doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.021

新疆膜下大豆收获机脱粒装置设计与脱出物分布规律研究

王士国[1,2]　陈学庚[1,3]　郭小虎[2]　李　斌[2]　胡一凡[3]　唐　忠[3]

（1.石河子大学机械电气工程学院，石河子 832000；2.新疆农垦科学院机械装备研究所，石河子 832000；
3.江苏大学农业工程学院，镇江 212013）

摘要：针对新疆地区膜下大豆在收获期茎叶青绿、草谷比大、含水率高所引起的脱出物分布不均与脱粒质量不稳定的问题，通过系统测定大豆植株形貌特征、各组分含水率及物料与脱粒元件间的摩擦特性，明确了相关物料参数，并以此为依据设计了脱粒装置。以滚筒转速、喂入量和脱粒间隙为试验因素，开展了单因素脱粒试验，系统分析脱出物分布规律。结果表明：大豆茎秆平均直径为 9.59 mm，籽粒三轴尺寸近似正态分布。籽粒侧放受力阈值不超过 73.7 N，茎秆与钢板间的摩擦因数最大为 0.58，茎秆含水率最高，达 34.0%。脱出物沿滚筒轴向呈现先迅速升高后缓慢下降的趋势，径向分布表现为两侧高、中间低的特征。在滚筒转速为 500 r/min 时，轴向与径向变异系数分别降至 50.05% 和 50.82%，分布均匀性最优。喂入量增大导致径向变异系数显著上升，分布均匀性下降。脱粒间隙为 25 mm 时径向分布最均匀，变异系数为 59.73%。研究结果可为适应膜下大豆物料特性的脱粒装置结构优化与作业参数设置提供参考。

关键词：膜下大豆；脱粒装置；物料特性；脱出物分布

中图分类号：S225.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)09-0226-11　　**OSID**：

Design of Threshing Device for Xinjiang Under-mulch Soybean Harvester and Distribution of Threshed Materials

WANG Shiguo[1,2]　CHEN Xuegeng[1,3]　GUO Xiaohu[2]　LI Bin[2]　HU Yifan[3]　TANG Zhong[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832000, *China*
2. *Institute of Mechanical Equipment*, *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science*, *Shihezi* 832000, *China*
3. *School of Agricultural Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Aiming to address the uneven distribution of threshed material and unstable threshing quality caused by the green stems and leaves, high straw-to-grain ratio, and high moisture content of soybeans planted under plastic film in Xinjiang during the harvest period, key material parameters were clarified through systematic measurement of the plant's morphological characteristics, moisture content of its components, and frictional properties between the material and threshing components. Based on these parameters, a vertical axial-flow threshing device was designed. Single-factor threshing experiments were conducted with drum speed, feed rate, and threshing clearance as experimental factors to systematically analyze the distribution pattern of the threshed material. The results indicated that the average stem diameter of the soybeans was approximately 9.59 mm, and the tri-axial dimensions of the seeds approximately followed a normal distribution. The lateral compressive force threshold for seeds did not exceed 73.7 N. The friction coefficient between stems and steel plate was the highest at 0.58, and the stem moisture content was the highest at 34.0%. The mass of threshed material along the drum axis showed a trend of rapid increase followed by a slow decrease, while the radial distribution was characterized by higher mass at both sides and lower in the center. At a drum speed of 500 r/min, the axial and radial coefficients of variation were decreased to 50.05% and 50.82%, respectively, indicating optimal distribution uniformity. An increase in feed rate led to a significant rise in the radial coefficient of

收稿日期：2024-10-13　修回日期：2024-11-11

基金项目：新疆生产建设兵团农业农村局项目(NYHXGG2023AA204)

作者简介：王士国(1977—)，男，博士生，新疆农垦科学院研究员，主要从事农业机械设计研究，E-mail：wansg@163.com

通信作者：陈学庚(1947—)，男，研究员，博士生导师，主要从事农业机械设计研究，E-mail：chenxg130@sina.com

variation and a decrease in uniformity. The radial distribution was most uniform at a threshing clearance of 25 mm, with a coefficient of variation of 59.73%. The findings can provide a reference for the structural optimization of threshing devices and the setting of operational parameters to adapt to the material characteristics of soybeans under plastic film mulch.

Key words: under-mulch soybeans; threshing device; material characteristics; distribution of threshed materials

0　引言

大豆是我国的重要粮油作物，在农业生产中占有重要地位，因其用途广泛、价值高的特点广泛种植于全球多个国家和地区[1-2]。大豆不仅用于食用油和食品加工，还广泛用于植物蛋白的提取及饲料生产。随着我国居民消费结构升级，大豆需求量逐年上升。为了满足日益增长的大豆需求，我国提出了大豆振兴计划，推动大豆种植面积的扩大[3-4]。然而，尽管种植面积增加，大豆产量仍无法满足需求。2023 年，我国大豆进口量达 9 941 万吨，约为国内总产量的 4.8 倍[5]。

大豆机械化收获水平总体落后、生产效益低，严重制约了各地区大豆产业的快速发展[6]。尤其是新疆地区，新疆独特的气候条件和膜下种植模式有利于大豆总产量的提升，但也形成了收获期植株茎青荚干的特点[7]。脱粒过程是大豆机械化收获的关键环节之一[8-9]，大豆植株的物理和力学特性对大豆联合收获机的脱粒效果有重要影响。茎秆尺寸、形状以及含水率会影响脱粒效果。

国内外学者对大豆的物料特性进行了广泛研究。国外研究方面，BAIDHE 等[10]探究了不同品种大豆在多种加载速率下的力学压缩行为，并得到载荷与变形的关系。SOYOYE 等[11]对大豆多项物理与力学参数进行了测定，其研究成果可为播种机关键部件的结构设计与材料选择提供直接依据。国内研究同样深入，并更具针对性。JIN 等[12]通过测定不同含水率大豆籽粒在三轴方向上的应力分布，对其压缩损伤过程进行了观察，揭示了由压缩力导致的损伤特性规律。滕悦江等[13]对多个大豆品种进行力学特性试验，为改进大豆脱粒和输送装置参数提供参考。朱红媛等[14]通过试验研究发现大豆与合金钢摩擦片的静摩擦因数随含水率的增加而增大，平均极限压力随大豆含水率的增加而降低。李庆伦等[15]利用万能试验机对豆荚及茎秆进行加载试验，结果表明豆荚炸荚时所需破坏力小于豆荚脱离时所需破坏力，在大豆收获过程中炸荚是主要损失因素。此外，针对豆荚的力学特性试验表明，在不同加载速度下，豆荚炸荚所需的破坏力小于豆荚脱离时的破坏力[16]。陈杰等[17]采用响应面法对剪切工艺参数进行优化，得到剪切角度对大豆秸秆剪切效果的影响程度最大，刀刃角的影响最小。谭云峰等[18]以南夏豆 25 为研究对象，建立了一种可破碎大豆植株离散元柔性模型，并对黏结参数进行标定，并通过试验验证了模型的准确性。这些物料特性研究为后续脱粒装置的优化设计奠定了基础。

在明确物料特性的基础上，学者进一步研究脱粒装置本身的结构与参数优化。康家鑫等[19]设计了一种对称可调式凹板筛，实现双侧脱粒间隙可调，有效提高了脱粒效率并降低脱粒损失。刘安稳等[20]针对传统大豆联合收获机脱粒间隙无法适时调控的问题，设计了一种基于喂入量感知的自适应调节系统，降低了籽粒破碎率、未脱净率与夹带损失率。李平等[21]针对丘陵山地大豆收获破碎率高的问题，基于赫兹接触理论及 EDEM 仿真对脱粒装置进行优化，减少了大豆籽粒的破损率。NIU 等[22]设计了一种柔性脱粒装置，其关键在于采用可变刚度弹簧与脱粒齿杆构成的缓冲系统，有效降低籽粒破碎。LIU 等[23]从脱粒过程籽粒的受力分析出发，设计了一种刚柔耦合杆齿，并据此优化了脱粒装置的结构参数。上述研究中的大豆特性与新疆地区青茎叶大豆的物理特性差异较大，难以直接应用。因此，需进一步研究脱粒装置中脱出物的分布规律。揭示物料运动、分离与堆积等关键特征，从而为脱粒装置与清选装置的结构参数优化提供直接依据。

为探究新疆膜下大豆生长特性对脱粒装置性能及脱出物分布规律的影响，本文以新疆地区收获期大豆为研究对象，调研膜下大豆的形貌特征，测定大豆植株的物理及力学特性，搭建大豆脱粒试验台开展单因素脱粒试验分析，得到脱出物随脱粒装置参数变化的分布规律，以期为大豆联合收获机脱粒装置与植株生物特征的适配性优化设计提供参考。

1　新疆膜下大豆特征与物料特性

1.1　膜下大豆物理特性

1.1.1　膜下大豆形貌特征

在新疆地区，由于特殊的气候条件和水资源短缺，大豆种植普遍采用铺膜滴灌的方式。研究表明，

豆类作物因植株特性不一、结荚高度偏低等特点，会增加机械化收获的难度[24]，膜下大豆植株形貌特征如图 1 所示。新疆地区种植的大豆品种较多，例如新大豆 8 号、龙垦 324 和吉育 86 等，其形貌特征存在一定差异。新振豆 1 号因其适应性强、产量稳定、豆荚集中且底荚离地高度适宜机械化作业等特点，已成为当地广泛种植的主栽品种。因此，选择新疆农垦科学院试验田内的新振豆 1 号作为代表性品种开展物性试验。



(a) 田间膜下大豆 (b) 膜下大豆形貌

图 1 膜下大豆形貌特征

Fig. 1 Morphology feature of soybean planted under film

如表 1 所示，主栽品种新振豆 1 号的平均株高为 68.4 cm，标准差为 4.63 cm，底荚处茎秆平均直径为 9.59 mm，标准差为 2.22 mm。由此可知，该品种植株高度适中，且群体整齐度高，其株高变异系数仅为 6.77%，茎秆平均直径适宜机械化处理，其直径变异系数为 23.19%。这种整体上高度一致的形态特征，有利于在机械化收获过程中实现稳定的喂入、脱粒与分离，是将其选为试验对象的重要依据之一。

表 1 大豆株高及底荚茎秆直径

Tab. 1 Soybean plant height and bottom pod stem diameter

编号	株高/cm	底荚直径/mm
1	63	11.16
2	80	6.44
3	67	13.27
4	64	10.35
5	65	9.23
6	68	7.19
7	72	7.66
8	67	11.22
9	70	12.01
10	68	7.39
平均值	68.4	9.59
标准差	4.63	2.22
变异系数/%	6.77	23.19

1.1.2 大豆籽粒三轴尺寸测定

进行大豆籽粒三轴尺寸的测试时，首先从试验田中随机选取 100 粒结构完整的大豆籽粒样品。使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺，对大豆的长度、宽度、厚度进行测量，每粒大豆需进行至少 3 次重复测量，求取平均值。

图 2 显示了大豆籽粒在长度、宽度和厚度 3 个方向上的分布。在 3 个方向上整体分布均近似于正态分布，大豆籽粒的长度主要集中在 8.4 ~ 9.3 mm 之间，宽度分布范围主要集中在 7.46 ~ 8.31 mm 之间，厚度主要集中在 6.1 ~ 7.0 mm 之间。

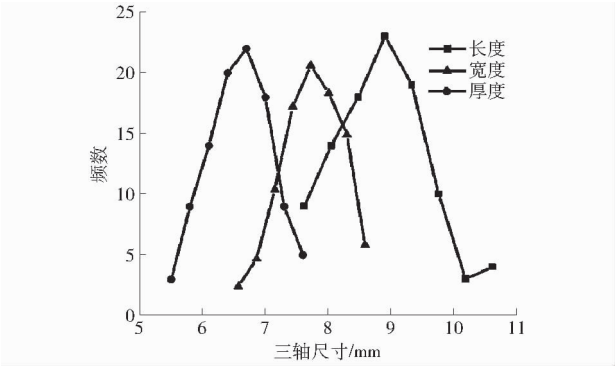


图 2 大豆籽粒特征尺寸分布

Fig. 2 Distribution of characteristic size of soybean grains

1.1.3 各组分含水率测定

含水率会直接影响大豆籽粒与植株之间的连接强度，较高的含水率使植株更具韧性，增加了脱粒难度。含水率的变化还会影响脱粒过程中的破碎率和损失率，需要对脱粒装置的结构和参数进行相应调整，以适应这种变化。采用烘干法对大豆籽粒、茎秆、豆荚的含水率进行测定。从田间随机选取物料分成两组，每组大豆籽粒 30 g、茎秆 10 g、豆荚 10 g，采用电热鼓风干燥箱将大豆籽粒、茎秆、豆荚分别进行称量与烘干。

物料的初始质量记为 m_1，随后在干燥箱中进行烘干处理，物料质量恒定不变时记录数据为 m_2。为降低数据误差，重复测量 3 次，最终对每个部分的含水率求取均值，含水率 W 的计算公式为

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

大豆植株不同部位含水率的差异会对大豆脱粒装置最佳工作参数调节产生影响。由表 2 可知，膜下种植的大豆籽粒含水率最低，经两次测量取平均值为 12.79%，其次是豆荚，含水率为 15.15%，与大豆含水率相近，含水率最高的是茎秆，为 34.00%。含水率的差异充分体现了膜下大豆茎青荚干的特征。为此，在脱粒装置设计过程中应先使茎秆快速疏散、以防缠绕，轴流滚筒则需要提供长行程击打和揉搓，确保脱净率，防止夹带损失。

表 2　大豆物料含水率

Tab. 2　Moisture content of soybean materials

物料种类	组别	试验前质量/g	试验后质量/g	含水率/%	含水率平均值/%
大豆	1	30.00	26.31	12.30	12.79
	2	30.00	26.02	13.27	
茎秆	1	10.00	6.46	35.40	34.00
	2	10.00	6.74	32.60	
豆荚	1	10.00	8.49	15.10	15.15
	2	10.00	8.48	15.20	

1.2　膜下大豆力学特性

1.2.1　压缩力测定

在大豆收获过程中存在大豆籽粒破碎的情况，如图 3 所示。这可能是多种因素共同作用所致，一方面，可能是在脱粒过程中，脱粒元件对大豆籽粒施加的作用力过大，导致籽粒无法承受而发生破碎；另一方面，也可能是由于大豆籽粒本身的质量问题，例如籽粒成熟度不够、存在病虫害等，使得籽粒强度降低；此外，试验中的参数变化，如脱粒间隙的调整、滚筒转速的改变等，也可能对大豆籽粒的破碎产生影响。



图 3　大豆籽粒破碎现象

Fig. 3　Broken phenomenon of soybean seeds

为了减少大豆在脱粒过程中出现的破碎情况，分析大豆的受力特性至关重要。利用 TA. XT Plus 物性测试仪（SMS 公司，英国）对大豆茎秆、豆荚、籽粒进行压缩试验[25]，质构仪探头的加载速度设置为 0.1 mm/s。挑选表面完整无损伤的大豆籽粒、无损伤的通直主茎秆、表皮未破裂的豆荚作为试验对象，每次试验重复 10 次。大豆籽粒、茎秆、豆荚的压缩过程如图 4 所示。图 5 为茎秆的位移-压力曲线，从图中可看出，在压缩过程中，茎秆在弹性变形阶段所受的压力不断增大，当测试仪施加的压力达到茎秆的承载极限时，压缩力会因茎秆内部损伤而下降，随后在压实阶段，茎秆的径向压缩力又不断增大。

通过比较不同放置方式下的受力可知，豆荚在侧放和立放时所受破荚力大致相近，分别为 13.4、14.3 N，立放的平均值略高于侧放（见表 3）。这表明在立放状态下，豆荚受到的冲击力更大，导致破荚

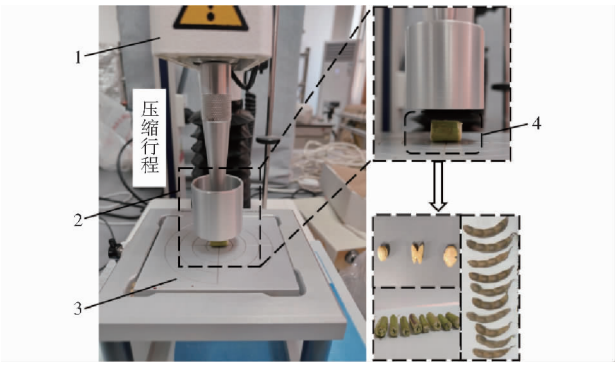


图 4　大豆物料压缩试验

Fig. 4　Compression test of soybean material

1. 质构仪　2. 压头　3. 载物台　4. 物料

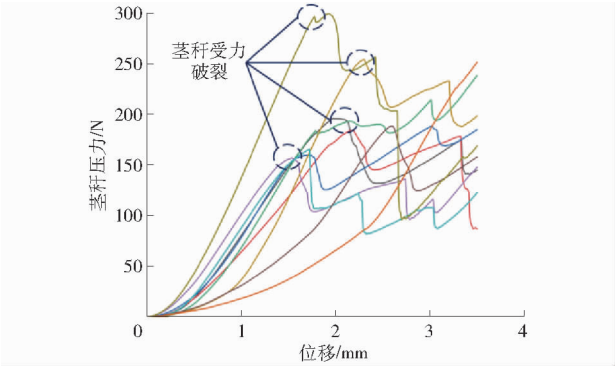


图 5　茎秆受载力变化曲线

Fig. 5　Curves of force variation on stalk under load

表 3　不同放置方式时大豆物料受力

Tab. 3　Force on soybean material by different placement methods　　N

序号	豆荚破荚力		大豆籽粒压缩受力			侧放茎秆压缩受力
	侧放	立放	立放	平放	侧放	
1	16.7	11.6	76.8	141.1	72.9	293.3
2	9.0	15.5	88.4	147.9	64.2	253.0
3	21.9	14.3	109.4	200.8	106.7	165.7
4	10.3	14.0	108.0	146.1	81.2	193.3
5	10.8	18.0	75.6	125.0	68.6	159.4
6	12.4	20.1	87.2	103.2	73.5	194.4
7	14.9	15.5	70.7	166.8	58.3	176.2
8	12.9	15.1	92.9	164.0	67.1	142.7
9	12.6	10.2	117.7	156.3	80.7	185.8
10	12.0	9.1	97.1	122.1	64.3	177.4
平均值	13.4	14.3	92.4	147.3	73.7	194.1
标准差	3.53	3.19	14.95	25.92	12.96	43.16

力增加。大豆籽粒平放时的压缩力为 147.3 N，明显高于侧放和立放，这是由大豆本身双子叶结构导致，在平放时无明显应力集中现象。但侧放时，平均破裂受力仅为 73.7 N，同样是因为双子叶结构导致在立放与侧放状态下大豆更易沿中间开裂。因此，为确保脱粒时籽粒完整，脱粒作用力必须低于此阈值，这直接决定了脱粒滚筒的极限转速与元件几何

形状的设计。

3 种物料中茎秆所承受压缩力最大,受力区间为 142.7 ~ 293.3 N,平均受力为 194.1 N,茎秆与载物台接触面积较大,且茎秆韧性较高导致其能承受更大的压缩力。通过观察标准差可看出,豆荚破荚力的标准差为 3.53 N(侧放)和 3.19 N(立放),表明不同样本间的破荚力差异相对较小。而大豆茎秆压缩受力的标准差相对较大,为 43.16 N,说明同品种不同茎秆样本间压缩受力差异较大。茎秆受力表现出较大的差异性可能由茎秆的含水率及成熟度不同导致。

1.2.2 摩擦因数测定

大豆脱粒过程中,籽粒、茎秆及豆荚在滚筒内的运动受其与接触面间摩擦性能的影响,这通常由静摩擦因数来表征。其定义为最大静摩擦力与正压力的比值,是衡量物料相对运动阻力大小的关键参数。测定过程中,挑选结构完整的物料水平布置于载物板表面,缓慢匀速拉动绳索,使载物台逐渐倾斜至物料即将发生移动,如图 6 所示,记录此时载物台的倾斜角度,每种物料测试重复 20 次。大豆物料与钢板之间的摩擦因数计算式为

$$\begin{cases} F_f = G\sin\alpha' \\ F_N = G\cos\alpha' \end{cases} \tag{2}$$

由

$$F_f = \mu F_N \tag{3}$$

得

$$\mu = \tan\alpha' = \tan\alpha \tag{4}$$

式中 G——物料颗粒所受的重力,N

F_f——物料颗粒受到的摩擦力,N

F_N——斜面对物料颗粒的支持力,N

μ——物料颗粒的静摩擦因数

α——斜面与水平面的夹角,(°)

α'——法向力与重力方向的夹角,(°)

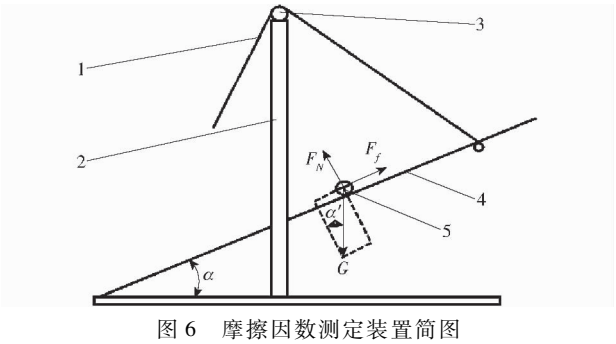


图 6 摩擦因数测定装置简图

Fig. 6 Schematic of friction coefficient measuring device

1. 绳索 2. 支撑杆 3. 滑轮 4. 载物板 5. 物料

摩擦因数测试结果如表 4 所示,茎秆与钢板间的摩擦作用最强,摩擦因数为 0.58,高于大豆籽粒的 0.31 与豆荚的 0.46。这表明在脱粒装置中,茎秆是产生摩擦阻力和影响物料运动特性的关键物料。摩擦因数会影响大豆与脱粒装置之间的相互作用,从而影响脱粒效率。若收获期间大豆含水率过高则可能导致大豆难以从豆荚中分离出来,脱粒不彻底,同时如果摩擦因数过高,还会导致脱粒元件磨损加剧。

膜下大豆茎秆与钢板的摩擦因数较大,这一特性要求脱粒元件与导流板必须具备更强的轴向输送能力,防止打滑或堵塞。同时,高摩擦特性也使茎秆更易被滚筒带动并随之旋转。在离心力的持续作用下,这些物料被甩向滚筒侧壁并堆积,这会导致脱出物在脱粒滚筒径向上呈现两侧质量高、中间质量低分布状态。

表 4 大豆物料摩擦因数

Tab. 4 Friction coefficient of soybean materials

接触材料	变化区间	平均值
大豆-钢板	0.14 ~ 0.32	0.31
茎秆-钢板	0.43 ~ 0.79	0.58
豆荚-钢板	0.39 ~ 0.62	0.46

2 膜下大豆脱粒装置设计

2.1 脱粒试验台整体结构

研制的纵轴流大豆脱粒分离装置结构如图 7 所示,纵轴流大豆脱粒装置主要由喂入滚筒、脱粒滚筒、凹板筛、顶盖、接料盒、输送带和机架等组成,为了使物料随着滚筒的旋转而进行轴向运动,在顶盖内侧设置有导流板。

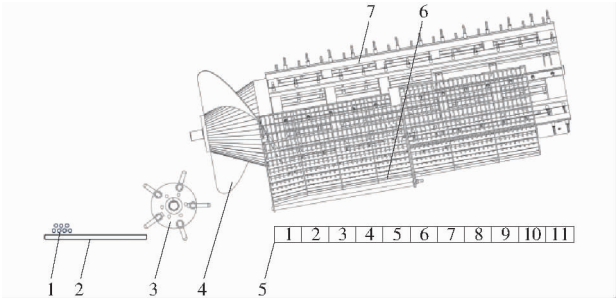


图 7 大豆脱粒分离装置结构图

Fig. 7 Structural diagram of soybean threshing and separating unit

1. 膜下大豆 2. 传送带 3. 喂入滚筒 4. 螺旋喂入叶轮 5. 接料盒 6. 凹板筛 7. 脱粒滚筒

2.2 工作原理

纵轴流大豆脱粒装置的工作流程主要包括 4 个步骤:喂入、脱粒、分离和排出。在大豆脱粒过程中,大豆植株先经喂入滚筒,再通过螺旋喂入装置将大豆送入后方脱粒滚筒和凹板筛构成的脱粒室。在脱粒过程中,物料在脱粒滚筒和导流板作用下,同时绕滚筒轴向旋转并沿滚筒轴向向后移动。在这个过程

中，大豆植株受到脱粒滚筒与凹板筛的打击、搓擦和挤压作用，大豆籽粒从豆荚中脱出，并与部分豆荚、碎叶及较小的短茎秆一起通过凹板筛的筛孔落入下方接料盒中。长茎秆和已脱粒的豆荚等杂质则继续沿滚筒轴向移动，最终从脱粒装置后端的排草口排出，完成大豆的脱粒分离。

2.3　脱粒装置关键部件设计

2.3.1　螺旋喂入叶轮设计

针对新疆膜下大豆茎秆含水率高达 34.00%，且易缠绕、茎青荚干突出的物料特性，螺旋喂入叶轮的设计必须实现对高含水率物料的强制抓取与连续顺畅输送，从而有效防止入口堵塞。因此，选用圆锥形喂入叶轮，其结构能够对进入的松散植株形成轴向压缩与导向，可有效克服因茎秆含水率过大而产生的喂入阻力，这一优势是圆柱形结构所不具备的。在螺旋叶轮个数选择上，采用 2 螺旋叶轮设计。虽然 4 螺旋叶轮能提供更多的输送通道，但 2 螺旋叶轮结构能最大限度地避免高速旋转时对湿黏物料产生的封闭效应，从而确保喂入过程的稳定。

为确定物料能被顺利输送至脱粒室所需的螺旋叶片升角，对叶片上任意点 A 处的物料进行受力分析，如图 8 所示。

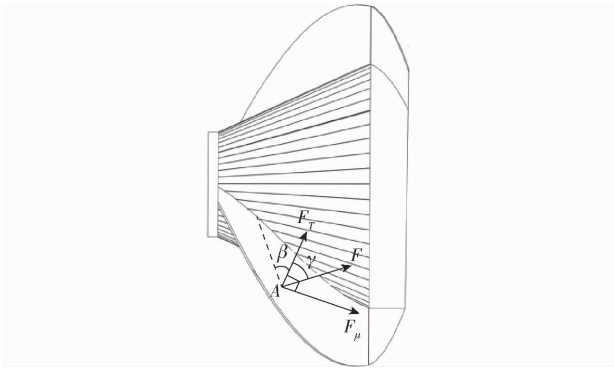


图 8　物料受力分析

Fig. 8　Force analysis of materials

在脱粒过程中，为实现螺旋喂入叶轮对物料有效向后推送，物料沿叶轮轴向所受到的推力应大于其所受到的阻力，计算式为

$$F_T\cos\beta > F_\mu\sin\beta \tag{5}$$

其中

$$F_\mu = F_T\tan\gamma \tag{6}$$

式中　F_μ——螺旋叶片与物料之间的摩擦力，N

F_T——叶片对物料的法向推力，N

γ——物料与叶片的摩擦角，(°)

β——螺旋叶片升角，(°)

由大豆力学特性试验可知，茎秆和螺旋叶片的平均摩擦因数为 0.58，联立式(4)求得大豆与螺旋叶片的摩擦角度取值范围 0°～59.9°，取 β = 30°。

2.3.2　脱粒滚筒长度设计

脱粒滚筒的长度是平衡作业能力与动力消耗的关键设计参数。一般而言，增加滚筒长度可处理更大喂入量，但也会导致功耗上升和机具结构增大。脱粒滚筒长度计算式为[26]

$$L \geqslant \frac{Q_f}{Q_a} \tag{7}$$

式中　L——脱粒滚筒长度，mm

Q_f——脱粒滚筒喂入量，取 7 kg/s

Q_a——脱粒滚筒单位长度允许喂入量，取 3～5 kg/(s·m)

考虑膜下大豆植株具有茎青荚干、含水率高的特点，在脱粒过程中需要更长的作用行程以实现充分的脱粒，因此将脱粒滚筒长度 L 设计为 1 600 mm。

2.3.3　脱粒滚筒直径设计

脱粒滚筒直径需协调防缠绕能力、分离效率与功耗。直径不足易致高含水率茎秆缠绕且分离面积有限，直径过大则增加无效功耗。依据轴流滚筒设计通则，直径应大于 350 mm[27]，其计算式为

$$D = \frac{MS}{\pi} + 2h \tag{8}$$

式中　D——脱粒滚筒直径，mm

M——脱粒滚筒上的齿杆排数

S——相邻齿杆的中心距，mm

h——脱粒钉齿工作高度，mm

参考常用联合收获机脱粒滚筒结构，取 M = 9，S = 160 mm，h = 65 mm，代入式(8)求得脱粒滚筒的齿顶圆直径 D 为 589 mm，取整 D = 590 mm。

纵轴流钉齿滚筒的转速 n 计算式为[28]

$$n = \frac{6\,000v}{\pi D} \tag{9}$$

式中　v——脱粒滚筒线速度，m/s

参考《农业机械设计手册》，钉齿滚筒大豆脱粒线速度为 12～15 m/s[29]，经计算，脱粒滚筒的理论转速为 485 r/min。为系统研究膜下大豆在不同转速下的脱出物分布规律，后续试验以取整后的 500 r/min 作为基准转速，并以此为中心，向下选取 400 r/min、向上选取 600 r/min 作为转速试验水平。

2.3.4　凹板筛设计

凹板筛是决定脱粒装置分离性能与籽粒损伤程度的关键部件。针对膜下大豆易堵塞、茎秆韧湿的特点，选用栅格式凹板筛，其纵向栅条构成的通道利于籽粒与细小杂余通过，并能减少高含水率碎茎的堵塞。参考文献[27]，为保证充分分离并兼顾防堵，凹板筛包角设为 190°，筛孔尺寸为 50 mm×20 mm。

2.3.5 脱粒滚筒顶盖设计

脱粒顶盖的内壁导流板是调控物料轴向运动的关键。为防止膜下大豆堵塞,并优化脱粒行程,参考文献[30],设计导流板结构,顶盖前半部分导流板螺旋升角设为17°,以提供较强的初始轴向推送力,后半部分螺旋升角设为13°延长物料滞留时间,增强后续揉搓与分离效果。顶盖内部设有多条导流板,顶盖整体结构尺寸为:长1 700 mm、宽880 mm。

3 变参数下膜下大豆脱出物分布规律

3.1 试验设计

试验在新疆农垦科学院的工程实验室进行,选取农垦科学院大豆试验田的新振豆1号品种大豆作为试验材料,开展单因素脱粒试验。大豆联合收获机在田间工作时,喂入量太小会降低作业效率,喂入量过大则会导致堵塞,因此驾驶员会依据田间实际情况调整作业速度来改变喂入量大小,本试验选取田间收获常用喂入量6、7、8 kg/s作为试验条件。由于膜下大豆草谷比大,茎秆含水率高,因此结合试验台情况适当提高滚筒转速,以500 r/min作为基准转速,确定滚筒转速水平为400、500、600 r/min。依据现有大豆脱粒试验台结构并参考文献[29],确定脱粒间隙分别为15、25、35 mm开展试验,试验设计方案如表5所示[31-32]。

表5 单因素试验方案

Tab.5 Experimental scheme of single factor

水平	因素		
	喂入量 $A/(\mathrm{kg\cdot s^{-1}})$	滚筒转速 $B/(\mathrm{r\cdot min^{-1}})$	脱粒间隙 C/mm
1	6	400	15
2	7	500	25
3	8	600	35

如图9所示,试验所搭建的大豆脱粒分离试验台主要包括驱动电机、接料盒、脱粒装置、控制柜、传送带等。



图9 大豆脱粒试验台

Fig.9 Soybean dehulling test bench

1.驱动电机 2.接料盒 3.脱粒装置 4.控制柜 5.传送带

试验台采用双伺服驱动架构,分别独立控制脱粒滚筒转速与喂入速度。在脱粒滚筒转速控制方面,由一台交流伺服电机直接驱动滚筒,上位工控机设定的转速指令经控制器解析后,驱动电机精确运行,实现转速在0~1 200 r/min无级调节。在喂入均匀性控制方面,由另一台交流伺服电机驱动传送带,以相同原理实现对喂入传送带速度的控制,速度在0~5 m/s内实现无级调节。两套系统均通过电涡流传感器配合测速齿轮实时监测实际转速与线速度。

如图7所示,根据试验要求,在脱粒滚筒和凹板筛下方设置了11排9列的接料盒,用于收集脱粒过程中从凹板筛筛孔掉落的脱出物。每个区域的尺寸为130 mm×100 mm。接料盒在滚筒轴向上的编号为1~11,径向上的编号为1~9。

试验开始前,使用电子秤称取所需的大豆植株,并根据不同的喂入量进行调整。然后将大豆均匀地铺设在传送带上,并留有足够的空间用于传送带加速。脱粒滚筒转速稳定后,启动传送带开始试验。将脱粒后的脱出物收集在接料盒中,脱出物按顺序取出后进行称量,脱出物如图10所示。



(a) 接料盒内脱出物 (b) 脱粒滚筒外脱出物

图10 大豆脱出物

Fig.10 Soybean extracted matter

3.2 脱出物分布规律分析

为客观评价脱出物分布的均匀性,引入变异系数作为统一的量化指标,定义轴向变异系数与径向变异系数,其值等于该方向所有接料盒质量的标准差与平均值的比值[33]。变异系数越低,代表分布越均匀。各试验条件下的变异系数分析结果如表6所示。

表6 不同试验条件下的脱出物分布变异系数

Tab.6 Coefficient of variation of extracted matter distribution under different testing conditions

试验因素	水平	轴向变异系数/%	径向变异系数/%
滚筒转速	1	52.18	62.06
	2	50.05	50.82
	3	67.33	68.48
喂入量	1	67.43	68.51
	2	69.47	69.33
	3	68.25	78.58
脱粒间隙	1	40.30	67.04
	2	39.68	59.73
	3	39.38	64.87

3.3　滚筒转速对脱出物分布规律的影响

在喂入量为 6 kg/s、脱粒间隙为 25 mm 的条件下，滚筒转速的增加显著影响脱出物的分布[34]。如图 11a 所示，轴向分布上，脱出物质量从第 1 排迅速升高至第 3 排达到峰值，随后下降，第 6 排略有回升后持续降低。随着滚筒转速从 400 r/min 增加至 600 r/min，脱出物质量峰值依次增大。由表 6 可知，3 种转速下的轴向变异系数分别为 52.18%、50.05% 和 67.33%。其中，500 r/min 时变异系数最低，分布最为均匀，600 r/min 时变异系数最高，均匀性最差。

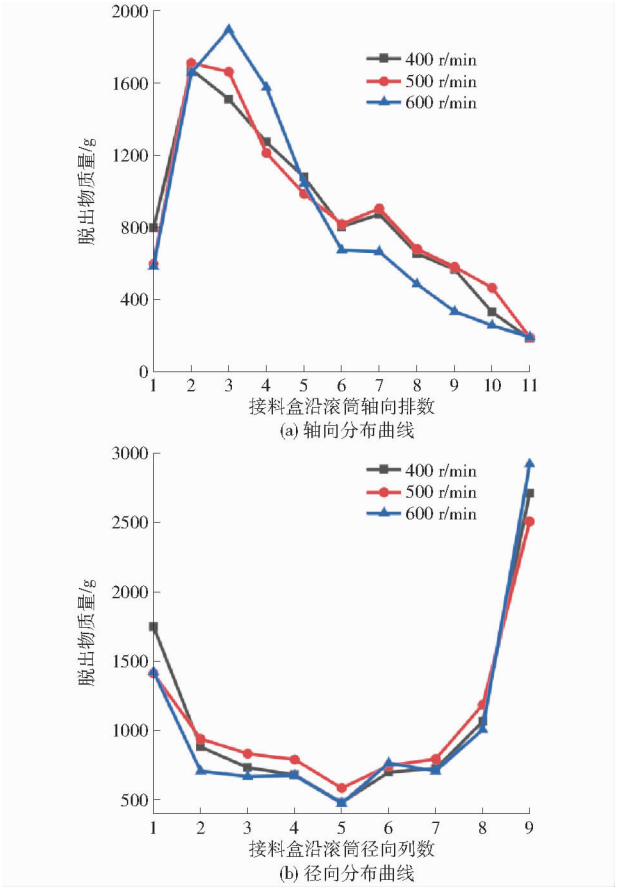


图 11　不同滚筒转速下脱出物质量分布

Fig. 11　Mass distribution of threshed mixture at different drum speeds

径向分布如图 11b 所示，脱出物质量自第 1 列到第 5 列递减，随后增至第 9 列达到最高，整体呈“V”形分布。径向变异系数的变化趋势与轴向一致，在 400、500、600 r/min 下分别为 62.03%、50.82% 和 68.48%。500 r/min 工况同样取得了最佳的径向分布均匀性。

产生上述现象的原因如下：当滚筒转速升高时，脱粒元件的打击作用增强使豆荚在滚筒前段迅速脱粒，脱出物大量分离。同时，高含水率茎秆在强离心力作用下易贴附凹板筛并相互缠绕，增厚的物料层阻碍了导流板的轴向推送，导致物料后移速度减缓。因此，前期脱粒过快与轴向输送受阻共同导致轴向分布更呈“前多后少”趋势。物料在离心力与导向作用下持续向滚筒右侧聚集，形成径向“V”形分布，转速过高时，这种力学效应被放大，故 600 r/min 时径向变异系数最大。结果表明，500 r/min 是本试验条件下兼顾脱粒效率与分布均匀性的较优转速。

3.4　喂入量对脱出物分布规律的影响

试验确定 500 r/min 为较优转速，但田间作业状态复杂，受植株密度、地形等因素影响，联合收获机在实际收获中难以始终维持在最优转速。为探究在偏离最佳转速的情况下，喂入量、脱粒间隙作业参数对脱出物分布均匀性的影响规律，以及是否仍可通过参数调节改善均匀性，选择 600 r/min 作为后续喂入量与脱粒间隙试验的固定转速。

在滚筒转速为 600 r/min、脱粒间隙为 25 mm 的条件下，设置喂入量分别为 6、7、8 kg/s 进行试验。如图 12 所示，不同喂入量下脱出物的轴向与径向分布形态相似。

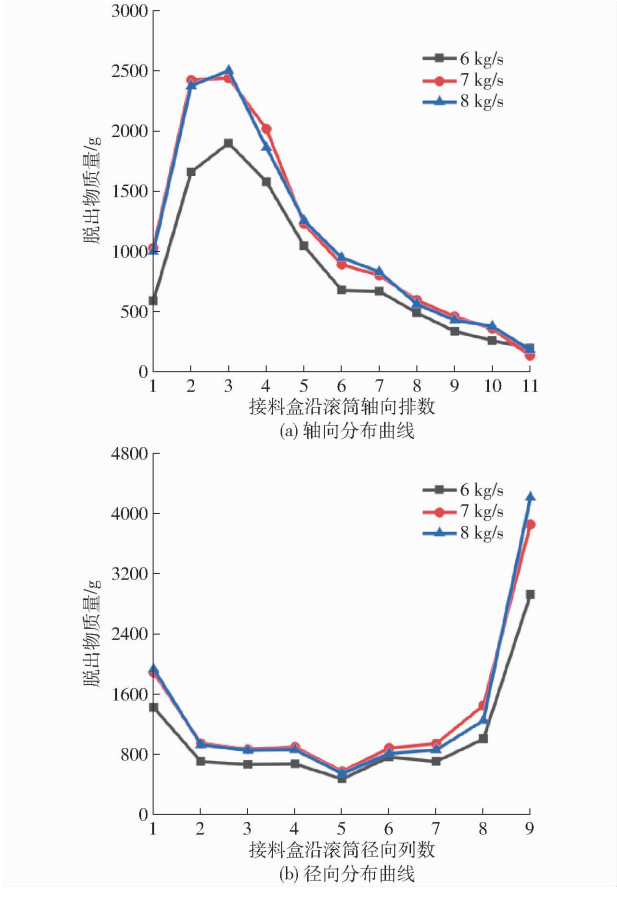


图 12　不同喂入量下脱出物质量分布

Fig. 12　Mass distribution of threshed mixture at different feeding rates

如图 12a 所示，沿滚筒轴向，脱出物质量均呈现先迅速增加后减少的趋势。在 3 种喂入量下轴向变异系数分别为 67.43%、69.47% 和 68.25%，变化幅

度较小,表明喂入量对轴向分布均匀性的影响有限。如图 12b 所示,脱出物质量先减少后增加,但径向变异系数随喂入量增加显著增加,分别为 68.51%、69.33% 和 78.58%。当喂入量增至 8 kg/s 时,径向变异系数达到最高,表明分布不均匀性急剧增加。这是由于喂入量增大,使得脱粒室内物料密度与层厚增加[35],增强了物料与元件间的挤压作用,使得整体脱出物质量增加,同时也加剧了物料在滚筒右侧的堆积,使得径向分布均匀性显著降低。陈艳普等[36]的研究表明轴向分布呈逐渐减小的趋势,这是因为该研究中接料盒的尺寸较大,将脱粒滚筒前部的物料都承接在同一接料盒内而本研究接料盒布置更加密集,脱粒滚筒后端脱出物变化趋势相同。综上所述,喂入量变大增加了径向分布的不均匀性。

3.5 脱粒间隙对脱出物分布规律的影响

在喂入量为 6 kg/s、滚筒转速为 600 r/min 的条件下,设置脱粒间隙分别为 15、25、35 mm 开展试验。如图 13 所示,不同脱粒间隙下脱出物的轴向与径向分布形态基本相似。

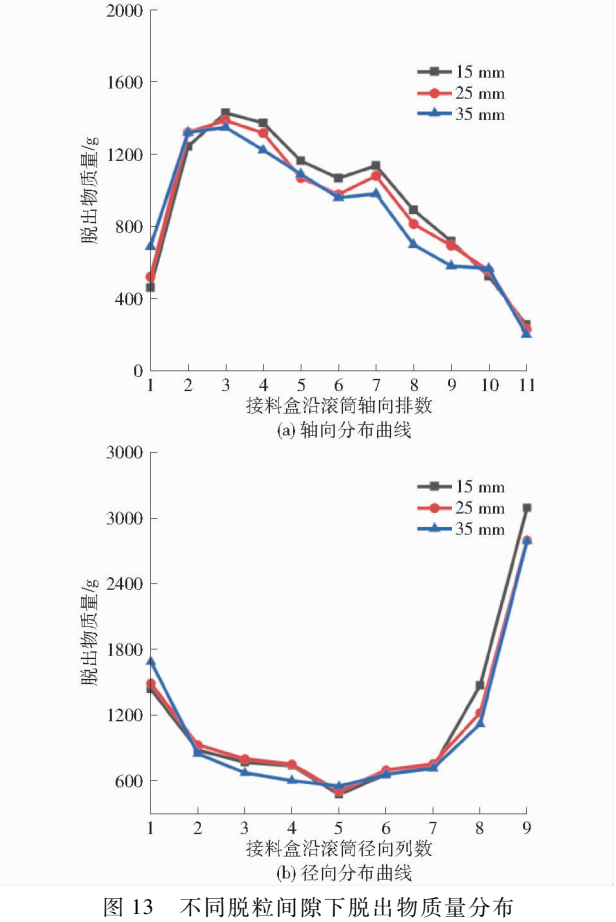


图 13 不同脱粒间隙下脱出物质量分布

Fig. 13 Mass distribution of threshed mixture for different threshing clearance

如图 13a 所示,轴向分布趋势为先迅速升高然后缓慢下降。轴向变异系数随间隙增大从 40.30% 持续改善至 39.38%,表明增大间隙使物料轴向运动更平缓、分布更均匀。如图 13b 所示,脱出物质量在径向上的分布规律为先下降后升高,但其变异系数在 25 mm 间隙时最优,变异系数为 59.73%,而间隙减小至 15 mm 或增大至 35 mm 时,均匀性均有所下降,系数分别增至 67.04% 与 64.87%。

产生上述规律的原因在于,脱粒间隙通过改变物料流状态影响分布。适当增大间隙有利于改善物料轴向运动的均匀性。对于径向分布,25 mm 的间隙在减小拥堵与保持导向作用之间取得了最佳平衡,从而实现较优的均匀性。间隙过小易导致拥堵与强制挤压,间隙过大则削弱了对物料的有效分布作用。因此,脱粒间隙对分布均匀性的影响表现为:增大间隙可改善轴向均匀性,而径向均匀性则存在一个明确的最优值,对应本试验中的 25 mm 脱粒间隙。

综上所述,针对新疆膜下主栽品种新振豆 1 号,其最显著的特征是收获期呈现“茎青荚干”状态。其茎秆含水率达 34.0%,高于黄淮海地区常规大豆的 28.4%[15]。茎秆与钢材的摩擦因数为 0.58,致使脱粒过程中易发生缠绕、输送阻力增大。上述物料特性直接影响了脱出物的分布形态。脱出物在滚筒径向呈现“两侧高、中间低”的分布规律。这与李奇等[37]在清选装置试验中发现的清选筛面上“前面多后面少、两边多中间少”的分布现象在机理上相互印证,共同反映了物料在脱粒作用下的运动特征。

因此,针对新疆膜下大豆的脱粒装置,其设计关键需从单纯追求脱净率,转向兼顾高含水率茎秆的顺畅输送与籽粒破损的平衡问题。这要求脱粒装置必需强化轴向强制输送能力以防止缠绕,通过更长的作用行程实现充分脱粒,并将脱粒间隙等参数作为调控分布均匀性的关键。

4 结论

(1)通过对膜下大豆的物理及力学试验得到,大豆籽粒的长度、宽度、厚度主要集中在 8.4 ~ 9.3 mm、7.46 ~ 8.31 mm、6.1 ~ 7.0 mm 之间,均近似于正态分布。大豆籽粒与豆荚的含水率较为接近,分别为 12.79% 与 15.15%,茎秆含水率最高为 34.00%。豆荚在侧放和立放时所受破荚力大致相近。大豆籽粒的双子叶结构导致平放时的压缩力明显高于侧放和立放,脱粒过程中大豆最大受力不能超过 73.7 N,3 种物料中茎秆所承受压缩力最大。大豆籽粒、茎秆、豆荚与钢板之间的摩擦因数分别为 0.31、0.58、0.46,茎秆与脱粒元件之间的摩擦因数最大。

（2）基于新疆膜下大豆关键力学与物理特性，对脱粒装置关键部件进行了针对性设计。依据茎秆含水率以及与钢板摩擦因数特性，强化了滚筒与导流板的轴向输送能力，有效防止高含水率茎秆缠绕堵塞。依据籽粒侧放受力阈值，控制脱粒元件作用力上限，可减少籽粒破碎。结合物料含水率与摩擦特性，优化脱粒行程与工作间隙，在保障脱净率的同时，提升脱出物轴向与径向分布的均匀性。

（3）通过对滚筒转速、喂入量与脱粒间隙三因素的试验分析可知，脱出物在轴向上呈先升后降趋势，在径向上表现为两侧高、中间低的分布特征。结果表明，在喂入量 6 kg/s、脱粒间隙 25 mm 的条件下，滚筒转速为 500 r/min 时分布均匀性最优，轴向与径向变异系数分别降至 50.05% 和 50.82%。由于田间作业中脱粒滚筒难以始终维持在最优转速，进一步在非最优转速 600 r/min 下开展喂入量与脱粒间隙试验。结果表明，喂入量由 6 kg/s 增至 8 kg/s 时，径向变异系数由 68.51% 升至 78.58%，均匀性显著下降，而将脱粒间隙调整至 25 mm，则可使径向变异系数从 68.48% 改善至 59.73%。表明即使单一工作参数偏离最佳值，通过合理调节其他作业参数，仍可有效控制脱出物分布变异系数、改善分布均匀性，为脱粒装置结构优化及复杂田间环境下的作业参数设置提供了依据。

参 考 文 献

[1] 杨辉，林嘉柏，林佳. 外生冲击下中国大豆产业安全：现状、挑战与机遇[J]. 大豆科学，2022，41(3)：352－357.
YANG Hui, LIN Jiabai, LIN Jia. Analysis of China's soybean industry safety under exogenous impact: current situation, challenges and opportunities[J]. Soybean Science, 2022, 41(3): 352－357. (in Chinese)

[2] ZHU Q, WANG F, YI Q, et al. Modeling soybean cultivation suitability in China and its future trends in climate change scenarios[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118934.

[3] 向友珍，安嘉琪，赵笑，等. 基于无人机多光谱遥感的大豆生长参数和产量估算[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：230－239.
XIANG Youzhen, AN Jiaqi, ZHAO Xiao, et al. Soybean growth parameters and yield estimation based on UAV multispectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 230－239. (in Chinese)

[4] 朱彦涛，苟升学，穆建新，等. 大豆产业振兴背景下机械化收获发展思考[J]. 农业工程，2023，13(6)：10－14.
ZHU Yantao, GOU Shengxue, MU Jianxin, et al. Reflections on development of mechanized harvesting under background of revitalizing soybean industry[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(6): 10－14. (in Chinese)

[5] 郑祖庭. 2023 年国内外大豆市场回顾及 2024 年展望[J]. 黑龙江粮食，2024(2)：23－26，12.
ZHENG Zuting. Review of domestic and international soybean markets in 2023 and outlook for 2024[J]. Heilongjiang Grain, 2024(2): 23－26，12. (in Chinese)

[6] 连潇，王建吉，朱砚. 大豆收获机割台关键技术及损失研究现状分析[J]. 中国农机化学报，2024，45(8)：8－13.
LIAN Xiao, WANG Jianji, ZHU Yan. Research status analysis of key technology and loss of soybean harvester header[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 8－13. (in Chinese)

[7] 曾凯，战勇，张恒斌，等. 新疆春大豆膜下滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技，2023，46(5)：16－17.

[8] 杨德旭，姜德龙，沈永哲，等. 切轴流式双滚筒大豆种子脱粒机设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(9)：102－110.
YANG Dexu, JIANG Delong, SHEN Yongzhe, et al. Design and test on soybean seed thresher with tangential-axial flow double-roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 102－110. (in Chinese)

[9] 高连兴，郑世妍，陈瑞祥，等. 喂入辊轴流滚筒组合式大豆种子脱粒机设计与试验[J]. 农业机械学报，2015，46(1)：112－118.
GAO Lianxing, ZHENG Shiyan, CHEN Ruixiang, et al. Design and experiment on soybean breeding thresher of double feeding roller and combined threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 112－118. (in Chinese)

[10] BAIDHE E, CLEMENTSON C. Modelling rupture and relaxation characteristics of soybean under compressive loading[J]. Biosystems Engineering, 2025, 254: 104137.

[11] SOYOYE B O, ADEMOSUN O C, AGBETOYE L A S. Determination of some physical and mechanical properties of soybean and maize in relation to planter design[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2018, 20(1): 81－89.

[12] JIN C, YAN K, GUO H, et al. An experimental and finite element analysis of the characteristics of soybean grain compression damage[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(7): e13721.

[13] 滕悦江，金诚谦，印祥，等. 大豆脱粒过程籽粒力学特性试验研究[J]. 农机化研究，2020，42(12)：121－128.
TENG Yuejiang, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Experiment and research on mechanical properties of soybean during threshing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(12): 121－128. (in Chinese)

[14] 朱红媛，王树林，刘春山，等. 谷物力学特性的试验研究[J]. 农机化研究，2024，46(2)：193－197.
ZHU Hongyuan, WANG Shulin, LIU Chunshan, et al. Experimental study on mechanical properties of grain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(2): 193－197. (in Chinese)

[15] 李庆伦，金诚谦，印祥，等. 黄淮海地区大豆品种生物及力学特性研究[J]. 农机化研究，2021，43(4)：185－190.
LI Qinglun, JIN Chengqian, YIN Xiang, et al. Study on biological and mechanical properties of some soybean varieties in Huang－Huai－Hai region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 185－190. (in Chinese)

[16] 杨德旭，刘德军，高连兴. 完熟期大豆炸荚力学特性试验[J]. 沈阳农业大学学报，2012，43(5)：576－580.
YANG Dexu, LIU Dejun, GAO Lianxing. Experiments of pod-split mechanical performance in period of soybean full ripe[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(5): 576－580. (in Chinese)

[17] 陈杰,张黎骅,谭涛.大豆秸秆剪切力学特性的研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(1):98 - 102.
CHEN Jie, ZHANG Lihua, TAN Tao. Study on shearing properties of soybean straw[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, 43(1): 98 - 102. (in Chinese)
[18] 谭云峰, 陈霖, 胡森, 等.南夏豆 25 收获期植株离散元建模方法与参数标定[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(5): 77 - 87.
TAN Yunfeng, CHEN Lin, HU Sen, et al. Discrete element modeling method and parameter calibration of Nanxia Dou 25 at harvest stage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(5): 77 - 87. (in Chinese)
[19] 康家鑫, 王修善, 谢方平, 等.大豆联合收获机对称可调式凹板筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 11 - 22.
KANG Jiaxin, WANG Xiushan, XIE Fangping, et al. Design and experiment of symmetrical adjustable concave for soybean combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(2): 11 - 22. (in Chinese)
[20] 刘安稳,谢方平,朱立学,等.大豆联合收获机脱粒间隙自适应装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(12):322 - 330,342.
LIU Anwen, XIE Fangping, ZHU Lixue, et al. Design and experiment of adaptive threshing gap device for soybean combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 322 - 330, 342. (in Chinese)
[21] 李平,古愉川,冯伟,等.山地大豆轻简联合收获机脱粒装置优化研究[J].农机化研究,2025,47(10):99 - 106.
LI Ping, GU Yuchuan, FENG Wei, et al. Optimization of threshing device of light and simple combined harvester for mountain soybean[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(10):99 - 106. (in Chinese)
[22] NIU L, ZHA Z, YANG H, et al. Design and experiment of flexible threshing device with variable stiffness for corn[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 836.
[23] LIU W, CHEN X, ZENG S. Design and parameter optimization of a rigid-flexible coupled rod tooth threshing device for ratoon rice based on MBD - DEM[J]. Agriculture, 2024, 14(11): 2083.
[24] 张仁龙,夏先飞,宋志禹,等.豆类机械化脱粒技术现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2025,46(9):39 - 48.
ZHANG Renlong, XIA Xianfei, SONG Zhiyu, et al. Present status and development trend of mechanized threshing technology of beans[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2025,46(9):39 - 48. (in Chinese)
[25] 闫以勋,赵淑红,杨悦乾,等.成熟期大豆茎秆力学特性研究[J].东北农业大学学报,2012,43(5):46 - 49.
YAN Yixun, ZHAO Shuhong, YANG Yueqian, et al. Study on mechanics properties of soybean stems in mature stage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012,43(5):46 - 49. (in Chinese)
[26] 张红梅,胡经营,何勋,等.基于纵轴流开式玉米脱粒装置的优化设计与试验[J].河南农业大学学报,2025,59(1):122 - 135.
ZHANG Hongmei, HU Jingying, HE Xun, et al. Optimization design and experiment of open corn threshing device based on longitudinal axial flow[J]. Journal of Henan Agricultural University,2025,59(1):122 - 135. (in Chinese)
[27] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
[28] 吴守一.农业机械学(下)[M].北京:中国农业机械出版社,1992.
[29] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
[30] 谢干.鼓形杆齿式纵轴流脱粒分离装置设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2020.
XIE Gan. Design and experimental research of deum-shaped rod-tooth longitudinal axial flow threshing and separating device [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2020. (in Chinese)
[31] YAN D, YU J, LIANG L, et al. A comparative study on the modelling of soybean particles based on the discrete element method[J]. Processes, 2021, 9(2):286.
[32] 宁新杰,金诚谦,李庆伦,等.黄淮海地区两种大豆脱出物物理特性测定与分析[J].农机化研究,2021,43(1):163 - 168,175.
NING Xinjie, JIN Chengqian, LI Qinglun, et al. Measurement and analysis of physical parameters of threshed of two soybean varieties in Huang - Huai - Hai region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 163 - 168,175. (in Chinese)
[33] 马朋勃,李闻曦,郭磊,等.圆捆机链齿式饲草碎料均匀供料装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(11):113 - 121.
MA Pengbo, LI Wenxi, GUO Lei, et al. Design and experiment of chain-tooth type chopped forage uniform feeding device for round bale[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(11):113 - 121. (in Chinese)
[34] 李耀明,王建鹏,徐立章,等.联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(8):68 - 75.
LI Yaoming, WANG Jianpeng, XU Lizhang, et al. Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 68 - 75. (in Chinese)
[35] ALWAN S K, SHARIFI A, ALJIBOURI M A, et al. Effect of threshing machines, rotational speed and grain moisture on corn shelling[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2019,25(2):243 - 255.
[36] 陈艳普, 康艳, 王廷恩, 等.大豆收获机纵轴流柔性脱粒装置脱出物分布规律[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 104 - 111.
CHEN Yanpu, KANG Yan, WANG Tingen, et al. Distribution regularities of the threshed mixtures in longitudinal axial flow flexible thresher of soybean harvester[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(9): 104 - 111. (in Chinese)
[37] 李奇,谢方平,康家鑫,等.4LZ - 4.0 大豆联合收割机清选装置参数优化及脱出物分布试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(6):737 - 743.
LI Qi, XIE Fangping, KANG Jiaxin, et al. Parameter optimization and experiment on post-threshed mixture for the cleaning device in 4LZ - 4.0 combine harvester of soybean[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences),2022, 48(6):737 - 743. (in Chinese)