

小直径水力旋流器微细分级模型^①

宋振东

(武汉工业大学资源与环境工程系, 武汉 430070)

摘 要 小直径水力旋流器直径小, 离心力场强, 液流微观结构复杂, 研究难度大。从流体宏观结构和微细颗粒的群态运动入手, 提出了“紊流携带模型”, 探讨用新的参数研究小直径旋流器微细分级的规律。阐明了“紊流携带模型”的基本观点和“相对携带量”、“分级粒度 d_r ”、“溢流水量分配”等主要参数的物理概念。在实验研究的基础上, 建立了与旋流器结构和操作参数相关的溢流水量分配、分级粒度、相对携带量3个数学方程。高岭土微细分级实验表明数学方程计算值与实验值吻合较好。该模型可用于小直径旋流器的理论研究和部分工艺指标的计算。

关键词 小直径旋流器 紊流携带模型 溢流水量分配 分级粒度 相对携带量

中图法分类号 TD 921.5

当前, 微细物料的分级和分选仍是重力选矿的一个活跃的研究领域^[1, 2], 小直径水力旋流器的微细分级是主要研究方向之一。小直径水力旋流器是指直径小于50 mm的旋流器。英国、德国、捷克等国在高岭土选矿中, 用 $d25$ mm和 $d10$ mm旋流器精选, 得到 $< 2 \mu\text{m}$, 含量大于90%的刮刀涂料级高岭土; 墨西哥回收萤石粉, 使用 $d25$ mm旋流器分离 $10 \mu\text{m}$ 物料; 巴西铌矿浮选前用 $d25$ mm旋流器脱去 $< 5 \mu\text{m}$ 的矿泥; 美国在净化回收硅藻土助滤剂中, 用 $d25$ mm旋流器分离 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 物料, 清洗效率达94%~98%; 小直径旋流器在工厂废水和粉尘处理, 玉米淀粉提纯, 有机晶体回收等方面已取得成功的应用^[3]。我国小直径水力旋流器用于微细物料分级约10余年历史, 目前主要用于高岭土的精选。

在理论研究方面, 对小直径水力旋流器分级机理的解释目前仍沿用传统理论, 其中用得较多的是“平衡轨道理论”和相应的“分级粒度 d_{50} ”的概念^[4, 5]。值得提出的是这些研究都是在 $d50$ mm以上旋流器中进行的。小直径旋流

器直径小, 给矿压力大, 分级粒度最小只有几个微米, 随着旋流器直径的减小和离心力场强度的增大, 颗粒在旋流器中停留的时间只有1~2 s, 在这样短的时间内, 每个颗粒能达到受力平衡是困难的^[6, 7]。

本文从流体的宏观结构和微细颗粒的群态运动入手, 提出“紊流携带模型”, 探讨用新的参数研究小直径旋流器的分级规律。

1 紊流携带模型的提出

紊流携带模型是一个总概念, 其中包括基本观点、主要参数和数学模型三方面内容。

紊流携带模型的基本观点是: ①小直径旋流器直径小, 离心力场强度大, 旋流器中存在着较强的液流紊动; ②小直径旋流器在操作上常采用较稀的进浆浓度和较小角锥比(底流口直径与溢流口直径的比值), 所以宏观水量大, 且大部分水进入溢流, 溢流水成为宏观液流的主流, 对微细分级起着重要作用; ③微细颗粒借脉动水流悬浮并被水流携带进入溢流, 我们

① 国家“八五”科技攻关计划资助项目 85- 603- 01- 01 收稿日期: 1997- 11- 25; 修回日期: 1998- 02- 13
宋振东, 男, 54岁, 副教授

称之为紊流的携带作用。矿浆进入旋流器后,微细颗粒借脉动水流悬浮,在紊流携带作用下随溢流水排出,其余不能被溢流水携带的较粗颗粒从底流口流出,这就是微细颗粒的分级过程。紊流携带模型的定量解释用它的基本参数和数学模型。紊流携带模型的主要参数有溢流水量分配、分级粒度 d_r 和相对携带量。它们的物理概念将分别叙述。

2 模型的建立

数学模型是在原攻关项目(856030101,以下简称“项目”)研究工作^[8, 9]的基础上建立的。原有研究工作应用小直径水力旋流器对高岭土、瓷石等矿物进行了微细分级研究,所获得的实验数据是建模的主要依据。

2.1 溢流水量分配

水量分配方程是旋流器的基本方程之一,实验表明溢流水量分配与原矿细度、进浆浓度和旋流器的直径、溢流口和沉砂口大小有关。“项目”研究所获实验数据经回归分析,得到水量在溢流中的分配率方程^[8]

$$\epsilon_{ow} = 149.63/w_u - 400.34 \Delta/w_u - 37.24L/100 + 0.32D + 85.27 \quad (1)$$

式中 ϵ_{ow} 为溢流中的总水量分配率(%); w_u 为设原矿固体含量为 1 时的原矿相对水量,在数值上等于矿浆的液固比,无因次; Δ 为角锥比,无因次; L 为原矿中 $< 2 \mu\text{m}$ 粒级颗粒的相对含量(相对 w_u 的值),无因次; D 为旋流器直径,mm。实验表明,给矿压力在 0.3~ 0.4 MPa 常规范围内,对溢流水量分配影响很小。

2.2 分级粒度

分级粒度是水力旋流器理论研究中的一个重要概念。现在普遍采用的是 d_{50} (或 d_{50c}),但紊流携带模型的分级粒度概念不同于 d_{50} 。现在看一特例,假如小直径水力旋流器溢流带出的固体颗粒与原料的粒度组成相同,表明没有分级或分级效率为零,这时任一窄粒级在溢流中的分配率等于溢流的产率,显然不存在分配率为 50% 的粒级。因此新的分级粒度的概念

定义为“某一窄粒级,它在溢流和给矿中的含量(%)相同,而在溢流中的分配率等于溢流产率,该窄粒级颗粒的平均粒度称为分级粒度,计为 d_r ”。以表 1 实验数据为例,临界窄粒级应在 8~ 10 μm ,在同一坐标上绘出溢流(负累计)和底流(正累计)粒度特性曲线,两条曲线交点对应的粒度值(8.9 μm)即为分级粒度 d_r ,该点对应的窄粒级在溢流和底流中的含量必然相等。根据临界窄粒级在溢流、底流和原矿中的量的平衡关系,可进一步导出该窄粒级在给矿中的含量恰等于在溢流中的含量,且在溢流中的分配率等于溢流产率。类似分级粒度的概念过去虽提出过^[10, 11],但并没有形成影响和获得实际应用。紊流携带模型的提出使 d_r 的物理概念更加清晰,同时它也成为紊流携带模型的重要组成部分。

表 1 水力旋流器粒度分析数据

Table 1 Size analysis data for hydrocyclone

Size / μm	Size analysis/ %			Partition coefficient/ % (Overflow)
	Overflow	Underflow	Feed	
0~ 2	32.90	3.84	23.90	95.02
2~ 4	15.81	2.55	11.71	93.21
4~ 6	18.40	3.29	13.72	92.57
6~ 8	11.91	5.14	9.81	83.79
8~ 10	8.11	8.27	8.16	68.63
10~ 12	4.75	12.95	7.29	44.99
12~ 14	4.74	16.28	8.31	39.35
> 14	3.38	47.68	17.10	13.68
Σ	100.00	100.00	100.00	
Product yield/ %	69.04	30.96		

“项目”研究所获实验数据经回归分析,建立了分级粒度方程式

$$d_r = 15.94 - 0.022D - 0.41w_u - 0.088C - 5.89 \Delta \quad (2)$$

式中 d_r 为分级粒度, μm ; C 为原矿中 $< 2 \mu\text{m}$ 含量,%; 其余符号同前。

2.3 相对携带量

溢流水对不同粒级颗粒携带量的大小称相对携带量,或称溢流水携带率,具体为原矿中各窄粒级颗粒在溢流中的分配率与溢流总水量

分配率的比值。以相对粒度的函数式 $f(x)$ 为变量的窄粒级颗粒在溢流中的分配率方程式 $\varepsilon_{oi} = \varepsilon_{ow} / [(\varepsilon_{ow}/r_0 - 1) \cdot f(x) + 1]$, 除以溢流总水量分配率 ε_{ow} , 再用“项目”研究所获实验数据经回归分析拟合出 $f(x)$ 的多项式, 经优化处理最终得到相对携带量数学模型

$$E_i = \varepsilon_{oi} / \varepsilon_{ow} = 1 / [(\varepsilon_{ow}/r_0 - 1) \cdot (0.33X + 0.32X^2 - 1.33X^3 + 1.68X^4) + 1] \times 100\% \quad (3)$$

式中 E_i 为任一窄粒级颗粒在溢流中的相对携带量, %; ε_{oi} 为原矿中任一窄粒级颗粒在溢流中分配率, %; ε_{ow} 为溢流中的总水量分配率, %; r_0 为溢流产品产率, %; X 为相对粒度 d_i/d_r , d_i 为任一窄粒级颗粒的平均粒度。

现对该数学模型的物理概念进行讨论:

(1) 对于极细粒级, $d_i \approx 0$, 所以 $X \approx 0$, 按公式(3) 计算得 $E_i \approx 100\%$, 表明极细颗粒在溢流中的相对携带量接近 100%。

(2) 平均粒度等于分级粒度的窄粒级颗粒, $d_i = d_r$, 所以 $X = 1$, 按公式(3) 计算得 $\varepsilon_{oi} = r_0$, 表明平均粒度等于分级粒度的窄粒级颗粒在溢流中的分配率等于溢流产率。

(3) 平均粒度最大的窄粒级颗粒, 对于高岭土精选给料最大粒度一般小于 50 μm , 此时 $X \approx 4 \sim 6$, 按公式(3) 计算 $E_i \approx 0$, 表明最大的窄粒级颗粒在溢流中的相对携带量等于零。

从以上分析可以看出, 相对携带量是随粒度增大而减小的一个减函数。

(4) 对于最坏的分级, $\varepsilon_{ow} = r_0$, 各粒级分别按公式(3) 计算都得 $E_i = 100\%$, 表明各窄粒级颗粒都以和溢流量或产率相同分配比例进入溢流, 溢流粒度组成与原矿完全相同, 即没有分级。

3 模型的验证

为检验模型的预测精度, 进行了小直径水力旋流器微细分级验证实验。实验用矿样来自

江西景德镇砂子岭、江苏吴县青山、江西景德镇大洲、湖南界牌等处高岭土矿。原矿经捣浆、粗加工后得到实验矿样, 编号为 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4, 实验矿样最大粒度 < 50 μm , 粒度组成见表 2。旋流器规格为 d 25 mm, d 50 mm, 每个实验得到溢流和底流两个产品, 粒度测定用日本 SKC-2000 粒度测定仪, 实验条件和结果见表 3。

表 2 实验矿样粒度分布

Table 2 Distribution of sample size (%)

Size/ μm	Experiment sample and number			
	Shaziling No. 1	Qingshan No. 2	Dazhou No. 3	Jiepai No. 4
0~ 2	23.90	76.10	22.01	26.45
2~ 4	11.71	10.41	18.92	16.17
4~ 6	13.72	4.59	12.67	13.96
6~ 8	9.81	1.73	16.14	10.34
8~ 10	8.16	1.37	12.66	7.67
10~ 12	7.29	1.52	7.43	4.95
12~ 14	8.31	1.59	4.81	3.93
> 14	17.10	3.69	5.36	16.53
Σ	100.00	100.00	100.00	100.00

用紊流携带模型对实验结果进行模拟计算。首先以表 3 中第 2 号实验为例说明计算步骤。实验矿样来自江西景德镇砂子岭, 实验用旋流器为 d 25 mm, 溢流口直径为 7.0 mm, 底流口直径为 2.2 mm, 进浆浓度为 10.66%, 溢流产率为 60.33%。由已知条件计算得 $w_u = 8.38$, $\Delta = 0.31$, $L = 2.85$, $C = 23.9$, 代入公式(1) 和(2) 计算得 $\varepsilon_{ow} = 95.25\%$, $d_r = 8.03 \mu\text{m}$, 与实验值 94.81%, 8.25 μm 接近。

将已知条件和计算结果代入式(3), 计算出各粒级(由小到大) E_i 值分别为 97.52%, 92.94%, 86.88%, 73.59%, 52.70%, 32.74%, 19.20%, 5.48%。为验证 E_i 与实验值的吻合程度, 根据原矿粒度组成由 E_i , w_u 的计算值反算出溢流产率 $r_0 = 59.58\%$, 可以看出与实验值 60.33% 接近。

按上述步骤用表 3 中的 26 组数据模拟计算, 求出 ε_{ow} , d_r , r_0 值, 并与实验值对比绘出图 1, 由图看出计算值和实验值拟合较好。

表 3 模型的验证实验数据

Table 3 Data of confirmation experiment of model

Number	Experiment sample (No)	Experimental condition				Experimental result		
		Cyclone diameter/mm	Vortex /mm	Apex/mm	Sludge density/%	Overflow yield/%	Overflow water/%	Separation size/ μm
1	1	25	5.5	1.5	11.00	67.64	96.30	8.76
2	1	25	7.0	2.2	10.66	60.33	94.81	8.25
3	1	25	5.5	2.2	10.24	53.78	89.80	7.79
4	1	25	7.0	3.2	10.50	50.01	87.47	7.30
5	1	25	3.0	1.5	11.00	47.42	85.07	7.17
6	1	25	5.5	3.2	13.00	38.17	80.00	6.43
7	1	25	3.0	2.2	15.00	31.30	66.01	6.20
8	2	25	7.0	1.5	11.00	86.70	97.70	3.60
9	2	25	5.5	1.5	11.00	81.80	94.96	3.20
10	2	25	7.0	2.2	11.00	79.30	93.92	3.00
11	2	25	5.5	2.2	11.43	76.50	90.30	2.90
12	2	25	7.0	3.2	11.43	72.11	85.00	2.80
13	2	25	3.0	1.5	11.00	69.01	81.41	2.70
14	2	25	5.5	3.2	11.43	63.60	80.05	2.30
15	1	50	14	6	19.63	63.15	90.81	9.00
16	1	50	11	6	20.40	48.85	80.90	7.90
17	1	50	11	8	19.70	34.10	66.80	6.90
18	1	50	8	6	20.66	33.05	60.37	6.81
19	3	50	14	6	15.00	68.77	93.20	7.40
20	3	50	11	6	15.00	53.01	86.20	6.50
21	3	50	11	8	15.00	40.09	71.90	6.00
22	3	50	8	6	15.00	38.81	71.50	5.80
23	4	50	14	6	16.50	63.71	93.90	7.60
24	4	50	11	6	16.50	55.62	83.23	7.35
25	4	50	11	8	16.50	43.02	71.53	6.51
26	4	50	8	6	16.50	39.45	66.42	6.35

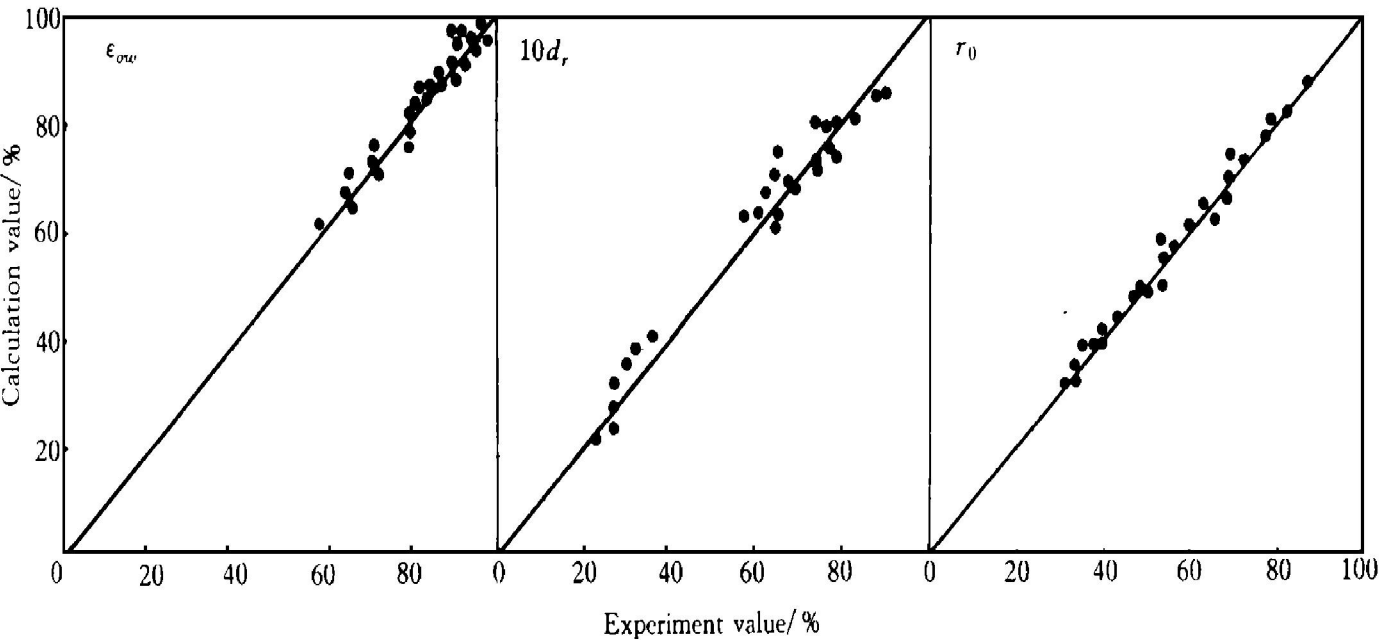


图 1 计算值与实验值对比

Fig. 1 Comparison of calculation data with experimental data

4 结语

文中提出的紊流携带模型是以液流的宏观结构和微细颗粒的群态运动为基础, 没有涉及旋流器内液流的微观结构和分级表面的平衡, 简化了研究和计算。本文建立的数学公式(1), (2), (3), 反映了紊流携带参数与旋流器结构和操作参数的关系, 用于指导高岭土选矿有一定的实用价值。方程式中的系数稍加修正后也可用于其他物料的微细分级。

REFERENCES

- 1 Lu Yongxin (吕永信). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(2): 10.
- 2 Wang Weixing(王卫星). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(2): 13.
- 3 Malghan S G. Ultrafine Grinding and Separation of Industrial Minerals(非金属矿超细磨与分选). Beijing: Chinese Publishing House of Building Industry, 1988: 187-201.
- 4 Pang Xueshi(庞学诗). Metallic Ore Dressing Abroad(国外金属矿选矿), 1992, (5): 18.
- 5 Zhang Pengfei(张鹏飞), Xu Deming(许德明) and Huang Shu(黄枢). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(3): 45.
- 6 Yao Shudian(姚书典). Principles of Gravity Concentration(重选原理). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 77.
- 7 Лопатин А Г. Цветные Металлы, 1983, (5): 96.
- 8 Song Zhendong(宋振东). Journal of Wuhan University of Technology(武汉工业大学学报), 1997, 19(2): 38.
- 9 Song Zhendong. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 1997, 12(1~2): 69.
- 10 Поваров А И. Обогащение руд, 1956, (5): 40.
- 11 Поваров А И. Обогащение руд, 1966, (3): 22.

MODEL OF SMALL-DIAMETER HYDROCYCLONE IN CLASSIFICATION OF ULTRAFINE PARTICLES

Song Zhendong

*Department of Resources and Environment Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China*

ABSTRACT Based on the analysis of fluid microstructure and the group movement of ultrafine particles, the turbulence-carrying model has been proposed and it has been used to explain the law of classification of ultrafine particles in the small-diameter hydrocyclone with new parameters. The basic idea about "turbulence-carrying model" and the physical concepts for the main parameters, such as relative carrying capacity, separation size d_r , distribution of overflowing water, have been delineated. Based on the experiment, three equations for distribution of overflowing water, separation size and relative carrying capacity were established, which are interrelated with the structure and the operation parameters of hydrocyclones. The experiment of the kaolin classification of ultrafine particles showed that the computation value coincides well with the experimental value. The model can be applied to the theoretical study of the classification of small-diameter hydrocyclone and the computation of process index to some degrees.

Key words small-diameter hydrocyclone turbulence-carrying model distribution of overflowing separation size relative carrying capacity

(编辑 吴家泉)