

文章编号:1673-5005(2008)02-0108-06

气液旋流分离器排气管结构试验

金向红^{1,2}, 金有海¹, 王振波¹, 王建军¹, 汪秀敏³

(1. 中国石油大学 多相流实验室, 山东 东营 257061; 2. 安徽理工大学 化工系, 安徽 淮南 232001;
3. 宁波工程学院 交通系, 浙江 宁波 315000)

摘要:通过对气液旋流分离器分离性能的试验研究发现,排气管的结构尺寸对旋流器分离的临界速度及分离效率有显著影响。相对于传统的直管型排气结构,采用扩散锥形的排气管结构可以有效地削弱旋流分离器内短路流的影响,增大排气心管内液膜的形成速度,从而在保证压力降基本不变的前提下提高分离效率。旋流器分离的临界速度受物料含液浓度的影响不大,主要受排气管结构尺寸的影响。

关键词:气液分离; 旋流器; 排气管; 分离效率; 压降损失

中图分类号: TQ 051. 8

文献标识码: A

Experiment of geometry of gas outlet in gas-liquid cyclone separator

JIN Xiang-hong^{1,2}, JIN You-hai¹, WANG Zhen-bo¹, WANG Jian-jun¹, WANG Xiu-min³

(1. Institute of Multiphase Flow in China University of Petroleum, Dongying 257061,
Shandong Province, China;

2. Department of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001,
Anhui Province, China;

3. Department of Traffic and Transportation, Ningbo University of Technology, Ningbo 315000, Zhejiang Province, China)

Abstract: Based on the separation experiments of gas-liquid cyclone separator, the style and the size of the exit tube had a strong effect on the critical velocity and separation efficiency of the cyclone separator. Compared with the conventional cylinder type of exit tube, the diffused cone type of exit tube could weaken the effect of short-circuit, prevent forming the liquid film in the exit tube, and the separation efficiency was increased without any change of the pressure drop in the cyclone separator. The critical velocity of the cyclone separator rests with not the consistence of the material, but the size of the geometry of gas outlet.

Key words: gas-liquid separation; cyclone; gas outlet; separation efficiency; pressure loss

采用旋流分离器分离低含液浓度气体中的雾化液滴,已广泛应用于天然气开采中的气液分离、压缩空气的油水净化处理以及化工生产中气相介质中雾化液滴的分离处理等工艺。试验表明在旋流分离过程中,随着流速的增加,部分液滴会被上旋气流带进分离器上部的排气管中,由于流动面积忽然缩小,进入排气管的气相流速进一步增加,在高速内旋流作用下,夹带的液滴被甩向管壁形成液膜,并在气体曳力的作用下,顺管壁向上攀升,一部分液体会随气相一起排出分离器,从而导致分离效率下降。因此,

降低排气管中的液滴夹带,将会显著提高旋流器的分离效率^[1-2]。如果采用适当的排气管出口结构,破坏气体进出口之间的短路流,同时使液膜难以形成并攀升,可以提高其分离效率。为此,笔者设计 4 种不同的排气管出口结构,在轴流导叶式气液旋流分离器中进行试验,考察新的排气管出口结构对气液旋流器分离性能的影响。

1 试验装置和工质

本试验以常温下的水-空气混合物作为试验物

收稿日期:2007-07-08

作者简介:金向红(1965-),男(汉族),河南驻马店人,副教授,博士研究生,研究方向为多相流分离技术。

料。进口物料含液浓度在 $8 \sim 24 \text{ g/m}^3$ 。

试验流程如图1所示。整个试验系统由供风系统、进料雾化系统、分离系统和测量系统4部分组成。

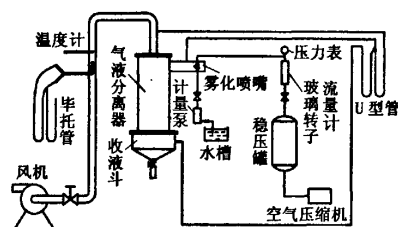


图1 气液旋流分离试验装置流程简图

1.1 分离系统

采用轴流导叶式气液旋流分离器，筒体为管锥式，为保证进料中气-液两相能充分混合，将进料室直径扩大，在进料室与导叶之间加锥形过渡。其结构如图2所示。分离器内径为100 mm。分离器全部采用有机玻璃制成。

1.2 进料雾化系统

雾化系统由空气压缩机、缓冲罐、空气转子流量计、液体计量泵、内混式双流体喷嘴组成。压缩空气与计量泵提供的液体同时进入喷嘴，通过喷嘴液体形成雾化。

压缩空气压力为0.21 MPa，流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，试验前采用激光烟雾粒径分析仪对雾化液滴粒径进行了测定，粒径分布范围为 $d_p = 15 \sim 25 \text{ }\mu\text{m}$ 。

1.3 供风系统

供风系统采用抽风机，负压操作，空气流量在 $30 \sim 110 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

试验时，在风机抽吸作用下，外部空气与雾化气-液混合物从进口管一起进入分离器，在进料室充分雾化后进入导叶，在导叶作用下形成高速旋流，因离心力作用，密度值大的液滴被甩到旋流器的边壁，从底流口流出，进入集液槽，而气体则从排气管流出，经风机直接排空。

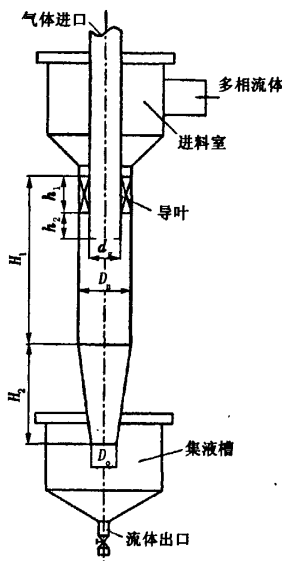


图2 管锥式气液旋流分离器结构

1.4 测量系统

(1) 流量测量。气体流量 Q_g 用出气管比托管测量计算。试验过程中底流口泄气量为零，分离器进、出口气量相同，低含液浓度下，近似认为气体流量等于物料的进口流量。

对于轴流导叶式气液旋流分离器，叶片出口流速决定着对液滴分离起主要作用的流体切向速度。因此采用叶片处的出口流速来表征分离效率随流速的变化，叶片出口流速可按下式计算：

$$v = \frac{Q_g}{3600A_j} \quad (1)$$

式中， A_j 为导向叶片间流体通道横截面积。

导叶的数量和结构参数一定时，叶片出口流速与流量成正比。对于正交布置的导向叶片，有

$$A_j = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \sin \beta - \frac{n}{2} \delta (d_o - d_i) \quad (2)$$

式中， d_o 、 d_i 分别为叶片的外径、内径； n 为叶片个数； β 为导叶的出口角，取为 25° ； δ 为导叶厚度。

在本试验中各项参数取值为： $d_o = 0.1 \text{ m}$ ， $d_i = 0.07 \text{ m}$ ， $n = 8$ ， $\delta = 3 \text{ mm}$ ， $A_j = 1.33 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。入口物料含液浓度 C_i 以每标准立方空气含液体质量计，入口加液量 $m_i (\text{g/min})$ 通过计量泵测得， C_i 计算式为

$$C_i = 60m_i / Q_g \quad (3)$$

(2) 压力降测量。压力降采用U形管压差计进行测量。这里测量了两个压力降，其中 Δp 为分离器入口与气体出口之间的静压差称为溢流压降， Δp_{ib} 为分离器入口与集液槽之间的静压差称为底流压降。一般而言，溢流压降 Δp 是气液旋流分离器的主要能耗参数。

(3) 分离效率 E_T 测量与计算。旋流分离器的效率一般分为质量效率和修正效率（澄清效率）两种定义方式，本文中由于底流泄气量为零，进出口气量相等，故在数值上两种方式计算结果相同，均为

$$E_T = \frac{m_c}{(1 - \xi)m_i} \quad (4)$$

式中， m_c 为底流口的液体出量， g ； ξ 为液体蒸发率，可以用一定的方法（如盐水电位滴定法）测得。

本试验主要评定排气管出口结构对分离性能的影响，不考虑蒸发率对分离效率的影响，所以 E_T 的实际计算公式为

$$E_T = m_c / m_i \quad (5)$$

2 排气管结构

通过分析气体短路流以及液膜的形成和攀升的

原因和机理,并参考传统气-液旋流分离器、气-固旋风分离器排气管结构形式,设计了 4 种排气管出口结构,如图 3 所示。分别用结构 1、结构 2、结构 3 和结构 4 表示,其中结构 1 是传统的气液旋流分离器排气管出口结构,结构 2 是旋风分离器传统的排气管出口结构,结构 3 和结构 4 是新设计的排气管出口结构。

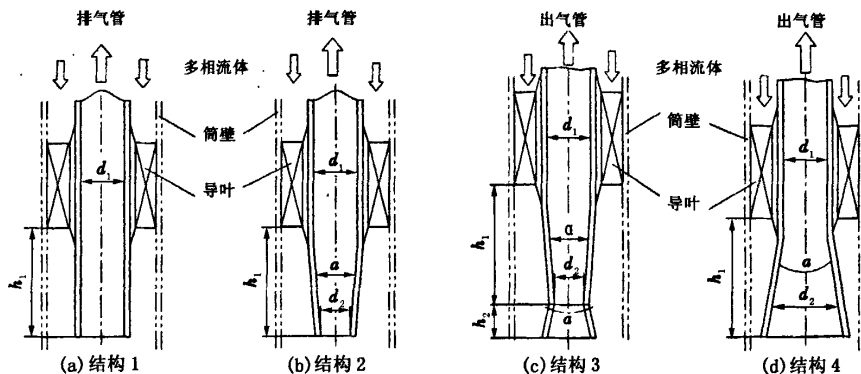


图 3 排气管出口结构

3 试验结果分析

3.1 不同排气管结构时的分离效果

以水-空气混合物为工质,在内径为 100 mm 的气液旋流器中进行分离性能试验,分别测量了采用 4 种不同的排气管出口结构时,其分离效率和压降损失随气速和含液浓度的变化。排气管出口结构参数见表 1(d_1 , d_2 分别为排气芯管、排气管进口直径, h_1 为排气管伸出长度)。

表 1 排气管结构参数

结构类型	d_1/mm	d_2/mm	h_1/mm
结构 1	45	—	40
结构 2	45	30	40
结构 3	45	30	40
结构 4	45	80	40

3.1.1 分离效率随流速的变化

图 4 显示了不同排气管出口结构下,分离效率随叶片出口流速变化的情况。

由图 4 可以看出,对于一定的排气管出口结构,在流速较低时,分离效率随着流速的增大而上升,这是因为随着叶片出口流速的增大,流体切向速度增大,离心力场增强,分离能力增大,分离效率随之提高。当叶片出口气速超过一定数值后,分离效率开始随流速增加呈下降趋势,这是由 3 个原因造成的:一是尽管随着流速的增加,液滴分离的离心力场继续增强,但分离器内湍流强度也大大增加,在气流的强旋

结构 3 是在锥形排气管下部接了一个倒喇叭形管口,主要是考虑这种结构可以干扰液膜在管口的形成和攀升。结构 4 中直接采用了一个喇叭口,是考虑到这种结构给从导叶出来的流体一个向外的轴向速度,可以减小短路流,同时这种倒坡的出气口结构,使液膜难以形成和攀升。

湍流作用下,液滴的碰撞、破碎雾化加剧,使分离难度增加;其次,随着流速的增加,旋流强度增强,沉积在器壁上的液体表面出现湍流弥散,产生气雾夹带现象,这部分二次返混的液滴会有部分进入内旋流,被气体带进排气管,使得分离效率降低;三是随着进口流速的增加,进口与气体出口间的短路流不断增强,部分未被分离的液滴随短路流进入排气管,也使得分离效率随之下降^[7-9]。

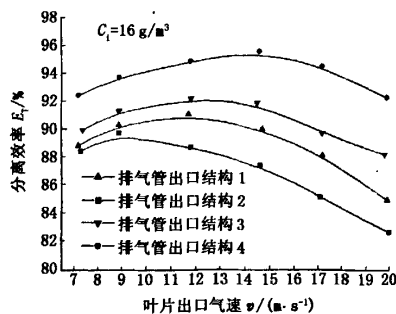


图 4 不同排气管结构时分离效率随流速的变化

将产生最大分离效率时的叶片出口流速称为旋流器的分离临界速度值 v_{cr} ^[3]。从图 4 中可以看到,不同的排气管出口结构,其分离临界速度不同,结构 2 的临界速度为 $v_{cr2} \approx 8.9 \text{ m/s}$,结构 1 和结构 3 的临界速度为 $v_{cr1} \approx v_{cr3} \approx 11.8 \text{ m/s}$,而结构 4 的临界速度值最大, $v_{cr4} \approx 14.6 \text{ m/s}$ 。对于各种排气管出口结构,在低气速下排气管中没有液膜出现,随着气体流量的加大,在其叶片出口流速达到临界值以后,在排气管

中可以看到一层液膜逐渐形成,并不断旋转上升。由此可以看出,旋流器的分离效率与排气管中液膜的形成有直接关系,采取措施控制排气管中的液膜,是提高旋流器分离效率的有效手段。

同时从图4可以看出,在一定流速下,不同的排气管出口结构分离效率不同,结构4的分离效率最高,而结构3的次之,传统的气液旋流排气管出口结构1的分离效率要低于两种新的排气管出口结构,结构2的分离效率最差。分析认为,新的排气管出口结构3和4,有效地阻碍和降低了短路流的产生;而且结构4的截面积逐渐减小,同时有一个向上的倾斜角度,不利于液膜的形成和攀升,所以在一定的流速下结构4的分离效率最高,而在一定的含液浓度下其临界速度最大。与传统的气液旋流分离器排气管结构1相比,在一定的流速和含液浓度下,新的排气管出口结构4的分离效率提高了6%~10%。

3.1.2 压力降随流速的变化

图5为不同的排气管结构分离器压力降随叶片出口流速的变化关系。从图5可以看出,结构2的压力降最大,结构4和结构1的压力降都较小,结构3的压力降低于结构2,大于结构1和结构4。

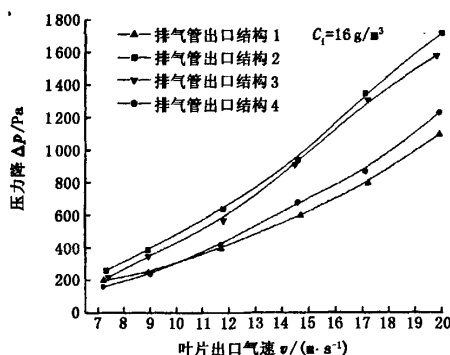


图5 不同的排气管结构时压力降随流速的变化

分离器的压降损失包括:流体进口的阻力损失、进入分离器后流动截面忽然扩大的射流损失、流体进入导叶的损失、流体在器壁和排气管壁的摩擦损失、分离器内气流旋转的动能损失、排气管内的能量回收、进入排气管流动截面忽然缩小的损失以及进出口的静势能损失和排气管内的能量回收^[4]。在分离器的各种损失中,流体旋转的动能损失、进入排气管时截面忽然缩小的损失和进出导叶的损失为主要损失。对于排气管结构2和结构3,由于排气管口直径进一步缩小,所以流体进入排气管的截面忽然缩小更为严重,因此在一定的流速下其阻力损失较大。而与结构2相比,结构3进口的导角可以缓解部分进口压

降损失。结构4的压力降略高于结构1的压力降,二者相差不大,甚至在低流速时结构4的压力降还略低于结构1。这是因为结构4的出口结构面积是逐渐减小的,使进入排气管时的损失降低,但是结构4使离开导叶的流体截面进一步减小,流体是从排气管口和筒壁之间的环缝进入简体,使流体这部分的射流损失和流体旋转动能损失增加,所以其压力降与结构1相差不大。通过分析还可以看出,结构4的压力降将受结构参数 d_1 和 d_2 (图3)的比值影响。

从图5还可以看出,对于一定的结构,随着流速的增加,其压力降呈抛物线上升的趋势,可以用局部压力降计算公式计算^[56],即

$$\Delta p = \frac{1}{2} \zeta \rho_g u_i^2 \quad (6)$$

式中, ρ_g 为空气密度; ζ 为分离器压力降阻力系数; u_i 为物料进口速度。

将 v 转换为 u_i 后,代入式(6),得到该旋流分离器4种排气管出口结构1~4压力降阻力系数 ζ 的近似值分别为7.82,11.98,10.95,7.90。可以看出结构2的阻力系数最大,结构3其次,结构1的最小。

3.1.3 分离效率随含液浓度的变化

图6为不同排气管出口结构的旋流器分离效率随含液浓度的变化。从图6中可以看出,对于一定的排气管结构,随着含液浓度的增加,分离效率呈上升趋势。这是因为当含液浓度高时,液滴之间的碰撞团聚几率更高,易于分离;同时当含液浓度较低时,水在空气中的挥发率相对较高,这部分挥发的液体没有参加分离而随空气排出,也导致了低含液浓度时分离效率降低。

在试验中还发现一个重要现象,那就是对于一定的排气管出口结构,其出现液膜时的速度(近似认为是临界速度)并不随含液浓度的增加而降低,也就是说其分离临界速度只受排气管出口结构的影响,而受含液浓度的影响较小。

从图6还可以看出在一定的流速和含液浓度下,排气管出口结构4的分离效率最大,结构3其次,结构2最小。这和图4的结论是一致的。

3.1.4 压力降随含液浓度的变化

图7为不同排气管出口结构的旋流器压力降随含液浓度的变化。图中纵坐标上的点是纯气体时分离器的压力降。图7显示,对于一定的结构,随着含液浓度增加,分离器压力降略有增加,但增幅不大,这说明低含液浓度下,含液浓度对分离器的压降影响不大,可以忽略。在分析计算其压力降阻力系数时可以

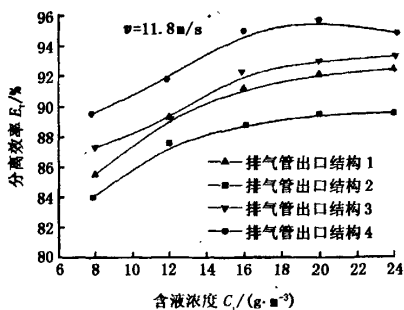


图 6 不同排气管结构分离效率随含液浓度的变化

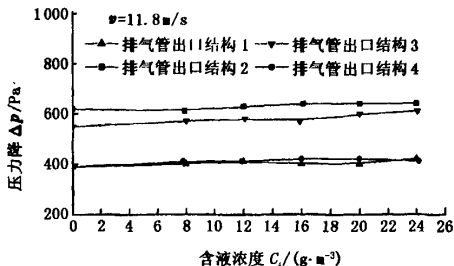


图 7 不同排气管结构压力降随含液浓度的变化

不考虑含液浓度的影响。

图 7 还显示在流速一定时,结构 2 的压力降最大,结构 3 的压力降其次,结构 1 的压力降最小,结构 4 的压力降略高于结构 3。这和图 5 中的结论一致。

3.2 排气管结构 4 不同尺寸时的分离效果

采用排气管结构 4 的气液旋流分离器分离效率,比采用传统排气管结构 1 的分离效率有明显提高,而压降损失几乎不变。改变排气管结构的几何尺寸,试验研究了排气管结构 4 几何尺寸变化对分离性能的影响。表 2 是 3 种不同的排气管几何尺寸。

表 2 排气管结构 4 不同的尺寸参数

尺寸类型	h_1/mm	d_1/mm	d_2/mm	a
结构 4 尺寸 1	40	45	70	0.571
结构 4 尺寸 2	40	45	80	0.563
结构 4 尺寸 3	40	45	90	0.5
结构 1	40	45	—	1.0

表中, a 为排气心管直径与排气管进口直径之比,即

$$a = d_1/d_2.$$

图 8 显示了排气管结构 4 不同的几何尺寸参数时分离效率随叶片出口流速的变化,为便于对比分析,图中还显示了传统气液旋流分离器排气管结构 1 的分离效率。从图 8 中可以看出,结构 4 不同的尺寸参数时分离效率随流速的变化情况与前面的试验结果是一致的,既较低流速时分离效率随流速的

增加而增大,达到一定值(临界流速后)将随流速的增大开始降低。

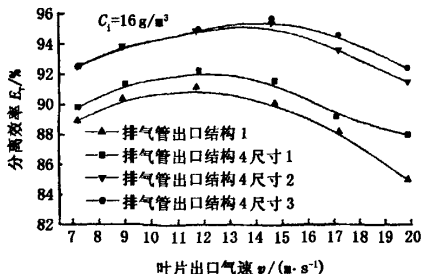


图 8 结构 4 不同尺寸时分离效率随流速的变化

图 8 中还显示在一定的流速时,分离效率受排气管几何结构尺寸的影响比较大,且 3 种尺寸的分离效率均大于传统结构 1,其中尺寸 1 略高于结构 1,而尺寸 2 和尺寸 3 分离效率增加较大,而且在低流速时尺寸 3 的分离效率略高于尺寸 2,高流速时尺寸 2 的分离效率超过尺寸 3。对于排气管结构 4 的分离器,在 a 值较小时,分离效率随 a 值增加而增加,当 a 达到某一值后分离效率将不再增加,而这时 a 值继续增大,其分离效率将会下降。通过试验可以得到分离效率最高时排气管结构 4 的最佳设计尺寸应是 $a_{\text{opt}} = 0.563$ 。

图 9 显示了排气管结构 4 不同的几何尺寸时压力降随叶片出口流速的变化及其与结构 1 的比较。应用式(6)计算得到结构 1 和结构 4 的 3 种尺寸分离器的压降阻力系数分别为 7.82, 7.34, 7.90, 9.70。

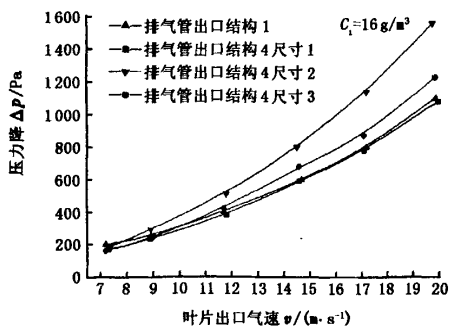


图 9 结构 4 不同尺寸时压力降随流速的变化

由图 9 可以看出,分离器压力降受结构尺寸影响较大,在低流速时各种结构尺寸的压力降较接近,而随着流速的增大,压力降差别较大。流速一定时,排气管结构 4 分离器的压力降随 a 值的降低而增加,其中尺寸 1 的压力降略低于结构 1,尺寸 2 的压力降略高于结构 1,而尺寸 3 的最大。分析认为,当

采用结构4的排气管时,与结构1相比,在气体出口有一个减缩过渡,将降低气体出口截面忽然缩小所产生的压力损失,当 α 值较大时使分离器的压力降减小,而随着 α 值的降低,排气管出口直径 d_2 不断增大,其与筒壁的间距减小,使得离开导叶的流体流动截面积不断缩小,然后从排气管与筒壁的环隙中喷出,截面积忽然增加,导致流体的射流损失增大,从而使分离器压力损失增加。由此可以看出对于排气管结构4的旋流分离器,压力降随 α 值的降低而增大。

4 结 论

(1)低含液浓度时气液旋流分离的临界速度较低,远低于旋风分离器。

(2)采用新型排气管出口结构4,能够有效地降低进口与排气管之间的短路流,并阻碍排气管液膜的形成和攀升,可以提高旋流分离器的分离效率。

(3)对于排气管结构4,分离器的压力降随 α 值降低而升高,在 α 值较低时其分离效率随 α 值增加而增大。对于分离器的分离效率和压力损失,排气管结构4的最佳尺寸为 $\alpha_{\text{opt}}=0.563$ 。

(4)对于一定的分离器排气管出口结构,当含液浓度一定时,在较低的流速时分离效率随着流速的增加而上升,当达到分离临界速度后,随着流体速度继续增加,其分离效率呈下降趋势。而当流速一定时,分离效率随着含液浓度的增加而增加。

(5)气液旋流分离器分离临界速度受排气管几何结构影响较大,几乎不受气体含液浓度的影响。

(6)对于一定的排气管出口结构,分离器的压力降随着流速的增加呈抛物线上升,低含液浓度下,含液浓度的变化对于压力降几乎没有影响。

参考文献:

- [1] FIHLO B R M. Rotational two-phase in gas-liquid cylindrical cyclone separators [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1997.
- [2] ROSA E S, FRANCA F A, RIBEIRO G S. The cyclone gas-liquid separator: operation and mechanistic modeling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001,32:87-101.
- [3] 金向红,金有海,王振波.轴流导叶式气液旋流分离器的试验研究[J].化工机械,2007,34(2):61-64.
JIN Xiang-hong, JIN You-hai, WANG Zhen-bo. An experimental study on the axial flow guide vane type gas-liquid cyclone separators [J]. Chemical Engineering and Machinery, 2007,34(2):61-64.
- [4] MOVAFAGHIAN S, JAUA-Marturet J A, MOHAN R S, et al. The effects of geometry, fluid properties and pressure on the hydrodynamics of gas-liquid cylindrical cyclone separators[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2000,26:999-1018.
- [5] 岑可法,倪明江,等.气固分离理论及技术[M].杭州:浙江大学出版社,1999.
- [6] 郭颖,王建军,金有海.轴流导叶式旋风管内气固两相流的实验研究[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(3):96-100.
GUO Ying, WANG Jian-jun; JIN You-hai. Experimental study of gas-solid two-phase flow in axial guide vane cyclone tube [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(3):96-100.
- [7] 金有海,王建军,王宏伟,等.PSC型旋风管内气相流动的实验与数值研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(6):71-76.
JIN You-hai, WANG Jian-jun, WANG Hong-wei, et al. Experimental and numerical study of gas flow in PSC type cyclone tube [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(6):71-76.
- [8] 孔珑.两相流体力学[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [9] GOMEZ L E. Dispersed two-phase swirling flow characterization for predicting gas carry-under [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 2001.

(编辑 沈玉英)