

文章编号: 1001-0920(2013)07-1013-05

## 基于纹理粗细度测量的铝土矿浮选过程 最佳精选泡沫状态分析

刘金平, 桂卫华, 唐朝晖

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 为实现铝土矿浮选生产工况的自动监测和智能评价, 提出一种基于机器视觉的精选泡沫最佳生产状态量化分析与选择方法. 首先, 通过改进LBP算子实现精选泡沫图像表面纹理粗细度特征的提取; 然后, 进一步分析了精矿品位与精选泡沫纹理特征间的关系, 以获得最佳生产工况下的精选泡沫表面纹理粗细度特征区间. 该方法可以实时监测精选泡沫表面纹理的变化, 并自动鉴别精选泡沫是否处于最佳生产状态, 为实现铝土矿浮选过程优化控制奠定了基础.

**关键词:** 铝土矿浮选过程; 精选泡沫图像; 局部二进模式; 浮选工况

**中图分类号:** TP391.41

**文献标志码:** A

### Analysis of the best production condition of cleaner froth in bauxite flotation process based on froth texture coarseness measurement

LIU Jin-ping, GUI Wei-hua, TANG Zhao-hui

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: TANG Zhao-hui, E-mail: zhtang@mail.csu.edu.cn)

**Abstract:** In order to achieve the automatic monitoring and intelligent evaluation of the bauxite flotation process, a method of analyzing and selecting the best production condition of the cleaner froth based on machine vision is presented. Firstly, the roughness feature of froth surface texture is extracted based on the improved local binary pattern(LBP) operator. Then, the best roughness interval of the cleaner froth texture feature in the flotation production process is obtained through analyzing the relation between the flotation concentrate grade and the extracted surface texture features of the cleaner froth image. This method can monitor the change of the texture feature of the cleaner froth image in real time and automatically identify whether the cleaning process is under the best production condition, which lays the foundation of the optimal control of the bauxite flotation process.

**Key words:** bauxite flotation process; concentrate froth image; local binary pattern(LBP); flotation production condition

## 0 引言

随着国民经济的高速发展, 高品位铝土矿日益枯竭, 为充分利用铝硅比不高的一水硬铝石, 各有色生产企业纷纷在氧化铝生产过程中加入泡沫浮选, 以提高矿物资源的有效利用水平和降低生产过程中的能量消耗, 因此如何保证泡沫浮选的稳定优化运行是进一步提高氧化铝产品产量和质量的关键. 长期以来, 选厂的生产操作通常依赖人工观察浮选泡沫表面的视觉特征进行<sup>[1]</sup>, 这种以人工观测为主的浮选生产方式无法实时监视浮选现场中几十甚至上百个浮选槽,

而且缺乏客观评价标准, 从而难以保证浮选生产的稳定优化运行. 随着视觉传感、图像处理、模式识别等技术的发展, 人们将图像处理、模式识别等方法和技术应用于浮选过程监控, 用以实现泡沫状态的在线检测和客观评价, 大大提高了矿物浮选生产效率和选矿的自动化水平<sup>[2]</sup>.

浮选泡沫由大量形状各异、大小不一的矿化气泡堆积而成. 泡沫层表面因矿化气泡堆积程度不同而形成无规则的局部异观结构, 在视觉上呈现为具有不同光泽度、方向性、密度和表面粗细度的表观纹理状

收稿日期: 2012-04-02; 修回日期: 2012-09-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61134006); 国家自然科学基金项目(61071176, 61171192, 61272337).

作者简介: 刘金平(1983-), 男, 博士生, 从事计算机视觉与模式识别的研究; 桂卫华(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模、控制与优化等研究.

态<sup>[3]</sup>. 浮选泡沫所表现出来的纹理结构与浮选生产操作变量(加药量、通气量等)和浮选生产指标(精矿品位、尾矿回收率等)密切相关<sup>[4-5]</sup>. 通过机器视觉对精选泡沫表面表现出来的生产性能进行自动鉴别和客观评价来保证浮选精选一直处于最佳生产状态, 将使铝土矿浮选流程的优化控制成为可能. 在进行泡沫图像纹理分析时, 目前常用的处理方法大都基于邻域灰度相关矩阵的某些统计参量, Moolman 等<sup>[6]</sup>采用空间灰度矩阵和邻域相关矩阵分析了泡沫表面统计纹理与矿物品位与回收率的关联性; 刘文礼等<sup>[7]</sup>通过引入空间灰度相关矩阵和邻域灰度相关矩阵对煤泥泡沫的状态进行了分析和识别研究; Bartolacci 等<sup>[4]</sup>总结了常用的泡沫图像纹理特征提取方法, 讨论了基于纹理信息的浮选过程综合控制策略的可行性. 虽然这些统计参数能在一定程度上描述浮选泡沫(比如重金属矿、非金属矿物浮选泡沫)表面纹理的部分统计规律, 但难以对无明显泡沫、表面泥化的铝土矿(轻金属矿)精选泡沫的纹理粗细光滑程度进行精确地描述, 更加难以描述泡沫纹理复杂的局部表现结构, 而且易受光照变化的影响, 因此不能较好地地为铝土矿浮选操作提供指导.

一般根据图像局部对比度, 通过某种规则对图像纹理特征进行计算和描述. 局部二进模式(LBP)是由 Ojala 等<sup>[8]</sup>提出的一种有效的图像局部纹理提取方法, 具有旋转不变性, 而且对光照不敏感, 在图像检索、人脸识别、图像修复等计算机视觉领域具有良好的性能<sup>[9]</sup>. 鉴于 LBP 算子具有良好的局部纹理描述性能, 本文提出一种基于改进 LBP 算子的浮选泡沫图像表面纹理粗细度测量方法, 并将其应用于中国铝业公司中州铝厂的铝土矿浮选过程精选泡沫状态的分析 and 描述. 针对该选厂精选泡沫图像的特点, 通过统计分析图像特点对传统的 LBP 算子进行改进, 以获取精选泡沫图像的纹理表面粗细程度的量化描述. 所获取的最佳纹理区间可以进一步实时监测精选是否属于最佳生产状态, 以便提醒生产操作者及时进行生产调节.

## 1 精选泡沫图像特点分析

本课题组在中州铝厂搭建了浮选泡沫视觉监控系统, 利用泡沫图像处理、模式识别等技术模拟人类视觉“看泡”过程, 以期实现浮选泡沫状态的自动测量和客观评价. 中州铝厂的铝土矿浮选过程中的精选泡沫图像与其他重(贵)金属、非金属(煤、硫)矿物选厂的泡沫图像表现相差较大. 虽然它也由大量的浮选气泡堆积而成, 但由于铝土矿的独特物理性质, 铝土矿浮选过程中的精选泡沫表面基本上看不到明显的泡沫, 表现为泥化堆积状态. 图 1 是该选厂典型的精选泡沫图像与其颜色特征空间的分布关系图.

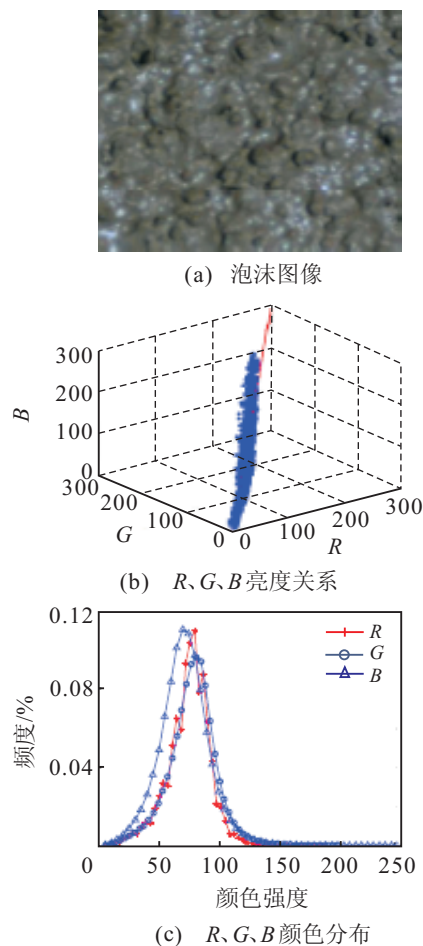


图 1 精选泡沫图像及其颜色空间相互关系

由图 1 可以看出, 铝土矿浮选过程中精选泡沫图像难以区分出独立的浮选气泡, 泡沫图像亮度对比不明显, 各颜色空间相关程度高. 由于铝土矿浮选回路中精选槽泡沫层含矿量高、易堆积、坍塌现象严重、不能辨别单个气泡, 无法对图像进行有效分割, 典型的泡沫形状尺寸等特征不适用于精选槽的泡沫图像分析, 能感受到的是精选泡沫图像的表面纹理的粗细程度. 精选泡沫图像粗细度的不同, 反映了精矿泡沫层中有效矿物粒子的富集程度, 进而与精矿品位密切相关<sup>[10]</sup>.

## 2 泡沫图像局部纹理描述

### 2.1 局部二进模式(LBP)

LBP 是一种基于图像局部灰度关系的纹理度量算子, 最开始的 LBP 算子仅考虑中心灰度值与邻域像素点之间的相互关系, 后来被改进到半径  $R$  的圆邻域内任意多个像素点.  $LBP_{P,R}$  表示半径为  $R$  的圆形邻域内  $P$  个点的算子, 计算公式如下:

$$LBP_{P,R} = \sum_{i=0}^{P-1} s(f_i - f_c) 2^i. \quad (1)$$

其中:  $s(f_i - f_c)$  表示所选中的像素点与中心像素点的关系, 大于等于中心灰度值的像素点表示为 1, 否则表示为 0.  $f_c$  为中心点像素亮度,  $f_i (i = 1, 2, \dots, P-1)$

是以  $f_c$  为中心的邻域像素亮度. 如果假设邻域中心点  $f_c$  的坐标为  $(0, 0)$ , 则  $f_i (i = 1, 2, \dots, P - 1)$  的坐标为  $(-R \sin(2\pi i/P), R \cos(2\pi i/P))$ . 对于一幅  $N \times M$  的精选泡沫图像, 对图像中每一个像素确定其 LBP 模式, 则纹理图像可以用 LBP 直方图描述, 即

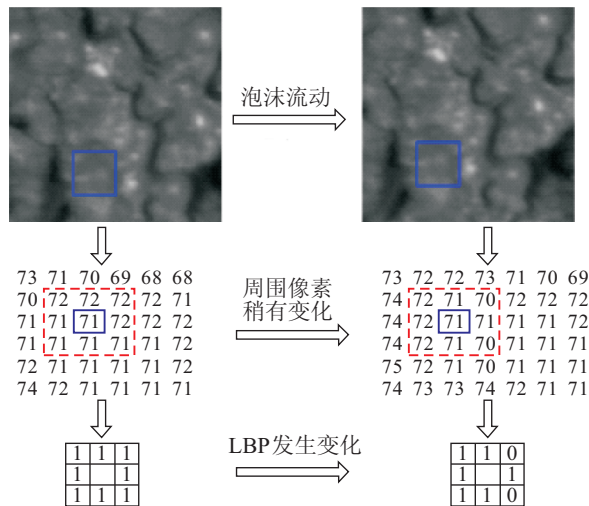
$$H(K) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M f(\text{LBP}_{P,R}(i, j), k). \quad (2)$$

其中  $k = [0, K]$ , 且

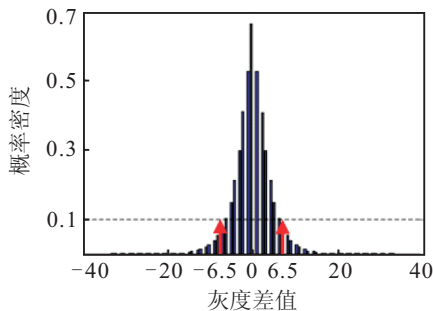
$$f(\text{LBP}_{P,R}(i, j), k) = \begin{cases} 1, & \text{LBP}(i, j) = k; \\ 0, & \text{LBP}(i, j) \neq k. \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 LBP 算子改进

由于浮选泡沫图像现场环境恶劣, 受粉尘、雾气、现场灯光和自然光等多种因素的影响, 基本的 LBP 仅仅根据周围的亮度值与中心点的差值的不同进行计算, 这样所提取的 LBP 可能会受到这些多因素的干扰而鲁棒性不强. 如图 2 所示, 在泡沫流动过程中, 图 2(a) 中用方框标注的小型区域为同一平坦区域, 因在流动过程中顶部光源角度发生变化, 像素灰度值稍有变化, 这样采用传统的 LBP 算子会使计算出来的结果存在较大的差别.



(a) 同样的泡沫区域在流动过程中由于光照变化, LBP 也发生变化



(b) 泡沫图像邻域灰度差值统计直方图

图 2 精选泡沫图像邻域灰度差值统计分布

为了将这种影响降到最低, 本文受文献 [9] 的启发, 在进行 LBP 特征计算时, 对图像中心像素点与局

部邻域像素点的灰度差值进行阈值处理, 即

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq T; \\ 0, & x < T. \end{cases} \quad (4)$$

在阈值  $T$  的选取中, 本文为充分考虑泡沫图像局部灰度值统计的特点, 在分析泡沫图像像素灰度与周围灰度关系的基础上设置相应的阈值. 手动采集 200 幅灰度平坦的泡沫图像, 统计中心点像素亮度与周围  $P$  邻域的灰度差值, 统计分布结果如图 2(b) 所示. 从图 2(b) 可以看出, 泡沫图像中心点与周围像素相差小, 当灰度值相差大于 6.5 时, 其概率小于 0.1. 也就是说, 平坦的泡沫图像中心点泡沫像素灰度值与周围像素灰度值的差值可以在这个范围内变化, 当泡沫像素灰度相差小于 6.5 时, 可以认为是因为光照、粉尘等的影响使得泡沫图像像素灰度值发生变化, 于是本文在后面的计算中将该阈值  $T$  选取为 6.5, 这样便能极大程度地降低因光照、粉尘、像素畸变等客观原因造成的 LBP 计算的误差.

### 3 精选泡沫图像表面纹理特征提取

浮选泡沫图像粗度与气泡的矿化程度密切相关, 通过建立精选泡沫图像粗度与浮选精矿品位的关系, 可以对精选泡沫生产状态进行客观评价.

#### 3.1 LBP 特征提取

采用本文提到的基于阈值的方法进行精选泡沫图像的 LBP 模式图提取, 所提取的 LBP 直方图见图 3.

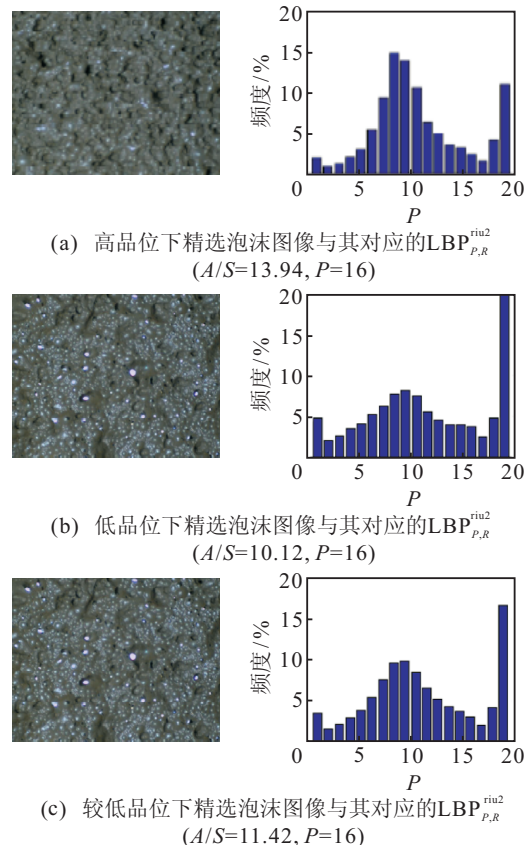


图 3 精选泡沫图像与其对应的 LBP 直方图

从图 3 可以看出,不同精矿品位所对应的精选泡沫图像的 LBP 直方图能在一定程度上表现出不同的统计特性.但是,采用 LBP 直方图进行泡沫纹理表征时仍然存在以下问题: 1) LBP 直方图是对整个纹理区域的局部特征进行整体统计,已经失去了对部分细节的描述; 2) 无法利用该直方图直接描述泡沫表面的粗细程度.由前面的分析可知,由于泡沫表面所承载的精矿粒子的堆积程度不同,在泡沫表面表现出的最大的不同是泡沫表面的纹理粗细程度,而通过泡沫图像的局部纹理获得泡沫表面的粗细度测量是进行浮选性能自动评价的基础.图像表面纹理的粗细程度虽然还没有确定统一的数学定义,但人类视觉可以感觉到泡沫图像表面的粗细程度,因此可以通过分析图像的特点,采用一定的数字量化方法对泡沫图像表面的粗细度进行测量.

### 3.2 泡沫纹理粗细度测量

为进一步分析浮选泡沫局部纹理特征与浮选生产指标的关系,本文在获取泡沫图像 LBP 局部纹理特征的基础上定义了精选泡沫表面纹理粗细度的测量方法.泡沫图像纹理的粗细度计算准则如下.

首先定义两个纹理表现模式: 1) 平坦模式.当  $P$  个相邻区域 0, 1 的个数相差大于等于  $P-2$  时,能够检测到平坦区域. 2) 边缘模式.当  $P$  个相邻区域中 0, 1 的个数相等时,可以检测到图像的微小特征,即边缘.其中  $p$  表示计算  $LBP_{P,R}$  时半径为  $R$  的圆形邻域上的  $P$  个像素点.当检测到边缘模式的数量越多时,表示图像纹理越细,反之纹理越粗;同时检测到平稳模式数量越多,表示图像纹理比较粗,反之纹理越细.然后,将整幅图像纹理中边缘模式出现的频率和平坦模式的频率分别记为细系数  $X$  和粗系数  $C$ .将  $C$  与  $X$  的比值定义为图像纹理的粗细值  $W$ .纹理粗细值  $W$  表示图像纹理的粗细程度,  $W$  越小,表示图像纹理越细.

在实际计算时,为更好地描述图像各子区域的粗度特征,可以将泡沫图像划分成多个子块.分别计算每个子块的粗细程度,最终将获得的各个子块的粗细程度的均值作为该泡沫图像对应的纹理粗细度测量值.表 1 给出了不同  $A/S$  对应的精选泡沫图像的表面粗细度测量值 ( $R = 6$ ).从表 1 可以看出,对于高品位的泡沫图像,其表面纹理的粗细度较为集中,而对于较低品位下的泡沫图像,由于其他工况的不同,其粗细度分散在其他不同的区域.通过精选泡沫图像表面纹理粗细度测量,可以对浮选性能进行客观评价.实验表明,  $P$  的选择对结果的影响不大,而  $R$  的大小体现了邻域像素点与中心像素点的远近,随着它们相关程度的差异,选择不同的  $R$  会对结果产生一定的影响.本文以中州铝厂的精选泡沫图像为主要研究和具

体应用对象,通过大量的实验发现,最终取  $R = 6$  时所获得的泡沫纹理粗细度能够对不同品位的精选泡沫图像产生较好的聚类效果.

表 1 精选泡沫表面纹理粗细度测量

$A/S$	$P = 8$	$P = 16$	$P = 32$	平均
14.34	0.0647	0.0635	0.0642	0.0641
14.63	0.0611	0.0634	0.0623	0.0623
14.96	0.0646	0.0649	0.0612	0.0632
15.73	0.0661	0.0671	0.0652	0.0661
12.09	0.0780	0.0731	0.0734	0.0748
11.9	0.0771	0.0782	0.0801	0.0785
10.53	0.0411	0.0452	0.0409	0.0424
10.87	0.0356	0.0345	0.0339	0.0347

## 4 最佳精选泡沫表面视觉状态选取

本文将机器视觉引入浮选过程监控,最终目的是希望能通过机器视觉自动泡沫图像处理模拟人类“看泡”,实现精选泡沫最佳生产状态的自动分析与识别,以期浮选生产提供操作指导.项目组在中州铝土矿浮选现场搭建的浮选泡沫图像视觉监控系统,自 2008 年 9 月成功上线以来收集了大量的浮选生产数据,包括精选泡沫图像、精矿品位、尾矿品位以及其他对应的一系列工艺参量.通过分析这些数据可以发现,随着加药量、通风量、液位等操作变量的不同,精选泡沫状态大致可以分为以下几种典型的浮选生产状态.

1) 理想的生产状态.该状态下泡沫纹理细,泡沫表面褶皱复杂,加药量适中,泡沫层中含矿量多.

2) 较细的纹理状态.发生这种情况的原因是药剂添加过量(在该轻金属浮选厂主要是捕收剂过量导致),气泡致密,粘度高,气泡中承载的矿物粒子过饱和而使泡沫大量破碎,浮选表面较干,流动慢.这种情况会造成药剂量的极大浪费,而且精矿的品位较低.

3) 较粗的泡沫纹理状态.产生这种情况的原因是药剂欠少,浮选泡沫层含矿物较少,浮选泡沫流动较快.这种情况会造成矿物回收率低,导致矿物资源的浪费.

上述几种典型的精选泡沫状态,光凭人工肉眼往往难以有效区分,从而不能保证浮选生产处于稳定最优的生产状态,造成矿物资源或浮选添加剂的严重浪费.为了定量分析泡沫表面纹理粗糙度与精矿品位间的关系,以该选厂 2009 年 4 月份的实际浮选生产数据为例,随机挑选其中典型的 85 幅精选图像为样本,采用本文提出的泡沫图像纹理粗细度特征提取方法提取泡沫纹理粗细程度  $W$ ,作为精选泡沫图像表面视觉特征,同时分析该特征与矿物品位的关系,通过曲线拟合获得精选泡沫表面粗细度与浮选生产指标(精矿品位)的相关性.纹理粗细度特征与矿物品位的相关性离散样本点与曲线拟合结果如图 4 所示.

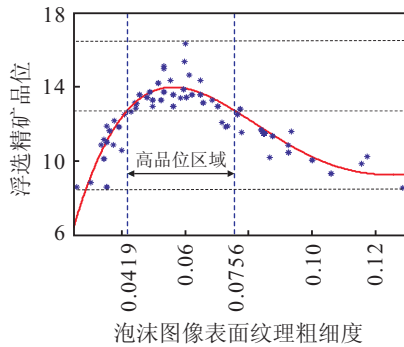


图4 纹理粗细度与矿物品位的关系

从图4可以明显看出,矿物品位的变化范围为[8.5, 16.35],所计算出来的纹理粗细度的取值范围是[0.035 2, 0.128 6]。随着纹理粗细度的增加,泡沫的矿物品位是先增后减,而且当精选泡沫图像纹理的粗细度在[0.041 9, 0.075 6]之间时具有较高的矿物品位,在这个区间的精矿品位大于12.9(该标准是根据该选厂的实际情况确定的)。因此,在矿物浮选过程中,当精选泡沫表面粗细度在区间[0.041 9, 0.075 6]时,即可以判断该浮选生产状态处于一个较优的生产状态。在该状态下,浮选生产的精矿是高品位的优质产品,当实时获取的泡沫图像所提取的表面粗细度不在该范围时,则应通知现场操作人员及时对浮选生产进行调整,以提高浮选精矿品位,保证浮选生产稳定优化运行。浮选现场长期的运行结果表明了该方法的实用性。

## 5 结 论

本文根据浮选泡沫图像特点,提出了一种基于改进LBP的泡沫图像纹理粗细度测量方法。提取了能直接反映浮选生产指标的矿物精选泡沫图像表面纹理视觉特征参数,该特征具有旋转不变性,能较好地克服浮选现场光照不均现象,实现了不同浮选工况下精选泡沫图像表面纹理特征的量化描述。以中国铝业公司中州铝厂铝土矿浮选过程的精选泡沫图像为主要研究和具体应用对象,通过收集大量的实际精选泡沫图像以及对应的浮选生产指标数据,分析了泡沫纹理粗细度特征与矿物品位之间的相关性,得到了精选泡沫图像视觉纹理粗糙度的最佳纹理区间。利用该方法可以实时监视精选泡沫表面纹理特征变化,通过提取精选泡沫图像表面局部纹理特征自动判别其是否处于最佳生产状态,从而通知现场操作人员及时对浮选操作进行调整,以保证整个浮选优化运行。

## 参考文献(References)

[1] Moolman D W, Eksteen J J, Aldrich C, et al. The significance of flotation froth appearance for machine

vision control[J]. *Int J of Mineral Processing*, 1996, 48(3/4): 135-158.

[2] 周开军, 阳春华, 牟学民, 等. 基于图像特征提取的浮选关键参数智能预测算法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(9): 1300-1305.

(Zhou K J, Yang C H, Mu X M, et al. Intelligent prediction algorithm for flotation key parameters based on image features extraction[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(9): 1300-1305.)

[3] Bharati M H, Liu J J, MacGregor J F. Image texture analysis: methods and comparisons[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2004, 72(1): 57-71.

[4] Bartolacci G, Pelletier P, Tessier J, et al. Application of numerical image analysis to process diagnosis and physical parameter measurement in mineral processes, Part I: Flotation control based on froth textural characteristics[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6/7/8): 734-747.

[5] 刘金平, 桂卫华, 牟学民, 等. 基于Gabor小波的浮选泡沫图像纹理特征提取[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(8): 1769-1775.

(Liu J P, Gui W H, Mu X M, et al. Flotation froth image texture feature extraction based on Gabor wavelets[J]. *Chinese J of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1769-1775.)

[6] Moolman D W, Aldrich C, Van Deventer J S J, et al. Digital image processing as tool for on-line monitoring of froth in flotation plants[J]. *Minerals Engineering*, 1994, 7(9): 1149-1164.

[7] 刘文礼, 陈子彤, 路迈西. 煤泥浮选泡沫的数字图像处理[J]. *燃料化学学报*, 2002, 30(3): 198-203.

(Liu W L, Chen Z T, Lu M X. Digital image processing of coal flotation froth[J]. *J of Fuel Chemistry and Technology*, 2002, 30(3): 198-203.)

[8] Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 971-987.

[9] Heikkila M, Pietikainen M. A texture-based method for modeling the background and detecting moving objects[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 657-662.

[10] Yang C H, Xu C H, Gui W H, et al. Application of highlight removal and multivariate image analysis to color measurement of flotation bubble images[J]. *Int J of Imaging Systems and Technology*, 2009, 19(4): 316-322.