

双仓平筛运动参数对筛理效率的影响

李 爽¹ 王凤成¹ 邓香芝¹ 李欣泽¹ 张保伟² 付云锋² 薛春芝³

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001; 2. 河北苹乐面粉机械集团有限公司, 河北 石家庄 050800;
3. 山东鲁研农业良种有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: [目的] 研究双仓平筛运动参数对小麦磨后不同系统物料筛理效率的影响。[方法] 选取典型的面粉生产线中皮磨、尾磨、渣磨磨下物为原料, 使用双仓平筛对不同物料进行筛分, 考察不同运动参数下各系统磨下物料在筛体内停留时间和筛理效果的变化, 并筛选各系统磨下物料在最佳筛分效果下的运动参数。[结果] 物料在双仓平筛内的停留时间从长到短依次为心磨、渣磨、皮磨。皮磨和渣磨磨下物料的筛理效果随离心加速度的增加先上升后下降, 皮磨物料在 $D=64\text{ mm}$ 、 $n=190\text{ r/min}$ 时的筛理效果最好; 渣磨物料在 $D=64\text{ mm}$ 、 $n=203\text{ r/min}$ 时的筛理效果最佳。心磨磨下物料在 $12.66\text{ m/s}^2 \leq \omega^2 r \leq 20.71\text{ m/s}^2$ 范围内, 筛理效果与离心加速度成正比, 并在 $D=50\text{ mm}$ 、 $n=275\text{ r/min}$ 时取得最佳。皮磨和渣磨物料适宜大直径、小转速的参数组合, 心磨物料则更适宜小直径、大转速的组合。[结论] 筛理时要想达到最佳筛理效果, 应根据物料的特性选择合适的运动参数。

关键词: 磨粉系统物料; 筛理效率; 离心加速度; 回转直径; 转速; 停留时间

Effect of double-bin plansifter motion parameters on sieving efficiency

LI Shuang¹ WANG Fengcheng¹ DENG Xiangzhi¹ LI Xinze¹ ZHANG Baowei²
FU Yunfeng² XUE Chunzhi³

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Hebei Pingle Flour Machinery Group, Shijiazhuang, Hebei 050800, China;
3. Shandong Luyan Agricultural Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: [Objective] The aim is to explore the effect of double-bin plansifter motion parameters on the material sieving efficiency of different systems after wheat milling. [Methods] The milled materials produced by the break system, tailing roll, and scratch system, obtained from a typical milling production line, were selected as raw materials. The double-bin plansifter was used to sieve different materials to investigate the variations in residence time inside the sieve body and in sieving performance under different motion parameters of milled materials in each system. The motion parameters with the optimal sieving performance for the milled materials from each system were then identified. [Results] The residence time of materials in the double-bin plansifter decreases in the order of the reduction system, scratch system, and break system. The sieving performance of the milled materials of the break system and scratch system increases and then decreases with the increase of centrifugal acceleration, and the sieving performance of the break system materials is the best in the combination of $D=64\text{ mm}$ and $n=190\text{ r/min}$, and that of the scratch system materials is the best in the combination of $D=64\text{ mm}$ and $n=203\text{ r/min}$. The sieving performance of the milled materials of the reduction system is proportional to the centrifugal acceleration in the range of $12.66\text{ m/s}^2 \leq \omega^2 r \leq 20.71\text{ m/s}^2$, and the best is achieved at $D=50\text{ mm}$ and $n=275\text{ r/min}$. The parameter combination of large diameter and small rotational speed is suitable for break and scratch system materials, while the combination of small diameter and large rotational speed is more suitable for reduction system materials. [Conclusion] To achieve the best performance when sieving, the appropriate motion parameters should be selected according to the characteristics of the materials.

基金项目: 山东省“外专双百计划”项目(编号: WST2020028)

通信作者: 王凤成(1963—), 男, 河南工业大学教授, 博士。E-mail: wangxiaoling74@163.com

收稿日期: 2025-04-15 改回日期: 2025-11-18

引用格式: 李爽, 王凤成, 邓香芝, 等. 双仓平筛运动参数对筛理效率的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 83-90.

Citation: LI Shuang, WANG Fengcheng, DENG Xiangzhi, et al. Effect of double-bin plansifter motion parameters on sieving efficiency[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 83-90.

Keywords: milling system material; sieving efficiency; centrifugal acceleration; rotary diameter; rotational speed; residence time

在现代制粉工业中,平筛作为关键的筛理设备,能够从小麦破碎后的不同粒度物料进行高效分级,承担着物料分级、粒度控制和品质优化的核心任务^[1-3]。而物料的粒度大小差异大,流动性表现各异^[4],在这种情况下,用同一组运动参数筛理不同特性的物料,筛理结果往往难以达到理想效果^[5]。为了应对这一挑战,可以动态调整双仓平筛的运动参数,如回转直径和转速等,以适应不同物料的特性。这种自适应调节不仅能够提高筛分效率,还能有效减少筛网磨损和能源消耗,延长设备使用寿命^[6]。顾尧臣^[7]认为筛选效果与物料的形状、粒度和摩擦系数等特性有关。陈志成^[8]提出,当筛上物料流量或水分增加时,为保证筛分效果应及时更改平筛的角速度和回转半径。以上研究大多停留在理论阶段,并未进行实际试验,目前针对不同制粉系统(皮磨、渣磨、心磨等关键环节)所产出物料,在同一筛分设备上展开的对比试验数据仍有大片空白亟待填补。

目前,对平筛的研究大都聚焦于结构设计、筛格和筛路的研究等方面^[9-11],物料在筛面上运动的相关研究相对匮乏,对物料筛分性能的离散元模拟研究也是在已知的参数下进行^[12-15]。这些研究虽然在一定程度上能够解决现实生活中的难题,但在正常生产中,设备和物料均受到多种因素影响。而且仿真模型是基于理想条件进行的,在应用方面存在一定的局限性。试验拟通过改变回转直径和转速的不同组合,用双仓平筛对皮磨、渣磨和心磨磨下物料进行筛理试验,对各物料在不同运动参数下的筛理效果变化以及物料在筛面上运动时间的变化进行测试,以研究各系统磨下物料在各类运动参数下的筛理表现,力求为筛分设备参数的精细化、精准化调控夯实理论根基,为实际生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

磨下物料:在中国某一典型的面粉生产线上取 1B、2B、1M、2M、3M 和 1S 磨下物料。

1.2 仪器与设备

双仓平筛:FSFS 83×2×12 型,河北苹乐面粉机械集团有限公司;

验粉筛:JJSY-Ⅲ型,上海嘉定粮油仪器有限公司;

粉筛:LS-30 型,无锡穗邦科技有限公司;

布袋过滤器:TBLM104 型,常州市东宇环保科技有限公司;

关风器:TGFY2 型,河北苹乐面粉机械集团有限公司;

变频器:VFD037CB43A-20 型,上海恺李机电设备有限公司;

限公司;

电子天平:YP10002 型,上海衡际科学仪器有限公司;

测速仪:SW6234C 型,广州市速为电子科技有限公司;

筛网:PET-GG 型,瑞士 SEFAR 公司;

筛网:DMP 型,上海新铁链筛网制造有限公司;

筛网:YHYSS-001 型,河北萨诺丝网贸易有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 双仓平筛试验系统装置设计 图 1 为试验所用装置系统,为了模拟商业面粉厂的实际生产,试验原料从进料口被离心风机将粉料通过管道输送至沙克龙,物料沉降后经关风器进入双仓平筛。双仓平筛的出料口 1、出料口 2 和出料口 3 分别连接布袋过滤器,物料经布袋过滤器后进入离心风机,完成循环。

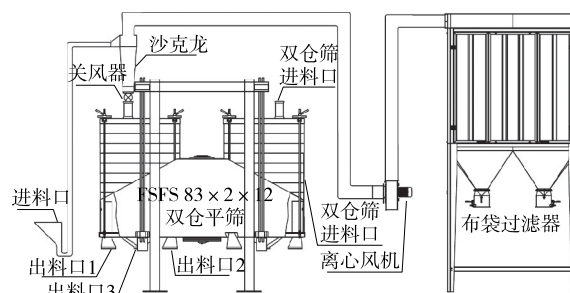


图 1 FSFS 83×2×12 型双仓平筛试验系统装置

Figure 1 Experimental system device of FSFS 83×2×12 double-bin plansifter

1.3.2 筛网和筛路的选择 为模拟正常生产,根据各物料的组分特征,按照物料分级的要求,选用不同筛网进行筛理试验。由于试验过程的人机流量是由筛理面积确定,若模拟整仓,所需物料量较大,难度较大,故选用其中的“一交”进行筛理试验。该双仓平筛中的筛芯尺寸为 660 mm×660 mm,筛理面积为 0.347 m²,试验过程中筛网总面积为 1.388 m²,筛网呈自然张紧状态,无破损和磨损情况。具体筛网选择为 1B (20W)、2B (22W)、1M (11XX)、2M (11XX)、3M (12XX)、1S (56GG 和 66GG)。其中为了保证试验的可靠性,粗筛、粉筛均用两种不同型号的筛网进行筛理,所以 1S 磨下物料用两种筛网分别进行筛理试验。具体筛理路线如图 2 所示,试验过程中,各物料筛理路线相同,只对筛格中筛芯进行更换。

1.3.3 进机流量的选择和测定 流量选择参考《小麦加工工艺与设备》中平筛各系统的流量,小试验后选择筛净率≥85%的流量,最终选择筛理试验流量为:1B 磨下物料 (1B 物料) 500 kg/(m²·h)、2B 物料 330 kg/(m²·h)、1S 物料 250 kg/(m²·h)、1M 物料 220 kg/(m²·h)、2M 物料 200 kg/(m²·h)、3M 物料 185 kg/(m²·h)。测试方法:在双

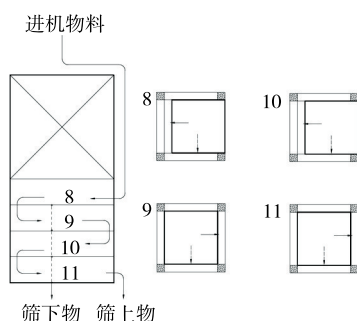


图2 筛理路线图

Figure 2 Flow diagram of sieving

仓平筛进料口处(关风器下方)接料3次,间隔10 s,每次接料10 s,称重并记录接料量,按式(1)计算流量。

$$Q = \frac{m}{t} \times 3600, \quad (1)$$

式中:

Q ——试验处理量,kg/h;

m ——接粮质量,kg;

t ——接粮时间,s。

1.3.4 回转直径调节与设定 双仓平筛回转直径通过改变配重块与主轴间距离从而调节筛体的回转直径,将偏重块向远离主轴的方向移动,即可增大回转直径,调整后开机测试,机器运行10 min,机器运行稳定后,将绑有铅笔的磁铁吸附在筛体底部,用固定有硬纸板的垂直升降台缓慢靠近铅笔,记录回转轨迹。圆的轨迹即为双仓平筛的回转直径,依次测量双仓平筛的8个角后,用直尺进行测量,保证8个角的回转直径一致。如此反复,调整到试验需要的回转直径即可。双仓平筛的标定回转直径为50 mm,FSFS 83×2×12型双仓平筛的回转直径最大能调节到70 mm,且实际商业面粉厂多用的高方筛回转直径为64 mm,所以试验中回转直径选择为50,64,70 mm。

1.3.5 转速调节与设定 双仓平筛的转速可通过外接变频器,改变输出电源频率,以达到改变转速的目的,再用测速仪测定平筛的实际转速。双仓平筛的标定回转直径为50 mm,标定转速为275 r/min。为避免筛体举动过于剧烈,导致筛体与钢架的碰撞和筛体的断裂,在试验过程中筛体转速和回转直径相互配合。根据不同的回转直径对转速进行调节,为了控制变量,在改变回转直径时,以标定回转直径50 mm为基础,选择转速为275,260,245,230,215,200,185 r/min。在保证离心加速度相同的条件下,按式(2)计算其他回转直径下的筛体转速,具体转速对照见表1。

$$a = \omega^2 r, \quad (2)$$

式中:

ω ——角速度,rad/s;

a ——离心加速度,m/s²;

表1 不同筛理离心加速度下回转直径与转速对照表

Table 1 Comparison of rotary diameters and rotational speeds at different centrifugal accelerations in sieving

离心加速度/ (m·s ⁻²)	转速/(r·min ⁻¹)		
	50 mm	64 mm	70 mm
9.37	185	163	156
10.96	215	176	169
12.66	200	190	181
14.49	230	203	194
16.44	245	216	207
18.51	260	229	219
20.71	275	243	232

r ——回转半径,m。

1.3.6 物料在筛面上停留时间测定 在双仓平筛的进料筒上开一个3 cm的缝隙,待筛子平稳运行后进料,进料30 s后,将染色小麦投入,同时计时,为避免缝隙漏料对试验造成影响,在投入染色小麦后将开口封住。待观察到染色小麦从出料口处落下,计时停止并记录时间。

1.3.7 双仓平筛各出口流量测定 待染色小麦从筛上物出口处流出后,在筛上物和筛下物出料口处分别接料3次,间隔10 s,每次接粮时间持续15 s,称重并记录,按式(3)计算各出口流量。

$$Q_i = \frac{m_i}{t} \times 3600, \quad (3)$$

式中:

Q_i ——出口流量,kg/h;

m_i ——接粮质量,kg;

t ——接粮时间,s。

1.3.8 未筛净率测定 若物料为定量投放,测定筛净率只需要用同型号筛网进行筛理检验便可以得出结果。但双仓平筛检测筛净率需要测定物料流量,会导致试验误差变大。由于试验只选了一仓中的一交,四层筛网型号均一致,所以评定双仓平筛的筛理效率参照田建珍等^[16]的方法,对未筛净率进行测定,可缩小试验误差,能准确反映双仓平筛的实际筛理效率。筛上物中残留的目标物料流量占进机物料所含目标物料流量的百分比即为未筛净率。按式(4)计算未筛净率。

$$H = \frac{b(1-a)}{a(1-b)} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

H ——未筛净率,%;

a ——进机物料中应筛出物料的占比,%;

b ——筛上物中应筛出而未筛出物料的占比,%。

1.3.9 筛上物质含粉率测定 参照田建珍等^[16]的方法,

留存在筛上物中的含粉量所占筛上物总量的百分比称为筛上物含粉率,操作方法同筛净率。试验过程中,用筛上物含粉率表征粉筛的筛理效率,筛上物含粉率越高,筛理效率越差。

$$K=\frac{x_1}{x}\times 100\%,\tag{5}$$

式中:

K ——筛上物含粉率,%;

x_1 ——筛上物含粉质量,g;

x ——筛上物质量,g。

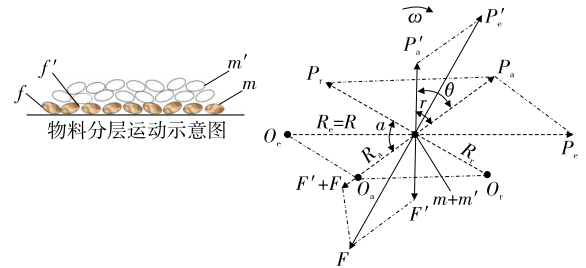
1.4 数据处理

试验至少重复 3 次,结果以平均值±标准差表示,采用 Excel、SPSS 20 进行数据统计和差异性显著分析,95% 置信度($P<0.05$),并用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 物料颗粒在平筛筛面上的运动分析

物料在平筛筛面上做水平回转运动时,受离心惯性和摩擦力的综合作用,离心力使其产生向外扩散的趋势,而物料与筛面之间的摩擦力形成阻力^[17]。物料开始滑动时的临界条件为物料所受的离心惯性力大于等于其与工作面之间的摩擦力^[18]。可将物料划分为若干层,每层物料作为其上层物料的工作面。下层物料与筛面间的摩擦力以及物料间的摩擦力,两者之和与绝对运动惯性力的大小相同,方向相反,矢量图如图 3 所示。



m . 下层物料质量 m' . 上层物料质量 f . 物料的外摩擦系数 f' . 物料的内摩擦系数 P_e . 牵连运动:工作面相对于地面的运动 P_r . 相对运动:颗粒相对于工作面的运动 P_a . 绝对运动:颗粒相对于地面的运动

图 3 上层和下层物料在筛面上运动惯性力矢量图
Figure 3 Vector diagram of inertial forces of upper and lower layer materials on sieve surface

$$\vec{F}+\vec{F}'+\vec{P}_a=0,\tag{6}$$

整理得:

$$R_a=\frac{fg}{\omega^2}\sqrt{\left(\frac{f'}{f}\right)+\left(1+\frac{m'}{m}\right)\left[1-\left(\frac{f'}{f}\right)^2\right]}.\tag{7}$$

由式(7)可知,临界离心加速度随上层物料质量的增大而增大;随物料间内摩擦系数 f' 的减小而增大;不同物

料的临界离心加速度不同。经过理论推算,数据整理见表 2,理论推导的各系统物料的临界加速度从大到小依次排序为后路皮磨磨下物料、后路心磨磨下物料、前路皮磨磨下物料、前路心磨磨下物料。

表 2 各系统磨下物料的摩擦系数对照

Table 2 Comparison of friction coefficients of milled materials in each system

物料名称	内摩擦系数(f')	外摩擦系数(f)	$fg/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
前路皮磨磨下物料	0.75	0.96	9.42
后路皮磨磨下物料	0.91	1.19	11.67
前路心磨磨下物料	0.72	0.92	9.02
后路心磨磨下物料	0.91	1.19	11.67
粗渣	0.57	0.70	6.87
粗、细麦心	0.78	1.00	9.81
麸皮	0.84	1.09	10.69

† 由式(7)可知,内摩擦系数必须小于外摩擦系数,则临界加速度 $\omega^2r=fg$ 。

2.2 不同运动参数下皮磨磨下物料的筛理效率

2.2.1 皮磨磨下物料在筛体内的停留时间 由表 3 可知,在相同的回转直径下,离心加速度与物料在筛面上的停留时间成反比,即离心加速度越大,物料在筛面上的停留时间越短。当离心加速度保持相同时,对 3 种不同回转直径下物料在筛面上的停留时间进行对比,结果显示回转直径越大,物料的停留时间越长。经理论推导可知,在离心加速度恒定的情况下,若回转直径增大,转速必然减小,移动速度变缓,物料在筛体内停留时间增加。因此,相同离心加速度下,回转直径越大,物料在筛面上的停留

表 3 皮磨磨下物料在筛面上的停留时间†

Table 3 Residence time of milled materials of break system on sieve surface

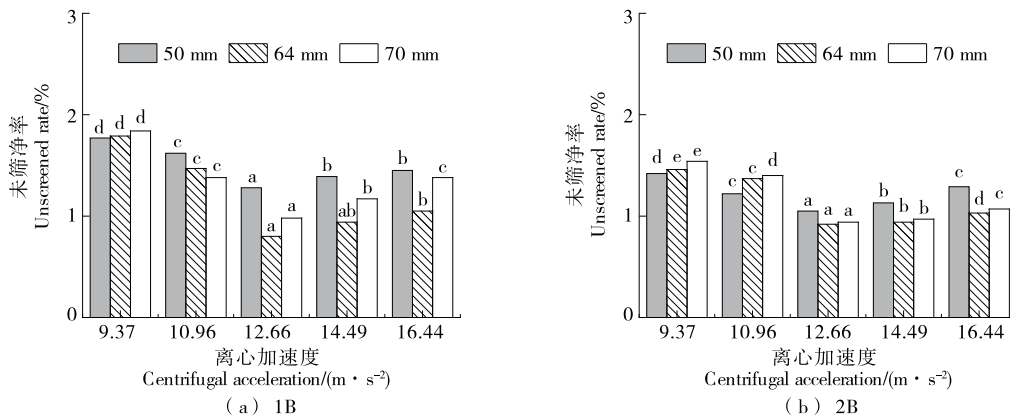
物料名称	离心加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	物料在筛面上的停留时间/s		
		50 mm	64 mm	70 mm
1B 磨下物料	9.37	74.59±1.22 ^e	75.51±1.32 ^e	77.71±0.88 ^e
	10.96	70.46±0.73 ^d	71.41±1.14 ^d	72.67±1.09 ^d
	12.66	63.48±1.12 ^c	65.18±0.54 ^c	66.73±1.20 ^c
	14.49	58.25±1.88 ^b	60.64±1.50 ^b	63.90±1.76 ^b
	16.44	54.51±1.32 ^a	56.62±1.38 ^a	57.79±0.53 ^a
2B 磨下物料	9.37	92.22±1.24 ^e	94.21±0.93 ^e	96.83±1.30 ^e
	10.96	84.56±0.92 ^d	87.38±1.17 ^d	88.12±1.83 ^d
	12.66	91.52±1.16 ^c	82.64±0.75 ^c	85.59±1.08 ^c
	14.49	72.99±0.51 ^b	76.54±1.15 ^b	80.27±1.28 ^b
	16.44	69.32±0.81 ^a	72.33±1.12 ^a	75.94±1.18 ^a

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

时间越长。

2.2.2 不同离心加速度下的未筛净率 由图4可知,随着离心加速度 $\omega^2 r$ 的增大,1B和2B磨下物料的未筛净率均呈先下降后上升趋势,3种回转直径下,未筛净率均在离心加速度 $\omega^2 r=12.66 \text{ m/s}^2$ 时取得最小值。当 $\omega^2 r < 12.66 \text{ m/s}^2$ 时,回转直径为50 mm的筛理效率优于回转直径为64, 70 mm的。当 $\omega^2 r > 12.66 \text{ m/s}^2$ 时,回转直径为64, 70 mm时的筛理效率较好。经过分析,高转速可以增加物料的跳动频率,促进物料分层和粗颗粒的分离,所以

当离心惯性力较大时,物料颗粒能够凭借惯性力实现有效分层,粗颗粒上浮,细颗粒下沉并透筛,物料在筛面上的分布也更均匀。但颗粒运动速度过快,物料依靠自身重力通过筛孔的概率下降^[19],物料在筛面上的停留时间大幅缩短,这将降低筛分效率。尤其是在小直径大转速的组合模式下,物料在筛面上的停留时间较短,加之过高的转速使得颗粒频繁撞击筛网。这不仅降低了颗粒透筛的概率,还容易导致细颗粒被裹挟至出料端,无法充分完成筛分,最终造成筛理效率显著降低。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 皮磨磨下物料的未筛净率

Figure 4 Unscreened rate of milled materials of break system

2.3 不同运动参数下渣磨磨下物料的筛理效率

2.3.1 渣磨磨下物在筛体内的停留时间 渣磨磨下物料在筛体内停留时间的规律与皮磨磨下物料表现一致。与皮磨磨下物料相比,渣磨磨下物料在筛面上的停留时间更长。由于渣磨磨下物料质量相对较小,自动分级效果更佳。而在离心力的作用下,质量较大的颗粒相较于小质量物料,更易克服与筛面之间的摩擦力,能够快速向筛面外缘的出料口滑动。渣磨磨后的细颗粒,因其惯性较小,移动速度迟缓,需要耗费更多时间才能通过筛面,所以渣磨磨下物料整体在筛面上的停留时间会比皮磨磨下物料的长,见表4。

2.3.2 不同离心加速度下的未筛净率 由图5可知,渣磨磨下物料在两种筛网下的筛理结果趋势一致,随着离心加速度 $\omega^2 r$ 的增大,未筛净率呈先减小后增大趋势,且在3种回转直径, $\omega^2 r=14.49 \text{ m/s}^2$ 时的未筛净率取最小值。

渣磨磨下物与皮磨磨下物料在筛理结果上存在显著差异,且不同回转直径下的表现不同。皮磨磨下物料在筛理过程中,当回转直径为50 mm时,未筛净率普遍偏高。从渣磨磨下物料的筛理结果可以看出,当回转直径为50 mm时,未筛净率偏低。在高转速下,能有效破坏细颗粒之间的团聚,有效避免因料层堆积而堵塞筛孔,同时

表4 渣磨磨下物料在筛面上的停留时间[†]

Table 4 Residence time of milled materials of scratch system on sieve surface

筛网 型号	离心加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	物料在筛面上停留的时间/s		
		50 mm	64 mm	70 mm
56GG	10.96	119.80 ± 1.19 ^e	133.55 ± 0.93 ^c	140.23 ± 0.97 ^e
	12.66	105.48 ± 1.41 ^d	118.91 ± 1.67 ^d	126.54 ± 0.81 ^d
	14.49	96.81 ± 1.31 ^c	109.81 ± 1.19 ^c	112.01 ± 1.43 ^c
	16.44	89.48 ± 0.89 ^b	100.48 ± 0.86 ^b	104.66 ± 1.26 ^b
	18.51	86.98 ± 1.83 ^a	93.48 ± 1.41 ^a	97.06 ± 1.06 ^a
66GG	10.96	109.8 ± 1.19 ^e	120.88 ± 1.76 ^e	126.55 ± 1.19 ^e
	12.66	103.81 ± 1.43 ^d	117.24 ± 1.24 ^d	123.73 ± 0.78 ^d
	14.49	96.81 ± 1.31 ^c	107.80 ± 1.19 ^c	112.24 ± 1.24 ^c
	16.44	83.81 ± 1.43 ^b	101.81 ± 1.43 ^b	103.80 ± 1.19 ^b
	18.51	83.65 ± 1.23 ^a	90.81 ± 1.31 ^a	96.81 ± 1.31 ^a

[†] 56GG筛网孔径为308 μm , 66GG筛网孔径为250 μm ;字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

克服颗粒间的摩擦力以及团聚现象,提升整体筛理效率^[20];也能极大程度上避免淀粉颗粒黏附于筛网表面,进而显著提升物料的透筛率^[21]。对于皮磨磨下物料而言,低转速不仅可以增加物料在筛面上的停留时间,提高透

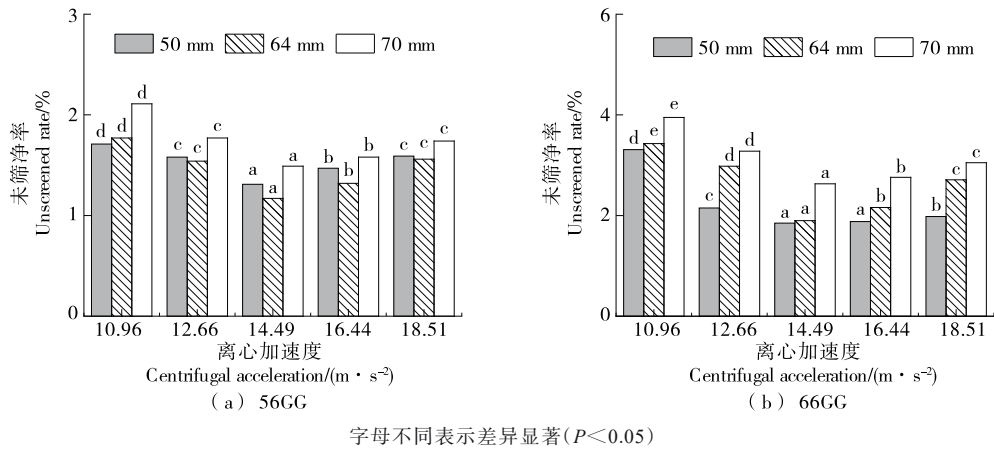


Figure 5 Unsieved rate of milled materials of scratch system

筛率^[22];还可以减少剧烈振动,避免大颗粒被过度抛掷或破碎,确保胚乳与麸皮完整且高效分离。因此,大直径搭配低转速的设备参数组合更符合皮磨物料的筛理需求。

2.4 不同运动参数下心磨磨下物料的筛理效率

2.4.1 心磨磨下物在筛体内的停留时间 由表5可知,心磨磨下物在筛体内的停留时间与离心加速度成反比,随着离心加速度的增大,物料在筛面上的停留时间相应缩短。在离心加速度相同的条件下,回转直径与物料在筛面上的停留时间成正比,回转直径越大,物料的停留时间越长。这与皮磨和渣磨磨下物料的趋势一致。由此可见,在相同的离心惯性力作用下,小麦磨下物料在筛面上的停留时间与离心加速度及转速均成反比,与回转直径成正比,离心加速度越大,物料在筛面上的停留时长越短。

3种物料在筛面上的停留时间存在显著差异,从长到短依次为1M、2M、3M。经分析,这与筛上物含量密切相关。在筛理过程中,1M与2M物料均采用11XX型号筛网。由表6可知,1M磨下物料中11XX占63.96%,2M磨下物料中11XX占52.98%。由于1M物料内筛上物含量较多,筛理时,筛面上会堆积形成较厚的物料层。物料层加厚促使物料颗粒间相互作用力增强,在这种复杂的相互作用体系下,物料在筛面上的整体流动速度却显著加快,进而使得筛上物能以更快的速度排出筛面。

2.4.2 相同离心加速度下的筛上物含粉率 由图6可知,在1M~3M磨下物料的筛理过程中,随着离心加速度的增大,在相同回转直径条件下,筛上物含粉率均呈下降趋势,当 ω^2r 为20.71 m/s²时取最小值。在相同离心力下,随着回转直径的增大,筛上物含粉率呈上升趋势,当回转直径为70 mm时取最大值,当回转直径为50 mm时取最小值。当 ω^2r 为20.71 m/s²,回转直径为50 mm,转速为

表5 心磨磨下物料在筛面上的停留时间[†]

Table 5 Residence time of milled materials of reduction system on sieve surface

物料名称	离心加速度/ (m · s ⁻²)	物料在筛面上停留的时间/s		
		50 mm	64 mm	70 mm
1M磨下物料	10.96	135.54 ± 1.11 ^e	140.31 ± 1.13 ^e	147.73 ± 1.55 ^e
	12.66	117.46 ± 1.19 ^d	125.05 ± 1.51 ^d	131.48 ± 1.38 ^d
	14.49	103.76 ± 1.54 ^c	110.45 ± 1.15 ^c	117.02 ± 1.23 ^c
	16.44	93.35 ± 1.37 ^b	102.22 ± 1.42 ^b	104.15 ± 1.09 ^b
	18.51	81.87 ± 1.18 ^a	90.98 ± 1.26 ^a	92.69 ± 0.97 ^a
2M磨下物料	10.96	144.34 ± 1.35 ^e	147.37 ± 1.02 ^e	154.71 ± 1.87 ^e
	12.66	135.71 ± 1.88 ^d	137.91 ± 1.14 ^d	145.44 ± 1.18 ^d
	14.49	126.04 ± 1.56 ^c	127.07 ± 1.55 ^c	132.40 ± 1.14 ^c
	16.44	114.79 ± 1.73 ^b	118.46 ± 1.32 ^b	123.29 ± 1.46 ^b
	18.51	107.29 ± 1.27 ^a	113.19 ± 1.61 ^a	115.27 ± 0.82 ^a
3M磨下物料	10.96	156.06 ± 1.46 ^e	160.18 ± 1.45 ^e	162.08 ± 1.38 ^e
	12.66	144.79 ± 1.33 ^d	151.62 ± 1.50 ^d	157.75 ± 1.98 ^d
	14.49	137.27 ± 1.22 ^c	144.96 ± 1.19 ^c	147.29 ± 1.82 ^c
	16.44	130.33 ± 1.37 ^b	136.19 ± 1.26 ^b	139.68 ± 1.73 ^b
	18.51	122.87 ± 1.34 ^a	126.03 ± 1.80 ^a	131.46 ± 1.64 ^a

[†] 字母不同表示差异显著(P < 0.05)。

表6 心磨磨下物料筛分质量占比

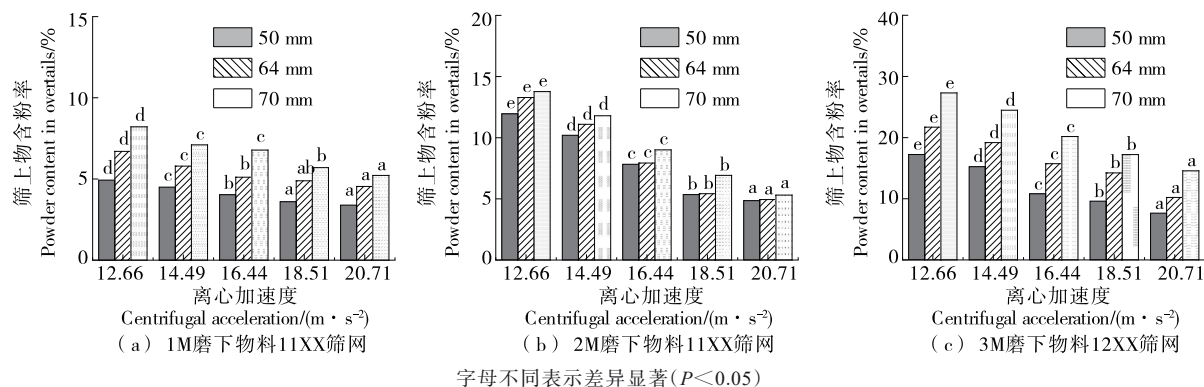
Table 6 Mass fraction of sieved milled materials of reduction system

物料名称	筛网型号	筛网孔径/μm	筛上物占比/%
1M磨下物料	11XX	117	63.96 ± 0.09
2M磨下物料	11XX	117	52.98 ± 0.11
3M磨下物料	12XX	110	28.24 ± 0.05

275 r/min时,筛理效果最佳,与皮磨和渣磨系统物料在达到最佳筛理效果时存在显著差异。

皮磨磨下物料中含有大量麸皮,其颗粒粗糙,粒度范围分布广,侧重于保留麸皮完整性并对粗颗粒进行有效分级。基于这些特征,皮磨磨下物料筛理需要借助大直径、低转速运行以及较长的物料停留时间来实现。心磨物料几乎全部由纯胚乳构成,其粉质细腻,颗粒粒度小。

而这种特性也使得心磨物料极易团聚,筛理难度较大。在心磨筛理过程中,核心任务是进行精细筛分,从胚乳中高效地提取高纯度细粉。在离心加速度相同的条件下,小直径所对应的转速更高。较高的转速能够使物料在筛面上的运动更为剧烈,增加物料间的碰撞与摩擦。心磨物料粒度小且易团聚,临界颗粒容易卡住,堵塞筛孔。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图6 心磨磨下物料的未筛净率

Figure 6 Unsieved rate of milled materials of reduction system

3 结论

在离心加速度相同的条件下,回转直径与物料在筛面上的停留时间成正比。而在回转直径相同的条件下,物料在筛面上的停留时间与离心加速度成反比,离心加速度越大,物料在筛面上的停留时间越短。皮磨磨下物和渣磨磨下物的筛理效果均会随着离心加速度的增加呈先上升后下降趋势。皮磨磨下物料在离心加速度为12.66 m/s²时筛理效果最好,最佳的参数组合为回转直径64 mm、转速190 r/min。渣磨磨下物料在离心加速度为14.49 m/s²时筛理效果最优,最佳的参数组合为回转直径64 mm、转速203 r/min。心磨磨下物料在12.66 m/s² ≤ 离心加速度 ≤ 20.71 m/s²范围内,其筛理效果与离心加速度成正比,即在离心加速度为20.71 m/s²时筛理效果最好,最佳的参数组合为回转直径50 mm、转速275 r/min。综合分析,皮、渣磨磨下物料在大直径、小转速的回转参数组合下能够获得更好的筛理效果;而心磨物料在小直径、大转速的回转参数组合下,筛理效果更为理想。后续可探究不同系统物料在不同筛网或多交工况下的最佳运动参数。

参考文献

- [1] 马思雨, 王晓曦, 田潇凌, 等. 制粉对小麦粉营养品质影响机理研究现状[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 187-194.
- MA S Y, WANG X X, TIAN X L, et al. Research status of influence mechanism of milling on nutritional quality of wheat

flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 187-194.

- [2] TIAN X L, WANG X X, WANG Z, et al. Particle size distribution control during wheat milling: nutritional quality and functional basis of flour products: a comprehensive review[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(12): 7 556-7 572.
- [3] DEVAUX M F, LE DESCHAULT DE MONREDON F, GUIBERT D, et al. Particle size distribution of break, sizing and middling wheat flours by laser diffraction[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1998, 78(2): 237-244.
- [4] HUANG Y L, GOH R M V, PUA A, et al. Effect of three milling processes (cyclone-, bead- and stone-millings) on the quality of matcha: physical properties, taste and aroma[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131202.
- [5] 顾尧臣. 粮食加工设备工作原理、设计和应用[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1998: 356-402.
- GU Y C. Working principle, design and application of grain processing equipment[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1998: 356-402.
- [6] 周永利, 毛君, 谢苗, 等. 弛张筛筛分效率与筛面磨损的匹配优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 202-213.
- ZHOU Y L, MAO J, XIE M, et al. Study on matching optimization of screening efficiency and screen surface wear of flip screen[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 202-213.
- [7] 顾尧臣. 振动设备工作原理和应用(二)[J]. 粮食与饲料工业,

- 1995(9): 1-8.
- GU Y C. The working principle and application of horizontal rotary equipment (2) [J]. Cereal & Feed Industry, 1995(9): 1-8.
- [8] 陈志成. 制粉师工程手册[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 157-179.
- CHEN Z C. Handbook of milling division engineering[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 157-179.
- [9] 梁彦兵, 赵峰, 陈小刚, 等. 高方平筛的发展历程[J]. 粮食加工, 2024, 49(2): 68-70.
- LIANG Y B, ZHAO F, CHEN X G, et al. The development of square plansifter[J]. Grain Processing, 2024, 49(2): 68-70.
- [10] 邱明, 廖振强, 焦卫东, 等. 基于刚柔耦合的高方平筛动力学建模与振动模态分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2 960-2 964, 2 990.
- QIU M, LIAO Z Q, JIAO W D, et al. Dynamics modeling and modal analysis of square plansifter based on rigid-flexible coupling[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(24): 2 960-2 964, 2 990.
- [11] 张庆霞. 高方平筛 A 型筛格与 A-A 筛路组合解析[J]. 现代面粉工业, 2022, 36(5): 7-12.
- ZHANG Q X. Analysis of the combination of A-type sieves and A: a sieve scheme of square plansifter[J]. Modern Flour Milling Industry, 2022, 36(5): 7-12.
- [12] 王晓川, 杨华瑞, 马学东, 等. 复合振动筛筛分性能的离散元模拟研究[J]. 应用力学学报, 2025, 42(4): 821-827.
- WANG X C, YANG H R, MA X D, et al. Discrete element simulation study of composite vibrating screen screening performance[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(4): 821-827.
- [13] 苏栋, 樊猛, 王翔, 等. 非规则颗粒形态表征与离散元模拟方法研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(11): 1 847-1 870.
- SU D, FAN M, WANG X, et al. Research on morphological characterization and discrete element modeling of irregular particles(in Chinese)[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(11): 1 847-1 870.
- [14] 刘占斌, 郭衍臣, 张东升, 等. 基于离散元法的颗粒筛分行为模拟与仿真研究[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(1): 305-310.
- LIU Z B, GUO Y C, ZHANG D S, et al. Simulation of particle screening behavior based on discrete element method[J]. Machine Design & Research, 2025, 41(1): 305-310.
- [15] 任宁, 王中营, 白晓丽, 等. 基于离散元法的往复振动筛运动参数优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 63-67, 80.
- REN N, WANG Z Y, BAI X L, et al. Motion parameter optimization of reciprocating vibrating screen based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 63-67, 80.
- [16] 田建珍. 平筛筛理效率评价指标的探讨[J]. 粮食与饲料工业, 1995(6): 16-19.
- TIAN J Z. On the evaluation indexes for sifting efficiency of plansieve[J]. Cereal & Feed Industry, 1995(6): 16-19.
- [17] 薛维华. 平筛工作原理的多种解释[J]. 现代面粉工业, 2012, 26(4): 9-11.
- XUE W H. Multiple explanations of the working principle of flat sieve[J]. Modern Flour Milling Industry, 2012, 26(4): 9-11.
- [18] 王希宁. 平面回转筛惯性力及其平衡问题的探讨[J]. 粮食与饲料工业, 1989(4): 31-33.
- WANG X N. Discussion on the inertial force and its equilibrium of plane rotary screen[J]. Cereal & Feed Industry, 1989(4): 31-33.
- [19] 梁彦兵, 孙震, 邵博, 等. 影响高方平筛筛理效果的因素[J]. 粮食加工, 2024, 49(5): 11-13.
- LIANG Y B, SUN Z, SHAO B, et al. Analysis of factors affecting the sieving effect of square plansifter[J]. Grain Processing, 2024, 49(5): 11-13.
- [20] 陈亚哲, 姚红良, 刘刚. 振动参数对筛分效率影响的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(8): 1 122-1 126.
- CHEN Y Z, YAO H L, LIU G. Experimental study on influence of vibration parameters on screening efficiency[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(8): 1 122-1 126.
- [21] 李少颖, 刘远晓, 王建立, 等. 粒度变化对小麦颗粒粉中淀粉理化性质与消化特性及多尺度结构的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 120-128.
- LI S Y, LIU S Y, WANG J L, et al. Effects of particle size on physicochemical properties, digestive characteristics, and multi-scale structures of starch in wheat granular flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 120-128.
- [22] 唐海燕, 石玉珠, 王黎. 新型双幅双频振动筛满足解耦条件方法[J]. 中国矿业, 1995(2): 69-73.
- TANG H Y, SHI Y Z, WANG L. A formula of the eliminating coupling of vibrating screen with double amplitude and frequency[J]. China Mining Magazine, 1995, 4(2): 69-73.