

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80979

# 智能胶辊砻谷机感知监测与品质调控技术 研究现状及进展

周时豪<sup>1</sup> 程敏<sup>1,2</sup> 徐雪萌<sup>1,2</sup> 曹宪周<sup>1,2</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南省粮食加工智能装备工程研究中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 胶辊砻谷机作为稻谷加工的关键设备, 其工艺效果对稻米加工品质、能耗、效率等加工效能指标具有重要影响。随着以智能化为特征的第四次工业革命的深入发展, 智能砻谷机的研发成为稻米加工机械发展的必然趋势。文章阐释了砻谷机智能化的基本内涵、技术特征和研究范畴, 综述了砻谷机砻谷基础理论、感知监测技术和品质调控技术, 分析了砻谷机智能化存在的问题, 并就未来努力方向进行了展望。

**关键词:** 胶辊砻谷机; 智能化; 稻谷; 感知监测; 品质调控; 智能决策

## Research status and progress on sensor monitoring and quality control technology for intelligent rubber roller huller

ZHOU Shihao<sup>1</sup> CHENG Min<sup>1,2</sup> XU Xuemeng<sup>1,2</sup> CAO Xianzhou<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Grain Processing, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** As the key equipment in rice processing, the technological performance of the rubber roller huller significantly impacts the quality, energy consumption, efficiency, and other performance indicators of rice processing. With the in-depth development of the Fourth Industrial Revolution, characterized by intelligence, the development of intelligent hullers has become an inevitable trend in the advancement of rice processing machinery. This paper explains the basic connotation, technical characteristics, and research scope of intelligent hullers, reviews the research progress on hulling theory, perception monitoring technology, and quality regulation technology, analyzes the existing issues in the intelligent upgrading of hullers, and looks forward to future development directions.

**Keywords:** rubber roller huller; intelligence; rice; perception detection; quality control; intelligent decision-making

稻谷加工涉及清理、砻谷、碾米及成品处理等工序, 其中砻谷直接影响产品品质和产量。砻谷工序的核心设备是胶辊砻谷机, 其通过一对特定线速度差和压力的弹性胶辊搓撕稻谷脱壳<sup>[1]</sup>。随着智能化成为第四次工业革命的核心特征, 稻米加工行业正经历巨大变革, 要求设备不仅提升自动化与信息化水平, 还需灵活应对多样化、个性化的市场需求。在此背景下, 国内外主流米机制造企

业纷纷推出了所谓“智能”砻谷机, 但这些设备普遍存在功能单一、自适应性弱、缺乏自我学习与自主决策能力等, 仍属于自动化产品。为此, 研究拟首先定义砻谷机智能化的内涵, 明确其技术特征与研究范畴; 然后从基础理论、感知监测、品质调控等方面系统梳理砻谷机智能化技术的发展现状, 深入分析其关键环节与瓶颈问题; 最后指出砻谷机智能化升级面临的挑战和发展方向, 以期为智

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金项目(编号: 232103810087); 郑州市 R&D 专项经费补助科研项目(编号: 22ZZRDZX14)

通信作者: 徐雪萌(1972—), 女, 河南工业大学教授, 硕士。E-mail: xuxuemeng7439@163.com

收稿日期: 2024-09-23 改回日期: 2025-02-21

引用格式: 周时豪, 程敏, 徐雪萌, 等. 智能胶辊砻谷机感知监测与品质调控技术研究现状及进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 241-248.

**Citation:** ZHOU Shihao, CHENG Min, XU Xuemeng, et al. Research status and progress on sensor monitoring and quality control technology for intelligent rubber roller huller[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 241-248.

能胶辊砻谷机及其关键技术的突破提供参考。

### 1 砻谷机智能化的基本内涵

#### 1.1 智能砻谷机的技术特征

智能砻谷机是一种将传统砻谷机与智能化技术相结合,综合运用感知、分析、协作、反馈等手段,实现自我诊断、自我维护、自动化生产和智能控制等功能的新颖稻谷脱壳设备。它利用物联网、大数据、AI 等技术进行智能调度、远程监控和故障预警等,进而优化工艺、提升品质、降低成本。与常规砻谷机相比,智能砻谷机能够实现自主感知、智能决策、自动执行、自我学习与维护等<sup>[2-3]</sup>,其技术优势主要包括:高度自动化、精准参数调节、强大数据处理、精准调控与远程管理、高效能源利用等<sup>[4]</sup>。

#### 1.2 砻谷机智能化技术研究范畴

如图 1 所示,砻谷机智能化技术的研发主要涵盖砻谷基础理论、感知监测技术、品质调控技术等研究范畴<sup>[5]</sup>。砻谷基础理论深入探究稻谷脱壳原理、稻谷特性、设备结构及运行参数、砻谷环境等,为构建智能决策系统奠定理论基础。感知监测技术则实时监测设备状态和关键工艺参数,如稻谷料流、胶辊状态、轧区温度、关键零部件振动等,为智能决策提供数据支持。品质调控技术基于感知数据实现执行机构工作状态的优化调整与设备故障诊断及维护,主要涉及喂料系统、胶辊轧距及转向、传动系统。智能决策系统作为智能化砻谷机的核心,负责处理感知数据,驱动品质调控系统,实现砻谷效率与质量的双重提升。

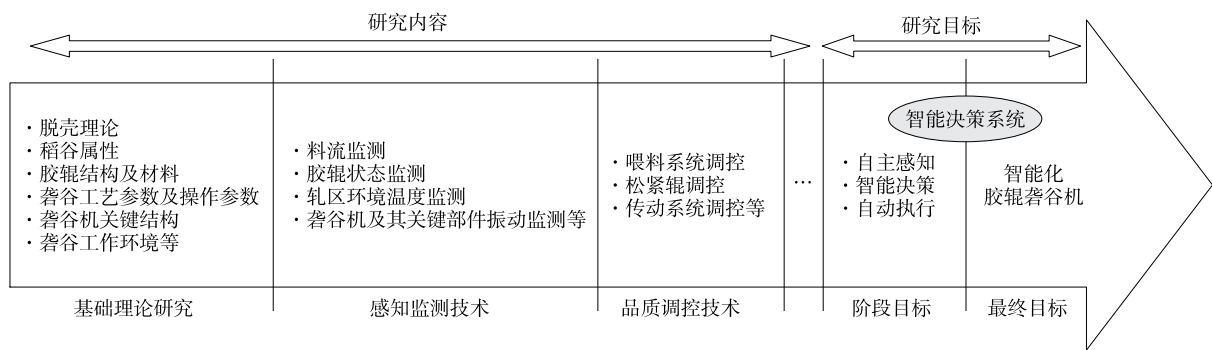


图 1 砻谷机智能化技术研究范畴

Figure 1 Research scope of intelligent technology for huller

### 2 砻谷基础理论研究进展

砻谷基础研究涉及稻谷脱壳理论、稻谷特性、胶辊形态结构及材料、砻谷工艺参数及操作参数、砻谷机关键结构及砻谷工作环境等方面,旨在揭示砻谷工艺效果的形成规律。

#### 2.1 脱壳理论

基于经典摩擦和弹性理论建立的早期稻谷脱壳模型一般将稻谷视为扁平体,胶辊视为球体,但因稻谷和胶辊形状以及稻谷与胶辊之间的摩擦特性都比假设的更加复杂,实际应用有一定局限性。郑晓<sup>[6]</sup>曾指出早期脱壳模型的相关参数计算模式太过单一,无法分析摩擦力和摩擦系数对稻谷摩擦脱壳本质的影响。随后,将黏着和滞后摩擦理论、弹性摩擦理论引入稻谷脱壳模型,在一定程度上提高了对稻谷脱壳过程的描述能力。为了更准确地描述稻谷脱壳过程,学者们进一步提出了圆柱胶辊与扁椭圆体稻谷的脱壳模型,如图 2 所示。

事实上,稻谷的真实截面轮廓由多段圆弧组成,而现有模型往往仅采用两段圆弧进行简化表示,这导致了模型与实际稻谷形态的较大差异<sup>[1]</sup>。另外,现有模型通常假设两胶辊的直径相同,而实际情况下由于磨损因素,两胶

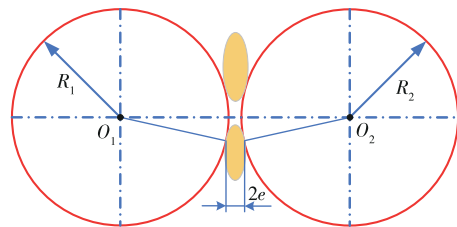


图 2 稻谷脱壳模型

Figure 2 Rice hulling model

辊的直径可能不完全相同。Han 等<sup>[7]</sup>采用多球填充方法构建了更加接近实际稻谷颗粒离散元模型。当前尽管在稻谷脱壳模型取得了显著进展,但因稻谷和胶辊的形状以及复杂的摩擦特性,现有模型仍难以完全准确描述稻谷的脱壳机理。

#### 2.2 稻谷特性

稻谷特性主要体现在稻谷品种与品质、稻谷入轧状态、稻谷物理特性等方面,在很大程度上与砻谷工艺效果直接相关。

2.2.1 稻谷品种 不同品种的稻谷因其硬度和韧性不同,导致其在砻谷过程中所需的作用力和速度也会有所

不同。李佳等<sup>[8]</sup>测定并发现了两种稻谷品质变化的总体趋势一致而程度不一的现象,其不仅证实了稻谷品种对磨谷效果的影响,还提示在实际生产中应根据稻谷品种调整磨谷工艺参数。Sharifi<sup>[9]</sup>发现,两种稻谷在相同含水率下的磨谷性能是不完全相同的。尽管稻谷品种对磨谷效果的影响已有研究,但具体的映射关系尚待明确,需要更多的试验与数据分析,以更深入地理解其影响机制。

**2.2.2 稻谷入轧状态** 当前,已初步揭示了稻谷取向角、颗粒层厚度等稻谷入轧状态对磨谷工艺效果的影响规律,以及谷粒在磨谷区域的运动规律等方面。Zareiforouh等<sup>[10]</sup>通过静载压缩试验发现稻谷在长轴和短轴方向上的破碎力存在明显差异。陈沛瑀等<sup>[11-12]</sup>利用离散元模拟和物理剪切试验发现稻谷取向角减小时脱壳率降低,而以长轴垂直于胶辊的取向角磨谷时,脱壳率可高达98%。张金成<sup>[13]</sup>更加全面地考虑了稻谷脱壳过程中的多个因素,发现稻谷垂直喂入最利于脱壳,颗粒层厚度增加会导致脱壳率与破碎率同时升高,而颗粒流速对两者影响不显著。目前,关于如何在实际生产中精确控制稻谷颗粒的取向角以实现最佳脱壳效果的研究还相对较少,且颗粒层厚度和流速对脱壳率和破碎率的具体影响机制需深入探究。

**2.2.3 稻谷物理特性** 当前国内外学者针对稻谷的力学特性、电学特性和硬度等物理特性的研究较少,在含水率方面的研究较多。Minaei等<sup>[14]</sup>研究发现,稻谷颗粒含水率升高则脱壳率降低。在此基础上,Payman等<sup>[15]</sup>进一步研究发现,线速差和含水率影响脱壳率,且长粒稻谷破碎率更高。范雨超<sup>[16]</sup>则从稻谷的断裂能入手,发现断裂能与速率、含水率呈负相关,不同速率、含水率、温度条件下,磨谷试验与压缩试验中稻谷断裂能的变化趋势相同,稻谷的玻璃化转变会降低其抗破坏能力。徐永阳等<sup>[17]</sup>从电学特性的角度探明了稻谷含水率与电学物理量之间的关系。然而,如何将电学特性应用在稻谷加工过程中尚需进一步的探索。

### 2.3 胶辊形态结构及材料

目前学术界对胶辊结构的研究主要集中在与其相关装置的升级改造上。龙继英<sup>[18]</sup>巧妙地将LGGQ254胶辊磨谷机的吸风冷辊改为小直径涡轮风机喷风冷辊。这种结构创新降低了胶耗与破碎率,提升了脱壳效率。刘晓霞等<sup>[19-20]</sup>基于MonteCarlo算法,采用ANSYS软件计算分析了磨谷机动辊装置的可靠性,并对其进行了优化设计,但在推进相关装置研究的同时,也应关注胶辊自身结构的升级改造。在胶辊材料方面,Baker等<sup>[21]</sup>指出,较硬的胶辊在较低正压力下能表现出更高的脱壳率。然而,Paramasivam等<sup>[22]</sup>的研究则揭示了胶辊硬度带来的双刃剑效应。软质胶辊耐磨性较差、易损耗,但高硬度胶辊耐磨,却会导致稻谷破碎率上升。总之,胶辊结构的优化设

计是提升其机械性能、增强稳定性和可靠性的关键。同时,胶辊材料的合理选择将直接影响磨谷机胶辊的耐磨性、耐腐蚀性和机械强度,进而影响其使用寿命和工艺效果。

### 2.4 磨谷工艺参数

磨谷机的进料速度、辊筒压力、辊筒转速以及温度、湿度、稻谷含水率等工艺参数是制约磨谷工艺效果的关键因素<sup>[23]</sup>。Alsharifi等<sup>[24]</sup>研究表明,胶辊轧距0.8 mm和含水量10%~12%时,稻谷的脱壳率和破碎率表现最佳。进一步地,Alwan等<sup>[25]</sup>则发现,减小胶辊轧距,脱壳率、破碎率和裂纹率均随之升高。该结果与Alsharifi等<sup>[24]</sup>的研究在一定程度上形成了互补,共同揭示了轧距对磨谷效果的多维度影响。李阳<sup>[26]</sup>利用ADAMS对磨谷过程进行数值模拟,确定了胶辊磨谷机的最佳工作参数。以上研究结果存在一定的差异性,未来需统一试验条件、标准化方法,提升研究结果的可靠性和一致性。

### 2.5 磨谷机关键结构

磨谷机的智能化升级,需增强其关键结构的柔性化,提高其可控性。胶辊转子系统的优化对于提升磨谷机的整机性能至关重要。陈伟超等<sup>[27]</sup>通过对主轴进行有限元分析和优化设计,提高了设备运行的稳定性,降低了故障率。程敏等<sup>[28]</sup>则提出了一种胶辊磨谷机转子系统机械结构的载荷等效设计方法。该方法将辊间挤压力刚化等效为转轴的外载荷,建立磨谷功率与磨谷产量、稻谷颗粒尺寸、胶辊尺寸及物性之间的依存关系,可为磨谷机转子系统机械结构优化提供理论依据。对于转子系统的结构布局、动平衡技术等方面的研究还较为缺乏,尚未形成一套完整、系统的优化方案。

在传动系统方面,传统的双皮带与齿轮变速箱结合或单皮带传动方式虽具有防过载的优点<sup>[1]</sup>,但也限制了磨谷机向着精准化、响应快捷化、高效率与低能耗的方向发展。刘亚奇等<sup>[29]</sup>提出的双变频电机驱动的全自动磨谷机,可实现两胶辊转速的无级、精确、独立调节。双变频电机虽然提供了更高的灵活性和精确性,但也需更复杂的控制系统支持。未来可探索采用永磁直联电机,进一步优化传动系统的柔性,提高传动效率,加快磨谷机的智能化进程。

传统的喂料系统存在喂料不均匀、易堵塞等问题。贾乐乐等<sup>[30-34]</sup>采用离散元和试验相结合方法研究了振动喂料系统并得到最佳参数,并基于最佳参数对喂料系统进行了改进设计,提升了喂料的均匀性和流畅性。与此同时,任晋博<sup>[35]</sup>不仅优化了喂料系统,还对脱壳系统和传动系统进行综合性的改进,降低了能耗、碎米率和爆腰率。随着智能化技术的发展,未来喂料系统需进一步融入智能控制元素,以实现更精准的喂料控制。

### 3 砉谷机感知监测技术研究进展

砉谷机感知监测技术主要运用传感器、机器视觉、数据处理和人工智能技术实时监测料流、胶辊、轧区温度及关键部件振动状态。该技术可及时发现运行异常,发出预警或自动停机,确保砉谷机稳定运行,提高生产效率和安全性。

#### 3.1 料流监测技术

稻谷料流会因多种因素失稳,影响脱壳效能和胶辊磨损。料流监测技术是砉谷机智能感知核心,能感知流量、厚度、速度等关键信息,避免堵塞、溢料,为自动控制和优化提供依据。目前散体物料监测技术成果较多,但针对稻谷料流监测技术的研究却相对较少。胡仕兵<sup>[36]</sup>利用 $\gamma$ 射线技术与单片机技术开发了新型智能料位监控仪,但因稻谷物化性质与容器内物料性质的显著差异性而不适用于稻谷料流监测。杨育坤<sup>[37]</sup>则针对带式输送机煤炭流量监测进行设计,用激光测距仪收集数据并由上位机处理,实现煤流量的实时计算。该系统依赖输送带的稳定运行,对稻谷料流中可能出现的堆叠、倾斜等现象可能不够敏感。袁娜等<sup>[38]</sup>利用图像处理技术开发了散状物料输送机实时称重系统。该系统在实际应用中可能受到稻谷形态、颜色、光照条件等多种因素的影响。谭长森等<sup>[39]</sup>设计的电场感应式料流传感器,利用电场感应式智能芯片监测料流电场的电参数,判断胶辊是否有料。该方法虽简单直接,但对稻谷料流中颗粒稀疏、堆叠等复杂情况的识别能力有限。叶王伟等<sup>[40]</sup>设计的物料运输与监测一体化装置,用 PLC 实现物料的同步运输与监测。但需针对稻谷料流特性优化,以提高监测准确性和稳定性。未来稻谷料流监测技术应着重优化算法、创新传感器,以提升监测的精准度和稳定性。

#### 3.2 胶辊状态监测技术

胶辊不均匀磨损会改变其直径,影响砉谷机工艺和运行状态。当前,实时测量胶辊直径是亟待解决的实际工程问题<sup>[41]</sup>。目前,胶辊状态监测主要依靠接触式测量与非接触式测量这两种方法。在接触式测量方面,现阶段对胶辊的测量大多采用千分尺进行抽样测量,采用人工读数、记录、计算,存在测量误差较大,数据不准确、劳动强度大等缺点<sup>[42]</sup>。沈俊豪<sup>[43]</sup>尝试用接触式传感器测量磨损胶辊直径,虽提高了测量的自动化水平,但因胶辊的弹性变形而导致准确性难以保证。相比之下,非接触式测量的技术优势显著。李莉<sup>[44]</sup>利用视觉监测技术实现了非接触式测量印刷机胶辊形位误差,该方法快速准确且避免了接触误差。目前基于激光测距的非接触测量成为主流,已在椰粮机 MLGQ36D/51D 砉谷机上成功应用,可实时测量胶辊直径,按预设程序调速调频,确保线速度最佳。相较于接触式测量,非接触式测量因其高精度、高速度及适

应性强等优点,在胶辊动态监测中的应用潜力巨大。

#### 3.3 轧区环境温度监测技术

砉谷机轧区温度过高会导致胶辊变形、磨损加剧,影响砉谷工艺效果,需精准管理。鲁邦年等<sup>[45]</sup>设计了独立于砉谷室的冷却室,直接针对高温问题采取了物理隔离措施。该方法简单直接,但需大改机械结构,且温度均匀性控制存在局限。冯叶陶<sup>[46]</sup>使用红外热成像仪及热敏风速仪测量了砉谷机运行时砉谷室内的温度和气流速度,建立了砉谷室流场的有限元模型,数值模拟砉谷室内部的温度场和稻谷颗粒流场,优化设计了砉谷室和吸风通道,降低了砉谷温度。在砉谷机以外的胶辊应用领域,李薇薇<sup>[47]</sup>揭示了温度、材料等对输纸胶辊摩擦系数的影响规律,为胶辊在不同温度条件下的应用提供了理论指导。李稀锦等<sup>[48]</sup>针对 ZJ116 卷烟机胶辊表面温度升高而导致胶液黏度降低的问题,采用物理冷却方法,设计了一套胶辊冷却系统。安建江等<sup>[49]</sup>解决了涡流纺用胶辊因表面温度过高而导致的回磨周期偏短的问题。总之,当前针对砉谷室内温度产生机理、温度分布、胶辊温度敏感性及其对能耗的影响等方面的研究尚不充分,未来还需深入探究温度如何影响胶辊寿命和砉谷效果。

#### 3.4 砉谷机关键部件振动监测技术

砉谷机运行中的不均匀喂料导致胶辊磨损不均,引发振动和噪声。长期振动会影响机器平稳性,损坏关键部件,且对周围环境有不良影响。针对这一问题,刘鹏<sup>[50]</sup>采用辊内多连杆隔振,设计了隔冲器,减少砉谷机胶辊的冲击振动传递及声辐射。未来需进一步研究胶辊不均匀磨损对转子动力特性的影响,以降低振动和噪声。

### 4 砉谷机品质调控技术研究进展

砉谷机品质调控技术是一种通过运用先进的控制算法对砉谷机的工作流程实施高精度调整与优化的高端技术,能够确保砉谷机在各种复杂工作环境下高效稳定运行。核心调控对象包括砉谷机进料、喂料、传动及胶辊系统,其调控方式从手动经自动发展至智能阶段,如图 3 所示。

#### 4.1 手动调控阶段

砉谷机早期发展阶段,各类系统的调控主要依赖人工操作<sup>[1]</sup>。例如,手轮、闸板调节进机流量、喂料量及喂料速度。传动系统的调控依赖变速箱,通过操作手柄变换速度。胶辊轧距和辊压也需人工调整,一般使用手轮、压坨等工具。此阶段调控精度和效率低,但操作简单易行。

#### 4.2 自动调控阶段

随着控制技术的发展,砉谷机进入自动调控阶段,先后采用气压、液压、电力式等轧距调控方式。此阶段,调节机构的执行部件成为关键设备,通过气压、液压或电力控制系统实现对喂料、传动和胶辊系统的自动调控。胡

志刚等<sup>[51]</sup>基于气压调节方式设计了磨谷机紧辊装置的自动控制系统,实现了胶辊轧距的自动控制。在此基础上,张士雄等<sup>[52]</sup>突破传统传动方式的束缚,设计了胶辊磨谷机双变频电机驱动装置和自动控制系统,实现了胶辊转速的无极调速及参数精准控制。如前所述,变频调速技术已应用于磨谷机新品,但自动调控阶段仍需人工监控和微调,确保系统稳定安全。

### 4.3 智能调控阶段

随着AI和机器学习技术的发展,磨谷机迈入智能化新阶段,将配备先进芯片和算法,构建智能决策系统,实现喂料、传动、胶辊等系统的智能统一调控。王慧<sup>[53]</sup>研发出实时监测磨谷机脱壳性能的系统,并据此设计了自

动调节工作参数的调控系统,为智能化调控系统开发奠定了坚实基础。吕泽<sup>[54]</sup>进一步探讨了磨谷机核心参数对性能及胶耗的影响,设计了智能化控制系统以提升性能与自动化水平,但仍需完善以实现无人化操作。现有技术仅可达到半智能化,无法完全脱离人工值守。未来,智能调控系统将具有自我学习功能,优化调控策略,提效增产,最终实现无人化操作。为适应智能调控需求,磨谷机机械结构将从早期的整机刚性结构逐步被更灵活的柔性结构替代,如永磁直联电机替代现有电机驱动。如图3所示,未来可引入AI、机器学习、机器视觉技术构建智能决策系统,推动整机全方位智能调控技术的发展与应用。

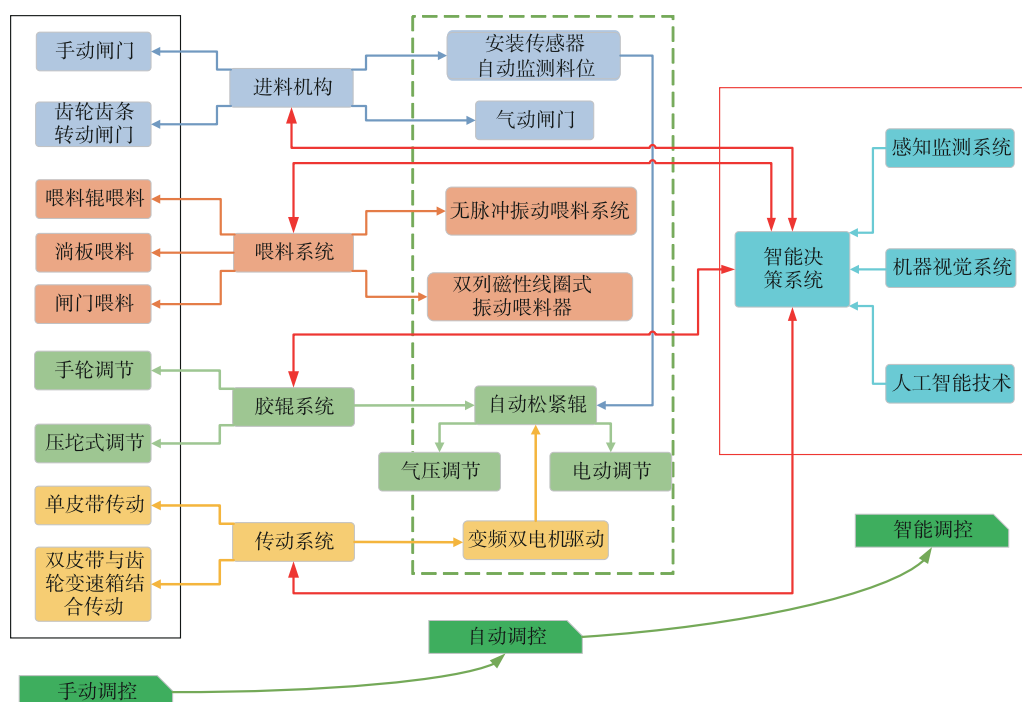


图3 磨谷机品质调控技术的发展历程

Figure 3 Development history of quality control technology for rice huller

## 5 结论与展望

当前智能胶辊磨谷机的研究工作仍停留在磨谷机原有设计基础上的某些特定部件或系统的升级改造。这些研究一定程度上优化了磨谷机的加工性能,但未完全脱离传统机械设计的范畴,且对磨谷机整体性能考虑不足。特别在智能感知监测及品质调控领域,研究成果相对碎片化,缺乏系统性,且研究不够深入,故尚不能有力支撑磨谷机的智能化发展。

未来需在以下方面持续推进:① 现有稻谷脱壳模型较简单,无法准确描述稻谷脱壳的实际过程,应加强多品种稻谷和动态磨损胶辊模型的研究。② 继续深入研究稻

谷的力学特性、电学特性、散固耦合特性,全面掌握稻谷物理学特性在磨谷工艺效果形成中的基础性作用。③ 加强对胶辊转子系统、传动系统、喂料系统等关键结构的整体性研究,提高磨谷机全工艺流程的统一管控能力。④ 研究解决传感器技术、智能控制算法、通信技术、机器学习、人工智能技术等适配与融合,为磨谷机智能决策系统的构建打下基础。

### 参考文献

- [1] 阮竟兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 358-397.  
RUAN J L, WU W B. Principles and applications of grain

- processing machine[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 358-397.
- [2] 舒服华. 基于灰色关联的砻谷机工作参数优化[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 18-23.  
SHU F H. Working parameter optimization of rice huller based on grey correlation [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 30(1): 18-23.
- [3] 康荣杰, 杨敏浩, 杨名远, 等. 会思考的机器——机械智能[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 15-24.  
KANG R J, YANG C H, YANG M Y, et al. Machines which can think—mechanical intelligence (MI) [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 15-24.
- [4] 马春玲. 智能机械设计制造自动化特点与发展趋势研究[J]. 内燃机与配件, 2020(20): 165-166.  
MA C L. Research on characteristics and development trends of intelligent machinery design and manufacturing automation[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(20): 165-166.
- [5] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 24-36.  
LIU Q. Study on architecture of intelligent manufacturing theory [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 24-36.
- [6] 郑晓. 胶辊接触应力及接触变形的分析与计算[J]. 粮食与饲料工业, 1995(2): 5-8.  
ZHENG X. Analysis and calculation of the contact stress and elastic deformation of rubber roll[J]. Cereal & Feed Industry, 1995(2): 5-8.
- [7] HAN Y L, ZHAO D, JIA F G, et al. Experimental and numerical investigation on the shape approximation of rice particle by multi-sphere particle models[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(4): 1 574-1 586.
- [8] 李佳, 曹毅, 吕荣文, 等. 两种不同品种稻谷储藏期间加工品质及其米饭质构特性研究[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(3): 29-33.  
LI J, CAO Y, LU R W, et al. Study on the processing quality and texture characteristics of two different varieties of rice during storage[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(3): 29-33.
- [9] SHARIFI S K A. Effect of different husking and whitening machines to rice kernel varieties Abasiya and Mushkhab 1 for both seasons 2006, 2007[J]. Euphrates Journal of Agriculture Science, 2010, 2(3): 11-35.
- [10] ZAREIFOROUGH H, KOMARIZADEH M H, ALIZADEH M R, et al. Effects of moisture content, loading rate, and grain orientation on fracture resistance of paddy (*Oryza sativa* L.) grain[J]. International Journal of Food Properties, 2012, 15(1): 89-98.
- [11] 陈沛瑛. 胶辊砻谷机内稻谷脱壳特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020: 35-39.  
CHEN P Y. Study on the hulling mechanism of paddy grain in a rubber roll huller[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020: 35-39.
- [12] CHEN P Y, JIA F G, LIU H R, et al. Effects of feeding direction on the hulling of paddy grain in a rubber roll huller [J]. Biosystems Engineering, 2019, 183: 196-208.
- [13] 张金成. 稻谷胶辊砻谷喂入取向角调节机制及系统优化设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023: 21-50.  
ZHANG J C. Regulation mechanism of feeding orientation of hulling rice with rubber roller and system optimization design [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023: 21-50.
- [14] MINAEI S, ALIZADEH M R, KHOSHAGHAZA M H, et al. Effects of de-awning and moisture content on husking characteristics of paddy in rubber-roll husker[J]. American Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 2007, 78(1): 1-5.
- [15] PAYMAN M, BAGHERI I, ALIZADEH M R, et al. Effective parameters of broken rice during paddy hulling using rubber roll huller[J]. Journal of Biological Sciences, 2007, 7(1): 47-51.
- [16] 范雨超. 基于稻谷结构特性的砻谷破碎机理研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023: 9-34.  
FAN Y C. Research on hulling and crushing mechanism based on structure property of rice paddy [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2023: 9-34.
- [17] 徐永阳, 邓安, 邱伟强, 等. 不同含水率稻谷电学物理量变化规律[J]. 食品工业, 2024, 45(2): 114-120.  
XU Y Y, DENG A, QIU W Q, et al. The change law of electrical physical quantity of rice with different moisture[J]. The Food Industry, 2024, 45(2): 114-120.
- [18] 龙继英. 对胶辊砻谷机胶辊冷却方式的改进[J]. 粮食与饲料工业, 2008(11): 3-4.  
LONG J Y. Improvement of cots cooling mode of cots husker [J]. Cereal & Feed Industry, 2008(11): 3-4.
- [19] 刘晓霞, 鱼鹏飞, 武照云, 等. 基于 ANSYS 的胶辊砻谷机活动辊装置可靠性分析[J]. 河北农机, 2021(12): 6-7.  
LIU X X, YU P F, WU Z Y, et al. Reliability analysis of movable roller device of rubber roller husker based on ANSYS [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2021(12): 6-7.
- [20] 鱼鹏飞. 胶辊砻谷机活动辊装置可靠性分析及优化设计[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 33-63.  
YU P F. Reliability analysis and optimization design of movable roller for rice huller with rubber roller[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021: 33-63.
- [21] BAKER A, DWYER-JOYCE R S, BRIGGS C, et al. Effect of different rubber materials on husking dynamics of paddy rice [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2012, 226(6): 516-528.
- [22] PARAMASIVAM P, RANGANATHAN R, RATHANASAMY R, et al. Experimental analysis on the technical behavior of carbon black filled rubber blends' rollers for rice husk removal application[J]. Polimery, 2019, 64(1): 50-55.
- [23] 吴中华, 王珊珊, 董晓林, 等. 不同温度及含水率稻米籽粒加

- 工过程破裂载荷分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 278-283.
- WU Z H, WANG S S, DONG X L, et al. Analysis of rice compression fracture load in processes with various temperatures and moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 278-283.
- [24] ALSHARIFI S K A, ARABHOSSEINI A, KIANMEHR M H, et al. Effect of moisture content, clearance and machine type on some qualitative characteristics of rice (tarm hashemi) cultivar[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2017, 23(2): 348-355.
- [25] ALWAN S K, ARABHOSSEINI A, KIANMEHER M H, et al. The effect of clearance on the performance of machine husking rubber rolls for two[J]. Journal of Babylon of University/Pure and Applied Sciences, 2018, 26(3): 207-214.
- [26] 李阳. 基于稻谷力学特性胶辊砻谷机工作参数优化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019: 48-72.
- LI Y. Optimization of working parameters of rubber roller husker based on mechanical characteristics of rice[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019: 48-72.
- [27] 陈伟超, 曹海军, 陈伟. 胶辊砻谷机主轴的设计与优化[J]. 粮食与食品工业, 2017(5): 80-82, 85.
- CHEN W C, CAO H J, CHEN W. Design and optimization of the main shaft of rubber roller husker[J]. Cereal & Food Industry, 2017(5): 80-82, 85.
- [28] 程敏, 陈睿斌, 曹宪周. 胶辊砻谷机转子系统机械结构的等效设计方法[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 113-119.
- CHENG M, CHEN R B, CAO X Z. An equivalent design method for mechanical structure of rotor system of rubber roller huller[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 113-119.
- [29] 刘亚奇, 任瑞龙, 顾仁刚, 等. 基于双变频电机驱动的胶辊砻谷机研究与实践[J]. 粮食加工, 2021, 46(6): 55-58.
- LIU Y Q, REN R L, GU R G, et al. Research and practice of rubber roll husker driven by dual frequency motor[J]. Grain Processing, 2021, 46(6): 55-58.
- [30] 贾乐乐, 阮竞兰, 石定秒, 等. 常用胶辊砻谷机的结构特点及性能分析[J]. 粮食加工, 2014, 39(3): 53-56.
- JIA L L, RUAN J L, SHI D M, et al. The structure characteristics and performance analysis of the commonly used rubber roller husker[J]. Grain Processing, 2014, 39(3): 53-56.
- [31] 贾乐乐, 阮竞兰. 胶辊砻谷机振动喂料参数分析与优化[J]. 粮食与饲料工业, 2014(12): 6-9.
- JIA L L, RUAN J L. The analysis and optimization of vibration feeding parameters in rubber roller husker[J]. Cereal & Feed Industry, 2014(12): 6-9.
- [32] 贾乐乐, 王凤成, 阮竞兰. 砻谷机喂料器隔振系统的优化分析[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 89-91.
- JIA L L, WANG F C, RUAN J L. Optimization analysis of rubber roller husker feeder isolation system[J]. Food & Machinery, 2014, 30(6): 89-91.
- [33] 贾乐乐. 胶辊砻谷机进料系统的数值模拟与运动仿真[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015: 37-56.
- JIA L L. The numerical modeling and motion simulation on the feeding system of rubber roller husker[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015: 37-56.
- [34] 贾乐乐, 阮竞兰. 砻谷机振动喂料器中物料流的离散元模拟及试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 91-93.
- JIA L L, RUAN J L. Discrete element simulation and experiment research of material flow in rubber roller husker vibrating feeder[J]. Food & Machinery, 2016, 32(5): 91-93.
- [35] 任晋博. 胶辊砻谷机的改进优化[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 66-71.
- REN J B. Improvement and optimization of top roller huller[J]. Grain Processing, 2018, 43(5): 66-71.
- [36] 胡仕兵. 基于 $\gamma$ 射线强度测量的智能料位监控仪的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(2): 164-169.
- HU S B. Development of an intelligent material-position monitoring and controlling instrument based on  $\gamma$ -ray intensity measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(2): 164-169.
- [37] 杨育坤. 激光测距原理的带式输送机监控系统中煤流量检测的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019: 41-49.
- YANG Y K. Research on coal flow detection in belt conveyor monitoring system based on laser ranging principle[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019: 41-49.
- [38] 袁娜, 宋伟刚, 姜涛. 散状物料输送机称重的图像处理方法初步研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(12): 58-60.
- YUAN N, SONG W G, JIANG T. Pilot study of imaging-processing method for weighing bulk material on belt conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(12): 58-60.
- [39] 谭长森, 倪春明. 电场感应式料流传感器设计[J]. 工矿自动化, 2016, 42(4): 27-30.
- TAN C S, NI C M. Design of material flow sensor based on electric field induction[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(4): 27-30.
- [40] 叶王伟, 王志明, 华旗, 等. 基于PLC的自动物料检测运输装置设计[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(3): 139-140.
- YE W W, WANG Z M, HUA Q, et al. Design of automatic material detection and transportation device based on PLC[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(3): 139-140.
- [41] 伍毅, 阮竞兰, 伍维维. 基于多指标正交试验设计的胶辊砻谷机工作参数综合优化分析[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(3): 1-5.
- WU Y, RUAN J L, WU W W. Comprehensive optimization analysis of working parameters for rubber roll husker based on multi-index orthogonal experimental design[J]. Packaging and

- Food Machinery, 2012, 30(3): 1-5.
- [42] 阮竞兰, 向光波, 程相法. 胶辊砻谷机性能参数试验与优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 353-357.  
RUAN J L, XIANG G B, CHENG X F. Experiments and optimization of performance parameters on rubber roll husker[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 353-357.
- [43] 沈俊豪. 砻谷机的胶辊半径测量系统设计及分析[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 12-44.  
SHEN J H. Design and analysis of rubber roller radius measurement system[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 12-44.
- [44] 李莉. 印刷胶辊视觉检测系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 19-35.  
LI L. Study of the visual inspection system for the rubber roller[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 19-35.
- [45] 鲁邦年, 郑疆. 全自动辊间压力控制砻谷机和室温常温砻谷工艺[J]. 粮食加工, 2010, 35(3): 64-67.  
LU B N, ZHENG J. Automatic roll pressure control huller and cool hulling technology[J]. Grain Processing, 2010, 35(3): 64-67.
- [46] 冯叶陶. 砻谷室温度场和流场分析与试验研究[D]. 成都: 西华大学, 2021: 18-47.  
FENG Y T. Analysis and experimental study on temperature field and flow field in Huller[D]. Chengdou: Xihua University, 2021: 18-47.
- [47] 李薇薇. 温度对胶辊粘性滚动接触特性的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 11-33.  
LI W W. Influence of temperature on the viscoelastic rolling contact characteristics of rubber roller[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 11-33.
- [48] 李稀锦, 毛龙所, 汤黎明, 等. ZJ116 卷烟机水松纸涂胶辊冷却系统的研制[J]. 中国机械, 2023(24): 2-6.  
LI Z J, MAO L S, TANG L M, et al. Development of cooling system for tipping paper cots of ZJ116 cigarette maker[J]. Machine China, 2023(24): 2-6.
- [49] 安建江, 沈绒, 邵焕, 等. WRC-KS82 型涡流纺用胶辊的研发与应用[J]. 纺织器材, 2023, 50(5): 46-50.  
AN J J, SHEN R, SHAO H, et al. Development and application of WRC-KS82 vortex spinning cot[J]. Textile Accessories, 2023, 50(5): 46-50.
- [50] 刘鹏. 胶辊式砻谷的冲击振动隔离技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2020: 40-53.  
LIU P. Study on impact vibration isolation technology of rubber roller husker[D]. Chengdou: Xihua University, 2020: 40-53.
- [51] 胡志刚, 张永林, 刘协舫. 气压紧辊脱壳机的工作原理及其气动系统设计[J]. 液压与气动, 2005, 29(6): 50-52.  
HU Z G, ZHANG Y L, LIU X F. De-hulling principle and pneumatic system design of the de-huller with a pneumatic roller tightener[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2005, 29(6): 50-52.
- [52] 张士雄, 阮竞兰, 武照云, 等. 基于双电机驱动全自动气压胶辊砻谷机的研制与控制系统设计[J]. 粮食与饲料工业, 2015(11): 5-7.  
ZHANG S X, RUAN J L, WU Z Y, et al. The development and control system design of dual motor-based automatic pneumatic rubber brick husker[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(11): 5-7.
- [53] 王慧. 胶辊砻谷机自动调节系统的设计与研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2016: 30-49.  
WANG H. The design and research of automatic control system for rubber roller hulling machine[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2016: 30-49.
- [54] 吕泽. 基于砻谷机的自反馈自动化系统设计[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 11-27.  
LYU Z. Design of self-feedback automation system based on rice abrasive machine[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 11-27.