

# 气流分选技术研究进展

朱学帅<sup>1</sup>, 孙涛<sup>1</sup>, 宋昭<sup>1</sup>, 严书劼<sup>1</sup>, 阮乐怡<sup>1</sup>, 柏思航<sup>1</sup>, 徐慧远<sup>2</sup>, 韦鲁滨<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;2.宜宾天原科创设计有限公司 综合管理部,四川 宜宾 644000)

**摘要:**双碳背景下,气流分选技术因污染低、成本低、不用水、投资省、工艺简单等优势备受关注。为提升气流分选技术在多领域、多地区、多工况的适应性,解决气流分选物料适用范围窄、细粒分选效率低、设备大型化难等问题迫在眉睫。围绕气流分选理论、技术应用和技术改进3方面系统评述气流分选技术研究进展。首先,介绍了气流分选技术原理,分析气流分选过程颗粒受力及分选理论进展;其次,综述了气流分选在固废、矿业、农业等领域的应用进展,并评析了技术优势和技术短板;再次,系统分析了气流分选供风方式优化和设备结构优化等技术改进进展;最后,给出了通过单体并联和相似放大准则提高设备处理量,通过预干燥、分选干燥一体化,改进入料方式提高潮湿物料适应性与分散性,通过窄粒级分选和保持物料形状一致性的预处理过程提高细粒和薄片物料分选效率等路径。展望了未来气流分选技术在线检测与控制智能化、分选装备大型化、分选效率精细化、分选工艺联合化等方面的发展方向,为气流分选技术进一步研究和推广应用提供重要依据。

**关键词:**气流分选技术;结构优化;相似放大准则;分选干燥一体化;窄粒级

**中图分类号:**TD922 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)01-0022-09

## Research progress on airflow separation technology

ZHU Xueshuai<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, SONG Zhao<sup>1</sup>, YAN Shumai<sup>1</sup>, RUAN Leyi<sup>1</sup>, BAI Sihang<sup>1</sup>, XU Huiyuan<sup>2</sup>, WEI Lubin<sup>1</sup>

(1.School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2.Yibin Tianyuan Kechuang Design Co., Ltd., Yibin 644000, China)

**Abstract:** Against the backdrop of "carbon peak and carbon neutrality", airflow separation has garnered attention across various industries due to its advantages of environment friendly, low cost, water-free, low investment, and facile process. To upgrade the airflow separation adaptability on multiple fields, regions and working conditions, it is urgent to solve challenges such as narrow sorting range of materials, inefficient fine-grained separation and equipment scaling up difficulties. A systematic review on the research progress of airflow separation around separation theory, technical application and technology improvement was conducted. The principle of airflow separation was first introduced, the force on particles during pneumatic separation process and the progress of separation theory was analyzed. Secondly, the application progress of airflow separation in solid waste, mining, agriculture was reviewed, the technical advantages and shortcomings were analyzed. Subsequently, the technical improvement progress of air supply mode optimization and equipment structure optimization in airflow separation were systematically analyzed. Finally, the solution paths of existing challenges were given, including improving the processing capacity of the equipment through the monomer parallel and similar amplification criteria, improving the adaptability and dispersion of wet materials through integrated pre-drying, separation and drying, and upgraded feeding method, and improving the separation efficiency of fine and thin materials through narrow particle separation and the pretreatment process that maintaining the shape consistency of materials. The future development direction of airflow separation in intelligent detection and control, large-scaling separation equipment, separation efficiency refinement and separation association were prospected, providing important basis for further research and promotion of airflow separation.

**Key words:** airflow separation; structural optimization; similarity amplification criteria; integration of separation and drying; narrow particle

收稿日期:2024-01-14;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.KD24011402

基金项目:北京市自然科学基金面上资助项目(2232067);宜宾市引进高层次人才资助项目(2022YJ04);国家自然科学基金青年基金资助项目(51604281)

作者简介:朱学帅(1983—),男,辽宁锦州人,副教授,博士。E-mail:zhuxueshuai@163.com

通讯作者:韦鲁滨(1962—),男,江苏扬州人,教授,博士。E-mail:wlb@cumtb.edu.cn

引用格式:朱学帅,孙涛,宋昭,等.气流分选技术研究进展[J].洁净煤技术,2024,30(1):22-30.

ZHU Xueshuai, SUN Tao, SONG Zhao, et al. Research progress on airflow separation technology[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(1): 22-30.



移动阅读

## 0 引言

气流分选简称风选,是以空气为分选介质,在气流力和重力共同作用下使固体颗粒按密度、粒度和形状等特征分类的方法<sup>[1]</sup>。基于阿基米德原理,轻颗粒和重颗粒在空气介质中呈现不同运动状态,轻颗粒上浮,重颗粒下沉,从而实现分离。采用气流实现物料分离最早可追溯到农耕时代,迎风扬起稻谷,利用稻谷颗粒密度差异实现稻谷除杂<sup>[2]</sup>。20世纪初,美国将气流分选技术应用于煤炭分选,并逐渐在其他西方国家推广应用。21世纪初,气流分选引入我国,应用于固废分选领域,后逐步推广至矿业、农业、食品加工等领域<sup>[3-5]</sup>。近年来,气流分选作为一种低碳环保技术,以其低成本、低污染、操作简便、流程简单等优势广泛应用于各工业领域。

气流分选技术推广应用的同时,相关理论研究快速发展。由于空气介质的可压缩性,颗粒在气流场中受力复杂,其中主导作用为重力和曳力<sup>[6]</sup>,而曳力解析十分困难,早期研究以理论与试验相结合方式为主,随着算力不断提升,采用计算流体力学分析曳力得到广泛共识。

笔者主要介绍气流分选原理、分选过程受力分析、行业应用现状及气流分选技术研究进展。探讨气流分选在应用中存在的主要问题,并对气流分选未来趋势进行展望,为“双碳”背景下气流分选进一步研究和应用提供方向。

## 1 气流分选技术原理及理论进展

### 1.1 气流分选技术原理

气流分选根据颗粒在气流场中沉降行为差异进行分离。轻产物在气流曳力主导作用下沿气流方向运动,重产物在颗粒重力主导作用下沿气流反向运动。根据分选机内颗粒流与气流流动方向不同,将气流分选机分为垂直、水平和倾斜3种,如图1所示。

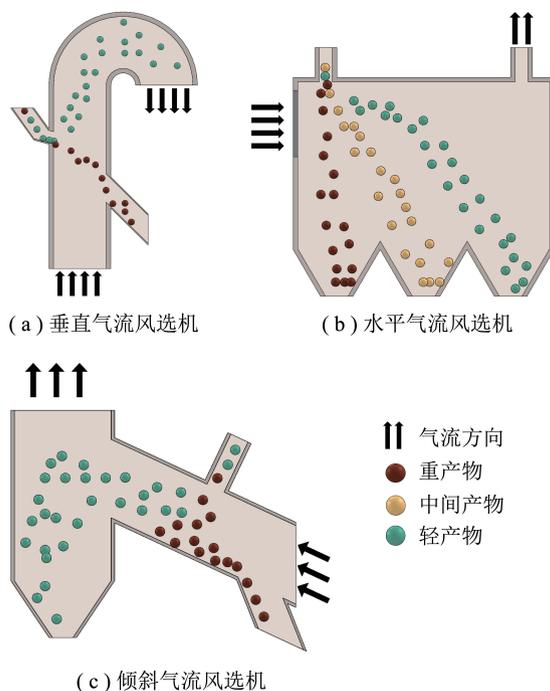


图1 气流分选机分类

Fig.1 Classification of airflow sorter

垂直气流分选的颗粒流与气流平行。由图1(a)可知,物料进入分选区后,颗粒流与气流形成逆流,沉降末速大于气流速度的颗粒在重力作用下逆气流方向运动,成为重产物,沉降末速小于气流速度的颗粒在上升气流的作用下顺气流方向运动,成为轻产物;水平气流分选的颗粒流与气流呈90°夹角。由图1(b)可知,物料由侧向进入分选区后,颗粒竖直方向加速度相同,下落时间相同,但不同颗粒水平方向位移不同,可根据落点差异分别设置轻重产物回收仓,实现轻重产物分离;倾斜气流分选的颗粒流与气流呈0~90°夹角。由图1(c)可知,倾斜气流分选结合了垂直和水平气流分选的特点,气流曳力分力可使颗粒在分选过程中产生水平和垂直方向位移,强化颗粒分散,延长颗粒停留时间,从而提升分选效果。3种气流分选方式的特点及适用领域见表1。

表1 气流分选方式及特点

Table 1 Airflow separation method and characteristics

气流方向	分选原理	特点	适用领域
垂直	轻重颗粒垂直沉降末速不同	轻重产物品位高,分散效果差,易堵塞	矿业、农业
水平	轻重颗粒水平位移不同	不易堵塞,处理量大,适合大颗粒分选	固废、农业
倾斜	轻重颗粒垂直、水平位移不同	分散性好,处理成分复杂物效果好	固废、农业、矿业

### 1.2 气流分选过程受力分析

气流分选过程中,颗粒在气流场中主要受自身重力、气流曳力作用。颗粒与气流分选机壁面接触时还会受壁面摩擦力和支持力。此外,还有气流对

颗粒的其他作用力<sup>[7]</sup>,如压力梯度力、附加质量力、Basset力、Saffman力、Magnus力等。颗粒为球形时,受力分析如下:

颗粒自身重力 $G$ 因地球重力场的作用产生,方

向垂直向下:

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_s g, \quad (1)$$

式中,  $d$  为颗粒直径, m;  $\rho_s$  为颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

气流浮力  $F_F$  表示空气介质对颗粒的浮力, 方向向上:

$$F_F = \frac{\pi d^3 \rho_g}{6} g, \quad (2)$$

式中,  $\rho_g$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

颗粒在变速运动过程中, 流体对颗粒周边的流体做功, 产生附加质量力  $F_f$ , 方向与颗粒和流体间相对加速度方向相反。由于空气和分选物料之间密度差过大, 浮力和附加质量力可忽略不计。

$$F_f = -\frac{1}{12} \pi d^3 \rho_g \left( \frac{dv_s}{dt} - \frac{dv_g}{dt} \right), \quad (3)$$

式中,  $v_g$  为气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_s$  为颗粒速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

颗粒两侧流速不同时, 会产生由低速到高速的升力, 即 Saffman 力  $F_s$ , 特别在边界层中表现明显。由于气流分选过程近似为均匀流场, 主分选区不在边界层, 因此可忽略不计。

$$F_s = 1.61 d^2 (\rho_g \mu_g)^{\frac{1}{2}} (v_g - v_s) \left| \frac{dv_g}{dy} \right|^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中,  $\mu_g$  为空气运动黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

Basset 力  $F_B$  为颗粒在黏性流体中作直线变速运动时, 产生的非恒定黏性力。因空气介质黏性很小,  $F_B$  可忽略不计。

$$F_B = \frac{3}{2} d^2 (\pi \rho_g \mu_g)^{\frac{1}{2}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \left[ \frac{d(v_g - v_s)}{dt} \right] d\tau, \quad (5)$$

式中,  $\tau$  为时间, s;  $t$  为当前时刻, s。

颗粒自转时, 气流会产生垂直于转动方向的升力, 即 Magnus 力  $F_M$ , 由于颗粒旋转产生升力, 颗粒自转发生较少时可忽略, 在气流分选中颗粒粒径越小, 自转作用越微弱。

$$F_M = \frac{1}{8} \pi d^3 \rho_s \omega (v_s - v_g), \quad (6)$$

式中,  $\omega$  为角速度,  $\text{rad}/\text{s}$ 。

压力梯度力  $F_P$  是作用在颗粒上的压强合力, 其方向与压力梯度相反, 颗粒两侧压力不一致时, 应考虑压力梯度力。

$$F_P = -\frac{\pi d^3}{6} \text{grad}P = -\frac{\pi d^3}{6} \frac{\partial P}{\partial l}, \quad (7)$$

式中,  $P$  为压强, Pa;  $l$  为压力梯度方向的距离, m。

气流曳力  $F_D$  与流体阻力大小相等, 与颗粒运动方向相反。

$$F_D = \frac{1}{8} \pi C_D d^2 \rho_g (v_g - v_s)^2, \quad (8)$$

式中,  $C_D$  为曳力系数。

曳力是气流分选过程中最重要的力<sup>[8]</sup>, 决定分选效果。曳力求解过程需确定曳力系数<sup>[9]</sup>, 曳力系数由雷诺数决定, 在不同气流流动状态下, 雷诺数适用曳力公式也存在差异<sup>[10]</sup>。曳力系数很难进行精确的理论计算, 多通过经验和半经验模型求解。常见的曳力模型有 Ergun、Wen and Yu、Felice、Koch and Hill 曳力模型等<sup>[11-14]</sup>。

综上, 气流分选过程中颗粒所受合力  $F$  应包括重力、曳力和压力梯度力, 一般受力方程<sup>[15-17]</sup>为

$$F = G + F_D + F_P. \quad (9)$$

将式(9)写成微分形式得到颗粒运动方程:

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{\rho_g}{\rho_s} \left[ \frac{3}{4d} C_D (v_s - v_g)^2 + \frac{dv_g}{dt} \right] - g. \quad (10)$$

以上分析均基于球形颗粒得出, 但实际工况中, 物料多为不规则颗粒, 通常采用近似球形的方法计算。关于非球形颗粒的悬浮速度近似方法应用较多的有3种:

1) 压差阻力法<sup>[18]</sup>使用压差阻力代替曳力计算所得。考虑颗粒迎流面积影响, 但存在模型过于简单、考虑因素过少等问题, 导致计算小颗粒 (<10 cm) 时误差过大:

$$v'_s = \sqrt{\frac{1.6(\rho_s - \rho_g) Vg}{S}}, \quad (11)$$

式中,  $v'_s$  为颗粒悬浮速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $V$  为颗粒体积,  $\text{m}^3$ ;  $S$  为颗粒迎流面面积,  $\text{m}^2$ 。

2) 当量直径法<sup>[19]</sup>将颗粒转化为同体积球同时用形状系数  $K$  修正得到不规则颗粒的近似球形参数。形状系数为固定值, 忽略颗粒最大投影面积和厚度对形状系数的影响。对于片状颗粒, 三维尺寸高度不均匀, 采用固定形状系数计算悬浮速度存在较大误差:

$$v'_s = 3.62 \sqrt{\frac{d_d (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g C_D K}}, \quad (12)$$

式中,  $d_d$  为与颗粒同体积的球体当量直径, m;  $K$  为形状系数。

3) 形状修正系数当量直径法基于当量直径法优化而来, 采用式(13)算出修正形状系数  $K_x$ , 该方法充分考虑厚度和最大投影面积对形状系数的影响, 误差较小:

$$K_x = \frac{2a^2 + 4ah}{\pi d_d^2}, \quad (13)$$

$$v'_s = 3.62 \sqrt{\frac{d_d(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g C_D K_x}}, \quad (14)$$

式中,  $a$  为颗粒底面边长,  $m$ ;  $h$  为颗粒厚度,  $m$ 。

近年来学者基于非球形颗粒曳力模型研究创新性地引入人工智能算法,如闫盛楠等<sup>[20]</sup>基于人工神经网络模型预测非球形颗粒曳力系数。

然而,现有技术难以对气流分选过程的力学行为进行精确解析,更多采用数值模拟方法对流场分布、颗粒运动等近似求解。目前,常用模拟方法有离散元方法(DEM)、计算流体力学(CFD)以及二者的双向耦合方法(DEM-CFD)<sup>[21-22]</sup>。离散相即颗粒运动的模拟常用 EDEM 实现,通过 FLUENT 的 UDF 接口可与 EDEM 实现双向耦合模拟<sup>[23-24]</sup>,完成气流场对颗粒作用力和颗粒对气流作用力的双向耦合计算。雷港等<sup>[25]</sup>耦合模拟米糠、碎米分离的运动过程作为参数调节依据。STANÍCZYK<sup>[26]</sup>使用 CFD-DEM 对煤炭负压气流分选进行模拟,相对误差在 5%~15%。张开兴等<sup>[27-29]</sup>利用 FLUENT 和 EDEM 双向耦合,分别进行茶叶、土豆、莲子壳的分选模拟,得到分选过程设备结构参数与试验操作参数。在气流分选数值模拟过程中,网格划分、模型假设和模型优化都需重点考虑。

## 2 气流分选技术应用进展

### 2.1 气流分选在固废处置领域应用

固废种类繁多,且相互掺杂,资源化处置前需分类和分选。由于固废处置量大,附加值低,要求分离精度不高,宜采用低成本、工艺简单处理方法。此外,固废各物料密度、粒度、形状等特性差异明显,采用空气作为分选介质即可实现物料分离,而无需采用水介质或重介质分选,既节约水资源又降低介质消耗,防止水体污染。

气流分选尤其适用于轻薄物料的分选,如塑料、布料和纸张等<sup>[30]</sup>。杨先海等<sup>[31]</sup>发现分选塑料时,倾斜气流效果优于水平气流;石文天等<sup>[32]</sup>使用卧式风选机分选泥丸、纸球和泡沫球,分选效率达 80%。固废气流分选时受物料性质、设备操作参数、设备结构参数等影响。相关研究表明,颗粒密度差、粒度差、形状系数差越大,分选效果越好,分选风速在一定区间时分选效果较好,给料角度与分选物料的成分构成有关<sup>[33-35]</sup>。

近年来,随着电子产品和新能源行业的飞速发展,气流分选广泛应用于废弃电路板和退役锂电池

回收等领域。ZHU 等<sup>[36]</sup>采用变径脉动气流分选方法强化物料按加速度分离,从而实现锂电池外壳和隔膜的有效脱除;祖磊等<sup>[37]</sup>通过改进卧式分选机结构,结合不同工况调整出口,实现 1~3 mm 锂电池破碎产物的有效分选;KUMAR 等<sup>[38]</sup>采用气流分选方法分离废旧电路板中的金属和塑料,有效降低工艺复杂性,节省后续湿法冶金成本。但以上作业中,气流分选通常是对物料预处理环节的粗分选,无法实现精细分选,分选效率很难达到 95%,应用具有一定局限性。

### 2.2 气流分选在矿业领域应用

矿石开采后含有用矿物和脉石,须通过选矿提高精矿品位、减少脉石含量,以减轻后续作业压力。气流分选作为一种清洁、有效、低成本、不用水、工艺简单的干法分选方法,在煤炭、金属矿、非金属矿分选等领域均有应用。以煤炭分选为例,气流分选特别适用于干旱缺水地区的煤炭、遇水易泥化煤的分选以及动力煤的排矸。但与重介质旋流器、重介浅槽、液固流化床等分选方法相比,气流分选精度偏低,无法实现对炼焦煤的有效分选。

煤炭干法分选领域,我国研究人员分别开发了适用于 50~6mm 煤炭的空气重介质流化床分选机<sup>[39]</sup>、80~0 mm 煤炭的复合式风力跳汰机<sup>[40]</sup>、<6 mm 煤炭的粉煤变径脉动气流分选机<sup>[41]</sup>等,并进行后续模块化、结构化、大型化等工业应用研发。赵跃民等<sup>[42]</sup>开发了模块化干法选煤工艺系统;韦鲁滨等<sup>[43]</sup>提出煤炭干法分选与干燥一体化技术,引入振动力场、磁场等附加力场,用于强化气流干法分选效果。

在矿石分选领域,气流分选可用于密度或形状差异较大的矿物分选。如蛭石和脉石密度差最大可达  $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,分选蛭石除杂时,脉石去除率很高,且对矿石中泥土和尾矿清除效果很好,有利于后续作业<sup>[44]</sup>;肖亚雄等<sup>[45]</sup>采用气流分选去除成品沙中云母,初始云母质量分数为 5%,选后云母质量分数降至 2%。

### 2.3 气流分选在农业领域应用

在农业生产加工领域,气流分选广泛用于农产品加工储存前的除杂及农产品质量等级分类分级,如谷物、豆类的壳仁分离,花生、大枣、辣椒等作物中未成熟、破损、病虫害果实的脱除,茶叶等叶茎作物的分选分级,种子良种与坏种的筛选等。不同种类、质量农作物之间的密度、粒度、形状差异显著时,可利用气流分选分离<sup>[46]</sup>。如果仁和果皮形状差异显著,果皮趋向于扁平,易成为轻产物;良种和坏种密

度差异明显,良种饱满密度高,坏种干瘪空洞密度低、粒度小,以上差异均为气流分选的应用创造条件。此外,农产品加工领域多为人工作业,采用大型气流分选设备代替人工手选,既能显著提升农业领域生产效率、自动化水平,又能实现农业集约化。

卧式气流分选机在农业领域应用广泛,适用于多种物质分离。刘正海等<sup>[47]</sup>采用水平卧式风选机分离谷物和茎秆;HU等<sup>[48]</sup>优化卧式风选机结构参数,用于花瓣中黏合花瓣和石头的去除,选后含杂率为0.69%,损失率为2.66%;张德俊等<sup>[49]</sup>设计了一种卧式风选机用于辣椒除杂,选后含杂率为4.62%、损失率为1.80%。对于2种分离物质,垂直风选机分选效果很好。丁贺贺等<sup>[50]</sup>设计了一种正压式风选机,并通过试验和模拟分析了风速对谷物和茎秆分离效果的影响,且与实际分选效果一致性良好。陈旭东等<sup>[51]</sup>设计一种负压风选机用来分选核桃壳仁,混合物料清选率最高可达96.50%,损失率仅0.41%。

### 3 气流分选设备优化

#### 3.1 气流分选设备供风方式优化

传统气流分选的供风方式主要以恒定气流为主,恒定气流分选过程中虽可通过调节风速一定程度改善分选效果,但物料在气流场中因空气介质密度较低,仍按照颗粒沉降末速分选,无法有效分选密度或粒度效应接近的等沉颗粒。此外细粒物料在入料过程中如颗粒聚团,会间接改变颗粒原始粒度,从而影响分选效果。

近年来,研究人员针对改善供风方式进行系统研究。通过引入脉动气流,增加气流加速效应,从而提高分选效果。STESSEL等<sup>[52]</sup>对比分析了不同脉动气流分选与主动气流分选方式,发现主动、脉动气流相结合的分选机分选效率更高;韦鲁滨等<sup>[53]</sup>利用脉动气流与变径结构的复合强化作用提高气流分选对于细粒物料的适应性,实现了细粒煤炭按加速效应分离。此外,引入不同方向的气流或调整给风角度也可强化物料的分散和分离。HAYASHI等<sup>[54]</sup>在气流分选机柱体段不同位置添加节流孔,使气流具有一定加速效应,较短时间内即可实现与主动气流相当的分选效果。李晓等<sup>[55]</sup>在水平气流中加入垂直气流,改变传统单一气流模式,通过二次风选进一步降低杂质含量,提升气流分选在烟草行业的应用价值。刘宁等<sup>[56]</sup>通过调整进风口角度改变分选机内气流场分布及物料运动轨迹,进而实现多产物分选。

#### 3.2 气流分选设备结构优化

气流分选设备另一个主要改进方向是分选机结构优化,优化分选机结构可增强分选机对于分选物料的适用型,提高分选效果。通过改变气流分选机给风结构、布风结构、分选结构、内构件结构等均可改善气流场分布,强化物料在气流场中的分散和分选行为。

在气流分选机结构改进方面,“Z”型气流分选机最典型,如图2(a)所示,有效结合垂直气流分选和斜流分选机的特点,通过变化分选通道几何形状实现多段级联分选<sup>[57]</sup>。李金亮等<sup>[58]</sup>通过改进风选机上壁面形状调节截面面积,使风选机内的气流稳定均匀,以降低错配率,图2(b)所示。ZHONG等<sup>[59]</sup>基于“Z”型风选机在分离腔下部设置激振器促进颗粒分散,如图2(c)所示。段晨龙等<sup>[60-61]</sup>在分选段加入三角形阻尼块实现被动脉动气流分选,阻尼块结构如图2(d)所示,较传统恒定气流分选提升效率6%~8%。KHAMYEY等<sup>[62]</sup>通过在气动通道中安装狭窄的隔板使气流分选机深部空间流场分布更均匀,如图2(e)所示,解决了增大横截面积后气流分散不利于分选的问题,生产效率提升20%。KHARCHENKO等<sup>[63]</sup>设计一种具有鳞片状透气结构的垂直风选机,如图2(f)所示,物料通过鳞片时经历了一次风选分层,从而改善风选效果。

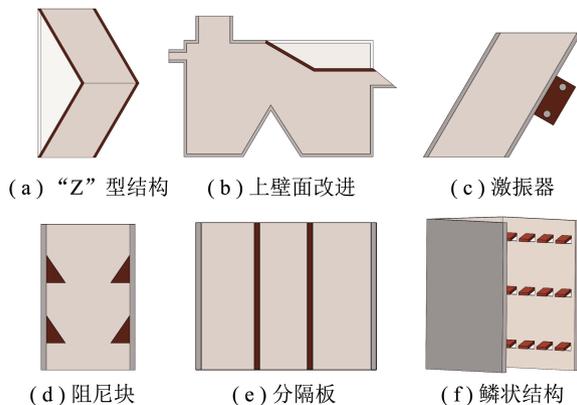


图2 气流分选装置结构优化示意

Fig.2 Structural optimization of airflow separator

### 4 气流分选技术存在问题

气流分选技术以空气为介质的特性,一定程度制约其推广和应用,主要存在问题如下:

1) 装备大型化困难。由于工业应用时对气流分选设备处理量要求较高,而设备放大后,原有流场状态和物料运动状态无法保证。因此,在气流分选设备放大过程中需明确设备相似放大准则,以保证装备大型化的同时,分选效果不受影响。此外,对于

单体设备无法满足处理量要求时,可采用多单体并联方式提高设备处理量。

2)对颗粒干燥度、松散度要求较高。部分固废和矿石等物料含水量高,易导致颗粒结团。另外塑料膜、隔膜、线丝状物的存在也会使物料团聚,难以分散,从而影响分选效果。对于潮湿物料,可采用预先干燥或分选干燥一体化方式处理;对于结团或不易松散的物料,应更改入料方式或优化入料结构。

3)细粒及薄片物料分选效果较差。细颗粒或薄片物料在气流分选过程中密度作用较弱,易受形状、粒径影响,难以实现按密度有效分选。对于细粒物料宜提前筛分,采用窄粒级入料方式;对于薄片物料在入料前应保证颗粒形状一致性,强化其按密度或粒度差异分选。

4)分选设备仍需优化改进,分选效率有待进一步提高。气流分选采用空气作为分选介质,分选密度与介质密度相差较大,相较湿法分选,气流分选效率仍较低。应持续探索装置结构、供风等方面的改进,以适应不同领域对于高回收率、高分选效率的需求。

## 5 结语及展望

历经百年发展,气流分选技术因其污染低、成本低、工艺简单等优势在农业、矿业、固废等领域广泛应用。虽然学者们在气流分选理论、技术研究方面取得较大进展,但在装备大型化、物料适应性、细粒物料分选等方面仍存在局限性。展望未来,克服气流分选设备缺陷,提升不同领域适应性,开展矿物分选、流体力学、人工智能领域交叉学科研究势在必行,主要发展趋势如下:

1)气流分选系统控制与在线检测智能化。单一气流分选设备操作简单,易于控制,但气流分选系统需智能化控制,以实现设备参数精准实时调节及可视化反馈。在分选作业和在线检测环节可引入人工智能手段对物料及产物进行实时检测,并针对物料性质变化进行智能精准调控。

2)气流分选装备大型化。气流分选应用领域,如矿业、农业、固废等均需处理大宗物料,对处理量要求极高,如何在保证分选效果的前提下实现设备大型化、大处理量是研究重点。通过研究气流分选设备的相似放大准则,将实验室装置适度放大转移至工业生产中。

3)气流分选效率精细化。气流分选精度相比水介质和重介质分选还存在明显差距,特别是对于细粒物料的分选。我国矿山分布特点决定了对干法

分选的巨大需求,但气流分选目前对矿石颗粒的干燥性要求较高,对于黏湿矿物分选效果较差。未来应重点攻克西部干旱缺水地区赋存矿种的气流分选问题,提高产品回收率和品位,强化设备应对各种状况的能力。

4)气流分选工艺联合化。气流分选在各类工艺环节前期的分选有显著优势,以其低成本、低能耗可有效取代人工拣选等现有的粗选环节。因此,未来应探索气流分选结合其他技术如磁选、电选、重选等。结合物料特点,充分利用各种分选技术优势,实现高效、低碳分选。

## 参考文献(References):

- [1] 吴鸿钧. 城市垃圾处理技术及应用前景[J]. 环境保护, 2000(12):14-16.  
WU Hongjun. Application aspects and disposal technologies of refuse[J]. Environmental Protection, 2000(12):14-16.
- [2] 谢天,杨会宾,郭亚丽,等. 我国稻米加工工艺的沿革与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4):71-76.  
XIE Tian, YANG Huibin, GUO Yali, et al. Evolution and prospect of rice processing technology in China [J]. China Rice, 2021, 27(4):71-76.
- [3] 刘明政,李长河,曹成茂,等. 核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术与装置研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20):294-310.  
LIU Mingzheng, LI Changhe, CAO Chengmao, et al. Research progress of key technology and device for size-grading shell-breaking and shell-kernel separation of walnut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20):294-310.
- [4] 胡志超,王海鸥,吴峰,等. 负压谷物风选机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2008(3):183-186.  
HU Zhichao, WANG Haiou, WU Feng, et al. Design and performance testing of negative pressure grain air separator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008(3):183-186.
- [5] 赖雄鸣,赖琴芳,张宝裕,等. 建筑垃圾轻物质分离风选装置的设计[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7):4245-4250.  
LAI Xiongming, LAI Qinfang, ZHANG Baoyu, et al. Design of winnowing equipment for separated of light construction waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(7):4245-4250.
- [6] 魏良俊,王昊利. 通道层流场中单颗粒惯性横向迁移的数值研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2023, 36(1):53-60.  
WEI Liangjun, WANG Haoli. Numerical study on the inertial lateral migration of a single particle in a channel laminar flow field [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2023, 36(1):53-60.
- [7] 孙国刚,李静海,巩馥洲,等. 颗粒流体两相流动的随机分析[J]. 科学通报, 2000, 45(3):256-259.  
SUN Guogang, LI Jinghai, GONG Fuzhou, et al. Stochastic

- analysis of two-phase flow of granular fluids [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(3): 256-259.
- [8] 邓磊, 李瑞宇, 黄笑乐, 等. 基于正交试验的曳力模型改进研究 [J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版): 1-9 [2023-12-03]. <https://doi.org/10.13245/j.hust.240668>.
- DENG Lei, LI Ruiyu, HUANG Xiaole, et al. Study on improvement of drag model based on orthogonal test [J/OL]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition): 1-9 [2023-12-03]. <https://doi.org/10.13245/j.hust.240668>.
- [9] 陆勇, 宋振华, 钟文琪, 等. 高速摄影法测量圆盘状颗粒曳力系数的方法研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(2): 351-355.
- LU Yong, SONG Zhenhua, ZHONG Wenqi, et al. Study of high speed photography method for measuring drag coefficients of non-spherical disc type particles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(2): 351-355.
- [10] 龚升高, 高宁宁, 曾乐林, 等. 宽 Re 范围内气泡和液滴曳力系数的关联模型 [J]. 过程工程学报, 2021, 21(6): 649-657.
- GONG Shenggao, GAO Ningning, ZENG Lelin, et al. A correlation model of drag coefficient for bubbles/droplets in a wide Reynolds number range [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(6): 649-657.
- [11] WANG X M, HAN C Y W, WU B, et al. Experimental study on the ventilation resistance characteristics of paddy grain layer modelled with response surface methodology [J]. Applied Sciences-basel, 2021, 11(17): 7826.
- [12] ASKARIPOUR H, MOLAEI DEHKORDI A. Simulation of 3D freely bubbling gas-solid fluidized beds using various drag models: TFM approach [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 100: 377-390.
- [13] DI Felice R. The voidage function for fluid-particle interaction systems [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(1): 153-159.
- [14] KOCH D L, HILL R J. Inertial effects in suspension and porous-media flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(1): 619-647.
- [15] LING Y, PARMAR M, BALACHANDAR S. A scaling analysis of added-mass and history forces and their coupling in dispersed multiphase flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 57: 102-114.
- [16] 齐学义, 程效锐, 肖聪, 等. 湍流边界层中单颗粒的运动方程 [J]. 兰州理工大学学报, 2004(3): 55-57.
- QI Xueyi, CHENG Xiaorui, XIAO Cong, et al. Motion equation of single particle in turbulent boundary layer [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004(3): 55-57.
- [17] 李振中, 魏进家, 宇波. 稀疏气固两相槽道湍流中颗粒受力的理论和数值分析 [J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(2): 146-152.
- LI Zhenzhong, WEI Jinjia, YU Bo. Theoretical and numerical analyses of interphase forces in dilute particle-laden channel turbulence [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(2): 146-152.
- [18] 袁成宇, 王娟, 陈致水, 等. 片状体最小悬浮速度的计算模型 [J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 62-65.
- YUAN Chengyu, WANG Juan, CHEN Zhishui, et al. A calculation model for the minimum suspension velocity of a sheet [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 62-65.
- [19] 吕子剑, 曹文仲, 刘今, 等. 不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试 [J]. 化学工程, 1997(5): 44-48, 6.
- LYU Zijian, CAO Wenzhong, LIU Jin, et al. Calculation and testing of suspension velocity of solid particles with different particle sizes [J]. Chemical Engineering, 1997(5): 44-48, 6.
- [20] 闫盛楠, 唐天琪, 任安星, 等. 基于神经网络模型的非球形颗粒曳力系数预测 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2171-2175.
- YAN Shengnan, TANG Tianqi, REN Anxing, et al. Prediction of drag coefficient using artificial neural network in a non-spherical particle system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(10): 2171-2175.
- [21] 王亚冲, 陈景鹏, 崔村燕, 等. 受限空间内湍流模型对气体扩散仿真结果的影响 [J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 123-127.
- WANG Yachong, CHEN Jingpeng, CUI Cunyan, et al. Impact of turbulence model on numerical simulation results of gas diffusion in confined space [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 123-127.
- [22] 张佳宝, 崔丽杰, 杨宁. 曳力模型和湍流模型对内环流反应器数值模拟的影响 [J]. 化工学报, 2018, 69(1): 389-395, 533.
- ZHANG Jiabao, CUI Lijie, YANG Ning. Effects of drag model and turbulence model on simulation of air-lift internal-loop reactor [J]. CIESC Journal, 2018, 69(1): 389-395, 533.
- [23] 胡文清, 詹杰民. 一种在 Fluent UDF 中使用 IMSL Fortran 数值库的方法 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(3): 31-35.
- HU Wenqing, ZHAN Jiemin. A method of using IMSL Fortran numerical libraries in Fluent UDF [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Natural Science Edition), 2017, 56(3): 31-35.
- [24] LIU D Y, BU C S, CHEN X P. Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM [J]. Computers & Chemical Engineering, 2013, 58: 260-268.
- [25] 雷港, 余南辉, 范吉军, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的米糠碎米分离装置的试验研究 [J]. 包装与食品机械, 2022, 40(5): 76-83.
- LEI Gang, YU Nanhui, FAN Jijun, et al. Experimental study on rice bran broken rice separation device based on EDEM-Fluent coupling [J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(5): 76-83.
- [26] STAŃCZYK K. Modelling of hard coal beneficiation process utilizing negative pressure pneumatic separator [J]. Energies, 2020, 13(19): 5174.
- [27] 张开兴, 马国良, 胡芳源, 等. 绿茶风选装备设计与性能试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(S2): 366-374, 387.
- ZHANG Kaixing, MA Guoliang, HU Fangyuan, et al. Design of

- equipment and experiment on air separation performance of green tea [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (S2): 366-374, 387.
- [28] 李晓晖,魏忠彩,苏国梁,等. 基于气固耦合的气筛式薯-石清选装置参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报; 1-13 [2024-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20231106.1721.008.html>.  
LI Xiaohui, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Parameter optimization and experiment of air-screen potato-stone cleaning device based on gas-solid coupling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery; 1-13 [2024-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20231106.1721.008.html>.
- [29] 马秋成,雷林韬,卢安舸,等. 基于CFD-DEM耦合法的莲子壳仁分离装置优化与试验分析[J]. 食品与机械, 2016, 32 (12): 87-91.  
MA Qiucheng, LEI Lintao, LU Ange, et al. Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel based on CFD-DEM coupling method[J]. Food & Machinery, 2016, 32 (12): 87-91.
- [30] 孙鹏文,王飞,闫金顺,等. 基于DPM的城市生活垃圾卧式气流分选流场仿真分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2013, 32(2): 101-106.  
SUN Pengwen, WANG Fei, YAN Jinshun, et al. Simulation and analysis on horizontal flow separating field of urban garbage based on DPM [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 32(2): 101-106.
- [31] 杨先海,吕传毅. 塑料优化分选设备风选运动特性分析和试验[J]. 机械工程学报, 2007(2): 132-135.  
YANG Xianhai, LYU Chuanyi. Kinematic properties and test of plastics' optimal separation equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007(2): 132-135.
- [32] 石文天,刘玉德,张浩,等. 基于FLUENT的城市生活垃圾风选仿真与试验研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 402-407.  
SHI Wentian, LIU Yude, ZHANG Hao, et al. Simulation and experimental research of city life garbage winnowing based on Fluent [J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 402-407.
- [33] 王霞,胡春芳. 城市生活垃圾卧式气流分选机性能影响因素分析及结构设计[J]. 内蒙古科技与经济, 2013(9): 103-104.  
WANG Xia, HU Chunfang. Analysis of performance influencing factors and structural design of horizontal air flow sorter for urban domestic waste[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2013(9): 103-104.
- [34] 李兵,董志颖,赵由才,等. 城市生活垃圾卧式气流分选特性研究[J]. 环境工程, 2012, 30(3): 96-101.  
LI Bing, DONG Zhiying, ZHAO Youcai, et al. Study on characteristics of the horizontal air separation for municipal solid waste [J]. Environmental Engineering, 2012, 30(3): 96-101.
- [35] 高春雨,郭仁宁,纪俊红. 城市生活垃圾风力分选效率研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(S1): 278-279.  
GAO Chunyu, GUO Renning, JI Junhong. Investigation of efficiency on sorting municipal solid waste by wind power [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2005, 24 (S1): 278-279.
- [36] ZHU X, ZHANG C, FENG P, et al. A novel pulsated pneumatic separation with variable-diameter structure and its application in the recycling spent lithiumion batteries [J]. Waste Management, 2021, 131: 20-30.
- [37] 祖磊,李华兵,朱华炳,等. 废动力电池破碎产物风选过程参数分析[J]. 电源技术, 2021, 45(9): 1122-1124, 1163.  
ZU Lei, LI Huabing, ZHU Huabing, et al. Parameters analysis of crushed products of spent power batteries in process of pneumatic separation [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45 (9): 1122-1124, 1163.
- [38] KUMAR V, LEE J C, JEONG J, et al. Novel physical separation process for eco-friendly recycling of rare and valuable metals from end-of-life DVD-PCBs [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 111: 145-154.
- [39] 赵跃民,李功民,骆振福,等. 一种新型的高效干法选煤设备[J]. 中国煤炭, 2009, 35(10): 90-92.  
ZHAO Yuemin, LI Gongmin, LUO Zhenfu, et al. A new type of dry high-efficiency separator for coal [J]. China Coal, 2009, 35 (10): 90-92.
- [40] 刘维生. 风力跳汰干法选煤系统的研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(11): 95-98.  
LIU Weisheng. Research on air jigging system for dry coal separation [J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(11): 95-98.
- [41] 韦鲁滨,张振,朱长勇,等. 宁东矿区粉煤变径脉动气流干法提质联合工艺研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 46-51.  
WEI Lubin, ZHANG Zhen, ZHU Changyong, et al. Combined process of fine coal dry beneficiation using variable-diameter pulsed airflow in Ningdong mining area [J]. Coal Engineering, 2021, 53 (3): 46-51.
- [42] 赵跃民,李功民,骆振福,等. 模块化干法重介质流化床选煤理论与工业应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1566-1571.  
ZHAO Yuemin, LI Gongmin, LUO Zhenfu, et al. Theory of modularized dry coal beneficiation and its application based on an air dense medium fluidized bed [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (8): 1566-1571.
- [43] 韦鲁滨,朱学帅,马力强,等. 褐煤空气重介质流化床干法分选与干燥一体化研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 125-128.  
WEI Lubin, ZHU Xueshuai, MA Liqiang, et al. Study on integration of lignite air heavy medium fluidized bed dry separation and drying [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41 (6): 125-128.
- [44] 李滚源,张佩英,何秀昌. 新疆蛭石选矿工艺研究[J]. 非金属矿, 2000(1): 32-33, 47.  
LI Gunyuan, ZHANG Peiying, HE Xiuchang. Research on Xinjiang vermiculite beneficiation process [J]. Non-Metallic Mines, 2000(1): 32-33, 47.
- [45] 肖亚雄,唐建国,陈威,等. 机制砂游离云母风选试验研究[J]. 水力发电, 2021, 47(9): 83-86.  
XIAO Yaxiong, TANG Jianguo, CHEN Wei, et al. Experimental study on free mica winnowing of machine-made sand [J]. Water Power, 2021, 47(9): 83-86.

- [46] PANASIEWICZ M, SOBCZAK P, MAZUR J, et al. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(3): 603-608.
- [47] 刘正海, 马学东, 陈广慧, 等. 基于 DEM-FLUENT 耦合仿真谷物颗粒风选研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(7): 50-56.  
LIU Zhenghai, MA Xuedong, CHEN Guanghui, et al. Study on wind-selection of cereal grains based on DEM-FLUENT coupling simulation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(7): 50-56.
- [48] HU Z Z, ZENG H F, GE Y, et al. Simulation and experiment of gas-solid flow in a safflower sorting device based on the CFD-DEM coupling method [J]. *Processes*, 2021, 9(7): 1239.
- [49] 张德俊, 张小明, 吴获, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的辣椒清洗仿真研究[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(7): 87-96.  
ZHANG Dejun, ZHANG Xiaoming, WU Di, et al. Simulation of pepper cleaning based on DEM-CFD coupling [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(7): 87-96.
- [50] 丁贺贺, 石加联, 马学东, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的谷物垂直气流风选仿真试验[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(6): 190-197.  
DING Hehe, SHI Jialian, MA Xuedong, et al. Simulation experiment of grain vertical air separation based on DEM-CFD coupling [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(6): 190-197.
- [51] 陈旭东, 胡国玉, 赵腾飞, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的核桃壳仁混合物负压风选仿真研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(6): 1017-1027.  
CHEN Xudong, HU Guoyu, ZHAO Tengfei, et al. Simulation study on negative pressure winnowing of walnut kernel mixture based on CFD-DEM coupling [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(6): 1017-1027.
- [52] STESSEL Richard Ian, JEFFREY Peirce. Comparing pulsing classifiers for waste to energy [J]. *Journal of Energy Engineering*, 1986, 112: 1-13.
- [53] 韦鲁滨, 李大虎, 陈赞歌, 等. 颗粒在脉动气流场中受力和分选数值模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(1): 162-168, 176.  
WEI Lubin, LI Dahu, CHEN Zange, et al. Numerical simulation of force and separation on particles in pulsing airflow [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(1): 162-168, 176.
- [54] HAYASHI N, OKI T. Effect of orifice introduction on the pneumatic separation of spherical particles [J]. *Materials Transactions*, 2014, 55(4): 700-707.
- [55] 李晓, 熊安言. FX6 型就地风选器在梗签风选中的应用[J]. *烟草科技*, 2006(8): 9-11.  
LI Xiao, XIONG Anyan. Application of in site pneumatic sliver classifier FX6 [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2006(8): 9-11.
- [56] 刘宁, 贺利乐. 城市生活垃圾塑料风选效率及影响因素分析研究[J]. *机械设计与制造*, 2017(1): 62-64, 68.  
LIU Ning, HE Lile. Analysis on the factors of winnowing efficiency and influence of city life garbage plastic winnowing machine [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(1): 62-64, 68.
- [57] KAAS A, MÜTZE T, PEUKER U A. Review on zigzag air classifier [J]. *Processes*, 2022, 10(4): 764.
- [58] 李金亮, 吕传毅, 杨先海. 风选通道分析及优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2009(2): 10-12.  
LI Jinliang, LYU Chuanyi, YANG Xianhai. Simulation and optimization of flow field of bellows [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(2): 10-12.
- [59] ZHONG X, LIU W, HAN J, et al. Pneumatic separation for crushed spent lithium ion batteries [J]. *Waste Management*, 2020, 118: 331-340.
- [60] 段晨龙, 何亚群, 赵跃民, 等. 阻尼式脉动气流分选装置处理电子废弃物的基础研究[J]. *环境工程*, 2005, 23(4): 53-55.  
DUAN Chenlong, HE Yaquin, ZHAO Yuemin, et al. The fundamental study on the reutilization of electronic scrap by passive pulse air classifiers [J]. *Environmental Engineering*, 2005, 23(4): 53-55.
- [61] 何亚群, 王海锋, 段晨龙, 等. 阻尼式脉动气流分选装置的流场分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(5): 574-578.  
HE Yaquin, WANG Haifeng, DUAN Chenlong, et al. Numerical simulation of airflow patterns within passive pulsing air classifiers [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(5): 574-578.
- [62] KHAMYEV V, GULYEV A, BOIKO A. Justification of the design of pneumatic sorting machine for the preparation of selection seeds [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 224: 05008.
- [63] KHARCHENKO S, BORSHCH Y, KOVALYSHYN S, et al. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(10): 4383.