# 浮选柱分类及其工作原理

来源：网络 作者：眉眼如画 更新时间：2024-07-25

*第三节浮选柱一、概述浮选柱研究最早出现于上世纪六十年代，但由于气泡发生器的结垢与堵塞、浮选尾矿得不到保证、设备运行不稳定等原因，该项研究与应用很快进入了低潮。自上世纪八十年代以来，浮选柱的发展出现了方兴未艾的局面。浮选柱的发展和应用取得了重...*

第三节

浮选柱

一、概述

浮选柱研究最早出现于上世纪六十年代，但由于气泡发生器的结垢与堵塞、浮选尾矿得不到保证、设备运行不稳定等原因，该项研究与应用很快进入了低潮。

自上世纪八十年代以来，浮选柱的发展出现了方兴未艾的局面。浮选柱的发展和应用取得了重大突破，一批新型浮选柱脱颖而出，浮选柱在浮选工业中又受到重视。如国内的喷射式浮选柱、充填浮选柱、静态浮选柱、微泡浮选柱、旋流微泡浮选柱和旋流-静态微泡浮选柱（床），以及澳大利亚的Jameson浮选柱，加拿大的CPT浮选柱和CFCC浮选柱，德国的KHD浮选柱，美国的Flotair浮选柱、VPI微泡浮选柱、MTU型充填介质浮选柱和Wemco利兹浮选柱，前苏联的乌克兰浮选柱，ФП浮选柱，全泡沫浮选柱，印度的电浮选柱，磁浮选柱等。在处理极细物料方面，它们具有常规浮选机所不可比拟的分选效果。目前，在类型众多的浮选柱中，旋流-静态微泡柱分选设备在我国应用最为广泛。

纵观几十年国内外浮选柱的研究现状，浮选柱新的进展总体来说表现在如下九大方面：

(1)气泡发生器方面。基本上都由上世纪60、70年代易堵塞的内置式气泡发生器发展为外置式。当然也有经改进比较先进的内置式，且其发泡方式多样，更为先进、合理。有旋涡气泡发生器、文丘里管气泡发生器、静态在线混合器、高效气动液压型充气器、美国的Flotaire型气泡发生器、加拿大的CESL型气泡发生器、CPT公司的SlamJet气体分散器、超声波气溶发泡器、射流气泡发生器和空气喷射式气泡发生器等；

(2)充填介质方面。近年来，出现了多种类型的充填介质和介质床层，解决了充填介质在碱性矿浆中易堵塞的问题，改善了柱内矿浆流态的稳定性以及气泡分散的均匀性等；

(3)柱体高度方面。已由原来的十几米降至几米，大型浮选柱的高径比逐渐减小，即使大型化的浮选柱的高度也基本上都在十米以下；

(4)矿浆在浮选柱内浮选的时间越来越短；

(5)浮选柱浮选的选择性和分选精度不断提高；

(6)数学模拟与按比例放大方面开展的研究越来越深入；

(7)自动控制的程度越来越高；

(8)向着大型化、系列化方向发展；

(9)在给矿和排矿方式上也有了较大改进。

由于浮选柱无机械搅拌器，无传动部件，同浮选机相比，浮选柱具有结构简单、制造容易、占地小、维修方便、操作容易、节省动力、对微细颗粒分选效果好等优点。随着柱浮选技术的日益成熟，浮选柱在我国的应用的领域逐步扩大，其优越性表现得越来越明显。目前已逐步应用于多种物料的分选，如硫化矿物(铜矿、辉钼矿、锑矿等)，氧化矿物（氧化钨矿、磁铁矿、赤铁矿等），工业矿物(硫酸盐矿、钾盐矿和磷酸盐矿物等)，石墨及其它非金属矿的分选等。

二、浮选柱的类型

浮选柱的种类繁多，差别主要表现在柱体高度、充气形式、矿化方式、分选原理等方面。按气泡发生器划分，可将浮选柱分为内部充气型和外部充气型；按柱体高度划分，可分为矮柱型、中高柱型和高柱型；按气泡和矿浆运动的方向则可分划分为逆流式、顺流式和逆流-顺流混合式。逆流浮选柱的入料通常由柱子上部给入，尾矿则从柱子底部排出；顺流浮选柱的入料、空气、尾矿均从柱子底部实现；而逆流-顺流混合式浮选柱则是同向给入矿浆和部分空气，另一部分空气由柱子底部给入，或者通过循环矿浆和空气由底部给入，而入料从柱子上部给入。目前，国内用于微细粒物料分选的浮选柱结构多样，按分类标准不同，有的浮选柱既属于矮柱型，又可归为其它类别浮选柱之中。据此可将国内外使用的结构上有特色的浮选柱分类如表35-1所示。

表35-1

浮选柱分类表

分类标准

类别

浮选柱种类及型号

高度

矮柱型

旋流器式浮选柱、射流浮选柱、旋流充气浮选柱、全泡沫浮选柱、LHJ浮选柱、Jameson浮选柱、Wemco-Leeds搅拌式浮选柱、气浮式浮选柱

中高柱型

FCMC旋流微泡浮选柱、FCSMC旋流-静态微泡浮选柱、CPT浮选柱、TAFC双充气微泡浮选柱、Microcel浮选柱、FXZ静态浮选柱、KYZ顺流喷射式浮选柱、KФM浮选柱、XFZ多柱室逆顺流交替流动式浮选柱

高柱型

Flotair浮选柱、Boutin浮选柱、KFP浮选柱、Leeds浮选柱、MTU充填介质浮选柱、电浮选柱、磁浮选柱、ФП浮选柱

充气方式

内部充气型

Boutin浮选柱、MTU充填介质浮选柱、KФM浮选柱、XFZ多柱室逆顺流交替流动式浮选柱、电浮选柱、气浮式浮选柱

外部充气型

旋流器式浮选柱、射流浮选柱、旋流充气浮选柱、全泡沫浮选柱、LHJ浮选柱、Jameson浮选柱、Wemco-Leeds搅拌式浮选柱、FCMC旋流微泡浮选柱、FCSMC旋流-静态微泡浮选柱、Microcel浮选柱、CPT浮选柱、TAFC双充气微泡浮选柱、FXZ静态浮选柱、KYZ顺流喷射式浮选柱、Flotair浮选柱、KFP浮选柱、Leeds浮选柱、磁浮选柱

气泡和矿

浆运动方向

逆流式

旋流充气浮选柱、全泡沫浮选柱、Wemco-Leeds搅拌式浮选柱、CPT浮选柱、FXZ静态浮选柱、Microcel浮选柱、Flotair浮选柱、Boutin浮选柱、Leeds浮选柱、MTU充填介质浮选柱、气浮式浮选柱、电浮选柱、磁浮选柱

顺流式

Jameson浮选柱、KYZ顺流喷射式浮选柱

逆流-顺流混合式

射流浮选柱、旋流器式浮选柱、FCMC旋流微泡浮选柱、FCSMC旋流-静态微泡浮选柱、TAFC双充气微泡浮选柱、KФM浮选柱、XFZ多柱室逆顺流交替流动式浮选柱

三、柱浮选设备

目前，常用的浮选柱多以逆流浮选柱为主，一些新型浮选柱将管流矿化也溶入到柱浮选分选体系中，取得了显著的分选效果。如旋流-静态微泡浮选柱通过高紊流的管流矿化，强化了柱分选环境，提高了难选物料的分选效率。在众多浮选柱中，最引人注目的有短体自由喷射式和高柱体逆流式浮选柱，后者被认为效果较好，应用广泛。该类型浮选柱主要有两种形式：一是充填介质式，即柱内充满某种结构的材料以粉碎气泡和创造良好的浮选环境；另一种是无充填式，即柱内无充填，以其他方法创造必要的分选条件。在实际应用中，根据分选物料性质的不同，这类设备内部都进行了一定程度上的填料充填。逆流式浮选柱的特点在于：

(1)比常规机械搅拌式浮选机和短体喷射式浮选柱有更大的矿化区。前者的矿化区仅在转子周围的高剪切区，后者也仅在射流所及的范围内，而逆流式浮选柱从给料口到气泡入口的整个捕集区都是矿化带，所以容积利用率高，单位容积的处理能力也大；

(2)矿物颗粒与气泡的碰撞及粘附机率大。机械搅拌式和喷射式浮选机的矿物颗粒和气泡高速甩出时运动方向基本一致，依靠紊流中两者间的速度差碰撞并实现粘附。但紊流不仅可使两者粘附，也可使两者脱离，且为了产生紊流要消耗很多能量。逆流浮选柱内颗粒和气泡的运动总体上是相向的，虽然运动的绝对速度较小，但相对速度却不小。由于紊流程度低、能耗低，颗粒和气泡的脱离几率也低；

(3)浮选柱产生的气泡分散度高、微细气泡多，因而同样的充气量可产生更大的气液界面，与矿物颗粒就有更多的碰撞机会，而且可产生多个气泡粘附于一个颗粒的气固絮团，减少了气泡和颗粒的脱落几率。此外大量微细气泡上升速度较慢，基本处于层流状态，造成和颗粒碰撞的有利条件，也提高了浮选速率和回收率；

(4)减少了高灰细泥的污染。机械搅拌式浮选机的泡沫精煤中常夹带高灰细泥，而逆流式浮选柱的湍流程度低，顶部又有冲洗水，迫使泡沫间夹带的入料水和高灰细泥排出，有利于生产低灰精煤和浮选脱硫。许多厂采用机械搅拌式浮选机，为提高精煤质量，或采用精选、扫选等复杂的流程，或以降低重选精煤的灰分来平衡全厂的精煤灰分，若采用浮选柱处理细泥，提高其分选效果，则有可能以简单的浮选工艺取得全厂最高的精煤产率。

下面以柱体高度为分类标准，就国内外自行研制或仿制的一些结构新颖的浮选柱为例作简要介绍。目前应用较为广泛的浮选柱将在下文“几种典型的浮选柱”中再作详细叙述。

（一）矮柱型浮选柱

1．旋流器式浮选柱

旋流器式浮选柱包括浮选柱分选段(浮选段)、旋流力场分选段(旋流段)、气泡发生器3部分。浮选段为一柱体，位于整个柱体的上部，旋流段采用柱锥相连的水介旋流器结构，并与浮选段呈上、下结构相连。从旋流段角度看，浮选段相当于放大了的旋流器溢流管。在柱体顶部，设置了冲洗水装置和泡沫精矿收集槽；给料管位于柱段中上部，最终尾矿由旋流段底流口排出。气泡发生器为外置式，沿切线方向与旋流段柱体相连（相当于旋流器切线给料管），气泡发生器上设导气管与起泡剂添加管。

气泡发生器是浮选柱的关键部件，它采用文丘里管和静止搅拌器的内部结构，具有吸入气体、气体粉碎成气泡以及气泡矿化多重作用。矿浆混合物沿切线方向进入旋流段，在旋流段内形成了气、液、固三相旋流力场。

旋流力场的作用之一是促成气泡的迅速分散，减少气泡沿柱体断面扩散所需要的路径，更重要的是对经过浮选段的中矿以及循环中矿的重力分选。在旋流力场作用下，物料按密度发生分离，其作用在于强化回收，保证得到合格尾矿。倒锥型套锥把经过旋流力场充分作用的底部矿浆机械分流成两部分：少量微气泡及大量中间物料进入倒锥内，单独引出后作为循环中矿；而大量高密度的粗粒物料则由内外倒锥之间排出，成为最终尾矿。旋流式浮选柱还具有以下特点:

(1)集浮选与重选原理于一身，强化了分选作用，提高了精矿产率，同时也降低了柱体高度。

(2)采用外置式气泡发生器，无需压风机和充填介质，节能显著，充气量大，气泡质量好，不堵塞，易调节，工作稳定，易维护和更换。同时由于压力释放析出大量高质量的活性微泡，使浮选柱更适合于细粒级或超细粒级矿物的分选。

(3)采用合理的柱体结构，不会沉积堵塞。

2．旋流充气浮选柱

旋流充气浮选柱最早由美国研制。它是重选水力旋流器与浮选相结合的产物，如图35-1。它提出了一种高效充气矿化方式，与逆流矿化相对应，其成泡与矿化过程突出了“垂直”的特点。在较高强度的离心力场背景下，这种“垂直”矿化方式不仅提高了浮选的矿化效率，而且降低了浮选粒度下限。再加上离心力场的重力分离作用，形成了微细物料分选的综合力场优势。

该设备的主要特点是：

(1)矿浆切向压力给入，将从多孔柱壁压入的空气剪切成气泡，气泡从柱壁向柱中心移动过程中，与颗粒发生碰撞附着，矿化速度高，因而浮选速度快，其处理能力相当于同容积浮选机的50倍；

(2)泡沫产品通过内螺旋向上运动排出，沉砂从底部环形排出，矿浆基本属于“塞流”；

图35-1

旋流充气浮选柱

(3)设备体积小，多孔介质孔眼不易堵塞，缺点是器壁磨损较甚，参数变化敏感性较大。

3.搅拌式浮选柱

搅拌式浮选柱实质上是浮选柱与浮选机结合的产物。该设备可改善粗颗粒的悬浮，提高+150μm粒级的回收率。如加拿大研制的多层搅拌浮选柱(Hydrochem)己在金矿浮选获得工业应用。

Wemco-Leeds搅拌式浮选柱也属于矮柱型浮选柱，如图35-2。它是将Leeds浮选柱与Wemco浮选机结合的产物。其特点是：

(1)具有机械充气搅拌装置，矿浆均匀，粗粒不易沉淀；

(2)柱内装有几层隔栅介质辊，悬动介质辊随泡沫层密度变化，上下浮沉。自动调节辊间间隙，以控制精矿品位；

(3)高度接近常规机械浮选机高度；

1-给料；2-逆水流；3-机内横向槽；4-进气管；5-刮泡器；6-泡沫聚集板；7-介质辊；8-矿浆排出口；9-排出管；10-搅拌器；11-稳流板

图35-2

Wemco—Leeds浮选柱

(4)柱顶加冲洗水，排除泡沫中脉石夹杂。该柱缺点是结构复杂。

4．射流浮选柱

射流浮选柱突破了传统浮选机和浮选柱设计上的基本概念，优化了浮选过程中捕集和分离这两个基本过程。一方面在射流浮选柱混合管内的中部区域，空气体积含量很高(可达60%~70%)，在高速射流强烈搅拌作用下，矿物颗粒与气泡碰撞并粘附的概率较大；另一方面混合管内的气泡尺寸较小，可供捕集颗粒的总面积较大。这两方面因素使得射流浮选柱在需要较大捕集概率的微细煤泥的浮选方面显示了突出的优越性。而且对于射流浮选柱来讲，气泡的上浮分离过程是在一个相对静止的环境中进行的，在上升过程中又受到了矿浆的清洗作用，排除了夹杂在气泡群中的微细非目的矿物颗粒，因此具有良好的分离选择性和分选精度。

在射流浮选柱基础上发展起来的双向充气射流浮选柱是一种新型高效的细粒矿物分选设备，作为机械搅拌式浮选机的更新换代产品，可用于细粒煤的分选、脱硫、超纯煤的制备以及金属矿物、非金属矿物的浮选。具有高效、节能、处理量大、设备简单可靠、投资省、见效快等特点。它由柱体、锥形漏斗、组合式气泡发生器等组成。其工作原理是，入料矿浆经组合式气泡发生器充气后从上部进入柱体，使易浮的精矿得到优先浮选，其余的物料与矿浆一起向下运动，与从柱体底部进入的经另一组（或两组）气泡发生器充气的中矿循环矿浆碰撞，使精矿被再次捕集。循环给入的中矿与向下回流的没有矿化的中矿隔开，分成复选区与循环区，已充气的中矿先在复选区中向上流动，使其有更多的机会与气泡接触得到再选，同时矿化气泡的上浮速度恒大于此处水流上升速度，大大减少了进入循环区的无效气泡，从而提高了浮选效率。由于复选区呈漏斗状，其水流速度自下而上逐渐减小，可使部分难浮的较粗矿粒滞留其中反复矿化，改善了浮选柱普遍存在的不易回收粗颗粒矿物的问题。

该设备主要特点为：

(1)采用由给料从柱体上部和循环中矿从柱体下部双向充气结构，有利于提高精矿的质量与回收率；

(2)将循环给入的中矿与向下回流的中矿隔开，分成复选区与循环区，使充气的中矿进入浮选柱后，先在复选区中向上运动，以便中矿有更多的机会与气泡接触得到再选。由于矿化气泡在此上升流中上浮速度恒大于此处水流上升速度，所以大大减少了进入循环区的无效气泡，提高了浮选效率；

(3)复选区设计为锥形，上升水流自下而上逐步减小，类似选矿的干扰沉降水力分级机，可以将一部分难浮的较粗的煤粒滞留其中，使其反复矿化，改善了浮选柱普遍存在的不易回收粗粒煤的情况；

(4)柱体内有初选区、精选区、扫选区及复选区，可通过调节给矿、排矿及循环量，改变各分选区的高度以适应不同工况的需要；

(5)由于双向充气，增大了中矿与气泡接触的机会，从而可以大大减少中矿循环量，降低能耗；

(6)组合式气泡发生器配置在柱体外部，减少了管路布置，维护及更换喷嘴方便；改进的喷嘴结构既有利于吸气，又有利于气泡的分散；

(7)自动化程度高。可根据泡沫层厚度自动调节液位，通过检测矿浆浓度自动调节药剂（起泡剂、捕收剂）添加量。

5．全泡沫浮选柱

全泡沫浮选柱结构见图35-3。其特点是：

图35-3

全泡沫浮选柱

(1)空气、水、起泡剂一起给入柱体充气区中，整个柱体全被气泡充满，入料从柱中上部给入到泡沫中，完全利用泡沫富集作用进行分选，可获得很高的精矿品位；

(2)柱体高度仅1m左右。缺点是矿浆停留时间短，矿化不充分。

6．气浮式浮选柱

新型槽型气浮式浮选柱属于微泡型浮选柱，其截面示意图见图35-4。浮选柱主体主要是一方形柱。侧面与另一个方形柱连接，柱下端装有特制的充气式曝气装置（充气器)。该装置作为气泡发生器，当气体通过该充气器时，在水混合物中(溶有少量起泡剂)会形成大量乳状微细气泡上浮，并从侧面进人主体浮选往，形成稳定连续上升的泡沫层，而经浮选药剂调节好的矿浆则从浮选柱的同一侧的上方进人1-槽型浮选柱；2-微泡发生器；3-给矿；4-泡沫产品；5-非泡抹产品

图35-4

槽型气浮式浮选柱

浮选柱，在矿浆流与泡沫流对流过程中形成矿化泡沫。然后矿化泡沫在上升和停留过程中实现二次富集。最后高品位泡沫产品自浮选柱的另一侧溢流至泡沫槽，非泡沫产品从浮选柱的下端排出。

（二）中高型浮选柱

1．静态浮选柱

水

流量表

充填料

精矿

叶轮

尾矿

水

流量表

压力表

流量表

减压器

泵

压缩空气

控制矿浆面

压力表

图35-5

静态浮选柱

静态浮选柱的特点是在柱中充填波纹板，形成众多孔道。静态浮选柱中没有旋流，当空气通过众多孔道时被粉碎成气泡。矿浆由上向下流动，气泡由下向上浮起，目的矿粒与气泡碰撞后，黏附在气泡上，精矿泡沫上浮到顶部溢流排出，尾矿随着水流到底部排出，如图35-5。

FXZ静态浮选柱包括静态浮选柱和与其配套的跌落箱。浮选柱中没有旋流，矿浆由上向下流动，气泡由下向上浮起，目的矿粒与气泡碰撞后，黏附在气泡上，精矿泡沫上浮到顶部溢流排出，尾矿随着水流到底部排出。跌落箱中没有运动部件，通过高压风将浮选药剂以乳滴状喷入跌落箱，与浮选入料混合，由于重力的作用使矿浆由上向下流动，在流动过程中药剂和矿粒充分接触，提高了目的矿物的可浮性，进入浮选柱后，可以提高浮选速度和浮选柱的处理量。

该浮选柱主要用于分选小于0.5mm的煤泥，降低煤泥的灰分、硫分，提高精煤的发热量，是理想的煤泥处理设备。该设备也可分选铁矿、高岭土、石墨等各种细粒矿物。此外，还可以用于污水处理、废纸脱墨，是环境保护的友好设备。四川大邑县悦来煤焦有限责任公司曾使用1米浮选柱，不用喷水的指标是：矿浆通过量50~60m3/h，干煤泥处理量5~7t/h，入料灰分为34.63％，入料-325目占60％，其灰分51％，入料浓度116g/L，精煤灰分8.74％，尾煤灰分57.78％，浮选药剂耗量1.15kg/t干煤泥。从1988年至今正常运行，创造了显著的经济效益和社会效益。设备技术特征见表35-2。

该设备的特点是：

(1)处理量大，比机械搅拌浮选机提高3倍，也可简化工艺流程；

(2)分选效果好，泡沫品位高，易于控制精煤灰分含量；

(3)无运动部件，维修方便，操作简单，易于控制；

(4)能耗低，是机械搅拌浮选机的80%；

(5)投资及运行费用低，效益显著。

表35-2

FXZ系列静态浮选柱技术特征

型

号

直

径（M）

矿浆量（m

3/h）

干煤泥量（t/h）

配套电机（Kw）

选煤厂（万吨）

FXZ-1000

1.0

50~60

4~6

FXZ-1000

1.5

70~110

5~8

18~25

FXZ-1000

2.0

110~180

8~10

25~55

FXZ-1000

3.0

250~500

10~15

55~75

30~60

2．微泡浮选柱

微泡浮选柱采用传统浮选柱的矿化分离模式，突出了浮选的“微泡效应”。该浮选柱的“革命性”贡献在于成泡方式的变革——流体混合成泡(具体实施方式为加静态搅拌叶片)。这使得利用流体混合成泡以及“微泡效应”来提高柱分选效率的思路在当今的浮选柱设计中被普遍采用。该设备关键之处在于采用了新型的微泡发生器，这种多孔管微泡发生器是在压力管道上设一微孔材质的喉管，喉管通过密封的套管同压缩空气相连，当矿浆快速经过喉管时，压缩空气经过套管从多孔材质的喉管的壁进人矿浆，形成微泡，并立即被流动的矿浆带走。微泡浮选柱的高度与直径比值在10~15之间，由所需的浮选时间而定。煤浆由上部柱高2/3处给入，泡沫层厚度0.6~0.8m，与柱高和直径无关。淋洗水加入泡沫中间（可由试验而定），水量按断面计算时约20cm3/(cm2.min)。它主要应用在煤泥分选方面。直径2.4m的浮选柱用于处理高灰（60％），细粒（小于150网目）、低浓度（3％~6％固体）、曾经用大直型浮选机处理但得不到合格指标的煤泥水时，一次分选可得出灰分10％、可燃体回收率60％的好指标。

TAFC系列双充气微泡浮选柱也属于微泡浮选柱中的一种，主要应用于煤炭行业。其特点是：占用空间小，能耗低，调整方便，其循环矿浆充气系统和涡流强制矿化分散装置，可最大限度提高精煤产率。设备技术参数见表35-3。

表35-3

TAFC系列双充气微泡浮选柱

筒体直径

3000mm

2000mm

1500mm

柱体高度

7500mm

7000mm

7000mm

入料浓度范围

50~120g/L

入料粒度

＜0.5mm

矿浆通过量

200~250m3/h

100~150

m3/h

＜100

m3/h

干煤泥量

10~20

t/h

10~150t/h

6~8

t/h

入料充气组件

1套

气泡发生器

12个

6~10个

8~10个

气泡发生器工作压力

0.15~0.20MPa

循环泵功率

55KW

45KW

37KW

入料泵功率

30KW

22KW

18.5KW

3．Microcel浮选柱

Microcel的浮选过程设计具有较小气泡而产生高浮选速率的特点。Microcel浮选过程由粗选、扫选和精选三部分组成。从泡沫和矿浆分界面下面给入的矿浆在浮选柱的精选部分和上升的气泡呈逆向流动。载荷气泡进入泡沫层，在这里机械夹带的矿物质被冲洗水冲掉，因此泡沫层被看作是精选阶段。进入浮选柱底部的部分物质成为循环矿浆，被泵打入气泡发生器而发生微泡。在底流一起流动的气泡和矿浆流动产生密切的接触，物料得到进一步的回收。气泡发生器部分起着扫选的作用。任何在气泡发生部分下面的物质均排出浮选柱作为尾矿。

Microcel浮选柱采用了静态在线混合器作为气泡发生器，它被安装在离心泵压力较高的一边，离心泵迫使来自浮选柱底部的矿浆进入静态混合器。多个较小的叶片以一定的相对位置放于发生器中，使流体产生空洞，同时使大的气泡破碎成较小的气泡，直到成为微泡。这种发生器在容器容积含量为30%~50%时，悬浮液易于产生极端细小的气泡，气泡直径在0.1~0.4mm之间。

静态在线混合器的使用使得该浮选柱具有如下优点：

(1)气泡发生器不会堵塞，不需要用清水来产生气泡，降低了清水和能源消耗；

(2)气泡发生器安装在外面，在操作过程中易于维修；

(3)微泡在浮选柱中上升，不产生紊流，加上冲洗水添加，细粒矿物质的机械夹带减小到最少；

(4)当给料品位有所变动时，泡沫产品能基本保持一致；

(5)浮选柱得到的精矿产品显示了较好的脱水特性，和常规浮选相比具有较高的过滤效率和较低的产品水分。

4．KYZ型顺流喷射浮选柱

顺流型喷射浮选柱利用射流原理引入空气，其结构简单经济，且选别效率高于传统逆流式浮选柱，矿浆和气泡同向流动，迫使气泡克服浮力向下运动，为气泡和矿浆接触创造理想的条件。由于顺流浮选柱相对于逆流型浮选柱具有容易操作、生产效率高等优点，国际上纷纷加紧了对其工作原理和选别性能的研究。

国内研制的KYZ型向下顺流喷射型浮选柱的工作过程为，利用射流原理引人空气，圆锥形收缩管和喇叭管在空室中间相联，当高速水流由圆锥形收缩管流向喇叭管时，因水流断面逐渐缩小，在圆锥形收缩管出口处形成较大流速，致使该处压强降低至大气压以下，在空室中形成负压，使空气从外部进入到空室中。在分选槽底部安装有一个反射假底，其作用是将高速水流所携带的空气粉碎成气泡，进而弥散到整个分选槽，充气量与浮选柱的结构参数(包括喷射尖缩管直径、分选槽直径)

和运行参数(包括流量及给入点压力)

有关。如图35-6。下导管与反射假底、分选槽的同心程度对于泡沫层的平稳性和空气分散程度影响较大。

该设备特点为：

(1)产生的气泡直径较小，空气保有量较高。

图35-6

KYZ型顺流喷射式浮选柱

(2)空气分散比较均匀。

(3)结构简单、操作方便、无运动部件。

5．顺流-逆流多段浮选柱

俄罗斯IOTT研究所研制的顺流-逆流多段浮选柱，其槽体体积为15~80m3，高4~6m，由于每一柱体具有不同的流体力学和充气状态，而且可以通过改变柱体截面来调整流速和停留时间，所以可使不同可浮性颗粒得到回收。此外，这种浮选柱还可以出多产品。

XFZ多柱室逆顺流交替流动式浮选柱共有四个柱室，按顺序单数为逆流柱，双数为顺流柱。柱体的上部和中部设有两组填料带，将柱体分为一、二、三3个区。在逆流柱中一区是入料区，其上面为精选区，下面为捕集区，三区是中矿排出区；在顺流柱中三区是入料区，二区是矿化气泡分离区，一区是中（尾）矿排出区。每组填料带由数层交叉垂直的平行板组成，这样就形成了上下相互垂直的矩形小流道，而在两层的界面上构成许多小方块。流体上下运动时先在一个方向被切割成小矩形块，到另一层时又从另一方向被切割，此时各矩形液流重新组合，使气、液、固三相得以更加充分混合。一、三区的空间内没有填料，可促使矿浆沿柱体整个截面均匀分布，同时使气泡有足够的空间扩散到整个截面上。在泡沫层的上方设置了冲洗水喷洒装置。

该设备的气泡发生器为金属与橡胶相结合的构件，浮选所需的充气量由空压机通过管道和气泡发生器产生。经测定，气泡的大小和充气量有很大的关系：随充气量的不断增加，气泡发生器出口处气体速度增加，得到的气泡更细；但充气量过大时，对矿浆的搅拌强度增加，会影响液面的稳定性。

6．FCMC型旋流微泡浮选柱

图35-7

旋流微泡浮选柱

FCMC型旋流微泡浮选柱是我国研制的适合中国煤泥的浮选柱，包括浮选段、旋流段和气泡发生器3个部分，如图35-7。该设备已形成系列产品，在煤泥分选方面具有明显优势。气泡发生器是该设备实现浮选的关键部件。利用循矿浆加压喷射、吸入空气和粉碎气泡，并通过压力释放析出大量微泡，然后沿切线进入旋流段。气泡发生器在产生合适气泡的同时，也为旋流段提供旋流力场。旋流段的工作是扫选回收浮选段未分选的精煤颗粒，以提高精煤回收率，增加浮选尾矿灰分。气泡在柱体内上升矿化并不断受到清洗，清除夹带的高灰物，上部较厚的泡沫层以及冲洗水的喷淋作用使精矿的品位大大提高，从而使旋流微泡浮选柱具有很高的精煤回收率和选择性。设备技术参数见表35-4。

表35-4

FCMC型旋流微泡浮选柱主要技术参数

型

号

FCMC-1000

FCMC-1500

FCMC-2024

FCMC-3000

柱体直径

mm

1000

1500

2024

3000

柱体高度

mm

5800

5800

5800

5800

入料粒度

mm

-0.5

-0.5

-0.5

-0.5

处理能力

矿浆

m3/h

20~60

60~100

100~150

150~300

干量

t/h

2~5

5~7

7~10

10~20

微泡发生器工作压力

MPa

0.16~0.20

0.16~0.20

0.16~0.20

0.16~0.20

微泡发生器数量

个

配套循环泵功率

kw

45~55

75~90

FCMC型旋流微泡浮选柱的技术特点在于：

(1)过饱和溶解气体析出及采用射流方式形成微泡，微泡的形成提高了细颗粒矿化效率；

(2)利用煤炭的密度与可浮性的联系，将浮选与重选方法结合，形成多重矿化为核心的强化分选回收；用高效矿化方式去处理难浮物料是提高整个矿化效率的关键；

(3)构建柱体内的“静态”分离环境，实现微细物料的高效分离；

(4)形成了有利于提高浮选精矿质量的合理分选梯度、厚泡沫层及二次富集作用的强化、喷淋水的进一步降灰，精煤质量高。

FCMC型旋流微泡浮选柱的性能特点为：

(1)在一个柱体内完成粗选、精选和扫选作用；

(2)高灰细泥对精煤的污染小，精煤质量好，回收率高，特别适用于分选灰分高，粒度特细的难选煤和高硫煤脱硫；

(3)单位容积处理能力大；

(4)节省厂房体积、节省基建投资，节能经济效益高；

(5)操作、维修管理方便。

该类型浮选柱主要用于选煤厂的-0.5mm的煤泥浮选，实践证明该设备对超细粒煤的分选特别有效，对高硫煤脱硫也有较明显的效果。该设备也能应用于各种金属和非金属矿物的浮选和某些污水的处理。投资视生产规模而定。和常规机械搅拌式浮选机相比，节省厂房面积1/2，节省电耗1/3，在相同精煤质量时回收率能提高5%以上。

7．新型KФM浮选柱

图35-8

KФM系列压气浮选柱

1-空气升液装量；2-中央管；3-环形泡沫收集槽；4-预先充气装量；5-浮选槽机壳；6-充气机组；7-底部的排料装量。

乌拉尔选矿研究设计院新研制的新型KФM浮选柱由喷射充气器、微泡发生器、中央浮选管、排料装置和泡沫收集槽组成。经药剂处理后的矿浆，在100~150kPa的压力下给入到第一级充气装置4中，矿浆在那里被微细空气泡饱和，此后矿浆空气混合物流入由中央管2和浮选槽的扩展部分所限制的第一浮选区。在这一区域中，被捕收剂膜牢固固着的矿粒发生浮选。属于难选的和粗粒的部分未发生浮选的有价组分往下降落。在产品转移到第二浮选区域时它的运动轨迹发生改变，这样就消除了逆流现象，确保矿物颗粒与气泡在一定的角度下相遇，并因此而可以最充分地实现浮选。这种浮选柱消除了常规浮选柱中的矿粒与气泡对流运动现象，如图35-8。该浮选柱中有2个充气区、矿浆内的沸腾层区、2个刮泡区、2个槽内产品排料区。因此，在同一台浮选设备中就可以实现粗选、精选和扫选作业。该浮选柱处理能力大，占地面积小，能耗低，浮选矿物粒度范围广。

（三）高柱型浮选柱

有代表的高柱型浮选柱主要有以下几种：

加拿大Boutin浮选柱、Flotair浮选柱、波兰KFP浮选柱、乌克兰浮选柱、ФП型浮选柱、Leeds浮选柱、MTU充填介质浮选柱、电解浮选柱、磁浮选柱和多层段浮选柱等。改进的高柱型浮选柱具有浮选回收率高，选择性好等优点，不足之处主要十单位容积分选效率低，操作维修不便。高柱型浮选柱由于大多数采用层流流态下进行矿化与分离，因而碰撞矿化效率低，矿浆停留时间长。目前，浮选柱的设计均由高柱型向矮柱型方向发展，已由原来的十几米降至几米，大型浮选柱的高径比逐渐减小，即使大型化的浮选柱的高度也基本上都在十米以下。

1．Flotair浮选柱

Flotair浮选柱由美国Deister选矿有限公司于七十年代生产，其直径为0.2~3.7

m，高度3.5~15

m，为了避免浮选柱下部堵塞，有压-水混合物从多孔底板通入浮选柱的下部，并在底板上方形成三相流化床以改变粗颗粒的分选，目前已近200台该类型的浮选柱在世界各地运行。

2．电解浮选柱

印度研制的电解浮选柱是在其底部安装电极，靠电解水产生的微小氢气、氧气气泡碰撞并附着疏水性颗粒，对细粒的浮选效果较好。

（四）其它新型浮选柱

1．多产品浮选柱

多产品浮选柱的设计最早由俄罗斯IOTT研究所的Rubinsein提出，后来出现了三产品浮选柱——3PC浮选柱。3PC浮选柱与常规浮选柱相比，在富集比和浮选速率上有一定的优势，泡沫回落物被选择性地分离出来后，避免了颗粒的再循环，不致发生常规浮选柱中污染精矿的现象，并且3PC浮选柱中矿浆密度、黏度、滞留固体成份保持恒定，可精确地截取精矿。

2．稳流板浮选柱

密西根技术大学针对轴向混合和泡沫兼并问题，研制了带有水平稳流板的浮选柱，使问题得到了较好的解决，水平稳流板由一些简单带孔的板组成。

3．二维浮选柱

美国西弗吉尼亚大学的Meloy等提出了二维浮选柱，它的柱体内部由充填物分成若干个小槽，因此可以产出一组品位连续变化的产品，类似于摇床。

四、几种典型的浮选柱

（一）旋流-静态微泡柱分选设备

1.旋流-静态微泡浮选柱技术的创新点

旋流-静态微泡柱分选的分离方法由中国矿业大学提出。该方法的提出打破了最初柱浮选设备单一的“层流”矿化反应模式，在保持柱浮选选择性优势的同时，引入了“紊流”矿化反应机制，实现了物料的梯级优化分选，将柱浮选、旋流分离、高度紊流矿化有机地结合起来，建立了以浮选柱为基本结构形式的微细物料分离与回收方法，形成了完善的矿化反应机制和分选过程，实现了由柱浮选到柱分选的方法创新。

A

三相旋流分选与柱浮选的结合三相旋流分选的特点在于保持柱浮选优势的同时，在柱浮选段下部引入了三相旋流分选体系。它通过切向旋转的径向逆流碰撞，产生了密度分离与表面浮选的叠加效应，柱浮选背景下旋流场结构的设计，保证了微细旋流分选作用的发挥，克服了旋流对柱浮选的干扰，与柱浮选体系有机地集合成一体，使得柱选中矿得到进一步的有效分选。三相旋流分选体系的引入，使得柱分选粒度下限大大降低，矿化速度进一步得到提高，其分选粒度下限随旋流力场离心因数的增大而降低，矿化速度与旋转角速度平方成正比。

B

柱浮选的静态化与混合充填

浮选柱内的充填是实现“静态化”的有效手段，混台充填模式即在柱分离段的精选区域采用填料充填，分选区域采用筛板充填，二者之间的入料位置不充填。

精选区的填料充填改变了浮选柱运行状况与分选效果。填料分散了气泡和矿浆，改善了浮选柱内的流态和泡沫支撑力，并将压人的气体分割成尺寸均匀的细小气泡，为浮选提供更好的气泡分布及两相接触面积，实现了真正的“塞流”浮选，强化二次富集作用。分选段的多段孔板充填使得柱体内的流态成“S”型方式运动，遏制底部旋流的流体扰紊动；在分选区域内创造一个既有利于气泡矿化，又有利于矿化气泡升浮与分离的精选环境；有效地克服了充填堵塞以及浮选柱内常见的“沟流”、“翻花”等不利现象；充分发挥了分选区域的双重分选作用。

这种混合充填前后平均灰分梯度可由2.6%/m增至6.8%/m，产品质量明显提高。

C

射流成泡与管流矿化

射流成泡是通过高速射流在负压条件下引射气体并把气体粉碎成气泡，它的优势在于产生的泡沫细。通过瞬时采样分析，气泡发生器出口处D=0.50mm的气泡占到了95%。微泡提供了细颗粒矿化条件。由于直径小，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。此外，在同样充气量条件下，气泡尺寸越小，数量就愈多，单位充气量的气泡比表面积就越大，从而直接增加了气泡与矿粒的附着机会，提高了浮选回收能力。

循环管中的高紊流状态大大提高了矿化效率，是强化柱分选回收能力，提高柱分选效率的重要手段。形成射流的能量是整个柱分选设备的能量来源，该能量主要通过由柱体外在的循环泵源源不断的输入。射流能主要消耗于四个方面：

DE射=DE引+DE混+DE过+DE旋

（35-1）

式中，DE引—引射气体的能量

DE混—气体与矿浆混合的能量

DE过—三相流体系在管道内高速流动过程中损失的能量

DE旋—产生旋流力场的能量

其中，DE混耗散最大，即管流矿化消耗了大部分能量。与浮选机相比，旋流微泡浮选柱的一个明显优势在于它的射流能的大小可以通过改变循环泵的负荷得以实现，从而能保证柱体内的能量得到“无限放大”。

D

梯级优化分选过程的形成旋流微泡浮选柱实现了三种矿化方式的梯级组合。柱浮选用于原料预选，并得到高质量精矿；旋流分选用于柱浮选中矿的进一步分选，并通过高回收能力得到合格尾矿；管流矿化用于旋流分选的进一步分选并形成循环。该分选矿化过程的特点是，随着分选过程的进行，易浮选的物料会优先浮出，物料的可浮性越来越差；与此同时，该过程构建了塞流-旋流-管流的矿化分选环境，流体的紊流度不断增加并且实现了内部循环，这样提高了颗粒与气泡碰撞矿化的概率与强度，从而实现了可浮性较差物料的分选。

对于整个分选过程而言，循环分选链为：旋流预选（中矿分离）Þ气泡发生器内高度紊流矿化（中矿分选）Þ旋流扫选（分离把关）；分选条件依次为：层流Þ旋流Þ管流。分选环境逐步得到加强，矿化效率逐步提高，适应了物料性质随着矿化反应过程而逐渐变差的趋势，弥补了最初柱浮选设备单一矿化条件的不足，即用多重高效矿化方式去处理难浮物料是提高整个矿化效率的关键。

2.旋流-静态微泡浮选柱分选的基本原理

图35-9

旋流-静态微泡浮选柱

旋流-静态微泡浮选柱属于逆流式浮选柱，其主体结构包括浮选柱分选段（下称柱分离段装置），旋流分离段（或称旋流分离段）、气泡发生与管浮选（或总称管浮选装置）三部分，如图35-9。整个浮选柱为一柱体，柱分离段位于整个柱体上部；旋流分离段采用柱-锥相连的水介质旋流器结构，并与柱分离段呈上、下结构的直通连接。从旋流分选角度，柱分离段相当于放大了的旋流器溢流管。在柱分离段的顶部，设置了喷淋水管和泡沫精矿收集糟；给矿点位于柱分离段中上部，最终尾矿由旋流分离段底口排出。气泡发生器与浮选管段直接相连成一体，单独布置在浮选柱柱体体外；其出流沿切向方向与旋流分离段柱体相连，相当于旋流器的切线给料管）。气泡发生器上设导气管。

管浮选装置包括气泡发生器与浮选管段两部分。气泡发生器是浮选柱的关键部件，它采用类似于射流泵的内部结构，具有依靠射流负压自身引入气体并把气体粉碎成气泡的双重作用（又称自吸式微泡发生器）。在旋流-静态微泡浮选柱内，气泡发生器的工作介质为循环的中矿。经过加压的循环矿浆进入气泡发生器，引入气体并形成含有大量微细气泡的气、固、液三相体系。含有气泡的三相体系在浮选管段内高度紊流矿化，然后仍保持较高能量状态沿切向高速进入旋流分离段。这样，管浮选装置在完成浮选充气（自吸式微泡发生器）与高度紊流矿化（浮选管段）功能的同时，又以切向入料的方式在浮选柱底部形成了旋流力场。管浮选装置为整个浮选柱的各类分选提供了能量来源，并基本上决定了浮选柱的能量状态。

当大量气泡沿切向进入旋流分离段时，由于离心力和浮力的共同作用，便迅速以旋转方式向旋流分离段中心汇集，进入柱分离段并在柱体断面上得到分散。与此同时，由上部给入的矿浆连同矿物（煤）颗粒呈整体向下塞式流动，与呈整体向上升浮的气泡发生逆向运行与碰撞。气泡在上升过程中不断矿化。与其它浮选柱不同的是，气泡一进入浮选柱即被水流很快分散，减少了沿柱体断面扩散所需的路径，从而为降低浮选柱高度创造了条件。

旋流分离段不仅加速了气泡在柱体断面上的分散，更重要的是对经过柱分离段分选的中矿以及循环中矿具有再选作用。在旋流力场作用下，两部分中矿按密度发生分离，低密度物料（包括绝大部分气泡和矿化气泡）汇集旋流分离段中部并向上进入柱分离段，再次经历柱分离的精选过程。因此，作为表面浮选的补充，旋流分离段强化了分选与回收。对于煤泥的降灰脱硫来说，柱分离段和旋流分离段的联合分选具有十分重要的意义，柱分离段的优势在于提高选择性，保证较高的产品质量；而旋流分离段的相对优势在于提高产率，保证较高的产品数量。

旋流分离段的底流口采用倒锥型套锥结构，把经过旋流力场充分作用的底部矿浆机械地分流成两部分：少量微细气泡以及大量中间密度物料进入内倒锥，单独引出后作为循环中矿；而大量高密度的粗颗粒物料则由内外倒锥之间排出，成为最终尾矿。循环中矿作为工作介质完成充气并形成旋流力场。倒锥型套锥结构具有以下功能：

(1)减少了高灰物质循环对分选的影响；

(2)中矿循环恰好使一些中等可浮性的待浮物，在管浮选装置内实现高度紊动矿化；

(3)减少了循环系统，特别是关键部件自吸式微泡发生器的磨损，保证了设备的正常运转，延长了设备寿命。因此，倒锥型套锥结构对整个分选作业具有十分重要意义。

3.旋流-静态微泡浮选柱的影响参数

影响浮选柱的工作参数很多，如矿物解离度、给矿浓度、速度、充气量、泡沫层厚度、循环泵压力、喷淋水用量及药剂消耗等。其中一些是操作因素，设计时主要考虑充气量、泡沫层厚度和循环泵压力等几个参数。

充气量一般被认为是达到浮选柱最佳化控制中最灵活、最敏感的一个因素，对浮选产品的数、质量有直接影响。一般随充气量的增加，精矿产率和品位同时增加，但充气量超过一定值后精矿品位反而下降。循环泵压力是影响浮选柱分选指标的重要参数之一。旋流-静态微泡浮选柱本身没有能量，其能量来源主要在于循环泵能量的不断输入，进而实现柱体内部矿浆的连续有效分选。循环泵压力的大小直接影响到柱体内部旋流力场的强度以及充气速率的大小，进而关系到分选效果的好坏。压力越大，柱体内部旋流力场的强度越大，但在不调整充气阀门的前提下，充气速率也相应加大，浮选过程中产生的气泡也就越多，矿物与气泡接触的机会也相应增加，但过量的气泡会使一些不该上浮的物料随泡沫相排出，导致底流产品回收率和泡沫相品位下降，底流产品品位上升；同时，循环泵压力的增大，浮选柱底部循环泵入料口处较高的向下流速，可能使得向下的矿浆流大于气泡上浮速度，导致部分中矿和泡沫从浮选柱底部的排料口排出，影响分选指标。反之，循环泵压力过小，柱体内部旋流力场的强度实现不了充分分选矿浆的目的，势必会直接降低分选指标。只有在循环泵压力适当和充气速率相匹配的情况下，才能获得较高的分选指标。

4.旋流-静态微泡浮选床

旋流-静态微泡浮选床是在柱分选设备研究的基础上发展起来的大型微细粒物料分选设备，如图35-10。该设备利用旋流分选原理，采用以双旋流结构为主体的旋流分选单元。一个旋流分离单元由一

图35-10

旋流-静态微泡浮选床

个大直径的旋流分离器与环绕其周围的若干个小直径的分选旋流器组成。分选旋流器的溢流以入料的形式进入旋流分离器，底流排出成为最终尾矿；旋流分离器位于柱分离单元的中心，并把柱分离中矿与分选旋流器的溢流进一步离心分离成两部分：溢流供柱分离进一步精选，底流以循环矿浆形式供管浮选装置进一步分选。旋流-静态微泡浮选床具有以下特点：设备运行稳定可靠，分选选择性好，效率高，处理能力大，电耗低，系统配置简单，安装方便，适应能力强。该设备可应用于-0.5mm粒度级煤泥的浮选，特别对-0.25mm细煤泥选择性好。

5.旋流-静态微泡柱分选设备的特点及技术规格系列

旋流-静态微泡柱分选设备早已形成系列产品，目前国内应用最为广泛。柱分选设备独特的循环中矿加压喷射自吸气成泡、针对物料分选过程难易程度而实施的多样化的矿化方式的集成以及梯级优化分选的实现，使得该浮选柱（床）具有富集比高、回收率高的显著优势。其特点是：处理量大，生产流程简单，分选效果好，对细粒高灰煤泥分选效果好，可生产低灰精煤，没有运动部件，易于安装、维护、操作，易于自动化，电耗低，投资和基建费用很低，占地面积小，维修量少，维修费低。与常规技术相比，该技术可提高2~3个质量档次，设备运行的稳定性与作业效率显著提高，投资与运行费用可降低1/3。最大单台设备能力达到800~1000 m3/h。通过柱分选技术的工业应用，降低了粉煤分选下限，较好地解决了煤泥深度降灰脱硫问题，并在特低灰低硫洁净煤制备、高灰细泥粉煤分选方面形成了生产能力。此外，在萤石、白钨、铜矿、磁铁矿等矿物浮选方面已成功实现工业化应用，还可应用于环境工程的污水处理等行业。应用企业逾400家，出口越南、印尼。其技术规格系列见表35-5。

6.旋流-静态微泡浮选柱的应用实例

柿竹园有色金属公司曾采用旋流-静态微泡浮选柱回收白钨粗选尾矿中的萤石，浮选柱采用一粗三精四段作业与浮选机一粗二扫九精二精扫共十四段作业相比，旋流-静态微泡浮选柱仅用四段流程即可获得合格精矿，使浮选流程大大缩短。在精一中矿不返回的情况下，浮选柱四段分选获得了萤石精矿品位97.44%，实际回收率28.99%的作业指标，与浮选机萤石精矿品位97.92%，实际回收率28.00%基本相当。在精选中矿返回的情况下，浮选柱四段分选作业取得了萤石精矿品位99.01%，实际回收率40.11%的优异指标，使精矿品位与回收率均有大幅度提高。

表35-5

旋流-静态微泡柱分选设备技术规格系列

类

型

与

规

格

性

能

特

点

单机配套厂型（选煤厂）万吨/年

系

列

设

备

规

格

矿浆量，m3/h

泵功率，kw

浮

选

柱

FCSMC-1500

50~60

<8

FCSMC-2024

100~120

FCSMC-3000

200~250

浮

选

床

FCSMC-3000´6000

400~500

FCSMC-6000´6000

800~1000

110´2

120

不定规格浮选床

…

…

…

（二）Jameson浮选柱

Jameson浮选柱是目前国内外推崇的新型短体浮选柱，从气泡和矿浆运动的方向上看，可归为顺流式浮选柱中。该浮选柱提出了高效矿化与降低浮选柱高度的问题，不仅给浮选柱技术发展注入了新的活力，而且为浮选柱的技术发展指明了方向。随着Jameson浮选柱结构的不断改进，其在我国的应用也得到了进一步发展。

1．Jameson浮选柱的结构及原理

图35-11

Jameson浮选柱

Jameson浮选柱结构如图35-11所示。其工作原理是将调好药剂的矿浆用泵经入料管打入下导管的混合头内，通过喷嘴形成喷射流而产生一负压区，从而吸入空气产生气泡，矿粒在下导管与气泡碰撞矿化，下行流从导管底口排入分离柱内，矿化气泡上升到柱体上部的泡沫层，经冲洗水精选后流入精矿溜槽，尾矿则经柱体底部锥口排出。

充气搅混装置是Jameson浮选柱的关键部件。它采用了射流泵原理，在把矿浆压能由喷嘴转换成动能的同时，在密封套管内形成负压，并由空气导管吸入空气。经密封套管，射流卷裹气体进入混合套管，在高度紊动流体作用下，气体被分割成气泡并不断与矿粒碰撞粘附，得到矿化。分散器相当于静态叶轮，将垂直向下的矿浆沿径向均匀分散。

2．Jameson浮选柱的优缺点

该设备具有以下优点：

(1)矿粒与气泡的碰撞矿化发生在下导管内，柱体只起使矿化气泡与尾矿分离作用，实现了矿化与分离的分体浮选策略；

(2)浮选柱高度低，由于气泡矿化过程不发生在柱体内，省去了常规浮选柱中的捕集区高度(约占总高度的80％)。工业用的Jameson浮选柱高度仅2m；

(3)矿粒在下导管内滞留时间短，连同柱体内总停留时间为lmin，因而浮选效率高；

(4)下导管内矿浆含气率高达40％~60％，而普通浮选柱气溶率为4％~16％；

(5)矿浆通过混合头的喷嘴以射流状进入下导管，从而形成负压将空气吸入，省去了正压充气设备。全机唯一动力设备是一台给料泵，节省了生产投资和电耗。

该柱缺点是：

(1)矿浆停留时间短，对可浮物较多的物料(如煤)，往往需要设置多段扫选；

(2)下导管内不易充满，给矿波动时，分选过程不稳定；

(3)对气体的劈分成泡过程不完善，在下导管内易产生“气团”，在柱体内易形成“气弹”。影响分选效果。

（三）CPT浮选柱

目前，加拿大CPT公司生产的浮选柱在我国选矿行业应用较为广泛。CPT公司的前身是著名的加拿大柯明柯工程服务公司(CESL)的浮选柱分公司，1999年年初浮选柱分公司独立，并更名为Canadian

Process

Technologies

Inc，简称CPT公司。CPT浮选柱技术处于国际领先地位，到目前为止销售的浮选柱总量超过300台及上千套气体分散系统，产品分布在加拿大、美国、智利、秘鲁、墨西哥、巴西、澳大利亚、菲律宾、印尼、南非、赞比亚等27个国家。

2024年8月，德兴铜矿大山选矿厂安装了一台Φ2.44×10m的CPT浮选柱，用于其“后三万”第二段浮选的精Ⅱ作业。浮选柱泡沫产品品位比机械浮选槽泡沫产品品位高3~4个百分点，而此时铜及其他伴生元素的回收率没有下降。浮选柱泡沫产品品位还有进一步提高的可能性。CPT浮选柱除用于矿物处理之外，在含油污水的油水分离、铜溶剂萃取-电解法(SX-EW)中的有机相回收、废纸再生中的油墨脱除作业中也有所使用。

1．CPT浮选柱的工作原理

CPT浮选柱属于逆流浮选设备，如图35-12。其工作过程为：经浮选药剂处理后的矿浆，从距柱顶部以下约1~2m处给入，在柱底部附近安装有可从柱体外部拆装检修的SlamJet气体分散器。气体分散器产生的微泡，在浮力作用下自由上升，而矿浆中的矿物颗粒在重力作用下自由下降，上升的气泡与下降的矿粒在捕收区接触碰撞，疏水性矿粒则被捕获，附着在气泡上，从而使气泡矿化。负载有用矿物颗粒的矿化气泡继续浮升而进入精选区，并在柱体顶部聚集形成厚度可达lm的矿化泡沫层，泡沫层被冲洗水流清洗，使被夹带而进入泡沫层的脉石颗粒从泡沫层中脱落，从而获得更高品位的精矿。尾矿图35-12

CPT浮选柱

矿浆从柱底部排出，整个浮选柱保持在“正偏流”条件下进行操作。

2．SlamJet气体分散系统

SlamJet气体分散系统是CPT浮选柱的核心部件，用于将细小气泡注入浮选柱，其所需空气通过一组环绕浮选柱槽体的支管提供，分散系统共有8根简单、坚固的气体喷射管，这8根喷射管均匀地分布在浮选柱底部附近的同一截面上。每根管子配有一个独立的气动自动流量控制及自动关闭装置，该装置可保证喷射管在未加压或发生意想不到的压力损失时能保持关闭和密封状态，防止矿浆流入，确保气体分散系统不因堵塞而影响其正常运行。喷射管喷嘴有多种不同的型号可供使用，通过调整喷射管开启个数及喷射管喷嘴的大小，可调整浮选柱的供气压力、流量，确保柱内空气充分弥散。气体分散系统部件设计得比较合理，使独立的SlamJet即使在浮选柱运行的情况下都易于插入和抽出，检查、维修方便。

3．CPT浮选柱的工艺参数

(1)空气流速率——被浮起的物料量对由分散器引入的空气的流速率是很敏感的，浮起单位固体颗粒量所需的空气量取决于颗粒的大小和气泡的大小，气泡的大小受供气压力的影响。空气流速率太小，泡沫区易发生聚集而形成死区，影响精矿品位；空气流速率太大，会造成浮选柱“溢泡”，影响回收率。

(2)冲洗水偏流——冲洗水量太大会使泡沫破裂，把粗颗粒矿石冲回底流，影响浮选柱回收率的提高。冲洗水量太小，精矿泡沫会带走矿浆中的水分，造成负偏流，影响精矿品位。因此，添加适量的冲洗水能减少精矿中脉石矿物的夹带，有利于提高精矿品位。

(3)界面高度——浮选柱泡沫层厚度的变化对浮选柱的选别指标影响较大，一般需保持有较厚的泡沫层(500~1200mm)，适当厚度的泡沫层有利于泡沫的稳定和精矿品位的提高，但过厚泡沫层会造成“回落”的有用矿物增加，从而影响被浮选矿物的回收率。

(4)冲洗水分配器高度——浮选柱采用泡沫浸没式冲洗水分配系统，冲洗水分配管的位置会影响泡沫的特性。如果分配器正好位于泡沫的表面，它可能会妨碍泡沫至溜槽的输送；当分配器位于泡沫上方时，泡沫的密度将会由于通往浮选柱溢流的水短路而降低。因此，这些管子应设在泡沫层深处，以提高清洗效率。

4．CPT浮选柱的自动控制

(1)浮选柱的界面高度控制回路——浮选柱的界面高度(即泡沫与矿浆的界面位置)通过球形浮子和超声波探测器进行测定。该界面高度由PID控制器调节浮选柱底流管路上的自控管夹阀来实现。

(2)分散器空气流量控制回路——控制分散器的空气流量是保持浮选柱良好运行的最重要的参数。空气流量通过流量计进行测定，并通过球形阀自动控制。

(3)冲洗水流量控制回路——冲洗水的流量通过流量计进行测定，通过流量控制阀可以手动或自动控制。

五、浮选柱主要技术参数计算

浮选柱在工业应用过程中，涉及的技术参数很多。由于浮选柱种类多样，很多研究者从不同角度对其浮选动力学进行了研究，其得出的数学表达式也很多。现主要以旋流-静态微泡浮选柱为主，给出浮选柱主要技术参数计算的表达式。

（一）浮选矿浆体积的计算

Q={K1

W（R+1/ρ）}/60

（35-2）

式中，Q

——给料流量，m3/min；

W

——设计作业处理量（包括返回矿量），t/h；

R

——作业矿浆的液体与固体重量之比；

r

——矿石的密度，t/m3；

K1

——处理量不均衡系数。当浮选柱前为球磨机时，K1

=1.0；当浮选柱前为湿式自磨机时，K1

=1.3。

（二）浮选时间的确定

浮选时间的长短对浮选柱容积的大小和浮选指标的好坏影响很大，必须慎重选取。通常根据试验结果并参照类似矿石选矿厂生产实例确定浮选时间。一般可按照柱体容积和处理量粗略计算浮选时间。

t=

(KV)/

Q

（35-3）

式中，t

——浮选时间，min；

K

——浮选柱容积系数，一般在0.65~0.85之间；

V

——柱体几何容积，m3；

Q

——给料流量，m3/min。

（三）粒度分选下限

旋流-静态微泡浮选柱的粒度下限与力场强度密切相关，随着力场强度的增加，浮选的粒度下限迅速单调下降；当力场强度为重力场强的50倍时，浮选粒度下限达到1微米。

浮选分选下限公式为：

dk=3{（3uKm）/（2

Dr

db）}0.5

（35-4）

式中，dk——固体颗粒的粒度，m；

uK——运动粘度速度，m——水的粘度，Dr——矿物与水的密度差，kg/m3；

a——力场强度，即离心加速度与重力加速度的比值，无量纲；

db

——气泡直径，m。

（四）颗粒与气泡碰撞的相对速度

旋流-静态微泡浮选柱中的离心力场为浮选的碰撞与矿化提供了一种新的方式。除此之外，颗粒与气泡的碰撞也处于较高的能量状态。

相对速度为：

ukq=v2g（Drdk2+2db2）/18

u

（35-5）

式中，v——矿粒与流体的旋转角速度；

g——矿粒与流体的旋转半径。

Dr——矿物与水的密度差，kg/m3；

dk——固体颗粒的粒度，m；

db

——气泡直径，m。

（五）柱体直径和高度的关系

D={[

K1

W

(R+1/r)t]/[15πH(1-K0)]}1/2

（35-6）

式中，D

——浮选柱直径，m；

H

——浮选柱高度，m；

K0

——浮选柱充气率，粗选取K0=0.25~0.35，扫选取K0=0.2~0.25，精选取K0=0.35~0.45，泡沫层厚时取大值，反之取小值；

K1

——不均衡系数，浮选柱之前为球磨机磨矿时，取K1=1.0，浮选柱之前为自磨机时，取K1=1.3；

W

——设计作业处理量（包括返回矿量），t/h；

R

——作业矿浆的液体与固体重量之比；

r

——矿石的密度，t/m3；

t

——浮选时间，min。

（六）柱体高度的确定

在旋流-静态微泡浮选柱内，柱分离段包括两部分：精选区域与分选区域。因此，柱分离段的长度为：

H

=

Hj

+

Hf

（35-7）

Hj=1.2–1.5

（35-8）

Hf=（Afz

–Ay）/bz

（35-9）

式中，H——柱分离段长度，m；

Hj——精选区域长度，m；

Hf——分选区域长度，m；

Afz——柱分离中矿品位，%；

Ay

——浮选柱入料品位，%；

bz——柱分离段沿柱高的平均分选梯度，%/m。

（七）浮选柱固体处理能力的确定

浮选柱的泡沫承载与输送能力实际上是一个与浮选柱的矿化条件与充气性能有关的一个浮选柱性能指标。对于旋流-静态微泡浮选柱系列设备来讲，一般通过实验室或半工业浮选实验测得C值，然后作为判据来计算工业浮选柱的处理能力。

对于实验室或连续实验系统：

C

=

4Mf1Y1/pDc12

（35-10）

对于工业浮选柱：

C

=

4Mf2Y2/pDc22

（35-11）

Mf2

=（Y1/Y2）.（Dc2/

Dc1）2.Mf1

（35-12）

式中，C

——旋流-静态微泡浮选柱系列设备的泡沫承载与输送能力；

Mf1、Mf2——实验室浮选柱、工业浮选柱的给料速率；

Y1、Y2

——实验室浮选柱、工业浮选柱的浮选精矿产率；

Dc1、Dc2——实验室浮选柱、工业浮选柱的直径。

六、浮选柱的选型

（一）选型原则

浮选柱的类型、规格的选择和确定与矿石性质（密度、粒度、可浮性、含泥量等）、设备性能、产品要求、生产规模、流程结构等因素有关，选择时应综合考虑。一般来说，浮选柱的选型应遵循以下原则：

(1)目前，国内浮选柱主要应用在-0.5mm煤泥的分选方面，在金属矿物、非金属矿物、有色金属及黑色金属分选方面，旋流-静态微泡浮选柱具有明显的优势，对矿石的适应能力较强。

(2)选型时应同时兼顾设备矿浆及干矿通过量，合理地选择浮选柱的规格。

(3)浮选柱的规格必须与选厂的规模相适应。

(4)为充分发挥浮选柱的优越性，应尽量减少浮选系列，采用大型柱分选设备。

(5)入料粒度要满足设备要求。

(6)注意设备制造质量、易磨损件的寿命及备品、备件供应情况。

（二）选型计算

现以旋流-静态微泡柱分选设备的选型为依据，选型时一般可按照柱体单位面积矿浆处理量进行计算，具体计算公式如下：

n=（60

Q）/（p

D2

Q1）

（35-13）

式中，n1

——所需浮选柱台数；

Q

——给料流量，m3/min；

Q1

——单台柱体单位面积矿浆处理量，m3/h.m2；

D——浮选柱的直径。

为了确保选型的准确性，在进行设备选型时，建议按照柱体单位面积干矿处理量进行较核，具体较核计算公式如下：

n=（60W）/（p

D2

Q2）

（35-14）

式中，n2

——所需浮选柱台数；

W

——设计作业处理量（包括返回矿量），t/h；

Q2

——单台柱体单位面积干矿处理量，m3/h.m2；

D——浮选柱的直径。

旋流-静态微泡柱分选设备的处理能力见表35-6。配套电机功率可从表35-5中选取。

表35-6

旋流-静态微泡柱分选设备的处理能力

设备名称

断面积m2

干矿处理量t/h

按干矿计（t/h·m2）

矿浆处理量m3/h

按矿浆计（m3/h·m2）

FCSMC-2024

6-12

2-4

100-120

33.3-40.0

FCSMC-3000

12-20

1.7-2.8

180-240

25.7-34.3

FCSMC-3000×6000

25-40

1.4-2.2

350-450

19.4-25

七、浮选柱应用实例

表35-7

浮选柱应用实例

厂矿名称

弓长岭矿业公司

选矿厂磁铁矿阳离子反浮选

柿竹园有色金属公司

白钨粗选尾矿萤石的回收

柿竹园有色

金属公司白钨粗选

工艺流程

给矿

浮选柱

浮选柱

浮选柱

磁选机

精矿

尾矿

钨尾

高梯度磁选机

浓泥斗

浮选柱

精矿

尾矿

浮选柱

浮选柱

浮选柱

磁性产品

溢流

给矿

浮选柱

粗选

浮选柱

精选

尾矿

精矿

操作参数

浮选柱作业

粗选

一扫

二扫

粗选

精一

精二

精三

粗选

精选

浮选柱规格，m

FCSMCΦ3.6×8

FCSMCΦ3.0×7

FCSMCΦ2.6×7

FCSMCΦ1.6×8

FCSMCΦ1.6×8

FCSMCΦ1.2×7

FCSMC

Φ1.2×7

FCSMCΦ3.6×9

FCSMCΦ3.2×8

断面积，m2

10.17

7.07

5.31

2.01

2.01

1.13

1.13

10.17

8.04

几何容积，m3

8.4

8.4

有效容积，m3

充气型式

自吸式

自吸式

自吸式

工艺条件

处理量，t/h

6.3

3.6

2.4

2.5

磨矿细度-0.074mm，%

88~91

72~75

85~88

浮选时间，min

作业浓度，%

40~43

28~35

20~30

32~36

26~28

18~20

16~20

32~38

24~28

矿浆流量m3/h

143

130

浮选指标

原矿品位，%

63.00

17.82

0.47

精矿品位，%

69.30

98.08

19.80

尾矿品位，%

20.00

4.05

0.09

精矿回收率，%

95.94

40.89

81.22

精矿产率，%

87.77

7.43

1.93

装机功率，kw

132

185

本DOCX文档由 www.zciku.com/中词库网 生成，海量范文文档任你选，，为你的工作锦上添花,祝你一臂之力！