

大型浮选机学术研讨会 论文集

中国有色金属学会冶金设备学术委员会

中国有色金属学会选矿学术委员会

中国选矿科技情报网

中国有色金属工业总公司选矿情报网

一九八八年一月

目 录

1. 论浮选槽按比例放大的相似依据.....中国矿业学院北京研究生部 郭梦熊 (1)
2. KYF-38大型浮选机的研制.....
北京矿冶研究总院 邹介斧 刘振春 沈政昌 杜懋德 (9)
3. 几种大型浮选机的综合评述.....北京有色冶金设计研究总院 秦毅 (13)
4. 国外大型浮选机的研制与应用.....北京矿冶研究总院 王璧善 (17)
5. 德兴铜矿、金川镍矿大型浮选机的功耗.....
北京有色冶金设计研究总院 秦毅 (27)
6. SF型浮选机.....北京矿冶研究总院 张鸿甲 刘桂芝 (30)
7. 关于OK、DORR型浮选机叶轮的讨论.....
北京有色冶金设计研究总院 秦毅 朴树寰 (35)
8. JJF-4浮选机在拉拉铜矿选厂改扩建中的应用.....
昆明有色冶金设计研究院 王吉萍 (38)
9. 新型浮选机在锡石硫化矿工业试验结果及推广应用.....
北京有色冶金设计研究院 刘见训 (43)
10. 引进大型浮选机的技术性能及其在选煤中的应用.....
煤炭科学研究院唐山分院 潘永保 刘鸿功 贾俊会 张孝君 (58)
11. 新型高效煤泥分选设备.....煤炭科学研究院唐山分院 刘洪功 (70)
12. XPM型喷射浮选机.....煤炭科学研究院唐山分院 顾少雄 韩德友 (84)
13. 大型浮选机自动控制.....北京矿冶研究总院 陈鼎玖 赵秀慧 (90)
14. 浮选过程工艺参数自动测控系统.....煤炭科学研究院唐山分院 任清晨 (98)
15. JJF-20型浮选机使用情况总结.....大冶铁矿 侯玉昆 (103)
16. 大型浮选机联合机组用于铁、稀土浮选的工业实践.....包钢选矿厂 黄锡武 (110)
17. 大型浮选机的应用与评述.....白银有色金属公司选矿厂 龚子新 (115)
18. JJF-16型浮选机在铜录山矿选矿厂1号系列的应用.....铜录山铜铁矿 崔锦舫 (120)
19. JJF-16米³浮选机在铜选厂的应用.....德兴铜矿选厂 骆淑龄 (125)
20. JJF-8型浮选机工业生产试验报告.....锦屏磷矿 (134)
21. 有色金属选厂磨矿和浮选作业的微机控制.....铜陵凤凰山铜矿 王启柏 (143)
22. KYF型浮选机浅述.....溧阳县矿山机械厂 狄士庚 (152)
23. 衬胶浮选机转、定子的研制和实践.....本溪市塑胶厂 陈强 (157)
24. JJF-16、JJF-8型浮选机在铜和铜铅锌选厂的应用.....
白银有色金属公司 龚子新 孙希乐 (164)
25. 烟台轻工机械厂简介..... (170)
26. 内蒙古黄金机械修造厂产品介绍..... (171)

论浮选槽按比例放大的相似依据

中国矿业学院北京研究生部 郭梦熊

一、前言

最近几年我国许多新建和扩建的浮选厂，许多经过改造及设备更新的旧浮选车间，在使用大容积浮选槽方面都积累了若干数据，多数选厂的实践证明，发展大容积浮选槽能够带来明显的经济效益。在这方面也曾经用DENVER-DR和WEMCO两个浮选槽系列产品的数据说明了国外的结论。随浮选槽容积增大，单位容积功率普遍已降低，这对降低浮选成本是有积极意义的，见图1。

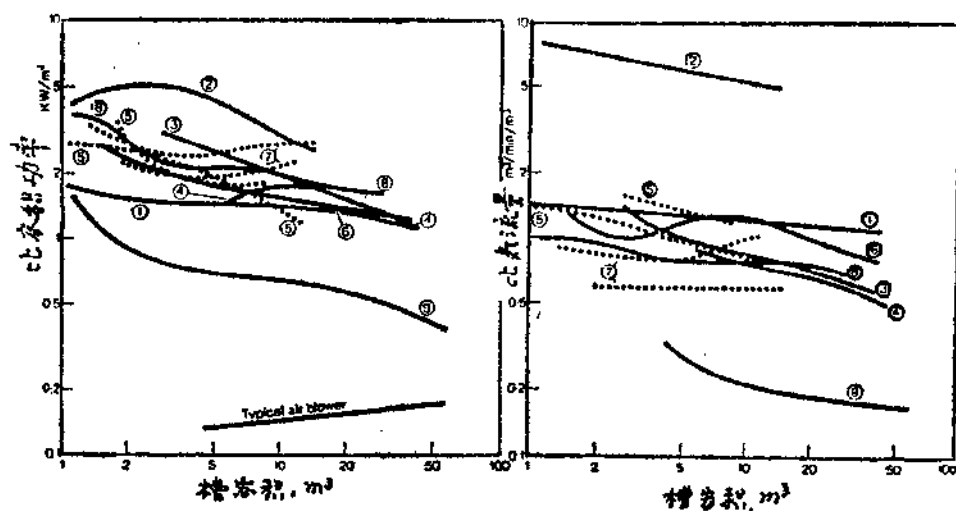


图1. 不同容积槽的比容积功率和气流量的变化状况

(1) Aker; (2) Booth; (3) Denver; (4) Agitair; (5) Minemettwo tank depths; (6) Outokumpu; (7) Sala-two tank depths; (8) Wemco; (9) Maxwell. (摘自YANG.)

然而在我国也有一些选厂使用大容积浮选槽之后工艺技术指标下降了或显著下降了。例如若干使用XJM-6浮选槽的选煤厂、使用WEMCO浮选槽的胶磷矿选矿厂等。这种情况在国外也有报道。因此，尽管上述优点已经获得公认，但是仍有人提出疑问，大容积浮选槽的

工艺技术效果是否与小容积槽相当或相等？持有这种怀疑的人多数来自现场生产第一线，所以是有根据的。国内有之，国外亦有之。我们认为形成这个概念的原因有两个：第一，由于选型不当，即选用的浮选机机型与浮选的矿石性质不相适应；第二，浮选槽本身固有的缺点，或者在放大过程中没有遵循相似准则，或者原来的结构设计就存在着缺陷。本文根据已发表的若干论述，就此问题进行一些讨论。

二、均匀液体中常用的无量纲数

在研究机械搅拌式浮选槽按比例放大规律时总是把它们看成一种带有缓冲部件的混合器，并采用一系列无量纲数来分析其流体动力学特征。这样做有助于减少参数的数目和简化分析过程。对于均匀液体常用的无量纲数有下列几个：

$$1. \text{雷诺数 } N_{Re} \quad \frac{ND^2\rho}{\mu} \text{ 或 } \frac{UD\rho}{\mu}$$

$$2. \text{功率数 } N_P \quad \frac{P}{\rho_i N^3 D^5}$$

$$3. \text{气流数 } N_A \quad \frac{Q_A}{ND^3}$$

$$4. \text{排流数 } N_L \quad \frac{Q_L}{ND^3}$$

$$5. \text{弗罗德数 } N_{Fr} \quad \frac{N^2 D}{g}$$

$$6. \text{韦伯数 } N_W \quad \frac{N^2 D^3}{\sigma_{LG}}$$

式中 D 为叶轮直径， N 为叶轮转数， ρ 和 μ 为液体的比重和粘度， i 指构成系统的相数，此处为 1， σ_{LG} 为气液界面张力， Q_A 和 Q_L 分别为充气量和叶轮的排流量。

上述无量纲数的意义将在下面分别进行讨论，首先从最简单的清水试验开始。

三、浮选槽内流体流动的性质

判定流体流动性质的无量纲数是雷诺数，它是惯性力和粘滞力的比。利用 N_{Re} 我们可以说明浮选槽内各部位的流体流动性质，从而衡量它们是否符合浮选要求。对于一般机械搅拌式浮选槽，我们均可按过程的性质把槽内空间划分为四个区：混合区、输送区、分选区和泡沫层。每个区的几何尺寸皆与搅拌-充气机构和槽体的结构特征有关。由于流体在各区的流动性质皆可用雷诺数描述，所以 N_{Re} 是一个重要相似准数。

在混合区， N_{Re} 的数量级为 $10^5 \sim 10^6$ ，故属湍流性质。在整个自然界的流体动力学范围内这不过是一种低湍流现象，但是就现有浮选槽中的流体流动状态来说这就算是强湍流了。为了完成分离过程必须保持稳定的矿化泡沫层，因此在泡沫层基线附近应当有一个平静的流动环境。为了把流动性质从湍流转变成近似层流，浮选槽需要保持一定的深度，这不仅可以延长气泡的矿化和分选路线，也可以增大容积。这样做比设置对矿化气泡具有破坏作用的稳流格于更

节省能量。选煤厂的实践证明，浅槽浮选机虽然可以节省些电功率，但并不适合中国煤的浮选性质。现场人员认为，槽深1.5米的旧式 $\phi M-2.5$ 浮选机要比1米槽深的XJM-4浮选机更为稳定。近代大容积浮选槽都相应地增加了槽深是有道理的。槽内不设置稳流板的浮选机常常在分选区出现一定强度的绕轴环流，设置稳流板有助于将此绕轴水平环流转变为上升流，但是也有增加能耗和减少有效容积等缺点。因此大容积浮选槽多去掉了槽内稳流板，而靠壁和槽底对流体反射效应造成上升流。

分选区以上的槽体容积向泡沫溢流唇方向延伸扩大，有助于缓和上升流和绕轴环流的湍流强度，并将部分上升流和绕轴环流疏散为面向泡沫溢流唇方向流动的水平流，后者可以促进矿化泡沫排出。DENVER-DR浮选槽设置上循环管不仅有助于中矿循环再选，而且其上部入口处的下降流亦有助于减缓上升流的强度。为了保持分选区的流态相似，DENVER-DR槽规定此区的深度为常数，不随槽容积和槽深增加而改变。WEMCO浮选槽的结构别具一格，利用分散裙、锥形罩和假底将水平旋流转变方向，从而在分选区形成分布相当均匀的上升流。

四、浮选槽的功率

输入功率主要取决于槽内各部件的几何结构特征和工作参数。功率数能够定量地反映出它们之间的关系。在单相流体中，功率只用于驱动液体运动并消耗于机械摩擦和流体阻力而转化为热量耗散。实验室测量证明，功率数随雷诺数增高而降低；充气条件下的功率数要比不充气时的低些，在DENVER槽内二者有很好的平行关系；在矿浆条件下， N_P 受矿浆密度和粘度影响变化较大。因此HARRIS提出了一个通式

$$N_P \propto (ND^2)^{-C}$$

并归纳了大量工业和实验室数据，建议C值介于0.2~0.5之间，对浅槽取低值，对深槽取高值。这个差异说明槽深对槽内流体阻力的影响。大容积浮选槽靠降低转速来降低功率，靠辅设的外部充气和增大叶轮直径来保证足够的充气量和输送矿浆，增加槽子深度可以提高气泡的矿化效果。后三项措施皆会使功率消耗增高。

五、浮选槽叶轮的通过能力

为了说明叶轮排流量和其最大理论流量之比，引用排流数 N_L 。由于测量上的困难，特别对于只起搅拌作用的叶轮要获得单位时间内的通过量则更为困难。因此，对这个重要的无量纲数研究得不多。NAGATA曾在一个圆柱形槽内测量平板桨状叶轮的 N_L ，叶轮直径和槽径比为0.3，槽内设有8个稳流板。在完全湍流条件下，测得 $N_P = 14.2$ ， $N_L = 2.9$ ，并得出下列关系式

$$N_L \propto \left(\frac{D}{L}\right)^{-2.6} \left(\frac{b}{L}\right) N_P^{0.7}$$

式中 D/L 为叶轮直径和槽径比，称为形比； b/L 为叶片高度和槽径比，此处等于0.1。

WEMCO1+1叶轮在充气条件下分别在14.15和28.3米³容积槽内测得的 N_L 值为0.505和0.558。NAGATA曾提议将 N_P/N_L 值做为比较各种叶轮排流效率的判据。但是，因为数据

有限, 所以只有MINEMETBCS浮选槽采用。

大量事实证明, 有价颗粒和气泡在叶轮-定子机构内部发生的接触过程, 如果从单位容积和时间来看, 其附着效率和选择性是最高的。这应当归功于狭窄空间内发生的湍流混合效应和空气析出作用。从DENVER槽的叶轮-定子机构演变过程就可以看到增加通过叶轮的矿浆数量和循环次数对提高浮选指标的重要性。初期的定子盖板上没有循环孔, 矿浆沿进浆管逐槽地通过叶轮。后来在定子盖板上设置了循环孔, 实现了槽内小范围的内循环。近来又进一步改设中央上循环筒, 实现了槽内大范围的内循环。每一次改进对颗粒和气泡的附着效率和选择性都有明显提高。从相反的方面看, 大容积直流槽中存在着流体短路流动现象。因此, 有些大容积浮选槽的分选指标低于逐槽的方案, 这说明浮选槽按比例转换必须保证一定比例的叶轮内循环量。鉴于上述事实, 作者建议把无量纲数环流比 R 做为浮选槽按比例转换的一个准数。

环流比 R 定义为单位时间内通过叶轮的內循环量与该槽通过量之比

$$R = \frac{Q_L}{Q_F}$$

在实验室单槽浮选机上, 环流比为槽内流体通过叶轮的循环量与槽容积比, Q_L/V 或 Q_L/Q_0 , 单位是 秒^{-1} , Q_0 是与槽子有效容积相当的液体量。我们曾检测过DENVER-DR实验室单槽浮选机不同容积槽的环流比, 发现欲使不同容积槽内的环流比保持恒定, 必须将叶轮直径、转速和循环管的口径调配恰当。对于工业浮选槽也曾给出DENVER和WEMCO两种槽的环流比(秒^{-1})随槽容积增大的变化规律。当然, 环流比受入料浓度和充气量的影响变化较大。但是在浮选槽设计时, 这些变量皆可做为设计的前提, 事先给定, 或者找出二相流条件下的环流比与浮选指标的对应关系, 相应选择适当的环流比对实现完全混合过程是十分重要的。

六、浮选槽的充气量

除去机械搅拌吸气式浮选槽之外, 例如WEMCO槽, 大多数大容积浮选槽皆采用外部供气系统做为低压充气源。因此, 自吸空气量不必做为保证目标。对于自吸式浮选槽来说, 通过叶轮的气流量不仅和叶轮的直径和转速有关, 而且与液流量有关。因此常采用气流数 N_A 来说明它们之间的关系。按定义气流数反应了气流和液流通过叶轮出口面积的相对值。大家知道, 过高的充气量会造成空气泛滥, 产生大气团和造成液面翻花现象, 此时功率突然下降; 与此相反, 过高的液体循环量不仅会降低充气量也会增高功率。WEMCO公司提出了气-水两相条件下的气流量、液流量和功率与叶轮直径和转速间的关系式:

$$\begin{aligned} Q_A &\propto D^{2.4}/nN - \delta \cdot m(D) \\ Q_L &\propto (DN)^{0.2} \exp f(D) + \delta \exp g(D) \\ P &\propto D^{8.7} N^{1.8} [n_1(D) + \delta n_2(D)] \end{aligned}$$

式中 δ 是叶轮浸水深度, $f(D)$, $g(D)$, $m(D)$, $n_1(D)$ 和 $n_2(D)$ 为 D 的不定函数。

对于设有外部充气的大容积浮选槽, 充气量完全是一个可控制的操作因素。实践证明, 不同的矿石性质需要不同的充气条件。例如, 煤浮选常需较高的充气量和较快的浮选速率; 胶磷矿浮选则需要较低的充气量和缓慢的浮选速率; 粗粒矿物浮选的充气量常比细粒的高些

等。但相应地叶轮搅拌强度必须减弱。

七、浮选槽内的气泡尺寸

机械搅拌式浮选槽内的气泡尺寸平均多在2毫米左右。大容积浮选槽内的气泡平均尺寸是否和小容积槽内的相似呢？为此引入韦伯数 N_w ，它是惯性力与表面力之比。

流体内部的应力，特别是湍流脉动的剪应力与表面力的平衡条件是形成气泡分散的基础，而单位容积的能量耗散控制着湍流的最小涡旋尺寸。由此，CALDERBANK提出下列关系式用来表述分散的气泡平均直径与 ϵ 和 σ_{LG} 的关系。式中 Φ 为空气容积占槽容积的比； μ_G 和 μ_L 分别为气体和液体的粘度； $\bar{d}$ 为气泡的平均直径，由统计式求出

$$\bar{d} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$$

此式只说明气泡平均直径与比功率之间的大致关系，并未与叶轮的直径和转速关联起来。因此，VAN DIERENDONCK提出了一个新的无量纲数，称为EOTVOS数，由下式求出

$$N_E = \frac{\bar{d}^2 \rho g}{\sigma_{LG}} = \left[1.2 + 260 \mu \frac{(N - N_0) D}{\sigma_{LG}} \right]^{-2}$$

利用 N_E 相似或气泡平均直径相同关系来寻找最佳叶轮转数和直径。

除此之外，也应用单位容积的平均充气量和单位表面积的平均气流通量，不过也不能说明气泡在槽内的分布状态。所以研究随流气泡尺寸及其沿径向的分布密度变化规律，并找出与流体参数相关关系会有助于消除大容积槽内有可能出现的死角。

八、浮选槽内叶轮产生的离心力

弗罗德数 N_{Fr} 是叶轮产生的离心加速度与重力加速度（或惯性力与重力）之比。因此，弗罗德数相等，即说明两种不同容积槽内的动压头（由离心力产生的）和流体静压差相似。

OUTOKUMPU浮选槽根据下列两个条件：

$$\text{弗罗德数相似} \frac{N'^2 D'}{g} = \frac{N^2 D}{g},$$

$$\text{泵的条件相似} \frac{N' D'^2}{L'} = \frac{N D^2}{L},$$

导出下列相似方程组，并以此做为该系列浮选槽按比例放大的准则。

$$\text{叶轮直径与槽宽比} \frac{D'}{D} = \left(\frac{L'}{L} \right)^{2/3},$$

$$\text{泵浆量比} \frac{Q'}{Q} = \left(\frac{L'}{L} \right)^{6/3} = \left(\frac{D'}{D} \right)^{6/3},$$

$$\text{功率比} \frac{P'}{P} = \left(\frac{L'}{L} \right)^{7/3} = \left(\frac{D'}{D} \right)^{7/3},$$

与此类似，作者提出另一个无量纲数 N_H 做为确定槽深时的准数，称为压力数，是全压与惯性力之比。

$$N_H = \frac{g(H + |h|)}{N^2 D^2}$$

式中 H 是叶轮浸水深度，米； $|h|$ 是负压差的绝对值，米； h 不仅是 N 和 D 的函数，也与 H 有关。故在按比例放大中 N_H 应有一个最佳范围值。

槽深和叶轮浸水深度不仅影响输入功率，也影响吸入空气量和槽内流体的流动性质，特别是分选区内的流体流动性质。此外，还与浮选矿石的浮选性难易程度有关。现代大容积浮选槽普遍增加了槽深，这样有利于提高精矿品位。

上述无量纲数分别从不同角度确定了浮选槽按比例转换时应遵守的准则，并各有一定的适用条件。做为一个综合应用无量纲数的例子，可引出NAGATA的关系式，它说明在有无空气时透平叶轮的功率比和若干无量纲数的相关关系

$$\ln \frac{P_A}{P_0} = -192 \left(\frac{D}{L} \right)^{4.38} N_{Re}^{0.115} N_{Fr}^{1.98} D/L N_A$$

式中 P_A 和 P_0 分别为充气时和未充气时的功率。

九、 浮选槽内的颗粒悬浮

在外部供气的大容积浮选槽内，搅拌叶轮的基本任务将更侧重于下列两点：使固体颗粒处于相对悬浮状态和将矿浆从入料点经过叶轮和分选，分别把气-固集合体和剩余的固-液混合物输送到泡沫溢流唇及下一个浮选槽或尾矿箱。

NAGATA提出一个关系式，说明在两相固-液系统中使颗粒处于流动状态的叶轮临界速度为

$$N_c = K D^{-2/3} d_s^{1/3} \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \right)^{-1/6} \gamma^{0.7}$$

式中 N_c 是叶轮的临界转速，转/分； D 和 d_s 分别为叶轮和颗粒的直径，米和毫米； ρ_s 和 ρ_L 分别为颗粒和液体的密度克/厘米³； μ_L 的单位为帕秒； γ 是表示颗粒形状的无量纲数，相关系数 K 的取值视叶轮形状和缓冲装置确定，对于平底圆柱槽 $K = 150 \sim 230$ 。

OYAMA及ENDO从能量角度上提出了一个关系式，说明使颗粒处于悬浮态必要的比能耗为

$$\varepsilon_m^{2/3} = \frac{g d p^{1.8} (\rho_s - \rho_L)}{16 \rho_i}$$

式中 ε_m 为单位质量矿浆的能耗； ρ_i 为矿浆的平均密度，等于液体和固体的质量对其总容积比。

因为浮选是在三相系统中进行的一个比较复杂的过程。不同容积槽的混合效率不仅受气泡尺寸和数量的影响，也受入料中固体物料含量和粒度组成影响。因此在固液两相系统中进行充气时，固体颗粒的悬浮

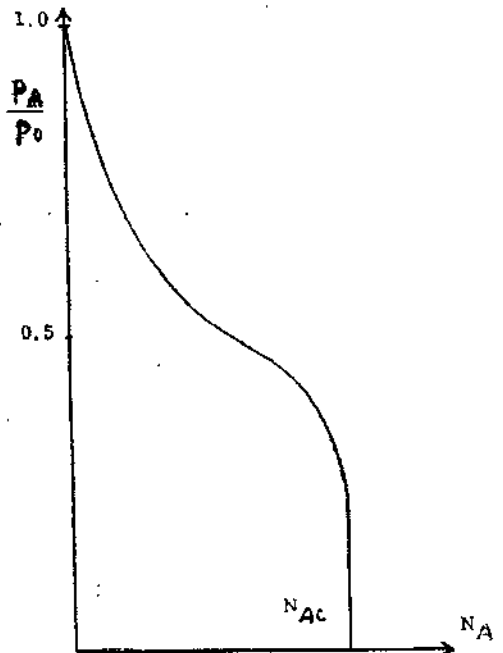


图2. 充气和未充气条件的功率比与气流数的关系， N_{Ac} 一般为 $(2-4)10^{-2}$

态会发生变化。悬浮液的稳定性将随气流数增高而降低，并有一个开始沉淀的临界点，称为临界气流数见图2。因此，为了维持固流气三相系统中的悬浮和分散，必须求出在临界气流数条件下的输入功率，此时槽底无颗粒沉降。KOCH提出下式

$$\frac{P_3}{V_t} = C_3 N_{AC}^P$$

式中 P_3 是三相系统中的输入功率； V_t 是矿浆容积； N_{AC} 是临界气流数； P 是指数，随叶轮结构型式和对充气的敏感程度而定； C_3 为常数，与物料的特性有关。如果考虑湍流结构和悬浮状态，尚需对 p 和 C_3 值做修正。KOCH特别提出叶轮结构对功率和充气敏感程度的影响，并给出通式

$$\frac{P_3}{V_t} = C N_{AC} - \left(\frac{ab}{a+b} \right)$$

式中 C 值取决于叶轮结构及尺寸； a 和 b 与气泡直径和数量有关。因此，充气时功率下降程度愈大，指数 $\frac{ab}{a+b}$ 值愈大。

为了说明入料性质对比功率的影响，KOCH给出如下实验结果：在6.6升实验室浮选槽内，安装直径为59毫米的双棒叶轮，锡石和钾盐分别磨至-0.315毫米占98%和-1.5毫米。按 $e_c \propto N_{AC}^p$ ， p 分别取值为0.235和0.05。由此可见，矿石粒度和密度不同，浮选槽的比输入功率和气流数临界值将不同。因此，用于粗粒物料和微细粒物料的浮选槽应有所不同。

十、浮选槽内流体流动的微观结构分析

许多研究者从流体流动的微观结构分析出发来讨论浮选槽按比例转换的准则。FALL-ENIUS根据湍流中最小耗能涡旋尺寸取决于流体运动粘度 ν 和位置能耗 ϵ 估算了浮选槽湍流的耗散尺度范围。设平均比功率 $\bar{\epsilon} = 1.0$ 千瓦/米³，则相应的能量耗散 $\epsilon = 1.0$ 米²秒⁻³。水在10℃的运动粘度 $\nu = 1.31 \cdot 10^{-6}$ 米²秒⁻¹时，可求出最小耗能涡旋尺寸为 $39 \cdot 10^{-6}$ 米，则发生能量耗散的湍流尺度范围为 $0.23 < \lambda < 2.3$ 毫米。浮选入料粒度一般介于或小于这个尺度范围，而浮选槽内的气泡直径则介于或稍大于此范围。因此，气泡的尺寸和矿化气泡的稳定性皆受湍流耗能区的脉动速度影响。从而认为不同容积槽按比例转换的湍流脉动速度和比能耗应当一致如下式所示

$$u' = \epsilon^{1/2} = \text{常数}$$

从上述基本理论出发，FALLENIUS令驱动叶轮旋转的比容积功率 $\bar{\epsilon} = P/V = N^3 D^5 / L^3$ 等于位置耗散能 ϵ ，并代入上式而得出

$$u' = N^{3/2} D \left(\frac{D}{L} \right)^{3/2}$$

当 $D/L = \text{常数}$ 时，得到

$$N D^{3/2} = \text{常数}$$

做为按比例转换的基本公式。

基于类似观点，KOCH曾提出在几何相似，雷诺数和弗罗德数相似条件下，比功率不变准则，并认为遵守这一准则可以获得良好的转换效果。他提出的转换关系如下

$$\text{转速转换关系：} N/N' = (D/D')^{-2/3}$$

叶轮周速或槽内某一流动点的湍流速度转换关系:

$$u/u' = U/U' = (D/D')^{1/3}$$

雷诺数转换关系: $N_{Re}/N'_{Re} = (D/D')^{4/3}$

弗罗德数转换关系: $N_{Fr}/N'_{Fr} = (D/D')^{-1/3}$

并把气流数 N_A 做为不同容积槽获得相同浮选指标的转换准则。

不管上述两种转换关系的适用性和通用性如何, 作者认为就其提出的能耗和脉动速度为常数的前提需要商榷。

(1) 槽内湍流脉动的能耗是与位置有关的变量, 故称为位置能耗 ε , 在数值上并不等于 $\bar{\varepsilon}$ 。由前节知, 仅耗散区的 ε 就可能比 $\bar{\varepsilon}$ 大10倍或小若干倍, 取决于速度的脉动尺寸。不管主流尺寸是按叶轮直径计算还是按射流厚度计算, 不同几何形状和直径的叶轮产生的主流尺寸是不同的。叶轮直径或射流口尺寸愈大主流尺寸也愈大。大家知道, 浮选槽按比例放大时, 常采取增加叶轮直径和降低转速的办法来节省能量。转速愈低, 脉动速度的波数愈小, 脉动幅度变大而衰减速率变慢。

由此可见, 小容积槽内的叶轮小, 转速高, 产生的主流和脉动流的尺寸小, 但脉动波数高。大容积槽恰恰与此相反, 如DENVER-DR实验室浮选槽内的流体脉动速度测试所证明。

表1 不同叶轮直径和转速时槽内相应点的流体脉动速度

测 点 号	900 转/分				1100 转/分			
	2升槽 ($D=55$)		4升槽 ($D=75$)		4升槽 ($D=75$)		8升槽 ($D=95$)	
	U_x	U_y	U_x	U_y	U_x	U_y	U_x	U_y
1	0.038	0.139	0.063	0.212	0.079	0.123	0.125	0.163
2	0.012	0.099	0.120	0.114	0.116	0.102	0.140	0.215
3	0.142	0.110	0.147	0.116	0.153	0.116	0.144	0.141
4	0.136	0.077	0.145	0.095	0.097	0.089	0.121	0.242
M	0.082	0.109	0.119	0.142	0.111	0.108	0.133	0.195

D 为叶轮直径, 毫米; U_x, U_y 为二维脉动速度, 米/秒 (激光速度计测定结果)。

工业浮选槽HUMBOT双摆叶轮能够增加槽内流体的脉动波数也可以做为一个证明实例。因此, 提出不同容积槽内流体相应点的脉动速度和位置能耗为常数是恰当的。

鉴于大容积槽的功率是随浮选槽容积增大而递减的事实, 如DENVER和WEMCO槽的数据所证实的, 提出比容积功率为常数的论点也是不合适的。

作者认为浮选槽内的湍流运动是一个有基本规律的随机过程。特别指出湍流脉动速度和脉动压力以及它们相应的位置能耗的衰变过程是有规律性的, 尽管槽内流体某一点的脉动速度或脉动压力的数值是随机的。因此, 我们只能用统计分析方法求出脉动速度或脉动压力及相应的位置能耗沿距离的衰变规律, 并把此衰变规律与叶轮直径、槽宽和工作参数等

特征数相关在一起，做为根据流体微观结构相似理论解决浮选槽按比例转换的基础。当然还要进行大量理论工作。

最后，认为已有的浮选槽按比例转换的准数未必都是通用的和实用的，应当有条件地选用或试用。因此，发展大容积浮选槽必须循序渐进并要有明确的对象。已有的实践证明，发展大容积浮选槽首先应当依据入料性质和厂型。例如，矿石品位和其中有用成分的价值愈低，处理量愈大，愈有利于采用大容积浮选槽；入料浓度愈稀，对设备通过能力要求愈高和对产品质量要求愈宽，愈可以采用大容积槽，如工厂废水和污水处理；反之，在选型上应持慎重态度。

在煤浮选方面，国内外多数人的意见认为容积为12~16米³范围内的浮选槽是比较适宜的。例如，12和14米³的大容积浮选槽已在选煤厂正式使用，反映是比较好的。是否还要采用更大容积槽应视选煤厂规模和粉煤入浮量而定。

十一、结 论

1. 在研究浮选槽按比例转换时，应把固体颗粒悬浮，气泡分散和环流比的最佳化做为三项基本要求；

2. 雷诺数是反映主流流动性质的基本量，其它无量纲数从不同角度上反映了浮选槽按比例转换的准则，应分别对待，综合考虑；

3. 根据流动微观结构分析，认为应当把槽内流体的脉动速度或脉动压力的衰变规律做为按比例转换的基本准则；

4. 应当根据入料性质和厂型选择浮选槽的类型和容积。

KYF-38大型浮选机的研制

北京矿冶研究总院 邹介斧 刘振春

沈政昌 杜懋德

由于使用大型浮选机具有节省功耗、减少投资费用、便于操作和维护、降低生产成本、节省厂房面积、易于实现自动化和电子计算机控制等优点，从六十年代开始，浮选槽容积向大型发展，并取得了可喜的成绩。我国从七十年代开始了大型浮选机的研究，先后研究出了CHF-X14米³、JJF、LCH-F、SF、KYF浮选机，大大促进了浮选设备的发展，单槽容积已发展到20立方米。

根据中国有色金属工业总公司（85）中色科字第557号及（86）中色科字第996号文件要求，为了满足德兴铜矿三期工程日处理6万吨矿石选矿厂的设计需要，本着立足国内、节省外汇的精神，北京矿冶研究总院接受了研究设计KYF-38大型浮选机的任务。

在研究设计工作中，我们充分分析了我国有一支几十年来专门从事浮选设备研究的队伍，及以先后研制出CHF-X、JJF等型浮选机的实际经验。确定要研究出一种具有八十年

代世界先进水平，具有中国特点的新型大型浮选机。我们充分分析了国外几种先进浮选机的优缺点，并经过充分的小型实验室试验，先设计了槽容为16立方米浮选机，经过工业试验并获得成功，在此基础上，设计了KYF-38立方米大容积浮选机。

德兴铜矿的工业试验表明，该机结构简单合理，运转平稳可靠，由于采用了独创的单壁后倾叶片倒锥台状叶轮、多孔圆筒型气体分配器、悬空式定子，空气分散能力强、固体悬浮情况好，中心活动推泡装置及技术先进的风量和液面自动控制技术，与国外资料对比，该机的主要性能已达到国外OK—38型浮选机水平。槽体设计为U型敞开式，操作维护方便，能耗低，占地面积小，节省基建投资；综合经济指标高，是德兴三期工程理想的浮选设备。

一、KYF-38浮选机结构及工作原理

KYF-38浮选机的结构如图1所示。它的主要部件由叶轮、空心轴、轴承体、槽体、定子及推泡装置组成。

该机的工作原理是：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、空心轴进入叶轮腔的空气分配器中，通过空气分配器周边的孔流入叶轮叶片间，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，由推泡板推出并自流到泡沫溜槽中，槽内矿浆再经叶轮进行再循环。

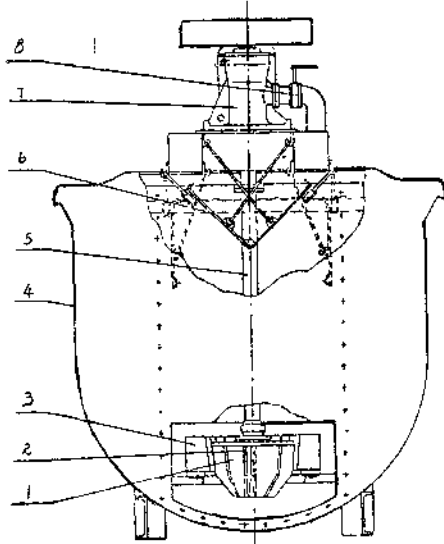


图1

二、KYF-38浮选机的设计及结构特点

1. 高效的叶轮-定子结构系统。

KYF-38浮选机采用独创的单壁后倾叶片倒锥台状叶轮，多孔圆筒型气体分配器及较小的悬空式径向定子，从而可在低动力消耗下产生较大的充气 and 固体颗粒的全部悬浮。

(1) 叶轮是浮选机的主要部件。其用途是搅拌和循环矿浆以及有效地把空气泡分散于矿浆中，设计叶轮，要求具有适当的搅拌强度和较大的空气分散能力，矿浆循环量较大，动压头较小，有利于在槽内造成稳定的分离区。

KYF-38浮选机的叶轮主要根据KYF-16浮选机的工业试验结果，进行比例放大。按流体力学的原理，叶轮被设计为高比转速离心式，它具有流量大、压头小、功耗低的特点。叶轮叶片设计为后倾某一角度，根据周漠仁主编的《流体力学泵与风机》书中的叙述，泵轮设

计的叶片有前向、径向和后向三种形式，这三种叶轮的理论流量—压头曲线和流量—功率曲线如图2、图3。由图2可见，后向叶片当流量大时产生的理论压头较低，总理论压头中动压成分较小，这正符合浮选机流体力学的要求。动压头小，也就是速度头低，对稳定矿浆液面有利。由图3可见，后向叶片当流量 Q_t 大时，功耗 N_t 较低，因此这种高比转速离心式叶轮配以后向叶片，有利于降低功率消耗。

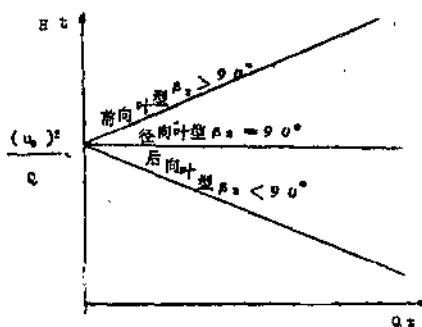


图2 三种叶型的 Q_t-H_t 曲线

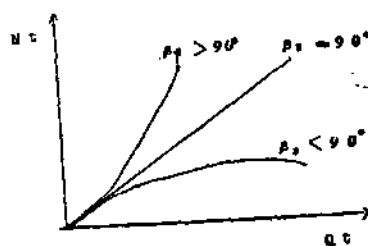


图3 三种叶型的 Q_t-N_t 曲线

(2) 空气分散器：它设在叶轮腔中，其上开有小孔。空气分散器能预先将空气较均匀地分散在叶轮叶片的大部分区域内，提供了大量的矿浆—空气界面，从而大大改善了叶轮弥散空气的能力。分散器的长短对进入叶轮的矿浆量和矿流方向都有一定的影响，其尺寸根据矿流的形式并通过试验确定，分散器的开孔总面积通过计算确定。

(3) 定子：定子的作用是将由转子（叶轮）产生的切向旋转的矿流转变成径向的矿浆流，可防止浮选槽中的矿浆打旋。定子的另一个作用是在转子圆周和定子叶片间产生一个强烈剪切环形区，这个剪切区有助于细的空气泡的形成。

KYF-38浮选机采用了悬空式径向短叶片定子，共24个叶片，安装在叶轮周围的斜上方，坐在槽底部的定子支架上。按浮选机规格来说，这种定子小而轻，定子与叶轮之间间隙较大。定子的悬空安装，有利于消除围绕转子下部零件的不必要的、不利的干扰，这不仅降低了动力消耗，而且也增强了最下部循环区的矿浆循环和固体颗粒悬浮。

2. 槽子采用U型槽断面，支承结构简单。

KYF-38浮选机槽子横断面设计成U型，它有利于粗重颗粒向槽子中心移动，便于返回叶轮区进行再循环，有利于粗颗粒矿物的悬浮，矿浆短路现象也可大大减轻。

同时利用U型槽体刚性好的特点，通过两个槽钢，直接坐在基础上，支承结构简单，槽体焊接、安装方便，减少钢材，减轻了整机重量。

3. 主轴部件采用座式，结构简单、合理、安装方便。

目前国外浮选机的主轴部件安装采用侧挂式和坐式两种型式，国内一般采用坐式。坐式与侧挂式相比，具有以下优点：①安装检修方便，吊车把主轴部件吊来以后，放在座板上，吊车就可以开走，而侧挂式螺丝不好对准。②稳定性能好，因为坐式接触面大、重心也低，而侧挂式承受力量和固定全靠四个螺栓。③张紧皮带方便。由于坐式不论从结构简易程度和安装检修角度来看，都明显优于侧挂式，所以我们国家的一些设计研究单位曾仿效国外，设计过侧挂式，经实践证明，检修工人不满意，后来又改成坐式了（JIF-20就是这样改过来的）。

4. 槽子上部设计成敞开式，有利于操作工人观察泡沫的变化，及时进行调整，也方便

安装刮板。

5. 采用了中心活动式推泡板，简单可行，大大促进了浮选槽中心泡沫产品的排出。

大型浮选机的槽子表面积比较大，槽中心泡沫产品通过溢流堰排到泡沫槽，距离比较长，有用矿物在排出过程中容易脱落，尤其对泡沫是自流式的槽子更为突出，为了便于槽中心泡沫能尽快排出，设计了中心式活动推泡板（国内外没有这种型式），在工作时，能将泡沫产品从浮选槽中心尽快排出，在检修浮选机时，又可很方便地移开。

6. 简易的放矿球阀，它是由一个提升杆和一个包胶球组成。十分简单，放矿时只要在操作台上把提升杆一提就行了，平时不放矿时，靠球的自重堵死，这比其它类似的浮选机在槽子底部安装闸阀方便简单。

7. 轴设计为上、下两部分。上部轴采用外径为180毫米的厚壁无缝钢管，下部轴采用外径为168毫米的无缝钢管，中间由法兰连接。法兰由机械加工而成，并保持定位对中。这样的装置可以很容易拆卸，更换下部的轴和叶轮时，不需动上面的轴、轴承部件和三角皮带传动部件。

8. 溢流式闸板式闸门。对矿浆量波动有自调作用，调节范围大，调节较方便。

9. 空气调节阀。为便于从鼓风机进入浮选槽空气的调节，在空气进入轴承体之前装有天津塘沽阀门厂生产的A型蝶阀，这种阀门体积小，轻便，调节灵活。

三、KYF-38浮选机的选别结果及应用效益

KYF-38浮选机图纸设计完成后，由溧阳矿山机械厂制造，并由北京矿冶研究总院、德兴铜矿、溧阳矿山机械厂三单位共同合作，于1987年5~6月份在德兴铜矿一选厂完成了工业试验。

试验是由两台KYF-38浮选机（总容积为76米³）代替6台JJF-16浮选机（总容积为96米³）进行对比，共进行了四个条件试验。试验结果表明：以叶轮直径为880毫米，转速为138转/分的条件较好。KYF-38在总容积少20立方米时，I、II轮平均粗选作业回收率只低1.06%，而系统回收率高1.3%，其中取得的一组最佳指标为，粗选作业回收率提高1.67%，系统回收率提高1.18%，表明该机完全适合于选别德兴铜矿石，是三期工程粗、扫选作业理想的国产设备，它具有以下优点。

1. 能耗低

由于叶轮-定子结构在设计中注意解决矿浆和空气的分散，使得叶轮直径小、分散空气能力强，以较小的动力消耗，建立了理想的浮选条件。主轴安装功率为37千瓦，主轴实耗功率为21.76千瓦，充气功率每槽为14.6千瓦/槽，单位槽容比功耗（包括充气功率在内）为0.9千瓦/米³，比JJF-16省电51.4%，比国外OK38省电20%以上。德兴三期6万吨选厂采用后，每年比JJF-16节电1818万度，折合人民币222万元。

2. 空气分散能力强

由于采用了高效的叶轮-定子结构，叶轮中部配有空气分配器，使得整个槽中都弥散空气，并保持一个稳定的泡沫区，清水时最大充气量可达2.6米³/米²·分，平时充气为15~20米³/槽·分，气泡分散度可以达到5~7。

3. 固体颗粒悬浮好

由于设计中注意解决粗粒沉槽问题,叶轮设计象一台强有力的离心泵,搅拌和循环矿浆,使得矿浆得到充分的搅拌又能保持理想的浮选条件。采用深槽取样器,在槽内不同深度分层取样,测定浓度并进行粒级筛析,证明了各层矿浆浓度和矿物粒度组成基本一致,槽底亦无粗砂沉积。

试验过程中还意外地经受一次特别粗粒子的考验,当班球磨处理量猛增250吨/日,旋流器又坏了一台,结果6~8毫米的大量粗颗粒进入浮选槽,此时主轴电机功率几乎没什么变化,数日后浮选机停车放矿,浮选槽中已找不到沉积的粗颗粒,而在尾矿箱的排矿箱格内,积累了大量粗颗粒,其余部分已从尾矿排走。

4. 负荷下启动容易

进行了负荷停车24、48及72小时后启动试验,主轴均可迅速启动,没有发生任何异常现象,安装37千瓦电机可满足负荷下启动的要求。

5. 泡沫特性好

泡沫均匀,槽与槽之间的泡沫外观,区别十分明显,由于设置了中心式泡沫推泡板,大大改善了泡沫的流动性使泡沫迅速地排到泡沫溜槽中。

6. 结构简单,设备重量轻,投资省

由于该机设计不论从主轴部件本身结构及安装方式,槽体结构及支承方式都是从可靠,简单方便考虑,使得整机总重比同类型同规格的机型要轻15%,按单位槽容重量计算,比JJF-16要轻48%。德兴三期工程,仅就粗扫选作业而言,该机与目前生产的JJF-16浮选机相比,可节省设备投资284.5万元。

7. 占地面积小,基建费用低

采用KYF-38浮选机比采用JJF-16浮选机,可节省厂房面积51%以上。

8. 经济效益显著

KYF-38浮选机若用于德兴三期工程选厂,仅就粗、扫选作业而言,与JJF-16相比,全厂全年将获经济效益569.52—786.69万元,节省一次性设备投资235.5万元。若与进口OK38浮选机比,单就主轴部件就可节省外汇250万美元。该机已于1987年8月26—29日在德兴铜矿通过部级鉴定。

几种大型浮选机的综合评述

北京有色冶金设计研究总院 秦毅

目前由于对各种金属需求量增大,从而使开采量增加,矿山趋向于处理低品位大量矿石,因此大型浮选机近年来有较大发展。例如:DR型、Wemco型、OK型、DORR型等都

较成功地用于各大型选矿厂。如何对这些浮选机进行评价与选择？首先对每种浮选机的机理及其主要构造有一个较为完整的概念，然后再根据不同的工艺条件与操作条件来择优选取。

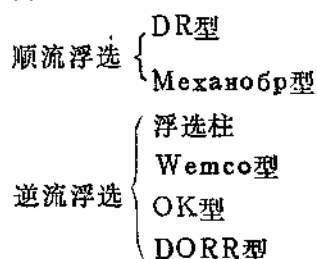
目前较为广泛使用的浮选机，除处理较粗粒度与较大比重的矿物外，这些通用的浮选机最终工艺指标均相差不大，但功耗、药剂消耗量、叶轮与定子寿命、操作条件有所不同，所以如何根据不同情况、不同工艺条件选择浮选机的类型，以及进行经济合理的配置设计是非常必要的。

为了以上目的，对常用的几种浮选机提出一些看法，望指正。

一、浮选机的分类

1. 泡沫与矿浆的流向

从泡沫与矿浆相对流向的出发点来区分，有顺流与逆流之别，浮选柱为典型的逆流浮选。Wemco型、OK型、DORR型从叶轮的循环矿浆方向来看，可称为逆流浮选，而DR型与（苏）Механобр型则为顺流浮选，但就给矿与排矿而言，以上几种浮选机均相同，今以叶轮循环来区分（在浮选机内的主导矿流）。



从浮选机理上推论，在相同的条件下，对易选矿物，为提高精矿品位，采用逆流浮选为宜，而对难选矿物或粒度较粗的，为了提高回收率采用顺流浮选为宜，以上只是推论，浮选过程不是简单的流体概念，是物理化学综合作用，较为复杂，对每种矿石及其药剂种类与制度均有不同，应通过试验，最终得出择优选取之目的。

2. 进气方式

浮选机的空气给入，有两种方式，一种是用外部鼓风机给入，一种是靠自己的吸力将空气吸入。

完全的充气方式的浮选机只有浮选柱，其它充气浮选机，虽设有鼓风机充气，但其本身亦有一定的吸气能力，固在叶轮腔中或外缘，会产生较大的矿浆流速，从而使压力下降，小于外部大气压，但这种吸气能力很小，远远不够，故须另加鼓风机充气。



自吸型：

优点：不需另加鼓风机充气与管路的安装，以一个单机为一个单元，较为简单。

缺点：空气给入调节范围小，到目前为止尚无有安装空气给入自动调节的先例。Механообр与Wemco分别设有手动风门、风板，可以在精选时减少空气的给入。

充气型：

优点：空气调节范围大，近年来在大型浮选机上，装有自动调节风门，如OK、DORR型。

随着浮选机的大型化，总的消耗功率较自吸型为小（包括风机），不受吸气限制，易于优化设计，优化操作。如DORR型已发展到44米³，OK型已发展到100米³。

缺点：

需要有鼓风机充气与空气管道设施。往往为降低厂房内噪音需另设鼓风机厂房，从而提高建设投资。

3. 槽深浅

深槽型-Wemco型

深槽型 { Механообр
DR
OK 型
DORR

浅槽在自吸空气式浮选中，单位能耗较深槽为小，但占地面积较同型号为大，从选别上推论，更适于易选矿物的选别。

4. 泡沫排出

{ 单面排泡沫
{ 双面排泡沫

浮选机最终目的是将富集上来的泡沫，从溢流堰排出回收，排的越迅速，越彻底越好。从排泡观点，排泡沫面越多越好，最好四面全能排泡，但从配置与操作观点，单面比双面为好，故容积小的浮选机（8米³以下），如泡沫不太厚，可优先考虑单面排泡，一般不会影响工艺指标，如有条件采用双面排泡，当然更好。

二、浮选机的结构

1. 刮板与溢流堰

近年来有些大型浮选机取消了刮板，采用自流，过去与现在有些浮选机仍采用刮板进行刮泡沫。例如Механообр7A型，采用两道刮板，有些煤用浮选机，因泡沫厚且多，采用链板式刮板刮泡沫。

安装与不安装刮板，要视其具体条件而定，不能全盘去掉刮板，故建议浮选机生产厂家应当有两种产品，一种带刮板的，一种不带刮板的，供使用、设计单位选择。

目前许多选矿厂的刮板，由于维护、设计、制造等多种因素，往往在使用过程中刮板损坏与缺损，甚至不能正常运转，操作者对此甚为头痛。对什么条件不安装刮板有以下看法：

（1）自流式（无刮板）：不安装刮板，依靠自流，需具备以下条件。

①泡沫层薄或泡沫单位容积浓度大，并且粘度小。