

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.024

雷丛林, 李岩, 张何英, 等. 不同粮种的通风阻力特性研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 175-182.

LEI C L, LI Y, ZHANG H Y, et al. Study on ventilation resistance characteristics of different grains[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 175-182.

不同粮种的通风阻力特性研究

雷丛林¹, 李岩¹✉, 张何英², 张来林³, 吴东亮⁴, 方江坤⁵

- (1. 中央储备粮漳州直属库有限公司, 福建 漳州 363105;
2. 福建省储备粮管理有限公司漳州直属库, 福建 漳州 363000;
3. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001;
4. 中央储备粮厦门直属库有限公司, 福建 厦门 361026;
5. 福建省储备粮管理有限公司漳浦直属库, 福建 漳州 363200)

摘要:通过对不同粮种通风实验中粮堆阻力等相关参数的检测结果可知:单位粮层阻力与粮面表观风速呈显著正相关,多项式二次函数对其拟合度更高;且粮面表观风速相同时大豆粮堆的单位粮层阻力相对较小,玉米次之,稻谷和小麦相对较大,即单位粮层阻力与粮食籽粒的结构、表面的光滑度与粮堆孔隙度等有关。穿网阻力随着粮面表观风速的增大而逐渐增大,两者呈显著正相关,且粮面表观风速增大到一定程度后穿网阻力均会急剧增大,故通风过程中不能盲目选择大风量通风,以避免能耗。而粮堆的通风均匀度与风量关系不大,主要随粮层厚度的增加而逐渐增大,不同粮种的通风均匀度大小关系是:稻谷<小麦<大豆<玉米,这与粮食的籽粒形状、堆叠结构有关。

关键词:粮种;机械通风;单位粮层阻力;穿网阻力

中图分类号:TS201.6;S-3 文献标识码:A 文章编号:1007-7561(2023)03-0175-08

Study on Ventilation Resistance Characteristics of Different Grains

LEI Cong-lin¹, LI Yan¹✉, ZHANG He-ying², ZHANG Lai-lin³, WU Dong-liang⁴, FANG Jiang-kun⁵

- (1. Sinograin Zhangzhou Depot Ltd. Company, Zhangzhou, Fujian 363105, China; 2. Fujian Grain Reserves Co., Ltd. Zhangzhou Depot, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 3. School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 4. Sinograin Xiamen Depot Ltd. Company, Xiamen, Fujian 361026, China; 5. Fujian Grain Reserves Co., Ltd. Zhangpu Depot, Zhangzhou, Fujian 363200, China)

Abstract: The results of resistance characteristics in different grains during ventilation experiments showed that the resistance of unit grain layer was positively correlated with the surface wind speed of grain, and the polynomial quadratic function had the higher fitting degree for them. When the surface wind speed of grain was at the same level, the resistance of unit grain layer in soybean was lower, followed by corn but that of rice and wheat was higher, indicating that the resistance of unit grain layer was related to grain structure、surface

收稿日期: 2023-02-08

基金项目: 河南省现代农业产业技术体系建设专项资金(S2015-02-G06)

Supported by: Special Fund for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System in Henan Province (No. S2015-02-G06)

作者简介: 雷丛林, 男, 1975 年出生, 本科, 高级工程师, 研究方向为粮油仓储管理。E-mail: 13924070995@126.com.

通讯作者: 李岩, 女, 1988 年出生, 硕士, 助工, 研究方向为粮油储藏技术应用。E-mail: 15260029737@126.com.

smoothness and porosity. The resistance of net was positively correlated with the surface wind speed of grain, with the increase of surface wind speed and the resistance of net during ventilation process. The resistance of net could increase sharply when the surface wind speed increased to a certain extent. In order to avoid the waste of energies, the large volume shouldn't choose blindly during the process of ventilation. The ventilation uniformity of grain increased gradually with the increase of the grain layer thickness, which was less affected by the ventilation volume when the ventilation uniformity of different grains was compared, rice was lower, follow by wheat, and soybean and corn was higher, which was related to grain shape and stacking structure.

Key words: grain varieties; mechanical ventilation; resistance of unit grain layer; resistance of the net

机械通风是目前粮食仓储工作中的一项重要储粮技术,是近代工程技术对储粮行业的一大贡献,不仅可用于降温降水以提高储粮稳定性,而且操作简单、费用低廉。该技术是粮堆降温、环流控温、补冷均温、熏蒸与气调杀虫等储粮技术的应用基础,因此在粮库生产中得到广泛应用,成为各类仓房的必备设施^[1-2]。而仓房的风道与环流系统配备,需要参考仓房类型、粮堆高度、通风量与粮层阻力等参数,进而计算风道尺寸、选用风机规格^[3]。根据流体力学原理,机械通风过程中空气沿风道流动和穿过粮层时必然会产生一定的压力损失,即通风系统阻力^[4]。以往关于粮堆厚度、粮层阻力、通风均匀度等参数的检测与研究较多^[5-7],但对穿网阻力等参数研究相对较少。且杨晓帆等认为采用粮堆内静压值判断机械通风均匀度是一种相对较好的检测手段^[8]。故参考河南工业大学设计的粮堆通风性能参数检测装置^[9],以粮堆内静压值检测为基础,开展不同粮种粮堆的通风阻力特性研究,探寻粮面表观风速、单位粮层阻力、穿网阻力、通风均匀度等参数的变化规律,为机械通风技术应用、风机选用配备提供数据参考。

1 材料与方 法

1.1 通风模拟装置

实验装置主箱体尺寸 1 000 mm(长)×1 000 mm(宽)×500 mm(厚),内置孔板厚度 2.0 mm(开孔率 18.84%);实验在垂直通风的前提下(见图 1),通过改变风机的送风方式,实现压入式上行通风和吸出式下行通风的转换(见图 2)。通风模拟装置分别装入玉米、小麦、稻谷、大豆四种粮食,开展粮堆通风阻力特性相关参数检测。



图 1 通风模拟装置示意图

Fig.1 The schematic diagram of ventilation simulator



图 2 压入式与吸出式的通风示意图

Fig.2 The ventilation diagram of push-in and pull-out ventilation

1.2 实验粮种

实验粮种分别包括玉米、小麦、稻谷、大豆四种,具体质量情况如下:

玉米:2022 年产美国进口玉米,色泽、气味正常,容重 747 g/L、水分 14.3%、杂质 0.9%、不完善粒 7.5%、脂肪酸值 45.0 mg KOH/100g、品尝评分值 80 分。

小麦:2022 年安徽产小麦,色泽、气味正常,容重 823 g/L、水分 12.2%、杂质 0.3%、不完善粒

3.4%、面筋吸水量 209、品尝评分值 84 分。

稻谷：2021 年安徽产晚籼稻谷，色泽、气味正常，水分 12.9%、杂质 0.4%、出糙率 79.1%、整精米率 60.2%、谷外糙米 1.5%、脂肪酸值 18.1 mg KOH/100g、品尝评分值 85 分。

大豆：2019 年产黑龙江大豆，色泽气味正常，水分 9.0%、杂质 0.2%、完整粒率 96.1%、损伤粒率 1.4%、蛋白质溶解比率 86.1%、粗脂肪酸值 1.2 mg KOH/100g。

1.3 实验仪器

GHCS-1 000 型两用容重器：吉林中谷工程有限公司；PB1502-S 型电子天平、AX204 型电子天平：梅特勒—托利多（中国）有限公司；DHG-9145A 型电热鼓风干燥箱：上海一恒科学仪器有限公司；JFSD-100 型电动粉碎机、JJM-54S 型面筋洗涤仪、JHGM 型面筋烘干仪、JZSM 型面筋测定仪：上海市嘉定粮油检测仪器厂；JLG-IIA 型砬谷机、JNM-III 型检验碾米机：中储粮成都储藏研究院有限公司；YJB-1500 型补偿式微压计：上海隆拓仪器设备有限公司；TES-1340 型热线式风速仪：台湾泰仕电子工业股份有限公司；YS90L-2 型多管风机：河南未来机电工程有限公司；L1 000-0075G/0110P-T4 型高性能矢量变频器：南京雷欧电器科技有限公司；自制喇叭型风罩（ $\Phi_{上}=5\text{ cm}$ 、 $\Phi_{下}=30\text{ cm}$ ，如图 3）等。



图 3 自制喇叭型风罩示意图

Fig.3 The schematic diagram of self-made trumpet type wind cover

1.4 实验方法

1.4.1 静压值测点布置

粮面共设 7 个检测点，具体布点见图 4；每个检测点分 5 层检测，距底部 100 mm 处为第 1

层测点，其它 4 层的间隔为 200 mm，依次向上顶部为第 5 层测点。

1.4.2 风速检测

实验时，通过调整风机上变频器的频率确定实验的风量；当风机运行稳定后，在实验粮堆表面，使用风速仪测得喇叭形风罩顶部小端口处放大的风速值，再换算出实际的粮面表观风速。粮面表观风速检测位置为装置四角和中心部位，共五个检测点，具体如图 5 所示。

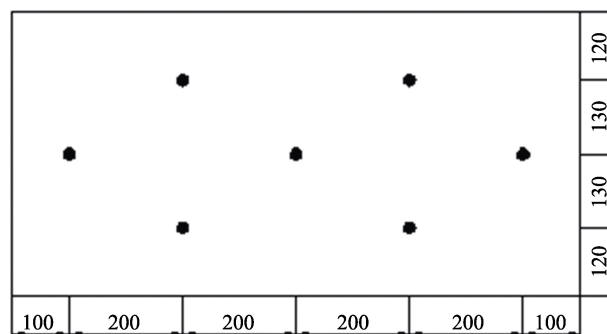


图 4 静压测定平面布点示意图

Fig.4 The plane schematic diagram of detection points for static pressure

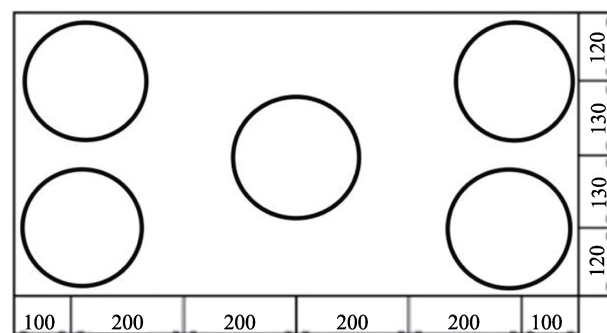


图 5 粮面表观风速检测布点示意图

Fig.5 The schematic diagram of detection points for surface wind speeds

1.4.3 穿网阻力检测

当空气穿过金属孔板进入粮堆时，会产生一定的压力降，即穿网阻力。穿网阻力在压入式上行通风条件下检测。在距孔板中心点左右两侧 5 cm 处，各开一个直径稍大于静压管直径的圆孔，将两根静压管分别插入上述两个小孔中，使其中一根静压管的前端小孔固定底部孔板上方 5 mm 左右的位置，另一根静压管的前端小孔固定在孔板下方 5 mm 左右的位置。实验过程中，微调两根静压管的插入深度，上下静压力检测数据的差

值最小时的位置即为检测穿网阻力的最佳位置，此时测得孔板上下静压差值即为穿网阻力。

1.5 参数测定与计算

实验在压入式上行通风和吸出式下行通风条件下进行，通过设置变频器的不同频率（10、20、30、40、50 Hz）达到调节风机风量的目的，检测不同风量条件下粮堆的粮面表观风速、粮堆内部静压值和穿网阻力值，经数据处理得到相关通风参数。对同一种粮食而言，测完压入式上行通风条件下的相关参数数据，再开展吸出式下行通风实验进行检测，因粮食高度并未大幅下降，故实验中未再补充粮食至实验装置。

1.5.1 风速和风量计算

根据流体连续方程（ $F_1 \times v_1 = F_2 \times v_2$ ），风速仪实测风速值除以风罩放大倍数即可计算出实际的粮面表观风速，进而计算出通风量，见式（1）。

$$Q = 3600 \times F \times v \quad (1)$$

式中： Q ——风量， m^3/h ； F ——粮面表层面积， m^2 ； v ——粮面表观风速， m/s 。

1.5.2 单位粮层阻力计算

在通风过程中，空气流穿过单位粮层的压力损失为单位粮层阻力，见式（2）。

$$Z = \frac{P_5 - P_1}{L} \quad (2)$$

式中： Z ——单位粮层阻力， Pa/m ； P_5 ——第 5 层的静压均值， Pa ； P_1 ——第 1 层的静压均值， Pa ； L ——第 5 层与第 1 层间的距离， m 。

1.5.3 通风均匀度计算

根据粮层中的静压值分布判断通风均匀性，求出该粮层静压值的平均值和标准差，进而计算通风均匀度，见式（3）。

$$J = \left(1 - \frac{S}{\bar{P}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

式中： J ——通风均匀度，%； P ——粮层内的静压值， Pa ； \bar{P} ——该粮层静压值的平均值， Pa ； S ——粮层内静压值的标准差。

2 结果与分析

2.1 单位粮层阻力变化情况分析

粮堆通风实验时，通过调整变频器的频率来改变风机的运行转速，分别进行压入式上行通风

和吸出式下行通风，从而影响粮堆的通风量、粮面表观风速、以及粮堆阻力等参数的变化。随着变频器工作频率的增大，粮堆通风量随之增大，风速亦随之增大。由于风量与风速呈线性相关，故选择粮面表观风速为自变量进行数据分析，两种通风方式下不同粮种的粮面表观风速和单位粮层阻力的变化情况如图 6、图 7 所示。

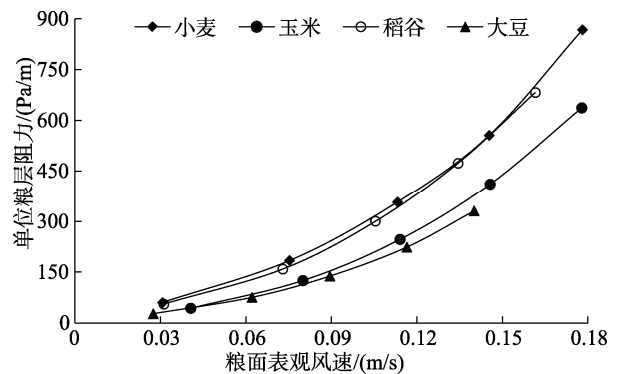


图 6 压入式上行通风方式下不同粮种的单位粮层阻力变化

Fig.6 The change of resistance of unit grain layer of different grains under push-in ventilation

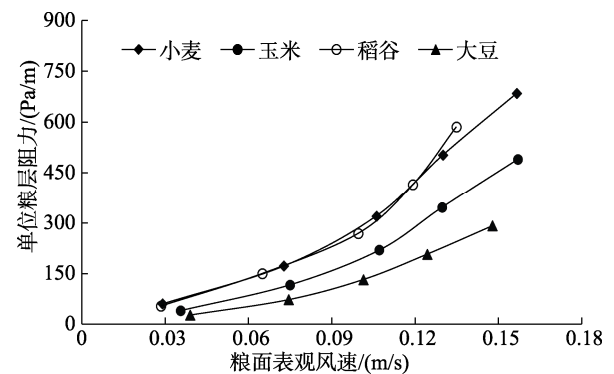


图 7 吸出式下行通风方式下不同粮种的单位粮层阻力变化

Fig.7 The change of resistance of unit grain layer of different grains under push-out ventilation

从图 6、图 7 可以看出，不论是压入式上行通风还是吸出式下行通风，不同粮种呈现同样的变化规律，即随着粮面表观风速的增大，粮堆的单位粮层阻力均逐渐增大，但不同粮种粮堆的单位粮层阻力变化幅度有所不同。以压入式上行通风实验为例，大豆粮堆的粮面表观风速由 0.027 m/s 增加至 0.140 m/s，对应的单位粮层阻力由 26.95 Pa/m 增加至 330.82 Pa/m，涨幅 303.87 Pa/m；玉米粮堆的粮面表观风速由 0.041 m/s 增加至 0.178 m/s，对应的单位粮层阻力由 43.22 Pa/m 增

加至 636.88 Pa/m, 涨幅 593.66 Pa/m; 稻谷粮堆的粮面表观风速由 0.031 m/s 增加至 0.162 m/s, 对应的单位粮层阻力由 55.95 Pa/m 增加至 682.50 Pa/m, 涨幅 626.55 Pa/m; 而小麦粮堆的粮面表观风速由 0.031 m/s 增加至 0.178 m/s, 对应的单位粮层阻力由 60.34 Pa/m 增加至 867.63 Pa/m, 涨幅 807.29 Pa/m。即通风实验中, 大豆粮堆的单位粮层阻力涨幅最小、玉米和稻谷次之、小麦最大。

对比图 6 和图 7 可知, 压入式上行通风过程中, 不同粮种的单位粮层阻力涨幅高于吸出式下行通风。例如稻谷粮堆在压入式上行通风过程中, 单位粮层阻力由 55.95 Pa/m 增加至 682.50 Pa/m, 涨幅 626.55 Pa/m; 而吸出式下行通风时单位粮层阻力由 53.38 Pa/m 增加至 586.35 Pa/m, 涨幅 532.97 Pa/m。即压入式上行通风条件下稻谷粮堆的单位粮层阻力涨幅明显高于吸出式下行通风。

对比图中不同粮种单位粮层阻力的变化趋势

可知, 两种通风方式下, 粮面表观风速相同时, 粮堆的单位粮层阻力却各不相同, 大豆粮堆的单位粮层阻力相对较小, 玉米次之, 稻谷和小麦相对较大, 这可能与粮食籽粒的结构、表面的光滑度与粮堆孔隙度等有关, 例如玉米的粮堆孔隙度为 35%~55%, 而小麦为 35%~45%^[4]。大豆和玉米多呈圆形或椭圆形, 粮堆内的粮食籽粒多为堆叠排布, 且表面光滑, 故通风过程中粮堆阻力相对较小; 而稻谷和小麦籽粒多为长型, 粮堆内的粮食籽粒多数呈现横卧状态排布, 再加上籽粒表面粗糙, 故导致通风时粮堆阻力相对较大。

分别对不同粮种的单位粮层阻力与粮面表观风速的数据进行统计分析, 曲线拟合的结果表明, 多项式二次函数的拟合度相对较高 ($R^2 \geq 0.99$), 即多项式二次函数能更好地反映单位粮层阻力与粮面表观风速的关系, 具体的拟合曲线方程和 R^2 值见表 1。

表 1 不同粮种通风实验中单位粮层阻力的拟合曲线方程

Table 1 The fitting curve equation of resistance of unit grain layer in the ventilation test of different grains

粮种	通风方式	拟合曲线方程	R^2 值
稻谷	压入式上行通风	$y = 26\ 926x^2 - 396.97x + 42.948$	$R^2 = 1$
	吸出式下行通风	$y = 45\ 053x^2 - 2\ 590.2x + 100.18$	$R^2 = 0.990\ 1$
小麦	压入式上行通风	$y = 28\ 950x^2 - 661.09x + 58.545$	$R^2 = 0.998\ 6$
	吸出式下行通风	$y = 27\ 966x^2 - 216.18x + 41.008$	$R^2 = 0.998\ 0$
玉米	压入式上行通风	$y = 24\ 212x^2 - 988.3x + 45.248$	$R^2 = 0.999\ 8$
	吸出式下行通风	$y = 22\ 150x^2 - 514.24x + 29.523$	$R^2 = 0.998\ 2$
大豆	压入式上行通风	$y = 17\ 848x^2 - 322.61x + 23.621$	$R^2 = 0.999\ 4$
	吸出式下行通风	$y = 15\ 584x^2 - 462.12x + 20.763$	$R^2 = 0.999\ 7$

从表 1 的拟合曲线方程可知, 不同粮种的单位粮层阻力与粮面表观风速呈显著的正相关关系, 即随着粮面表观风速的增大, 粮堆的单位粮层阻力逐渐增大, 且粮面表观风速越大, 单位粮层阻力的涨幅越大。

2.2 穿网阻力变化情况分析

分别对不同粮种通风实验中穿网阻力与粮面表观风速的数据进行统计分析, 曲线拟合结果显示, 多项式二次函数和幂函数均呈现较高的拟合度, 选取不同粮种曲线拟合度最高的函数模型进行汇总, 拟合曲线方程和 R^2 值见表 2。从表 2 可知, 稻谷和玉米的通风实验中, 多项式二次函数对穿网

阻力和粮面表观风速的拟合度较高 ($R^2 \geq 0.99$), 相对而言能更好地反映两者之间的关系, 而小麦和玉米则是幂函数的拟合度较高 ($R^2 \geq 0.98$), 即用幂函数描述两者关系更为准确。

表 2 不同粮种通风实验中穿网阻力的拟合曲线方程

Table 2 The fitting curve equations of the resistance of the net in the ventilation test of different grains

粮种	拟合曲线方程	R^2 值
稻谷	$y = 1\ 524.7x^2 + 22.619x + 3.336\ 1$	$R^2 = 0.997\ 1$
小麦	$y = 821.43x^{1.7275}$	$R^2 = 0.988\ 9$
玉米	$y = 1\ 619.5x^2 - 122.97x + 3.602\ 5$	$R^2 = 0.993\ 5$
大豆	$y = 5\ 597.2x^{2.708\ 8}$	$R^2 = 0.985\ 9$

不同粮种通风实验中穿网阻力的变化情况如图 8 所示, 从图中可以看出, 穿网阻力随着粮面

表观风速的增大而逐渐增大,两者呈显著正相关。

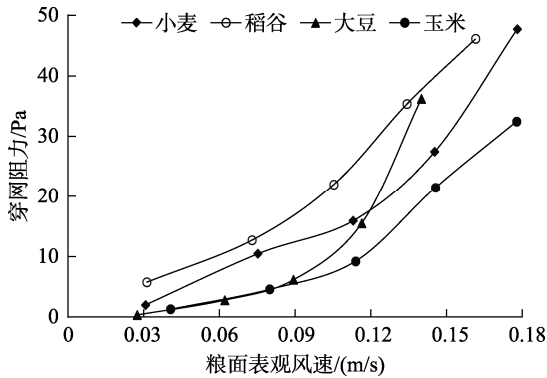


图 8 不同粮种通风实验中穿网阻力的变化趋势图
Fig.8 The change of the resistance of the net in the ventilation test of different grains

对比不同粮种间穿网阻力的变化趋势可知,低频风机运转条件下,稻谷粮堆通风实验中穿网阻力值相对较大,小麦次之,大豆和玉米较小。高频风机运转时,粮面表观风速增大到一定程度(粮面表观风速 0.11 m/s 左右)后,各个粮种通风实验中穿网阻力均会急剧转折,如稻谷通风实验中穿网阻力由 5.8 Pa 增大至 46.1 Pa,增大 7 倍;小麦通风实验中穿网阻力由 2.0 Pa 增大至 47.8 Pa,增大 23 倍;玉米通风实验中穿网阻力由 1.3 Pa 增大至 32.5 Pa,增大 24 倍;而大豆通风实验中穿网阻力由 0.4 Pa 增大至 36.2 Pa,增大 89 倍。

上述相关数据分析结果表明:通风实验中,通过粮面的表观风速或穿过粮堆的风量越大,穿网阻力呈现出多项式二次函数或幂函数式的增大。因此,在实际通风作业中,穿网阻力对粮堆通风量、通风效果的影响不容忽视,尤其当大粮堆、深粮层的浅圆仓通风时,4 台风机、大风量通风的做法不可取^[10],当风机功率一定的条件下,巨大的粮层阻力会迫使风机进行减少风量与增大风压间的能量转换,使得大风量通风并未取得显著的降温效果,从流体力学角度解释了两台风机与四台风机通风效果相近的原因。

2.3 通风均匀度变化情况分析

通过不同粮种的通风实验可知,同种通风方式下,风机运转功率的大小转换并没有明显影响粮堆的通风均匀度,即粮堆通风量或粮面表观风速对粮堆通风均匀度的影响不大,故选取变频器

50 Hz 时不同粮种的粮堆通风均匀度数据进行分析。压入式上行通风和吸出式下行通风方式下,不同粮种的粮堆通风均匀度变化情况如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 可以看出,两种通风方式下,不同粮种粮堆的通风均匀度均达到 98.2%以上,最高可达 99.9%,这说明实验过程中粮堆整体通风效果良好。整体而言,吸出式下行通风时粮堆的通风均匀度略高于压入式上行通风,差别不大。

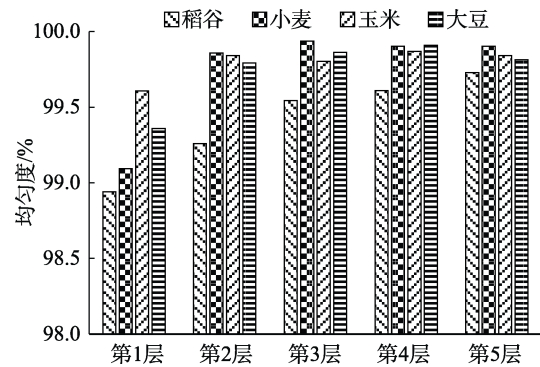


图 9 压入式上行通风时不同粮种粮堆的通风均匀度 (50 HZ)
Fig.9 The ventilation uniformity of different grains under push-in ventilation (50 HZ)

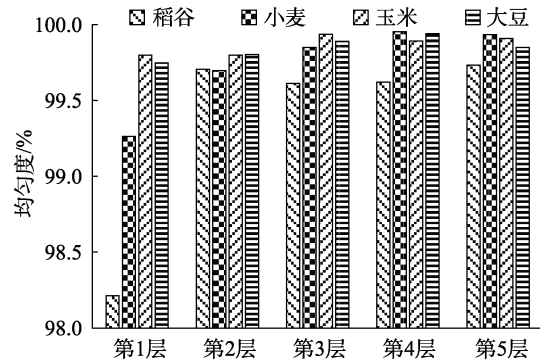


图 10 吸出式下行通风时不同粮种粮堆的通风均匀度 (50 HZ)
Fig.10 The ventilation uniformity of different grains under push-out ventilation (50 HZ)

不同粮种间对比可知,稻谷粮堆的通风均匀度相对较低,保持在 98.2%~99.7%之间;小麦次之,保持在 99.1%~99.9%之间;大豆保持在 99.4%~99.9%之间,而玉米相对较高,始终保持在 99.8%~99.9%之间,即不同粮种的通风均匀度大小关系是:稻谷<小麦<大豆<玉米。这应该是与粮粒形状、堆叠结构有关。

对照粮层厚度横向比较可以看出,不同粮种粮堆的第一层通风均匀度相对较低,随着粮层厚

度的增加,通风均匀度逐渐增大,两者呈明显正相关关系,但数值增加至一定数值后即无明显变化。以稻谷粮堆的压入式上行通风实验为例,第一层通风均匀度 98.9%,第二层为 99.3%,第三层为 99.5%,第四层 99.6%。第五层 99.7%,通风均匀度呈现逐渐递增的趋势。而小麦、玉米和大豆粮堆的第一层通风均匀度相对较低,第 2 层至第 5 层均维持在较高水平。这说明,粮堆的通风均匀度随粮层厚度的增加而逐渐增大,与粮层厚度呈正相关关系,粮层较薄时通风均匀度相对较差,通风均匀度随粮层厚度的增加而增加至一定程度后即无明显变化。

3 结论

不同粮种的粮堆通风实验中,通过调整变频器的频率来改变风机的运行转速,进而研究压入式上行通风和吸出式下行通风条件下粮堆的通风量、粮面表观风速、以及粮堆阻力等相关参数的变化,实验结果表明:

单位粮层阻力方面,粮面表观风速相同时,两种通风方式下粮堆的单位粮层阻力各不相同,大豆粮堆的单位粮层阻力相对较小,玉米次之,稻谷和小麦相对较大。随着粮面表观风速的增大,粮堆的单位粮层阻力均逐渐增大,但不同粮种的单位粮层阻力变化幅度有所不同,大豆粮堆的单位粮层阻力涨幅最小、玉米和稻谷次之、小麦最大。这可能与粮粒结构、粮堆孔隙度与籽粒表面光滑程度等有关。对不同粮种的单位粮层阻力与粮面表观风速的数据进行统计分析、曲线拟合,多项式二次函数的拟合度相对较高 ($R^2 \geq 0.99$),即多项式二次函数能更好地反映单位粮层阻力与粮面表观风速的关系。单位粮层阻力与粮面表观风速呈显著的正相关关系,即随着粮面表观风速的增大,粮堆的单位粮层阻力逐渐增大,且粮面表观风速越大,单位粮层阻力的涨幅越大。故通风技术应用过程中,应综合考虑粮食种类、通风目的和通风效能等因素,选择合适的通风方式,配合功率适当的风机,以实现高效、经济的目标。


穿网阻力方面,穿网阻力随着粮面表观风速的增大而逐渐增大,两者呈显著正相关。统计分

析、曲线拟合结果表明,多项式二次函数和幂函数均对穿网阻力与粮面表观风速的数据关系呈现较高的拟合度,其中稻谷和玉米粮堆通风实验用多项式二次函数 ($R^2 \geq 0.99$) 能更好反映穿网阻力和粮面表观风速的关系,而小麦和大豆则用幂函数 ($R^2 \geq 0.98$) 更为准确。对比不同粮种的穿网阻力变化趋势可知,低频风机运转条件下,稻谷粮堆通风实验中穿网阻力值相对较大,小麦次之,大豆和玉米较小。当高频风机运转,粮面表观风速增大到一定程度后,各个粮种通风实验中穿网阻力均会急剧增大。即通风过程中通过粮面的表观风速或穿过粮堆的风量越大,穿网阻力呈现出多项式二次函数或幂函数式的增大。故在实际通风作业中,穿网阻力对粮堆通风量、通风效果的影响不容忽视,不能单纯追求大功率、大风量通风,避免造成不必要的资源浪费。

粮堆通风均匀度方面,两种通风方式下不同粮种粮堆的通风均匀度均可达到 98% 以上,整体通风效果较好,且粮堆通风量或粮面表观风速对粮堆通风均匀度的影响不大;吸出式下行通风时粮堆的通风均匀度略高于压入式上行通风,但差别不大。不同粮种的通风均匀度大小关系是:稻谷 < 小麦 < 大豆 < 玉米,这与粮食的籽粒形状、堆叠结构有关。对比不同粮层厚度的通风均匀度可知,粮堆的通风均匀度整体上随粮层厚度的增加而逐渐增大,与粮层厚度呈正相关关系,粮层较薄时通风均匀度相对较差,通风均匀度随粮层厚度的增加而增加至一定程度后即无明显变化。

参考文献:

- [1] 张来林, 金文, 朱庆芳, 等. 储粮通风技术的应用及发展[J]. 粮食加工, 2011, 36(3): 66-70.
ZHANG L L, JIN W, ZHU Q F, et al. Application and development of grain storage ventilation technology[J]. Grain Processing, 2011, 36(3): 66-70.
- [2] 赵会义, 张宏宇, 李福君, 等. 我国储粮机械通风技术发展[J]. 粮油食品科技, 2015(1): 4-10.
ZHAO H Y, ZHANG H Y, LI F J, et al. Development of the mechanical ventilation technology for grain storage in China[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015(1): 4-10.
- [3] 张来林. 储粮机械通风技术[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2014, 1.
ZHANG L L. Mechanical ventilation technology for grain

- storage[M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2014,1.
- [4] 王若兰. 粮油储藏学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009, 1.
WANG R L. Grain and oil storage[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009,1.
- [5] 杨进, 杨国峰. 粮层深度与粮层阻力关系的实验分析[J]. 中国粮油学报, 2001(2): 47-49.
YANG J, YANG G F. Experimental analysis of the relationship between grain depth and grain resistance[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2001(2): 47-49.
- [6] 尉尧方, 王远成, 王兴周, 等. 储粮通风模型的构建及其应用分析[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(3): 251-257.
WEI Y F, WANG Y C, WANG X Z, et al. Model construction and application analysis of grain storage ventilation[J]. Journal of Shandong Construction University, 2017, 32(3): 251-257.
- [7] 张海红, 阮竞兰. 不同风道的机械通风效果比较[J]. 粮食与饲料工业, 2012(2): 17-20.
ZHANG H L, RUAN J L. Comparison of mechanical ventilation effects in different air ducts[J]. Cereal and feed industry, 2012(2): 17-20.
- [8] 杨晓帆, 李宗良, 卢献礼. 粮仓机械通风均匀性的检测方法比较[J]. 郑州工程学院学报, 2004(4): 36-38.
YANG X F, LI Z L, LU X L. Comparison of testing methods for uniformity of mechanical ventilation in grain silos[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Engineering, 2004(4): 36-38.
- [9] 张来林, 陶金亚, 陈朝, 等. 粮堆通风性能参数检测装置[P]. 河南: CN201420643851, 2015-02-18.
ZHANG L L, TAO J Y, CHEN C, et al. Testing device for ventilation parameters of grain pile[P]. Henan: CN201420643851, 2015-02-18.
- [10] 吴琼, 郑颂, 张来林, 等. 浅谈浅圆仓的风道设计[J]. 粮食加工, 2022(3): 96-100.
WU Q, ZHENG S, ZHANG L L, et al. Discussion on the air duct design of squat silo[J]. Grain Processing, 2022(3): 96-100. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。