文章编号:1000-7601(2022)04-0272-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.04.31

牧草种子基础物理和接触力学参数的确定

孙步功,陈贰浩,石林榕

(甘肃农业大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘　要:通过试验和仿真相结合的方法确定 6 种常见牧草种子(白三叶、大田百脉根、红三叶、扁蓿豆、苜蓿和红豆草)的基本物理(种皮厚度、种子密度、千粒重)和接触力学参数(静摩擦系数和动摩擦系数),为牧草种子破眠机的研制提供基础理论数据。试验测定 6 种牧草种子密度分别为 1.082、1.212、1.210、1.246、1.302、0.658 g · mL^{-1},千粒重分别为 0.581、1.254、1.252、1.508、2.074、28.556 g。通过斜面法测定牧草与钢之间的静摩擦系数分别为 0.406、0.425、0.513、0.547、0.494、0.472,与玻璃之间的静摩擦系数分别为 0.386、0.397、0.489、0.514、0.473、0.703。基于 EDEM 仿真,标定出牧草种子之间的滚动摩擦系数分别为 0.451、0.302、0.502、0.360、0.250 和 0.410。

关键词:牧草种子;基础物理参数;接触力学参数;标定

中图分类号:S541　　**文献标志码**:A

Calibration of basic physical characteristics and contact mechanical parameters of forage seeds

SUN Bugong, CHEN Erhao, SHI Linrong

(*School of Mechanical and Electrical Engineering of Gansu Agriculture University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: This study used combined method of experiment and simulation to measure the six common grass seeds' (white clover, datian baimai root, red clover, lentils, alfalfa and sainfoin) basic physics (seed coat thickness, the density of seeds, grains) and contact mechanics parameters (static friction coefficient and friction coefficient). Then the data were used to develop the grass seed broken sleep machine. The seed densities of the six herbage species were 1.082, 1.212, 1.210, 1.246, 1.302 and 0.658 g · mL^{-1}, respectively, and the 1000-seed weights were 0.581, 1.254, 1.252, 1.508, 2.074 and 28.556 g, respectively. The static friction coefficients between grass and steel were 0.406, 0.425, 0.513, 0.547, 0.494, 0.472, and those between grass and glass were 0.386, 0.397, 0.489, 0.514, 0.473, 0.703, respectively. Based on EDEM simulation, the rolling friction coefficients between forage seeds were 0.451,0.302,0.502,0.360,0.250 and 0.410, respectively.

Keywords: herbage seeds; basic physical parameters; contact mechanical parameters; calibration

种子在长期的演化过程中为适应周围环境的变化,多数种子选择休眠。处于休眠状态下的种子新陈代谢缓慢,农业上在播种之前对种子进行破眠处理,促进种子的萌发。种子破眠的方法大体可分为物理、化学和生物破眠三类。了解种子发育成熟过程中休眠性的变化,有利于及时采集种子和播种前处理种子。

早在 1946 年,Johnson 对美洲椴种子进行了预浸泡、硫酸酸化、种皮划伤、层积 4 种方法破眠处理,后来研究者采用硫脲浸泡、射线、变温、酒精浸泡等方式对休眠种子处理,均达到可观效果[1-4];国内对种子的破眠处理已展开了基础性研究,可以通过物理、化学或者生物的方法对其破眠处理,解除种子的休眠状态。其中,物理方法常选用高温、低

收稿日期:2021-08-04　　**修回日期**:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金(51965002);甘肃省重点研发计划项目(20YF8NA134);甘肃省高校大学生就业创业能力提升工程项目(CXCYTS2020004);甘肃省教育厅创新创业教育改革项目(CXCYJG2020004)

作者简介:孙步功(1971-),男,甘肃通渭人,教授,研究方向为旱作农业全程机械化、林草种子加工等。E-mail:sunbg@gsau.edu.cn

通信作者:石林榕(1983-),男,甘肃西和人,讲师,研究方向为西北寒旱区精密播种技术与工程。E-mail:shilr@gsau.edu.cn

温和机械处理,高温处理可软化种皮,去除表面蜡质和油脂。李昆等[1]使用 90℃热水浸泡黑荆树种子,明显提高了其发芽率。低温沙藏的方法一方面可以提高种子的渗透性,另一方面可以提高酶的活性,增强水解[5]。机械处理操作简单,实验表明针对不同种子通过机械破皮的办法可将种子发芽率提高 30% ~65%;机械破眠的主要形式是通过手工形式或者简易的机械装置对种子进行研磨,从而达到破眠的目的,但是这种破眠方式容易损伤种子,影响种子出苗。马嘉毅等[6]为解决高寒地区牧草种子硬实问题设计了一种机械破眠装置,发芽率提高 91.1%;张琴[7]以苜蓿种子作为研究对象借助传统碾压原理设计了一种碾压式破眠装置,处理后的苜蓿种子发芽率高达 92%;潘光杰等[8]对豌豆脱皮技术原理与方法进行分析与研究,设计了一种揉搓式豌豆脱皮机。化学方法主要是用强酸性、强碱腐蚀性试剂或者激素浸泡种子达到破眠的效果,由于试剂具有强酸碱腐蚀性,可能会对种子和人造成不可逆的影响。陈镇等[9]使用 100 mg · L^{-1}赤霉素浸泡巨紫荆种子,种子第 3 天开始萌发,第 7 天发芽率可达 90%以上。生物方法主要采用动物过腹胃肠消化种皮,但对激素处理所起作用的研究尚存在分歧。还可综合几种方法对种子破眠,李强等[10]提出利用生物与机械破眠技术结合解除紫花苜蓿的休眠方法,利用羊胃液和机械研磨系统结合,使紫花苜蓿的发芽率高达 95%。

由于种子颗粒比较小,很难测定基础物理特性,导致其破眠机械的研究进展缓慢。在人工草地重建过程中,大部分播种者仍使用砂纸打磨等传统方法解除种子休眠,传统方法效率低、破损率高、操作难度大、参数不易控制等问题一直未得到解决,研制出高效、低损伤且可批量处理的智能破眠设备成为种子破眠研究的主要方向。本文通过实验和离散元仿真测定验证了红豆草、苜蓿、扁蓿豆、红三叶、大田百脉根、白三叶共 6 种常见牧草种子的基础物理特性和力学特性,以期为设计种子破眠机器提供理论计算依据。

1　牧草种子基础物理特性

设计牧草种子破眠机,需测定牧草种子的基础物理特性和力学特性[11]。试验材料选择三叶、红三叶、扁蓿豆、苜蓿、大田百脉根、红豆草 6 种牧草种子作为实验对象(图 1),分别测定 6 种不同牧草种子的基础物理特性(种皮厚度、种子密度、千粒重)和确定力学物理特性(堆积角、静摩擦系数、滚动摩擦系数、泊松比、弹性模量、剪切模量)。

1.1　种皮厚度

牧草种子的种皮厚度是设计牧草种子破眠机构重要的参考依据。种子在萌发时,胚需突破种皮的限制,长出胚芽和胚根[12]。测种皮厚度时,用薄刀片将种子从最中间切开,保证切割处是种子直径最大,取一半用少量白乳胶固定在载玻片上,用显微镜自带的测量工具对该类别种子的种皮厚度进行测量(图 2)。

由图 2 可知,白三叶种子和大田百脉根种子的种皮较薄,仅为 0.01 mm,其种皮与种子内部结构之间存在间隙;大田百脉根种子种皮与种子内部结构接触紧密;红三叶、扁蓿豆、苜蓿种子的种皮稍厚,特别是扁蓿豆种子,种皮厚度不规则,红豆草种子的种皮最厚,约为 0.26 mm,种皮与种子内部结构之间存在空隙。6 种牧草种子的种皮厚度见表 1。

1.2　种子密度

种子密度是一定绝对体积的种子质量和同体积水的质量之比,即种子的绝对质量和它的绝对体积之比。不同类别的牧草种子,密度因形态构造、细胞组织的致密程度和化学成分的不同而有很大的差异。对于同一品种的种子,密度随成熟度和充实饱满度的不同而变化[13]。大多数的种子成熟越充分,内部积累的营养物质越多,则籽粒越充实,密度就越大,用排水法测量种子密度。具体步骤如下,选取精细刻度的 5 mL 量筒,内装适量的水,读取液体高度,记为 V_1;称取适量的待测种子,记其质量为 m;将种子倒入装有水的量筒,再读取液体平面高度,记为 V_2;据式(1)计算种子密度;每个品种测 5 次,结果取平均值,测量结果见表 1。

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \tag{1}$$

1.3　千粒重

千粒重是体现种子大小与饱满程度的一项指标,是检验种子质量和作物考种的内容,也是田间预测产量时的重要依据[14]。可以在种子破眠机构的设计中作为种子饱满程度的最初设计参考值,在后续的工作中,依据不同条件,不同饱满程度的牧草种子,对设计参数加以修正。取 6 种牧草种子各 1 000 粒,用精密天平(精度为 0.001 g)进行测量,测量结果如表 1 所示。

由表 1 可知,除了红豆草以外,其他 5 种的密度相差不大。大田百脉根种子的千粒质量略大于红三叶种子的千粒质量,说明大田百脉根种子的饱满度大于红三叶种子。

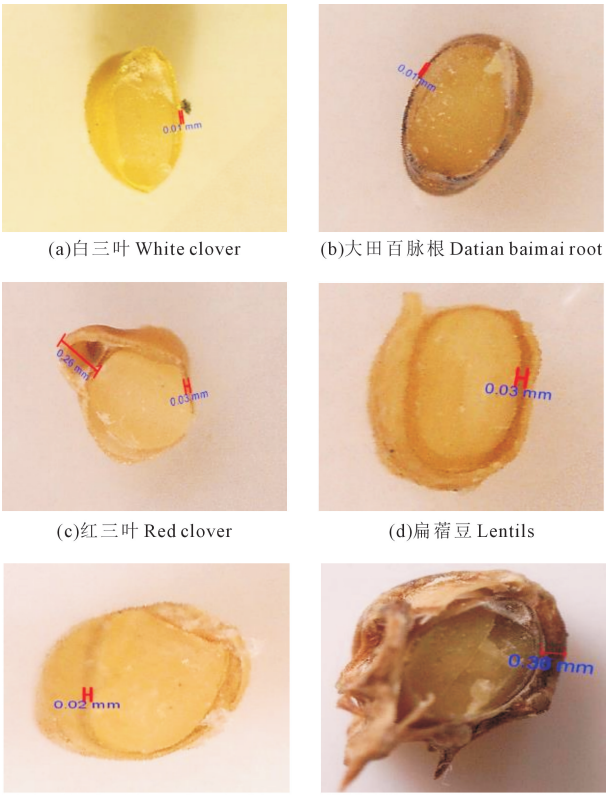
(a)白三叶 White clover (b)红三叶 Red clover

(c)扁蓿豆 Lentils (d)大田百脉根 Datian baimai root

(e)苜蓿 Alfalfa (f)红豆草 Sainfoin

图 1 牧草种子

Fig.1 Grass seed



(a)白三叶 White clover (b)大田百脉根 Datian baimai root

(c)红三叶 Red clover (d)扁蓿豆 Lentils

(e)苜蓿 Alfalfa (f)红豆草 Sainfoin

图 2 牧草种子厚度测量

Fig.2 Measurement of forage seed thickness

1.4　堆积角

堆积角反映了种子之间的内摩擦性能和散落性能,堆积角越大,则说明种子间内摩擦力越大,散落性越差,堆积角也称为休止角,是指颗粒自由堆积体形成的堆积坡面与水平面之间的最大夹角。测量堆积角方法较多,试验采用定漏斗法[15]。测量时,种子从漏斗流出,自由下落至底板堆积。漏斗中心与底盘中心的直线垂直于底盘,保证被测种子下落在底盘中心;对堆积的种子拍照。拍照时必须将镜头与底板表面对齐且水平拍摄,以保证所拍内容和水平面垂直,尽量减小误差;将所拍摄的照片导入绘图软件(实验中用的是 CAXA 电子图版)做辅助线;利用绘图软件测量该类别种子的堆积角(图 3)。

6 种牧草种子,红豆草的堆积角最大,为35.06°,苜蓿种子的堆积角最小,为 30.06°(表 2),表明红豆草种子间的内摩擦力大于苜蓿种子,在箱体中的流动性也差于苜蓿种子。

1.5　静摩擦系数

采用斜面法测定静摩擦系数[16]。为了方便操作和实验,制作了一个结构简单的测量装置,其测定原理如图 4 所示。

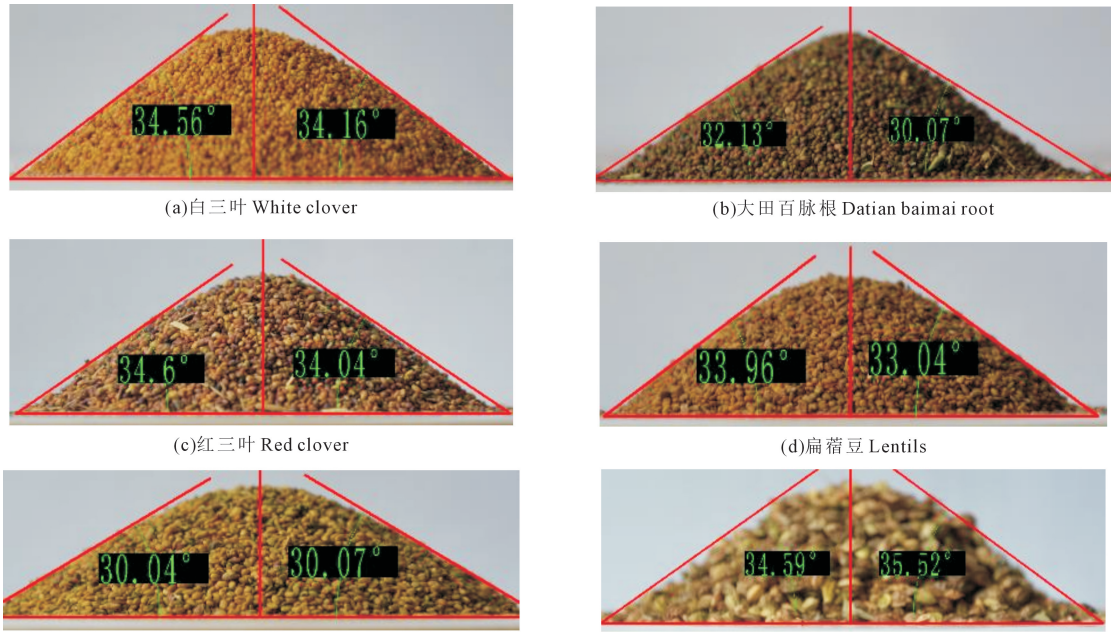
将待测种子均匀放在斜板的上端,通过驱动杆将斜板一端缓慢升起,为了测量种子与不同材料之间的静摩擦系数,斜板可以更换为不同的材料;种子刚开始滑动的瞬间,停止转动驱动杆,并且通过锁定装置锁定该位置,观看角度尺上的角度读数计为 θ;通过公式计算静摩擦系数,静摩擦系数的计算为公式(2),静摩擦系数测定结果如表 3 所示。

$$f=\arctan\theta \tag{2}$$

表 1　牧草种子物理参数测量结果

Table 1　Measurement results of physical parameters of forage seeds

项目 Item	白三叶 White clover	大田百脉根 Datian baimai root	红三叶 Red clover	扁苜豆 Lentils	苜蓿 Alfalfa	红豆草 Sainfoin
种皮厚度/mm Seed coat thickness	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.36
种子密度/(g·mL^{-1}) Grass seed density	1.082	1.212	1.21	1.246	1.302	0.658
千粒重/g Thousand-grain weight	0.581	1.254	1.252	1.508	2.074	28.556



(a)白三叶 White clover　(b)大田百脉根 Datian baimai root

(c)红三叶 Red clover　(d)扁蓿豆 Lentils

(e)苜蓿 Alfalfa　(f)红豆草 Sainfoin

图 3　6 种牧草种子堆积角

Fig.3　Angle of repose of six forage seeds

表 2 6 种牧草种子堆积角测量结果

Table 2 Measurement results of angle of repose of six forage seeds

项目 Item	白三叶 White clover	大田百脉根 Datian baimai root	红三叶 red clover	扁蓿豆 Lentils	苜蓿 alfalfa	红豆草 Sainfoin
堆积角/(°) Angle of repose	34.36	31.10	34.00	33.50	30.06	35.06

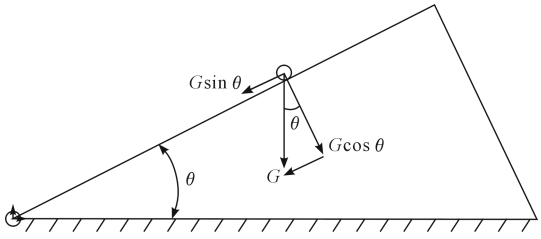


图 4 静摩擦系数测定原理

Fig.4 Measurement principle of static friction coefficient

1.6 滚动摩擦系数

从能量守恒的角度出发,进行滚动摩擦系数的测定[17]。将种子放置于斜面法测量装置的斜面上,缓慢转动装置,记录种子与仪器开始滚动时的角度,记为 θ_1,此时,种子在重力的作用下,沿着斜面滚动,由能量守恒定律可得:

$$E = E_p - E_k \tag{3}$$

式中,E 为种子由于滚动消耗的能量,E_p 为种子初始的重力势能,E_k 为种子终了时刻的动能。

由于单个种子的质量非常小,很难测到其动能的变化,采用初始滚动时刻内近似能量守恒来获得滚动摩擦系数的预估值。对种子进行受力分析,当重力为 G 的种子在实验仪上滚动微小角度时,其在实验仪上滚动的距离为 x,种子对斜板的正压力 $N=G\cos\theta_1$,滚动摩擦力 $F=\mu_2 N$,重力势能 $E_p=Gx\sin\theta_1$。

种子在开始滚动的一个微小角度内,速度由 0 逐渐开始增加,假设种子的动能 $E_k=0$,由以上分析可得到滚动摩擦系数:

$$\mu_2 = \tan\theta_1 \tag{4}$$

经过多次试验,得到 6 种牧草种子的滚动摩擦系数如表 4 所示。

1.7 剪切模量

泊松比是重要的力学参数之一,本文采用定义法来测量种子的泊松比[18],实验仪器采用质构仪,随机选取种子,用数显式游标卡尺测量其长度和厚度。将种子平放在平板上,对于红豆草和扁蓿豆两种比较大的种子,采用 5 mm 探头挤压,剩下 4 种比较小的种子,使用 2 mm 的探头挤压,设定加载速度位 0.5 mm · s^{-1},加载时间为 2 s 后停机,利用游标卡尺测得加载后长度和厚度的变形量,通过式(5)计算泊松比:

表 3 6 种牧草静摩擦系数

Table 3 Static friction coefficient of six forage

牧草 Grass	种子与 45 钢的静摩擦系数 Static friction coefficient between seed and 45 steel	种子和玻璃的静摩擦系数 Static friction coefficient of seed and glass
白三叶 White clover	0.406	0.386
大田百脉根 Datian baimai root	0.425	0.397
红三叶 Red clover	0.513	0.489
扁蓿豆 Lentils	0.547	0.514
苜蓿 Alfalfa	0.494	0.473
红豆草 Sainfoin	0.732	0.703

表 4 6 种牧草滚动摩擦系数

Table 4 Dynamic friction coefficient of six forage

牧草 Grass	种子与 45 钢的滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient between seed and 45 steel	种子和玻璃的滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient of seed and glass
白三叶 White clover	0.632	0.588
大田百脉根 Datian baimai root	0.482	0.453
红三叶 Red clover	0.397	0.364
扁蓿豆 Lentils	0.463	0.445
苜蓿 Alfalfa	0.692	0.634
红豆草 Sainfoin	0.477	0.530

$$\mu = \left|\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}\right| = \frac{\Delta l/l}{\Delta d/d} \tag{5}$$

式中,μ 为泊松比,无量纲;ε_x 为种子的横向应变,无量纲;Δl 为种子的横向变形量,mm;ε_y 是种子的纵向应变,无量纲;Δd 是种子厚度的变化量,mm;l 为种子的原长,mm;d 为种子的原来厚度,mm。测量结果如表 5 所示。

利用软件处理得到种子压缩试验过程中的位移-载荷数据,由式(6)计算出种子的弹性模量:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{6}$$

式中,E 为弹性模量(MPa),σ 为最大压应力(Pa),ε 为线应变。

剪切模量(G) 可用式(7) 计算。

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \tag{7}$$

式中,E 为弹性模量,μ 为泊松比。试验结果如表 6

所示。

2　仿真参数的标定

牧草种子的基本物理参数已经通过实验测定得到,测得各种子的三轴尺寸在三维软件里建立几何模型,将其保存为 stl 格式导入仿真软件 EDEM 中。为了兼顾仿真效率和仿真结果的真实性和可靠性,将形状不规则的种子边角处进行圆角化处理,在 EDEM 中用单球形颗粒对种子颗粒进行填充。堆积角测定模型如图 5 所示。在 EDEM 仿真实验中,将种子仿真实验堆积角测定模型导入绘图软件中进行测量(AutoCAD),做辅助线进行测量[19]。在漏斗上方生成 Polygon 虚拟颗粒平面,用于生成种子颗粒,颗粒生成方式采用动态生成方式,仿真总时间为 1 s。仿真时间步长的选择对仿真至关重要,过大会导致颗粒爆炸式发散,过小会使计算量成倍增加,选取时间步常为 1.76×10^{-7} s,共生成颗粒 1 000 个,生成速率为 2 000 个·s^{-1}[20-22]。

表 5　6 种牧草种子泊松比

Table 5　Poisson´s ratio of six forage seeds

项目 Item	白三叶 White clover	大田百脉根 Datian baimai root	红三叶 Red clover	扁蓿豆 Lentils	苜蓿 Alfalfa	红豆草 Sainfoin
泊松比 Poisson's ratio	0.484	0.672	0.598	0.463	0.131	0.155

表 6　6 种牧草种子弹性模量和剪切模量

Table 6　Elastic modulus and shear modulus of six forage seeds

项目 Item	白三叶 White clover	大田百脉根 Datian baimai root	红三叶 Red clover	扁蓿豆 Lentils	苜蓿 Alfalfa	红豆草 Sainfoin
弹性模量 Modulus of elasticity	7.865	10.2	6.46	6.4	12.63	1.25
剪切模量 Shear modulus	5.83	8.52	5.16	4.68	7.14	0.72

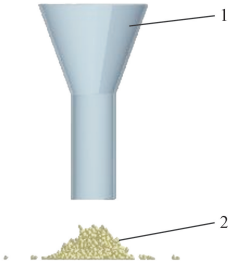
2.1　牧草种子模型建立

红豆草、大田百脉根、苜蓿、扁蓿豆、白三叶、红三叶种子建模和 EDEM 填充模型对比如图 6 所示。

2.2　仿真角对比及结果分析

仿真几何模型材料设置为有机玻璃,其他输入参数使用上述试验测定值进行堆积角仿真,滚动摩擦系数在测量值±0.02 变动,结果导入绘图软件中制作辅助线测量角度。

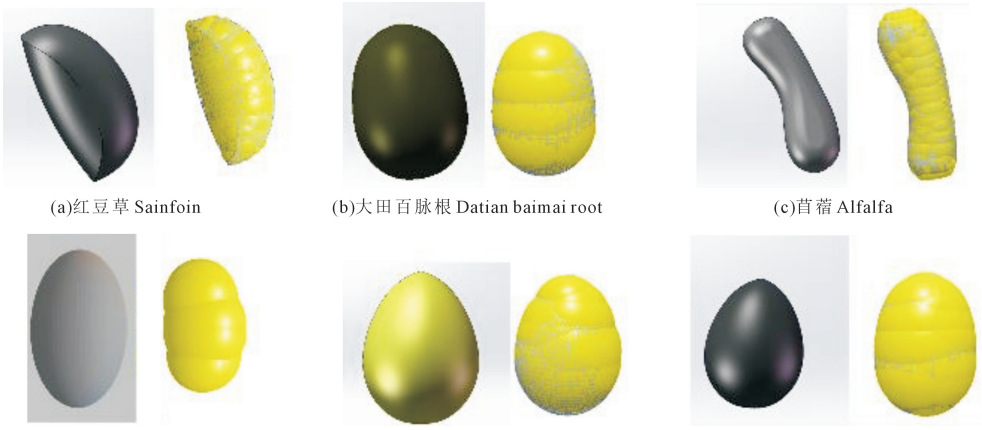
6 种牧草种子堆积角仿真结果如图 7、表 7 所示。



1.漏斗 Funnel; 2.种子 Seed

图 5　堆积角测定模型

Fig.5　Angle of repose measurement model



(a)红豆草 Sainfoin　(b)大田百脉根 Datian baimai root　(c)苜蓿 Alfalfa

(d)扁蓿豆 Lentils　(e)白三叶 White clover　(f)红三叶 Red clover

图 6　6 种牧草种子建模对比

Fig.6　Comparison of six forage seeds modeling

表 7　6 种牧草种子堆积角仿真结果

Table 7　Simulation results of seed accumulation angle of six forage

牧草 Grass	序号 Serial number	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	堆积角平均值/(°) Average value of stacking angle
扁蓿豆 Lentils	1	0.460	33.60
	2	0.461	33.75
	3	0.462	34.10
	4	0.463	34.80
红豆草 Red bean grass	1	0.401	34.50
	2	0.402	35.00
	3	0.403	35.35
	4	0.404	36.50
红三叶 Red clover	1	0.500	33.50
	2	0.501	33.70
	3	0.502	34.65
	4	0.503	35.70
白三叶 White clover	1	0.45	34.15
	2	0.451	34.45
	3	0.452	35.05
	4	0.453	35.80
大田百脉根 Datian baimai root	1	0.300	29.70
	2	0.301	30.45
	3	0.302	31.00
	4	0.303	31.45
苜蓿 Alfalfa	1	0.250	30.50
	2	0.251	30.85
	3	0.252	31.85
	4	0.253	31.95

为了保证滚动摩擦系数选取的科学性，对表 9 的数据进行拟合[23]，得到 6 种牧草种子的 2 次多项式拟合曲线如图 8 所示。

其曲线方程分别为：

$$y = 13750x^2 - 126518x + 29137 \quad (8)$$

$$y = 237500x^2 - 190047x + 38054 \quad (9)$$

$$y = 62500x^2 - 55862x + 12516 \quad (10)$$

$$y = -75000x^2 + 45805x - 6961.8 \quad (11)$$

$$y = -62500x^2 + 31972x - 4056.5 \quad (12)$$

式中，决定系数(R^2)分别为 0.9987、0.9074、0.9931、0.9834、0.9997、0.9233，接近于 1，说明拟合曲线的可靠度高。分析仿真结果，扁蓿豆种子在滚动摩擦系数为 0.360 时，形成堆积角平均值为 33.60°，接近实际堆积角 33.50°，相对误差为 0.29%；红豆草种子在滚动摩擦系数为 0.41 时，形成堆积角平均值为 35.00°，接近实际堆积角 35.06°，相对误差为 0.15%；红三叶种子在滚动摩擦系数为 0.502 时，形成堆积角平均值为 34.65°，接近实际堆积角 34.60°，相对误差为 0.14%；白三叶种子在滚动摩擦系数为 0.451 时，

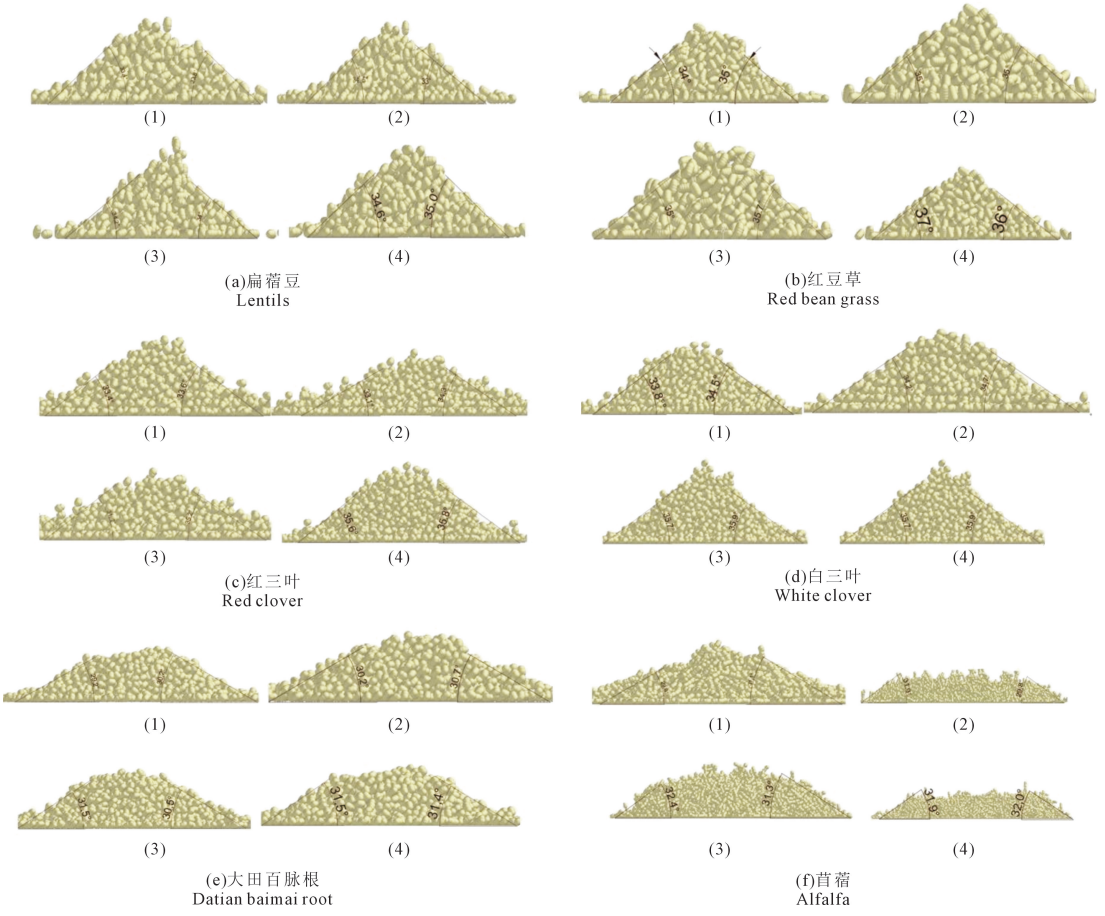


图 7　6 种牧草种子堆积角

Fig.7　Seed accumulation angle of six forage

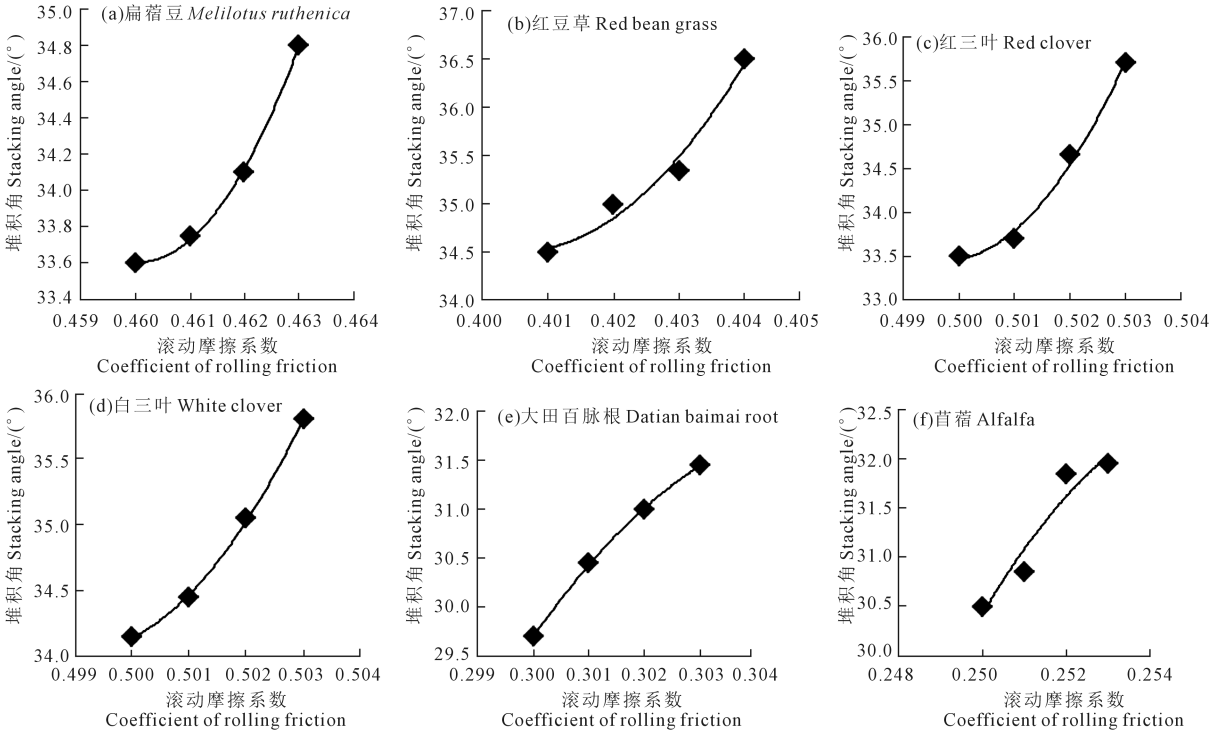


图 8　6 种牧草种子的二次多项式拟合曲线

Fig.8　Quadratic polynomial fitting curves of six forage

形成堆积角平均值为 34.45°,接近实际堆积角 34.36°,相对误差为 0.26%;大田百脉根种子在滚动摩擦系数为 0.302 时,形成堆积角平均值为 31.00°,接近实际堆积角 31.095°,相对误差为 0.3%;苜蓿种子在滚动摩擦系数为 0.25 时,形成堆积角平均值为 30.50°,接近实际堆积角 30.06°,相对误差为 0.14%。

3　结　论

1)为了利用离散元仿真软件 EDEM 对牧草种子破眠装置研制和优化,本文确定了常见牧草种子仿真所需要的基本物理参数和接触力学参数。

2)为了确定试验牧草种子参数的可靠性,通过 6 种牧草种子仿真堆积角与实际堆积角对比,对所得数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线,结果表明扁蓿豆、红豆草、红三叶、白三叶、大田百脉根、苜蓿种子仿真与试验堆积角相对误差分别为 0.29%、0.15%、0.14%、0.26%、0.3%、0.14%。

机械破眠在高寒地区牧草种子破眠中占据主要地位,本文为牧草种子破眠机的研制提供基础理论数据,但是机械破眠后的种子存在胚和胚乳的隐性损伤,如何在破眠的同时降低机械对种子胚和胚乳的损伤也是在进行破眠研究过程中的重要课题。

参 考 文 献:

[1]　李昆,崔永忠,张春华.金沙江干热河谷退耕还林区造林树种的育苗技术[J].南京林业大学学报(自然科学版),2003,27(6):89-92.
LI K, CUI Y Z, ZHANG C H. A study on seedling cultivation technique in reforesting district of hot and arid valley of Jinsha river[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2003, 27(6): 89-92.

[2]　PEARSON B O. Bitterbrush Seed dormancy broken with thiourea[J]. Journal of Range Management, 1957, 10(1): 41-42.

[3]　KIM H B, ATHKINS I M, MCDANIEL M E. Methods of breaking seed dormancy in oats[J]. Korean Journal of Crop Science, 1971, 12: 85-90.

[4]　刘洋礼,孙步功,张鹏,等.高寒地区牧草种子破眠技术研究现状与展望[J].林业机械与木工设备,2021,49(8):20-24.
LIU Y L, SUN B G, ZHANG P, et al. Present research status and prospects of dormancy breaking technology for forage seeds in alpine regions[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(8): 20-24.

[5]　吴丽芳,魏晓梅,陆伟东,等.白刺花硬实种子的休眠机制及休眠解除[J].南方农业学报,2018,49(5):944-949.
WU L F, WEI X M, LU W D, et al. Dormancy mechanism and breaking methods for hard seeds of *Sophora davidii*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(5): 944-949.

[6]　马嘉毅,孙步功,张克平,等.一种面向种子硬实效应的机械破眠装置设计与试验研究[J].中国农机化学报,2019,40(4):78-83.
MA J Y, SUN B G, ZHANG K P, et al. Design and experimental study of a mechanical breaker for seed hard effect[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 78-83.

[7]　张琴.碾压式苜蓿种子破眠装置的设计与仿真分析[D].兰州:甘肃农业大学,2018.
ZHANG Q. Design and simulation analysis on rolled broken sleep

device for alfalfa seed [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.

[8] 潘光杰,孙传祝,张志杉,等.揉搓式豌豆脱皮机研究与设计[J].食品与机械,2012,28(4):146-148.
PAN G J, SUN C Z, ZHANG Z S, et al. Research and design on knead-style peeling machine of pea[J]. Food & Machinery, 2012, 28(4): 146-148.

[9] 陈镇,张建,王碧,等.巨紫荆种子休眠原因及破眠技术研究[J].种子,2018,37(12):29-34.
CHEN Z, ZHANG J, WANG B, et al. Research on seed dormancy and the technique of breaking dormancy of *Cercis gigantea*[J]. Seed, 2018, 37(12): 29-34.

[10] 李强,孙步功,张鹏,等.紫花苜蓿种子破眠方法的设计与试验研究[J].农机化研究,2021,43(6):161-165.
LI Q, SUN B G, ZHANG P, et al. Design and experimental study on a method of breaking seed dormancy of alfalfa[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(6): 161-165.

[11] 王旺平,张永林,易启伟,等.新鲜莲子脱皮机的研制[J].农业机械,2011,(6):149-151.
WANG W P, ZHANG Y L, YI Q W, et al. Design and development of fresh lotus seed de-huller[J]. Farm Machinery, 2011, (6): 149-151.

[12] 程玉来,许绍惠,康清明,等.杏仁脱皮机的试验研制[J].沈阳农业大学学报,1995,26(2):200-204.
CHENG Y M, XU S H, KANG Q M, et al. The theeory and structure of apricot kernel automatic peeler[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1995,26(2): 200-204.

[13] 张麟,宋新毛,张小燕.油菜籽脱皮机的试验研究[J].粮油加工与食品机械,1997,(1):3-4.
ZHANG L, SONG X M, ZHANG X Y. Experimental study on rapeseed peeling machine[J]. Agricultural Machinery and Food Machinery, 1997,(1): 3-4.

[14] 李诗龙,刘协舫.砂辊式油菜籽脱皮机的研制[J].粮食与油脂,2015,28(4):54-55,56.
LI S L, LIU X F. Development of abrasive roll dehuller for rapeseed[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(4): 54-55, 56.

[15] 孙传祝,王相友,张志杉,等.螺旋揉搓式豌豆脱皮机设计[J].农机化研究,2013,35(2):94-97.
SUN C Z, WANG X Y, ZHANG Z S, et al. Design of a screw rubbing-type pea dehulling machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(2): 94-97.

[16] 顾尧臣.粮食加工设备工作原理、设计和应用[M].武汉:湖北科学技术出版社,1998.
GU Y C. Working principle, design and application of grain processing equipment[M]. Wuhan: Hubei Science And Technology Press, 1998.

[17] 王超.燕麦脱皮工艺与设备实验研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2015.
WANG C. The process and equipment research of oats peeling[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015.

[18] 屈少敏.Solidworks 在碾米机螺旋输送器设计中的应用[J].河南工业大学学报(自然科学版),2006,27(1):72-74.
QU S M. Application of solidworks for designing screw conveyor in rice whitener[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition),2006,27(1): 72-74.

[19] 顾尧臣.碾米机碾白理论的研究应用和机型[J].粮食与饲料工业,2001,(4):8-11.
GU Y C. Research and application of whitening theory of rice mill and its model[J]. Cereal & Feed Industry, 2001,(4): 8-11.

[20] 孙正和,吴守一,张兴宇,等.擦离式碾米机碾米室压力的研究[J].农业工程学报,1994,10(3):133-137.
SUN Z H, WU S Y, ZHANG X Y, et al. Study on the milling chamber pressure of friction-type miller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1994,10(3):133-137.

[21] 高中庸,陈迎春,胡靖明.机械设计[M].武汉:华中科技大学出版社,2014.
GAO Z Y, CHEN Y C, HU J M. Mechanical design[M]. Wuhan: Huazhong University Of Science And Technology Press, 2014.

[22] 周开勤.机械零件手册[M].北京:高等教育出版社,2001.
ZHOU K Q. Mechanical parts manual[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

[23] 石林榕,孙伟,赵武云,等.马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J].农业工程学报,2018,34(6):35-42.
SHI L R, SUN W, ZHAO W Y, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 35-42.