

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2010.06.0018

柱型旋流器内单相流场压降的实验研究*

刘海飞¹, 邓晓辉², 罗东红², 许晶禹¹, 吴应湘¹, 郑之初¹

(1.中国科学院力学研究所, 北京 100190, E-mail: liuhaifei1024@gmail.com;

2.中国海洋石油总公司深圳分公司, 广东 深圳 518067)

摘要: 对新型油水分离器关键装置柱型旋流器进行了性能实验研究, 得到了压降、压降比与进口流量和溢流比之间的关系。结果表明, 柱型旋流器内压降随着流量的增大而增大, 呈抛物线型增长; 压降比与溢流比之间呈线性关系。给出了计算旋流器压降的经验关系式。这些结果对柱型旋流器的设计运行和操作控制有着重要的指导作用, 目前已用于南海平台油水分离器的现场实验。

关键词: 柱型旋流器; 压降比; 流量; 溢流比

中图分类号: O351.2

文献标识码: A

Experimental study of pressure drop of single phase in cylindrical cyclone

LIU Hai-fei¹, DENG Xiao-hui², LUO Dong-hong², XU Jing-yu¹,
WU Ying-xiang¹, ZHENG Zhi-chu¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Shenzhen Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Shenzhen 518067, China)

Abstract: The cylindrical cyclone which is an important part of a new-style oil-water separator was studied by experiment. The relationships between pressure drop, pressure drop ratio and inlet flow rate, and flow split-ratio were obtained. The experiment results indicate that the pressure drop in cylindrical cyclone increases parabolically with the increase of inlet flow rate and the pressure drop ratio is linear with the flow split-ratio. An experimental relation is concluded to calculate the pressure drop. These results will improve the local operation of cylindrical cyclone as well as the control performance and guide the local experiment in Nanhai's offshore platform.

Key words: cylindrical cyclone; pressure drop ratio; flow rate; split-ratio

* 收稿日期: 2010-10-20(2010-11-01 修改稿)

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题项目“海相礁灰岩稠油油藏(特)高含水期精细开发技术研究”(2008ZX05024-004-010)

作者简介: 刘海飞(1982-), 男, 江西上饶人, 博士研究生.

通信作者: 吴应湘, E-mail: yxwu@imech.ac.cn

1 引言

随着油田开采时间的增长，陆上大部分油田产出原油的含水率逐渐增高，有的油田甚至高达 90% 以上^[1]。同时海洋石油的大规模开采，对油、气、水的多相混输和分离技术提出了新的挑战。产量和含水率的增高以及人们对环境保护意识的提高，都对油田油水处理工艺提出了更高的要求。传统陆上和海上油田多相分离器主要存在着设备体积庞大、需要多级组合分离、分离时间长等缺点^[2,3]。因此，发展紧凑型的高效油水分离器成为目前海洋工程研究的热点^[4]。

“十·五”期间，中国科学院力学研究所与中国海洋石油总公司在重大科技合作项目中，提出并设计了一种小型、快速的复合式高效油水分离器^[5]。该分离器综合利用了离心、重力和膨胀等多种分离原理，其技术指标达到了油中含水小于 1% 和水中含油小于 1000ppm，并在陆上油田得到了成功应用。为了适应海上平台，特别是深海平台上对油水分离设备的体积和重量的严格要求，课题组近期提出了将 T 型多分岔管路装置与柱型旋流器相结合的新型管道式油水分离器^[6,7]，如图 1 所示。该分离器具有结构简单、体积小、重量轻和处理时间短等优点，在油水处理和污水排放上有着广泛的应用前景。柱型旋流器是该新型管道式油水分离器的重要组成部分。

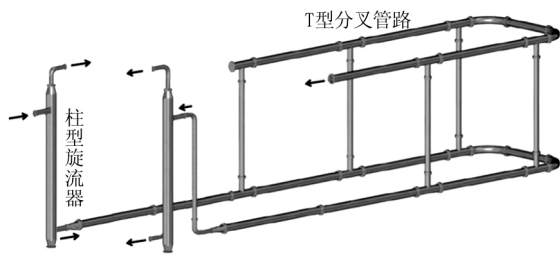


图 1 新型管道式油水分离器

柱型旋流器利用油水两相的密度差，在离心力作用下进行分离。油水混合物从水平管道以切线方式进入柱型旋流器，形成高速旋转流场，产生强大离心力，而油、水两相之间存在密度差，各相所受的离心力不同。重质相水在离心力的作用下流向旋流器内壁，并沿着器壁以螺旋线形式从底流口流出；而轻质相油聚集在旋流器中心部位，形成油心，经溢流口流出旋流器。旋流分离器虽然结构简单，但其分离过程相当复杂^[8,9]，受到了各种因素的影响制约。压降是旋流器的一个重要特性参数^[10-12]，在旋流器的工程设计、性能预测以及现场运行控制中都起着重要的指导意义，而且压降也与旋流器在使用过程中的能耗指标密切相关^[13,14]。本文设计了柱

型旋流器，对其单相流场的压力特性进行实验研究，为新型管道式油水分离器的可行性提供实验依据。

2 实验部分

2.1 实验装置

实验是在中国科学院力学研究所多相流实验平台上进行的，其流程见图 2。实验装置主要由供给系统、柱型旋流器和数据采集系统等组成。本实验为单相流实验，以水为实验介质。水相由水泵驱动后，经过电磁流量计，沿着管路以切线方式进入旋流器。经柱型旋流器后，由溢流口和底流口流出的液体分别进入混合罐，然后通过电磁阀返回到水箱，以便循环利用。

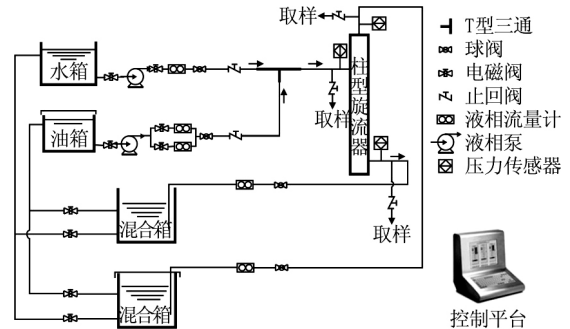
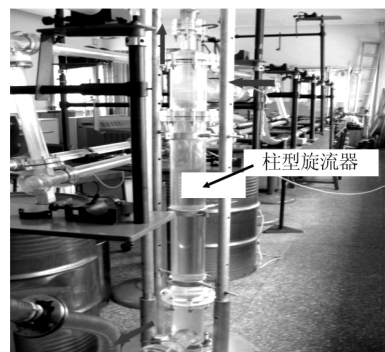
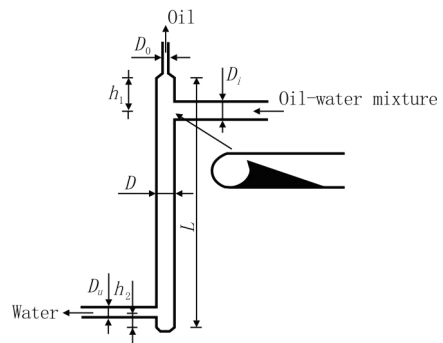


图 2 实验流程示意图



(a)



(b)

图 3 柱型旋流器结构示意图

实验所采用的柱型旋流器如图 3 所示, 旋流器的材料为有机玻璃。图 3 (a) 为室内实物照片, 图 3 (b) 为结构示意图。旋流器柱段直径 D 为 100 mm, 长 L 为 1590 mm, 切向入口直径 D_i 为 100 mm (采用截面面积为 20% 的缩颈), 溢流口直径 D_o 为 30 mm, 底流口直径 D_u 为 60 mm, 切向入口与柱段顶部的距离 h_1 为 160 mm, 底流口与柱段底部的距离 h_2 为 80 mm。

2.2 数据采集系统

水相经水泵驱动后, 通过电磁流量计进行计量; 溢流口处流量通过多次接样计量。在旋流器的入口和两个出口处, 都安置了压力传感器和取样装置, 且在溢流口和底流口附近安装了球阀, 用来调节旋流器的溢流比。其中, 压力信号采用 CYB13 隔离式压力变送器测量后, 应用 DAOP-12H 数据采集系统进行采集, 采样频率为 500Hz。

3 实验结果分析与讨论

在旋流器的研究与应用中, 溢流比 fs 是指旋流器溢流口流量 Q_o 与进口流量 Q_i 之间的比值,

$$fs = \frac{Q_o}{Q_i} \quad (1)$$

压降与压降比 PDR (pressure drop ratio) 分别定义为

$$\Delta P_{i-o} = P_i - P_o \quad (2)$$

$$\Delta P_{i-u} = P_i - P_u \quad (3)$$

$$PDR = \frac{\Delta P_{i-o}}{\Delta P_{i-u}} = \frac{P_i - P_o}{P_i - P_u} \quad (4)$$

式中, P_i 、 P_o 和 P_u 分别是旋流器进口、溢流口和底流口的压力, ΔP_{i-o} 是指进口与溢流口之间的压差, ΔP_{i-u} 是指进口与底流口之间的压差。

旋流器的雷诺数表征旋流器内流体惯性与粘性摩擦力之比, 其定义式为

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{4 \rho Q_i}{\mu \pi D} \quad (5)$$

式中, D 为柱型旋流器的直径, ρ 和 μ 分别是旋流器内液体的密度和动力粘度, v 是旋流器的特征速度, $v = 4Q_i / \pi D^2$ 。

Euler 数表征旋流器内流体压力与惯性力的比值, 其计算式为

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho v^2 / 2} = \frac{\Delta P}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{4Q_i}{\pi D^2} \right)^2} = \frac{\pi^2 D^4 \Delta P}{8 \rho Q_i^2} \quad (6)$$

由于 ΔP 为压降, 故在旋流器内, 有两个特征 Eu 准数, 分别是底流 Eu_u 准数和溢流 Eu_o 准数。

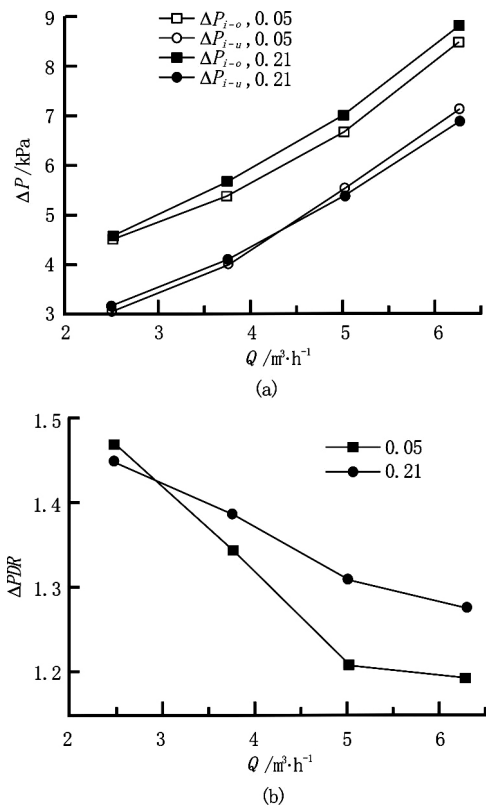


图 4 压降和压降比与流量之间的关系

3.1 流量对压降的影响

实验中以水作为单相流体介质, 选取了在 2.5、3.75、5、6.25 m^3/h 四种流量工况下进行实验, 以此来分析在不同流量下, 压降、压降比的变化关系。实验时通过调节溢流口和底流口处球阀, 保证在不同的入口流量下有着相同的溢流比, 并当系统运行稳定后, 通过系统控制台对旋流器入口和两个出口进行压力数据的采集。图 4 (a) 所示为压降与流量之间的关系。从图中可以看出, 在相同的溢流比下, 随着流量的增加, 柱型旋流器的进口与溢流口之间的压差 ΔP_{i-o} 以及进口与底流口之间的压差 ΔP_{i-u}

均以抛物线型方式增大；溢流比的变化对 ΔP_{i-o} 有较大的影响，而对 ΔP_{i-u} 值的影响较小，且增大溢流比， ΔP_{i-o} 随之有所增加，但是 ΔP_{i-u} 却基本保持不变。图 4 (b) 为压降比与流量之间的关系图。由图中可见，随着流量的不断增大，旋流器的压降比逐渐减小，且在流量较小阶段，压降比递减的较快，在较大流量时，压降比变化趋缓；而且在小溢流比下，压降比变化较大溢流比迅速。从压降、压降比与流量之间的关系中，可说明溢流压力损失增加的幅度大于底流压力损失增加的幅度。在旋流器结构一定的情况下，入口流量的变化直接反应了入口流速的变化，而旋流器的分离加速度由入口流速决定，即流量决定了分离加速度。在油田污水处理中，污水中的含油量很小，导致了分散中的油滴颗粒非常小。为了有效地处理这类低含油污水，有必要大幅度提高旋流器内的分离加速度，也即在一定的条件下提高旋流器的处理量，而大处理量带来的是大压降。所以，为了更高效地处理油田污水，需要消耗更多的能量。高效率与低能耗是旋流分离器内的一对相互矛盾的指标参数，如何平衡两者的关系是旋流器的一个重要研究课题。

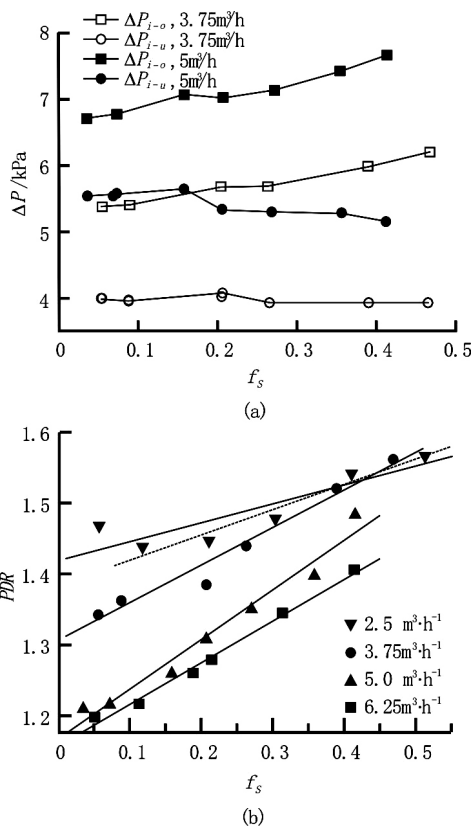


图 5 压降和压降比与溢流比之间的关系

3.2 溢流比对压降的影响

在一定流量下，通过调节溢流口出口处的球阀，改变旋流器的溢流比 f_s ，测定压降、压降比与

分流比之间的关系。图 5 (a) 所示为进口流量在 $3.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 下，测得的进口与溢流口之间的压差 ΔP_{i-o} 和进口与底流口之间的压差 ΔP_{i-u} 随溢流比变化的曲线。实验结果表明，随着溢流比的增大， ΔP_{i-o} 逐渐上升，而 ΔP_{i-u} 呈略微下降的趋势或基本保持不变，这也说明了溢流比对 ΔP_{i-o} 的影响更大。在保持进口流量不变时，随着溢流比的增加，底流流量降低，而溢流流量增加，这样向溢流口方向运动的流体旋转速度加快，流体的角动量增大了，从而使溢流口附近的压力随之降低，表现为 ΔP_{i-o} 值逐渐变大。压降比与溢流比之间的关系如图 5 (b) 所示。从图中可以看出，随着溢流比的增大，压降比 PDR 呈现出线性变化的趋势。在流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，第一个实验点的压降比值表现出异常，这可能是实验过程带来的误差所造成。忽略第一个点后，线性插值直线如图中虚线所示。四种流量工况下，实验点线性回归的相关系数分别为 98.52% 、 97.70% 、 98.41% 和 99.62% 。这就进一步说明，在柱型旋流器中，压降比与溢流比成线性关系。这一线性关系的结论对于旋流器在实际运行和操作控制中起着非常重要的作用。从图中还可以得到，随着流量的增大，压降比的值却减小了。

3.3 Eu 与 Re 之间的关系

旋流器内的 Eu 数与 Re 数之间有如下关系式^[15],

$$Eu = k_p (Re)^{n_p} \quad (7)$$

式中， k_p 和 n_p 为旋流器的经验常数，与旋流器的结构特征有关，可由实验确定。

根据 Eu 数的定义式(6)可得

$$\Delta P = Eu \frac{8\rho Q_i^2}{\pi^2 D^4} = Eu \cdot Re^2 \cdot \frac{\mu^2}{2\rho D^2} \quad (8)$$

于是有

$$\Delta P = \frac{k_p \mu^2}{2\rho D^2} \cdot Re^{2+n_p} \quad (9)$$

图 6 所示为柱型旋流器单相流场中 Eu 数与 Re 数之间的关系图。实验中，固定旋流器的溢流比，在四种不同的 Re 数下，分别得到了溢流 Eu_o 数和底流 Eu_u 数。从曲线图中可知，随着 Re 数的增大， Eu 数均逐渐减小。且当 Re 一定时， Eu_o 值大于

Eu_u , 这就说明了当 Re 不变时, 旋流器的溢流压降值大于底流压降值。按照式(7)给出的 Eu 与 Re 之间的关系, 由实验数据可以回归得到方程,

$$Eu_o = 2.3625 \times 10^8 (Re)^{-1.3467} \quad (10)$$

$$Eu_u = 4.5047 \times 10^7 (Re)^{-1.2054} \quad (11)$$

由上面两式可以分别得到旋流器的溢流与底流的 k_p 和 n_p 值。

从图 6 中还可得出, 当旋流器结构一定时, 溢流比对 Eu 数的影响很小, 即对于一定结构的旋流器, 在溢流比对压降的变化影响可忽略的情况下, 可以根据式(9)来计算旋流器的压降值。

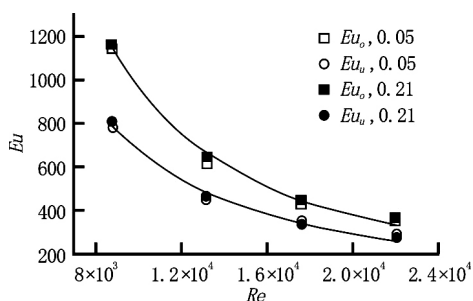


图 6 Eu 数与 Re 数之间的关系

在本文实验的基础上, 根据南海采油平台的处理量、分离指标和流动参数, 设计了新型管道式油水分离器——T型多分岔管路与柱型旋流器相结合的油水分离器(图 7), 该分离器集离心、重力、膨胀等多种分离原理为一体。最近在南海平台对此分离器进行了现场试验。试验结果表明, 该系统能够有效地处理排海污水中的含油, 处理后的污水含油率达到了平台方面提出的排放指标要求。在入口条件相同的情况下, 处理后的水中含油为 16 ppm, 达到了油水分离器的世界先进水平。

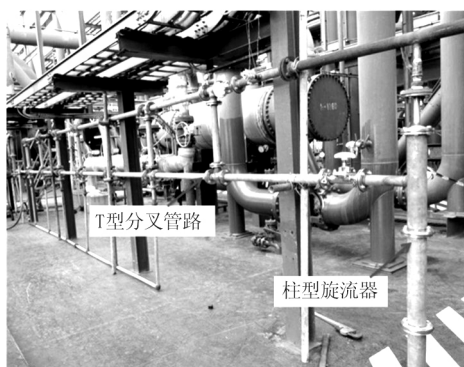


图 7 安装在平台上的新型管道式油水分离器

4 结论

本文建成了一套柱型旋流器的试验装置, 并用此装置进行了单相流实验, 分别在四种流量工况下测定了旋流器进出口的压力变化, 得到了压降和压降比与流量和溢流比的变化关系, 为进一步设计高效油水分离器的实验做了基础工作, 并为旋流分离器压力系统的选择提供参考。由本文的试验结果可得如下结论:

(1) 在相同溢流比下, 柱型旋流器的压降随着进口流量的增大而增大, 呈现出抛物线型的变化趋势; 而压降比随着进口流量的增大减小。

(2) 柱型旋流器的压降比与溢流比之间呈线性关系; 随着溢流比的增大, 进口-溢流口之间的压差逐渐增大, 而进口-底流口之间的压差呈略微下降的趋势。

(3) 对于一定结构的柱型旋流器, 根据 Eu 数与 Re 数之间的关系, 得到了压降计算的经验关系式。

上述结论在现场初步实验中得到了应用, 为现场油水处理试验提供了操作依据。今后将在压降、溢流比、流量等操作参数和结构参数对柱型旋流器油水分离效率方面做进一步的实验研究。

参 考 文 献:

- [1] 董良飞, 张志杰. 采油废水回注处理技术的现状及展望. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2003, 20(1): 43-49.
DONG Liang-fei, ZHANG Zhi-jie. Present situation and prospect on refilling treatment technology of oil extraction wastewater[J]. Journal of Chang An University (Architecture and Environment Science Edition), 2003, 20(1): 43-49.
- [2] 周永, 吴应湘, 郑之初等. 油水分离技术研究之一——直管和螺旋管的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2004, 19(4): 540-546.
ZHOU Yong, WU Ying-xiang, ZHENG Zhi-chu, et al. Research on oil-water separation technique I —— numerical simulation in both straight and helical pipes[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2004, 19(4): 540-546.
- [3] VAZQUEZ C O, AFANADOR E, GOMEZ L, et al. Oil-water separation in a novel liquid-liquid cylindrical cyclone(LICC) compact separator-experiments and modeling[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(4): 553-564.
- [4] 郑之初, 周永, 郭军, 等. 海上油气混输中的分离技术[C]. 第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水

- 动力学学术会议文集, 香港, 2004. 830-837.
- ZHENG Zhi-chu, ZHOU Yong, GUO Jun, et al. Separation technique for oil-gas multi-phase flow transportation in submarine pipeline[C]. Proceedings of the 17th National Conference on Hydrodynamics and the 6th National Congress on Hydrodynamics, Hong Kong, 2003, 830-837.
- [5] 周永. 高效油气水分离器的机理研究[D]. 中国科学院研究生院硕士论文, 北京, 2004.
- ZHOU Yong. Mechanism study on high-efficiency oil-gas-water separator[D]. M.S. Thesis, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2004.
- [6] 王立洋. 分岔管路内的油水两相流动研究[D]. 中国科学院研究生院博士论文, 北京, 2009.
- WANG Li-yang. An investigation on oil/water two-phase flow inside T-junction pipelines[D]. Ph.D. Dissertation, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2009.
- [7] WANG Li-yang, WU Ying-xiang, ZHENG Zhi-chu, et al. Oil-water two-phase flow inside T-junction[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2):147-153.
- [8] LI Lin, QIU Xiu-yuan, JIN Sheng, et al. Weakly swirling turbulent flow in turbid water hydraulic separation device[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(3): 347-355.
- [9] WANG Li-yang. Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclone[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(3): 408-414.
- [10] CHEN Jian-yi, SHI Ming-xian. A universal model to calculate cyclone pressure drop[J]. Powder Technology, 2007, 171(3): 184-191.
- [11] BELAIDI A, THEW M T. The effect of oil and gas content on the controllability and separation in a de-oiling hydrocyclone[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81(3): 305-314.
- [12] ZHAO Bing-tao. Modeling pressure drop coefficient for cyclone separators: A support vector machine approach[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(19): 4131-4136.
- [13] 李自力, 冯叔初. 除油旋流器压降比的数学模型[J]. 化工学报, 2001, 52(6): 485-489.
- LI Zi-li, FENG Shu-chu. Theoretical and experimental research on pressure drop ratio prediction model of de-oiling hydrocyclone[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(6): 485-489.
- [14] ACVI A., KARAGOZ I. Theoretical investigation of pressure losses in cyclone separators[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(1): 107-117.
- [15] 褚良银. 水力旋流器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- CHU Liang-yin. Hydrocyclone[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998.