

引用格式:刘国蓉,张福亚,高自然,等.浮选柱在微细粒矿物浮选中的研究进展[J].有色设备,2024,38(3):19-23.

LIU Guorong,ZHANG Fuya,GAO Ziran,et al. Research progress of flotation columns in fine-grained minerals flotation[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2024,38(3):19-23.

# 浮选柱在微细粒矿物浮选中的研究进展

刘国蓉<sup>1,2</sup>,张福亚<sup>1,2\*</sup>,高自然<sup>1,2</sup>,侯孝安<sup>1,2</sup>

(1.北矿机电科技有限责任公司,北京100160;2.矿物加工科学与技术国家重点实验室,北京102628)

**[摘要]**浮选柱由于其对细粒级有较好的回收效果而得到广泛应用。代表性的微细粒柱浮选装备主要有 Jameson 浮选柱、FCSMC 旋流微泡浮选柱以及 KYZB 空气直充型浮选柱,三种浮选柱在矿化形式等方面有各自的特点。其中,空气直充型浮选柱的应用范围最广。本文总结了以上三种柱浮选设备在微细粒浮选领域研究和应用的最新进展,总结了各自的优缺点,为新一代微细粒浮选柱的开发提供借鉴。

**[关键词]**细粒;微泡;浮选柱;回收;矿化

**[中图分类号]**TD923

**[文献标志码]**A

**[文章编号]**1003-8884(2024)03-0019-05

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.003

随着矿产资源采选技术的不断进步以及易选资源的逐渐匮乏,我国矿产资源贫、细、杂化的问题愈发突出。细粒矿物特别是微细粒氧化矿物难以有效分选和回收,造成了矿产资源的大量浪费<sup>[1]</sup>。微细粒矿物由于质量小、比表面积大,容易造成脉石矿粒与有用矿粒之间的非选择性团聚,在浮选过程中极易造成脉石夹带<sup>[2]</sup>,并且在浮选过程中由于动量小,很难与气泡发生有效的碰撞和粘附,造成回收率低。针对以上技术难点,通过开发微细粒选矿装备,能够为微细粒浮选提供更有利矿浆和流场环境<sup>[2]</sup>,强化细粒矿物回收,通过合适的气泡发生装置产生微小气泡,更有利于与微细粒发生有效碰撞和黏附<sup>[3]</sup>。通过设备结构优化将多种矿化形式结合,提高气泡和微细粒矿物颗粒有效碰撞的概率,能够强化浮选动力学过程的发生<sup>[4-5]</sup>。

浮选柱因具有富集比高、占地面积小、维护和运行成本低等优势,在微细粒矿物回收领域发挥了重

要的作用<sup>[6]</sup>。浮选柱特有的发泡形式为微细粒浮选创造了足够多的微小气泡,同时,柱体上方的喷淋水系统为有用矿物在泡沫层中的二次富集创造了有利条件<sup>[7]</sup>。本文归纳总结了近些年来浮选柱在微细粒选矿领域的研究进展。代表性的浮选柱类型有 Jameson 浮选柱、旋流微泡浮选柱、空气直充型浮选柱以及其他新型的浮选柱。本文将介绍各种浮选柱的研究进展情况以及各自的优缺点。

## 1 Jameson 浮选柱

Jameson 浮选柱是由澳大利亚的 Jameson 教授研发的一种结构紧凑、高效率的无搅拌浮选设备<sup>[8]</sup>,自工业化以来在全球多个矿山中得到广泛的应用,其基本结构见图1。

Jameson 浮选柱为一种空气自吸型浮选柱<sup>[8]</sup>,在导管中部设置空气吸入口,矿浆在导管中高速流动时吸入空气。同时,导管内由于压力较大,矿浆中会溶解大量气体,随着压力释放,会析出大量气泡,与矿物颗粒发生碰撞和粘附。因此,Jameson 浮选柱的矿化形式主要有管流矿化和析出矿化。

河南理工大学利用 Jameson 浮选柱回收-45 μm 粒级含量占 56.5% 的煤泥,得到了精煤灰分为 10.28%,回收率超过 60% 试验指标<sup>[9]</sup>。Karagizel 等<sup>[10]</sup>采用实验室规模的 Jameson 浮选柱浮选-38 μm 的长石,将长石品位从 0.18% 富集到了 1.06%。

**[收稿日期]**2024-03-16

**[第一作者]**刘国蓉(1988—),男,湖南安乡人,高级工程师,硕士,主要研究方向为选矿装备的研究与推广。

**[通信作者]**张福亚(1989—),男,河北唐山人,高级工程师,硕士,主要研究方向为选矿装备的专属化大型化设计研究及工程转化。

**[基金项目]**“十三五”国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目资助(2022YFE012-700)。

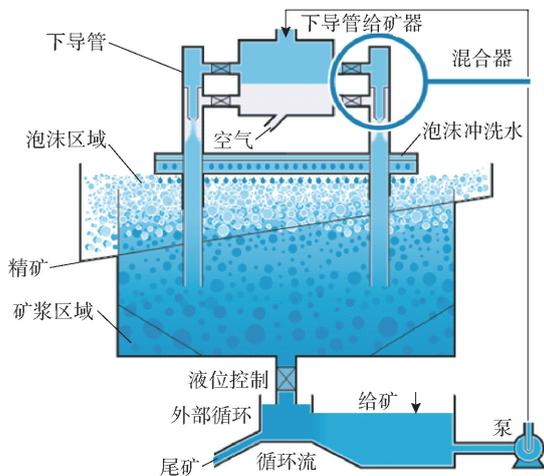


图1 Jameson 浮选柱基本结构示意图

Fig.1 Jameson Flotation Column Structure

黄光耀教授<sup>[11]</sup>在 Jameson 浮选柱的基础上,开发了 CFC 新型微细粒浮选柱,在给矿出口处做了一个具有多个通道的矿浆分配器,可保证矿浆空气均匀地分散至整个柱体内部。通过对某 -74 μm 含量占 90% 以上的选金尾矿进行回收,一次精选的精矿品位就达到了浮选机三次精选的品位。同时,回收率比常规浮选机高 3.2%。在某微细粒铜矿上试验也得到了远高于常规浮选机的试验指标<sup>[12]</sup>。

Jameson 浮选柱的气泡矿化主要发生在导管中,而不是在柱体内部。因此,其柱体高度大幅降低,首次实现了矮柱型浮选柱设计,降低了工业上流程配置的难度。但是由于导管中矿化的时间较短,也导致了浮选时间不足、回收率偏低的问题。且由于导管中矿浆流速较高,带来了导管等磨损件寿命降低的问题,增加了工业上检修的频率。

## 2 FCSMC 旋流微泡型浮选柱

FCSMC 旋流微泡浮选柱由中国矿业大学刘炯天教授团队研发,结构及工作原理如图 2 所示。柱体内部的动力学区从上到下依次为泡沫区、捕集区和旋流区。矿浆首先给入捕集区,气泡与矿物颗粒发生逆流矿化。矿化气泡上升进入泡沫区,在喷淋水的洗涤作用下发生二次富集。未被粘附的矿物颗粒进入底部锥形旋流区,锥底矿浆一部分经过砂泵输送以切向方向射入到旋流区,粗颗粒在离心力作用下向锥底运动被排掉。细颗粒经旋流作用上浮,进入捕集区与气泡再次发生碰撞和粘附,发生二

次矿化。在管流矿化、逆流矿化和旋流力场的多重作用下,细粒矿物被充分回收<sup>[13]</sup>。

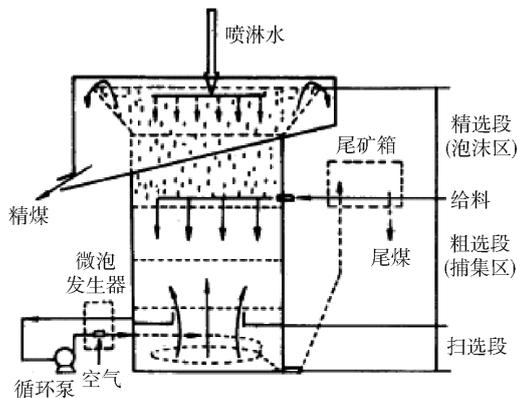


图2 FCSMC 旋流微泡浮选柱基本结构示意图

Fig.2 FCSMC Cyclonic Micro-bubble Flotation Column Structure

李晓恒<sup>[14]</sup>通过在柱体内部填充筛网填料,有效降低了气泡平均直径。王爱<sup>[15]</sup>研究了旋流锥角的影响,锥角过小,切向速度和离心强度降低,旋流浮选装置中产生无序的流体流动;锥角过大,又会造成离心强度过大和准强迫旋涡上升通量减少或消失,导致分选环境恶化。王立军<sup>[16]</sup>等对不同的涡流发生器结构进行模拟计算,发现湍流动能和湍流耗散率最高时,紊流强度最大,对煤泥的分选效果也最好。王大鹏等<sup>[17]</sup>研究发现中矿循环采用旋流方式比采用直流方式的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位和精矿回收率均有所提高,旋流方式主要促进了细颗粒的回收,离心力场可以增强细粒的矿物与气泡的有效碰撞以及降低有效浮选的下限。邵怀志等<sup>[18]</sup>对比旋流微泡浮选柱和浮选机对细粒煤泥的分选效果,柱选精煤的 -45 μm 含量比机选指标高 5.33%。除了煤泥浮选以外,张团团等<sup>[19]</sup>对 -45 μm 占 80% 的隐晶质石墨进行旋流微泡浮选柱浮选试验研究,在开路试验下,柱选一粗三扫和机选一粗六扫的精矿品位相当,且回收率高了 37%。吴焕勋等<sup>[20]</sup>对云浮公司磨矿溢流中细粒硫铁矿采用旋流微泡浮选柱进行浮选试验,结果表明旋流微泡浮选柱对于 -0.074 mm 含量为 90% 以上的微细粒硫铁矿,具有较好的适应性。

旋流微泡浮选柱主要应用在煤泥浮选领域。由于其同时具有管流矿化、逆流矿化以及旋流分级力场,大幅提高了微细粒矿物的矿化效率。但是在实际应用的过程中,为了保证管流矿化以及射流离心力场的强度,配备的砂泵能耗较高,且过流装置磨损

较快,尤其对金属矿山,矿石硬度较高,易损件的磨损速度提高,增加了选厂检修的工作量。且由于是自吸空气,存在着吸气量不足的问题。金属矿尤其是有色金属矿的浮选对充气量相比于煤矿来说更为敏感,因此充气量的不可控制约了旋流微泡浮选柱在金属矿的应用。

### 3 空气直充型浮选柱

空气直充型浮选柱的代表型号有矿冶科技集团开发的 KYZB 系列、长沙有色冶金设计研究开发的 CCF 系列以及美国艺利公司开发的 CPT 浮选柱。该类型浮选柱的动力学分区分为捕集区和分离区两部分<sup>[21]</sup>,具体的结构形式见图 3。空气通过位于柱体中下部的若干根气枪以超高速形式射入柱体内部。高速空气在与矿浆接触的过程中被分散成微小气泡,并均匀地分散在整个柱体截面上。矿浆从位于柱体中上部的给矿分配器中给入,向下运动的矿物颗粒与向上运动的气泡在柱体中发生逆流碰撞。而有用矿物被附着到气泡形成矿化气泡,上浮到泡沫区。泡沫层的上方布置有喷淋水系统,对泡沫进行洗涤,形成二次富集<sup>[22]</sup>。

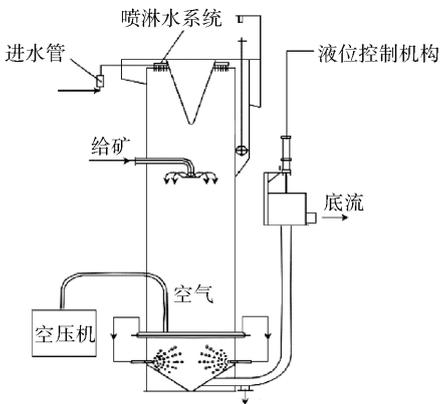


图3 KYZB型空气直充型浮选柱基本结构示意图

Fig.3 KYZB air direct charging flotation column Structure

该类型浮选柱的矿化形式主要以逆流矿化为主,因此,柱体内部的流场特征以及气泡尺寸特征是影响浮选柱性能的核心因素。沈政昌等<sup>[23]</sup>基于“浮选柱元”的理念提出在捕集区增设稳流装置,强制内部流体的柱塞流,保证上升气泡与下降的疏水性颗粒形成纯净的逆流矿化条件。史帅星等<sup>[24]</sup>发现相同位置充气速度的增大会增加充气紊流区的气泡

湍流雷诺数和颗粒与气泡碰撞的概率,为细粒矿物的矿化创造了条件。

在金川铜镍硫化物的柱机对比浮选工业试验<sup>[25]</sup>中,对于 $-8\ \mu\text{m}$ 的粒级,采用空气直充型浮选柱回收率比浮选机的指标高了一倍。对某锡石矿的重选分级溢流进行柱机对比开路试验,结果表明浮选柱一次精选的精矿品位和回收率都要好于浮选机两次精选的指标<sup>[26]</sup>。黄根<sup>[27]</sup>采用柱机联合流程回收尾矿中的硫,相比于全浮选机流程, $-54\ \mu\text{m}$ 的粒级回收率明显提高, $-20\ \mu\text{m}$ 的粒级回收率提高了将近10%。李靖<sup>[28]</sup>采用浮选柱对微细粒磷灰石进行柱机对比浮选试验,浮选柱在 $-25\ \mu\text{m}$ 中MgO的脱除效果要好于浮选机。智利有学者<sup>[29]</sup>在将柱体上部弯曲,弯曲处向下做一处矿浆出口,作为中矿出口,将从气泡中脱落的有用矿物单独回收,形成三产品浮选柱(3PC),在处理给料粒度 $-10\ \mu\text{m}$ 占50%的金矿时取得了较好的指标。有学者在浮选柱的内部加入了各种形式的带孔填料,空气通过填料时被剪切成更小的气泡,有利于细粒矿物的浮选<sup>[30]</sup>,通过对赤铁矿磁选精矿进行反浮选试验表明<sup>[31]</sup>,经一粗一精一扫流程可以得到精矿品位67.05%、回收率72.77%的指标。但充填式浮选柱的填料容易堵塞,清理困难,制约了充填浮选柱的工业应用。

空气直充型浮选柱是工业上应用最为广泛的浮选柱。充气器通过空压机提供气源,气量稳定且能够根据矿石性质和工艺流程的不同灵活调整充气量。该类型浮选柱不需要配备中矿循环泵,唯一的耗能设备为空压机,因而能耗仅为循环泵的1/3左右。充气器喷嘴作为唯一的磨损件可实现在线直接更换,且由于材质性能的提升,充气器的喷嘴寿命大幅延长。该类型浮选柱的不足在于矿化形式单一,逆流矿化需要的浮选时间相对较长,且为了保证富集效果,柱体高度往往较高,增加了工业现场厂房建设和流程配置的难度。

### 4 结论

1)3种浮选柱在矿化形式上各有不同。Jame-son浮选柱仅有管流矿化和少量析出矿化,矿化时间短,导致回收率偏低,限制了其应用范围。FCSMC旋流微泡浮选柱兼具管流矿化和逆流矿化,同时具有离心力场,微细粒矿物浮选效率较高。但由于自吸空气,吸气量偏小且不可控,对气量敏感的金属矿

适应性有待提高,且由于配备磨损较快的过流件,增加了工业上设备检修的频率。空气直充型浮选柱能耗低、设备维护方便,应用范围最为广泛,尤其在有色金属矿的精选作业,基本替代了传统的浮选机,目前在萤石、石墨以及磷矿等非金属矿山中逐步应用,并且已有部分工程实践案例。但其仅有逆流矿化,矿化所需时间较长,导致设备容积较大且柱体高度较高,不利于工业配置。

2) 新一代微细粒浮选柱的开发,首先要实现将管流矿化、逆流矿化以及析出矿化等多种矿化形式相结合,提高微细粒矿物与气泡的碰撞与粘附效率;其次是开发新型微气泡发泡装置,微小气泡是细粒矿物浮选的必要条件;再者在保证设备性能的基础上节能降耗、延长易损件的寿命以及检修的便捷度,这也是浮选柱能否扩大其适用范围的关键影响因素之一。

#### [参考文献]

- [1] 陈文胜,付君浩,韩海生,等. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(4):134-145.
- [2] Miettinen T, Ralston J, Fornasiero D. The limits of fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2010,23(5):420-437.
- [3] 何廷树,陈炳辰. 细粒浮选机的设计准则[J]. 金属矿山,1996(5):38-40.
- [4] Daniel C M. the dependency of the critical contact angle for flotation on particle size — Modelling the limits of fine particle flotation [J]. Minerals Engineering, 2010, 24 (1):50-57.
- [5] Forbes E. Shear, selective and temperature responsive flocculation: A comparison of fine particle flotation techniques [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011,99(1):1-10.
- [6] 王选毅,吴铁生,薛明向,等. 浮选柱用于白钨精选的工业试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(6):60-64.
- [7] 邱冠周,胡岳华,王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1993.
- [8] 陶长林. 詹姆森浮选柱—浮选工艺的一大技术突破[J]. 中国矿业,1995,4(1):43-48.
- [9] 焦红光,涂必训,梁增田. 应用 Jameson 浮选槽分选无烟煤泥的实践[J]. 煤炭工程, 2007(8):95-97.
- [10] Karagüzel C, Çobanoğlu G. Stage-wise flotation for the removal of colored minerals from feldspathic slimes using laboratory scale Jameson cell[J]. Separation and Purification Technology, 2010,74(1):100-107.
- [11] 黄光耀,曹玉川,李希山,等. 新型微细粒浮选机与机械搅拌浮选机的对比工业试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(2):64-66.
- [12] 曹玉川,黄光耀,杨柳毅,等. 新型微细粒浮选机分选某铜矿的试验研究[J]. 湖南有色金属, 2017,33(4):11-14.
- [13] 杨颀,霍晓丽,俞和胜. 影响旋流微泡浮选柱工作的因素分析[J]. 洁净煤技术, 2008(1):12-14.
- [14] LI X, YAN X, LI J, et al. Effect of sieve plate packing on bubble size distribution in a cyclonic flotation column [J]. Chemical engineering and processing, 2021, 168:108554.
- [15] WANG A, YAN X, WANG L, et al. Effect of cone angles on single-phase flow of a laboratory cyclonic-static micro-bubble flotation column: PIV measurement and CFD simulations[J]. Separation and Purification Technology, 2015,149:308-314.
- [16] Wang L, Wang Y, Yan X, et al. A numerical study on efficient recovery of fine-grained minerals with vortex generators in pipe flow unit of a cyclonic-static micro bubble flotation column [J]. Chemical Engineering Science, 2017,158:304-313.
- [17] 王大鹏,刘炯天,曹亦俊,等. 离心力场在胶磷矿柱式反浮选中的应用[J]. 化工矿物与加工,2010,39(10):5-8.
- [18] 邵怀志,谢广元,刘畅,等. 浮选柱与浮选机分选细粒粉煤的对比性实验研究[J]. 煤炭工程, 2011(9):103-105.
- [19] 张团团,彭耀丽,谢广元,等. 隐晶质石墨旋流微泡浮选柱与浮选机试验研究[J]. 非金属矿, 2017,40(1):7-9.
- [20] 吴焕勋,高中才. 超细粒级硫铁矿选矿实践及柱浮选探讨: 2010中国矿业科技大会[C]. 中国江苏苏州, 2010.
- [21] 沈政昌,史帅星,卢世杰,等. KYZ-B型浮选柱系统的设计研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2006(4):20-24.
- [22] 余悦,郑诏星,张跃军. KYZ浮选柱操作参数对铜浮选效率影响的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(2):76-79.
- [23] 沈政昌,史帅星,张明,等. KYZ-B浮选柱捕收区的动力学特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(3):77-82.
- [24] 史帅星,韩登峰,张跃军,等. 浮选柱内紊流强度对气泡与颗粒碰撞概率的影响[J]. 有色金属(选矿部分),

2016(4):81-86.

[25] 樊晓鹏. CCF浮选柱在金川铜镍硫化物选矿中的应用研究[D]. 西安:长安大学, 2006.

[26] 农升勤, 邓位鹏, 姚贵明, 等. 低品位细粒锡石浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014(3):37-40.

[27] 黄根, 徐宏祥, 章述广. 浮选机-浮选柱联合分选某硫铁矿尾矿试验研究[J]. 矿业科学学报, 2016(1):89-95.

[28] 李靖. 微细粒磷矿石柱浮选试验研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2017.

[29] Valderrama L, Rubio J. Unconventional column flotation of low-grade gold fine particles from tailings[J]. International Journal of Mineral Processing, 2008, 86(1-4): 75-84.

[30] 张希侠, 苏成德. 充填式浮选柱的浮选特性与前景[J]. 河北理工学院学报, 2004, 26(3):1-4.

[31] 王伟之, 陈丽平, 赵刘备, 等. 充填浮选柱在赤铁矿反浮选中的应用试验研究[J]. 矿山机械, 2014(2):97-100.

## Research progress of flotation columns in fine-grained minerals flotation

LIU Guorong<sup>1,2</sup>, ZHANG Fuya<sup>1,2\*</sup>, GAO Ziran<sup>1,2</sup>, HOU Xiaolan<sup>1,2</sup>

(1. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Flotation column is widely used because of its good fine particles recovery. The representative fine particle flotation column mainly includes Jameson flotation column, cyclone micro bubble flotation column and direct aeration flotation column. The three flotation columns have their own characteristics in terms of mineralization forms and other aspects, while the last kind is most widely used industrially. It is summarized the latest research and application progress of the above equipment in micro particle flotation area in this paper, as well as their advantages and disadvantages. And finally puts forward some personal thoughts for the development of a new generation of fine particle flotation column.

**Key words:** fines; micro-bubble; flotation column; recovery; mineralization



## 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591、63933053 联系。

《有色设备》编辑部