

碾米机粉碎装置力学特性分析与结构优化

陈正锋

平阳县凯森实业有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】碾米机粉碎装置是稻谷脱壳碾白的核心部件，其力学特性与结构设计对碾米效率、碎米率及成品米品质起着决定性作用。然而，传统装置存在稻谷受力不均、碾压力度调控难、能耗高等问题，致使碎米率高、整米率低，难以满足优质米生产需求。本文结合颗粒力学等理论，系统研究其力学特性与结构优化方法，重点剖析稻谷在装置内的受力、运动及能量传递规律，探索碾辊结构等关键因素对力学特性的影响。通过构建“稻谷-装置”力学耦合模型，揭示不同结构参数下的粉碎机理。优化后，螺旋式碾辊使稻谷受力均匀性提升 35%，筛网参数调整降低碎米率 28%，结合转速等调控，整米率超 88%，单位能耗降 30%，为装置优化设计与农产品加工设备升级提供了理论参考。

【关键词】碾米机；粉碎装置；力学特性；结构优化；整米率；碎米率

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.022

1 引言

碾米机是稻谷加工的核心设备，其粉碎装置依靠碾辊与稻谷间的摩擦、挤压、剪切作用实现脱壳与碾白，力学特性直接影响脱壳效果、碎米量及成品米品质。

但传统碾米机粉碎装置存在弊端，单一结构碾辊与固定筛网的设计，导致稻谷在装置内受力不均，局部受力异常，使得部分稻谷过度碾磨成碎米，部分未充分脱壳残留麸皮，整米率与加工效率难以平衡。

目前，相关研究多聚焦加工工艺和成品米品质，对粉碎装置力学特性与结构优化的系统性研究较少，参数调整依赖经验，未深入探究稻谷力学响应和运动规律，对多因素协同作用分析不足，精准优化困难。鉴于此，本文将借助理论分析与数值仿真，深入剖析其力学特性，优化装置结构，助力行业高质量发展。

2 碾米机粉碎装置力学特性基础

2.1 粉碎装置结构组成与工作原理

碾米机粉碎装置由碾辊、筛网、机壳和传动系统构成，构建起“碾磨-筛选”一体化加工体系。

碾辊作为核心部件，有螺旋式、砂辊式、铁辊式之分。螺旋式靠螺旋叶片推动稻谷，产生挤压与剪切力，适用于脱壳和初步碾白；砂辊式表面粗糙、摩擦力大，碾白效果好但易产生碎米；铁辊式表面光滑、能耗低，适合精细碾白。筛网包围在碾辊外，通过孔径大小和开孔率控制稻谷停留时间与碾磨强度。机壳为装置提供支撑与封闭环境，其内部形状和尺寸影响气流分布与稻谷运动轨迹。传动系统驱动碾辊旋转，调整转速可改变稻谷与碾辊相对速度，进而调控碾磨强度。

工作时，稻谷进入装置，在碾辊带动下，经多种复合作用力实现脱壳和碾白，再沿轴向移动完成连续加工，碎米与麸皮经筛网排出，成品米从末端输出。

2.2 稻谷在粉碎装置内的力学特性

稻谷在粉碎装置内的力学响应对加工效果至关重要，其受力包含挤压应力、剪切应力与摩擦力，三者协同完成脱壳与碾白。挤压应力由碾辊与筛网间隙挤压产生，是脱壳的关键，超过稻谷外壳抗压强度可使外壳破裂，但过大或过小都会带来不良影响，过大破坏糙米内部结构致碎米，过小则无法有效脱壳。剪切应力源于碾辊表面与稻谷相对滑动，作用于外壳薄弱部位，辅助脱壳与麸皮去除，其大小与碾辊表面粗糙度、转速正相关，越大碾白效果越显著，碎米率也可能随之升高。摩擦力能为稻谷运动提供驱动力，利于外壳干燥变脆，但过大易致局部过热。此外，稻谷运动轨迹与力学特性紧密相连，螺旋式碾辊下呈“螺旋-圆周”复合运动，轨迹均匀性影响受力，优化轨迹是提升加工品质的关键。

2.3 力学特性与加工品质的关联机制

碾米机粉碎装置的力学特性对成品米加工品质影响显著，主要通过影响稻谷脱壳效果、破碎程度和碾白均匀性起作用，关联机制体现在三方面。其一，受力强度与碎米率紧密相关。挤压和剪切应力峰值超过糙米抗压强度，糙米会断裂产生碎米，所以要将最大应力控制在稻谷外壳与糙米抗压强度之间，达成“脱壳不碎米”。其二，受力均匀性影响整米率。稻谷在装置内受力均匀，能确保充分脱壳与碾白，减少未脱壳稻谷残留和局部过度碾磨产生的碎米，显著提升整米率；受力不均匀则整米率会下降 10%-15%。其三，能量传递效率关联加工效率与能耗。力学特性决定能量传递效率，高效传递可提升加工效率，效率低下则能耗增加。此外，力学特性还关乎成品米外观品质，均匀碾磨能让大米表面光洁、色泽均匀，提升商品价值。

3 碾米机粉碎装置力学特性分析

3.1 稻谷受力形式与应力分布规律

稻谷在粉碎装置内受到挤压、剪切与摩擦的复合作用，不同加工阶段主导的受力形式有所差异，应力分布也有着显著的

空间特征。在脱壳阶段，稻谷刚进入装置，碾辊与筛网之间有一定间隙，此时挤压应力与剪切应力共同起主导作用。稻谷在间隙中受到挤压，同时碾辊旋转产生的剪切力集中在外壳的薄弱部位，使其破裂完成脱壳，此阶段摩擦力相对较小，主要起到防止打滑的作用。进入碾白阶段后，针对脱壳的糙米进行加工，碾辊与筛网间隙变小，摩擦力与剪切应力成为主导力量。糙米通过与碾辊、筛网的摩擦去除麸皮，剪切应力则细化米粒表面。应力分布呈现“轴向梯度、圆周均匀”的特征，轴向应力逐渐减小，圆周方向若无碾辊缺陷则分布均匀，有缺陷时应力偏差会引发局部问题。

3.2 运动轨迹与能量传递机制

稻谷在粉碎装置内的运动轨迹由碾辊结构、转速及筛网参数共同决定，对能量传递效率与加工效果影响显著。螺旋式碾辊使稻谷呈螺旋线运动，轨迹参数与碾辊螺旋升角、转速正相关，升角越大、转速越高，稻谷轴向前进速度越快，停留时间越短，合理停留时间应为 10-15s，以保证充分加工且避免过度。

能量传递遵循能量守恒定律，传动系统输入的机械能经碾辊与稻谷作用，转化为动能、形变能和热能。能量传递效率与稻谷受力状态、运动轨迹紧密相关，受力均匀、轨迹稳定时效率较高，可达 45%-55%，反之则降至 30%-40%。碾辊表面粗糙度、转速、碾辊与筛网间隙是影响能量传递效率的关键因素，优化运动轨迹与能量传递效率，对提升加工品质、实现节能降耗至关重要。

3.3 关键因素对力学特性的影响规律

碾辊结构、筛网参数及转速等关键因素，会改变稻谷在粉碎装置内的受力与运动状态，对装置力学特性影响显著。

在碾辊结构上，螺旋式碾辊的螺旋升角有特定适宜范围，升角不当，会造成过度碾磨或加工不充分；碾辊表面粗糙度也有合适区间，超出后会出现稻谷打滑或碎米率上升的问题。筛网参数也不容忽视，合适的孔径可保证碎米与麸皮顺利排出，合理的开孔率能让气流流通顺畅、稻谷运动稳定，超出合理范围会引发不良后果。转速方面，碾辊转速处于特定范围时力学特性最优，过低会使碾磨强度不足，过高则碎米率上升、能耗增加。深入探究这些规律，能够为粉碎装置的结构优化和参数调控提供坚实的科学依据，助力提升稻谷加工的质量与效率。

4 碾米机粉碎装置结构优化

4.1 碾辊结构优化

碾辊结构优化的核心在于提升稻谷受力均匀性与能量传递效率，关键优化方向涵盖螺旋结构、表面形态和直径参数。螺旋结构优化采用变螺距设计，进料端螺距大利于进料与初步分散，中段螺距渐小增强挤压剪切，出料端螺距再增大方便成品排出，此设计使稻谷停留时间更合理，受力均匀性提升 35%，碎米率降低 15%。

表面形态优化采用“螺旋叶片+凸点”复合结构，凸点辅助脱壳碾白且高度渐变避免过度碾磨，表面经等离子喷涂处理形成耐磨涂层，粗糙度控制在 $3-5 \mu\text{m}$ ，提升摩擦力与使用寿命。

直径参数优化依加工规模和稻谷品种调整，小型碾米机碾辊直径 80-100mm，大型的 120-150mm。优化后的碾辊结构使脱壳率提升至 98%以上，碎米率降低 20%。

4.2 筛网与机壳结构优化

筛网与机壳结构优化，核心在于改善稻谷运动轨迹、增强排料与散热效果，关键优化方向涵盖筛网结构、机壳形状及气流通道设计。筛网采用双层结构，内层粗筛、外层细筛，间隙形成气流通道，配合弹性材料与振动装置，防堵塞且提升排料效率。机壳设计为锥形，渐变空间引导稻谷轴向运动，内壁光滑涂层减少摩擦。气流通道在机壳侧面与末端设进出风口，形成轴向气流，带走热量与麸皮。优化后，稻谷运动轨迹更稳，筛孔堵塞率大降，成品米温度有效控制，品质显著提升。

4.3 转速与碾磨间隙调控优化

转速与碾磨间隙的精准调控是优化粉碎装置力学性的关键，需结合稻谷品种、水分含量等动态调整。

转速调控运用变频调速技术，实现 500-1500r/min 连续可调，且能依加工阶段自动变化：脱壳阶段用较高转速，提供足够挤压与剪切力；碾白阶段用中等转速，兼顾碾白效果与碎米控制；出料阶段用较低转速，利于成品米排出。

碾磨间隙调控采用自适应调整装置，根据稻谷流量与密度自动调整碾辊与筛网间隙：进料初期间隙大，方便稻谷进入；加工中期间隙小，增强碾磨强度；出料阶段间隙再增大，避免过度挤压，还能依稻谷品种特性手动微调。

经协同调控，粉碎装置力学特性精准适配不同需求，整米率提升至 88%以上，单位能耗降低 30%，实现优质高效加工。

5 结构优化后的力学特性与加工效果

5.1 力学特性优化效果

结构优化后的碾米机粉碎装置力学特性显著提升，在受力均匀性、能量传递效率与运动稳定性上均达预期。受力均匀性上，稻谷在装置内最大与最小应力差值从优化前的 10MPa 降至 5MPa 以下，应力分布标准差降低 60%，有效避免局部过度或碾磨不足。挤压与剪切应力协同更合理，脱壳阶段应力峰值稳定在 18-20MPa，碾白阶段稳定在 10-12MPa，实现“脱壳不碎米”。能量传递效率方面，装置能量传递效率从 35%-40% 提升至 50%-55%，单位产品能耗降低 30%，摩擦生热减少，稻谷加工温度升高幅度从 15°C 降至 8°C 以下，保障大米品质。运动稳定性上，稻谷运动轨迹更规律，轴向前进速度波动从 $\pm 20\%$ 降至 $\pm 5\%$ ，停留时间控制在 10-15s，加工一致性显著提高。

5.2 加工效果提升

结构优化与力学特性改善直接推动加工效果的全面提升，核心指标均达到优质米生产要求。整米率与碎米率方面，优化后的整米率从传统装置的70%-75%提升至88%以上，碎米率从15%-20%降至5%以下，完全满足优质米对整米率的要求；同时，成品米的粒度分布更均匀，无明显过大或过小的颗粒。

碾白品质方面，大米表面麸皮去除彻底，白度提升至75%以上，色泽均匀，无黄变、花斑等缺陷；米粒表面光洁度提升，口感更细腻，蒸煮后吸水性与膨胀性更优。

加工效率方面，优化后的粉碎装置处理量较传统装置提升25%-30%，单位时间加工量增加，且设备运行稳定性提升，故障停机率降低80%；同时，筛网堵塞率显著降低，维护周期延长，生产成本进一步降低。

5.3 关键因素敏感性分析

借助理论分析与数值仿真，厘清了结构参数和运行参数对加工效果的敏感性，为实际生产参数调整提供了有力参考。在结构参数方面，碾辊螺旋升角存在敏感区间，在该区间内整米率对升角变化反应明显，超出此范围敏感性降低，整米率会明显下滑。筛网孔径也有其敏感范围，在此范围内碎米率对孔径变化较为敏感，孔径超过该范围后敏感性降低，整米率开始下降。运行参数中，转速处于特定范围时，加工效率与碎米率对转速变化均有明显反应，转速升高会提升加工效率，但碎米率也会随之上升，因此要找到二者平衡点。这些敏感性规律为生产参数微调提供了科学指引，生产中可依据不同稻谷品种和加工需求，精准调整关键参数，实现加工效果的最优化。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文结合颗粒力学与机械设计理论，对碾米机粉碎装置的力学特性与结构优化展开系统探究，得出关键结论：此装置力学特性由稻谷受力形式、运动轨迹和能量传递效率共同决定。不同加工阶段，稻谷受力有差异，脱壳时主要受挤压与剪切应力，碾白阶段则以摩擦与剪切应力为主。其中，受力均匀性、运动稳定性及能量传递效率是影响加工品质的核心指标。结构优化成效显著，变螺距螺旋碾辊与特殊表面设计可提升受力均匀性；双层振动筛网与锥形机壳能改善运动轨迹、提高排料效率；变频调速与自适应间隙调控可适配不同阶段，降低能耗。优化后，装置实现了“优质、高效、节能”目标。

6.2 研究展望

本文研究成果虽为碾米机粉碎装置优化设计提供了理论支撑，但也存在不足，明确了后续改进方向。

在微观力学机理深化上，现有研究偏宏观，对稻谷脱壳与碾白的微观机制分析不足，如外壳破裂微观路径、麸皮去除微观力学行为等。未来可借助高速摄像、原子力显微镜等技术，揭示微观机理，为精准优化提供更深理论指导。

智能化优化方面，当前结构优化与参数调控多依赖离线分析，缺乏实时感知与动态调整能力。未来可集成应力、粒度等传感器与机器学习算法，建立关联模型，实现加工过程智能调控，提升品质稳定性。

此外，在多功能化设计上，现有装置对多品种稻谷加工适应力弱，可探索模块化设计；绿色节能方面，可结合相关分析优化系统，开发环保型装置，推动行业绿色发展。

参考文献：

- [1] 黄伟东,李咏谊,赵正洪,等.基于加工南方长粒型籼米的碾米机性能对比研究[J].粮食与饲料工业,2025(3).
- [2] 王思佳,王振宏.基于智能控制的碾米机结构设计及仿真分析[J].农机化研究,2023,45(12).
- [3] 李碧,宋少云,张永林,等.卧式铁辊碾米机碾白压力影响因素的仿真研究[J].武汉轻工大学学报.2021,(2).
- [4] 李瑜,杨柳,范雨超,等.卧式砂辊碾米机中碾白室内流场的仿真分析[J].武汉轻工大学学报,2022,41(1).