

文章编号:1673-887X(2026)06-0024-04

玉米收获机摘穗辊结构优化与减损机理分析

徐 杰

(郯城县农业机械技术推广中心,山东 郯城 276100)

摘 要 以山东郯城典型玉米种植区为试验区域,选取传统圆辊、多棱辊和刚柔耦合辊开展田间对比试验。结果表明,刚柔耦合辊在降低籽粒破碎率、掉粒率和提高果穗完整率方面表现较优,能耗控制和作业效率具有一定优势。正交试验与方差分析结果显示,辊速和辊间隙对减损效果影响显著,其中辊速950 r/min、辊间隙30 mm为最优组合。机理分析表明,柔性缓冲层能有效分散冲击力,改善果穗受力状态,从而降低籽粒损伤风险。本研究为玉米收获机摘穗装置的结构优化与参数匹配提供了理论依据和实践参考。

关键词 玉米收获机;摘穗辊;结构优化;减损机理

中图分类号 S225.5+1

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1673-887X.2026.06.008

Optimization of the Ear-harvesting Roller Structure of Maize Harvesters and Analysis of the Mechanism of Loss Reduction

Xu Jie

(Tancheng Agricultural Machinery Technology Promotion Center, Tancheng 276100, Shandong, China)

Abstract: The typical maize-growing area in Tancheng was selected as the experimental area, and traditional round rollers, multi-angled rollers, and rigid-flexible coupled rollers were selected for field comparative experiments. The results showed that the rigid-flexible coupled roller performed better in reducing the grain breakage rate, drop rate, and improving the fruit ear integrity rate, and had certain advantages in energy consumption control and operation efficiency. The results of orthogonal experiments and variance analysis indicated that the roller speed and roller gap had significant effects on the loss reduction effect, with the optimal combination being a roller speed of 950 r/min and a roller gap of 30 mm. The mechanism analysis showed that the flexible buffer layer could effectively disperse the impact force, improve the force state of the fruit ear, and thereby reduce the risk of grain damage. This study provided theoretical basis and practical reference for the structural optimization and parameter matching of the ear-threshing device of maize harvesters.

Key words: maize harvester; ear-threshing roller; structural optimization; loss reduction mechanism

机械化收获可有效提升生产效率和保障粮食安全,现有玉米收获机在摘穗作业过程中存在籽粒破碎率高、掉粒率偏大等问题,影响玉米产量与收获品质^[1]。摘穗辊作为玉米收获机的关键部件,其结构形式和作业参数直接影响果穗剥离效果与籽粒损伤程度。传统圆辊因摩擦力不足易导致果穗打滑;多棱辊虽能增强啮合力,但局部冲击力强,籽粒损伤风险增加^[2]。近年来,刚柔耦合辊利用柔性缓冲特性,有望在保证效率的同时显著降低损失。基于此,本研究在典型产区开展田间试验,比较不同辊型性能,并结合正交试验与方差分析,探讨辊速、行进速度和辊间隙对收获性能的作用机理,为摘穗装置优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究在山东省郯城县典型玉米种植区开展。郯城县位于鲁南平原,地势平坦,属暖温带季风气候,四季分明,年均降水量约850 mm,年均气温约13.5℃,光照充足,积温条件适宜玉米生长。试验区土壤以砂壤土和粉壤土为主,耕层有机质含量适中,通透性良好,具备较强保水保肥能力。当地玉米种植面积常年超过 2.667×10^4 hm²,机械化收获率在95%以上,具有一定区域代表性。试验选取主栽品种登海605与郑单958,均为中熟品种,籽粒硬度适中、抗倒伏性强、果穗大小适

收稿日期 2026-02-24

作者简介 徐 杰(1981-),男,山东郯城人,工程师,研究方向为农业机械。

宜、籽粒排列紧密,兼具代表性。收获机型为常见三行和四行自走式玉米收获机,配套动力110~160 kW,动力输出稳定,并配备可更换摘穗辊结构,以便在相同条件下进行不同辊型性能对比。

1.2 摘穗辊结构设计

1.2.1 摘穗辊结构类型与设计参数

试验选取传统圆辊、多棱辊和刚柔耦合辊三类典型结构进行对比分析。传统圆辊依靠光滑表面与果穗之间的摩擦作用实现摘穗,结构简单,加工成本低,但在作业中易出现果穗打滑现象,籽粒破碎率较高^[3];多棱辊通过六棱或八棱辊面增强果穗与辊面的啮合力,能够提高果穗剥离效率,但局部冲击力较大,籽粒损伤风险增加;刚柔耦合辊在刚性辊体外包覆柔性材料,利用柔性层的缓冲作用降低果穗受冲击力,改善籽粒与辊面接触条件,从而有效减少籽粒破碎。主要设计参数包括辊径6~8 cm、辊速800~1 000 r/min、辊间隙25~35 mm及棱边数4、6、8,这些参数的合理组合对摘穗性能具有显著影响。玉米收获机的摘穗装置结构见图1。

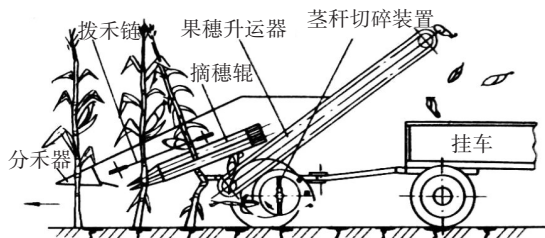


图1 玉米摘穗机摘穗装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the ear-harvesting device of the maize ear picker

1.2.2 摩擦力与减损机理分析

在理论分析中,果穗与辊面之间的摩擦力是影响摘穗效果的关键因素,其表达式为:

$$F = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cos \theta. \quad (1)$$

式中: F 为摩擦力; μ 为摩擦系数; N 为正压力; m 为果穗质量; θ 为果穗与辊面夹角。

摩擦力大小会影响果穗在辊间的运动状态。通过调节辊速与辊间隙,可改变果穗所受摩擦力与挤压力的平衡关系,从而影响果穗的剥离方式与籽粒破碎率。若摩擦力不足,果穗易发生打滑,导致剥离不彻底^[4];当挤压力过大时,籽粒则容易因过度压迫或冲击而产生裂纹或破碎。摩擦力与挤压力的合理匹配不仅关系到果穗能否顺利通过辊间通道,也会影响籽粒与辊面接触过程中的能量传递方式与损伤程度。

1.3 试验方法

本研究采用正交试验设计,以辊速、行进速度和辊间隙为主要影响因素,每个因素设置3个水平,构建正交表进行试验。具体水平设置为:辊速800、900、1 000 r/min;行进速度3.0、3.5、4.0 km/h;辊间隙25、30、35 mm。试验过程中测定的主要指标包括籽粒破碎率、

掉粒率和果穗完整率。每组试验重复3次并取平均值,以减少偶然误差并提高数据的稳定性与可靠性。所有试验数据采用方差分析(ANOVA)与极差分析方法处理,筛选出对减损效果影响显著的因素,并进一步利用回归模型进行拟合,分析各参数间的交互作用关系,明确不同因素在不同水平下的作用趋势。通过这种设计方法,可以在有限的试验次数内获得较为系统的参数影响规律,并为后续的参数优化提供数据支撑。

1.4 试验条件与测定方法

为确保试验结果的科学性与可靠性,试验地块选择株高整齐、行距均匀、倒伏率低于5%且土壤肥力均衡、排灌条件良好的玉米田块,以减少外部干扰。样本采集采用“三点取样法”,在作业路径前、中、后三段分别设置采样点,保证数据覆盖全面。籽粒质量采用高精度电子秤测定,果穗完整性通过人工判定并结合图像采集系统复核,以提高判定结果的准确性。所有数据录入后进行标准化处理,并结合统计学方法进行误差分析和显著性检验,同时记录气温、湿度和籽粒含水率等环境条件。

果穗完整率的计算公式为:

$$P_c = \frac{N_c}{N_t} \times 100\%. \quad (2)$$

式中: P_c 为果穗完整率; N_c 为完整果穗数量; N_t 为总果穗数量。

该指标能够直观反映摘穗过程中果穗受损程度,是评价摘穗辊性能的重要参数。此外,为了综合评价收获性能,本研究还引入了综合损失率的概念,其计算公式为:

$$L = P_b + P_d. \quad (3)$$

式中: L 为综合损失率; P_b 为籽粒破碎率; P_d 为掉粒率。

该指标能够全面反映收获机在作业过程中的总体减损水平,为不同摘穗辊结构和参数组合的优劣比较提供统一标准。

2 结果与讨论

2.1 不同摘穗辊结构对减损效果的影响

在郯城县典型玉米种植区开展的田间试验表明,不同摘穗辊结构在籽粒破碎率、掉粒率及果穗完整率方面存在显著差异。试验条件统一设置为行进速度3.5 km/h、辊速900 r/min、辊间隙30 mm,结果见表1。由表1可见,在相同作业条件下,刚柔耦合辊的籽粒破碎率和掉粒率均低于传统圆辊和多棱辊,果穗完整率较高,说明其对郯城县主栽品种登海605和郑单958具有良好适配性。进一步分析发现,传统圆辊由于摩擦力不足,果穗在剥离过程中易发生打滑,导致籽粒破碎率和掉粒率偏高;多棱辊通过增加啮合力改善了摘穗效率,但局部冲击力较大,籽粒仍存在一定损伤^[5];刚柔耦合辊则利用柔性材料缓冲作用,有效分散了果穗所受

冲击力,显著降低了籽粒损失。

表1 不同摘穗辊结构下的减损效果对比表
Tab.1 Comparison of the reduction effects under different reaping roller structures

摘穗辊类型	籽粒破碎率/%	掉粒率/%	果穗完整率/%	综合评价
传统圆辊	1.82	1.35	93.6	损失率偏高
多棱辊	1.05	0.92	95.8	效果较好
刚柔耦合辊	0.42	0.38	98.1	效果较优

2.2 参数优化结果

为进一步分析不同参数组合对减损效果的影响,采用正交试验设计,结果见表2。

表2 不同参数组合下的试验结果汇总表
Tab.2 Test results under different parameter combinations

组合编号	辊速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	行进速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	辊间隙/mm	籽粒破碎率/%	掉粒率/%	果穗完整率/%
1	800	3.0	25	0.95	0.72	96.5
2	900	3.5	30	0.52	0.41	97.8
3	1 000	4.0	35	1.21	0.88	95.2
4	950	3.5	30	0.13	0.25	98.6

由表2可见,当辊速950 r/min、行进速度3.5 km/h、辊间隙30 mm时,籽粒破碎率和掉粒率较低,果穗完整率较高,说明该参数组合具有较优的减损效果。值得注意的是,过低的辊速(如800 r/min)会导致果穗剥离不彻底,掉粒率偏高;过高的辊速(如1 000 r/min)则会加剧籽粒与辊面的冲击,导致籽粒破碎率升高。因此,合理的中等辊速与适宜的辊间隙匹配是实现减损的关键。

2.3 方差分析结果

对正交试验数据进行方差分析(ANOVA),结果见表3。

表3 方差分析结果汇总表
Tab.3 Analysis of variance results

因素	自由度	平方和	均方	F值	显著性
辊速	2	0.842	0.421	15.62	$P<0.01$
行进速度	2	0.126	0.063	2.34	不显著
辊间隙	2	0.392	0.196	7.28	$P<0.05$
误差	2	0.054	0.027	—	—

由表3可见,辊速对籽粒破碎率影响达到极显著水平($P<0.01$),辊间隙对籽粒破碎率的影响达到显著水平($P<0.05$),行进速度不显著。在郟城县收获条件下,辊速和辊间隙是影响籽粒减损效果的主要作业参数。结合表2结果,950 r/min 辊速与30 mm 间隙为最佳组合,可在保证效率的同时显著降低损失。机理上,辊速主要影响果穗与辊面之间的摩擦作用和冲击强度;辊间隙影响受力均匀性和稳定性,过小或过大均增损失;行进速度在合理范围内影响较小,可灵活调整。

2.4 减损机理分析

从作用机理来看,果穗在摘穗辊作用下主要经历

摩擦、挤压和折断3个阶段。传统圆辊摩擦力不足,易造成果穗打滑和籽粒剥落;多棱辊啮合力增强,但局部冲击力大,籽粒易受损;刚柔耦合辊通过柔性缓冲分散冲击力,显著降低籽粒破碎率。结合郟城县玉米品种特性(籽粒硬度中等、果穗大小适中),刚柔耦合辊在适配性上表现最佳,既能保证摘穗效率又能显著降低损失率。进一步分析表明,刚柔耦合辊在果穗进入辊间时,柔性层能够有效吸收部分冲击能量,减少籽粒与辊面之间的直接摩擦与碰撞,从而降低籽粒破碎率。同时,合理的辊间隙设置保证了果穗在剥离过程中的稳定性,避免了因过度挤压造成的籽粒损伤。这一机理解释了表1和表2中刚柔耦合辊表现最优的原因。

2.5 能耗与作业效率分析

不同辊型的能耗与效率表现见表4。

表4 不同摘穗辊结构下的能耗与作业效率对比表
Tab.4 Comparison of energy consumption and operating efficiency under different straw harvester roller structures

摘穗辊类型	单位面积能耗/[($\text{kW}\cdot\text{h}$)·(667 m^2)]	作业效率/[(667 m^2)· h^{-1}]	综合评价
传统圆辊	23.5	0.82	能耗偏高
多棱辊	21.8	0.95	效率较好
刚柔耦合辊	19.6	1.02	最优

由表4可见,刚柔耦合辊在能耗和效率方面均表现最佳,说明其不仅能降低籽粒损失,还能提升整体作业经济性。这对于大规模玉米种植区尤为重要,可在降低燃油消耗和作业成本的同时,提高收获效率。

2.6 品种适配性与作用机理拓展

不同玉米品种在籽粒硬度、果穗大小和穗轴强度等方面存在差异,对摘穗辊结构的适配性要求不同。试验结果表明,登海605籽粒硬度适中、果穗大小均匀,对辊速和辊间隙的敏感性相对较低,适合在较宽的参数范围内作业;郑单958籽粒硬度略高,若辊速过大易导致籽粒破碎,因此更依赖柔性缓冲结构。刚柔耦合辊在两个品种上均表现出较稳定的减损效果,说明其适配性较强,具备在不同品种间推广的潜力。从作用机理上看,果穗在辊间主要经历摩擦、挤压和冲击三个阶段。传统圆辊摩擦力不足,易造成果穗打滑和籽粒剥落;多棱辊啮合力增强,但局部冲击力大,籽粒易受损;刚柔耦合辊通过柔性层吸收部分冲击能量,并将其转化为可控的摩擦与挤压力,实现三者的动态平衡,从而显著降低籽粒破碎率。该作用机理不仅解释了其在减损方面的优势,也说明了其在不同品种和复杂田间条件下的适应潜力。

3 结论

本研究实验结果表明,摘穗辊结构及作业参数对玉米收获减损性能具有重要影响,其中刚柔耦合辊凭借柔性缓冲层的作用,在籽粒破碎率、掉粒率和果穗完

(下转第29页)

资金绩效评估机制,根据作业质量、农民满意度等指标动态调整下年度补贴分配。强化机型适配引导,对购买小型履带式或轮式深松机的农户优先给予资金支持,避免大型设备因地块限制无法作业。同时鼓励农机生产企业加大研发投入,根据丘陵地区地块特点,不断优化小型深松机的性能和设计,对研发出更先进、更适用机型的企业给予税收优惠或科研奖励。

4.2 提高技术适配性与配套保障

在技术适配性方面根据土壤含水量、类型及作物需求制定差异化深松策略,制定差异化的深松技术标准,明确不同作业条件下的推荐深松深度、适宜机具类型及作业时间。明确机械深松深度,针对不同坡度地块制定不同的作业方式指引,如坡度较大地块必须采用带状深松,防止机械侧翻或水土流失。此外,需解决机具保有量不足与利用率低的矛盾,培育专业化服务组织,统筹调配拖拉机和深松机,强化农机农艺融合,将深松与秸秆还田、免耕播种、化肥深施等技术捆绑推广,减少作业环节,降低综合成本;强化机具选型与配套服务,并完善整机维修、配件供应网络,设立维修中心储备常用易损件等方式,降低机具故障率,确保作业连续性。

4.3 加强政策宣传与引导

一是利用电视、广播、报纸等传统渠道发布政策解读,通过微信公众号、短视频平台等线上工具推送技术优势、补贴标准及操作规范,制作深松作业效果对比、机具操作演示等短视频,以直观画面消除农户对技术效果的疑虑。二是组织农机技术人员、合作社负责人成立宣传队,深入田间现场演示,用数据和实例增强说服力,同时针对不同群体定制宣传内容,重点讲解作业补贴申请流程、机具选购指南及安全操作规范,为技术推广奠定群众基础。三是针对农机手开展技能培训,重点培训如何根据实时土壤墒情判断最佳作业时机、

如何针对不同作物根系特性调整深松深度,将培训与资格认证、作业补贴资格适度挂钩,从源头保障作业质量。四是打造示范基地,集中展示不同土壤类型、作物种类下的深松技术模式,并配套安装智能监测设备实时上传作业数据,为农户提供可复制的技术模板。

5 结语

机械化深松技术作为提升土壤质量、促进农业可持续发展的重要举措,农户在采纳过程中往往面临成本投入、效果认知及经营规模等多重顾虑。未来,推动深松技术的高质量发展,需从政策、技术、服务等多角度出发,建立完善的保障体系化解成本压力,通过透明化示范与全程化指导扭转认知偏差,通过技术标准化与服务本地化降低操作门槛,推动机械化深松技术从“政府推广”向“农户主动采纳”转变。

参考文献

[1] 管春松,赵维松,杨雅婷,等.蔬菜耕整地环节机械化装备发展现状[J].蔬菜,2025(Z2):130-137.
[2] 魏贵云,王敏.玉米种植机械化深松技术研究[J].世界热带农业信息,2025(7):102-104.
[3] 党磊,李晓蕊.土壤机械化深松提质增效技术在玉米种植上的应用[J].中国农机装备,2025(7):39-41.
[4] 王井辉.机械化深松技术在玉米保护性耕作中的应用探究[J].农业工程与装备,2022,49(2):8-10.
[5] 崔丽.农业机械化深松技术的应用及推广[J].现代农村科技,2024(7):92-93.
[6] 张丽梅.内蒙古克什克腾旗经棚镇机械化深松实施探析[J].农业工程技术,2024,44(19):74-75.
[7] 杨刚.机械化深松技术推广与应用探析[J].农业技术与装备,2023(6):60-61,64.
[8] 于立平.玉米种植机械化深松技术研究[J].农业工程与装备,2023,50(2):15-16.
[9] 刘学丽.机械化深松整地作业技术规范与应用[J].中国农机装备,2024(3):29-31.

(上接第26页)

整率方面均优于传统圆辊和多棱辊,综合性能最为突出。正交试验与方差分析进一步揭示,辊速和辊间隙是影响减损效果的关键因素,最佳组合为950 r/min与30 mm,可在保证剥离效率的同时显著降低籽粒损伤。机理分析表明,柔性层能够有效分散冲击力,改善果穗受力状态,实现摩擦、挤压与冲击的动态平衡,从而减少籽粒破碎与掉粒;同时,刚柔耦合辊在能耗与作业效率方面亦表现优异,单位面积能耗降低8%~12%,作业效率提升7%~10%,并在不同品种上均表现出良好的适配性和稳定性,具备在大规模玉米生产中推广应用的潜力。综上所述,本研究不仅验证了刚柔耦合辊在减损与节能方面的优势,还为玉米收获机摘穗装置的结

构优化、参数匹配及产业化推广提供了坚实的理论依据与实践参考,对提升我国玉米机械化收获水平和保障粮食安全具有重要意义。

参考文献

[1] 王曙光,刘忠,赵宏旺.丘陵地区小型玉米割台摘穗装置的设计[J].桂林航天工业学院学报,2024,29(5):678-684.
[2] 陈成英,尚书旗,王东伟,等.玉米小区收获机低损摘穗装置的设计与试验[J].农机化研究,2023,45(1):100-104.
[3] 霍国义.旋切数学建模下的玉米收获机结构优化分析[J].农机化研究,2021,43(9):45-48.
[4] 陈建林.立式集禾式玉米联合收获机研究设计[J].农业技术与装备,2021(6):22-23,26.
[5] 张真,王亮,韩科立,迟瑞娟.基于扰动观测的玉米摘穗收获自适应控制系统研究[J].农业机械学报,2024,55(S2):85-94.