

锤片式饲料粉碎机分离装置设计与试验

曹丽英¹ 史兴华¹ 汪建新¹ 白羽^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 包头 014033)

摘要: 为了研究锤片式饲料粉碎机分离装置应具有合理形状,通过计算物料沿外管壁运动时摩擦力所做的功,得到摩擦力做功最小时外管壁的曲线形状,并根据该形状制作了分离装置。利用 ANSYS Workbench 软件中的 Fluent 模块对改进前后分离装置内物料的运动规律进行气-固两相流模拟,比较 2 种分离装置内的玉米颗粒浓度及玉米颗粒速度分布情况。对 2 种分离装置的物料输送效果进行了实际粉碎试验,利用高速摄像技术对比 2 种分离装置内的玉米颗粒分布情况;在不同转速和喂料量的情况下比较 2 种分离装置对物料的运输分离效果。软件模拟和试验结果均表明:当转速在 1 500 ~ 3 500 r/min 间变化时,新分离装置比原分离装置出料量高 0.18 ~ 0.3 kg/s。当转速一定时,喂料量越接近理论设计料量,新分离装置的出料量越高于原分离装置。当转速为 2 500 r/min,喂料量为 5 kg 时,二者出料量相差约 0.01 kg/s。

关键词: 饲料; 锤片式粉碎机; 分离装置

中图分类号: S226.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0128-06

Design and Experiment of Separation Device of Hammer Feed Mill

Cao Liying¹ Shi Xinghua¹ Wang Jianxin¹ Bai Yu^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

2. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Baotou 014033, China)

Abstract: This article is about researching the reasonable shape of the hammer feed mill's separation device. We got the shape under the situation that the friction did the minimum work by calculating the friction's work when the corn granules moving inside the separation device's tube. The new separation device was made out on the basis of analysis and calculation. On the one hand, we used Fluent simulation to analyze the movement of the materials in the new separation device and the original separation device; on the other hand, we contrasted the actual transport results of the two kinds of separation devices. We got the distribution of the corn granules within the separation devices by adopting the high-speed image technology, and then we obtained the data records of the two kinds of separation devices at different turning velocities and feed quantities. Both the simulation results and the experimental results shows that the new separation device raises the transport efficiency, especially at high speed and big feed quantity. When the speed becomes higher, the transport efficiency of the original separation device gets closer to the new separation device, but the efficiency of the new separation device is still higher, the efficiency gap of the two kinds of separation devices becomes bigger again at the speed of 3 500 r/min; when the feed quantity becomes bigger and gets closer to the nominal rating, the efficiency gap of the two kinds of separation devices becomes bigger too, because the new separation device not only uses a new reasonable shape, but also becomes smaller than the original one. So the new separation device is effective for energy saving and consumption reducing especially at high speed and big feed quantity. This research will play an important role in energy saving and consumption reducing of feed production. It also provides a theoretical reference for the design of the separation device.

Key words: feed; hammer feed mill; separation device

引言

传统卧式锤片式饲料粉碎机工作时,会在机体内产生绕主轴旋转的环形气流,形成环流层和负压区,使已达到粒度要求的物料颗粒不能及时透筛,出现物料过粉碎、物料温升大、生产效率低等问题^[1-2]。鉴于此,课题组在传统粉碎机结构基础上,以提高粉碎机分离效率为目的,对传统粉碎机的筛分系统进行了改进,设计了一种新型结构的粉碎机^[3],并对该粉碎机的分离机理进行了长期的研究,前期研究主要集中在分离装置内流场的仿真模拟和试验测试方面^[4-5]。本文通过理论分析,以最小摩擦功耗为研究目标,设计一种有利于物料运动和分离的分离装置的壁面曲线,并就其分离装置的形状设计问题加以讨论。

1 问题的提出

如图 1 所示,物料从粉碎室的切线方向进入分离装置,在分离装置管壁和管内气流的共同作用下移动到筛面处。在这个过程中,物料运动方向发生了变化,速率可能改变。实际情况是大量物料(尤其是大颗粒)与外侧管壁的内表面发生碰撞,在该表面上滑动,由于摩擦而造成了能量损失,减小了物料的速度,降低了物料颗粒达到筛面的概率^[6]。因此,合理设计分离装置的形状曲线,减小物料运动过程中的能量损失,对于节能降耗,提高粉碎效率等具有实际意义,同时也成为分离装置设计过程中主要考虑的问题。

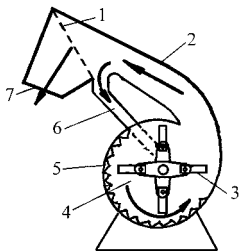


图 1 锤片式粉碎机结构示意图
Fig. 1 Diagram of hammer feed mill

1. 筛片 2. 分离装置 3. 锤片 4. 粉碎室 5. 齿板 6. 回料管
7. 出料口

2 最小摩擦功耗曲线分离装置设计

利用泛函分析计算出在物料颗粒沿外管壁运动的情况下,摩擦力做功最小时的外管壁曲线形状^[7-8],其方程为

$$y = -\frac{2c\sqrt{\mu m}}{c_1^2}(-c_1x - c_2)^{\frac{1}{2}} + c_3x + c_4 \quad (1)$$

式中 μ ——摩擦因数 m ——颗粒质量

$c、c_1、c_2、c_3、c_4$ ——任意常数,需用有关边界条件确定

$x、y$ ——曲线的横、纵坐标

假设单颗粒物料在分离装置内匀速运动,仅方向改变,大小为 10 m/s,入口处斜向向上 85°方向进入分离装置,出口处以水平方向出料,将以上边界条件代入式(1)计算得到方程

$$y = 0.153(141.77x + 0.76)^{\frac{1}{2}} - 1.086x - 0.133 \quad (2)$$

根据此曲线设计的分离装置外管壁如图 2 所示。

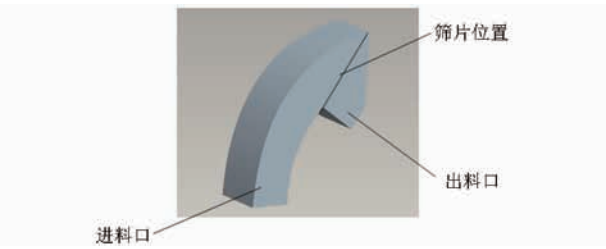


图 2 最小摩擦功耗曲线分离装置模型
Fig. 2 Model of minimum frictional power consumption separation device

3 原始分离装置与最小摩擦功耗曲线分离装置气-固两相流数值模拟

3.1 几何建模

基于有限单元法,运用 ANSYS Workbench 软件中的 Fluent 模块^[9-11],对分离装置中的物料运动过程进行气-固两相流模拟,将分离装置的三维几何实体模型导入 ANSYS 前处理中进行网格划分,建立其有限元模型^[12-16]。网格划分后的分离装置如图 3 所示。模拟采用 Fluent 中的欧拉多相流模型^[17]。

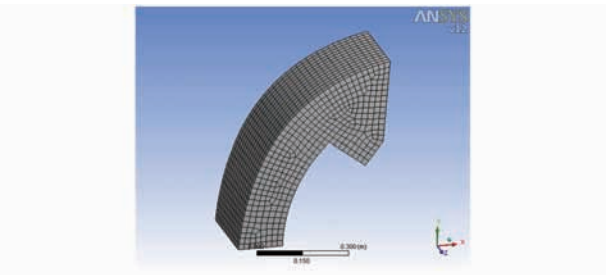


图 3 计算区域网格单元
Fig. 3 Unit of computational area

3.2 物料固相浓度模拟

经过实际粉碎试验,用标准筛对粉碎后物料颗粒的粒度进行测量发现,被粉碎的物料颗粒粒度大部分集中在 3 mm 左右,所以,在模拟研究中,假设物料颗粒粒径为 3 mm。玉米颗粒浓度(单位体积的玉米颗粒质量,下同)云图如图 4、5 所示。

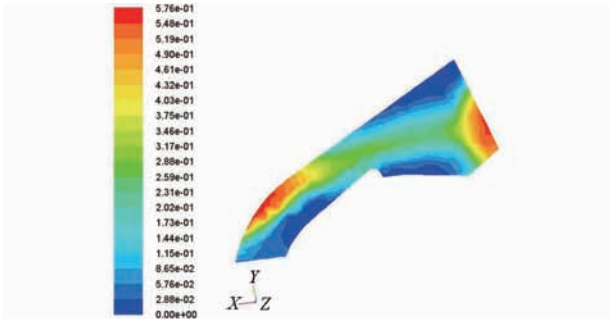


图 4 原始分离装置玉米颗粒浓度云图
Fig4 Contour band of original separation device

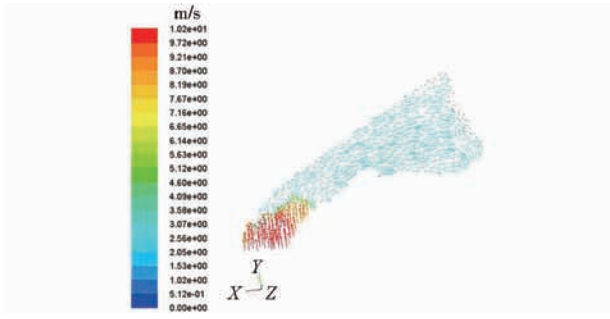


图 6 原始分离装置玉米颗粒速度云图
Fig.6 Velocity contour of original separation device

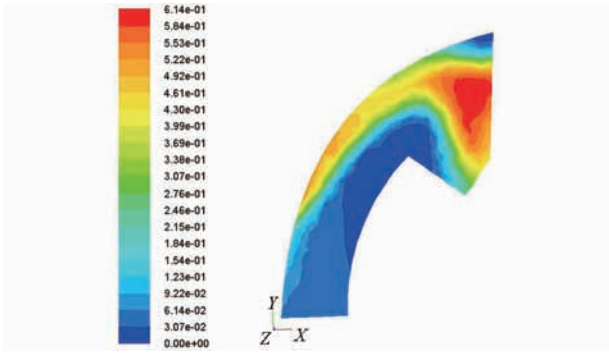


图 5 最小功耗曲线分离装置玉米颗粒浓度云图
Fig.5 Contour band of minimum power consumption separation device

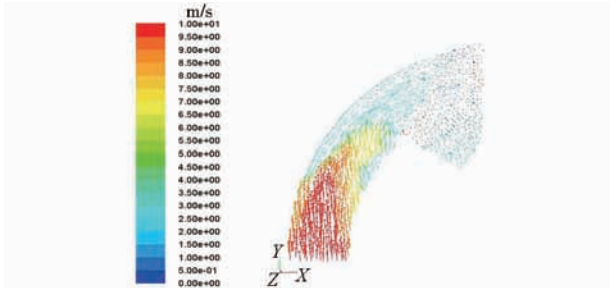


图 7 最小摩擦功耗曲线分离装置玉米颗粒速度云图
Fig.7 Velocity contour of minimum power consumption separation device

从图 4 可以看出,玉米颗粒在原始分离装置内的高浓度区域集中在中下部。这是因为物料在上升的过程中受到了外管壁的阻挡作用,一部分物料与外管壁发生碰撞被反弹回粉碎室,影响了物料的运输分离效果。另外,物料在重力及负压的影响下被气流带到筛片的中下部,所以有效筛分面积只有筛片中下部区域。

从图 5 可以看出,玉米颗粒在最小摩擦功耗曲线分离装置内高浓度区域沿外管壁集中在上部。因为该分离装置外管壁曲线为最小摩擦功耗曲线,所以物料沿此管壁运动时摩擦力做功最小。同时,物料可以被气流带到筛片的顶部,所以有效筛分面积较原始分离装置更大,几乎为整个筛片,故物料透筛效率有所提高。

比较 2 种分离装置的物料颗粒浓度云图可知,改进后的分离装置可以提高物料运输分离效率。

3.3 物料颗粒速度模拟

由粉碎室出来的物料是在锤片以及气流的双重作用下进入分离装置内的,所以分离装置内的气流分布至关重要。对原始分离装置及最小摩擦功耗曲线分离装置内的物料速度进行模拟,结果如图 6、7 所示。

从图 6 可以看出,在原始分离装置内,物料高速区集中在入口位置,因为外管壁对气流的阻挡作用

较大,物料与外管壁发生碰撞,能量损失严重。所以当物料从粉碎室出来以后就没有足够的能量到达筛片,显然不利于物料的输送。而从图 7 可以看出,在最小摩擦功耗曲线分离装置内,物料高速区在分离装置中的位置更靠上。说明物料能量损失较小,而气流速度更大,有利于物料的运输分离。

通过比较物料浓度分布情况及速度分布情况,可以得知物料在最小摩擦功耗曲线分离装置内的能量损失较小,更容易被气流带到筛片处进行透筛,从而提高了物料的运输分离效率。

4 试验

4.1 基于高速摄像技术的气-固两相流试验

研制出了最小摩擦功耗曲线分离装置,如图 8 所示。原始分离装置如图 9 所示。为了进一步验证模拟结果的正确性,对 2 种分离装置进行两相流试验研究。

试验中,通过调节粉碎机的转速来控制物料进



图 8 最小摩擦功耗曲线分离装置实体
Fig.8 Entity of minimum power consumption separation device



图 9 原始分离装置实体

Fig.9 Entity of original separation device

入分离装置的速度。本文设定粉碎机的转速为 2 000 r/min,喂入一定的物料,当粉碎工作开始时,利用高速摄像机对分离装置内的物料进行拍摄,结果如图 10、11 所示。

从图 10、11 可以看出,在原始分离装置内物料受到负压的影响只能被气流带到筛片的中部,而在最小摩擦功耗曲线分离装置内,大部分物料都能沿着外管壁运动到筛片的顶部,有效筛分面积较大,且物料能量损失较小。结合模拟结果可知,试验结果与模拟结果基本一致,说明数值模拟具有一定的参考价值。



图 10 原始分离装置玉米颗粒浓度分布图像

Fig.10 Concentration distribution of corn granules in original separation device

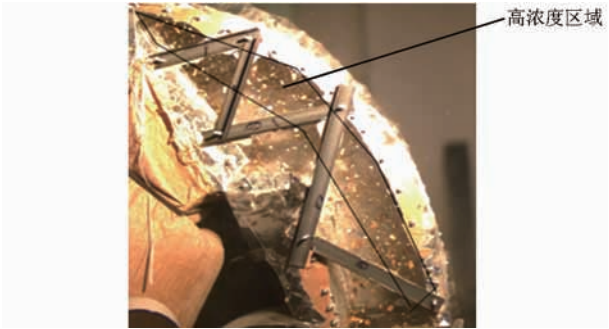


图 11 最小摩擦功耗曲线分离装置玉米颗粒浓度分布图像

Fig.11 Concentration distribution of minimum power consumption separation device

4.2 物料运输分离效果试验

分离装置的主要作用是使粉碎后的物料通过筛片的筛选,将符合粒度要求的物料颗粒分离出来,不符合要求的则通过回料管回流到粉碎室继续粉碎,所以分离装置对物料的运输分离效果有直接影响。

研究这 2 种分离装置在不同转速和喂料量的情况下物料的运输分离效果。喂料量为 5 kg 时,分别设定转速为 1 500、2 000、2 500、3 000、3 500 r/min,记录试验数据如表 1、2 所示。当转速为 2 500 r/min 时,分别设定喂料量为 3、4、5 kg,记录试验数据如表 3、4 所示。

表 1 不同转速下最小摩擦功耗曲线分离装置试验结果

Tab.1 Results of minimum power consumption separation device at different turning velocities

试验 序号	电动机电 流频率/ Hz	粉碎机主 轴转速/ (r·min ⁻¹)	喂料量/ kg	出料量/ kg	耗时/ s	单位时间 出料量/ (kg·s ⁻¹)
1	20.21	1 500	5	3.427	20	0.171
2	26.98	2 000	5	3.673	20	0.184
3	33.72	2 500	5	3.836	20	0.192
4	42.23	3 000	5	4.094	20	0.205
5	49.18	3 500	5	4.187	20	0.209

表 2 不同转速下原始分离装置试验结果

Tab.2 Results of original separation device at different turning velocities

试验 序号	电动机电 流频率/ Hz	粉碎机主 轴转速/ (r·min ⁻¹)	喂料量/ kg	出料量/ kg	耗时/ s	单位时间 出料量/ (kg·s ⁻¹)
1	20.21	1 500	5	3.248	20	0.162
2	26.98	2 000	5	3.370	20	0.169
3	33.72	2 500	5	3.656	20	0.183
4	42.23	3 000	5	4.023	20	0.201
5	49.18	3 500	5	4.046	20	0.202

表 3 不同喂料量下最小摩擦功耗曲线分离装置试验结果

Tab.3 Results of minimum power consumption separation device at different feeding rates

试验 序号	电动机电 流频率/ Hz	粉碎机主 轴转速/ (r·min ⁻¹)	喂料量/ kg	出料量/ kg	耗时/ s	单位时间 出料量/ (kg·s ⁻¹)
1	33.72	2 500	3	2.729	20	0.136
2	33.72	2 500	4	3.775	20	0.189
3	33.72	2 500	5	3.836	20	0.192

表 4 不同喂料量下原始分离装置试验结果

Tab.4 Results of original separation device at different feeding rates

试验 序号	电动机电 流频率/ Hz	粉碎机主 轴转速/ (r·min ⁻¹)	喂料量/ kg	出料量/ kg	耗时/ s	单位时间 出料量/ (kg·s ⁻¹)
1	33.72	2 500	3	2.744	20	0.137
2	33.72	2 500	4	3.720	20	0.186
3	33.72	2 500	5	3.656	20	0.183

分别以转速和喂料量为横坐标,单位时间出料量为纵坐标,在 Matlab 软件中画出这 2 种分离装置

的单位时间出料量曲线,如图 12、13 所示。

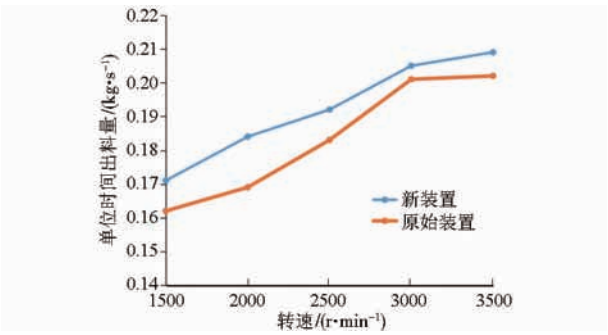


图 12 2 种分离装置不同转速下单位时间出料量变化曲线
Fig. 12 Productivity curves of the two kinds of separation devices at different turning velocities

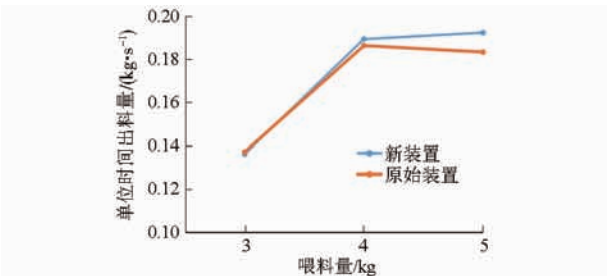


图 13 2 种分离装置不同喂料量下单位时间出料量变化曲线
Fig. 13 Productivity curves of the two kinds of separation devices at different feeding rates

从图 12 可以看出,随着转速的增加,2 种分离装置的单位时间出料量都在增加。一方面,随着锤片组转速的增加,气流速度增大,对物料的运输能力在增强;另一方面,在锤片的抛射作用下,物料速度也会增加。在此双重作用下物料到达筛片的时间变短,与筛片接触的几率增加,这是物料单位时间出料量增加的原因所在。比较 2 种分离装置,当转速为 1 500 ~ 3 500 r/min 时,最小摩擦功耗曲线分离装置的出料量明显高于原始分离装置的出料量。特别是在 2 000 r/min 时,最小摩擦功耗曲线分离装置对物料的运输分离效率高 于原始分离装置。因为改进后

的分离装置外管壁不仅采用了最小摩擦功耗曲线,而且该分离装置的尺寸比原始分离装置要小,缩短了物料在分离装置内的行程,因此显著提高了能量的利用率。而随着转速的增加,2 种分离装置的出料量逐渐接近。从表 1 和表 2 可以看到,在 2 500 r/min 时,2 种分离装置的单位时间出料量相差 0.18 kg。但在 3 500 r/min 时,新分离装置的出料量又明显高于原分离装置。

从图 13 看出,转速不变时,随着喂料量的增加,2 种分离装置的单位时间出料量都在增加,在开始阶段,由于喂料量小,粉碎机的粉碎能力和物料分离能力都未达到饱和状态,所以二者出料量的差异不太明显,但随着喂料量逐渐加大,特别是喂料量接近该粉碎机的理论设计喂入量时,新分离装置的出料量明显高于原分离装置。

5 结 论

(1) 利用软件模拟得到的结果与试验结果相一致,证明了通过软件模拟方法设计粉碎机分离装置的可行性。提出的最小摩擦功耗曲线设计方法对类似问题的解决具有一定的参考价值。

(2) 假定单颗粒物料在分离装置内匀速率运动,仅方向改变,大小为 10 m/s,入口处以斜向向上 85°方向进入分离装置,出口处以水平方向出料的条件下,采用提出的曲线形状制作分离装置可以提高粉碎机的生产效率。从测得的试验结果可以看出,在不同转速和不同喂料量的试验条件下,新分离装置的分离效率均高于原始分离装置。

(3) 在低转速情况下,最小摩擦功耗曲线分离装置对物料的分离效率有明显提高,随着转速的增加,2 种分离装置的分离效率逐渐接近,但新分离装置的分离效率仍高于原始分离装置。所以采用最小摩擦功耗曲线制作的分离装置可以提高粉碎机的生产效率。

参 考 文 献

1 HIROHISA Takeuchi,HIDEYA Nakamura,TOMOHIRO Iwasaki,et al. Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer [J]. Powder Technology,2012,217:148 – 156.

2 曹丽英,王顺喜,武佩,等. 锤片式饲料粉碎机若干关键技术问题的探讨[J]. 粮食与饲料工业,2009(7):34 – 36.
CAO Liying,WANG Shunxi,WU Pei,et al. The discussion about some important technologies of feed hammer mill[J]. Cereal and Feed Industry,2009(7):34 – 36. (in Chinese)

3 曹丽英. 一种循环筛分式粉碎机:中国,201207358752[P]. 2012 – 12 – 18.

4 汪建新,孙洪斌. 锤片式饲料粉碎机分离装置结构的改进[J]. 饲料工业,2013(3):11 – 14.
WANG Jianxin,SUN Hongbin. Improvement on the separation device structure of the feed hammer mill [J]. Feed Industry,2013 (3):11 – 14. (in Chinese)

5 曹丽英,武佩. 粉碎机分离装置气-固两相流研究——基于 FLUENT[J]. 农机化研究,2013,2(2):23 – 26.
CAO Liying,WU Pei. Study on air-solid tow-phase flow in the sieving set-up of a hammer mill [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,2(2):23 – 26. (in Chinese)

6 曹丽英. 新型锤片式粉碎机物料分离特性的模拟与测试分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
CAO Liying. Measuring and simulating analysis on material-sieving properties for a new hammer mill [D]. Huhhot: Inner Mongolia University of Science and Technology,2010. (in Chinese)

7 老大中. 变分法基础[M]. 北京:国防工业出版社,2004:77.

8 汪建新,张广义,曹丽英. 新型锤片式饲料粉碎机分离流道内物料运动规律[J]. 农业工程学报,2013,29(9):18-23.
WANG Jianxin,ZHANG Guangyi,CAO Liying. Research of materials motion law in separation flow of new type hammer feed grinder [J]. Transactions of the CSAE,2013,29(9):18-23. (in Chinese)

9 葛研军,姜玉龙,肖奇,等. 笼型转子异步磁力耦合器的温度场研究[J]. 机械工程与技术,2015,4(1):1-8.
GE Yanjun,JIANG Yulong,XIAO Qi,et al. Research on the temperature field of asynchronous magnetic coupling [J]. Mechanical Engineering and Technology,2015,4(1):1-8. (in Chinese)

10 龚俊,宋永奇,郭润兰. 一种新型湍流超细粉碎机流场的数值模拟[J]. 现代制造工程,2006(11):77-79.
GONG Jun,SONG Yongqi,GUO Runlan. Numerical simulation of flow on a new model of comminuting mill [J]. Modern Manufacturing Engineering,2006(11):77-79. (in Chinese)

11 李文华,苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术,2006(4):39-41.
LI Wenhua,SU Mingjun. Turbulence model in common use and it's application in the FLUENT software [J]. Pump Technology,2006(4):39-41. (in Chinese)

12 孙晨,陈凌珊,汤晨旭. 气固两相流模型在流场分析中的研究进展[J]. 上海工程技术大学学报,2011,25(1):49-53.
SUN Chen,CHEN Lingshan,TANG Chenxu. Study and development of gas-solid two-phase flow model in flow field analysis [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science,2011,25(1):49-53. (in Chinese)

13 孙洪斌. 提高锤片式饲料粉碎机工作效率方法的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2013.
SUN Hongbin. Study and research on improve the work efficiency of the feed hammer mill [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology,2013. (in Chinese)

14 帅群. 小型提升管气固两相流冷模实验及数值模拟研究[D]. 北京:中国石油大学,2007.
SHUAI Qun. Experimental measurement and numerical simulation of the gas-solid two-phase flow in mini-riser reactor [D]. Beijing:China University of Petroleum,2007. (in Chinese)

15 胡桂荣,李意民,贾晓娜. 离心风机内气固两相流的值模拟[J]. 煤矿机械,2008(3):37-39.
HU Guirong,LI Yimin,JIA Xiaona. Simulation of gas-solid two-phase flow of centrifugal fan [J]. Coal Mine Machinery,2008(3):37-39. (in Chinese)

16 陈越南,杨晓清. 稀相气固两相流动的数值求解[J]. 浙江大学学报:自然科学版,1988(3):86-94.
CHEN Yuenan,YANG Xiaoqing. Computation of dilute gas-particle flows based on SIMPLE method [J]. Journal of Zhejiang University:Natural Science,1988(3):86-94. (in Chinese)

17 蒙伟安,穆塔里夫·阿赫迈德,严荣波. T 型管流场混合多相流与欧拉多相流模型的数值研究[J]. 机械设计与制造,2012(2):27-29.
MENG Weian,MUTELLIP Ahmat,YAN Rongbo. Numerical research on flow field of T-tube by mix-multiphase flow model and euler-multiphase flow model [J]. Machinery Design & Manufacture,2012(2):27-29. (in Chinese)

(上接第 206 页)

42 YAMASHITA Y, JAFFE R. Characterizing the interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(19): 7374-7379.

43 汪玲玲. 三维荧光光谱技术在溶解性有机物研究中的应用[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(1): 153-155.
WANG Lingling. Application of three dimensional excitation-emission fluorescence technique in dissolved organic matter analysis [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(1):153-155. (in Chinese)

44 李卫华,盛国平,陆锐,等. 厌氧产甲烷受抑制过程的三维荧光光谱解析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2131-2315.
LI Weihua, SHENG Guoping, LU Rui, et al. Analysis of the EEM fluorescence spectra of effluent from anaerobic methane reactor during the Inhibition process[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2131-2135. (in Chinese)

45 LI X, DAI X, TAKAHASHI J, et al. New insight into chemical changes of dissolved organic matter during anaerobic digestion of dewatered sewage sludge using EEM-PARAFAC and two-dimensional FTIR correlation spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2014, 159: 412-420.

46 BLODAU C, DEPPE M. Humic acid addition lowers methane release in peats of the Mer Bleue bog, Canada[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 52: 96-98.

47 LIU K, CHEN Y, XIAO N, et al. Effect of humic acids with different characteristics on fermentative short-chain fatty acids production from waste activated sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(8): 4929-4936.