文章编号:1671-251X(2019)07-0038-06 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17437

基于半监督聚类的煤泥浮选泡沫图像分类方法

曹文艳， 王然风， 樊民强， 付翔， 王宇龙

（太原理工大学 矿业工程学院，山西 太原 030024）

扫码移动阅读

摘要:针对选煤厂煤泥浮选过程加药量依靠人工干预存在主观性、滞后性和粗放性的问题,提出了一种基于半监督聚类的煤泥浮选泡沫图像分类方法。首先,采集已知加药比例与未知加药比例下的煤泥浮选泡沫图像样本,并对泡沫图像进行预处理,提取泡沫的气泡个数、气泡面积、气泡周长等形态特征;然后,对已知加药比例下泡沫图像形态特征样本进行标志,对未知加药比例下泡沫图像形态特征样本不做标志,并将已标志泡沫图像形态特征样本与未标志泡沫图像形态特征样本进行混合;最后,利用基于高斯混合模型的半监督聚类方法对混合样本进行聚类后得到各类簇,将各类簇内已标志泡沫图像形态特征样本的信息映射到未标志泡沫图像形态特征样本。应用结果表明,该方法可为煤泥浮选生产过程加药量调整提供指导,降低了药剂消耗量,提高了选煤厂浮选自动化水平和经济效益。

关键词:选煤厂;煤泥浮选;浮选泡沫;加药量;图像特征提取;半监督聚类;高斯混合模型

中图分类号:TD948 文献标志码:A

Coal slime flotation foam image classification method based on semi-supervised clustering

CAO Wenyan, WANG Ranfeng, FAN Minqiang, FU Xiang, WANG Yulong

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve problems of subjectivity, hysteresis and extensiveness existed in reagent amount addition of coal slime flotation in coal preparation plant depended on manual intervention, a coal slime flotation foam image classification method based on semi-supervised clustering was proposed. Firstly, coal slime flotation foam images under known reagent-addition ratio and unknown reagent-addition ratio are collected, and the foam images are preprocessed to extract morphological characteristics such as bubble number, bubble area and bubble perimeter. Then, foam image morphological characteristic samples under known reagent-addition ratio are marked, while foam image morphological characteristic samples under unknown reagent-addition ratio are not marked, and the marked foam image morphological characteristic samples and the unmarked foam image morphological characteristic samples are mixed. Finally, semi-supervised clustering method based on Gaussian mixture model is used to cluster the mixed samples, so as to get various clusters, and information of the marked foam image morphological characteristic samples is mapped to the unmarked foam image morphological characteristic samples in various clusters. The application results show that the method can provide guidance for adjustment of reagent-addition amount in coal slime flotation production process, reduce consumption of reagent, and improve flotation automation level and economic benefit of coal preparation plant.

Key words: coal preparation plant; coal slime flotation; flotation foam; reagent-addition amount;

收稿日期:2019-05-13;**修回日期**:2019-06-26;**责任编辑**:盛男。

基金项目:山西省科技计划研究项目(201801D221358)。

作者简介:曹文艳(1990—),女,山西大同人,博士研究生,主要研究方向为煤泥浮选自动化及图像视觉处理,E-mail:594030512@qq.com。

引用格式:曹文艳,王然风,樊民强,等.基于半监督聚类的煤泥浮选泡沫图像分类方法[J].工矿自动化,2019,45(7):38-42.

CAO Wenyan, WANG Ranfeng, FAN Minqiang, et al. Coal slime flotation foam image classification method based on semi-supervised clustering[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(7): 38-42.

image feature extraction; semi-supervised clustering; Gaussian mixture model

0　引言

煤泥浮选主要是在浮选机或浮选柱等浮选设备中,利用煤颗粒表面亲疏水性质的差异,从煤泥中分选出精煤和尾煤。煤泥浮选过程的主要操作变量包括入料浓度、入料流量、浮选槽充气量及加药量,其中入料浓度、入料流量和浮选槽充气量主要是从物理层次影响煤泥浮选效果,而加药量则是影响煤泥浮选效果的主要因素,其通过改变煤颗粒表面物理化学性质来改变煤的可浮性[1-2]。目前多数选煤厂仍依靠有经验的浮选司机通过肉眼观察泡沫特征来调节煤泥浮选过程加药量,该人工控制方式存在主观随意性和滞后性,不能对泡沫特征进行量化描述,无法实现对加药量的优化控制,造成浮选工况波动大、浮选生产指标不合格、浮选药剂消耗量大、选煤成本高。

近年来,许多学者对泡沫图像处理技术进行了深入研究。文献[3]运用图像处理技术对浮选泡沫图像进行分析,得出泡沫颜色、气泡个数、气泡大小、泡沫稳定度、移动速度等物理参数,用以预测浮选泡沫层精矿品位。文献[4]利用改进分水岭分割算法提取泡沫形态特征,用来预测浮选回收率。文献[5]研究了气泡尺寸、形状特征与浮选工况之间的关系,提出了一种基于纹理特征和对象先验知识的改进分水岭浮选泡沫图像分割方法。文献[6-7]根据浮选泡沫图像特点,深入研究了矿物浮选泡沫的动态特征提取方法,并初步分析了浮选泡沫图像速度特征与浮选生产指标之间的关系。文献[8-9]提出使用空间灰度相关矩阵和领域灰度相关矩阵提取泡沫纹理特征,研究了泡沫特征参数随浮选时间变化的关系,定性地指出了各泡沫特征参数与泡沫纹理的相关性。

本文在上述研究的基础上,通过提取泡沫图像形态特征,利用基于高斯混合模型(Gaussian Mixture Model,GMM)的半监督聚类方法对泡沫图像形态特征进行聚类,进而将不同加药量下的泡沫图像进行分类,为浮选过程加药量控制提供指导。

1　泡沫形态与加药量关系机理分析

目前多数选煤厂煤泥浮选使用的药剂主要有捕收剂和起泡剂。捕收剂的最大作用是改变煤颗粒表面润湿性进而改变其亲疏水性,以此增加煤颗粒表面性质的差异,使得承载精煤颗粒的气泡具有可浮性,从而达到分选的目的。起泡剂可降低煤浆溶液的表面张力,使进入煤浆的气体容易扩散到溶液中,与煤浆融合形成气泡,增强气泡稳定性,使得浮选过程有足够多气泡来保证精煤颗粒的吸附。

在浮选过程中,泡沫发挥着“托运”精煤的作用,气泡的个数、尺寸等特征直接关系到精煤的吸附效率,而泡沫特征参数主要受加药量的控制。当捕收剂过量时,泡沫层会变得紧密,这是由于煤颗粒表面性质被改变,使得附着在气泡上的精煤过多,同时也夹杂着大量矿泥;当捕收剂用量少时,泡沫表面颜色会变浅且光滑,这主要是由于泡沫承载的精煤较少,大量精煤流失。当起泡剂过量时,形成的气泡较小,气泡含水过多,携带的精煤较少;当起泡剂用量少时,形成的气泡较大,气泡壁较薄容易破裂,气泡不稳定,原本附着在气泡上的精煤又回落到矿浆中。泡沫形态与加药量存在一定关系[10-12],因此可利用泡沫形态特征来指导浮选过程加药量。

2　煤泥浮选泡沫图像采集

煤泥浮选泡沫图像采集装置主要由光源、摄像机、图像存储及计算处理服务器等组成,如图 1 所示。泡沫产生设备为 XJX-20 机械搅拌自吸式浮选机,利用旋转叶轮产生的负压,自吸气体和药剂形成无污染且稳定的气泡与煤粒接触。光源为机器视觉专用 LED 环形光源,能为摄像机提供亮度高且色温稳定的照明,光强可根据环境变化进行调节。摄像机采用 35 倍光学变焦、400 万像素的 IDS-2DF9C435IH-DW 黑光球机,其分辨率较高,具有红外补光功能,可较清晰拍摄泡沫表层,获取泡沫图像,输出图像质量高,且接口易于软件访问操作。图像存储及计算处理服务器选用 IBM E5-2609v4 服务器,其存取和运算处理速度较快,能对泡沫图像进行实时处理分析[13-14]。

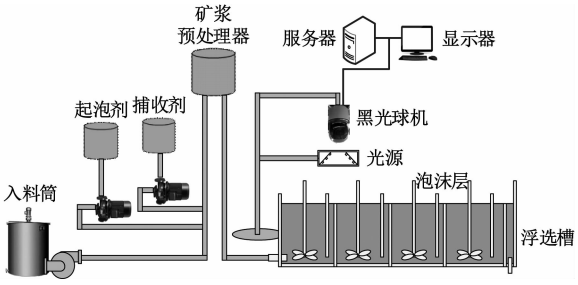
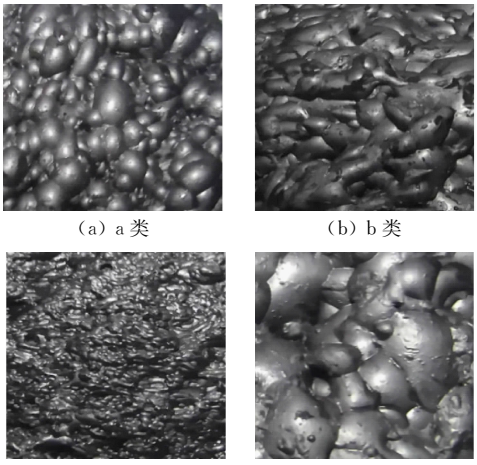


图 1　煤泥浮选泡沫图像采集装置

Fig. 1　Coal slime flotation foam image collection device

在起泡剂与捕收剂比例分别为 3∶2,3∶1,1∶1,1∶3 的加药条件下各采集 10 张泡沫图像样本,在未知加药比例的情况下采集 760 张泡沫图像

样本。当起泡剂与捕收剂比例为 3∶2 时，形成如图 2(a)所示的 a 类泡沫，气泡尺寸合适、大小均匀，气泡稳定，泡沫表面承载较多的矿物颗粒。当起泡剂与捕收剂比例为 3∶1 时，形成如图 2(b)所示的 b 类泡沫，气泡多为长条形，气泡较稳定、光滑，泡沫表面承载的精煤较少。当起泡剂与捕收剂比例为 1∶1 时，形成如图 2(c)所示的 c 类泡沫，泡沫层变得紧密，气泡尺寸较小，多为碎泡，形状不规则，且有连生体存在，气泡之间边缘不明显，气泡稳定度较高，溢流速度慢，粘附在气泡上的精煤较多，但同时夹杂着大量矿泥。当起泡剂与捕收剂比例为 1∶3 时，形成如图 2(d)所示的 d 类泡沫，气泡较大，气泡壁较薄，容易破裂或发生兼并，气泡不稳定，泡沫表面承载的精煤较少。



(a) a 类 (b) b 类 (c) c 类 (d) d 类

图 2 不同加药比例下煤泥浮选泡沫图像

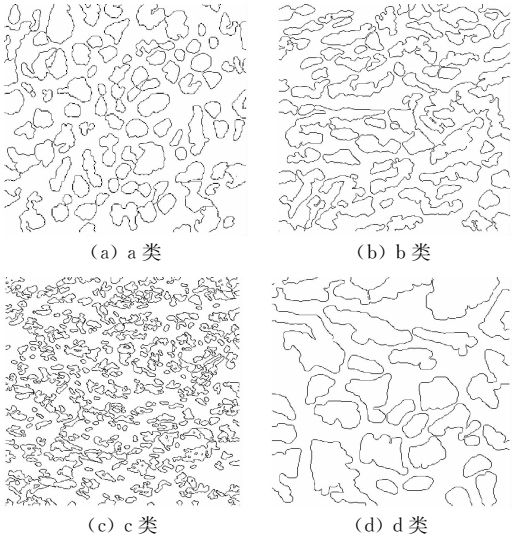
Fig. 2 Coal slime flotation foam images under different reagent-addition ratio

3 煤泥浮选泡沫图像形态特征提取

首先对已知加药比例下获得的 4 类煤泥浮选泡沫图像样本进行预处理，包括图像增强、图像去噪、二值化、形态学处理等。预处理后煤泥浮选泡沫图像如图 3 所示。

在实际浮选过程中泡沫大小不一，形状不规则。为便于定量描述气泡尺寸，将单个气泡近似为椭圆，如图 4 所示，长轴长为 $2m$，短轴长为 $2n$。

煤泥浮选泡沫图像形态特征是反映浮选指标的一个重要特征，其特征量包括气泡个数、气泡面积、气泡周长等。在煤泥浮选过程中关注的不是单个气泡形态，而是不同直径的气泡群体。本文采用平均尺寸描述气泡的面积、周长。基于分水岭算法对泡沫图像分割处理后，通过对泡沫图像中互不连通的气泡区域进行标号，便可得到气泡个数；对气泡在水平面投影的横截面积内的像素进行计算，得到气泡



(a) a 类 (b) b 类 (c) c 类 (d) d 类

图 3 预处理后煤泥浮选泡沫图像

Fig. 3 Coal slime flotation foam images after pretreatment

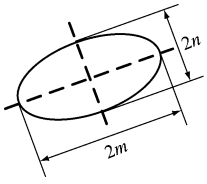


图 4 气泡尺寸

Fig. 4 Bubble size

面积 $S=\pi mn$；图像分割后得到各气泡脊线，通过计算气泡脊线的像素数得到气泡周长 $L=2\pi n+4(m-n)$[15-17]。已知加药比例下 4 类泡沫形态特征见表 1。

同理，对未知加药比例下获得的 760 张煤泥浮选泡沫图像样本预处理后进行特征提取。对已知加药比例下 4 类煤泥浮选泡沫图像形态特征样本进行标志，将 a，b，c，d 类泡沫图像形态特征样本分别标志为■，★，▲，◆；未知加药比例下 760 张泡沫图像形态特征样本不做标志。将已标志的泡沫图像形态特征样本和未标志的泡沫图像形态特征样本混合。

4 煤泥浮选泡沫图像形态特征半监督聚类

煤泥浮选过程中各类泡沫图像样本都是随机存在且相互独立的，当泡沫图像样本足够多时，根据中心极限定理，这些泡沫图像样本分布趋于高斯分布。每类泡沫图像样本包含多个泡沫形态特征，可由一个多维(表示泡沫特征数)高斯分布表示。半监督聚类是有监督分类和无监督聚类相结合的一种方法，在已标志的泡沫图像形态特征样本信息帮助下，可获得比只用未标志的泡沫图像形态特征样本得到的结果更好的簇。因此，为描述所有类型泡沫图像样本的分布情况，通过基于 GMM 的半监督聚类方法对泡沫图像样本进行拟合。

表 1　不同类型泡沫形态特征

Table 1　Morphological characteristics of different types of foam

a 类泡沫			b 类泡沫			c 类泡沫			d 类泡沫		
气泡个数	气泡面积/像素数	气泡周长/像素数	气泡个数	气泡面积/像素数	气泡周长/像素数	气泡个数	气泡面积/像素数	气泡周长/像素数	气泡个数	气泡面积/像素数	气泡周长/像素数
53	1 083.453	167.409 4	39	1 683.453	248.892 7	152	383.453	119.335 6	26	2 583.453	268.523 5
58	1 009.931	160.748 9	42	1 609.931	236.404 2	156	309.931	111.842 5	29	2 509.931	251.872 2
57	1 180.543	160.338 2	42	1 780.543	235.634 1	156	480.543	111.380 4	29	2 680.543	250.845 4
51	1 188.957	155.705 5	38	1 788.957	226.947 8	151	488.957	106.168 7	26	2 688.957	239.263 8
51	1 098.173	159.822 4	37	1 698.173	234.666 9	151	398.173	110.800 2	25	2 598.173	249.555 9
55	1 097.851	161.985 0	40	1 697.851	238.721 8	154	397.850	113.233 1	28	2 597.851	254.962 4
61	1 067.544	162.866 2	44	1 667.544	240.374 1	159	367.544	114.224 4	31	2 567.544	257.165 4
54	1 180.011	158.328 2	39	1 780.011	231.865 5	153	480.011	109.119 3	27	2 680.011	245.820 6
57	1 073.849	157.879 0	41	1 673.849	231.023 1	155	373.849	108.613 9	29	2 573.849	244.697 5
52	1 022.241	167.807 7	38	1 622.241	249.639 5	152	322.241	119.783 7	26	2 522.241	269.519 3

GMM 分布:

$$p(x_i) = \sum_{k=1}^{K} \delta_k G(x_i \mid \mu_k, \boldsymbol{E}_k) \tag{1}$$

$$\sum_{k=1}^{K} \delta_k = 1 \tag{2}$$

式中:$p(x_i)$为样本 x_i($i=1,2,\cdots,N$,N 为泡沫图像样本数)属于各泡沫类型的概率;δ_k 为第 k($k=1,2,\cdots,K$,K 为泡沫类型数)个高斯分布的系数;$G(x_i|\mu_k,\boldsymbol{E}_k)$为第 k 个高斯分布,μ_k 为第 k 个高斯分布泡沫图像形态特征样本均值,$\boldsymbol{E}_k$ 为第 k 个高斯分布泡沫图像形态特征样本协方差矩阵。

GMM 的估计可使用最大似然法进行拟合,GMM 的似然函数可表示为

$$L(x_i) = \lg \prod_{i=1}^{N} p(x_i) = \sum_{i=1}^{N} \lg\left(\sum_{k=1}^{K} \delta_k G(x_i \mid \mu_k, \boldsymbol{E}_k)\right) \tag{3}$$

为求得 $L(x_i)$ 的极值,采用期望最大化(Expectation-Maximization,EM)算法进行迭代,流程如图 5 所示。EM 算法分为 E 步和 M 步[18-19]:E 步中根据初始值或上一步迭代的聚类中心、协方差矩阵和权重,使用贝叶斯公式计算每个高斯分布的最大后验概率;M 步根据最大后验概率确定新的聚类中心、协方差矩阵和权重。重复 E 步和 M 步直到收敛。

利用基于 GMM 的半监督聚类方法对已标志和未标志的泡沫图像形态特征混合样本进行聚类,得到各类簇,将各类簇内已标志泡沫图像形态特征样本的信息映射到未标志泡沫图像形态特征样本,结果如图 6 所示。

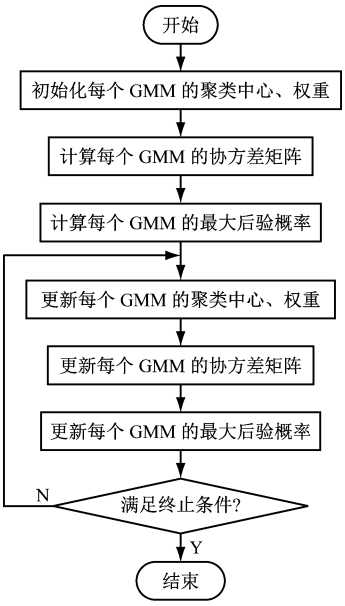


图 5　EM 算法流程

Fig. 5　EM algorithm flow

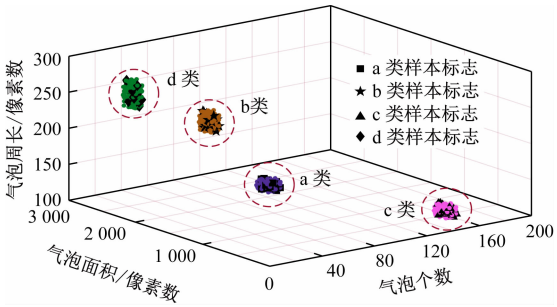


图 6　不同类型泡沫图像聚类分布

Fig. 6　Cluster distribution of different types of foam images

5　应用效果

山西汾西矿业(集团)有限责任公司柳湾选煤厂利用图像采集装置(图 7)获取煤泥浮选泡沫图像。

图像经过预处理、特征提取、半监督聚类分析等处理后，用于判断并调整加药量：若处理结果为 a 类泡沫图像，说明当前加药量合适，无需做调整；若处理结果为 b 类泡沫图像，说明捕收剂用量少，可适当加大捕收剂用量；若处理结果为 c 类泡沫图像，说明捕收剂用量过大，可适当降低捕收剂用量；若处理结果为 d 类泡沫图像，说明起泡剂用量少，可适当加大起泡剂用量。经过 1 个月测试，相比原有仅依靠浮选司机观察来调节加药量，捕收剂、起泡剂消耗量分别降低了 8.22%，7.67%，提高了选煤厂浮选自动化水平和经济效益。

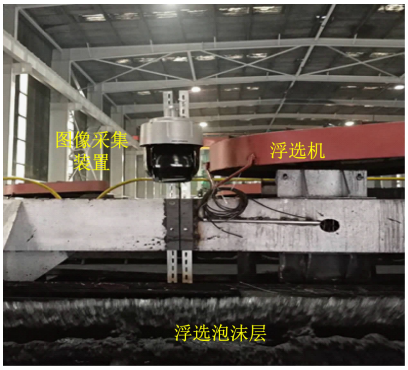


图 7 现场应用

Fig. 7 Field application

6 结语

提出了一种基于半监督聚类的煤泥浮选泡沫图像分类方法。对采集的煤泥浮选泡沫图像进行特征提取，利用基于 GMM 的半监督聚类方法对泡沫图像形态特征进行聚类，依据泡沫图像分类情况调整加药量。应用结果表明，该煤泥浮选泡沫图像分类方法可为煤泥浮选生产过程加药量调整提供指导，降低了药剂消耗量，避免了仅依靠浮选司机观察来调节加药量的主观性、滞后性和粗放性。

参考文献(References)：

[1] 吴翠平，杨小平，许德平，等. 在线煤浆灰分测量的煤泥浮选优化控制系统研究[J]. 高技术通讯，2003，13(8)：85-90.
WU Cuiping, YANG Xiaoping, XU Deping, et al. Study of a coal slurry floatation optimizing control system based on ash on-line measurement[J]. Chinese High Technology Letters, 2003, 13(8): 85-90.

[2] 史纪录，朱正军. 浮选自动加药装置的研制与应用[J]. 选煤技术，2014(3)：68-71.
SHI Jilu, ZHU Zhengjun. Study and application of flotation automatic dosing device[J]. Coal Preparation Technology, 2014(3): 68-71.

[3] 曾荣，沃国经. 图像处理技术在镍选矿厂中的应用[J]. 矿冶，2002，11(1)：37-41.
ZENG Rong, WO Guojing. Application of the image processing technology in nickel concentrator [J]. Mining & Metallurgy, 2002, 11(1): 37-41.

[4] 周开军，阳春华，牟学民，等. 一种基于图像特征提取的浮选回收率预测算法[J]. 高技术通讯，2009，19(9)：957-963.
ZHOU Kaijun, YANG Chunhua, MU Xuemin, et al. A flotation recovery prediction algorithm based on image feature extraction [J]. Chinese High Technology Letters, 2009, 19(9): 957-963.

[5] 李建奇，阳春华，曹斌芳，等. 面向参数测量的改进分水岭浮选泡沫图像分割方法[J]. 仪器仪表学报，2013，34(6)：34-41.
LI Jianqi, YANG Chunhua, CAO Binfang, et al. Improved watershed segmentation method for flotation froth image based on parameter measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 34-41.

[6] 牟学民，刘金平，桂卫华，等. 基于 SIFT 特征配准的浮选泡沫移动速度提取与分析[J]. 信息与控制，2011，40(4)：525-531.
MU Xuemin, LIU Jinping, GUI Weihua, et al. Flotation froth motion velocity extraction and analysis based on SIFT features registration[J]. Information and Control, 2011, 40(4): 525-531.

[7] 桂卫华，阳春华，谢永芳，等. 矿物浮选泡沫图像处理与过程监测技术[M]. 长沙：中南大学出版社，2013.

[8] 路迈西，王勇，王凡，等. 利用阈值分割技术提取煤泥浮选泡沫图像的物理特征[J]. 煤炭科学技术，2002，30(8)：34-37.
LU Maixi, WANG Yong, WANG Fan, et al. Threshold segmentation technology applied to get physical features of foam image from slime floatation [J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(8): 34-37.

[9] 刘文礼，路迈西，王凡，等. 煤泥浮选泡沫图像纹理特征的提取及泡沫状态的识别[J]. 化工学报，2003，54(6)：830-835.
LIU Wenli, LU Maixi, WANG Fan, et al. Extraction of textural feature and recognition of coal flotation froth [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(6): 830-835.

[10] 平翠霞. 铝土矿浮选泡沫尺寸分布特征与浮选药剂添加量关系模型[D]. 长沙：中南大学，2012.

[11] 董志勇，王然风，樊民强，等. 基于 PSO-LSSVM 的煤泥浮选药剂自动添加系统研究[J]. 煤炭工程，2017，49(2)：117-120.
DONG Zhiyong, WANG Ranfeng, FAN Minqiang,

et al. Research on automatic dosing system for coal slime flotation based on PSO-LSSVM [J]. Coal Engineering, 2017, 49(2): 117-120.

[12] 唐朝晖,王伟,刘金平,等.基于泡沫尺寸 PDF 模型的铜粗选过程加药量预测控制[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):856-863.
TANG Zhaohui, WANG Wei, LIU Jinping, et al. Predictive control of reagent-addition amount based on PDF model of bubble size in copper roughing flotation process [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(3): 856-863.

[13] 肖金林,桂卫华.浮选泡沫图像监控系统在冬瓜山铜矿的应用[J].科协论坛(下半月),2012(6):70-71.

[14] 刘恒.铜浮选泡沫图像监控系统的构件化软件设计[D].长沙:中南大学,2013.

[15] 欧阳长恒.基于 MATLAB 的煤泥浮选泡沫图像分析方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.

[16] 林小竹,谷莹莹,赵国庆.煤泥浮选泡沫图像分割与特征提取[J].煤炭学报,2007,32(3):304-308.
LIN Xiaozhu, GU Yingying, ZHAO Guoqing. Feature extraction based on image segmentation of coal flotation froth [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 304-308.

[17] 林小竹,王彦敏,杜天苍,等.基于分水岭变换的目标图像的分割与计数方法[J].计算机工程,2006,32(15):181-183.
LIN Xiaozhu, WANG Yanmin, DU Tiancang, et al. A segment and count method based on watershed transformation[J]. Computer Engineering, 2006, 32(15): 181-183.

[18] 罗胜,郑蓓蓉,叶忻泉.基于 EM 和 GMM 相结合的自适应灰度图像分割算法[J].光子学报,2009,38(6):1581-1585.
LUO Sheng, ZHENG Beirong, YE Xinquan. Image segment based on the self-adaptive threshold EM and GMM algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1581-1585.

[19] 王民,张鑫,贠卫国,等.基于核模糊 C-均值和 EM 混合聚类算法的遥感图像分割[J].液晶与显示,2017,32(12):999-1005.
WANG Min, ZHANG Xin, YUN Weiguo, et al. Remote sensing image segmentation based on KFCM and EM hybrid clustering algorithm [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(12): 999-1005.