

The Optimal Structure Parameters of Hydrocyclone with Dual Cone Based on Orthogonal Design

Feng Li, Zihan Xu

Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang
Email: 493409976@qq.com

Received: Dec. 2nd, 2016; accepted: Dec. 17th, 2016; published: Dec. 27th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Emissions and processing of oil-bearing sludge generated during oil field exploration and production processes have been major problems to be solved. Based on orthogonal design and computational fluid dynamics, dual-cone hydrocyclone monomer structure suitable for separating fine particles has been simulated. According to the analysis of solid-phase volume, oil-phase volume of underflow port and pressure fall of overflow port in different experimental groups, the optimal structure was found. Through these tests, the optimal structure operating parameters were found. Finally dual-cone hydrocyclone monomer structure was designed for high-efficient treatment of oil-bearing sludge. The optimal efficiency can reach 96.22%.

Keywords

Orthogonal Design, Structure Optimization, Operating Parameters

正交试验条件下的双锥旋分器结构参数的确定

李 枫, 徐子涵

东北石油大学, 黑龙江 大庆
Email: 493409976@qq.com

收稿日期: 2016年12月2日; 录用日期: 2016年12月17日; 发布日期: 2016年12月27日

摘要

油田勘探与开发过程中所产生的含油污泥的排放和处理一直是各大油田急待解决的问题, 本文基于正交试验及计算流体力学模拟出适用于处理细颗粒污泥的双锥旋流器的单体结构。通过对不同试验组的固相体积分数分布云图, 底流口油相体积分数分布以及溢流口压力降的综合分析, 得到最优结构。并针对最优结构优化其操作参数。最终设计出用于高效处理油田含油污泥的旋流器结构单体, 其优化后的结构分离效率可以达到96.22%。

关键词

正交试验, 结构优化, 操作参数

1. 前言

在油田开发过程中, 对于含油污泥的排放和处理一直困扰着各大油田。如果含油污泥处理不当, 将会对环境造成污染。同时, 含油污泥中的泥粒径非常细小, 粒径中值在 $50\ \mu\text{m}$ 以下, 且其与水的密度差较小, 分离难度较大。相比普通单锥固液分离设备结构, 双锥旋流器结构能够有效的减小分离粒度, 提高分离效率, 同时减小压力降, 并且能够有效的解决底流口堵塞等问题[1]。因此, 本文针对含油水的细颗粒污泥, 在原有旋流器模型的基础上, 设计与优化出能够高效分离细颗粒污泥的双锥旋流器。

2. 主要结构参数与正交设计

原始模型参照东北石油大学旋流机械实验室的主直径 $60\ \text{mm}$ 的双锥旋流器, 如图 1。由于本实验模拟分析底流口固相的分离效率, 入口直径的大小决定处理量和分离粒度, 上锥段采用大锥角, 可以提高旋流器内的切向速度, 下锥段采用小锥角, 能够有效提高分离时间[2], 细颗粒分离的底流口流量要小于溢流口的流量, 因此底流口直径应当小于溢流口直径。基于上述分析, 本次正交试验对于双锥旋流器结构参数的优选如表 1。

利用 $L_{18}(3^7)$ 正交表的前五列完成试验设计方案, 第六与第七列作为误差分析列, 18 组结构参数组合方案见表 2。并利用计算流体力学(CFD)软件进行数值模拟分析[3], 此次模拟选用雷诺应力模型(Reynolds Stress)。

从指标 y_i 可以直接看出, 试验号 9 号, 因素水平 $A_3B_3C_1D_3E_2$ 方案的分离效率最高, 达到了 94.20%。即当入口直径为 $13\ \text{mm}$, 上锥段角度为 20° , 下锥段角度为 3° , 接口直径为 $40\ \text{mm}$, 底流口直径为 $10\ \text{mm}$ 时分离效率最高。

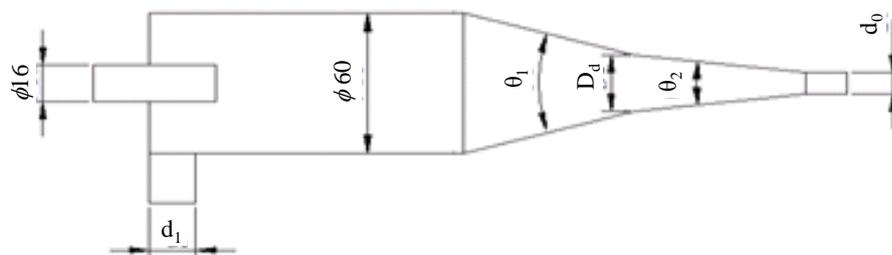


Figure 1. The basic structure of hydrocyclone
图 1. 旋流器基本结构参数(单位: mm)

Table 1. Test factors table
表 1. 因素水平表

因素水平	A	B	C	D	E
	入口直径 D_i (mm)	上锥段角度 θ_1 ($^\circ$)	下锥段角度 θ_2 ($^\circ$)	接口直径 D_d (mm)	底流口直径 D_o (mm)
1	8	10	3	20	8
2	10	15	5	30	10
3	13	20	8	40	12

Table 2. Analysis table for results of the orthogonal test
表 2. 正交试验计算结果分析表

试验序号	A	B	C	D	E	空	空	指标 y_i 效率%
1	1	1	1	1	1	1	1	87.28
2	1	2	2	2	2	2	2	89.30
3	1	3	3	3	3	3	3	90.21
4	2	1	1	2	2	3	3	90.25
5	2	2	2	3	3	1	1	91.19
6	2	3	3	1	1	2	2	90.68
7	3	1	2	1	3	2	3	92.27
8	3	2	3	2	1	3	1	93.98
9	3	3	1	3	2	1	2	94.20
10	1	1	3	3	2	2	1	85.26
11	1	2	1	1	3	3	2	89.52
12	1	3	2	2	1	1	3	92.35
13	2	1	2	3	1	3	2	93.10
14	2	2	3	1	2	1	3	92.67
15	2	3	1	2	3	2	1	93.36
16	3	1	3	2	3	1	2	93.19
17	3	2	1	3	1	2	3	93.91
18	3	3	2	1	2	3	1	94.08
K_1	5.3393	5.4135	5.4853	5.4651	5.513	5.5088	5.4515	
K_2	5.5024	5.5058	5.5229	5.5243	5.4576	5.4478	5.4999	$T = 16.4381$
K_3	5.6163	5.5488	5.4599	5.4787	5.4974	5.5115	5.5166	
k_1	0.8899	0.9023	0.9142	0.9109	0.9188	0.9181	0.9086	
k_2	0.9171	0.9176	0.9205	0.9207	0.9096	0.9080	0.9167	
k_3	0.9361	0.9248	0.9010	0.9131	0.9162	0.9186	0.9194	
R	0.0462	0.0225	0.0195	0.0098	0.0092	0.010	0.0108	

表 3 为显著性检验的方差分析表。从表中的显著性来看, 五个因素对旋流器整体的分离效率均无显著影响, 说明试验中的误差较小, 不会影响试验的结论分析, 因此在试验中选择较为合理的结构即可。

Table 3. Variance analysis table of the orthogonal test
表 3. 正交试验方差分析表

方差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值	F 临界值	显著性
A	0.0425	2	0.02125	0.77	3.68	无
B	0.056	2	0.028	1.02	3.68	无
C	0.0549	2	0.02745	1	3.68	无
D	0.0549	2	0.02745	1	3.68	无
E	0.0547	2	0.02735	0.9964	3.68	无
误差	0.1098	4	0.02745	-	-	-

3. 优选结构

在 18 组模拟中选取了 4 组进行模拟对比分析, 根据不同分离效率从低到高依次选择了试验 1 号、试验 4 号、试验 7 号、试验 9 号, 它们的分离效率分别为 87.28%、90.25%、92.27%、94.20%。图 2 为不同试验组模拟固相体积分数分布云图, 从云图中可以看出, 双锥固液旋流分离装置的云图整体分布均匀, 固相均延边壁向底流口运移, 随着分离效率的增加, 边壁处的固相浓度也有明显增加, 并且从溢流口的云图中可以看出, 试验 1 号有一小部分固体从溢流口流出, 但是当效率达到 94.20% 时, 试验 9 号的溢流口固相体积分布已经逐渐减小, 所以从模拟的固相体积分布云图中可以证明试验条件为 $A_3B_3C_1D_3E_2$ 的分离效率较好。

如图 3 所示, 分别选取了试验 1 号、试验 4 号、试验 7 号、试验 9 号的底流口作为研究对象, 通过 Fluent 模拟分析得出这四组试验的底流口油相体积分数曲线图, 从图中可以看出从边壁开始油核逐步向中心聚集, 在中心处达到峰值。但随着旋流器分离效率的不断增加, 底流口中心处的油相体积分数逐渐下降, 并且图像基本成中心对称, 跟常规旋流器相似, 说明其中的流场相对稳定。

因本研究为固-液水力旋流器, 溢流口排出大量液体, 因此溢流口的压力降更能代表旋流器的压力损失能耗[4]。图 4 为四组试验地溢流口压力降的柱状图, 从柱状图可看出, 随着分离效率的不断增加, 试验 1 号到试验 9 号的溢流口压力降逐渐降低。由于介质在水力旋流器内的分离过程是依靠压力损失来获取动力的, 因而在处理能力相同的前提下, 如果能获得相同的分离效果, 压力降应越低越好[5]。

因此, 试验 9 号结构为最佳即试验 $A_3B_3C_1D_3E_2$ 。

4. 优选操作参数

4.1. 分流比对旋流器性能的影响

分流比 F 是旋流器重要的操作参数之一, 它可以反映旋流器的溢流口以及底流口的流量分配关系, 在理想状态下, 同一结构旋流器应存在最佳分流比[6], 所以下面将入口速度固定在 13.89 m/s、固相粒径固定在 0.05 mm、入口含油 2% 等参数下进行模拟分析。

将溢流口的分流比分别设定为 10%、15%、20%、25%、30% 分别进行模拟。图 5 为底流口固相体积分数分布云图。从图中看以清晰的看到随着旋流器的分流比的增大, 底流口含泥逐渐减少。当分流比为 10% 时, 底流口固相分离效率达到 97.97%。但是不能作为衡量最优参数的依据, 因整体旋流器的分离效率受复杂的因素影响, 所以应量进行综合分析。

根据模拟同一结构旋流器不同分流比的结果可知, 对于同一结构的旋流器, 其他参数不变时, 随着分流比的增大, 底流口分离效率逐渐减小, 但是通过检查溢流口的压力降发现, 压力降逐渐增高。将模拟结果的分离效率和压力降进行数据整理如图 6 所示。

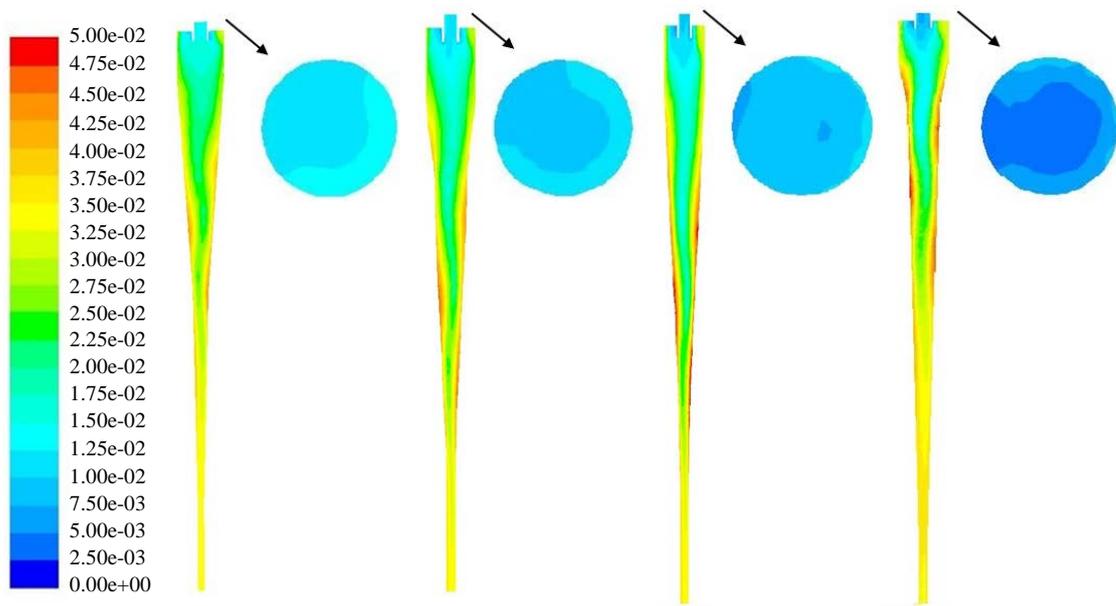


Figure 2. Solid-phase volume distribution of different experimental groups
 图 2. 不同试验组模拟固相体积分数分布云图

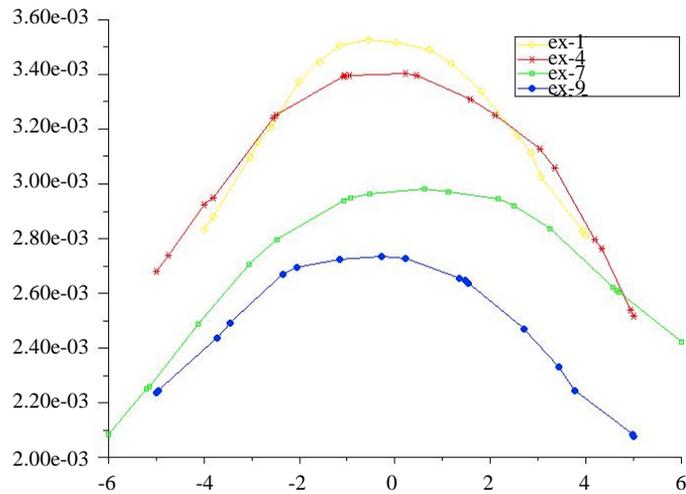


Figure 3. Oil-phase volume of underflow port
 图 3. 底流口油相体积分数分布曲线图

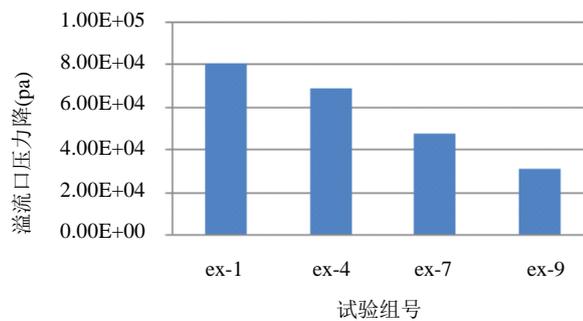


Figure 4. Pressure fall of overflow port
 图 4. 溢流口压力降柱状图

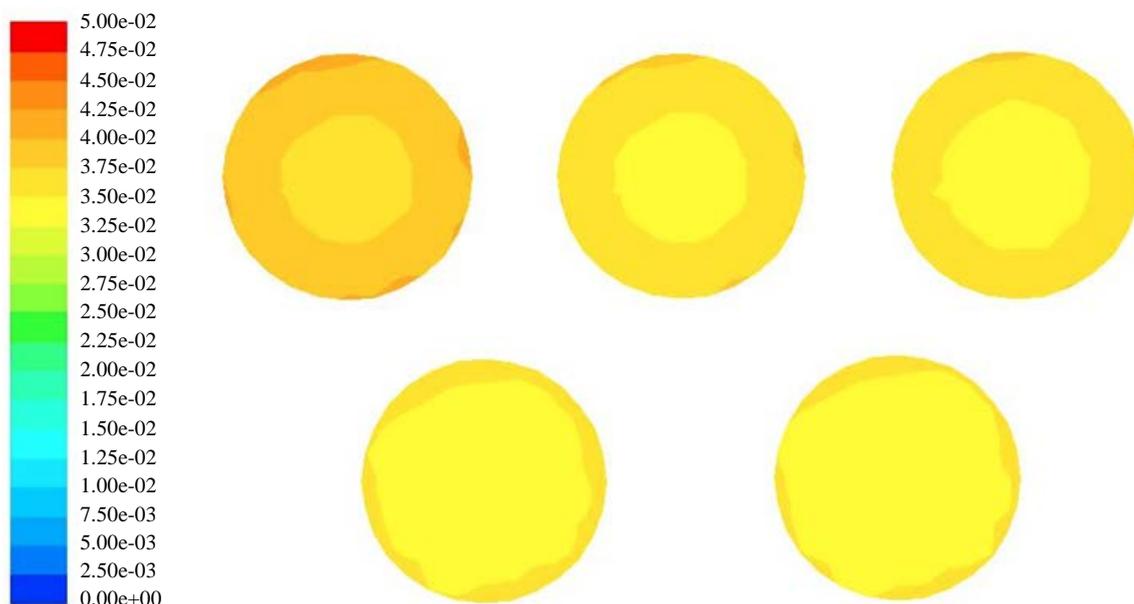


Figure 5. Solid-phase volume of underflow port under different split ratio
图 5. 不同分流比下底流口固相体积分数分布图

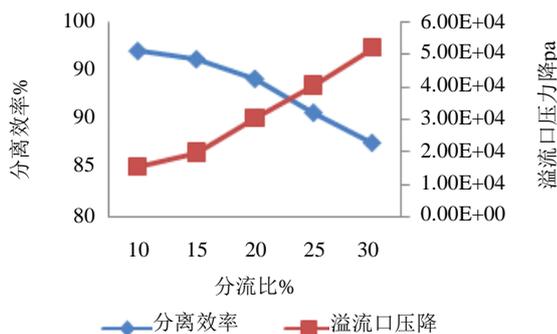


Figure 6. Simulation results under different split ratio
图 6. 不同分流比下模拟结果

从图 6 中可以看出, 分离效率和压力降呈反比例关系。分流比从 10% 增到 30% 时, 分离效率逐渐下降, 并且分流比在 10% 到 20% 之间的分流效率同压力降的变化速率均较平稳。根据分离效率以及压力降的综合分析[7], 对于该固-液分离旋流器的分流比应选择 10%, 但是模拟是在理想状态下进行, 不对外在环境加以考虑, 在实验中, 当溢流分流比选择较小时, 底流分流比相对变大, 其需要泵提供的能量也随之提高, 与现场实际情况不符, 背离节能、降耗实验目的。如图所示分流比为 10%、15%、20% 的分离效率相对较高, 但分流比为 20% 的压力降比分流比为 15% 的压力降高, 所以综合分析, 最佳分流比操作参数为 15%。

4.2. 处理量对旋流器性能的影响

处理量是旋流器重要的操作参数之一, 不同的处理量会使旋流器内部的流场产生影响。在同一旋流器结构参数下, 对分流比、固相粒径、含水率等参数保持不变下进行模拟分析。对同一结构的固-液分离旋流器, 处理量的改变意味着入口的速度也随之改变, 因此本次通过研究不同入口速度对旋流器的影响来替代不同处理量下的旋流器内部流场的变化。

设定入口速度分别为 9.72 m/s、11.11 m/s、12.5 m/s、13.89 m/s、15.28 m/s, 图 7 为不同入口速度下底流口固相体积分数分布图。从图中可以看出, 随着入口速度的不断增大, 底流口含泥量也在不断增多。当速度为 15.28 m/s 时, 即处理量达到 11 m³/h, 底流口含泥量为 0.163 kg/s。但是不能作为衡量最优参数的依据, 因整体旋流器的分离效率受复杂的因素影响, 所以应尽量进行综合分析。

根据模拟分析可知, 同一结构的旋流器, 其它参数不变时, 随着入口速度的增大, 其固相的分离效率也逐渐增大, 但溢流口的压力降也同时增大。将模拟结果的分离效率和压力降进行数据整理如图 8 所示。

从图中可以看出, 当入口速度从 9.72 m/s 增加到 15.28 m/s 时, 分离效率不断增加, 当速度达到 12.5 m/s 之后, 增加的速率明显下降, 逐渐趋于平稳, 但压力降却因入口流量增大, 使旋流器内部流场的湍流作用增强, 能量损失增加导致压力降增大, 呈现直线上升趋势。在速度为 15.28 m/s 处, 压力降明显增大。由于在实际应用中, 入口速度过大, 会导致旋流器内部的泥粒径受剪切力的影响, 使泥粒破碎, 从而从溢流口流出影响分离效果。因此, 综合分析, 入口速度为 13.89 m/s 时作为最佳操作参数。

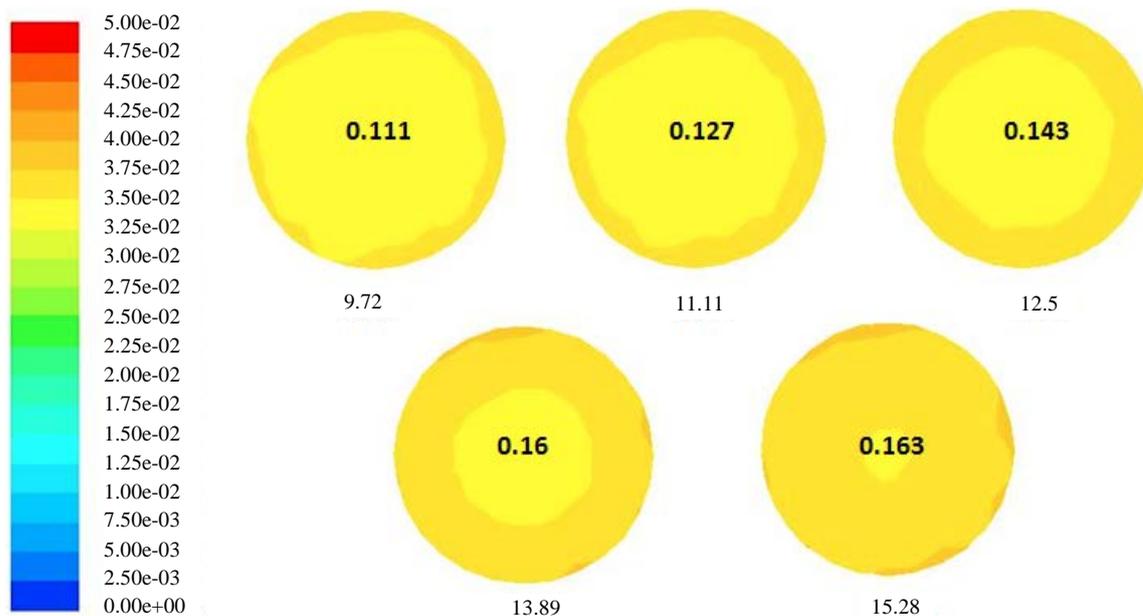


Figure 7. Solid-phase volume of underflow port under different velocity
图 7. 不同入口速度下底流口固相体积分数分布图

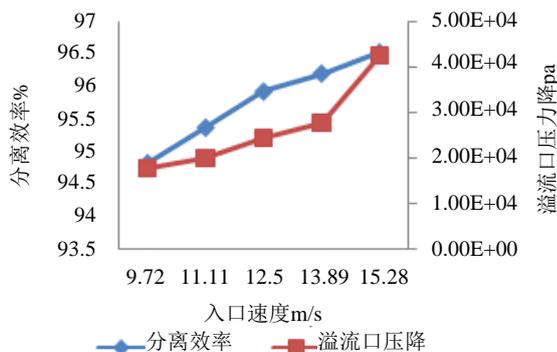


Figure 8. Simulation results under different velocity
图 8. 不同入口速度下模拟结果

5. 结论

1) 根据正交试验, 得出分离效率相对较好的试验组: 入口直径为 13 mm, 上锥段角度 20°, 下锥段角度 3°, 接口直径 40 mm, 底流口直径 10 mm, 即 $A_3B_3C_1D_3E_2$ 。并且从直观分析中可以看出分离效率较好。方差分析各因素均无显著影响, 说明试验中误差较小, 结构选择较合理。

2) 通过对不同试验组模拟固相体积分数分布云图, 底流口油相体积分数分布以及溢流口压力降的综合分析, 得到最优结构, 即 $A_3B_3C_1D_3E_2$, 其分离效率达到 94.20%。

3) 在最优结构基础上, 对固-液分离双锥旋流器的分流比以及处理量进行模拟分析, 得出最佳分流比为 15%, 以及最优入口速度为 13.89 m/s。优化后的结构分离效率达到 96.22%。

基金项目

国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(博导类), 编号: 20132322110002。

致谢

感谢东北石油大学旋流机械实验室为本课题研究所提供的原始旋流器模型, 同时感谢实验室的同学们对本课题研究所提供的帮助, 他们严谨求实的态度和踏踏实实的精神都让我受益匪浅。

在这里, 请接受我诚挚的谢意。

参考文献 (References)

- [1] Raziye, S. and Ataallah, S.G. (2014) CFD Simulation of an Industrial Hydrocyclone with Eulerian-Eulerian Approach: A Case Study. *International Journal of Mining Science and Technology*, **24**, 643-648.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.07.010>
- [2] Siangsanan, V., Guigui, C. and Morchain, J. (2011) Velocity Measurement in the Hydrocyclone by Oil Droplet, Doppler Ultrasound Velocimetry, and CFD Modelling. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **89**, 725-733.
<https://doi.org/10.1002/cjce.20440>
- [3] 崔瑞, 王光辉, 李茂林. 基于正交设计与计算流体力学模拟的双锥旋流器锥体设计研究[J]. 中国矿业, 2015(4): 148-151.
- [4] 朱学佳, 袁惠新, 曹仲文, 李雪斌. 典型旋流器压力降的分析与比较[J]. 化工装备技术, 2007, 28(6): 1-5.
- [5] 王淑军, 吕秀丽. 计算流体力学软件 FLUENT 在旋流器流场模拟中的应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(9): 28-30+8.
- [6] 傅进军. 固液旋流器分离效率影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(18): 5576-5581.
- [7] 苏劲, 袁智, 侍玉苗, 陈波洋. 水力旋流器细粒分离效率优化与数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 183-190.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org