

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.007

差速充种沟式小麦单粒排种器优化设计与试验

赵金¹ 郑超¹ 张晋国¹ 韩东亮² 粘永康¹ 孙楠²

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 河北农哈哈机械集团有限公司, 石家庄 052560)

摘要: 为实现小麦精播,设计了一种差速充种沟式小麦单粒排种器。运用力学分析、结构分析、理论计算、仿真试验、台架试验验证以及田间试验的优化流程对排种器参数进行优化。首先,应用 EDEM 离散元软件和 Design-Expert 8.0.6 软件进行了仿真试验,完成了差速式小麦排种器参数的优化;然后进行了台架试验验证,结果表明,当转速为 1 r/s,弧形挡板固定在排种器端盖上,充种沟隔板间长度、充种沟宽度、充种沟高度分别为 8.00、6.00、5.00 mm,弧形挡板凸起斜度为 42.68°时,粒距合格率为 81.67%,重播率为 12.50%,漏播率为 5.83%,排种器排种均匀性变异系数为 32.32%,台架试验结果与仿真试验结果一致;最后,对采用该排种器的 7.5 cm 行距小麦播种机进行了田间试验,结果表明,在作业速度为 4.8 km/h 时,粒距合格率为 82.50%,重播率为 9.17%,漏播率为 8.33%,播种机的播种均匀性变异系数为 30.12%。试验结果与仿真试验及台架试验结果基本一致。

关键词: 小麦;排种器;差速充种沟式;播种机;精播;离散元法

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0065-10 OSID: 

Parameter Optimization and Experiment of Differential Filling Groove Single Grain Seed-metering Device for Wheat

ZHAO Jin¹ ZHENG Chao¹ ZHANG Jinguo¹ HAN Dongliang² NIAN Yongkang¹ SUN Nan²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. Hebei Nonghaha Agricultural Machinery Group Co., Ltd., Shijiazhuang 052560, China)

Abstract: Different from traditional cultivation techniques of sowing in lines for wheat, precision seeding technology ensures the most reasonable distribution of wheat seeds in the field through precisely controlling seeding quantity and uniformity. Precision seeding technology can ensure the balance of nutrition in the growth process of wheat and achieve high quality and yield. The main component that affects the sowing precision of wheat seeder is seed metering device. The uniformity and stability of sowing are affected due to the pulsating of seed arrangement at low speed or small amount of sowing. However, in high speed operation, the diameter of the outer groove wheel seed metering device is small, when the speed is increased, the seed filling rate would be reduced, and the seed damage rate would be increased, it is difficult to achieve the goal of precision seeding of wheat. In order to realize the wheat single grain seeding technology, reasonable allocation of row spacing for wheat sowing, and improve the sowing quality of wheat seeder, a kind of different-speed single grain seed-metering device with seed-filling groove for wheat was designed, and a 7.5 cm row spacing narrow row wheat seeder was produced, the structure of “one seed-metering device with two seed rows” was realized, double row single grain sowing was realized, it provided technical support for close row spacing and uniform seed spacing. The design of the differential filling groove single grain seed-metering device with seed-filling groove for wheat was completed. EDEM discrete element software and Design-Expert 8.0.6 software were used to carry out simulation tests on the seed device and optimize the parameters of the differential filling groove single grain wheat seed device. A single factor experiment was completed by using EDEM discrete element software, it showed that the relative motion between the two sides alternate seed-filling and rotating seed wheel and stationary curved baffle was better for the seeding performance, the qualified rate was higher,

收稿日期: 2020-08-22 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300907)

作者简介: 赵金(1986—),女,博士生,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: 491876797@qq.com

通信作者: 张晋国(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及农机化管理研究,E-mail: zhangjinguo@hebau.edu.cn

which was 77.58%. The orthogonal experiment of the effect of the length, width and height of the seed-filling groove on the seeding performance was completed by using EDEM discrete element software, the simulation results showed that when the length between seed groove baffles was 8.00 mm, the width of seed groove was 6.00 mm, the height of seed groove was 5.00 mm, the optimal results can be obtained. Based on these studies, the orthogonal combination test of multiple quadratic regression rotation was carried out on the basis of rotational speed, width of filling groove and raised slope angle of stationary curved baffle, then the Design-Expert 8.0.6 software was applied to analyze the test data, the relationship between the regression model and the influence of factors on indicators was obtained, the factors influencing the qualified rate of seeding were determined, the importance descending order was that rotational speed, width of filling groove and raised slope angle of stationary curved baffle, and the pair wise interaction cannot be ignored, the important factors influencing the variation coefficient of seeding uniformity, in order of importance, were the width of filling groove, rotational speed and raised slope angle of stationary curved baffle. Multi-objective parameter optimization was carried out based on regression model, the results showed that when the rotational speed was 1 r/s, the width of filling groove was 6 mm, and the raised slope angle of stationary curved baffle was 42.68° , it was predicted that the qualified rate of the seeding was 76.73%, and the variation coefficient of the seeding uniformity was 28.23%. The sample of seed metering device was made. Then some bench tests were carried out to verify the results, the results of bench tests showed that when the rotation speed was 1 r/s, the qualified rate was 81.67%, the re-seeding rate was 12.50%, the miss seeding rate was 5.83%, and the variation coefficient of the seed uniformity was 32.32%. The results were consistent with the simulation results. Field experiments were carried out on the wheat seeder trial-produced by using the differential filling groove single grain seed-metering device for wheat. The test results were consistent with the simulation test and the bench test results; the qualification rate of grain spacing was 82.50%, the replay rate was 9.17% and the missed replay rate was 8.33%, the mean value of the variation of sowing uniformity was 30.12%, which met and exceeded the national standards.

Key words: wheat; seed-metering device; differential filling groove; seeder; precision seeding; discrete element method

0 引言

随着精准农业的推广和精量播种技术的发展,精量播种已经成为现代农业播种技术体系的主要组成部分^[1-2]。小麦精播技术具有明显的省种、增效特征,具有巨大的经济效益和社会效益^[3-4]。均匀播种既可以保证作物生长过程中营养的均衡、实现优质高产,又可以为后续机械化收割提供有利的条件^[5-6]。精量播种是将预定数量的种子播种到田间预定的位置,是由株距、行距和播深所决定的播种技术^[7]。因此,小麦精量播种是指减少播量、提高播种质量,使小麦单粒种子的三维空间坐标符合要求,也就是使种子在田间具有精确的播深、行距和株距^[8]。

影响小麦播种机播种精度的主要部件是排种器^[9-13]。我国使用的小麦播种机多采用外槽轮式排种器,播种形式有条播、撒播以及宽苗带播种,均不能确定株距。外槽轮式排种器结构简单、成本低、工作可靠、调整方便,能够满足目前播种要求^[14-16]。但是,该排种器在低速或小播量播种时排种存在脉动性,使播种均匀性和稳定性受到影响。外槽轮式排种器直径小,高速作业时转速提高,则充种率会降

低,种子的破损率也随之增高,很难实现小麦的均匀播种^[17-18]。国外精量排种器发展较快,主要用于玉米等大粒种子的播种,小麦播种机多为气力输送式条播机,未实现定株距播种。而法国、奥地利等国家相继研制的单粒气吸式播种机仅适用于小区作业^[19]。

针对上述问题,本文研究一种能够提高小麦播种机播种质量、减小脉动性影响、并可提高小麦播种作业效率和种行内种子分布均匀性的差速充种沟式小麦单粒排种器,以进一步推动小麦精量播种农艺技术的发展。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

排种器主要由排种器壳体、弧形挡板、双边交替充种旋转轮盘、排种器侧端盖、清种刷、投种片、投种片限位销轴、排种漏斗等组成。图1为排种器爆炸图。

双边交替充种旋转轮盘沿圆周方向加工种沟,种沟底部设计有种沟隔板,用于存放、排布种子,并带动种子产生运动。旋转的两个双边交替充种旋转轮盘分别插入静止的3个弧形挡板中间,作业时双

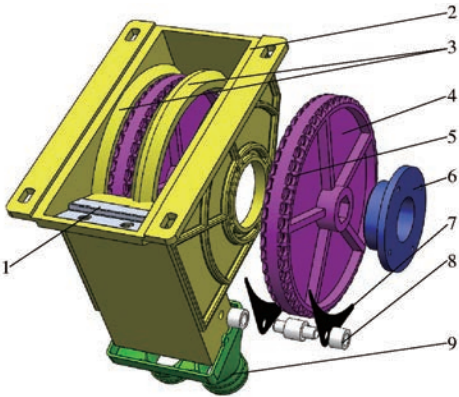


图 1 差速充种沟式小麦单粒排种器爆炸图

Fig. 1 Exploded diagram of different-speed single grain seed-metering device with seed-filling groove for wheat

1. 清种刷 2. 排种器壳体 3. 弧形挡板 4. 双边交替充种旋转轮盘 5. 种沟隔板 6. 排种器侧端盖 7. 投种片 8. 投种片限位销轴 9. 排种漏斗

边交替充种旋转轮盘与弧形挡板间产生差速运动,对种子进行扰动。排种器侧端盖轴向限制双边交替充种旋转轮盘的位置。清种刷安装在排种器壳体上,用于清掉种沟上方多余的种子。在排种器投种位置处固定有投种片,用于投种,同时将种沟内残留的药末和杂质清出,预防长时间作业后种沟产生堵塞。投种片限位销轴用于限制投种片的轴向位置。清落的小麦种子通过排种漏斗排出,完成投种作业。双边交替充种旋转轮盘直径设计为 150 mm,适宜高速作业,相同播量条件下,其角速度较低,可减少离心力对充种的影响,延长充种时间,提高充种效率。

1.2 工作原理

如图 1 所示,通过六方轴插入双边交替充种旋转轮盘内孔传输旋转动力,种子覆盖在排种器壳体上部。未达到清种刷位置前为充种区,双边交替充种旋转轮盘转动,迫使种带运动,与弧形挡板产生差速运动,利用差速原理,使种子顺利落入种沟内。种沟内的种子排列有序并随双边交替充种旋转轮盘转动,经清种刷将种沟上方多余的种子清除。种子通过清种刷后进入导种区,种沟运送种子至投种区,在投种区种子靠自身重力、离心力以及受投种片挤压脱离种沟,进入排种漏斗进行投种。

2 种子在排种器内受力分析

种子通过种箱从双边交替充种旋转轮盘正上方落入到充种沟内充种区,图 2a、2b 所示的 I、II、III、IV 即为种子落入双边交替充种旋转轮盘充种沟内的 4 种情况, I 为种子竖立落入种沟内, II 为种子落在种沟隔板上, III 为种子平躺入种沟, IV 为种子一端在弧形挡板上, 一端在双边交替充种旋转轮盘上。

II、IV 处种子在充种沟外,下面分析 II、IV 处的种子受力情况。

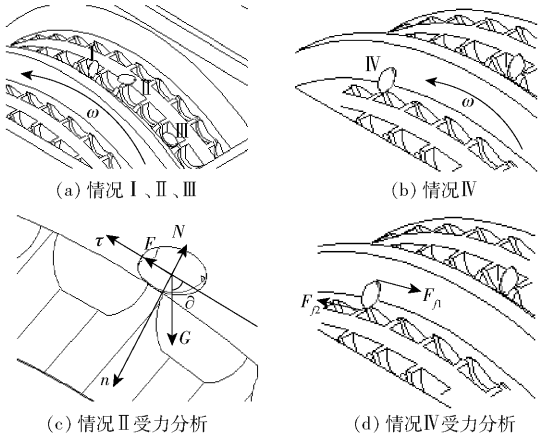


图 2 种子落入种沟情况和种子受力分析

Fig. 2 Condition of seeds fell into the filling groove and stress analysis of seeds

2.1 种子在 II 处的受力分析

当双边交替充种旋转轮盘处于静止状态时,种子位于种沟壁上,双边交替充种旋转轮盘以 ω 开始转动,则由于其他种子因重力产生的压力以及其本身的惯性作用,种子将失去平衡落入种沟内;如果双边交替充种旋转轮盘以 ω 转动,种子由于拖带层牵连运动会产生速度^[20],当种子速度为 v_w ,双边交替充种旋转轮盘旋转速度为 v_s 时,种子受力情况如图 2c 所示,并建立最初时刻的方程组

$$\begin{cases} F_f = G \cos \delta & (\tau \text{ 方向}) \\ N = G \sin \delta & (n \text{ 方向}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_f ——种子与种沟隔板顶端表面之间产生的摩擦力, N
 G ——种子重力与其他种子施加的压力之和, N
 N ——种沟隔板顶端对种子的支持力, N
 δ ——种子所在位置与双边交替充种旋转轮盘圆心的连线与水平位置的夹角, ($^\circ$)

由式(1)和牛顿第二定律可推出

$$a_\tau = \frac{|F_f - G \cos \delta|}{m} \quad (2)$$

式中 a_τ ——种子在 τ 方向的加速度, m/s^2
 m ——种子质量, g

由式(2)可知,当 $F_f \neq G \cos \delta$ 时,种子在 τ 方向做变加速运动,且加速度随 δ 的改变而改变。

$$v_w = v_0 + a_\tau t \quad (3)$$

$$F_f = \mu F_n \quad (4)$$

式中 v_0 ——种子的初始速度, m/s
 t ——种子从初速度到末速度时所经过的时间, s

μ ——摩擦因数
 F_n ——种子在种沟隔板顶端产生摩擦力时的正压力,N

当初始时 $v_w = v_s$, 种子在瞬时位于种沟隔板顶端上方, 相对于种沟隔板顶端是静止的, 但经过 t 时间后, 根据式(3) v_w 变成 v'_w , 种子与种沟隔板顶端产生相对运动, 随后落入种沟; 当初始时 $v_w \neq v_s$, 则种子与种沟隔板顶端产生相对运动, 种子随即落入种沟。

当 α 很小时,合力 G 在 τ 负方向上的分力很大,而在 n 正方向上的分力很小,即产生摩擦力 F_f 时的正压力很小,所以充种时主要靠合力 G 进行充种;随着 α 增大,合力 G 在 τ 负方向上的分力逐渐减小,而在 n 正方向上的分力逐渐加大,种子对种沟隔板顶端产生的正压力也逐渐增大,摩擦力 F_f 增大,种子进行变加速运动,通过与种沟隔板顶端产生的相对运动,种子可充入到种沟内。

2.2 种子在IV处的受力分析

种子一端在排种器壳体内的弧形挡板上,一端在双边交替充种旋转轮盘上,此时种子除了具有图 2c 的受力情况外,种子上端还受到静止的弧形挡板的摩擦力 F_f ,种子下端受到双边交替充种旋转轮盘产生的摩擦力 F_{f2} ,摩擦力 F_{f1} 与摩擦力 F_{f2} 方向相反,如图 2d 所示,由式(4)可知实际作业时种子上方还会有其他种子产生压力,因此产生摩擦力 F_{f1} 与摩擦力 F_{f2} 的正压力较大,所以摩擦力 F_{f1} 与摩擦力 F_{f2} 较大。设种子的长轴直径为 L , F_{f1} 产生力矩 M_1 , F_{f2} 产生力矩 M_2 ,则

$$\begin{cases} M_1 = F_{f1}L \\ M_2 = F_{f2}L \end{cases} \quad (5)$$

在力矩 M_1 、 M_2 的作用下,IV 处种子转动后落入种沟内。图 2d 中种子为竖直状态同时接触双边交替充种旋转轮盘和弧形挡板,如果 IV 处种子为横卧状态时,也会同时产生摩擦力 F_{f1} 与摩擦力 F_{f2} ,不同的是种子短轴小于长轴,因此,力矩减小,种子转动能力减小,通过合外力产生的加速度,使其与双边交替充种旋转轮盘产生相对运动后落入种沟内。

3 优化及仿真试验

根据种子在排种器内的受力情况分析结果,运用受力分析、仿真试验对排种器进行优化设计。

3.1 优化目标

基于种子在排种器上受力分析结果对排种器进行优化设计,结合排种器结构特性以及小麦单粒排种要求,建立优化目标:①确定差速充种沟结构中弧形挡板固定位置。②确定充种沟尺寸参数。③确定

弧形挡板凸起斜度。
3.2 差速充种沟充种差速优化

差速充种沟由弧形挡板与双边交替充种旋转轮盘组合而成。为了提高充种效率,充种沟的位置应使种子的运动轨迹与充种沟的运动轨迹重合,充种沟中心离排种器侧壁越近,充种性能越好^[21],原因是侧壁相对静止,轮盘转动时,二者之间存在差速运动,可提高充种效率。因此,设计双边交替充种旋转轮盘边缘为充种沟,且充种沟外侧设置弧形挡板,即侧壁。当侧壁固定,双边交替充种旋转轮盘作业转动时,为差速充种;当侧壁固定在双边交替充种旋转轮盘上时,则无差速充种。双边交替充种旋转轮盘与弧形挡板间是否存在差速运动会对种子层运动产生影响。因此采用单因素试验法,对弧形挡板固定位置进行研究。

通过仿真模拟试验测定差速充种效果。图 3 为仿真试验模型,图 3a 弧形挡板固定在侧板上,可形成差速充种沟(处理 1);图 3b 弧形挡板固定在双边交替充种旋转轮盘上,二者同速旋转(处理 2)。采用单因素法分别对粒距合格率、重播率、漏播率进行对比,结果如表 1 所示。

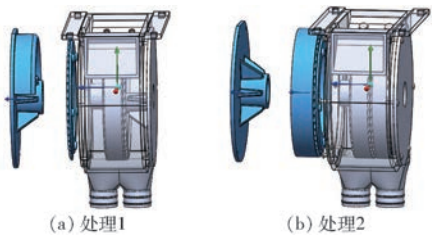


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

表 1 弧形挡板固定位置仿真试验结果

Tab.1 Simulation test results of fixed position of stationary curved baffle

试验处理	序号	粒距合格率	重播率	漏播率
1	1	75.98	11.47	12.55
	2	76.88	11.87	11.25
	3	79.33	11.05	9.62
	4	78.12	11.88	10.00
	平均值	77.58	11.57	10.85
	变异系数	1.88	3.41	12.23
2	1	71.18	10.83	17.99
	2	73.75	10.00	16.25
	3	71.76	9.91	18.33
	4	70.21	10.21	19.58
	平均值	71.73	10.24	18.03
	变异系数	2.08	4.05	7.62

由表 1 可知,处理 1 粒距合格率均值为 77.58%,高于处理 2,且粒距合格率变异系数小,为 1.88%,即各次试验结果的离散程度小,粒距合格率

较处理 2 稳定;处理 1 重播率均值为 11.57%,略大于处理 2 的 10.24%,但漏播率均值为 10.58%,远小于处理 2 的 18.03%,这是由于处理 2 小麦缺少转动的外力,种子层内部运动较少,容易存在架空现象,因此影响充种,产生了较多的漏播。通过表 1 进行方差分析可知,两个处理的粒距合格率、重播率以及漏播率间都存在极显著差异。

综上,当弧形挡板固定在侧板上,排种器存在差速运动时,可以增加小麦种子所受外力,有助于打破种子原有状态,使其产生运动,提高充种效率,进而提高播种质量及效率。

3.3 充种沟尺寸优化

充种沟尺寸太大会产生重播,充种沟过小又会影响充种,产生漏播,为了更合理地设计差速充种沟式小麦单粒排种器,采用正交试验法,对充种沟尺寸进行优化试验研究。

统计黄淮海地区常用的不同小麦种子尺寸得出,小麦长、宽、厚平均尺寸为 6.33、3.42、3.12 mm,最大尺寸分别为 7.29、4.22、3.81 mm,且充种沟尺寸应满足^[22]

$$L_{\max} < l < L_a + \frac{1}{2}D_a$$

(6)

式中 $L_{\max}$ ——小麦长度最大值,mm
 L_a ——小麦长度平均值,mm
 D_a ——小麦厚度平均值,mm
 l ——充种沟隔板间长度,mm

充种沟宽度以及高度应满足

$$W_{\max} < w < 2D_{\min}$$

(7)

$$D_{\max} < d < 2D_{\min}$$

(8)

式中 $W_{\max}$ ——小麦宽度最大值,mm
 w ——充种沟宽度,mm
 $D_{\max}$ ——小麦厚度最大值,mm
 $D_{\min}$ ——小麦厚度最小值,mm
 d ——充种沟高度,mm

将统计值代入式(6)~(8)计算可得 7.29 mm < l < 7.89 mm,4.22 mm < w < 6.24 mm,3.81 mm < d < 6.24 mm。

为分析影响充种沟尺寸的主次因素及合理水平,选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验仿真。试验因素及水平如表 2 所示,上述计算所得区间值取中间值 ± 0.50 mm。

粒距合格率、重播率以及漏播率正交试验结果如表 3 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素水平值。在设计排种器以及排种器作业的过程中排种器粒距合格率应越高越好,其次重播率和漏播率应越小越好,由表 3 可知,充种沟各参数最优组合应为试验 6,即当充种沟

表 2 充种沟尺寸试验因素水平

Tab.2 Orthogonal factors and levels of filling groove size

水平	因素		
	充种沟隔板间	充种沟宽度/	充种沟高度/
	长度/mm	mm	mm
1	7.00	5.00	4.50
2	7.50	5.50	5.00
3	8.00	6.00	5.50

表 3 充种沟尺寸正交试验结果

Tab.3 Results of orthogonal test of seed hole size

序号	x_1	x_2	x_3	误差项	粒距合格 率/%	重播 率/%	漏播 率/%
1	1	1	1	1	73.85	12.08	14.06
2	2	2	2	1	73.75	13.91	12.34
3	3	3	3	1	71.82	22.71	5.47
4	1	2	3	2	75.00	17.34	7.66
5	2	3	1	2	75.26	16.93	7.81
6	3	1	2	2	77.03	15.00	7.97
7	1	3	2	3	74.58	18.85	6.56
8	2	1	3	3	75.26	16.62	8.13
9	3	2	1	3	75.83	15.89	8.28
$\bar{K}_{1Q}$	74.48	75.38	74.98				
$\bar{K}_{2Q}$	74.76	74.86	75.12				
$\bar{K}_{3Q}$	74.90	73.89	74.03				
R_Q	0.42	1.49	1.09				
因素主次顺序				$x_2 > x_3 > x_1$			

的宽度为 5.00 mm、高度为 5.00 mm、充种沟隔板间长度为 8.00 mm 时,排种器基于 EDEM 软件进行仿真的作业效果最好^[23]。仿真试验结果中充种沟的宽度、高度与计算区间的中值相近,充种沟隔板间长度与最大值接近,仿真结果符合计算设计要求。对充种沟尺寸正交试验极差分析结果可知,最终影响排种器粒距合格率的主次因素依次为充种沟宽度、充种沟高度、充种沟隔板间长度。

3.4 弧形挡板凸起斜度优化

种子在落入充种沟的过程中,种子的流动性以及运动方向同样重要。弧形挡板凸起斜度,可对种子起到引流的作用,帮助种子流向充种沟。弧形挡板凸起斜度 θ 如图 4 所示。弧形挡板凸起斜度过大则充种接触面变窄,斜度过小不能提高种子有向流动性,因此弧形挡板合理的凸起斜度有利于提高种子流动性,进而提高充种质量。

休止角对研究颗粒体系的流动性有着重要的参考意义^[24],是确定弧形挡板凸起斜度的有效参考依据。可采用直尺测量法,确定小麦种子的自然休止角 β (图 5)^[25]。通过测量麦堆的底面半径和麦堆高度,可计算出自然休止角,公式为

$$\beta = \arctan \frac{H}{R}$$

(9)

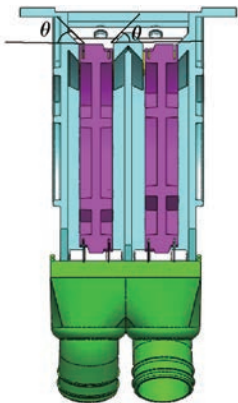


图 4 弧形挡板凸起斜度示意图

Fig.4 Rake angle of stationary curved baffle

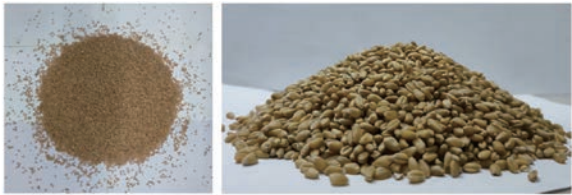


图 5 小麦种子自然休止角的测定

Fig.5 Measurement of natural angle of repose of wheat seeds

式中 H ——麦堆高度,mm

R ——麦堆底面半径,mm

经过 3 次重复试验,小麦种子自然休止角的测定试验结果如表 4 所示,将试验所得数据代入式(9),可得小麦种子的平均自然休止角 $\beta=29.10^{\circ}$ 。

表 4 小麦种子自然休止角的测定结果

Tab.4 Determination results of natural angle of repose of wheat seeds

参数	试验组号		
	1	2	3
麦堆高度 H/mm	54.00	44.00	55.00
麦堆底面半径 R/mm	94.50	86.50	93.00
自然休止角 $\beta/(^{\circ})$	29.74	26.96	30.60
自然休止角 β 平均值/ $(^{\circ})$	29.10		

为提高种子的流动性,设定弧形挡板凸起斜度应为 $29.10^{\circ}<\theta<90^{\circ}$ 。由上文已知影响粒距合格率的主要因素是充种沟宽度,为了在不影响充种率的前提下提高排种器作业效率,通过二次正交旋转中心仿真试验确定充种沟宽度、弧形挡板凸起斜度、排种器转速三者最佳参数组合。

3.5 仿真正交试验

设置排种器的转速、充种沟宽度、弧形挡板凸起斜度为影响因素,以粒距合格率 P_1 、重播率 P_2 、漏播率 P_3 、排种均匀性变异系数 P_4 共 4 个评价指标为响应值,各因素编码如表 5 所示,采用 Design-Expert 8.0.6 软件,以 Box - Behnken 响应面优化方法进行

三因素三水平正交试验,试验方案及结果如表 6 所示, A 、 B 、 C 为因素编码值。

表 5 因素编码

Tab.5 Factors and codes of tests

编码	因素		
	转速/ $(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	充种沟宽度/ mm	弧形挡板凸起 斜度/ $(^{\circ})$
-1	1.0	5.00	30
0	1.5	5.50	45
1	2.0	6.00	60

表 6 试验方案及结果

Tab.6 Test design and corresponding result

编号	因素			评价指标/%			
	A	B	C	P_1	P_2	P_3	P_4
1	0	0	0	72.87	12.97	5.16	31.22
2	-1	0	-1	77.03	12.97	10.00	36.45
3	0	1	1	69.69	28.13	2.19	29.25
4	-1	0	1	78.28	14.38	7.34	34.10
5	0	0	0	75.10	17.08	7.81	32.46
6	-1	-1	0	74.01	10.05	15.94	37.02
7	0	-1	1	75.42	12.71	11.88	38.71
8	0	0	0	73.33	23.23	3.44	29.58
9	1	-1	0	72.92	13.96	13.13	39.77
10	1	1	0	66.20	28.65	5.16	29.47
11	0	0	0	73.54	7.03	19.43	32.64
12	0	0	0	74.17	20.37	5.47	32.43
13	1	0	-1	72.81	18.28	8.91	35.61
14	-1	1	0	76.72	17.81	5.47	27.81
15	0	0	0	74.17	20.37	5.47	32.43
16	0	-1	-1	72.87	11.51	15.63	41.15
17	1	0	1	70.83	23.07	6.09	35.72

粒距合格率和排种均匀性变异系数方差分析如表 7 所示,二次回归模型均极显著($P<0.01$),失拟项均不显著($P>0.05$),回归方程不失拟。依据系数间不存在线性相关性,经逐步回归法剔除不显著因素得各因素与粒距合格率 P_1 、排种均匀性变异系数 P_4 回归响应面方程分别为

$$P_1=73.97-2.91A-1.16B-2.36AB-0.81AC-1.55BC-1.71B^2$$
 (10)

$$P_4=32.24+0.65A-5.07B-0.63C+1.04A^2+2.2C^2$$
 (11)

由表 7 可知,粒距合格率 P_1 和排种均匀性变异系数 P_4 2 个指标的回归数学模型的 P 值均小于 0.01,表明 2 个模型的显著性极好;其失拟项的 P 值均大于 0.05,说明 2 个模型在试验参数范围内,拟合程度较高,说明该模型可以预测排种器的最佳工作参数。从表 7 还可以看出,充种沟宽度对粒距合格率和排种均匀性变异系数都具有极显著影响,而

表 7 回归模型的方差分析

试验指标	粒距合格率 P_1		变异系数 P_4	
	F	P	F	P
模型	33. 07	<0. 000 1 **	56. 87	<0. 000 1 **
A	159. 12	<0. 000 1 **	7. 15	0. 03 *
B	25. 24	0. 001 5 **	435. 23	<0. 000 1 **
C	0. 98	0. 36	6. 67	0. 04 *
AB	52. 20	0. 000 2 **	0. 62	0. 46
AC	6. 13	0. 04 *	3. 23	0. 12
BC	22. 55	0. 002 1 **	2. 34	0. 17
A^2	0. 41	0. 54	9. 65	0. 02 *
B^2	28. 95	0. 001 0 **	0. 52	0. 50
C^2	3. 19	0. 12	43. 01	0. 000 3 **
失拟项	0. 10	0. 95	1. 99	0. 26

注：* 表示差异显著 ($P < 0.05$)，** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

弧形挡板凸起斜度只对排种均匀性变异系数产生了显著影响。

建立响应曲面模型如图 6 所示,当弧形挡板凸起斜度保持 45° 不变时,随转速的增大粒距合格率 P_1 逐渐减小,随充种沟宽度的增大,粒距合格率 P_1 先升高后降低。响应面沿转速方向的变化速率快,沿充种沟宽度方向的变化速率慢,说明在试验水平下,转速对粒距合格率 P_1 的影响比充种沟宽度影响显著。

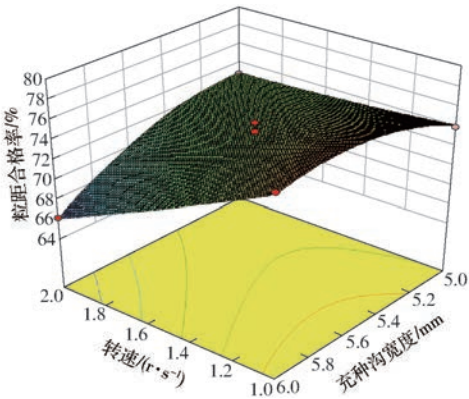


图 6 转速与充种沟宽度交互作用对粒距合格率的影响
Fig. 6 Effect of interaction between speed and width of filling groove on qualified rate

如图 7 所示,当弧形挡板凸起斜度保持 45° 不变时,随转速增大排种均匀性变异系数 P_4 先减小后增大,随充种沟宽度的增大 P_4 逐渐降低。响应面沿充种沟宽度方向的变化速率快,沿转速方向的变化速率慢,说明在试验水平下,充种沟宽度对排种均匀性变异系数 P_4 的影响比转速显著。

为了获得排种器的最佳工艺参数组合,以评价播种的 2 个指标 P_1 、 P_4 为目标函数,对播种的工作参数进行优化。运用 Design-Expert 8.0.6 软件的优

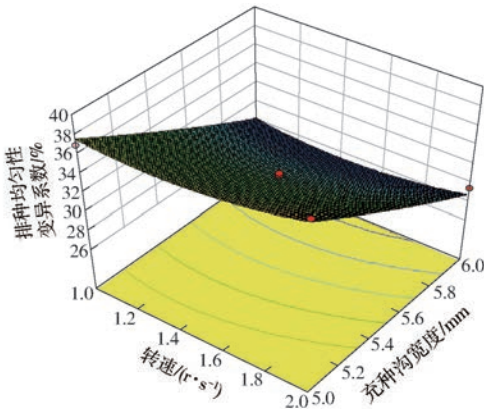


图 7 转速与充种沟宽度交互作用对排种均匀性变异系数的影响

Fig. 7 Effect of interaction between speed and width of filling groove on coefficient of variation

化分析功能对 2 个指标的回归数学模型进行优化分析,目标函数为

$$\begin{cases} \max P_1 \\ \min P_4 \\ \text{s. t. } \begin{cases} -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

可得最佳编码值组合: $A = -1$, $B = 1$, $C = -0.155$,即转速为 1 r/s ,充种沟宽度为 6 mm ,弧形挡板凸起斜度为 42.68° ,最佳参数组合下 2 个评价指标的预测值分别为: $P_1 = 76.73\%$, $P_4 = 28.23\%$ 。

4 台架试验与田间试验

4.1 台架试验材料及设备

试验所用小麦品种为冀麦 585,千粒质量为 42.1 g ,长度平均值为 6.21 mm 、宽度平均值为 3.48 mm 、厚度平均值为 3.22 mm 。试验设备为差速充种沟式小麦单粒排种器以及 JPS-12 型排种器试验台(图 8),设定排种器转速为 1.17 r/s ,种床带速为 2.0 km/h ,在试验台上分别测定粒距合格率、重播率、漏播率以及排种均匀性变异系数,台架试验结果用于验证仿真试验。

4.2 台架试验结果及分析

4.2.1 弧形挡板固定位置对排种均匀性的影响

与仿真试验相同,在台架试验中,处理 1 为双边交替充种旋转轮盘与静止的弧形挡板间有相对运动,处理 2 为弧形挡板周向固定在双边交替充种旋转轮盘上,二者之间无相对运动,试验结果如表 8 所示。处理 1 的粒距合格率为 77.00% ,高于处理 2,处理 1 的重播率、漏播率以及排种均匀性变异系数均低于处理 2,分别为 14.00% 、 9.00% 、 36.45% ,试验结果表明处理 1 的排种效果优于处理 2。

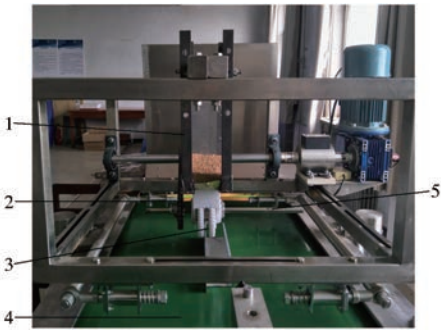


图 8 JPS-12 型排种器试验台

Fig. 8 JPS-12 seed-metering device test bench

1. 排种器固定架 2. 链轮 3. 排种器 4. 传送带 5. 排种器轴

表 8 弧形挡板固定位置台架试验结果

Tab. 8 Bench test results of fixed position of stationary curved baffle

处理	粒距合格率		重播率		漏播率		排种均匀性变异系数
	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	
1	77.00	3.56	14.00	29.88	9.00	24.85	36.45
2	68.00	11.15	17.00	39.46	15.00	33.33	41.83

弧形挡板的固定位置影响排种器的排种均匀性效果比较明显,处理 1 的粒距合格率比处理 2 高 9 个百分点,处理 1 的漏播率和重播率均低于处理 2,且处理 1 的粒距合格率、重播率以及漏播率的变异系数均较低,结果与仿真试验一致。同时,处理 1 的排种均匀性变异系数比处理 2 低 5.38 个百分点,说明处理 1 的排种效果以及稳定性均优于处理 2。处理 1 漏播率(9.00%)与重播率(14.00%)都较低,处理 2 的漏播率(15.00%)高,原因为充种不充分,多余的种子会随种层运动到毛刷处,当堆积到一定程度毛刷上的种子在重力和排种轮的作用力下被排出,堆积严重就会产生重播现象,因此处理 2 的重播率高于处理 1。

4.2.2 充种沟尺寸对排种均匀性的影响

从 3.3 节仿真试验结果中选最优的 3 组进行台架试验,分别为试验 6(充种沟隔板间长度 8.00 mm、充种沟宽度 5.00 mm、充种沟高度 5.00 mm)、试验 9(充种沟隔板间长度 8.00 mm、充种沟宽度 5.50 mm、充种沟高度 4.50 mm)和试验 5(充种沟隔板间长度 7.50 mm、充种沟宽度 6.00 mm、充种沟高度 4.50 mm)。试验结果见表 9。

表 9 充种沟尺寸台架试验结果

Tab. 9 Bench test results of seed hole size

试验序号	粒距合格率	重播率	漏播率	排种均匀性变异系数
6	81.00	13.00	6.00	32.68
9	78.00	14.00	8.00	34.66
5	77.00	16.00	7.00	35.74

充种沟尺寸对排种均匀性的影响也较明显,试验 6 的粒距合格率、重播率以及漏播率分别为 81.00%、13.00%、6.00%,均优于试验 9 和试验 5,与仿真试验结果一致。试验 6 排种均匀性变异系数为 32.68%,优于试验 9 的 34.66% 和试验 5 的 35.74%。由充种沟尺寸正交试验结果(表 3)进行正交试验极差分析结果可知,充种沟宽度对重播率有显著影响,随着宽度的增加,重播率呈递增趋势,与理论分析结果一致。

4.2.3 弧形挡板凸起斜度对排种均匀性的影响

依据上文理论分析结果:转速为 1 r/s,充种沟隔板间长度、充种沟宽度、充种沟高度分别为 8.00、6.00、5.00 mm,弧形挡板凸起斜度为 42.68°时,粒距合格率 P_1 以及排种均匀性变异系数 P_4 达到最优值,依照上述参数进行台架试验,结果为:粒距合格率为 81.67%,重播率为 12.50%,漏播率为 5.83%,排种均匀性变异系数为 32.32%,台架试验结果与仿真试验结果相近。

4.3 田间试验

综合理论分析与台架试验结果,确定排种器的结构参数为:弧形挡板固定在排种器端盖上,充种沟隔板间长度、充种沟宽度、充种沟高度分别为 8.00、6.00、5.00 mm,弧形挡板凸起斜度为 42.68°。在此基础上试制了样机,机具参数如表 10 所示。

表 10 机具参数

Tab. 10 Machine parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 960×2 500×1 110
配套动力范围/kW	25.7~43.9
工作幅宽/cm	240
工作行数/行	32
行距/cm	7.5
粒距/cm	2.3
调整的播种深度/cm	4
机组前进速度/(km·h ⁻¹)	4.8

在河北省宁晋县(北纬 37°37′、东经 114°53′)进行试验,位于暖温带大陆性气候区,土壤为中壤土,土壤坚实度为 429 kPa,试验地地表平整,坡角小于等于 5°。种植模式为一年两熟,小麦播种前进行旋耕整地处理,前茬作物为玉米,残茬含水率 15%~35%,植被覆盖量为 1.68 kg/m²,图 9 为机具田间作业,作业速度为 4.8 km/h。

将播后的地块分为 3 个小区,待出苗后测量每个小区内小麦粒距合格率和播种均匀性变异系数,图 10 为出苗效果,播种性能如表 11 所示,粒距合格率为 82.50%,其中最小值为 80.00%;重播率为



图 9 田间试验
Fig. 9 Field experiment



图 10 出苗效果
Fig. 10 Wheat at seeding stage

表 11 播种性能指标对比

Tab. 11 Comparison of sowing performance index

参数	试验平均值	标准值
粒距合格率	82. 50	≥60
重播率	9. 17	≤30
漏播率	8. 33	≤15
合格粒距变异系数	32. 87	≤40
播种均匀性变异系数	30. 12	≤45

9. 17%,其中最大值为 10. 00%;漏播率为 8. 33%,其中最大值为 10. 00%;合格粒距变异系数为 32. 87%,其中最大值为 34. 70%;播种均匀性变异系数为 30. 12%,其中最大值为 31. 54%。试验结果

满足 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》中对精播作业性能的要求。

田间试验表明,本文设计的差速充种沟式小麦单粒排种器,在进行田间作业时,双边交替充种旋转轮盘进行旋转作业,与弧形挡板之间利用差速原理,增加小麦种子在排种器内所受外力,进而扰动小麦种层,提高充种效率,提高了播种粒距合格率,实现小麦单粒播种。

试验结果表明,仿真试验、台架试验与田间试验结果一致。后期可进行排种器差速比研究,以明确差速与充种的关系。

5 结论

(1)设计了一种差速充种沟式小麦单粒排种器,可以实现小麦定株距的精量播种。该排种器利用差速原理,增大排种器内小麦所受外力,通过外力提高小麦的自身转动,进而提高充种效果,使小麦单粒播种的播种质量得到提高。

(2)进行了离散元仿真试验及排种器台架试验,对差速充种沟式小麦单粒排种器进行参数优化,通过单因素试验、正交试验法以及正交回归旋转中心仿真试验分析得出优化后结构参数:弧形挡板固定在排种器端盖上,充种沟隔板间长度、充种沟宽度、充种沟高度分别为 8. 00、6. 00、5. 00 mm,弧形挡板凸起斜度为 42. 68°时,粒距合格率最优。

(3)根据优化结果,对采用差速充种沟式小麦单粒排种器的 7. 5 cm 行距小麦播种机进行了田间试验,在作业速度为 4. 8 km/h 时,粒距合格率为 82. 50%、重播率为 9. 17%、漏播率为 8. 33%,播种均匀性变异系数 30. 12%。试验结果与仿真试验及台架试验结果基本一致。

参 考 文 献

[1] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦精量播种机排种高精度检测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):66-74. CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and experiment of precision detecting system for wheat-planter seeding quantity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (1):66-74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190107&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 01. 007. (in Chinese)

[2] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48. YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 006. (in Chinese)

[3] 世界小麦种植区域分布分析[EB/OL]. (2013-08-21) [2016-07-21]. <http://www.docin.com/p-692152910.html>.

[4] 何亮. 小麦精量播种高产栽培技术要点[J]. 北京农业,2015(12):56. HE Liang. Key techniques of wheat precise sowing and high yield cultivation [J]. Beijing Agriculture, 2015(12):56. (in Chinese)

[5] 丛锦玲,廖庆喜,曹秀英,等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报,2014,30(8):30-39. CONG Jinling, LIAO Qingxi, CAO Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for

- both rapeseed & wheat seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(8):30–39. (in Chinese)
- [6] 张泽平,马成林,左春桢. 精播排种器及排种理论研究进展[J]. 吉林工业大学学报,1995,25(4):112–117.
ZHANG Zeping, MA Chenglin, ZUO Chunheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995, 25(4): 112–117. (in Chinese)
- [7] 张波屏. 国内外小麦精密播种机技术纵横[J]. 农牧与食品机械, 1992(4): 37–40.
ZHANG Boping. Wheat precision seeder technology at home and abroad [J]. Agriculture and Food Machinery, 1992(4): 37–40. (in Chinese)
- [8] 余松烈,亓新华,刘希运. 冬小麦精播高产栽培[M]. 北京:农业出版社, 1987.
- [9] SIDAHMED M M. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry air last sprayer—part I: air jet model [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 5–10.
- [10] TSAY J. Valuation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation [J]. Transactions of the ASAE Online, 2002, 45(1): 47–54.
- [11] BAETENS K. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 161–173.
- [12] 祁力钧,赵亚青,王俊,等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报,2010,41(2): 62–67.
QI Lijun, ZHAO Yaqing, WANG Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62–67. (in Chinese)
- [13] 马立. 新型缝隙式小麦气吸播种机的研究[D]. 保定:河北农业大学,2010.
MA Li. Study on the new kind tube-slit air-suction wheat seeding machine [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [14] 张晋国,马立,史智兴,等. 新型缝隙式小麦气吸排种器的设计[J]. 农机化研究,2010,32(4):69–71.
ZHANG Jinguo, MA Li, SHI Zhixing, et al. The design of the new slit-style air suction seed-metering device for wheat[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(4):69–71. (in Chinese)
- [15] 马立,张晋国. 圆管孔眼式小麦气吸排种器的设计[J]. 农机化研究,2010,32(6):97–100.
MA Li, ZHANG Jinguo. The design of the hole-tube air suction wheat seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2010,32(6):97–100. (in Chinese)
- [16] 侯玲玲,张晋国,王学良,等. 充种沟式精密排种器的设计[J]. 农机化研究,2014,36(6):134–137.
HOU Lingling, ZHANG Jinguo, WANG Xueliang, et al. Design of ditch filling-type precision seeder-metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(6):134–137. (in Chinese)
- [17] 赵晓坤,张晋国,王浩,等. 7.5 cm 行距机械式小麦精量播种机的改进设计[J]. 农机化研究,2015,37(9):105–108.
ZHAO Xiaokun, ZHANG Jinguo, WANG Hao, et al. Improved design of 7.5 cm row spacing mechanical precise seeder for wheat[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9):105–108. (in Chinese)
- [18] 刘立晶,杨学军,李长荣,等. 2BMG-24 型小麦免耕播种机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(10): 39–43.
LIU Lijing, YANG Xuejun, LI Changrong, et al. Design of 2BMG-24 no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 39–43. (in Chinese)
- [19] 翟萌萌. 基于 EDEM 的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
ZHAI Mengmeng. Optimum design and test of wheat wide precision seeding device based on EDEM [D]. Taian: Agricultural University of Shandong,2018. (in Chinese)
- [20] 赵月霞. 机械式精密排种器关键技术研究[D]. 南京:南京农业大学,2003.
ZHAO Yuexia. Study on key technology of mechanical precision metering device [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2003. (in Chinese)
- [21] 马连元. 内侧充种垂直园盘排种器充种机理的研究[J]. 河北农业大学学报,1995,18(2):70–75.
MA Lianyuan. The study on seed-filling mechanism of the vertical-plate feed of seed-cell fill on inside precise seedmeter[J]. Journal of Agricultural University of Hebei. 1995,18(2):70–75. (in Chinese)
- [22] 侯玲玲. 7.5 cm 行距机械式小麦播种机的研制[D]. 保定:河北农业大学,2014.
HOU Lingling. Development of the 7.5 cm row spacing mechanical seeder for wheat [D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2014. (in Chinese)
- [23] 滕海英,祝国强,黄平,等. 正交试验设计实例分析[J]. 药学服务与研究,2008(1):75–76.
TENG Haiying, ZHU Guoqiang, HUANG Ping, et al. Orthogonal experimental design and instance analysis [J]. Pharmaceutical Care & Research,2008(1):75–76. (in Chinese)
- [24] 张昱. 倾抖沙漏流与颗粒休止角研究[D]. 兰州:西北师范大学,2016.
ZHANG Yu. The angle of repose for inclination granular orifice flow [D]. Lanzhou: Northwest Normal University,2016. (in Chinese)
- [25] 田晓红,李光涛,张淑丽. 谷物自然休止角测量方法的探究[J]. 粮食加工,2010,35(1):68–71.
TIAN Xiaohong, LI Guangtao, ZHANG Shuli. Determination of angle of repose[J]. Food Processing, 2010,35(1):68–71. (in Chinese)