

粮食烘干废气多效除尘系统设计与试验

陈坤杰¹ 陈希壮¹ 井世亮¹ 孙杰² 张鑫² 於海明¹ 季凡¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 连云港市渐丰现代农业产业研究院有限公司, 连云港 222000)

摘要: 针对目前粮食烘干废气处理缺乏有效处理技术和装备, 影响粮食烘干产业发展的问题, 开发了一种集离心沉降、团聚和喷淋作用于一体的粮食烘干废气多效除尘技术及装备。首先, 通过仿真试验分析了喷淋塔气流速度、喷雾角度及喷雾压力对液滴场的影响, 采用单因素试验对仿结果进行验证并确定气流速度、喷雾角及压力的适宜范围, 然后以除尘效率为评价指标, 进行三因素三水平二次正交回归试验, 构建回归方程和响应曲面, 分析气流速度、喷雾角度及喷雾压力对除尘效率的影响并进行参数优化, 表明当气流速度为 0.89 ~ 1.33 m/s、喷雾角度为 -15° ~ 0° 、喷雾压力为 1 ~ 1.5 MPa 时, 液滴场较均匀。最优参数组合为: 气流速度 0.92 m/s、喷雾角度为 -8.4° 、喷雾压力 1.44 MPa。此时, 除尘效率最高可达到 96.27%。与脉冲除尘器的对比试验结果表明, 经过多效除尘器处理后, 粮食烘干废气平均粉尘质量浓度为 5.54 mg/m³, 低于脉冲除尘器的 7.05 mg/m³, 显著低于国家排放标准。

关键词: 粮食烘干废气; 除尘器; 仿真; 响应面试验

中图分类号: S226.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)03-0513-10

OSID:



Experiment on Multi-effect Dust Removal System for Grain Drying Exhaust Gas

CHEN Kunjie¹ CHEN Xizhuang¹ JING Shiliang¹ SUN Jie² ZHANG Xin² YU Haiming¹ JI Fan¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Lianyungang Jianfeng Modern Agricultural Industry Research Institute Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Aiming to address the lack of effective technologies and equipment for grain drying exhaust gas treatment, which affects the development of grain drying industry, a multi-effect dust removal technology and equipment integrating centrifugal sedimentation, agglomeration, and spray action for grain drying exhaust gas was developed. Initially, through simulation experiments, the effects of spray tower airflow velocity, spray angle, and spray pressure on the droplet field were analyzed. Single-factor experiments validated the simulation results and determined the appropriate range for airflow velocity, spray angle, and pressure. Subsequently, aiming for the highest dust removal efficiency, a three-factor three-level quadratic orthogonal regression experiment was carried out to construct a regression equation and response surface. The effects of airflow velocity, spray angle, and spray pressure on dust removal efficiency were analyzed for parameter optimization. It was proven that a uniform droplet field can be achieved at airflow velocities between 0.89 m/s and 1.33 m/s, spray angles between -15° and 0° , and spray pressures between 1 MPa and 1.5 MPa. The optimal parameter combination was identified as an airflow velocity of 0.92 m/s, a spray angle of -8.4° , and a spray pressure of 1.44 MPa. Experimental results showed that after optimization, the highest dust removal efficiency could reach 96.27%. Compared with a pulse dust collector, the average dust mass concentration of the grain drying exhaust gas treated by the multi-effect dust collector was 5.54 mg/m³, which was lower than 7.05 mg/m³ produced by the pulse dust collector and significantly below the national emission standard. This demonstrates that the treated grain drying exhaust gas can meet the emission standards using the developed multi-effect dust collector.

Key words: grain drying exhaust gas; dust collector; simulation; response surface methodology

收稿日期: 2024-01-31 修回日期: 2024-02-16

基金项目: 2023 年南京市现代农机装备与技术创新示范项目 (NJ[2023]06)

作者简介: 陈坤杰 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工、无损检测及其智能化装备研究, E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

通信作者: 於海明 (1974—), 男, 高级工程师, 主要从事农业工程与轻工业研究, E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

0 引言

随着我国经济和技术的快速发展,国内粮食烘干机械化水平逐步提高^[1-5]。据统计,截止到 2020 年底,国内粮食烘干机保有量达到 13.62 万台,烘干机械化水平接近 20%^[6]。由于粮食烘干过程中会排出大量高含尘废气,严重污染周边环境。目前,大多数的粮食烘干采用将废气通入灰房自由沉降后再排放的处理方式,但由于粉尘成分复杂,粉尘量大,沉降处理效果差,无法满足排放要求^[7-8]。因此,粮食烘干废气达标排放,成为了粮食烘干行业亟待解决的难题。

关于除尘设备的研究,国内外已经做了大量研究工作。文献[9]最先在 Fluent 软件中对喷淋塔内的气液两相流场进行模拟研究,提出可运用数值模拟技术来指导优化塔的结构设计。文献[10]利用 CFX 软件对文丘里洗涤器的烟气流速、体积分数、雾滴粒径和去除效率进行了研究,得到较好的仿真结果。文献[11]通过 CFD 仿真得出,带有减压孔的旋风分离器可以降低压降并提高分离效率;文献[12]采用计算颗粒流体力学(CPPD)方法对湿式电除尘器的喷头位置和喷头开启前后的电除尘器内部流场进行了数值模拟,发现了喷嘴对除尘器速度流场影响的规律。文献[13]利用 Fluent 软件和 Euler-Lagrange 模型模拟了喷淋塔内两相流场,研究了各因素对喷淋塔性能的影响,为喷淋塔的设计提供了参考。文献[14]为了提高旋风分离器的除尘净化效率,采用数值模拟方法得到了内部气-固两相流的分布参数云图,确定了旋风分离器的最佳设计方案,为旋风分离器的设计提供了参考。

但是,目前关于除尘技术和装备研究,主要是针对工业上烟尘排放展开,对粮食烘干机废气的除尘方法、技术和装备研究则处于空白。虽然目前有采用布袋除尘^[15]、重力除尘^[16-17]或过滤除尘^[18]装置进行粮食烘干废气除尘的应用,但由于粮食烘干废气湿度高、成分复杂,采用布袋等单一的除尘方式除尘效果较差,满足不了实际要求。为此,本文提出一种基于微颗粒团聚效应的多效除尘技术,通过仿真试验,研究喷淋塔主要参数对除尘效果的影响,研制开发一种多效除尘系统,以实现粮食烘干机废气达标排放。

1 多效除尘器组成及工作原理

试验测定结果显示,粮食烘干机废气不同于一般的工业含尘气体,一是其相对湿度较高,最高接近 100%,最低 50% 以上。二是粮食烘干机废气除了

含有 21.3% 的微小粉尘外,其余的 78.7% 为小土块、石子、碎秸秆、稻壳、草种、瘪稻谷大颗粒杂质。

因此,粮食烘干废气无法采用现有的任何一种单一除尘方法进行有效处理。为此,将离心除尘、微粒团聚和喷淋除尘进行集成,构建一种多效除尘系统。先对粮食烘干机排出的废气,通过旋风除尘器将其中的土块、石子和秸秆等较大的颗粒进行离心沉降,然后再利用文丘里管的气流加速功能,强化微小粉尘颗粒的湍流团聚效应,最后利用喷淋的方式除去废气中的微小粉尘。多效除尘系统如图 1 所示,主要由旋风除尘器、文丘里管、喷淋系统等组成。烘干机排出废气中较大的颗粒及杂质在旋风除尘器中沉到底部由关风机排出;细小粉尘随上升气排出旋风除尘器进入文丘里管被加速后冲入喷淋塔,在团聚效应作用下,部分细小粉尘颗粒团聚成较大的颗粒,在喷淋塔内被液滴捕捉、沉降,随水排出。处理后的洁净空气上升,通过喷淋塔出口排出。

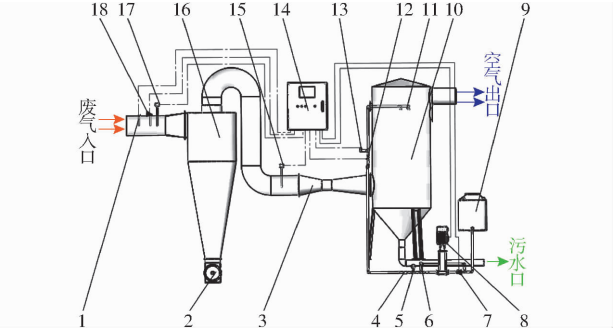


图 1 多效除尘系统结构示意图

Fig.1 Schematic of structure of multi-effect dust removal system

- 1. 温湿度传感器 2. 关风机 3. 文丘里管 4. 球阀 5. 压力表
- 6. 溢流阀 7. 电磁阀 8. 立式离心泵 9. 水箱 10. 喷淋塔
- 11. 实心锥喷嘴 12. 流量传感器 13. 压力传感器 14. 控制柜
- 15. 粉尘浓度传感器 II 16. 旋风除尘器 17. 风速传感器
- 18. 粉尘浓度传感器 I

喷淋系统包括喷淋塔、水箱、电磁阀、立式离心泵、压力表、溢流阀、球阀、实心锥喷嘴以及由粉尘浓度传感器、温湿度传感器、风速传感器和 PLC 组成的监测控制系统构成。PLC 作为上位机,通过各传感器监测含尘量、压力等参数,通过变频器控制多级离心泵的工作状态,实现喷淋系统的自动变量喷淋。

2 喷淋塔结构及参数设计

2.1 喷淋塔直径

喷淋塔气流速度对除尘效率有重要影响,较小的气流速度可使粉尘颗粒延长与雾滴接触的时间,有利于提高除尘效率,但在在烘干废气处理量一定的条件下,气流速度越低,喷淋塔直径就越大,设备投资越大。但是如果喷淋塔直径过小,气流速度就

会过大,会导致雾滴随气流排出喷淋塔,不仅降低除尘效率,还会造成环境污染。因此,喷淋塔直径(气流速度)是影响除尘效果的关键因素。参考喷淋塔设计标准,喷淋塔直径(塔径)计算公式为

$$D=\sqrt{\frac{Q_f}{900\pi v}}$$

(1)

式中 D ——喷淋塔直径,m
 Q_f ——每小时处理的气体量,m³/h
 v ——废气穿塔速度,m/s
在气体处理量一定条件下,塔径决定气流速度。

2.2 塔高及喷淋层确定

为了保证粉尘与液滴有足够的接触时间,喷淋塔高度需满足

$$\left\{\begin{array}{l} \theta=H_s/D \\ H_1>2d_2/3 \\ H_2\geq H_s/2 \\ H_3>2d_1/3 \\ H_4\geq d_2+d_3 \\ H_5\leq 2H_D/3 \\ H_s=H_1+H_2+H_3+H_T \\ H=H_s+H_D \end{array}\right.$$

(2)

式中 θ ——喷淋塔高径比,取 2~7
 H ——喷淋塔总高度,m
 H_s ——塔身高度,m
 H_T ——顶部高度,m
 H_1 ——水管入口定位高度,m
 H_2 ——喷淋段高度,m
 H_3 ——废气入口定位高度,m
 H_4 ——观察口定位高度,m
 H_5 ——塔底高度,m
 H_D ——支架高度,m
 d_1 ——喷淋塔进风口直径,m
 d_2 ——喷淋塔出风口直径,m
 d_3 ——观察口直径,m

由以上公式可知,喷淋塔结构尺寸基本由塔径决定。喷淋塔结构及模型如图 2 所示。
选用实心锥型喷嘴,为保证液滴场能够覆盖整个喷淋塔的内截面并有效减少液滴的逃逸,根据预试验结果,选择喷嘴通径为 2 mm,喷嘴数量为 4,通过万向节改变喷嘴喷雾方向的喷淋层布置形式如图 3 所示。

3 喷淋塔液滴场仿真

粮食烘干废气处理的难点在于对高湿微小粉尘

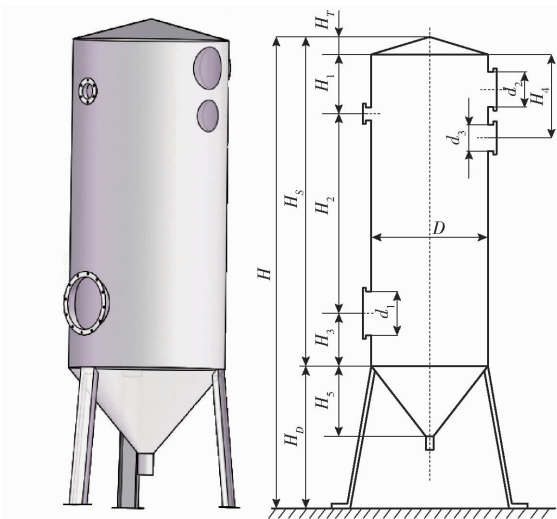


图 2 喷淋塔三维图及结构设计图
Fig. 2 Three-dimensional and structural design diagram of spray tower

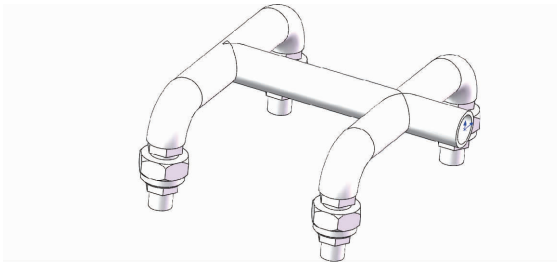


图 3 喷淋层布置形式图
Fig. 3 Spray layer arrangement diagram

的处理,多效除尘的关键核心是基于团聚效应的喷雾除尘。喷雾除尘虽然对微小颗粒有良好除尘效果,但雾滴直径、压力、气流速度等参数对除尘效率有重要影响,为此,通过仿真试验,以确定最佳的雾滴直径、压力及气流速度(塔径)等参数。

3.1 仿真模型构建

3.1.1 物理模型建立及网格划分

设定塔径为 1 500 mm,塔高 4 000 mm。根据网格无关性试验,设置单元尺寸为 40 mm,计算区域划分网格节点 97 554 个,网格单元 510 020 个。

3.1.2 模型及边界条件设置

采用 DPM 模型^[19]进行液滴的描述,模型考虑液滴的蒸发,蒸发组分设为 H₂O,入口设置为速度入口,出口设置为压力出口,计算方法采用 Simple,湍流模型为 Realisable $k-\varepsilon$ mode,喷嘴注射方式为 Pressure-Swirl-Atomiser,壁面条件设置为 Trap,注射材料为 Water-Liquid,设置破碎模型为 TAB model,喷雾半角为 25°,喷雾流量 0.078 L/s。

3.1.3 评价指标计算

在探索各因素对液滴场影响的仿真试验中,以液滴质量浓度作为评价指标,其计算公式为

$$C_y=m/V$$

(3)

式中 C_y ——液滴质量浓度, kg/m^3
 m ——计算单元内液滴的质量, kg
 V ——计算单元的体积, m^3

液滴逃逸率是指被气流吹出除尘设备液滴所占比率。其计算公式为

$$\eta_t = q_{mp} / q_m \times 100\% \tag{4}$$

式中 η_t ——液滴逃逸率, %
 q_{mp} ——液滴颗粒逃逸质量流量, kg/s
 q_m ——喷淋水的总质量流量, kg/s

3.2 仿真结果

3.2.1 气流速度

为了研究不同的塔内气流速度对液滴场的影响,在喷雾角度为 0° 的条件下,分别设置气流速度为 0 、 0.56 、 1.11 、 1.67 m/s 。给出距离喷淋塔顶部 $1\,000$ 、 $2\,000$ 、 $3\,000$ mm (Z_1 、 Z_2 、 Z_3) 监测面上,不同气流速度与压力下液滴质量浓度分布如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着压力的增加, $1\,000$ mm 监测面与 $2\,000$ mm 监测面上,液滴质量浓度均增加,液滴场对粉尘的抑制效果提高。在不同的气流速度下, $3\,000$ mm 监测面上液滴质量浓度随压力增加而减小,而且气流速度越高,液滴质量浓度越低,气流速度为 1.67 m/s 时,进风口处的液滴质量浓度几乎为零。这是因为气流速度过高时会将液滴吹出,而且压力增加会使得液滴粒径变小更易被风吹出,从而导致液滴场的分布极不均匀,抑尘性能变差。

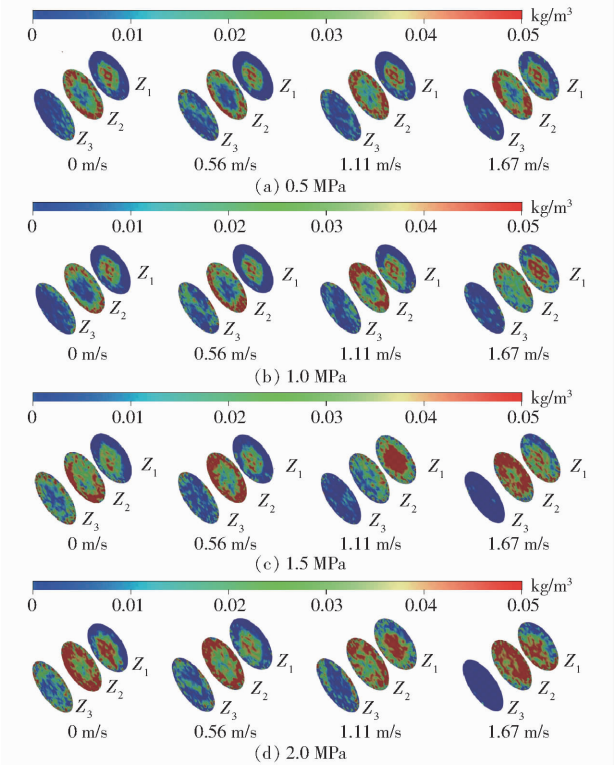


图 4 不同气流速度与压力下液滴质量浓度分布
Fig.4 Droplet mass concentration distribution at different inlet wind speeds and pressures

当气流速度过大时,液滴会被风夹带吹出,造成水资源的浪费和环境污染。为此,以喷淋塔出口为监测面,监测液滴逃逸的质量浓度,得到图 5 所示的不同气流速度及压力下的液滴逃逸率曲线。由图 5 可知,当气流速度为 0.56 m/s 时,不同压力下液滴逃逸率基本上没有变化,均小于 1% 。当气流速度为 1.11 m/s 时,压力由 0.5 MPa 增加至 2 MPa ,液滴的逃逸率会有明显增加,但整体上液滴逃逸率小于 5% 。当气流速度为 1.67 m/s 时,压力由 0.5 MPa 增加至 2 MPa ,液滴逃逸率显著增加,最高超过 10% 。综合分析,在气流速度为 $0.89 \sim 1.33$ m/s 时,能够得到比较理想的液滴场。

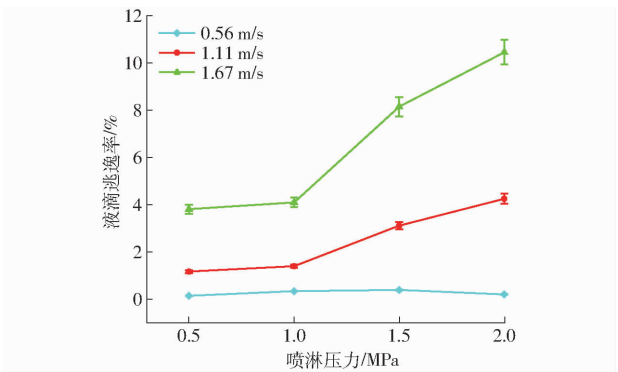


图 5 不同气流速度液滴逃逸率
Fig.5 Droplet escape rate at different inlet wind speeds

3.2.2 喷雾角度

为研究喷雾角度对液滴场的影响,分别设置喷嘴喷雾角度为 -30° 、 -15° 、 0° 、 15° 、 30° 进行试验,以喷淋塔 YZ 平面为监测面,如图 6 所示,得到不同喷雾角度下 YZ 平面上液滴质量浓度分布,如图 7 所示。分析图 7 可知,相同压力下,液滴场分布在喷雾角度 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 范围内呈相似变化规律。当喷雾角度为 -30° 时,液滴主要集中在喷嘴附近,且具有较高的液滴质量浓度,在进风口处液滴质量浓度较低且呈现出不均匀分布。当喷雾角度为 -15° 时,液滴场分布较均匀,且随着压力增加,液滴场的覆盖率逐步提高。当喷雾角度为 0° 时,液滴场的分布均匀性开始变差,在进风口一侧

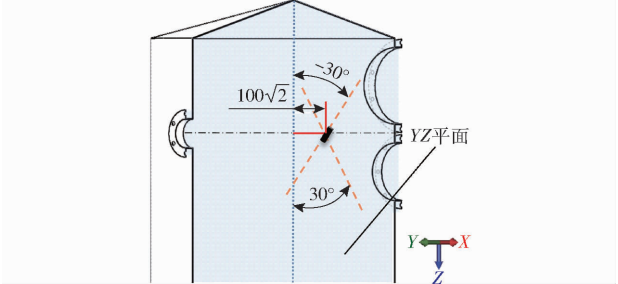


图 6 喷雾角度及 YZ 平面示意图
Fig.6 Schematic of spray angle and YZ plane

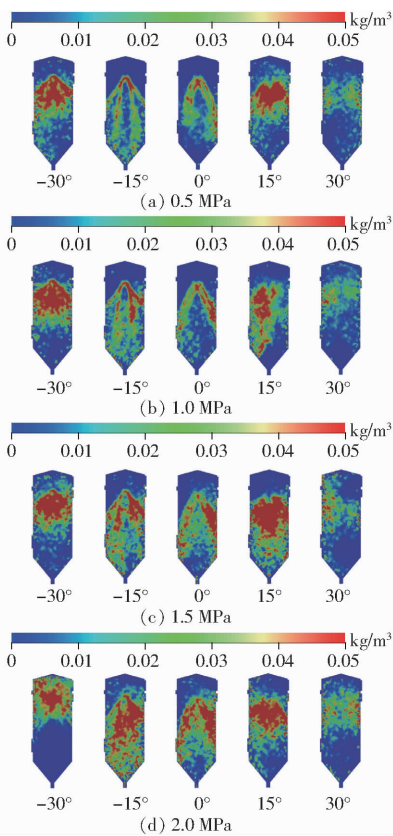


图 7 不同喷雾角度与压力下液滴质量浓度分布
Fig. 7 Droplet mass concentration distributions at different spray angles and pressures

液滴质量浓度小于出风口一侧的液滴质量浓度。当喷雾角度为 15° 及 30°, 液滴场的分布均匀性更差, 液滴场覆盖率也较低, 不能起到很好的除尘效果。同时, 在相同喷雾角度下, 压力越大液滴场的雾化效果越好, 液滴覆盖率越高。

为了进一步分析喷雾角度对液滴场的影响, 选择喷淋塔顶部距离 500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000 mm 的截面作为目标平面, 计算目标平面上液滴的平均质量浓度, 结果如图 8 所示。图中 A 区域为喷雾区、B 区域为除尘区、C 区域为进风区。由图 8 分析可知, 在喷雾角度 -30° ~ 30° 的范围内, 不同压力下, 液滴质量浓度在喷淋塔轴向上呈现先增后降趋势, 除尘区液滴质量浓度最高, 进风区液滴质量浓度降低。当喷雾角度为 -30° 和 15° 时, 各种喷雾压力下液滴场均匀性都较差; 当喷雾角度为 30° 时, 不同压力下平均液滴质量浓度曲线一致性较好, 但是最大质量浓度仅为 0.03 kg/m³; 当喷雾角度为 -15° 到 0° 时, 不同压力下最大平均质量浓度可达 0.05 kg/m³。这表明, 最佳的喷雾角度应该为 -15° ~ 0°。

3.2.3 喷雾压力

当喷嘴尺寸确定后, 液滴质量浓度、雾滴粒径、雾滴速度主要取决于喷雾压力。为了研究不同的喷

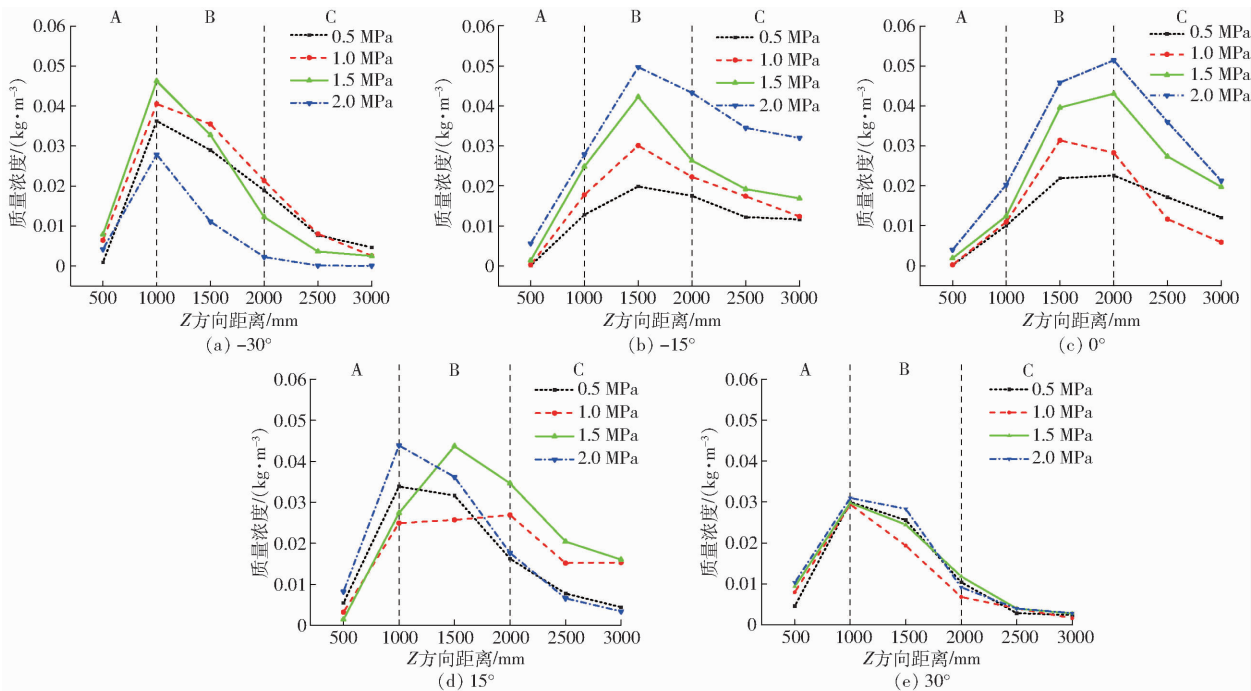


图 8 不同喷雾角度塔内沿着 Z 方向不同平面平均液滴质量浓度曲线

Fig. 8 Curves of average droplet mass concentration at different planes along Z direction in tower with different spray angles

雾压力对液滴场的影响, 在气流速度为 0 m/s 及喷雾角度为 0° 条件下, 分别设置喷雾压力为 0.5、1.0、1.5、2.0 MPa, 得到不同压力下液滴场速度分布图和液滴场粒径分布图如图 9 所示。由图 9 可

直观看出, 随喷雾压力增加, 液滴场内液滴数量急剧增加, 液滴平均速度降低; 由图 9 也可看出, 随喷雾压力增加, 液滴粒径变小, 液滴场覆盖率增大。

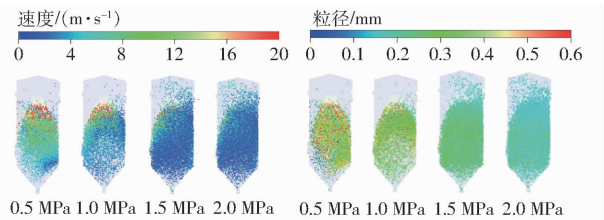


图9 液滴速度及液滴粒径分布

Fig.9 Droplet velocity and droplet size distribution

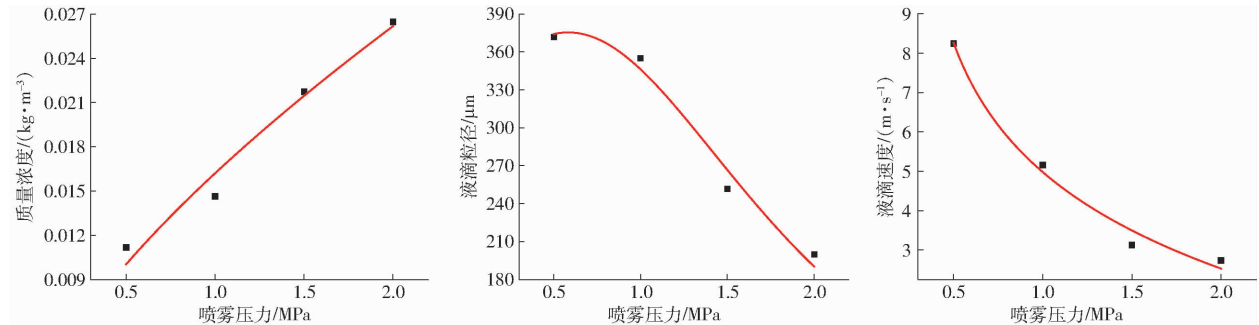


图10 液滴微观统计

Fig.10 Microstatistics of droplets

4 多效除尘器性能试验

4.1 试验材料及装置

试验在南京市江宁区太和水稻种植专业合作社进行,采用 CEL-1200 型烘干机(金子农机(无锡)有限公司,处理量 12 t,额定风量 10 800 m³/h)进行烘干试验,稻谷初始含水率为 22.5%、18.6%、23.1%、19.5% 及 24.2%,最终降至 15.0%。试验设备仪器包括:ZGF-3 型粉尘采样器(盐城市紫光电子仪器有限公司)、MTQ300D 型电子天平(深圳市美孚电子有限公司)、Smart Sensor AS8336 型风速仪等。

4.2 参数测定

4.2.1 粉尘质量浓度

采用粉尘采样器在喷淋塔出口采集粉尘,计算粉尘的浓度。粉尘采样操作按照文献[20]执行。每次试验条件下重复测量 3 次,取平均值作为试验结果。粉尘质量浓度计算公式为

$$C = \frac{m_2 - m_1}{Qt} \times 1\,000 \tag{5}$$

式中 C——粉尘质量浓度,mg/m³
m₁——采样前滤膜质量,mg
m₂——采样后滤膜质量,mg
t——采样时间,min
Q——采样流量,L/min

4.2.2 除尘效率

除尘效率测定参考文献[21],计算公式为

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \tag{6}$$

式中 η——除尘效率,%

上述试验结果说明,喷雾压力是影响液滴场的关键因素。如图 10 所示,喷雾压力增加,液滴平均粒径减小,平均浓度增加,表面积增大,与粉尘粒接触机会变大并增加了液滴与尘粒的接触时间,有利于对尘粒的捕捉及抑尘。但较高的压力会造成液滴逃逸率增加,因此,喷雾压力应在 1~1.5 MPa 较为适宜。

C₁——喷淋塔进口粉尘质量浓度,mg/m³

C₂——喷淋塔出口粉尘质量浓度,mg/m³

4.3 除尘效率单因素试验

由仿真试验可知,气流速度、喷雾角度、喷雾压力是影响喷淋塔内液滴场的主要因素,为探究以上各因素对除尘效率的影响规律,开展以除尘效率为指标的单因素试验,在烘干中期每组连续进行 3 次重复试验,以平均值作为结果。

4.3.1 气流速度

考虑到除尘器的除尘效率及液滴的逃逸,选取喷淋塔气流速度为 0.56、0.89、1.11、1.33、1.67 m/s 共 5 个水平,在喷雾角度为 -7.5°、喷雾压力为 1.25 MPa 条件下,测量多效除尘器的除尘效率,分析气流速度对除尘效率的影响。

4.3.2 喷雾角度

考虑到除尘器的除尘效率及液滴场的分布,选取喷嘴喷雾角度为 -30°、-15°、0°、15°、30° 共 5 个水平,在气流速度为 1.11 m/s、喷雾压力为 1.25 MPa 条件下进行试验,分析喷雾角度对除尘效率的影响。

4.3.3 喷雾压力

综合考虑到除尘器的除尘效率及液滴逃逸率,选取喷嘴喷雾压力为 0.5、0.75、1、1.25、1.5 MPa 共 5 个水平,在气流速度为 1.11 m/s、喷雾角度为 -7.5°条件下进行试验,分析喷雾压力对除尘效率的影响。

4.4 单因素试验结果与分析

气流速度、喷雾角度、喷雾压力对除尘效率的影响如图 11 所示。由图 11a 可知,在气流速度由 0.56 m/s 增加到 1.67 m/s 时,除尘效率呈现逐渐降

低趋势,在气流速度大于 1.11 m/s 以后除尘效率降低较快,试验结果与前文液滴场分布规律一致。这可能是由于气流速度增大后,喷淋塔内液滴场覆盖性能变差,抑尘性能变差,从而导致除尘效率变低,因此,适宜气流速度取值为 0.89 ~ 1.33 m/s。

由图 11b 可知,在喷雾角度为 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 变化时,除尘效率呈先增加后降低趋势。可能的原因是,随喷雾角度的增加,液滴场逐渐均匀,除尘效率也相应增加,但喷雾角度过大时,会有部分液滴直接飞向

塔壁,从而除尘效率降低,因此,最佳确定喷雾角度为 $-15^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 。

由图 11c 可知,当喷雾压力为 0.5 MPa 增加到 1.5 MPa 时,除尘效率呈现逐渐增加趋势,但在喷雾压力大于 1 MPa 以后除尘效率增加缓慢。可能是随喷雾压力增加,液滴场变得密集,有利于除尘效率提高。压力过大,会使液滴逃逸率增加,从而导致除尘效率增加缓慢,因此,合适的喷雾压力应为 1 ~ 1.5 MPa。

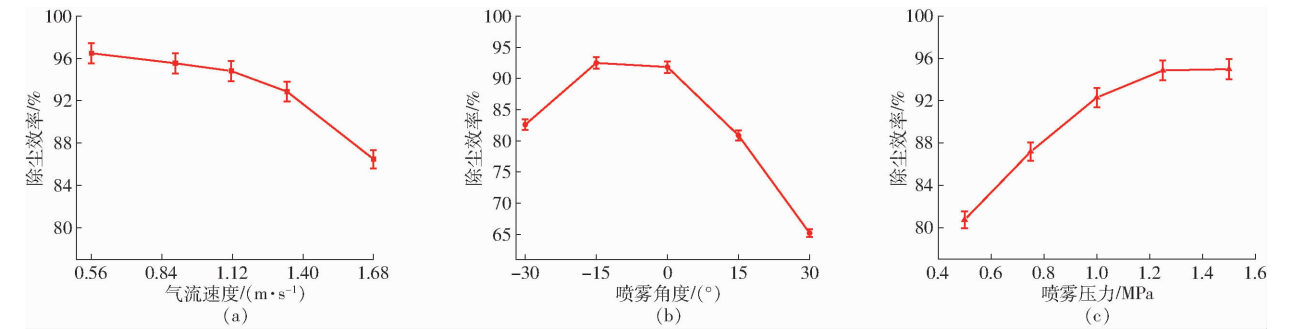


图 11 不同试验因素除尘效率变化曲线

Fig. 11 Variation curves of dust removal efficiency under different test factors

4.5 除尘效率正交试验

为探究试验因素对评价指标影响的显著性、各因素间交互作用并得到最优参数组合。参考文献[22–26],选择气流速度、喷雾角度、喷雾压力为试验因素。除尘效率为性能评价指标,设计三因素三水平正交试验。根据单因素试验及前文仿真分析得到的结果,试验因素编码如表 1 所示。在烘干中期每组试验重复测量 3 次后取平均值。

表 1 试验因素编码
Tab.1 Level of test factors

编码	因素		
	气流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	喷雾角度/($^{\circ}$)	喷雾压力/MPa
-1	0.89	-15.0	1.00
0	1.11	-7.5	1.25
1	1.33	0	1.50

4.6 正交试验结果与分析

为了得到喷雾压力、气流速度和喷雾角度最佳参数组合并建立多效除尘器除尘效率预测模型,进行正交试验并对试验结果进行回归分析,结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 表示气流速度、喷雾角度、喷雾压力编码值。由表 2 可知,在气流速度为 0.89 m/s、喷雾角度为 -7.5° 和喷雾压力为 1.5 MPa 条件下,除尘效率最高,可达 95.99%。如果以除尘效率最大为优化目标,通过 Design-Expert 10 中参数优化模块进行参数优化,结果显示,当气流速度为 0.92 m/s、喷雾角度为 -8.4° 、喷雾压力为 1.44 MPa 时,能够获得最优除尘效率,为 96%。

表 2 正交试验结果

Tab.2 Orthogonal test results

试验序号	因素			$\eta/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	0	0	0	94.55
2	1	1	0	90.35
3	0	0	0	94.85
4	0	0	0	94.79
5	0	0	0	95.05
6	1	0	1	92.19
7	0	-1	1	92.98
8	0	0	0	95.14
9	0	-1	-1	89.96
10	0	1	1	92.28
11	-1	-1	0	92.89
12	0	1	-1	89.25
13	1	0	-1	90.82
14	-1	1	0	92.14
15	1	-1	0	90.69
16	-1	0	1	95.99
17	-1	0	-1	92.55

为了检验优化参数的准确性,取气流速度为 0.92 m/s, 喷雾角度为 -8.4° , 喷雾压力为 1.44 MPa,在烘干中期进行 5 组验证试验,结果显示:5 组试验平均除尘效率能达到 96.27%,最大除尘效率达到 96.82%,与优化结果相当。

方差分析结果显示,各因素对除尘效率的影响程度依次为:喷雾压力、气流速度、喷雾角度。回归模型中 X_1 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著 ($P < 0.01$),

X_2 、 X_1X_3 影响显著($0.01 \leq P < 0.05$),其他影响不显著。除尘效率二次回归方程表示为

$$Y = 94.88 - 1.91X_1 - 0.31X_2 + 1.36X_3 + 0.10X_1X_2 - 0.52X_1X_3 - 0.79X_1^2 - 2.56X_2^2 - 1.19X_3^2$$

(7)

为进一步探究各因素间的交互作用对除尘效率的影响规律,绘制出各因素对除尘效率影响的响应曲面,如图 12 所示。

由图 12a 可知,当喷雾压力为 1.25 MPa 时,随着气流速度增加,除尘效率降低,当喷雾角度由 -15° 增加至 0° 。除尘效率将先增加后减小。可能是由于气流速度增加会使一部分粉尘来不及被液滴

捕捉就被吹出所导致。

由图 12b 可知,当喷雾角度为 -7.5° 时,气流速度降低与喷雾压力增加都会使得除尘效率增加。可能是气流速度降低会增加粉尘在喷淋塔内停留时间,而喷雾压力增加会使得液滴数量增加,有利于液滴对粉尘的捕获。

由图 12c 可知,当气流速度为 1.11 m/s 时,除尘效率随着喷雾角度增加先增加后降低,随着喷雾压力增加而增大。这可能是随着喷雾角度增加,喷淋塔内液滴场均匀性变好,但当喷雾压力过大时,会造成部分雾滴直接撞上喷淋塔墙壁,失去除尘能力。

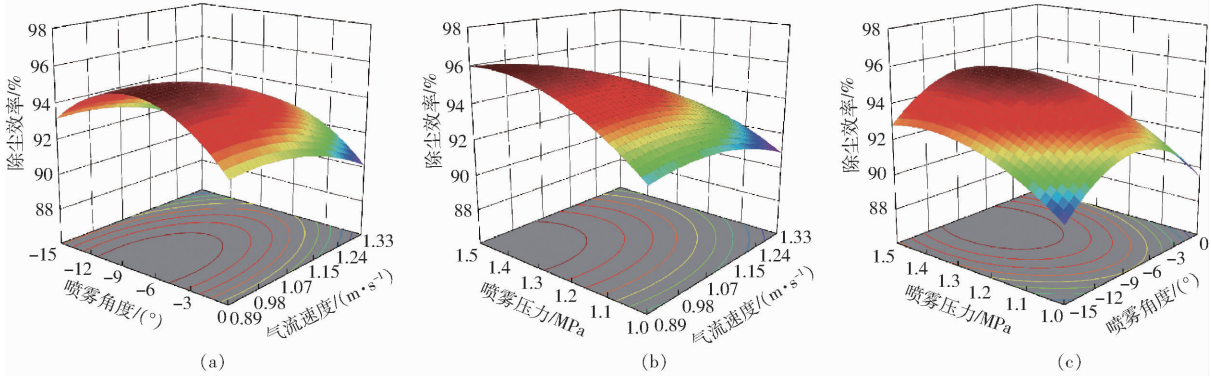


图 12 因素间交互作用对除尘效率的影响

Fig. 12 Influence of interaction among various factors on dust removal efficiency

5 多效除尘器与脉冲除尘器除尘效果对比

在最优参数条件下,进行多效除尘器与 TBLM 型脉冲除尘器除尘效果对比试验。试验时采用 YR-FD100 型粉尘浓度测量仪(山东瑶瑞电子科技有限公司),每 10 min 分别采集测量两种除尘器排出的废气中粉尘浓度,结果如表 3 所示。由表 3 可知,经过多效除尘器除尘后,排放的废气中平均粉尘质量浓度约为 5.54 mg/m³,而经过脉冲除尘器的除尘后平均粉尘质量浓度约为 7.05 mg/m³,前者较后者降低 27.26%。这说明多效除尘器除尘效果优于脉冲除尘器。另外,国家大气排放标准规定的颗粒物排放极限为150mg/m³[27],经过多效除尘

器处理后粮食烘干废气中粉尘浓度远低于国家标准,说明粮食烘干机废气经过多效除尘器处理后,可以满足环保要求。

6 结论

- (1)基于理论分析确定了喷淋塔的结构,气流速度、喷雾角度及喷雾压力是影响多效除尘器喷淋塔液滴场的主要因素,当气流速度为 0.89 ~ 1.33 m/s、喷雾角度为 $-15^\circ \sim 0^\circ$ 、喷雾压力为 1 ~ 1.5 MPa 时,液滴场较均匀,有利于除尘。
- (2)除尘效率最高时最优参数组合为:气流速度 0.92 m/s、喷雾角度 -8.4° 、喷雾压力 1.44 MPa,此时,平均除尘效率可达 96.27%,能够有效抑制烘干机排出的粉尘。
- (3)经过多效除尘器处理后,粮食烘干废气平均粉尘质量浓度为 5.54 mg/m³,优于脉冲除尘器的 7.05 mg/m³,显著低于国家规定湿式除尘器排气口粉尘排放最高允许浓度(150 mg/m³),证明粮食烘干废气经过多效除尘器处理后,可以实现达标排放。

表 3 对比试验结果

Tab.3 Comparison of test results

mg/m³

序号	除尘后粉尘平均浓度	
	多效除尘器	脉冲除尘器
1	5.54	7.08
2	5.51	6.91
3	5.59	7.15

参 考 文 献

[1] 杜岳峰,傅生辉,毛恩荣,等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2019,50(9):1-17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):1-17. (in Chinese)

[2] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1):1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):1-18. (in Chinese)

[3] 魏娟,杨鲁伟,张振涛,等. 塔式玉米除湿热泵连续烘干系统的模拟及应用[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):114-119.
WEI Juan, YANG Luwei, ZHANG Zhentao, et al. Simulation and application of continuous corn drying tower of dehumidified heat pump[J]. Journal of China Agricultural University,2018,23(4):114-119. (in Chinese)

[4] 刘紫薇,贲宗友,杨浩勇,等. 粮食烘干机变频式热泵系统的开发及试验研究[J]. 南京农业大学学报,2022,45(6):1286-1294.
LIU Ziwei, BEN Zongyou, YANG Haoyong, et al. Design of heat pump system of variable frequency grain dryer and rice drying experiment[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2022,45(6):1286-1294. (in Chinese)

[5] 李业德,李业刚. 顺流式谷物烘干机的模糊控制系统[J]. 农业工程学报,2002,18(1):162-164.

[6] 姚渠,尹君,李瑞敏,等. 我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J]. 粮食加工,2022,47(3):77-79.

[7] LIU Y, SHAO L, WANG W Z, et al. Study on fugitive dust control technologies of agricultural harvesting machinery[J]. Agriculture,2022,12(7):1038.

[8] 秦锋,肖彦民. 关于顺逆流烘干机废气粉尘排放处理方法的研究[J]. 现代食品,2019(16):8-10.

[9] MAROCCO L, INZOLI F. Multiphase Euler-Lagrange CFD simulation applied to wet flue gas desulphurisation technology[J]. International Journal of Multiphase Flow,2009,35(2):185-194.

[10] ALI M, YAN C, SUN Z, et al. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a venturi scrubber in CFX[J]. Nuclear Engineering and Design,2013,256:169-177.

[11] PRASANNA N, SUBRAMANIAN K, AJAY S, et al. CFD study on the performance of reducing pressure drop holes in cyclone separator[J]. Materials Today: Proceedings,2021,43:1960-1968.

[12] 戴春喜,梁平,车德勇,等. 蜂窝管湿式电除尘器内部流动特性研究[J]. 发电技术,2022,43(1):155-159.
DAI Chunxi, LIANG Ping, CHE Deyong, et al. Study on flow characteristics in honeycomb tube wet electrostatic precipitator[J]. Power Generation Technology,2022,43(1):155-159. (in Chinese)

[13] 潘文惠. 喷淋塔的参数化设计及数值模拟分析[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
PAN Wenhui. Parametric design and numerical simulation of spray tower[D]. Xiangtan: Xiangtan University,2012. (in Chinese)

[14] 万筱军,何仁财,吴兆胜,等. 基于计算流体力学数值模拟分析的旋风分离器优化设计[J]. 航天器环境工程,2012,29(6):708-711.
WAN Xiaojun, HE Rencai, WU Zhaosheng, et al. CFD-based simulation analysis for the optimization design of cyclone separator[J]. Spacecraft Environment Engineering,2012,29(6):708-711. (in Chinese)

[15] 郑州中粮科研设计院有限公司. 一种用于粮食烘干机的多级组合除尘装置:CN202022086896.3[P]. 2021-06-29.

[16] 铁岭圣添机械有限公司. 一种谷物干燥机重力除尘装置:CN202020101607.X[P]. 2020-10-09.

[17] 江苏丰尚智能科技有限公司. 一种废气室式谷物烘干塔:CN201721610967.7[P]. 2018-06-19.

[18] 安徽森米诺农业科技有限公司. 一种粮食烘干机用粉尘收集过滤装置:CN201810640714.7[P]. 2018-12-04.

[19] LIU N, CHEN K, DENG E, et al. Study on dust suppression performance of a new spray device during drilling and blasting construction in the metro tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023,133:104975.

[20] 中华人民共和国卫生部. 工作场所空气中有害物质监测的采样规范:GBZ 159—2004[S]. 2004.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 湿式除尘器性能测定方法:GB/T 15187—2017[S]. 2017.

[22] 陈坤杰,贺鑫业,祁恒阳,等. 海苔片热压粘合工艺参数试验优化[J]. 农业机械学报,2023,54(4):407-415.
CHEN Kunjie, HE Xinye, QI Hengyang, et al. Optimization and experiment on process parameters of hot pressing bonding of seaweed sheet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):407-415. (in Chinese)

[23] 刘春山,陈思羽,肖世伟,等. 稻谷变温均质干燥装置工艺优化与性能试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊1):366-372.
LIU Chunshan, CHEN Siyu, XIAO Shiwei, et al. Process research and performance verification of variable temperature homogeneous drying device for paddy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.1):366-372. (in Chinese)

[24] 马学杰,刘敏,侯占峰,等. 小粒牧草种子丸粒化包衣数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(2):43-52.

MA Xuejie, LIU Min, HOU Zhanfeng, et al. Numerical simulation and experimental study on the pelletized coating of small grain forage seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 43–52. (in Chinese)

[25] 何瑞银, 王建林, 徐高明, 等. 限制充种姿态-正负压式小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 39–49, 167.

HE Ruiyin, WANG Jianlin, XU Gaoming, et al. Design and experiment of wheat precise seed metering apparatus with positive and negative pressure with function of limiting seed filling posture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 39–49, 167. (in Chinese)

[26] 姚福强, 王永维, 郝一枫, 等. 气力式杂交水稻制种授粉机授粉管结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 18–25.

YAO Fuqiang, WANG Yongwei, HAO Yifeng, et al. Optimization of the structural parameters of pollination pipe for pneumatic hybrid rice breeding pollination machines[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 18–25. (in Chinese)

[27] 国家环境保护总局. 环境保护产品技术要求 工业粉尘湿式除尘装置: HJ/T 285—2006[S]. 2006.

(上接第 502 页)

[30] CHEN Y Y, HUANG S P, WU T W, et al. UWB system for indoor positioning and tracking with arbitrary target orientation, optimal anchor location, and adaptive NLOS mitigation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 9304–9314.

[31] 胡晓强, 武东杰, 彭侠夫. INS/GNSS/VO 组合导航系统复合型异常检测与容错算法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(2): 148–156.

HU Xiaoqiang, WU Dongjie, PENG Xiafu. Compound anomaly detection and fault tolerance algorithm for INS/GNSS/VO integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(2): 148–156. (in Chinese)

[32] STAHLKE M, KRAM S, OTT F, et al. Estimating TOA reliability with variational autoencoders[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(6): 5133–5140.

[33] 杨波, 刘枫, 薛亮, 等. 一种有色噪声条件下的改进卡尔曼滤波算法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(10): 1004–1009.

YANG Bo, LIU Feng, XUE Liang, et al. An improved Kalman filter algorithm under colored noise[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(10): 1004–1009.