

超重力旋转床微米级粉尘脱除实验研究

胡显平, 田东磊, 邓先和

(华南理工大学化学与化工学院, 广东 广州 510640)

摘要:以超重力旋转床作为除尘设备,用超细滑石粉模拟工业微米级粉尘,考察旋转床除尘的分离效率和设备压降。在气量 500~700 m³/h、液量 0.6~1.0 m³/h、转速 560~1 400 r/min、平面丝网层数为 3 的条件下,除尘总效率均大于 97%,设备总体压降不超过 490 Pa。超重力旋转床相对于其他除尘设备,显示了高效除尘和低压降性能。

关键词:微米级粉尘;超重力旋转床;除尘效率;压降

中图分类号:TQ028.24

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)12-0069-04

Experimental research on removing of micron scale dust by high gravity rotating packed bed

HU Xian-ping, TIAN Dong-lei, DENG Xian-he

(School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The particle removal efficiency and pressure drop of rotating packed bed is investigated in this paper, with high gravity rotating packed bed used as particle removal equipment and superfine talc used to simulate industrial micron scale dust. The results show that the total removal efficiency is more than 97% and the pressure drop of the equipment is less than 490 Pa, under the following conditions that the gas flow rate of 500~700 m³/h, liquid flow rate of 0.6~1.0 m³/h, rotational speed ranges of 800~1 400 r/min and axial plane mesh number of 3. The high gravity rotating packed bed has a high particle removal efficiency and lower pressure compared with other conventional equipment.

Key words: micron scale dust; rotating packed bed; particle removal efficiency; pressure drop

工业上使用的气固分离除尘设备一般可归纳为四大类^[1]:机械力分离、电除尘、过滤分离、洗涤分离。对于粒径大于 10 μm 的尘粒,这些传统设备皆能有很高的分离效率。而对于粒径小于 10 μm 的超细粉尘,传统除尘设备要么分离效率不高,要么设备总体压降较大,不能同时满足环保法规所要求的高除尘效率和低能耗的要求。因此开发新型高效、低能耗的除尘设备成为必然。

超重力旋转床作为一种新型的传质、分离装置,利用其高速旋转的填料使液体在离心力的作用下,被高度分散、撕碎、雾化以形成很大的并不断更新的表面积,从而提高气液的传质面积,强化传质过程。与其他除尘相比较,超重力旋转床具有分离效率高、设备总体压降小、设备占地面积小、易于安装和维修等优势。按照气液传质的接触方式不同,超重力旋转床除尘装置一般分为并流型、逆流型、错流型。国内外专家如柳巍^[2]、Keyvani^[3]、张海峰^[4]、简弃非^[5]、潘朝群等^[6]对不同接触方式的旋转床的除尘性能做

了大量的研究工作并取得了大量成果。

该实验研究中采用的旋转床由多级离心雾化超重力旋转床^[7]在轴向添加数层平面丝网改进而来,属于气、液错流型除尘装置。为了考察、测试该种超重力旋转床设备在除尘方面的潜力,设计了一整套实验流程及方法,对微米级粉尘脱除的效果和设备压降进行了实验研究,为设备的工业化应用提供有价值的参考数据。

1 超重力平面丝网旋转床除尘原理

多级雾化超重力平面丝网旋转床如图 1 所示。该旋转床中气相从设备的左下角处进入,沿轴向流动;在转动轴高速旋转的条件下,轴中心处钢管内液体被离心加速,从小孔喷射出,并沿径向流动。

当含尘气流以一定速度进入床体雾化区时,在轴向丝网和平面丝网的带动下,气体也会受到离心力的作用,从而由直线上升运动变为螺旋式上升的复合运动。同时,沿径向流动的液体在离心力的

收稿日期:2009-07-17

基金项目:广州市科技计划项目(2006Z2-D9041)

作者简介:胡显平(1983-),男,硕士生;邓先和(1954-),男,博士生导师,教授,主要从事换热器和超重力旋转床烟气除尘脱硫的研究,通讯联系人, cexhdeng@scut.edu.cn。

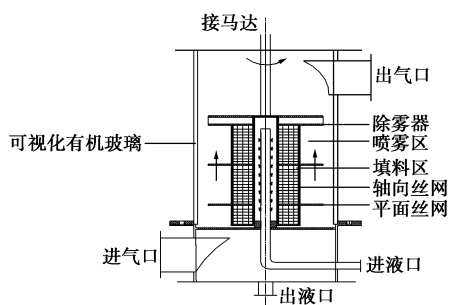


图 1 多级雾化平面丝网超重力旋转床

作用下被高度分散、雾化。则含尘气体在运动中,在颗粒间相互碰撞和呈膜状的液体捕获以及丝网对固体颗粒的过滤作用下,尘粒团聚而变成质量更大的颗粒或被液滴捕获并粘在一起,这样在离心力的作用下,这些颗粒就会被甩向器壁而除去。

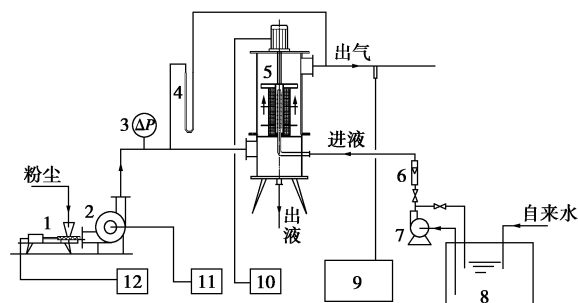
2 实验部分

2.1 实验装置

旋转床的主体结构由不锈钢钢管和厚度为 3 mm 的不锈钢板焊接而成,5 层平面支撑结构焊在钢管上,每层平面由 $\phi 5$ mm 的钢筋支撑。转子中央钢管直径 60 mm,钢管上开有等间距的 8 条宽度为 1.5 mm 的缝;丝网材料为不锈钢,丝网孔间距 1.5 mm,厚度 0.7 mm;2 层轴向丝网位置: $\phi = 64$ mm 和

$\phi = 140$ mm;以除雾器平面为基准向下为正,3 层平面丝网高度分别为: $H_1 = 0$ mm, $H_2 = 100$ mm, $H_3 = 200$ mm。

实验流程图如图 2 所示。



1—加粉机;2—风机;3—补偿式压差计;4—U型压差计;
5—超重力平面丝网旋转床;6—转子流量计;7—水泵;8—水箱;
9—粉尘采样分析仪;10,11—变频器;12—加粉调速仪

图 2 超重力旋转床实验流程图

该实验选择 2 000 目左右的滑石粉模拟工业粉尘,其峰值粒径为 $4.73 \mu\text{m}$ 。气体流量用笛型管和微压差计测量。液体流量由转子流量计计量。旋转床进出口压力降用 U 型管压差计测量。粉尘用型号为 TH-880 的微电脑烟尘平行采样仪采集。

2.2 实验方法

粉尘经烘箱烘干后由小型螺杆挤出到风机的

(上接第 68 页)

能够以很高的精度对系统运行进行预测。这对于实际应用具有较大意义,使得污水处理系统过程有可能实现水质早期预报并反向自动控制以得到理想的目标值。

参考文献

- [1] 黄明智,马彦文,万金泉,等.污水处理中人工神经网络应用研究的探讨[J].环境科学与技术,2008,31(3):131-135.
- [2] 葛哲学,孙志强.神经网络理论与 MATLAB 2007 实现[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 许东,吴铮.基于 MATLAB6.X 的系统分析与设计:神经网络[M].2 版.西安:西安电子科技大学出版社,2002:166-238.
- [4] 田禹,王宝贞,周定.人工神经网络对水处理系统建模适应性的研究[J].环境科学学报,1999,19(1):33-36.
- [5] 叶晓,黄小蕊,俞军,等.基于 BP 神经网络建立姬松茸多糖超滤分离模型[J].化学研究与应用,2006,18(9):1120-1123.
- [6] 石宝强,张捍民,杨凤林,等.人工神经网络在膜生物反应器膜污染预测中的应用前景[J].工业水处理,2006,26(12):14-17.
- [7] 孟凡刚,张捍民,李艳松,等.膜生物反应器膜污染数学模型研究进展[J].水处理技术,2005,31(10):1-4.
- [8] 徐茵,李建明,陈文梅.理论研究方法在膜超(微)滤研究中的应

用[J].膜科学与技术,2004,24(2):68-73.

- [9] Grishma R S, Shankaraman C. Predicting membrane fouling during municipal drinking water nanofiltration using artificial neural networks[J]. J Membr Sci, 2003, 217: 69-86.
- [10] 胡志华,万金泉,马彦文,等.基于 ANN 的造纸废水处理智能控制系统研究[J].环境科学与技术,2007,30(3):58-63.
- [11] Mjalli F S, Al-Ashehl S, Alfadala H E. Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance[J]. J Environ Manag, 2007, 83: 329-338.
- [12] Hanbay D, Turkoglu I, Demir Y. Prediction of wastewater treatment plant performance based on wavelet packet decomposition and neural networks[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34: 1038-1043.
- [13] Oliveira-Esquerre K P, Seborg D E, Bruns R E, et al. Application of steady-state and dynamic modeling for the prediction of the BOD of an aerated lagoon at a pulp and paper mill: Part I. Linear approaches[J]. Chem Eng J, 2004, 104: 73-81.
- [14] 郑静,曾嘉,林开利,等.人工神经网络-分光光度法同时测定废水中的金和钡[J].分析实验室,2006,25(12):19-22.
- [15] Dornier M, Decloux M, Trystram G, et al. Dynamic modeling of cross-flow microfiltration using neural networks[J]. J Membr Sci, 1995, 98: 263-273.
- [16] Delgrange N, Cabassud C, Durand-Bourlier L, et al. Neural networks for prediction of ultrafiltration transmembrane pressure-application to drinking water production[J]. J Membr Sci, 1998, 150: 111-123. ■

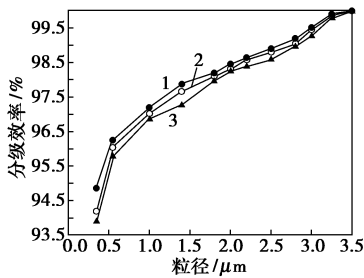
入风口处,由风机抽吸到风机内将其和空气混合形成比较稳定的气溶胶,然后在离心风机的推动下进入旋转床内,加入的粉尘量通过调整螺杆加粉机的转速来控制。水箱中的水由水泵经过进液阀门控制和转子流量计的计量后进入旋转床。通过改变气量、液量、转速、平面丝网层数,在不同工艺条件下,测试旋转床的除尘总分离效率、分级效率和设备总体压降。

3 实验结果与分析

3.1 除尘效率及影响因素

3.1.1 气液比的影响

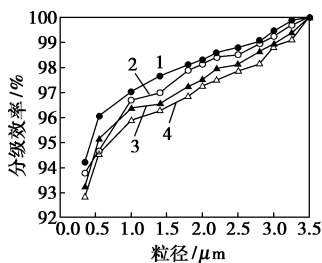
从图3和图4可知,随着液量的增加或气量的减少,即液气比增大,分级效率随之提高。这是由于从旋转床转子中心钢管缝隙喷射出的液体,被高速旋转的轴向丝网不断分散、撕碎,雾化为细小的液滴。在离心力作用下,这些液滴沿着径向向壁面运动,由于液体的表面张力和吸附作用,从而在平面丝网上铺成液膜。当喷液量相对于气量增加时,在雾化区内单位体积的液滴和液膜的数量增加。则气流与液流接触的比表面积增大,气体中尘粒与液流中的液滴、液膜的碰撞几率增大,被捕获的概率明显提高。



气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$: 1—500; 2—600; 3—700

注:液量 $Q_L = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 1400 \text{ r}/\text{min}$, 平面丝网层数 $N = 3$

图3 分级效率与气量的关系曲线



液量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$: 1—1.0; 2—0.8; 3—0.6; 4—0.4

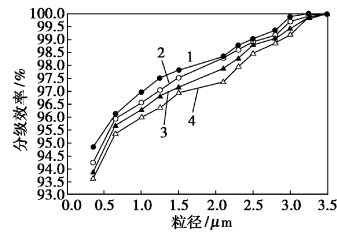
注:气量 $600 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 1400 \text{ r}/\text{min}$, 平面丝网层数 $N = 3$

图4 分级效率与液量的关系曲线

3.1.2 转速的影响

由图5可知,随着转速的提高,除尘的分级效率

也随之增大。增大转速能提高除尘效率的原因在于:随着转速的增加,径向多级丝网填料的线速度增加,增大的剪切力克服了液体的表面张力,可以更好地对液体进行雾化,同时喷出的液滴更密集,速度也更快,加大了液滴和气体中粉尘颗粒的碰撞频率,为粉尘脱除提供了大量的高速的捕集体。再者随着转速的增加,气体在填料的带动下,离心运动也增强;同时置于径向的平面丝网的线速度增大,会使得丝网上的液膜更多、铺展得更薄,相当于增大了其过滤面积^[8]。则粉尘颗粒在经过雾化区时,被丝网上的液膜和填料区域的液滴捕获的几率明显增大,从而强化了对粉尘的分离效率。



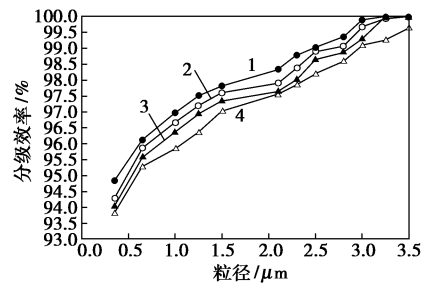
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$: 1—1400; 2—1100; 3—800; 4—600

注:气量 $Q_C = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, 液量 $Q_L = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 平面丝网层数 $N = 3$

图5 分级效率与转速的关系曲线

3.1.3 平面丝网层数的影响

平面丝网层数对分级效率的影响见图6。



平面丝网层数: 1—3层; 2—2层; 3—1层; 4—无

注:气量 $Q_C = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, 液量 $Q_L = 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 1400 \text{ r}/\text{min}$

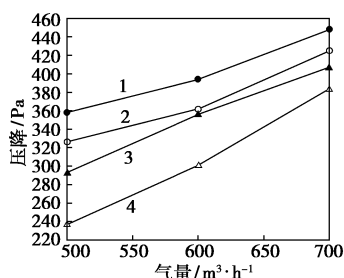
图6 分级效率与平面丝网层数的关系曲线

由图6可知,沿气流的轴向增加平面丝网,对强化除尘的作用很明显;随着平面丝网层数的增加,分级效率也逐步升高。相对于没有加平面丝网的多级雾化超重力旋转床,有轴向平面丝网的旋转床,在高速旋转下,就相当于多了数层“过滤”网,气流经过雾化区时,尘粒被丝网有效地拦截而捕获。同时,液滴沿径向运动时,受到丝网对液滴的剪切力作用,使得液滴分散成直径更小的液滴,单位传质体积内液滴的数量增多,也就增大了液滴与气流中尘粒的碰撞几率。

3.2 设备压降及影响因素

3.2.1 气量的影响

从图 7 可知,随着气量的增加,设备总体压降会随之增大。这是因为随着气量的增加,气量增大带来的旋转床内气流速度的提高也会使液滴、液膜与气体的曳力增加^[9]。又由于设备的压降与表观速度的平方关于某个系数成正比,随着气量的增加,气流通过旋转床的表观速度也相应增高,这样就会促使设备压降的增大。

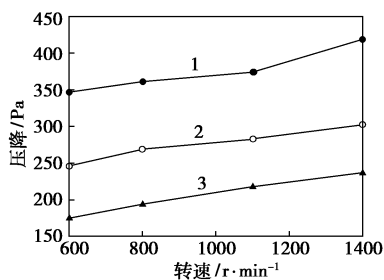


流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$: 1—0.4; 2—0.6; 3—0.8; 4—1.0
注: 转速 $n = 1\,400 \text{ r/min}$, 平面丝网层数 $N = 3$

图 7 压降与气量的关系曲线

3.2.2 转速的影响

从图 8 可知,随着转速的增加,设备的总体压降会增大。这是因为随着转速的增加,旋转床内的超重力强度会增大,一方面离心压降 ΔP_c 增大;同时超重力强度增大,气液与丝网填料剧烈碰撞,液滴不断聚并和分散,雾化程度不断提高,气液错流接触的湍动程度加剧,气体通过轴向平面丝网填料时所受的摩擦和形体阻力增大,损失的机械能增大,两方面共同作用导致湿床压降随转速的增大而增加。



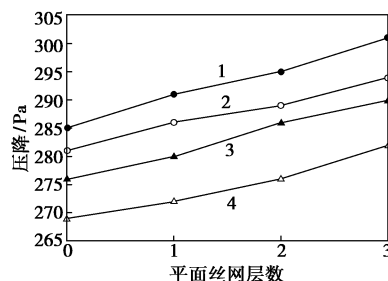
气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$: 1—700; 2—600; 3—500
注: 液量 $Q_L = 700 \text{ m}^3/\text{h}$, 平面丝网层数 $N = 3$

图 8 压降与转速的关系曲线

3.2.3 平面丝网层数的影响

从图 9 中可知,沿轴向随着平面丝网数量的增加,设备的总体压降变化不大。总的趋势是随着丝网数量的增多,设备总体压降增大,但增幅很小,一般不超过 20 Pa。这是因为平面丝网比较薄,在高速旋转的过程中,带动气体同时做离心运动的加速度

较小,因而造成的离心摩擦阻力较小。因此,气体在流经平面丝网的过程中,流速受离心摩擦阻力作用而降低的幅度较小,气体的压降变化不大。



液量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$: 1—1.0; 2—0.8; 3—0.6; 4—0.4
注: 气量 $Q_G = 600 \text{ m}^3/\text{h}$, 转速 $n = 1\,400 \text{ r/min}$

图 9 压降与平面丝网层数的关系曲线

3.3 总分离效率

从实验结果综合分析可知,当多级雾化平面丝网超重力旋转床的气量在 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 、操作液量大于 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 、转速在 $1\,400 \text{ r/min}$ 、平面丝网层数为 3 时,旋转床除尘的总效率均在 98% 以上。在入口粉尘质量浓度为 $4\,000 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的情况下,出口粉尘质量浓度可以控制在 $120 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下,满足国家规定的排放标准。

使用多级雾化平面丝网超重力旋转床进行除尘,其效果与其他的除尘装置比较如表 1 所示。

表 1 除尘装置性能比较

除尘设备	平均压降/Pa	分离效率/%	切割粒径/ μm
多级雾化平面丝网	445	97.4	0.02 ~ 0.03
超重力旋转床			
高效旋片分离器	1200	84.2	2.00 ~ 5.00
喷淋塔	360	94.5	1.00 ~ 2.00
高效文丘里洗涤除尘器	8000	99.9	0.10 ~ 0.20
超重力旋转床	1100	99.9	0.02 ~ 0.03

4 结论

(1) 多级雾化平面丝网超重力旋转床与多级雾化旋转床相比,分离效率有所提高,压降稍有增加;与其他传统除尘设备相比,切割粒径变小,能耗降低。

(2) 多级雾化平面丝网超重力旋转床的除尘效率与操作气量、液量、转速以及轴向丝网数量有关。随液气比、转速以及轴向丝网数量增大,除尘效率增大,所引起的设备总体压降增量较小。

(3) 平面丝网层数取决于除尘效率和能耗的要求,在两者间综合衡量,根据不同粉尘的除去要求,选定平面丝网层数。

(下转第 74 页)

装置采用湿式螺杆压缩机组,能适应较低的吸气压力,对湿压缩不敏感,变工况适应性强,当煤层气中含有水分及液化重烃或杂质时,都不会影响机组正常工作。特别适应我国煤层气的储藏以欠压煤储层为主、井口回收的煤层气气源不稳定并含有固体杂质的特殊工况条件。

(2)采用燃气发动机作为驱动装置。装置采用燃气发动机作为压缩机驱动装置,可直接利用煤层气作为燃气驱动,调节方便,经济环保。燃气发动机热效率高(35%~37%),燃料气消耗量低(0.25~0.30 m³/kWh)^[1]。

(3)采用移动式结构。采用车载形式,具有移动性、灵活性的特点,可根据需要在各井口之间实现灵活移动。开采期结束后,可在不同气源地重复安装使用,装置利用率高。

(4)装置整体性能。整套装置结构简单,体积小、易损件少、振动小、平衡性能好,且技术成熟,可靠性高。机组能耗低,适应野外环境,可安全、长周期、高效率、低成本连续运行。现场的电气设备、仪器仪表均采用防爆型,可确保机组的安全运行。

2 移动式煤层气压缩装置的应用分析

2.1 应用领域

由于煤层气是一种非常规天然气,与常规天然气的开采相比有较为明显的差异。我国煤层气的储藏以欠压煤储层为主,从煤矿中抽放排出的煤层气压强通常与大气压强相同,因此煤层气在被抽采后,往往需先经过增压后才能进一步作为燃料发电,民用燃气等回收利用,或进一步经深冷液化回收,以槽车储存运输。移动式煤层气压缩装置即可应用于该压缩环节,如图 2 所示。

目前国内外专门针对煤层气压缩设计的气体压缩机较少,大多采用天然气压缩机改造后用于煤层气压缩,而驱动装置多采用电机驱动或燃气发动机。如国内天然气田采用的燃气发动机——往复式压缩

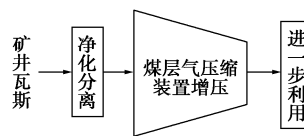


图 2 煤层气回收利用流程示意图

机组,其热效率可达到 35% 左右^[2],但机器笨重,投资和安装费用高,辅助设备较复杂,振动大。川局成都天然气压缩机厂研制的车载式天然气压缩机也是活塞式压缩机,而且主要面向天然气压缩领域。

未来以螺杆压缩机、燃气发动机为主要组成形式的移动式煤层气压缩装置在煤层气压缩领域的优势将会日益凸现:一方面,随着螺杆压缩机技术的不断发展,其在轻烃回收领域的应用不断增加,我国国内厂家已经研制出专门针对煤层气介质的螺杆压缩机产品,为煤层气的压缩提供了更为高效和安全的保证。另一方面,其移动灵活的特性特别适应我国中小型煤矿中煤层气开采抽放气井大面积分布、不集中、气源不稳定的特点,因此,该类装置在我国煤层气压缩领域的应用将不断深入。

2.2 应用设计中需考虑的问题

为确保移动式煤层气压缩装置能安全、稳定地运行,在实际应用设计过程中还应考虑以下几个方面的问题:

(1)车载式煤层气压缩装置的安全性和可靠性。因为煤层气中混有空气或氧气,组分、温度、压力变化范围很大,如在爆炸极限范围内压缩时会发生危险(甲烷在空气中的爆炸极限体积分数为 5.0%~15.0%),随着压力的变化爆炸范围也在变化,而且压力越高危险性越大。因此必须建立 1 套煤层气爆炸极限计算方法和检测设备,在检测、控制的基础上,研究合适的系统技术来解决。

(2)燃气发动机的供气稳压。燃气发动机的供气由煤层气提供,由于煤层气中甲烷浓度、压力、温度等的变化,会影响燃气发动机煤层气压缩装置的

(下转第 76 页)

(上接第 72 页)

参考文献

[1] 化学工程手册编辑委员会. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
 [2] 柳巍. 超重力并流除尘技术[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
 [3] Keyvani M, Gardner N C. Operating characteristics of rotating beds[J]. Chemical Engineering Progress, 1989(9): 48-52.
 [4] 张海峰. 旋转床除尘技术的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 1996.

[5] 简弃非. 同心环波纹碟片填料超重力旋转床流体力学与传质特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 1997.
 [6] 潘朝群, 邓先和. 多级雾化超重力旋填料床的特性及应用[J]. 硫酸工业, 2007(6): 31-38.
 [7] 邓先和, 黄思铭, 邓颂九. 气体轴流型旋转填料床气液传热传质装置: 中国, ZL97212054.8[P]. 1998-08-19.
 [8] 杨涛, 黄之初. 一种新型油烟净化设备净化机理与应用研究[J]. 能源与环境, 2005(3): 67-69.
 [9] 宋云华, 陈建铭. 旋转填充除尘技术的研究[J]. 化工进展, 2003(5): 499-502. ■