

“十二五”国家重点图书出版规划项目

KUANGWU FUXUAN PAOMO TUXIANG CHULI YU GUOCHENG JIANCE JISHU

矿物浮选泡沫图像处理 与过程监测技术

桂卫华 阳春华 谢永芳 唐朝晖 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

“十二五”国家重点图书出版规划项目

矿物浮选泡沫图像处理 与过程监测技术

桂卫华 阳春华 谢永芳 唐朝晖 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

矿物浮选泡沫图像处理与过程监测技术/桂卫华,阳春华,谢永芳,唐朝晖著. —长沙:中南大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5487-0929-9

I. 矿... II. ①桂... ②阳... ③谢... ④唐... III. ①浮游选矿-泡沫浮选-图像处理②浮游选矿-泡沫浮选-过程控制

IV. TD923

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 175895 号

矿物浮选泡沫图像处理与过程监测技术

桂卫华 阳春华 谢永芳 唐朝晖 著

☐责任编辑 刘 辉 汪宜晔

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 18 ☐字数 446 千字

☐版 次 2013 年 8 月第 1 版 ☐2013 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0929-9

☐定 价 50.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书总结了作者及其团队近 10 年来在矿物浮选泡沫图像处理技术及基于机器视觉的过程监测技术领域的工作，内容涉及浮选生产过程机理分析、泡沫图像处理方法、工艺指标预测技术、工况识别方法以及系统实现等方面。书中论述了浮选泡沫图像形态特征、颜色特征、纹理特征以及运动特征的提取方法；讨论了泡沫图像特征与浮选工况、工艺指标之间的相互关系；给出了基于概率密度估计和加权模糊支持向量机的浮选过程工况识别技术；阐述了基于机器视觉的矿物浮选监测系统及其在铝土矿浮选、锌湿法冶炼硫浮选、铜优浮选及金锑浮选等典型浮选生产过程中的应用。这些系统在实际工业生产过程中取得了明显的应用成效，实现了浮选生产过程泡沫图像特征的提取、关键工艺参数的监测和浮选工况的实时监视，为稳定浮选生产工况、提高精矿品位和回收率发挥了重要作用。相关方法可为其他复杂生产过程的在线监测提供借鉴和参考。

本书可作为高等院校控制科学与工程、仪器科学与技术等学科研究生和教师日常用书，也可作为从事矿物浮选和过程控制领域研究的科研人员和工程技术人员提供参考。

前言

Foreword

选矿是矿产资源加工中必不可少的一个重要环节,泡沫浮选是最重要的—种选矿方法,广泛应用于钢铁、有色金属、煤炭、化工和环保等工业部门。泡沫浮选是通过在矿浆中加入浮选药剂,并充入空气搅拌产生气泡,根据矿物表面润湿性差异,疏水有用矿物在气泡上黏附,亲水脉石矿物滞留水中,实现有用矿物与脉石分离的一种分选方法。浮选泡沫表面视觉特征是浮选工况和工艺指标的直接指示器,长期以来,浮选生产主要依靠人工观察泡沫表面视觉特征进行调整操作,存在主观随意性,容易引起浮选工况波动,直接影响浮选精矿产品质量的稳定和矿产资源回收率。

本书将机器视觉应用到矿物浮选过程中,替代人工肉眼观察,研究矿物浮选泡沫图像处理、工艺指标在线检测、工况识别及过程监测等技术,开发了基于机器视觉的泡沫浮选过程监测系统,应用于铝土矿浮选、锌湿法冶炼硫浮选、铜优浮选以及金锑浮选等典型浮选生产过程中。

全书共分8章:第1章主要介绍了浮选工业及浮选生产过程监测技术的发展;第2章分析了浮选生产过程工艺机理,阐述了气泡矿化的热力学和动力学分析,讨论了影响泡沫特征的主要影响因素,确定了表征工况的主要泡沫特征;第3章至第5章分别讨论了浮选泡沫图像形态特征、颜色特征、纹理特征以及运动特征提取方法;第6章阐述了泡沫图像特征与浮选工况、工艺指标之间的相互关系;第7章主要研究工况识别方法,详细说明了基于概率密度估计和加权模糊支持向量机的浮选过程工况识别技术;第8章主要介绍了基于机器视觉的矿物浮选过程监测系统的实现技术,以及研发的矿物浮选过程监测系统在铝土矿浮选、锌湿法冶炼硫浮选、铜优浮选以及金锑浮选等典型浮选生产过程中的应用。本书的第1章、第2章和第6章由桂卫华执笔,第3章、第4章和第5章由阳春华执笔,第7章由唐朝晖执笔,第8章由谢永芳执笔,由桂卫华、阳春华统编全稿。

本书是我们团队秉承“求实创新、研以致用”的科研精神,在矿物浮选过程监控技术领域近10年研究工作的总结,参与该书研究工作的团队老师还有徐德刚、朱红求、王雅琳和陈宁等。团队中一批优秀的博士研究生和硕士研究生勇于创新、孜孜不倦,在矿物浮选过程监控技术领域取得了创新性的研究成果。他们勤勤恳恳、任劳任怨奋斗在工业现场,使得这些研究成果在实际工业生产过程中取得了明显的应用成效,为本书的撰写提供了基本素材。博士研究生何明芳、邹波、刘金平,博士后周开军等在完成研究工作的同时,还为本书的编写投入了大量时间和精力,正是团队的勤勉敬业和共同合作,本书得以顺利完成。为此,特别感谢为本书的撰写做出重要贡献和给

予大力支持的团队老师和研究生。

本书的基础研究工作得到了国家创新研究群体科学基金项目“复杂有色冶金过程控制理论、技术与应用”(61321003)、国家自然科学基金重点项目“基于机器视觉的矿物浮选过程建模与优化控制”(61134006)、国家杰出青年科学基金项目“复杂工业过程建模、控制与优化”(61025015)以及“矿物浮选泡沫视觉图像处理方法研究”(61071176)、“图像统计建模基础理论及其在工业视觉中的应用研究”(61272337)等项目的支持,此外还得到了教育部创新团队项目“复杂有色冶金过程控制理论、方法与应用”(IRT1044)、教育部高等学校博士点基金优先发展领域资助项目“复杂有色冶金生产节能降耗的过程控制理论与方法”(20110162130011)以及“基于分布机器视觉的矿物浮选过程优化控制”(20120162110076)等项目的支持,在此,对国家自然科学基金委员会和教育部表示深深的谢意。

由于水平有限、时间仓促,书中所述存在不妥和错误之处,恳请读者和同仁多多批评指正。

桂卫华 阳春华 谢永芳 唐朝晖

2013 年 6 月

于中南大学控制工程研究所

目录

Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 浮选工业的发展	(1)
1.2 矿物浮选泡沫图像处理技术的发展	(3)
1.3 浮选生产过程监测技术的发展	(11)
第2章 浮选生产过程工艺机理分析	(14)
2.1 浮选生产过程原理及工艺	(14)
2.2 气泡矿化热力学分析	(18)
2.3 矿粒与泡沫作用过程动力学分析	(20)
2.4 浮选泡沫特征的主要影响因素	(26)
2.5 表征浮选工况的泡沫表面视觉特征	(32)
2.6 小结	(34)
第3章 浮选泡沫形态特征提取	(35)
3.1 泡沫图像形态特征提取方法概述	(35)
3.2 泡沫图像的筛选与光照补偿	(36)
3.3 泡沫图像分割结构元素选取	(51)
3.4 基于分层分水岭的泡沫图像自适应分割算法	(64)
3.5 基于谷底型边缘的泡沫图像分割方法	(77)
3.6 图像标记及像素定标	(84)
3.7 泡沫尺寸统计特征提取	(85)
3.8 基于形态学签名变换的泡沫形状特征提取	(88)
3.9 小结	(94)
第4章 浮选泡沫颜色和纹理特征提取	(95)
4.1 泡沫颜色和纹理特征提取概述	(95)
4.2 基于全变差修复的泡沫顶部亮点移除	(96)
4.3 多颜色空间的泡沫颜色特征提取	(98)
4.4 纹理特征提取	(104)
4.5 小结	(120)

第5章 浮选泡沫动态特征提取	(121)
5.1 动态特征提取方法概述	(121)
5.2 浮选泡沫速度特征提取	(122)
5.3 浮选泡沫稳定度特征提取方法	(139)
5.4 小结	(142)
第6章 基于泡沫视觉特征的浮选关键工艺参数检测	(143)
6.1 浮选泡沫视觉特征与关键工艺参数分析	(143)
6.2 基于混合神经网络的 pH 软测量模型	(154)
6.3 基于 B 样条变换偏最小二乘的精矿品位预测模型	(169)
6.4 基于稀疏多核最小二乘支持向量机的回收率预测模型	(180)
6.5 小结	(188)
第7章 基于泡沫视觉特征的浮选工况识别	(189)
7.1 基于尺寸概率密度估计的浮选工况识别	(189)
7.2 基于加权模糊支持向量机的浮选工况识别	(203)
7.3 小结	(213)
第8章 基于机器视觉的矿物浮选过程监测系统	(214)
8.1 系统需求分析	(214)
8.2 图像采集硬件平台设计	(216)
8.3 软件设计与实现	(220)
8.4 铝土矿浮选过程监测系统	(234)
8.5 锌湿法冶炼硫浮选过程监测系统	(242)
8.6 铜优浮选过程监测系统	(250)
8.7 金锑浮选过程监测系统	(260)
8.8 小结	(271)
参考文献	(272)

第1章 绪论

矿产资源是人类社会赖以生存和发展的物质基础,是国家安全与经济发展的重要保障。我国有95%以上的能源、85%的工业原料和70%的农业生产资料取自于矿产资源。自然界所蕴藏的矿产资源绝大多数需要选矿加工后才能利用,选矿是矿产资源加工中必不可少的一个重要环节。在常用的选矿方法中,泡沫浮选是以表面化学为基础,根据矿物表面润湿性的不同来分选矿物的分离方法。泡沫浮选是应用最为广泛的一种选矿方法,几乎所有矿石都可用泡沫浮选分选。由于浮选工艺流程长、内部机理不明确、影响因素多、涉及变量多且非线性严重、工艺指标不能在线检测等原因,一直以来,浮选过程主要依靠人工肉眼观察浮选槽表面泡沫状态来完成现场操作,这种以人工肉眼观察泡沫进行浮选操作的生产方式主观性强,难以实现浮选泡沫状态的客观评价与认知,造成浮选生产指标波动频繁、矿物原料流失严重、药剂消耗量大、资源回收率低等情况发生,特别在高品位矿物资源日益匮乏的今天,浮选矿源成分复杂、矿物品位低,浮选生产人工操作更加难以有效进行。

浮选是发生在固、液、气三相界面上的连续物理化学过程,其中浮选泡沫层起关键作用。浮选泡沫颜色、大小、形状、稳定性、流速、纹理粗细度等表面视觉特征与浮选工况、生产指标、操作变量等密切相关。因此,浮选泡沫表面视觉特征是浮选工况与工艺指标的直接指示器,浮选泡沫表面视觉特征一直是选厂浮选生产调节的主要依据。由于工业视觉检测速度快,可同时监测整个浮选流程中几十乃至上百个浮选槽的泡沫状态,实现泡沫表面视觉特征的量化描述与浮选生产状态客观评价和矿物泡沫浮选过程全流程监测,对实现浮选过程的整体优化运行、提高精矿品位和矿物资源利用率具有重要意义。随着我国经济规模的迅速扩大,绝大部分矿产资源已无法满足经济发展的需求,严重制约了国民经济的发展,为了充分利用好贫矿与难选矿等有限的矿物资源,深入研究基于机器视觉的泡沫浮选过程监测技术,切实提高矿产资源的回收率与综合利用率和选矿过程自动化技术水平迫在眉睫。

为此,本专著系统地总结了矿物浮选泡沫图像处理技术及基于机器视觉的过程监测技术的研究工作,重点阐述了矿物浮选泡沫图像处理、工艺指标在线检测、工况识别及过程监测等技术,研发了基于机器视觉的泡沫浮选过程监测系统,应用于铝土矿浮选、锌湿法冶炼硫浮选、铜优浮选以及金锑浮选等典型浮选生产过程中。

1.1 浮选工业的发展

浮选作为一种工业规模的选矿应用方法,在国外大约形成于19世纪末。当时西方国家工业发展迅速,急需大量的矿物原料。为了从细粒浸染的贫矿或组成较复杂得多金属矿石中选出精矿产品,浮选开始在工业上出现,并不断得到发展和完善。泡沫浮选法最早起源于贝塞尔兄弟在1877年发明的一种选别石墨矿专利,该专利将磨碎的矿石与1%~10%的有机物(如石蜡油)混合,加入水并煮沸得到水蒸气气泡使石墨矿粒浮出。但是当时人们并没有意识到将气泡作为分选界面以及矿粒运载体的重要性,直到1886年出现用酸和碳酸盐类矿物产

生气泡进行浮选的专利后,人们才明确认识到浮选过程中气泡的作用,并相继发明了许多产生气泡的方法。用气泡替代油滴作为矿粒载体,可将每吨矿石浮选的用油量由 8 kg/t 逐渐降低到 $120\sim 800\text{ g/t}$,随后还陆续发现不同油类物质的浮选性能并不完全相同。利用气泡增加气-液界面并携带矿粒上浮,使浮选法大大向前推进一步,并出现了许多形式的泡沫浮选法,主要包括:

(1)气体浮选法:1901年,澳大利亚采用这种方法处理了多年积累的品位为20%的锌重选废弃尾矿,生产出600多万吨品位达42%的锌精矿。这种方法的特点是将含有碳酸盐类脉石的干尾矿物料,放入热稀硫酸溶液中,因发生化学反应产生 CO_2 气泡,经油作用过的闪锌矿便黏附在 CO_2 气泡的表面被携带到矿液面。

(2)电解浮选法:1904年曾提出用电解水产生气体,但当时在工业上并没有得到应用,目前主要用于工业污水及某些轻工、食品工业生产废水的净化和用于研究微细粒矿物的微泡浮选新工艺。

(3)真空浮选法:1904年提出并曾在工业上获得了大规模的应用,该法的实质是在矿浆液面上抽气造成真空,使原先溶于矿浆中的有用矿物以气泡的形式析出。

(4)正压力浮选法:对矿浆加压促进空气溶解,解压至普通大气压,使溶解的空气呈气泡析出。但当时此法并未得到正式应用,目前已被广泛用于新型气体析出式浮选机。

(5)用机械搅拌装置粉碎空气流产生气泡法:1906年出现了利用叶轮对矿浆进行剧烈搅拌,将大气中的空气直接吸入以产生气泡进行浮选的专利;1910年出现了工业用机械搅拌式浮选机,当时机械搅拌式浮选机叶轮转速尽管不高(300 r/min),但由于叶轮在矿浆中急速旋转,在转轴周围形成“空气漏斗”,同时在叶轮的轴心附近形成负压,大气中的空气经“空气漏斗”被吸入矿浆中,并被叶轮的搅动割裂弥散成细小气泡。之后又制造出气升式浮选机,由多孔底板直接通入空气,或浸入矿浆中的管子直接鼓入空气等。

(6)药剂的应用对浮选发展起着巨大的推动作用。1909年出现采用有机起泡剂(如酮、醛及酯)的专利,接着又出现松油和醇类起泡剂。在1915—1922年间,捕收剂(即当时的捕收油),通常是指某些对欲浮矿物具有捕收性能的非气泡性油类。但自1921年后,发现了含三价氮和含二价硫的可溶性(或水溶性较小)有机化合物可以代替油类捕收剂,特别是在1925年发现黄药可以作为硫化矿物的有效捕收剂,使浮选效果显著提高,大大促进了硫化矿物浮选的发展,并在20世纪30年代使浮选成为矿物加工的一个重要工序。黄药的应用,当时在矿物加工史上是最引人注目的一项成果,甚至被视为浮选工艺的革命,结束了仅使用油类作为唯一捕收剂的历史。1924年出现用皂类捕收剂回收氧化矿物的专利,1935年又研制出胺类阳离子捕收剂。由于各种有机化合物类捕收剂的相继出现,浮选的适用范围日益扩大,既可处理硫化矿物,又可处理非硫化矿物。

为了实现多金属矿石的选择性分离,发现或找到某些无机盐类药剂对改善硫化矿物的分离或改善硫化矿物的浮选是十分重要的。如1903年出现采用 Na_2SO_4 (无水芒硝),1905年出现用碱金属硫化物或多硫化物处理有色金属氧化物专利,1912年发现重铬酸盐对方铅矿的抑制作用;1913年发现硫酸铜可提高闪锌矿的可浮性,以及 SO_2 可抑制闪锌矿,开始了对硫化矿物的优先浮选。随后发现了石灰对黄铁矿有显著的抑制作用,特别是在1922年发现氰化物的选择性抑制作用,使多金属硫化矿的优先浮选更为有效。1923年发现硫化物(如硫化钠)、1924年发现亚硫酸盐等无机盐类在多属硫化物的分离浮选中均可作为抑制剂使用。特

别是近代,许多新型特效药剂不断出现,使分选效率大为提高,并推动了浮选理论与工艺的迅速发展。

我国的浮选工业起步较晚,但在改革开放后发展迅速,生产能力有了巨大的增长,目前多种金属的产量均居于世界前列。浮选厂的生产规模也有了很大的发展,兴建了一大批日处理能力高达几十万吨甚至上百万吨的大型浮选厂,如江西德兴铜矿大山选矿厂(60 kt/d)为我国最大的选矿厂,山西省平朔煤矿安家岭选煤厂(15 Mt/a)为世界最大的选煤厂。

在浮选厂的工艺流程方面,目前我国不论是硫化铜矿、多金属硫化矿还是其他金属矿和非金属矿都积累了很多经验,掌握了先进的工艺流程。比如针对硫化铅锌矿,中南大学和凡口铅锌矿利用浮选体系中同类矿粒的粗粒效应与载体作用,采用常规浮选设备实现了细粒矿石的浮选回收。与矿泥单独浮选相比,提高铅回收率6%、锌12%以上。

资源综合利用方面也成绩显著,特别是针对难选矿石,通过实验研究找到了不少解决办法。如针对柿竹园钨、铋、钼、萤石等复杂难选多金属矿,通过多年的科技攻关研制成功了以主干全浮流程为基础、以螯合捕收剂为核心的综合选矿新技术,很好地解决了该矿石的选矿技术难题,2000年底完成了工业试验,并成功地应用于柿竹园1000 L/d选矿厂。

浮选设备制造也有了很大的发展。绝大部分浮选设备已经实现了国产化,如北京矿冶研究总院研制成功的BF型浮选机,是一种针对铁精矿反浮选工艺特点研制的高效分选设备;中国矿业大学开发的旋流-静态微泡浮选柱,实现了逆流-旋流-管流三种矿化的梯级组合。

浮选药剂方面通过不断实验,刻苦攻关,每年都有新型的浮选药剂问世。比如由中南大学负责的铝土矿反浮选脱硅新药剂工业试验项目,以河南中、低铝硅比铝土矿为研究对象,系统地开展了反浮选脱硅新药剂基础理论研究,完成了小型试验、扩大连选试验及工业试验,揭示了铝土矿中主要铝硅酸盐矿物各晶面断裂化学键性质的各向异性和阳离子捕收剂在矿物不同界面的相互作用及浮选行为的机制,提出了铝硅酸盐矿物高效捕收剂结构的新思路,研制开发了适合于铝土矿反浮选脱硅的高效捕收剂,确定了铝土矿反浮选脱硅配套的高效药剂制度;成功研制了新型阳离子捕收剂,实现了矿浆的控制分散和选择性脱泥,以及硅酸盐矿物的强化捕收,形成了铝土矿选择性脱泥及强化阳离子反浮选脱硅的工艺技术,解决了我国铝土矿资源品位低难以分选的难题,使我国80%的中、低品位铝土矿成为高品位精矿,建立了具有我国自主知识产权的世界第一条高硅铝矿石选矿拜耳法氧化铝生产线。

1.2 矿物浮选泡沫图像处理技术的发展

基于图像处理的浮选过程监控系统能否成功实现其控制目标,很关键的一点就是是否能准确分析出与浮选生产工况密切相关的泡沫图像表面视觉特征。一般的基于机器视觉的浮选过程监控系统,均是通过研究特定的泡沫图像处理方法提取泡沫表面的一个或者多个视觉特征,进而通过大量的样本统计分析这些视觉特征与工艺生产状态参量、过程操作量和生产指标间的相互关系,建立相应的关系模型,以期实现基于机器视觉的浮选过程控制。因此,通过研究合适的泡沫图像处理算法,提取能反映浮选生产工况的泡沫表面视觉特征是实现浮选过程自动控制的关键。在基于机器视觉的浮选过程监控系统中,信息处理的主要流程如图1-1所示。

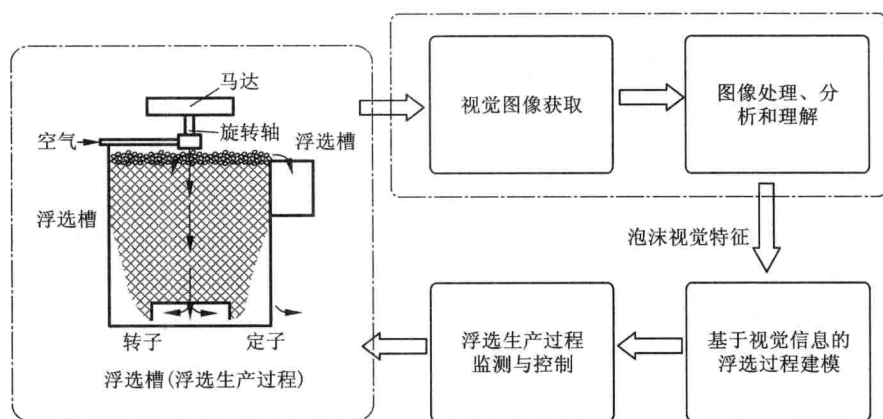


图 1-1 基于机器视觉的浮选过程监控的主要流程

图 1-1 表明,在获取泡沫图像之后,通过合适的方法对泡沫图像进行处理以提取与浮选工况密切相关的泡沫表面视觉特征参量,实现与人类观察泡沫表面类似的工况感知功能,是基于机器视觉的浮选过程监控系统成功实施的先决条件。因浮选泡沫表面所表现出来的独特的视觉特性,研究者已经进行了大量的浮选泡沫图像处理和泡沫表面视觉特征提取方面的研究。目前文献中最为关注的泡沫表面视觉特征包括泡沫颜色、气泡形态特征、泡沫纹理和泡沫动态特征(包括流速和稳定度)。

1.2.1 泡沫表面颜色特征提取

人类在观察客观世界时,所看到的物体,总感觉均有其独特的颜色,比如看到橘子可能认为橘子是橙黄色。那么浮选泡沫到底是什么颜色,并且泡沫颜色与浮选生产工况到底有什么关系呢?根据物理学原理,物体表面的颜色决定于物体对光线的吸收和反射,现实世界中不同材质结构的物体表面对不同波长的光吸收能力和反射能力不同,所以不同材质的物体表面呈现出的颜色也不同,也就是说,物体表面所表现出来的颜色实质上决定于物质的内部结构属性^[1]。不同波长的光由不同能量的光子组成^[2],波长 λ 和能量 E 间的关系为 $E = hc/\lambda$, 式中 h 为普朗克常数, c 为光速。当光子射到物体上时,某波长的光子能量与观测物质内原子的振动能或电子发生跃迁时所需能量相同时,就易被物质吸收,其他波长的光就不易被吸收。物质对光的选择吸收,就造成了各自的颜色。

在矿物浮选生产中,不同选厂矿石原料的性质、矿物成分不同,那么矿化泡沫层所黏附的矿物粒子的材质和含量、粒度不一样,且由于浮选现场的入射光波长(能量)的差异,使得不同选厂的矿化泡沫所吸收和反射的光的波长也会有差异,造成采集的泡沫颜色产生差异。比如铜矿泡沫表面表现为金黄色,而铝土矿浮选泡沫则表现为土黄色,当铝土矿的原矿中含铁较多时,泡沫颜色偏红。同一选矿厂的浮选泡沫,即使忽略环境光照的影响,浮选泡沫表面颜色也会随着现场光照的变化和浮选生产工况的变化而发生变动。其主要原因是,浮选入选原矿的成分和品位是随机难以控制的,由于操作条件不同,浮选生产工况状态不同,泡沫表面包含的矿物粒子的属性(粒度、品位)不完全相同,从而使得不同浮选状态下同一浮选槽

中的浮选泡沫也呈现出不同的颜色。理论上,浮选泡沫表面颜色与泡沫中矿物成分和品位有直接关系^[3],这一观点已被实验室研究者和工程应用者广泛接受。实际选矿厂有经验的操作工人一般都会根据泡沫的颜色、泡沫表面的亮度信息来判断矿物的种类和含量。

鉴于泡沫表面颜色与矿化气泡的种类、成分的关系密切,泡沫图像颜色特征提取受到研究者的广泛重视。Moolman^[4]较早地指出泡沫颜色与浮选生产工况具有密不可分的联系。随后 Oestreich^[5]指出颜色向量角(color vecotr angular)是一个非常有效的颜色参量,能较好地检测到泡沫中因精矿品位的变化造成的表面颜色的变化,通过对不同状态下的泡沫颜色分别进行分析能较好地实现泡沫中精矿品位的软测量。Haavisto^[6]通过检测和分析矿浆的可视和近红外光谱实现矿浆成分的测量,实验表明该方法是 X-ray 荧光分析仪对矿浆成分检测的一个很好的补充,极大提高了矿浆成分(矿物品位)在线检测的频率。为了分析泡沫表面颜色与矿物品位的关系,Kaatinen^[7]通过在锌浮选现场安装了 RGB 彩色摄像头和分光光度计来检测泡沫的颜色,通过建立泡沫颜色和品位的偏微分和多元线性回归模型预测泡沫中的锌品位。Cipriano^[8]通过提取泡沫图像的 R、G、B 空间的颜色统计量,刻画泡沫表面的颜色特征,结合泡沫形态、大小、速度等特征参量,建立了浮选过程的专家操作系统。Bonifazi^[9, 10]通过在 Pyhasalmi (Finland) 和 Garpenberg (Sweden) 选厂收集的大量浮选泡沫图像与其对应的选矿指标,分析了泡沫表面颜色与形态特征来预测浮选性能指标。在煤泥浮选中,Vathavooran^[11]经过研究发现煤泥泡沫图像的表面颜色和精矿的灰分、水分和滤饼比阻(specific cake residence)是密切相关的。

虽然大量的研究已经可以确定泡沫表面颜色与泡沫中矿物成分品位密切相关,但是泡沫表面颜色测量会受到周围环境光源的影响,造成泡沫颜色特征测量不准确。Reddick^[12]采用 Smartfroth 系统检测泡沫颜色,并自制了 LED 光源,通过将泡沫 RGB 颜色转换到 CIE 'LAB' 颜色空间,以尽可能地减少颜色测量过程中环境光源的影响。研究表明,环境光照的影响在泡沫表面颜色测量中不能完全忽略。在对 Kennecott Utah Copperton 选厂的硫化矿的批浮选实验中,结果表明泡沫表面颜色并不能说明泡沫中夹带的脉石的数量,主要原因是这些脉石极少分布在浮选气泡薄膜上表面,从而极大地影响通过泡沫颜色特征来预测精矿品位的准确性。为了进一步获得更为准确的泡沫表面颜色,降低不同光照对泡沫表面颜色的影响,Yang^[13]针对泡沫凸表面的镜面反射(泡沫图像高亮点)影响泡沫表面颜色测量,提出了一种泡沫表面高亮点修复方法,对修复后的泡沫图像采用多变量分析(MIA)方法提取了泡沫图像颜色特征参量,并通过正交最小二乘回归方法建立了泡沫颜色与矿物品位的相关模型。实验表明,所提出的方法能获取泡沫表面稳定的颜色特征参量,为精矿品位预测奠定基础。Haavisto^[14]采用近红外反射光谱检测与传统的 X-ray 荧光分析仪相结合的方法检测浮选矿浆中矿物成分含量,在一个铜锌矿浮选厂(主要是黄铜矿和闪锌矿)搭建了相应的原型系统,减少了 X-ray 荧光分析仪的检测频率,并获得较好的矿浆成分检测效果。

理论分析和实际应用结果均表明,浮选泡沫表面的颜色与矿化气泡中矿物种类与气泡的矿化程度密切相关,可以通过获取泡沫表面颜色预测精矿品位。但是,泡沫颜色检测极易受环境光照、现场粉尘、水雾等恶劣检测环境的影响,并且气泡薄膜上表面的镜面反射所产生的高亮点也极易造成泡沫颜色测量的不精确性,虽然目前有少量研究者已经注意泡沫颜色测量中存在问题,并通过设置现场灯光、转换图像颜色表示空间,并进行泡沫表面修复等方法,以期获得更为准确的颜色特征,但是这些方法还是没有根据泡沫表面统计特点对泡沫表面光

照进行校正,未能解决泡沫表面的色偏问题。因此,有必要根据泡沫图像表面的特点,建立泡沫图像光照估计模型,基于所获得的光照估计对泡沫颜色进行校正,以获取未受光照影响的泡沫颜色特征。

1.2.2 气泡大小和形态特征提取

气泡大小和形态是泡沫结构的主要特征参量,和泡沫颜色一样同样与浮选生产工况密切相关。浮选泡沫的大小和形态随矿浆中矿石的性质、混合药剂的剂量和浮选区域的变化而变化。当泡沫承载率高也就是泡沫上矿粒多且密集时,浮选泡沫比较实,并且当入选矿物品位较高且药剂合适时,一般泡沫大小比较均匀,泡沫既不会太大也不会太小,反之则可能形成虚化泡沫,影响选矿回收率。三相的矿化气泡的具体形态为:相邻气泡间包含表面薄膜将两个独立气泡分割开来,三个气泡薄膜以 120° 交接形成气泡边界骨架或

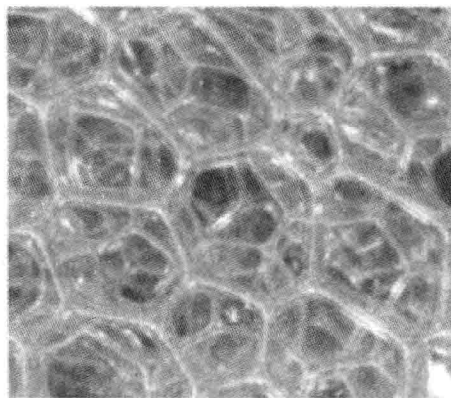


图 1-2 真实的二相泡沫

者四个相邻气泡薄膜共同交接以 109.6° 形成气泡的边界顶点^[15]。泡沫边界骨架形成一个大分支网络,而边界顶点相当于网络的顶点。为了能有效观察三相泡沫的内部结构,可以通过拍摄与三相泡沫内部结构类似的透明二相泡沫来进行分析,图 1-2 显示了一个真实的二相泡沫拍摄图。由于二相泡沫的透明性,从图中可以看到气泡的基本骨架和泡沫薄膜交接顶点。在泡沫的立体结构中,大多数的液体存在于泡沫骨架中,它们与曲线薄膜相比具有非常急剧的曲线化的液/气交接面,气泡的表面张力造成泡沫骨架中的液体压力比气泡薄膜中压力低,迫使液体从薄膜中流出。由于气泡薄膜非常薄,可以假设气泡中排水均发生在泡沫的骨架中,将泡沫看成是一个相互交接的网络,或者是一个随机分布的排水通道网。独立泡沫薄膜在浮选过程中具有非常重要的行为,表面张力的变化,泡沫压力等均会造成泡沫薄膜的破裂,相邻泡沫的兼并和泡沫拓扑结构的改变。

一般来说泡沫结构是分层变化的,从泡沫表面到矿浆和泡沫的交接面,泡沫大小从大到小逐渐减小,并且下层的泡沫表现为越来越规则。图 1-3 显示了泡沫大小结构随泡沫层厚度的增加而逐渐变化的分层示意图。从图中可以看到,在矿物浮选过程中,泡沫层中上层泡沫不断破裂兼并,气泡破裂后泡沫表面粒子部分直接黏附在相邻的泡沫上,部分矿物粒子往下沉,在下沉过程中会与其他泡沫发生黏附、脱落等动作,而水膜、脉石颗粒随着泡沫骨架流回到浮选机的矿中。因此实际上泡沫层里面的浮选泡沫大小结构的整体分布是浮选生产性能的关键,直接决定了矿物粒子与气泡碰撞、粒子发生脱落、被黏附的概率,从而最终关系到精矿产品的品位。

由于所搭建的泡沫图像监控系统只能拍摄到泡沫上表面,因此实际的工业浮选监控系统只能获得泡沫层最上表面气泡薄膜大小和形状的特征。但是,由图 1-3 所示的浮选泡沫层的结构示意图可知,表面泡沫大小、分布和形状和底层泡沫大小、分布和形状是不一样的。Wang^[16]通过对泡沫层结构进行仿真实验,结果表明,泡沫层表面气泡的大小分布与泡沫底

层的气泡大小分布有着极大不同,即使具有相同表面气泡大小分布,泡沫层内部的气泡大小分布可能截然不同。随后,为了进一步探讨浮选泡沫层表面气泡薄膜的分布与内部泡沫大小分布的关系,Wang^[17]通过模拟泡沫层的结构,在各种多聚分散度(poly-dispersities)实验中,发现泡沫表面气泡薄膜大小与内部气泡大小的比值与内部气泡大小的分布是独立的,进而可以通过表面气泡薄膜的大小分布来推测内部气泡大小的分布。因此,从他们的研究可以发现,其实通过直接观察泡沫上表面水膜的尺寸分布,就可以进一步推测出内部气泡大小的分布特点。因此,本专著以后所提到的泡沫大小(分布)实际上就是泡沫层表面薄膜的大小(分布)。

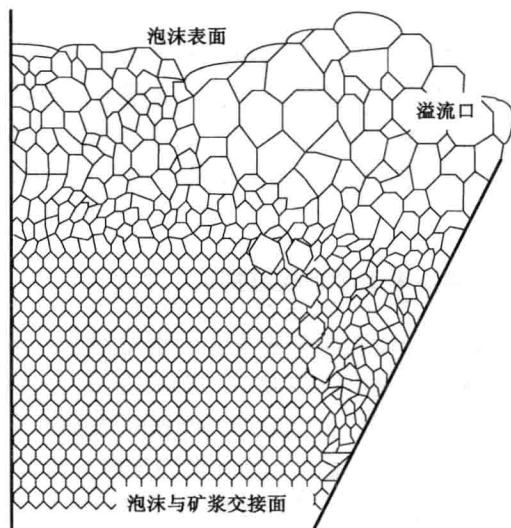


图1-3 浮选泡沫大小结构示意图

对泡沫层泡沫大小进行测量,目前研究者已经提出多种测量方法。主要分为两种,基于光学的和非光学的方法。对于非光学的方法,一般是直接测量泡沫层内部气泡尺寸大小的分布包括NMR和X-ray断层扫描^[18],这两种扫描方法均需要专门的仪器,基本只适合实验室研究,难以满足工业应用的需求。光学方法包括激光共聚焦显微镜(confocal microscopy)和光学层析成像(optical tomography)^[19],这些方法能较好地测量泡沫层内部气泡的结构和尺寸分布。但是这些方法基本只能适用于透明的二相泡沫,且计算复杂度高,也无法工业应用。

Wang^[17]等人经研究证明,可以通过浮选泡沫表面气泡的大小分布来预测内部气泡的大小分布。因此,基于机器视觉的浮选泡沫大小与分布测量是一种非常有效的方法。在基于机器视觉的浮选泡沫大小分布测量中,需要在对泡沫图像准确分割的基础上获得。在对泡沫图像准确分割后,统计出拍摄视野中的各独立气泡的大小和形状,进而对泡沫形状和尺寸分布进行估计。由于泡沫图像中各浮选气泡边缘比较微弱,缺乏有效对比度,常用的基于梯度的图像分割方法难以在泡沫图像分割中应用。目前被证明有效的泡沫图像分割方法主要有分水岭分割算法和基于谷底边缘的分割算法,以及对这两种方法进行改进的一些方法。文献[20]提出了一种基于分水岭分割的泡沫图像分割算法,该方法在进行泡沫图像分割之前,先进行图像灰度重构,然后检测出区域极大值作为分水岭分割的种子点,通过将浮选气泡等同为椭球体计算了浮选泡沫的等效直径分布和形态分布。Symonds^[21]采用形态学图像处理进行了泡沫图像分割以获得泡沫图像中的气泡大致分布。Wang^[22]提出了一种基于图像谷底边缘检测与跟踪的泡沫图像分割算法,该方法根据气泡的特点将图像进行自动分类,针对不同类别的泡沫图像选用相应的泡沫图像分割算法。杨尽英^[23]根据泡沫图像大小形状灰度分布不均的问题,提出一种基于聚类预分割和高低精度距离重构的泡沫图像分割方法,取得了较好的分割效果。Yang^[24]提出了一种改进的谷底边缘检测方法来提取泡沫图像的结构,减少表面虚假白点对泡沫图像分割的影响,再通过对边缘细化和滤波获得更准确的气泡边界。Lin^[25]采用泡沫图像纹理谱来估计浮选气泡的大小,该方法难以准确获得泡沫大小与分布,只能对泡

沫的大小进行大致的估计。张国英等^[26]结合区域生长和边界检测技术,提出了一种基于种子区域边界生长的泡沫图像分割方法。

上述研究表明虽然目前已经有很多研究者对泡沫图像分割进行了研究,但是目前所提出的这些算法主要对包含小气泡泡沫图像或者气泡大小分布较均匀的泡沫图像能获得较好结果,而对大的浮选气泡或者泡沫表面气泡大小分布极度不均的泡沫图像难以获得准确的分割结果^[27, 28]。

1.2.3 泡沫表面纹理特征提取

纹理是物体表面非常重要的视觉线索,同时也是图像中普遍存在但是却难以描述的特征。泡沫图像是由许多大小、形状不一的小泡组成,随着浮选工况的变化,浮选泡沫表现出独特的随机纹理状态。特别当浮选泡沫表面承载率高、泡沫多处重叠或者人眼都分辨不出独立气泡时,就难以通过对泡沫图像准确分割处理以获得气泡的形态、尺寸特征,这时往往通过考虑泡沫表面的纹理特征来进行浮选工况判决。泡沫图像表面纹理特征主要用来表征浮选泡沫表面的均匀与光滑程度,与泡沫层表面的带矿水平和泡沫黏性水平密切相关^[29]。

目前国内外对泡沫图像的纹理特征研究得较多的是直接计算基于泡沫图像的像素空间灰度分布的二阶统计参量,比如通过计算泡沫图像相应的空间灰度依赖矩阵(SGLDM)、邻域灰度依赖矩阵(NGLDM)和灰度共生矩阵(GLCM),在这几个空间灰度矩阵的基础上计算出一些图像统计量,包括能量、熵、惯性矩、局部同构性、细度、粗度、二阶矩、不均匀性等。由邻域灰度相关矩阵计算所得的纹理参数与泡沫的黏性、尺寸、稳定性和流动性等有关,也就是与浮选生产的工况状态是密切相关的。一些实验表明,通过纹理参数对浮选泡沫生产状态分类可以达到较高精度。Moolman^[30]在提取泡沫图像的SGLDM、NGLDM的基础上提取了基于这些矩阵的熵、能量及惯性矩等统计量作为浮选泡沫的表面纹理特征,然后进行了浮选泡沫状态的分类研究。Bartolacci^[31]总结了常用的泡沫图像纹理特征提取方法,分别给出了基于小波变换(WTA)、GLCM和多变量图像分析(MIA)的泡沫图像纹理特征分析结果,并建立了泡沫图像特征与生产指标的多变量回归模型(MIR)。国内,中国矿业大学的刘文礼、路迈西等^[32-34]通过大量煤浮选分批实验,探讨了采用SGLDM和NGLDM获取煤浮选泡沫的纹理特征参量,利用自组织神经网络对煤泥泡沫状态进行识别研究。刘文礼等人研究发现^[32],基于SGLDM提取的参数在煤浮选过程中具有明确的物理意义,能量、熵、惯性矩较好地代表了泡沫图像纹理的变化情况,是描述煤泥浮选泡沫特征的有效参数,而基于NGLDM的细度和粗度能很好地反映出浮选泡沫特征,而熵、二阶矩和不均匀性三个参数与泡沫特性变化的相关性不强。程翠兰^[35]根据人类视觉的图像表面感知特点,定义了一种基于非线性隶属度函数的泡沫图像模糊纹理特征提取与表征方法,提出一种泡沫表面纹理复杂度的测量方法,通过分析稳定工况条件下的泡沫表面纹理复杂度特征与生产指标的关系,获得了稳定工况下的泡沫表面纹理复杂度的理论区间。郝远红等^[36]利用正交局部保持投影对泡沫图像纹理特征参数进行变换,并利用支持向量机的方法进行泡沫图像聚类与识别分析,获得了较好的分类识别效果。何桂春^[37, 38]等分析了基于泡沫图像灰度直方图统计的泡沫图像纹理特征参量,在实验室利用径向基神经网络建立了黄铜浮选指标与所提取的纹理特征参数的关系模型。李庆利^[39]等探讨了灰色系统理论在煤泥图像处理中的应用。北京矿冶研究院^[40, 41]在大山选矿厂

搭建了 BFIPS-I 型浮选泡沫图像处理系统,实现了浮选泡沫表面物理参数的快速提取,并建立了基于泡沫视觉特征的浮选精矿品位预测模型。刘金平等^[29]提出了一种基于 Gabor 小波变换的浮选泡沫图像纹理特征提取方法,通过建立泡沫图像 Gabor 纹理幅度谱(GARR)和相位谱(GPRR)的统计分布模型,获取了基于 GARR 和 GPRR 统计分布形状的特征参量,并利用所提取的泡沫纹理特征进行了浮选生产工况状态的分类与识别实验,获得了较好的分类效果。唐朝晖等^[42]根据泡沫图像序列测量了泡沫流动速度,并分析了泡沫流速与浮选性能间的关系,同时结合小波变换,定量分析了泡沫表面纹理均匀度,获得了精选泡沫的最佳纹理区间^[43]。王红平等^[44]针对邻域灰度相关矩阵和空间灰度相关矩阵在泡沫分类性能方面不太理想的原因,采用主成分分析法对特征参数进行变换处理,实验表明通过该方法处理能提高泡沫状态的分类性能。云南冶金集团有限公司技术中心通过采用图像处理自动获取泡沫图像特征,进而来判断药剂添加量的健康程度^[45]。为了提高基于泡沫图像表面纹理特征的浮选生产状态的识别性能,王介生^[46]采用多级支持向量机(MLSVM)进行训练与识别实验,并对 MLSVM 模型的核函数参数采用改进惯性权重的粒子群算法进行优化。阳春华等^[47]针对浮选过程泡沫纹理特征间信度差异和类间样本分布不均的问题,引入信息熵的概念,以二阶统计量的信息增益分配各种纹理特征对分类器的信度,并通过类间样本数加权以消除样本分布的不平衡性,最后实现一对一加权支持向量机的浮选工况识别。

上述研究表明,泡沫表面纹理是可以作为有效的浮选生产工况的评价指标。但是,上述方法都只考虑了原始图像像素间的统计关系,这些方法与人类视觉脱节,难以进行更精确的纹理描述^[48]。泡沫纹理表现出来的微观异构性、复杂性以及其概念的不明确性给纹理提取带来巨大挑战,采用简单的统计方法对泡沫进行浮选状态鉴别还存在一定困难。由于泡沫表面堆积了各种大小的矿化气泡,浮选泡沫往往呈现出多尺度特性,为了能对浮选状态进行分类与识别,需从多尺度方向对泡沫纹理进行分析,以进一步实现浮选生产工况的自动分类与识别。

1.2.4 泡沫动态特征提取

动态特征主要用来描述泡沫在浮选机中运动的特征行为,主要包括泡沫流速以及泡沫稳定度(主要用来描述气泡的坍塌、破碎程度等,或者用于描述泡沫表面的一些变化程度)。泡沫的动态特征参数是反映浮选效率与性能的重要因素,如泡沫稳定性影响了矿物有效分选,泡沫流速极大地影响了浮选生产的效率与有用矿物的回收水平。在基于机器视觉的浮选过程监控中,大多数研究者是通过将提取的速度特征与其他泡沫表面特征相结合,进而来对选矿状态进行预测。Kaartinen^[49], Supomo^[50], Moolman^[4]等都进行了浮选泡沫动态特征的研究。

1. 泡沫流速

在浮选泡沫流速测量中,大多数的研究者通过将图像划分成不重叠的多个小子块,分别分析各子块的运动特性估计整个泡沫的流动特征。Kaartine^[49]等根据子块互相关性计算了泡沫位移,再利用泡沫子块的速度信息来检测相邻图像对的像素变化,以此来提取泡沫的稳定度特征,但该方法在图像分辨率高时计算量大,影响系统实时性。Holtham^[51]采用像素跟踪技术提取泡沫速度特征,但其假设的前提是泡沫形变和光照不发生变化,该方法在实际应用