流态化浮选技术概述

沈政昌[1,2]，罗世瑶[1,2]，杨义红[1,2]，史帅星[1,2]

（1.北京矿冶科技集团有限公司 矿物加工科学与技术国家重点实验室，北京 100160；
2.北矿机电科技有限责任公司 北京市高效节能矿冶技术装备工程技术研究中心，北京 100160）

摘要：本文首先分析了粗颗粒矿物难以浮选的原因，主要介绍了流态化技术以及该技术在粗颗粒选矿中的应用，同时总结了矿物分选领域流态化浮选设备，分析了该技术以及设备的发展趋势和方向。

关键词：粗颗粒矿物；流态化技术；流态化浮选；流态化浮选设备

Application of fluidization technology in mineral processing

Shen Zhengchang[1,2]，Luo Shiyao[1,2]，Yang Yihong[1,2]，Shi Shuaixing[1,2]

(1. BGRIMM Technology Group，State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology，Beijing 100160，China；
2. BGRIMM Machinery and Automation Technology Co.，Ltd.，Beijing Engineering Research Center on Efficient and Energy Conservation Equipment of Mineral Processing，Beijing 100160，China)

Abstract: Firstly, this paper analyzes the reasons for poor recovery of coarse-grained minerals. Next, we mainly introduce the fluidization technology and its application in coarse-grain beneficiation. At the same time, we summarize the fluidized flotation equipment in mineral separation field. Lastly, the development trend of this technology and equipment are analyzed.

Key words: coarse particle minerals；fluidization technology；fluidized flotation；fluidized flotation equipment

伴随着我国经济社会的快速发展，对资源的需求量越来越大，矿产资源被大量开采，资源呈现贫、细、杂的属性，这对选矿工艺与设备提出了更高的要求。以有色金属矿分选领域为例，研究统计表明，磨矿电耗占选厂总电耗的45～55%，提高矿物浮选粒度，可以大幅降低磨矿功耗[1,2]。机械搅拌式浮选机作为最主要的浮选设备之一，应用于粗颗粒矿物选别具有很大局限性，主要面临两大现实问题：

（1）矿物种类繁多，浮选流程配置不断更新，单一的粗颗粒专用浮选设备工艺适应性差，性能有待提高。

（2）常规粗颗粒矿物浮选设备处理的粒度上限有限，低解离粗颗粒在常规粗颗粒浮选设备的流体动力学环境中脱落概率高[3]。

北京矿冶研究总院研发的CLF和CGF浮选机在一定程度上解决了粗颗粒矿物难以回收的问题，但对于粗颗粒矿物回收的能力仍不够，且对于粗大颗粒和低解离颗粒的回收能力更低[4-7]。

流态化浮选技术结合流态化技术与浮选技术的特点，流态化技术提供适宜粗颗粒分选稳定的环境，浮选技术强化矿物颗粒按亲疏水性进行分选，两种技术的融合能够大幅度提升粒度回收上限，使粗颗粒以及低解离度颗粒回收成为可能。且粗颗粒直接入选，提前抛出大部分脉石矿物，大大降低了再磨作业功耗。流程配置的革新，相比传统的磨浮流程节省能耗

30%-40%，降低药剂的用量，同时降低脱水作业的难度。因此，有色金属矿分选领域流态化浮选技术以及设备的研究具有现实意义。

1 粗颗粒概述

矿物适宜浮选粒度具有上、下限，最佳粒度范围之外的矿物，可浮性和选择性都会变差。粗粒级矿物与常规粒级矿物具有不同的浮选特性，因质量大，惯性大，粗颗粒矿物易在强紊流浮选环境中脱落，且粗颗粒矿物易于在浮选机空间区域内产生浓度差异，与常规粒级矿物浮选机均一悬浮的设计理念相违背。目前对粗颗粒矿物浮选行为的研究工作始于对适宜浮选粒度的界定。

1.1 粗粒级矿物界定

早在 1932 年，Gaudin 等人提出粗细颗粒具有不同的浮选特性[8]。1983 年，卢寿慈依据实验室和工业实践所取得的数据对矿物颗粒的粒度等级进行了划分[9]；1991 年，胡熙庚等人认为泡沫浮选难于对 100μm 以上的粗颗粒矿物发挥作用，常规泡沫浮选针对硫化矿的适宜粒度范围为 100～7μm[10-13]。1993 年，Schulze 在静态分选环境下，得出浮游粒度上限公式[14,15]：

$$D_{\max}=\left[-\frac{3}{2}\frac{\gamma_{LG}\sin\omega\bullet\sin\left(\omega+\theta\right)}{\Delta\rho\bullet g}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1.1}$$

式中 γ_{LG}—液/气界面张力（$N\cdot m^{-1}$）；
θ—接触角（deg）；
$\Delta\rho$—矿粒与液体间密度差（$kg\cdot m^{-3}$）；
g—重力常数（$9.81m\cdot s^{-2}$）；
$\omega=180°-1/2\theta$。

关于浮选最佳粒度范围，不同矿物种类间差异很大。粒度超过最佳范围的为粗粒，低于最佳范围的为细粒。最佳可浮粒度范围受多个因素影响，如浮选工艺参数、矿物种类及浮选设备型式等。锡石的最佳浮选粒度范围为3～20μm，石英为10～40μm，萤石为50～150μm[16]。2008 年，Jameson 在 Schulze 工作的基础上推导出传统浮选机中能够回收的最大颗粒直径的公式[17,18]：

$$d_{p,\max}=1.53\left(\frac{\gamma^{6/5}\left(1-\cos\theta\right)}{\Delta\rho\varepsilon_{1}^{4/5}\rho_{L}^{1/5}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1.2}$$

其中 γ—表面张力
θ—接触角
$\Delta\rho$—固相液相密度差
ε_i—能量耗散率
ρ_L—液相密度

2010 年，Jameson 通过在浮选柱中引入流态化分选环境，将矿物分选粒级提高到 0.4mm。2013 年，Bellson Awatey 等人利用 HydroFloat 流态化分选设备，将闪锌矿的浮游粒度上限提升至 1.18mm。因此，随着浮选技术的进步，可浮矿物粒度的上限是在不断拓展的。

1.2 粗颗粒矿物难浮原因概述

1.2.1 浮选设备中的强紊流环境，粗颗粒脱落概率高。

矿物颗粒浮选过程的首要条件是矿粒与气泡的接触和附着，粗颗粒矿物粒度粗，质量大，Stokes 准数 K 大，矿物与气泡之间的相对速度大，因此矿物与气泡的碰撞几率大。实现粗颗粒矿物与气泡粘附，形成矿粒-气泡集合体必须满足的前提条件是：感应时间须小于矿粒与气泡碰撞时的接触时间。从矿粒与气泡水化膜接触、水化膜变薄、破裂，最终形成三相润湿周边的感应时间与矿粒大小之间的关系见下式 [3,19]。

$$t=kd^{n} \tag{1.3}$$

式中　t－感应时间

k－感应时间系数

d－矿粒当量粒度直径

n－由矿粒的运动状态决定的指数，一般介于 0-1.5，层流时 n=0，湍流时 n=1.5。

对于粗颗粒矿物来说，自身粒度大，惯性大，与气泡的接触时间较短，而所需的感应时间长（颗粒粒度大，根据公式（1.3），所需感应时间长），尤其在湍流状态时，矿粒与气泡的接触时间远小于感应时间，因此可以减小叶轮的转速使粗粒矿物能在平稳的环境中与气泡接触，实现粘附。

Zongfu Dai 和 Daniel Fornasiero 等人早期的研究表明，感应时间与气泡大小、颗粒接触角等因素都有关系[20]。综合颗粒直径、气泡直径、感应时间及紊流强度等因素的影响，颗粒-气泡附着概率可用式（1.4）来表示：

$$P_a=\sin^2\left\{2arctg\exp\left[\frac{-(45+8Re_b^{0.72}V_b\cdot t_i)}{30R_b(\frac{R_b}{R_p}+1)}\right]\right\} \tag{1.4}$$

式中　Re_b——气泡雷诺数大小，$Re_b < 100$；

V_b——气泡平均运动速度；

t_i——感应时间；

R_b——气泡半径；

R_p——矿粒半径。

1.2.2 粗颗粒与气泡气固黏附强度低，易从矿浆-泡沫层界面脱落。

由于气-液-固三相浮选动力学过程的复杂性，因此浮选机内各动力学分区实际上并没有严格清晰的界限，不同的浮选机动力学分区也不同，一般可将常规浮选机动力学分区划分为四个：搅拌混合区、运输区、分离区和泡沫区。携带粗颗粒的气泡在从分离区进入泡沫区的过程中，由于粗颗粒与气泡黏附强度低，稳定性差，易从矿浆-泡沫层界面脱落。Schulze 推导了邦德数（Bo）方程，定义了描述气泡-颗粒集合体稳定程度的邦德数。Bo>1 时，紊流中黏附于气泡表面的矿粒将会脱落[21]。

2006 年，D.R. Seaman 通过测定进入泡沫层的气泡-颗粒集合体的速率来确定穿过泡沫层黏着颗粒回收率，并通过 $3m^3$ Outokumpu 浮选机开展试验，得出矿物颗粒在矿浆-泡沫层的分界面脱落程度最高。这为粗颗粒浮选设备的设计提供了重要指导[22]。

2 流态化技术概述

2.1 流态化技术发展及应用

关于流态化技术的应用，宋应星早在《天工开物》中就记载采用不断颠簸的方法，用水掏洗铁砂，强烈震荡大幅减少粒子间内摩擦作用，将较轻的脉石洗掉，留下精铁矿的流态化分选过程，这一原理至今还在摇床选矿过程中应用[23-28]。流态化技术引入现代工业举足轻重的发展是石油的催化裂化和煤的气化，这两个领域的迅速发展激发了许多应用流态化技术的工业过程。现在流态化技术已广泛应用于现代能源、轻工、石油、化工、冶金、环保、材料等行业中。

流态化技术的原理：向上的流体流过固体颗粒堆积的床层，使固体颗粒悬浮，颗粒具有一般流体的性质，减小颗粒之间内摩擦力的作用。随着作用于颗粒群的流体流速的增加，流态化将从散式流态化，经历鼓泡流态化、湍动流态化（以上三者可以统称为传统流态化）以及快速流态化阶段，最终进入流化输送状态[29,30]。

散式流态化是指颗粒能够均匀分散在流体中的流态化体系，多为固-液体系。而大量应用的气-固流化床由于气泡的普遍存在，气固接触效率变差，传热、传质及反应速率降低，称鼓泡流化床，属于聚式流态化。西方学者重点研究聚式流态化下气泡的生成与长大规律，建立了多种鼓泡流化床数学模型，并根据不同密度、粒度的颗粒所表现出来的流化行为，将颗粒划分为Ａ、Ｂ、Ｃ、Ｄ四类，即著名的 Geldart 分类。有研究表明不是任何尺寸的固体颗粒都能被流化，一般适合流化的颗粒粒度在 30μm-3mm 之间，大至 6mm 左右的颗粒仍能被流化，随着研究的深入，流态化技术适用的颗粒粒径的范围在不断拓宽。之后相继出现“稀相流态化”、“湍动流态化”、“浅床流态化”、“快速流态化”等理论研究成果。与此同时，气液固三相流化床和浆态床的研究与应用也得到进一步发展[31,32]。

流态化技术优势：

（1）颗粒在流体的作用下保持悬浮状态，颗粒之间消除接触现象，颗粒与流体之间的相界面积大，传质和传热速率、效率比其他接触方式高。

（2）颗粒群有类似流体的性质，从而能够像流体一样在两个装置中进行大量循环。

（3）固体空隙率的变化引起曳力系数的改变，因此流态化技术的操作范围比较宽。

（4）设备结构简单，单位处理能力大，可以对细粉颗粒进行处理。

2.2 两相流态化技术进展

两相流态化技术在选矿领域中的应用主要体现在煤的分选过程以及矿物的焙烧过程。流态化技术因其独特的优势，气固和液固流态化技术解决了选煤过程中粗煤泥回收难的问题，降低了粒度对煤分选过程的影响，强化了颗粒按照密度进行分选，提高了分选精度。相继出现了一大批干扰床分选机，具有典型代表性的是 TBS 分选机、CSS 分选机、FBCC 分选机、阻尼脉动液固流化床分选机、普通鼓泡流化床和振动流化床等。由于 TBS 等分选机在宽粒级范围分选精度下降，TBS 分选机分选粗煤泥的精煤产品中含有部分高灰细泥，一般经脱泥质量才能达到要求，针对 TBS 分选机存在的缺点，国内外专家基于不同流场和力场对其进行改造，出现了横流分选机、逆流分选机等设备。

针对矿物焙烧过程，气固两相流态化的应用，强化了焙烧过程传热与传质效率，具有典型代表性的设备是磁化焙烧炉、流态闪速焙烧炉、循环流态焙烧炉和气体悬浮焙烧炉。

由于有色金属矿分选的复杂性，两相流态化技术很难满足分选需要。三相流态化浮选技术因其融合了浮选技术的优势，因此开始成为研究的热点问题。同时国外研究学者已经率先开发出三相流态化浮选设备，针对三相流态化浮选理论进行深入研究，且此设备目前在磷矿、锂辉石矿、蛭石矿、钴石矿、钾盐矿、长石矿上有很好的应用。

3 流态化浮选理论

3.1 有色金属矿领域中三相流态化的理论与应用

3.1.1 三相流态化浮选理论

由于粗颗粒矿物在常规浮选环境下易脱落，基于低紊流环境下的流态化浮选技术应用而来。流态化浮选技术是基于流态化干涉沉降的原理，颗粒在干涉环境中，沉降末速小，降低了颗粒与气泡之间的速度差；薄的泡沫层降低了矿化气泡穿过浆-气界面而造成的脱落；同时浮选环境中引入小气泡，增加了对粗颗粒矿物的捕收概率[33]。

（1）延长了颗粒在浮选过程中的停留时间，提高了碰撞和回收概率。

流态化环境下颗粒的干涉沉降公式：

$$U_{\mathrm{t}}=\frac{gd^{2}\left(\phi_{\max}-\phi\right)^{\beta}\left(\rho_{s}-\rho_{f}\right)}{18\eta\left(1+0.15\,\mathrm{Re}^{0.678}\right)} \tag{1.5}$$

其中　g—重力加速度

d 力颗粒粒径

ρ_s—固体颗粒密度

ρ_f—流化床层密度

η—液体粘度

Φ—固体体积浓度

Φ_{max}—最大固体体积浓度

β—变量，根据颗粒雷诺数而变化

三相流化床浮选给料浓度比常规浮选机给料浓度高，这直接增加了颗粒气泡碰撞概率；同时，矿浆粘度的增加降低了粗颗粒的沉降速度。流化床液相的给入，保证了颗粒的悬浮和均一分散，改变了传统浮选机中叶轮的强力搅拌维持颗粒悬浮的方式。

（2）小气泡的二次捕收作用，加速大气泡的粘附。

基于 Miettinen 等人的研究，矿浆中小气泡的存在对粗粒的浮选是有益的。小气泡在矿浆中密布在粗颗粒矿物上，作为浮选过程中的第二种捕收剂，有助于大气泡的粘附。流态化环境中的大气泡，易在高浓度矿浆中颗粒与颗粒之间的缝隙中弥散成小气泡，增加了粗颗粒的浮选速率。

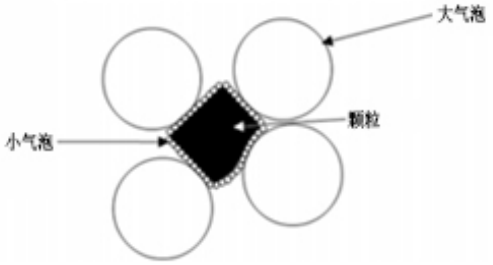


图 1　小气泡在矿物颗粒上分布

Fig. 1　Small bubbles distribute on mineral particles

（3）薄的泡沫层降低了矿化气泡穿过泡沫层而造成的脱落。

根据粗颗粒矿物难以浮选的原因，可以看出粗颗粒由于粒度和密度的原因，气泡浮力不足以将粗颗粒从分离区运送至泡沫区，且形成的矿化气泡强度低。薄的泡沫层使矿化气泡不需要具有足够的浮力去穿过矿浆-泡沫层分界面，避免了常规浮选机和浮选柱泡沫层厚而造成粗颗粒难以回收的困难。

（4）低紊流分选环境中，颗粒的临界接触角变小，低解离粗颗粒的接触角易大于临界接触角，浮选行为更容易发生。

4 流态化浮选技术研究进展

桂夏辉、李延峰等人对液固流化床中粗煤泥自由沉降末速进行研究，得出阿连公式是计算粗煤泥自由沉降末速的合适公式。在经验模型中，斯万森公式得出的计算值最接近实际测量值[34]。沙杰等人研究不同排料方式、不同柱体高度对液固流化床粗煤泥分选试验的影响，得出 1500mm 柱体高度下分选效果最佳，中心排料型流体分布器分选效果优于周边排料型流体分布器[35]。太原理工大学王怀法等人采用 fluent 软件对流化浮选装置内部结构进行优化，并探索不同分选条件下流化浮选装置的浮选效果[36]。Bellson Awatey 等人利用电声装置测量粗颗粒矿物的脱落力，这对优化粗颗粒矿物分选环境具有重要意义。同时 Bellson Awatey 等使用 ESEM 装置对粗颗粒矿物的接触角进行测量，探究接触角对分选过程的影响[37]。Graeme J.Jameson 等对单个气泡和一组气泡在旋转矿浆相中的行为进行了研究，对矿物与气泡的接触碰撞、脱附过程进行了研究，用实验证实了传统理论中认为的颗粒脱附过程：粗颗粒由于离心力的作用，从气泡表面脱落。同时 Graeme J.Jameson 等研究了流态化浮选过程中产生的气泡簇在浮选机中的行为，用高速摄像机对气泡簇的破裂和再形成过程进行观察，分只加起泡剂和只加捕收剂两种条件下进行研究。

5 流态化浮选设备

5.1 水力分选机(Hydrofloat Separator)

美国 Eriez 公司对横流式分选机（Crossflow Separator）[38-45]进行改进，研制出一种新的流态化分选设备。在装置中部提供一个上升水流的同时，外加一个充气装置，水气高度剪切，产生分选所需要的小气泡。它结合了浮选过程适应性强和重力分选处理量大的特点，经过药剂调浆的矿浆给入水力分选机上部，切向给入槽体上部。

通过调整给水、充气速度将合理直径的气泡引入到流态化床层，气泡能够作用在原本疏水的矿物颗粒表面或经过调浆后产生的疏水性颗粒表面，减少他们的有效密度，轻的矿粒以及被气泡捕获的疏水性矿粒进入溢流槽，没有与气泡附着的亲水性颗粒，则通过圆锥形尾矿排出装置排出槽体。

此设备不仅对密度差异大的矿物能进行有效分选，且通过改变矿浆性质、改变气泡直径分布可以实现对密度差异小的矿物和脉石进行分选。

与传统的机械搅拌式浮选设备相比，水力分选机具有以下优点：

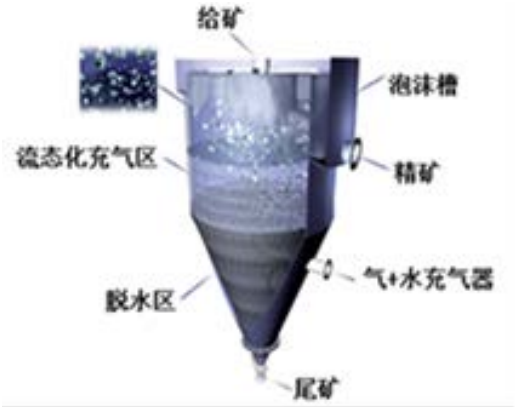
（1）给矿矿浆浓度大，增加了矿物颗粒与气泡的碰撞概率。

（2）矿浆粘度大，减少颗粒的干扰沉降速度，增加碰撞概率。

（3）矿浆以逆流形式给入槽体，在上升水流提供向上力的作用下，增加了粗颗粒矿物的停留时间，从而提高了选别指标。

（4）无机械搅拌机构，单位处理能力能量消耗低，需要维修量少，分选区分选环境相对平稳，从而减小了气泡-矿粒集合体的脱附概率。

（5）大的气泡矿物颗粒簇的形成，减少粗颗粒矿物的脱落。



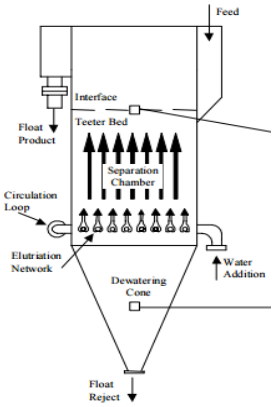


图 2　Hydrofloat Separator 结构简图　　**图 3　Hydrofloat Separator 结构简图**

Fig.2 Fig.3　The basic structure of Hydrofloat Separator

Bellson Awatey 等人利用闪锌矿进行粗颗粒浮选试验，所用物料化学多元素分析显示含 9.8% Zn，5.7% S，0.26% Fe，0.02% Cu，17.2% Ca，9.4% Mg，4.2% Si 和 0.005 Pb。XRD 分析结果表明分选物料脉石矿物主要为白云石和石英，含有少量的钠长石、石灰石等。对原矿进行破碎筛分后，得到 250-425μm、425-850μm 和 850-1180μm 三种粒级，三种粒级按照一定的比例混合后作为浮选的物料。用相同粒度组成的石英物料构建流态化床层，采用钠甲基异丙基黄药作为分选捕收剂，PPG425 作起泡剂，$CuSO_4$ 作活化剂，石灰作调整剂。试验结果表明：Hydrofloat 流态化床针对粗颗粒有好的回收效果，在最优条件表观气速 0.38cm/s，表观液速 1.52 cm/s，床层高度 15.2 cm 的情况下，回收率达到最佳，同时在相同的药剂条件下选用 Denver 浮选机作为对比试验，结果显示在粒度范围 250-425μm 的区间内，Hydrofloat 和 Denver 浮选机试验效果相当。在粒度范围 425-850μm 和 850-1180μm 的区间内，Hydrofloat 表现出比 Denver 浮选机更好的试验效果，针对 850-1180μm 的粒径区间，Hydrofloat 的回收率仍然能够达到 85.9%，而 Denver 浮选机只能达到 41.3%，对比结果见下图 4。

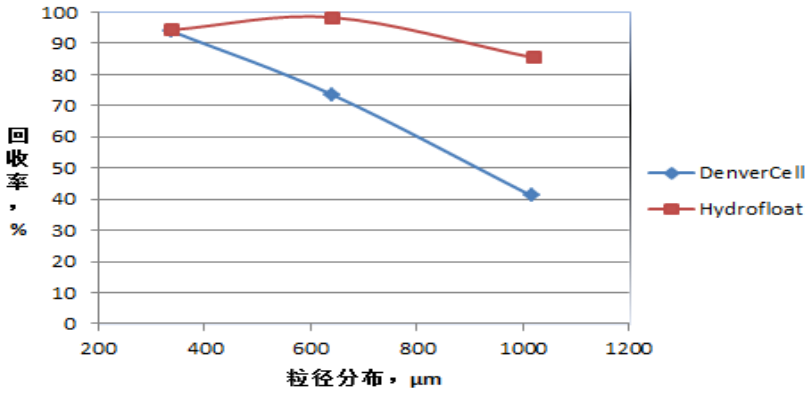


图 4　Hydrofloat 与 DenverCell 粗颗粒分选效果图

Fig. 4　Hydrofloat and DenverCell sorting effect on coarse particle

此装置也存在明显劣势，该设备适合窄级别入选，对细颗粒的选择性差，细颗粒脉石矿物易成为精矿产品，对精矿质量会产生影响，且该设备耗水量大，在缺水地区应用起来很困难。

5.2 NovaCell 浮选柱

NovaCell 浮选柱由澳大利亚 Newcastle Jameson 教授 2010 年提出。该设备由浮选柱体、泡沫槽、尾矿出口、中矿循环管路、矿气混合装置组成，槽体的分选区域主要由泡沫区、分离区和流态化区组成，新给矿以及分离区部分中矿同空气一起经过矿气混合装置，矿气高度剪切碰撞，气泡被弥散成小气泡，高的能量耗散对细颗粒的碰撞矿化有利[46, 47]。在矿浆进入槽体后，粒度大、密度大的颗粒形成流态化床层，此区域属于低紊流区域，而细颗粒和部分被气泡粘附的疏水性粗颗粒穿过流态化区进入分离区，最终成精矿。该设备的相对于 Hydrofloat Separator 的独特之处在于，它针对不同粒度的矿物颗粒适应性强，对细颗粒同样具有好的分选效果，而且槽体中上部细颗粒尾矿排出口的设计，减少了细粒脉石颗粒对精矿产品的影响。NovaCell 浮选柱运行过程中保证一定的泡沫层厚度，这与 Hydrofloat Separator 的薄的泡沫层设计不同。运用 NovaCell 浮选柱进行粗颗粒矿物分选，方铅矿和黄铜矿的最大可浮粒度上限被提升至 1.4mm，针对密度更小的煤的浮选，最大可浮粒度上限能达到 5mm。

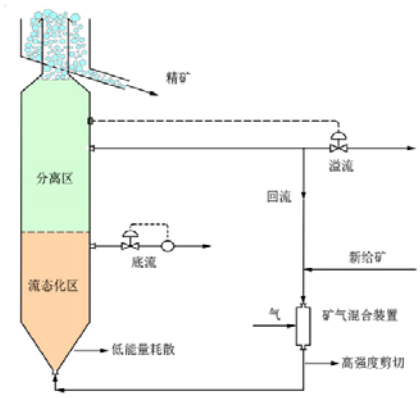


图 5　NovaCell 工作原理简图

Fig. 5　Schematic diagram of NovaCell working principle

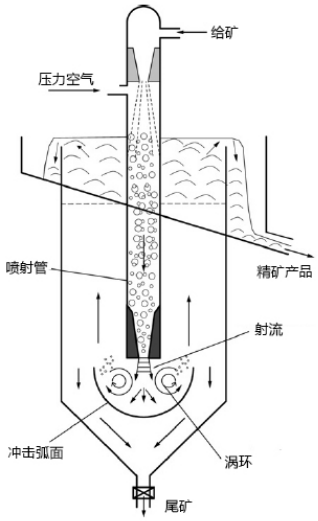


图 6　矿气混合装置简图

Fig. 6　Schematic diagram of the mine gas mixing device

该装置已经实现在磨矿回路中应用，能够对半自磨排矿的粗颗粒直接选别（0.4mm），提前抛尾，因此大大减少下游球磨机的入磨量，节省功耗，减少球磨机的规格尺寸。其使用的流程见图 5。

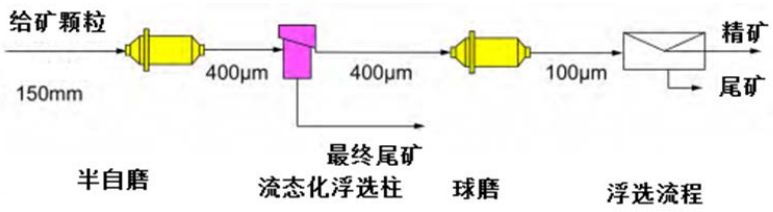


图 7　NovaCell 现场使用流程图

Fig. 7　NovaCell field use flow chart

此设备实现全粒级分选的同时，存在以下不足：溢流尾矿口的位置需通过试验确定，当生产中物料性质改变后，需及时对溢流尾矿口和矿浆循环口的位置做出调整。

5.3 基于矿物差异化高效分选的柱浮选关键技术及应用

针对粗细粒难处理矿物日益增加、资源品位变差、精矿品质要求不断提高的现状，北京矿冶科技集团有限公司沈政昌教授研发团队深入研究了不同粒级矿物的矿化行为，提出了“差异化分选”和“浮选柱元”的观点[48]，解决了柱浮选技术宽粒级分选的难题，在分选机理方面取得重要突破，克服了传统浮选柱只能有效回收常规粒级的不足。

（1）实现了柱浮选的流化床矿化。首次在浮选柱内提出气液固三相流化床矿化设计思想，通过研究流体流速、颗粒粒径以及床层高度之间的关系，建立了流化床矿化模型，发明了具有多重稳流板和放射状循环通道的流化床矿化装置（图 8）。高速气泡流在栅板处形成阻流效应和分散效应，能量强制释放建立了上升气泡流的柱塞流特征，使气泡均匀分散，空气分散度大于 5。放射状循环通道利用矿浆密度差实现了局部循环流动，使栅板上方形成稳定散式流化床，气泡雷诺数小于 100，矿物与气泡接触时间大于感应时间，从而形成多气泡粘附大比重矿物的聚合体，提高了粗粒矿物矿化概率。

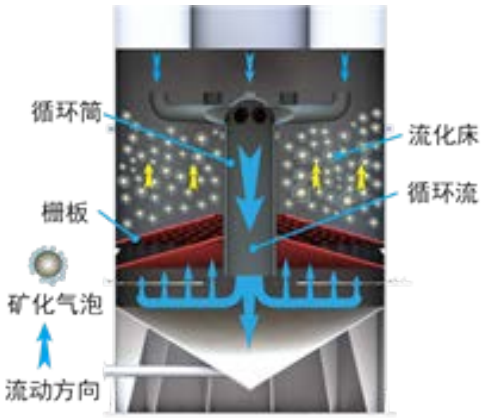


图 8　三相流化床矿化装置

Fig. 8　Three-phase fluidized bed mineralization device

（2）实现泡沫相分选。基于泡沫粘附粗粒疏水矿物的作用机理，分析了泡沫层厚度、泡沫间的通道结构、通道尺寸、接触时间、感应时间等的关系，提出了粒级差异化分选的设计思想。利用旋流分级理论，发明了具有阻尼缓冲板和短锥形折射孔结构的差异化给矿装置（图 9），使粗粒矿物“零末速”均匀给入泡沫层，形成了粘附矿化气泡聚集体，首次在浮选柱内实现了粗粒级矿物的泡沫相分选，0.15mm 以上粗粒矿物的粒级回收率提高 15%。

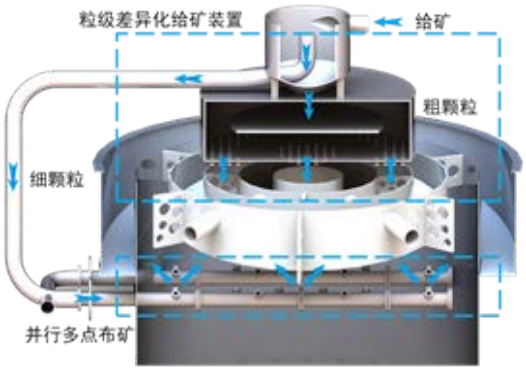


图 9　粒级差异化给矿装置

Fig. 9　Granular differential ore feeding device

该设备借助多重稳流板的作用，在紊流板上方形成流态化床层（悬浮层），与 Hydrofloat

Separator 和 NovaCell 的设计理念不一样，但是该设备主体未形成从下向上保证颗粒悬浮的流场，因此提升粗颗粒回收上限的能力有限。

5.4 新型粗煤泥分选机

太原理工大学高明永等人针对传统液固流化床分选机进行改造，在上升水流中引入气泡流，从而设计了一种新型粗煤泥分选机，在一定程度上拉大了低密度粗颗粒与高密度细颗粒的分选密度，强化了煤泥分选机按密度进行分选[49-59]。

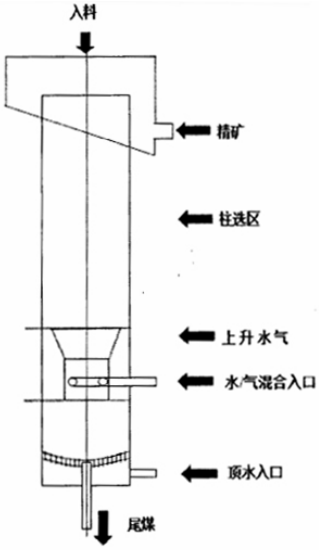


图 10　一种新型粗煤泥分选机

Fig. 10　A new type of coarse slime sorting machine

该设备从下到上依次为尾矿排矿口、顶水口、水气混合入口、柱选区、给料装置和精矿出口。

高永明等利用 Fluent 软件对分选装置进行建模和流场分析，由于上升水流和上升气泡流的存在，改变了颗粒的沉降末速，强化了低密度粗颗粒的分选，而细颗粒分选不受影响。从而弱化了粒度对颗粒分选的影响。在柱选区域内，给水口和充气口上方的湍动强度较大，能够加强气泡与颗粒的相互作用。

基于屯兰矿煤样，粒度组成+0.125mm 占 94%，分选结果表明，在不加捕收剂、加捕收剂、结构改装等不同条件下，研究上升水流速度、充气速度、入料浓度、入料速度等因素对分选效果的影响。实验结果表明，不加捕收剂的情况下，最佳的试验条件为：顶水速度、通气速度、入料速度分别为 8.5×10^{-3} m/s、（2.4-2.5）$\times10^{-3}$ m/s 和 4.5×10^{-3}m/s，入料浓度 300g/L。在其他条件相同时，添加捕收剂的分选效果优于不加捕收剂的分选效果，说明捕收剂的添加对分选有利。

该设备针对传统的液固流化床进行改进，底部加入充气装置，对流态化浮选柱进行单相、气液两相数值模拟表明，速度矢量分布均匀，气相分布均匀，满足了煤泥分选所需要的流场环境。但该设备目前仅处在试验室试验阶段，且分选物料仅针对粗煤泥，对有色金属矿的适用性未知。

6 结论

粗颗粒矿物回收一直是浮选过程研究的热点和难点问题。粗颗粒矿物由于其自身性质，具有与细颗粒矿物不同的浮选特性，易在强紊流环境中脱落。流态化浮选技术针对粗颗粒矿物的回收有很好的效果，综合上述流态化浮选技术以及设备可得如下结论：

（1）流态化技术提供了粗颗粒分选低紊流的环境，同时浮选技术强化颗粒按润湿性差异进行分选，两者技术的融合显著提升了粗颗粒粒度回收上限。

（2）国内外研究学者对粗颗粒分选过程进行分析，对碰撞、脱落、再粘附过程进行深入研究，研究三个过程中提升矿物颗粒碰撞粘附过程的具体措施。同时研究不同分选条件对回收效果的影响，在提升粗颗粒回收率的同时，兼顾细粒颗粒的选择性。

（3）应用先进实验流体力学测试手段和模拟软件对内部流场进行优化，由于三相流态化模拟的复杂性，目前众多学者针对这一领域开展研究，找到适用于三相流态化分选的模拟策略。

（4）现有流态化浮选设备 Hydrofloat Separator 因其细粒级脉石易影响精矿品位，耗水量大而发展受限，NovaCell 运转工序易受给矿性质波动影响，流态化浮选柱针对粗颗粒的回收粒度上限有限，因此需要开发更加高效的流态化浮选设备。

（5）目前上述设备针对煤矿、磷矿、锂辉石矿、蛭石矿、钻石矿等矿石有好的回收效果，且已经工业应用，针对粗颗粒的回收效果明显优于浮选机。

国内外针对流态化浮选技术以及设备研究的趋势：

（1）对流态化浮选过程的机理进行深入研究，运用先进测试手段探究流态化浮选过程。

（2）三相流态化浮选过程的模拟，可视化的揭示某些在试验条件下难以被捕捉的现象。

（3）扩大流态化浮选设备的应用范围，外加力场的加入实现更优的分选效果。

（4）对矿气和水气混合装置进行研究，保证装置性能可靠、能耗最低。

参考文献

[1] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 冶金工业出版社, 2012.

[2] 周龙廷. 选矿厂设计[J]. 1999.

[3] 沈政昌. 浮选机理论与技术[M]. 冶金工业出版社, 2012.

[4] 沈政昌, 刘振春, 吴亦瑞. 粗粒浮选机设计原则[J]. 有色金属(选矿部分), 1996(3):23-27.

[5] 沈政昌, 冶炼炉渣选矿设备研究与实践. 铜业工程, 2009(04): 第 1-4 页.

[6] 董干国, 卢世杰, 杨丽君,等. CGF 型宽粒级机械搅拌式浮选机研制及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(5):50-53.

[7] 余悦, 董干国, 杨丽君. CGF-2 型宽粒级机械搅拌式浮选机工业试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(4):69-73.

[8] A.M.Gaudin, Flotation, McGraw Hill Book Co.,Inc, New York,1932.

[9] 现代浮选理论及工艺. 卢寿慈编著.武汉钢铁学院，1983 年 12 月.

[10] 张跃军, 韩登峰, 冯天然,等. CLF 浮选机对粗颗粒钛铁矿浮选工艺适应性研究[J]. 矿冶, 2015, 24(b11):17-19.

[11] 胡熙庚，黄和慰，毛钜凡等. 浮选理论与工艺. 中南工业大学出版社，长沙，1991

[12] D.Tao . Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles . Separation Science and Technology，2004(4)：741-760

[13] R.-H. Yoon. The role of hydrodynamic and surface forces in bubble–particle interaction . International Journal of Mineral Processing，2000(2)：129-143

[14] Schulze H J. Flotation as a heterocoagulation process：possibilities of calculating the probability of flotation[J]. Surfactant Science Series，1993（47）：321-353.

[15] Przemyslaw B，Kowalczuk，Oktay Sahbaz，Jan Drzymala. Maximum size of floating particles in different flotation cells[J].Minerals Engineering,，2011（24）：766-771.

[16] 龚明光. 泡沫浮选[M]. 冶金工业出版社, 2007.

[17] Jameson G J. New directions in flotation machine design[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(11):835-841.

[18] Jameson,Graeme John, Method and apparatus for flotation in a fluidized bed,Patent, AU2008221231, 2008.

[19] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 中南工业大学出版社, 1993.

[20] Zongfu Dai,Daniel Fornasiero,John Ralston.Particle-bubble collision models-a review.Advances Colloid and Interface Science, 85(2000)231-256

[21] Shina Goel，Graeme J Jameson.Detachment of Particles From Bubbles in an Agitated Vessel[J]. Minerals Engineering 2012(36-38)：324–330.

[22] D.R. Seaman, E.V. Manlapig, J.-P. Franzidis. Selective transport of attached particles across the pulp–froth interface Minerals Engineering 2006(19): 841–85.1.

[23] 梁冀平. 多相外循环流化床上升管内流动特性的数值模拟及实验研究[D]. 河北工业大学, 2007.

[24] 李洪钟. 流态化技术与计算机模拟[J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(9):1047-1052.

[25] 李登新. 可循环氧化剂氧化高硫高砷难选金精矿或氰化尾渣提金及综合利用[J]. 中国科技成果, 2014(3):22-22.

[26] 张祥. 二维气固湍动流化床流动特性的数值模拟[D]. 四川理工学院, 2010.

[27] 刁润丽. 磁场协助作用下纳米颗粒的流态化研究[D]. 中南大学, 2009.

[28] 韩超. 细颗粒声场流态化特性研究[D]. 浙江大学机械与能源工程学院, 2008.

[29] 宋莲英. 纳米颗粒添加组分的流态化[D]. 中南大学, 2008.

[30] 金涌. 流态化工程原理[M]. 清华大学出版社, 2002.

[31] 李洪钟, 郭慕孙. 回眸与展望流态化科学与技术[J]. 化工学报, 2013,64(1):52-62.

[32] 郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册 : Handbook of fluidization[M]. 化学工业出版社, 2008.
[33] Awatey B, Thanasekaran H, Kohmuench J N, et al. Optimization of operating parameters for coarse sphalerite flotation in the HydroFloat fluidised-bed separator[J]. Minerals Engineering, 2013, 51(4):99-105.
[34] 桂夏辉, 李延锋, 刘纯, et al. 液固流化床内颗粒自由沉降末速的试验研究[J]. 选煤技术, 2010(1):5-10.
[35] 沙杰, 谢广元, 王宏, et al. 液固流化床分选粗煤泥的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S1):178-181.
[36] 徐虎彪. 粗煤泥流态化浮选柱试验研究与流场分析[D]. 太原理工大学, 2012.
[37] Awatey B, Thanasekaran H, Kohmuench J N, et al. Critical contact angle for coarse sphalerite flotation in a fluidised-bed separator vs. a mechanically agitated cell[J]. Minerals Engineering, 2014, 60(6):51-59.
[38] 陈文刊等, 液固流化床分选粗煤泥技术发展与应用. 矿山机械, 2011(09): 第 75-79 页.
[39] G•H•卢特雷, 谢贤, 童雄,等. 高效水力分级机的研究[J]. 国外金属矿选矿, 2008, 45(3):18-23.
[40] Kohmuench J N, Mankosa M J, Thanasekaran H, et al. Improving coarse particle flotation using the HydroFloat™ (raising the trunk of the elephant curve)[J]. Minerals Engineering, 2018, 121:137-145.
[41] HydroFloat recovers coarse particles up to 6 mm[J]. Filtration + Separation, 2014, 51:11.
[42] Barbee C J. In-Plant Testing of the Hydrofloat Separator for Coarse Phospahte Recovery[J]. 2007.
[43] TESTING OF THE HYDROFLOAT SEPARATOR FOR COAL CLEANING APPLICATIONS.
[44] Fosu S, Awatey B, Skinner W, et al. Flotation of coarse composite particles in mechanical cell vs. the fluidised-bed separator (The HydroFloat™)[J]. Minerals Engineering, 2015, 77:137-149.
[45] Awatey B, Skinner W, Zanin M. Incorporating fluidised-bed flotation into a conventional flotation flowsheet: A focus on energy implications of coarse particle recovery[J]. Powder Technology, 2015, 275:85-93.
[46] Cowburn J , Harbort G , Manlapig E , et al. Improving the recovery of coarse coal particles in a Jameson cell[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(6-8):609-618.
[47] 李强, 史帅星, 张跃军. 流态化床分选设备发展与应用[J]. 矿产综合利用, 2017(3):29-32.
[48] 基于矿物差异化高效分选的柱浮选关键技术及应用.
[49] 高永明. 新型粗煤泥分选机数值模拟与试验研究[D]. 太原理工大学, 2012.
[50] 李延锋. 液固流化床粗煤泥分选机理与应用研究[D]. 中国矿业大学, 2008.
[51] 祁泽民等, 选煤工艺的新突破——粗煤泥分选机. 中国煤炭, 2008(07): 第 86-89 页.
[52] 康淑云, 我国选煤设备制造业发展现状及其对策建议. 煤炭经济研究, 2014(02): 第 25-33 页.
[53] 赵斌, 王庆功, 么强,等. 流化床煤颗粒分级试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(4):678-683.
[54] 沙杰, 谢广元, 王宏,等. 液固流化床分选粗煤泥的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(s1):178-181.
[55] 桂夏辉等, 液固流化床内颗粒沉降特性试验研究. 煤炭学报, 2010(08): 第 1374-1379 页.
[56] 桂夏辉等, 液固流化床内颗粒自由沉降末速的试验研究. 选煤技术, 2010(01): 第 5-10+77 页.
[57] 王宏等, TBS 干扰床分选机在粗煤泥分选中的应用研究. 煤炭工程, 2009(03): 第 95-97 页.
[58] 徐景田, 丁晶, 叶振. TBS 在选煤厂粗煤泥分选中的应用[J]. 应用能源技术, 2013(1):7-10.
[59] 徐凤, 张晓洲, 李云红,等. 干扰床分选机(TBS)的评述[J]. 煤炭加工与综合利用, 2008(3):1-5.