doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.032

小粒径苜蓿种子机械梳脱增流式收获机设计与试验

潘烤鑫[1,2]　张　庆[1,2]　尤　泳[1,2]　孙立皓[1,2]　胡建良[3]　王德成[1,2]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学智能草业装备与智慧草业研究中心, 北京 100083;
3. 石家庄鑫农机械有限公司, 石家庄 052400)

摘要: 针对当前国内外小粒径苜蓿种子机械化收获缺少专用采收装备且采净率低等问题,设计了一种机械梳脱耦合负压气流吸收的增流式半喂入苜蓿种子收获机。根据苜蓿植株生物学特性和种植农艺提出了机械梳齿梳脱、气流吸附与运移、负压风机增流的小粒径苜蓿种子机械化采收方案。基于苜蓿种子收获过程损失抑制机理进行了梳脱割台关键部件设计,针对苜蓿种子收获过程中的未梳损失,设计梳齿结构对种荚进行捋穗式梳脱。针对落粒与飞溅损失,设计滚筒与壁面组合式气流喉口和负压风机对种子、种荚进行吸附与运移。在此基础上,开展了梳齿梳脱过程中的运动学特性分析,确定了梳脱速比有效范围为 36 ~ 50,梳脱滚筒半径为 290 mm,并识别出影响未梳损失的关键参数为梳脱滚筒转速、中心离地高度和割台行进速度。利用 CFD 仿真结合 CCD 正交试验研究了梳脱滚筒转速、气流喉口尺寸与负压风机转速交互作用对割台流场的影响规律,并通过响应面法确定气流喉口尺寸、梳脱滚筒转速和负压风机转速优化值分别为 83 mm、1 000 r/min 和 1 450 r/min。为验证整机及梳脱割台功能有效性,开展了苜蓿种子收获样机田间试验,结果表明:当梳脱滚筒中心离地高度为 430 mm、机具行进速度为 0.68 m/s 时,梳脱后苜蓿植株无种荚漏梳现象,苜蓿种子采净率达到 83.4%,作业效率达 0.73 hm^2/h,满足苜蓿种子机械化采收指标要求,为小粒径种子采收机设计提供了参考。

关键词: 小粒径苜蓿种子; 收获机; 梳齿梳脱; 负压气流

中图分类号: S225.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0342-15　　**OSID**:

Design and Experiment of Flow-enhanced Mechanical Combining Harvester for Small-seeded Alfalfa

PAN Kaoxin[1,2]　ZHANG Qing[1,2]　YOU Yong[1,2]　SUN Lihao[1,2]　HU Jianliang[3]　WANG Decheng[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Intelligent Grassland Equipment and Smart Grassland Research Center*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Shijiazhuang Xinnong Machinery Co., Ltd.*, *Shijiazhuang* 052400, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of lacking dedicated harvesting equipment and having low clean harvest rates for small-seeded alfalfa in mechanized harvesting both domestically and internationally, a half-feed alfalfa seed harvester combining mechanical combing separation with negative pressure airflow suction and flow enhancement was designed. Based on the biological characteristics of alfalfa plants and planting agronomy, a mechanized harvesting scheme was proposed, including mechanical combing separation, airflow adsorption and transportation, and enhanced airflow through a fan for small-seeded alfalfa. According to the mechanism of loss suppression during the alfalfa seed harvesting process, key components of the combing platform were designed. For uncombed losses during the alfalfa seed harvesting process, a combing structure was designed to perform combing separation of highly dispersed seed pods. For seed fall and splash losses, a drum-wall combination airflow throat and negative pressure fan system were designed to adsorb and transport the seeds and pods. On this basis, a kinematic analysis of the combing detachment process was conducted. It was determined that the effective range for the comb detaching speed ratio was between 36 and 50, with a comb detaching drum radius of 290 mm. The

收稿日期: 2024-09-13　修回日期: 2024-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001902)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-34)

作者简介: 潘烤鑫(1999—),男,硕士生,主要从事苜蓿草种机械化收获技术与装备研究,E-mail: pankaoxin@cau.edu.cn

通信作者: 张庆(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事苜蓿草种机械化收获技术与装备研究,E-mail: zhangqingbit@cau.edu.cn

critical parameters affecting incomplete combing losses were identified as the rotational speed of the comb detaching drum, the center-to-ground height, and the forward speed of the harvesting platform. Using CFD simulation combined with CCD orthogonal experimental methods, the interaction effects of the combing drum rotational speed, airflow throat dimensions, and negative pressure fan speed on the platform airflow field were explored. Using response surface methodology, the optimized values for the airflow throat dimensions, combing drum rotational speed, and negative pressure fan speed were determined to be 83 mm, 1 000 r/min and 1 450 r/min, respectively. To verify the effectiveness of the whole machine and the combing platform function, field trials of the alfalfa seed harvesting prototype were conducted. Results showed that when the height of the combing drum center above ground level was 430 mm and the machine's travel speed was 0.68 m/s, there was virtually no uncombed seed pod after combing, the alfalfa seed clean harvest rate reached 83.4%, and the operational efficiency was 0.73 hm^2/h, meeting the mechanized harvesting index requirements for alfalfa seeds, providing a reference for the design of small-seeded seed harvesters.

Key words: small-seeded alfalfa; harvester; combing separation by mechanical teeth; negative pressure airflow

0　引言

苜蓿作为多年生豆科草本植物,因其较高的产量、长久的收获期、强大的再生能力及丰富的营养价值等优点,在全球范围内被广泛种植[1-2]。截至 2023 年全球苜蓿种植面积约为 3.3×10^7 hm^2,其中我国苜蓿种植面积约为 2×10^6 hm^2,位居世界第 5,且逐年上升[3]。我国虽有广袤的苜蓿种植面积,但苜蓿种子产量及质量与美国、加拿大等发达国家相比还存在较大差距。随着国内畜牧业快速发展,苜蓿种子进口量明显增加[4]。苜蓿种子自给率不足已严重制约了我国牧草产业化发展[5-6]。因此,提高苜蓿草种产量及机械化收获技术已成为我国牧草产业发展关键[7-8]。

苜蓿种子机械化收获尚无专用设备,目前国内外普遍采用改制的全喂入联合收获机进行苜蓿种子收获[9-10],如改装后 JOHN DEERE W80 型及 LOVOL GM80 型等。由于苜蓿植株形态特征多样,草种在植株高度上分散分布,机械化采收时中下部草种容易出现漏采。苜蓿种子千粒质量不足 2 g,种子被螺旋种荚包裹,联合收获机正压送风清选会导致大量夹带损失[11]。目前采用联合收获机采收苜蓿种子损失率普遍在 50% 以上[12]。因此研发一款专用低损高效苜蓿种子收获机至关重要[13-14]。国外专用苜蓿种子收获机研发起步较早[15-17],在苜蓿种子收获技术方面有着较为厚实的基础,但草种采净率始终未能达到较高水平[18-19]。国内专用苜蓿种子收获机研发起步较晚[20-22],割台普遍采用梳脱式结构,没有考虑草种梳脱后收集问题,因此草种采净率一直未能得到有效提高。

针对上述问题,结合当前标准化苜蓿种田种植农艺模式及采收要求,本文基于机械-负压气流耦合收获技术设计一款增流式苜蓿种子收获机,采用横向布置捋穗式梳脱滚筒配合气流喉口对苜蓿草种进行梳脱与吸附,并通过负压风机增流加强对草种的吸附效果,以减少收获过程中的未梳、落粒与飞溅损失。对收获过程中的植株姿态变化进行运动学分析,梳理出影响苜蓿草种收获效果的关键参数,并利用 CFD 仿真方法结合响应面法得出参数数值,再通过田间试验验证草种收获机功能和性能指标。

1　整机结构与工作原理

1.1　苜蓿种田种植农艺模式

多数牧草种植采用常规苜蓿种植农艺模式来培育苜蓿种田,以求达到一田多用的目的[23-24]。该种农艺模式虽有较好的经济效益,但草种收获效益极低。其原因在于常规苜蓿草场播种量、种植行距、灌溉及施肥等种植技术侧重于苜蓿青贮收获,导致苜蓿生长过于茂盛而出现倒伏、缠绕等情况,加大了草种收获难度[25],不适宜机械化收获,因此苜蓿草种采净率一直未能得到有效提高。标准化苜蓿种田在种植农艺模式上与常规苜蓿草场有较大差别,如图 1 所示,每公顷种植数量由原来 6×10^6 ~ 7.5×10^6 株降至 7.5×10^4 ~ 1.05×10^5 株。并且通过合理控制灌水量和施肥量[26],避免了植株过度生长而出现大面积倒伏,因此苜蓿植株普遍高度为 80 cm 左右且较少出现缠绕,大大降低了草种机械化收获难度。

1.2　整机结构

整机作业机构主要由梳脱割台、输运装置和脱粒清选装置 3 部分组成,如图 2 所示。梳脱割台由压禾鼻、缓冲橡胶板、梳脱滚筒、梳脱齿、双螺旋输送器、割台外壳和挡板组成。输运装置则由运输刮板组成,采用链轮传动形式将种子与茎秆混合物运输

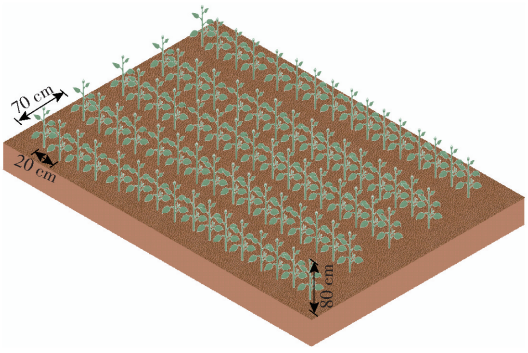

图 1 苜蓿种田种植农艺示意图

Fig. 1 Schematic of alfalfa field planting agronomy

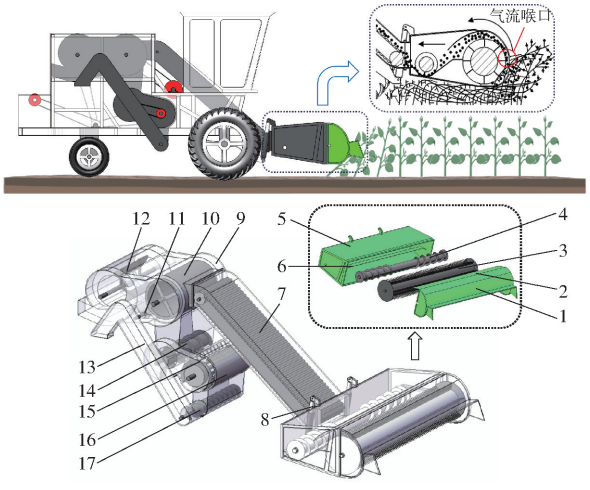

图 2 整机结构原理图

Fig. 2 Schematic of machine structure

1. 压禾鼻 2. 缓冲橡胶板 3. 梳脱滚筒 4. 双螺旋输送器 5. 割台外壳 6. 挡板 7. 运输装置 8. 升降液压缸 9. 清选装置外壳 10. 圆柱型通风网 11. 清洁刷 12. 负压风机 13. 升运器 14. 刮板 15. 脱粒清选滚筒 16. 筛网 17. 单螺旋输送器

至脱粒清选装置处。脱粒清选装置则由装置外壳、圆柱型通风网、负压风机、清选滚筒、单螺旋输送器和升运器等部分组成。

1.3 工作原理

工作时梳脱割台压禾鼻压弯苜蓿植株,同时梳脱滚筒带着梳脱齿高速旋转,此时压弯的苜蓿植株、梳脱滚筒、挡板、缓冲橡胶板、压禾鼻构成相对密封区域,如图 3 所示。由于缓冲橡胶板和压禾鼻内壁呈渐开线形,梳脱滚筒高速旋转产生的回旋气流通过气流喉口时,喉口上下方将形成一定的压力差,割台内部将呈负压状态。顶置的高速负压风机运转后会加强割台内部负压,从而将梳脱下的种子、种荚等向割台内进行吸附。梳脱滚筒上排布的梳脱齿能够对植株上的苜蓿种荚进行往复梳脱,梳脱下的苜蓿种子与种荚随负压气流抛撒至割台内,进入割台内速度较大的种子与种荚便会撞击缓冲橡胶板进行沉降,双螺旋运输器则将种子种荚从割台出料口排出,运输装置将种子种荚运输至脱粒清选装置内部,在完成种子二次脱粒与清选工作后,苜蓿种子从升运器中排出,从而完成采收工作。

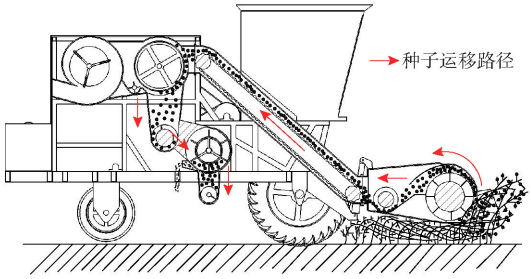

图 3 整机工作原理图

Fig. 3 Schematic of machine operation

2 梳脱割台结构设计与梳运机理分析

2.1 梳脱割台结构设计

2.1.1 梳脱滚筒结构设计与运动学分析

梳脱滚筒是割台重要组成部分,其结构、尺寸影响草种梳脱效率和效果,如图 4 所示,共有 8 排捋穗式梳齿均匀焊接在梳脱滚筒上。捋穗式梳齿在功能上可划分为 3 个区域,包括分流区、初脱区和复脱区。分流区将植株枝杈分开,使每个脱粒区间都能分配到一定数量的待脱粒茎秆。初脱区对植株进行初次脱粒,随着机具行进植株会逐渐进入复脱区,此时复脱区捋穗孔对植株进行复脱。

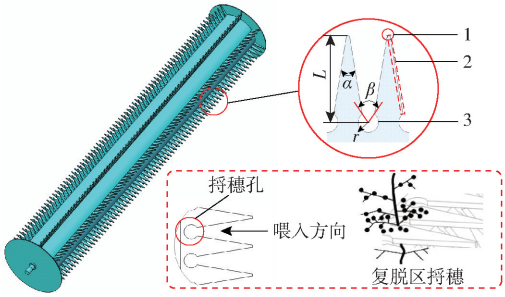

图 4 梳齿结构及梳脱原理

Fig. 4 Structure of comb teeth and combing principle

1. 分流区 2. 初脱区 3. 复脱区

梳齿参数需结合苜蓿植株生物学特性进行设计,包括植株主茎秆直径、分茎秆直径、株距、植株密度等,其主要几何尺寸参数如表 1 所示。

表 1 梳齿结构参数

Tab. 1 Parameters of comb teeth structure

参数	数值
分流区分流角 α/(°)	18
初脱区长度 L/mm	100
复脱区张开角 β/(°)	286
捋穗孔半径 r/mm	10
梳齿排数 Z	8

为了探究梳齿工作过程运动特征,解析其运动特性,对梳齿进行了运动学分析。影响梳齿运动轨

迹参数主要包括割台行进速度 v、滚筒角速度 ω、滚筒半径 R。为了探究梳齿上某点运动轨迹与以上 3 个参数数学关系，建立以大地为基准的运动学参考系，如图 5 所示。

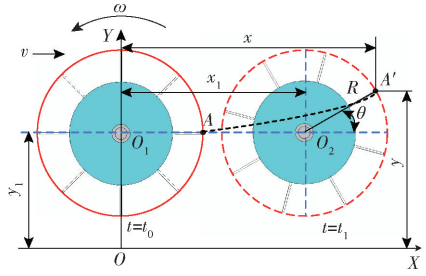

图 5　梳齿运动轨迹分析原理图

Fig. 5　Schematic of comb teeth motion trajectory analysis

取初始时刻 t_0 梳齿尖端上某一点 A，在时刻 t_1 后该点运动到点 A'，此时点 A' 位置坐标为

$$\begin{cases} x = x_1 + R\cos\theta \\ y = y_1 + R\sin\theta \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} x_1 = 1\,000vt_1 \\ y_1 = H \\ \theta = \omega t_1 \end{cases} \tag{2}$$

式中　x——点 A' 在大地坐标系上 X 方向坐标，mm

y——点 A' 在大地坐标系上 Y 方向坐标，mm

x_1——梳脱滚筒在时间 t_1 内行进的距离，mm

y_1——梳脱滚筒中心时刻 t_0 离地高度，mm

θ——梳脱滚筒在时间 t_1 内转动角度，rad

H——梳脱滚筒中心离地高度，mm

将式(2)中相关参数代入式(1)，可得到梳脱滚筒尖端点 A 随时间 t 变化的关系，即运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = 1\,000vt + R\cos(\omega t) \\ y = H + R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{3}$$

式中　t——工作时间，s

由式(3)可看出，梳齿尖端运动轨迹形状(即弧线 AA')为摆线型，当梳脱滚筒半径 R 确定时，影响梳齿尖端点 A 运动轨迹参数则为梳脱滚筒角速度 ω 和割台前进速度 v。为进一步探究梳脱滚筒角速度 ω 和割台前进速度 v 对运动轨迹的影响，引入梳脱速比 λ 进行分析，其表达式为

$$\lambda = \frac{u}{v} \tag{4}$$

其中

$$u = \frac{R\omega}{1\,000} \tag{5}$$

式中　u——梳脱滚筒圆周速度，m/s

将式(4)、(5)代入式(3)可得运动轨迹与梳脱速比 λ 之间关系为

$$\begin{cases} x = R\left(\dfrac{\omega t}{\lambda} + \cos(\omega t)\right) \\ y = R\left(\dfrac{H}{R} + \sin(\omega t)\right) \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可知，当滚筒半径 R 一定时，摆线形状仅与梳脱速比 λ 有关，轨迹形状随梳脱速比的变化规律如图 6 所示。梳脱速比 λ 从 0 变化到 ∞ 时，梳脱滚筒梳脱轨迹则是从直线($\lambda = 0$)变化到短幅摆线($\lambda < 1$)、普通摆线($\lambda = 1$)、长幅摆线($\lambda > 1$)直至圆($\lambda = \infty$)。

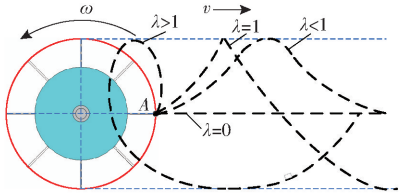

图 6　梳脱轨迹变化规律

Fig. 6　Variation patterns of combing trajectory

为实现梳齿对苜蓿植株分流、梳脱和向后抛送等作用，须使梳齿尖端点 A 在捋穗后具有水平向后分速度。而梳脱轨迹曲线上各点的切线方向则是梳齿在各位置时的绝对速度方向。从图 6 可看出，当 $\lambda < 1$ 时轨迹曲线上任何一点均不具有向后的水平分速度；当 $\lambda > 1$ 时，即轨迹曲线为长幅摆线(又称余摆线)时，运动轨迹形成扣环，如图 7 所示，梳脱轨迹的水平和竖直方向的分速度计算式为

$$\begin{cases} u_x = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = 1\,000v - R\omega\sin(\omega t) \\ u_y = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{7}$$

式中　u_x——梳脱轨迹水平方向分速度，mm/s

u_y——梳脱轨迹竖直方向分速度，mm/s

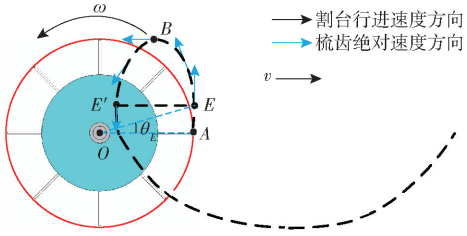

图 7　梳齿尖端绝对速度

Fig. 7　Absolute velocity at tip of comb teeth

由此可得梳脱轨迹在某时刻绝对速度为

$$u_t = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \sqrt{10^6 v^2 - 2\,000R\omega v\sin(\omega t) + R^2\omega^2} \tag{8}$$

式中　u_t——梳脱轨迹绝对速度，mm/s

当水平方向分速度为 0 时式(7)应满足

$$1\,000v - R\omega\sin\theta_E = 0 \tag{9}$$

式中　θ_E——梳脱轨迹上点 E 与圆心的夹角，rad

因此可得梳齿水平方向速度为 0 时转动角为

$$\theta_E = \arcsin\frac{10^3 v}{R\omega} = \arcsin\frac{1}{\lambda} \tag{10}$$

由此可知扣环最大横弦 EE' 的上方轨迹具有水

平向后分速度,可将梳脱下的种子种荚抛送进割台。因此为了保证梳脱滚筒正常工作,须保持梳齿梳脱速比 $\lambda>1$。

为减少种子采收时损失,应尽量在梳脱轨迹 EB 段(有效梳脱段)对植株进行梳脱,即在点 E 开始、点 B 结束,如图 8 所示,此时梳脱下的种子种荚可通过惯性力抛撒进割台内部,当梳脱滚筒转动一圈时单排梳齿有效梳脱范围为

$$\Delta x=\frac{1}{2}l_{EE'}=\frac{R}{\lambda}\left(\arcsin\frac{1}{\lambda}+\sqrt{\lambda^2-1}-\frac{\pi}{2}\right) \tag{11}$$

式中 Δx——单排梳齿有效工作范围,mm

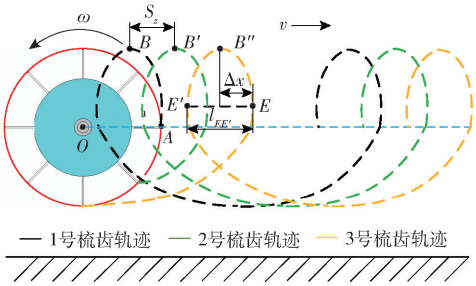

图 8 梳脱滚筒梳脱特征

Fig. 8 Characteristics of combing by a combing roller

相邻两排梳齿梳脱轨迹间距为

$$S_z=\frac{S}{Z}=\frac{2\,000\pi v}{\omega Z}=\frac{2\pi R}{\lambda Z} \tag{12}$$

式中 S_z——相邻两排梳齿梳脱轨迹间距,mm

S——梳脱滚筒转动一圈行进距离,mm

从式(11)、(12)可看出,单排梳齿有效工作范围 Δx 与梳脱滚筒半径 R 呈正相关,与梳脱速比 λ 呈负相关,而相邻两排梳齿梳脱轨迹间距 S_z 与梳齿排数 Z 和梳脱速比 λ 呈负相关。因此梳脱速比 λ 越大,单排梳齿有效梳脱范围 Δx 越大,相邻两排梳齿梳脱轨迹间距 S_z 越小,即对单位植株梳脱次数越多,种荚梳脱效果会更好。但重复梳脱次数过高时会导致含杂率提高,种子破损量也会增加。因此在保证梳脱效果的同时尽量采用较小的梳脱速比 λ,但割台行进速度不能过低,否则割台前进时冲量不够,植株不能较好地喂入梳脱滚筒,造成较大的飞溅损失,文献[27]表明梳脱式谷物收获机割台梳脱速比 λ 为 18~25 能保证较好的梳脱效果,由于牧草种植稠密,几乎成倍增加,采用相同梳脱速比时喂入量较大,未梳损失会增加,因此增加梳脱速比为 36~50 较为合适。

当梳脱速比 λ 不变时,增大梳脱滚筒半径 R 可以使单排梳齿的有效梳脱范围 Δx 及相邻两排梳齿梳脱轨迹间距 S_z 增大,即增大单位梳齿梳脱量,提高梳脱效率。但滚筒半径 R 不宜过大,否则会使得割台结构过于庞大,因此梳脱滚筒半径 R 在满足梳脱要求的前提下应采用较小尺寸。减少梳齿排数 Z 虽可使相邻两排梳齿梳脱轨迹间距 S_z 增大,从而提高单位梳齿梳脱量,但由此而导致大部分种荚在植株被压禾鼻压弯时梳脱,飞溅损失量会上升,因此不宜减小梳齿排数。

如图 9 所示,梳脱过程中梳脱滚筒中心离地高度过高会导致苜蓿植株底部种荚未被梳脱,产生大量未梳损失;梳脱滚筒中心离地高度过低时虽可避免未梳损失,但会导致大部分种子是在苜蓿植株处于压弯状态时被梳脱,造成大量飞溅损失。因此梳脱滚筒中心离地高度应满足

$$\begin{cases}L_a\leqslant L_d=H+R\\ L_b\geqslant L_c=H-R\end{cases} \tag{13}$$

式中 L_a——植株最高结荚高度,取 785 mm

L_b——植株最低结荚高度,取 213 mm

L_c——梳脱轨迹最低点离地高度,mm

L_d——梳脱轨迹最高点离地高度,mm

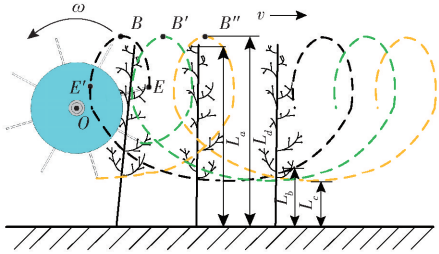

图 9 梳脱过程示意图

Fig. 9 Schematic of combing process

可得到梳脱滚筒高度范围为

$$L_a-R\leqslant H\leqslant L_b+R \tag{14}$$

由此可知梳脱滚筒半径 R 需满足

$$\frac{L_a-L_b}{2}\leqslant R \tag{15}$$

将相关数据代入式(15)可得梳脱滚筒半径 R 应不小于 286 mm,为增加单位梳齿梳脱量同时避免割台结构过大,设计梳脱滚筒半径 R 为 290 mm。

2.1.2 滚筒-壁面组合式气流喉口设计

在梳脱过程中,由于部分种荚未能在梳脱轨迹的 BE 段被梳脱,导致大量飞溅损失。为了降低该部分损失,结合梳脱滚筒高速旋转形成的回旋气流设计了图 10 所示的滚筒-壁面组合式喉口结构,压禾鼻与缓冲橡胶板内表面光滑且呈类渐开线型,与梳脱滚筒的工作圆周点 A 距离最近,因此在点 A 位置附近形成了喉口(即壁面间距最窄处)。

当梳脱滚筒高速旋转时,滚筒周边会产生相应回旋气流,同时由于前方植株对气流形成遮挡,气流则通过喉口沿渐开线展开方向进入割台内部,滚筒周围气体压强与壁面间距关系为

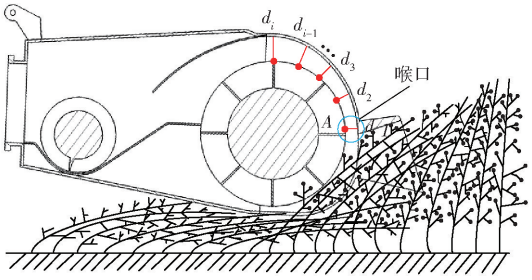

图 10　喉口结构示意图

Fig. 10　Schematic of throat structure

$$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2=\frac{\gamma-1}{2}\frac{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}{\left[1-\left(\frac{p_i}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}\right]\left(\frac{p_i}{p_1}\right)^{2/\gamma}} \tag{16}$$

式中　d_i——壁面间距，mm

d——喉口处壁面间距，mm

p_i——内壁某点处气体压力，Pa

p_1——喉口处气体压力，Pa

γ——空气比热容比

由式(16)可知，气体压力与壁面间距呈正相关，即喉口处压力最小，并沿渐开线展开方向逐渐增大。由于喉口下方为敞口，其下方压力明显大于喉口上方的压力，在喉口上下形成如图 11 所示的相对正负压区域，从而对梳脱下来的种子种荚进行吸附。

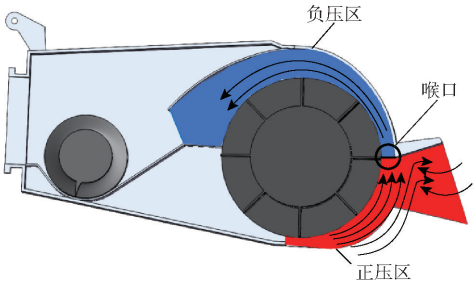

图 11　割台喉口处压力示意图

Fig. 11　Schematic of pressure at throat of cutting platform

为了喉口处气流能够将种子种荚吸入割台内部，喉口尺寸 d 至关重要，且与苜蓿种子、种荚悬浮特性紧密相关，文献[28]表明其悬浮速度为 2.63 ~ 4.87 m/s，因此喉口处气流流速应至少达到 5 m/s。同时为降低进入割台内部种子种荚的运移速度，防止其撞击割台内壁后逸出，通过增大喉口比(d_i与 d 之比)使种子种荚降速，当喉口处气流过大时，d_i也会随之增大，从而造成割台整体庞大，功耗增大。文献[29]表明喉口尺寸一般为 80 ~ 100 mm 较为合适。

2.1.3　割台增流式装置设计

因梳脱滚筒旋转产生的回旋气流难以将梳脱下苜蓿种子、种荚完全吸入采集台内部，因此设计了如图 12 所示的增流式结构对割台进行增流。

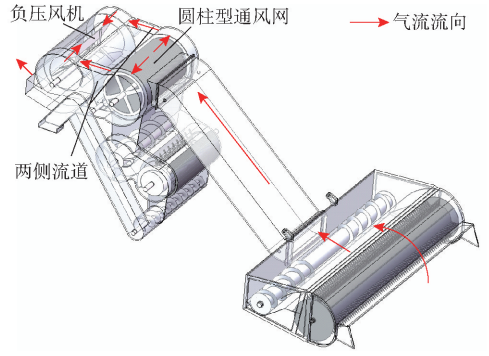

图 12　增流式结构示意图

Fig. 12　Schematic of flow-enhancing structure

其原理为通过负压风机高速旋转对割台前方的气流进行抽吸，加快气体流经喉口处速度的同时使喉口下方的气流具有水平向后分速度，从而能够将飞溅种子种荚带回割台内部。

2.2　苜蓿植株梳脱过程分析

为更好地掌握苜蓿植株在梳脱过程的具体情况，对苜蓿植株进行运动学分析，可分为压弯、喂入、抽出 3 个阶段。

2.2.1　苜蓿植株压弯阶段

割台行进过程中，压禾鼻将植株进行压弯(图 13)。苜蓿植株积蓄弹性势能，直至离开压禾鼻的瞬间释放弹性势能并顺势喂入梳脱滚筒。苜蓿植株在被压禾鼻压弯的状态可视为根部直立在土壤之中的悬臂梁，压禾鼻在鼻尖点 T 与植株接触并施加集中力 F，因此植株在点 T 弯曲量为

$$x_t=1\,000vt=\frac{Fl^3}{3EI} \tag{17}$$

式中　x_t——植株上点 T 在时刻 t 弯曲量，mm

F——压禾鼻给植株施加的集中力，N

l——苜蓿植株压弯后 OT 段长度，mm

E——苜蓿植株弹性模量，MPa

I——苜蓿植株截面惯性矩，mm^4

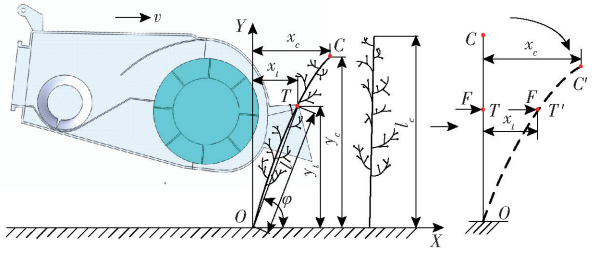

图 13　苜蓿植株压弯阶段姿态分析

Fig. 13　Analysis of alfalfa plant bending posture during pressing phase

由此可得苜蓿植株 OT 段长度为

$$l=\sqrt[3]{\frac{3\,000EIvt}{F}} \tag{18}$$

苜蓿在点 T 被压弯后，植株 CT 段可视为直线

段,因此可以得到植株顶端点 C 弯曲量为

$$x_c=\sqrt{(l_c-l)^2-(y_c-y_t)^2}+x_t \tag{19}$$

式中 l_c——苜蓿植株自然高度,mm

y_c——苜蓿植株在弯曲状态下高度,mm

y_t——压禾鼻鼻尖点 T 离地高度,mm

x_c——植株顶端点 C 在时刻 t 弯曲量,mm

苜蓿植株弯曲状态下倾斜角 φ 近似为

$$\varphi=\arctan\frac{y_t}{x_t}=\arctan\frac{y_t}{1\,000vt} \tag{20}$$

由此可得到苜蓿植株顶端点 C 在弯曲状态下高度近似为

$$y_c=\frac{\mu y_t l_c}{\sqrt{y_t^2+10^6v^2t^2}} \tag{21}$$

式中 μ——植株弯曲系数,取 0.8 ~ 0.9

将式(21)代入式(19)可得苜蓿植株顶端点 C 在时刻 t 弯曲量为

$$x_c=\sqrt{\left(l_c-\sqrt[3]{\frac{3\,000EIvt}{F}}\right)^2-\left(\frac{\mu y_t l_c}{\sqrt{y_t^2+10^6v^2t^2}}-y_t\right)^2}+1\,000vt \tag{22}$$

由式(22)可知,随着接触时间增长,苜蓿植株各点弯曲量逐渐增大,弯曲量最大值与鼻尖点 T 离地高度(梳脱滚筒中心离地高度)呈负相关。因此,当行进速度一定时,可通过降低梳脱滚筒中心离地高度,使植株具有较高的弹性势能,以便喂入梳脱滚筒增强梳脱效果。

2.2.2 苜蓿植株回弹喂入阶段

苜蓿植株顶端点 C 离开压禾鼻鼻尖点 T 之后便进入喂入阶段,植株积蓄弹性势能在此刻释放,并顺势喂入梳脱滚筒的梳齿中,并与梳脱滚筒齿根圆相切于点 Q_1,如图 14 所示。

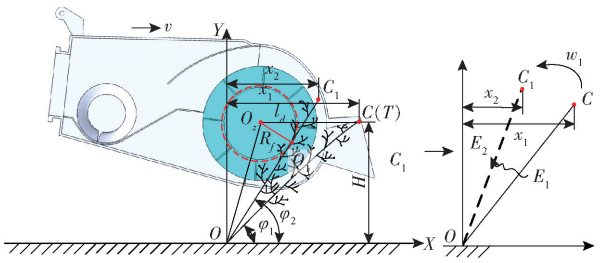

图 14 苜蓿植株喂入阶段姿态分析

Fig. 14 Analysis of alfalfa plant posture during feeding phase

在植株顶端点 C 离开压禾鼻时,此时植株顶端点 C 的弯曲量最大值计算式为

$$x_1=\frac{Fl_c^3}{3EI} \tag{23}$$

式中 x_1——植株端点 C 在点 T 处时弯曲量,mm

苜蓿植株刚度可表示为

$$k=\frac{F}{x_1}=\frac{3EI}{l_c} \tag{24}$$

式中 k——苜蓿植株刚度,N/mm

此时苜蓿植株积蓄弹性势能为

$$E_1=\int_0^{x_1}kx\mathrm{d}x=\frac{1}{2}kx_1^2=\frac{3EI}{2l_c^3}x_1^2 \tag{25}$$

式中 E_1——苜蓿植株在点 C 积蓄的弹性势能,kJ

同理可得苜蓿植株释放部分弹性势能到达点 C_1 时弹性势能为

$$E_2=\frac{3EI}{2l_c^3}x_2^2 \tag{26}$$

式中 x_2——苜蓿植株在点 C_1 的压弯量

E_2——苜蓿植株在点 C_1 积蓄的弹性势能,kJ

苜蓿植株顶端点 C 运动到点 C_1 处时释放的弹性势能转化为植株绕点 O 旋转的动能(假设植株为质量分布均匀的刚性体),由此可得苜蓿植株在点 C_1 处动能为

$$E_k=E_1-E_2=\frac{J\omega_1^2}{2\,000}=\frac{3EI}{2l_c^3}(x_1^2-x_2^2) \tag{27}$$

式中 J——苜蓿植株转动惯量,kg·m^2

则植株在点 C_1 处时摆动速度为

$$\omega_1=\sqrt{\frac{3\,000EI}{Jl_c^3}(x_1^2-x_2^2)} \tag{28}$$

由此可得植株转动时各点线速度为

$$v_a=\omega_1 l_x=\sqrt{\frac{3\,000EIl_x^2}{Jl_c^3}(x_1^2-x_2^2)} \tag{29}$$

式中 v_a——植株在点 C_1 处时各点线速度,mm/s

l_x——植株上某点距离根部点 O 的距离,mm

植株顶端点 C 运动到点 C_1 处时植株倾斜角 φ_2 为

$$\varphi_2=\arcsin\frac{H}{\sqrt{(x_1-l_d)^2+H^2}}-\arcsin\frac{R_f}{\sqrt{(x_1-l_d)^2+H^2}} \tag{30}$$

式中 l_d——鼻尖点 T 到梳脱滚筒中心水平距离,mm

R_f——梳脱滚筒齿根圆半径,mm

梳脱时植株最底部种荚在梳脱后沿 X、Y 方向速度为

$$\begin{cases}U_x=1\,000v+\omega R-\cos\varphi_2\sqrt{\dfrac{3\,000EIl_b^2}{Jl_c^3}(x_1^2-x_2^2)}\\ U_y=\sin\varphi_2\sqrt{\dfrac{3\,000EIl_b^2}{Jl_c^3}(x_1^2-x_2^2)}\end{cases} \tag{31}$$

式中 l_b——最底部种荚与植株根部距离,mm

U_x——最底部种荚脱落时 X 方向速度,mm/s

U_y——最底部种荚脱落时 Y 方向速度,mm/s

由式(31)可看出，植株底部种荚在被梳脱后运动速度受割台行进速度、梳脱滚筒角速度和梳脱滚筒中心离地高度影响。由于梳脱滚筒角速度相较于其他 2 个参数可灵活变化，因此实际采收过程中可通过减小梳脱滚筒角速度降低种荚沿 X 方向运移速度，防止其逃逸负压流场的捕获，从而达到降低飞溅损失的目的。

由于植株喂入后姿态产生倾斜，最低结荚高度会相应降低，需适当降低滚筒高度以降低未梳损失，但高度过低会导致植株在弯曲过程中即被梳脱滚筒卷入导致植株茎秆断裂，为防止这两种情况发生，梳脱滚筒中心离地高度如图 15 所示。

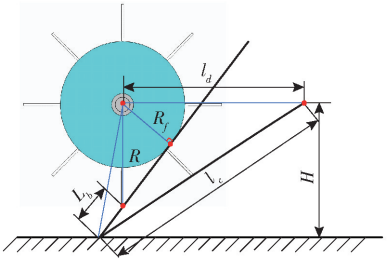

图 15　梳脱滚筒离地高度分析

Fig. 15　Analysis of ground clearance of comb cylinder

因此梳脱滚筒中心离地高度需满足

$$\frac{l_c R}{l_d} \leqslant H \leqslant \frac{L_b \sqrt{R^2 - R_f^2}}{R} + R \tag{32}$$

将相关参数代入可得到梳脱滚筒中心的离地高度为 410 ~ 450 mm，由植株压弯阶段分析的结果可知在保证植株梳脱效果前提下，应尽量使用较低梳脱滚筒高度进行收获。

2.2.3　苜蓿植株梳脱抽出阶段

苜蓿植株喂入梳脱滚筒到植株顶端离开梳脱滚筒为植株梳脱抽出阶段。随着梳脱滚筒转动以及割台行进，对苜蓿植株由下往上开始梳脱。此过程中，苜蓿植株一直与梳齿的齿根圆相切，图 16 为植株在不同时刻与梳脱滚筒的位置关系。

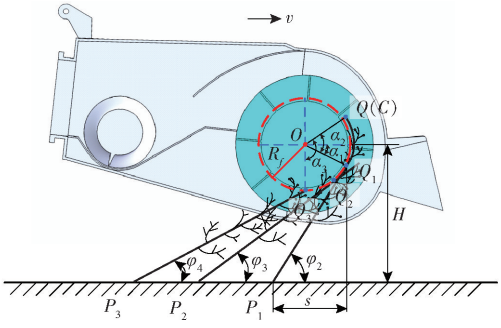

图 16　苜蓿植株抽出阶段姿态分析

Fig. 16　Analysis of alfalfa plant posture during extraction phase

苜蓿植株在喂入梳脱滚筒时与其齿根圆相切于点 Q_1，植株的倾斜角为 φ_2，植株根部位于点 P_1，根部至点 Q_1 植株长度为

$$l_a = \frac{H - R_f \sin\alpha_1}{\sin\varphi_2} = \frac{H - R_f \cos\varphi_2}{\sin\varphi_2} \tag{33}$$

其中

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi_2 \tag{34}$$

式中　α_1——点 Q_1 与中心连线和水平方向夹角，rad

l_a——点 Q_1 至植株根部植株长度，mm

此时位于点 Q_1 上部的植株缠绕在梳齿之间，这部分植株长度为

$$l' = l_c - l_a = l_c - \frac{H - R_f \cos\varphi_2}{\sin\varphi_2} \tag{35}$$

式中　l'——植株缠绕在梳脱滚筒上长度，mm

缠绕在滚筒上植株包络角为

$$\alpha_2 = \frac{l_c}{R_f} - \frac{H - R_f \cos\varphi_2}{R_f \sin\varphi_2} \tag{36}$$

式中　α_2——植株包络角，rad

在割台行进过程中植株与滚筒的相切点逐渐向左下方移动，此时植株到达点 P_2 位置，滚筒继续梳脱直至植株脱离梳脱滚筒到达 P_3 位置时植株抽出，梳脱过程结束。梳脱过程中植株顶端点 C 从点 Q 绕梳脱滚筒中心旋转到点 Q_3，旋转角为

$$\alpha_3 = \alpha_2 + \varphi_2 = \frac{l_c}{R_f} - \frac{H - R_f \cos\varphi_2}{R_f \sin\varphi_2} + \varphi_2 \tag{37}$$

式中　α_3——植株顶端点 C 旋转角，rad

由三角关系可得倾斜角 φ_2 为

$$\varphi_2 = \arctan \frac{H - R_f \cos\varphi_2}{s} \tag{38}$$

其中

$$s = 1\,000 v t_1 \tag{39}$$

式中　s——割台在时间 t_1 内行进的距离，mm

由此可得抽出阶段植株在不同时刻摆动角速度为

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = \frac{1\,000 v \sin\varphi}{R_f \sin(2\varphi) - 1\,000 v t \cos\varphi - H \sin\varphi} \tag{40}$$

同理可得植株在滚筒上包络角 α_2 随时间 t 减小角速度为

$$\frac{\mathrm{d}\alpha_2}{\mathrm{d}t} = \frac{H\cos\varphi - R_f}{R_f \sin^2\varphi} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \tag{41}$$

由式(40)、(41)可得抽出过程中植株顶端点 C 从点 Q 绕梳脱滚筒中心旋转到点 Q_3 角速度为

$$\frac{\mathrm{d}\alpha_3}{\mathrm{d}t} = \frac{1\,000 v \sin\varphi}{R_f \sin(2\varphi) - 1\,000 v t \cos\varphi - H \sin\varphi} \left(1 + \frac{H\cos\varphi - R_f}{R_f \sin^2\varphi}\right) \tag{42}$$

则植株抽出线速度 u_φ 为

$$u_\varphi = \frac{1\,000 v R_f \sin\varphi}{R_f \sin(2\varphi) - 1\,000 v t \cos\varphi - H \sin\varphi} \left(1 + \frac{H\cos\varphi - R_f}{R_f \sin^2\varphi}\right) \tag{43}$$

由式(43)可看出,当割台结构参数确定时,植株抽出线速度与割台行进速度 v、梳脱滚筒离地高度 H 呈正相关,即割台速度越大、高度越高抽出的速度越大,且植株包络角 α_2 越小,植株梳脱过程则会越短,未梳损失增加。因此在实际收获过程中,割台在合适范围内应以较低高度作业。

由式(38)也可得植株倾斜角与时间 t 的关系为

$$t=\frac{H-R_f\cos\varphi}{1\,000v\tan\varphi} \tag{44}$$

当植株位于点 P_3 位置时,植株倾斜角为

$$\varphi_4=\arcsin\frac{H-R_f}{l_c} \tag{45}$$

式中 φ_4——植株位于点 P_3 位置时倾斜角,rad

则植株抽出时间为

$$\Delta t=t_3-t_1=\frac{1}{1\,000v}\left(\frac{H-R_f\cos\varphi_4}{\tan\varphi_4}-\frac{H-R_f\cos\varphi_2}{\tan\varphi_2}\right) \tag{46}$$

式中 Δt——植株抽出阶段时间,s

t_3——植株顶端离开滚筒的时刻,s

由此可得到抽出阶段植株受到的梳脱次数为

$$N=\frac{Zn_1}{60}\Delta t=\frac{n_1}{7\,500v}\left(\frac{H-R_f\cos\varphi_4}{\tan\varphi_4}-\frac{H-R_f\cos\varphi_2}{\tan\varphi_2}\right) \tag{47}$$

式中 N——抽出阶段植株受到的梳脱次数

n_1——梳脱滚筒转速,r/min

由式(47)可知植株的梳脱次数与滚筒转速 n_1 呈正相关,与割台行进速度 v 呈负相关。实际收获过程中,为增加植株梳脱次数降低未梳损失,可通过增大滚筒转速或减小割台行进速度进行调节。

3 梳脱割台流场仿真

梳脱割台处流场对降低种子损失至关重要。由气流喉口分析可知,喉口尺寸对梳脱滚筒高速旋转产生的回旋气流具有重要影响,同时负压风机可加强割台处流场的负压强度。因此影响割台流场主要参数为负压风机转速、梳脱滚筒转速以及气流喉口尺寸,为了探究其对梳脱割台流场的影响规律,采用 Solidworks 结合 Fluent 建立割台流体仿真模型,通过控制变量法进行单因素试验,得到各因素对气流的影响规律,再通过多因素正交仿真试验得到产生最优流场参数组合。

3.1 流体仿真模型

在流体仿真分析前需对流场几何模型进行简化[30-32],如图 17 所示。简化后几何模型包括梳脱滚筒流体域、负压风机流体域和流道。在植株喂入和抽出阶段,由于植株对进气口形成遮挡,为了探究气流对草种的吸附作用,将进气口设为前部和底部 2 个部分,其中前部进气口的气流向割台内部流动时,有利于将沿 X 方向运动的种子种荚带入割台,从而降低飞溅损失;底部进气口的气流向割台内部流动时,有利于将沿 Y 方向运动的种子种荚带入割台,从而降低落粒损失,气流出口则为位于负压风机后方的排气口。

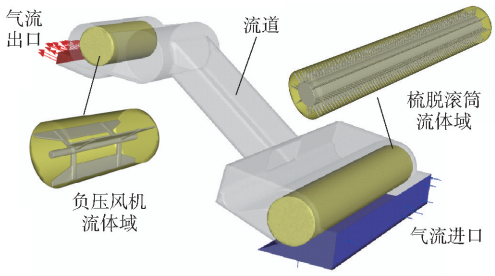

图 17 流场几何模型

Fig. 17 Geometric model of flow field

建立割台流场几何模型后需进行网格划分。割台流场几何模型网格划分时,考虑到梳脱滚筒流体域和负压风机流体域为动网格,对整体仿真计算影响较大,将其网格尺寸设为 30 mm。流道中的流体域则为静网格,静网格尺寸一般为动网格尺寸 3 ~ 5 倍较为合适,因此将静网格尺寸设为 120 mm。划分完成后网格模型如图 18 所示,网格数量为 5 403 254,单元格质量为 0.89,网格纵横比为 1.98,网格倾斜率为 0.78,均在正常范围内。

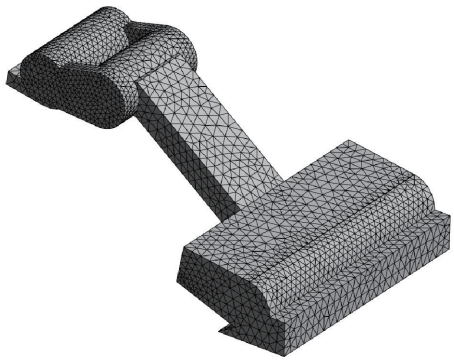

图 18 流体网格模型

Fig. 18 Fluid mesh model

为使草种梳脱后能够被气流吸附进入割台内部,需保证气流进口处流速不小于 5 m/s,可通过单因素仿真试验探究各变量对气流进口流速的影响。同时,由于梳脱滚筒与负压风机高速旋转导致割台内部气流呈轻度湍流状态,因此气流进口处气流流速并非均匀分布,可将气流进口划分为方格形式,通过流速探针测量各方格节点流速,并取 4 个节点平均值作为该方格区域的实际流速,原理如图 19 所示。通过计算流速大于 5 m/s 的方格数量

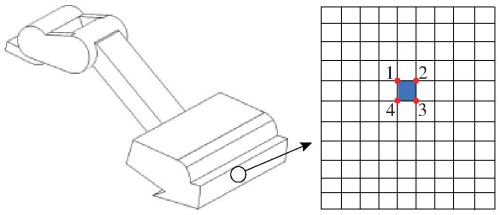

图 19　流速测量原理

Fig. 19　Principles of velocity measurement

(高效吸收流域)占总方格数量比值来评价其影响效果。

3.2　各因素对流场的影响

通过控制变量法探究各因素对割台流场的影响,各因素变化范围如表 2 所示。通过等间距划分原则将各因素设置为 5 个水平,共进行 15 组仿真试验。

表 2　各因素变化范围

Tab. 2　Range of variations for each factor

参数	数值
梳脱滚筒转速 n_1/(r·min^{-1})	500 ~ 1 000
负压风机转速 n_2/(r·min^{-1})	1 000 ~ 1 600
气流喉口尺寸 d/mm	80 ~ 100

提取进气口流速仿真结果,如图 20 所示。从图 20b 可看出,随着梳脱滚筒转速增加,底部进气口与前部进气口的高效吸收流域占比都呈上升趋势,当梳脱滚筒转速为 1 000 r/min 时,底部和前部进气口的高效流域都达到最大,分别为 63.8% 和 54.6%,总占比为 61.5%。从图 20c 可知,随着负压风机转速增加,底部和前部进气口的高效吸收流域占比呈先增大后减少趋势,当负压风机转速为

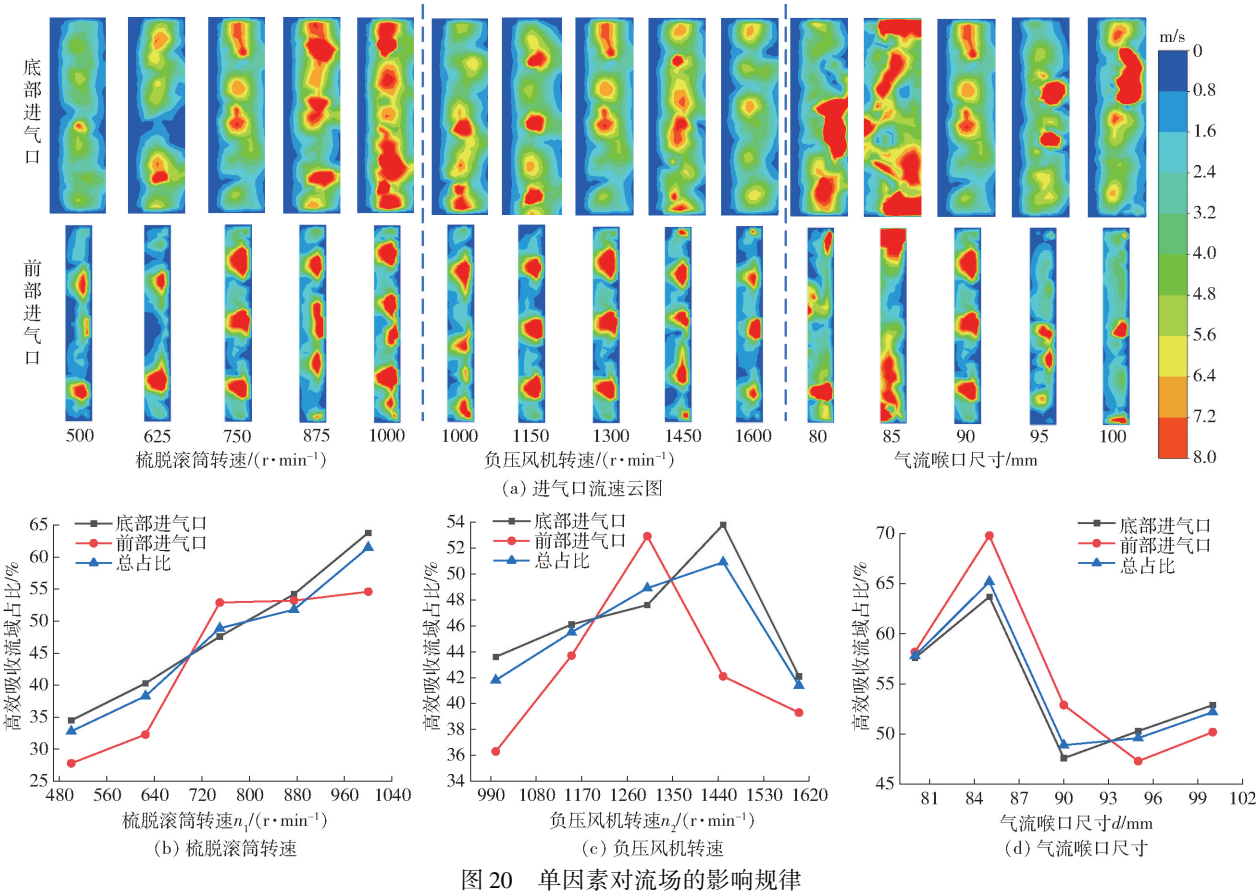

图 20　单因素对流场的影响规律

Fig. 20　Influence of single factor on flow field

1 450 r/min 时,高效吸收流域总占比达到最大,为 50.9%。从图 20d 可知,随着气流喉口增大,底部和前部进气口的高效吸收流域占比呈先增大后减小趋势,当气流喉口尺寸为 85 mm 时,底部和前部进气口高效吸收流域占比达到最大,分别为 63.7% 和 69.8%,总占比为 65.2%。

3.3　多因素正交仿真试验

在单因素仿真试验基础上,探究梳脱滚筒转速、负压风机转速和气流喉口尺寸的交互作用对高效吸收流域的影响,从而确定割台最佳工作参数[33-35]。通过中心组合设计 CCD(Central composite design)响应面试验方法对梳脱滚筒转速、负压风机转速和气流喉口尺寸进行流体仿真试验,试验仿真次数为 20,其中中心水平设计 6 组重复试验,试验因素编码如表 3 所示,CCD 响应面试验设计及结果如表 4 所示。X_1、X_2、X_3为因素编码值。

通过 Design-Expert 13.0 软件对流场的仿真结果进行响应面回归分析,并经过相关计算得到各影

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Experimental factors and levels coding

编码	因素		
	滚筒转速/(r·min^{-1})	风机转速/(r·min^{-1})	喉口尺寸/mm
-1.682	800	1 300	80
-1	840	1 340	82
0	900	1 400	85
1	960	1 460	88
1.682	1 000	1 500	90

表 4 CCD 响应面试验设计与结果

Tab. 4 RSM experimental design and results

序号	因素			底部进气口高效吸收流域占比 S_1/%	前部进气口高效吸收流域占比 S_2/%	总占比 S/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	58.7	59.6	58.9
2	-1	1	-1	62.3	67.1	63.5
3	-1	-1	1	52.3	54.7	52.9
4	-1	1	1	53.8	56.4	54.5
5	1	-1	-1	65.8	68.2	66.4
6	1	1	-1	69.6	72.5	70.3
7	1	-1	1	53.9	59.6	55.3
8	1	1	1	58.6	62.3	59.5
9	-1.682	0	0	64.5	69.6	65.8
10	1.682	0	0	69.3	73.8	70.4
11	0	-1.682	0	63.7	71.2	65.6
12	0	1.682	0	64.3	72.8	66.4
13	0	0	-1.682	58.6	60.3	59.0
14	0	0	1.682	55.6	52.8	54.9
15	0	0	0	62.1	68.9	63.8
16	0	0	0	61.7	67.4	62.6
17	0	0	0	64.1	66.3	64.7
18	0	0	0	62.8	65.4	63.5
19	0	0	0	59.5	62.6	60.8
20	0	0	0	58.6	62.8	59.7

响因素与评价指标 S_1、S_2、S 拟合方程分别为

$$S_1 = 61.58 + 2.11X_1 + 1.07X_2 - 3.22X_3 + 0.425\,0X_1X_2 - 1.000\,0X_1X_3 - 0.150\,0X_2X_3 + 1.18X_1^2 + 0.159\,6X_2^2 - 2.16X_3^2 \quad (48)$$

$$S_2 = 65.72 + 2.33X_1 + 1.38X_2 - 3.75X_3 - 0.275\,0X_1X_2 - 0.400\,0X_1X_3 - 0.925\,0X_2X_3 + 1.17X_1^2 + 1.28X_2^2 - 3.74X_3^2 \quad (49)$$

$$S = 62.64 + 2.16X_1 + 1.15X_2 - 3.35X_3 + 0.237\,5X_1X_2 - 0.862\,5X_1X_3 - 0.337\,5X_2X_3 + 1.17X_1^2 + 0.438\,9X_2^2 - 2.56X_3^2 \quad (50)$$

其中评价指标 S_1、S_2、S 回归方程方差分析结果如表 5 ~ 7 所示,结果显示割台底部进气口高效吸收流域 S_1、前部进气口高效吸收流域 S_2 和总流域 S 的回归模型 P 分别为 0.047 1、0.010 4 和 0.026 0,表

表 5 高效吸收流域 S_1 响应面方差分析

Tab. 5 Variance analysis of response surface for efficient absorption basin S_1

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	324.58	9	36.06	3.08	0.047 1 *
X_1	61.04	1	61.04	5.22	0.045 5 *
X_2	15.63	1	15.63	1.34	0.274 7
X_3	141.91	1	141.91	12.13	0.005 9 **
X_1X_2	1.44	1	1.44	0.123 5	0.732 6
X_1X_3	8.00	1	8.00	0.683 7	0.427 6
X_2X_3	0.180 0	1	0.180 0	0.015 4	0.903 8
X_1^2	20.23	1	20.23	1.73	0.217 9
X_2^2	0.367 0	1	0.367 0	0.031 4	0.863 0
X_3^2	67.00	1	67.00	5.73	0.037 8 *
残差	117.01	10	11.70		
失拟项	95.76	5	19.15	4.51	0.062 1
纯误差	21.25	5	4.25		
总和	441.60	19			

注:* 表示相关性显著(0.01 < P ≤ 0.05),** 表示相关性极显著(P ≤ 0.01),下同。

表 6 高效吸收流域 S_2 响应面方差分析

Tab. 6 Variance analysis of response surface for efficient absorption basin S_2

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	571.22	9	63.47	4.89	0.010 4 *
X_1	74.34	1	74.34	5.73	0.037 8 *
X_2	26.13	1	26.13	2.01	0.186 4
X_3	192.08	1	192.08	14.80	0.003 2 **
X_1X_2	0.605 0	1	0.605 0	0.046 6	0.833 4
X_1X_3	1.28	1	1.28	0.098 6	0.760 0
X_2X_3	6.84	1	6.84	0.527 3	0.484 4
X_1^2	19.85	1	19.85	1.53	0.244 4
X_2^2	23.60	1	23.60	1.82	0.207 2
X_3^2	201.65	1	201.65	15.53	0.002 8 **
残差	129.81	10	12.98		
失拟项	98.31	5	19.66	3.21	0.118 6
纯误差	31.49	5	6.30		
总和	701.03	19			

表 7 高效吸收流域 S 响应面方差分析

Tab. 7 Variance analysis of response surface for overall basin S

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	370.80	9	41.20	3.73	0.026 0 *
X_1	63.45	1	63.45	5.75	0.037 5 *
X_2	17.92	1	17.92	1.62	0.231 3
X_3	153.69	1	153.69	13.93	0.003 9 **
X_1X_2	0.451 3	1	0.451 3	0.040 9	0.843 8
X_1X_3	5.95	1	5.95	0.539 3	0.479 6
X_2X_3	0.911 2	1	0.911 2	0.082 6	0.779 7
X_1^2	19.77	1	19.77	1.79	0.210 3
X_2^2	2.65	1	2.65	0.240 3	0.634 6
X_3^2	94.35	1	94.35	8.55	0.015 2 *
残差	110.35	10	11.03		
失拟项	92.08	5	18.42	5.04	0.050 2
纯误差	18.27	5	3.65		
总和	481.15	19			

明该回归模型显著，并且决定系数 R^2 分别为 0.735 0、0.814 8 和 0.770 7，接近于 1，表明回归方程拟合性较好。

由表 5～7 可知，梳脱滚筒转速和喉口尺寸对底部进气口的气流具有显著影响，负压风机转速的影响效果则不显著。梳脱滚筒转速和喉口尺寸同样对前部进气口的气流具有显著影响，负压风机转速的影响效果则不显著，在高效吸收流域总占比 S 中同样显示了此影响规律。由此可知，梳脱滚筒转速与气流喉口尺寸对割台收获时的损失量起决定性作用，其中梳脱滚筒转速影响效果小于气流喉口尺寸。由此可知当割台结构确定时，通过调整梳脱滚筒转速可有效增大进气口的高效吸收流域面积，从而减少割台损失。因此实际作业过程中，应该根据割台实时采收效果调整梳脱滚筒转速，以减少割台损失。

由于气流喉口尺寸与梳脱滚筒转速对高效吸收流域影响效果显著，负压风机转速影响效果不显著，根据评价指标 S_1、S_2、S 的拟合方程采用 Origin 软件进行响应面图形绘制，如图 21 所示。

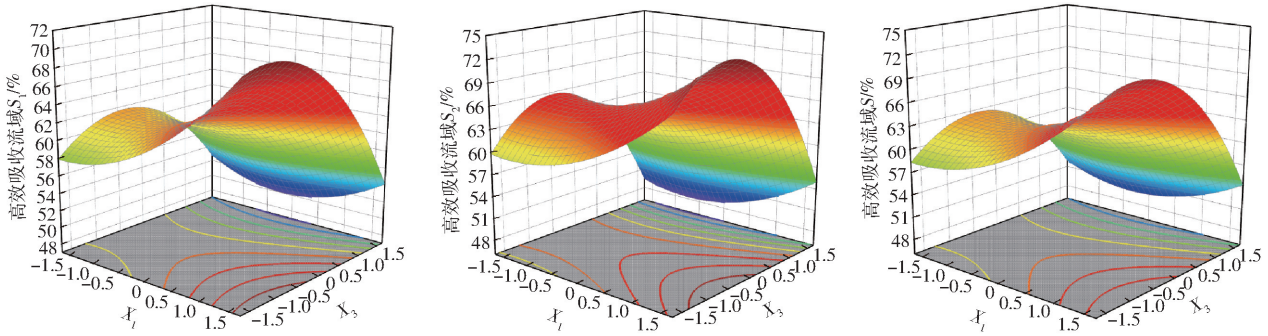

图 21　参数交互作用对高效吸收流域的影响

Fig. 21　Impact of parameter interactions on efficient absorption basin

为获得割台最优工作参数组合，同时保证优化设计条件在合理的设计范围内，以高效吸收流域 S_1、S_2 及 S 最大化为目标，运用 Design-Expert 13.0 软件对回归模型进行约束目标求解。其目标函数和工作参数的约束范围为

$$\begin{cases} \max S_1(X_1,X_2,X_3) \\ \max S_2(X_1,X_2,X_3) \\ \max S(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{51}$$

优化结果：当梳脱滚筒转速为 959.46 r/min、负压风机转速为 1 459.46 r/min、气流喉口尺寸为 82.56 mm 时，目标参数底部进气口高效吸收流域 S_1、前部进气口高效吸收流域 S_2 和总占比 S 预测值和取整值如表 8 所示。将取整值代入仿真模型进行验证，仿真结果显示误差不大于 4.0%，验证了回归模型预测准确性。

表 8　割台参数优化结果

Tab. 8　Optimization results for header parameters

参数	优化值	优化圆整值	误差/%
梳脱滚筒转速 n_1/(r·min^{-1})	959.40	1 000	4.0
负压风机转速 n_2/(r·min^{-1})	459.46	1 450	0.6
气流喉口尺寸 d/mm	82.56	83	0.5
高效吸收流域 S_1/%	68.67	71.5	3.9
高效吸收流域 S_2/%	73.26	73.8	0.7
总占比 S/%	69.80	69.80	3.2

4　田间试验

4.1　试验方案

参考 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》、GB/T 8097—2008《收获机械联合收割机 试验方法》和 NY/T 995—2006《谷物(小麦)联合收获机械作业质量》，制定了相应的饲草种子收获机械的试验方案，如图 22 所示。

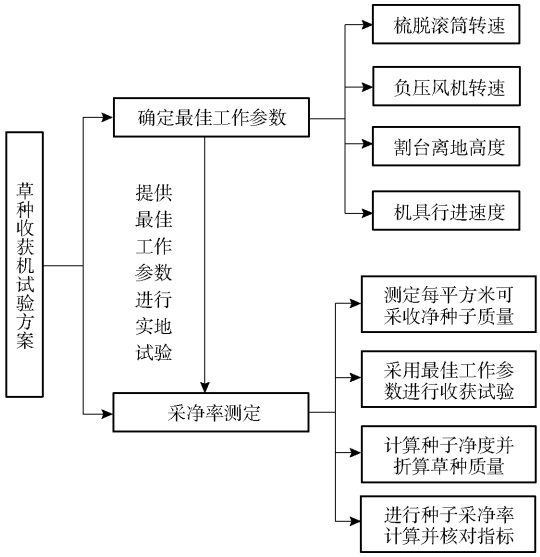

图 22　田间采收试验方案

Fig. 22　Field harvest experimental plan

机具行进速度与梳脱速比 λ 有关，计算式为

$$v = \frac{\pi R n_1}{30\,000\lambda} \tag{52}$$

其中梳脱滚筒半径为 290 mm,滚筒转速为 1 000 r/min,梳脱速比 λ 为 36 ~ 50,因此可得到收获机行进速度为 0.61 ~ 0.84 m/s。

在试验区内用五点法确定取样点位,每点位以两行植株为宽度割取约 1 m^2 的植株。脱粒并去除杂质后称量,计算平均值。计算式为

$$W_z = \frac{W_x}{nab} \tag{53}$$

式中 W_x——每取样点位所采收的净种子质量,g

W_z——每平方米可采收的净种子质量,g/m^2

n——取样点位内株距数

a——株距,m

b——行距,m

在种子堆内分点,按 GB/T 3543.3 进行试验。用四分法取样,每次取不少于 50 克,计算平均值。计算式为

$$J_d = \frac{W_j}{W_y} \times 100\% \tag{54}$$

式中 J_d——种子净度,%

W_j——净种子质量,g

W_y——样品质量,g

草种总质量应去除杂质后才可作为净种子质量,计算式为

$$W_{j1} = \frac{W_{z1} J_d}{S} \tag{55}$$

式中 W_{j1}——每平方米采收到的净种子质量,g/m^2

W_{z1}——试验区内采收到的草种总质量,g

S——试验区面积,m^2

种子采净率为每平方米采收到的净种子质量与每平方米可采收的净种子质量之比,计算式为

$$C_j = \frac{W_{j1}}{W_z} \times 100\% \tag{56}$$

式中 C_j——种子采净率,%

作业效率通过割台的有效作业幅宽和机具行进速度计算,计算式为

$$Z_\eta = \frac{3\,600 W_e v}{10\,000} \tag{57}$$

式中 W_e——作业幅宽,m

Z_η——作业效率,hm^2/h

4.2 采收试验

草种收获机样机于 2024 年 7 月 28 日在内蒙古鄂托克旗中国农业科学研究院畜牧研究所牧草良种繁育与示范基地进行田间试验,如图 23 所示。

计算出测试区域的每平方可采收净种子质量、种子净度、每平方米采收到净种子质量、种子采净率及作业效率,取 5 次试验结果平均值,试验结果如表 9 所示。



(a) 田间收获 (b) 收获后效果 (c) 取样 (d) 杂质 (e) 苜蓿草种

图 23 田间试验及样品处理

Fig. 23 Field experiment and sample processing

表 9 田间试验结果

Tab. 9 Field experiment results

参数	数值	指标
每平方米可采收的净种子质量/(g·m^{-2})	37.9	
种子净度/%	41.9	
每平方米采收到的净种子质量/(g·m^{-2})	31.6	
种子采净率/%	83.4	≥70
作业效率/(hm^2·h^{-1})	0.73	

试验后目视观察,处于割台工作幅宽内的苜蓿植株均被有效梳脱,无漏梳。样机试验过程中平均行进速度为 0.68 m/s,作业效率为 0.73 hm^2/h,满足收获机械田间工作效率要求;草种收获机的种子采净率为 83.4%,远高于目前国内外苜蓿种子机械化采收约 50% 的采净率,实现了苜蓿小粒径种子低损高净度采收目标,验证了所设计样机及梳脱割台功能有效性。

5 结论

(1)设计了一种机械梳脱耦合负压气流吸附的增流式半喂入苜蓿种子收获机。基于苜蓿种子收获过程中的损失抑制机理进行了割台关键部件设计,采用捋穗式梳齿降低苜蓿种子收获过程中的未梳损失,并设计了滚筒-壁面组合式气流喉口和负压增流风机降低苜蓿种子收获过程中的落粒与飞溅损失。

(2)开展了梳齿梳脱过程中的运动学分析,确定了梳脱速比为 36 ~ 50,梳脱滚筒半径为 290 mm,并得出影响未梳损失的关键参数为梳脱滚筒转速、割台行进速度和梳脱滚筒中心离地高度。利用 CFD 仿真结合 CCD 正交试验法探明了梳脱滚筒转速、气流喉口尺寸与负压风机转速交互作用对割台

流场的影响规律，并通过响应面法确定了气流喉口尺寸、梳脱滚筒转速和负压风机转速优化值依次为 83 mm、1 000 r/min 和 1 450 r/min。

(3)田间试验结果表明，当梳脱滚筒中心离地高度为 430 mm、机具行进速度为 0.68 m/s 时，苜蓿植株基本无种荚漏梳现象，苜蓿种子采净率达到 83.4%，作业效率达 0.73 hm^2/h，满足苜蓿种子机械化采收要求，验证了梳脱割台功能有效性。

参 考 文 献

[1] 王晓春，韩鹏，汪伟，等. 紫花苜蓿与饲用燕麦混合青贮研究[J]. 现代畜牧科技，2024(4)：74－76.
WANG Xiaochun，HAN Peng，WANG Wei，et al. Study on mixed silage of alfalfa and forage oats[J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology，2024(4)：74－76. (in Chinese)

[2] 李茂娜，王晓玉，杨小刚，等. 圆形喷灌机条件下水肥耦合对紫花苜蓿产量的影响[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：133－140.
LI Maona，WANG Xiaoyu，YANG Xiaogang，et al. Effects of water-fertilizer coupling on alfalfa yield under center pivot irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：133－140. (in Chinese)

[3] 王雪萌，张涵，宋瑞，等. 中美牧草种子生产比较[J]. 草地学报，2021，29(10)：2115－2125.
WANG Xuemeng，ZHANG Han，SONG Rui，et al. Comparison of forage seed production between China and U. S. A[J]. Acta Agrestia Sinica，2021，29(10)：2115－2125. (in Chinese)

[4] 陈曦，任树梅，杨培岭，等. 京郊地区苜蓿草地土壤水分状况与产草量的研究[J]. 农业工程学报，2005，21(13)：218－220.
CHEN Xi，REN Shumei，YANG Peiling，et al. Relationships between soil moisture conditions and alfalfa yield in the suburb of Beijing[J]. Transactions of the CSAE，2005，21(13)：218－220. (in Chinese)

[5] 永海，文明，额尔敦乌日图. 我国苜蓿草种植情况及发展困境-基于内蒙古阿鲁科尔沁旗的实地调查[J]. 安徽农业科学，2024，52(8)：263－265，274.
YONG Hai，WEN Ming，ERDUN Wuritu. Alfalfa planting situation and development in China-based on filed investigation of Inner Mongolia Ar Horqin Banner[J]. J. Anhui Agric. Sci.，2024，52(8)：263－265，274. (in Chinese)

[6] 赵馨馨，杨春. 我国草种子国际贸易格局及进出口量预测[J]. 草业科学，2020，37(8)：1646－1655.
ZHAO Xinxin，YANG Chun. International trade patterns and prediction of import and export of grass seeds in China[J]. Pratacultural Science，2020，37(8)：1646－1655. (in Chinese)

[7] 陈文星，万其号，高英杰，等. 苜蓿种子收获机械研究现状及问题探讨[J]. 农机化研究，2023，45(12)：1－6.
CHEN Wenxing，WAN Qihao，GAO Yingjie，et al. Current status and issues in research on machinery for harvesting alfalfa seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(12)：1－6. (in Chinese)

[8] 刘伟，李凤鸣，李伟，等. 牧草种子收获机研究现状与展望[J]. 农业工程，2021，11(7)：17－20.
LIU Wei，LI Fengming，LI Wei，et al. Research status and prospect of forage grass seed harvester[J]. Agricultural Engineering，2021，11(7)：17－20. (in Chinese)

[9] 王德成，贺长彬，武红剑，等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：1－25.
WANG Decheng，HE Changbin，WU Hongjian，et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(8)：1－25. (in Chinese)

[10] 李凤鸣，李伟，王强，等. 禾本科牧草种子采集装置设计与试验[J]. 农业工程，2022，12(4)：83－87.
LI Fengming，LI Wei，WANG Qiang，et al. Design and experiment of pick device for gramineous grass seed[J]. Agricultural Engineering，2022，12(4)：83－87. (in Chinese)

[11] 李凤鸣，刘贵林，张英俊，等. 自走式牧草种子收获机的设计与试验[J]. 农机化研究，2023，45(4)：66－73.
LI Fengming，LIU Guilin，ZHANG Yingjun，et al. Design and testing of a self-propelled forage seed harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(4)：66－73. (in Chinese)

[12] 刘贵林，杨世昆，贾红燕，等. 我国苜蓿种子收获机械研究的现状和发展[J]. 草业科学，2007，24(9)：58－62.
LIU Guilin，YANG Shikun，JIA Hongyan，et al. The present situation and development of research about *Medicago sativa* seed harvesting machinery in China[J]. Pratacultural Science，2007，24(9)：58－62. (in Chinese)

[13] 王强，刘贵林，杨莉，等. 紫花苜蓿种子机械化收获现状及发展方向——以内蒙古自治区为例[J]. 农业工程，2019，9(6)：1－5.
WANG Qiang，LIU Guilin，YANG Li，et al. Present situation and development direction of alfalfa seed harvesting mechanization in Inner Mongolia[J]. Agricultural Engineering，2019，9(6)：1－5. (in Chinese)

[14] 孙锦秀，张平，孙先明. 黑龙江牧草种子收获机械现状及发展[J]. 农机化研究，2006，28(2)：32－33.
SUN Jinxiu，ZHANG Ping，SUN Xianming. Present situation of grass harvesting machinery and its development in Heilongjiang Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2006，28(2)：32－33. (in Chinese)

[15] SAMUEL E. Blue-grass-seed：US1063812[P]. 1913－06－03.

[16] WOODSON J. Grass-seed harvester：US1212053[P]. 1917－01－09.

[17] JOHN C. Seed harvester：CA1166456[P]. 1984－01－26.

[18] HEREDIA A，DETRAIN C. Influence of seed size and natum on recruitment in the polymorphic harvester ant messor barbarus[J]. Behavioural Processes，2005，70(3)：273－300.

[19] GALE G. Automatic height control of a stripper harvester using a tactile sensor to detect the crop[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1995,61(4):217 - 226.
[20] 黑龙江省畜牧机械化研究所. 苜蓿种子收获机:CN90217920.9[P]. 1991 - 4 - 3.
[21] 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院. 气吸式纵向倾斜滚筒草籽收获机:CN02207044.3[P]. 2004 - 06 - 09.
[22] 王德成,赵彦瑞,尤泳,等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):178 - 187.
WANG Decheng, ZHAO Yanrui, YOU Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):178 - 187. (in Chinese)
[23] 鄂继芳,杨树青,张万锋,等. 暗管条件下牧草种植对农牧交错区盐渍土的改土效应[J]. 农业机械学报,2024,55(9):402 - 410.
E Jifang,YANG Shuqing,ZHANG Wanfeng,et al. Effect of forage planting on improvement of saline soil under subsurface pipe in agro-pastoral intertwined zones[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):402 - 410. (in Chinese)
[24] 陈涛,衣淑娟,李衣菲,等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报,2023,54(5):91 - 100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):91 - 100. (in Chinese)
[25] 杨开鑫,赵建涛,王旭哲,等. 不同灌溉方式及施磷对紫花苜蓿产量、品质及水磷利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2023,39(21):130 - 138.
YANG Kaixin,ZHAO Jiantao,WANG Xuzhe,et al. Effects of different irrigation methods and phosphorus application on alfalfa yield,quality and water and phosphorus use efficiency[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(21):130 - 138. (in Chinese)
[26] 李锦晶,杨彦斌,闫炜,等. 白银市种田乡紫花苜蓿与燕麦混播模式效果初探[J]. 南方农业,2023,17(7):139 - 142.
[27] 袁建宁,李显旺,张晓文,等. 梳脱式收获机设计理论的研究[J]. 农业机械学报,1998,29(2):38 - 44.
YUAN Jianning,LI Xianwang,ZHANG Xiaowen,et al. Research on the design theory of comb-type harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1998,29(2):38 - 44. (in Chinese)
[28] 宁国鹏,王德成,王光辉,等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(1):84 - 89,133.
NING Guopeng,WANG Decheng,WANG Guanghui,et al. Design and CFD simulation of quad-pass drum dryer-separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):84 - 89,133. (in Chinese)
[29] 范国昌,李宽,齐新,等. 牧草种子梳脱式收获台性能影响因素分析[J]. 农业机械学报,2007,38(10):198 - 200.
FAN Guochang,LI Kuan,QI Xin,et al. Analysis of factors affecting the performance of forage seed comb-type harvesting platforms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(10):198 - 200. (in Chinese)
[30] 李中华,王德成,刘贵林,等. 正压式气流排种器排种效果试验[J]. 农业工程学报,2009,25(1):89 - 93.
LI Zhonghua,WANG Decheng,LIU Guilin,et al. Experimental study on sowing seeds by air-stream metering mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(1):89 - 93. (in Chinese)
[31] 高扬,王德成,王光辉,等. 紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化[J]. 农业机械学报,2010,41(6):113 - 117,162.
GAO Yang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Effect prediction model and process optimization of the drying and separating for leaf-stem of fresh chopped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):113 - 117,162. (in Chinese)
[32] 罗小燕,王德成,王光辉,等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报,2009,40(10):71 - 74.
LUO Xiaoyan,WANG Decheng,WANG Guanghui,et al. Optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(10):71 - 74. (in Chinese)
[33] 陈树人,肖君,饶师任,等. 黄花苜蓿收获机吹送装置气流速度场 CFD 分析[J]. 农业工程学报,2016,32(12):39 - 46.
CHEN Shuren,XIAO Jun,RAO Shiren,et al. CFD numerical analysis of airflow blowing velocity-field of *Medicago hispida* harvester[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(12):39 - 46. (in Chinese)
[34] 兰凌霄,李凤鸣,王强,等. 基于 CFD 的牧草种子收获机沉降箱体改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊2):150 - 155,172.
LAN Lingxiao,LI Fengming,WANG Qiang,et al. Improvement design and experiment of settlement box of forage grass seed harvester based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp. 2):150 - 155, 172. (in Chinese)
[35] 高雄发,施卫东,张德胜,等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(5):101 - 106.
GAO Xiongfa,SHI Weidong,ZHANG Desheng,et al. Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(5):101 - 106. (in Chinese)