卧式分离器;单因素;正交法;分离性能

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.02.018

Experimental Study on Solid Particle Separation Performance of Horizontal Separator

Xu Renci

Guangzhou Development Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract: In order to improve the solid particle separation performance of the separator, the effects of liquid level, inlet liquid flow rate and particle size on the separation efficiency of solid particles in horizontal separator are studied by single factor and orthogonal experiments. The results show that the separation efficiency of solid particles with particle size larger than 65 micron is better, and the influence of liquid level height is not obvious; with the increase of liquid level height to 0.5 D, the separation efficiency of solid particles in horizontal separator is improved. When the mass separation efficiency is less than 60 L/h, it gradually increases to 90%; the median particle size of the outlet is relatively stable at 6~18 μm ; the influence of three variables on the separation efficiency is in turn: particle size > liquid level > inlet liquid flow rate; the particle size is the most significant effect at the significant level of $\alpha=0.05$. The study can provide reference for the adjustment of solid particle separation performance of horizontal separator.

Keywords: Horizontal separator; Single factor; Orthogonal method; Separation performance

收稿日期:2019-09-27

基金项目:国家科技专项“深水天然气凝析液控砂与射流清管技术”项目(2016 ZX 05028004003)

作者简介:许仁辞(1991-),男,山东菏泽人,硕士,主要从事油气储运工程及能源技术创新相关工作。E-mail:1124150254@qq.com

0 前言

随着开采进度推移,天然气气田出砂现象日益严重^[1-3],在储运过程中普遍存在出砂现象^[4-5],严重威胁集输管道和下游设备生产的正常运行,例如东方气田^[6],颗粒在聚结器大量沉积,诱发污水滤芯阻塞。卧式分离器^[7]作为核心缓冲、气液分离器设备的同时也具备分离固体颗粒的功能。天然气分离设备隔板高度或液位^[8-9]越高,气体分离效果越低,液体分离效率越高。保持合理的液位高度对平衡气体和液体分离效果十分关键。本文以现场分离设备模化后的实验模型为对象,研究高气液比(500/1)条件下液位、颗粒、液体流速等因素对分离效率的影响规律,为生产中设备固体颗粒分离和除砂提供参考。

1 试验简介

1.1 试验系统

气液固多相流体试验流程见图1,压缩空气气源来自空压机,通过缓冲罐,经过涡街流量计计量后进入混合器,同时固、液相通过小循环形成均匀稳定的混合流后,经电磁流量计进入混合器,气液固三相混合后进入分离试验段。在分离器入口和排液口处取样测量进入和排除的固体颗粒粒径、压力等参数。试验样机以现场设备为模型进行模化,见图2,其中模型长度 $L_0 = 1\ 100\text{ m}$,内径 $D_0 = 365\text{ mm}$,排气管、排液管距基准面 $L' = 1\ 000\text{ mm}$ 。

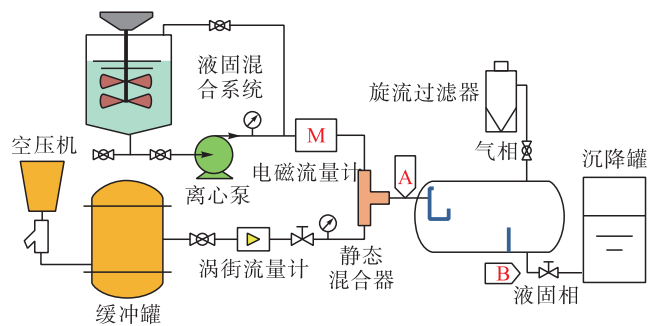


图1 试验流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental flow

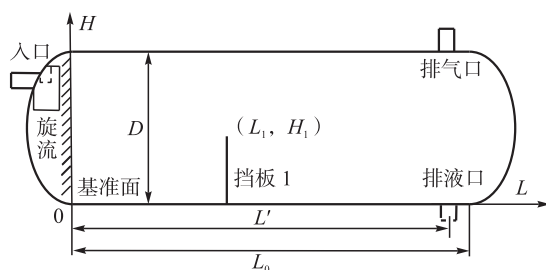


图2 分离器几何结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of separator geometry

1.2 试验条件与评价指标

试验气体介质为空气,入口表观流速为 10 m/s ;液体介质为清水,入口表观流量为 $45\sim 90\text{ L/h}$;固体颗粒选用天然石英砂,密度为 $2\ 605.46\text{ kg/m}^3$,体积浓度为 0.2% ,中位粒径为 $63\ \mu\text{m}$ 。

实际中影响固体颗粒分离的机理较为复杂^[10-11]且因素较多,包括流体的稳定性、颗粒浓度、沉降区几何形状等。本文对生产中常用的宏观指标液体控制、入口液体流量和颗粒粒径3个自变量因素进行研究,并采用分离效率和排液管中位粒径进行分析。其中分离效率为分离器内沉积的颗粒质量和入口颗粒总质量的比值;排液管中位粒径通过激光粒度仪测,记作无量纲长度 $\alpha = L_1/L'$ 和高度 $\beta = H_1/D_0$ 。

2 结果分析

2.1 单因素分析

2.1.1 液位对分离效率的影响

将液位无量纲高度 β 分别设置为 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $3/8$ 、 $1/2$,不同液位条件下的分离效率见图3。随着 β 的增加,颗粒分离效率逐渐增大至 90% ,其中在入口液体流量 $45\sim 60\text{ L/h}$ 工况下,分离效率变化最为明显,增幅约为 15% 。根据沉淀池理论^[12-13],在高液位低流速条件下,液位升高后液体容量增加,沉淀池的表面负荷增大,提高了颗粒的去除率。而在入口来液流量不变的工况下,分离器内的液体有效停留时间增大,极大地抑制了入口处的惯性流和沉淀区的停滞区、异重流等。

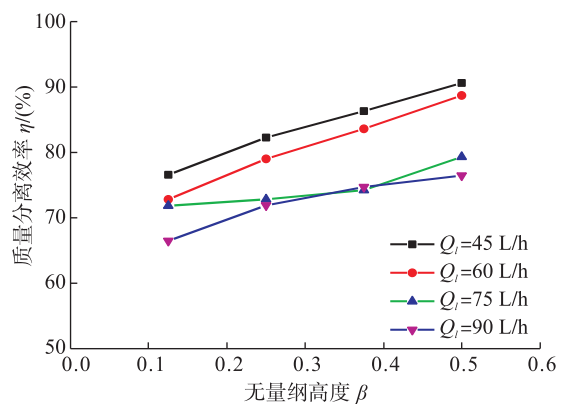


图3 不同液位条件下的分离效率图

Fig. 3 Separation efficiency under different liquid level

随着无量纲高度 β 逐渐增加,排液管中位粒径随液位增高逐渐增大到 $18\ \mu\text{m}$,见图4。由于实验介质属于粉砂,粒径基本小于 $100\ \mu\text{m}$,在沉降过程中^[14-15]容易受到湍流或者局部湍流的影响呈现悬浮状态。这类状态的颗粒运动具有很强的不规则性。水体容量越大,溶液中单位空间颗粒浓度越小,颗粒的不规则运动越剧烈。可以看出液位升高后,排液口中位粒径增加至 $18\ \mu\text{m}$ 。

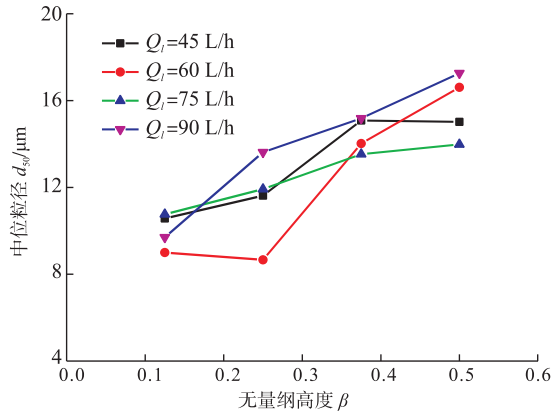


图4 不同液位条件下的排液管颗粒粒径曲线图

Fig. 4 Particle size of liquid discharge tube under different liquid levels

2.1.2 入口液体流量对分离效率的影响

在入口液体流量 45 ~ 90 L/h 范围内,分离效率逐渐降低至 65%, 见图 5。液流量增大后,液相分离区截面积流量增大,沉淀负载增大,不利于颗粒分离。此外,液相流速大时,颗粒随液相进入分离器具备的水平方向速度大,有效沉降时间缩短。

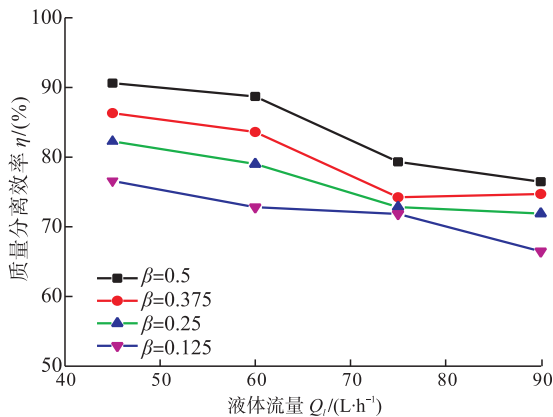


图5 不同液体流量条件下的分离效率曲线图

Fig. 5 Separation efficiency under different liquid flow

在不同入口液体流量下,排液管中位粒径分布基本稳定在 6 ~ 18 μm, 见图 6。从流体的性质分析,弗劳德数表征水流稳定性,即惯性和重力的比值。弗劳德数越大,惯性力作用越强,水流越稳定。但是,提高水平流速的同时,也使得雷诺数增大,不利于分离。实际分离器中,水流断面的流速分布不均匀,存在流速梯度。

2.1.3 颗粒粒径对分离效率的影响

在液体流量 45 ~ 90 L/h 和无量纲高度 β 为 0.25 ~ 0.5 范围内,取 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 35、35 ~ 55、> 65 μm 五个粒段进行分离效率分析,见图 7。随着颗粒粒径的增大,分离效率均呈现出增大的趋势,粒径大于 65 μm 后,粒级分离效率超过 95%。根据经典斯托克斯理论,颗粒粒径越大,沉降速度越快,越容易被分离出来。

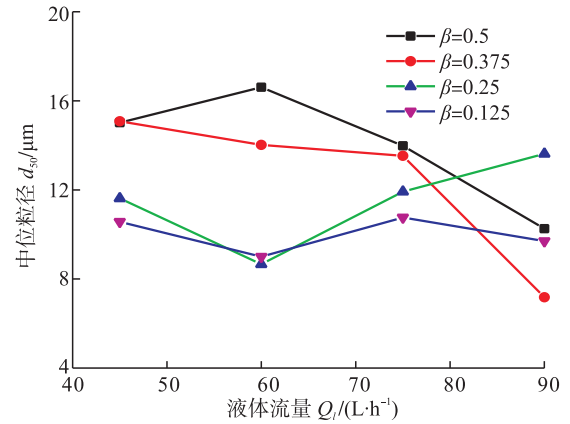
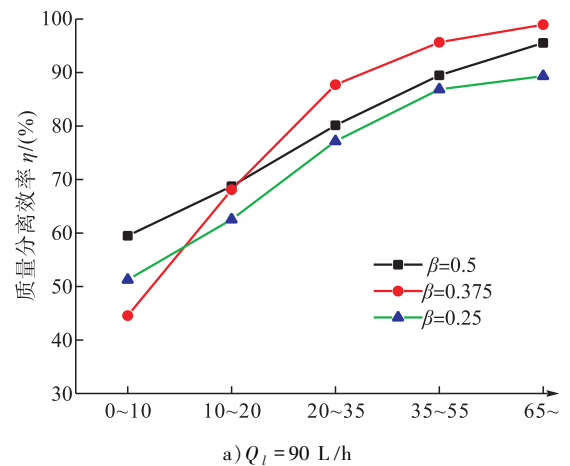
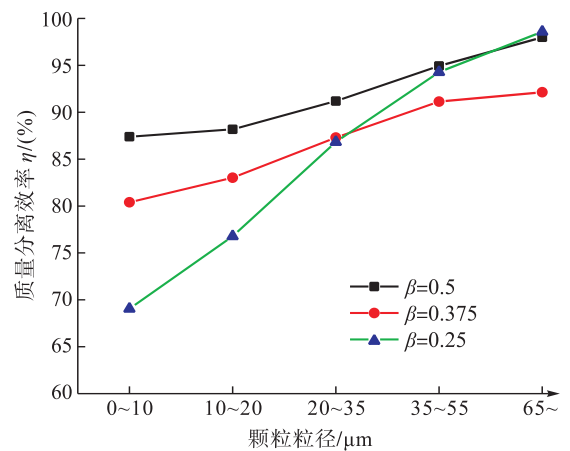


图6 不同液体流量的排液管颗粒粒径曲线图

Fig. 6 Particle size of liquid discharge tube under different liquid flow



a) $Q_i = 90 \text{ L/h}$



b) $Q_i = 45 \text{ L/h}$

图7 不同颗粒粒径条件下的分离效率曲线图

Fig. 7 Separation efficiency under different particle sizes

2.2 正交因素分析

通过单因素试验,研究了液位、流量、粒径三因素对分离性能的影响。正交试验法^[16-17]常被用来分析不同自变量对结果影响的显著性。其中无量纲高度 β 分别为 0.125、0.25、0.375、0.5;液流量分别为:45、60、75、90 L/h;

颗粒中位粒径分别为:10、20、35、55、65 μm ,借助 SPSS 软件^[18]确定正交表格,研究不同水平条件下液位、入口液

体流量、颗粒粒径对分离的影响程度的大小,以便在设计和生产中采取有针对性方法控制,见表1。

表1 SPSS 正交实验表

Tab.1 SPSS orthogonal test

序号	液位水平	流量水平	粒径水平	分离效率/(%)	序号	液位水平	流量水平	粒径水平	分离效率/(%)
1	3	1	2	68.92	14	1	4	2	32.51
2	2	2	2	54.36	15	2	1	3	75.38
3	4	1	1	76.37	16	4	1	3	83.16
4	1	3	1	22.03	17	1	2	4	85.05
5	1	1	5	94.20	18	4	3	2	53.32
6	3	4	5	97.94	19	1	1	4	85.36
7	4	4	4	80.07	20	3	2	1	52.53
8	1	1	2	52.50	21	3	3	3	54.55
9	1	3	5	86.46	22	2	4	1	26.27
10	2	1	5	97.18	23	3	1	4	83.06
11	1	4	3	59.66	24	2	3	4	83.10
12	1	1	1	25.79	25	4	2	5	95.85
13	1	2	3	68.97					

方差分析法研究不同因子对分离性能的显著程度,而极差分析则可以得到优选方案,主效应评价指标 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 代表不同因子水平对分离效率影响的大小,极差 R 反映不同因子对分离效率影响的大小, R 值越大对应该因子的影响越大, F 值代表检验方法条件下 F 取值大小,用以判断因子显著性,见表2。采用极差法和方差法进行结果分析:颗粒粒径、液位、入口液体流量的

极差 R 值分别为 35.33、11.58、10.29,对分离影响强度顺序分别为:颗粒粒径、液位、入口液体流量,最优水平分别为 65 μm 、0.5 D、45 L/h。在方差分析中,取显著性水平 $\gamma = 0.05$ 并采用 F 检验法^[19-20],颗粒粒径、液位、入口液体流量的 F 值分别为 3.38、3.91、24.65,因此在实验范围内,颗粒粒径对分离效率的影响显著,而液位、入口液体流量对分离效率的影响不显著。

表2 正交实验数据分析表

Tab.2 Data analysis of orthogonal test

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	R	F	较优水平	因子主次	自由度	第三类平方和	平均值平方
液位	76	80	84	88	—	12	3.38	A 4	2	3	990	330
入口液体流量	85	84	76	75	—	10	3.91	B 1	3	3	1 146	382
颗粒粒径	62	72	82	91	97	35	24.65	C 5	1	4	9 623	2 406

3 结论

单因素实验表明,在高气液比范围内,当控制液位高度逐步增加至 0.5 D,颗粒分离效率明显改善;颗粒粒径大于 65 μm 的颗粒分离效率较高,达到 90%,受液位高度影响不明显;出液管颗粒中位粒径相对稳定分布在 6~18 μm ,因此在分离器下游固体颗粒防治时要重点针对该粒段的颗粒。正交实验表明,对分离效率的影响大小依次为颗粒粒径、液位和入口液体流量;在显著性水平 $\gamma = 0.05$ 条件下,颗粒粒径影响最为显著,其他两项不显著。

参考文献:

- [1] 李颖川. 采油工程[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
Li Yingchuan. Oil Production Engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [2] 陈冬林,周天春,刘华杰,等. 川西气田压裂井出砂机理及防砂技术[J]. 天然气工业,2007,27(8):91-93.
Chen Donglin, Zhou Tianchun, Liu Huajie, et al. Mechanism and Prevention of Sanding in Fractured Wells in West Sichuan Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27 (8): 91-93.

- [3] 邹一锋, 郑平, 刘超, 等. 川西水平井纤维加砂压裂工艺研究与应用[J]. 天然气与石油, 2013, 31(5): 46-49.
Zou Yifeng, Zheng Ping, Liu Chao, et al. Research on Horizontal Well Fiber Sand Fracturing Technology in Western Sichuan and Its Application [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(5): 46-49.
- [4] 龙学, 何兴贵, 张朝举, 等. 气井压后出砂危害和尾追纤维技术控砂返出及增产效果评价[J]. 天然气勘探与开发, 2010, 33(1): 63-67.
Long Xue, He Xinggui, Zhang Chaoju, et al. Sand Production Hazard After Gas Well Pressure and Evaluation of Sand Control and Production Increase Effect by Tail Fiber [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2010, 33(1): 63-67.
- [5] 黄禹忠, 任山, 兰芳, 等. 纤维网络加砂压裂工艺技术先导性试验[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1): 77-78.
Huang Yuzhong, Ren Shan, Lan Fang, et al. Pilot Test of Fiber-Laden Fracturing Technology [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 77-78.
- [6] 许仁辞, 静玉晓, 石凯月, 等. 段塞捕集器结构改造与除砂性能评价[J]. 中国海上油气, 2017, 2: 156-161.
Xu Renci, Jing Yuxiao, Shi Kaiyue, et al. Improvement in the Structure of Slug Catchers and Evaluation of Their Desanding Performances [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 2: 156-161.
- [7] 桑义敏, 陈家庆, 张利岩. 油气田系统除砂技术探讨[J]. 石油化工安全环保技术, 2007, 23(4): 5-10.
Sang Yimin, Chen Jiaqing, Zhang Liyan. Discussion on Sand Removal Technologies for Oil-Gas Field Systems [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2007, 23(4): 5-10.
- [8] 高光才, 白志国. 油气分离器设计制造规范: QHS 30062003 [S]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2003.
Gao Guangcai, Bai Zhiguo. Specification for Design and Fabrication of Oil and Gas Separators: QHS 30062003 [S]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2003.
- [9] Feng Zhigang, Michaelides E E. Interparticle Forces and Lift on a Particle Attached to a Solid Boundary in Suspension Flow [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(1): 49-60.
- [10] 吴维新, 苗子旭, 龙佳, 等. 颗粒沉降动力学特性研究进展[J]. 金属矿山, 2019(6): 27-32.
Wu Weixin, Miao Zixu, Long Jia, et al. Research Progress on Dynamic Characteristics of Particle Sedimentation [J]. Metal Mine, 2019(6): 27-32.
- [11] 刘波, 李忠媛, 李鑫钢, 等. 液固流化过程颗粒沉降动力学的研究进展[J]. 化学工程, 2014, 42(12): 49-55.
Liu Bo, Li Zhongyuan, Li Xingang, et al. Study Progress of Particles Sedimentation Dynamics in Liquid-Solid Fluidization Process [J]. Chemical Engineering (China), 2014, 42(12): 49-55.
- [12] 符新建. 一种多层平板单元组合沉淀池中试及其优化途径研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Fu Xinjian. Pilot Test of a Multi-Storey Slab Unit Assembled Sedimentation Tank and Study on Its Optimization Approach [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [13] 徐长学. 沉淀池中异重流现象的理论分析[J]. 人民长江, 2013, 44(5): 66-68.
Xu Changxue. Theoretical Analysis on Density Current Phenomenon in Sedimentation Basin [J]. Yangtze River, 2013, 44(5): 66-68.
- [14] 王成勇, 李子文, 潘东. 煤泥水悬浮颗粒混凝沉降影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 328-330.
Wang Chengyong, Li Ziwen, Pan Dong. Study on Factors Affecting Coagulating Sedimentation of Suspended Particles in Slime Water [J]. Coal Technology, 2018, 37(10): 328-330.
- [15] 周克钊, 罗万申, 赵远清, 等. 静置沉淀试验中污泥沉降速度的不确定性研究[J]. 给水排水, 2018, 44(12): 31-35.
Zhou Kezhao, Luo Wanshen, Zhao Yuanqing, et al. The Uncertainty of Sedimentation Velocity of Activated Sludge in Static Sedimentary Experiments [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(12): 31-35.
- [16] 黄坤, 王怡佳, 李新战, 等. 基于正交试验的仰角式油水分离器结构参数优化[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(3): 241-225.
Huang Kun, Wang Yijia, Li Xinzhan, et al. Structure Parameters Optimization of the Inclined Oil-Water Separator Based on Orthogonal Design [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2014, 43(3): 241-225.
- [17] 杨子渝, 张力. 正交试验法优化泥沙分离器结构参数[J]. 机械设计与制造, 2018(9): 79-87.
Yang Ziyu, Zhang Li. Sediment Structure Parameters of Separator Optimized by Orthogonal Experiment [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(9): 79-87.
- [18] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2017: 45-65.
Zhang Wentong. Basic Course of SPSS Statistical Analysis [M]. Beijing: Higher Education Press, 2017: 45-65.
- [19] 潘鸿, 张小宇, 吴勇民. 应用统计学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 100-196.
Pan Hong, Zhang Xiaoyu, Wu Yongmin. Applied Statistics [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011: 100-196.
- [20] 吴可杰. 统计学原理[M]. 南京: 南京大学出版社, 2012.
Wu Kejie. Statistical Principle [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012.