

TECHNOLOGY OF PUSLING AIR SEPARATION

脉动气流分选

何亚群 赵跃民 著



化学工业出版社

TECHNOLOGY OF PUSLING AIR SEPARATION

脉动气流分选

何亚群 赵跃民 著

何亚群 赵跃民 著

化学工业出版社

本书主要介绍脉动气流分选技术的基本原理、设备结构、操作方法和应用。全书共分五章。第一章介绍脉动气流分选技术的基本原理；第二章介绍脉动气流分选设备的结构；第三章介绍脉动气流分选的操作方法；第四章介绍脉动气流分选的应用；第五章介绍脉动气流分选技术的发展趋势。



化学工业出版社

·北京·

（北京）（北京）

（北京）（北京）

本书是系统介绍脉动气流分选的专著。本书讨论了脉动气流分选原理；研究了脉动气流流场特性；分析了颗粒在脉动气流流场中的运动规律；建立了脉动气流流场中颗粒运动动力学方程；数值模拟了阻尼式和主动式脉动气流流场与颗粒运动规律，进而，对不同性质颗粒的分离进行实验室试验研究；验证了脉动气流分选理论及颗粒运动动力学方程的正确性；最后，在实验室主动脉动气流分选装置上，对于几种实际物料进行脉动气流分选试验，提出了工业化主动脉动气流分选系统的设计方案。

本书可以作为矿物加工工程、资源循环利用、环境保护领域科技人员的学习参考用书，也可作为相关领域本科生、研究生的教学和科研参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

脉动气流分选/何亚群, 赵跃民著. —北京: 化学工业出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-122-04148-7

I. 脉… II. ①何…②赵… III. 分离-化工过程
IV. TQ028

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 182584 号

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 李 林

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 265 千字 2009 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

气流分选，或曰风力分选，在我国很早就已用于农业生产，西汉元帝（公元前 48~33 年）黄门令史游《急就篇》记载了当时主要的谷物加工农具：“碓、硃、扇、颿、舂、簸、扬”。唐颜师古注：“碓，所以礱也；亦谓之碓。古者雍父作舂，鲁班作硃。扇，扇车也。颿，扇车之道也……颿之言坠也。言即扇之，且令坠下也。舂则簸之、扬之，所以除糠粃也。扬字或作颿，音义同。”以上记载了我国古代谷物清选加工的三种方式及工具。一是借助自然风的“扬”法，主要的工具有杵和颿篮；二是“簸”法，主要工具是簸箕；三是利用风扇车等设备产生间断或连续的人造风对谷物进行清选，达到去粗取精的目的。风扇车是一种利用流体力学、惯性、杠杆等原理人为地强制空气流动，产生一定风力的人造风，用以把蹂打脱粒后或舂、碾后的谷物籽粒与混在一起的糠粃、糠皮等杂物分开。风扇车至迟发明于汉代，除西汉文献《急就篇》的记载外，在很多出土文物中还有多例汉代风扇车模型为佐证，《王祯农书》中也对风扇车做了详细的记载。

西方对风力分选的文献记载最早见于圣经，此时气流分选已用于稻谷等粮食作物的分选。尽管西方最初利用风力分选的时间与我国基本相当，但有文献记载，我国的旋转风扇车于公元 1700~1720 年才由荷兰船员带到欧洲，大约在这个时期，瑞典人直接从我国南方进口了这种颿车。公元 1720 年左右，传教士也从我国把几台颿车带到了法国。

由于气流分选所需分选介质为空气，所以气流分选工艺及设备具有建造及运行成本低、流程简单、二次污染小、节约能源与水资源等优点；但其也存在不足，如矿物中水分的影响、分选过程的粉尘污染难控制等问题。除此之外，因分选物料组分的沉降末速是决定分选效率的主要因素，故传统气流分选工艺存在分选精度低的问题是其致命弱点。所以，为了提高物料在稀相条件下的分选效率，传统气流分选装置在分选之前需要将物料进行窄分级，或经破碎使粒度均匀后，才可使其按密度差异进行分选。

自 2000 年开始，中国矿业大学开始进行电子废弃物处理资源化研究工作，并将工作重心集中于废弃线路板的机械分选及各种成分资源化技术

的理论研究与实际应用。由于气流分选可对电子废弃物破碎产品中的有价值成分回收利用,有较强的针对性和较好的适应性,因此气流分选理论与实践的研究随即成为电子废弃物处理资源化研究的重要方面。近十年中,笔者及笔者所在课题组对传统气流分选、阻尼式脉动气流分选、主动脉动气流分选的分选理论、工艺参数及设备结构进行了系统的研究,在流场的形态特性、颗粒运动的动力学方程、物料按密度为主导的分离机理、脉动气流分选工艺的应用等方面取得了突破。现将上述研究成果总结、提炼,撰写成本书,供大家工作学习中参考。

全书共分10章,其中第3章、第7章的内容是在段晨龙博士大量的实验室工作基础上完成的,第4章内容的完成得益于王海锋讲师的辛勤劳动,第9章的部分工作由宋树磊工程师完成。此外,课题组的其他同仁以及研究生对本书的完成付出了努力。本书受到中国矿业大学“211工程”重点学科建设项目(B00405)、国家杰出青年基金项目(50025411)、国家自然科学基金面上项目(50574094)、高校博士点基金(20030290015)、煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室开放课题基金(CPEUKF06-11)、徐州市科技创新基金(工业部分)(200600242)项目资助。

由于编者水平所限,书中不当之处,恳请广大读者批评指正。

何亚群 赵跃民

2008年9月于徐州

目 录

第1章 引言	1
1.1 气流分选背景	3
1.2 传统气流分选原理	4
1.3 气流分选设备	8
1.3.1 水平气流分选机	9
1.3.2 垂直气流分选机	10
1.3.3 倾斜式气流分离器	11
1.3.4 气力摇床	12
1.4 气流分级设备	14
1.5 浓相气流分选理论与设备	16
1.5.1 气固两相流理论	16
1.5.2 浓相气流分选应用	19
参考文献	24
第2章 脉动气流分选的提出	27
2.1 颗粒抛落实验	29
2.2 脉动气流分选原理的提出	30
2.3 阻尼式脉动气流分选	32
2.4 主动脉动气流分选	36
参考文献	39
第3章 阻尼式脉动气流分选	41
3.1 分选试验系统	43
3.2 测试分析系统	45
3.3 实验原料	47
3.4 阻尼式脉动气流分选研究	47
3.4.1 试验过程	47
3.4.2 分选效果评价	48
3.4.3 阻尼块数量对分选效果的影响	49
3.4.4 阻尼块形状对分选效率的影响	54

3.4.5	分选装置高度对分选效果的影响	56
3.4.6	给料量对分选效果的影响	59
3.5	颗粒运动形态分析	61
3.5.1	高速动态拍摄试验分析过程	61
3.5.2	球形颗粒试验分析	62
3.5.3	模拟物料试验分析	65
3.6	颗粒在气流分选中的动力学分析	71
3.6.1	颗粒的受力分析	72
3.6.2	湍流脉动分选理论	75
参考文献		77
第4章	阻尼式脉动气流流场数值模拟	79
4.1	FLOTRAN 计算流体动力学概述	81
4.2	FLOTRAN 分析的主要步骤	83
4.3	模拟结果及分析	84
4.3.1	传统柱式气流分选机流场模拟结果及分析	86
4.3.2	阻尼式脉动气流流场模拟结果及分析	88
4.3.3	第二类阻尼式脉动气流流场模拟结果及分析	95
参考文献		102
第5章	主动脉动流场颗粒运动动力学方程	103
5.1	概述	105
5.2	颗粒受力分析	108
5.3	颗粒运动分析	117
参考文献		119
第6章	主动脉动气流分选系统	121
6.1	主动脉动气流分选装置	123
6.1.1	实验室主动脉动气流分选系统	123
6.1.2	脉动阀	124
6.1.3	供风系统	126
6.1.4	分选柱	126
6.1.5	给料装置	126
6.1.6	排料系统	127
6.1.7	脉动频率	128

6.1.8 气流分布板	128
6.2 测量分析系统	130
6.2.1 颗粒高速动态分析系统	130
6.2.2 分析软件	130
6.3 分选物料	131
6.3.1 示踪颗粒	131
6.3.2 实际物料	132
6.4 分选流程设计及实验室配置	135
参考文献	138
第7章 主动脉动气流流场颗粒运动规律	139
7.1 颗粒运动数值模拟的意义	141
7.2 模拟物料	141
7.3 数值分析软件	143
7.4 数值模拟	144
7.4.1 动力学模型归一化表示	144
7.4.2 动力学模型参数修正	145
7.4.3 分选条件模拟	150
7.4.4 玻璃与塑料分选模拟	156
7.4.5 金属与非金属分选模拟	162
7.5 结果与讨论	165
参考文献	171
第8章 主动脉动气流实验室分选特性	173
8.1 引论	175
8.2 测试记录系统	176
8.3 实验室分选试验	177
8.3.1 分选效率定义	177
8.3.2 分选结果	178
8.3.3 分析与讨论	180
8.4 动态拍摄与分析	188
8.4.1 橡胶及玻璃颗粒的拍摄分析	189
8.4.2 橡胶及金属球形颗粒的拍摄分析	203
参考文献	226

第 9 章 实际物料主动脉动气流分选	227
9.1 铝与塑料的分选	229
9.1.1 脉动频率的影响	229
9.1.2 分选装置高度的影响	231
9.1.3 给料量的影响	233
9.2 废弃催化剂提取贵金属化合物的分选	234
9.2.1 物料性质	234
9.2.2 分选实验	236
9.3 废弃 PCB 破碎产品中金属成分的分选	238
9.3.1 物料性质	238
9.3.2 0.5~2mm 级废弃电路板物料分选	241
9.4 多因素对 0.5~2mm 级废弃印刷电路板物料分选效率的影响	247
9.4.1 废弃印刷电路板物料 (0.5~2mm 级) 试验设计	247
9.4.2 废弃印刷电路板物料 (0.5~2mm 级) 分选试验结果	248
9.4.3 废弃电路板物料 (0.5~2mm 级) 分选试验结果分析	251
参考文献	255
第 10 章 脉动气流分选工业性应用	257
10.1 工业性应用背景	259
10.2 废弃催化剂分选工业性应用	259
10.2.1 总体指标	259
10.2.2 系统联系	259
10.2.3 参数计算	261
10.2.4 系统装配图	265
10.3 蛭石分选工业性应用	265
10.3.1 蛭石的特性	265
10.3.2 物料性质	266
10.3.3 实验研究	267
10.4 工业性设备实例	275

第 1 章

引 言

1.1 气流分选背景

气流分选是一种古老的分选方法，在古代就已用于稻谷等粮食作物的分选^[1]。因为所用分选介质为空气，所以气流分选具有分选成本低、不产生二次污染、产品和介质无需后续处理等优点。然而，由于物料和分选本身的原因，传统的气流分选并未得到广泛应用。在选矿工艺学经典著作“Mineral Processing Technology”第二版^[2]和第六版^[3]中均未查到有关气流分选的叙述。在国内的选矿学著作和教材中对气流分选的叙述亦鲜有介绍^[4,5]。

在煤炭分选的应用方面，美国“Coal Preparation”第四版对气流分选作了简单的介绍。气流分选用于选煤选别在 20 世纪 60 年代最为广泛，但 70 年代中后期，由于煤炭的机械化采掘程度的不断提高，导致毛煤水分增大等原因，采用气流分选的处理量逐年下降（表 1-1）^[1]。此后，由于煤炭在美国一次能源消费结构中的比例不断降低，煤炭干法分选的数量也逐步减少。至 20 世纪 70 年代，俄罗斯风力选煤方法在整个选煤中的比例从 19.7% 下降至 11.4%，目前只占 8% 左右。我国是煤炭消费大国，煤炭在一次能源消费结构中的比例一直占 70% 左右，尽管煤炭干法分选可以缓解我国西部缺水地区及北部高寒地区的煤炭分选问题，但煤炭干法分选的总量仍很小，一般仅用于排除煤中的矸石^[6]。

表 1-1 20 世纪 60~70 年代美国干法选煤情况 单位：万短吨

年份/年	干法分选量	选煤总量
1964	2140.0	31020.3
1965	2538.4	33225.6
1966	2420.5	34062.6
1967	2126.8	34940.2
1968	1680.4	34092.3
1969	1916.3	33476.1
1970	1785.5	32345.2
1971	1450.6	27140.1
1972	1171.0	29282.9
1973	1050.5	28891.8
1974	775.7	26515.0
1975	710.0	26500.0

注：短吨=0.91 吨。

1916年,首台工业干法选煤设备在美国成功应用,该设备由 Sutton、Steel 等以及位于达拉斯的 Steel Co. 和美国选煤联合会 (American Coal Cleaning Corp.) 研制推广,它是应用气流和一个摆动装置组成的分选设备。此后,在国外也出现了其他用于选煤的气流分选设备,如 Peale Davis 的气动重力分选设备 (Pneumo-Gravity Machine), Arms 以及 Heyl 和 Patterson 的摆动摇床 (Oscillating Table), 气力跳汰等设备。在国内,煤用气流分选设备主要为气力摇床和复合式干法选煤以及空气重介质干法选煤工艺等^[7]。

尽管矿物的干法分选设备具有成本低、流程简单、二次污染小、节约水资源等优点,但也存在不足,如矿物中水分的影响、分选过程的粉尘污染控制等问题。除此之外,传统气流分选工艺存在分选精度低的问题是致命弱点。对于传统的立式气力分选装置,分选物料组分的沉降末速是决定分选效率的主要因素^[8]。颗粒的沉降末速又主要取决于颗粒在气流中运动时的空气动力学特性,而颗粒的粒度、形状和密度依次影响颗粒的空气动力学特性^[9]。由于以空气为介质的矿物分选是属于稀相条件的分选,而颗粒在空气中的等降比远远小于在水中的等降比,大约为其 $1/2 \sim 1/5$ ^[10]。因此,为了提高物料在稀相条件下的分选效率,对于传统气流分选装置在分选之前需要将物料进行窄分级,或经破碎使粒度均匀后,才可使其按密度差异进行分选。因而传统气流分选装置难以实现物料宽粒级、多组分按密度为主导的分离^[11]。

1.2 传统气流分选原理

根据气流流动方向,气力分选一般分为立式和卧式两种,通常又以立式分选装置应用较为广泛。气流分选的基本原理是气流将较轻的物料向上带出分选设备或从水平方向带到较远的地方,而重物料则由于向上气流不能支撑其重量而沉降,或由于重物料较大的惯性使其不能剧烈改变方向而穿过气流而沉降。被气流带走的轻物料可进一步从气力旋流器中分离出来^[1]。

根据流体动力学的知识,气流中自由下落的颗粒在流体中受三个力

的作用, 即重力 F_G 、浮力 $F_{\text{浮}}$ 和阻力 F_D 。

重力 F_G 克服浮力 $F_{\text{浮}}$ 使颗粒上升或沉降的作用力称作有效重力^[12], 表示为:

$$F = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho) g \quad (1-1)$$

式中 ρ_p ——颗粒密度;

ρ ——流体密度;

d ——颗粒直径。

F 以沉降方向为正。

颗粒在流体中上升或沉降时遇到的阻力为:

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} \quad (1-2)$$

式中 C_D ——阻力系数, 其值与颗粒运动状态和流体的雷诺数大小有关;

v ——颗粒在流体中运动的速度。

颗粒沉降经过最初加速度阶段后, 随着阻力的增加达到有效重力与阻力的平衡, 变成匀速运动。这个匀速运动的速度被称为最终速度或颗粒沉降末速, 用式(1-3)表示。

$$v_0 = \sqrt{\frac{4d(\rho_p - \rho)g}{3C_D\rho}} \quad (1-3)$$

通过 F 与式(1-2) 中 F_D 相等的关系, 可以导出球形颗粒沉降最终速度 v_0 的通式, 即:

对于层流区:

$$0 < Re < 1, C_D = 24/Re \quad (1-4)$$

对于过渡区:

$$2 < Re < 500, C_D = 10/Re^{1/2} \quad (1-5)$$

对于紊流区:

$$500 < Re < 100000, C_D = 0.44 \quad (1-6)$$

将式(1-4)~式(1-6) 三式代入式(1-3) 中计算, 得到三区最终沉降速度, 可按以下三式计算:

层流区:

$$v_0 = \frac{g(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu} \quad (\text{斯托克斯定律}) \quad (1-7)$$

过渡区:

$$v_0 = 0.20 \left(g \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{-0.72} \frac{d^{1.18}}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0.45}} \quad (1-8)$$

式中 μ ——运动的黏性系数。

过渡区两端 (即 $Re < 30$ 或 $Re > 300$) 计算时有一定误差。

紊流区:

$$v_0 = 1.74 \left(g \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{0.5} d^{0.5} \quad (\text{牛顿定律}) \quad (1-9)$$

空气与水相比,其密度和黏度都较小,并具有可压缩性。当压力为 1MPa、温度为 20℃ 时,空气的密度是 0.00118g/cm³,黏度为 0.000018Pa·s。由于在分选过程中,使用的风压一般不超 1MPa,因此可忽略空气的可压缩性,而将其视为流体性质的介质。颗粒在水中的沉降规律也同样适用于在空气中的沉降,但由于空气的密度与颗粒的密度相比甚小,可忽略不计。

故颗粒在空气中的沉降末速 v_0 为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4d\rho_p g}{3C_D\rho}} \quad (1-10)$$

式中 d ——颗粒的直径;

ρ_p ——颗粒的密度;

ρ ——空气的密度;

C_D ——阻力系数;

g ——重力加速度。

为推导方便,沉降末速可表达为:

$$v_0 = \sqrt{\frac{\pi d \rho_p g}{6\phi\rho}} \quad (1-11)$$

式中 ϕ ——阻力系数,其值与 C_D 相差一个常数。

由式(1-11)可知,当颗粒粒度一定时,密度大的颗粒沉降末速大;当颗粒密度相同时,直径大的颗粒沉降末速大。由于颗粒的沉降末速与颗粒的密度、粒度及形状有关,因而在同一介质中,密度、粒度和形状

不同的颗粒在特定条件下,可以有相同的沉降末速。这样的相应颗粒称为等(沉)降颗粒。其中密度小的颗粒粒度 d_1 与密度大的颗粒粒度 d_2 之比称为等降比^[13],以 e 表示,即:

$$e = \frac{d_1}{d_2} \quad (1-12)$$

等降比可由沉降公式或通式写出,如果两个颗粒等降,则 $v_{0_1} = v_{0_2}$, 那么:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\pi d_1 \rho_{p_1} g}{6 \phi_1 \rho}} &= \sqrt{\frac{\pi d_2 \rho_{p_2} g}{6 \phi_2 \rho}} \\ \frac{d_1 \rho_{p_1}}{\phi_1} &= \frac{d_2 \rho_{p_2}}{\phi_2} \\ e_0 &= \frac{d_1}{d_2} = \frac{\phi_1 \rho_{p_2}}{\phi_2 \rho_{p_1}} \end{aligned} \quad (1-13)$$

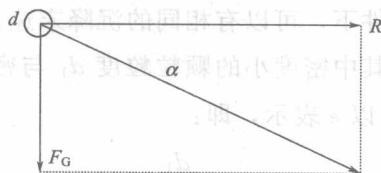
式(1-13)为自由沉降等降比 e_0 的通式。从公式中可以看出,等降比 e_0 将随两种颗粒的密度差 $(\rho_{p_2} - \rho_{p_1})$ 的增大而增大;而且 e_0 还是阻力系数 ϕ 的函数。理论和实践都表明, e_0 将随颗粒粒度变细而减小。所以,要实现物料在稀相条件下的有效分选,对于传统气流分选需要将物料进行窄分级或破碎使粒度均匀。

颗粒在空气中沉降时,所受的阻力远小于在水中沉降时所受的阻力,所以颗粒在静止空气中沉降到达末速所需的时间和沉降距离都较长。然而,颗粒在上升气流中达到沉降末速时,颗粒的沉降速度 v 等于颗粒对介质的相对速度 v_R 和上升气流速度 v_{up} 之差,即,

$$v = v_R - v_{up} \quad (1-14)$$

由式(1-14)可知,上升气流可以缩短颗粒达到沉降末速的时间和下降距离,因此在传统气流分选中常采用上升气流改善其分选效果。颗粒在实际气流分选过程中的运动是干涉沉降^[14],在干涉条件下,使颗粒按沉降末速分选时,上升气流速度的大小,应根据物料中各种组分的性质,一般可通过实验确定。

在气流分选中还常应用水平气流选别方法。在水平气流分选装置中,物料是在空气动力及颗粒本身重力作用下按粒度或密度进行分离的。由图 1-1 可以看出如在缝隙处有一直径 d 的球形颗粒,并且通过缝

图 1-1 水平气流中颗粒 d 受力分析

隙的水平气流为 u 时, 那么颗粒将受到以下两个力的作用。

(1) 空气的动压力 R

$$R = \phi d^2 u^2 \rho \quad (1-15)$$

式中 ϕ ——阻力系数;

ρ ——空气的密度;

u ——水平气流的速度。

(2) 颗粒本身的重力 F_G

$$F_G = mg = \frac{\pi d^3 \rho_p}{6} g \quad (1-16)$$

式中 m ——颗粒的质量;

ρ_p ——颗粒的密度。

颗粒的运动方向将和两力的合力方向一致, 并且由合力与水平夹角 α 的正切值来确定:

$$\tan \alpha = \frac{F_G}{R} = \frac{\pi d^3 \rho_p g}{6 \phi d^2 u^2 \rho} = \frac{\pi d \rho_p g}{6 \phi u^2 \rho} \quad (1-17)$$

由式(1-17)可知, 当水平气流速度一定、颗粒粒度相同时, 密度大的颗粒沿与水平夹角较大的方向运动; 密度小的颗粒则沿夹角较小的方向运动, 从而达到按密度差异分选的目的。

1.3 气流分选设备

传统气流分选装置在城市垃圾、纤维性固体废物、农业稻麦谷类等物料处理和利用中得到了广泛的应用。广义的气流分选还包括集尘。它们的工作原理是一致的, 按工作气流的流向可将它们分为水平、垂直和倾斜三种类型, 其中尤以垂直气流分选器应用得最为广泛^[15]。图中, 给