

水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验*

左彦军¹ 马旭¹ 玉大略² 廖醒龙¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 至卓飞高线路板深圳有限公司, 深圳 518067)

【摘要】 利用 Fluent 软件,采用三维、不可压、黏性、RNG 湍流模型和 SIMPLE 数值计算方法,对不同窝眼的气吸滚筒流场进行模拟。模拟结果表明:滚筒在相对压力 -4 kPa、生产率 350 盘/h、窝眼行距 23 mm 和孔间距 31.4 mm 时,滚筒内部压力分布均匀,速度稳定,能量损失主要集中在窄缝和出口附近,窝眼窄缝间气流相互影响甚微,说明窝眼在滚筒轴向和周向上分布合理。通过对比不同窝眼滚筒的平均湍动能、窄缝出口的平均压力和最大速度差可知,半球型滚筒窝眼更为合适。试验结果表明:半球型窝眼的播种合格率最高,达 85.34%,与模拟结果一致。

关键词: 水稻芽种 窝眼窄缝 气吸滚筒 流场 数值模拟

中图分类号: S223.2⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0058-05

Flow Field Numerical Simulation of Suction Cylinder-seeder
for Rice Bud Seed with Socket-slot

Zuo Yanjun¹ Ma Xu¹ Yu Dalu² Liao Xinglong¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Topsearch Printed Circuits Shenzhen Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract

A 3-D, incompressible, viscous, RNG turbulence model and the SIMPLE method were used with computational fluid dynamics (CFD), and flow fields of suction cylinder-seeder with different sockets were simulated by Fluent. When under pressure was -4 kPa, productivity was 350 trays per hour, row spacing of sockets was 23 mm and pitch of holes was 31.4 mm, the pressure was uniform, the velocity was stable. Energy loss mainly occurred nearby slots and export, and there was almost no interaction among sockets-slots, which indicated that sockets of cylinder-seeder were distributed reasonably in axial and circumference. The hemispherical socket was more appropriate by contrasting different sockets on average turbulent kinetic energy, average vacuum and maximum velocity difference in side of slots. The experimental results showed that hemispherical socket had the best seeding performance(85.34%) which was consistent with simulant results.

Key words Rice bud seed, Socket-slot, Suction cylinder, Flow field, Numerical simulation

引言

超级稻穴盘育秧播种要求精度高,通常每穴 2 ± 1 粒,传统的机械式播种装置往往不能满足其播种要求。气力式播种装置以其伤种率低、单粒率高、通用性好、对种子尺寸要求不严等优点^[1-2],成为超级

稻育秧播种的主流装置。气力式播种装置的流场变化对播种性能有着极为重要的影响,因此国内外很多学者对气力式播种装置的流场进行了研究。Karayel 等建立了气吸式精密排种器的数学模型^[3];Guarella 等在理论和试验上研究了蔬菜种子真空播种机的喷嘴性能^[4]。袁月明、王朝辉等对气吸式垂

收稿日期: 2010-04-24 修回日期: 2010-06-23

* 国家自然科学基金资助项目(50775078)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A05-4)、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(农科教发[2007]14号)和广东省高等学校人才引进科研资助项目(粤教师[2008]86号)

作者简介: 左彦军,博士生,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: 42648135@qq.com

通讯作者: 马旭,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计与检测技术研究,E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

直圆盘排种器和气吸式滚筒精密播种机的气室流场进行了仿真与试验研究^[5-6]；李耀明等对影响气吸式排种器吸种效果的吸孔流场进行了仿真与试验研究^[7]；廖庆喜等对气力式油菜精密播种器的流场进行了仿真分析^[8]。虽然已有多人对气吸式播种机构进行研究,但由于水稻需要芽播,现有的气力播种装置在播种时都存在吸孔堵塞现象。尽管庞昌乐^[9]研制的双层气吸滚筒能减缓吸孔堵塞,但仍不能满足连续播种要求,所以急需研制一种新原理、新结构的播种装置来解决此问题。本文在传统气吸滚筒的基础上,研制一种窝眼窄缝式气吸滚筒,通过充填、吸种、清种和强制清孔,能够有效地解决滚筒吸孔堵塞问题。

为了提高其播种性能,本文采用计算流体力学(computational fluid dynamics,简称CFD)软件对不同形状窝眼的气吸滚筒内部流场进行数值模拟计算,通过对内部流场速度和压力分布规律的分析,进行窝眼形状选择;并通过试验对其进行验证,为超级稻育秧精密排种器的设计提供理论和实践依据。

1 气吸滚筒排种器的工作原理

窝眼窄缝式气吸滚筒试验装置如图1所示。工作时,种子由供种箱落到振动种盘,并随振动种盘的振动向下蠕动进入吸种区,而芒刺、碎芽及其他杂质过振动种盘上的筛孔被筛除。种子在自重及窄缝负压吸力作用下进入窝眼完成充种。当窝眼转到上方清种区时,首先被同向旋转的清种滚刷将窝眼内多余的种子刷掉,剩余的种子随滚筒继续旋转进入护种带。当窝眼旋转至下方排种清孔区时,负压被切

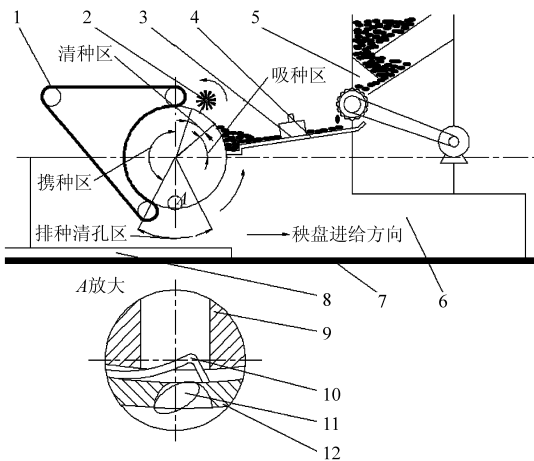


图1 窝眼窄缝式气吸滚筒排种试验装置原理图
Fig.1 Principle diagram of suction cylinder-seeder with socket-slot

1. 护种带 2. 清种滚刷 3. 气动振动器 4. 振动种盘 5. 供种箱 6. 机架 7. 输送带 8. 秧盘 9. 正压室 10. 弹种钢丝 11. 种子 12. 滚筒

断,此时滚筒内的弹种钢丝强制把窝眼内的种子弹出并清孔,种子则在重力和弹力的作用下下落到预定的育秧盘穴孔内,从而实现精密播种。

2 数值模拟

2.1 物理模型

在滚筒外表面沿轴向加工与钵体秧盘(15×25穴)相对应的15行窝眼,窝眼形状为半球型、圆台1型和圆台2型。窝眼行距和孔间距分别为23 mm(即穴盘行距)和31.4 mm;滚筒内表面沿周向与窝眼相对位置加工环形槽,环形槽与窝眼相贯形成长度约4 mm的窄缝,具体尺寸如图2所示。由于流体空间局部尺寸差异较大,所以采用结构化和非结构化的混合网格对模型进行网格划分,如图3所示。

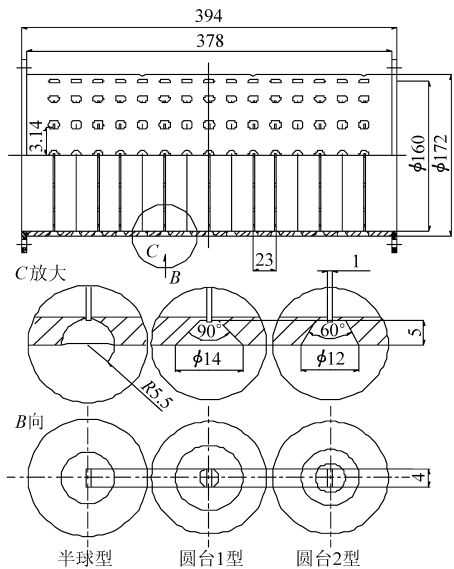


图2 滚筒结构示意图

Fig.2 Structural sketch of cylinder

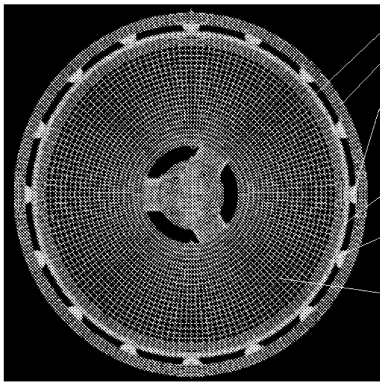


图3 滚筒流场模型

Fig.3 Computational model of cylinder

1. 滚筒 2. 外流场区域 3. 窝眼 4. 环形槽 5. 窄缝 6. 内流场区域

2.2 流动控制方程

窝眼窄缝连通着滚筒内、外两个不同流场区域,因滚筒的转动和空气的粘性作用,所以在窝眼窄缝

处,形成包括滚筒壁面的边界层流和旋转剪切流、窄缝的射流、管道内的自由流以及带有分离流动等的复杂湍流旋流。为了保证对窝眼窄缝两端场数值模拟的准确性,本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,模型中考虑了流动情况及空间坐标;修正了湍流黏度,也考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况;提供了一个低雷诺数流动的解析公式,较标准 $k-\varepsilon$ 方程,能更准确地对待近壁面流动^[10]。湍动能和耗散率方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_p - \rho \varepsilon$$
$$(i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (2)$$

其中
式 中 k ——湍动能, m^2/s^2
 ε ——湍流耗散率, m^2/s^3
 ρ ——流体密度, kg/m^3
 u_i ——流体速度分量, m/s
 G_k ——平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项
 G_p ——浮力引起的湍动能 k 的产生项
 μ_e ——湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
 i, j ——坐标方向

模型常数取值^[11]分别为: $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ 。

2.3 边界条件

流体为标准状态下常温空气,密度 $1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、黏度 $1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、温度 293 K ,因此入口压力为标准大气压 $101\,325 \text{ Pa}$ 。压力入口与压力出口均为亚音速,壁面采用绝热、无滑移边界条件^[12]。

3 模拟结果及分析

设定出口压力为 $97\,325 \text{ Pa}$,滚筒生产率为 $350 \text{ 盘}/\text{h}$,采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations)法对半球型、圆台 1 型、圆台 2 型 3 种窝眼分别进行数值模拟,结果如图 4 所示。图中,左侧为压力分布图,右侧为速度分布图。

从压力分布图可以看出,在整个滚筒内,压力分布均匀,但在窄缝和出口处变化较大。这主要是因为气流经过的管道断面突然变化,在惯性力处于支配的地位时,流动不能像壁面那样突然转折,造成主流与边壁脱离,形成漩涡区。主流区内流速分布的调整和漩涡区内的流体转动以及这两部分流体质点

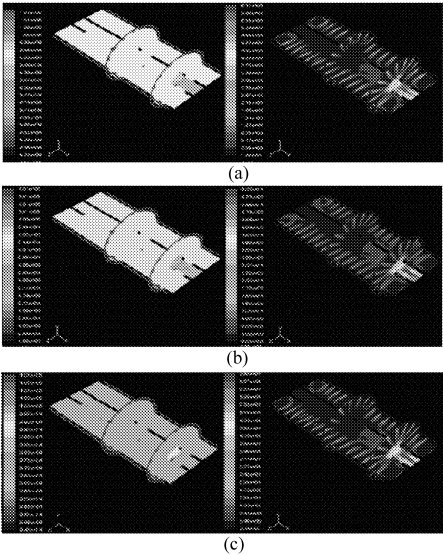


图 4 压力、速度分布图
Fig. 4 Distribution maps of pressure and velocity
(a) 半球型 (b) 圆台 1 型 (c) 圆台 2 型

之间的交换都消耗能量,所以能量的损失主要发生在窄缝和出口附近。从速度分布图可以看出,穿过窝眼窄缝的气流速度在轴向和周向上相互影响甚微,滚筒内部速度稳定,说明窝眼在滚筒上的分布合理。

表 1 不同窝眼的对比

Tab.1 Comparison of different sockets			
窝眼形状	平均湍动能 / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	窄缝出口平均 相对压力/ kPa	窄缝出口最大 速度差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
半球型	2.08	-1.88	9.22
圆台 1 型	1.59	-1.96	17.84
圆台 2 型	1.87	-1.27	11.16

表 1 为不同窝眼的平均湍动能、窄缝出口相对压力、窄缝出口最大速度差的对比分析。由表 1 可以看出,圆台 1 型窝眼滚筒的平均湍动能最小 ($1.59 \text{ m}^2/\text{s}^2$),说明湍流作用最小,涡流对流动造成的影响最弱,流场最稳定,但是三者相差不大。圆台 2 型窝眼滚筒窄缝出口的相对压力最小 (-1.27 kPa),说明能量损失最多,半球型和圆台 1 型几乎相同 (-1.88 kPa 和 -1.96 kPa)。圆台 1 型窝眼滚筒窄缝出口的最大速度差最大 (最大速度 $50.55 \text{ m}/\text{s}$,最小速度 $32.71 \text{ m}/\text{s}$),说明圆台 1 型窝眼窄缝吸种均匀性最差,半球型和圆台 2 型相对圆台 1 型有很大的改善。图 5 为不同窝眼速度矢量图,图中左侧为滚筒径向的窝眼速度矢量剖面,右侧为滚筒周向的窝眼速度矢量剖面。由图 5 可以看出,气流沿半球型窝眼表面流动状态逐渐变化,能量损失较少,速度也较均匀;气流沿圆台 1 型窝眼表面流动状态变化

的不同,导致局部能量损失不同,速度差异大;气流沿圆台 2 型窝眼流动状态急剧变化,局部能量损失大,速度较小但相差不大。通过对比平均湍动能、窄缝出口的相对压力和最大速度差,以及窝眼速度矢量的分析,理论上选择半球型作为滚筒窝眼更为合适。

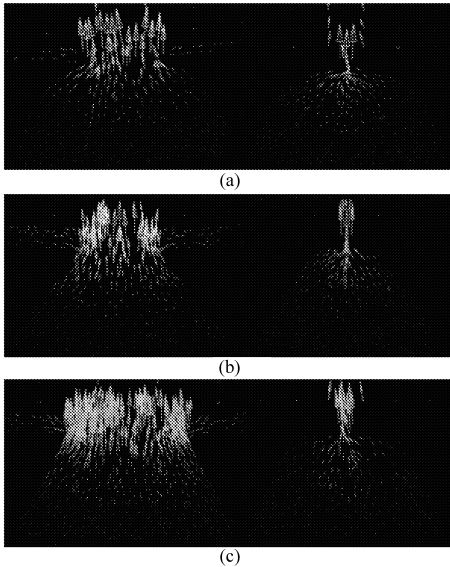


图 5 不同窝眼速度矢量图

Fig. 5 Velocity vectors of different sockets
(a) 半球型 (b) 圆台 1 型 (c) 圆台 2 型

4 试验对比分析

4.1 试验材料

试验材料为超级稻培杂泰丰,其芽种尺寸为长 9.23 mm、宽 3.45 mm 和厚 2.42 mm。

4.2 试验步骤

- (1)浸种、催芽,使谷种露白破胸备用。
- (2)调定风机向气动振动器提供稳定 0.2 MPa 的气压。
- (3)调定真空泵使相对压力达到 -4 kPa。
- (4)调定变频器使生产率达到 350 盘/h。
- (5)启动滚刷,使之与滚筒同向旋转,转速为 50 r/min。
- (6)将芽种放入供种箱,启动振动器,振动种盘开始振动,然后启动供种箱开始向滚筒供种,运行稳定后,进行播种试验。

4.3 试验因素

根据对 Fluent 模拟结果的分析,采用控制变量法,研究窝眼形状对滚筒播种性能的影响,验证数值模拟的结果。

4.4 试验结果

试验在华南农业大学工程实验室育秧试验台上进行,以播种合格率、重播率和空穴率为考核指标,结果如表 2 所示。其中,合格率为每穴中有 1~3 粒种子的穴数占总播种穴数的百分比;重播率为每穴中超过 3 粒种子的穴数占总播种穴数的百分比;空穴率为没有种子的穴数占总播种穴数的百分比。

表 2 试验结果
Tab. 2 Experimental results %

窝眼形状	合格率	重播率	空穴率
半球型	85.34	9.78	4.88
圆台 1 型	70.94	2.54	26.52
圆台 2 型	74.53	5.71	19.76

由表 2 可以看出,圆台 1 型窝眼的窄缝出口速度最不均匀、吸力不稳定、易落种,导致空穴率高;圆台 2 型窝眼的窄缝出口相对压力小、吸力小、吸种能力弱,空穴率较高;半球型窝眼的窄缝出口相对压力较高、速度均匀、吸力强,导致重播率高,但滚刷能及时刷落多余种子。半球型窝眼窄缝式气吸滚筒的播种合格率最高(85.34%),所以半球型更适合作为窝眼,这与 CFD 模拟结果相吻合,说明试验与模拟结果是一致的。

5 结论

- (1)滚筒内部压力分布均匀,速度较稳定;能量损失主要集中在窄缝和出口附近;窝眼窄缝间气流相互影响甚微,说明窝眼在滚筒轴向和周向上的分布合理。
- (2)3 种窝眼滚筒的平均湍动能相差不大;圆台 2 型窝眼滚筒的能量损失大;圆台 1 型窝眼滚筒窄缝处气流速度最不均匀,吸种均匀性差,所以半球型作为窝眼更为合适。
- (3)试验结果表明,半球型窝眼的播种性能最好,播种合格率为 85.34%,与 CFD 数值模拟结果一致。

参 考 文 献

1 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育苗播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2008,24(4):301~306.
Zhou Haibo, Ma Xu, Yao Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(4):301~306. (in Chinese)

2 吴明亮,汤楚宙,李明,等. 水稻精密播种机排种器研究的现状与对策[J]. 中国农机化, 2003(3):30~31.
Wu Mingliang, Tang Chuzhou, Li Ming, et al. The present situation and countermeasures about seeding apparatus of paddy

- precision seeder[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2003(3): 30 ~ 31. (in Chinese)
- 3 Karayel D, Barut Z B, Ozmerzi A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437 ~ 444.
 - 4 Guarella P, Pellerano A, Pascuzzi S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(1): 29 ~ 36.
 - 5 袁月明, 马旭, 金汉学, 等. 气吸式水稻芽种排种器气室流场研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 42 ~ 44.
Yuan Yueming, Ma Xu, Jin Hanxue, et al. Study on vacuum chamber fluid field of air suction seed-metering device for rice bud-sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 42 ~ 44. (in Chinese)
 - 6 王朝辉, 袁月明, 马旭, 等. 超级稻育秧精密播种器内部流场的数值模拟[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(6): 781 ~ 784.
Wang Zhaohui, Yuan Yueming, Ma Xu, et al. Numerical simulation for air field of air-suction cylinder seeder[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2009, 31(6): 781 ~ 784. (in Chinese)
 - 7 陈进, 李耀明, 王希强, 等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 59 ~ 62.
Chen Jin, Li Yaoming, Wang Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 59 ~ 62. (in Chinese)
 - 8 廖庆喜, 李继波, 覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 78 ~ 82.
Liao Qingxi, Li Jibo, Qin Guoliang. Simulation analysis on air current field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 78 ~ 82. (in Chinese)
 - 9 庞昌乐, 鄂卓茂, 苏聪英, 等. 气吸双层滚筒水稻播种器设计与实验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 52 ~ 55.
Pang Changle, E Zhuomao, Su Congying, et al. Design and experimental study on air-suction two-laye cylinder rice seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(5): 52 ~ 55. (in Chinese)
 - 10 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 124 ~ 125.
 - 11 吴波, 严宏志, 张静. 渣浆泵三维湍流数值模拟性能预测研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(5): 585 ~ 589.
Wu Bo, Yan Hongzhi, Zhang Jing. Study on 3-D turbulence numerical simulation and performance forecast of slurry pump[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(5): 585 ~ 589. (in Chinese)
 - 12 邓敦夏. 流体流动手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 471.