

郑娟,廖宜涛,周启凡,等. 催芽和未催芽状态下西洋参种子的物理机械特性[J]. 江苏农业科学,2020,48(10):256-262.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.10.048

# 催芽和未催芽状态下西洋参种子的物理机械特性

郑娟<sup>1</sup>, 廖宜涛<sup>2</sup>, 周启凡<sup>1</sup>, 王都<sup>1</sup>

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

**摘要:**西洋参是具有特殊治疗价值的贵重补益药品,国内西洋参种植农艺要求窄行距单粒密植,播种仍以人工压穴点播为主,迫切需要研制西洋参单粒精密播种机。西洋参的物理机械特性是进行西洋参精密排种器结构设计与优化的重要参数依据。对催芽和未催芽西洋参种子的基本物理参数、摩擦学特性、压缩力学特性和碰撞恢复系数等物理机械特性参数进行测量和对比分析。结果表明,未催芽种子含水率为13.85%,催芽种子含水率达到45.29%;未催芽种子千粒质量为33.320 g,催芽吸水后千粒质量增加到53.261 g;未催芽种子容重为389.984 g/L,催芽后达到522.650 g/L;西洋参种子为扁D状异形种子,催芽前种子长、宽、厚平均尺寸分别为6.20、4.92、2.91 mm,球度为72.06%,催芽后出现膨胀增大,长、宽、厚平均尺寸分别为6.24、5.04、3.35 mm,球度增加到75.69%;未催芽种子休止角和滑动摩擦角分别为37.63°、33.34°,屈服力为45.535 N,应变平均值为0.277,催芽后因籽粒吸水,种子间和种子表面粘性较未催芽时增加,种皮变软,休止角和滑动摩擦角分别增加至38.45°、36.72°,屈服力降低为29.671 N,应变平均值0.195;西洋参种子催芽前种皮坚硬,且呈闭口状态,测得其与铁板的碰撞恢复系数为0.682;经过浸泡催芽处理后,西洋参种皮纤维结构变软,且种胚膨胀呈裂口状态,导致碰撞时变形量增大,较未催芽西洋参种子碰撞能量损失多,测得其与铁板的碰撞恢复系数为0.206。该研究结果为西洋参精密播种机关键部件的设计与优化提供了相关参数依据。

**关键词:**物理机械特性;测量分析;碰撞恢复系数;西洋参种子;催芽和未催芽

**中图分类号:**S223.2+6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)10-0256-07

西洋参是具有特殊治疗价值的贵重补益药品,种植经济效益显著<sup>[1-2]</sup>。我国西洋参种植面积不断扩大,现已成为世界西洋参第一消费国和第三生产国,国内西洋参种植农艺要求窄行距单粒精密播种,仍以人力压穴点播为主<sup>[3-4]</sup>,为降低生产成本、提高工作效率和播种质量,生产实际中迫切需要适用的精密播种技术与装备。种子是种植机械主要作业对象,其物理机械特性是设计种植机械的重要参数依据<sup>[5]</sup>。

西洋参种子形状不规整,播种前需进行裂口催芽处理,属异形种子,异形种子物理机械特性研究随着适用于异形种子种植机械的需求而增多,Shreekant 等对大豆弹性模量、流变学性质、静压机

械特性等物理机械特性进行了研究<sup>[6-9]</sup>。张勇等进行了绿豆物理机械特性的测量,填补了绿豆重要特性参数研究的空白<sup>[10]</sup>。李雪珍等测量了干、湿、露白3种状态下的杂交水稻播种特性和物理机械特性,为排种器型孔选型、运动形式选择、运动速度设定等提供了理论计算依据<sup>[11]</sup>。崔涛等借助高速摄影技术对玉米种子间及与不同材料间的滚筒摩擦特性进行测量,并将测量的休止角和 EDEM 仿真结果对比验证,为籽粒物理机械特性测量提供了另一种思路方法<sup>[12]</sup>。辛明金等测量了浸泡时间对玉米种子、大蒜种瓣物理机械性质的影响,为相应播种工艺、排种机构形式和参数提供参考<sup>[13-14]</sup>。目前,对参类种子的物理机械特性研究不多,本研究对西洋参种子进行排种器设计相关特性参数测量,以期后期西洋参气力针式精密集排器设计提供相关参数依据。

## 1 材料与仪器

### 1.1 试验材料

试验选用山东文登人工选育的催芽和未催芽西

收稿日期:2019-04-24

基金项目:国家自然科学基金(编号:51975238,51875229);国家重点研发计划(编号:2017YFD0700702)。

作者简介:郑娟(1992—),女,河南周口人,硕士,主要从事现代农业装置设计与测控研究。E-mail:1730217425@qq.com。

通信作者:廖宜涛,博士,副教授,主要从事现代农业装备设计与测控研究。E-mail:liaoetao@mail.hzau.edu.cn。

洋参种子(图1),去除损伤、无籽空壳和其他杂质。



图1 试验西洋参种子

1.2 试验仪器

量程 500 g、精度 0.001 g 的电子天平秤; 500 mL 量筒;精度为 0.02 mm 的数显游标卡尺;常压恒温烘箱;休止角测量装置;自制斜面仪;以色列 KAPRO 开普路 992 电子数显量角器;美国 FTC 公司研制精度为 ±1% 的 TMS - PRO 质构仪;自制碰撞恢复系数测量装置等。

2 结果与分析

2.1 西洋参种子基本物理参数测量

西洋参种子的基本物理机械特性包括种子的形状、尺寸、千粒质量、含水率、容重等,在进行播种机械设计时首先要了解种子的基本物理参数。

2.1.1 形状和尺寸 西洋参种子的形状和尺寸影响其在排种器中的充填性、流动性和接触面直径大小;进行西洋参气力针式集排器设计前需确定西洋参种子的形状及尺寸,种子几何尺寸包括种子长度、宽度、高度,观察西洋参种子形状,呈扁平 D 型,初步确定其三轴方向,从催芽、未催芽种子堆中各随机选取 100 粒西洋参种子,用精度为 0.02 mm 的数显游标卡尺分别测量每粒种子的长度、宽度、高度,并记录数据,对 2 种状态下的西洋参种子三轴尺寸进行统计分析,其尺寸分布概率曲线见图 2。

对种子几何平均宽度、球度等进行计算:

2.1.1.1 种子三轴尺寸

$$\bar{L} = \frac{\sum(L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_{98} + L_{99} + L_{100})}{100}; \quad (1)$$

$$\bar{W} = \frac{\sum(W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_{98} + W_{99} + W_{100})}{100}; \quad (2)$$

$$\bar{H} = \frac{\sum(H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_{98} + H_{99} + H_{100})}{100}. \quad (3)$$

式中: $\bar{L}$ 为西洋参种子长度均值,mm; $\bar{W}$ 为西洋参种子宽度均值,mm; $\bar{H}$ 为西洋参种子厚度均值,mm; $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{98}, L_{99}, L_{100}$ 为 100 粒种子每粒的长度值,mm; $W_1, W_2, W_3, \dots, W_{98}, W_{99}, W_{100}$ 为 100 粒种子每粒的宽度值,mm; $H_1, H_2, H_3, \dots, H_{98}, H_{99}, H_{100}$ 为 100 粒种子每粒的厚度值,mm。

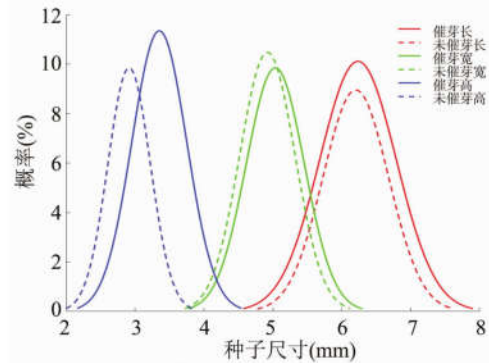


图2 西洋参种子三轴尺寸概率密度曲线

2.1.1.2 种子几何平均宽度 由 Mohsenin 公式可知<sup>[15]</sup>,几何平均宽度由下式计算:

$$D = \sqrt[3]{LWH}. \quad (4)$$

式中: $D$ 为种子几何平均宽度,mm。

2.1.1.3 球度 球度体现了种子实际形状与球体之间差异程度的大小,可用来判断种子形状是否规整,计算公式如下:

$$S_p = \frac{D}{L} \times 100\%. \quad (5)$$

式中: $S_p$ 为球度,%。

计算可得种子形状和尺寸值分布见表 1。

从图 2 可知,催芽、未催芽西洋参种子的几何分布符合正态分布曲线;从表 1 可以看出,西洋参种子在催芽、未催芽状态下种子形状略有差异,催芽西洋参种子三轴尺寸平均值为 6.24 mm × 5.04 mm × 3.35 mm,几何平均宽度为 4.72 mm,球度为 75.69%,略大于未催芽西洋参种子三轴尺寸平均值 6.20 mm × 4.92 mm × 2.91 mm,几何平均宽度 4.47 mm,球度 72.06%,厚度变化明显;原因是西洋参种子经催芽处理后含水量大,胚芽发育冲破种皮呈破裂状态。种子经催芽处理后三轴尺寸变异系数较未催芽处理时大,球度较小,种子形状极不规则,由催芽处理后种子胚芽发育不一致,种壳破裂位置不定引起。

根据以上计算可知,若采用气吸式排种器,吸

表1 催芽、未催芽西洋参种子几何尺寸比较

参数	催芽			未催芽		
	长	宽	高	长	宽	高
均值(mm)	6.24	5.04	3.35	6.20	4.92	2.91
标准差(mm)	0.556	0.421	0.397	0.477	0.400	0.308
变异系数(%)	8.920	8.363	11.854	7.686	8.125	10.566

种型孔由以下公式计算:

$$d = kD。 \quad (6)$$

式中: $d$ 为吸种型孔直径,mm; $k$ 为系数,取0.64~0.66。

计算可得,气吸式排种器吸种型孔 $d$ 取值范围为3.02~3.11 mm。

西洋参种子为扁平状,若采用勺夹式排种器,保证夹种可靠的同时兼顾合格优先,避免漏重播,种夹长度、宽度取值需满足:

$$\begin{cases} \bar{L} \leq L \leq \bar{W} + \frac{1}{2}\bar{W} \\ \frac{1}{2}\bar{W} \leq W \leq \bar{W} \end{cases}。 \quad (7)$$

式中: $L$ 为种夹的长度,mm; $W$ 为种夹的宽度,mm。

计算可得,勺夹式排种器种夹长 $L$ 取值范围为6.24~7.56 mm,宽 $W$ 取值为2.52~5.04 mm。

若采用窝眼轮式排种器,西洋参播种时要求单粒精密点播,则其型孔直径 $d_1$ 和型孔深度 $h$ 根据种子的最大尺寸而定,需满足:

$$\begin{aligned} d_1 &= l_{\max} + (0.5 \sim 1.0); \\ h &= l_{\max} - (0.5 \sim 1.0)。 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $d_1$ 为型孔直径,mm; $h$ 为种夹的宽度,mm; $l_{\max}$ 为催芽西洋参种子的最大尺寸。

计算可得,窝眼轮式排种器的型孔直径 $d_1$ 取值为6.74~7.24 mm,型孔深度 $h$ 取值为5.74~5.74 mm。

2.1.2 含水率 西洋参种子含水率是检验种子质量的重要指标之一,种子水分测定方法有烘干减重法、化学法和蒸馏法等<sup>[16]</sup>。本研究采用常压恒温烘干法进行含水率测定,试验参照国标 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》标准规定的方法,取试验用催芽、未催芽西洋参种子各500粒,分别平分为5组试验样品,测其烘干前质量 $m_1$ ,将试验样品放入常压恒温烘箱中,在(103±2)℃温度下烘15 h至质量不再发生变化,将试验样品取出冷却至室温后测量其质量 $m_2$ ,计算公式

如下:

$$M_w = \frac{m_1 - m_2}{m_1}。 \quad (9)$$

式中: $M_w$ 为种子含水率,%; $m_1$ 为西洋参种子烘干前质量,g; $m_2$ 为西洋参种子所含干物质的质量,g。

计算可得催芽西洋参种子含水率为45.29%,未催芽西洋参种子含水率为13.85%。经催芽处理后西洋参种子含水率高,不易储存,易感染病原菌,且催芽种子易继续生长发芽,种子间和种子与充种室、排种针间的黏附力较未催芽西洋参种子大,会降低排种器排种精度,种子含水率过低时,又会影响种子的生理活性,因此进行西洋参播种作业时需严格控制其催芽种子的含水率,尽量缩短播种作业时间。

2.1.3 千粒质量 西洋参种子千粒质量指1 000粒无杂质、无损伤、颗粒饱满西洋参种子的绝对质量,受种子的品质、含水量、形状特征等因素影响<sup>[17]</sup>,千粒质量大小对排种器吸种、携种顺利进行所需吸附力和投种过程种子的运动趋势和轨迹影响较大。随机取去除杂质、空壳等的催芽、未催芽西洋参种子各1 000粒,用量程为500 g,精度为0.001 g的华中农业大学实验室电子天平称测量其质量,试验重复5次,取平均值为其千粒质量值,测得催芽种子千粒质量为53.261 g,未催芽种子千粒质量为33.320 g。

2.1.4 容重 种子的容重指单位体积(包括籽粒间的孔隙)种子的质量,西洋参种子的容重对西洋参气力针式精密集排器的种箱和充种室结构大小设计有很重要的参考价值,容重值受种子形状大小、堆积或充填方式和含水率等影响。试验前测量量筒质量 $\rho_a$ ,取催芽、未催芽西洋参种子若干分别装至量筒中,轻微给予振动,使种子平面与量筒500 mL刻度线处重合,称量量筒与种子总质量 $\rho_b$ ,试验重复5次,计算公式为:

$$\rho = \frac{\rho_b - \rho_a}{500} \times 1\,000。 \quad (10)$$

式中: $\rho$ 为容重, g/L; $\rho_b$ 为量筒和西洋参总质量, g; $\rho_a$ 为量筒质量, g。

将5次试验测量所得数值代入计算可得, 催芽西洋参种子的容重为522.650 g/L, 未催芽西洋参种子容重为389.984 g/L, 西洋参种子经催芽处理后, 吸水膨胀且质量增大, 容重较未催芽西洋参种子大。

## 2.2 种子摩擦学特性参数测量

散粒物料由于其具有的内摩擦特性等摩擦学行为而呈现粮仓效应、自组织临界效应等, 研究西洋参种子的摩擦学特性, 为西洋参气力针式精量集排器关键部件种箱、充种室、充种室隔板等设计提供参数依据, 同时也分析其对吸种和投种过程的影响, 对反映种子间内摩擦性质的休止角和反映种子与接触固体表面间摩擦性质的滑动摩擦角进行测量<sup>[18]</sup>。

2.2.1 自然休止角测量 采用注入法<sup>[5]</sup>进行休止角测定, 试验采用的休止角测量装置是根据 GB/T 11986—1989《表面活性剂 粉体和颗粒休止角的测量》标准规定制作, 测定原理示意图3-a、

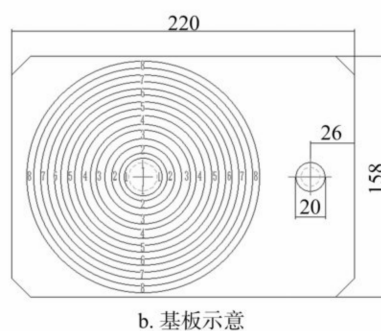
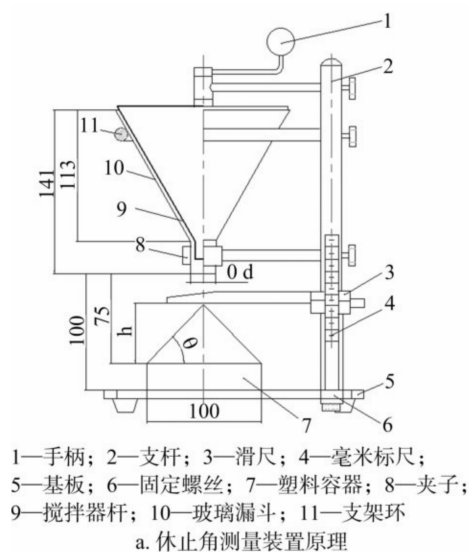


图3 颗粒休止角测量原理示意及实物

2.2.3 滑动摩擦角测量 采用自制斜面仪对滑动摩擦角进行测定, 原理见图4。试验结果表明, 催芽西洋参种子与钢板的滑动摩擦角为36.72°, 略高于未催芽西洋参种子与钢板的滑动摩擦角33.34°, 原因是西洋参种子经催芽处理后含水率变大, 种皮表面存在水分, 黏附作用增加, 使摩擦力增大。

## 2.3 种子压缩力学特性

西洋参种子的压缩力学特性反映了种子受力状态, 为排种器充种室隔板间距设计与种子破碎受力情况等研究提供理论依据; 试验采用美国 FTC 公

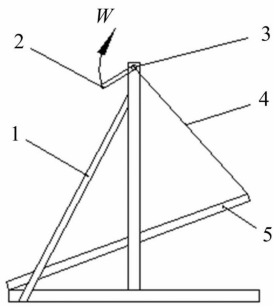
司研制的检测精度为 $\pm 1\%$ , 最大检测力为1 000 N, 数据收集频率为1 000 Hz的TMS-PRO质构仪和精度为0.02 mm的电子数显游标卡尺。

西洋参种子休止角可表示为:

$$\psi = \text{Arctan} \frac{2h}{100} \quad (11)$$

式中: $h$ 为西洋参种子的锥形高度, mm; $\psi$ 为颗粒休止角, °。

测定结果表明, 催芽、未催芽西洋参种子休止角为38.45°、37.63°, 进行排种器结构设计时需考虑种子的流动性, 查阅资料可知西洋参休止角大于油菜、小麦作物种子休止角(分别为27.1°、29.6°), 其流动性较差。结合散粒体力学理论, 为保证吸种可靠性, 针对西洋参等流动性较差的种子, 需采用辅助供种装置或针式吸嘴来保证排种效果<sup>[19-20]</sup>。



1—撑杆；2—手柄；3—绕旋轴；4—绳索；5—斜面  
图4 滑动摩擦角测量原理

起始力为 0.5 N, 催芽西洋参种子测试最大距离设为 1.8 mm, 未催芽西洋参种子最大测试距离设为 1.6 mm, 均为所选西洋参种子厚度的 50% ~ 60%, 可完整体现西洋参种子受挤压力作用宏观破裂的过程。典型催芽、未催芽种子 2 种变化趋势见图 5、图 6。因种子强度由能引起种子外伤、降低种子发芽率的载荷而不是由极限载荷或破坏载荷决定, 因此对所选催芽、未催芽各 10 粒种子受挤压后开始破裂(即出现第 1 个破裂点)时的屈服强度进行统计分析(表 2)。

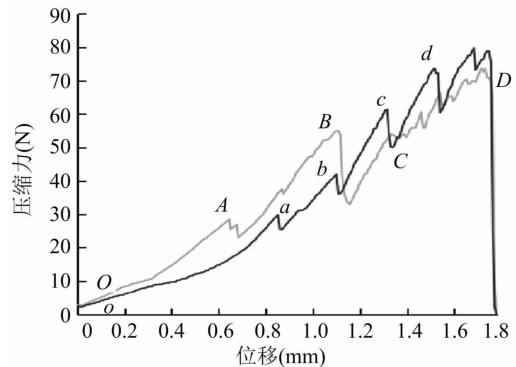


图5 典型催芽西洋参种子压缩力-位移曲线

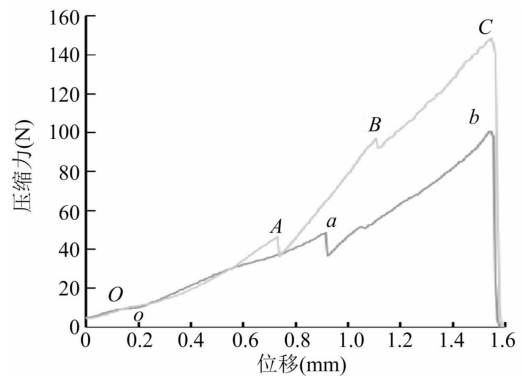


图6 典型未催芽西洋参种子压缩力-位移曲线

表 2 催芽、未催芽西洋参种子压缩受力

项目	催芽				未催芽			
	厚度(mm)	屈服位移(mm)	屈服力(N)	应变(mm)	厚度(mm)	屈服位移(mm)	屈服力(N)	应变(mm)
最小值	3.310	0.603	17.481	0.168	2.910	0.670	34.660	0.201
最大值	3.730	0.908	38.096	0.244	3.340	1.053	58.711	0.357
平均值	3.554	0.694	29.671	0.195	3.039	0.837	45.535	0.277
标准差	0.139	0.109	6.738	0.026	0.129	0.137	0.429	0.050
变异系数	3.920%	15.724%	22.709%	13.452%	4.235%	16.391%	18.510%	18.246%

从图 5 可以看出, 催芽西洋参种子压缩力 - 位移曲线可大致分为 OD 和 od 段, 结合压缩试验观察得知, 催芽西洋参种子在 OA 段时随着压缩力的增加, 芽种变形量不断增加, OA 段变形主要以种子厚度方向的种皮发生裂纹为主, A、a 点为种皮屈服点, 从 A、a 点种皮开始断裂, 所受压缩力骤降, 曲线呈下降趋势, AB、ab 段为种皮屈服段, 到 B、b 点后出现 2 种情况: (1) 种胚达到屈服点破裂, 种芽骤然被挤出, 曲线呈大幅下降趋势, 接着发生蠕动性挤出, 见图 5BD 段; (2) 种胚在所受压缩力不断增大后破裂, 胚芽被挤出, 但是种子未被压实, 所以种皮裂纹增大, 胚芽从增大的裂口中不断挤出, 见图 5bd 段。

从图 6 可以看出, 未催芽西洋参种子压缩力 - 位移曲线大致分为 ob 和 OC 段, 在 oa 下半段西洋参

种子开始产生裂纹, 随着压缩力变大, 种子变形量逐渐增大, a 点种皮开始破裂, 曲线大幅度下降, 图 6ab 段为屈服段, 种子开始破裂, 形变量变小, 被压实; 图 6OA、图 6AB 段与图 6oa、图 6ab 相似, 在 b 点种皮二次断裂, 出现较大裂缝, 曲线出现第 2 次下降趋势, bc 段种子被压实, 形变量变小。

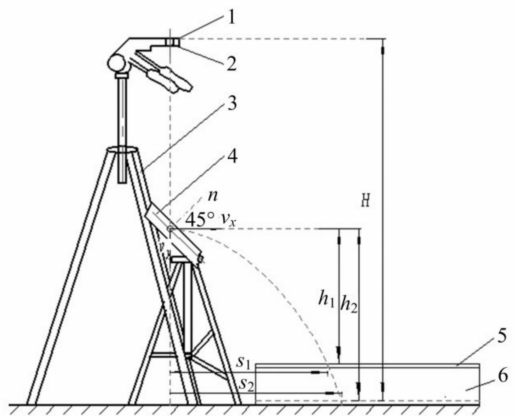
从表 2 可以看出, 经催芽处理的西洋参种子屈服力平均值为 29.671 N, 较未催芽西洋参种子屈服力平均值(45.535 N)小, 因此, 在设计充种装置、排种针型孔参数、排种转速等时, 应保证催芽西洋参种子所受载荷小于 29.671 N; 催芽西洋参种子受挤压时到达屈服点时的应变平均值为 0.195, 低于未催芽种子达到屈服点时应变平均值(0.277), 试验结果可知, 西洋参种子经催芽处理后呈裂口状态,

种胚外漏,厚度较未催芽种子增大,受挤压时种皮破裂后种胚受力增加出现裂纹直至破裂芽种被挤出,所以压缩力位移曲线中出现较多下降曲线段,而未催芽西洋参种子闭口,且种皮坚硬,种皮破裂所需屈服力较催芽西洋参种子大,屈服应变相对较大,同时结合催芽、未催芽种子屈服力和应变平均值变异系数可知,种子个体差异对其受力破碎影响较大,催芽西洋参种子易破碎,且种子形状大小不一,相较对种子形状要求较高的窝眼轮、勺夹等机

械式排种器,气力式排种器更适用于西洋参排种。

### 2.4 种子碰撞恢复系数测量

播种时西洋参种子在充种室内和投种过程中会发生各种形式的碰撞,为探明催芽、未催芽西洋参种子发生碰撞后的形变恢复能力和能量损失大小,进行西洋参种子的碰撞恢复研究很有必要,本研究基于运动学方程原理设计搭建了恢复系数测量装置(图7)。



1—投料基准面; 2— $\Phi 20$  mm 投料孔; 3—高度可调相机三脚架; 4—斜面; 5—物料收集细沙盘; 6—垫高板  
a. 恢复系数测量原理示意



b. 恢复系数测定装置

图7 恢复系数测量原理示意及实物

从催芽西洋参种子堆中挑选形状大小近似的种子 30 粒,试验时将种子从具有一定高度  $H$  的投料孔投下,自由落体后与倾角为  $45^\circ$  的斜面发生碰撞,碰撞后反弹改变运行轨迹做抛物线运动,最后落在垫高后距离地面为 100 mm 的平整沙盘中,测量种子运动水平距离  $s_1$  和种子在斜面上的碰撞点到沙盘面的垂直距离  $h_1$ ,测量点为种子掉落点聚集性较好部分 ( $>90\%$ ) 的中心位置<sup>[22-23]</sup>,为得到抛物线的运动轨迹,将垫高盒去掉使沙盘放置在地面上,再挑选形状大小近似的催芽西洋参种子 30 粒按照上述操作进行试验,得到  $s_2$ 、 $h_2$ 。相关运动学公式如下:

种子进行自由落体运动距离:

$$H' = H - h_2 \quad (12)$$

种子碰撞前瞬时速度:

$$V_0 = \sqrt{2gH'} \quad (13)$$

种子碰撞后将速度分解为水平分速度  $v_x$  和竖直分速度  $v_y$ ,若测量得到水平距离  $s$  和竖直位移  $h$ ,则:

$$\begin{cases} s = v_x t \\ h = v_y t + \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (14)$$

将测量所得  $s_1$  和  $h_1$ 、 $s_2$  和  $h_2$  代入上式,可得:

$$\begin{cases} v_x = \sqrt{\frac{gs_1s_2(s_1 - s_2)}{2(h_1s_2 - h_2s_1)}} \\ v_y = \frac{h_1v_x}{s_1} - \frac{gs_1}{2v_x} \end{cases} \quad (15)$$

种子发生碰撞后种子速度可表示为:

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (16)$$

碰撞恢复系数  $C_r$  可由下式算出:

$$C_r = \frac{v_{xy} \cos \left[ 45^\circ + \arctan \left( \frac{v_y}{v_x} \right) \right]}{v_0 \sin 45^\circ} \quad (17)$$

式中: $H$  为投料孔距放置在地面的沙盘面高度, m;  $H'$  为种子自由落体运动距离, m;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $h_1$  为种子碰撞点距垫高后沙盘面垂直高度,取 0.46 m;  $h_2$  为种子碰撞点距放置在地面的沙盘面垂直高度,取 0.55 m;  $s_1$  为种子散落点距垫高

后沙盘面水平距离,  $m$ ;  $s_2$  为种子散落点距放置在地面的沙盘面水平距离,  $m$ ;  $v_0$  为种子碰撞前瞬时速度,  $m/s$ ;  $v_x$  为碰撞后种子水平分速度,  $m/s$ ;  $v_y$  为碰撞后种子竖直分速度,  $m/s$ ;  $v_{xy}$  为碰撞后种子速度,  $m/s$ ;  $C_r$  为碰撞恢复系数。

计算可得, 催芽西洋参种子在试验条件下与铁板的碰撞恢复系数为 0.206, 小于未催芽西洋参种子相同条件下的碰撞恢复系数(0.682), 原因是西洋参种子催芽前种皮坚硬, 且呈闭口状态, 经过浸泡催芽处理后, 西洋参种皮纤维结构变软, 且种胚膨胀呈裂口状态, 导致碰撞时变形量增大, 较未催芽西洋参种子碰撞能量损失多, 弹性恢复能力较弱, 因此进行投种和入土装置设计时, 应尽量避免碰撞现象发生, 并降低投种高度。

### 3 结论

以催芽、未催芽西洋参种子为研究对象, 对影响西洋参播种的物理机械特性进行了研究, 研究结果表明, 催芽西洋参种子的三轴尺寸为  $6.24 \text{ mm} \times 5.04 \text{ mm} \times 3.35 \text{ mm}$ , 几何平均宽度为  $4.72 \text{ mm}$ , 球度为 75.69%, 略大于未催芽西洋参种子三轴尺寸平均值  $6.20 \text{ mm} \times 4.92 \text{ mm} \times 2.91 \text{ mm}$ , 几何平均宽度  $4.47 \text{ mm}$ , 球度 72.06%, 且厚度变化明显; 催芽西洋参种子含水率为 45.29%, 千粒质量为 53.261 g, 容重为 522.650 g/L; 未催芽西洋参种子含水率为 13.85%, 千粒质量为 33.320 g, 容重为 389.984 g/L。

催芽处理后的西洋参种子含水率较高, 其种子间和种子表面粘附性较未催芽时增加, 摩擦力增大, 流动性差, 其自然休止角为 38.450, 滑动摩擦角为 36.720, 大于未催芽西洋参种子的自然休止角 37.630, 滑动摩擦角 33.340。

催芽、未催芽西洋参种子的压缩力学特性和碰撞恢复系数测量可知, 催芽西洋参种子屈服力平均值为 29.671 N, 未催芽西洋参种子屈服力平均值为 45.535 N, 因此在设计充种装置、排种针型孔参数、排种转速等时, 应保证催芽西洋参种子所承载荷小于 29.671 N; 且催芽西洋参种子受挤压到达屈服点时的应变平均值为 0.195, 低于未催芽种子达到屈服点时应变平均值(0.277)。由催芽、未催芽西洋参种子的碰撞恢复系数测量可知, 催芽西洋参种子与铁板的碰撞恢复系数为 0.206, 小于未催芽西洋参种子相同条件下的碰撞恢复系数(0.682)。

### 参考文献:

- [1] 孙黎明, 李方杰, 刘静, 等. 文登西洋参应用以及种植技术方面的研究[J]. 特种经济动植物, 2015, 18(9): 38-39.
- [2] 郑爽, 于明坤, 石文静, 等. 山东省威海文登地区西洋参种植产业概况及发展对策[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 247-248, 254.
- [3] 黄顺之, 于志霞, 鞠在华, 等. 西洋参标准化栽培技术[J]. 中国农技推广, 2009, 25(6): 26-28.
- [4] 陈萍, 权宜淑, 梁俊. 人参与西洋参研究进展[J]. 基层中药杂志, 2000, 14(1): 58-61.
- [5] 周祖镔. 农业物料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [6] Shreekant R P, Rameshwar T K, Digvir S J, et al. Mechanical damage to soybean seed during processing[J]. Stored Products Research, 2002, 38(4): 385-394.
- [7] Fernando S, Mesquita C. Soybean threshing mechanism development and testing[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 599-605.
- [8] 刘志云, 温吉华. 大豆弹性模量的测量与研究[J]. 粮食储藏, 2010(3): 27-30.
- [9] 高连兴, 焦维鹏, 杨德旭, 等. 含水率对大豆静压机械特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 40-44.
- [10] 张勇, 刘飞, 赵满全. 绿豆物理机械特性参数的试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 119-124.
- [11] 李雪珍, 李波勇. 杂交水稻种子物料特性的实验研究[J]. 农机化研究, 2004(1): 180-181.
- [12] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41.
- [13] 辛明金, 宋玉秋, 白晓虎, 等. 玉米流体穴播种子物理机械特性研究[J]. 中国农机化, 2011(4): 45-47, 37.
- [14] 宋玉秋, 路春泽, 辛明金, 等. 浸泡对大蒜种瓣物理机械特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(4): 436-440.
- [15] 刘明国, 曹磊. 花生基本物理特性试验研究[J]. 农业科技与装备, 2011(6): 70-73.
- [16] 李淑娴, 高莹莹, 李运红, 等. 种子含水量的测定方法及展望[J]. 种子, 2010, 29(10): 57-59, 61.
- [17] 张桂花, 汤楚宙, 熊远福, 等. 包衣稻种物理特性的测定及其应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(1): 68-70.
- [18] 杨文伟, 缙海啸, 胡斌, 等. 番茄种子的物料特性研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 92-94, 111.
- [19] 刘晓蛟, 尚书旗, 王东伟, 等. 气力式西洋参排种装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 213-217.
- [20] 廖宜涛, 郑娟, 廖庆喜, 等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 46-57.
- [21] 胡梦杰, 周勇, 汤智超, 等. 脱绒包衣棉花种子的力学特性[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(1): 175-180.
- [22] 黄小毛, 查显涛, 潘海兵, 等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 22-29.
- [23] Yang L, Yang M J, Li Q D, et al. Experimental study on physical properties of coated rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 7-11.