基于风力分选的轻细烧结燃料颗粒分离技术

戴 波[1]，谭潇玲[1]，魏进超[1]，张 震[1]，王兆才[1]，刘 臣[1]，卢兴福[1]，胡 昆[2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 湘潭大学 机械工程与力学学院，湖南 湘潭 411105）

摘要：燃料粒度是影响烧结过程性能、能耗与产、质量的关键因素。粒度过粗（>3 mm）或过细（<0.5 mm）均会降低燃烧效率与传热效果，导致烧结矿产量与质量下降。为解决烧结燃料因粒度不均、细粉含量高易引起团聚及常规筛分堵孔的问题，实现小于 0.5 mm 细粉的高效去除与粒度优化，本研究提出基于流化床原理的燃料风选分离技术。首先系统测量了烧结燃料的物性参数（包括粒径分布、密度、含水率及摩擦特性等），并据此设计了直孔式布风板，通过理论分析确定了临界流化速度、终端速度及悬浮速度等关键流体力学参数。随后，搭建了风选试验平台，系统研究了送风速度、布风板结构参数（开孔率、倾角）、料层厚度及风选时间对分离效率的影响。试验结果表明：在优化参数组合（开孔率 5%、倾角 1°～4°、送风速度 15～16 m/s、料层厚度 20～35 mm、风选时间≥20 s）下，小于 0.5 mm 细粉去除率可达 80% 以上，有效实现了燃料粒度的精准调控。该技术不仅显著提升了燃料的燃烧效率，也为烧结工序的低碳化改造提供了可行的技术路径。

关键词：烧结燃料；风选分离；粒度控制；流化床
中图分类号：TF046.4 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）03－0030－11
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.044

Separation technology for light and fine sintered fuel particles in air separation

DAI Bo[1], TAN Xiaoling[1], WEI Jinchao[1], ZHANG Zhen[1], WANG Zhaocai[1], LIU Chen[1], LU Xingfu[1], HU Kun[2]
（1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd, Changsha 410205, Hunan, China;
2. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China）

Abstract: Fuel particle size is the key factor affecting the performance, energy consumption, yield and quality of the sintering process. Particle sizes that are too coarse (>3 mm) or too fine (<0.5 mm) will reduce combustion efficiency and heat transfer effectiveness, leading to a decrease in the yield and quality of the sintered products. In order to solve the problems of uneven particle size and high fine powder content of sintered fuel that are easy to cause agglomeration and conventional screening hole blocking, and to achieve efficient removal and particle size optimization of fine powder less than 0.5 mm, therefore a fuel air separation technology based on the principle of fluidized bed is proposed. Firstly, the physical parameters of the sintered fuel (including particle size distribution, density, moisture content and friction characteristics) are systematically measured, and the straight-hole air distribution plate is designed accordingly, and the key hydrodynamic parameters such as critical fluidization velocity, terminal velocity and suspension velocity are determined through theoretical analysis. Subsequently, a winnowing test platform is built to systematically study the effects of air supply speed, structural parameters of air distribution panel (aperture rate, inclination angle), material layer thickness and winnowing time on the

收稿日期：2025－10－23；**修回日期**：2026－01－07
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2023YFC3707001）
作者简介：戴 波（1987—），男，高级工程师，从事冶金、环保技术及装备方面的研究。
通信作者：谭潇玲（1996—），女，工程师，从事冶金、环保技术及装备方面的研究。

separation efficiency. The results show that under the optimal parameter combination (opening rate of 5%, inclination angle of 1° ~ 4°, air supply speed of 15 ~ 16 m/s, material layer thickness of 20 ~ 35 mm, and winnowing time ≥20 s), the removal rate of fine powder less than 0.5 mm can reach more than 80%, which effectively realizes the precise control of fuel particle size. This technology not only significantly improves the combustion efficiency of fuel, but also provides a feasible pathway to achieve low-carbon transformation in the sintering process.

Key words: sintered fuel; air separation; particle size control; fluidized bed

钢铁企业要提升市场竞争优势，必须着力压缩生产成本；而提高燃料使用效率，则是实现这一目标的关键路径之一。目前，燃料的粒度分布是制约其燃烧效果的一个核心要素，它显著关系到烧结过程的稳定性、产物的质量指标以及系统的整体能耗。研究表明，0.5 ~ 3.0 mm 是较为理想的燃料粒度范围，其中 1 ~ 3 mm 粒级的燃烧效率最高，燃料粒度过粗(>3 mm)或过细(<0.5 mm)均对烧结过程的燃烧速度与传热效率不利，从而降低燃料利用率，影响烧结矿的产量与质量[1-2]。燃料粒度过粗会导致燃烧带变宽、透气性下降、料层偏析加剧，造成下部过熔、上部强度差；粒度过细则燃烧过快，高温持续时间短，液相反应不充分，成品率降低[3]。因此，控制燃料粒度一方面可以提高烧结矿生产率，另一方面可以减少原料中固体燃料的配入量，从而达到节能减碳的效果[4]。

当前烧结燃料粒度控制主要依赖机械筛分[5-6]，但存在堵孔、效率低、细粉去除不彻底等问题。为解决这些难题，风选分离技术作为一种基于气固两相流动的高效干法分级方法，近年来在农林、矿产、能源及食品加工等产业领域得到广泛应用与深入研究。这些研究揭示了风速、倾角、风口开度等参数对分离效果的显著影响，并验证了响应面法、正交试验在参数优化中的有效性[7-8]，同时在多级风选中明确了最佳风速范围与结构设计原则[9-10]。对于非球形、不规则物料的处理，部分学者提出了等效颗粒建模、悬浮速度区间估计、形状修正系数等方法[11-13]，解决了传统测量与仿真中的难点，为烧结燃料这类粒度差异小、易团聚的物料提供了分级新思路。此外，布风板作为风选与流化床中的关键部件，其开孔率、阻力特性与结构形式对内部流场均匀性、压降分布及传质行为具有决定性影响。研究表明，合理设计布风板开孔率可显著改善逆流烟气余热回收塔内流场均匀性[14]，而布风板阻力的变化则会对反应器内气体流动与传质过程产生耦合影响，甚至在床层不同高度引起参数反向变化[15]。在结构创新方面，多级风选装置、集成化风选装备等设计[16-17]，为烧结燃料风选系统的集成化、高效化与低阻化提供了工程参考。近年来，CFD-DEM 耦合数值方法已成为研究气固两相流动与分离过程的重要手段，其在农业食品加工等系统中的成功应用，为理解复杂物料在气流中的运动机理、优化装置结构与操作参数提供了可靠工具。综上所述，风选技术在多个行业的成熟应用与相关仿真、优化方法的不断发展，为烧结燃料的粒度控制提供了坚实的理论与技术基础。基于此，本研究将流化床风选技术引入该领域，通过系统的试验研究与参数优化，深入探讨送风速度、布风板结构及料层厚度等关键因素对细粉去除效果的影响，旨在实现烧结燃料粒度的精准调控，提升燃烧效率，从而为烧结工序的低碳化改造提供可行技术路径。

1　烧结物料特性与团聚物料的风选原理

1.1　烧结燃料特性

1.1.1　物性参数

固体燃料是烧结过程采用的主要燃料之一，包括焦炭和无烟煤两种类型。对于烧结轻质细粉燃料风选装置的研发，充分了解燃料特性是风选方案设计的基础。因此，利用粉粒体试验室的相关设备对烧结燃料的物性参数进行了测量，包括含水率、堆积角、粒径分布、接触参数及其他物性参数等，测量结果如表 1 ~ 4 所示，测量过程中采用的固体燃料来自于某钢铁厂生产用原料。

表 1　燃料堆积角

Table 1　Repose angle of fuel

含水率/%	0	2	4	6	8.24(原矿)
堆积角/(°)	31	32	33	41	43

表 2 燃料粒径分布(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of fuel %

≥3 mm	(3.00,0.50) mm	[1.43,0.50) mm	[0.50,0.15) mm	≤0.15 mm
12.83	28.54	28.31	19.16	11.16

表 3 燃料接触参数

Table 3 Contact parameters of fuel

接触类别	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
煤 - 煤	0.5	0.5	0.40
煤 - 铁板	0.5	0.4	0.05

表 4 燃料其他物性参数

Table 4 Measurement table for other physical properties of sinter fuel

堆积密度/($kg\cdot m^{-3}$)	真密度/($kg\cdot m^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa	含水率/%	挥发分/%
630	1 700	0.3	$7x10^9$	9.49	5.25

1.1.2 物料状态分析

烧结燃料具有含水率高、粒径细、粒级差异小、产量高等特点，其自然状态如图 1 所示。由于燃料之间受到液桥力、范德华力和机械咬合力等共同作用，导致团聚现象严重，除了小颗粒团聚在一起外，还容易出现小颗粒黏附在大颗粒上的现象，常规的筛分设备筛分时极易堵孔，难以满足要求，如图 2 所示。因此，要想实现烧结燃料 <0.5 mm 粒级的精准去除，首先必须实现物料的充分分散，然后在此基础上，引入可实现细粉精确分级的分级装置。

1.2 团聚物料的风选原理

针对前文所述烧结燃料含水率高、易团聚且难以通过常规机械筛分实现精准分级的难题，引入风选技术是打破这一技术瓶颈的有效途径。风选技术的核心在于利用不同颗粒在气流中空气动

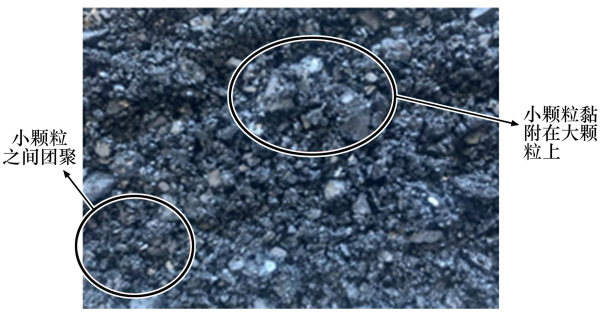


图 1 燃料团聚现象

Fig. 1 Agglomeration of fuel particles



图 2 燃料筛分现状

Fig. 2 Current status of fuel screening process

力学特性的差异来实现气固分离。为了将这一风选原理高效落地，目前工业与试验中采用的主要核心分级设备便是气固流化床。流化床作为风选的载体具有得天独厚的优势，它能够利用自下而上的均匀气流提供强烈的剪切与扰动，打破颗粒间的液桥力与机械咬合力，实现团聚物料的充分分散。因此，深刻理解流化床的气固两相流动机制是优化风选工艺的前提，其具体分离原理如下所述。

1.2.1 流化床概述

在干燥设备中，当颗粒物料置于分布板上，并从床层底部通入气体时，随着表观气速增大至临界值，床内颗粒将由静止转为剧烈的悬浮运动状态，呈现出类似流体沸腾的特征，此装置即定义为流化床。气固流化床的流型并非单一不变，而是受到颗粒物性、床体结构及操作气速等多参数的协同影响。在气流速度由低至高的连续变化过程中，系统将依次经历颗粒静止的固定床、气泡生成的鼓泡床、流动紊乱的湍流床、颗粒均匀扩散的快速床，并最终发展为气力输送状态。

下面结合物料运动状态和床层压降变化情况等对固定床、流化床和气力输送 3 个阶段进行详细的介绍。

(1) 固定床。固定床对应于低流体速度的操作区间，其特征是静态堆积的颗粒在流体穿过时保持相对位置不变。通过测定流体空塔速度(v_0)与对应床层压降(ΔP)的关系，并在双对数坐标中进行标绘，可得到如图 3 所示的 AB 段那样，ΔP 随v_0而上升。

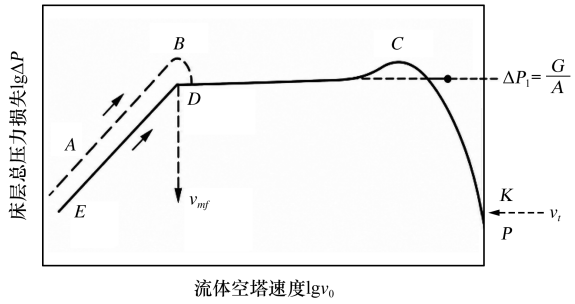


图 3　流体通过固体颗粒层时 ΔP 与 v_0 的关系

Fig. 3　Relationship between ΔP and v_0 for fluid flow through a packed bed of solid particles

（2）流化床。当流体流速超过固定床阶段的 B 点(即临界流化点)后，床层压降 ΔP 趋于稳定，固体颗粒开始脱离静止状态，产生位移并做不规则运动，标志着床层进入流化状态，形成流化床。随流速进一步提高，颗粒运动加剧，但在达到带出速度前，颗粒仍存留于床层内。在此流化阶段，系统具备如密度、导热性等确定物性，且床层高度与空隙率随气速增加而增大，而床层压降 ΔP 则基本维持恒定，约等于单位截面床层内颗粒的质量，此时可见清晰的床层界面。临界流化点(B 点)为 $\Delta P - v_0$ 关系曲线的转折点，超过此点后压降稳定于 ΔP_{mf} 直至 C 点。若从流化状态降低流速，床层沿 DE 线返回固定床，对应 D 点的流速称为临界流速 v_{mf}。工程上常将 B、D 两点视为重合，其间广阔的流速范围(B/D 至 C 点)即为稳定流化区，在此范围内颗粒始终保持流化(由于床层的膨胀抵消了阻力的增加,床层压降保持基本恒定为重力 G 与床层横截面积 A 的比值)，其运动剧烈程度则随实际流速变化。

（3）气力输送。进一步提高流化床内的流体速度，当流体速度至超过图 3 所示的 C 点(即流速大于 v_t)，床层内的固体颗粒便无法停留，会全部被高速气流夹带而出，此时的流动形态转变为气力输送，如图 KP 段，此时由于流速过高导致床层结构崩溃，压降随之骤降。

1.2.2　流化速度确定

物理流化速度主要涉及临界流化速度、终端流化速度、颗粒悬浮速度与操作流化速度 4 种。

（1）临界流化速度。当流体垂直向上穿过细颗粒床层时，其流动状态随流速变化呈现典型阶段性特征：在低流速下，流体仅从静止颗粒的间隙中穿过，床层表现为固定床；随流速增大，颗粒间距开始增大，部分颗粒在有限范围内产生波动与移动，床层进入膨胀状态；当流速进一步提高至使全部颗粒恰好悬浮于向上流动的流体中时，系统达到临界流化状态。此时，作用于颗粒的流体曳力与其重力相平衡，颗粒间垂向挤压力趋近于零，同时流体穿过床层任一横截面所产生的压降近似等于该面上颗粒与流体的自重。这一特定状态标志着床层实现初始流化，可称为临界流化床。

因此，物料的流化条件：

$$\Delta PA = (A L_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)\frac{g}{g_c} \tag{1}$$

经重新排列，得出临界流化条件：

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)\frac{g}{g_c} \tag{2}$$

而当 $Re < 20$ 时，固定床压降的计算公式：

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150\frac{(1-\varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3}\frac{\mu u_0}{(\Phi_s d_p)^2} + 1.75\frac{1-\varepsilon_m}{\varepsilon_m^3}\frac{\rho_g u_0^2}{\Phi_s d_p} \tag{3}$$

综合式(2)和式(3)，得：

$$u_{mf} = \frac{(\Phi_s d_p)^2}{150}\frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} g \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} \tag{4}$$

式中：ΔP 为床层压降，Pa；A 为床层的横截面积，mm^2；L_{mf} 为临界流化床层高度，m；ε_{mf} 为临界孔隙率，无量纲；ρ_s 为颗粒密度，kg/m^3；ρ_g 为流体密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；g_c 为重力常数，数值为 1，且无量纲；ε_m 为固定床孔隙率，无量纲；μ 为空气的动力黏度，Pa·s；u_0 为流体表观速度，m/s；Φ_s 为球形度，无量纲；d_p 为平均当量直径，mm；u_{mf} 为临界流化速度，m/s。

代入数据计算得，$u_{mf} = 0.14$ m/s。

（2）终端流化速度。流化床的实际操作气速存在一个有效窗口：其下限由临界流化速度决定，而上限则受制于颗粒被气体夹带的现象。一旦发生夹带，被带离的颗粒需通过循环系统返回床层或补充新物料，以维持过程的连续稳定运行。因此，气体流量的操作上限通常以颗粒的终端速度(即自由沉降速度)为理论参考，其值可由流体力学估算。

$$u_t = \left[\frac{4}{225}\frac{(\rho_s-\rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu}\right]^{1/3} d_p, 0.4 < Re_p < 500 \quad (5)$$

代入数据计算得，u_t = 0.89 m/s。

（3）颗粒悬浮速度。当流化床内操作气速超过颗粒的悬浮速度时，床层内的固体颗粒便无法维持原位，将被气流夹带而离开容器。该悬浮速度在物理上定义：当流体向上的速度与颗粒在其中的自由沉降速度相等时，颗粒处于受力平衡状态，将在某一水平高度附近摆动，此时的速度即为该颗粒的悬浮速度。在此悬浮状态下，颗粒在流体中所受的净重力(即浮重)与流体对其施加的阻力(流体动力)大小相等、方向相反，从而使颗粒保持动态平衡，颗粒的悬浮速度计算过程如式(6)所示。

$$(\rho_s-\rho_g)\frac{\pi}{6}g d^3 = C_D \frac{\pi u_x^2}{8}\rho_s d^2 \quad (6)$$

式中：C_D为阻力系数，无量纲；d 为颗粒直径，mm。

由两者相等，得：

$$u_x = 1.15\sqrt{\frac{(\rho_s-\rho_g)gd}{C_D\rho_g}} \quad (7)$$

综上所述，不同粒径下颗粒的悬浮速度为 d = 0.5 mm 时，u_x = 1.54 m/s；d = 3 mm 时，u_x = 6.56 m/s。

（4）操作流化速度。为了避免从床层中带出固体颗粒，流化床操作气速必须保持在u_{mf}和u_t之间，且操作流化速度 u_0 = (3 ~ 6) u_{mf} = (0.2 ~ 0.6) u_t，则取 u_0 = 0.5 m/s。

1.2.3 流化床层压力损失

根据上文中的相关描述可以知道，在物料流化过程中，床层压降随流体速度的变化经历三个不同的阶段：第一个阶段，流体流速小于物料的临界流化速度，物料呈现出固定床层的形态，床层压降会随着流体流速的增加而增大；第二个阶段，随着流体流速达到物料的临界流化速度，物料呈现出流态化的形态，再增加流体速度，床层的压力损失保持不变，物料停留在床层内不会被流体带走；第三个阶段，流体速度超过物料的终端流化速度时，物料会被流体带出流化床，床层压降会减小。

因此，物料在流化过程中的最大床层压降就是第二阶段所对应的压降，在此阶段，固体颗粒处于完全悬浮状态，其对流体的阻滞作用是构成床层压降的主要根源。因此，流体穿过床层所产生的压力损失，在数值上等于床层横截面上单位面积所承载的固体颗粒平均重力，其计算公式如下。

$$\Delta P = \frac{mg}{A} \quad (8)$$

$$m = L_{mf}A(1-\varepsilon_{mf})(\rho_s-\rho_g) \quad (9)$$

则有：

$$\Delta P = L_{mf}(1-\varepsilon_{mf})(\rho_s-\rho_g)g \quad (10)$$

数据代入，得 ΔP = 163.14 Pa。

1.2.4 流化床层高度

流化床设备的高度主要取决于浓相段高度 H 和稀相段高度 H_1(或分离高度)。而扩大段高度 H_2 主要是决定粉尘回收装置的尺寸。

（1）浓相段高度。该高度是流化床层内流化作用的主要部位，其床层高度关系到产品质量、回收率及操作特性等工艺尺寸，设计中一般由膨胀比 R 来计算。

$$R = \frac{V}{V_0} = \frac{H}{H_0} \quad (11)$$

式中：V 为流化床层体积，m^3；V_0为固定床层体积，m^3；H 为流化床层高度，m；H_0为固定床层高度，m。

根据流化前后床层中的固体体积不变，床层直径 D 一定，可得：

$$H(1-\varepsilon) = H_0(1-\varepsilon_0) \quad (12)$$

其中：$\varepsilon_0 = 1-\frac{\rho_b}{\rho_s}$，$\varepsilon = \left[\frac{18Re+0.36Re^2}{Ar}\right]^{-0.21}$，$Re = \frac{d_p\rho_g u_0}{\mu}$，$Ar = \frac{d_p^3\rho_s g}{\mu^2\rho_g}$

式中：ρ_b为床层堆积密度，kg/m^3；Re 为雷诺数，无量纲；Ar 为阿基米德数，无量纲。

代入公式，得 Re = 16.58、Ar = 3 923.3。

则有 $H = \frac{H_0(1-\varepsilon_0)}{(1-\varepsilon)} = \frac{0.02(1-0.51)}{(1-0.62)}$ = 0.026 m。

（2）稀相段高度。对于一定的操作速度，在沸腾层上部的某一高度以上，固体颗粒的含量就会保持一定量，这个高度就称为分离高度 H_1，稀相段高度的计算公式：

$$H_1 = 1.2 \times 10^3 H_0 Re^{1.55} Ar^{-1.1} \quad (13)$$

将数据代入，得$H_1 = 0.205$ m。

1.3　布风板关键参数设计

1.3.1　布风板结构形式

流化床反应器的核心结构由床层壳体、气体分布器、内部构件(如挡板)、自由空间(即分离段)、气固分离装置、颗粒输送管路及进排料系统等组成。在这些部件中，气体分布板(亦称布风板)作为关键内构件，对维持床层流化质量与操作稳定性具有决定性作用，其功能涵盖支承催化剂床层、实现气体均匀分布与整流、稳定操作工况以及强化传热传质过程。鉴于布风板功能的核心地位，其结构设计需兼顾气流均布与能耗控制：既需具备适当阻力以促进气体均匀分布、增强气固接触并优化流化状态，也应最大限度降低其自身压损，以实现能量高效利用。为达成均匀布风、良好起流与低压降的目标，布风板型式历经持续演进。目前工业应用的布风板种类多样，主要包括多孔板、喷嘴式、泡罩式、风帽式及管栅式等结构；国内实践中常将其划分为直流型、侧流型、密孔型与填充型等类别。对于本文中主要起到流化分选作用的燃料风选装置而言，经过试验证明，为了达到较好的风选效果，料层厚度不宜过厚。因此，风帽式布风板并不适用，本装置中采用具有流化性好、阻力适中、易于设计等优点的直孔式均匀多孔布风板。

1.3.2　布风板阻力特性与开孔率

布风板结构形式不同，通过布风板上小孔流动的阻力系数不同，从而影响其最佳开孔率的大小。目前，布风板的阻力系数多由试验结果计算得到，计算式见式(14)。

$$\Delta p = 1.83 \times 10^{-10} \frac{\varepsilon}{A^2} Q_N^2 (273 + t) \quad (14)$$

式中：Δp 为布风多孔板阻力，Pa；Q_N为 DCS 显示的标态流化风量，m^3/h；A 为布风多孔板面积，m^2；ε 为总阻力系数；t 为流化介质温度，℃。

布风板的阻力系数可由式(15)得出：

$$\varepsilon = \frac{\Delta p}{1.83 \times 10^{-10} u^2 (273 + t)} \quad (15)$$

烧结燃料小试试验平台设计了 3 种规格的多孔板结构，试验过程中可测量管道压降和流速，进而根据上式计算出各自的总阻力系数，计算结果如表 5 所示。

表 5　不同多孔板参数工况下阻力系数

Table 5　Drag coefficients under different operating conditions with varying perforated plate parameters

项目	试验次数	Δp/Pa	u/(m·s^{-1})	t/℃	ε	平均ε
规格 1# 孔径:2.5 mm 开孔率:4.9%	1	200	5.90	9.0	8.59	9.32
	2	380	7.70	9.0	9.58	
	3	680	10.20	9.0	9.77	
规格 2# 孔径:1.5 mm 开孔率:6%	1	250	5.33	10.0	13.11	14.83
	2	500	6.86	10.0	15.83	
	3	750	8.48	10.0	15.54	
规格 3# 孔径:1.5 mm 开孔率:8%	1	200	5.30	9.8	10.62	12.33
	2	400	6.87	9.8	12.64	
	3	680	8.59	9.8	13.74	

多孔型布风板的开孔率可直接通过锐孔理论来设计，计算过程如下。

流化床固体床层压降：

$$\Delta P = L_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)\frac{g}{g_c} \quad (16)$$

$$\Delta P_{d,min} = \mathrm{Max}(0.1\Delta P_{床层}\text{或}35\ \text{mm水柱或}100\Delta P_{进入容器时膨胀}) \quad (17)$$

$$Re = \frac{d_p \rho_g u_0}{\mu} \quad (18)$$

$$u_{or} = C'_d \left[\frac{2 g_c \Delta p_d}{\rho_g}\right]^{1/2} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{u_0}{u_{or}} \quad (20)$$

式中：ΔP 为流化床固体床层压降、$\Delta P_{d,min}$为布风板最小允许压降，Pa；u_{or}为通过布风板微孔的气体速度，m/s；C'_d为锐孔系数，取值为 0.5，无量纲；α 为布风板最小允许压降所对应的开孔率，无量纲；u_0为操作流化速度，m/s。

上述计算过程中，料层厚度取值均为 20 mm，其他料层厚度工况下的参数计算结果如表 6 所示。

2　风选试验与结果讨论

2.1　风选试验

2.1.1　试验装置

烧结轻质细粉燃料风选小试试验平台主要有风选小试试验装置、天平、测速仪、压力表、烘

箱、目径筛、托盘等，其中风选小试试验装置主要由风力输送系统、主体结构、除尘系统等部分

表 6 不同料层厚度工况下设计参数

Table 6 Design parameters under operating conditions with different material bed heights

料层厚度/mm	流化床压力损失/Pa	浓相段高度/m	稀相段高度/m	布风板开孔率/%
20	163.14	0.026	0.205	6.3
25	203.93	0.032	0.256	5.7
30	244.71	0.039	0.308	5.2
35	285.50	0.045	0.359	4.8
40	326.28	0.052	0.410	4.5
45	367.07	0.058	0.461	4.2
50	407.85	0.064	0.513	4.0

组成，主体结构包括上料系统、多孔板、激振器、壳体等，如图 4 所示。

2.1.2 试验参数

在烧结燃料风选过程中，送风速度、抽风负压、多孔板开孔率和孔径、多孔板倾斜角度、料层厚度、风选时间、粒径分布等参数的选取均会对风选效果产生较大的影响。因此，为了确定能获得最佳风选效果所对应的结构参数范围，采用单因素试验的方法基于轻质细粉燃料风选小试试验平台系统开展了系列的风选试验，通过对比不同工况下 <0.5 mm 粒级颗粒的去除效果来判断参数的选取范围，试验过程中相关参数的选取范围如表 7 所示，需要注意的是，在开展单因素试验的过程中，其他参数的取值参考：送风速度为 15.5 m/s，抽风负压为 1 752 Pa，多孔板开孔率为 5%，倾斜角度为 4°，料层厚度为 20 mm，风选时间为 4 ~ 25 s，粒径分布为初始粒径。

2.1.3 试验步骤与衡量指标

（1）试验步骤。燃料风选小试试验步骤包括：① 检测烧结燃料湿度。每次取样 100 g，应至少重复三次，记录相关数据。② 称取烧结燃料。采用目径筛测量燃料初始粒径分布情况。③ 调整含水量。将烧结燃料含水量调整至目标值。④ 调节参数并试验。调节系统参数至工况设计值，并开展该工况下的风选试验。⑤ 收集与分析。收集风选后的物料，烘干后测量粒径分布情况，对比风选前后的粒径分布差异，判断该工况下的风选效果。⑥ 重复试验。重复开展不同工况下的烧结燃料风选试验。

（2）衡量指标。试验中，采用燃料 <0.5 mm 粒级下降的相对值来定义燃料的去除效率，计算公式如式(21)。

$$n = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \tag{21}$$

式中：n 为风选后烧结燃料的去除率；A_1 为风选前烧结燃料的粒径占比；A_2 为风选后烧结燃料的粒径占比。

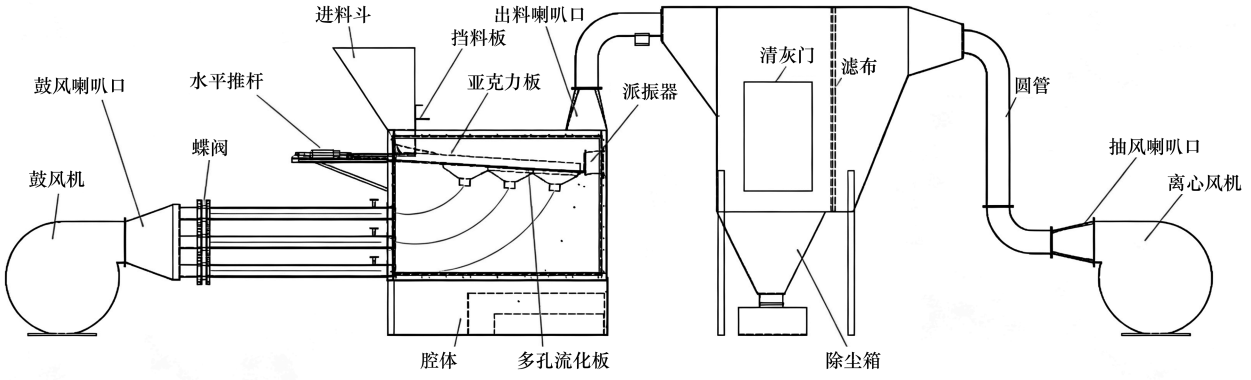


图 4 风选小试试验装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of the pilot-scale air classification test setup

表 7 燃料风选小试试验参数

Table 7 Parameters of the pilot-scale air classification experiment for fuel

送风速度/(m·s^{-1})	抽风负压/Pa	多孔板开孔率/%	多孔板倾斜角度/(°)	料层厚度/mm	风选时间/s	粒径分布
10 ~ 20	1 460 ~ 2 920	5 ~ 8	0 ~ 10	20 ~ 50	4 ~ 25	初始粒径工况；去除 >1.43 mm 粒级工况

2.2　试验结果分析

图 5 ~ 12 给出了不同工况下烧结燃料风选试验结果。由图 5 可知，三种不同的多孔板工况下（多孔板一：开孔率 5%，孔径 2.5 mm；多孔板二：开孔率 6%，孔径 1.5 mm；多孔板三：开孔率 8%，孔径 1.5 mm），多孔板一所对应的风选效果最好，板二和板三作用时，存在明显的风量分布不均匀的现象，这主要是由多孔板孔径减小导致整体床层压降增大所致。由图 6 可知，多孔板倾斜角度越小，燃料的风选效果越好，因此，在保证物料顺利送料的前提下，应尽量减小多孔板的倾斜角度。由图 7 可知，燃料的风选效果随着管道送风风速的增加而增大，但是通过对风选后除尘系统回收的燃料粒径组成进行分析发现，当管道送风风速达到 17.2 m/s 时，除尘系统中 < 0.5 mm 粒级明显增大。同时，当管道送风风速达到 15.5 m/s 时，物料在多孔板上已经能够呈现出较好的流化效果。因此，综合考虑下，管道风速在 15 ~ 16 m/s 的范围内较为合适。由图 8 可知，随着抽风负压的增大，风选效果呈现出平缓上升，但抽风负压过大时，同样会出现大颗粒被带走的现象，中试装置设计过程中会通过仿真分析的方法来对抽风口进行合理设计。由图 9 可知，随着料层厚度增大，风选效果逐渐减弱，但由于工程现场烧结燃料的产量较大，当料层厚度为 20 mm 时，设备尺寸过大。因此，为了在保证风选效果的前提下降低设备尺寸，可将料层厚度设置在 35 mm 左右。由图 10 可知，当把原始物料中 > 1.43 mm粒级去掉，再送入小试装置进行风选试验时，风选效果较原始粒级相比并无明显改善。由图 11 和图 12 可知，当料层厚度分别为 20 mm 和 35 mm 时，< 0.5 mm 去除率能够达到 80% 以上所对应的风选时间应分别大于 20 s 和 22.5 s。

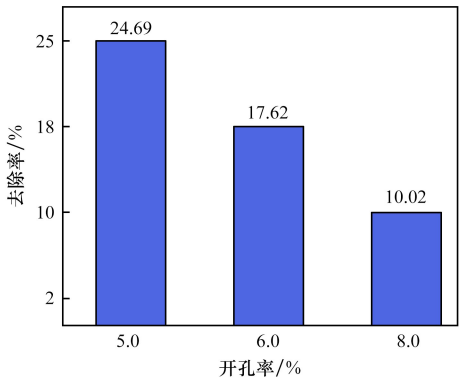


图 5　不同开孔率下 < 0.5 mm 燃料去除率

Fig. 5　Removal rate of < 0.5 mm fuel fraction under different open area ratios

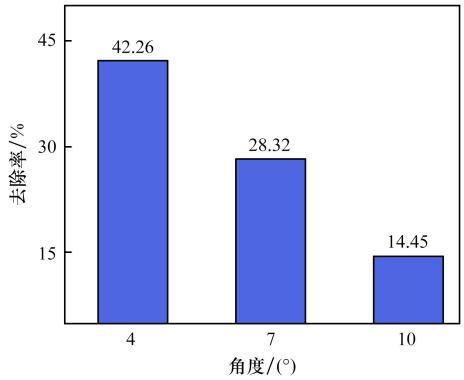


图 6　不同倾斜角度下 < 0.5 mm 燃料去除率

Fig. 6　Removal rate of < 0.5 mm fuel fraction under different inclination angles

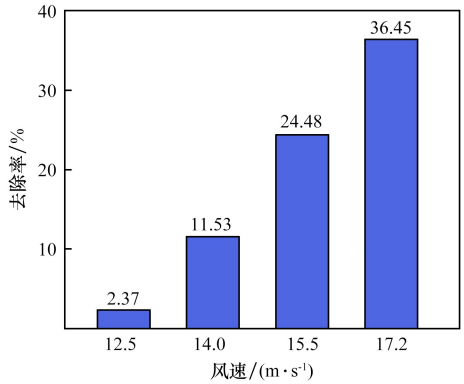


图 7　不同送风速度下 < 0.5 mm 燃料去除率

Fig. 7　Removal rate of < 0.5 mm fuel fraction under different air velocities

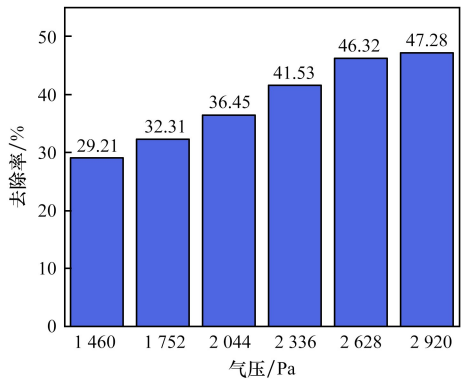


图 8　不同抽风机负压下 < 0.5 mm 燃料去除率

Fig. 8　Removal rate of < 0.5 mm fuel fraction under different induced draft fan pressures

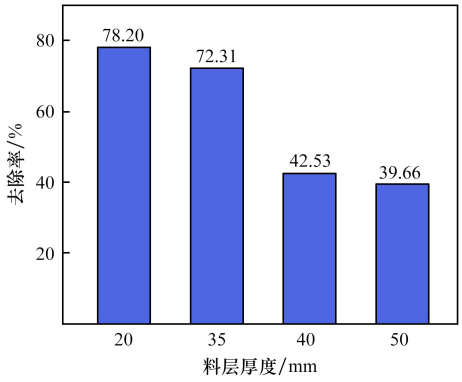


图 9 不同料层厚度下 <0.5 mm 燃料去除率

Fig. 9 Removal rate of <0.5 mm fuel fraction under different material bed heights

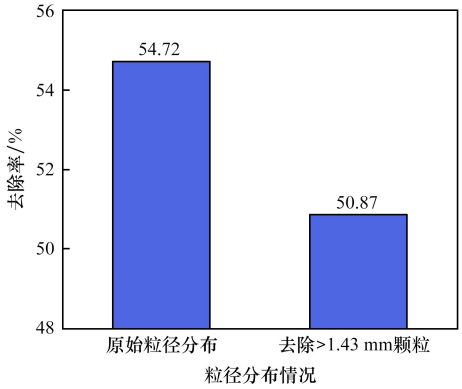


图 10 不同粒径分布下 <0.5 mm 燃料去除率

Fig. 10 Removal rate of <0.5 mm fuel fraction under different particle size distributions

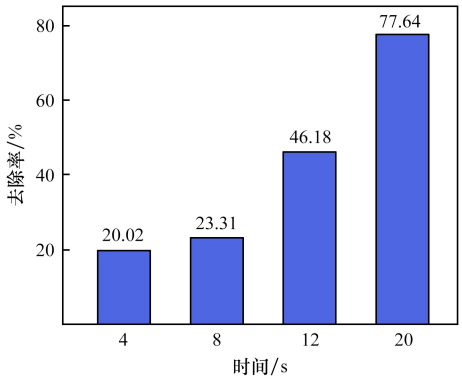


图 11 不同时间下 <0.5 mm 燃料去除率（料层厚度为 20 mm）

Fig. 11 Removal rate of <0.5 mm fuel fraction over time (bed height:20 mm)

综上所述，当多孔板开孔率为 5%、倾斜角度为 1°~4°、送风速度为 15~16 m/s、料层厚度为 20~35 mm、风选时间大于 20 s 时，燃料的风选效果基本能达到 80% 以上，相关参数可为后续中试试验装置的设计提供参考。

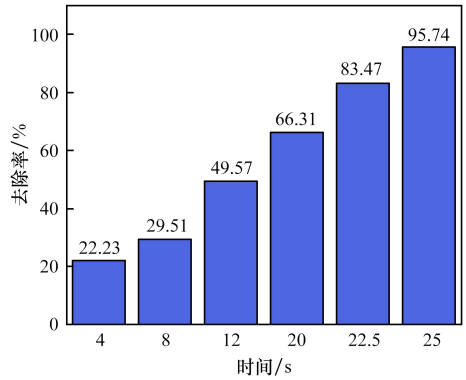


图 12 不同时间下 <0.5 mm 燃料去除率（料层厚度为 35 mm）

Fig. 12 Removal rate of <0.5 mm fuel fraction over time (bed height:35 mm)

3 结 论

（1）烧结燃料因含水率高、粒径细、粒级差异小，易发生团聚现象，导致常规筛分设备堵孔严重。通过流化床风选技术，在适宜操作风速和布风板结构（如直孔式多孔板）下，可实现物料的充分流化与分散，为细粉（<0.5 mm）的高效分离提供基础。

（2）在实验室风选小试试验发现，在多孔板开孔率为 5%、倾斜角度为 1°~4°、送风速度为 15~16 m/s、料层厚度为 20~35 mm、风选时间≥20 s 优化参数组合下，<0.5 mm 粒级燃料的去除率可达 80% 以上，为工业化中试装置设计提供了可靠依据。工业化中若能精准分离并去除过细燃料（<0.5 mm），将改善烧结料层透气性，提高燃烧效率，减少不完全燃烧产生的 CO 等污染物排放。该技术的突破不仅将提升燃料利用率，也将为烧结工序的低碳化改造提供可行的技术路径。

参考文献：

[1] 蒋大军，何木光，宋剑，等. 燃料粒度对烧结性能影响的试验研究[J]. 钢铁研究，2016，44(4)：1-7.
JIANG Dajun, HE Muguang, SONG Jian, et al. Experimental research on fuel particle size influence on sintering performance[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(4): 1-7.

[2] 赵改革，喻维纲，郑浩翔，等. 烧结料面燃料分加耦合

低温点火碳减排新技术[J]. 中国冶金，2024，34(10)：91－98.
ZHAO Gaige，YU Weigang，ZHENG Haoxiang，et al. A new carbon reduction technology of fuel separated addition in sintered material surface coupled with low temperature ignition[J]. China Metallurgy，2024，34(10)：91－98.

[3] 保善山，熊涛，汪晶，等. 酒钢 3#烧结机固体燃料粒度对烧结生产影响的研究[J]. 甘肃冶金，2023，45(2)：1－3.
BAO Shanshan，XIONG Tao，WANG Jing，et al. Study on the influence of solid fuel size on sintering production in jiusteel 3# sintering machine[J]. Gansu Metallurgy，2023，45(2)：1－3.

[4] 李保良，贾宪，张超民，等. 烧结燃料粒度的优化实验研究[J]. 山东冶金，2024，46(1)：63－64.
LI Baoliang，JIA Xian，ZHANG Chaomin，et al. Optimization experiment study on particle size of fuels on sintering[J]. Shandong Metallurgy，2024，46(1)：63－64.

[5] 薛春光，孙凤桥. 烧结燃料预筛分工艺生产实践分析[J]. 冶金管理，2023(15)：51－52.
XUE Chunguang，SUN Fengqiao. Production practice analysis of sintering fuel pre-screening process[J]. China Steel Focus，2023(15)：51－52.

[6] 吴坡，王岿. 湘钢烧结燃料预筛分工艺生产实践[J]. 金属材料与冶金工程，2022，50(5)：15－18.
WU Po，WANG Kui. Production practice of sintering fuel pre-sieving process in Xiangtan iron and steel group Co.，ltd[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering，2022，50(5)：15－18.

[7] 于涛，刘素梅，雷明准. 基于 CFD-EDEM 大豆风选除尘模拟研究[J]. 包装与食品机械，2023，41(4)：46－53.
YU Tao，LIU Sumei，LEI Mingzhun. Simulation of soybean dust removal based on CFD-EDEM[J]. Packaging and Food Machinery，2023，41(4)：46－53.

[8] 张小明. 基于 DEM-CFD 耦合的辣椒风选模拟研究[J]. 贵州农机化，2023(2)：4－8.
ZHANG Xiaoming. Study on simulation of pepper winnowing based on DEM-CFD coupling[J]. Guizhou Agricultural Mechaniation，2023(2)：4－8.

[9] 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.

[10] 郭柄江，马学东，赵磊，等. 基于 DEM-CFD 耦合的谷物多级风选模拟研究[J]. 中国农机化学报，2019，40(10)：96－102.
GUO Bingjiang，MA Xuedong，ZHAO Lei，et al. Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM-CFD coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(10)：96－102.

[11] 李凯凯，彭强吉，牛萌萌，等. 基于 CFD-DPM 的风选设备参数仿真计算方法[J]. 农业装备与车辆工程，2023，61(6)：1－6.
LI Kaikai，PENG Qiangji，NIU Mengmeng，et al. Simulation calculation method of parameters of air separation equipment based on CFD-DPM[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering，2023，61(6)：1－6.

[12] 王应彪，杨斌，宛双林，等. 基于悬浮速度区间估计的核桃壳仁物料气动特性分析与试验[J]. 农业工程学报，2025，41(3)：290－300.
WANG Yingbiao，YANG Bin，WAN Shuanglin，et al. Analysis and experiment on the aerodynamic characteristics of walnut shell and kernel material based on suspension velocity interval estimation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2025，41(3)：290－300.

[13] 曹成茂，罗坤，彭美乐，等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报，2019，50(9)：105－112.
CAO Chengmao，LUO Kun，PENG Meile，et al. Experiment on winnowing mechanism and winnowing performance of hickory material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(9)：105－112.

[14] 潘晓伟，彭烁，李硕，等. 布风板开孔率对逆流烟气余热回收塔流场均匀性影响研究[J]. 电力科技与环保，2022，38(5)：407－413.
PAN Xiaowei，PENG Shuo，LI Shuo，et al. Study on the influence of distribution plate opening ratio on the uniformity of flow field of low-temperature flue gas counter flow waste heat recovery tower[J]. Electric

Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(5):407 – 413.

[15] 宋晓皎,王帅,王琦. 布风板阻力对流动传质的影响[J]. 节能,2020,39(5):67 – 70.
SONG Xiaojiao, WANG Shuai, WANG Qi. Influence of resistance of air distribution plate on flow and mass transfer[J]. Energy Conservation,2020,39(5):67 – 70.

[16] 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.
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.

[17] 张孟辉,邵彬,谢华华,等. 基于气 – 固两相流体动力学数值模拟的风选室设计[J]. 矿山机械,2019,47(8):47 – 51.
ZHANG Menghui,SHAO Bin,XIE Huahua,et al. Design of air separation chamber based on numerical simulation of gas-solid two-phase hydrodynamics[J]. Mining & Processing Equipment,2019,47(8):47 – 51.

(上接第13页)

[83] 谢奎,赵良,朱辰,等. pH摆动:钢渣矿化固碳工艺经济潜力评估[J]. 高校地质学报,2024,30(4):476 – 484.
XIE Kui, ZHAO Liang, ZHU Chen, et al. pH swing: evaluation of economic potential of mineralized carbon fixation process of steel slag[J]. Geological Journal of China Universities,2024,30(4):476 – 484.

[84] WATJANATEPIN P,STEINWIDDER L,DE SCHUTTER A, et al. Preliminary environmental and economic assessment of mineral carbonation of steel slags as a carbon capture, utilization and storage technology[J]. Procedia CIRP,2024,122:318 – 323.

(上接第21页)

[26] 秦皇岛首钢机械有限公司. 智能检测系统[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.
Qinhuangdao Shougang Machinery Co., Ltd. Intelligent Detection System[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.

[27] 陈思墨,乐文毅,李旭东,等. 基于机器视觉识别的袋式除尘器破袋检测定位技术研究与应用[C]//2024全国除尘技术研讨会论文集(下). 抚顺:中国环境保护产业协会除尘专业委员会,2024:662 – 666.
CHEN Simo,YUE Wenyi,LI Xudong,et al. Research and application of bag break detection and localization technology in baghouse dust collectors based on machine vision recognition[C]//Proceedings of the 2024 National Conference on Dust Control Technology (Volume II). Fushun: Dust Removal Professional Committee of China Environmental Protection Industry Association, 2024: 662 – 666.

[28] LIU Xuan, TANG Yuquan, ZHANG Zhirong, et al. A pattern recognition method for filter bags in bag dust collectors based on ∅-optical time-domain reflectometry [J]. Photonics,2024,11:152.

[29] 刘旭安,胡新广. 分布式光纤传感技术在除尘器破袋检测中的应用方案解析[J]. 科技视界,2023,13(18):37 – 40.
LIU Xuan,HU Xinguang. Analysis of application scheme of distributed optical fiber sensing technology in bag breakage detection of dust collector[J]. Science&Technology Vision,2023,13(18):37 – 40.