

高速气送集排器水稻种子损伤规律及发芽试验

李晓冉，廖庆喜^{*}，杜文斌，刘智博，汪晓东，廖宜涛，袁佳诚

(1. 华中农业大学工学院，武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070)

摘要：针对高速播种 ($\geq 12\text{km/h}$) 过程中，水稻种子受气送式集排器的多次压缩和冲击作用易导致种子破损影响发芽率的问题，基于损伤累积理论开展了水稻种子在单次及多次机械压缩作用下损伤规律的研究。首先，开展单次压缩试验，建立了适用于水稻种子的弹塑性模型；进一步，开展多次等位移压缩试验，确定水稻种子在多次压缩作用下产生损伤的临界形变量，并进行种子发芽率试验验证损伤临界形变量的正确性；最后，基于能量守恒定律和种子冲击损伤特性与压缩特性关联模型明确了气送式集排系统高速排种时作业参数匹配范围。水稻种子单次压缩试验结果表明：常规稻和杂交稻种子单次压缩破碎力分别为 (118.4 ± 35.6) 、 $(113.2\pm 39.9)\text{N}$ ，破碎时形变量分别为 (0.59 ± 0.07) 、 $(0.63\pm 0.11)\text{mm}$ ，弹塑性平均临界形变量分别为 0.4 、 0.44mm 。水稻种子多次压缩试验及发芽率验证试验结果表明：杂交稻种子产生损伤的临界形变量为 0.44mm ，当籽粒压缩形变量大于 0.44mm 时，受多次循环压缩后水稻种子的发芽率下降。在气送式集排系统作业参数匹配过程中，应避免水稻种子受载后产生的形变量大于 0.44mm ，经计算，搅种装置转速范围应低于 125r/min 、种子在气流冲击作用下运移速度应低于 8.5m/s 以减少集排器对水稻种子的损伤。本研究可为水稻高速播种时作业参数匹配提供理论依据和参数范围。

关键词：农业机械；水稻；压缩特性；弹塑性模型；气送式集排器；参数匹配

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406072

中图分类号: S223.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0046-10

李晓冉，廖庆喜，杜文斌，等. 高速气送集排器水稻种子损伤规律及发芽试验[J]. 农业工程学报，2024，40(21): 46-55.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406072 <http://www.tcsae.org>

LI Xiaoran, LIAO Qingxi, DU Wenbin, et al. Damage patterns and germination experiments of rice seeds using high-speed air-assisted centralized seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 46-55. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406072 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水稻是国内重要的粮食作物，截至 2022 年，中国水稻种植面积达 $29\,450\text{km}^2$ ，占粮食作物种植面积的 24.89% ，产量达 $20\,849.5\text{万t}$ ，占粮食作物总量的 30.37% ^[1]。为进一步提高水稻直播的效率和品质，水稻机械化播种逐渐向高速方向发展^[2-3]，气送式集排器高速作业时，种子在高速输送气流作用下与输送管道内壁和分配器产生多次冲击碰撞^[4]，此外由于水稻种子流动性不足，集排器工作时需搅种装置辅助充种，种子在充种区多次受搅种装置的压缩作用^[5-7]。当输送气流速度和搅种装置转速过高时，水稻种子多次受气流冲击和搅种装置的压缩作用容易产生损伤，影响种子发芽率。因此开展水稻种子损伤特性的研究，阐明集排器结构对水稻种子的作用机理，明确气送式集排系统作业参数的匹配范围，对减轻高速排种时水稻种子的损伤具有重要意义。

众多学者在种子力学特性方面开展了深入研究。李

心平等^[8]通过有限元法获得玉米种子在不同施力部位压载作用下的微观力学性质，并开展跌落试验，明确了玉米种子冲击破碎机理^[9]。杨作梅等^[10]对谷子进行压缩与摩擦特性试验，研究了谷子的挤压破碎过程，测定了谷子的滑动摩擦系数，并拟合了种子力学性能与含水率的关系方程。张克平等^[11]通过试验获得了小麦种子在不同压缩姿态下的破碎负载、屈服强度和最大形变量，并通过有限元法研究了应力分布规律。李耀明等^[12]分析了水稻种子挤压破碎的过程，以破坏力和破坏能为指标探究了水稻的品种、成熟程度和稻壳对水稻力学特性的影响。在此基础上，王显仁等^[13]研究了不同含水率水稻种子挤压力学性能，并对比分析了水稻谷粒的挤压、剪切和弯曲力学性能。陈树人等^[14]通过 CT 扫描对不同载荷压缩下的稻谷进行扫描和三维模型重构，提出内部损伤定量评价方法。CHU 等^[15]通过冲击试验和 DEM 仿真模拟了水稻冲击脱壳过程，研究了冲击速度和角度对脱壳率和脱壳形态的影响，为稻米加工参数提供依据。以上研究均通过探究种子基础力学特性为结构设计及工作参数匹配提供依据，但研究多聚焦载荷的单次作用，而实际作业过程中种子主要受载荷的多次重复作用，目前鲜见水稻种子在多次载荷作用下损伤规律及对水稻种子发芽率影响的相关研究。

为研究水稻种子在多次载荷作用下的损伤规律，明

收稿日期: 2024-06-12 修订日期: 2024-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2000405)

作者简介: 李晓冉，博士生，研究方向为稻麦油兼用播种技术与装备。

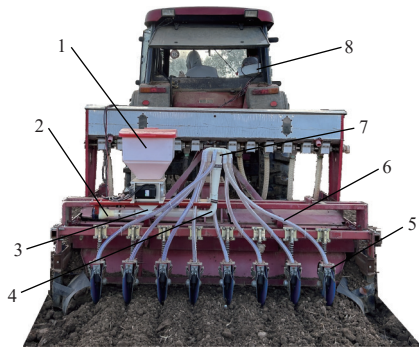
Email: lixiaoran@webmail.hzau.edu.cn

※通信作者: 廖庆喜，教授，博士生导师，研究方向为油菜机械化生产技术与装备。Email: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

确水稻气送式集排器不同结构对水稻种子的作用机理，基于损伤累积理论开展水稻种子力学特性的研究。开展单次压缩试验，构建适用于水稻种子的弹塑性模型；开展多次等位移压缩试验，确定水稻种子多次压缩作用下产生损伤的临界形变量；结合种子发芽率试验，验证损伤临界形变量的正确性；基于能量守恒定律和种子冲击损伤特性与压缩特性关联模型明确气送式集排系统高速排种时作业参数匹配范围。

1 水稻高速气送集排器总体结构及伤种环节分析

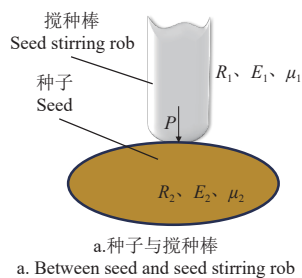
气送式集排系统可满足水稻高速播种的作业要求，其结构组成如图 1 所示，主要由风机、供种装置、混种部件、输送管道、分配装置、导种管、开沟仿形装置及控制系统等 8 个部分组成。



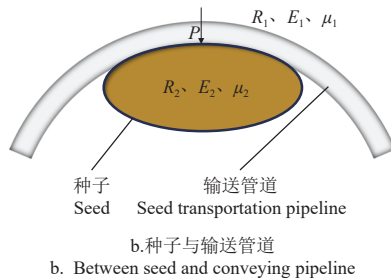
1. 供种装置 2. 风机 3. 混种部件 4. 输送管道 5. 开沟仿形装置 6. 导种管 7. 分配装置 8. 控制系统
1. Seed supply device 2. Blower 3. Seed mixing device 4. Transport pipeline 5. Trenching and profiling device 6. Seed guide pipe 7. Distribution device 8. Control system

图 1 水稻高速气送式集排系统结构组成

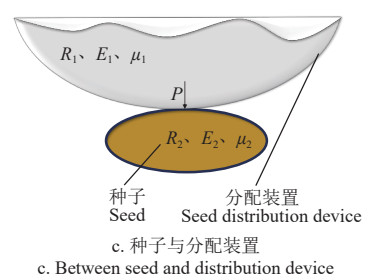
Fig.1 Composition of high-speed air-assisted centralized seed metering system for rice



a. 种子与搅种棒
a. Between seed and seed stirring rod



b. 种子与输送管道
b. Between seed and conveying pipeline



c. 种子与分配装置
c. Between seed and distribution device

注：P 为接触压力，N； R_1 、 R_2 分别为两接触物体的曲率半径，mm； E_1 、 E_2 分别为两接触物体的弹性模量，Pa； μ_1 、 μ_2 分别为两接触物体的泊松比。
Note: P is the contact pressure, N; R_1 and R_2 are the curvature radii of the two contact objects, mm; E_1 and E_2 are the elastic moduli of the two contact objects, Pa; μ_1 and μ_2 are the Poisson's ratios of the two contact objects.

图 3 水稻种子与气送式集排器不同结构接触示意图

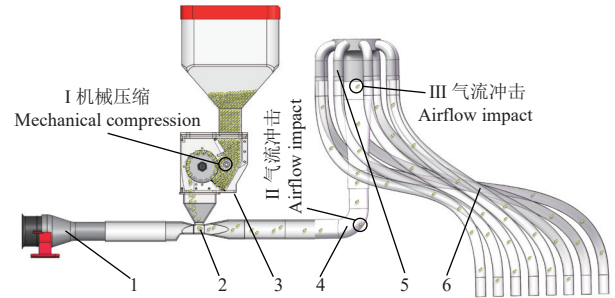
Fig.3 Schematic diagram of contact between rice seeds and different structures of air-assisted centralized seed metering device

2 水稻种子单次机械压缩特性分析与试验

2.1 水稻种子单次机械压缩弹塑性模型构建

当水稻种子近似看作均匀、各向同性的椭球体，假设接触区很小且接触为非共性的^[16-17]，在初始接触点附近水稻种子视为弹性半空间，接触时无面内摩擦且切向面内力为零，水稻种子与搅种棒、输送管道和分配装置的弹性接触力学模型符合 Hertz 理论，但接触形式存在

差异，种子与搅种棒及分配装置接触力学模型示意图如图 4a 所示，种子与输送管道接触示意图如图 4b 所示。



1. 风机 2. 混种部件 3. 供种装置 4. 输送管道 5. 分配装置 6. 导种管
1. Blower 2. Seed mixing device 3. Seed supply device 4. Transport pipeline 5. Distribution device 6. Seed guide pipe

图 2 水稻高速气送式集排系统工作过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the working process for rice high-speed air-assisted centralized seed metering system

高速排种过程中，容易造成种子损伤的主要环节为：在搅种环节，种子受搅种棒的多次压缩作用（图 3a）；在输送环节，种子受高速输送气流作用下与输送管道内壁多次碰撞（图 3b）；在分配环节，种子受气流作用下与分配装置多次碰撞（图 3c）。分析图 3 可知，种子与气送集排器不同结构的接触形式、接触材料和载荷作用形式不同，因此开展水稻种子力学特性研究，明确气送集排器作业参数匹配范围，以减轻高速排种过程中种子损伤。

差异，种子与搅种棒及分配装置接触力学模型示意图如图 4a 所示，种子与输送管道接触示意图如图 4b 所示。

根据 Hertz 理论，搅种棒与种子的接触力 P 与压缩形变量 δ 的关系式^[18] 为

$$P = \frac{4}{3} R_e^{\frac{1}{2}} E^* \delta^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

其中

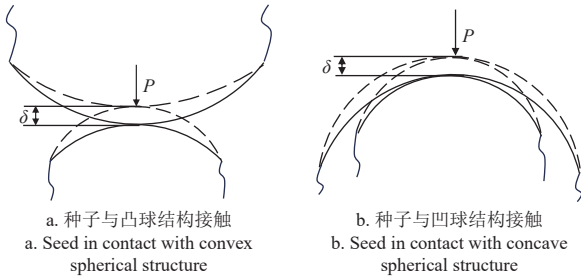
$$\begin{cases} R_e = (R'R'')^{\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 R_e 为等效相对曲率半径, mm; R' 、 R'' 分别为最大、最小等效曲率半径, mm; E^* 为综合弹性模量, MPa。

由于种子与搅种棒、输送管道和分配装置等集排器不同结构的接触形式不同, 等效曲率半径的计算公式存在差异, 如式 (3) 为种子与凸球状结构接触时最大、最小等效半径的计算式。

$$\begin{cases} \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2'} \\ \frac{1}{R''} = \frac{1}{R_1''} + \frac{1}{R_2''} \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_1' 、 R_1'' 为与种子接触的集排器结构的最大、最小接触曲率半径, mm; R_2' 、 R_2'' 为种子的最大、最小接触曲率半径, mm。



注: 图中 δ 为接触形变量, mm。
Note: δ is the shape variable in contact, mm.

图 4 种子与集排器不同结构弹性接触力学模型

Fig.4 Mechanical model of elastic contact between seeds and different structures of centralized seed metering device

当种子与输送管道等凹球状结构接触时, 等效曲率半径的计算式为

$$\begin{cases} \frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1'} - \frac{1}{R_2'} \\ \frac{1}{R''} = \frac{1}{R_1''} - \frac{1}{R_2''} \end{cases} \quad (4)$$

研究表明水稻种子受机械压缩时, 力与形变的关系并非完全符合 Hertz 接触理论, 随着压缩形变量的增大, 水稻种子受机械压缩的实际 P - δ 曲线逐渐偏离 Hertz 弹性接触理论曲线。这是由于随着压缩位移的增加, 水稻种子内部结构发生变化, 使种子发生塑性变形, 因此仅用 Hertz 弹性接触理论无法准确描述水稻种子压缩全过程的力学特性。

弹塑性模型是一种用于描述材料受力时弹性和塑性行为的数学模型, 它结合了材料在小应力下的弹性恢复和在较大应力下发生的不可逆塑性变形^[19-20]。水稻种子在单次机械压缩过程中, 当压缩位移不超过弹塑性变形临界值时, 种子发生弹性变形; 当压缩形变量超过弹塑性变形的临界值时, 籽粒内部结构发生变化, 水稻种子产生塑性强化, 直至籽粒破碎。由式 (1) 可知, P 与 $\delta^{3/2}$ 成线性关系, 可采用弹塑性线性强化数学模型描述水稻种子机械压缩过程中的力与形变之间的关系^[21-22]。因此,

水稻种子单次机械压缩过程中, 压缩力 P 与压缩形变量 δ 之间的数学模型为

$$P = \begin{cases} \frac{4}{3} E^* R_e^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} & 0 < \delta \leq \delta_s \\ P_s + k_s (\delta - \delta_s) & \delta_s < \delta \leq \delta_p \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_s 为水稻种子产生塑性变形的临界压缩力, N; δ_s 为水稻种子弹塑性临界形变量, mm; δ_p 为水稻种子发生破碎时的形变量, mm; k_s 为塑性强化阶段的强化系数, 其大小与籽粒本身力学特性相关, 对一个确定的籽粒 k_s 为固定值。

2.2 水稻种子单次压缩破碎试验材料与方法

2.2.1 单次压缩破碎试验材料

为验证水稻种子弹塑性模型的正确性, 开展单次压缩破碎试验。试验以长江中下游地区广泛种植的常规稻品种“黄华占”和杂交稻品种“荃优 737”为试验材料。试验前, 分别随机选取 25 颗颗粒饱满、无损伤、无霉变的“黄华占”和“荃优 737”水稻种子^[23]。经测定, “黄华占”种子的长、宽、高度尺寸范围分别为 8.87~10.15、2.06~2.51、1.81~2.02 mm, 千粒质量为 22.36 g, 含水率为 10.16%; “荃优 737”种子的长、宽、高度尺寸范围分别为 8.27~10.33、2.43~2.99、2.01~2.20 mm, 千粒质量为 28.40 g, 含水率为 10.03%。

2.2.2 单次压缩破碎试验方法

水稻种子压缩力学特性试验如图 5 所示, 试验仪器为美国 FTC 公司生产的 TMS-PRO 质构仪, 由于水稻种子近似椭球体, 根据 ASAE S368.4 DEC2000(R2017) 标准, 质构仪采用平板压缩工具从种子高度方向进行加载。试验时, 设置接触种子前加载速度为 50 mm/min, 与种子接触压缩时加载速度为 5 mm/min, 加载距离为 1 mm, 触发力为 0.5 N, 完成压缩后返回速度为 50 mm/min^[24]。单次压缩试验以水稻种子破碎时所受载荷和形变量为试验指标。

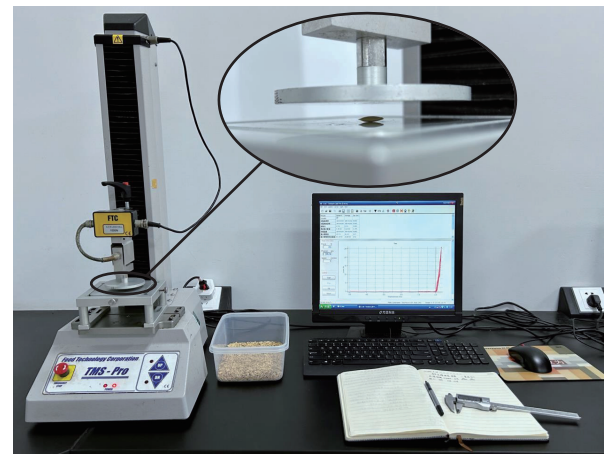


图 5 水稻种子压缩力学特性试验

Fig.5 Experiment of compressive mechanical properties on rice seeds

2.2.3 表观弹性模量测试与计算方法

由于水稻种子形状不规则, 依据 ASAE S368.4 DEC

2000(R2017) 《Compression Test of Food Materials of Convex Shape》标准, 常用表观弹性模量来表征种子抵抗变形的能力。测定表观弹性模量时, 需采用质构仪对种子进行压缩试验, 并提取实际压缩过程中的 $P-\delta$ 曲线计算水稻种子的表观接触弹性模量 E , 公式如下:

$$E = \frac{0.338P(1-\mu_2^2)}{\delta^{\frac{3}{2}}} \times \left[K_U \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{\frac{1}{3}} + K_L \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

式中 R_U 、 R'_U 、 R_L 、 R'_L 分别为上下两接触面与水稻种子接触的最小与最大曲率半径, mm; K_U 、 K_L 为接触系数, 结合 ASAE S368.4 DEC2000(R2017) 标准中提供的 $\cos\theta$ 与 K 的对应表可求出 K_U 、 K_L 。

其中 $\cos\theta$ 为

$$\cos\theta = \frac{\left[\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R'_U} \right]}{\left[\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right]} \quad (7)$$

2.3 水稻种子单次压缩力学特性试验结果分析

水稻种子受单次机械压缩破碎的实际压缩曲线与 Hertz 接触理论曲线对比图如图 6 所示, 由图 6 可知, 实际压缩曲线并非完全符合 Hertz 接触理论曲线, 为明确水稻种子在单次压缩过程中力学特性的变化趋势, 根据水稻种子单次压缩曲线 ($P-\delta$) 并结合式 (6) 绘制了表观弹性模量与压缩位移 ($E-\delta$) 的关系曲线, 如图 7 所示。

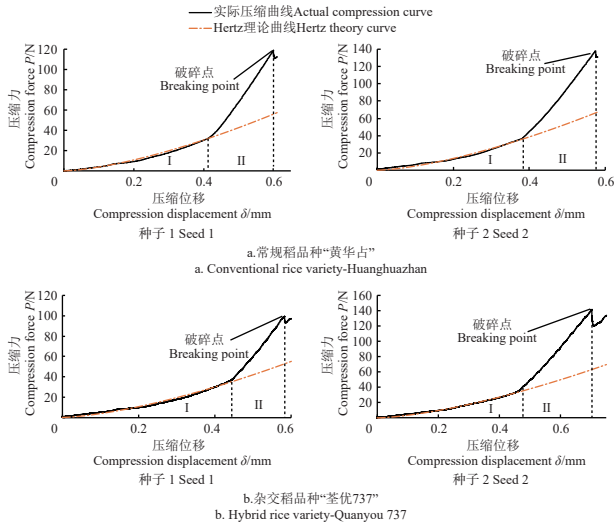


图 6 水稻种子单次压缩试验 $P-\delta$ 曲线

Fig.6 $P-\delta$ curve of single compression test for rice seeds

由图 6 可知, 由于种子个体间存在差异, 不同种子破碎力和破碎形变量存在细微差异, 但水稻种子实际压缩曲线的变化趋势基本一致。在压缩的第 I 阶段, 实际 $P-\delta$ 曲线与 Hertz 理论曲线基本一致, 种子发生弹性变形, 由图 7 可知, 当压缩部件与种子接触稳定后, 随着加载距离的增加, 水稻种子的表观弹性模量逐渐趋于稳定状态, 在该阶段水稻种子可看做弹性体, 当外部载荷卸载后,

水稻种子恢复原始状态; 当水稻种子形变量超过 Hertz 接触曲线与实际压缩曲线交点后, 水稻种子压缩过程进入第 II 阶段, 此时籽粒内部的晶体颗粒发生位错、滑移, 微观组织产生微孔洞、微裂纹, 籽粒产生不可恢复的塑性变形, 由图 7 可知, 在压缩的第 II 阶段, 水稻种子表观弹性模量逐渐增大, 这是由于籽粒在外载荷的挤压作用下内部晶体颗粒变得紧密, 使水稻种子发生塑性强化, 随着载荷继续增大, 籽粒内部组织结构遭到破坏, 微观裂纹和缺陷的扩展、融合导致种子发生破碎^[25-26]。

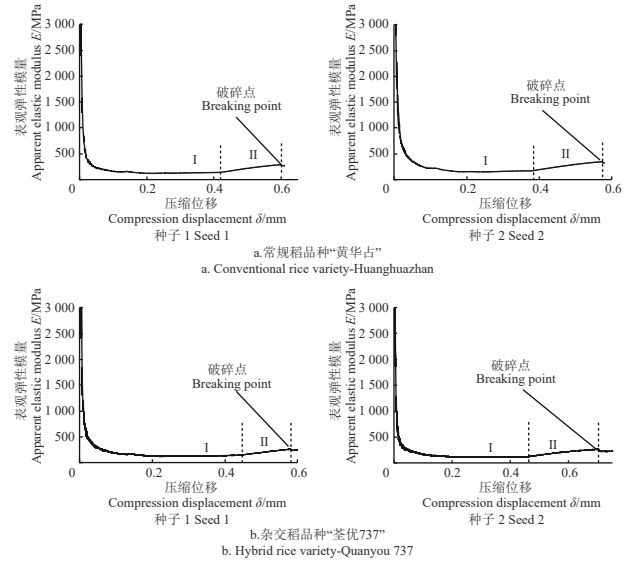


图 7 水稻种子单次压缩试验 $E-\delta$ 曲线

Fig.7 $E-\delta$ curve of single compression test for rice seeds

基于上述分析, 在机械压缩过程中, 水稻种子不能看做均匀的弹性体, 而是弹塑性颗粒物体。在一定压缩范围内, 水稻种子可看做弹性体, 超过一定压缩位移时, 水稻种子发生塑性变形, 总体上近似线性的塑性强化过程。水稻种子压缩过程中, 实际压缩曲线逐渐偏离 Hertz 接触理论曲线的点为水稻种子弹塑性变形的临界点 δ_s 。

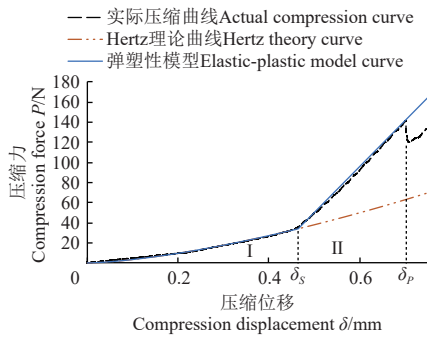
杂交稻和常规稻水稻种子单次压缩试验的统计结果见表 1, 由表 1 可知, 常规稻和杂交稻单次压缩至籽粒破碎的压缩力分别为 (118.4 ± 35.6) 、 (113.2 ± 39.9) N, 单次压缩至籽粒破碎的形变量为 (0.59 ± 0.07) 、 (0.63 ± 0.11) mm, 弹塑性变形的平均临界形变量 δ_s 分别为 0.40、0.44 mm, 弹塑性临界形变量与籽粒高度的比值为 $(21.08 \pm 1.79)\%$ 、 $(22.13 \pm 3.83)\%$, 破碎形变量与籽粒厚度的比值为 $(30.72 \pm 3.49)\%$ 、 $(30.17 \pm 5.40)\%$ 。

为验证本文建立的弹塑性模型的准确性, 如图 8 所示, 绘制了种子实际压缩曲线、Hertz 接触理论曲线及弹塑性模型曲线进行对比。由式 (6) 计算水稻种子在弹塑性变形临界点 δ_s 处对应的表观弹性模量为 E_2 为 1.18×10^8 Pa, 水稻种子泊松比 μ_2 为 0.3, 平板压缩部件为不锈钢材质, 其弹性模量 E_1 为 1.1×10^{11} Pa, 泊松比 μ_1 为 0.25^[22]。水稻种子的弹塑性临界形变量 δ_s 取 0.46 mm, 塑性强化系数为 $k_s = 4.57 \times 10^5$, 将参数带入式 (5) 求得水稻种子单次压缩的弹塑性模型。

表 1 不同品种水稻种子单次压缩试验结果对比
Table 1 Comparison of single compression test results for different kind of rice seeds

项目 Item	黄华占	荃优 737
种子含水率 Seed moisture content/%	10.16	10.03
种子高度 Seed highness/mm	1.92±0.11	2.18±0.17
破碎压缩力 Compression force at breaking/N	118.4±35.6	113.2±39.9
破碎形变量 Deformation at breaking/mm	0.59±0.07	0.63±0.11
弹塑性平均临界形变量 Elastic-plastic mean critical deformation /mm	0.40	0.44
临界形变量/种子高度 Critical deformation/Seed highness/%	21.08±1.79	22.13±3.83
破碎形变量/种子高度 Breaking deformation/Seed highness/%	30.72±3.49	30.17±5.40

由图 8 可知, 当压缩形变量小于弹塑性临界形变量 δ_s 时, 弹塑性模型的曲线与实际压缩曲线及 Hertz 接触理论曲线基本一致, 随着压缩形变量继续增大, Hertz 接触理论曲线逐渐偏离实际压缩曲线, 而弹塑性接触理论模型能够较好的拟合实际压缩曲线, 因此本文建立的弹塑性接触模型可较好的预测水稻种子压缩过程中压缩力与形变量之间的关系。



注: δ_s 为水稻种子弹塑性临界形变量, mm; δ_p 为水稻种子发生破碎时的形变量, mm
Note: δ_s is the critical deformation value for elastic-plastic deformation of rice seeds, mm; δ_p is the deformation value at which rice seeds fracture, mm.

图 8 水稻种子单次压缩 P - δ 曲线对比

Fig. 8 Comparison of single compression P - δ curve of rice seeds

3 水稻种子多次机械压缩特性分析与试验

3.1 水稻种子多次机械压缩损伤累积模型的建立

结合弹塑性模型可知, 当水稻种子接触形变量小于弹塑性变形临界值时, 种子处于完全弹性状态, 不会导致损伤; 当水稻种子在外部载荷作用下产生的形变量超过弹塑性变形临界值后, 种子内部结构发生变化, 产生损伤。为了描述水稻种子机械压缩的损伤特性, 将水稻种子的损伤变量 D 定义为^[18]:

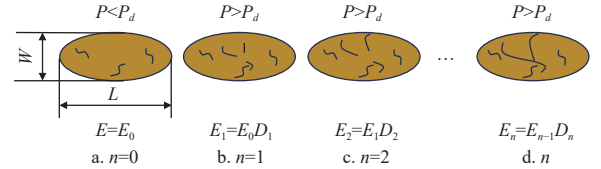
$$D = \left(\frac{\delta - \delta_d}{\delta_p - \delta_d} \right)^\gamma \quad (8)$$

式中 γ 为损伤系数, 其大小与接触物体本身的材料相关; δ_d 为水稻种子发生损伤的临界形变量, mm。

水稻种子的损伤变量随接触形变量的变化而变化, 当接触形变量 $\delta \leq \delta_d$ 时, 水稻种子处于完全弹性状态,

没有损伤发生, 此时 $D=0$; 当水稻种子受载后的接触变形 δ 大于损伤临界形变量 δ_d 时, 损伤产生, 当水稻种子压缩至破碎时 $\delta=\delta_p$, 此时 $D=1$, 定义为完全损伤。

水稻种子受多次压缩作用产生损伤的变化过程示意图如图 9 所示, 水稻种子本身存在微观缺陷, 在机械压缩过程中, 当外部载荷超过损伤临界压缩力后, 水稻种子内部产生裂纹, 在多次机械压缩作用下, 裂纹逐渐扩展、融合, 随着损伤的累积最终导致籽粒破碎。



注: n 为压缩次数; W 为种子宽度, mm; L 为种子长度, mm; P_d 为水稻种子产生损伤的临界压缩力, N; $E_0, E_1, E_2, E_{n-1}, E_n$ 分别为种子第 0、1、2、 $n-1$ 、 n 次压缩后的弹性模量, Pa; D_1, D_2, D_n 分别为种子第 1、2、 n 次压缩后的损伤变量。

Note: n is the number of compressions; W is the seed width, mm; L is the seed length, mm; P_d is the critical compressive force for damage generated to rice seeds, N; $E_0, E_1, E_2, E_{n-1}, E_n$ are the elastic moduli of the seed after 0, 1, 2, $n-1$, and n compressions, respectively, Pa; D_1, D_2, D_n are the damage variables of the seed after 1, 2, and n compressions, respectively.

图 9 水稻种子多次机械压缩损伤变化过程

Fig. 9 Changes in the damage process of rice seed under multiple mechanical compression

种子弹性模量的改变是损伤的外在表现, 因此用综合弹性模量来表示水稻种子损伤变量的公式如下:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}^*}{E^*} \quad \delta \geq \delta_d \quad (9)$$

式中 E^* 为有效综合弹性模量, MPa。

根据损伤变量的定义, 结合 Lemeitre 等效应力假设, 得到机械压缩作用下考虑种子损伤影响的 P - δ 关系方程为:

$$P = \frac{4}{3} \bar{E}^* R_e^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} = \frac{4}{3} E^* (1-D) R_e^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

本文基于损伤累积理论^[27-29] 描述水稻种子受多次机械压缩的损伤变化过程, 采用线性损伤累积准则计算水稻种子多次压缩损伤的累积, 当水稻种子经过 n 次压缩后, 有效综合弹性模量 \bar{E}_n^* 的值为

$$\bar{E}_n^* = E_{n-1}^* (1 - D_{n-1}) = E^* \prod_{i=1}^{n-1} (1 - D_i) \quad (11)$$

式中 E_{n-1}^* 值为水稻种子第 $n-1$ 次压缩后的综合弹性模量, MPa; D_{n-1} 为水稻种子第 $n-1$ 次压缩后的损伤变量。

因此, 水稻种子多次压缩过程中的压缩力 P 与形变量 δ 之间的关系为

$$P = \begin{cases} \frac{4}{3} E^* R_e^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} & \delta \leq \delta_d \\ \frac{4}{3} E^* \prod_{i=1}^{n-1} (1 - D_i) R_e^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} & \delta > \delta_d \end{cases} \quad (12)$$

3.2 水稻种子多次等位移压缩及发芽率试验方法

3.2.1 水稻种子多次等位移压缩试验方法

由单次压缩试验结果可知, 相比常规稻种子, 杂交稻种子更容易产生损伤。为进一步提高气送式集排系统

对水稻品种的适应性,满足不同品种水稻种子兼用需求,多次压缩试验选杂交稻种子为试验材料。试验前,选取 400 颗籽粒饱满、无损伤、无霉变的水稻种子进行多次等位移压缩试验。试验时,对同一颗种子每次压缩固定距离,循环压缩 30 次或至水稻种子破碎,质构仪运行参数设置与单次压缩破碎试验的运行参数一致。考虑到质构仪的精度,多次压缩试验中加载距离分别设置为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mm,根据 ASAE S368.4 DEC2000(R2017) 标准,每组试验需重复 20 次以上,本文每组试验重复 25 次,重复 2 组取平均值作为试验结果。此外,为观察种子由损伤至破碎的变化过程,选取无损伤、无霉变、颗粒饱满的种子并去除外壳进行多次压缩,压缩过程中将试验种子取出放置在透光玻片上,将强光源放置在透光玻片下方,并用遮光板遮住种子周围光源,用数码相机拍摄照片记录种子损伤变化过程,通过对图片进行二值化处理,提取种子裂纹扩展轨迹。

3.2.2 水稻种子发芽率试验方法

由于种子破碎或内部形态损伤会对种子的发育产生影响,为探究多次机械压缩对水稻种子发芽率的影响,依据国家标准 GB/T 3543.4-1995《农作物种子检验规程-发芽率试验》,以多次等位移压缩处理后的水稻种子为试验材料开展发芽率试验。试验前,在培养皿上放置多层吸水纸作为发芽床,并使吸水纸吸满水分。试验时,将多次等位移压缩处理后的水稻种子均匀排布在湿润的发芽床上,粒与粒之间保持一定的距离。将放有种子的培养皿放置在温暖湿润的环境中,每天观察种子发芽情况,于第 5 天统计发芽势,第 14 天统计发芽率并测量每株幼苗的根长,并计算种子活力指数。发芽率试验以发芽势、发芽率和活力指数为指标,计算方法为:

$$\begin{cases} G_v = \frac{M_1}{M} \times 100\% \\ G_p = \frac{M_2}{M} \times 100\% \\ R_v = S \times \sum \frac{G_t}{D_t} \end{cases} \quad (13)$$

式中 G_v 为种子发芽势,%; G_p 为种子发芽率,%; R_v 为活力指数,mm; M_1 为 5 天内正常发芽的种子数量; M_2 为 14 天内正常发芽的种子数量; M 为每组种子数量; G_t 为在时间 t 内的发芽数; D_t 为发芽时间; S 为平均根长,mm。

3.3 水稻种子多次压缩损伤规律分析

3.3.1 水稻种子多次机械压缩损伤变化过程分析

将透光玻片放置在强光源之上,将水稻种子放置在透光玻片上并用遮光板遮住种子周围光源,借助数码相机拍摄记录多次压缩过程中种子由无损伤至完全破碎的变化过程,并将拍摄的照片进行二值化处理得到种子裂纹扩展轨迹,如图 10 所示为压缩位移为 0.5 mm 的多次等位移压缩过程中水稻种子损伤变化过程。

由图 10 可知,当压缩位移超过弹塑性变形临界值后,在连续机械压缩作用下,种子与压缩平板接触处最先产生内部细纹,并向种子长轴和短轴两个方向延伸,随着

压缩次数的增加,裂纹逐渐由内而外扩展至表面可见,随着压缩次数继续增加损伤逐渐累积,裂纹逐渐扩展、融合直至种子完全破碎。

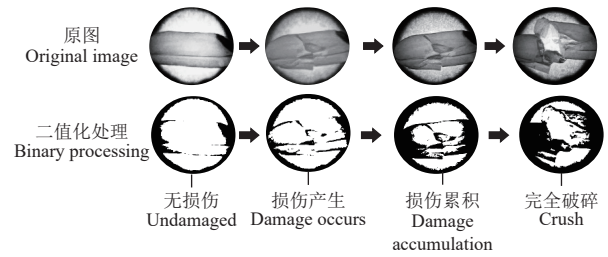


图 10 水稻种子损伤变化过程

Fig.10 Evolution process of rice seed damage

为明确多次等位移压缩作用下,水稻种子力学特性的变化趋势,分别导出水稻种子在 0.3、0.5 mm 等位移压缩试验的第 1、5、10、15、20、25、30 次压缩曲线如图 11 所示。

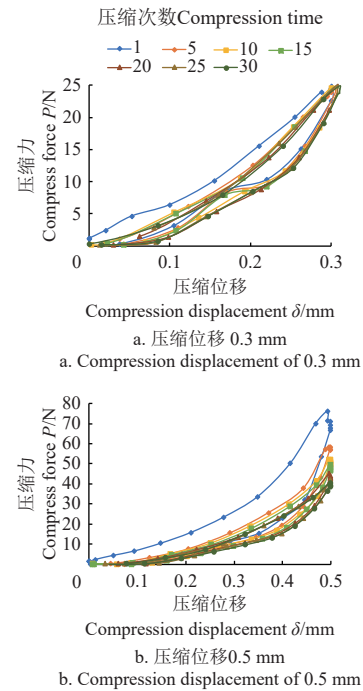


图 11 水稻种子多次等位移压缩试验结果

Fig.11 Test results of multiple equal displacement compression for rice

由图 11a 可知,当压缩位移为 0.3 mm 时,此时种子产生的形变小于种子弹塑性变形临界值,在每次压缩循环过程中种子均发生弹性变形,当外部载荷卸载后,种子逐渐恢复至原始状态,即使压缩 30 次,种子仍未产生损伤,因此在 30 次压缩循环过程中种子受力趋势和最大压缩力基本保持一致。由图 11b 中可知,当压缩位移为 0.5 mm 时,受单次压缩时种子已发生塑性变形,种子内部结构发生变化,随着压缩次数的增加,损伤不断累积,因此种子在 1、5、10、15、20、25、30 次循环压缩过程中,种子最大压缩力依次递减。

3.3.2 多次机械压缩对水稻种子发芽率的影响

为探究多次压缩对水稻种子发育的影响及损伤临界

形变量的正确性,开展受多次等位移压缩处理后的水稻种子的发芽率验证试验,并对各压缩位移下种子的发芽率、发芽势和活力指数进行统计和对比分析,统计结果见图 12。

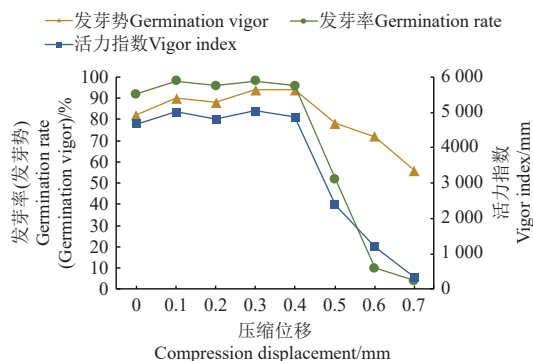


图 12 发芽率试验结果

Fig.12 Results of germination rate experiment

由图 12 可知,当压缩位移小于弹塑性变形的临界值 0.44 mm 时,水稻种子的发芽率、发芽势和活力指数与未经压缩种子相比无明显差异,由此证明,此时种子未产生损伤,多次弹性压缩作用不会对种子发育造成不良影响;当压缩位移大于 0.44 mm 时,种子的发芽率、发芽势和活力指数下降,种子损伤对种子发育造成不良影响。当压缩位移为 0.5 mm 时,单次压缩时部分种子已发生不可恢复塑性变形,随着压缩次数的增加,损伤逐渐累积,多次压缩试验后观察水稻种子形态可知,由于不同种子尺寸存在差异,多次循环压缩后种子会出现无损伤、内部细纹、表面可见裂纹、完全破碎等形态,发芽率试验结果表明,虽部分未完全破碎的种子仍可发芽,但种子活力下降会造成种子成活率降低,30 次压缩后种子的发芽势、发芽率、活力指数相较未经压缩种子明显下降。当压缩位移为 0.6 mm、0.7 mm 时,循环压缩位移接近种子单次压缩破碎距离,单次压缩时大部分种子出现表面可见裂纹或完全破碎,在多次压缩作用下,大部分种子完全破碎,造成发芽率和活力指数急剧下降。因此,杂交稻种子产生损伤的平均临界形变量 δ_d 为 0.44 mm,该值与水稻种子弹塑性变形的临界值 δ_s 一致。

4 水稻高速气送式集排器作业参数匹配及验证试验

在优化匹配高速气送式集排器作业参数时,应尽量避免水稻种子产生损伤影响发芽率。结合前文可知,在集排器作业参数匹配过程中应避免水稻种子受载后产生的形变量大于 0.44 mm。在此基础上,基于能量守恒定律,明确种子受搅种装置压缩作用产生损伤的临界转速,基于冲击损伤特性与压缩损伤特性拟合方程,明确种子与输送管道、分配装置产生冲击损伤的临界相对运动速度,从而为气送式集排器高速作业时搅种转速和输送气流参数匹配提供依据。

4.1 搅种装置参数匹配

基于能量守恒定律,水稻种子受搅种装置压缩产生损伤时,满足:

$$\frac{1}{2}mv_d^2 = \int_0^{\delta_d} Pd\delta = \int_0^{\delta_d} \frac{4}{3}E^*R_e^{\frac{1}{2}}\delta^{\frac{3}{2}}d\delta \quad (14)$$

式中 m 为接触两物体的等效质量, kg; v_d 为搅种时产生损伤的临界速度, m/s。

其中

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (15)$$

式中 m_1 、 m_2 分别为接触两物体的质量, kg。

由式 (14) 可得 v_d 为:

$$v_d = \frac{4\sqrt{15}}{15} \sqrt{E^*R_e^{\frac{1}{2}}\delta_d^{\frac{5}{2}}} \quad (16)$$

经计算水稻种子与搅种装置接触的综合弹性模量 E^* 为 130 MPa, 综合曲率半径 R_e 为 2.79 mm, 结合前文取 δ_d 为 0.44 mm, 将参数带入式 (16) 可得 v_d 为 0.17 m/s。

搅种装置绕搅种轴做旋转运动, 搅种损伤临界转速为

$$n_d = \frac{60v_d}{2\pi r} \quad (17)$$

式中 n_d 为搅种损伤临界转速, r/min; r 为搅种装置转动半径, m。

将 v_d 代入式 (17) 可得种子产生损伤的临界搅种转速 n_d 为 125 r/min。为避免高速排种过程中水稻种子受搅种装置压缩作用产生损伤影响出苗率, 搅种转速应低于 125 r/min。

4.2 输送气流参数匹配

水稻种子冲击损伤特性的研究对水稻高速气送式集排系统输送气流参数匹配具有重要指导意义。已有研究表明, 当外载荷加载速度小于 100 m/s 时, 种子冲击特性与压缩特性之间存在明确关系^[30], 基于冲击损伤特性与压缩损伤特性关联模型, 种子在不同冲击速度下产生冲击损伤的概率满足^[31]:

$$P_c = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{v_c}{E^*M_c^{-0.75}} \right)^{-0.063M_c^2 + 1.633M_c - 5.277}} \quad (18)$$

式中 P_c 为种子冲击损伤概率, %; v_c 为气流冲击作用下种子运移速度, m/s; M_c 为种子含水率, %。

根据《GB/T25418-2022 水稻直播机》要求, 水稻种子破损率 P_c 应低于 0.8%, 结合前文计算水稻种子与输送管道接触时综合弹性模量 E^* 为 132 MPa, 由式 (18) 求得当种子在输送气流冲击作用下的运移速度 v_c 超过 8.5 m/s 时, 有超过 0.8% 的水稻种子产生冲击损伤。为避免排种过程中种子与输送管道内壁等产生冲击损伤影响出苗率, 种子运移速度应低于 8.5 m/s。

4.3 验证试验

4.3.1 台架验证试验

为验证理论分析结果的适用性, 在华中农业大学排种性能试验室开展台架验证试验, 试验台架如图 13a 所示。试验时, 通过控制器调节电机转速和风机输送气流速度从而改变搅种转速和种子运移速度; 试验后, 收集集排器排出的受损伤种子进行观察分析。



图 13 台架验证试验
Fig.13 Bench validation test

通过分析发现, 当搅种转速高于 125 r/min 时, 完全破碎 (图 13b)、局部破损 (图 13c) 的水稻种子比例增加, 这是由于搅种装置多次压缩作用下损伤的累积引起的; 当种子平均运移速度低于 8.5 m/s 时, 观察集排器排出的种子鲜见完全破碎或局部破损种子, 少量种子外壳破口 (图 13d), 但外壳破口不会对种子发芽率造成不良影响。台架验证试验表明, 为避免气送集排器高速排种时损伤种子影响发芽率, 集排器搅种转速和种子运移速度应低于损伤临界值。

4.3.2 田间验证试验

为验证气送集排器田间高速播种的成苗情况, 在华中农业大学荆州市科技试验田 (30°34'N, 112°50'E) 开展水稻田间播种试验。试验前测试土壤坚实度为 132 kPa, 土壤含水率为 50.28%, 播种面积为 0.4 hm², 平均播种速度为 12 km/h, 播种时供种转速为 40 r/min, 搅种转速与供种转速的比例为 1:1^[32], 风机输送气流速度为 20 m/s, 试验情况如图 14a 所示, 水稻成苗情况如图 14b 所示。

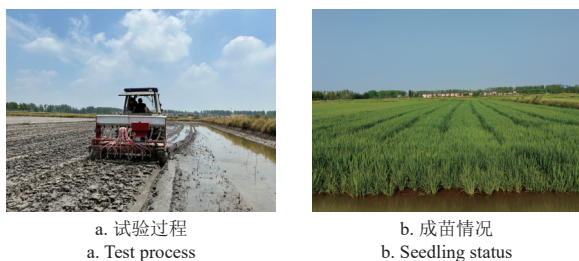


图 14 田间播种试验
Fig.14 Seeding test in the field

经测定水稻实际播量为 61.1 kg/hm², 出苗后在试验区域内随机选取 5 处统计 1 m² 总株数, 水稻平均总株数为 156 株, 总株数变异系数为 8.34%, 田间验证试验结果表明, 当搅种转速低于 125 r/min、种子运移速度低于 8.5 m/s 时, 水稻成苗情况满足气送集排器田间高速作业要求。

5 结 论

1) 基于 Hertz 接触理论, 建立了适用于水稻种子的弹塑性模型, 构建了水稻种子在单次压缩作用下压缩力与压缩形变量 ($P-\delta$) 的关系方程。对比杂交稻和常规稻单次压缩试验结果发现, 杂交稻种子更容易产生损伤, 杂交稻单次压缩最大破碎力为 (113.2±39.9)N, 最大形变量值为 (0.63±0.11)mm, 弹塑性变形的临界平均形变量为 0.44 mm。

2) 通过水稻种子多次等位移压缩试验明确了种子产生损伤的临界形变量并通过发芽率试验进行了验证, 结果表明, 种子产生损伤的临界形变量与种子发生弹塑性变形的临界值一致, 当种子的形变量小于损伤临界形变量时, 多次循环压缩不会对种子的发芽及活力产生不良影响, 在集排器作业参数匹配过程中, 应避免种子受载后变形超过损伤临界形变量。

3) 基于能量守恒定律明确了水稻种子受搅种装置压缩产生损伤的临界转速, 基于种子冲击损伤特性与压缩特性关联模型明确种子冲击损伤临界速度。结果表明, 搅种装置转速范围应低于 125 r/min、种子运移速度应低于 8.5 m/s 以减少高速排种时集排器对水稻种子的损伤。

[参 考 文 献]

- [1] 梁玉玥. 稻麦旱作兼用气吹式精量排种器设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
LIANG Yuyue. Design and Experiment of Air Blowing precision Seed-Metering Device for both Rice and Wheat under Dry Cultivation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote sustainable agricultural development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [3] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王磊, 席日晶, 廖宜涛, 等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62-72, 97.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62-72, 97. (in Chinese with English abstract)
- [5] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10-18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and

- experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(20): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [6] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
CONG Jinling. Study on Seeding System and Mechanism of Pneumatic Precision Metering Device for Wheat&Rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李晚冉, 廖庆喜, 王磊, 等. 稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 35-48.
LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(14): 35-48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李心平, 高连兴, 马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(10): 64-67, 72.
LI Xinping, GAO Lianxing, MA Fuli. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 64-67, 72. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李心平, 马福丽, 高连兴. 玉米种子的跌落式冲击试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 113-116.
LI Xinping, MA Fuli, GAO Lianxing. Dropping impact experiment on corn seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(1): 113-116. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨作梅, 孙静鑫, 郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 253-260.
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(23): 253-260. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张克平, 黄建龙, 杨敏, 等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 352-356.
ZHANG Keping, HUANG Jianlong, YANG Min, et al. Finite element analysis and experimental verification of wheat grain under compression loads[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(6): 352-356. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李耀明, 王显仁, 徐立章, 等. 水稻谷粒的挤压力学性能研究[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(11): 56-59.
LI Yaoming, WANG Xianren, XU Lizhang, et al. Study on compression properties of rice grains[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(11): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王显仁, 师清翔, 倪长安. 水稻谷粒的压弯剪力学性能试验[J]. *农机化研究*, 2012, 34(2): 141-144.
WANG Xianren, SHI Qingxiang, NI Changan. Study on compression, bending and shearing properties of rice grain[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(2): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈树人, 徐李, 尹建军, 等. 基于 Micro-CT 图像处理的稻谷内部损伤定量表征与三维重构[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17): 144-151.
CHEN Shuren, XU Li, YIN Jianjun, et al. Quantitative characterization of grain internal damage and 3D reconstruction based on Micro-CT image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(17): 144-151. (in Chinese with English abstract)
- [15] CHU Y H, HAN Y L, JIA F G, et al. Analysis of the impact hulling behaviour of paddy grains[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 220: 243-257.
- [16] JOHNSON K L 著. 徐秉业, 罗学富译. 接触力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 9-223.
- [17] 徐立章, 李耀明, 丁林峰. 水稻谷粒与脱粒元件碰撞过程的接触力学分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 146-149.
XU Lizhang, LI Yaoming, DING Linfeng. Contacting mechanics analysis during impact process between rice and threshing component[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(6): 146-149. (in Chinese with English abstract)
- [18] 何思明, 廖祖伟, 刘威, 等. 颗粒物质冲击损伤特性研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(23): 100-105.
HE Siming, LIAO Zuwei, LIU Wei, et al. Impact damage of granular material[J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 35(23): 100-105. (in Chinese with English abstract)
- [19] THORNTON C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic perfectly plastic spheres[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1997, 64(2): 383-386.
- [20] 何思明, 吴永, 李新坡. 颗粒弹塑性碰撞理论模型[J]. *工程力学*, 2008, 25(12): 19-24.
HE Siming, WU Rong, LI Xinpo. Theoretical model on elastic-plastic granule impact[J]. *Engineering mechanics*, 2008, 25(12): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [21] LIU X P, SHI Z A, ZHANG Y L, et al. Characteristics of Damage to Brown Rice Kernels under Single and Continuous Mechanical Compression Conditions[J]. *Foods*, 2024, 13: 1069.
- [22] YUAN J C, WAN X Y, LIAO Q X, et al. Mechanical compression characteristics of rapeseed based on continuous damage theory[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 224: 301-312.
- [23] The ASAE Physical Properties of Agricultural Products Committee. ASAE S368.4 DEC 2000(R2017) Compression Test of Food Materials of Convex Shape [S]. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.
- [24] Nicolás-García M, Arzate-Vázquez I, Perea-Flores M J, et al.

- An overview of instrumented indentation technique for the study of micromechanical properties in food: a case study on bean seed coat[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 204(1): 377-385.
- [25] 朱永义, 郭祯祥, 田建珍, 等. 谷物加工工艺及设备[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [26] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [27] TAVARES L M. Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation[J]. *Powder Technology*, 2009, 190(3): 327-339.
- [28] TAVARES L M. Single-particle fracture under impact loading[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1998, 54(1): 1-28.
- [29] 程育仁, 缪龙秀, 侯炳麟. 疲劳强度[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [30] GONG D Z, NADOLSKI S, SUN C B, et al. The effect of strain rate on particle breakage characteristics[J]. *Powder Technology*, 2018, 339: 595-605.
- [31] HAN Y L, ZHAO D, CHU Y H, et al. Breakage behaviour of single rice particles under compression and impact[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(12): 4635-4650.
- [32] 李晓冉, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 52-63.
- LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(4): 52-63. (in Chinese with English abstract)

Damage patterns and germination experiments of rice seeds using high-speed air-assisted centralized seed metering device

LI Xiaoran, LIAO Qingxi^{*}, DU Wenbin, LIU Zhibo, WANG Xiaodong, LIAO Yitao, YUAN Jiacheng

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Multiple compression and impact of the air-assisted centralized seed metering device on rice seeds during high-speed sowing ($\geq 12\text{km/h}$) can easily lead to seed damage and adversely affects the emergence rate. This study aims to explore the damage of rice seeds under single and multiple mechanical compression in the air-assisted centralized seed metering device, according to the damage accumulation theory. The fitting equations of seed impact damage and compression were clarified to determine the matching range of stirring speed and the conveying airflow parameters during high-speed seeding. A systematic analysis was also implemented to explore where the seed was damaged under the repeated compression by the seed mixing device during high-speed seeding. The multiple impacts of airflow were evaluated during transportation and distribution in the air-assisted centralized seed metering device. The single compression test was carried out on the hybrid rice and conventional rice varieties. An elastic-plastic model was constructed suitable for rice seeds, in order to determine the critical value of elastic-plastic deformation. The multiple equal displacement compression tests were then carried out to determine the process of damage to rice seeds under multiple compressions. The critical deformation of rice seeds was determined and verified to combine with the seed germination rate test under multiple compressions. According to the conservation of energy, the critical speed was constructed at which the rice seeds were compressed and damaged by the stirring device. The fitting equation of impact damage and compression was combined to analyze the speed of seed airflow impact damage. The results showed that the crushing forces of conventional and hybrid rice seeds under single compression were $(118.4\pm 35.6)\text{ N}$ and $(113.2\pm 39.9)\text{ N}$, respectively, the deformation during crushing was $(0.59\pm 0.07)\text{ mm}$ and $(0.63\pm 0.11)\text{ mm}$, respectively, and the average critical deformation of elastic plasticity was 0.4 and 0.44 mm, respectively. In multiple compression tests, the maximum compression force of the seeds remained consistent, when the compression distance was less than the elastic-plastic average critical deformation; Once the compression distance was greater than the critical elastoplastic deformation, the maximum compressive force on the seed decreased gradually. Verification tests were also performed on the rice seeds germination rate. There was the a 0.44 mm critical deformation of hybrid rice seeds that caused damage. When the deformation of compressed seeds was less than 0.44 mm, there was no significant difference in the germination rate between compressed and uncompressed seeds after multiple compressions; When the compression deformation of the seeds was greater than 0.44 mm, the germination rate of rice seeds decreased after multiple cycles of compression. Therefore, the deformation of rice seeds after being loaded should be avoided to be greater than 0.44 mm. After that, the rotation speed range of the stirring device should be lower than 125 r/min and the seed transport speed should be lower than 8.5 m/s, in order to reduce the compression and impact damage of the air-assisted centralized seed metering device on rice seeds. This finding can provide a theoretical basis and parameter range to match the operating parameters during rice high-speed sowing.

Keywords: agricultural machinery; rice; compression characteristics; elastic-plastic model; high-speed air-assisted centralized seed metering device; parameter matching