

柱状旋流分离器旋转涡核边界分布特性

陈建磊¹, 何利民¹, 罗小明¹, 吕宇玲¹, 韩梦媛², 杨东海¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 胜利勘察设计研究院, 山东东营 257026)

摘要:采用微分雷诺应力模型对柱状旋流分离器气体单相流场中的旋转涡核边界分布特性进行数值模拟, 阐述涡核的衰减形态, 考察升气管直径、入口面积以及筒体长度变化对旋转涡核边界分布的影响。结果表明: 零轴速包络边界与旋转涡核边界分属不同面, 二者分布于升气管投影面的两侧; 旋转涡核在分离器中的自然终止形态是涡核尾端弯曲终止于壁面, 并沿壁面做圆周运动; 涡核边界宽度随升气管直径的减小、入口面积的增大而减小; 当筒体较短时, 在较大跨度的升气管直径分布内, 涡核边界沿轴向近似成柱状分布。筒体长度增加会使切向速度沿轴向产生衰减, 涡核边界在升气管入口区域向外扩张, 沿轴向向下逐渐收缩。

关键词:旋流分离器; 切向速度; 零轴速包络面; 涡核; 数值模拟

中图分类号: TQ 051.8

文献标志码: A

Rotating vortex core boundary distribution behavior in cylindrical cyclone separator

CHEN Jian-lei¹, HE Li-min¹, LUO Xiao-ming¹, LÜ Yu-ling¹, HAN Meng-yuan², YANG Dong-hai¹

(1. College of Pipeline & Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Shengli Engineering & Consulting Company Limited, Dongying 257026, China)

Abstract: Differential Reynolds stress model was used to simulate rotating vortex core boundary of gas phase flow field in cylindrical cyclone separator. The attenuation form of vortex core was expounded and the effects of vortex finder diameters, inlet areas and separator lengths on the distribution of rotating vortex core boundary were studied. The results show that zero axial velocity boundary and rotating vortex core boundary are different, which locate on both sides of vortex finder projection surface respectively. The natural termination form of rotating vortex core in separator is that vortex core end stops deviously on the wall of separator and makes circular motion along the wall. Vortex core boundary width decreases with the decrease of vortex finder diameters and the increase of inlet areas. Vortex core boundary in separator with small length presents columnar distribution approximatively among the larger span of vortex finder diameters distribution. The increase of separator length can make tangential velocity attenuate, and vortex core boundary expands outwards at vortex finder inlet and shrinks downwardly along the axial direction.

Key words: cyclone separator; tangential velocity; zero axial velocity envelope; vortex core; numerical simulation

旋流分离器的三维流场可分解成柱坐标系下的切向、轴向与径向 3 个速度分量。流场若以切向速度沿径向的最大切向速度点为界, 可以分为外侧的准自由涡和内侧的准强制涡; 以切向与轴向速度的组合划分, 可以将流动分为外旋流与内旋流; 以轴向速度流动方向划分, 可将流动分为下行流与上行流。

内、外旋流之间与上、下行流之间的交界面是同一个面——零轴速包络面。内、外旋流交界面与准自由涡、准强制涡交界面分属不同面。在物理上, 将准强制涡所包围的区域称为“涡核”, 对涡核的研究多集中在涡核端部, 包括涡核端部在分离器内部的终止形式^[1-3]、涡核长度计算^[4-6]以及涡核尾端流场的非

稳态波动和由此引起的分散相返混回流现象^[7-8]。在分离器实际应用中,筒体长度一般小于涡核的自然衰减终止长度,非自然终止的旋转涡核边界在分离器内部的分布特性则很少研究。基于此,笔者采用 FLUENT 数值模拟方法,以柱状旋流分离器为例,对其旋转涡核边界分布特性及其受结构参数变化的影响进行研究。

1 结构模型与数值方法

1.1 模型与网格离散

图1为矩形直入口柱状旋流分离器结构示意图。其中, a 、 b 、筒体直径 D 、升气管直径 D_e 、升气管插入深度 S 和筒体长度 H 分别为85、210、390、180、210、1400 mm。 z 坐标原点位于分离器顶盖面的中心轴线上,向上为正,分离器分区域划分非结构六面体网格。

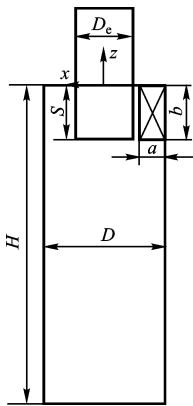


图1 柱状旋流分离器结构示意图

Fig.1 Sketch map of cylindrical cyclone separator

1.2 数学方法与边界条件

应用二阶矩微分雷诺应力模型(DRSM)模拟分离器中的非稳态不可压缩流动^[9],对流项离散格式选择二阶迎风格式,压力插补格式采用 PRESTO 格式,压力-速度耦合算法采用对瞬态问题有明显优势的 PISO 算法^[10]。

模拟流动介质为空气,密度为 $1.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,黏度为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,由于流体流动假定为不可压缩,因此入口边界设定为速度入口边界, $v_{\text{in}} = 15 \text{ m/s}$,并给出入口边界的湍动能与耗散率^[11]。出口边界按照湍流流动充分发展处理,壁面采用无滑移边界条件。由于靠近固体壁面区域流体流速较低,处于层流状态,层流底层的黏性作用占优,而湍流扩散相对减弱,高雷诺数下的湍流输运方程已不能严格有效,在 FLUENT 中,近壁处用标准壁面函数计算。

1.3 模型验证

首先对 Stairmand 型旋风分离器流场进行模拟,并与 Slack 等^[12]采用 LDA 测量的代表性横截面的切、轴向速度场进行比较。图2为模拟与试验的数据对比。可见模拟与试验数据吻合较好,表明本文所选择的数值模拟方法切实可行。

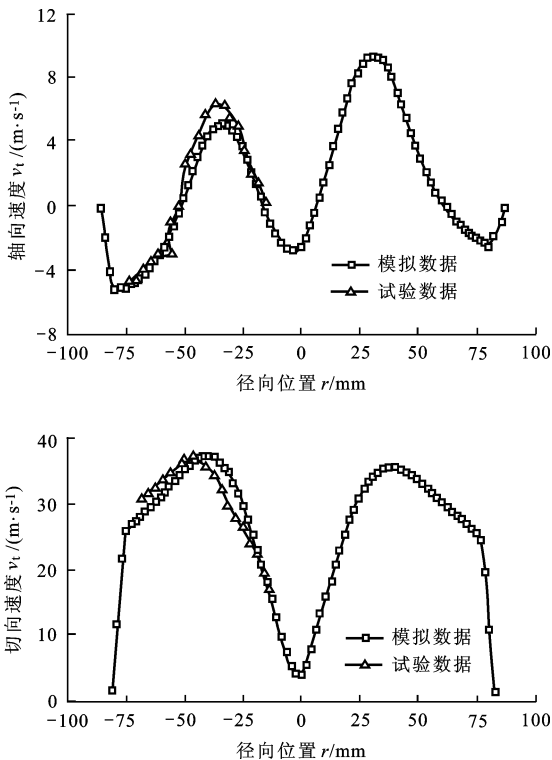


图2 模拟与试验的数据对比

Fig.2 Comparison of numerical and experimental data

2 计算结果及其分析

2.1 切向速度分布

柱状旋流分离器内部切向速度场分布如图3所示。切向速度呈组合涡特征,即靠近外壁的准自由涡和分离器轴心位置的准强制涡。准自由涡区,切向速度沿径向向内逐渐增大;准强制涡区,切向速度沿径向向外逐渐增大。准自由涡与准强制涡交汇处存在一个切向速度最高点。旋流分离器轴向上各切向速度最高点所包络的涡束就是旋转涡核,切向速度最高点包络面就是涡核边界。通过分析发现,涡核边界与零轴速包络面边界并不重合。图4为分离器涡核边界与零轴速包络面边界之间的相对位置关系。从图4中可以明显看出,零轴速包络面边界位于升气管投影区域之外,涡核边界位于升气管投影区域之内,二者并不重合。

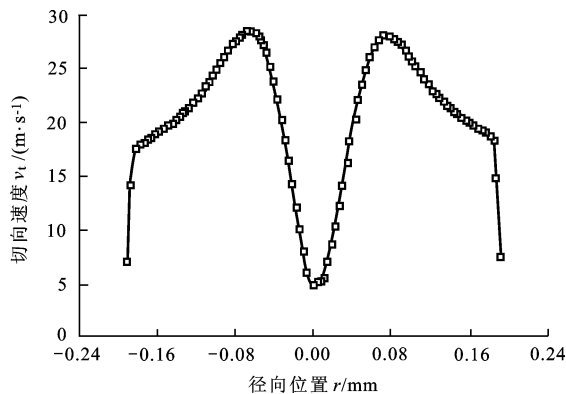


图 3 分离器流场典型切向速度分布

Fig.3 Typical tangential velocity distribution of separator flow field

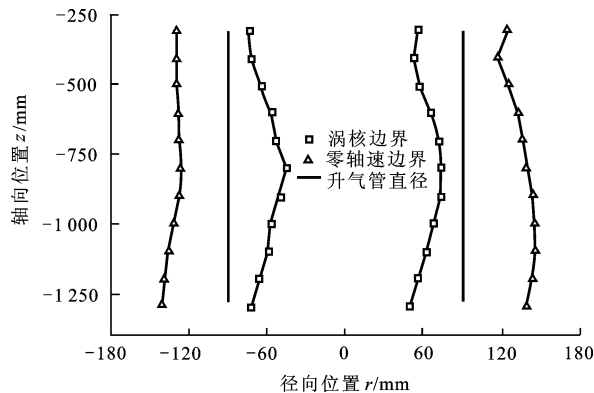


图 4 涡核边界与零轴速边界的相对位置关系

Fig.4 Relative location between vortex core boundary and zero axial velocity boundary

2.2 涡核终止形态

从图 4 同样可以看出,涡核边界一直保持到了分离器底部而没有发生旋涡的自然终止。旋流分离器流场研究中存在自然旋风长的概念,是指从升气管入口到旋转流在分离器中自然结束点的距离。对于旋涡的自然终止形式有两种认识:一是涡核末端产生破裂,呈轴对称状态,涡核端部代表的是一种回流“气泡”运动;二是涡核末端发生弯曲并终止于分离器器壁,终止端点会沿着壁面周围进行旋转,形成环状结构。

自然旋风长与分离器入口面积、筒体直径、升气管直径和筒体长度等结构参数以及流速、物性等操作参数密切相关,这些参数决定了分离器能量的扩散损失、壁面摩擦损失以及旋流耗散损失。围绕着升气管直径与筒体直径比 $d_e = D_e/D$,筒体横截面积与入口面积比 $K_A = \frac{\pi D^2}{4ab}$ 两个特征参数,文献中出现了多个经验公式^[5,13],受分离器结构以及试验条件差异的影响,各经验公式在自然旋风长的预测上存

在较大偏差,不同研究者得出的这两个特征参数对自然旋风长度的影响关系甚至完全相反。通常,柱状旋流分离器的自然旋风长大于同等条件下的柱锥形旋流分离器的。图 1 所示柱状旋流分离器由于筒体长度小于其自然旋风长,因此旋转流动保持了较高的强度,分离器底部壁面对其进行了强行封闭并折流向上,涡核边界一直保持到了分离器底部而没有发生旋涡的自然终止。

自然旋风长与进入分离器的流动能量以及流动能量损失密切相关,能量耗散与分离器结构以及流体的物性均有关系,大多试验的研究对象都是环境空气,物性差异较小。为了对涡核终止形态进行直观表现,做了一个关于流体物性对自然旋风长影响的尝试,选择一个 3 倍于空气黏度的流体,其他参数不变,计算分离器场分布。

图 5 为某一瞬时分离器纵向横截面的切、轴向速度以及静压分布。从图 5 中可以看出,涡核的端点止于筒壁。通过动态观察不同瞬时场分布,可以发现涡核端点在筒壁上不断进行周向旋转,这与文献上得到的涡核末端终止于分离器器壁并沿壁面进行旋转的结论一致。

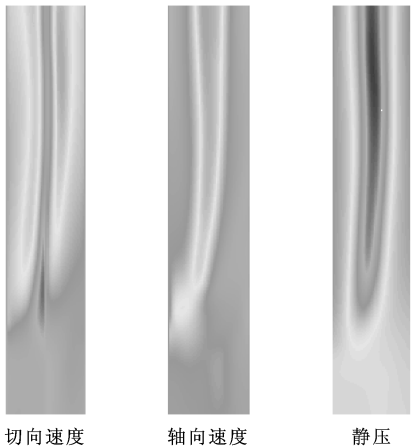


图 5 速度与压力场分布

Fig.5 Distributions of velocity and pressure field

研究对象同样为环境空气,黏度较小,分离器结构参数的变化幅度也不是很大,因此研究范围内的自然旋风长都超出了分离器筒体长度本身,涡核止于分离器底部并折流向上。

2.3 升气管直径

图 6 为不同升气管直径时分离器纵向截面切向速度分布云图。从图 6 中可以看出,由于升气管直径不同引起的流场不稳定对涡核边界沿轴向分布产生很大的影响,升气管直径越大,切向速度场越不稳定,摆动幅度也就越大。关于分离器结构参数变化

对流场产生的不稳定性影响,宋健斐等^[14-16]有过详细分析。从图 6 中同样可以看出,涡核边界的相对宽度随升气管直径的减小而不断减小。

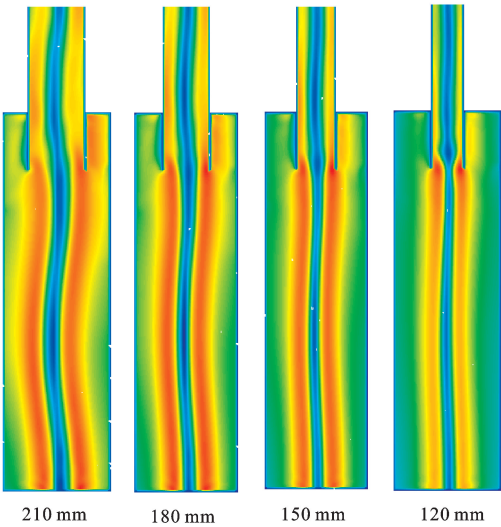


图 6 不同升气管直径下的切向速度

Fig. 6 Tangential velocity distributions of different vortex finder diameters

表 1 为筒体长度 $H=1400\text{ mm}$ 时,不同升气管直径下的分离器在升气管入口以下每隔 100 mm 轴向截面所得涡核边界宽度。

表 1 不同升气管直径下的涡核边界宽度
Table 1 Vortex core boundary width distributions of different vortex finder diameters

轴向位置 z/mm	D_e/mm			
	210	180	150	120
-300	153.7	129.8	110.2	86.6
-400	147.6	126.1	106.3	86.6
-500	139.9	122.0	98.3	94.5
-600	141.4	122.0	106.3	98.4
-700	141.8	125.5	102.0	94.6
-800	136.0	118.3	105.5	96.6
-900	137.8	122.1	105.9	102.4
-1 000	137.9	124.3	106.2	102.4
-1 100	138.9	120.0	106.9	100.6
-1 200	139.9	121.6	106.6	104.2
-1 300	139.9	122.1	114.2	104.1
平均值/ mm	141.35	123.07	106.22	97.36
标准差/ mm	5.07	3.17	4.02	6.34

从表 1 中可以看出,对于不同分离器的同一轴向截面,涡核边界宽度随升气管直径的减小而减小;而对于同一分离器的不同轴向截面,其涡核边界宽度基本相同,偏差基本在 10 mm 以内,尤其是升气管直径 $D_e=180\text{ mm}$ 和 150 mm 时。升气管直径较大和较小时,升气管入口区域的涡核边界宽度分布较敏感, $D_e=210\text{ mm}$ 时,涡核边界宽度偏大; $D_e=$

120 mm 时,涡核边界宽度偏小。

表 1 最后列出了分离器在不同轴向横截面所得涡核边界宽度样本的标准差,直观反映了涡核边界宽度在不同轴向上的分布关系, $D_e=180、150\text{ mm}$ 下的样本标准差较小,因此涡核边界宽度在不同轴向上近似相同; $D_e=210、120\text{ mm}$ 下的样本标准差较大,涡核边界宽度在升气管入口区域分别偏大和偏小。

2.4 入口面积

选取分离器筒体长度 $H=1400\text{ mm}$ 、筒体直径 $D=390\text{ mm}$ 、升气管直径 $D_e=180\text{ mm}$,分析不同入口面积比对涡核边界分布的影响,如图 7 所示(K_A 为分离器筒体截面积与分离器矩形入口面积之比, K_A 越小,入口面积越大)。

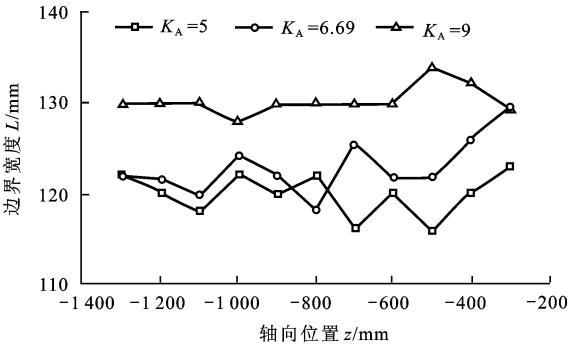


图 7 不同入口面积下的涡核边界宽度
Fig. 7 Vortex core boundary width distributions of different inlet areas

不同 K_A 下的分离器各轴向横截面的涡核边界宽度近似相同。对不同轴向横截面涡核边界宽度进行统计和计算,涡核边界宽度偏差保持在 10 mm 以内,各样本集的数值标准差也维持在一个较小的范围。从图中可以看出,不同轴向横截面的涡核边界宽度随入口面积的增大而减小,而入口面积对涡核宽度的影响小于升气管直径。本研究中不同入口面积是通过固定矩形入口的长度,改变矩形入口的宽度来实现的。入口面积越大,矩形入口的宽度越大,回转变体的过流通道越靠近分离器轴心,导致涡核边界偏向轴心方向,宽度较小。

2.5 筒体长度

旋流分离器流场的不稳定性使涡核边界在不同轴向位置产生摇摆(图 6),因此为了能够形象刻画不同筒体长度分离器在不同轴向位置上涡核边界相对宽度的分布情况,假设分离器内部流场为轴对称分布,将涡核边界沿中心轴一分为二,其沿轴向分布如图 8 所示。

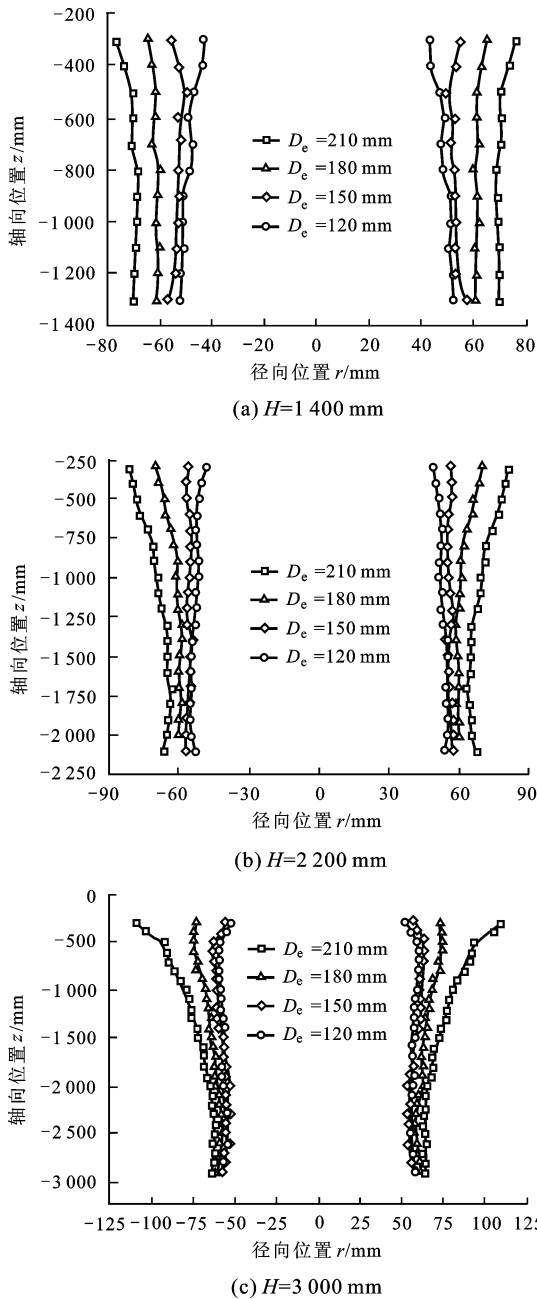


图 8 涡核边界沿轴向的分布

Fig. 8 Vortex core boundary distributions along axial direction

从图 8 中可以看出,针对不同升气管直径的分离器,随着筒体长度的不断增加,其涡核边界宽度变化总体表现为:在筒体长度较短时,升气管直径大小对整个筒体范围内的涡核边界宽度影响不大,影响主要集中在升气管入口区,在大部分升气管直径分布范围,整个分离器涡核边界保持柱状分布,仅在升气管直径非常小分离器的升气管入口区域出现收缩;随着筒体长度的增大,升气管入口区的涡核边界总体来讲具有向外扩张的趋势,壁面摩擦损失增大,切向速度沿轴向产生衰减,涡核边界沿筒体向下逐

渐收缩。拥有不同升气管直径的分离器,随着分离器筒体长度增加,涡核边界从最初保持柱状分布的结构,开始变为上宽下窄,原来升气管入口区域涡核边界收缩分布的结构,开始趋于柱状分布。

3 结 论

(1)柱状旋流分离器的旋转涡核边界与零轴速边界分属不同的面,旋转涡核边界位于升气管投影面的内侧,零轴速边界位于升气管投影面的外侧。

(2)实际工程应用中旋流分离器的筒体长度小于其自然旋风长,当涡核在分离器内部自然终止时,涡核末端会弯曲终止于筒壁,并沿筒壁进行周向旋转。

(3)涡核边界宽度随升气管直径减小和入口面积增大而减小,在筒体长度较小时,在较大跨度的升气管直径分布内,涡核边界沿轴向近似成柱状分布,筒体长度增加会使切向速度沿轴向产生衰减,涡核边界在升气管入口区域向外扩张,并沿轴向向下逐渐收缩。

参考文献:

- [1] PISAREV G I, HOFFMANN A C. Effect of the 'end of the vortex' phenomenon on the particle motion and separation in a swirl tube separator[J]. Powder Technology, 2012,222:101-107.
- [2] PENG W, HOFFMANN A C, DRIES H W A, et al. Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: the nature of the vortex end[J]. Chemical Engineering Science, 2005,60(24):6919-6928.
- [3] PISAREV G I, HOFFMANN A C, PENG Wei-ming, et al. Large eddy simulation of the vortex end in reverse-flow centrifugal separators[J]. Applied Mathematics and Computation, 2011,217(11):5016-5022.
- [4] 钱付平,章名耀. 基于响应曲面法旋风分离器的自然旋风长[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2006,36(2):247-251.
- QIAN Fu-ping, ZHANG Ming-yao. Natural vortex lengths of cyclone separators based on response surface methodology[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2006,36(2):247-251.
- [5] 魏耀东,张静,宋健斐,等. 旋风分离器自然旋风长的试验研究[J]. 热能动力工程, 2010,25(2):206-210.
- WEI Yao-dong, ZHANG Jing, SONG Jian-fei, et al. Experimental study of the natural cyclone length of a cyclone separator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010,25(2):206-210.

- [6] 高翠芝, 孙国刚, 董瑞倩. 旋风分离器旋风长度的分析计算[J]. 石油学报: 石油加工, 2012, 28(1): 94-98.
GAO Cui-zhi, SUN Guo-gang, DONG Rui-qian. Analysis calculation of the vortex length in a gas cyclone[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2012, 28(1): 94-98.
- [7] 吴小林, 王红菊, 时铭显. 防返混锥对旋风分离器旋进涡核的抑制作用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(3): 68-70.
WU Xiao-lin, WANG Hong-ju, SHI Ming-xian. Effect of installation of sticks for stabilizing vortex on restraining PVC in a cyclone separator[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(3): 68-70.
- [8] 吴小林, 熊至宜, 姬忠礼, 等. 旋风分离器旋进涡核的数值模拟[J]. 化工学报, 2007, 58(2): 383-390.
WU Xiao-lin, XIONG Zhi-yi, JI Zhong-li, et al. Numerical simulation of processing vortex core in cyclone separator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(2): 383-390.
- [9] 王振波, 马艺, 金有海. 切流式旋流器内两相流场的模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 136-140.
WANG Zhen-bo, MA Yi, JIN You-hai. Simulation of two-phase flow field in tangential hydrocyclone[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(4): 136-140.
- [10] 金向红, 金有海, 王建军, 等. 轴流式气液旋流分离器内气相流场的数值研究[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(5): 748-755.
JIN Xiang-hong, JIN You-hai, WANG Jian-jun, et al. Numerical simulation of gas-phase flow field in an axial flow type gas-liquid cyclone separator[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2009, 23(5): 748-755.
- [11] WANG B, CHU K W, YU A B. Numerical study of particle fluid flow in a hydrocyclone[J]. Ind Eng Chem Res, 2007, 46: 4695-4705.
- [12] SLACK M D, PRASAD R O, BAKKER A, et al. Advances in cyclone modelling using unstructured grids[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2000, 78(8): 1098-1104.
- [13] 姬忠礼, 吴小林, 时铭显. 旋风分离器自然旋风长的试验研究[J]. 石油学报: 石油加工, 1993, 9(4): 86-91.
JI Zhong-li, WU Xiao-lin, SHI Ming-xian. Experimental research on the natural turning length in the cyclone[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 1993, 9(4): 86-91.
- [14] 宋健斐, 魏耀东, 时铭显. 旋风分离器内流场的非轴对称性特点[J]. 过程工程学报, 2004, 4: 562-566.
SONG Jian-fei, WEI Yao-dong, SHI Ming-xian. Study on asymmetry of gas flow field in cyclone separator[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2004, 4: 562-566.
- [15] 宋健斐, 魏耀东, 时铭显. 蜗壳式旋风分离器气相流场的非轴对称特性的模拟[J]. 化工学报, 2005, 56(8): 1397-1402.
SONG Jian-fei, WEI Yao-dong, SHI Ming-xian. Asymmetry of gas-phase flow field in cyclone separator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(8): 1397-1402.
- [16] 宋健斐, 魏耀东, 时铭显. 蜗壳式旋风分离器内气相流场非轴对称特性分析[J]. 化工学报, 2007, 58(5): 1091-1096.
SONG Jian-fei, WEI Yao-dong, SHI Ming-xian. Analysis of asymmetry of gas-phase flow field in volute cyclone[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(5): 1091-1096.

(编辑 沈玉英)