

浮选与浓缩

FUXUAN YU NONGSUO

机械工业出版社

U191.3
Z396

浮 选 与 浓 缩

翟 宏 新 译

机 械 工 业 出 版 社

本书收集了《机械搅拌式浮选机叶轮结构和工作方式对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响》和《浓缩的现代理论与浓缩机的设计》两篇文章。第一篇从理论与实践的结合上,详细地论述了叶轮结构和工作方式对浮选槽中流动特征和选别效果的影响,给出了一系列影响因素的函数关系及曲线。第二篇着眼于工程实践,尤其注意到不同的观点,对浓缩理论作了概括和评价,并推荐了设计的方法。

本书可供从事选矿机械理论研究和设计的人员参考。

浮 选 与 浓 缩

翟 宏 新 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 4 $\frac{1}{8}$ · 字数 88 千字
1980年 8 月天津第一版 · 1980年 8 月天津第一次印刷

印数 0,001—2,000 · 定价 0.44 元

*

统一书号: 15033 · 4738

译 者 的 话

本书收集了《机械搅拌式浮选机叶轮结构和工作方式对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响》和《浓缩的现代理论与浓缩机的设计》两篇文章。第一篇选译自 1975 年莱比锡出版的《Beiträge zur Theorie und Praxis der Flotation》(选矿的理论与实践)一书。此书共收集了东德两篇弗莱堡研究报告, 本文是其中之一篇。第二篇选译自英国《Filtration & Separation》(过滤与分离)杂志, 1975 年第 4、5、6 期, 美国道尔公司发表的文章。现把这两篇文章合在一起, 将书名定为《浮选与浓缩》。

目前, 国内外选矿厂的浮选作业, 大部分仍然使用机械搅拌式浮选机。为了适应我国日益发展的大型金属矿山浮选作业的需要, 尤其是浮选大量弱磁性铁矿石的需要, 必须进一步加强机械搅拌式浮选机的基础理论的研究, 寻求浮选机工作的内在规律, 为设计新型高效浮选机提供充分的理论依据。

机械搅拌式浮选机的关键部件是叶轮。众所周知, 在不同的工作条件下, 不同结构的叶轮, 在槽体中往往形成不同的流体动力状态, 从而达到不同的浮选指标。但是, 叶轮结构和工作方式, 究竟怎样定量地影响槽体中的流体动力状态? 当流体动力特征变化时, 浮选指标会出现怎样的变化? 关于此类问题研究的系统性论文很少, 《叶轮结构和工作方式对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响》一文, 是这方面的一份专题研究报告。

IV

鉴于浓缩机研究资料的缺乏,本书还选辑了《浓缩的现代理论与浓缩机的设计》一文。此文立足于工程实践,广泛应用数学模型与图解,比较全面系统地论述了浓缩理论的基础和发展,结合生产和设计实践,推荐了浓缩机的设计方法,提出了理论上的一些独特见解,是一篇有理论、有分析的专题研究资料。

在翻译过程中,本着洋为中用的原则,对上述两篇文章中的某些烦琐与不妥之处,作了适当修改与删节。

洛阳矿山机械研究所、沈阳选矿机械研究所和沈阳矿山机器厂的同志们,为译文作了审查校对工作,在此谨向他们致以深切的谢意。

译 者

1978年10月

目 录

译者的话

一、机械搅拌式浮选机叶轮结构和工作方式对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响.....	
..... [东德] P. 科赫	1
(一) 问题的提出	1
(二) 机械搅拌式浮选机的特征量	2
(三) 紊流对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响	8
(四) 试验	27
(五) 试验结果及其讨论	36
(六) 结论	74
本文使用的符号及含义	75
参考文献	81
二、浓缩的现代理论与浓缩机的设计.....	
..... [美] B. 菲奇	85
(一) 引言	85
(二) 区域沉降理论	87
(三) 压缩理论	96
(四) 毛细管作用	108
(五) 压缩点	113
(六) 设计方法	115
本文使用的符号及其含义	122
参考文献	123

一、机械搅拌式浮选机叶轮结构和工作方式对三相系统的流体动力学和浮选指标的影响

[东德] P. 科赫

(一) 问题的提出

在浮选作业中,大部分采用机械搅拌式浮选机。在浮选参与相(液相、固相和气相)的紊流混合过程中,疏水性矿粒与气泡的接触是多相集合的必要条件。近年来,除了对捕收剂的附着进行研究之外,还进一步进行了浮选过程的研究:

① 分批和连续浮选中的浮选基本特性和浮选动力学模型的设计及验证;

② 机械搅拌式浮选机槽体中流体动力学的影响,以及流体动力状态和浮选指标的关系。

尤其是最近二十年来,浮选设备制造厂对浮选机的叶轮进行了改进。

工业型浮选机的转子-定子系统,由于其局部结构的显著差异,使浮选时具有不同的比功率消耗,并且达到不同的分选指标。

目前,考虑到多种影响因素,并且指出叶轮结构和工作条件如何影响浮选过程的系统性论文是很少的。

本文即为解决上述复杂问题的一份研究报告。文中着重研究了紊流状态对浮选槽中的悬浮、充气和多相集合等过程

的影响,并就以下问题报导了实验室系统研究的成果:

① 叶轮的结构型式、比例关系和工作方式,对单槽和直流槽中流体动力状态的影响;

② 当三相系统的流体动力状态变化时,浮选指标的变化。

(二) 机械搅拌式浮选机的特征量

在矿用浮选设备中,尽管充气式浮选机有了进一步的发展,但是机械搅拌式浮选机的应用仍然处于优势。近年来,制造厂在提高机械搅拌式浮选机的单位容积和单位时间的处理能力,以及在减少其占地面积和能量消耗方面,取得了不少成绩^[1]。浮选设备中需要解决的问题有^[1~5]:

① 保证矿浆的连续流动(液-固混合物的体积含固量 $\beta_k \approx 5 \sim 30\%$, 其中有价矿物的品位为 $0.5 \sim 50\%$);

② 矿浆与浮选药剂的混合;

③ 固体颗粒的充分悬浮(颗粒直径 $d_k < 1$ 毫米, 固体物料密度 $\gamma \approx 2 \sim 7.5$ 克/厘米³);

④ 导入相应的空气量(比充气量 $q_L \leq 1$ 米³ 空气/米³ 矿浆·分);

⑤ 将导入的空气分散成小气泡(气泡直径 $d_B < 2$ 毫米);

⑥ 充气矿浆混合的要求:

一是气泡和固体颗粒之间发生多次碰撞;

二是矿粒-气泡集合体上浮时,尽量不受阻碍;

三是具备相对稳定的液面,以利于矿化泡沫层的形成。

⑦ 矿化泡沫的刮集。

目前的浮选设备中,单叶轮对应的矿浆容积(一个搅拌段的容积)为 $0.1 \sim 14$ 米³。为了增加设备容积,经常采用多个

搅拌级(多搅拌段),而且可以采用间接槽或者直流槽。采用间接槽时,矿浆流在叶轮的吸入作用下,经过可调溢流堰,自一槽流入下一槽。当采用直流槽时,矿浆流通过槽体搅拌段之间的隔板孔口流动。

为了比较经济地解决浮选设备中的许多问题,随着一般搅拌工艺中的搅拌器和槽形(圆形槽、拱形底槽体)的发展,浮选工艺中的叶轮或转子-定子系统及其槽形(方形或矩形槽、平底槽)也在不断发展。

为了寻求确定浮选机叶轮适宜参数(结构和工作条件)的理论基础,对浮选机中的流体动力状态作了试验研究^[7,8,9],并且利用一些量,描述了槽体中的流体动力关系。这些量对于预先确定叶轮的输送能力(吸入作用)是必需的^[7,8]。影响流体动力状态的量有:

- ① 几何特征量及其相互比例;
- ② 表示矿浆物理性质的量;
- ③ 表示工作条件的量。

它们是借助于相似理论综合成的无因次特征数组^[9]。

在装有稳流板的浮选设备中,比较重要的特征参数有:

- ① 单一的几何量(参见图1)和物料特征量(如 d_2/d_1 , h_2/d_1 , h_0/d_1 , γ/ρ);

- ② 无因次特征数组:

雷诺数

$$Re = \frac{\rho n d_2^2}{\eta} \quad (1)$$

充气量数

$$c_L = \frac{\dot{V}_{\text{Gas}}}{n d_2^3} \quad (2)$$

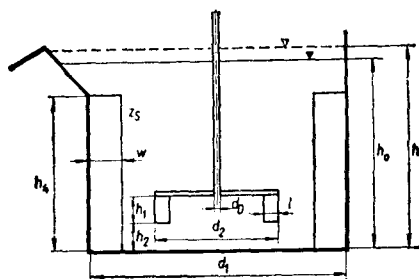


图 1 浮选槽几何量标注示意图

d_1 —槽体直径(图中为方形槽体横断面的内边边长) d_2 —叶轮直径 h_1 —叶轮的叶片(或棒)的高度 h_2 —叶轮下部距槽底的距离 l —叶轮的叶片宽度或棒的直径 h_4 —稳流板的高度 w —稳流板的宽度 h_0 —未充气状态的液面高度 h —充气状态的液面高度 z_5 —稳流板的数量 z_R —叶轮的叶片(或棒)的数量 d_0 —风口(中空轴的排气孔)直径

功率数

$$c_p = \frac{P}{\rho n^3 d_2^5} \quad (3)$$

伏罗得数

$$F_R = \frac{n^2 d_2}{g} \quad (4)$$

利用有关文献资料^[3, 4, 10~15]列出的工业型浮选机特征量一览表(表 1), 可以局部地说明几何量、无因次特征数组, 以及比指标的重要变化范围。

由图 2、3、4 和表 1 可见, 近代转子-定子结构, 具有极高的 c_p 值。

在所研究的槽体结构尺寸中, 比输入功率为 2~5 千瓦/米³。

所有的叶轮, 均在较高的紊流范围内工作 ($Re_{d_2} \gg 4 \times 10^5$)。因此, 对于浮选矿浆紊流运动的三相混合来说, 在每一个

表1 工业型转子-定子特征量一览表

叶 类 型	型 号	V (米 ³)	d_1 (毫米)	d_2/d_1	h/d_1	h_2/d_1	h_1/d_2	u (米/秒)	$\frac{P_M}{V}$ (千瓦/米 ³)	$Re \times 10^6$	c_p	q_L (分 ⁻¹)	q_T (分 ⁻¹)
泵 叶 轮	斯凯特型												
	1500 RE(E) (S)	1.5	1100	0.5	1.2	0.01	0.18	8.8	4	4.8	0.9	0.3~0.7	
	3000 RE(E) (S)	3	1400	0.5	1.2	0.01	0.17	8.6	3.7	6	1.1	0.3~0.7	
	6000 U (E)(T),(S)(F)	6	2170	0.35	0.66	0.02	0.29	8.0	8	6	2.6	0.2~0.6	0.8
	苏联 ΦMP 系列												
	M5(E) (S)	1.3	1100	0.45	0.91	0.05	0.2	7.9	2.8	3.9	0.9	0.5~0.7	2
	M6(E) (S)	3	1750	0.34	0.63	0.05	0.2	8.8	2.7~3.3	5.3	1.0	0.5~0.7	2
	M7(E) (S)	6.2	2200	0.34	0.55	0.05	0.2	6.7	2.6~3.9	6.8	1.2	0.5~0.7	2
	丹佛 DR 型												
	21(T) (F)	1.12	963	0.5	1.1	0.03	0.2	6.0	2.6	2.9	1.8		
双 摆 叶 轮	24(T) (F)	1.4	1091	0.51	0.9	0.03	0.2	6.0	3.2	3.3	2.1		
	30(T) (F)	2.8	1420	0.48	0.86	0.03	0.2	6.0	3.2	4.1	2.6		
	200 V(T) (F)	5.7						7.1	2.2			1.3~1.6	
	洪堡型												
	(T) (S)	4.2		0.4	0.9	0.04	0.2	9.5	3.8	6	1.5	0.6	1
	米涅迈特 BCS 型(T)												
	(F) 或 (S)	1.55	1250	0.35	0.8	0.03	0.9	9.4	3.0	4.1	0.9	0.3~1	2.3
	维姆科-法格古伦型												
	66(T) (S)	1.7	1676	0.25	0.37	0.06	1	8.5	5.2	3.5	2.6		

(续)

叶 轮 类 型	型 号	V (米 ³)	d_1 (毫米)	d_2/d_1	h/d_1	h_2/d_1	h_1/d_2	u (米/秒)	$0.8 \frac{P_M}{V}$ (千瓦/米 ³)	$Re \times 10^6$	c_p	q_L (分 ⁻¹)	q_T (分 ⁻¹)
1+1 星 形 轮	维姆科-法格古伦型												
	66(T)(S)	1.7	1676	0.19	0.37	0.06	1	6.3	3.5	2	7.5		
	120(T)(S)	8.4	3050	0.18	0.44	0.05	1	6.3	2.1	3.4	7.6		
单面棒 叶 轮	加利加-阿基泰尔型												
	48(T)(F)	1.12	1219	0.63	0.63			7.3	3.9	5.6	0.6	1.9~2.2	
	苏联 ΦΠP 系列												
	ΦΠM-ΠMO 型												
	1.2(T)(F)	1							4.4			0.8~1.2	4
	1.6(T)(F)	1.6							2.75			0.8~1.2	3
	3.2(T)(F)	3.2							3.25			0.8~1.2	4
	MHP-1100(T)(F)	0.85	1100	0.55	0.69			6.5	4.2	3.9	1.1	0.8~1.3	
	MHP-1600(T)(F)	2	1600	0.43	0.48			6.5	1.8~3	4.4	1.0	0.8~1.3	
	ΦPM-1.2(T)(F)	1.1	1200	0.57	0.67			6.5	4.7	4.4	1.3	0.8~1.3	3
双面棒 叶 轮	ΠMHP(T)(F)	4.2	2200	0.34	0.41	0.03	0.27	6.0	2.6	4.5	2.8	1.1~1.2	2.4
	斯科特型												
双面棒 叶 轮	6000U(T)(F)	6	2170	0.35	0.66	0.12	0.32	5.9	2.3	4.4	3.7	0.3~0.7	0.8

注: V —名义容积(米³), 工作容积为 0.8~0.95 V ; (E)—间接槽; (T)—直流槽; (S)—自吸式; (F)—外部压气式;
 Re, c_p —按水介质计算; q_L —比充气量(米³空气/米³矿浆·分); q_T —矿浆比处理量(米³矿浆/米³单槽容积·分)。

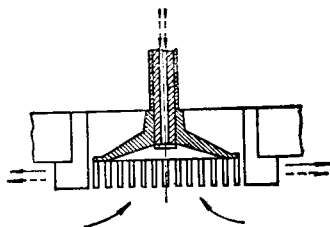


图2 外部压气单面棒叶轮(阿基泰尔型、米哈诺布尔产)

特征量:	d_2/d_1 0.34~0.63	h/d_1 0.41~0.69
	h_2/d_1 0.03	h_1/d_2 0.27
	u 6.0~7.3 米/秒	$0.8 P_M/V$ 2.6~4.7 千瓦/米 ³
	Re_{d_2} 5.6×10^6	c_P 0.6~2.8

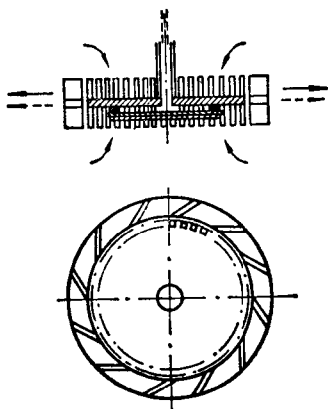


图3 外部压气双面棒叶轮
(斯凯特型, 马格德堡产)

特征量:	d_2/d_1 0.35
	h/d_1 0.66
	h_2/d_1 0.12
	h_1/d_2 0.32
	u 5.9 米/秒
	$0.8 P_M/V$ 2.3 千瓦/米 ³
	Re_{d_2} 4.4×10^6
	c_P 3.7

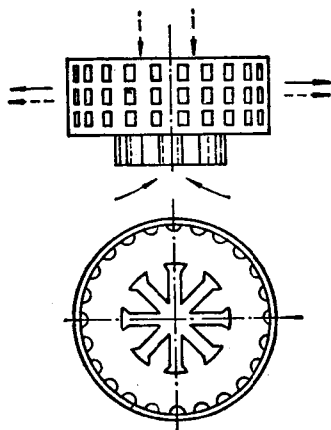


图4 1+1 星形轮(维姆
科-法格古伦型)

特征量:	d_2/d_1 0.18~0.19
	h/d_1 0.37~0.44
	h_2/d_1 0.05~0.06
	h_1/d_2 1
	u 6.3 米/秒
	$0.8 P_M/V$ 2.1~3.5 千瓦/米 ³
	Re_{d_2} $2 \sim 3.4 \times 10^6$
	c_P 7.5~7.6

混合点的每一相(固相、液相、气相)速度的变化,如同每一个紊流运动一样,是非常无规律的。

(三) 紊流对三相系统的流体动力学 和浮选指标的影响

叶轮回转时形成的紊流结构,影响到液体中微观过程的变化、空气的分散、矿粒与气泡的碰撞以及物料的传送,因此影响到流体动力状态,从而影响到浮选指标。下面借助于统计紊流理论^[16, 17, 18],定量地研究紊流对浮选过程机理的影响。

同时注意到,这种考虑仅仅是当前解决设备对浮选指标影响的第一步。统计紊流理论在工艺过程中的应用,很快地引起了重视。

1. 搅拌装置中的流动结构

1) 紊流的特征^[16, 17, 18]

每个流动点的速度 v 随时间的不规则变化,可以看作紊流的特征。这里, $v = \bar{v} + v'$, $\bar{v}$ 为平均流动速度, v' 和叠加在中心流上的不规则速度变化量 v' 之和(因为 $\sum v'_i = 0$, $v_i = \sqrt{\bar{v}'^2}$ 是特征平均速度变化)。我们可以将这个变化量,看作尺寸为 l_i 的不同“紊流单元”或“紊流团”运动的叠加。尺寸 l_i 应看作距离的数量级,流动速度基本上是在这些距离上变化的。

在雷诺数 Re 值较大的情况下,紊流中自很短至很长的距离上,都存在着紊流单元(即存在着紊流能级分布)。最大紊流单元运动的幅度也最大。具有较高频率 f_λ 的小紊流单元,则合并到运动幅度较小的流股中去,从而构成了叠加为较大紊流单元的局部结构。

我们可以使雷诺数 Re_λ 与第 i 个紊流单元相一致,流动

的能量在由小到大的紊流单元上是连续分布的,最后在 $Re_\lambda \approx 1$ 时得以分散,亦即由动能转换为热能。输入整个系统中的能量与分散的能量是一致的,于是得以形成恒定的紊流。人们利用搅拌装置,使引入的能量形成紊流。搅拌装置首先在径向、轴向或者切向产生主流。于是,在 $Re_{0.4}$ 值足够高的情况下,实现了装置中的紊流对流。液体的中心主运动为叠加于其上的波动提供了能量,紊流强度是依其所处位置而与主流方向垂直的。对此,可以采用紊流度 $T_u = v_t/\bar{v}$ 表示该状态的特征。

鉴于其单值性,在考虑紊流状态时(高的 Re 值),人们经常是从各向同性的紊流出发的。

所有各向异性流的微细结构是各向同性的^[16]。通过一次近似,认为各向异性的宏观流和微观流是各向同性的。由此可见,这种简化在一般情况下,不应当强行规定为各向异性流中获得的试验结果^[17]。

表示紊流特征的量可以归纳为:

- ① 速度,紊流强度(v_t);
- ② 波长(λ)或紊流单元的尺寸(l_t);
- ③ 频率(f_λ),或旋涡运动的波数(k);
- ④ 旋涡的雷诺数(Re_λ);
- ⑤ 紊流的尺寸(微观尺寸 λ_f , 宏观尺寸 L_f)。

长波旋涡场($k \lesssim k_0$, k_0 —能级较高的旋涡的波数^[17])的大小和不均匀性,是通过紊流系统确定的。紊流能级的短波部分($k \gg k_0$)与紊流系统关系不大,并由局部能量分散度 ε 和粘度 ν 调整。紊流能级的这一部分,划分为两个区域:

① 惰性区——在此区域中,通过旋涡的互相影响来传递能量,其分散度很小,可以忽略不计。

② 分散区——在此区域中,通过分子的扩散来传递能量。

据目前了解,影响搅拌过程均匀性的重要流动特征量有^[19]:

① 表示均匀化情况下的紊流宏观尺寸 Δ_f 和紊流强度 (特征变化量 v_t 或紊流度 T_u);

② 表示分散和充气作用的平均能量分散度 $\bar{\varepsilon}$ 或者局部能量分散度 ε ;

③ 表示底层或相界层中悬浮情况的速度分布。

2) 搅拌装置中的紊流

关于搅拌装置在单相系统中形成的紊流流动状态,已经进行了一些研究^[19~24] (限于测量技术的现状,尚未直接测得多相系统的紊流特征量)。

上述研究提供了 $\bar{v}$ 、 v_t 、 T_u 、 Δ_f 和 λ_f 与下列因素有关:

① 叶轮的结构型式和比例关系 (d_2/d_1);

② 有无稳流板;

③ 叶轮圆周速度或 Re_{d_1} ;

④ 装置中的测量位置。

对于清水中的不同叶轮 (槽中设有稳流板), 表 2 综合列

表 2 不同叶轮的紊流参数比较表

叶 轮 类 型	$\frac{d_2}{d_1}$	$\left(\frac{\Delta_f}{d_1}\right)_{\max}$	$\left(\frac{\Delta_f}{d_2}\right)_{\max}$	$\left(\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}}\right)_{\max}$	$\left(\frac{v_t}{u}\right)_{\max}$	$\left(\frac{v_t \Delta_f}{n d_2^2}\right)_{\max}$
三叶螺旋式	0.4	0.03	0.075	4.2	0.17	0.0194
六叶斜叶片式	0.4	0.06	0.15	6.9	0.265	0.0068
六 叶 浆 式	0.25	0.034	0.135	30.9	0.328	0.1104
	0.35	0.068	0.193	13.3	0.332	0.2253
	0.4	0.072	0.181	7.65	0.218	0.1537
	0.5	0.096	0.184	5.0	0.185	0.1660

出了最大宏观尺寸、能量分散比、速度比，以及表示紊流传送物料的无因次特征量 $(v_t A_f) / (n d_2^2) = D_t / n d_2^2$ 。

搅拌槽中，单相系统流动状态的研究结果表明，紊流特征量主要取决于叶轮的结构型式。

对于单相系统中的均匀搅拌过程，已经确定了表示紊流状态的量与所有特征量（如搅拌系数和搅拌功率数^[20]）之间的关系^[24]。

对于三相紊流系统中的矿浆浮选过程，同样认为其紊流过程是可以确定的。

至于浮选工艺中的叶轮，其紊流大小的变化范围目前尚不可能给出，此类流动情况的研究尚未进行。

关于生成的紊流结构对浮选指标的影响方式，要回答此问题是困难的。因为还不可能直接测得多相系统中，表示紊流特征的量^[25]。而且，采用单相系统的紊流特征量来描述三相系统，这一研究工作尚未进行。装置中逐点的 ε 值并不相同，通过不同的能量分散作用，可以达到相同的 $\bar{\varepsilon}$ 值。

2. 紊流的单一过程

尽管定量地确定紊流的影响还有许多困难，通过试验说明浮选过程的变化与紊流状态的关系还是可行的。为此，首先讨论紊流对浮选系统中单一微观过程的影响。

1) 紊流的传送

在三度空间的各个方向，紊流引起动量的传递和物料的输送。通常，紊流的传送取决于被输送量的局部梯度和紊流扩散系数 D_t ^[17]。在均匀的紊流中，传递动量的扩散系数为^[17]：

$$D_t = v_t A_L \quad (5)$$

在理论上，人们对于均匀紊流中任意颗粒的传送了解甚少。传递过程受到颗粒尺寸与紊流尺寸之比以及颗粒浓度的