



浮选柱的研究与应用

王 宾, 蒋 昊

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 随着国内矿产资源不断开发, “贫”、“细”、“杂”的难选矿石愈来愈多, 这对选矿设备的性能提出更高的要求。浮选柱是浮选技术中的一种重要浮选设备, 具有投资小、结构简单、效率高等优点, 其研发对于资源利用具有重要意义。介绍了浮选柱的基本结构、基本工作原理和主要操作参数; 归纳了浮选柱的发展历程及分类; 重点阐述了 Jameson 浮选柱、旋流-静态微泡浮选柱、充填式浮选柱的基本结构与工作原理、优缺点、研究现状和应用进展; 归纳了浮选柱的气泡发生器、数学模型、按比例放大及自动控制等相关研究进展; 介绍了几种新型浮选柱的特点及应用。最后, 指出了浮选柱的未来发展应是气泡发生器的研制与应用、综合力场的结合、数学模型及按比例放大、自动化等方向。

关键词: 浮选柱; 浮选; 应用; 气泡发生器; 进展

文章编号: 1004-0609(2021)-04-1027-15

中图分类号: TD923

文献标志码: A

引文格式: 王 宾, 蒋 昊. 浮选柱的研究与应用[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1027–1041. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36566

WANG Bin, JIANG Hao. Research and application of flotation column[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(4): 1027–1041. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36566

近年来, 随着国民经济的持续发展, 国内矿产资源的不断开发, 我国品位低、嵌布粒度细、矿物组成复杂的矿石占比例日益增大。冶金、材料等用户对矿产资源的质量要求也越来越高, 加上国家对环境保护的重视, 高开发、低利用、高排放的这种资源开发模式制约了资源合理应用, 使得矿业工程面临着前所未有的挑战, 这对选矿设备的性能提出了更高的要求。浮选技术是选矿的最重要的工艺之一, 大部分有色金属矿石都需要采用浮选技术来实现选别, 而浮选柱是浮选技术中的重要浮选设备之一, 其发展程度决定了资源开采的效率。浮选柱作为一种高效浮选设备具有以下优点: 1) 占地面积小, 投资小; 2) 浮选速度快, 浮选流程短; 3) 泡沫层厚度、气泡大小与数量可调性好; 4) 矿浆平稳, 搅动较小; 5) 气固碰撞与分离效果好; 6) 富集比大、回收率高。由于浮选柱的这些优点, 其广泛应

用在各种物料的分选工艺中。但实际上浮选柱从 20 世纪初诞生后, 其发展历程经过几次波折, 直到近年来浮选柱技术及浮选理论的不断成熟, 浮选柱才逐渐又一次成为国内外浮选设备中研究的热点, 也因此拥有了更加广阔的应用前景。

1 浮选柱的基本原理、主要操作参数

1.1 浮选柱的基本结构与基本工作原理

常规的浮选柱(如图 1 所示)结构简单, 其通常由给矿器、矿浆分配器、气泡发生器、尾矿管、冲洗装置等组成。柱高通常在 9~15 m 之间, 柱直径在 0.5~3.0 m 之间, 柱上部为圆柱形或矩形, 柱下部为圆锥形。常规浮选柱多数是逆流型浮选柱, 即柱内矿粒与气泡采用逆流接触的流动方式, 这种流动方式可以为气泡提供大量捕收矿粒的机会, 有利

于气泡矿化；矿粒和气泡的逆向运动绝对速度慢，相对速度高，这种运动状态紊流较弱，对气泡的矿化提供了较理想的流体力学条件^[1]。

浮选柱工作时，将经药剂处理好的矿浆从柱体中上部的给矿器均匀加入，矿粒受自身的重力作用向下沉降，气泡发生器将经过空气压缩机处理过的空气从底部往上射出，气泡发生器射出的小气泡穿过矿浆向上升浮，在矿粒和气泡的逆向运动下，疏水性矿粒选择性附着在气泡上，并随气泡浮升至矿浆液面后聚集，形成泡沫层，再由冲洗水冲出成为精矿，非泡沫产品则从柱体底部作为尾矿排出^[2]。

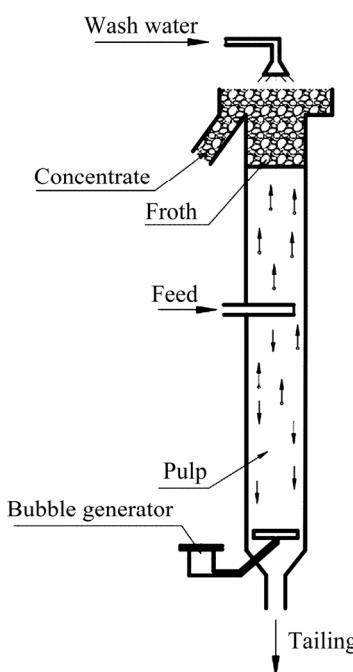


图1 常规浮选柱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional flotation column

1.2 浮选柱的主要操作参数

在一定范围内，浮选柱操作参数的变化能够影响最终选别的指标。随着人们对浮选柱操作技术的认识不断加深，人们逐渐认识到浮选柱的主要操作参数包含充气量、冲洗水流量、泡沫层厚度等^[2-3]。

1) 充气量。合适的充气量能有效提高气泡与矿粒的碰撞概率，从而达到提高产品回收率的目的。但充气量过大时，易造成机械夹杂等问题，过小时又会造成矿化不充分等问题。因此，充气量通常被认为是浮选柱中最灵活、最敏感的参数。

2) 冲洗水流量。合适的冲洗水能够及时带走泡

沫层中的精矿，强化泡沫的二次富集作用，提高分选效果。冲洗过程中，少部分的冲洗水随泡沫一同溢出，但其余大部分水则通过泡沫向捕集区流去，导致矿浆再循环和环流，降低精矿品位。尾矿中的单位面积水量与给矿中的单位面积水量之差称为偏流(Bias)。为了有效地进行分选，生产中常采用正偏流，即尾矿流速大于给矿流速。

3) 泡沫层厚度。泡沫层厚度直接影响精矿品位，操作范围通常在80~150 cm之间。泡沫层的厚度增加可以加强泡沫二次富集作用，提高浮选的选择性，但如果泡沫层过厚，可能会发生泡沫塌陷和精矿泡沫排出困难等问题，导致捕集区的容积减少，降低回收率。

2 浮选柱的发展历程及分类

2.1 浮选柱的发展历程

20世纪60年代，由于该设备具有结构简单、占地小、投资小、能耗低等优点，其迅速盛行在中国、美国、苏联和澳大利亚等国家，但由于当时技术条件的限制，无法解决如气泡发生器易堵塞、易磨损和充气不均匀等问题，浮选柱未能持续有效推广，其发展处于停止状态^[4-6]。

20世纪80年代以后，为了提高浮选指标，解决浮选柱中的以下缺陷^[7]：1) 矿物解离不充分，粗颗粒往往较难悬浮，气泡与颗粒接触几率小，为此，提高品位往往需要损失回收率；2) 气泡发生器易损，维修成本较高，且常需停机维修，影响生产；3) 矿浆pH值对气泡发生器影响较大，在高碱度时易堵塞气泡发生器；4) 浮选效果受化学性质影响大，黏度大的矿浆会使得细粒脉石矿物长时间在柱内留存，导致分选效果被恶化。美国、加拿大和澳大利亚等矿业强国先后将研究方向重新转向浮选柱，使得浮选柱技术和浮选理论得到不断发展、完善，先后获得重大专利技术100余项，许多性能优良的浮选柱相继出现，国外如澳大利亚的Jameson浮选柱^[4]，美国MTU型充填介质浮选柱^[8]，加拿大的CPT浮选柱等^[9]；国内如北京矿冶研究总院的KYZ浮选柱^[10]、长沙有色研究总院的CCF浮选柱^[11]、中国矿业大学的FCSMC旋流-静态微泡浮选柱^[6]。

目前，世界上浮选柱的使用较为普遍，中国是

世界上安装和使用浮选柱最多的国家,浮选柱已成功应用于铁、铜、锌等金属矿浮选领域和煤、磷、石墨等非金属矿领域^[5, 12]。未来,随着浮选柱的更新换代,性能逐年提高,浮选柱的入料范围将从细粒级向粗粒级扩展,将会用于更多种类物料的分选。

2.2 浮选柱的分类

浮选柱的种类较多,其结构各有不同,但差异主要体现在柱体高度、矿化方式、成泡方式、槽体数、气泡发生器位置等方面。

1) 按柱体高度分类。根据浮选柱高度可分为矮、中高和高共计三种柱型。矮柱型如 Jameson 浮选柱、全泡沫浮选柱^[13]; 中高柱型如 FCSMC 旋流-静态微泡浮选柱、KYZ 顺流喷射式浮选柱等; 高柱型如 CCF 浮选柱、MTU 充填式浮选柱等。

2) 按矿化方式分类。浮选柱按矿化方式分类可分为逆流-碰撞矿化型、旋流-碰撞矿化型、管流或离心-碰撞矿化和多种矿化组合型。逆流-碰撞矿化型如 CPT 浮选柱、CCF 浮选柱、全泡沫浮选柱等; 旋流-碰撞矿化型如旋流充气浮选柱; 管流或离心碰撞-矿化型如 Jameson 浮选柱、KYZ 喷射式浮选柱等; 多种矿化组合型如 FCSMC 旋流-静态微泡浮选柱。

3) 按成泡方式分类。浮选柱按成泡方式可分为空气分割型、空气射流型、气-液混合型等。空气分割型如 MTU 充填介质浮选柱; 空气射流型如 CPT 浮选柱、CCF 浮选柱等; 气-液混合型如 FCSMC 旋流-静态微泡浮选柱、Jameson 浮选柱等。

4) 按槽体数分类。浮选柱可以根据槽数分为单槽和多槽,其中单槽浮选柱应用较为广泛,如 Jameson 浮选柱等; 多槽浮选柱如环型充气浮选柱^[14]等。

5) 按气泡发生器位置分类。浮选柱还可以分为内部充气型和外部充气型两种。

3 浮选柱研究与应用的新进展

目前,浮选柱在结构和应用等方面均取得了很大的进展,新进展中重点针对现有浮选柱的柱体形状、气泡发生器、数学模型等方向进行改进或创新,

通过改变柱体结构来探索更有利于选别的流场,或从成泡方式、矿化方式等方面进行改进和创新。同时,随着计算机科学的不断发展,越来越多的计算机辅助技术可以用于浮选柱的设计中,从而使得浮选柱的设计更符合机械设计准则。

3.1 几种典型浮选柱研究及应用进展

20世纪80年代后,国内外相继出现许多优秀的浮选柱,其中喷射型、微泡型、充填式浮选柱结构新颖、性能优越,并在工业上取得较多应用,故下文主要针对这几类浮选柱相关研究进展及应用进行介绍。

3.1.1 喷射型浮选柱

喷射型浮选柱与常规浮选柱差别主要体现在气泡发生器上,喷射型浮选柱中的气泡发生器利用射流原理产生气泡,即将处理过的矿浆加压后高速射出,从而在喷嘴前产生一片负压区后吸入空气产生大量活性气泡。喷射型浮选柱中以结构新颖、性能优越的 Jameson 浮选柱为典型代表。

1) Jameson 浮选柱的基本结构与工作原理

Jameson 浮选柱是由澳大利亚新南威尔士纽卡斯尔大学的 Jameson 教授研制,其结构示意图如图 2 所示^[15],该设备不仅是喷射型浮选柱的代表,更是浮选柱研究的重大突破,该设备将浮选柱高度范围重新定义(柱高仅 1.5 m),并在给矿方式和分选机理上有所创新,目前广泛应用在铅锌浮选、煤浮选、铜浮选等领域。该设备主要由柱体(或槽体)和下导管组成,其中下导管的顶部内装有混合头,混合头内设有给料口、喷嘴组件及空气吸入口。工作时,将预先调好的矿浆用泵从下导管中的混合头内打入,矿浆高速通过喷嘴形成负压,从而吸入空气产生气泡,矿粒和气泡在下导管内矿化,并从下导管底口排至分离柱内,然后矿化气泡上升至泡沫层,经冲洗水精选后进入精矿槽,尾矿则从柱体底部的尾矿口排出。

2) Jameson 浮选柱的优缺点

与常规浮选柱相比,该设备有以下优点^[4, 16]:

1) 气容率高和微泡量大,矿粒矿化过程发生在下导管内,气容率高达 40%~60%,并且有大量活性微泡析出,有利于细粒浮选; 2) 生产能力大、占地面积小,由于气泡矿化主要发生在下导管,因此可降

低柱体长径比;3)微细粒分选效果好,矿粒在下导管中停留时间很短,减少了精矿矿粒氧化作用的影响,同时气泡更小,泡沫层更厚,改善了精选;4)投资小、节能高效,整机动力仅为一台给料泵,通过负压吸入空气,省去了充气设备。虽然 Jameson 浮选柱有着与众不同的优点,但其也存在以下缺点:

1)喷嘴磨损较快,处理粗颗粒时易堵塞;2)回收率偏低,缺少中矿循环,尾矿需多级反复再选才可达到合格指标;3)矿化气泡易短路,由于下导管在分离槽内插入深入较大,容易造成矿化气泡短路,使有用矿物进入尾矿。

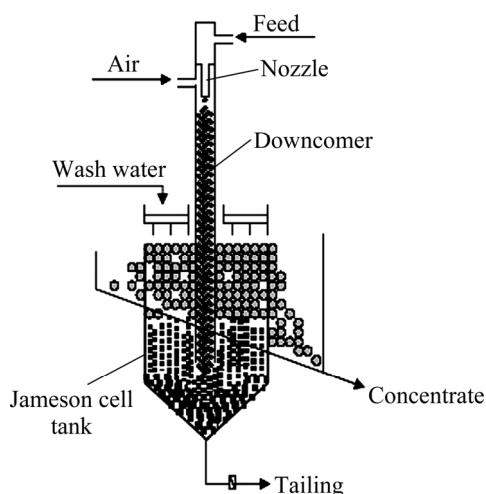


图 2 Jameson 浮选柱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Jameson flotation column

3) Jameson 浮选柱的研究现状

为进一步提高 Jameson 浮选柱的浮选效率,解决其实际应用中存在的缺点,许多学者对 Jameson 浮选柱进行了更深入的理论研究,其中主要有计算机辅助模拟、浮选动力学、结构改进等方面。SAHBAZ 等^[17]对 Jameson 浮选柱中的粗粒浮选进行研究。利用速度梯度计算方法,研究下导管向分离槽排放的流体的流动特性,建立了预测分离槽速度梯度的数学模型,即湍流模型,并将悬浮颗粒最大尺寸的实验结果和模型计算结果进行对比。结果表明,该模型可以准确预测柱内粗粒浮选的湍流大小,为改善 Jameson 浮选柱的粗粒浮选提供一定理论依据。

ZARGARAN 等^[18]利用实验室规模 Jameson 浮选柱进行顺流浮选柱中的气液两相滑移速度的测定,结合 CFD 模拟得到的数据对漂移流(Drift-flux)

模型进行改进,然后在 CFD 上使用该模型计算滑移速度,并将仿真结果与实验结果进行对比。结果表明,向下顺流浮选所产生的气泡尺寸较小,气含率比逆流浮选时的高;较高的气含率和较低的滑移速度的结合,使得下导管气泡捕获的细粒脱附可能性更小。

LI 等^[19]为提高 Jameson 浮选柱在低气压高海拔地区锂辉石的浮选效果,对 Jameson 浮选柱进行改进,将压缩空气通过微孔管形成微泡替代高速矿浆形成微泡,并对改进后的 Jameson 浮选柱进行性能测试。结果表明,改进后的 Jameson 浮选柱能有效减少低气压对微泡产生的影响,与传统机械式浮选机相比,设备改进后的高海平地区浮选指标有了较大提高。

ZHU 等^[20]以实验室 Jameson 浮选柱为研究对象,使用气泡测量系统研究了浮选柱中下导管和上升管的气泡尺寸的变化,讨论了甲基异丁基甲醇(MIBC)浓度、取样高度、气液流量等对下导管和上升管中气泡尺寸的影响。结果表明:1)气泡尺寸随着 MIBC 浓度的增加而减小直至临界气泡兼并浓度,在临界气泡兼并浓度以上,气泡尺寸基本保持不变;2)气泡的大小变化与下导管的雷诺数密切相关,雷诺数的大小取决于气体流量与液体流量;3)气泡上升过程中,上升管的气泡尺寸随着取样高度的增加而增大。

除了 Jameson 浮选柱的理论研究,国内外研究人员还在 Jameson 浮选柱的基础上研制或改进了许多新型浮选柱。卢世杰^[10]根据射流理论研制出 KYZ 型顺流喷射浮选柱,在分选粗颗粒时效果较好。工作时,通过射流作用吸入空气,柱内的矿浆和气泡作同向流动,迫使气泡克服重力向下运动,并且柱槽底设有反射假底,能将高速水流带出的空气粉碎成气泡,进一步分散到整个分选槽。

周凌锋等^[16, 21]基于 Jameson 浮选柱设计了一种新型细粒浮选柱,该设备结合“矿浆适度紊动”比“矿浆静态”更有利于细粒浮选的新观点,给矿方式改为从下部锥形漏斗加入,并加装中矿选别系统,可实现中矿有效循环,使得原矿与中矿发生对流冲撞从而产生适度紊流,提高了分选效果。

北京宾隆矿业新科技开发有限责任公司研制了一种旋流喷射浮选柱,喷嘴与射流泵类似,但该

设备与其他喷射浮选柱相比,最显著的特点在于气泡发生器中的喷嘴内部添加了螺旋导流片,可以通过调节导流片的数量与形状来适应不同的矿物^[22]。新疆某铜镍选矿厂处理尾矿中应用BG-1型旋流喷射浮选柱粗选进行铜镍粗选,经过一粗三精的流程,可得铜镍品位分别为1.21%和2.72%,铜镍回收率分别为12.30%和16.59%的铜镍混合精矿^[23]。

BILIR等^[24]基于前人对Jameson浮选柱的研究,确定了影响粗粒浮选回收率下降的因素,设计了射流扩散器浮选柱(JDFC),通过扩大下导管的末端直径来降低下导管末端的湍流度。同时,该柱设计中利用流体力学原理,确定了最合适的扩散器几何形状,以提供从下导管到分离槽的最佳流量,提高了浮选回收率,并与Jameson浮选柱进行回收某滑石矿的对比试验,结果表明JDFC浮选柱浮选粗粒的性能更好。

4) Jameson浮选柱的应用进展

古汉山选煤厂应用Jameson浮选柱分选无烟煤泥,该厂入浮煤泥较细,采用直接浮选工艺,在入浮煤泥灰分29.5%时,可得浮选精煤产率61.43%,精煤灰分10.28%,与传统的机械搅拌式浮选机XJM-S12相比,处理量提高了两倍多^[25]。应用实验室规模的Jameson浮选柱在土耳其爱琴海(Aegean region)Kaltun矿业公司的长石矿样中,采用一段粗选和分级浮选流程去除含有铁和钛的脉石矿物,从 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 含量1.06%的矿样中,获得了 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ 含量0.18%、回收率70%的钠长石精矿,成功地获得适合陶瓷工业的钠长石^[26]。土耳其的屈塔希亞(Kutahya)Emet-Espey硼加工厂处理尾矿中应用Jameson浮选柱分选硬硼钙石,在给矿 B_2O_3 品位36.8%的条件下,可获得精矿 B_2O_3 品位为45.42%, B_2O_3 回收率为98.47%^[27]。

3.1.2 微泡型浮选柱

微泡型浮选柱利用特殊的气泡发生器,使矿浆产生压差后生成大量细碎、均匀的微泡。微泡浮选有较好的分选效果,主要体现在^[1]:1)在一定的条件下,可以减少气泡尺寸,有利于增加气-液界面,增加微细粒间的碰撞和黏附概率,有利于微细粒矿物的浮选;2)浮选的粒度下限与气泡的直径成正比,气泡尺寸的减少就相当于降低了浮选的粒度下限,因此微泡的形成是微细物料回收率提高的先决

条件;3)射流产生的微泡直径较小,能够有选择性地优先在疏水矿物表面析出,微泡周围多呈层流状态,使得微细物料容易吸附且不易脱落。微泡浮选的这些优点,使得微泡型浮选柱成为近些年研究的热点。

1) 旋流-静态微泡浮选柱的基本结构与工作原理

目前,相关微泡浮选设备以刘炯天院士牵头研制的旋流-静态微泡浮选柱(FCSMC)为典型代表,其结构示意图如图3所示^[6]。该设备可进行多次矿化,具有选择性好、效率高、能耗低、维护方便等优点,应用于细粒煤矿分选和磁铁矿、铜矿、白钨矿等矿物分选中。旋流-静态微泡浮选柱主要由柱分离装置、旋流分离装置、射流管浮选装置三部分组成。工作时,矿浆从中上部给入,在重力作用下向下运动,射流管浮选装置通过射流原理将气泡沿与柱体相切方向从气泡发生器射出,在柱分离区下方形成旋流力场,这种旋流力场加速了气泡在径向的分散,同时向上运动的气泡与向下运动的矿粒碰撞矿化时,也能够形成一种表面分选,它即形成了气泡与矿粒的分离,又形成了矿粒按密度的径向分布,同时柱分离区填充筛板和立管,为粗选和精选提供了低紊流环境,精矿泡沫上浮后冲洗水冲出,尾矿则从底部排出^[6]。

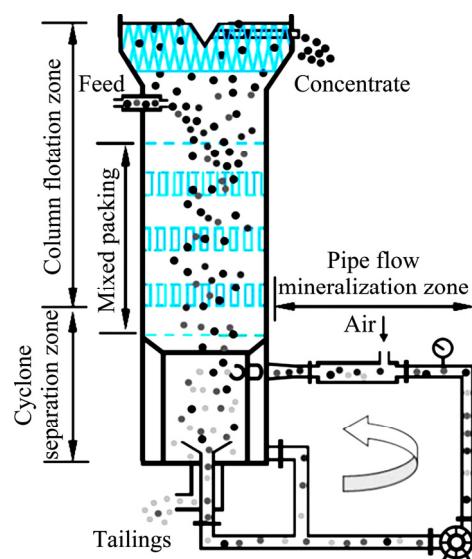


图3 旋流-静态微泡浮选柱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cyclonic-static micro-bubble flotation column

2) 旋流-静态微泡浮选柱的优缺点

与其它浮选柱相比,该设备有以下优点:1)采用自吸射流发泡原理形成微泡,提高细颗粒矿化效率,进气量易调节;2)通过静态化与混合充填构建了柱体内“静态”分离环境,对微细颗粒浮选效果好。缺点是耗水量较大,干旱缺水地区不适用,部分构件易磨损^[28],处理量较小。

3) 旋流-静态微泡浮选柱的研究现状

旋流-静态微泡浮选柱(FCSMC)是我国自主研发的浮选柱,因为微泡技术分选效果优异,该类浮选柱在市场上有一定占有率,但由于壁厚磨损严重及处理量较小等问题,该类浮选柱性能未能发挥完全。目前,FCSMC浮选柱的相关研究仍有待深入,现研究方向主要有浮选动力学、结构改进、计算机辅助模拟、综合力场结合等。胡卫新等^[29]对旋流-静态微泡浮选柱气含率的影响因素进行研究,采用压差法分别研究了循环压力、进气量和起泡剂浓度三个因素对气含率的影响,采用正交实验设计法对影响气含率的三个因素同时进行研究。结果表明,气含率均随三个因素增加而呈上升趋势,其中起泡剂浓度影响最显著,该研究对浮选柱气含率的有效调节起到一定指导作用。

ZHANG 等^[30]在 FCSMC 浮选柱中充填了引流介质,并进行 FCSMC 浮选柱流动特性的流体动力学研究。该研究利用 CFD 和单相模型进行了 FCSMC 连续相的流体动力计算,对比分析了 FCSMC 浮选柱和充填浮选柱的流动特性,将流体动力学与颗粒-气泡分离相联系,揭示了引流介质充填 FCSMC 浮选柱提高浮选回收率的机理。结果表明,引流介质充填 FCSMC 浮选柱能够将湍流分离,有利于颗粒从弱流中分离,进而有利于颗粒的附着,能够增强 FCSMC 浮选柱的浮选性能。

WANG 等^[31]为提高旋流-静态微泡浮选柱的细粒矿物回收率,设计了带有涡流发生器(VG)的新型管流装置。通过 CFD 模拟研究了 VG 对管流装置内湍流动能和湍流耗散率的影响,优化了新型管流装置。结果表明,通过 VG 产生的流向涡量能改善管流装置的湍流环境,VG 相邻阵列之间的交错布置是最佳排列方式,改进后的结构在临环选煤厂的煤泥进行浮选,可以提高浮选精煤产率和可燃物回收率,从而提高浮选性能。

李超等^[32]在旋流-静态微泡浮现柱中引入脉冲磁场机构,该机构可在柱分选段产生脉冲磁场,使得矿浆中的磁性矿物反复磁团聚、磁分离,解决了磁性矿物中脉石矿物夹杂的问题,这种带有综合力场的磁浮选改善了分选效果。LIAO 等^[33]在浮选柱的基础上加装六个可产生脉冲磁场的外部线圈,进行磁铁矿反浮选试验,探讨了磁场强度、开关频率和开关时间比三个参数对磁选效果的影响。结果表明,在确定了脉冲磁场的最佳参数后,加装脉冲磁场使得铁精矿的 Fe 回收率和 Fe_t品位分别比无磁场时的提高了 1.12% 和 4.22%。

4) 旋流-静态微泡浮选柱的应用进展

某难选钼矿应用旋流-静态微泡浮选柱浮选微细粒级别的钼矿石,经过一粗二精的流程,在原矿平均 Mo 品位为 0.181% 的条件下,可得平均精矿 Mo 品位 25.32%, Mo 回收率 54.58% 的钼精矿^[34]。柿竹园钨钼铋萤石复杂多金属矿采用柱机联合浮选流程浮选钨矿,采用 FCSMC 浮选柱、JJF 浮选机和 SF 浮选机联合浮选,将原来一粗一扫流程改为一粗、一精、一扫,精矿直接返回浮现柱的流程,工艺改造后的钨粗选回收率提高到 76.13%,较先前的钨粗选回收率提高了 10.42%,钨总回收率提高到 63.96%,较先前的提高 10.78%,年增效益 3124 万^[35]。太西洗煤厂应用 FCSMC-4500 型浮选机对细煤泥浮选,试验结果表明该柱对 0.045~0.074 mm 粒级细煤泥浮选效果较好, FCSMC-4500 型浮选柱投入使用后可得浮选精煤灰分 8.14%, 精煤产率 51.63%, 尾煤灰分 51.84%, 浮选精煤数量指数达 90.34%, 浮选完善指标达 52.99%, 每年可为企业增收 751 万元^[36]。

3.1.3 充填式浮选柱

1) 充填式浮选柱的基本结构与工作原理

充填式浮选柱最早是由美国密西根技术大学的杨锦隆教授研制^[2],其结构示意图如图 4 所示,该浮选柱在柱内装有特定填料,填料通常为波纹板或槽纹板,填料材料通常为金属或塑料等,浮选柱内的充填板层层排列,互相呈 90°配置,形成大量细小曲折的空道,使得矿粒和气泡接触时间更长,接触更为紧密,改善了分选效果,广泛应用于各类矿物浮选及废水处理中。工作时,矿浆从柱体中部给入,压缩空气从柱体底部通入,顶部设有喷水装

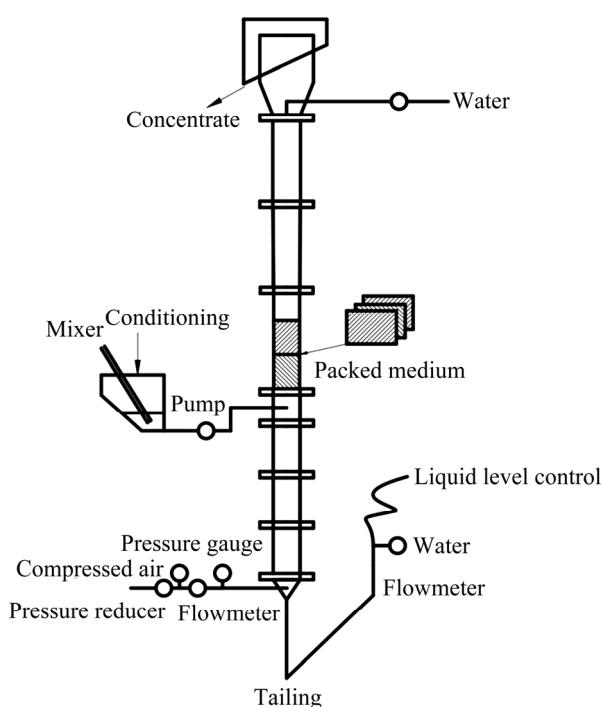


图4 充填式浮选柱示意图

Fig. 4 Schematic diagram of packed flotation column

置,精矿从顶部溢出,尾矿则全部从底部排出。

2) 充填式浮选柱的优缺点

与其他浮选柱相比,该设备具有以下优点^[1,37]:

1) 不需要气泡发生器,因此不会发生气泡发生器堵塞的问题;2) 柱内存在显著的“柱壁效应”,可减缓气泡的兼并;3) 泡沫区更加平稳,能够克服强烈紊流导致“翻花”、“沟流”等不利现象;4) 由于充填板的作用,使得气泡粒度组成基本保持不变,克服了传统设备气泡易兼并的问题。但同时,充填式浮选柱也存在以下的一些缺点:1) 波纹材料磨损较快,处理带有固体悬浮颗粒的物料时易造成内部堵塞,维修较困难;2) 处理量小,由于柱内填充满了充填介质,柱体的有效容积变小,设备的处理量有所减少;3) 气泡最小尺寸受充填介质流道尺寸与孔径限制。

3) 充填式浮选柱的研究现状

目前,充填式浮选柱的充填介质堵塞、充填介质磨损严重等问题未能完全解决,这使得充填式浮选柱工业上的应用较少,微泡型浮选柱少,但如果充填材料或充填方式能够进一步改进优化,有效解决以上问题,这种充填式浮选柱能凭借其独特的优点在工业上实现更多的应用。目前,为改进充

填式浮选柱性能,相关研究人员进行了浮选动力学、充填介质、计算机辅助模拟等研究。ZHANG等^[38]对充填浮选柱中捕集区的颗粒停留时间分布进行相关研究,进一步探讨浮选过程中的流态与返混现象,采用脉冲示踪法分析矿物停留时间曲线,进行串槽模型与轴向弥散模型数据拟合比较,并研究操作参数对颗粒停留时间分布的影响。结果表明,串槽模型有较好的拟合效果,当保持较高的表面气体流速或较低的捕集区高度时,颗粒的返混增大,冲洗水量的变化对停留时间分布变化则影响较小。

欧乐明等^[39]根据充填介质、微泡发生等理论研制了水平充填式浮选柱,采用了液位上升法、电导法等研究了表观气速、表观液速等因素对水平充填式浮选柱的关键参数气含率及其分布的影响,证实了水平填充可以降低气泡紊流程度,为水平式充填浮选柱工艺应用提供了可靠的设计依据。

王黎伟^[40]采用分批收集法进行充填浮选柱的浮选动力学研究,通过研究不同充气速度下的浮选过程随时间的变化,选用合适的动力学模型,并将动力学模型常数与气含率关联,得到捕集区含气率与浮选动力学常数的函数关系式,提高了模型实用性,为工业生产提供了一定的理论基础。

4) 充填式浮选柱的应用进展

某赤铁矿在微细粒赤铁矿反浮选流程中应用充填式浮选柱,在给矿 Fe_t 品位 42.15% 的条件下,经过一粗一精一扫的流程,可得精矿 Fe_t 品位 67.05%、产率 45.75%、 Fe_t 回收率 72.77%,扫选尾矿 Fe_t 品位降至 11.25%。同样的给矿条件下,应用 XFD 型单槽浮选机进行对比试验,结果表明充填式浮选柱在降低尾矿品位方面效果更为显著^[41]。某磁赤铁矿选厂应用 $d 50 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 的充填式微泡逆流接触式浮选柱,进行赤铁矿混磁精矿的阳离子反浮选试验,在给矿 Fe_t 品位 39.89% 的条件下,经过两粗一精一扫的流程,可得精矿 Fe_t 品位 66.07%、产率 42.17%、 Fe_t 回收率 69.82%,扫选尾矿 Fe_t 品位降至 13.04%^[42]。

3.2 浮选柱气泡发生器的研究进展

气泡的尺寸对浮选效果有着显著影响,而浮选

柱产生气泡大小由气泡发生器、充气速率、起泡剂等因素决定。气泡发生器作为浮选柱中的核心构件，其结构特点和性能直接与整机的分选效率挂钩。目前，气泡发生器的发展趋势由早期的内置式向外置式发展，由停产更换向不停产更换发展。浮选柱常用的发泡方式主要有^[1, 43]：1) 剪切接触发泡；2) 气体通过多孔接触发泡；3) 降压或升压发泡；4) 射流发泡；5) 电解发泡；6) 超声波发泡。

3.2.1 浮选柱内部气泡发生器

早期研制的气泡发生器多为内部气泡发生器，其主要有^[44]：1) 过滤盘式气泡发生器。在盘式过滤机的过滤盘上蒙一层滤布，水平置于浮选柱底部，气体由中轴管导入，该气泡发生器产生的气泡较均匀，但易磨损、易堵塞；2) 立管气泡发生器。将多个直径40~75 mm、高300~500 mm的立管均匀分布于浮选柱底部，并与空压机管网相连接，每个立管上下段界面装有多孔介质材料，因矿泥容易在多孔介质表面沉淀，此气泡发生器极易堵塞；3) 砾石床层气泡发生器。将直径8~20 m的砾石置于上下两层筛子之间，组成厚300~600 mm的砾石床层，空气通过矿层间隙产生气泡，堵塞较轻，但产生的气泡直径大；4) 电解气泡发生器。通过在浮选柱底部电极的电解作用产生气泡，该种气泡生成方式可用于工业水处理、细粒矿物泡沫浮选等。

目前，内部气泡发生器未能有效解决易堵塞、更换困难等问题，因此相关研究较少，科研人员的研究目光逐渐转向起泡性能强、易更换、不易堵塞的外部气泡发生器。

3.2.2 浮选柱外部气泡发生器

外部气泡发生器^[43~44]具有耐磨、易换修等优点，逐渐成为研究的主流，其主要有自吸式微泡发生器、喷射式气泡发生器、剪切混合式气泡发生器、旋流器式气泡发生器等。

1) 自吸式微泡发生器。自吸式微泡发生器的研制基于射流泵，利用射流原理产生气泡，即将处理过的矿浆加压后从喷嘴高速射出，高速射流造成混合室内负压，空气不断被自吸入混合室，同时空气在喉管内的矿浆湍流作用下形成微泡并与矿浆实现矿化，自吸式发泡能耗通常较高。近年来，刘佳林^[45]对旋流-静态微泡浮选柱的自吸式气泡发生器

进行改进，设计了一种微孔陶瓷气泡发生器，通过空气压缩机压入气体，空气通过微孔陶瓷产生稳定细小的气泡，具有操作简单、能耗低、易调节等优点。

2) 喷射式气泡发生器。喷射式气泡发生器通常可分为水/空气、空气喷射式气泡发生器两种。工作时，将空气和水流或将水流单独高速注入混合室后，从喷嘴排出产生气泡。常见的水/空气的气泡发生器有 TurboAir、Flotair、CESL 三种^[44]。近年来，长沙有色冶金研究设计院研制了一种空气喷射式气泡发生器，其喷嘴采用了渐开线变孔径式喷嘴，产生气泡大小微细且均匀，喷嘴耐磨，枪管不易堵塞，可以在不停产的条件下维修更换^[11]。

3) 剪切混合式气泡发生器。该类常见的气泡发生器有 Minnovex 静态混合器、Microcel 气泡发生器等。Minnovex 静态混合器利用高速流动的矿浆和气体在剪切力作用下形成气泡，具有耐磨、易于更换和在线调控气泡大小的特点，但加工精度要求较高。美国布莱克本选煤与选矿中心研制的 Microcel 气泡发生器内装有静态混合器，当混合液通过内部装有固定叶片的静态混合器时，混合液受到固定叶片强力剪切作用形成的均匀气泡^[46]。

4) 旋流器式气泡发生器。工作时，将压缩过的空气从中心管给入，利用离心力使矿粒向槽壁移动，离心力使矿浆和气泡充分混合，空气既可自流给入，也可压入。优点是气泡向内侧上升，捕收速度快；对细粒矿物浮选效果好，不易堵塞。缺点是粗粒和高密度矿物的分离时则需慎用、气泡空间分布不均匀。

3.3 浮选柱数学模型、按比例放大及自动控制的研究进展

3.3.1 浮选柱的数学模型、按比例放大

进行浮选柱数学模型的研究有两个目的^[47]：1) 物料特性和操作参数已知时，预测选别指标；2) 用于浮选柱的设计放大和浮选过程的控制及优化。设计中应用可靠的按比例放大设计依据可以设计出分选性能更好的浮选柱。浮选按比例放大研究通常可以分成动力学和机械设计两大类^[48]。目前，这两个领域的研究区别主要在于：动力学放大通常很少

考虑槽体的设计或尺寸,而只单方面考虑操作方面的因数,如平均停留时间;机器设计放大则研究设备的设计、形状和尺寸对性能的影响,主要关注这些变量对流体力学的影响。

李彪等^[49]应用 Design-Expert 正交设计软件建立了浮选柱精煤产品数质量的数学模型。应用 FCMC 旋流微泡浮选柱进行了入浮浓度、循环泵压力及柱高对浮选柱精煤产品数质量影响关系的单因素试验,在单因素试验基础上又进行了多因素正交试验,然后在正交试验基础上建立精煤产品数质量的数学模型,最后根据模型进行预测并与实际试验结果对比。结果表明,预测精煤灰分和产率与试验结果平均标准误差分别为 0.10% 和 0.86%,说明该数学模型可靠、精度高,为生产中实时掌握浮选参数提供了一定依据。

韩登峰^[50]以 KYZ-B 浮选柱为例,建立了浮选柱选型数学模型。试验以气泡和矿粒的相对碰撞速率与矿化率的关系为基点,研究分析表观给矿速率与选矿指标间关系,然后基于表观给矿速率、浮选时间,分别建立浮选柱直径计算数学模型、浮选柱高度计算数学模型,最后基于泡沫负载率对浮选柱直径校核。该选型数学模型的建立可以帮助选矿厂快速且准确地进行浮选柱的选型。

YOU 等^[51]进行 Jameson 浮选柱下导管的颗粒收集与浮选动力学的研究。利用浮选模型计算了甲基化石英浮选速率常数。为减少湍流流速波动对实验的影响,用两相流体模型推导出下导管的湍流能量消耗系数。利用该模型计算了甲基化石英颗粒浮选速率常数随粒径的变化规律,并与实验数据进行分析对比。结果表明,计算数据与实验数据相近,两组数据中间粒度的浮选速率常数皆最大,说明该模型可靠,能够为 Jameson 浮选柱的优化设计提供理论依据。

获得某一回收率所需的工业生产中浮选柱内矿浆停留时间与分批试验所需浮选时间的比值称为时间放大因数。亚纳托斯等^[52]对大尺寸浮选槽的设计及操作条件进行评价,确定以经验规则为基础的按比例放大的时间放大因数。试验在 6 排(每排 9 台)平行排列的 160 m³ 自吸式浮选槽组成的粗选回路中进行,通过直接取样和一排中各个浮选槽的数

质量平衡估算粗选回路动力学参数,进而对浮选动力模型拟合。然后分批浮选试验建立动力学模型,确定由分批试验到工业浮选的按比例放大时间因数。结果表明,矩形分布函数最适于工业生产中分布速率常数的描述;该浮选槽按比例放大时间因数为 3.2,与不同规格的浮选槽测得结果相近。

3.3.2 浮选柱的自动控制

实现浮选柱的自动控制可以有效地提高分选指标、稳定分选过程,但由于浮选柱内部流态的复杂性,使得浮选柱想要实现可靠的自动化控制具有一定难度。目前,浮选柱的自动控制发展日趋系统化、智能化、实时化,是一个非常重要的研究课题。

浮选柱稳定控制中的液位控制是实现浮选柱正常作业的重要前提与保证。为保证生产中液位的有效控制,董志勇等^[53]设计了一套泡沫层厚度自动控制系统。该系统在原有的浮选柱基础上改进,安装液位传感器在尾煤排放口处来间接测量浮选柱液位,在尾煤排放口处安装电控液动执行机构代替原有手动旋转提升螺杆。系统可实现就地、远程两种控制方式,通过合理设计实现了泡沫层厚度闭环控制,液位稳定性得到了提高,产品数质量指标得到了保证。

随着智能化不断发展,浮选柱自动控制的智能化也在不断发展,一些控制理论方法和算法可以在柱浮选自动控制过程中得到应用和研发。TIAN 等^[54]在考虑柱浮选过程状态/输出和输入控制约束的基础上,建立了一种柱浮选过程的模拟预测控制方法,该控制方法在无限维离散模型基础上建立了三相柱浮选动态模型,并对该模型进行了仿真试验验证,这种最优控制的实现可以有效优化柱浮选过程,使其更有效地运行。

机械视觉系统可以从浮选泡沫图像中提取的视觉特征来进行实时诊断浮选过程的条件,并预测浮选过程的性能,目前机器视觉在浮选系统监控中的应用,特别是在工业规模上的应用还是很少。MASSINAEI 等^[55]研究探讨了机械视觉技术在某浮选柱监测分析的可能性,开发了一种用于煤柱浮选回路监测与分析的机器视觉系统,该系统基于标记的分水岭算法和 SVM 分类器对泡沫图像中的气泡进行分割,开发从采集的视频中提取泡沫特征的图

像处理算法，可以用于诊断柱浮选的操作条件以及预测不同条件下的分选参数。

4 几种新型浮选柱的研发

4.1 NovaCell 浮选柱

NovaCell 浮选柱是澳大利亚新南威尔士纽卡斯尔大学的 Jameson 教授研制的一种新型浮选柱，该浮选柱设计中引入流态化分选，对于不同粒度的矿物颗粒适应性强，能够有效改善粗颗粒的选别^[56]。该设备由柱体、泡沫槽、尾矿口、中矿循环管路、矿气混合装置等组成，槽体内的主要分选区从下往上依次为流态化区、分离区和泡沫区。工作时，新给矿和部分中矿合并后从中矿管加入，空气在中矿管顶部压入形成气泡，矿气混合体从浮选槽底部向上流动，粗颗粒矿物形成流态化层，细颗粒和部分被气泡黏附的疏水性粗颗粒则穿过流态化区进入分离区成为精矿，尾矿则从底部排出^[57]。

NovaCell 浮选柱进行粗颗粒矿物分选时，可使方铅矿、黄铜矿和煤的最大可浮粒度上限分别提升至 1.4 mm、1.4 mm、5 mm，应用 NovaCell 浮选柱浮选斑岩铜矿时，在原矿 Cu 品位为 1.0%，磨矿回路中采用四台 NovaCell 浮选柱串联，可使得铜回收率达到 99%以上，约 80% 的给料被作为粗石颗粒从粗加工机中剔除，减少了球磨机入磨量，能节约研磨能耗和介质消耗的成本约 40%^[58]。

4.2 无传动浮选槽

浮选柱的矮柱化是趋势，中国铝业郑州研究院研发的无传动浮选槽是一种新型逆流矮柱型浮选柱，可用于低品位的铝土矿浮选脱硅。无传动浮选槽主要由矿浆分配器、压缩空气管、气泡发生器、喷头、矿化管、矿化器等组成。该设备中特制的无传动浮选槽矿化器可使得矿浆在分选时依次经过矿化器、矿化管、喷头三处共计实现三次矿化，矿化效果好^[13]。工作时，含有气泡、水和物料的矿浆一同给入浮选柱内，整个柱体被气泡充满，利用泡沫富集作用进行分选，矿化气泡从上部出口管排出，细粒脉石矿物则从尾矿排出。无传动浮选槽具有分选效果好、处理量大、结构简单、能耗低等优点，但矿浆停留时间较短，气泡与矿物接触仍不充

分^[13, 37]。

某铝土矿选矿厂应用无传动浮选槽分选低品位铝土矿，原矿 Al_2O_3 含量 53.78%、A/S 为 2.32，经过两粗一精两扫的流程，可得精矿 Al_2O_3 产率 51.67%， Al_2O_3 含量 63.37%， Al_2O_3 回收率 61.07%，A/S 达 5.18。同时，在相仿的工艺流程与生产流程上应用 1.5 L 槽式机械搅拌浮选机进行对比试验，研究发现机械式浮选机需要多一段精选才可以达到与无传动浮选槽近似的精矿 A/S 指标^[13]。

4.3 电解微泡浮选柱

朱超英等^[59]针对细粒氧化矿的回收，研制了一种新型电解微泡浮选柱，该机采用电解水发泡和液面控制器，具有气泡活性好、尺寸小、矿化效果好、结构简单、易控制等优点。该机为双柱体结构，可一次性完成粗选和扫选，气泡发生器置于柱体底部，通过电解水产生氢气和氧气。工作时，提前调好的矿浆从主柱体底部给料口进入混合室，在底部搅拌装置的作用下实现矿化，形成的矿化泡沫向上移至精矿槽，未完全浮起的泡沫则随尾矿一同进入次柱体中完成扫选作业。

应用电解微泡浮选柱在细粒级钛铁矿处理中，原矿 TiO_2 品位 10%左右，经过一次粗选，可得精矿 TiO_2 品位 36.01%， TiO_2 回收率 67.63%，精矿 TiO_2 品位较使用普通浮选机时的高 19.95%^[59]。

4.4 充气旋流微泡浮选柱

中国矿业大学研制出一种新型充气旋流微泡浮选柱，该浮选柱结合充气式、旋流微泡式浮选柱的结构优势，在旋流微泡浮选柱基础上布置多段充气分选室，将整个浮现流程扩展为“充气-柱体-旋流三段式过程”，这种多段式改进延长了物料与药剂作用时间，增加颗粒与气泡的碰撞概率，为物料分离创造了理想的分选环境，优化分选效果^[60]。工作时，矿浆从给料分布器加入，矿浆自上而下依次经过充气分选室、柱体分选室和旋流分选室。矿浆在充气分选室时，在外加充气装置作用下实现一段分选，优先分选出可选性好的煤；矿浆在柱体分选室时，处于近似层流状态，进一步分选回收低灰精煤；矿浆在旋流分选室时，在循环泵作用下完成管流矿化，防止粗颗粒精煤丢失，提高分选指标。

应用充气旋流微泡浮选柱与传统浮选柱进行对比试验,在相同的参数条件下,新型充气旋流微泡浮选柱较传统浮选柱的精煤产率提高0.57%,尾煤灰分提高5.03%^[60]。

4.5 环形充气浮选柱

杨琳琳^[14]研制了一种新型环形充气浮选柱,该机具有能耗低、结构简单、操作方便等优点。整机采用逆流浮选,由多个矮浮选柱在水平方向按环形布置。该机工作原理与逆流式浮选柱类似,但由于多段浮选柱的布置,可使得精矿依次经过多个浮选柱进行精选,中矿也可以依次经过多个浮选柱进行扫选。

应用实验室型环形充气浮选柱与XFD型传统浮选机在贵州遵义某硫铁矿试样上进行对比试验,应用实验室型环形充气浮选柱进行一次选别,可得硫精矿S品位49.44%,S回收率99.15%,而XFD浮选机三次粗选的硫精矿S品位只有46.51%,S回收率96.79%^[61]。

5 结语

浮选设备是浮选技术中的重要一环,而浮选柱作为浮选设备中的“佼佼者”,其研究对于推动资源合理利用具有重大意义。在这几十年的相关研究里,Jameson浮选柱、FCSMC浮选柱、充填式浮选柱等性能优越的浮选柱在实际生产中的成功应用,不仅推动了行业发展,而且也为国内科研人员带来了一定启示,我国在浮选设备领域仍有较大的进步空间,浮选柱的研究仍需要提速。未来浮选柱的研究更应该重视以下几个方向:

1) 气泡发生器的研制与应用。气泡发生器作为浮选柱的重要部件,其性能好坏将直接影响浮选柱的浮选效率。外部气泡发生器较内部气泡发泡器更易于维修、耐磨,未来应该将研究重点放在外部气泡发生器或其它特殊的气泡发生器的研制上。

2) 综合力场(磁场、电场和离心力场)。综合力场在浮选柱中的应用可以有效提高浮选柱的综合选别能力,但目前综合力场在浮选柱中的相关应用仍较少,因此未来浮选柱的设计更应该重视综合力场在浮选柱中的应用。

3) 浮选柱数学模型、按比例放大的研究。浮选柱数学模型及按比例放大研究的应用,可以帮助我们更好的预测选别及设计指标,为实际生产或设备研发提供合理的优化,节约投产时间成本,并提高性能。

4) 自动化。浮选柱的自动化可以有效控制实时生产中的各项指标,有利于浮选效果及经济效益的提高。

REFERENCES

- [1] 胡岳华. 矿物浮选[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014: 210–223.
HU Yue-hua. Mineral Flotation [M]. Changsha: Central South University Press, 2014: 210–223.
- [2] 欧乐明, 邵延海, 冯其明, 等. 浮选柱研究和应用进展[J]. 矿产保护与利用, 2003, 23(3): 44–48.
OU Le-ming, SHAO Yan-hai, FENG Qi-ming, et al. Research and application of flotation column[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2003, 23(3): 44–48.
- [3] 程琪林, 罗立群. 浮选柱及其控制技术的研究进展[J]. 中国矿业, 2015, 24(1): 115–119.
CHENG Qi-lin, LUO Li-qun. Development of flotation column and its control technology[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(1): 115–119.
- [4] 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.
TAO Chang-lin. Jameson's column flotation—A technical breakthrough of flotation technology[J]. China Mining Magazine, 1995, 4(1): 43–48.
- [5] HARBORT G, CLARKE D. Fluctuations in the popularity and usage of flotation columns—An overview[J]. Minerals Engineering, 2017, 100: 17–30.
- [6] ZHANG H J, LIU J T, WANG Y T, et al. Cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. Minerals Engineering, 2013, 45: 1–3.
- [7] 程敢, 曹亦俊, 徐宏祥, 等. 浮选柱技术及设备的发展[J]. 选煤技术, 2011, 39(1): 66–70.
CHENG Gan, CAO Yi-jun, XU Hong-xiang, et al. Development of flotation column technology and equipment[J]. Coal Preparation Technology, 2011, 39(1): 66–70.

- [8] 杨锦隆, 王毓华. 新型充填式浮选柱[J]. 国外金属矿选矿, 1991, 29(2): 8–12.
YANG Jin-long, WANG Yu-hua. New packed floatation column[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1991, 29(2): 8–12.
- [9] 张兴昌. CPT浮选柱工作原理及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2003, 55(2): 22–24.
ZHANG Xing-chang. The principle and application of CPT flotation column[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2003, 55(2): 22–24.
- [10] 卢世杰. KYZ型浮选柱机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2002, 54(1): 20–23.
LU Shi-jie. Hydrokinetics research of KYZ flotation column[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2002, 54(1): 20–23.
- [11] 卿林江. CCF浮选柱在钼和钨浮选的应用[J]. 矿业工程, 2018, 16(2): 42–44.
QING Lin-jiang. The application of CCF floatation column in the floatation concentration of molybdenum and tungsten[J]. Mining Engineering, 2018, 16(2): 42–44.
- [12] 宋子翔, 韩继康, 王伟之, 等. 浮选柱技术发展与应用现状[J]. 金属矿山, 2019, 54(6): 20–26.
SONG Zi-xiang, HAN Ji-kang, WANG Wei-zhi, et al. Development and application status of flotation column technology[J]. Metal Mine, 2019, 54(6): 20–26.
- [13] 刘中原, 张建强, 张书先, 等. 无传动浮选槽在铝土矿选矿中的产业化应用研究[J]. 轻金属, 2019, 56(11): 7–11.
LIU Zhong-yuan, ZHANG Jian-qiang, ZHANG Shu-xian, et al. Industrial application research of non-driven flotation tank in bauxite ore dressing[J]. Light Metals, 2019, 56(11): 7–11.
- [14] 杨琳琳. 环形充气浮选机的研制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008: 109–111.
YANG Lin-lin. Development of ring-like inflatable flotation machine[D]. Kunming: Kunming University Of Science and Technology, 2008: 109–111.
- [15] UÇURUM M. Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon[J]. Powder Technology, 2008, 191(3): 240–246.
- [16] 周凌锋, 傅联海, 张 强. 高效细粒浮选柱[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 55–58.
ZHOU Ling-feng, FU Lian-hai, ZHANG Qiang. Efficient flotation column for fine particles[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(2): 55–58.
- [17] SAHBAZ O, UÇAR A, ÖTEYAKA B. Velocity gradient and maximum floatable particle size in the Jameson cell[J]. Minerals Engineering, 2013, 41: 79–85.
- [18] ZARGARAN A, MOZAFFARI E, GIDDINGS D. Gas-liquid slip velocity determination in co-current column flotation[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 169: 179–186.
- [19] LI S, LU D F, CHEN X H, et al. Industrial application of a modified pilot-scale Jameson cell for the floatation of spodumene ore in high altitude area[J]. Powder Technology, 2017, 320: 358–361.
- [20] ZHU H Z, VALDIVIESO A L, ZHU J B, et al. A study of bubble size evolution in Jameson flotation cell[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 137: 461–466.
- [21] 周凌锋, 傅联海, 张 强. 新型细粒浮选柱的研究[J]. 金属矿山, 2006, 41(1): 80–82.
ZHOU Ling-feng, FU Lian-hai, ZHANG Qiang. Study on a new type of flotation column for fine particles[J]. Metal Mine, 2006, 41(1): 80–82.
- [22] 程 瑜, 宋永胜, 李 宾, 等. 微细粒黄铁矿柱浮选试验[J]. 金属矿山, 2009, 44(6): 64–68.
CHENG Yu, SONG Yong-sheng, LI bin, et al. Experimental research on the column flotation of micro-fine pyrite particles[J]. Metal Mine, 2009, 44(6): 64–68.
- [23] 白海静, 程 瑜, 吕慧峰, 等. 新疆某铜镍尾矿综合利用选矿试验[J]. 金属矿山, 2013, 48(12): 151–155.
BAI Hai-jing, CHENG Yu, LÜ Hui-feng, et al. Comprehensive utilization and beneficiation tests of a copper-nickel tailing in Xinjiang[J]. Metal Mine, 2013, 48(12): 151–155.
- [24] BILIR K, UCAR A, SAHBAZ O, et al. Comparison of Jameson cell and jet diffuser flotation column[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2018, 54(1): 174–181.
- [25] 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, 54(8): 95–97.
JIAO Hong-guang, TU Bi-xun, LIANG Zeng-tian. Anthracite slurry separation using Jameson floatation cell[J]. Coal Engineering, 2007, 54(8): 95–97.
- [26] 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.

- [27] UCAR A, SAHBAZ O, KERENCILER S, et al. Recycling of Colemanite tailings using the Jameson flotation technology[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2014, 50(2): 645–655.
- [28] 赵敏捷, 方建军, 李国栋, 等. 旋流-静态微泡浮选柱的应用及研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2016, 37(4): 6–10.
ZHAO Min-jie, FANG Jian-jun, LI Guo-dong, et al. State and application of cyclonic static microbubble flotation column[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016, 37(4): 6–10.
- [29] 胡卫新, 刘炯天, 李振, 等. 旋流-静态微泡浮选柱气含率影响因素研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(4): 617–621.
HU Wei-xin, LIU Jiong-tian, LI Zhen, et al. Research on factors influencing gas hold-up of a cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(4): 617–621.
- [30] ZHANG M, LI T L, WANG G C. A CFD study of the flow characteristics in a packed flotation column: Implications for flotation recovery improvement[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 159: 60–68.
- [31] WANG L J, WANG Y H, YAN X K, 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.
- [32] 李超, 曹亦俊, 杨兴满, 等. 脉冲磁场在旋流-静态微泡浮选柱中的应用[J]. *金属矿山*, 2011, 40(3): 126–128.
LI Chao, CAO Yi-jun, YANG Xing-man, et al. Application of the pulsed magnetic field in the cyclone-static microbubble flotation column[J]. *Metal Mine*, 2011, 40(3): 126–128.
- [33] LIAO Y F, MA Z L, CAO Y J. Improving reverse flotation of magnetite ore using pulse magnetic field[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 138: 108–111.
- [34] 刘炯天, 李小兵, 王永田, 等. 旋流-静态微泡浮选柱浮选某难选钼矿的试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2008, 39(2): 300–306.
LIU Jiong-tian, LI Xiao-bing, WANG Yong-tian, et al. Experimental study on separating some molybdenum ore by using cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2008, 39(2): 300–306.
- [35] 陈克锋, 李晓东, 石志中, 等. 柱机联合浮选在柿竹园钨粗选作业中的应用研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2012, 64(2): 58–60.
CHEN Ke-feng, LI Xiao-dong, SHI Zhi-zhong, et al. Study of joint flow of cell and column flotation applied in tungsten rough flotation operation of Shizhuyuan's plant[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2012, 64(2): 58–60.
- [36] 李建华, 罗伯财, 朱长勇. FCSMC-4500型浮选柱在太西洗煤厂二分区的应用[J]. *选煤技术*, 2015, 43(1): 52–54.
LI Jian-hua, LUO Bo-cai, ZHU Chang-yong. Application of FCSMC-4500 flotation column in the second subarea of Taixi coal preparation plant[J]. *Goal Preparation Technology*, 2015, 43(1): 52–54.
- [37] 马智敏, 张辉, 陈兴华, 等. 浮选柱技术的应用现状及发展方向[J]. *现代矿业*, 2015, 31(10): 66–70.
MA Zhi-min, ZHANG Hui, CHEN Xing-hua, et al. Application status and development direction of flotation column technology[J]. *Modern Mining*, 2015, 31(10): 66–70.
- [38] ZHANG L, DING Y G, JI J, et al. Particle residence time distribution of collection zone in packed flotation column[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 781/784: 2195–2200.
- [39] 欧乐明, 张文才, 冯其明, 等. 水平充填介质浮选柱中气含率研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2014, 66(2): 65–69.
OU Le-ming, ZHANG Wen-cai, FENG Qi-ming, et al. Study of gas hold-up in a horizontal packing flotation column[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2014, 66(2): 65–69.
- [40] 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: 1–34.
WANG Li-wei. Research on flotation kinetic of packed flotation column[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2014: 1–34.
- [41] 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, 42(2): 97–100.
WANG Wei-zhi, CHEN Li-ping, ZHAO Liu-bei, et al. Experimental research for application of packed flotation column to reverse flotation of hematite[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2014, 42(2): 97–100.
- [42] 王伟之, 刘泽伟, 来有邦. 某磁赤混合铁矿的柱式阳离子反浮选试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2017, 38(6): 64–67.
WANG Wei-zhi, LIU Ze-wei, LAI You-bang. Experimental study on cationic reverse flotation by flotation column of a

- magnetite and hematite mixed iron ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017, 38(6): 64–67.
- [43] 桂夏辉, 刘炯天, 曹亦俊, 等. 气泡发生器结构性能的研究与进展[J]. 选煤技术, 2009, 37(2): 66–70.
- GUI Xia-hui, LIU Jiong-tian, CAO Yi-jun, et al. Current study and development of structure and performance of bubble generator[J]. Goal Preparation Technology, 2009, 37(2): 66–70.
- [44] 陈志友, 陈湘清, 李旺兴, 等. 浮选柱气泡发生器的研究与进展[J]. 煤炭加工与综合利用, 2008, 25(2): 19–21.
- CHEN Zhi-you, CHEN Xiang-qing, LI Wang-xing, et al. Research and development of flotation column bubble generator[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2008, 25(2): 19–21.
- [45] 刘佳林. 旋流-静态微泡浮选柱充气方式优化与分选试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 8–21.
- LIU Jia-lin. Study on inflatable mode optimization and separation of cyclonic-static micro-bubble flotation column[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 8–21.
- [46] LAHEY A E, CLARKSON C J, BRAKE I. MicrocelTM flotation column modelling[J]. Coal Preparation, 1998, 19(1/2): 83–113.
- [47] 陈泉源, 张泾生. 浮选柱的研究与应用[J]. 矿冶工程, 2000, 20(3): 1–5.
- CHEN Quan-yuan, ZHANG Jing-sheng. A study and application of flotation column[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(3): 1–5.
- [48] MESA D, BRITO-PARADA P R. Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 950–962.
- [49] 李彪, 谢广元, 张秀峰, 等. 浮选柱浮选精煤产品数质量的数学模型研究[J]. 煤炭工程, 2011, 58(8): 87–89.
- LI Biao, XIE Guang-yuan, ZHANG Xiu-feng, et al. Study on mathematical model of clean coal product quality and quantity from floatation column separation[J]. Coal Engineering, 2011, 58(8): 87–89.
- [50] 韩登峰. 基于给矿速率的KYZ-B型浮选柱试验选型数学模型的建立与分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2015, 67(4): 72–74.
- HAN Deng-feng. Establishment and analysis of mathematical model of test selection for KYZ-B flotation column based on the feeding rate[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015, 67(4): 72–74.
- [51] YOU X F, LI L, LIU J T, et al. Investigation of particle collection and flotation kinetics within the Jameson cell downcomer[J]. Powder Technology, 2017, 310: 221–227.
- [52] J·B·亚纳托斯, 陈云, 雨田. 大尺寸浮选槽的特征[J]. 国外金属矿选矿, 2006, 44(9): 23–28.
- YANATOS J B, CHEN Yun, YU Tian. Characteristics of large size flotation cell[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2006, 44(9): 23–28.
- [53] 董志勇, 李璐, 王然风. 浮选柱泡沫层厚度自动控制系统的设计和实现[J]. 选煤技术, 2013, 41(1): 75–78.
- DONG Zhi-yong, LI Lu, WANG Ran-feng. The design and implementation of automatic control system of flotation column froth layer thickness[J]. Goal Preparation Technology, 2013, 41(1): 75–78.
- [54] TIAN Y H, LUAN X L, LIU F, et al. Model predictive control of mineral column flotation process[J]. Mathematics, 2018, 6(6): 100.
- [55] MASSINAEI M, JAHEDSARAVANI A, TAHERI E, et al. Machine vision based monitoring and analysis of a coal column flotation circuit[J]. Powder Technology, 2018, 343: 330–341.
- [56] JAMESON G J. New directions in flotation machine design[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(11): 835–841.
- [57] 沈政昌. 浮选柱技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 1–14.
- SHEN Zheng-chang. Technology of column flotation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 1–14.
- [58] JAMESON G J, EMER C. Coarse chalcopyrite recovery in a universal froth flotation machine[J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 118–133.
- [59] 朱超英, 易峦, 程建国, 等. 新型电解微泡浮选柱的研制与试验研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(z1): 46–48.
- ZHU Chao-ying, YI Luan, CHENG Jian-guo, et al. Development and experimental study of a new electrolytic microbubble flotation column[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(z1): 46–48.
- [60] 贺长营, 李延锋, 张文军, 等. 新型充气旋流微泡浮选柱结构介绍与分选效果研究[J]. 矿山机械, 2015, 43(3): 99–102.
- HE Chang-ying, LI Yan-feng, ZHANG Wen-jun, et al. Structural introduction and effects study of new-type inflatable cyclonic micro-bubble flotation column[J]. Mining

- & Processing Equipment, 2015, 43(3): 99–102.
- [61] 杨琳琳, 唐秀英, 宁旺云. 实验室型环形充气浮选机的结构设计及实验对比[J]. 价值工程, 2012, 31(14): 47–48.
YANG Lin-lin, TANG Xiu-ying, NING Wang-yun.
- Structural design and comparison test of laboratory type ring inflatable flotation machine[J]. Value Engineering, 2012, 31(14): 47–48.

Research and application of flotation column

WANG Bin, JIANG Hao

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the continuous development of domestic mineral resources, there are more and more refractory ores with low grade, fine grain size and complex mineral composition, which puts forward higher requirements on the performance of mineral processing device. Flotation column is an important flotation device in flotation technology. It has the advantages of small investment, simple structure and high efficiency. It is of great significance to resource utilization. The basic structure, basic working principle and main operating parameters of the flotation column were introduced. The development history and classification of flotation columns were summarized. The basic structure and working principle, advantages and disadvantages, research status and application progress of Jameson flotation column, Cyclonic-static micro-bubble flotation column and Packed flotation column were elaborated. The bubble generator, mathematical model, scale-up and automatic control research progress of the flotation column were summarized. The characteristics and application of several new flotation columns were introduced. Finally, it is pointed out that the future development of the flotation column should be the development and application of bubble generators, combination of comprehensive force fields, mathematical models, scale-up and automation.

Key words: flotation column; flotation; application; bubble generator; progress

Received date: 2020-06-10; **Accepted date:** 2020-10-20

Corresponding author: JIANG Hao; Tel: +86-731-88836545; E-mail: jianghao-1@126.com

(编辑 李艳红)