

# 基于差分法的图像粒子运动分析

朱建新 严建华 马增益 丁经纬 池涌 岑可法

(能源洁净利用与环境工程教育部重点实验室, 浙江大学热能工程研究所, 杭州 310027)

**摘要** 利用差分法配合灰度拉伸对颗粒运动图像进行了处理, 直方图分析表明, 像素在灰度上的分布特性与颗粒运动的剧烈程度具有相关性。差分图像中高亮度像素越多, 颗粒运动越剧烈。随运动剧烈程度的降低, 灰度相近的像素, 其亮度由高向低变化。除去低亮度区域内白噪声的影响后, 以对数函数为权值, 在考虑了一定亮度范围内的像素分布后, 提出了一个用于评价颗粒运动剧烈程度的指数。将其应用于流化床气泡生成图像序列表明, 这种处理方法能够较好地评价颗粒的运动特点。

**关键词** 图像处理 差分法 运动指数 图像序列 直方图分析

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0402-06

## Movement Analysis of Particles Based on Image Difference

ZHU Jian-xin, YAN Jian-hua, MA Zeng-yi, Ding Jing-wei, Chi Yong, CEN Ke-fa

(Clean Energy & Environment Engineering key Lab of Ministry of Education, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** By using image difference and gray stretch technique, image histogram analysis method was used to investigate the movement of particles in image sequence. The result shows that the movement of particles has close relation with the dispersivity of pixels' greyvalue. The number of pixels with high brightness indicates the fierceness of particles. The brightness of pixels with similar grayscale will decrease with the slowdown of particles. After eliminating the influence of noise and taking consider of the gray level of pixels within certain range, a weight factor based on logarithm function was introduced to evaluate the intensity of particles' movement. Application of this algorithm in image sequence of fluidized bubble verifies the validity of this method.

**Keywords** image processing, image difference, moving index, image sequence, histogram analysis

## 1 引言

流化床内颗粒的运动十分复杂, 利用图像法分析颗粒在流化床内的运动具有对流场无影响, 测量准确以及自动化程度高等优点。为了解颗粒在流化床内的混合情况, 利用图像处理技术对流化床内颗粒运动的图像进行分析, 实现床内运动区域及运动强度的识别, 对研究流态化具有重要作用。

图像序列的运动分析可以采用很多不同的研究方法, 其中基于差分法的图像序列运动分析应用最为广泛。如基于时间序列的运动检测法<sup>[1]</sup>, 通过差分

法检出图像中的运动及静止信息, 并配合边界提取来检测刚体的运动, 效果较好, 文献[2]则是通过对图像进行差分运算, 并对运算结果进行相似度判断, 从而实现了火灾的各种判据; 文献[3]是通过差分法, 配合阈值分析以及中值滤波, 实现了真实运动矢量运算。基于差分法的运动分析还广泛应用于医学图像处理<sup>[4]</sup>、监控领域<sup>[5,6]</sup>以及机器人视觉领域等。由此可见, 差分法在图像序列的运动分析中得到了广泛应用。

对于运动物体的图像序列, 差分后物体的运动信息能在图像上得到较好地体现。使用这种算法对提取具有较明显灰度边界的物体运动信息具有简

单、快速的特点。对于无明显边界的物体运动,如流体运动等,虽然用差分法仍能较好地将运动信息显示出来,但差分后得到的图像很难再用边界提取等方法处理,而只能采用其他方法,如区域分割或模式识别等方法来处理。

流化床颗粒运动具有较为明显的非刚性,一是,颗粒并无明显的区域差别;二是,颗粒运动速度分布不均匀,颗粒的运动包括平移,转动,其间混以气泡的作用,因此颗粒的运动十分复杂。同时由于颗粒的拟流体性质,通常会表现出区域的渐变,一般很难对这种图像进行有效的处理。为研究颗粒在流化床内的混合规律,依据图像处理的有关算法,对流化床内部颗粒运动的差分图像进行了分析,提出了一个用于表征颗粒运动的指标,来研究颗粒在流化床内的运动。

## 2 实验系统

为研究颗粒在流化床内的运动规律,在小型冷态流化床实验台上拍摄了颗粒图像序列,实验装置如图 1 所示。

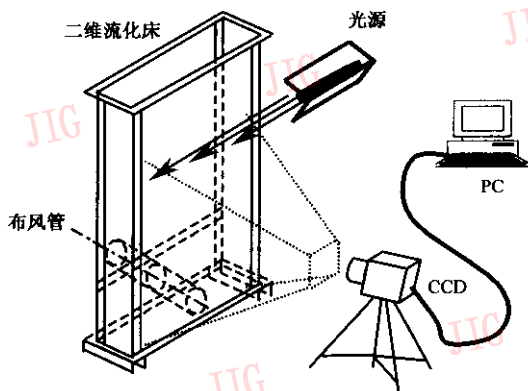


图 1 实验系统

实验装置主要由二维冷态流化床(主要尺寸:300×100×500mm),高速 CCD,照明系统以及控制 PC 机组成。为精确揭示颗粒在流化床内的运动,实验中所用的 CCD 为高速 CCD,最高拍摄速度为 1 000fps,拍摄速度可调。图像为 TIFF 格式,解析度为 256×256,单色。实验用的 PC 机主要用于控制高速 CCD,并保存高速 CCD 采集的图像。实验中照明采用高强度新闻灯,功率为 1 000W。

实验过程中,启动照明灯后,先启动流化床,再用高速 CCD 拍摄流化床颗粒的运动图像,用于分析。

## 3 图像分析

### 3.1 图像差分法

流化床颗粒运动图像与其他运动物体的图像之间的区别是,颗粒图像无明显区域特征,颗粒运动随机性强,图像渐变明显。研究这种图像中物体的运动也十分复杂,因整个图像内并无相同的运动,各点运动分布不均匀。参照图像序列运动分析方法,采用基于图像差分法的运动分析<sup>[7]</sup>。对于连续的图像序列,任取其中连续两帧  $f_1(x,y)$  和  $f_2(x,y)$ ,差分法得到的图像为  $f_{12}(x,y)$ ,为避免相减后得出图像灰度为负的现象,定义差分算法

$$f_{12}(x,y) = |f_2(x,y) - f_1(x,y)| \quad (1)$$

使用式(1)进行差分计算后得到的图像  $f_{12}(x,y)$ ,能够较好地地将图像中包含的运动信息反映出来。颗粒运动越剧烈,图像差别越大,这样得到的图像  $f_{12}(x,y)$  越大,反之越小。当图像中颗粒无运动时,则图像  $f_{12}(x,y)$  为零。

对于流化床颗粒运动图像,由于拍摄速度很快(400fps),在大多数区域,由于颗粒运动相对较慢,因此差分法后得到的图像大部分灰度值很小(如图 2)。图像中颗粒的运动信息被背景噪声所淹没,可以采用图像处理技术中的灰度拉伸来增加有用信息的输出。

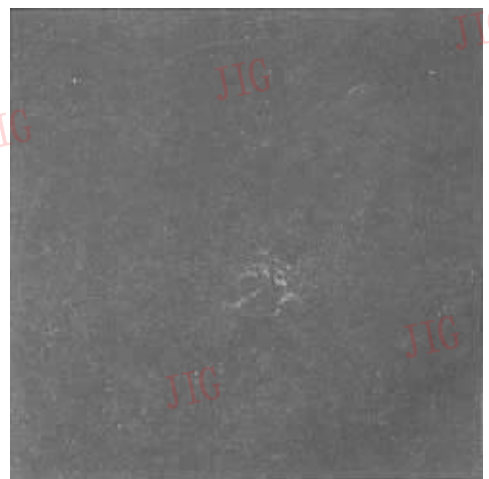


图 2 差分后得到的图像

### 3.2 图像灰度拉伸

灰度拉伸是使用灰度的线性变换,有选择地将某段灰度区间的图像进行变换,以改善图像的输出<sup>[8]</sup>。设灰度拉伸后得到的图像为  $f'_{12}(x,y)$ ,则

$$f_{12}(x,y) = \begin{cases} 0 & f_{12}(x,y) < A \\ \frac{255}{B-A}(f_{12}(x,y) - A) & A < f_{12}(x,y) < B \\ 255 & f_{12}(x,y) > B \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $A, B$  为常数, 处于  $A \sim B$  之间的灰度, 进行灰度运算后计算出新的灰度值。实验中,  $A$  和  $B$  分别取为 0 和 20, 经过灰度拉伸后, 可以有效地将有用信息显示出来(如图 3 所示)。

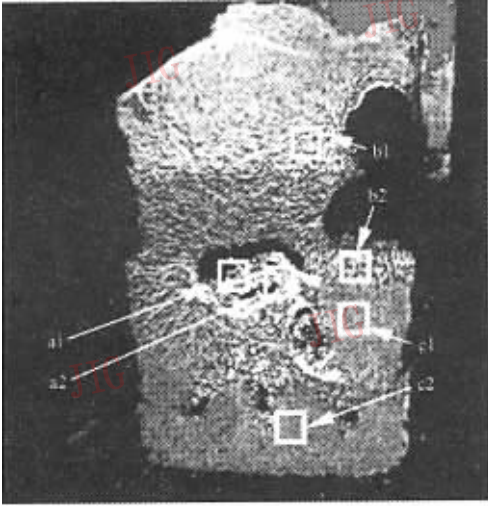


图 3 灰度拉伸后的图像

从图 3 中可以看出, 差分后得到的信息能在图像中有效地反映出来, 为后续分析创造了条件。

### 3.3 基于直方图的运动区域分析

为研究差分图像中所包含的运动信息, 对不同的运动区域进行了直方图分析。研究发现, 不同的运动区域, 颗粒的运动剧烈程度不同。图 4 是不同区域的灰度直方图, 其中, (a)、(b) 代表运动最为剧烈的

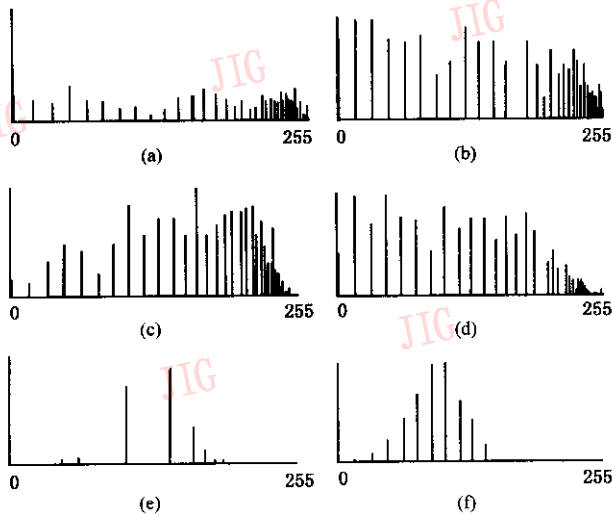


图 4 灰度直方图分析

区域(图 3 中  $a_1, a_2$  区域)所对应的直方图; (c)、(d) 为运动较为剧烈的区域(图 3 中  $b_1, b_2$  区域)所对应的直方图; (e)、(f) 为基本无运动的区域(图 3 中  $c_1, c_2$  区域)差分图像直方图。

从图 4 可以看出, 图像像素在灰度上分布不连续, 在某些灰度上, 像素分布较多, 而在某些灰度上没有像素分布。典型流动区域与静止区域的图像灰度直方图分布具有明显的区别。对于混合最为剧烈的区域, 像素在  $0 \sim 255$  级灰度上分布较广, 而且亮度越高, 像素存在的灰度级间隔越小, 相应的像素越少。而运动较平缓的区域, 直方图分布与前面具有相似的特征, 不同的是亮度大的像素显著减小, 相应的灰度级较相近的像素向亮度小的一侧偏, 如图 4 中 (c)、(d) 所示。从灰度直方图可以看出, 对几乎无运动的区域, 灰度直方图基本上呈正态分布, 由于 CCD 采样过程中存在噪声, 因此这部分输出图像可以理解为噪声<sup>[8,9]</sup>。灰度拉伸在增强运动信息的同时也增加了噪声的输出。

通过直方图分析可以发现, 运动剧烈程度与其图像灰度分布具有明显的相关性, 这一特征可以为研究颗粒运动所用。

差分图像直方图显示, 随着亮度的升高, 像素的灰度分布类似于对数曲线(如图 5 所示), 即随着亮度  $x$  的增加, 当灰度步距  $dx$  不变时, 两灰度值差  $dy$  越近, 而运动不剧烈的区域, 灰度值存在的两种像素在数量上较少, 且在亮度最高的区域基本上无像素分布。这些特点说明, 像素在高亮度处的数量越多, 运动越剧烈, 像素在高亮度区域的分散性越好, 颗粒的运动越剧烈; 对于低亮度区域, 受噪声的影响, 灰度直方图呈正态分布。

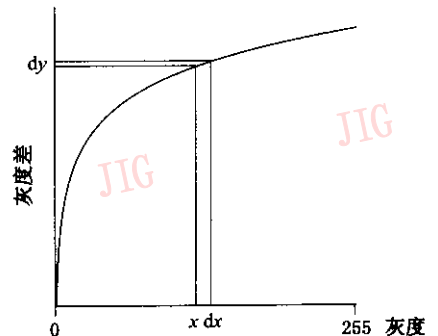


图 5 灰度差与灰度变化示意图

为表征像素灰度直方图与颗粒运动的关系, 用一个权值  $K$  来关联像素亮度与运动程度的关系。沿亮度方向, 灰度值存在的灰度间隔越来越小, 近似呈

对数分布,因此构造权值函数形式如下

$$K = \frac{1}{2.3979} \ln\left(\frac{f}{25.5} + 1\right) \quad (3)$$

式中,  $K$  为灰度的权值,  $f$  为灰度级, 取  $0 \sim 255$ 。亮度越高, 权值越大, 这样就可以将亮度与运动剧烈程度相互关联。当亮度为零时, 说明两帧图像完全相同, 此时颗粒无运动。当灰度为 255 时, 权值为 1, 此时权值最大, 即该灰度级的像素最能反映颗粒在流化床内的运动。

定义了灰度权值后, 还要考虑各灰度级的像素在采样窗口内总像素中的分量。从直方图分析可以看出, 颗粒运动越剧烈, 高亮度区域的像素越多, 说明不同灰度级的像素数目与颗粒运动剧烈程度有关系, 将这一因素考虑在内, 可以用一个无量纲的运动指数  $m$  来衡量颗粒的运动。对于某一级灰度值  $f$ , 相应的运动指数  $m$  定义如下

$$m = K \cdot \frac{n}{N} = \frac{1}{2.3979} \cdot \ln\left(\frac{f}{25.5} + 1\right) \cdot \frac{n}{N} \quad (4)$$

式中,  $K$  为该灰度级的权值,  $n$  为采样窗口内该灰度级的像素数,  $N$  为采样窗口内总像素数。将采样窗口内全部像素的灰度都考虑在内, 窗口内颗粒的运动指数  $M$  定义如下

$$M = \sum_{f=0}^{255} \left( \frac{1}{2.3979} \cdot \ln\left(\frac{f}{25.5} + 1\right) \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

式中,  $M$  为整个采样窗口内颗粒运动指数, 由于考

虑了所有像素及其灰度, 因此理论上, 用这一方法可以将采样窗口内的运动强度表征出来,  $M$  为一无量纲数,  $M$  越大, 表示运动越剧烈。

将运动指数  $M$  用于实际计算时发现, 在运动较为剧烈的区域, 用运动指数可以准确地表征出窗口内颗粒的运动程度, 而将其用于基本无运动区域的计算表明, 受低亮度处白噪声的影响会出现误诊断。从图 4 中各处的采样窗口内灰度直方图可以看出, 白噪声往往在低亮度区域分布, 由于对灰度级计算是从 0 开始, 因此白噪声的影响很大。灰度直方图表明, 颗粒运动强度基本与低亮度像素无关, 为减小白噪声的影响, 可以设一个阈值  $F$ , 使灰度在阈值以下像素不计入运动指数中。试验发现, 阈值  $F=150$  时可以很好地抑制白噪声, 而将有用的运动信息显示出来。这里, 完整的窗口内颗粒运动系数  $M$  为

$$M = \sum_{f=150}^{255} \left( \frac{1}{2.3979} \ln\left(\frac{f}{25.5} + 1\right) \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (6)$$

#### 4 诊断结果及分析

利用文中提出的颗粒运动系数, 对流化床内气泡产生过程中所拍摄的图像序列进行了分析, 图 6 为图像序列中两帧不同时刻的图像及计算结果, 图像大小为  $512 \times 512$  个像素。

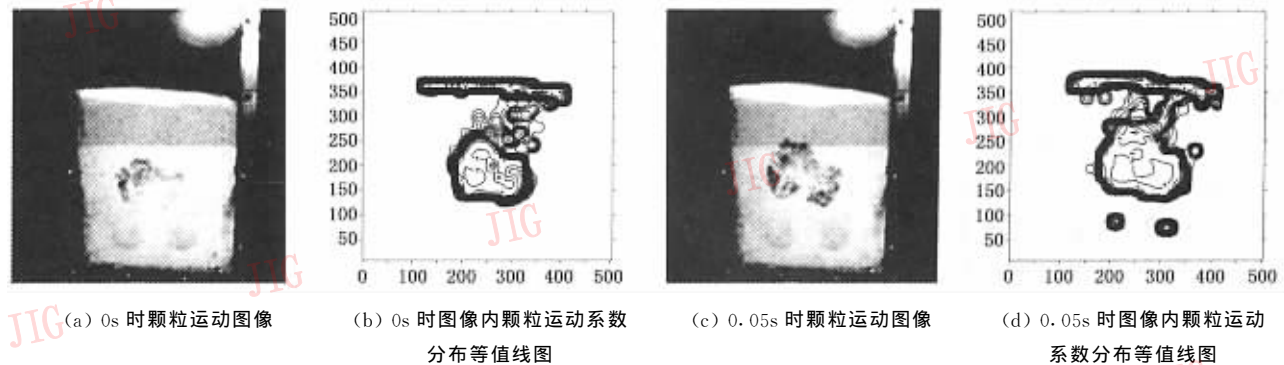


图 6 图像序列及其诊断结果

图 6 中计算结果以等值线图的形式表示, 采用 surfer 6.0 绘制。相应的原图也在图中列出, 以供对照。图像记录了流化床内一个气泡的产生过程, 两帧图像间隔时间为  $0.05s$ 。实验中采用的阈值为 150, 采样窗口大小为 24 个像素。从诊断的结果可以清楚地看出气泡形成过程中颗粒的运动情况如下:

(1) 依据流化床的有关理论, 受气泡内部内循环气流的作用, 气泡及气泡晕内颗粒运动速度较大,

计算结果与实际相吻合;

(2) 从图 6(d) 可以看出, 气泡顶部颗粒运动剧烈程度高于气泡底部颗粒, 由于颗粒处于不稳定状态, 颗粒可能发生“沟流”而引起气流短路, 符合有关气固流化理论;

(3) 计算结果表明, 基于差分法的颗粒运动分析方法具有较好的抗干扰性。实验中采用的 CCD 为面阵 CCD, 各像限获取的图像存在亮度差, 但这并

未对计算结果产生很大影响,如图6(d)所示。可见,这种方法能较好地识别出气泡及其周围颗粒的运动,并表现出良好的抗干扰性;

为分析式(6)中阈值的选取与采样窗口的大小对计算结果的影响,选用不同的参数对图6(c)进行了计算,计算结果如图7所示,图像大小为 $512 \times 512$ 个像素,其中,(a)、(b)、(c)、(d)分别为阈值为170、130以及采样窗口为32个像素及16个像素的计算结果。将图7与图6(d)比较,可以发现:

(1) 阈值过大会把图像内运动较不剧烈的颗粒运动信息舍弃,而阈值较小能将更多的颗粒运动信息计算出来,但过小的阈值不利于抑制白噪声;

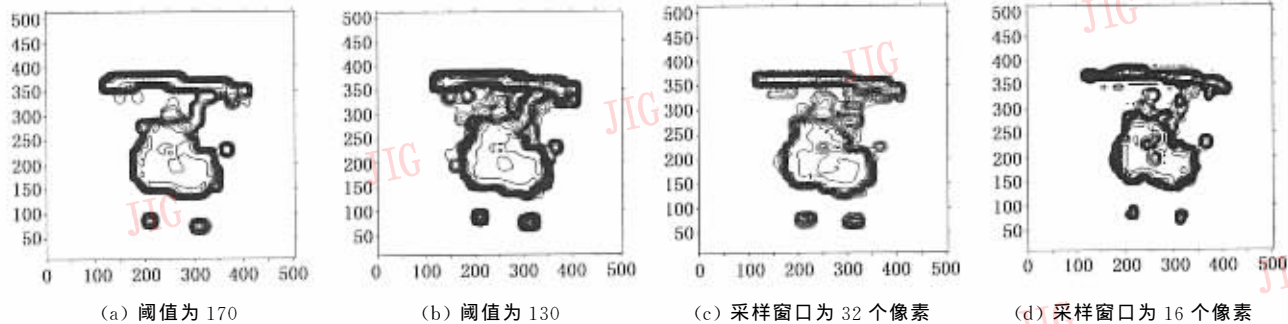


图7 阈值及采样窗口对计算结果的影响

## 5 结论

(1) 实验证明,采用差分法分析散体颗粒运动剧烈程度是可行的,颗粒运动的剧烈程度与差分法得到图像的灰度直方图具有内在联系;

(2) 颗粒图像经过差分法及灰度拉伸处理后,直方图分析表明,高亮度像素的分布直接体现颗粒的运动强度,而低亮度像素易受图像获取过程中白噪声的影响,采用权值函数结合阈值分析可以较好地避免白噪声的干扰;

(3) 计算表明,阈值的选择与采样窗口的大小影响诊断结果,阈值的选取应视图像而定,合理选择阈值及采样窗口也可以参照其他图像处理方法;

(4) 采用差分法结合直方图分析的方法判断图像中粒子运动情况,与其他图像分析方法相比,如基于互相关的粒子图像测速技术,具有运算量小的特点,能大大节约计算成本。

## 参考文献

1 关海英,阮秋琦. 序列图像中运动目标的检测[J]. 铁道学报, 1996, 18(6): 33~38.

(2) 阈值的选取应视具体的情况而定,不同的图像由于拍摄时的亮度、分辨率不同,会有所差别,应根据图像的具体情况合理选定;

(3) 采样窗口对计算结果的影响表现为计算结果的分辨率。文中计算结果表现为整个采样窗口内颗粒的平均运动强度,一方面,采样窗口过大,无法显示颗粒运动细微结构;另一方面,采样窗口较小时,虽然可以计算出颗粒的细微运动,但由于颗粒运动的复杂性,过小的采样窗口将会使计算失去意义;

(4) 实验中,阈值的选取及采样窗口的大小可以参考其他图像处理方法,例如可以与基于灰度梯度或基于互相关的颗粒速度测量技术相结合来确定。

2 卢瑞祥,牟轩沁,纪震. 火灾的图像识别方法与应用[J]. 计算机应用研究, 1998, (1): 106~108.

3 卢官明,毕厚杰,江平. 求取真实运动矢量的一种方法[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(3): 267~272.

4 Vincent J T, van Ginneken, Albert D F. Addink, *et al.* Metabolic rate and level of activity determined in tilapia (*Oreochromis mossambicus* Peters) by direct and indirect calorimetry and videomonitoring [J]. *Thermochimica Acta*, 1997, 291: 1~13.

5 胡俊,孙祥芳,刘立海等. 图像序列运动检测算法的研究及其应用[J]. 武汉大学学报, 2000, 46(5): 613~616.

6 张文涛,李晓峰等. 高密度视频目标场景下的运动分析[J]. 电子学报, 2000, 28(10): 114~117.

7 王润生. 图像理解[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995: 236~239.

8 何斌,马天予,王运坚等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

9 浙江大学编. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.



朱建新 1976年生,现为浙江大学热能工程研究所工程热物理专业博士研究生。主要研究方向为电厂火焰监视、图像法测试技术以及燃烧诊断等。



严建华 1962 年生,教授,博士生导师,1990 年获浙江大学博士学位。研究方向为能源与环境工程、燃烧学、废弃物无害化资源化利用、燃烧诊断等基础理论和工程应用研究。



池涌 1961 年生,教授,博士生导师,1990 年毕业于浙江大学工程热物理专业,获博士学位,现任浙江大学热能工程研究所“废弃物资源化清洁利用”研究室副主任。主要研究方向为工程热物理、能源与环境工程、燃烧学、废弃物热处理、热力发电等。



马增益 1970 年生,副教授,1998 年获浙江大学博士学位。主要从事废弃物资源化利用、火焰图像处理、多相流检测方法及技术等方面的研究。



岑可法 1935 年生,教授,博士生导师,中国工程院院士,现任浙江大学机械与能源学院院长,1962 年毕业于莫斯科包曼高等工业大学动力系,获副博士学位。主要从事洁净煤燃烧、废弃物资源化利用、流化床等的研究。



丁经纬 1978 年生,2003 年于浙江大学获硕士学位。主要研究方向为火焰检测技术、基于图像法的流化床测试技术等。发表论文 1 篇。

