

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.005

# 圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机设计与试验

赵金 张晋国 粘永康 郑超

(河北农业大学机电工程学院, 保定 071001)

**摘要:** 为了实现小麦精播技术, 针对黄淮海北部小麦-玉米一年两熟区, 设计了圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机, 重点设计了圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器。通过室内台架试验确定了当缝隙宽度为 0.70 mm, 锥面角度为 90°, 负压为 4.0 kPa 时, 圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器的吸附率为 85.89%。通过台架对比试验得出缝隙表面有 1.5 倍种子长的锯齿形间距时, 吸附率可提高到 88.82%。通过计算得出排种器作业时所需负压, 整机作业时, 能使种子被成功吸附的负压范围为 8.0 ~ 13.3 kPa, 计算得所需风机功率应大于 1.47 kW。通过田间试验得出, 圆管锥面缝隙式播种机的播种均匀性变异系数平均值为 31.20%, 较传统排种器有显著提高。

**关键词:** 气吸式播种机; 小麦; 圆管锥面缝隙式排种器

**中图分类号:** S223.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0034-09

## Design and Test of Wheat Seeder with Suction and Metering Device with Cone Surface of Circular Tube

ZHAO Jin ZHANG Jinguo NIAN Yongkang ZHENG Chao

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

**Abstract:** Because of the accumulated temperature which results in two cultivations of crops in a year in the north of Huang-Huai-Hai is not enough to affect wheat tillering, people are accustomed to sowing wheat in large quantities. This sowing method not only causes wastes of water, fertilizer and other resources, but also affects the whole growth and yield of the whole wheat population due to its poor uniformity of sowing. The mechanization of wheat planting in China has been popularized, most areas use mechanical seeders for sowing, and the air suction type wheat planters have not been widely used. Compared with the mechanical seed metering device, the pneumatic seed metering device has the advantages of good applicability, good seeding uniformity, etc., therefore, the main purpose was to design a wheat air suction planter that can achieve single grain precision sowing well. The circular tube cone slot type wheat air suction seeder was designed. Through the analysis and research of several generations of prototypes developed by Professor Zhang Jinguo's team of Hebei Agricultural University since 2008, it can be known that the gap structure used in wheat air suction seeder can improve the uniformity of filling and seeding. In view of the problems existing in previous generations of round tube slot wheat seeding machine and the problem that excess seeds were easily accumulated around the gap, a new type of pipe cone slot type wheat suction and metering device was designed to realize precision seeding, reduce the amount of sowing, and improve the uniformity of seeding effect. The structure and working principle of wheat seed suction and metering device with cone surface were introduced, and the main parameters were determined. According to the research results of previous generations of sample machines, the main parameters affecting the seed arrangement performance of the circular tube cone surface slot wheat air suction and seed ejector were determined, which were gap width, cone surface angle and negative pressure respectively. The optimum parameters and conditions for the operation of wheat seed suction and metering apparatus with taper surface were determined by multi-group single factor test and orthogonal test. When the cone angle was 90 degrees, the gap width was 0.7 mm, negative

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-02

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

pressure was 4.0 kPa, and the adsorption rate was 85.89%. By bench contrast test, the result showed that when the gap surface had serrated spacing, and the length was 1.5 times of seed, the adsorption rate could be increased to 88.82%. The negative pressure value of the seed-device was obtained by calculation, the negative pressure range for successful adsorption of seeds was 8 ~ 13.3 kPa. It was also calculated that the required fan power should be greater than 1.47 kW. Field trials showed that the average variation coefficient of sowing uniformity of wheat seeder with suction and metering device with cone surface of circular tube was 31.20%, less than 45%, which met the national standard.

**Key words:** suction type seeder; wheat; metering device

## 0 引言

小麦精播技术可实现均匀播种,保证作物在生长过程中营养均衡<sup>[1]</sup>,具有明显的省种增效、提高产量的特点,具有巨大的经济效益和社会效益<sup>[2]</sup>。影响小麦播种机播种均匀性的主要部件是排种器<sup>[3-8]</sup>,小麦精量播种机的排种器可分成气力式和机械式<sup>[9]</sup>,气力式排种器又分气吸式和气吹式。机械式和真空气吸式精密播种技术是国内外应用较多的两种播种技术。

目前市场上的小麦播种机机械式排种器大多采用外槽轮排种器,由于其排种存在脉动性,播种均匀性差,不适宜精播,容易造成种子的破损,且直径小不适宜高速作业<sup>[10-12]</sup>。气吸式排种器伤种率低于机械式排种器,且作业速度提高潜能大,目前气吸式播种机所采用的排种器按照设计形式的不同可以分为:针式、管式、圆盘式、吸孔式、滚筒式、圆管缝隙式等<sup>[13-14]</sup>。由于拌种后的小麦种子中有杂质,其中针式、管式、圆盘式、吸孔式、滚筒式不易清理而产生堵塞现象,而圆管缝隙式能很好地解决堵塞问题,但由于气压场会出现种子堆积、吸种不均匀的现象<sup>[15-17]</sup>。因此急需设计一种适合高速作业且排种均匀性高的气吸式小麦排种器。

为了实现小麦精播技术,还需设计适合气吸式小麦精量排种器的播种机。市场上常见的 15 ~ 20 cm 行距的播种机、宽苗带小麦播种机以及无垄联合耕播机<sup>[18]</sup>,多是采用机械式排种器,国外气力式排种器使用广泛,但机型庞大不适合国内使用<sup>[19-20]</sup>,国内气吸式小麦精量播种机研究较为广泛<sup>[21-24]</sup>,但播种均匀性还需要进一步提高。

本文针对黄淮海北部小麦-玉米一年两熟区,农机农艺相结合,设计适合小麦精量播种作业的气吸式精量播种机,以期小麦高产增效提供技术参考。

## 1 整机结构与工作原理

### 1.1 整机结构

圆管锥面缝隙式小麦气吸式播种机结构如图 1 所示,主要包括:覆土镇压轮、种管、风管、种箱、驱动

电机、控制箱、计数轮、圆管锥面缝隙式气吸排种器、风机、风机架、三点悬挂装置、开沟器以及机架等。播种机采用双圆盘开沟器,由于精量播种加大了播种粒距,为保证播量不变,需缩小播种行距,因此设计播种机行距为 7.5 cm,在安装过程中为了避免作业时行距过密发生秸秆堵塞的现象,机架可分 4 个梁分别安装开沟器,左右两个圆盘开沟器间距离为 30 cm,将 32 个开沟器安装在 4 个机架横梁上;为了实现精量排种,排种器采用圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器<sup>[25]</sup>,安装在种箱下方,通过种管与双圆盘开沟器连接;锥面缝隙等分在排种器的圆管上,为了避免因距离产生的吸力差异,排种圆管分为长度相等的两段,横向排布,吸风口分布在两个圆管的两侧及中间位置;对应两段排种圆管上方安装种箱;为了避免地轮打滑造成的漏播现象,本机采用电机驱动排种,计数轮、电机以及控制箱分别安装在播种机的一侧,方便电路连接;为了避免打滑,计数轮的轮外圈设置了突出小齿;风机安装在种箱前侧,三点悬挂的后方,风机进风口通过风管与排种器上 3 个吸风

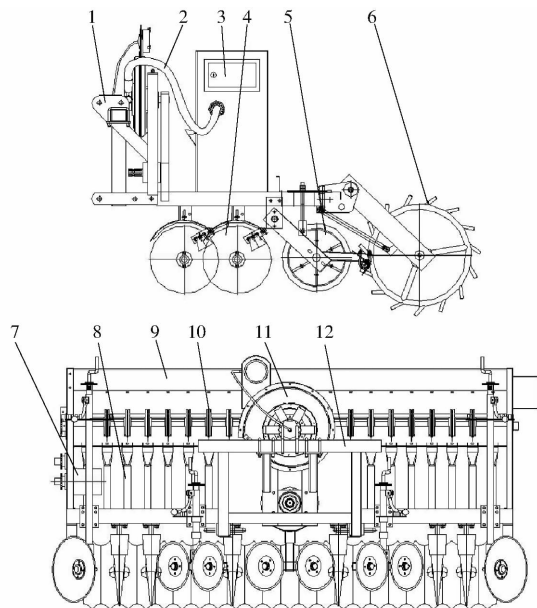


图 1 整机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of the machine

1. 三点悬挂装置 2. 风管 3. 控制箱 4. 双圆盘开沟器 5. 覆土镇压轮 6. 驱动轮 7. 驱动电机 8. 种管 9. 种箱 10. 圆管锥面缝隙式排种器 11. 风机 12. 风机架

口连接;覆土镇压轮采用对行镇压装置,由32片橡胶凸轮排列在轴上,相邻两轮凸起部分中心距为7.5 cm,每一个凸起对应着一个圆盘开沟器的作业种行,橡胶凸轮的安裝圆心直径大于轴直径,因此左右相邻的两个橡胶凸轮可自由上下运动,当二者产生高度差时,可有效清除两轮缝隙间的泥土和秸秆,防止土壤因水分过大而附着在镇压轮上;对行镇压轮上方安装有刮泥板,用来周向清除对行镇压轮表面作业时粘上的泥土;覆土镇压轮位于机架后方;本机一次作业可同时完成开沟、播种、覆土镇压等工序。主要技术指标如表1所示。

表1 机具参数

Tab.1 Machine parameters

参数	数值/型式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 960×2 800×1 110
悬挂方式	三点悬挂
配套动力范围/kW	33.09~44.12
工作幅宽/cm	240
工作行数/行	32
行距/cm	7.5
机组前进速度/(km·h <sup>-1</sup> )	8~10
播种深度/cm	3~5
播种量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	150.0~337.5
开沟器	双圆盘

## 1.2 排种器工作原理

整机通过三点悬挂装置挂接在拖拉机后部,作业时拖拉机动力输出轴带动风机高速旋转产生气流,气流从风机排风口排出,使进风口产生负压从而吸气;3个风管分别连接风机进风口和排种器3个吸风口,气流通过风管进入风机并被排出,使得排种器圆管内产生负压;种箱内的种子覆盖在排种器上方,由于缝隙内产生负压,种子被吸附在圆管外的锥形缝隙上;播种机前进时,驱动轮无负载转动,转动过程中产生信号,传递给控制箱,控制箱根据实际播种需要设定好数值,再将加工后的信号传递给电机,电机输出设定好的转速,通过链轮传动,将转速传递给排种轴;管内负压将种子吸附在锥面缝隙上,当排种轴转动时,种子会依次吸附在缝隙上,并随排种轴转动,种子转动到种管口时,经缝隙内清种片进行投种作业;种子掉入种管内,通过种管进入到双圆盘开沟器中;双圆盘开沟器开好种沟,待种子落入种沟内,种沟两侧的土壤进行自然覆土,后经过对行覆土镇压轮进行覆土及对行镇压作业,保证种子与土壤充分接触。

## 2 关键部件设计

### 2.1 圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器

#### 2.1.1 主要结构与工作过程

圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器吸种装置主要

由内、外两部分组成。内部为一根空心无缝不锈钢圆管,外部主要由圆锥曲面、限位圆环组成。相邻两个圆锥曲面通过限位产生合适的缝隙。具体结构如图2所示,因为整机左右的排种器结构相同,因此以其中一个为例进行详细分析。图2a为外部的圆锥曲面,图2b为以内部无缝不锈钢圆管为材料的多气孔内轴,内轴上周向均匀打孔,共16组;圆锥曲面套在内轴外,两个圆锥曲面相对安装,即最大直径面相邻,两个圆锥曲面间的距离由曲面内部的6个定位凸台确定,两个圆锥曲面间形成狭窄的缝隙,该缝隙为吸种作业面,如图2c所示,圆锥曲面内径与内轴外径相等;两轴头用于连接风管,作业时风机排出气体使轴表面形成负压,进而在缝隙处产生吸种负压,使排种器完成吸种作业。

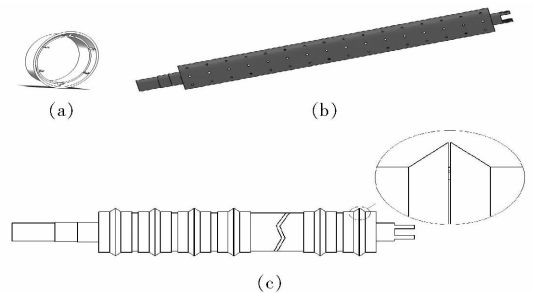


图2 圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器吸种管结构示意图  
Fig.2 Wheat seeds suction and metering device with cone surface of circular tube

#### 2.1.2 圆锥曲面理论排量确定

根据公式

$$z_0 = \frac{\pi R}{l} \quad (1)$$

式中  $z_0$ ——圆锥曲面吸种数,个

$R$ ——圆锥曲面最大直径,mm

$l$ ——小麦种子长度,mm

设计得圆锥曲面最大直径  $R = 140.00$  mm,统计“石麦22”的小麦种子长度,平均值  $l = 5.93$  mm,长度最大值  $l_{\max} = 6.48$  mm,圆锥曲面理论排种个数为58~62个。

#### 2.1.3 圆锥曲面形状确定

根据前期研究基础<sup>[16-17,23]</sup>,有圆管缝隙式小麦气吸排种器的缝隙低于圆管高度,如图3所示,现将两排种器进行台架试验对比。采用JPS-12型计算机视觉排种器试验台,如图4所示,每个排种器取一行进行对比试验,排种器使用3D打印制作。

在转速分别为30、36、42 r/min时,负压3.0、3.5、4.0 kPa下的吸附率为

$$C = \frac{Z_i}{Z} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $C$ ——吸附率,%

$Z_r$ ——吸附在排种器上的实际种子数,个  
 $Z$ ——吸附在排种器上的理论种子数,个  
 结果如图 5、表 2 所示。

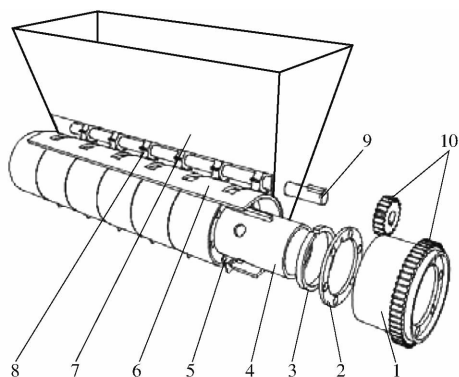


图 3 圆管缝隙式小麦气吸排种器结构示意图

Fig. 3 Slit-style air suction seed-metering device for wheat

1. 外环 2. 内外管连接板 3. 限位环 4. 内环 5. 投种片 6. 护种板 7. 种箱 8. 搅轮 9. 搅轴 10. 齿轮



图 4 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台

Fig. 4 JPS-12 computer vision seed meter test bench

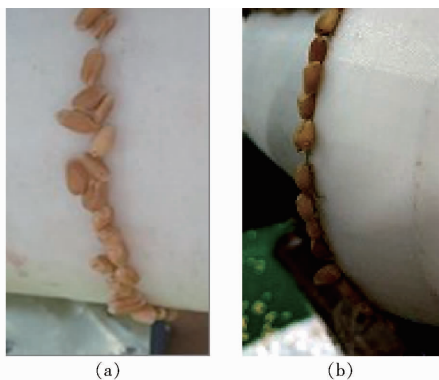


图 5 吸种情况对比

Fig. 5 Comparison of two seed metering devices for adsorption rate

图 5a 为圆管缝隙式小麦气吸排种器吸种作业图,种子在负压作用下无规律吸附在缝隙处,不能达到连续排列的效果,且重吸现象较严重,因此会产生重播现象。图 5b 为圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器吸种作业图,由于锥面结构凸出于圆管,会自动清除缝隙周围多余的种子,使重吸率减少,被吸附的种子基本呈单粒排列,有利于达到精量排种的效果。

表 2 2 种缝隙形式在不同转速及负压下的吸附率试验结果

Tab. 2 Experimental results of adsorption rate at different rotation speeds and negative pressure for different slot forms

转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	负压/ kPa	吸附率/%	
		圆管缝隙式小麦 气吸排种器	圆管锥面缝隙式 小麦气吸排种器
30	3.0	143.33	84.17
	3.5	137.62	81.04
	4.0	162.38	93.75
36	3.0	99.52	69.58
	3.5	118.57	91.46
	4.0	143.33	100.63
42	3.0	100.71	58.33
	3.5	116.19	80.42
	4.0	123.10	91.25

由表 2 可知,随着转速的增大,两个排种器的吸附率平均值逐渐降低,随着负压的增加,吸附率均值在增加。圆管缝隙式小麦气吸排种器的吸附率均值均大于圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器的吸附率均值,且绝大多数均值大于 100%,即出现重吸现象,达不到单粒精播的效果,而圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器的吸附率均值均小于 100%,即产生部分漏播现象,由于麦粒有充足的空间在排种器上进行排列,有利于实现单粒精播,但需要继续改进结构提高吸附率。

#### 2.1.4 圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器参数确定

根据前期研究基础可知,负压、缝隙是影响排种器吸附率的主要因素,对于本文研制的排种器,锥面角度也是影响吸附率的主要因素。综上,采用正交试验法确定排种器参数。

通过前几代圆管缝隙式小麦气吸排种器试验效果以及缝隙宽度的分析和研究可知,最优缝隙宽度为 0.25 ~ 0.35 mm<sup>[16-17,23]</sup>,选择 0.30 mm 作为本次试验缝隙宽度的最小值,由于圆管锥面缝隙式排种器自身结构的特殊性,同样缝隙宽度的情况下,圆管锥面缝隙式排种器的吸附率低于圆管缝隙式排种器的吸附率。因此,为了提高吸附率,本次正交试验所设计的圆管锥面缝隙式排种器的缝隙宽度最终选择 0.30、0.50、0.70 mm。

负压的确定需要进行单因素试验,即负压最低从 2.0 ~ 4.5 kPa 每间隔 0.5 kPa 进行一次吸附率试验,试验结果如表 3 所示:当负压在 2.0、2.5 kPa 时,吸附率平均值均为 60% 左右,漏吸现象严重;当负压为 4.5 kPa 时,吸附率平均值均大于 100%,重吸现象严重。因此选择 3.0、3.5、4.0 kPa 作为本次试验因素的 3 个水平。

针尖式吸种针也能够将种子吸住并进行播种,吸种针的针头采用锥形针头<sup>[26-28]</sup>,当圆管锥面缝隙

表3 不同负压下排种器吸种性能

Tab.3 Absorption of seed metering devices under different negative pressures

转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	负压/kPa	吸附率平均值/%	变异系数/%
30	2.0	37.28	35.78
	2.5	58.93	28.49
	3.0	84.38	22.31
	3.5	81.25	15.94
	4.0	92.86	15.94
	4.5	122.99	18.97
36	2.0	37.72	27.24
	2.5	63.39	24.11
	3.0	69.87	23.61
	3.5	91.74	14.25
	4.0	100.45	16.67
	4.5	102.90	13.88
42	2.0	41.74	29.12
	2.5	66.07	23.66
	3.0	58.04	28.25
	3.5	80.36	20.60
	4.0	91.52	15.46
	4.5	116.29	16.76

式气吸排种器的锥面角度接近针尖式气吸排种器针头尖端锥形口角度时也可以将种子吸住,由此将试验用的最小锥面角度确定为 $30^\circ$ ,即单侧锥面角度为 $15^\circ$ ,确定 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 作为本次正交试验锥面角度的3个水平。

选用 $L_9(3^4)$ 正交表,3个因素包括负压、缝隙宽度、锥面角度。正交试验的设计方案与试验结果分析如表4所示。

表4 正交试验设计与结果

Tab.4 Orthogonal test design and results analysis

序号	缝隙宽度/ mm	锥面角度/ ( $^\circ$ )	负压/ kPa	吸附率/ %
1	0.30	30	3.0	28.93
2	0.50	60	3.5	53.39
3	0.70	90	4.0	85.89
4	0.30	60	4.0	46.07
5	0.50	90	3.0	60.89
6	0.70	30	3.5	47.50
7	0.30	90	3.5	43.75
8	0.50	30	4.0	66.96
9	0.70	60	3.0	56.61
$K'_1$	39.58	47.80	48.81	
$K'_2$	60.41	52.02	48.21	
$K'_3$	63.33	63.51	66.31	
极差	23.75	15.71	18.10	

由表4可知,各水平下极差由大到小顺序为:缝隙宽度、负压、锥面角度,极差越大表示该因素水平的变动对试验结果的影响越大,从而可知:缝隙宽度的变化对试验结果的影响最大,其次是负压,最后是锥面角度。由表4还可得出第3组为最

佳组合:缝隙宽度为 $0.70\text{ mm}$ 、锥面角度为 $90^\circ$ 、负压为 $4.0\text{ kPa}$ 。

### 2.1.5 缝隙表面结构确定

为了增加排种器的附着力以及扰动种子的能力,对锥面缝隙式结构表面进行处理,以期增大吸附率。在原有光滑表面进行锯齿状处理,锯齿齿距分别为 $0.6$ 倍种子长( $0.6l$ )、 $0.8$ 倍种子长( $0.8l$ )、 $1$ 倍种子长( $l$ )、 $1.5$ 倍种子长( $1.5l$ )、 $2$ 倍种子长( $2l$ ),如图6所示。

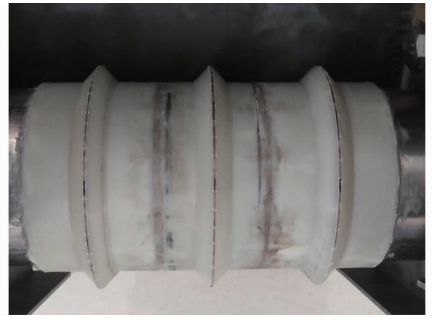


图6 不同锯齿距离的排种器

Fig.6 Different sawtooth distance metering diagram

由表5可知,在最佳负压 $4.0\text{ kPa}$ 时,当锯齿间距为 $1.5$ 倍种子长时,排种器的吸附效率最高,为 $88.82\%$ 。

表5  $4.0\text{ kPa}$ 下不同锯齿间距的性能试验结果

Tab.5 Influence of sawtooth spacing on test results under optimal negative pressure %

参数	齿距				
	$0.6l$	$0.8l$	$l$	$1.5l$	$2l$
吸附率均值	60.46	79.90	88.04	88.82	57.06
变异系数	21.27	25.53	12.83	18.60	22.68

### 2.2 清种片结构、清种角度的确定

为避免因清种不当使清种片被损坏等情况的出现,根据圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器的结构,设计了一种清种片,其具体结构如图7所示。

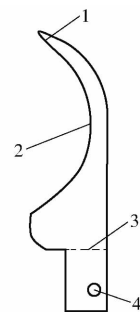


图7 清种片结构示意图

Fig.7 Schematic of cleansing sheet

1.尖端 2.弧形面 3.折弯线 4.定位孔

安装时,沿折弯线使两面垂直,将弧形面插入圆管锥面缝隙中,弧形面的两端的弧度小于弧形面中

间的弧度,因此只有弧形面的两端与凸台接触,中间部分不与凸台接触,从而减小作业时产生的摩擦。弧形面的长度需要同时跨过 3 个定位凸台,起到限位作用。

小麦种子被吸附到圆管锥面缝隙上后会随排种器的转动而一起转动,当被吸附在圆周缝隙上的小麦遇到清种片时因受到自身重力作用下落到投种装置中。圆管锥面缝隙式排种器在工作过程中有自身的转动以及与播种机前进方向一致的速度,为了保证播种均匀性应尽可能地实现零速投种,因此,对投种过程进行运动分析,运动分析图如图 8 所示。

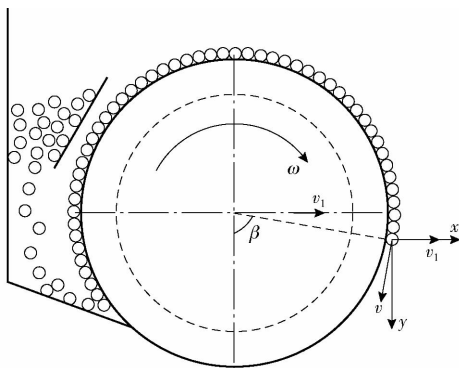


图 8 投种过程运动分析图

Fig. 8 Motion analysis of seeding process

图中  $v$  为吸种缝隙处线速度,  $m/s$ ;  $v_1$  为排种器前进速度,  $m/s$ ;  $\omega$  为排种器角速度,  $rad/s$ 。

为实现零速投种,应减少种子与种管之间的碰撞以及种子在下落过程中的弹跳,即实现下落过程中种子  $x$  方向合速度为 0。

$$\begin{cases} v = \omega R \\ v_x = v \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

令  $v_1 = v_x$ , 得

$$\begin{cases} v = \omega R \\ v_1 = v \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v_x$ —— $v$  在  $x$  轴方向的分速度,  $m/s$

$\beta$ —— $v$  与  $x$  轴之间的夹角,  $(^\circ)$

整理式(3)、(4)可得

$$\beta = \arccos \frac{v_1}{\omega R} \quad (5)$$

由式(5)表明,需根据排种器的前进速度、转速以及直径来确定投种角。当排种器前进速度为  $1 m/s$ , 半径为  $0.06 m$ , 取排种器转速为  $36 r/min$ , 代入式(5), 经计算得出投种角  $\beta$  为  $74.62^\circ$ 。因此,在清种片的制作和安装过程中保证投种角在  $75^\circ$  左右,以达到零速投种,保证播种均匀性。

### 2.3 机具所需负压的确定

负压直接决定了种子能否被成功吸附。对刚刚

被吸附上的种子进行力学分析,如图 9 所示,通过受力分析可知,种子刚刚被吸附时所受到的吸附力  $F_Q$  不仅要克服种子自身的重力  $G$ , 还要克服种群之间的摩擦力  $f_q$ , 因此种子在刚刚被吸附时所受到的吸附力应当大于后来种子所受到的吸附力,只有这样才能可以保证种子能被成功吸附。

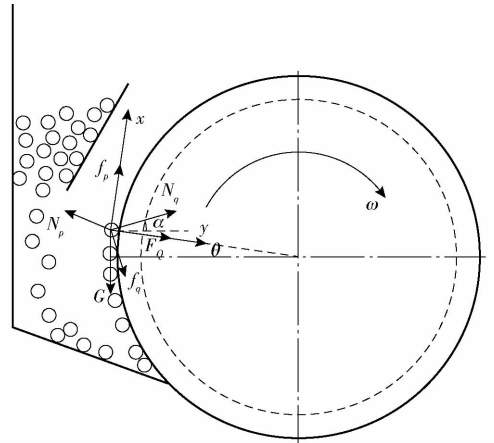


图 9 种子被吸附时受力分析图

Fig. 9 Stress analysis of seed when it was adsorbed

图 9 中  $f_p$  为种子受到排种器的摩擦力,  $N; N_q$  为种子受到种群的支持力,  $N; N_p$  为种子受到排种器的支持力,  $N; \alpha$  为  $N_q$  与水平方向的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\theta$  为  $f_q$  与水平方向的夹角,  $(^\circ)$ 。

根据种子的受力分析可得到方程

$$\begin{cases} \sum F_x = N_q \sin(\alpha + \theta) + f_p - G \cos \theta - f_q \cos(\alpha + \theta) = 0 \\ \sum F_y = F_{Q2} + G \sin \theta + f_q \sin(\alpha + \theta) + N_q \cos(\alpha + \theta) - N_p - m \omega^2 R = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} f_q = N_q \tan \phi_q \\ f_p = N_p \tan \phi_p \end{cases} \quad (7)$$

式中  $F_x$ ——种子所受  $x$  方向的合力,  $N$

$F_y$ ——种子所受  $y$  方向的合力,  $N$

$m$ ——种子质量,  $kg$

$F_{Q2}$ ——后来种子所受的吸附力,  $N$

$\phi_q$ ——种子的自然休止角,  $(^\circ)$

$\phi_p$ ——小麦种子与圆管间的滑动摩擦角,  $(^\circ)$

小麦种子受到的吸附力由排种器缝隙内外压差形成,吸附力表达式为

$$F_Q = \pi \Phi \Delta P_N \left( \frac{k}{2} \right)^2 \quad (8)$$

式中  $\Phi$ ——流场比例系数

$k$ ——泄漏系数, 取  $1.05$

$\Delta P_N$ ——负压,  $Pa$

由式(8)可以看出,吸附力直接由负压决定。

联立式(6)~(8)得出种子所需吸附力  $F_Q$  的最小值,即  $F_Q$  与  $F_{Q_2}$  相等时为最小值。

$$F_{Q_{\min}} = \pi \Phi \Delta P_N \left( \frac{k}{2} \right)^2 = m\omega^2 R - \frac{N_q \cos(\phi_q + \phi_p - \alpha - \theta) + mg \cos \phi_q \sin(\theta - \phi_p)}{\cos \phi_q \cos \phi_p} \quad (9)$$

当小麦种子运动到排种器的最上方时,即重力等于支持力,种子所受吸附力最小,将式(9)进行进一步的简化,可得

$$\Delta P_N = \frac{m\omega^2 R - mg \sin(\theta - \phi_p) + mg \tan(\phi_q - 1) \cos(\theta - \phi_p)}{\pi \phi \left( \frac{k}{2} \right)^2 \cos \phi_p} \quad (10)$$

由式(8)和式(10)都可以看出吸附力与负压密切相关,除此之外,种子能否被成功吸附还与种子物料特性、排种器转速以及吸种的角度有关系。因此,为了使种子能够被成功吸附,做了大量室内试验来为田间试验做充分准备,最终确定了整机工作时能使种子被成功吸附的负压范围为 8.0~13.3 kPa。

## 2.4 机具所需风量及风机功率的确定

根据前期试验结果可知,负压为 4.5 kPa 时台架试验所用排种器的吸附效果最佳,台架试验所用排种器为 3 行而整机为 32 行,因此将整机分为 11 组,每 3 行为 1 组来计算整机所需风量。

1 组排种器所需风量  $Q_1$  的计算公式为

$$Q_1 = \frac{\pi}{4} D^2 v_i \quad (11)$$

式中  $D$ ——通风管直径,mm

$v_i$ ——气体流速,m/s

整机所需风量  $Q$  计算式为

$$Q = kQ_1 N \quad (12)$$

式中  $N$ ——排种器组数,取 11

整机所需真空度  $p$  计算式为

$$p = p_1 + p_2 + p_3 \quad (13)$$

其中

$$p_2 = \mu \frac{L}{d} \frac{v_g^3}{2} \quad (14)$$

$$p_3 = \gamma \frac{(v_{g1} - v_{g2})^2}{2} \quad (15)$$

$$v_g = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (16)$$

式中  $p_1$ ——1 组排种器所需负压,取 4 500 Pa

$p_2$ ——沿程压力损失,Pa

$p_3$ ——局部压力损失,Pa

$\mu$ ——阻力系数,取 0.02

$L$ ——管长,m

$d$ ——管的内径,m

$v_g$ ——气体流速,m/s

$\gamma$ ——空气比重,取 1.205 kg/m<sup>3</sup> (即 20℃ 时空气密度)

$v_{g1}$ ——小管中气体平均流速,m/s

$v_{g2}$ ——大管中气体平均流速,m/s

根据式(11)~(16)可得

$$\begin{cases} Q = \frac{\pi}{4} k D^2 v_g \times 11 \\ p = 4500 + \mu \frac{L}{d} \frac{v_g^3}{2} + \gamma \frac{(v_{g1} - v_{g2})^2}{2} \end{cases} \quad (17)$$

将通风管直径 0.04 mm,大管直径 0.11 mm,以及整机所需的负压范围代入式(17)中,估算出整机所需风量的范围为 0.14~0.21 m<sup>3</sup>/s。

风机功率计算式为

$$W = \frac{Qp}{1000\eta_1\eta_2} \quad (18)$$

式中  $W$ ——风机功率,kW

$\eta_1$ ——风机效率,取 0.72~0.80

$\eta_2$ ——机械传动效率,取 0.95

将负压 8.0 kPa,风量 0.14 m<sup>3</sup>/s 代入可得风机功率约为 1.47 kW。

## 3 田间试验

### 3.1 试验条件

试验在河北省石家庄辛集市马庄乡河北农业大学马庄试验站进行。属中国东部温带半湿润季风气候,土壤为中壤土,栽培制度为冬小麦-夏玉米一年两熟制,是华北高产农区。

试验所用小麦品种为“冀麦 585”,千粒质量为 42.1 g,试验用拖拉机动力为 44.12 kW,播量为 187.5 kg/hm<sup>2</sup>,作业速度 7.2 km/h,图 10 为田间试验场景。



图 10 田间试验场景

Fig. 10 Picture of field testing

### 3.2 田间试验结果与分析

圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机和普通机械式小麦播种机进行对比试验,试验地为同一地区相邻

两个小区。播种后第 17 天进行田间查苗,圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机所播种地块小麦的出苗情况如图 11 所示,均匀性较好,无堆积现象。分别将这两种播种机所播种的地块分为 3 个小区,测量播种均匀性变异系数,结果见表 6。

从上述试验结果可知圆管锥面缝隙式播种机的变异系数平均值为 31.20%,较传统排种器有显著提高。



图 11 圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机播种后小麦的出苗情况

Fig. 11 Seed emergence of wheat after sowing with a circular tube cone-type wheat air suction planter

表 6 播种均匀性变异系数对比

Tab. 6 Comparison of variation coefficient of seeding uniformity

参数	圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机			普通机械式小麦播种机		
	小区 1	小区 2	小区 3	小区 1	小区 2	小区 3
播种平均数/粒	7.39	9.61	8.89	7.89	11.17	9.61
标准差/粒	1.94	3.26	2.97	2.70	4.67	3.24
播种均匀性变异系数/%	26.32	33.88	33.39	34.20	41.81	33.69
变异系数均值/%		31.20			36.57	

## 4 结论

(1) 为了实现小麦精播技术,针对黄淮海北部小麦-玉米一年两熟区,设计了圆管锥面缝隙式小麦气吸播种机。

(2) 通过室内台架试验确定了圆锥曲面形状、缝隙宽度、锥面角度、清种片结构以及清种角度,并计算了排种器作业时所需负压,以及机具所需风量,确定了风机。

(3) 台架试验得出,当缝隙宽度为 0.70 mm,锥面角度为 90°,负压为 4.0 kPa 时,圆管锥面缝隙式小麦气吸排种器的吸附率为 85.89%。通过台架对比试验得出缝隙表面有 1.5 倍种子长的锯齿形间距时,吸附率可提高到 88.82%。

(4) 整机作业时,能使种子被成功吸附的负压范围为 8.0 ~ 13.3 kPa,所需风机功率应大于 1.47 kW。

(5) 圆管锥面缝隙式播种机的播种均匀性变异系数平均值为 31.20%,较传统排种器有显著提高。

## 参 考 文 献

- [1] 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 Chunzhen. 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)
- [2] 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 Agricultural, 2015(12):56. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] TSAY J. Valuation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation [J]. Transactions of the ASAE Online, 2002, 45(1): 47-54.
- [5] 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.
- [6] 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)
- [7] 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: Agricultural University of Hebei, 2010. (in Chinese)
- [8] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):75-84.  
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and text of the wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):75-84. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190108&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190108&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.008. (in Chinese)
- [9] 徐冬. 小麦精密播种机械的研究与应用[J]. 农业科技与装备,2015(6):79-80.



- XU Dong. Research and application of wheat precision seeding machinery [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2015(6):79-80. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 古玉雪,苑进,刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. *农业工程学报*, 2011,27(11):134-139. GU Yuxue, YUAN Jin, LIU Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(11):134-139. (in Chinese)
- [13] 胡建平,侯俊华,毛罕平. 磁吸式穴盘精密播种机的研制及试验[J]. *农业工程学报*, 2003,19(6):122-125. HU Jianping, HOU Junhua, MAO Hanping. Development and test of the magnetic precision seeder for plug seedlings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003,19(6):122-125. (in Chinese)
- [14] 胡建平,郑赛男,刘文东. 磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2009,40(3):60-63. HU Jianping, ZHENG Sainan, LIU Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder-seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3):60-63. (in Chinese)
- [15] 陈凤艳. 气吸式小麦精密播种机缝隙式排种器的设计与研究[D]. 保定:河北农业大学,2011. CHEN Fengyan. Design and study on a slot-type pneumatic precision wheat feeding device [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2011. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 赵晓顺,于华丽,马跃进,等. 负压式小麦精量排种器参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2017,33(11):11-18. ZHAO Xiaoshun, YU Huali, MA Yuejin, et al. Parameter optimization and experiment of negative pressure precision seed-metering device for wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017,33(11):11-18. (in Chinese)
- [18] 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 7.5 cm row spacing mechanical seeder of wheat [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014. (in Chinese)
- [19] 田波平,廖庆喜,黄海东,等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. *农业机械学报*, 2008,39(10):211-213. TIAN Boping, LIAO Qingxi, HUANG Haidong, et al. Design of 2BFQ-6 precision joint direct seeder for rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10):211-213. (in Chinese)
- [20] 赵湛,李耀明,陈进,等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. *农业工程学报*, 2011,27(7):112-116. ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Dynamic analysis of seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7):112-116. (in Chinese)
- [21] 杜辉,王忠举,李汝莘. 气吸式小麦精量播种机的改进研究[J]. *山东农机*, 2002(6):8-9. DU Hui, WANG Zhongju, LI Ruxin. Improvement of air suction wheat precision seeder[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2002(6):8-9. (in Chinese)
- [22] 杜辉. 气吸式小麦精量播种机的改进研究[D]. 泰安:山东农业大学,2003. DU Hui. Study on improvement of wheat pneumatic precise seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [23] 陈凤艳,张晋国,陈凤娟. 槽缝式小麦气吸精密播种机的设计与研究[J]. *农机化研究*, 2011,33(8):81-84. CHEN Fengyan, ZHANG Jinguo, CHEN Fengjuan. Design and research on suction slot-type precision wheat seeder[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011,33(8):81-84. (in Chinese)
- [24] 刘立晶,刘忠军,杨学军,等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. *农业机械学报*, 2011,42(2):54-57. LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(2):54-57. (in Chinese)
- [25] 河北农业大学. 一种气吸式排种元件、排种器和排种装置:201821614700. x[P]. 2019-05-10.
- [26] 刘云强. 气吸滚筒式蔬菜育苗播种机试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2018. LIU Yunqiang. Experimental study on air-suction drum-type vegetable seedling seeder [D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)
- [27] 赵立新. 震动气吸针式精量播种机的性能与应用[J]. *中国农机化*, 2003,24(1):16-17. ZHAO Lixin. Performance and application of vibrating inspilation needle precision seeder[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2003,24(1):16-17. (in Chinese)
- [28] 苗振坤. 气吸针板式林木种子精密播种机的设计与研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2014. MIAO Zhenkun. The design and research on suction needle plate precision seeder of forest tree seed [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2014. (in Chinese)