

海底水合物混合浆体除泥砂水力旋流器

伍开松, 代茂林

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要: 根据海底天然气水合物基本特征和多相流理论, 完成了水力旋流器结构参数初步设计, 并对原汉考克综合效率计算公式中各参数的含义进行了修正, 得到了符合海底水合物混合浆体的改进汉考克综合效率计算公式. 然后, 建立了水力旋流器的有限元模型, 基于雷诺应力模型开发了一种适合液-固-固三相流的流场模拟分析方法, 通过数值模拟分析, 得到了水力旋流器内部的速度、压力和密度等参数的分布规律. 最后, 通过结构参数的正交试验优化, 得到了水力旋流器的最优结构参数组合, 使其分离效率提升到初始方案分离效率的 1.36 倍. 进一步对操作参数进行了正交试验优化, 得到了水力旋流器的最优操作参数组合, 使水力旋流器的分离效率又提高了 5.15%.

关键词: 多相流; 海底; 水合物; 水力旋流器; 正交试验

中图分类号: TH 12

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)07-0973-07

doi: 10.11936/bjtxb2014090076

Hydrocyclone for Separating Silt in Gas Hydrate Mixed Slurry on the Seabed

WU Kai-song¹, DAI Mao-lin¹

(School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: According to the basic features of seabed gas hydrate and the multiphase flow theory, by comparing separation schemes, this paper accomplished the preliminary design of the structural parameters for the hydrocyclone. As the original Hancock overall efficiency formula could not be directly used in the calculation of the separation efficiency of seabed gas hydrate mixed slurry, the definition of parameters of the original formula was modified to work out an improved formula. Then, the finite element model for the hydrocyclone was established and developed, based on the Reynolds stress model, a flow field simulation analysis method applicable for the liquid-solid-solid tri-phase flow, and by simulation analysis of the numerical value, distribution rules of parameters of the hydrocyclone such as the internal speed, pressure and density are obtained. Finally, the optimal structural parameter combination for the hydrocyclone was worked out by optimizing the structural parameters through orthogonal test, thus increasing the separation efficiency by 36.24%, compared with the initial scheme. Then, the operational parameters were further optimized through orthogonal test to gain an optimal operational parameter combination for the hydrocyclone, increasing separation efficiency of the hydrocyclone by another 5.15%.

Key words: multiphase flow; seabed; gas hydrate; hydrocyclone; orthogonal test

天然气水合物作为新的矿产资源, 其碳储量巨大, 在近十多年引起广泛的关注, 根据业内专家估

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(L1322021); 中国工程院自然基金资助项目(2013-04-ZQC-002)

作者简介: 伍开松(1961—), 男, 教授, 主要从事有限元分析、现代设计方法、机械系统动力学仿真、岩石破碎和石油机械方面的研究, E-mail: wks9998@163.com

算,天然气水合物中甲烷的占有量约为 $2.0 \times 10^{16} \text{ m}^3$,相当于地球上全部石油、天然气、煤和其他物质中碳储量之和的 2 倍^[1-2]. 海底浅表层水合物藏固态流化开采技术是一种全新的海洋水合物开发方法,具有安全可靠、污染小、次生灾害小等优势,该技术的一个关键技术就是解决对破碎后的“海底水合物混合浆体中泥砂分离问题”. 因此,本文分析了一种适合海底水合物混合浆体分离的水力旋流器. 通过对水力旋流器结构参数和操作参数的正交试验优化,确定了其最佳结构参数和最佳操作参数.

1 初步方案设计

水力旋流器是利用离心力场原理对多相流进行分离的一种设备,它广泛应用于存在一定密度差的两相或多相混合浆体的分离,具有结构简单、操作方便、生产能力大、分离效率高、占地面积小、投资少、无转动部件和易于实现自动控制等优点^[2],所以本文决定采用水力旋流器来对海底水合物混合浆体进行分离.

采用有限元数值仿真模拟的方法对水力旋流器的内部流场进行分析和研究,故还需要对海底水合物混合浆体的介质模型进行简化,根据海底天然气水合物基本特征和多相流理论,简化后的海底水合物混合浆体中含有海水、天然气水合物和泥砂三相的存在,该混合浆体的流动属于液-固-固三相流.

1.1 水力旋流器结构组成及工作原理

水力旋流器主要是由圆柱体、锥体、溢流口、底流口和进料口组成^[3],进料口的形式采用长方形入口. 其基本几何结构如图 1 所示.

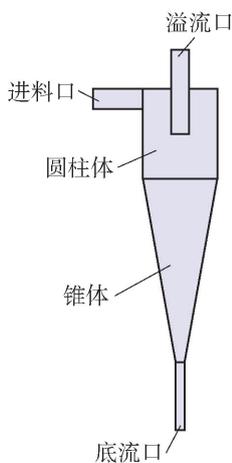


图 1 水力旋流器基本结构

Fig. 1 Basic structure of hydrocyclone

水力旋流器是将具有一定密度差的两相或多相混合浆体以一定的压力(或初速度)由切向进料口进入水力旋流器内部,流体的压力能转化为流体的动能在旋流器内部做高速旋转运动,使混合浆体中密度(或直径)较大的组分在离心力的作用下,在旋转运动的同时向下、向外运动,最终形成外旋流以底流的形式从底流口排出;而密度(或直径)较小的组分在旋转运动的同时向内、向上运移,最终形成内旋流以溢流的形式经溢流口排出,从而完成分离任务^[3-5].

1.2 水力旋流器初选结构参数

1.2.1 水力旋流器基本直径

根据生产能力计算水力旋流器的基本直径 D ,其公式为^[6]

$$D = 19.5 q_n^{0.5} \rho_m^{0.25} \Delta P_m^{-0.25} \quad (1)$$

式中: q_n 为计划单台生产能力, m^3/h ; ΔP_m 为进料入口到底流出口之间沿径向的压力降, MPa ; ρ_m 为进料口多相流密度, t/m^3 .

假设给定海底水合物混合浆体的原始参数为:海底水合物混合浆体处理量 $27 \text{ m}^3/\text{s}$;海底水合物混合浆体的密度 $1097.5 \text{ kg}/\text{m}^3$;进料入口到底流出口之间沿径向的压力降 0.25 MPa ;海底水合物混合浆体中海水、天然气水合物和泥砂的体积分数分别为 70% 、 20% 和 10% ;进料口中固相颗粒的粒度为 2 mm . 根据式(1),并综合考虑制造、安装定位及强度等因素,初步确定水力旋流器的直径为 150 mm .

1.2.2 水力旋流器锥角

水力旋流器锥角的大小会影响分级粒度. 当圆柱体直径相同时,锥角越大其锥体高度越短,流体在其中分离的时间也就越短. 反之,锥角越小锥体高度越长,流体在其中分离的时间越长^[6]. 假设采用标准型水力旋流器,可初选锥角为 20° .

1.2.3 其他结构参数

参考庞学诗《水力旋流器技术与应用》^[6],根据相关的经验公式,可初选长方形入口的长和宽分别为 40 mm 和 18 mm ,溢流口直径为 36 mm ,底流口直径为 18 mm ,溢流管插入深度为 90 mm ,筒体高度为 180 mm .

2 海底水合物混合浆体分离效率

从天然气水合物的角度出发,该海底水合物混合浆体的分离效率 E 是指流体流过水力旋流器时,天然气水合物进入溢流管的数量,与该物料在进料

管的数量的比值. 由于这些数量值不能从模拟结果中直接提取,因此本文采用汉考克综合效率计算公式对该分离效率进行计算,原汉考克综合效率计算公式为^[6]

$$E = \frac{(\alpha - \vartheta)(\beta - \alpha)}{\alpha(\beta - \vartheta)(100 - \alpha)} \times 10\,000\% \quad (2)$$

式中: α 为进料中天然气水合物的体积分数,%; β 为溢流中天然气水合物的体积分数,%; ϑ 为底流中天然气水合物的体积分数,%.

根据海底天然气水合物浆体的分离要求,应使天然气水合物与泥砂能够达到较好的分离效果,而进入水力旋流器内的海水从溢流口或底流口排出量的多少没有明确要求,因此针对该三相流的分离过程中,在对有用相体积分数的计算时,不考虑其进料口、溢流口和底流口中海水所占体积,最后对水力旋流器的分离效率进行计算.

根据以上分析,用 α_w 和 α_H 表示进料口海水和天然气水合物的体积分数;用 β_w 和 β_H 表示溢流口海水和天然气水合物的体积分数;用 ϑ_w 和 ϑ_H 表示底流口海水和天然气水合物的体积分数,则有有用相的各体积分数计算式为

$$\alpha = \frac{\alpha_H}{1 - \alpha_w} \times 100 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\beta_H}{1 - \beta_w} \times 100 \quad (4)$$

$$\vartheta = \frac{\vartheta_H}{1 - \vartheta_w} \times 100 \quad (5)$$

将式(3)~(5)带入式(2),并令 $\gamma = \frac{\alpha_H}{1 - \alpha_w}$ 、 $\delta =$

$\frac{\beta_H(1 - \alpha_w)}{\alpha_H(1 - \beta_w)}$ 、 $\theta = \frac{\vartheta_H(1 - \alpha_w)}{\alpha_H(1 - \vartheta_w)}$,得到适用于海底水合物混合浆体的水力旋流器分离效率计算式为

$$E = \frac{(1 - \theta)(\delta - 1)}{(\delta - \theta)(1 - \gamma)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: γ 为水力旋流器进料口中去除海水后的天然气水合物的体积分数; δ 为水力旋流器溢流口中去除海水后的天然气水合物的体积分数与 γ 的比值; θ 为水力旋流器底流口中去除海水后的天然气水合物的体积分数与 γ 的比值. α_w 、 α_H 、 β_w 、 β_H 、 ϑ_w 和 ϑ_H 的值均可从有限元计算结果中提取.

3 仿真模型建立及边界条件处理

3.1 有限元模型的建立

本文采用Gambit软件^[7-8]建立了水力旋流器的有限元模型,由于结构化网格在Fluent计算时更加

精确,收敛性也更好^[9-12],因此本文采用结构化网格的划分方法.为解决水力旋流器入口与筒体连接处结构化网格划分的难题,本文采用了多区域网格划分的方法,各区域重合的2个面设置为一对interface面.图2为该水力旋流器的网格划分示意图.网格总数为370 263个.

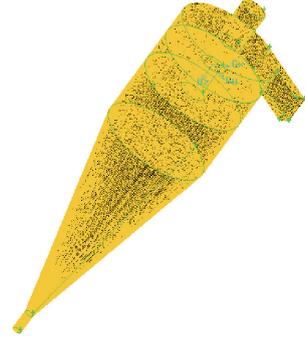


图2 水力旋流器的网格划分

Fig.2 Finite element mesh generation of hydrocyclone

水合物混合浆体在水力旋流器内部的运动十分复杂,特别在水力旋流器的内壁及中心轴线附近更加复杂,因此在体网格划分时,适当提高了这些地方网格的密度,从而更真实地反映流体的实际运动情况.

3.2 介质物性参数及边界条件设定

本文所涉及的多相流组分有泥沙、海水、天然气水合物,其中泥沙和天然气水合物为颗粒状的固体,海水为液体;在进行模拟过程中使用介质的物性参数为:海水的密度 $\rho_w = 1\,025\text{ kg/m}^3$,海水的动力黏度 $\mu_w = 0.001\,7\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,泥沙流体的密度 $\rho_s = 2\,600\text{ kg/m}^3$,泥沙流体的动力黏度 $\mu_s = 1.72 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,天然气水合物流体的密度 $\rho_H = 600\text{ kg/m}^3$,天然气水合物流体的动力黏度 $\mu_H = 1.2 \times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$.

入口采用Velocity-inlet边界条件,海水、天然气水合物和泥沙三相流体均匀混合,并垂直入口边界流入,入口速度为 $V_i = 8\text{ m/s}$,同时给定离散相(天然气水合物和泥沙)的体积分数和入口的水力直径,设定入口的湍流强度^[13]为5%及水力直径24.8 mm.

该水力旋流器模型的溢流口和底流口均采用Outflow边界条件,指定2个出口回流比,2个出口的湍流强度均设为10%.

壁面边界按无滑移边界条件处理.

4 水力旋流器数值模拟结果与分析

4.1 分离效率的计算

从有限元的计算结果中可以得到

$$\alpha_w = 70\%; \alpha_H = 20\% \quad (7)$$

$$\beta_w = 57.966\%; \beta_H = 42.035\% \quad (8)$$

$$\vartheta_w = 58.289\%; \vartheta_H = 15.843\% \quad (9)$$

将以上结果带入式(6)中,计算得到该水力旋流器的分离效率为

$$E = \frac{(1-\theta)(\delta-1)}{(\delta-\theta)(1-\gamma)} \times 100\% = 69.38\% \quad (10)$$

故该结构的水力旋流器的分离效率为 69.38%。

4.2 速度分布规律

在图3中,水力旋流器内靠近壁面的速度基本为零,速度大小从壁面到轴心沿径向呈先增大后减小的趋势,在溢流管内壁面附近的位置时出现最大值,在水力旋流器中心附近位置出现最小值,该现象与王光谦等^[14]、马艺等^[15]的分析结果基本一致。在整个水力旋流器中,其速度分布较为对称,整体速度分布呈“M”状。

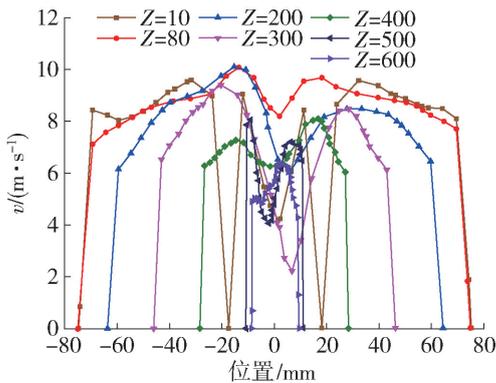


图3 各截面速度分布规律

Fig.3 Rules of velocity distribution in each cross-section

4.3 压力分布规律

如图4所示,从图中可以看出,水力旋流器内的静压从内壁面沿径向到轴心逐步减小。从前面确定的轴向零速包络面^[16-17]也可以看出,在径向方向上,外旋流的压力梯度小于内旋流的压力梯度,所以在水力旋流器的中心区域出现了负压区。

4.4 密度分布规律

各相流体在离心力与阻力的共同作用下,泥砂靠近水力旋流器的壁面分布,天然气水合物分布于水力旋流器的轴心位置,而绝大部分海水则分布于

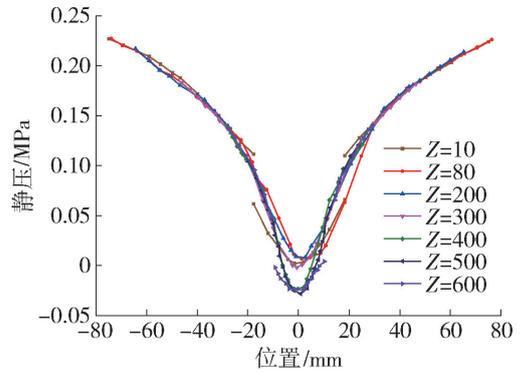


图4 各截面沿径向静压分布规律

Fig.4 Rules of static pressure distribution in each cross-section

泥砂与水合物之间,因此混合浆体在水力旋流器中的密度沿径向由轴心到壁面逐渐增大,该现象在图5的各截面沿径向密度分布曲线图可以直观看出。

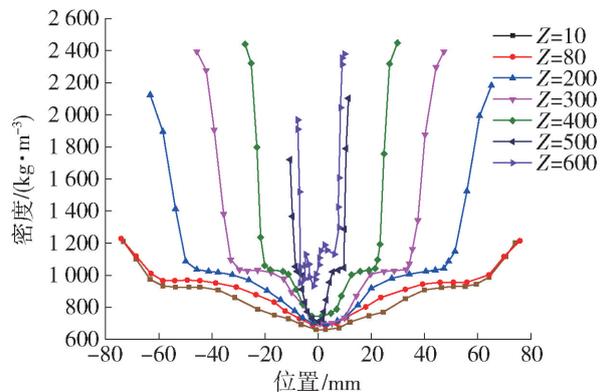


图5 各截面沿径向密度分布规律

Fig.5 Rules of density distribution in each cross-section

5 水力旋流器正交试验优化

王振波等^[18]、郭广东等^[19]分别对水力旋流器的结构参数、操作参数进行了分析研究。在分析结构参数和操作参数对水力旋流器分离效率的影响时,实验中用到的不同结构的水力旋流器众多,实验成本太高、操作烦琐,故在此采用数值模拟的方法替代实验。本文以水力旋流器分离效率为评价指标,利用正交试验的方法分别制订了结构参数和操作参数正交试验的因素水平表,如表1、2所示。表中:A为进料口面积;B为底流口直径;C为溢流口直径;D为溢流管插入深度;E为锥角;F为体积分数;G为速度;H为分流比。水力旋流器结构参数及操作参数的优化试验方案及试验结果如表3、4所示。

表1 水力旋流器结构参数的正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal factor level of hydrocyclone's structural parameters

水平	因素				
	A	B	C	D	E
1	360	12	28	70	16
2	480	15	32	80	18
3	600	18	36	90	20
4	720	21	40	100	22
5	840	24	45	110	24

表2 水力旋流器操作参数的正交试验因素水平表

Table 2 Orthogonal factor level of hydrocyclone's operating parameters

水平	因素				
	F			G	H (底流-溢流)
	海水	泥砂	水合物		
1	0.94	0.02	0.04	4	0.12~0.88
2	0.85	0.05	0.10	6	0.16~0.84
3	0.70	0.10	0.20	8	0.2~0.8
4	0.55	0.15	0.30	10	0.24~0.76
5	0.40	0.20	0.40	12	0.28~0.72

表3 水力旋流器结构参数优化的试验方案及试验结果(n=5)

Table 3 Scheme of orthogonal and the results of test for hydrocyclone's structural parameters optimization (n=5)

模拟序号	因素					分离效率/%
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	81.64
2	1	2	2	2	2	78.25
3	1	3	3	3	3	76.08
4	1	4	4	4	4	75.47
5	1	5	5	5	5	74.82
6	2	1	2	3	4	63.92
7	2	2	3	4	5	73.65
8	2	3	4	5	1	89.17
9	2	4	5	1	2	87.35
10	2	5	1	2	3	75.16
11	3	1	3	5	2	76.53
12	3	2	4	1	3	74.18
13	3	3	5	2	4	69.71
14	3	4	1	3	5	64.57
15	3	5	2	4	1	84.52
16	4	1	4	2	5	65.93
17	4	2	5	3	1	73.94
18	4	3	1	4	2	77.16
19	4	4	2	5	3	76.01
20	4	5	3	1	4	72.43
21	5	1	5	4	3	73.91
22	5	2	1	5	4	68.57
23	5	3	2	1	5	61.39
24	5	4	3	2	1	76.53
25	5	5	4	3	2	73.52
k_1	77.25	72.39	73.42	75.40	81.16	
k_2	77.85	73.72	72.82	73.12	78.56	
k_3	73.90	74.70	75.04	70.41	75.07	
k_4	73.09	75.99	75.65	76.94	70.02	
k_5	70.78	76.09	75.95	77.02	68.07	
极差 R	7.07	3.70	2.53	6.61	13.09	
因素主次顺序	E > A > D > B > C					
优水平	A2	B5	C5	D5	E1	
优组合	A2B5C5D5E1					

表4 水力旋流器操作参数优化的试验方案及试验结果

Table 4 Scheme of orthogonal and the results of test for hydrocyclone's operating parameters optimization

模拟序号	因素			分离效率/%
	F	G	H	
1	1	1	1	91.07
2	1	2	2	95.96
3	1	3	3	96.17
4	1	4	4	97.26
5	1	5	5	98.32
6	2	2	1	93.11
7	2	3	2	95.57
8	2	4	3	96.79
9	2	5	4	97.13
10	2	1	5	89.53
11	3	3	1	93.47
12	3	4	2	95.39
13	3	5	3	95.27
14	3	1	4	91.94
15	3	2	5	91.35
16	4	4	1	95.61
17	4	5	2	93.83
18	4	1	3	92.19
19	4	2	4	91.95
20	4	3	5	90.73
21	5	5	1	93.37
22	5	1	2	95.06
23	5	2	3	94.34
24	5	3	4	92.18
25	5	4	5	89.39
k_1	95.76	91.96	93.33	
k_2	94.43	93.34	95.16	
k_3	93.48	93.62	94.95	
k_4	92.86	94.89	94.09	
k_5	92.87	95.58	91.86	
极差 R	2.89	3.63	3.30	
因素主次顺序	G > H > F			
优水平	F1	G5	H2	
优组合	F1G5H2			

通过水力旋流器结构参数的正交试验优化,试验结果如表3所示,得到其最优结构参数组合为A2B5C5D5E1,由于在本次的正交试验中并没有这

一组试验的安排,故需要按最优结构参数组合,重新进行水力旋流器有限元模型建立,并进行数值仿真模拟,从而计算得到该最佳结构参数组合下的水力旋流器的分离效率为94.52%。该分离效率提升到了初始方案分离效率的1.36倍。

以此为基础进一步对水力旋流器的操作参数进行正交试验优化,试验结果如表4所示,得到其最优操作参数组合为F1G5H2,同样在本次的正交试验中并没有这一组试验的安排,其分离效率为99.38%,分离效率进一步提高了5.15%。

6 结论

1) 基于海底水合物混合浆体(即液-固-固)三相流的特征,重新定义了汉考克分离效率计算公式,经过推导得出了改进后的汉考克分离效率计算公式。

2) 基于雷诺应力模型研究了一种适合于液-固-固三相流的流场模拟分析方法,通过数值模拟分析,得到了水力旋流器内部的速度、压力和密度等参数的分布规律,其流场分布规律与水力旋流器的流场理论分析结果基本一致。由此论证了该数值模拟方法的正确性。

3) 运用正交试验的方法,以水力旋流器分离效率为优化目标,对其结构参数和操作参数进行了正交试验优化,分别得到了结构参数和操作参数的最佳组合方案。该组合方案使水力旋流器分离效率提升到了初始方案分离效率的1.43倍。该成果可以作为海底水合物混合浆体分离用水力旋流器的结构设计及生产操作的参考依据。

参考文献:

- [1] 郭平,刘士鑫,杜建芬. 天然气水合物气藏开发[M]. 北京:石油工业出版社,2006:7-10.
- [2] 黄永祥,张光学. 我国海域天然气水合物地质—地球物理特征及前景[M]. 北京:地质出版社,2009:28-32.
- [3] 赵庆国,张明贤. 水力旋流器分离技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003:12-14.
- [4] BRADLEY D. Hydrocyclones [M]. London: Permamon Press, 1965: 18-29.
- [5] BHASKAR K U, MURTHY Y R, RAJU M R, et al. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone [J]. Minerals Engineering, 2006, 20(1): 60-71.
- [6] 庞学诗. 水力旋流器技术与应用[M]. 北京:中国石化

- 出版社, 2010: 195-204.
- [7] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 154-184.
- [8] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 142-179.
- [9] 孙启才, 雷明光, 陈文梅. 水力旋流器内单相液体速度场的研究[J]. 流体工程, 1988(6): 341-349.
SUN Qi-cai, LEI Ming-guang, CHEN Wen-mei. The study of velocity field for single phase liquid in hydrocyclone [J]. Fluid Engineering, 1988 (6): 341-349. (in Chinese)
- [10] IPATE G, CĂSĂNDROIU T. Numerical study of liquid-solid separation [J]. U P B Sci Bull: Series D, 2007, 69(4): 83-94.
- [11] PALADINO E, AGUIRRE J, QUINTELLA E. Developing multiphase models for liquid-liquid hydrocyclone flow [C] // International Conference on Multiphase Flow. Leipzig: Technische Universität Darmstadt, 2007: 9-13.
- [12] 杨荣, 李学恒, 陶文铨, 等. QUICK 与多种差分方案的比较与计算[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1): 593-597.
YANG Mo, LI Xue-heng, TAO Wen-quan, et al. Computation and comparison for heat and fluid flow using a QUICK and other difference schemes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20 (1): 593-597. (in Chinese)
- [13] 邹宽, 杨荣, 曹玮, 等. 水力旋流器湍流流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 127-129.
ZOU Kuan, YANG Mo, CAO Wei, et al. Numerical simulation of turbulent flow in a hydrocyclone [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25 (1): 127-129. (in Chinese)
- [14] 王光谦, 倪晋仁. 固液两相流速分布特性的试验研究[J]. 水利学报, 1992(11): 43-49.
WANG Guang-qian, NI Jin-ren. Experimental study on velocity distribution characteristics of solid-liquid two-phase flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992 (11): 43-49. (in Chinese)
- [15] 马艺, 王振波, 金有海. 水力旋流器径向压力分布及能耗分析[J]. 流体机械, 2009, 37(12): 27-30.
MA Yi, WANG Zhen-bo, JIN You-hai. Pressure distribution and energy dissipation analysis of hydrocyclone [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 27-30. (in Chinese)
- [16] 刘诚, 沈永明, 唐军. 水平方管内固液两相流动特性数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 767-773.
LIU Cheng, SHEN Yong-ming, TANG Jun. Numerical simulation of liquid-particle two-phase flow in horizontal rectangular pipes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 767-773. (in Chinese)
- [17] 陈立, 林鹏, 叶小云. 泥沙对挟沙水流流动结构影响的研究[J]. 水利学报, 2003(9): 39-42.
CHEN Li, LIN Peng, YE Xiao-yun. Influence of sediment particles on open channel flow structure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(9): 39-42. (in Chinese)
- [18] 王振波, 陈志军, 金有海, 等. 结构参数对旋流沉降组合油水分离器性能的影响[J]. 化工机械, 2010, 37(1): 1-4.
WANG Zhen-bo, CHEN Zhi-jun, JIN You-hai, et al. Influence of the structure parameters on the performance of the oil-water separators with a combination of whirl and settlement [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2010, 37(1): 1-4. (in Chinese)
- [19] 郭广东, 邓松圣, 张福伦. 操作参数对固-液-液三相水力旋流器分离效率的影响[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(5): 17-19.
GUO Guang-dong, DENG Song-sheng, ZHANG Fu-lun. Effects of operating conditions on separation efficiency of three-phase solid-liquid-liquid hydrocyclones [J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(5): 17-19. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)