

DOI: 10.7652/xjtuxb201707013

# 回流式两级分离轴流旋风分离器性能实验研究

刘碧媛, 冯健美, 夏宗飞, 畅云峰, 彭学院  
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 为进一步提高电厂湿法脱硫后的烟气除雾效果,设计了一种新型的部分回流式两级分离轴流旋风分离器并为此搭建了旋风分离器性能测试实验台,通过液滴雾化装置产生了不同粒径液滴,采用 Malvern 激光粒度分析仪对设计的几种结构分离器的进、出口粒径分布进行了测试,对不同结构分离器在不同工况下的分离效率和阻力损失进行了测试。实验结果表明:分离器的分离效率随回流槽数量的增加而提高,内筒顶部回流槽数增加1倍,筒内气流速度为 3.9 m/s 时,分离器效率提高 66.78%;回流槽集中分布在分离器顶部比回流槽分布在分离器内筒上、中、下时的效率提高得更加显著,当筒内气流速度为 3.94 m/s 时,分离效率可提高 16.9%;中间导流管高度对分离效果也有一定影响,当导流管高度与分离器高度比为 0.32 时,分离效果最佳。

**关键词:** 轴流旋风分离器;回流;液滴;粒径分布;分离效率

**中图分类号:** TQ028.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)07-0084-06

## Experiment for Partial Reflux Axial-Flow Cyclone Separator with Two-Stage Separation

LIU Biyuan, FENG Jianmei, XIA Zongfei, CHANG Yunfeng, PENG Xueyuan  
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To further enhance the efficiency of demister in a flue-gas after desulfuration by wet processes for power plant, a new type of partial reflux cyclone separator with two separation stages is proposed. An experiment rig is constructed to test the performance of cyclone separator, and a droplets generator is designed to produce liquid droplets with different diameters. Malvern particle size analyzer is adopted to obtain the droplet diameter distribution at the inlet and outlet of the separator, and the separation efficiency and resistance loss are measured for different separator parameters under various working conditions. The experiments show that the separation efficiency rises with the increasing number of reflux tanks. At the inlet velocity of 3.9 m/s, the efficiency of separator rises by 66.78% in the case of doubled number of reflux tanks. The efficiency of separator with reflux tanks centered on the separator top reaches higher than that with reflux tanks scattered along the separator. At the inlet velocity of 3.94 m/s, the efficiency rises by 16.9%. The height of guide tube affects the efficiency of separator and there exists an optimum ratio of 0.32 between the height of guide tube and the separator.

**Keywords:** axial-flow cyclone separator; reflux; liquid droplet; droplet diameter distribution; separation efficiency

相比切向进气的旋风分离器,轴流旋风分离器的压力损失小,对气体的处理量大<sup>[1]</sup>。轴流旋风分离器不会改变气流的主运动方向,因此便于和管道连接,应用更为广泛。轴流旋风分离器适用于制冷系统、分馏塔顶冷凝冷却器的气相除雾,各种气体水洗塔、吸收塔、解析塔的气相除雾,以及烟气除尘等较为纯净的场合。但是,轴流旋风分离器对气体和杂质的分离效率低于切向进气旋风分离器,现有的轴流旋风分离器没有额外的过滤层,分离出的杂质不能及时排出,存在气体与杂质之间二次夹带的问题,这种分离不彻底导致了轴流旋风分离器分离效率降低<sup>[2]</sup>。

付双成等研究指出,轴向导叶式分离器的性能提升在于自身结构优化和组合结构优化<sup>[3]</sup>。龚光彩等研究了轴入式旋风分离器的叶片螺旋角度和叶边距对气液旋风分离器分离效率和压力损失的影响<sup>[4]</sup>。Safikhani 等通过数值模拟得出了影响旋风分离器分离性能和压力损失的结构参数因素<sup>[5]</sup>。Park 等提出了一种三级旋风分离器,并基于粒子直径进行分级分离<sup>[6]</sup>。Brar 等数值模拟得出了分离效率和压力损失随旋风分离器直径变化的关系<sup>[7]</sup>。王玲子等指出,临界入口流速的存在避免了小油滴的产生,从而有效提高了分离效率<sup>[8]</sup>。Nieuwstadt 等对轴流式旋风分离器进行了实验和数值模拟分析<sup>[9]</sup>。

以上工作主要集中于研究旋风分离器的基本结构参数对分离效率的影响,忽略了分离器自身结构和组合结构对分离器分离性能的影响,也未对经一级旋风分离后仍有残留杂质的气体采取措施。本文设计了一种具有部分回流作用<sup>[10]</sup>和两级离心分离的轴流式旋风分离器,可对经一级离心分离后靠近壁面附近含液量较高的气体,通过回流通道再次进行二级分离<sup>[11]</sup>。通过对不同结构尺寸和不同进口速度的旋风分离器进行实验研究,计算了分离器的分离效率、分离器的临界分离粒径,测量了分离器的压力损失,讨论了本文旋风分离器的主要结构参数对分离器分离效率和压力损失的影响,以期对具有部分回流的旋风分离器分离性能的提高与优化奠定基础。

## 1 实验系统及结构

### 1.1 实验系统

实验系统主要由雾化段喷嘴、四通观测管、旋风分离器、标准喷嘴、离心风机和流量测量装置组成,

如图 1 和图 2 所示。为了便于观察,雾化段和旋风分离器采用有机玻璃制成。

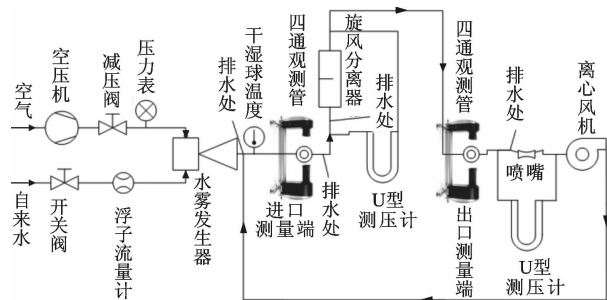


图 1 实验流程

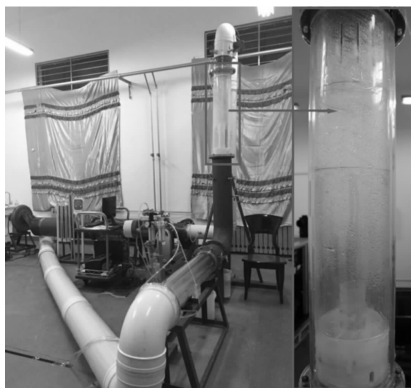


图 2 实验系统

实验采用 BETE AD100 喷嘴对液态水进行雾化,生成液滴。在不同压力的压缩空气和不同水流量的共同作用下,喷嘴产生了不同浓度(体积分数)和粒径分布的液滴,实验工况下喷嘴产生的液滴直径均小于  $150\text{ }\mu\text{m}$ ,所以实验时液滴被认为是球形液滴,且不考虑液滴形状对分离效率的影响。根据厂家提供的喷嘴工况数据,实验时通过改变空气压缩机的排气压力和水流量可调节雾化效果,满足不同工况下的液滴粒径需求。实验系统雾化段和喷嘴如图 3 所示。

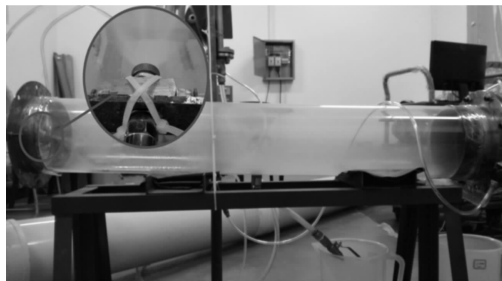


图 3 实验系统雾化段及喷嘴

旋风分离器进、出口的液滴粒径分布采用 Malvern 激光粒度分析仪测量, 粒径测量范围为  $0.02 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$ 。实验中, 在旋风分离器进、出口段

分别安装了四通观测管,观测管两端由光学玻璃和高压氮气形成气幕保护,为的是在保护 Malvern 镜头的同时不影响测量结果。氮气纯度(体积分数)为 99.99%,由于气幕与管道内气液混合物的压差影响着液滴体积浓度和粒径分布的测量,所以实验时需要控制氮气压力和实验管道进气量,使管道内压力与气幕压力平衡。工作状态下的 Malvern 激光粒度分析仪和出口测量段如图 4 所示。



图 4 Malvern 激光粒度分析仪和出口测量段

1.2 实验结构

为了研究不同结构参数对分离性能的影响,参考实际应用条件,设计了结构参数不同的 8 种旋风分离器。具有代表性的 I、II 和 III 旋风分离器截面图如图 5 所示。对 8 种旋风分离器分别设计了组内对照旋风分离器,结构参数如表 1 所示,并对这 8 种结构的分离效果进行了对比分析。I 旋风分离器主要结构有分离器内筒和外筒及其之间的回流通道,分离器内筒底部有旋流子、二级旋风发生器和排液装置,分离器内筒上部有回流槽。工作过程:来自进口带杂质的气流通过旋流子后进行一级离心分离;洁净气流从内筒中央流出,含有杂质的气流从内筒

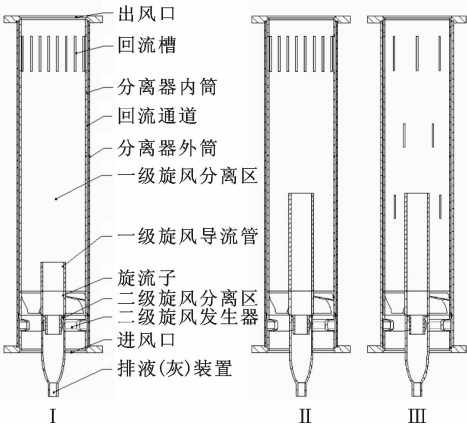


图 5 分离器剖面图

上的回流槽进入回流通道,再通过二级旋风发生器进行二级离心分离;经二级分离所得杂质通过分离器底部的排液(灰)装置排出。

分离器外筒高度  $H$  为 940 mm,外筒直径  $D_1$  为 230 mm,内筒直径  $D_2$  为 220 mm,一级旋风导流管直径  $d$  为 70 mm,一级旋风导流管高度  $h$  和回流槽排布见表 1。

表 1 不同旋风分离器的结构参数

| 分离器编号 | $h/\text{mm}$ | 回流槽数及分布位置                     |
|-------|---------------|-------------------------------|
| I     | 100           | 16 个回流槽均布在内筒上部                |
| I-1   | 100           | 内筒无回流槽                        |
| II    | 300           | 16 个回流槽均布在内筒上部                |
| II-1  | 200           | 16 个回流槽均布在内筒上部                |
| II-2  | 400           | 16 个回流槽均布在内筒上部                |
| III   | 300           | 8 个回流槽均布在内筒上部,<br>4 个均布在中部和下部 |
| III-1 | 300           | 8 个回流槽均布在内筒上部,<br>4 个均布在中部    |
| III-2 | 300           | 8 个回流槽均布在内筒上部                 |

1.3 实验方法

采用变频器调节离心式风机的转速,改变旋风分离器进口气流速度。实验段风速范围为 3.9~10 m/s,通过测量获得的实验段风速分别为 3.9、4.7、5.4、6.3、7.7、8.6、9.3、10 m/s 共 9 组工况下 8 种分离器的进、出口粒径分布和分离器效率。在标准喷嘴前、后的管道周向分别设有 4 个均布的取压点,获取喷嘴前、后压力,并根据标准喷嘴法气体流量公式计算筒内气体流量,再用截面平均计算筒内气流速度。在离心风机前端设置了标准喷嘴,待工况稳定运行后通过标准喷嘴法测量离心风机的风量。旋风分离器进、出口分别有 4 个均布的取压点,利用 U 型管测压计测量旋风分离器的压力损失。

采用 Malvern 激光粒度分析仪测量旋风分离器进、出口的液滴粒径分布和体积浓度,采用分离效率衡量分离器的分离性能。若旋风分离器进口的液滴体积分数为  $C_A$ ,出口的液滴体积分数浓度为  $C_B$ ,则总分离效率为

$$\epsilon = \frac{C_A - C_B}{C_A} \times 100\%$$

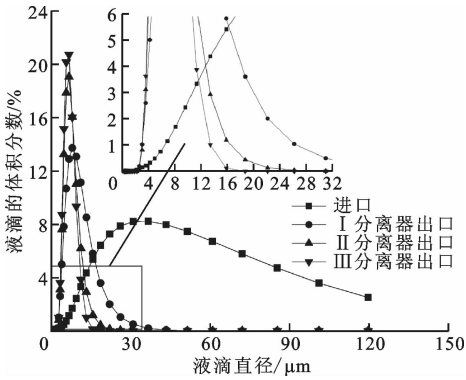
在分析旋风分离器的分离性能时,同时考察了分离器的临界粒径和分割粒径<sup>[12]</sup>。临界粒径是指理论上能从气体中以 100%的效率分离出来的最小粒子的直径;分割粒径是指理论上能从气体中以

50%的效率分离出来的最小粒子的直径。临界粒径和分割粒径越小,分离器的分离性能就越好。

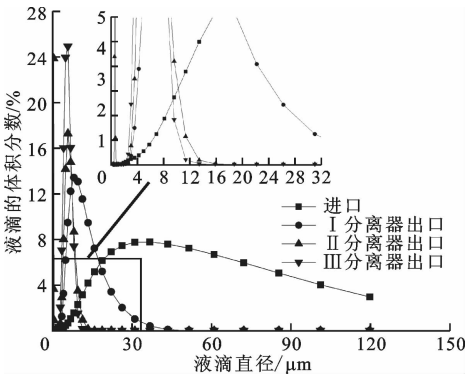
2 实验结果分析

2.1 进、出口液滴粒径分布

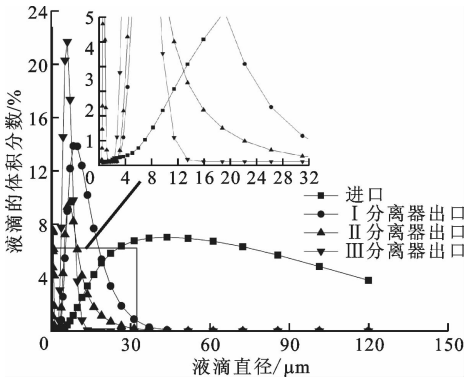
限于篇幅,本文仅给出了进气速度为 3.97、7.04、9.97 m/s 时 I、II 和 III 分离器进、出口的液滴粒径分布特征,如图 6 所示。



(a)分离器进口流速为 3.94 m/s



(b)分离器进口流速为 7.04 m/s



(c)分离器进口流速为 9.97 m/s

图 6 分离器进、出口液滴粒径分布

在 3 种进气速度下,进入旋风分离器之前的气液混合物中,直径小于 15 μm 的液滴的体积分数约为 18%,直径在 15~25 μm 之间的约为 20%,直径

大于 25 μm 的约为 62%。所有实验工况下,按照流经喷嘴的水流量和所测得的实验段内气体流量计算,分离器进口处的液滴的体积分数为  $7.0 \times 10^{-6} \sim 20.6 \times 10^{-6}$ ;采用马尔文粒径分析仪测量相应工况下分离器进口处液滴的体积分数为  $3.7 \times 10^{-6} \sim 16.3 \times 10^{-6}$ 。

经过 I 分离器后,直径小于 25 μm 的液滴的体积分数为 95%,直径大于 25 μm 的约为 5%。对于直径大于 30 μm 的液滴的分离效率可达 96%,出口处直径小于 3 μm 的液滴的体积分数接近 0。

在 II 分离器出口处,直径小于 1 μm 的液滴的体积分数远大于进口处的,且随进口气流速度的增大,其体积分数增大。在旋风分离器中,液滴碰到壁面后不一定全部被捕捉、分离,当气流速度较大时,液滴可能破碎,产生更多的小液滴,这些破碎的小液滴难以分离,从而降低了旋风分离器的分离效率。

2.2 分离效率分析

8 种结构旋风分离器在不同工况下的分离效率如图 7 所示。由图可知,II 分离器分离效率最高,在实验段气流速度为 3.94~9.97 m/s 时,分离效率变化趋势较平稳,分离效果最佳。

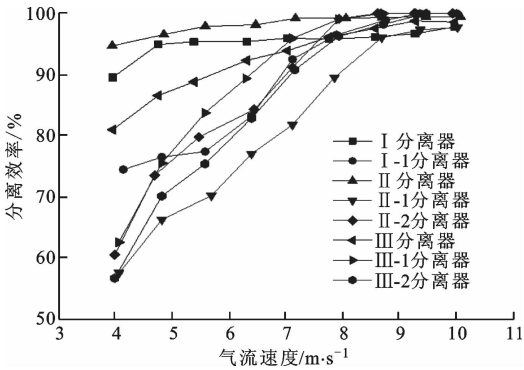


图 7 结构参数对分离效率的影响

回流会影响分离效率,I 分离器上部均布 16 个回流槽,I-1 分离器无回流槽,将两者进行对比,结果表明:当筒内气流速度小于 7.5 m/s 时,I 分离器分离效率高于 I-1 分离器,当筒内气流速度为 4.0 m/s 时,I 分离器的分离效率比 I-1 分离器高 20.2%;当筒内气流速度大于 7.5 m/s 时,两分离器的分离效率差别小于 3.3%。综合所有工况,带回流的分离器由于将未被彻底分离的靠近内筒壁面的气液混合物导入分离器底部进行二级分离,所以分离效果更佳。

II 分离器上部均布 16 个回流槽,III 分离器在内筒上、中、下部共分布着 16 个回流槽,III-1 分离器在内筒上部和中部分布着 12 个回流槽,III-2 分

分离器在内筒上部分布着8个回流槽。下面,将这几种结构回流槽数量及分布形式对分离效率的影响进行对比分析。

对比II和III-2分离器的分离效率可知,当内筒上部回流槽数量由8个增加至16个时,分离器效率在低速时可增加66.78%,在高速时差别不明显。对比II和III分离器的分离效率可知,当回流槽总数相同时,回流槽集中分布在分离器上部更有利于提高分离效率,分离效率在低速时提高最显著,可达16.9%。这是由于当回流槽分布在分离器上部时,通过回流槽进入分离器底部进行二级分离的混合气流已经达到了很低的带液量,此时进行二级分离可以达到更高的分离效率。对比III、III-1、III-2分离器可知,III分离器分离效率最高,III-2分离器效率最低。当分离器结构一定时,回流量增大,未被彻底分离的混合气流可重新进入分离器进行二级分离,这样分离效率进一步提高。

下面,分析导流管高度对分离效率的影响。I、II-1、II、II-2分离器的导流管高度分别为100、200、300、400 mm。II分离器在实验段所有工况下的分离效率均高于其他3种分离器,分离效率最高时导流管高度与分离器高度比为0.32。当导流管过短时,经回流进入导流管的混合气流直接与刚进入分离器的未分离的气液混合物混合,不能进行有效的二级分离;导流管过长时,需要进行二级分离的气液混合物经导流管直接离开分离器,并未进行二级分离。因此,导流管存在一个最佳高度,可引导二级离心分离后的洁净气体排出分离器,且不会产生二次夹带,由此提高了分离效率。

### 2.3 分离器临界粒径

8种不同结构参数的分离器对应不同筒内气流速度下的临界粒径,如图8所示,可以看出,随气流速度的提高,临界粒径减小。

I分离器的临界粒径大于22.16  $\mu\text{m}$ ,高于I-1分离器,回流槽的存在导致临界分离粒径增大。

II分离器临界粒径大于III分离器,分布在筒内不同高度的回流槽更有利于大液滴的分离。III、III-1、III-2分离器分别有16、12、8个回流槽,而III-1分离器的临界粒径最小,故存在最合适的回流槽数量,使分离器的临界粒径最小。

在实验工况下,分离器的临界粒径随筒内流速的提高而减小。当导流管高度为400 mm时,II-2分离器的临界粒径在筒内流速为9.97 m/s时最小,为4.85  $\mu\text{m}$ 。

### 2.4 分离器压力损失分析

不同进口流速下旋风分离器的压力损失如图9所示。对比I和I-1分离器,由于回流槽对分离器壁面附近流场产生了扰动,由此增加了局部阻力损失,所以有回流时分离器的压力损失高于无回流时。对比II和III分离器,集中分布在筒顶部的回流槽带来的压力损失小于分布在筒上、中、下部带来的压力损失。对比III、III-1、III-2分离器,随着回流槽数量的增加,分离器的压力损失上升。

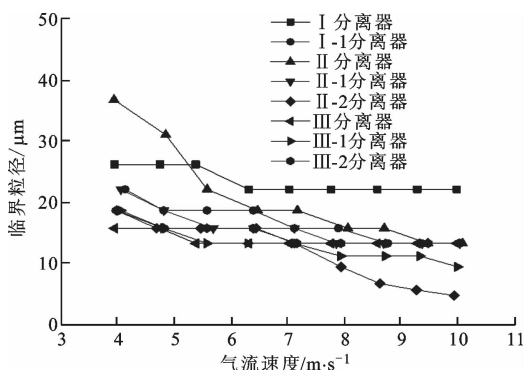


图8 不同结构参数下分离器的临界粒径

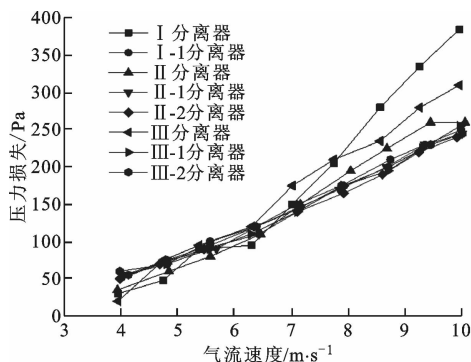


图9 不同结构参数下分离器的压力损失

## 3 结 论

本文对不同结构轴流旋风分离器的分离性能进行了实验研究,得出的主要结论如下。

(1)内筒回流有助于提高分离器的分离效率,当分离器结构从内筒无回流改为内筒上部均布16个回流槽时,低速时分离效率提高了20.2%;当回流槽数量从内筒上部的8个增加至16个时,低速时分离效率提高了66.78%。

(2)回流槽集中分布在筒内上部的分离器效率比回流槽排布在筒上、中、下部的分离器高16.9%,但回流槽集中分布的分离器不利于混合气流中大液滴的分离,其临界粒径在全范围工况下均大于22.16  $\mu\text{m}$ 。

(3)实验工况下,导流管高度为 200 mm 时,分离器分离效果最佳,筒内气流速度为 3.94 m/s 时,分离效率可达 40.04%,且高于其他分离器,其最小临界粒径为 13.36  $\mu\text{m}$ ,压力损失略微增加。

## 参考文献:

- [1] 栾一刚. 轴流旋风分离器数值模拟与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 1-17.
- [2] 栾一刚, 王松, 孙海鸥, 等. 无节流器轴流旋风气液分离器性能研究 [J]. 动力工程学报, 2011(2): 142-147.  
LUAN Yigang, WANG Song, SUN Hai'ou, et al. Performance study of an axial-flow gas-liquid cyclone separator without throttleer [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011(2): 142-147.
- [3] 付双成, 孙国刚. 轴向导叶式直流旋风分离器的研究与应用现状 [C]// 全国非均相分离技术学术交流会. 北京: 中国化工学会, 2007: 242-246.
- [4] 龚光彩, 杨周周, 朱少林. 轴入式旋风分离器分步湍流模型的数值模拟与试验 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 19-24.  
GONG Guangcai, YANG Zhouzhou, ZHU Shaolin, et al. Numerical simulation and test of the two-stage turbulence model of axis-in cyclone separator [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(2): 19-24.
- [5] SAFIKHANI H, MEHRABIAN P. Numerical study of flow field in new cyclone separators [J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(2): 379-387.
- [6] PARK C, SONG D, YOOK S. Development of a single cyclone separator with three stages for size-selective sampling of particles [J]. Journal of Aerosol Science, 2015, 89(11): 18-25.
- [7] BRAR L S, SHARMA R P. Effect of varying diameter on the performance of industrial scale gas cyclone dust separators [J]. Proceedings of Materials Today, 2015, 2(4/5): 3230-3237.
- [8] WANG Lingzi, GAO Xiang, FENG Jianmei, et al. Research on the two-phase flow and separation mechanism in the oil-gas cyclone separator [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. London, UK: Institute of Physics, 2015: 012075.

- [9] NIEUWSTADT F, DIRKZWAGER M. A fluid mechanics model for an axial cyclone separator [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(10): 3399-3404.
- [10] 邢超. 回流型动态旋风分离器设计与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 22-31.
- [11] SONG C, PEI B, JIANG M, et al. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators [J]. Powder Technology, 2016, 294: 437-448.
- [12] 范贵生, 赵满全, 高爱武, 等. 旋风分离器临界粒径计算的一种新方法 [J]. 粮食与饲料工业, 2004(5): 13-15.  
FAN Guisheng, ZHAO Manquan, GAO Aiwu, et al. A new method for calculating the critical diameter of the particles in cyclone separators [J]. Cereal & Feed Industry, 2004(5): 13-15.

## [本刊相关文献链接]

- 付曦, 张俊红, 寇海军, 等. 复杂载荷下轴流压气机叶片疲劳损伤数值研究. 2017, 51(5): 149-155. [doi:10.7652/xjtuxb201705021]
- 董玮, 楚武利, 张皓光, 等. 垫升轴流风扇的静叶优化设计及内部流动机理数值研究. 2017, 51(5): 156-164. [doi:10.7652/xjtuxb201705022]
- 兰艾青, 王志恒, 于洪石, 等. 合成射流激励位置对控制翼型大攻角分离流动影响的数值研究. 2016, 50(7): 110-117. [doi:10.7652/xjtuxb201607017]
- 潘艳芝, 王栋, 巩大利, 等. 一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究. 2016, 50(7): 140-144. [doi:10.7652/xjtuxb201607021]
- 陆建涛, 成玮, 訾艳阳, 等. 结合改进粒子群的非线性盲源分离方法研究. 2016, 50(6): 15-22. [doi:10.7652/xjtuxb201606003]
- 程鹏, 王新军, 张峰, 等. 核电汽轮机弯管式汽水分离器的改进结构及其除湿性能. 2014, 48(5): 61-66 + 77. [doi:10.7652/xjtuxb201405011]
- 冯健美, 杨鑫, 高翔, 等. 旋风式油气分离器数值模拟与实验研究. 2011, 45(7): 55-59. [doi:10.7652/xjtuxb201107011]
- 张旭, 颜立伟, 李云, 等. 液氮洗工艺的多目标遗传算法优化. 2011, 45(5): 114-118. [doi:10.7652/xjtuxb201105021]

(编辑 苗凌)