

第六章 浮选设备

- ◆浮选设备概述
- ◆机械搅拌矿化浮选设备
- ◆逆流矿化浮选设备
- ◆混流矿化浮选设备
- ◆流化态（床）浮选设备

6.1 浮选设备概述

(1) 浮选设备工作原理

矿浆充气 and 气泡矿化是浮选的两个必备条件，也是评定浮选设备工作效率的重要因素。

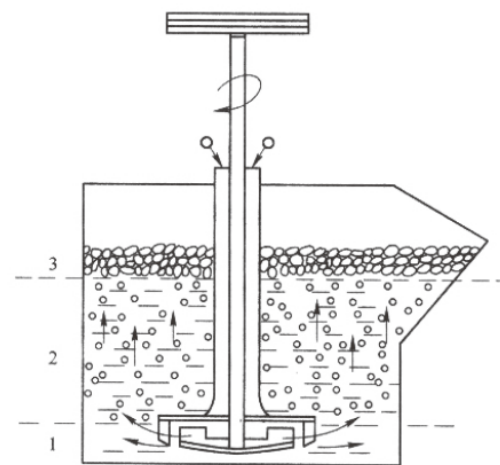
①气泡的形成。

吸入或由外部风机压入浮选设备内的空气流，可通过不同方法使之分散成单个的气泡。主要包括：**机械搅拌作用粉碎空气流形成气泡；使空气流通过细小孔眼的多孔介质而形成气泡；喷射式和喷射旋流作用产生气泡；采用负压或电解等方式析出气泡等；**有时在同一种浮选机内，可以同时采用两种以上的方式产生气泡。

②气泡的运动及分区。

气泡在一般机械搅拌式浮选机内的运动大体可分为3个区。

第1区是充气搅拌区。主要作用是：对矿浆空气混合物进行激烈搅拌，粉碎气流，使气泡弥散；避免矿粒沉淀；增加矿粒和气泡的接触机会等。在搅拌区气泡由于跟随叶轮甩出的矿浆流作紊流运动，所以，气泡升浮运动的速度较慢。



浮选机内各作用区的分布
1-搅拌充气区； 2-气泡分离区； 3-泡沫层

第2区是分离区。在此区间内气泡随矿浆流一起上升，且矿粒向气泡附着，成为矿化气泡上浮。随着旋涡运动变弱，静水压力减小，气泡变大，矿化气泡升浮速度也逐渐加大。

第3区是泡沫区。带有矿粒的矿化气泡上升至此区形成有一定厚度的矿化泡沫层，由于大量气泡的聚集，气泡升浮速度又减慢。泡沫层上层的气泡会不断自发兼并，产生“二次富集”作用。

③充气程度与空气弥散程度。

直接影响气泡的矿化过程、浮选速度、工艺指标和浮选药剂用量等。充气程度通常用充气量表征，即每分钟每平方米槽面积通过的空气量，或者每立方米矿浆中含有的空气量。气泡弥散程度或空气分布均匀性通常用K值表征，即单位时间和槽体面积内，平均空气量与最大空气量和最小空气量之差的比值，或者单位容积内平均空气量与最大空气量和最小空气量之差的比值。通常充气程度应根据具体浮选过程要求确定，而空气弥散程度和分布均匀性则反映出颗粒与气泡间的碰撞和矿化概率。

④浮选过程

浮选设备中，搅拌作用使矿粒悬浮并与浮选药剂发生作用，使目的矿物表面疏水化，非目的矿物亲水化；充气作用则在矿浆中产生气泡，并借助机械搅拌等作用使空气均匀弥散，为矿粒与气泡间的接触、碰撞和矿化创造良好条件；疏水矿粒与气泡碰撞并粘附在气泡上，形成矿化气泡；矿化气泡连续不断地浮升至矿浆面，形成泡沫层；在泡沫层中，气泡不断兼并、破裂和脱水，从而脱除一部分夹杂的亲水性矿粒，即发生“二次富集作用”；通过机械装置刮出矿化泡沫，得到泡沫精矿，完成浮选过程。

(2) 浮选设备性能要求

①具有良好的充气作用。浮选过程中，气泡的作用是运载疏水性矿物。为增加矿粒与气泡碰撞接触机会，造成有利于附着条件，并能将疏水性矿粒及时运载到矿浆表面，所以在浮选机内必须有足够大的气泡表面积（空气弥散度）以及适宜的气泡升浮速度。为此，浮选机必须保证能向矿浆中吸入（或压入）足量的空气，并使这些空气在矿浆中充分地弥散，以便形成大量大小适宜的气泡，同时这些弥散的气泡，又能均匀地在浮选槽内分布。在一定充气量范围内，充气量愈大，空气弥散愈好，气泡分布愈均匀，矿粒与气泡接触碰撞的机会也愈多。

②具有良好的搅拌作用。矿粒在浮选机内的悬浮状况也是影响矿粒向气泡附着的重要因素。为使矿粒能与气泡充分接触，应使全部矿粒处于悬浮状态，并使矿粒在浮选机内均匀分布，从而营造矿粒与气泡接触和碰

撞的良好条件。此外，搅拌作用还可以促进某些难溶浮选药剂的溶解和分散，提高药剂作用效果。

③能形成平稳的泡沫区。在浮选槽的矿浆表面应能形成平稳的泡沫区，以使矿化气泡顺利浮出。同时，为使气泡能充分地矿化，气泡在矿浆中的运动应有足够的矿化路程。在泡沫区中，矿化气泡不仅要能保持目的矿物（强度适合），同时要让夹杂的脉石从气泡上脱落（兼并作用），当然，这还需要起泡剂的配合。

④矿浆的循环流动作用。为增加空气和矿粒的接触机会，浮选机应能使矿浆循环流动。

⑤应能连续和平稳工作，且便于操作和调节。

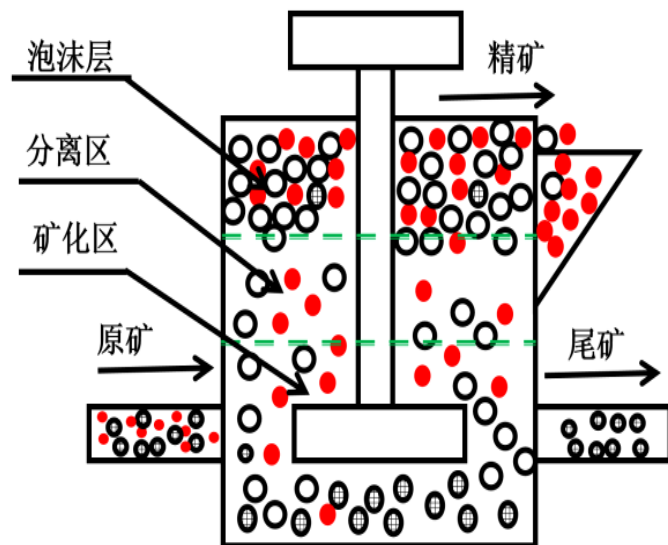
⑥应具备结构简单、操作方便、维修工作量大、节能高效、便于实现自动控制和生产费用低等特点。

(3) 浮选设备分类

浮选机工作过程主要包括：气泡生成、气泡与颗粒的作用、疏水和亲水矿物的分离三个主要基本过程。根据浮选机矿化方式的不同，目前工业应用的浮选机主要有：机械搅拌矿化浮选机、逆流矿化浮选机和混流矿化浮选机三大类。

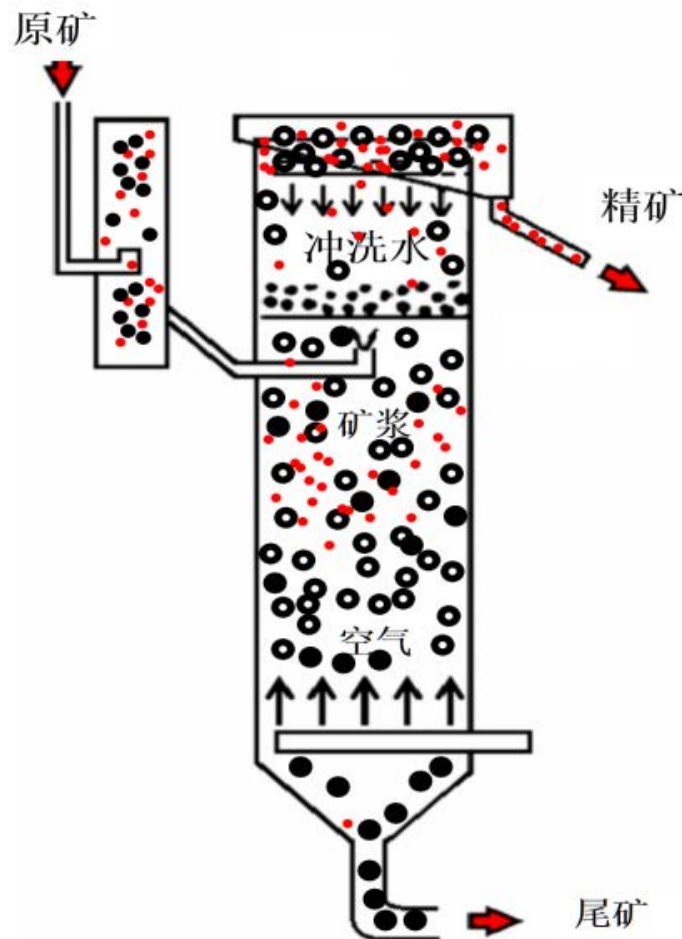
①机械搅拌矿化浮选机

目前应用最广的浮选机，其矿化原理为：通过叶轮旋转切割空气产生气泡，并在叶轮附近产生强湍流环境，使气泡和颗粒相互碰撞，从而实现机械搅拌矿化。



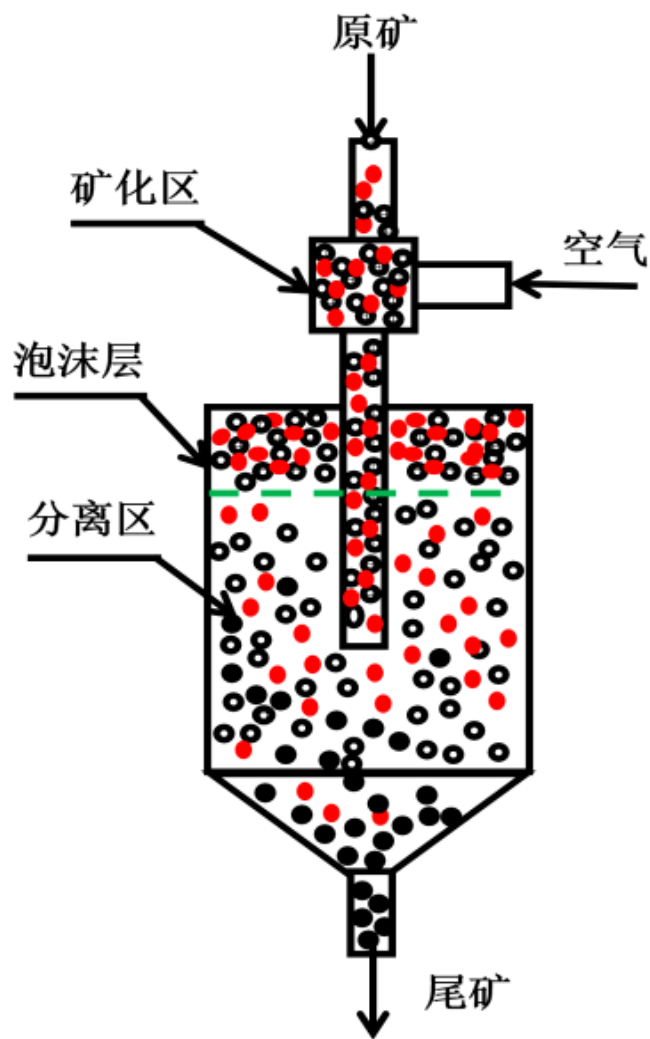
②逆流矿化浮选机

由于其槽体通常较高而被称为浮选柱，其矿化原理为：原矿从柱体上方给入，受重力作用向下运动，气泡则在槽体底部产生，在浮力作用下向上运动。运动方向相反的气泡和颗粒在槽体垂直方向上发生碰撞实现逆流式矿化。



③混流矿化浮选机

通常由单独的矿化区和槽体组成（机械搅拌矿化浮选机和逆流矿化浮选机则无单独的矿化区，矿化和分离均在槽体内完成）。与机械搅拌矿化和逆流矿化浮选机相比，混流矿化浮选机由于采用了单独的矿化区，具有矿浆停留时间短和气泡尺寸小的优点。矿化原理为：矿粒和气泡在矿化器中混合并发生强烈的相互作用完成矿化。



不同矿化方式的浮选机性能参数及特点

矿化方式	典型机型	气泡尺寸 (mm)	矿浆停留时间 (min)	特点
机械搅拌式	KYF型浮选机	1.3	17.9	槽体高度低 粗粒浮选指标好
逆流式	CPT浮选柱	2.2	21.3	矿浆停留时间长 细粒浮选指标好
混流式	Jameson浮选机	0.95	5.0	气泡颗粒相互作用强 细粒浮选指标好

6.2 机械搅拌矿化浮选设备

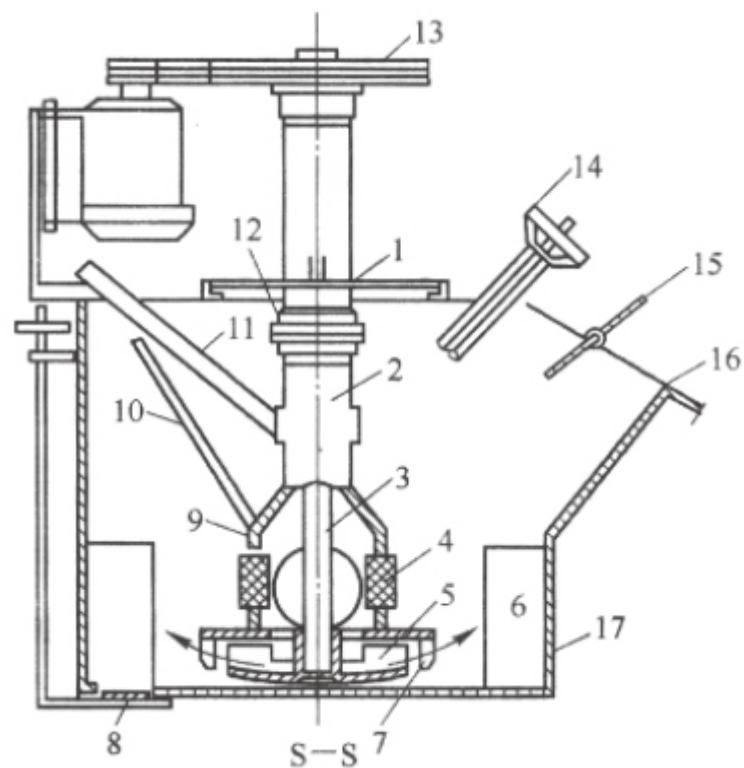
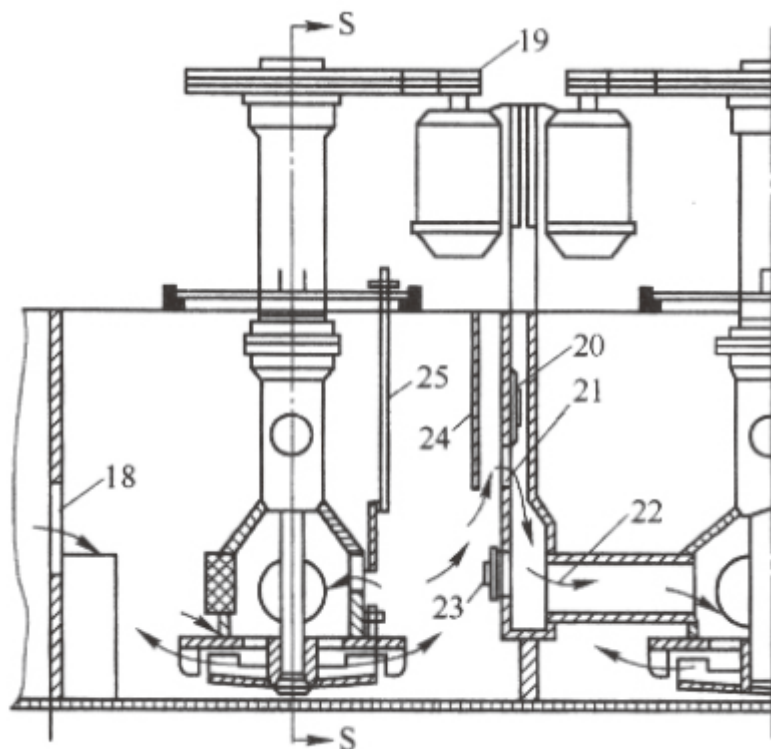
使用最早的机械搅拌矿化浮选机有XJK和棒型浮选机等。随后逐渐出现了WEMCO型、KYF型、JJF型、SF型等浮选机。

6.2.1 机械搅拌自吸气式浮选机

机械搅拌作用下，依靠定子和转子间形成的负压实现空气吸入。

(1) XJK型浮选机

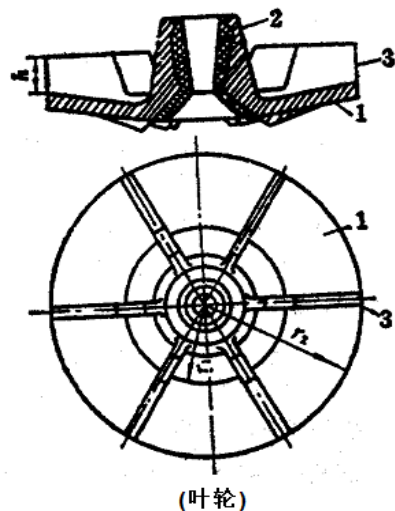
结构：又称A型或XJ型浮选机。一般由两槽构成一组，第一槽（带有进浆管）为吸入槽或吸浆槽，第二槽（无进浆管）为自流槽或直流槽。每组之间设有中间室（闸门），用以调节矿浆液面。叶轮安装在主轴下端，主轴上端有皮带轮，通过电机带动其旋转。空气由进气管吸入。叶轮上方装有盖板和空气筒（或称竖管），空气筒上开有孔，用以安装进浆管，中矿返回管或作矿浆循环之用。



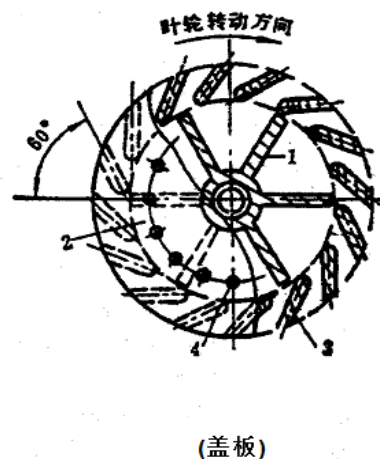
XJK型浮选机结构示意图

1-座板；2-空气筒；3-主轴；4-矿浆循环孔塞；5-4叶轮；6-稳流板；7-盖板（导向叶片）；8-事故放矿闸门；9-连接管；10-砂孔闸门调节杆；11-吸气管；12-轴承套；13-主轴皮带轮；14-尾矿闸门丝杠及手轮；15-刮板；16-泡沫溢流堰；17-槽体；18-直流槽进浆口；19-电动机皮带轮；20-尾矿溢流堰闸门；21-尾矿溢流堰；22-给矿管（吸浆管）；23-粗砂闸门；24-中间室隔板；25-内部矿浆循环孔闸门调节杆

叶轮和盖板：是浮选机的关键部件，叶轮上面有六个辐射状叶片，在叶轮上方5~6mm处，装有盖板。盖板的作用如下：a) 当矿浆被叶轮甩出时，在盖板和叶轮之间形成负压而吸入空气；b) 调节进入叶轮的矿浆量；c) 停车时，可以防止矿砂沉积在叶轮上而“压死”叶轮，从而可以随时开车；d) 起一定程度的稳流作用。



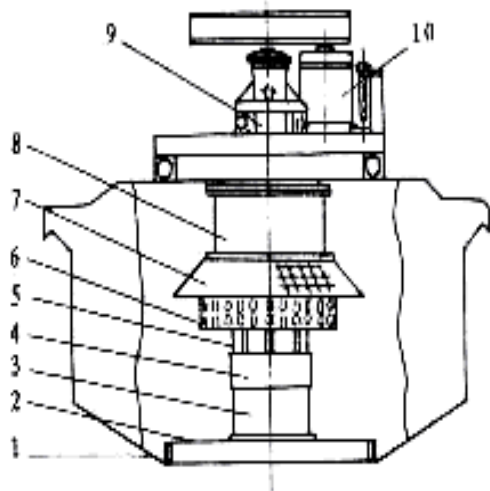
1-叶轮锥形底盘；2-轮壳；3-辐射叶片； r_1 -矿浆入口半径； r_2 -矿浆出口半径； h -叶片外端高



1-叶轮叶片；2-盖板；3-导向叶片（定子叶片）；4-循环孔

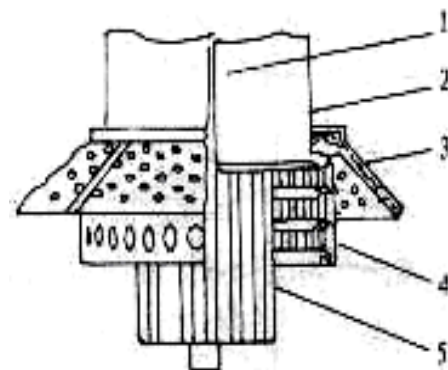
(2) JJF型浮选机

结构：采用深型叶轮，形状为星形，叶片为辐射状，定子为圆筒形，其上均匀布有长孔作为矿浆通道。定子遮盖叶轮高度仅三分之二，定子外增加了表面均布小孔的锥形分散罩，起稳定液面的作用。为能自吸气和防止沉槽，叶轮下部增设导流管和假底，实现矿浆的下循环。转子和定子间的空隙较大，可削弱或消除转子和定子间的涡流，使浆气混合流沿着槽子容积均匀分布，形成较为稳定的矿化气泡。



JJF浮选机结构示意图

1—槽体；2—假底；3—导流管；4—调节环；5—叶轮；
6—定子；7—分散罩；8—竖筒；9—轴承体；10—电机



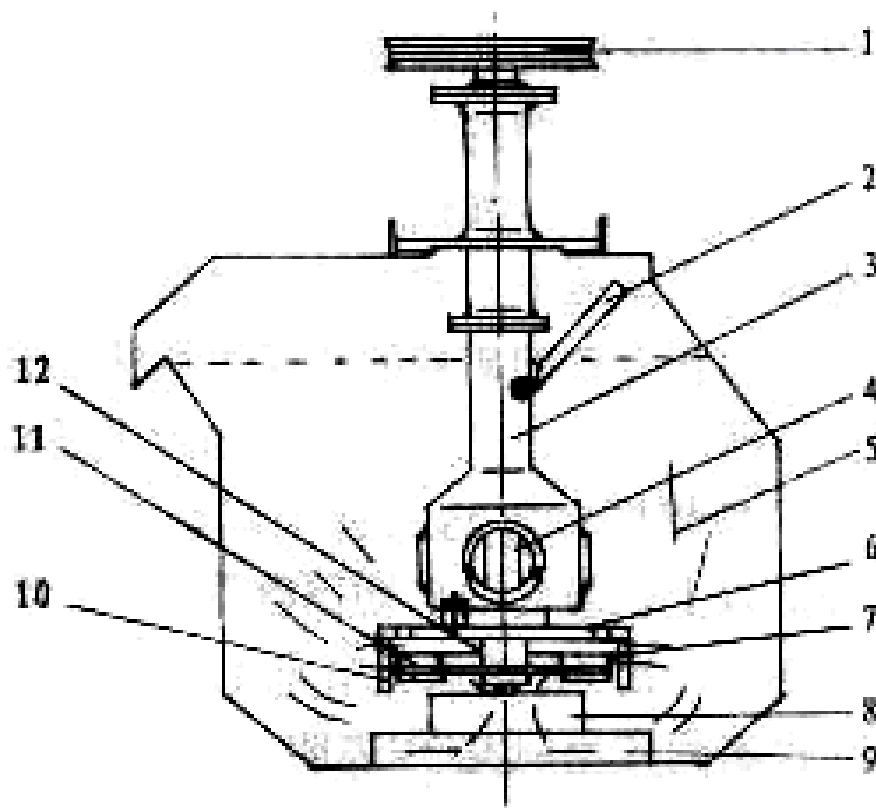
JJF浮选机叶轮结构

1—主轴；2—竖筒；3—分散罩；
4—叶轮；5—定子

特点：结构简单外；转子转速低，在转子和定子间存在着较大的空隙，可大大降低充气搅拌器的磨损，节省经营维修费用，降低动力消耗；停车后再起动也比较容易；矿浆液面稳定，便于自动控制。缺点是不能自吸矿浆，需阶梯配置。

工作原理：当星形转子旋转时在竖管和导管内产生涡流，此涡流可形成足够的负压，使外界空气从空气进入管自动吸入，被吸入的空气在转子与定子区内和由下面经导管由于负压而自动吸进的矿浆进行充分的接触和混合，由转子旋转所造成的切线方向运动的浆气混合流，经定子的作用转换成径向运动，并被均匀地抛甩于槽体内，矿粒与气泡碰撞、接触、粘附形成矿化气泡、向上升浮至泡沫区并聚集成矿化泡沫层，自流溢出或由刮板刮出即为泡沫产品。

(3) SF (BF) 型浮选机



SF型浮选机结构示意图

1-皮带轮;2-吸气管;3-中心筒;4-主轴;5-槽体;6-盖板;7-叶轮;
8-导流管;9-假底;10-下叶片;11-上页片;12-叶轮盘

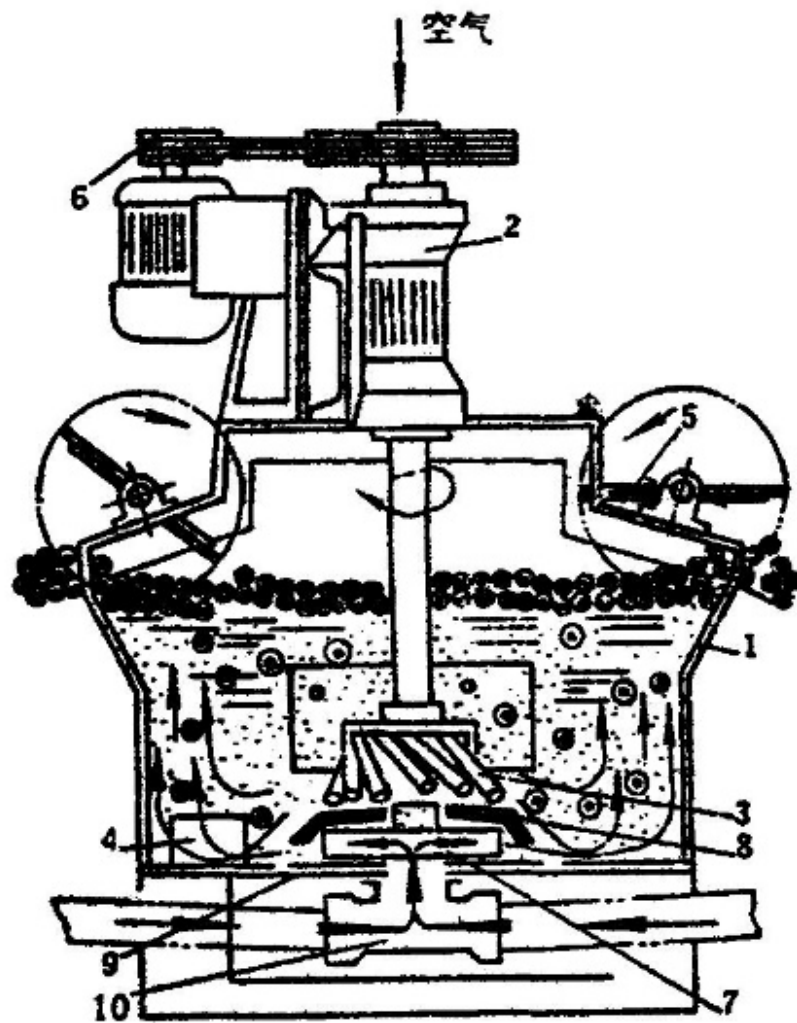
结构：叶轮为后倾式双叶片叶轮，由上、下叶片和轮盘组成，形成上下叶轮腔，大容积浮选机还设有导流管和假底。

工作原理：当叶轮旋机时，矿浆受离心为作用，在上叶轮腔内形成负压区，吸入空气和矿浆并向四周抛出。下叶轮腔内的矿浆也受离心力作用向四周抛出，该部分矿浆的比重比上叶片抛出的气液混合物比重大，其离心力和速度亦大，对气液混合物具有带动加速作用，从而加大了上叶轮腔的真空度，起到**辅助吸气作用**。另外，叶轮旋转，矿浆通过下叶轮腔向四周甩出的同时，其下部矿浆由四周向中心补充，形成在叶轮之下的矿浆循环。大容积SF型浮选机中，矿浆通过假底之下的通道和导流管由下向上循环，在导流管和假底之下的通道内，矿浆流速大，足以使粗粒矿物悬浮而不沉淀。

特点：保持了“A”型浮选机自吸空气和矿浆的优点，不需阶梯配置，中矿返回不需泡沫泵。但与“A”型浮选机相比，吸气量大，叶轮周速低，叶轮与盖板间隙大，磨损轻。该类型浮选机可方便流程布置，**多与JJF型浮选机组合使用**，对流程复杂，选别段数多的中小选厂尤为合适。

（4）棒型浮选机

结构：由一排金属制的长方形槽子组成，槽体之间用螺栓连接。槽子的结构有两种：吸入槽和浮选槽。选用何种结构及选用的数量，取决于选矿工艺流程、处理量和该种矿石的浮选时间。每个槽均由槽体1、轴承体（连同中空主轴）2、斜棒叶轮3、稳流器4、凸台、刮板5、传动装置6等部分组成。吸入槽中，除有上述部件（凸台由压盖代替）之外，在其中空主轴的下端还有提升叶轮7、压盖8和底盘9。



棒型浮选机结构

1-槽体;2-轴承体;3-斜棒叶轮;4-稳流器;5-刮板;6-传动装置
;7-提升叶轮;8-压盖;9-底盖;10-导浆管

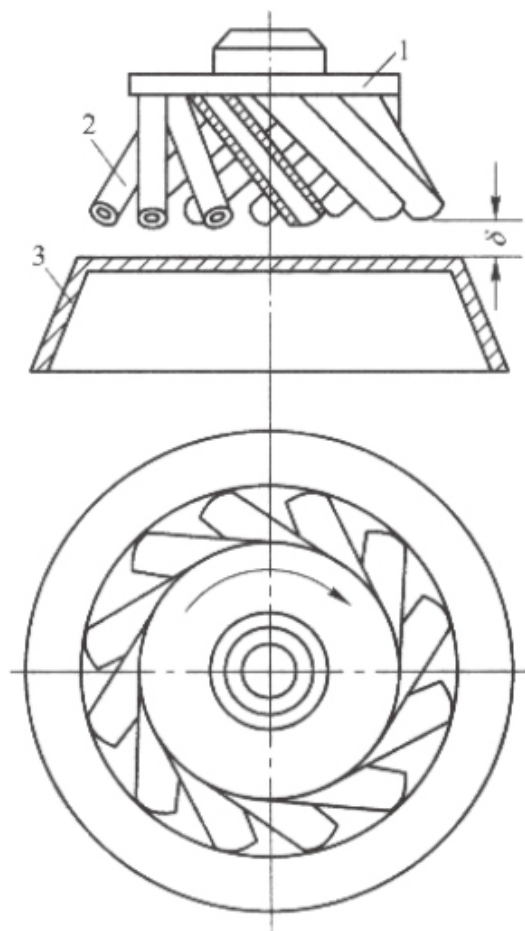
工作原理：也是利用叶轮（斜棒轮）回转时所产生的负压，经空心主轴吸入空气，并弥散形成泡沫，靠棒轮的强烈搅拌与抛射作用，使空气泡与矿浆充分混合，并由混合区向下方推出，借助于凸台、稳流器的导向作用，使之连续、均匀的射向槽体四周，而后再徐徐扩大上升到液面。这样，既能使矿粒和气泡有较多的接触机会，使有用矿物颗粒在药剂的作用下很快被气泡所吸附而浮至液面，又能使矿流在分选区稳定流动，不致因气泡破坏使有用矿物重新落于槽底，从而促成了分选过程的顺利进行。

特点：

◆用扩散型的斜棒轮作为搅拌器，并配以凸台作为导向装置以及独特的弧形稳流板等充气搅拌器组。

◆属于浅槽式自吸式浮选机，浮选速度快，吸气量大，搅拌力强，适用于矿浆浓度高、密度大、粒度较粗的矿物浮选。

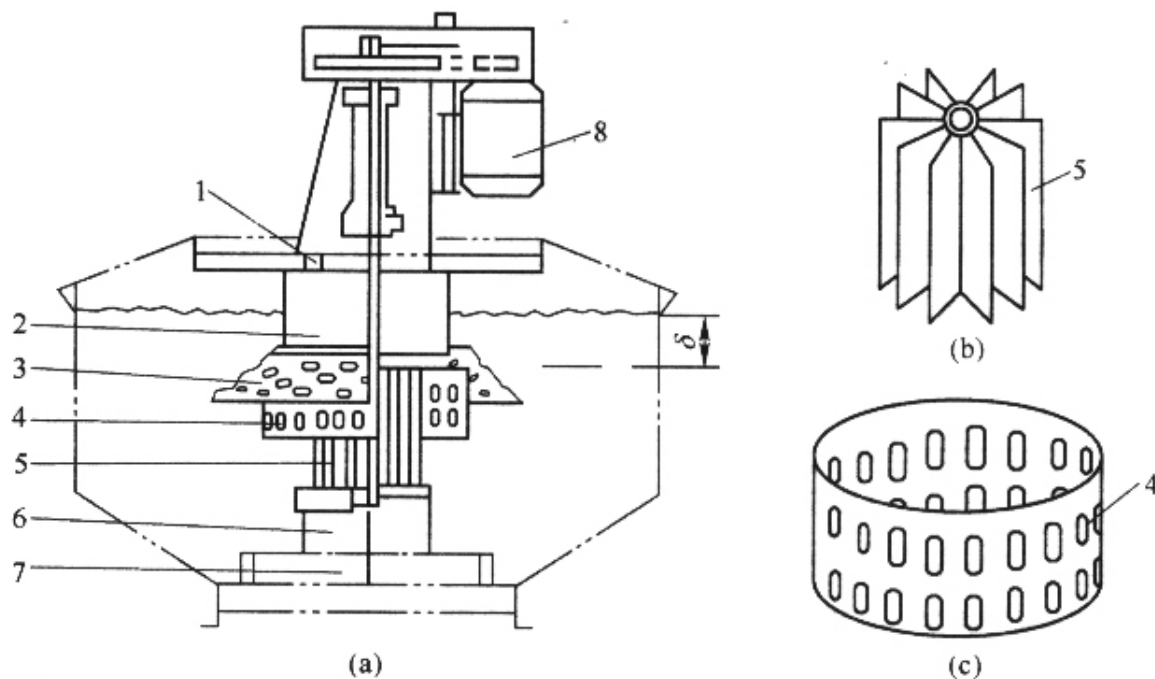
◆吸入槽结构复杂，棒型轮磨损较快。



斜棒叶轮及凸台构造
1-圆盘；2-斜棒；3-凸台

(5) 维姆科 (Wemco) 浮选机

结构：由带放射状叶片的星形转子、周边有许多椭圆形孔的圆筒（扩散器）和突出筋条的定子、锥形罩盖、一个供矿浆环用的假底、导管、竖管、空气进入管及槽体等组成。

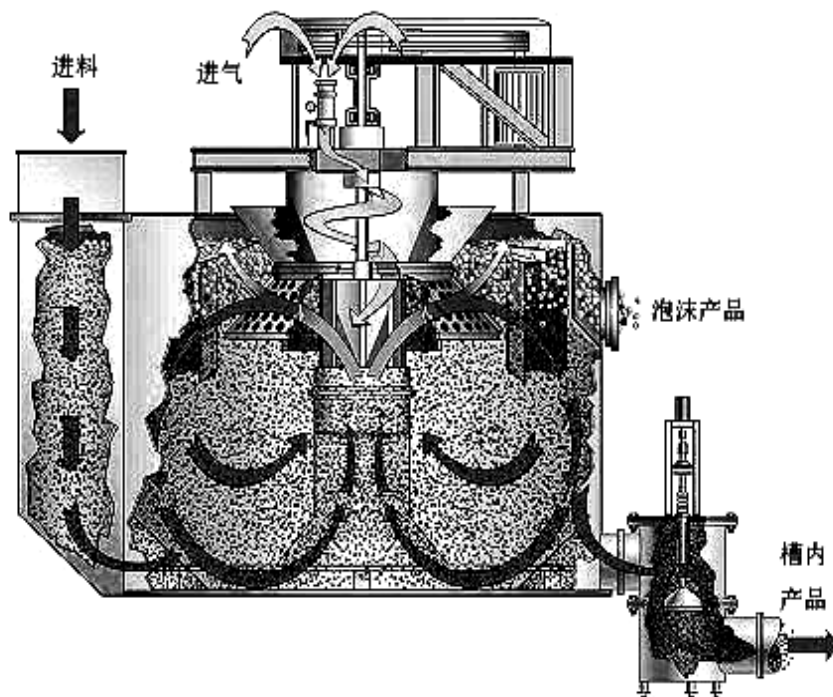


维姆科型浮选机

(a)槽子总图；(b)转子；(c)-定子

1-进气口；2-竖管；3-锥形罩；4-定子(扩散器)；5-转子；6-导管
；7-假底；8-电动机； δ -浸没深度

工作原理：当星形转子旋转时，便在竖管和导管内产生涡流，此涡流形成负压，空气从槽子表面的空气进入管吸入。被吸入的空气，在转子与定子区内和由转子下面经导管吸进的矿浆进行混合。由转子造成的切线方向运动的浆气混合流，经定子的作用转换成径向运动，并均匀地抛甩于浮选槽中。矿化气泡向上升浮至泡沫层，自流溢出即为泡沫产品。



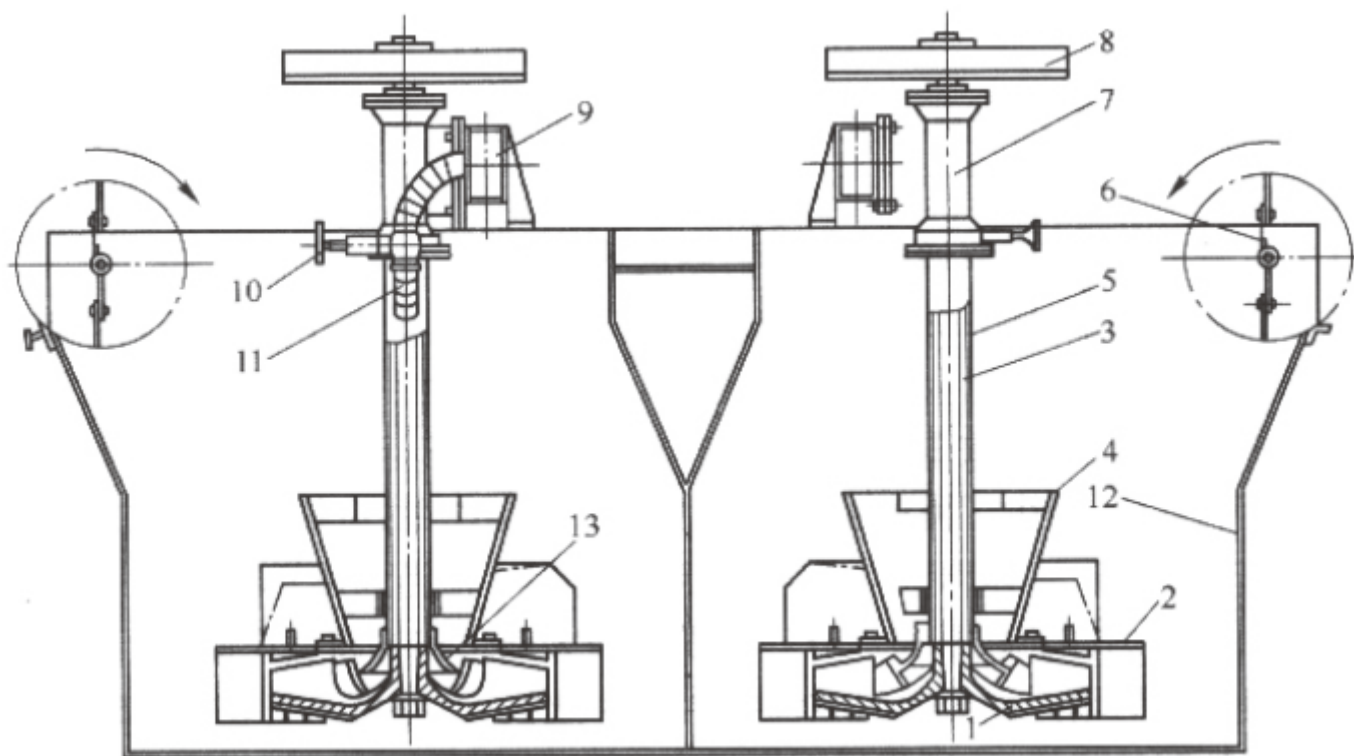
特点：①采用新型充气搅拌器及圆锥形泡沫罩。定子具有较好的变向和扩散作用，使浆气混合流呈径向运动，形成较为稳定的矿化气泡。圆锥形泡沫罩则将转子产生的涡流与泡沫层隔离，保持液面平稳。②设有假底和套筒，增强了搅拌力，并形成矿浆的大循环。叶轮的安装浸入矿浆中深度较浅，可使充气量增大，避免粗粒沉槽，减少动力消耗。③矿浆按一定径向流到外部，形成以竖轴为中心的旋流，使矿浆的充气量加大，提高了充气效率，转子转速可以降低，转子与定子间隙较大（约200mm），磨损减少，维修方便。④由于不能自吸矿浆，安装时需设置液面差200-300mm，或采用砂泵实现中矿返回。

6.2.2 充气机械搅拌式浮选机

叶轮用作为搅拌矿浆和分散气泡，所需空气由外部鼓风机提供。充气搅拌式浮选机种类很多，主要有CHF-X型、XCF型和KYF型等。

(1) CHF-X型充气搅拌式浮选机

结构：主要由槽体、叶轮、盖板、钟形物、循环筒、主轴、中心筒及总气筒等组成。两槽背靠背连接组成一个机组。叶轮上有8个辐射状叶片。盖板由4块拼成，下有24个导向叶片。叶片与盖板的轴向间隙为15-20mm，径向间隙为20-40mm。中心筒上部的充气管与总风管相连，中心筒下部与循环筒相连。钟形物安装在中心筒下端。盖板与循环筒相连，循环筒与钟形物之间的环形空间供循环矿浆用，钟形物具有导流作用。

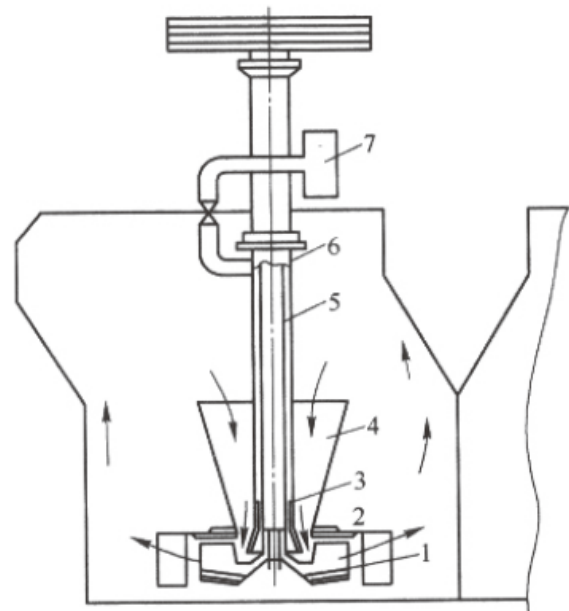


CHF-X型充气搅拌式浮选机结构图

1-叶轮；2-盖板；3-主轴；4-循环筒；5-中心筒；6-刮泡装置；7-轴承座；8-皮带轮；9-总气筒；10-调节阀；11-充气管；12-槽体；13-钟形物

工作原理：应用了矿浆垂直循环和外部充气。

当叶轮旋转时，叶轮腔中的矿浆与空气混合后被甩出，使叶轮叶片背面变成负压区，循环矿浆经循环筒与钟形物之间的环形孔进入负压区。低压空气经中心筒与钟形物进入被循环矿浆封住的叶轮腔，促进空气与矿浆在叶轮腔内充分混合，混合物由于旋转叶轮产生离心力的作用，被甩撞在盖板叶片上并进一步使空气泡细分而分散于矿浆中，在垂直循环上升流的作用下，由整个槽底底部向上扩散，使泡沫在槽子上部的平静区与脉石矿物分离，有用矿物被选人泡沫产品。

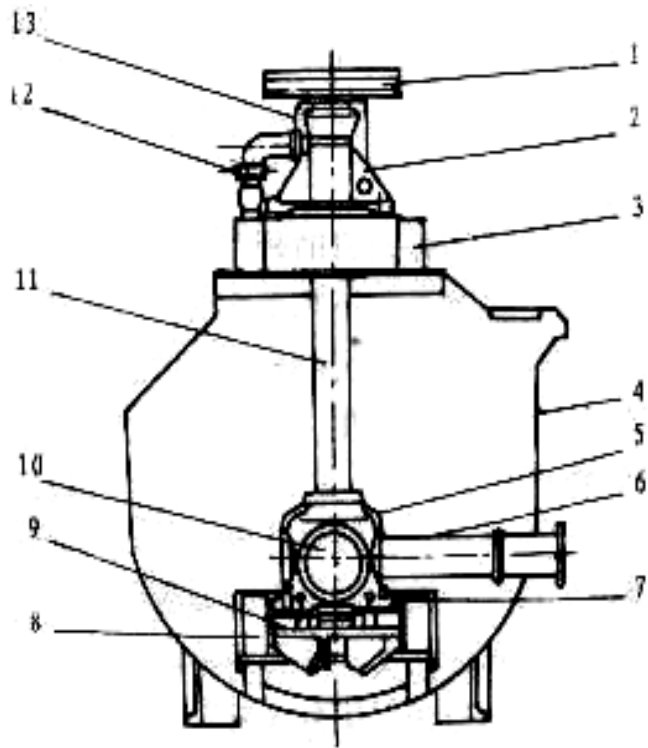


浮选槽内矿浆运动方式示意图
1-叶轮；2-盖板；3-钟形物；4-循环筒；5-主轴部件；6-中心筒；7-风筒

特点：

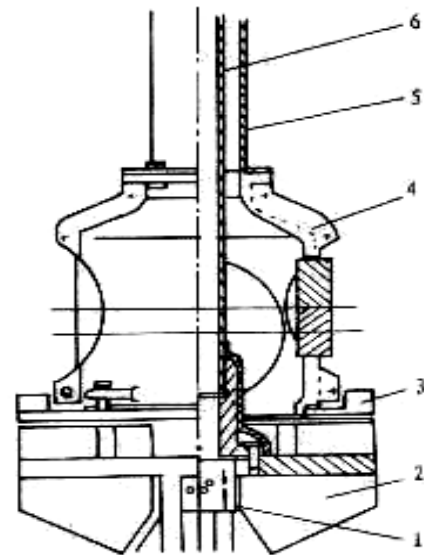
- ①设计为直流槽形式，矿浆通过能力大，浮选速度快；
- ②采用鼓风机供气，充气量大小根据工艺要求进行调节；
- ③矿粒在槽内悬浮，减少了槽内粗颗粒的沉积和分层作用，可提高可浮选粒级上限；
- ④叶轮只用于循环矿浆和弥散空气，深槽浮选机的叶轮仍可在低转速下工作。备件磨损及消耗少，能耗低，矿液面亦比较平稳。有利于设备的大型化和提高生产能力；
- ⑤叶轮与盖板间的轴向和径向间隙都比XJK型浮选机大，易于安装和调整；
- ⑥泡沫（中矿）不能自行返回，需配置泡沫泵，或设置吸入槽来解决，且设备不能配置在同一平面上，需阶梯式配置。
- ⑦适用于大、中型浮选厂的粗、扫选作业。

(2) XCF型充气搅拌式浮选机



XCF型浮选机结构

1-传动装置；2-轴承体；3-横梁；4-槽体；
5-中矿管 6-盖板；7-定子；8-叶轮；9-给
矿管；10-中心筒11-连接管；12-空气调节
阀；13-电机



XCF型浮选机叶轮和定子系统
1-空气分配器；2-叶轮；3-盖板；
4-中心筒；5-连接管；6-空心主轴

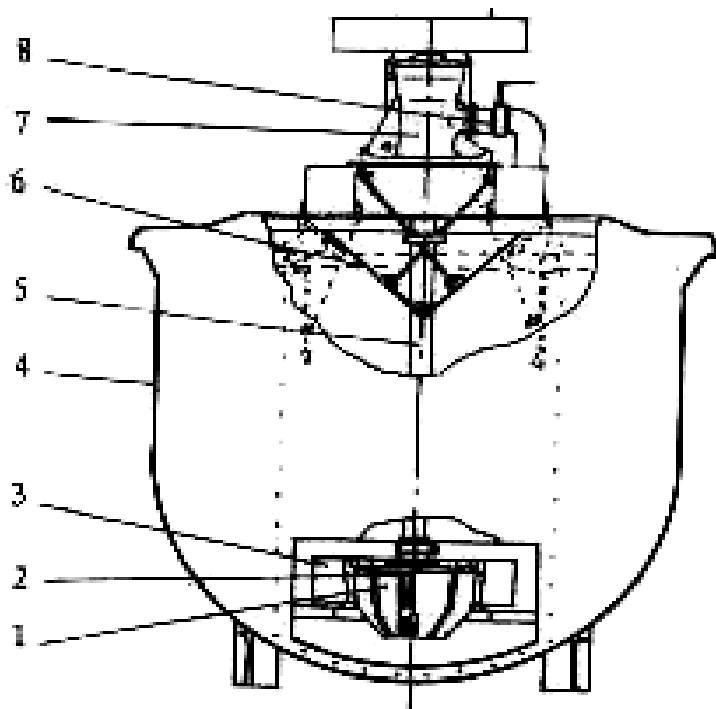
结构：叶轮由上叶片、下叶片和大隔离盘组成。上叶片为辐射直叶片，下叶片为后倾某一角度的多边形叶片，隔离盘直径大于或等于叶片外圆直径。上叶片主要从槽外吸入矿浆并与盖板一起组成吸浆区，下叶片负责循环矿浆和分散空气称为充气区，隔离盘将充气区和吸浆区分开，空气分配器安装在叶轮充气区中。盖板是一种具有特殊结构参数的重要零件，它与叶轮上叶片组成吸浆区。盖板封闭上叶片，使上叶片中心区形成负压，同时还起到吸浆区与槽内部区的隔离作用，有效地防止充入的空气被导入到吸浆区，使吸浆得到实现。连接管的作用在于定位中心筒和盖板，连接管上设计有一排气装置，及时将浮选机运转过程中产生的大量气体排出，防止连接管内空气及压力不断增加，使上叶片中心区负压不断减小，最终无法吸入给矿和中矿的情况。

工作原理：当叶轮旋转时，叶轮上叶片抽吸给矿及中矿，槽内矿浆从四周经槽底由叶轮下端吸入到叶轮下叶片间，由鼓风机给入的低压空气通过分配器进入叶轮下叶片间，矿浆和空气在叶轮下叶片间进行充分混合后，从叶轮下叶片周边排出，排出的矿浆空气混合物与上叶片排出的矿浆一起，安装在叶轮周围的定子稳流定向后进入到槽内主体矿浆中，矿化气泡上升到槽子表面形成泡沫层，槽内矿浆一部分返回叶轮下叶片进行循环，另一部分通过槽壁上的流通孔进入下槽再选别。

特点：采用了一种既能循环矿浆和分散空气，又能从槽外部吸入给矿和中矿泡沫的双重作用的叫轮、开式定子、无叶片圆盘形盖板和带排气装置的连接管，不仅具有一般充气机械搅拌式浮选机的优点，而且能自吸给矿和中矿，**常与KYF型浮选机组合使用。**

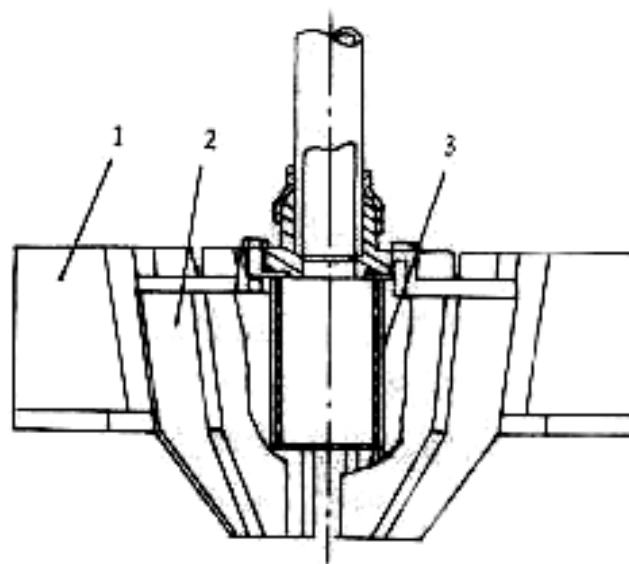
(3) KYF型充气搅拌式浮选机

独特之处是采用了单壁后倾叶片，倒锥台状叶轮和多孔圆筒型气体分配器和较小的悬空式定子。



KYF型浮选机结构

1-叶轮；2-空气分配器；3-定子；4-槽体
5-空心主轴；6-推泡板；7-轴承体；8-空气调节阀



KYF型浮选机叶轮结构

1-叶轮；2-定子；3-空气分配器

工作原理：当叶轮旋转时，槽内矿浆从四周经槽底由叶轮下端吸入叶轮叶片间，与此同时，由鼓风机给入的低压空气，经风道、空气调节阀，空心主轴进入叶轮腔的空气分配器中，通过分配器周边的孔进入叶轮叶片间，矿浆与空气在叶轮叶片间进行充分混合后，由叶轮上半部周边排出，排出的矿流方向向斜上方，由安装在叶轮四周斜上方的定子稳定和定向后，进入到整个槽子中。矿化气泡上升到槽子表面形成泡沫，经泡沫括板括到泡沫槽中，矿浆再返回叶轮区进行再循。

6.2.3 机械搅拌矿化浮选机主要进展

(1) 自动化和大型化

浮选设备市场竞争激烈，国内主流生产厂家为北京矿冶研究总院、丹麦的FLSmidth（艾法史密斯）、芬兰的Outotec（奥图泰）和芬兰的Metso（美卓）。

生产厂家	代表机型	最大容积(m ³)
北京矿冶研究总院	KYF	680
FLSmidth（艾法史密斯）	Super Cell	660
Outotec（奥图泰）	Tank Cell	500
Metso（美卓）	RCS Machine	600

四种浮选机结构基本类似，主要部件包括：槽体、叶轮、盖板、传动系统(电机，减速机和主轴)，且都采用圆柱形槽体，的主要差异在于叶轮结构的不同。

（2）粗粒级浮选机

国内北京矿冶研究总院研制的YX型浮选机，以及国外Outotec（奥图泰）研制的SkimAir（闪速）浮选机为当前应用最广的粗粒机械搅拌浮选机。



SkimAir（闪速）浮选机主要通过以下三个方面的设计来提高粗粒的浮选效果：

- （1）通过优化叶轮形状和减小叶轮转速来减小粗颗粒脱落。
- （2）通过降低槽体高度减小矿浆停留时间。
- （3）通过设置锥形推泡槽加快精矿泡沫溢出速度。

通常用于处理一段磨矿分级后的粗粒产品，浮选的粗粒产品可作为最终产品或者经再磨浮选以提高精矿品位^[47]。由于该浮选设备的矿浆停留时间短，对于金、镍、铜和铅等密度较大，或易过磨的矿物具有良好的回收效果。

6.3 逆流矿化浮选设备

通过多孔筛板和喷嘴把压缩空气从外部充入至矿浆中，以各种类型浮选柱为代表，包括充填式浮选柱、搅拌式浮选柱、电解浮选柱、旋流浮选柱等。

浮选柱的核心部件是发泡器。不同类型浮选柱的槽体结构类似，区别主要在于发泡器的不同。最初的发泡器设置于浮选柱内部，一般为多孔的橡胶管和布料等。由于微孔发泡器易堵塞而导致其没有大规模的应用。目前工业应用浮选柱的发泡器类型主要包括：空气射流发泡器、线性混合发泡器和文丘里管发泡器。

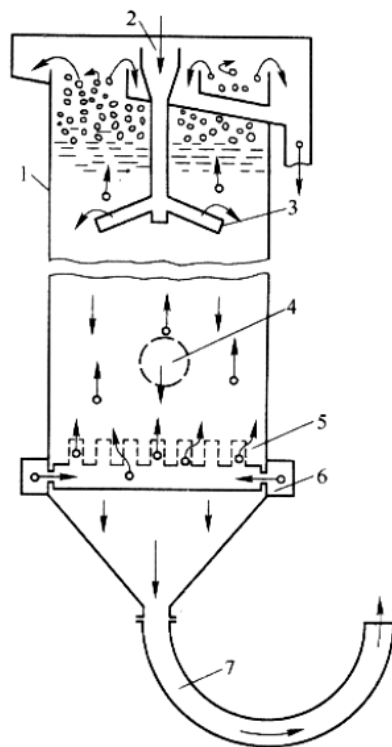
不同类型发泡器浮选柱及生产厂家

发泡器类型	设备名称	发泡器名称	公司
空气喷射	KYZ-B	喷射气泡器	北矿院
	CCF	喷枪发泡器	中工矿业
	CPT	SlamJet sparger	Eriez
	COLUMNCELL	SonicSparger Jet	Ototec
线性混合	Microcel	MicrocelSparger	Metso
文丘里管	CSMFC	自吸式发泡器	中国矿大
	COLUMNCELL	SonicSparger Vent	Ototec
	CPT	CavTube	Eriez

6.3.1 微孔发泡器浮选柱

(1) 普通浮选柱

结构较为简单，槽体为一个柱体，内装充气器（气泡发生器），此外还有给矿器、泡沫槽及管网等。



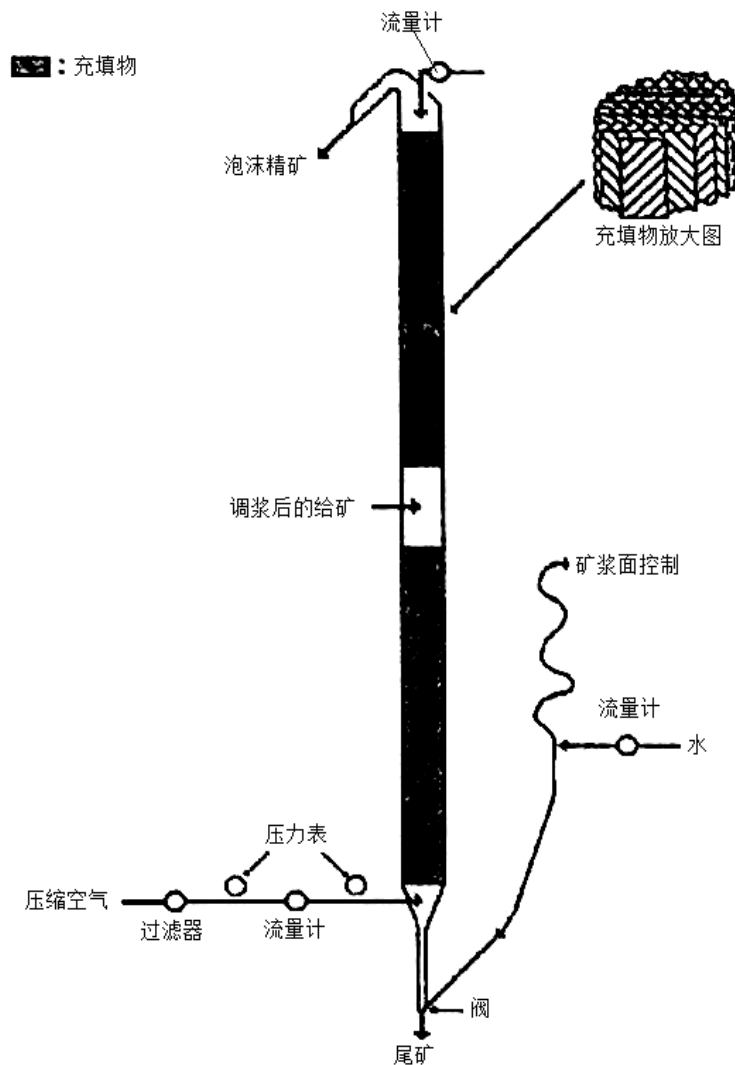
自溢式浮选柱示意图

1-柱体；2-给矿槽；3-矿浆分配管；4-入孔
；5-充气器；6-环形供气管道；7-尾矿管

工作原理：经药剂处理的矿浆，从柱体上部给矿器均匀地给入，矿粒在重力的作用下缓缓沉降，空气由空气压缩机经浮选柱底部的充气器（气泡发生器）不断压入，并由气泡发生器产生细小的气泡，均匀地分布在柱体的整个断面上。细小气泡穿过向下流动的矿浆徐徐向上升浮。在这种对流运动中，矿粒和气泡发生相互接触和碰撞，实现气泡的矿化。矿化气泡升浮至矿液面后形成泡沫层，溢出或刮出而得泡沫产品，非泡沫产品则由柱体底部排出。

(2) 充填式浮选柱

结构：一般由柱体、填料、压缩气管、给矿装置、泡沫产品溢流槽、尾矿锥，调节器和洗涤水管等组成。其中，填料材料采用的形式多种多样。由于充填物的采用，可有效减少矿浆中颗粒和气泡的轴向混合作用，提高颗粒与气泡间的碰撞机会，此外，根据采用的充填式介质形状的不同，充填介质还可以起到产生细小气泡的作用。



介质充填的作用：

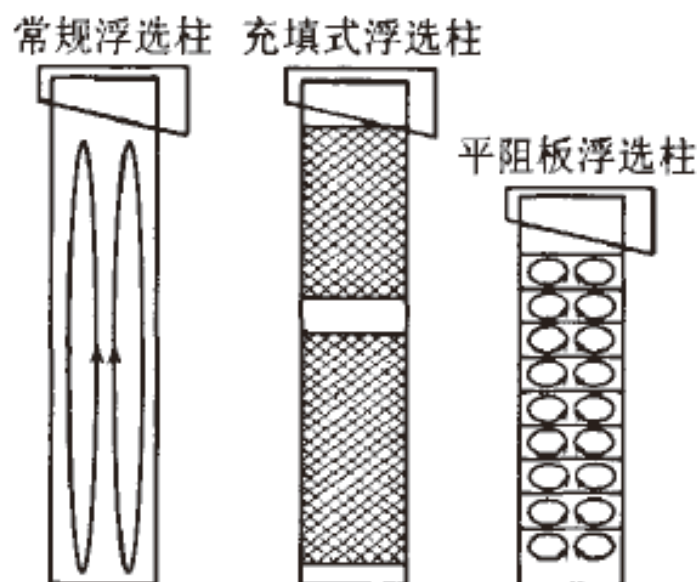
- ①改变并控制浮选柱内流体的流动状态，实现浮选过程的“塞流”。
- ②强化浮选柱内三裙体系之间的麓量交换，整提高柱浮选逆流碰撞与矿化效率的一条有效途径；
- ③建立一种新的气体成泡方式，气泡在升浮过程中不易兼并；
- ④充填对泡沫层具有支撑作用，使分选过程更稳定。

但充填方式不当，会出现易堵塞、停车须放矿等问题。

充填方式：

主要有填料充填、筛板充填和混合充填三种。显改善气体在柱内的径向分布，有效地防止气泡兼并等。

项 目	筛板充填	填料充填
压力降	压力降一般较大	适合于压力降小的场合
生产能力	矿浆通过能力大	允许的矿浆通过能力小
作业效率	效率较稳定	效率高
粒度范围	-0.5 mm 均可	粒度不易太粗
材质要求	普通钢材	不锈钢、高分子材料
造 价	低	高，是筛板的几倍



浮选柱内流体流态对比

6.3.2 空气喷射发泡器浮选柱

典型代表为SlamJet空气喷射发泡器。发泡器喷口插入浮选柱底部矿浆中，通过高压空气（0.2-0.7 MPa）穿过直径1 mm的喷孔形成高速空气流剪切矿浆产生大量微小气泡。空气喷射发泡器的喷嘴和针阀由耐磨材料制成以提高其使用寿命。



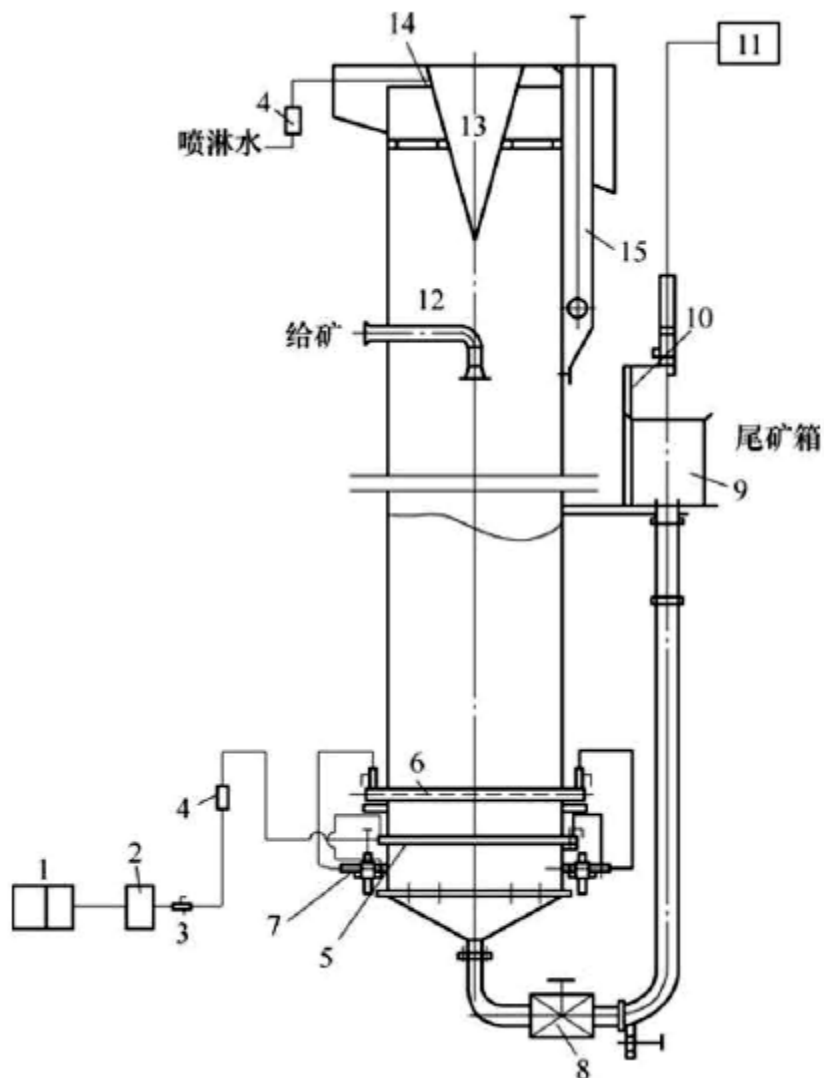
(a)



(b)

SlamJets照片(a)和运行状态(b)

(1) KYZ-B 型浮选柱



KYZ-B型浮选柱结构

1-风机;2-风包;3-减压阀;4-转子流量计;5-总水管;6-总风管;7-充气器;8-排矿;9-尾矿箱;10-气动调节阀;11-仪表箱;12-给矿管;13-推泡器;14-喷水管;15-测量筒

结构：主要由柱体、给矿系统、气泡发生系统、液位控制系统、泡沫喷淋水系统等构成。

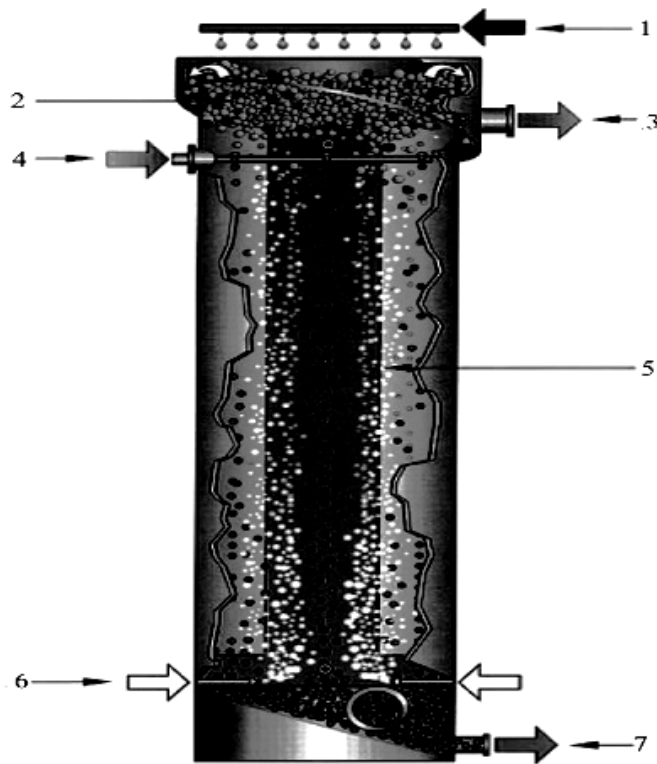
工作原理：采用空气压缩机作为气源，气体经总风管送至个充气器产生微泡，从主体底部缓缓上升。矿浆由距顶部柱体约 $\frac{1}{3}$ 处给入，经给矿器均匀分布后，矿浆缓缓向下流动，矿粒与气泡在柱体中逆流碰撞，疏水矿物附着在气泡上形成矿化气泡，上浮到泡沫区，经过二次富集后的产品从泡沫槽流出。亲水性矿物颗粒则随矿流下降至尾矿管排出。液位的高低和泡沫层厚度有液位控制系统进行调节。

特点：

- ①给矿器保证矿浆均匀地分布于浮选柱的截面上。气泡发生装置所产生的气泡满足浮选动力学要求，建立相对稳定分离区和平稳泡沫层，减小矿粒的脱附机会。
- ②气泡发生装置优化空间上的分布，可以消除气流余能，形成细微空气泡，稳定液面，防止翻花现象的发生。喷射气泡发生器，采用了耐磨的陶瓷衬里，使用寿命长；微孔气泡发生器采用不锈钢烧结粉末，形成的气泡大小均匀，浮选柱内空气分散度高，该气泡发生器可以再生并重复使用（适用于酸性和中性矿浆）。
- ③泡沫槽增加推泡锥装置，缩短泡沫的输送距离，加速泡沫的刮出。
- ④给气、加药、补水、调节液面实现自动控制。

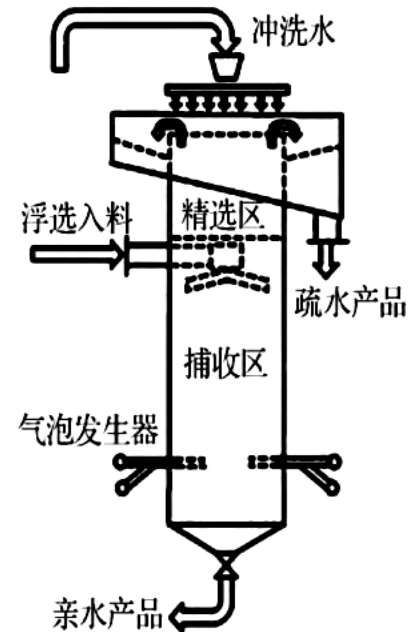
(2) CPT型浮选柱

加拿大Candian Process Technologies INC. 公司研制的新型浮选柱，在世界各地得到了广泛应用。主要由气泡发生器、柱体、泡沫槽、顶部泡沫冲洗水装置、给矿管和尾矿排出管几部分构成。



CPT浮选柱结构示意图

1-喷淋水；2-泡沫；3-精矿；4-给矿；5-隔板；
6-进气；7-尾矿



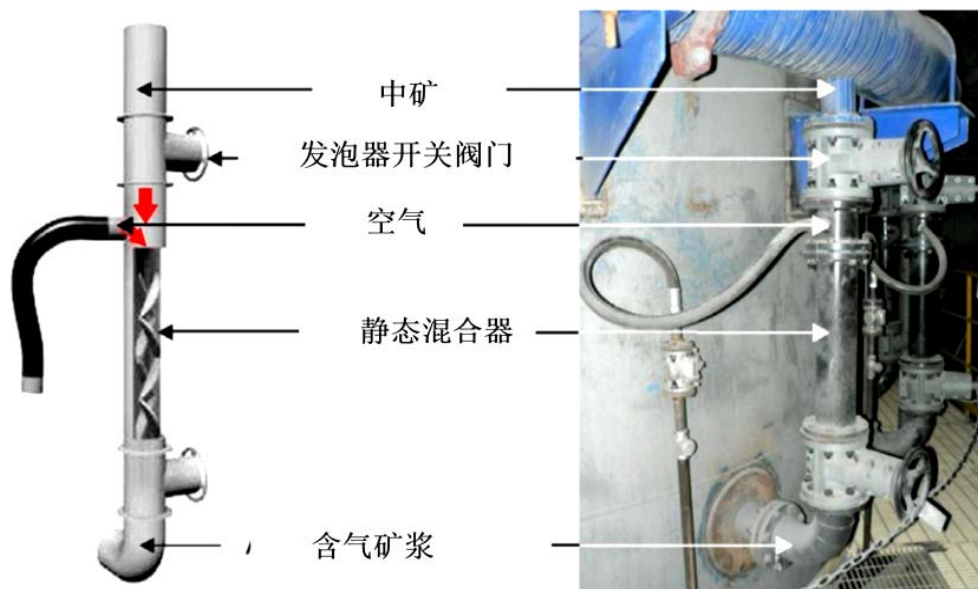
工作过程：矿浆从浮选柱顶部以下1~2 米的给矿口给入，从上向下做干扰沉降运动，底部发泡器产生的微小气泡在浮力作用下从下往上运动，逆向流动的气泡和颗粒在捕收区发生逆流碰撞完成矿化过程，随后疏水矿物粘附在气泡上向上运动最终成为泡沫产品。亲水矿物向下运动进入底流。

特点：

- ①使用独立的发泡器，具有能耗低，易维护等优点。
- ②高柱体实现较长的矿浆停留时间，利于提高细粒回收率。
- ③厚泡沫层配合冲洗水实现高精矿品位。

6.3.3 线性混合发泡器浮选柱

典型的线性混合发泡器为CISA/Microcel。从浮选柱内抽取中矿矿浆，在静态混合器作用下矿浆切割空气产生大量细小气泡，同时强化中矿中难选颗粒和气泡的作用，增加矿粒和气泡的碰撞概率，提高精矿回收率。现今工业应用线性混合发泡器的浮选柱为美卓公司的Microcel浮选柱。



CISA/Microcel发泡器



Microcel浮选柱结构示意图

Microcel浮选柱主体机构和CPT浮选柱类似。原矿从柱体上方给入，区别在于用中矿循环泵抽取槽体内矿浆经过充气的线性混合发泡器，产生气泡输送至槽体底部，向下的矿浆和向上的气泡在槽体内完成逆流矿化。

Microcel浮选柱是在CPT单一对原矿逆流矿化的基础上，增加了对中矿进行**混流矿化**，强化了浮选速率较小的细颗粒的回收效果。

6.3.4 文丘里管发泡器浮选柱

CavTube文丘里管发泡器由Eriez公司生产，使用离心泵从浮选柱中抽取中矿浆，矿浆通过文丘里管发泡器产生高速射流，吸入并剪切空气，在产生大量细小气泡的同时，强化矿粒和气泡的作用，提高精矿回收率（结合了部分混流矿化）。

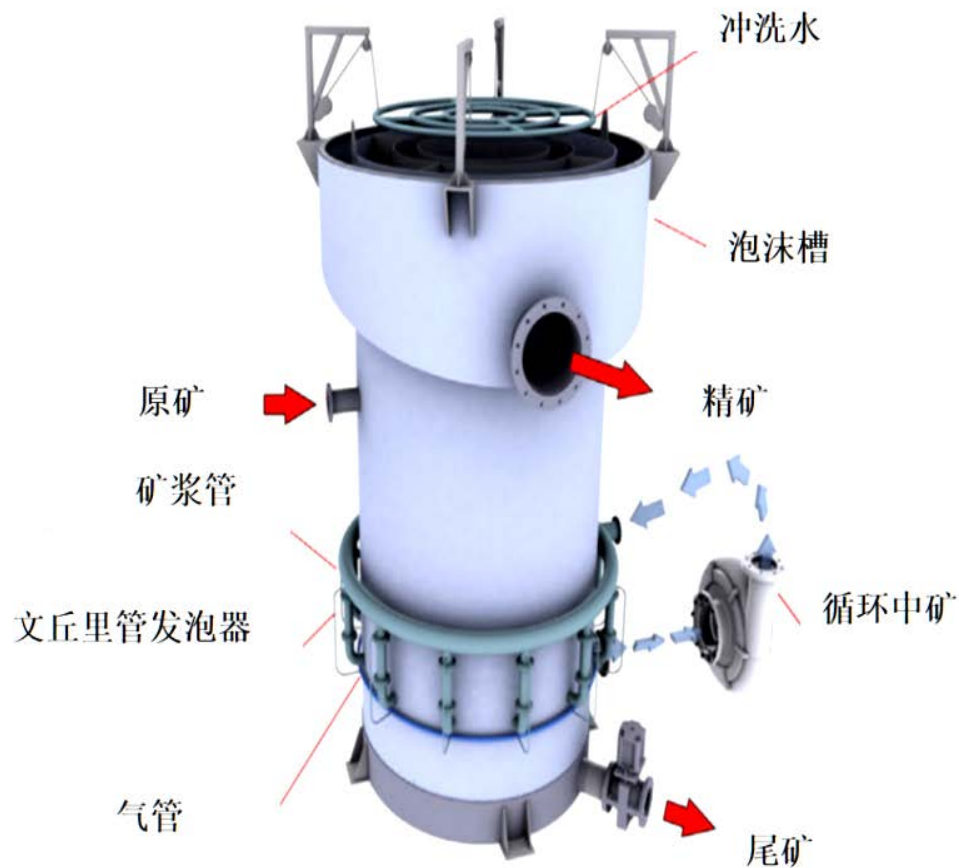


运行



结构

(a)

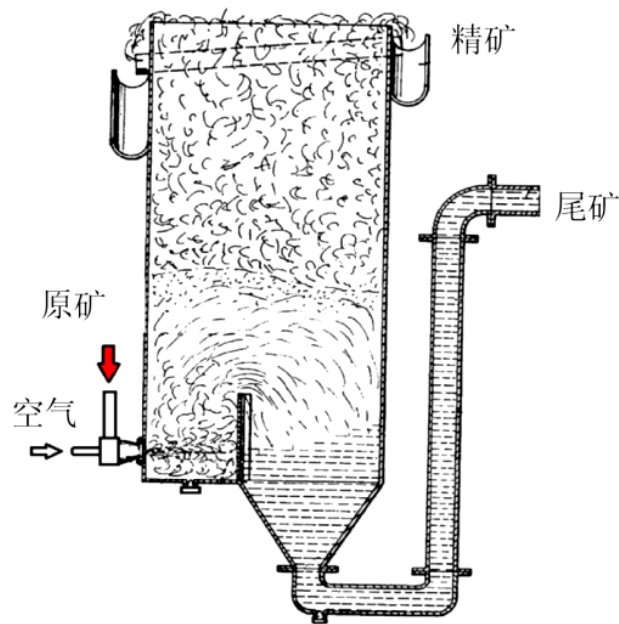


(b)

CavTube发泡器(a)和使用CavTube发泡器的浮选柱(b)

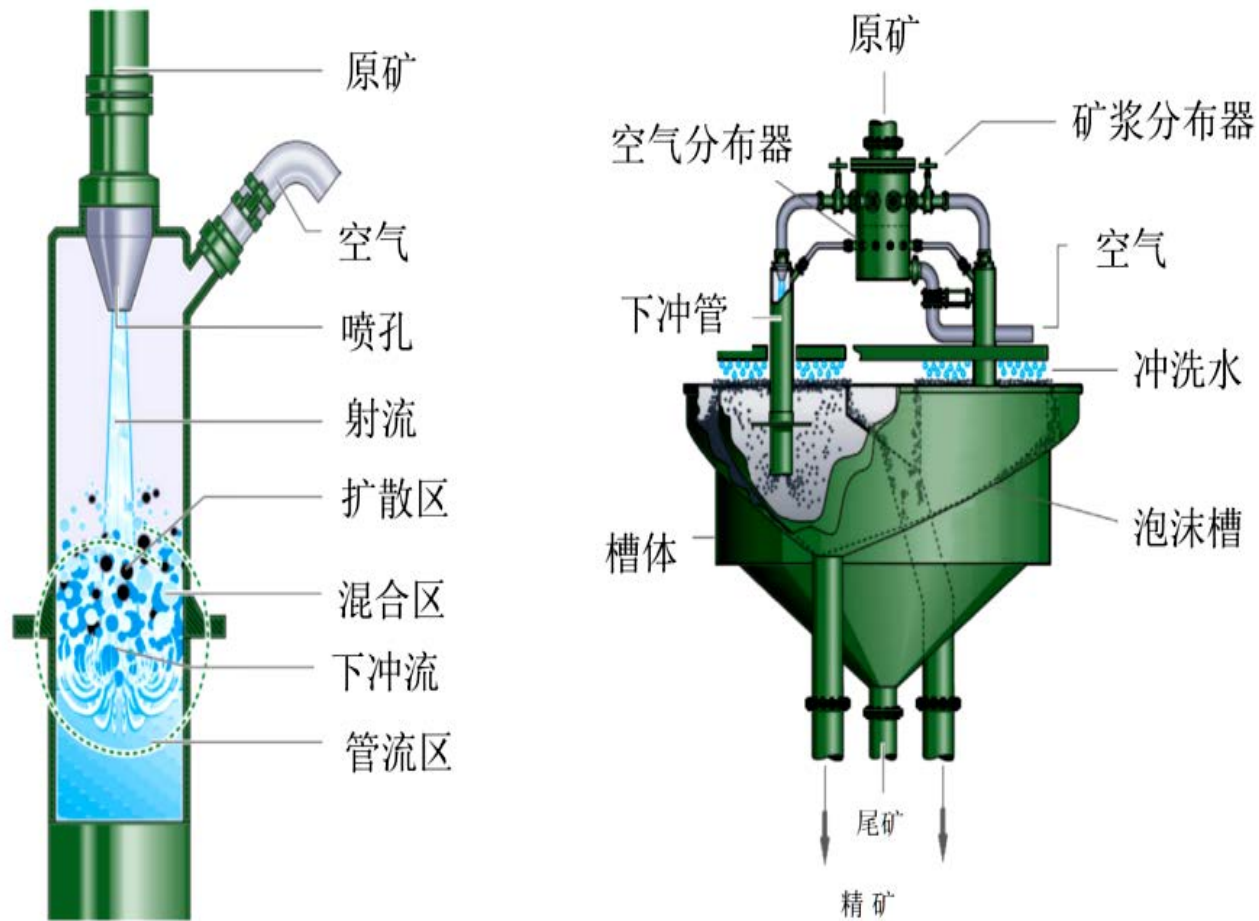
6.4 混流矿化浮选设备

上世纪60年代出现了第一款高效的管流式混流矿化浮选机Davcra cell^[57]，其结构如图1-16所示，空气和矿浆经过旋流器形式的混流矿化器实现矿化，矿化后的矿浆通过喷嘴射入浮选槽体内，高速的射流击打在垂直挡板上进一步强化颗粒和气泡间的作用，随后矿浆在挡板的阻挡作用下向上运动进入富集分离区，实现亲水和疏水矿物的分离。



Davcra cell 结构示意图

(1) Jameson浮选机



JamesonCell结构示意图

结构：主要由槽体和下冲管组成，下冲管上部装有文丘里管发泡器而下部则插入槽体底部区域。在文丘里管发泡器中，在离心泵的作用下矿浆高速通过喷嘴形成射流，高速矿浆射流形成负压吸入空气并将空气切割成直径约0.1-0.6 mm的微泡，并完成矿化过程。矿化后的矿浆在下导管中向下运动进入浮选机槽体。随后，矿化气泡向上运动进入泡沫层，而亲水矿物进入底流。

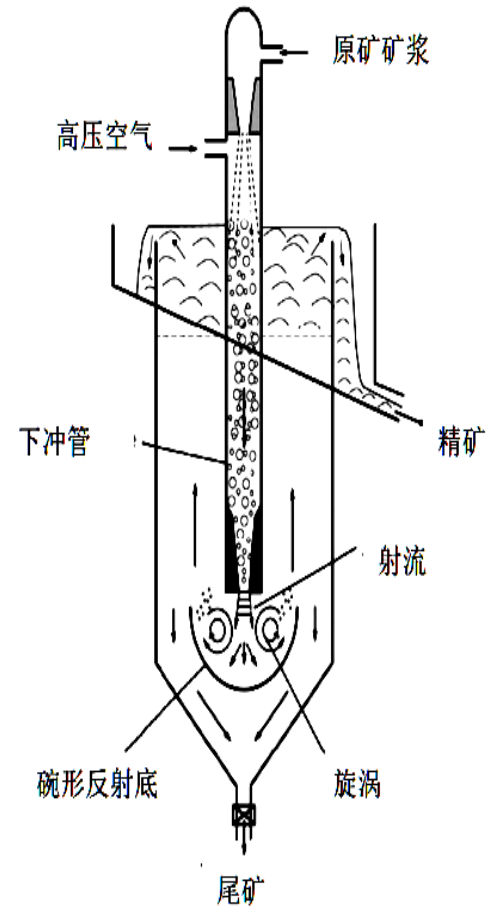
矿化过程：通过把混有药剂的矿浆用泵打入导管的混合头内，经过喷嘴形成喷射流而产生一个负压区，从而吸入空气并产生气泡，形成稳定的气、液、固三相混合流，因此避免了常规浮选柱压入空气所引起的问题。

特点：气泡矿化过程是在下导管内，由于下导管内矿浆溶气率高达40%-60%，而普通浮选柱溶气率仅4%-16%，因此矿化快，浮选效率高。与传统机械搅拌浮选机相比，Jameson浮选机由于采用了文丘里管产生微泡并强化气泡和颗粒的作用，具有细粒浮选效果好和矿浆停留时间短的明显优势，除此以外，还具有节能，槽体高度低，占地面积小，自动化程度高和生产稳定，使用寿命长等优点。

不过詹姆森槽也存在诸如喷嘴的堵塞与磨损问题。

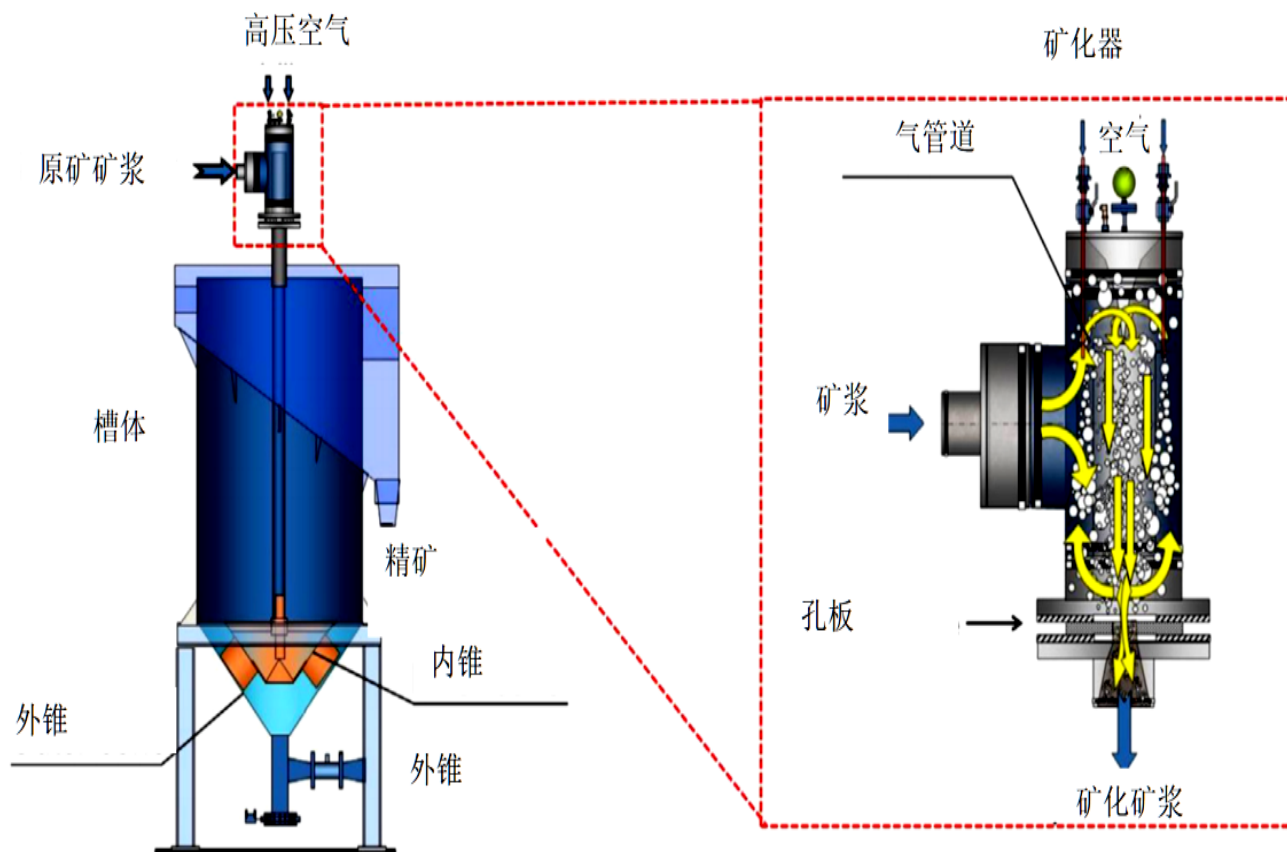
(2) Concorde Cell浮选机

工作原理：原矿矿浆首先通过文丘里管矿化，然后矿浆通过下冲管底端的喷口形成射流完成第二次矿化，最后射流击打在矿化管下方的碗形反射底，形成漩涡完成第三次矿化。通过三次矿化，Concorde Cell实现了较小矿浆停留时间和良好的细粒浮选效果，其浮选速率比机械搅拌浮选机提高了近100倍，且对4-150 μm 的宽粒级有用矿物具有良好的回收效果^[60]。



(3) Contact Cell浮选机

一种充气式混流矿化浮选机

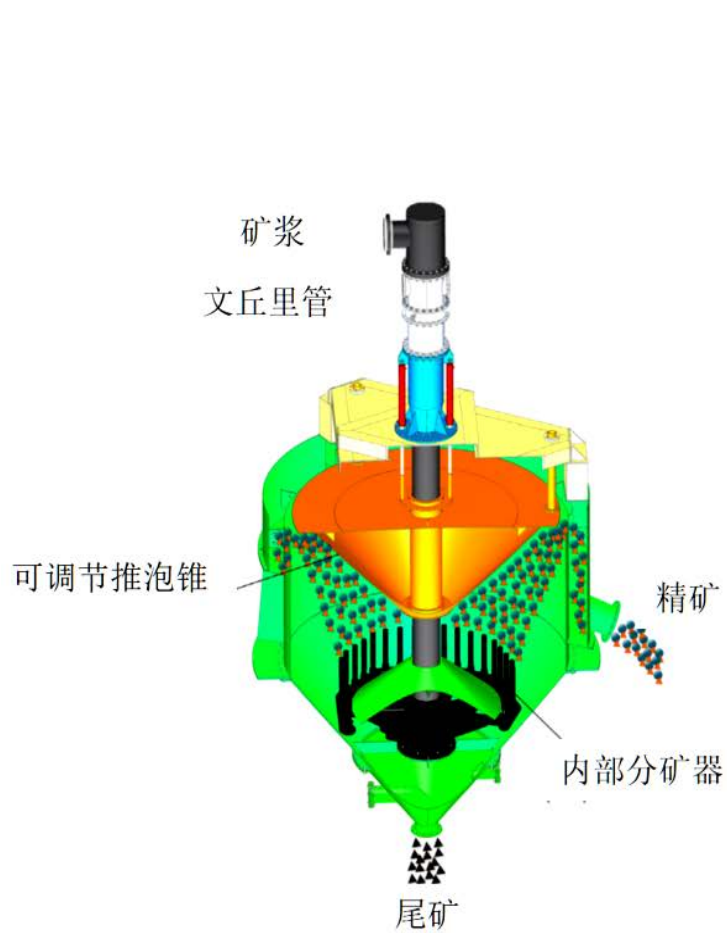


Concorde Cell结构及工作原理示意图

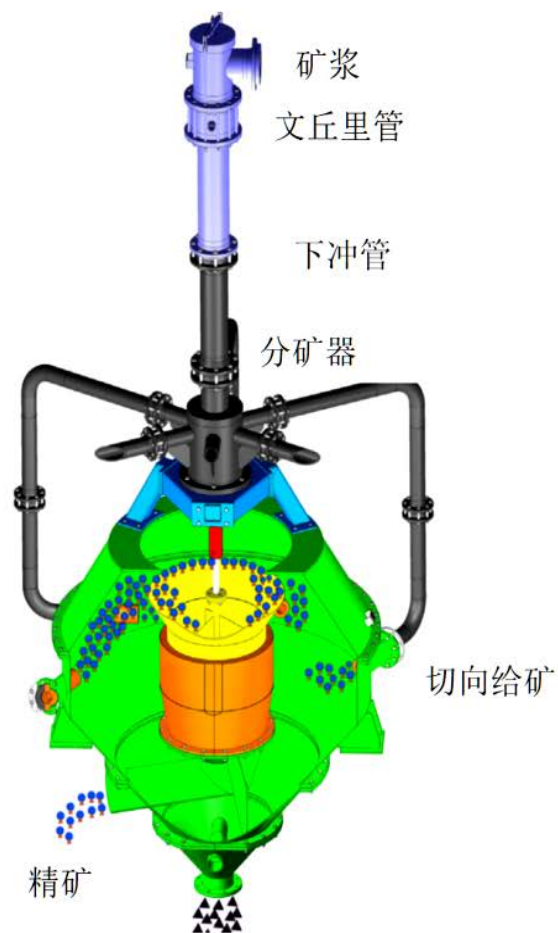
工作原理：高压空气和矿浆进入发泡器后混合产生微泡并强化气泡和颗粒的作用。矿化后的矿浆通过孔板上的小孔形成射流，完成二次矿化。随后矿浆经过下导管经过喷口击打在底部的内锥上完成第三次矿化。矿化后的矿浆进入槽体后，疏水矿物随着气泡向上运动最终进入精矿槽，而亲水矿物进入底流。

（4）IMHOFLOT CELL浮选机

借助文丘里管矿化方式的矿化效率高的优势，通过特定槽体和文丘里管的配合使用，强化粗粒和细粒的浮选。南非MAELGWYN（迈尔格恩）公司开发了IMHOFLOT V-CELL粗粒浮选机和IMHOFLOT G-CELL细粒浮选机。



(a) V-Cell粗粒浮选机



(b) G-Cell细粒浮选机

IMHOFLOT结构示意图

IMHOFLOT V-CELL工作过程：完成调浆的矿浆经过槽体上方的文丘里管发泡器矿化后通过下导管进入槽体底部的矿浆分配其中，矿浆分配器将矿浆均匀的散布在槽体内，矿化气泡向上运动最终进入精矿槽，而亲水矿物向下运动最终进入底流。

IMHOFLOT V-CELL提高粗粒浮选效果的措施：

- （1）文丘里管矿化方式配合低槽体设计减小矿浆停留时间，减少粗颗粒脱附概率。
- （2）文丘里管发泡器产生高气含率矿浆以利于粗颗粒的回收。
- （3）可调节的倒圆锥形推泡槽利于提高精矿泡沫的流量，减少粗粒在泡沫层的停留时间，从而减少粗颗粒脱落。
- （4）喷口向上的矿浆分布器利于提高，粗颗粒的上升速度，减少粗粒停留时间，从而减少粗颗粒脱附概率。

IMHOFLOT G-CELL细粒浮选机，槽体形状上部为圆锥而槽体下部为倒圆锥形。

调浆后的矿浆经过槽体上方的文丘里管发泡器矿化后沿着底部倒圆锥的切向方向给入，在底部圆锥作用下，强化了细颗粒矿化气泡向上运动，在顶部圆锥形槽体和中间圆柱形精矿槽的作用下，槽体径向截面积变小，精矿泡沫加速流入精矿槽。粗粒脉石矿物在底圆锥作用下进入底流。

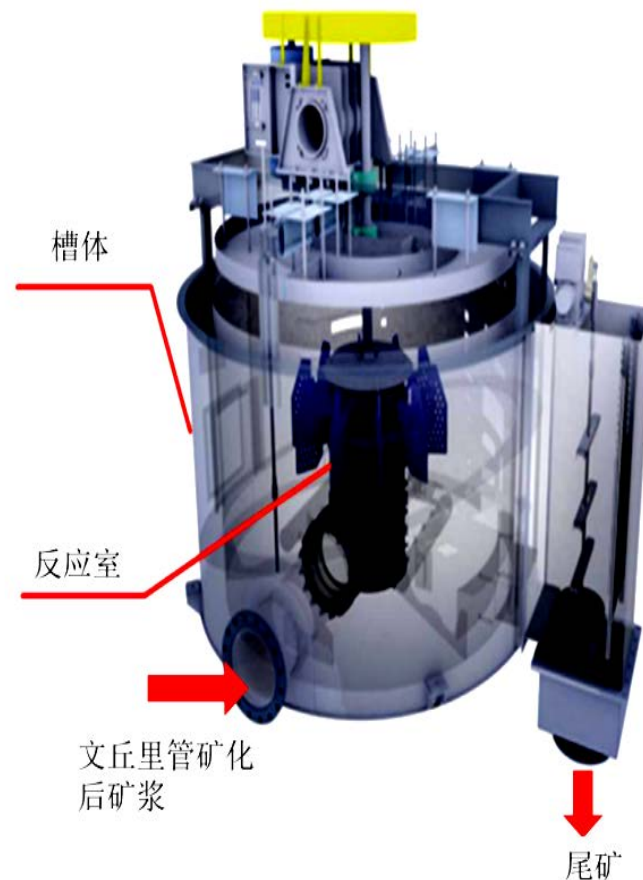
IMHOFLOT G-CELL提高细粒浮选效果的指标主要有以下几点：

- （1）下部倒圆锥槽体，强化细颗粒回收和与粗颗粒的分离。
- （2）上部圆锥和中部精矿槽设计，提高了泡沫的流量，提高了细颗粒的回收率。

（5）StackCell浮选机

工作原理：通过文丘里管混流矿化和机械搅拌矿化协同作用，强化细粒浮选效果。首先通过文丘里管发泡器完成第一次矿化，随后矿浆进入反应室在叶轮的搅拌下完成第二次矿化，完成两次矿化后的矿浆进入槽体后，在槽体内完成有用矿物与脉石矿物的分离。

特点：由于混流矿化和机械叶轮搅拌矿化协同使用，StackCell浮选机具有占地面积小，能耗小，处理能力强和细粒浮选指标好等优点。



StackCell结构示意图

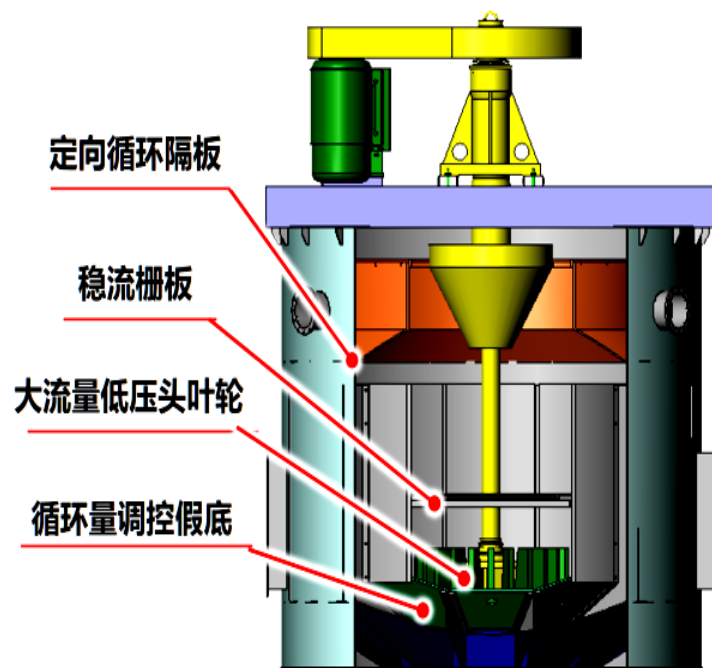
通过综合分析机械搅拌、逆流和混流矿化浮选机的工作原理及特点，可得到以下结论：

（1）机械搅拌矿化浮选机出现最早，技术成熟，应用最广。低叶轮转速，低槽体利于粗粒浮选，而高叶轮转速，高槽体利于细粒回收，难以同时有效回收细粒与粗粒矿物。

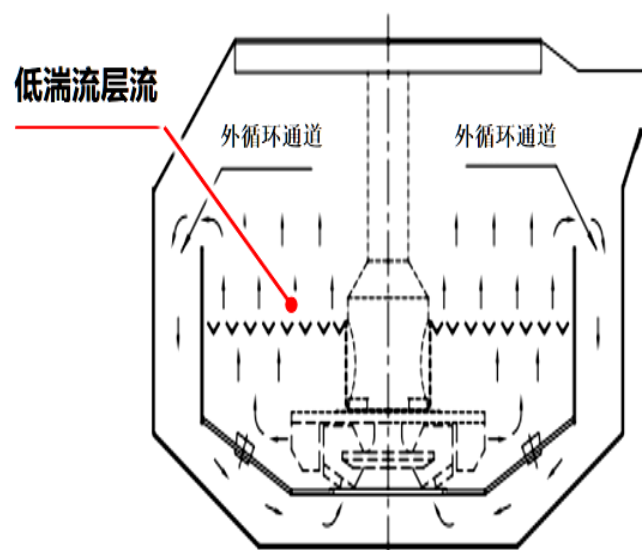
（2）常规逆流矿化浮选机（浮选柱），由于较大的柱体高度，增加了矿浆停留时间，利于浮选速率较小的细颗粒矿物的回收，但高柱体不利于粗粒浮选。

（3）混流矿化浮选机，由于采用独立的矿化器，具有气泡小，矿化强度大的特点，对于细粒矿物具有良好的回收能力，而较小的矿浆停留时间可减少能耗和设备占地面积。

(6) CLF和CGF型宽粒级浮选机



(a) CLF充气式宽粒级浮选机



(b) CGF自吸式宽粒级浮选机

CLF和CGF型宽粒级浮选机结构示意图

北京矿冶研究总院生产的CLF和CGF型宽粒级浮选机。二者结构相似，CLF型是外部充气式，CGF型则为自吸。CLF型浮选机通过槽体内隔板实现流态化，低湍流的富集分离区来提高粗颗粒回收率，除此以外，低槽体深度和低叶轮转速利于减小槽体内湍流强度从而减小较粗粒级、较大密度的有用矿物的脱附概，从而实现较粗粒级、较大密度、较高浓度的全粒级选别，已被成功用于石英砂、冶炼炉渣等含有粗粒级的有色、黑色、非金属矿物的选别。

主要特点:

- (1) 叶轮使用高比转速，配合后倾式的叶片设计,使矿浆贴合叶轮形状的流动，可增大浮选机的矿浆循环量、减小功耗;
- (2) 使用格子板降低富集分离区的湍流动能和减小矿浆流轴向混合，而且矮槽体利于降低粗颗粒脱附概率。

6.5 流化态（床）浮选设备

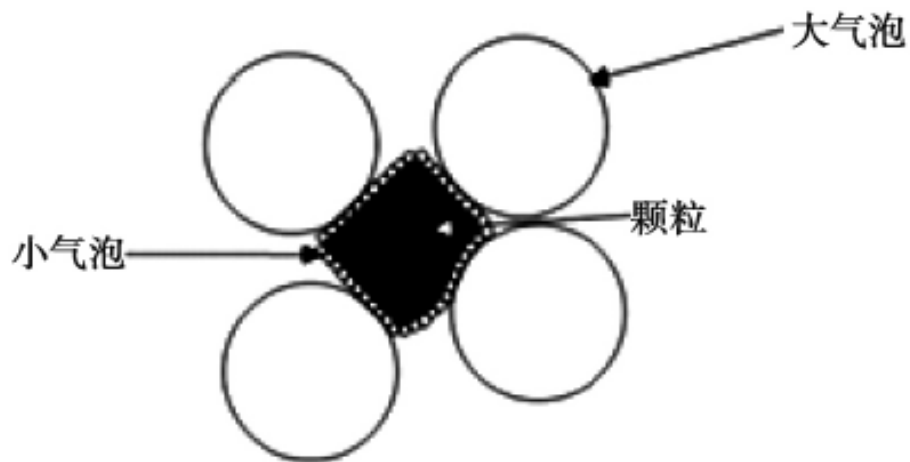
6.5.1 流态化浮选理论简介

流态化浮选技术是基于流态化干涉沉降原理，颗粒在干涉环境中，沉降末速小，从而降低了颗粒与气泡之间的速度差；薄泡沫层降低了矿化气泡穿过浆一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，有效减轻了常规浮选环境下粗颗粒易从气泡脱落的问题。

（1）流化床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。三相流化床（固液气）浮选给料浓度比常规浮选机给料浓度高，矿浆黏度增加降低了粗颗粒沉降速度；增加了颗粒气泡碰撞概率；保证了颗粒的悬浮和均一分散，改变了传统浮选机依靠叶轮强力搅拌维持颗粒悬浮的方式。

（2）小气泡的二次捕收作用，加速大气泡的黏附。

基于Miettinen等人的研究，矿浆中小气泡的存在对粗粒浮选是有益的。小气泡在矿浆中密布在粗颗粒矿物上，有助于大气泡的黏附。流态化环境中的大气泡，易在高浓度矿浆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。



(3) 薄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。

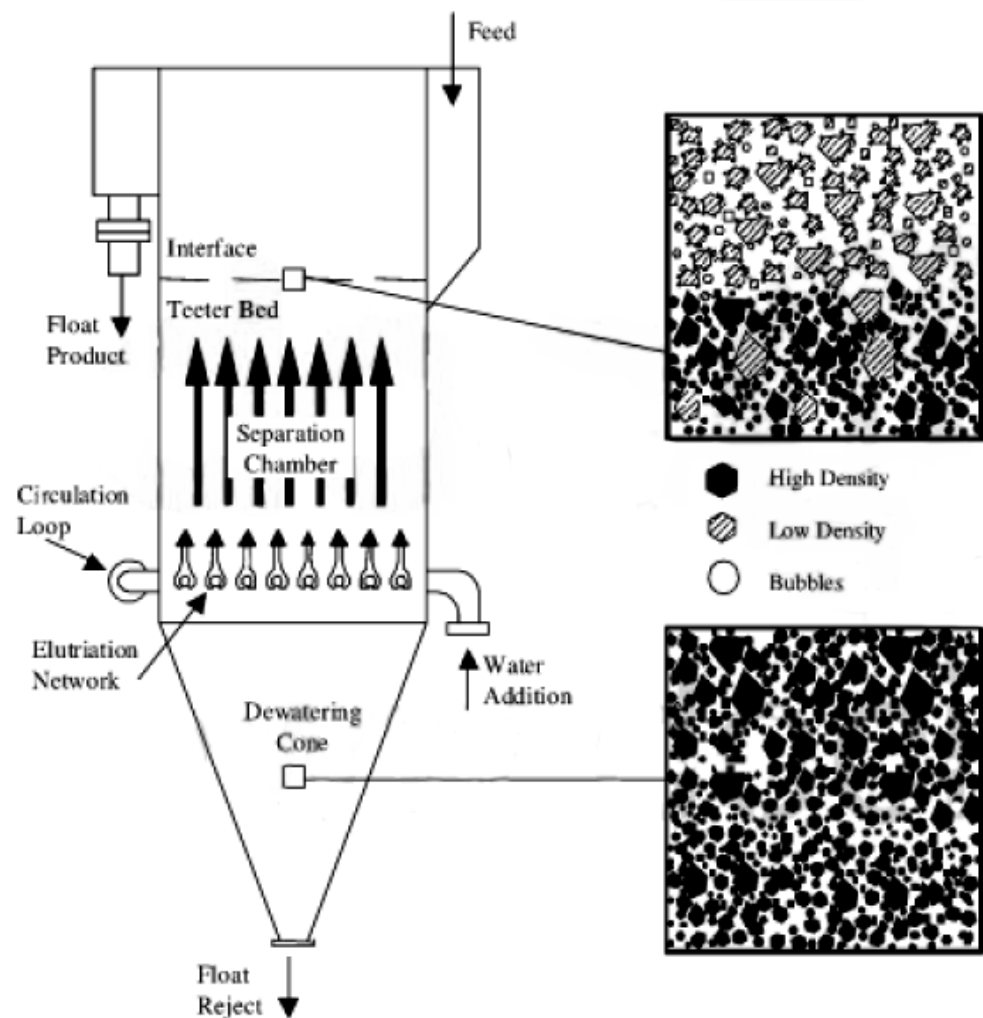
(4) 流化床的低紊流分选环境中，颗粒的临界接触角变小，低解离粗颗粒的接触角易大于临界接触角，浮选行为更容易发生。

6.5.2 典型设备

(1) HydroFloat浮选机

结构：HydroFloat 分选机由位于上部的矩形横截面的分选槽和位于下部的脱水圆锥组成。

工作原理：与两相流态化分选机工作类似，通过分选室底部整个横截面的网状管路供给流态化水。注入压缩空气和向流态化水中添加少量起泡剂，以连续向流态化床充气。在离心泵组成的闭路中水通过高剪切混合器循环，气体分散为小气泡。在流态化床中气泡固着在疏水颗粒上，因而，降低了气泡-颗粒集合体的有效密度。颗粒可以是天然疏水的，也可以通过添加浮选捕收剂使其疏水化。较轻的气泡-颗粒集合体上升到较高密度流态化床的顶部，溢到分选室的顶部。



HydroFloat浮选机结构示意图

与常规浮选机不同，气泡-颗粒集合体上升到槽子顶部不需要很大浮力。干扰床的流态化效应推动低密度气泡-颗粒集合体溢流到溢流产品槽中。亲水颗粒不固着在气泡上，继续向下运动进入流态化床，最终穿过流化床沉降到脱水锥中。通过分选机底部的控制阀门，这些颗粒以高固体流(含75 %固体)排出。安装在分选室旁边的压力传感器发出的控制信号开启和关闭阀门，可使流态化床保持恒定的有效密度。

HydroFloat浮选机主要通过以下几点措施提高粗粒浮选效果：

- ①上升水流和气泡的共同作用提高了粗颗粒受到的浮升力。
- ②高浓度矿浆提升了粗颗粒的浮力，增加气泡和颗粒的碰撞概率，逆流矿化方式增加了矿浆停留时间。
- ③流态化流场减少了径向混合和湍流强度利于减小粗颗粒的脱落。

与传统的机械搅拌式浮选设备相比，具有以下特点：

（1）给矿矿浆浓度大，增加了矿物颗粒与气泡的碰撞概率，同时流态化床层的形成，减少颗粒的干扰沉降速度，增加碰撞概率。

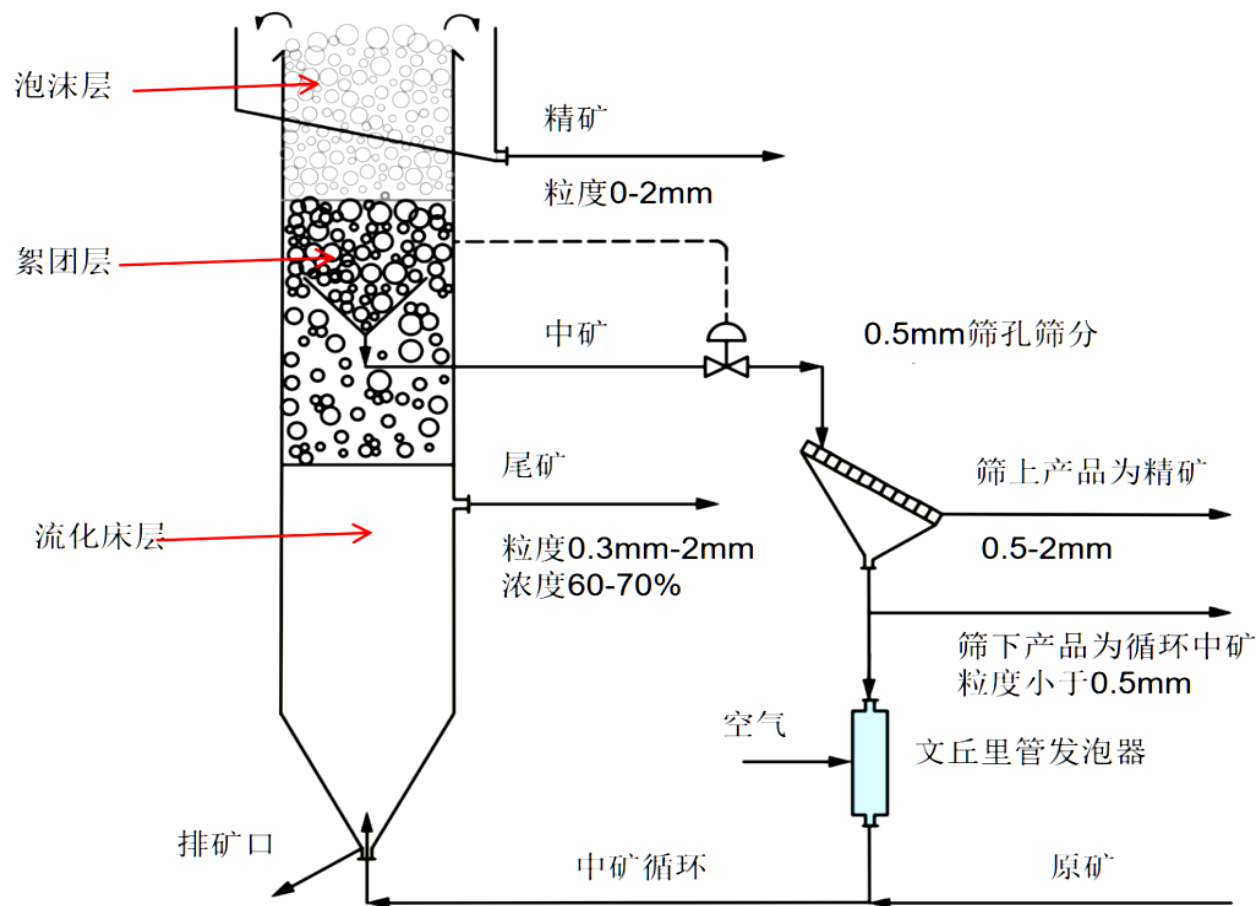
（2）矿浆以逆流形式给入槽体，在上升水流提供向上力的作用下，增加了粗颗粒矿物的停留时间，从而提高了选别指标。

（3）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。

（4）大的气泡矿物颗粒簇的形成，减少粗颗粒矿物的脱落。

（5）HydroFloat浮选机泡沫层薄，不利于回收细粒矿物。

(2) Nova Cell浮选机



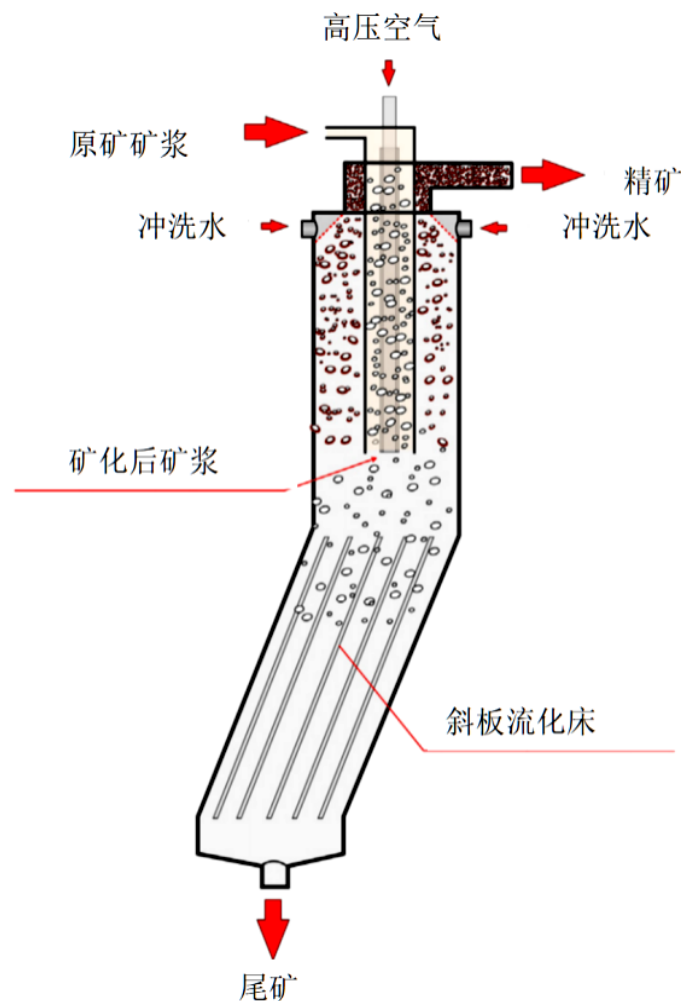
Nova Cell浮选机结构示意图

由澳大利亚Jameson教授研制。原矿和返回的中矿经文丘里管发泡器矿化后给入槽体底部。槽体底部为矿浆浓度高达60 %的流化床层，可以强化气泡与颗粒的作用，延长矿浆停留时间，提高粗颗粒回收率。疏水颗粒随着气泡上升穿过流化床层进入富集分离区，粗颗粒絮团回落被收集为中矿，中矿使用0.5mm振动筛进行筛分，筛上粗粒产品为精矿，筛下细粒产品返回再选。富集分离区较细或疏水性更好的疏水矿物随气泡进入泡沫层最终溢出，而亲水矿物从流化床层的上端以高达60 %的浓度排出。Nova Cell主要有以下优点：

- （1）提高煤矿的浮选粒度上限至2 mm，而通常浮选机和浮选柱的煤矿浮选粒度上限分别为0.3 mm和0.15 mm。
- （2）采用文丘里管矿化器，矿浆处理能力大，能耗低。
- （3）尾矿浓度高达60 %，可节省尾矿脱水成本。

(3) Reflux Flotation Cell浮选机

使用了微孔管混流矿化、斜板、流态化分选多个技术的结合。通过槽体上方的新型微孔管混流矿化器产生高气含率小气泡的三相矿浆。矿浆进入流化床层后，向下的冲洗水，使得疏水矿物向下运动进入底流，可减少精矿中脉石的夹杂，疏水矿物随着气泡向上运动进入精矿管排出。流化床下方为斜板区间可以避免高速向下运动的气泡短路进入尾矿。



与Nova Cell 使用水实现流态化不同的是，RFC使用空气实现流态化，流态化区位于槽体上部，从上部进入的水主要起冲洗和降低气泡上升速度，增加矿浆停留时间的作用。

RFC具有以下优点：

- （1）新型微孔管混流发泡方式可产生有利于细粒回收的微泡，而高气含率有利于粗颗粒的回收。
- （2）取消泡沫层，向下的冲洗水不仅可以提高精矿品位，而且可以通过提高精矿流量来提高精矿回收率。
- （3）斜板流化床可避免矿浆短路进入尾矿。