## 矿产保护与利用

#### CONSERVATION AND UTILIZATION OF MINERAL RESOURCES

#### 综合评述

# 浮选动力学模型的应用与发展

### 白丽梅<sup>1,2</sup>,刘忠义<sup>2</sup>,韩跃新<sup>1</sup>,刘杰<sup>1</sup>,马玉新<sup>2</sup>

(1. 东北大学,沈阳 110004;2. 华北理工大学,唐山 063009)

**摘 要:**随着选矿自动化程度的提高,为了能更好地描述和模拟矿物的浮选过程,浮选动力学的研究备受选 矿工作者的关注。从浮选动力学数学模型的基础入手,简述了浮选动力学模型研究的发展和主要应用的动 力学模型;并通过介绍颗粒形貌、颗粒粒度、浮选药剂等对浮选过程及浮选动力学模型和参数的影响,进而阐 述浮选动力学在浮选过程中的应用;最后介绍浮选设备结构和性能对浮选动力学的影响,及动力学研究在浮 选工艺优化和设备优化中的作用。

关键词:浮选动力学;浮选;速率

中图分类号:TD91 文献标志码:A 文章编号:1001-0076(2016)04-0056-08 DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2016.04.012

### **Application and Development of Flotation Kinetics Model**

BAI limei<sup>1,2</sup>, LIU Zhongyi<sup>2</sup>, HAN Yuexin<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>, MA YUxin<sup>2</sup>

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 2. North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China)

**Abstract**: With the improvement of automation degree in mineral processing , the flotation kinetics have been studied by many researchers to describe and simulate the process of flotation preferably . Based on the mathematical model of flotation kinetics , the development of flotation kinetics model and the main application were outlined. The influence of particle morphology , particle size and flotation agents on flotation process and flotation kinetics model were summarized . Then the application of flotation kinetics model in process of flotation was illustrated . In the end, the impact of structure and performance of flotation equipment on flotation kinetics , and the guiding effect of kinetics on optimization of flotation technology and equipment were also presented .

Key words: flotation kinetics; flotation; rate

浮选研究中无论是表面化学还是电化学,都是 以热力学研究作为基础,得到的结果大多是某种反 应发生的趋势,并不能说明反应是否真正能够进行 也不能精确地判断浮选过程中的主要影响因素。为 了了解反应发生的过程以及反应的快慢,许多学者 进行了动力学研究。浮选动力学是动力学研究的一 种,是指矿粒与气泡之间的作用及疏水矿粒在气 – 液界面的富集及运载过程。浮选动力学主要包含四 个方面的内容,即:气泡与微粒的碰撞概率、浮选速 度常数的物理意义、润湿性的差异对矿物浮选分离 的影响、疏水矿粒在液 – 液或气 – 液界面的有效富 集实现矿物颗粒之间的分离。通过研究各种影响因

基金项目:国家自然基金(51204035)

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-03-19

作者简介:白丽梅(1979-),女,博士研究生,副教授,主要从事复杂矿产资源选矿技术方面的教学科研工作。 通讯作者:韩跃新(1961-),男,院长,教授,博士研究生导师。主要从事复杂难选矿工艺和理论的研究工作。

素支配下浮选过程随时间的变化规律,揭示浮选过 程的实质和对过程进行科学管理<sup>[1]</sup>。研究浮选动 力学及其数学模型不仅可以改进和优化浮选工艺、 提高浮选效率,同时对于浮选设备的研发和优化也 具有重要意义<sup>[2]</sup>。

### 1 浮选动力学模型基础

根据不同的研究方法浮选过程模型主要分为经 验模型、总体平衡模型、动力学模型、概率模型四种, 其中动力学数学模型是在浮选动力学理论基础上建 立起来的<sup>[3]</sup>。浮选动力学数学模型最早由 H. Garcia Zuniga 和 K. Φ. Белоглазов 从化学反应动力学 中借用来的,把矿粒与气泡的相互作用等同于化学 反应过程中的分子、原子或离子等粒子间的相互作 用。认为浮选过程动力学与一级化学反应动力学相 似,即:

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c^n \tag{1}$$

式中: *c* 为浮选槽内目的矿物的浓度, *t* 为浮选时间, *k* 为浮选速度常数, *n* 为反应阶数。当*n* = 1 时, 方程 式的物理意义是浮选速度正比于槽内目的矿物的浓 度<sup>[4]</sup>。

### 2 浮选动力学模型的发展

当方程(1)中的 n 为1,并用矿物回收率来替代 矿物的浓度,则得出浮选一级动力学模型, $\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \times$  $(1 - e^{-kt})$ 。在浮选实验研究发现浮选过程与化学 反应过程不同,很多时候对实验结果按照  $\log \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_x - \varepsilon}$ -t作图,不符合一级动力学模型,故提出n级动力 学模型。当n为1、2以外的非整数阶时,由于受科 学和计算条件的限制,一般用作图法进行求解,致使 n级数模型仍是经验性的。但随着分数阶微积分的 发展,L. Vinnett 等<sup>[11]</sup>提出了间断浮选动力学模型 的分数阶微积分计算方法,把 Mittag - leffler 函数  $E_a(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\Gamma(a \cdot i + 1)}$ 与变形后的 kazem 函数  $R(t) = R_{\infty} \cdot [1 - E_a(1 - k_a \cdot t^a)]$ 相结合,求解出 反应阶数 a 和相应的动力学常数  $k_a$ 。通过对 Chilean 矿体不同地点的斑岩型铜钼矿进行分数阶动力学实 验研究,求得其动力学阶数是从 0.6 到 0.95 小于 1 的非整数。浮选分数阶速率常数的研究,将为浮选 动力学的深入研究提供一个新思路。

由于浮选动力学阶数主要通过作图法求解,因 此浮选动力学的研究主要集中在浮选速率常数 上<sup>[5]</sup>。近年来,随着浮选动力学研究的不断深入, 诸多学者已将动力学模型运用到浮选当中,并提出 了自己的模型,如经典一级模型、一级矩形分布模 型、二级动力学模型、二级矩形分布模型等<sup>[6-7]</sup>、哥 利科夫模型、陈子鸣模型<sup>[5]</sup>、刘逸超模型<sup>[8]</sup>、许长连 模型<sup>[9]</sup>以及三重逼近模型<sup>[10]</sup>,其中应用最广的是经 典一级动力学模型,国内外诸多学者认速率常数应 该是随时间的变化而变化。因此基于经典一级动力 学理论,根据矿石自身性质对浮选动力学模型进行 适当的延伸和修正,使之达到最优的效果。

#### 2.1 以一级模型为基础延伸的动力学模型

一级动力学模型是目前应用最广的浮选动力学 模型,但是在试验研究中发现,由于矿粒的不均匀 性,其拟合结果与实验数据往往有偏差。为此,在一 级动力学模型的基础上进行了不同的修正。金会心 等<sup>[12]</sup>研究织金新华含稀土磷矿浮选动力学时,在典 型的一级浮选动力学理论模型的基础上引入时间滞 后因子  $\theta$ ,推出了磷矿反浮选速率模型  $\varepsilon = \varepsilon_{\infty}$  +  $(100 - \varepsilon_{\infty}) e^{-k(t+\theta)}$ 。为了更直观的表述各因素对 浮选过程的影响,动力学正交实验数据以三维图像 和等高线图进行了展示。正交实验结果表明.修正 后的动力学模型可以很好的描述含稀土磷矿物Σ REO 和脉石矿物 MgO 回收率随时间变化的规律。 ∑REO 和 MgO 浮选动力学行为和分选效果可以通 过修正速率常数  $k_{md}$  和选择性指数 SI 来表示。安 茂燕等[13]采用煤质分析和筛分试验方法对低阶煤 难浮选问题进行了研究,并在一级动力学速率模型 和一级矩形分布速率模型的基础上进行浮选速率模 型曲线拟合,得到了与试验结果拟合度最高的低阶 煤浮选速率模型。

在实际浮选中,不同的矿粒具有不同的浮选行为,因此在经典一级动力学模型的基础上发展了分 布式动力学模型 (Distributed flotation kinetics models)<sup>[14]</sup>:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{l} m_{ij} R_{\infty ij} [1 - \exp(-k_{ij}t]]$$
(2)

式中: $m_{ij}$ 是j成分i粒级颗粒的质量百分比, $k_{ij}$ 和  $R_{*ij}$ 分别是j成分i粒级颗粒对应的浮选速率常数 和最终回收率,n是颗粒粒级个数,i是成分个数。 Ofori Phili 等<sup>[15]</sup>为了研究不同粒级不同性质煤的浮选动力学特性,通过对不同粒度不同性质的煤进行了浮选实验,并用不同的浮选动力学模型对浮选实验结果进行拟合,发现不同粒级不同性质煤的浮选过程均符合分布式动力学模型,在分布式浮选动力学模型中通过接触角测定可以预测不同粒度组成物料的浮选速率常数,也可得到不同粒级颗粒的可浮性分布。李俊旺等<sup>[16-17]</sup>为了获得会泽铅锌硫化矿的浮选动力学模型,以一级动力学模型为基础,结合会泽铅锌硫化矿异步浮选的技术特点,把槽内物料分为快浮物和慢浮物(也就是分布式动力学模型中的成分按浮选性能分为快和慢两种),引入了快 – 慢分速浮选动力学模型(即 keslsll 模型):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \left[ \varepsilon_{fmax} exp^{(-k_f t)} + (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{fmax}) exp^{(-k_s t)} \right] (3)$$

式中: ε 为浮选回收率, ε<sub>max</sub>为最大回收率, ε<sub>fmax</sub>为快 浮最大回收率, k<sub>f</sub> 为快浮浮选速度常数, k<sub>s</sub> 为慢浮浮 选速度常数,并分别采用经典一级动力学模型、二级 动力学模型对试验结果进行了拟合,通过对三种模 型的拟合结果进行对比发现,分速浮选模型与实验 数据的拟合度最好。通过人工智能技术对硫化矿浮 选过程进行了模拟研究, 在此基础上设计的研究平 台和模拟平台实现了人机信息的友好交流。

Asghar Azizi 等<sup>[18]</sup>以斑铜矿作为研究对象,利 用四个常规模型:一级动力学模型、可浮性矩形分布 模型、快-慢分速浮选动力学模型以及完全混合式 反応器模型(Fully Mixed Reactor 模型)对实验数据 进行了拟合,探讨 pH 值、固体浓度、水质、捕收剂用 量等对浮选速率常数和最终回收率的影响,并选择 了最佳的动力学模型。结果表明,Fully Mixed Reactor 模型和 Keslsll 模型分别给出了最好的和最合适 的拟合实验数据。因此在一级动力学模型的基础上 发展的分布式动力学模型更符合实际的浮选动力学 过程,进一步证明了很多时候矿粒在浮选槽内的分 布是不均匀的,从原始的动力学公式(1)中求解的 反应阶数 n 是不等于1 的非整数。由于受分数阶方 程求解的限制,从分析浮选过程入手来研究浮选速 率常数和浮选动力学模型,把概率模型学引入浮选 动力学模型中。

#### 2.2 引入碰撞概率的动力学模型

分布式动力学模型虽然对欲浮组分可浮性的不 均一性做了成功的描述,但是这种不均一性也只是 整个浮选过程不均一性中的一个方面。在实际浮选 过程中,矿浆和泡沫层应为两个不同的相。于是 1976年哈瑞斯等提出了两项浮选动力学模型,后续 在两项动力学模型的基础上提出了三相模型或多项 模型。O. N. Savassi<sup>[19]</sup>在建立浮选速率模型中考 虑真正浮选和夹带浮选两方面的影响因素,把浮选 槽分为矿浆捕收区、矿浆静止区和泡沫区,提出了间 隔模型(Compartment Model):

$$R = \frac{k_{cz} \bullet \tau_{cz} \bullet R_f \bullet (1 - R_w) + ENT \bullet R_w}{(1 + k_{cz} \bullet \tau_{cz} \bullet R_f) \bullet (1 - R_w) + ENT \bullet R_w}$$
(4)

k<sub>a</sub>为浮选速率;τ<sub>a</sub>为在捕收区的停留时间;R<sub>f</sub>为接 触颗粒的泡沫回收率;R<sub>a</sub>为进入精矿中水的回收 率,ENT为进入度。Nilce Alves dos Santos 等<sup>[20]</sup>在 间隔模型的基础上,又引入 Yianatos and Contreras 模型,通过对不同模型的评估和整合,结合每个模型 的优点和局限性,把其它模型引入间隔模型中,并使 用改进后的间隔模型对铜矿石浮选厂的浮选泡沫进 行研究,通过对水的回收率和夹带因子等实验数据 的研究,形成一个综合的基础模型。

S.Kouachi 等<sup>[21]</sup>为了考察 Yoon-Luttrell 碰撞 附着浮选模型在常规动力学模型中的性能,从理论 上用 Yoon - Luttrell 模型说明流体条件、气泡粒度和 速度、颗粒表面疏水性等对气泡与颗粒的粘附和碰 撞效率的影响。以石英和黄铜矿为例,把 DUkhin 碰撞模型的最大接触角引入到 Yoon - Luttrell 模型 中的碰撞效率里,分析了颗粒密度对碰撞行为的影 响规律。然后利用 Yoon - Luttrell 模型、Dobby -Finch 接触模型和 GSE 碰撞模型计算出的浮选速率 常数进行对比研究,发现浮选速率常数与气泡的大 小和分布有关。

### 3 浮选动力学的影响因素与应用

浮选过程是一个相当复杂的物理化学过程,其 中主要包括矿粒悬浮与气泡碰撞和附着的过程;泡 沫与矿浆之间进行物质交换和分配的过程;矿粒在 气泡表面附着、滑动及脱落的过程;矿化泡沫上浮到 表面成为精矿排出的过程<sup>[22]</sup>。影响浮选行为的因 素有很多种,包括矿物种类、矿物粒度等矿物本身的 特性,以及浮选药剂环境、浮选温度、浮选设备及其 工作性能等,在浮选动力学模型中,这些因素同样对 浮选速率常数 k 也有影响<sup>[23]</sup>。因此为了探索这个 复杂的浮选过程,研究学者利用浮选动力学模型中

#### 3.1 矿物颗粒粒度与形状的影响及应用

由于矿物颗粒在浮选槽中的分布是不均匀的, 因此不同形状及粒度的颗粒在湍流中与药剂的粘附 效率和粘附时间不同,并且不同粒度颗粒之间的相 互剪切都会影响浮选动力学的参数。曾克文 等<sup>[24-25]</sup>引入碰撞概率公式、粘附概率公式、脱附概 率公式对矿粒与气泡的碰撞、粘附和脱落的影响因 素及规律进行了理论研究,分析矿浆紊流强度、粒度 对浮选动力学及可浮性的影响规律,进一步通过实 验研究分析紊流强度对萤石浮选速率的影响,探索 紊流强度与脱附概率、捕收概率的关系,为萤石的浮 选提供了较好的紊流强度。

为了更直观考察矿物表面形貌特征对浮选动力 学的影响, Behzad Vaziri Hassas 等<sup>[26]</sup> 借助酸蚀后 -150+106 µm 的玻璃珠,研究表面粗糙度和形状 对浮选过程中动力学参数的影响。利用原子力显微 镜进行球形颗粒表面粗糙度测量和修正,利用数字 图像分析仪对形状因子进行测定。研究发现,颗粒 表面特征的变化对浮选回收率、接触角和气泡颗粒 附着等参数变化有一定的影响,即:随着表面粗糙度 的增加,接触角、气泡附着效率和浮选回收率均有所 提高:并从实验结果分析得知,颗粒边缘的棱角可以 促进颗粒与气泡的第一次碰撞过程中水化膜的破 裂,因此形状因子在浮选和气泡附着过程中占主导 地位,也就是磨过的颗粒更容易有效回收。David I. Verrelli 等<sup>[27]</sup>以玻璃球和有棱角的玻璃颗粒为研究 对象,通过测定两种形状颗粒与气泡附着时所需时 间,分析颗粒形状与可浮性之间的内在联系。研究 过程中使用毫秒定时器装置直接观察颗粒 - 气泡相 互作用和连接的过程,并且通过高速视频记录,放大 观察,从而测量颗粒与气泡附着的诱导时间。颗粒 与气泡的碰撞过程原理图如图1所示,实验装置简 图如图 2 所示, David I. Verrelli 也认为颗粒越有棱 角浮选速率越快,有棱角的颗粒在高速靠近气泡时, 会接近泡沫的顶点,缩短诱导期。因此可知,在研磨 过程中,除了注意颗粒的粒度,还应注意研磨所获得 颗粒的形状。

为了研究实际矿石形貌对浮选动力学的影响, T.G. Vizcarra 等<sup>[28]</sup>将75~150 μm 粒级的黄铜矿 在微泡浮选机中进行浮选动力实验,使用 MLA 测定 其浮选精矿的形状特征。研究发现,不规则颗粒比 圆形颗粒更容易富集(有些学者认为是颗粒的棱角 等形状特征使得气泡周围的水膜变薄、破裂),同时 光电子能谱(XPS)和飞行时间二次离子质谱(TOF -SIMS)也证实了不规则颗粒有其更容易浮选的表 面化学性质(如较高的疏水性硫化物表面覆盖率), 对浮选动力学有更大的影响。通过有无捕收剂的对 比实验发现,颗粒形状特征只对那些低可浮性矿物 的动力学有显著影响,也就是对那些低浮选性能的 脉石矿物有较大影响;而当矿物颗粒可浮性高的时 候,形状特征的影响就不明显了。



由于矿石粒度在实际浮选中容易控制,因而粒 度对浮选动力学的影响研究比较多<sup>[7,29-30]</sup>。为了 研究煤泥粒度对其浮选动力学的影响,罗成等<sup>[31]</sup>对 -0.074、0.074~0.125、0.125~0.25、0.25~0.5 mm 粒级的煤泥进行浮选动力学研究,以一级动力 学模型为基础,对煤泥浮选动力学的关键参数进行 了研究,认为窄粒级煤泥的浮选动力学级数更符合 一级动力学;窄粒级煤泥的浮选速率常数 K 是时间 随着动力学研究的深入,动力学在浮选工艺改造中的重要性也不断增加<sup>[32]</sup>。曹钊等<sup>[33]</sup>针对洗煤 厂浮选入料高灰细泥含量大、浮精灰分高、尾矿灰分 低的实际问题,通过浮选动力学理论探究最佳浮选 入料粒度组成。以一级浮选动力学公式为依据,研 究煤泥在不同粒度组成(包括不同混合粒级和不同 单粒级)时的浮选效率,分析不同时刻浮选精煤的 理化特性。研究表明,由一级浮选动力学公式计算 浮选精矿产率值的拟合曲线的拟合优度值可达到 0.9 左右。当最终精煤灰分要求为≤10.5%时,煤 泥粒度组成约为 – 0.355 mm 的混合粒级时,煤泥浮 选动力学常数 k 值及相应浮选效率 C 值可达到最 大,进而可确定当煤泥粒度组成为 – 0.355 mm 时, 为最佳浮选入料粒度条件。

何丽萍[34]研究粒度对黄铜矿、方铅矿、闪锌矿 浮选动力学的影响,发现矿物在粒度为-0.074+ 0.054 mm 时,浮选速率常数达到最大值,其他颗粒 粒级速率常数略有降低:对于粒度过粗的闪锌矿,浮 选速率常数呈现明显的下降趋势。但是.在最佳浮 选条件下,模型拟合后单矿物浮选速率常数最大的 是黄铜矿,最小的是闪锌矿。Haijun Zhang 等<sup>[30]</sup>探 讨了在氯化钠存在下褐煤颗粒大小对反浮选动力学 的影响,氯化钠存在时反浮选试验中所获得的数据 应代入6种浮选动力学模型中,利用1stOpt的统计 分析软件模型拟合,得到最大的浮选回收率、浮选速 率常数和颗粒大小之间的关系。廖亚兵等<sup>[35]</sup>考察 了萤石粒度对浮选动力学的影响。结果显示,随着 萤石粒度的减小,浮选速率常数 k 值逐渐升高,但萤 石回收率ε逐渐降低,当萤石粒度小于0.01 mm 时, 萤石浮选效果很差,认为在磨矿过程中在保证单体 解离度的同时,应尽量避免过磨和泥化现象。

#### 3.2 浮选药剂的影响与应用

浮选除了考虑矿物本身性质对浮选的影响,更 主要的工作是研究浮选溶液环境对矿物浮选分离的 影响,实现矿物的差异化浮选,故研究浮选药剂对各 矿物可浮性和浮选速率的差异性是浮选研究的热点 和重点。Ramanathan Natarajan 等<sup>[36]</sup>研究不同取代 基的 N – 芳香异羟肟酸酸捕收剂对加拿大铜 – 镍矿 石浮选实验研究,研究发现 N – phenylacetyl – N – (2,6 – 二甲基苯基)羟胺(PANXHA)相对于钾戊黄 药(PAX)有较高的一级镍黄铁矿的浮选动力学速 率常数,同时 PANXHA 也具有最高的镍黄铁矿选择 性指数,选择了浮选速率和选择性指数均好的捕收 剂。崔伟勇等<sup>[37]</sup>研究了捕收剂 GJBW 质量浓度和 矿物粒度对胶磷矿物浮选动力学的影响,研究发现 捕收剂在一定浓度范围内,随着 GJBW 质量浓度的 增加,各粒级的极限回收率和浮选速率 k 值均不断 增大。捕收剂 GJBW 在相同质量浓度条件下,微细 颗粒比粗颗粒极限浮选回收率大,但粗颗粒的浮选 速率常数 k 值比较大。

于洋等<sup>[38]</sup>为了实现湖南柿竹园白钨矿、黑钨矿 及萤石的异步浮选技术,研究了活化剂柠檬酸对粒 度范围为 – 74 + 38 μm 三种矿物浮选动力学的影 响.研究发现速率常数 k 值在浮选过程中是不断变 化的, 萤石加入活化剂柠檬酸后 k 值变化很小, 基本 上不具有可浮性,添加适量的柠檬酸可显著扩大三 者可浮性以及浮游速率之间的差异,为三种矿物的 异步浮选技术、矿物的个性化、差异性浮选提供了理 论依据。张晋霞等<sup>[39]</sup>以邢台地区蓝晶石矿为例,考 察了捕收剂十二胺和抑制剂淀粉对蓝晶石、石英及 黑云母三种矿物浮游特性及其动力学特性的影响. 发现在浮选过程中浮选速率常数是变化的,淀粉的 加入可以使矿物之间的可浮性呈现显著的差异。缪 亚兵等[35]研究了油酸钠和水玻璃用量对萤石矿浮 选动力学的影响,发现随着油酸钠用量的增加,浮选 速率常数逐渐增大,有利于浮选的进行,水玻璃对浮 选的速率常数的影响较小。

岳涛<sup>[40]</sup>为了解决细粒黑钨矿与脉石浮选分离 难的问题,研究了矿浆 pH 值对黑钨矿、萤石、方解 石及石英单矿物的浮游性和浮选动力学的影响,并 对浮选过程中的黑钨矿进行了分流分速处理,通过 异步浮选不仅获得更高品位的钨精矿,而且对于细 粒黑钨矿的回收也有一定的效果。王虎<sup>[41]</sup>针对南 京栖霞山铅锌矿进行浮选试验,分别研究了矿浆 pH 值、捕收剂用量、矿浆浓度对方铅矿、闪锌矿单矿物 浮选速率常数 k 的影响,结果表明:在碱性条件下, 随着矿浆 pH 值的增大,两种矿物的浮选速率常数 均逐渐减小,可浮性变差;随着捕收剂用量、矿浆浓 度的增大,两种矿物的浮选速率常数均逐渐增大,矿 物的可浮性变好。因此,通过研究捕收剂、抑制剂、 活化剂、pH 值调整剂等浮选药剂对各矿物浮选速率 的影响,可实现矿物的差异化浮选。

### 3.3 浮选设备结构和性能的影响与应用

浮选动力学模型的研究是浮选模型研究的一个 基础,因此浮选动力学研究在改善浮选工艺流程和 优化浮选设备等方面有着不可取代的意义。浮选槽 是浮选作业的主要场所,搅拌装置是浮选作业的动 力来源,两者的有机构成为矿物颗粒的有效分选提 供了条件<sup>[42]</sup>。但由于浮选槽结构、搅拌强度及充气 效果等因素均会影响颗粒悬浮效果以及颗粒与气泡 的碰撞过程,因此对矿物的回收有着重大的影 响<sup>[23]</sup>。

对于柱式浮选,王黎伟<sup>[43]</sup>利用磷矿进行了充填 式浮洗柱的动力学研究,绘制出不同通气速率条件 下随时间变化的浮选过程曲线:通过动力学模型分 析,发现随着浮选过程的进行,浮选速率逐渐降低, 并将气含率与浮选动力学常数进行了关联,得到浮 选动力学常数与气含率的具体表达式,提高了柱式 浮洗动力学模型的实用性。结合浮洗动力学数据分 析,在原实验工艺基础上,增加尾矿回流系统可提高 浮选性能,优化了柱式浮选工艺。王大鹏<sup>[44]</sup>也通过 对胶磷矿全粒级浮选动力学特性试验研究,指出了 浮选过程中胶磷矿的可浮性呈"非线性"分布,浮选 过程前期以微细矿粒的浮出为主,后期则以浮洗速 率慢的粗粒级为主。以矿化和物性耦合适配为思路 进行了基于可浮性特征的矿化方式研究,推导了矿 化和物性的耦合方程式,公式表明,随着浮选过程的 持续,要保持有用矿物的高效回收需建立 Re 逐步 增加的浮选过程。以此为研究思路,旋流 - 静态微 泡浮选柱将高效充填柱浮选、旋流分选和管段高紊 流矿化集于一体,构建了矿浆紊流度逐步提高的分 洗环境。

为了改进和优化浮选机结构,兰州理工大学韩 伟<sup>[45]</sup>通过对 JFC - 150 浮选机内多相流动特性及浮 选动力学的研究,考察了叶轮转速对浮选机内矿物 与气泡的扩散、充气水平、气泡矿化、矿浆短路、矿浆 在浮选机内停留时间的影响,为 JFC - 150 浮选机提 出了一些改进和优化的原则。陈东等<sup>[46]</sup>从浮选过 程动力学的角度出发,结合浮选槽内不同粒级物料 与气泡之间的作用以及浮选槽内流体的动力学特 性,考察了浮选过程中浮选物料对充气搅拌式浮选 机的影响,为大型浮选机提供了设计原则。A• 维 别尔等<sup>[47]</sup>认为浮选槽中矿浆的流动速度、矿浆和 空气的停留时间等因素会影响浮选机的按比例放 大,通过研究不同因素对 WEMCO 浮选机的影响,提 出了浮选机的按比例放大原则。

为了发挥设备性能,沈政昌等<sup>[48]</sup>通过研究充气 量、叶轮转速等条件对不同粒级矿物回收率的影响, 得出当叶轮转速增大时,粗粒矿物受湍流影响增大, 从而附着气泡上的粗颗粒脱落的可能性变大。但是 对于细颗粒,提高叶轮转速会增加其碰撞率,提高了 浮选效率。同时适当提高充气量,也有助于提高粒 级回收率。沈政昌也对160 m<sup>3</sup> 浮选机进行了浮选 动力学研究<sup>[49]</sup>,主要考察了充气量、转速、气泡大小 等参数的影响,分析了充气量与其他因素的关系,最 后确定了最佳叶轮转速,为160 m3 浮选机工业应用 条件的确定提供了依据。廖亚兵等<sup>[35]</sup>考察萤石浮 选中,浮选机转速对萤石浮选动力学的影响,发现随 着浮选机叶轮线速度的提高, 萤石回收率和浮选速 率常数 k 值均逐渐增大。因此,适当加大浮选机的 叶轮线速度有利于萤石的浮选回收。郭柄霖 等<sup>[50-51]</sup>研究了叶轮转速和充气量对小于 1.0 mm 的粗煤泥浮选的影响,发现精煤的浮选产率随着叶 轮转速的提高呈先增加后降低的趋势,因为当叶轮 转速过大时,由于附着药剂的粗粒脱落作用大于颗 粒之间的碰撞作用,使精煤产率呈下降趋势,并且在 叶轮转速一定的条件下,充气量与宽粒级煤泥的产 率存在正相关性。王燕玲<sup>[52]</sup> 通过 0.125~1.0 mm 窄粒级煤泥浮选动力学试验,研究了叶轮转速和充 气量对浮选动力学的影响及对动力学参数的变化规 律。研究表明,对于不同粒度分布的煤在不同叶轮 转速和充气量的条件下,浮选速率常数 k 值的变化 不一样,叶轮转速相对于充气量对 k 值的作用较强。 对于同一粒度级的煤,当充气量保持不变时,浮选精 煤产率随叶轮转速的提高而增加。

Çilek, E C<sup>[53]</sup>以 küre 铜矿不同地区的黄铜矿矿 石为试样品,考察了充气量、泡沫厚度和给矿品位等 浮选操作因素对浮选速率常数及浮选动力学模型中 其它参数的影响,由一级经典动力学模型和统计模 型建立了它们之间的关系表达式,建立的预测模型 的误差小于3.3%,并且通过改变其他操作条件,降 低给矿品位波动对产品指标的影响。

#### 3.4 其他影响因素

除了矿物形貌和粒度、浮选药剂以及浮选设备

的充气性能、搅拌条件等因素影响浮选的动力学外, 停留时间、矿浆浓度等也对浮选动力学有影响。

Gorain 等<sup>[54]</sup>研究了泡沫停留时间和浮选速率 常数间的关系,认为浮选速率常数随泡沫停留时间 的延长呈指数性递减,但是这种指数性关系取决于 浮选槽容积。廖亚兵等[35] 以萤石纯矿物为研究对 象,研究了浮选矿浆浓度对浮选动力学的影响,发现 随着矿浆浓度的升高,萤石的回收率上升,但浮选速 率常数却呈现先升后降的趋势,这说明提高矿浆浓 度有利于萤石的回收,在一定范围内可以提高浮选 速率常数。吕沛超等<sup>[55-56]</sup>以金川镍矿二矿区富矿 矿石为研究对象,研究超声波作用对硫化镍矿浮选 行为的影响。研究表明,浮选速率符合二级矩阵分 布动力学模型,超声波作用能明显提高反应速率常 数.改善粗粒硫化矿物的浮选行为。K. Changunda 等[57]研究了在新型振荡网格浮选槽中能量输入对 石英浮选动力学的影响。在一定功率(0.015~0.60 W)以及不同气泡尺寸(0.13、0.24、0.82 mm)条件 下,对甲基化的石英颗粒(P80=100 µm)进行了浮 选动力学研究,振荡网格浮选槽可产生相对均匀和 各向同性的湍流环境。结果发现,浮选速率常数增 加与试验中所用的所有颗粒大小、气泡大小的功率 强度近似为线性关系;所得到的线性关系,能量输入 影响较小。随着功率的增加,浮选速率常数的增加 主要取决于颗粒大小,而气泡大小影响较小。因此, 可以弱化能量输入和气泡大小对浮选动力学的影 响。保加利亚选矿中心研究所研究了温度对泡沫浮 选动力学影响。在温度为20~40℃情况下,对泡沫 浮选动力学和3相接触角参数进行了研究。上浮物 料包括不同直径的玻璃球(微球体)和石英颗粒。 在温度不同的情况下,确定了平衡3相接触角、十二 烷胺氢氯化物溶液的表面张力以及3相参数的扩 展。实验数据表明,在选别较小颗粒,温度为30~ 40 ℃时,可以增加浮选动力学速率常数。在选别较 大颗粒时也可观察到这种情况。引起浮选动力学速 率常数增加的原因是扩展的3相接触率和送气时间 与温度的相关性。

A. Vidyadhar 等<sup>[58]</sup>探讨了利用泡沫浮选法从电 子废品印刷电路板(印刷电路板)提取金属、去除非 金属成分,研究空气流量、叶轮转速、起泡剂用量、矿 浆浓度对 -1 mm 的废弃印刷电路板的浮选动力学 的影响,并确定了最佳浮选条件,为电子废路板的回 收利用提供了一个有效方案。

### 4 结论

浮选动力学经历近百年历史的发展并且取得了 很大的成就,许多学者从动力学角度出发,研究了浮 选过程中浮选槽内物料在不同流场力中的特性、浮 洗设备性能、化学药剂作用等,得到了内在浮洗动力 参数变化规律,对矿物的有效分选、浮选机性能的优 化等奠定了基础。但是很多研究考察的是单一矿物 的动力学参数,虽然有些理论应用于实际浮选过程 并且在一定的条件下提出了一些研究矿物浮选动力 学特性的模型,但是目前各种模型只是以某些主要 因素对浮选动力学的影响进行了解释和模拟,对于 浮选过程中的各种不均一性的动力参数不能够做出 系统和清晰的体现,对于许多复杂难选矿也不太适 用。因此,对于复杂难选混合矿的动力学研究、计算 机仿真模拟软件的开发成了重大的发展方向,同时 流体力学、数学求解方法和选矿学的有机组合在选 矿实践中发挥最优化的作用具有重大的意义。

#### 参考文献:

- [1] 冯绍灌. 选煤数学模型[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [2] 胡为柏.浮选[M].北京:冶金工业出版社,1989.
- [3] 程宏志, 潘永强. 浮选数学模型的探讨[J]. 选煤技术, 1993 (2): 6-8.
- [4] 卢寿慈,梁幼鸣. 浮选过程动力学模型的发展[J]. 国外金属 矿选矿,1983(9):1-7.
- [5] 陈子鸣,吴多才.浮选动力学研究之一—矿物浮选速度模型
  [J].有色金属(冶炼部分),1978(10):28-33.
- [6] 罗仙平. 浮选动力学研究进展[J]. 金属矿山, 2008, 382(4): 71-75.
- [7] 夏青,岳涛.浮选动力学研究进展[J].有色金属科学与工程, 2012,3(2):46-51.
- [8] 刘逸超. 浮选动力学物理逻辑模型研究[J]. 有色金属(选矿 部分),1981(2):2-4.
- [9] 许长连. 浮选速度方程[J]. 有色金属(选矿部分), 1981(5): 32-37.
- [10] 孙德四,施爱加.灰色预测模型与浮选动力学多重模型[J].
  金属矿山,2002(8):37-39.
- [11] Vinnett L, Alvarez Silva M, Jaques A, et al. Batch flotation kinetics: Fractional calculus approach [J]. Minerals Engineering, 2015, 77: 167-171.
- [12] 金会心,李军旗,吴复忠.织金新华含稀土磷矿浮选动力学及 三维图形表征[J].中国稀土学报,2011(2):239-247.
- [13] 安茂燕, 焦小莉, 周璐, 等. 低阶煤可浮性及浮选速率模型研究[J]. 洁净煤技术, 2012(1): 9-12.
- [14] T. I, T. I. Kinetic consideration of froth flotation [Z]. Cannes, 1963:563-579.
- [15] Ofori P, O Brien G, Hapugoda P, et al. Distributed flotation ki-

netics models – A new implementation approach for coal flotation [J]. Minerals Engineering, 2014, 66–68: 77–83.

- [16] 李俊旺,孙传尧. 基于 EXCEL 和 MATLAB 求解浮选动力学 模型的研究[J]. 矿冶,2011(4): 1-4.
- [17] 李俊旺. 会泽铅锌硫化矿浮选过程分流分速的动力学研究 [D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- [18] Asghar A, Ahmad H, Behnam F. Investigating the first order flotation kinetics models for Sarcheshmeh copper sulfide ore[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(5): 849 – 854.
- [19] Savassi O N. A compartment model for the mass transfer inside a conventional flotation cell [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77(2): 65-79.
- [20] Alves Dos Santos N, Savassi O, Peres A E C, et al. Modelling flotation with a flexible approach – Integrating different models to the compartment model[J]. Minerals Engineering, 2014, 66 – 68: 68 – 76.
- [21] Kouachi S, Bouhenguel M, Amirech A, et al. Yoon Luttrell collision and attachment models analysis in flotation and their application on general flotation kinetic model[J]. Desalination, 2010, 264(3): 228 – 235.
- [22] 孙刚,刘焕胜. 浮选动力学的研究现状及其进展[J]. 煤炭加 工与综合利用,2011(6):27-30.
- [23] 任天忠. 选矿数学模拟及模型[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [24] 曾克文,余永富.浮选矿浆紊流强度对矿物浮选的影响[J]. 金属矿山,2000(9):17-20.
- [25] 曾克文.浮选槽内矿浆紊流强度对浮选影响的理论及应用研 究[D].长沙:中南大学,2001.
- [26] Vaziri Hassas B, Caliskan H, Guven O, et al. Effect of roughness and shape factor on flotation characteristics of glass beads [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 492: 88 – 99.
- [27] Verrelli D I, Bruckard W J, Koh P T L, et al. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations [J]. Minerals Engineering, 2014, 58: 80 - 89.
- [28] Vizcarra T G, Harmer S L, Wightman E M, et al. The influence of particle shape properties and associated surface chemistry on the flotation kinetics of chalcopyrite[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(8): 807-816.
- [29]任浏祎. 细粒锡石颗粒—气泡间相互作用及其对浮选的影响 [D]. 长沙:中南大学,2012.
- [30] Zhang H, Liu J, Cao Y, et al. Effects of particle size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride[J]. Powder Technology, 2013, 246: 658-663.
- [31] 罗成,何亚群,卜祥宁,等. 窄粒级煤泥浮选经典动力学模型 的改进[J].中国矿业大学学报,2015(3):477-482.
- [32] 李现龙. 基于粒度效应的浮选动力学在浮选工艺改造中的应 用研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2015.
- [33] 曹钊,张弘强,袁治国,等.煤泥入料粒度对其浮选动力学特性的影响[J].煤炭技术,2015(7):310-312.
- [34] 何丽萍. 铜铅锌硫化矿浮选动力学研究[D]. 赣州:江西理工 大学,2009.
- [35] 缪亚兵,邓海波,徐轲. 萤石在油酸和水玻璃体系中的浮选动 力学模型及浮选行为研究[J]. 化工矿物与加工,2015(7):

13 - 17.

- [36] Natarajan R, Nirdosh I. Effect of molecular structure on the kinetics of flotation of a Canadian nickel ore by N – arylhydroxamic acids[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 93(3-4): 284 – 288.
- [37] 崔伟勇,张覃,邱跃琴,等. 捕收剂 GJBW 作用下胶磷矿浮选 动力学研究[J]. 化工矿物与加工,2015(1):11-13.
- [38] 于洋,李俊旺,孙传尧,等.黑钨矿、白钨矿及萤石异步浮选动 力学研究[J]. 有色金属(选矿部分),2012(4): 16-22.
- [39] 张晋霞,谭晴晴,张晓亮,等. 蓝晶石、石英及黑云母的浮选动 力学研究[J]. 中国矿业,2014(11):115-119.
- [40] 岳涛. 微细粒级黑钨矿浮选动力学研究[D]. 赣州:江西理工 大学,2013.
- [41] 王虎. 南京栖霞山高硫低铅锌银矿高效回收工艺及浮选动力 学研究[D]. 赣州:江西理工大学,2015.
- [42] 夏青,岳涛. 浮选动力学研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2012,3(2): 46-51.
- [43] 王黎伟. 充填式浮选柱浮选动力学研究[D]. 武汉:武汉工程 大学,2014.
- [44] 王大鹏.中低品位胶磷矿柱式浮选过程强化与短流程工艺研 究[D]. 武汉:中国矿业大学,2011.
- [45] 韩伟. 浮选机内多相流动特性及浮选动力学性能的数值研究 [D]. 兰州:兰州理工大学,2009.
- [46] 陈东,董干国,张建一.大型浮选机浮选流体动力学特性探讨 及设计原则研究[J].有色金属(选矿部分),2010(1):33-37.
- [47] A•维别尔,崔洪山,李长根.大容积浮选设备的按比例放大 和设计[J].国外金属矿选矿,2002(4):24-31.
- [48] 沈政昌,陈东.充气式浮选机浮选动力学模型研究[J].有色 金属(选矿部分),2006(1):22-25.
- [49] 沈政昌.160m<sup>3</sup> 浮选机浮选动力学研究[J].有色金属(选矿 部分),2005(5):33-35.
- [50] 郭柄霖,杨润全,王怀法.叶轮转速与通气量对宽粒级煤泥浮选影响的研究[J].中国煤炭,2015(5):99-104.
- [51] 郭柄霖. 叶轮转速和充气量对宽粒级煤泥浮选行为影响的初步研究[D]. 太原:太原理工大学,2015.
- [52] 王燕玲,杨润全,王怀法.不同粒度煤泥浮选特性的试验研究 [J].选煤技术,2007(5):1-5.
- [53] çilek E C. Estimation of flotation kinetic parameters by considering interactions of the operating variables [J]. Minerals Engineering, 2004, 17(1): 81-85.
- [54] B. K. 戈雷, J. P. 费朗兹蒂斯, E. V. 曼拉皮格, 等. 泡沫滞留时 间对浮选动力学的影响[J]. 国外选矿快报, 1999(11):7-11.
- [55] 吕沛超,卢毅屏,冯博,等. 超声波作用下金川硫化镍矿浮选 动力学研究[J]. 有色金属(选矿部分),2014(3):58-61.
- [56] 吕沛超,卢毅屏,冯博,等. 超声波对金川硫化镍矿浮选的作用研究[J]. 有色金属(选矿部分),2015(4): 34-38.
- [57] Changunda K, Harris M, Deglon D A. Investigating the effect of energy input on flotation kinetics in an oscillating grid flotation cell[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(12-14): 924-929.
- [58] Vidyadhar A, Das A. Enrichment implication of froth flotation kinetics in the separation and recovery of metal values from printed circuit boards[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 118: 305 - 312.