



基于图像处理的回转滚筒内颗粒群提取方法

张立栋¹, 刘朝青¹, 朱明亮¹, 于丁一¹, 李少华², 王 擎¹

(1. 东北电力大学 油页岩综合利用教育部工程研究中心, 吉林 吉林 132012; 2. 中国大唐集团电力科学技术研究院, 北京 100033)

摘要: 为了研究低转速下回转滚筒内多组元颗粒群混合情况, 提出 Photoshop 与 Matlab 图像处理相结合的方法; 选取恰当的阈值进行图像分割, 利用 Matlab 形态学原理对不同粒径的颗粒进行筛分, 提取混合图像中不同粒径的颗粒个数, 用于分析颗粒群的混合机理及计算表征颗粒混合度的 Lacey 指数。结果表明, 与人工统计相比, 该方法处理颗粒群混合问题的颗粒个数提取准确度可达 95% 以上。

关键词: 颗粒群混合; 图像处理; 阈值分割; 颗粒提取

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2013)04-0042-05

Extraction Method of Particle Groups Based on Image Processing in Rotary Drum

ZHANG Lidong¹, LIU Chaoqing¹, ZHU Mingliang¹,
YU Dingyi¹, LI Shaohua², WANG Qing¹

(1. Engineering Research Centre of Ministry of Education for Comprehensive Utilization of Oil Shale, Northeast Dianli University, Jilin 132012; 2. China Datang Corporation Science and Technology Research Institute, Beijing 100033, China)

Abstract: To research the mixing situation of multi-component particle groups in low speed rotary drum, a method based on Photoshop and Matlab image processing was presented. An appropriate threshold was selected to segment the image. Matlab morphology principle was utilized to screen particles with different sizes. The particles numbers with different sizes were extracted to analyze the mixing mechanism of particle groups and calculate Lacey index which represented the mixing level of particles. The results show that the accuracy of this method can reach beyond 95% matching to the manual statistics in dealing with mixing of particle groups.

Key words: particle group mixing; image processing; threshold segmentation; particles extraction

颗粒物质普遍存在于工业生产和日常生活中, 颗粒混合被广泛应用在制药、化工、能源等领域, 其混合程度的优劣对产品的影响至关重要, 对颗粒混合过程

与机理的研究有很重要的理论意义和实用价值。目前国内外学者多采用试验和数值模拟方法等对颗粒混合进行研究, 研究过程中对颗粒群的混合运动多采取直接观察的方式, 而在定量评价颗粒混合质量时, 需要确定特定区域内不同粒径的颗粒群个数。张勇等^[1]运用快速摄像图像处理技术, 采用相对标准差作为混合指数, 考察喷动气速和流化气速对颗粒混合行为的影响; 张立栋等^[2]以滚筒径向颗粒的 Lacey 指数作为混合指数, 研究 5 种不同转速下回转干馏炉内二组元颗粒混合指数的变化趋势; 赵永志等^[3]利用 Lacey 混合指数评价宽粒径分布流化床内颗粒的混合情况; 黄德财等^[4]利用分子动力学方法研究颗粒密度对旋转筒内二元颗粒体系混合与分离的影响; 高红利等^[5]对水平薄滚筒内二元湿颗粒体系混合过程进行数值模拟, 与同等操作条件下干颗粒体系的混合行为进行比较, 分析液体对颗粒混合行为的影响; van Puyvelde 等^[6]通过对颗粒混合图像的研究提出了通过计算颗粒接触数来衡量颗粒混合程度。以上研究使用不同混合指数评价混合质量时, 均对二维混合图像进行网格划分, 统计每个小样本内颗粒个数, 计算混合指数。在文献[1]中, 颗粒混合抽样区域被划分成 5×10 的网格, 示踪区域被划分成 9×10 的网格; 在文献[2]中, 颗粒混合取样图被划分成 12×12 的网格; 在文献[3]中, 流化床被划分成 15×60 个样本, 每个样本为长、宽均为 1 cm 的网格; 在文献[4]中, 旋转筒被划分为长和宽均为 5.0 mm 的方形区域作为样本。以上研究均未给出详细说明。

本文中以回转滚筒内多组元颗粒混合实验为背景, 结合 Photoshop 与 Matlab 对混合二维图像进行图像分割、粒径筛分等操作, 提取混合图像中不同粒径颗粒群数量, 用于计算混合指数, 分析颗粒群的混合机理, 最后分析造成颗粒提取误差的原因。

1 实验部分

1.1 实验装置及物料

采用的回转滚筒实验装置如图 1 所示。回转滚筒绕其中心轴旋转, 水平放置, 电机调速仪可使回转滚筒在 0~50 r/min 进行无级调速, 滚筒内径 D 为 84 mm, 内

收稿日期: 2012-12-28, 修回日期: 2013-02-27。

基金项目: 国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新研究项目, 编号: OSR-05; 吉林省重大科技发展计划项目, 编号: 20096034。

第一作者简介: 张立栋(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为油页岩综合利用及回转装置内颗粒混合与分离。E-mail: nedu1015@yahoo.com.cn。

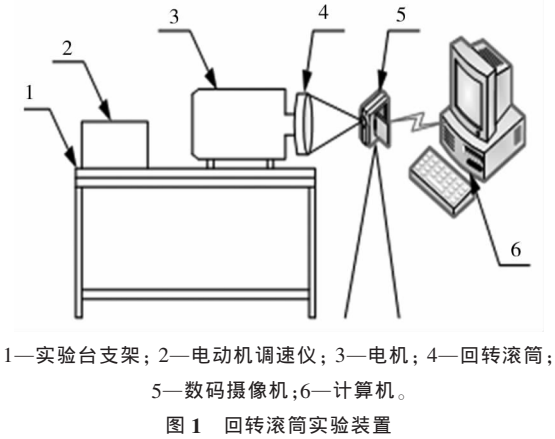


图 1 Diagrammatic sketch of rotary drum

部厚度 d 为 8 mm, 体积 V 为 44 311.68 mm³。

实验用球形颗粒(GCr15 钢)的 HRC 表面硬度值为 62~66, 密度为 7.85 g/cm³, 弹性模量为 2.16 kPa, 颗粒粒径分别为 1、3、5 mm, 颗粒按前者与后两者的体积比为 1:1 进行填充。颗粒数量如表 1 所示。

表 1 不同粒径的颗粒数量

Tab. 1 Quantity of particles with different particle sizes

填充率/%	不同粒径的颗粒个数		
	1 mm	3 mm	5 mm
16.7	4 188	50	23
33.3	8 376	100	46

1.2 实验工况设置

实验工况设置如表 2 所示。

1.3 采样及混合度评价方法

使用高清摄像机对圆形滚筒中颗粒的混合运动

表 2 实验工况设置
Tab. 2 Experimental conditions

填充率/%	转速/(r·min ⁻¹)
16.7	3.4、6.8、10
33.3	3.4、6.8、10

进行全程拍摄, 对录像按每秒 24 帧的频率提取颗粒混合图像, 可较真实地反应混合效果。

采用 Lacey 混合指数^[7]定量描述滚筒内多组元颗粒群的混合情况, 该指数表达式为

$$M=\frac{S_0^2-S^2}{S_0^2-S_f^2}, \tag{1}$$

式中: S^2 为 2 种颗粒的实际混合方差; S_0^2 为完全分离状态的方差, $S_0^2=XY$, X 和 Y 分别为 2 种颗粒的总体积分别占整个体系颗粒总体积的体积分数; S_f^2 为完全混合状态的方差, $S_f^2=XY/N$, N 为 1 个样本内的平均颗粒个数。

2 图像处理

2.1 颗粒混合图像预处理

2.1.1 图像剪切

对从录像中提取的颗粒混合图像进行剪切, 截取整个颗粒群混合区域。为了清晰直观地表达出所使用的图像阈值处理方法, 截取混合图像中部分颗粒混合区域。以填充率为 33.3%, 转速为 3.4 r/min 时混合过程中的图像为例, 图像剪切结果如图 2 所示。

2.1.2 红绿蓝(RGB)真彩图像转化成灰度图像

在对图像进行处理和分析时, 为了减少数据处理

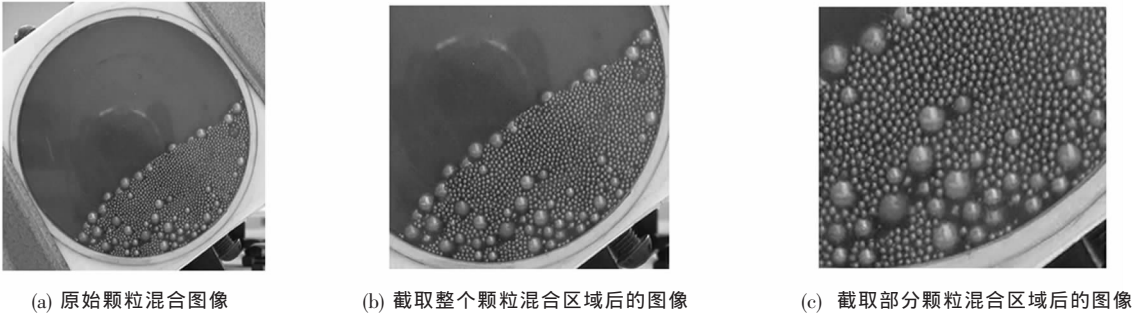


图 2 图像剪切结果

Fig. 2 Results of image clipping

量、增大处理速度, 将红绿蓝(RGB)真彩图像转化为灰度图像。利用 Photoshop 软件的图像模式转化功能, 将 RGB 真彩图像转化成灰度图像, 以便下一步灰度阈值化处理。

2.1.3 图像增强

图像增强方法^[8]减弱或去除图像中不需要的信息, 突出、加强有用信息, 是一种按照一定要求对现有图像进行加工的信息处理方法。根据增强处理所在的空间不同, 常见的图像增强方法可分为频域处理方法和空域处理方法。前者先按照某种变换(如傅里叶变换)将

图像从空间域变换到频率域, 然后在频率域处理图像, 最后将图像频率数据进行相应的反变换恢复到空间域数据; 后者则直接对每一像素的灰度值在图像所处的二维空间里进行处理。图像增强的方法主要有空域滤波法、频域滤波法、直方图均衡化法以及灰度值调整法等。本文中调用 Matlab 软件中 adapthisteq 函数, 实现有限对比自适应直方图均衡化, 增强图像的对比度。

2.1.4 图像阈值分割处理

为了研究回转滚筒内多组元颗粒混合情况, 需要对混合图像进行图像分割。分割的准确性直接影响后

续图像处理的有效性,图像分割方法的关键步骤是阈值选取。阈值法利用图像中要提取的目标物与背景的灰度特性差异,通过设置恰当的阈值,将图像灰度划分为 2 个或多个灰度区间,以确定分割物体边界,它是一种简单有效的图像分割方法。常见阈值法有 p -分位数法、双峰法、灰度直方图变换法、Otsu 法、灰度直方图凹度分析法等^[9],都各有其优缺点和适用范围。 p -分位数法是基于灰度直方图的自动阈值选择方法,它假设在亮背景中存在一个暗目标,并且已知目标在整幅图像中所占面积比为 p 。此方法计算简单,抗噪性好,但是需预先知道给定目标和整幅图像的面积比 p 。双峰法的灰度直方图有明显的 2 个波峰,分别与图像中的目标和背景相对应,它是针对目标与背景灰度级有明显差别的图像的方法。此方法简单易行,但不适用于灰度直方图中波峰不明显的图像。灰度直方图变换法直接对灰度直方图进行变换,使其具有更尖的波峰和更深的波谷,而非直接选取阈值,然后利用双峰法得到最优阈值。

由于实验过程中的颗粒群混合图像具有较好的对比度,使用 Photoshop 软件基于灰度直方图凹度分析法^[10]的阈值检测方法,对图像选取合适的阈值,此方法较 Matlab 软件中常用的最大类间方差法,即 Otsu 算法^[11],具有处理快速、实时调节阈值选取方便,以及可以避免阈值过小,造成小颗粒丢失,或者阈值过大,造成颗粒粘连,影响颗粒个数提取等优点。图 3 所示为 Photoshop 软件与 Matlab 软件的阈值处理图像对比。

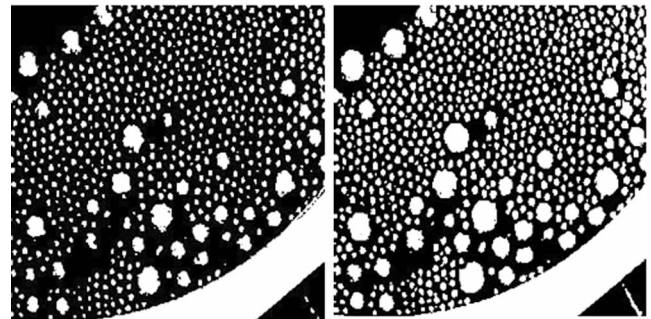
2.2 基于 Matlab 软件的混合图像处理

2.2.1 灰度图像转化成二值图像

在对混合颗粒群进行粒径筛分时,需要对粒径及形状特征进行提取。区域的形状特征仅与区域的像素点有关,与像素点的灰度值无关,需要将其转化成二值图像。调用 Matlab 软件中的 im2bw 函数将经过预处理的颗粒群混合灰度图像转化成二值图像。

2.2.2 对二值图像进行优化处理

为了填充二值图像前景区域内出现的黑色孔洞,



(a) Matlab 软件

(b) Photoshop 软件

图 3 Photoshop 软件与 Matlab 软件的阈值处理对比

Fig. 3 Threshold processing contrast of Photoshop and Matlab software

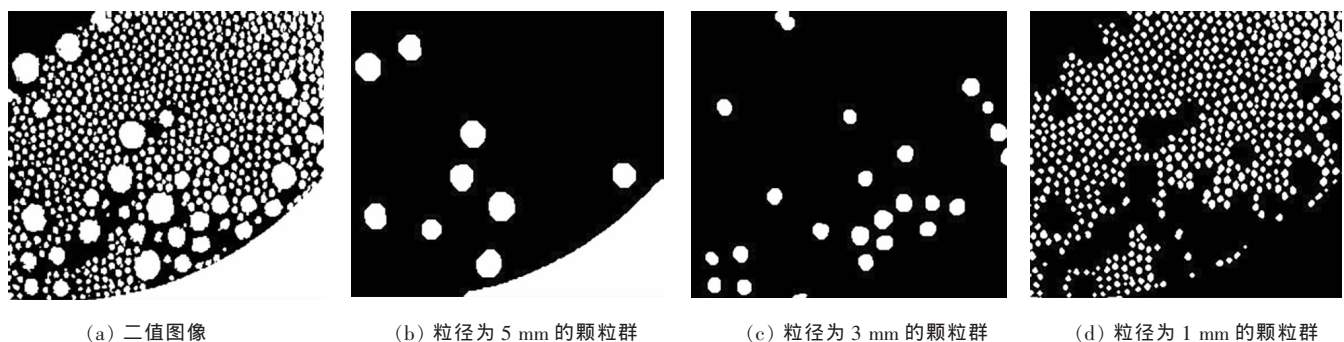
降低对计算结果准确性的影响,利用 Matlab 软件图像处理工具箱中的 infill 函数进行区域填充操作。

2.2.3 对二值图像进行形态学操作

形态学操作利用具有一定形态的结构元素度量和提取图像中对应的形状,以达到分析和识别图像的目的。形态学操作常分为膨胀和腐蚀 2 种。前者将与物体接触的所有背景点都合并到物体中,使边界向外扩张,它可以用来填补物体中的孔洞;而后者是消除边界点,使边界向内收缩的过程,它可以用来消除微小且无意义的物体。对于颗粒群灰度值高于背景灰度值的图像,采用开运算,即先对图像进行腐蚀然后再对结果进行膨胀,开运算完全删除了不能包含结构元素的对象区域,平滑了对象的轮廓,断开了狭窄的连接,去掉了细小的突出部分。本文中使用半径递增的圆盘结构元素,通过调用 imopen 开运算函数,使不同粒径的混合颗粒依次显现出来,调用 imsubtrec 函数,用小半径结构元素处理过的图像减去大半径结构元素处理过的图像,再对此图像进行形态学开运算,得到小粒径混合颗粒的图像。

2.3 混合颗粒个数的提取

由于混合颗粒的图像像素是连续的,在二值图像中具有连通性,调用 Matlab 中的 bwlabel 函数寻找连通成分,并用唯一的数字分类标记,从而得出混合图像中的颗粒个数,结果如图 4 所示。



(a) 二值图像

(b) 粒径为 5 mm 的颗粒群

(c) 粒径为 3 mm 的颗粒群

(d) 粒径为 1 mm 的颗粒群

图 4 Matlab 软件图像处理结果

Fig. 4 Image processing results of Matlab software

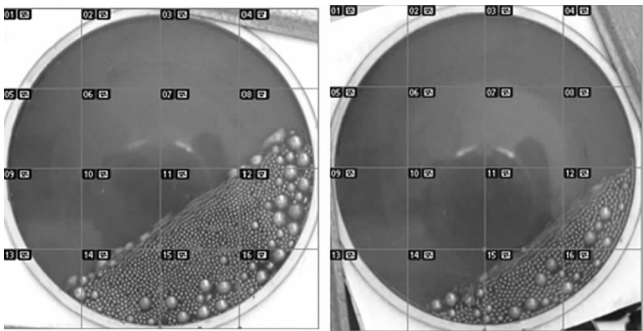
3 实验数据及误差分析

取混合初始阶段 4 个时间点, 即第 2、8 s 及混合稳定后第 54、60 s 对 2 种填充率(16.7%、33.3%), 在 3 种转速(3.4、6.8、10.0 r/min)情况下的颗粒个数提取进行分析。由于计算 Lacey 混合指数时需要图像进行网格划分, 所以对每张图像进行 4×4 网格划分(如图 5 所示), 提取各个网格中大小颗粒数量。对混合图像进行颗粒提取时, 粒径为 1 mm 的颗粒较粒径为 3、5 mm 颗粒出现的误差大, 只提取整体的粒径为 1 mm 的颗粒个数进行分析, 统计结果如表 3 所示。可以看出, 提取出的粒径为 1 mm 的颗粒个数的个别误差均在 5%~8% 之间, 其他均在 5% 以下, 具有较高的准确性。

计算颗粒计数相对误差表达式为

$$\varepsilon_i=(b_i-a_i)\times 100\%/b_i,$$

式中: a_i 为第 i 次计算机颗粒计数值($i=1, 2, \cdots, 24$); b_i



(a) 填充率 33.3%, 转速 3.4 r/min (b) 填充率 16.7%, 转速 10 r/min

图 5 4×4 网格划分

Fig. 5 4×4 mesh generation

为第 i 次人工颗粒计数值; ε_i 为第 i 次计算机颗粒计数相对误差; 其中人工颗粒计数为基准值。句号不同工况计算结果见表 3、4。

图 6 所示为整体平均相对误差对比。可以看出, 随着转速的不断增大, 颗粒计数误差不断增大, 其中

表 3 粒径为 1 mm 的颗粒计数结果(填充率为 33.3%)

Tab. 3 Counting results of particles with particle size of 1 mm (filling rate is 33.3%)

项目	n=3.4 r/min				n=6.8 r/min				n=10.0 r/min			
	2 s	8 s	54 s	60 s	2 s	8 s	54 s	60 s	2 s	8 s	54 s	60 s
计算机提取颗粒数	1 000	1 013	964	973	904	976	942	982	885	887	868	873
人工计颗粒数	1 028	1 040	972	987	923	1 020	964	1 009	898	911	927	940
相对误差/%	2.80	2.66	0.83	1.44	2.10	4.51	2.34	2.75	1.47	2.71	6.80	7.67
平均相对误差/%	1.93				2.93				4.67			

表 4 粒径为 1 mm 的颗粒计数结果(填充率为 16.7%)

Tab. 3 Counting results of particles with particle size of 1 mm (filling rate is 16.7%)

项目	n=3.4 r/min				n=6.8 r/min				n=10.0 r/min			
	2 s	8 s	54 s	60 s	2 s	8 s	54 s	60 s	2 s	8 s	54 s	60 s
计算机提取颗粒数	410	421	438	429	392	390	392	394	368	360	366	353
人工计颗粒数	413	429	446	434	401	399	404	402	379	373	380	371
相对误差/%	0.73	1.90	1.83	1.17	2.30	2.31	3.06	2.03	2.99	3.61	3.83	5.10
平均相对误差/%	1.41				2.43				3.88			

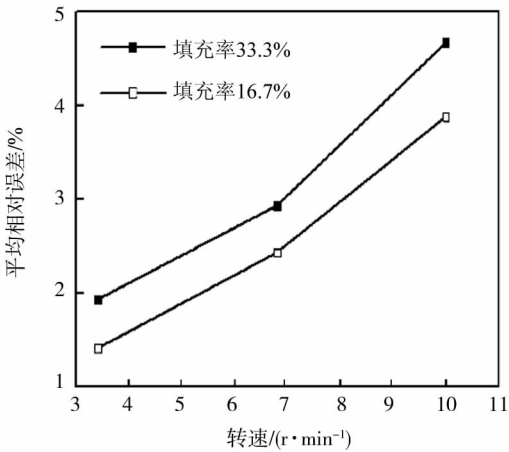


图 6 颗粒计数的平均相对误差

Fig. 6 Relative errors of particles counting

的原因是转速的增大会使图像中颗粒对流、剪切运动强烈的区域变模糊, 造成图像中目标(颗粒)与背景的灰度级差别较小, 影响阈值的选取, 从而影响图像分割、颗粒提取的效果, 导致颗粒计数误差增大。

相同转速时, 填充率为 33.3% 的情况下颗粒计数误差大于填充率为 16.7% 情况下的颗粒计数误差, 原因是在相同的转速时, 填充率为 33.3% 情况下颗粒在滚筒内的下落层面积大于填充率为 16.7% 情况下的下落层面积。相对静止层内的颗粒只有微小的扩散运动, 而在下落层, 颗粒运动非常明显, 主要为对流运动和剪切运动^[3]。强烈的混合运动会导致混合区域变模糊, 图像对比度变小, 造成阈值分割过程中出现颗粒黏结情况, 使颗粒计数减少, 产生误差。

(下转第 53 页)

- [2] LIN Y M, TSENG Y H, HUANG J H, et al. Photocatalytic activity for degradation of nitrogen oxides over visible light responsive titania-based photocatalysts[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 1616–1621.
- [3] SONG D H, UHM S H, LEE S B, et al. Antimicrobial silver-containing titanium oxide nanocomposite coatings by a reactive magnetron sputtering[J]. Thin Solid Films, 2011, 519: 7079–7085.
- [4] 吴金铃, 谢洪勇, 杨海峰. 火焰化学气相沉积法制备氮掺杂纳米TiO₂研究[J]. 中国粉体技术, 2011, 17(2): 57–60.
- [5] 白蕊, 李巧玲, 张巍, 等. WO₃-TiO₂ 纳米材料的制备及其光催化性能[J]. 中国粉体技术, 2012, 17(1): 6–8.
- [6] CHOI W, TERMIN A, HOFFMANN M R. The role of metal ion dopants in quantum-sized TiO₂: correlation between photoreactivity and charge carrier recombination dynamics[J]. J Phys Chem, 1994, 98(51): 13669–13679.
- [7] HAN X P, SHAO G S. Electronic properties of rutile TiO₂ with non-metal dopants from first principles [J]. J Phys Chem: C, 2011, 115(16): 8274–8282.
- [8] GONZÁ LEZ-BORRERO P P, BEMABÉ H S, ASTRATH N G C, et al. Energy level and optical properties of nitrogen doped TiO₂: an experimental and theoretical study [J]. Appl Phys Lett, 2011, 99: 221909–1–221909–3.
- [9] CHAI J W, YANG M, CHEN Q, et al. Effects of nitrogen incorporation on the electronic structure of rutile-TiO₂ [J]. J Appl Phys, 2011, 109: 023707–1–023707–4.
- [10] 赵宏生, 郭子斌, 李自强, 等. 氮掺杂 TiO₂ 纳米粉体的制备及其可见光催化性能[J]. 材料工程, 2011(3): 16–19.
- [11] GAO X, CHEN P W, LIU J J. Enhanced visible-light absorption of nitrogen-doped titania induced by shock wave [J]. Mater Lett, 2011, 65(4): 685–687.
- [12] MÁ RQUEZ A M, PLATA J J, ORTEGA Y, et al. Structural defects in W-doped TiO₂ (101) anatase surface: density functional study[J]. J Phys Chem: C, 2011, 115(34): 16970–16976.
- [13] 吴道新, 陈启元, 李洁, 等. 钨掺杂金红石型二氧化钛的光催化分解水析氢活性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 730–735.
- [14] 廖莉玲, 郭新丽, 谌孙文. 正交实验法优选 WO₃-TiO₂ 复合光催化剂的制备条件[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2011, 29(4): 80–82.
- [15] 李雪, 李艳平, 杨鹏飞. 钨、氮共掺杂 TiO₂ 的制备及其光催化性能研究[J]. 化工科技, 2011, 19(6): 15–18.
- [16] KUBACKA A, COLÓ N G, FERNÁ NDEZ-GARCÍ A M. N- and/or W-(co)doped TiO₂-anatase catalysts: effect of the calcinations treatment on photoactivity [J]. Appl Catal: B: Environ, 2010, 95(3/4): 238–244.
- [17] KUBACKA A, Bachiller-BAEZA B, COLÓ N G, et al. Doping level effect on sunlight-driven W, N-co-doped TiO₂-anatase photocatalysts for aromatic hydrocarbon partial oxidation [J]. Appl Catal: B: Environ, 2010, 93(3/4): 274–281.
- [18] HORN M, SCHWERDTFEGER C F, MEAGHER E P. Refinement of the structure of anatase at several temperatures [J]. Zeitschrift für Kristallographie, 1972, 136(3/4): 273–281.
- [19] 郑树凯, 吴国浩, 赵瑞, 等. W 掺杂锐钛矿相 TiO₂ 电子能带结构的第一性原理研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013, 41(2): 16–20.
- [20] 郑树凯, 吴国浩. TiO₂-N_x 薄膜的光催化性能及其电子结构研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013, 41(1): 45–49.

(上接第45页)

4 结论

1)随着转速的提高,颗粒的混合运动增强,但是导致混合图像中对流剪切运动强烈的区域变得模糊,颗粒与背景的灰度级差别变小,影响图像分割和颗粒提取,造成颗粒的计数误差增大,但是在低转速工况下误差在允许范围内。

2)颗粒计数方法的统计结果与人工计数结果之间的误差较小,与人工计数法相比,提高了计数效率,对后续的颗粒混合度分析研究奠定了基础。

致谢:感谢东北电力大学科研启动基金项目(编号:BSJXM2011-02)对本研究的大力支持!

参考文献(References):

- [1] 张勇,金保升,钟文琪. 喷动气流化床颗粒混合规律的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 8–14.
- [2] 张立栋,朱明亮,李少华,等. 回转干馏炉内二组元颗粒混合机理及混合度分析[J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2382–2387.

- [3] 赵永志, 郑津洋. 宽粒径分布流化床的微观尺度模拟与分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 55–61.
- [4] 黄德财, 冯耀东, 解为梅, 等. 颗粒密度对旋转筒内二元颗粒体系分离的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(12): 372–378.
- [5] 高红利, 陈友川, 赵永志, 等. 薄滚筒内二元湿颗粒体系混合行为的离散单元模拟研究[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 330–337.
- [6] van PUYVELDE D R, YOUNG B R, WILSON M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis[J]. Powder Technology, 1999, 106(3): 183–191.
- [7] LACEY P M C. Developments in the theory of particle mixing[J]. Journal of Applied Chemistry, 1954, 4(5): 257–268.
- [8] 汪志云, 黄梦为, 胡钊, 等. 基于直方图的图像增强及其 MATLAB 实现[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(2): 54–56.
- [9] 韩思奇, 王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 91–94.
- [10] ROSENFELD A, de la TORRE P. Histogram concavity analysis as an aid in threshold selection[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, 13(2): 231–235.
- [11] OSTU N A. A threshold selection method from graylevel histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66.