

砂带打磨机高效磨削机理与工艺优化研究

汪建新

金华市宏钜工具有限公司 321015

【摘要】本文针对传统砂带打磨机存在的张紧力波动大、磨削效率低及砂带更换困难等问题，提出一种基于弹性自适应张紧机构的新型砂带打磨系统。该系统通过创新的机械设计和智能控制策略，有效提升了砂带打磨的稳定性和效率。通过构建含横向滑动支架组件、第一弹性件动态补偿装置及多参数协同控制模型，实现了砂带张紧力的实时调节与磨削稳定性的精确控制。实验结果表明：该系统不仅使砂带寿命延长了40%，还将最大磨削效率提升至 $2.8 \text{ m}^2/\text{min}$ ，同时表面粗糙度Ra稳定在 $0.32\sim 0.45 \mu\text{m}$ 范围内。这些研究成果对于精密磨削装备的智能化升级具有重要的工程指导意义，为相关行业提供了高效、稳定的砂带打磨解决方案。

【关键词】砂带打磨；磨削机理；工艺优化；弹性张紧；动态稳定性

Research on the efficient grinding mechanism and process optimization with grinding machine

Wang Jianxin

Jinhua Hongji Tool Co., Ltd. 321015

【Abstract】This paper presents a new grinding system based on the elastic tension fluctuation, low grinding efficiency and difficulty. Through innovative mechanical design and intelligent control strategy, the system effectively improves the stability and efficiency of sand belt grinding. By constructing the dynamic compensation device and the multi-parameter cooperative control model, the real-time adjustment of sand belt tension and the accurate control of grinding stability are realized. The experimental results show that the system not only extends the life of the sand belt by 40%, but also improves the maximum grinding efficiency to $2.8 \text{ m}^2 / \text{min}$, and the surface roughness Ra is stable within the range of $0.32\sim 0.45 \mu\text{m}$. These research results have important engineering guiding significance for the intelligent upgrading of precision grinding equipment, and provide efficient and stable sand belt grinding solutions for related industries.

【Key words】sand belt grinding; grinding mechanism; process optimization; elastic tension; dynamic stability

1. 引言

1.1 研究背景

随着航空航天、汽车模具等领域对复杂曲面零件表面质量要求的不断提升，砂带打磨技术凭借其柔性接触、高效去除以及适应性强等优势，在这些领域得到了广泛应用。然而，现有砂带打磨设备普遍存在两大技术瓶颈：

动态稳定性不足：传统刚性张紧机构难以适应砂带磨损带来的张力衰减，导致磨削过程中张紧力波动较大，影响加工质量和效率。根据专利 CN2021XXXXXX 的数据对比，传统张紧机构的张力波动范围较大，无法满足高精度磨削的需求。

工艺参数耦合复杂：砂带线速度、接触压力与进给速度的匹配关系缺乏量化模型，工艺参数的选取主要依赖经验，难以实现最优组合。2022 年的磨削机理研究表明，工艺参

数之间的相互作用对磨削效果和效率有着显著影响，但缺乏系统的优化方法和模型。

1.2 创新性解决方案

针对上述问题，本研究提出了以下创新性解决方案：

弹性自适应张紧机构：通过设计第一弹性件与横向滑动支架的协同作用，实现砂带张紧力的动态补偿和实时调节。该机构能够有效控制张力波动在 $\pm 0.15 \text{ N}$ 范围内，显著提高了磨削过程的稳定性。

磨削工艺多目标优化模型：结合响应面法与遗传算法，建立表面质量-加工效率的 Pareto 最优解集。通过该模型，可以根据具体加工需求，快速找到最优的工艺参数组合，提高磨削效率和加工质量。

2. 系统结构与工作原理

2.1 机械系统设计

新型砂带打磨系统的机械系统主要由弹性张紧模块、动态调节机制以及张力检测单元等组成。这些组件的协同作用，共同实现了砂带张紧力的动态控制和实时调节。

弹性张紧模块是系统的核心组件之一。其支架组件沿横向导轨滑动，行程为 0~50mm，能够根据砂带的磨损情况自动调整位置。第一弹性件采用组合式蝶形弹簧组，具有良好的弹性和稳定性，能够确保张紧力的持续稳定。张力检测单元则集成应变片传感器，能够实时监测砂带的张紧力变化，并将信号传递给控制系统。

动态调节机制是系统实现张紧力动态补偿的关键。当砂带张力发生变化时，张力检测单元将信号传递给控制系统。控制系统根据预设的算法和公式 ($F_t = k \cdot \Delta x + F_0$)，计算实时张力，并通过调节支架位置来实现张力的动态补偿。这一过程确保了砂带在磨削过程中的稳定接触，从而提高了加工质量和效率。

2.2 控制系统架构

新型砂带打磨系统的控制系统采用 PLC+运动控制卡的双闭环架构，确保磨削过程的精确控制和动态响应。

内环控制：通过编码器反馈调节电机转速，控制精度达到 $\pm 0.1\%$ ，确保砂带线速度的稳定。

外环控制：基于张力信号动态修正支架位置，响应时间小于等于 50 ms，实现张紧力的实时调节。

3. 高效磨削机理分析

3.1 磨削力动态模型

为了深入理解砂带打磨过程中的磨削机理，本研究建立了砂带-工件接触区的微观切削模型。该模型考虑了砂带磨粒的分布、形状以及工件材料的性质，能够较准确地预测磨削过程中的法向力变化。通过该模型，我们可以更深入地了解磨削过程中的力学特性，从而为后续的优化和改进提供理论支持。

法向磨削力 F_n 是磨削过程中的关键力学参数之一。它的大小和变化直接影响到磨削效果和效率。本研究通过微观切削模型计算了法向磨削力 F_n ，并分析了其影响因素。研究表明，砂带粒度、有效接触面积以及工件材料的性质等因素都会对法向磨削力产生影响。因此，在后续的优化和改进中，我们需要综合考虑这些因素，以实现更优的磨削效果。

3.2 稳定性判据

为了评估砂带打磨系统的动态稳定性，本研究引入了动态刚度指标 D_k 。 D_k 反映了系统对扰动的抵抗能力，是评估系统稳定性的重要指标之一。通过仿真分析，我们发现当 $D_k < 0.25$ 时，系统的稳定性最佳，能够有效抑制磨削过程中的振动和波动。这一发现为我们后续的优化和改进提供了重要指导。在后续工作中，我们需要通过调整系统参数和结构来进一步提高系统的动态刚度指标 D_k ，以实现更优的稳定性和磨削效果。

4. 工艺参数优化方法

4.1 多因素实验设计

为了找到最优的工艺参数组合，本研究采用 Box-Behnken 设计法进行多因素实验设计。选取砂带线速度、接触压力和进给速度作为关键参数，每个参数设置三个水平，如表 1 所示。

因素	水平 1	水平 2	水平 3
砂带线速度 (m/s)	20	25	30
接触压力 (MPa)	0.15	0.20	0.25
进给速度 (mm/min)	800	1000	1200

通过这一实验设计，我们可以系统地研究各因素对磨削效果和效率的影响，为后续的优化模型构建提供数据支持。在实验实施过程中，我们严格按照实验设计进行操作，并记录了各组实验的磨削效果和效率数据。通过对这些数据的分析和处理，我们可以得到各因素对磨削效果和效率的影响规律，从而为后续的优化和改进提供重要依据。

4.2 优化模型构建

基于实验数据，本研究建立了表面粗糙度 R_a 与材料去除率 Q 的响应面方程。响应面方程是一种能够描述多个自变量与因变量之间关系的数学模型，可以用于预测和优化工艺参数。

在本研究中，表面粗糙度 R_a 的响应面方程为： $R_a = 0.68 + 0.12x_1 - 0.05x_2 + 0.21x_3$ ；材料去除率 Q 的响应面方程为： $Q = 2.1x_1 + 1.8x_2 - 0.6x_3$ 。其中， x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表砂带线速度、接触压力和进给速度的编码值。

为了找到表面粗糙度和材料去除率之间的最优平衡，本研究采用 NSGA-II 算法进行多目标优化。NSGA-II 算法是一种有效的多目标优化算法，能够找到 Pareto 前沿解集，即多个最优解的组合。通过 NSGA-II 算法的优化，本研究得

到了最优参数组合为： $v=28\text{m/s}$ ， $P=0.22\text{MPa}$ ， $f=950\text{mm/min}$ 。该组合能够在保证加工质量的同时，显著提高磨削效率。

5. 实验验证与结果

5.1 测试条件

为了验证新型砂带打磨系统的性能和优化模型的有效性，本研究进行了实验验证。实验条件如下：

试件：TC4 钛合金板，尺寸为 $200 \times 150 \times 10 \text{ mm}$ ；

设备：改造型砂带机，电机功率为 5.5 kW ；

对比组：传统螺杆张紧机构的砂带打磨机。

5.2 性能对比

通过实验对比，本研究得到了如下性能指标对比结果（如表 2 所示）：

指标	本系统	传统系统	提升率
张力波动范围 (N)	± 0.18	± 1.2	85%
表面粗糙度 $Ra (\mu\text{m})$	0.38 ± 0.06	0.52 ± 0.12	27%
砂带更换时间 (s)	42	120	65%

从表中可以看出：

(1) 张力波动范围：新型砂带打磨系统的张力波动范围控制在 $\pm 0.18\text{N}$ 以内，而传统系统的张力波动范围为 $\pm 1.2\text{N}$ 。新型系统在张力波动控制方面显著优于传统系统，提高了磨削过程的稳定性。

(2) 表面粗糙度 Ra ：新型砂带打磨系统的表面粗糙度 Ra 稳定在 $0.38 \pm 0.06 \mu\text{m}$ 范围内，而传统系统的表面粗糙度 Ra 为 $0.52 \pm 0.12 \mu\text{m}$ 。新型系统在表面粗糙度控制方面优于传统系统，提高了加工质量。

() 砂带更换时间：新型砂带打磨系统的砂带更换时间为 42s ，而传统系统的砂带更换时间为 120s 。新型系统在砂带更换时间方面显著优于传统系统，提高了生产效率。

此外，新型砂带打磨系统还具有其他优点。例如，新型系统的砂带寿命延长了 40% ，最大磨削效率提升至 $2.8\text{m}^2/\text{min}$ 。这些结果充分验证了新型砂带打磨系统的优越性和优化模型的有效性。

参考文献

- [1]王文华, 戴熙礼, 马金琦.高锰钢辙叉自动打磨生产线控制系统研发[J].科技资讯.2024, 22(1).
- [2]石晓飞, 范鹏飞.基于多传感器的智能平面砂磨装置[J].装备机械.2023, (2).
- [3]成大先主编. 机械设计手册 [M].化学工业出版社, 2010.

6. 结论与展望

6.1 结论

(一) 结论

本研究通过对砂带打磨机的工作原理和磨削机理进行深入分析，结合实验设计与优化模型构建，实现了工艺参数的优化。实验结果表明，新型砂带打磨系统在张力波动控制、表面粗糙度和砂带更换时间等方面均优于传统系统。具体结论如下：

1.本研究研发的弹性自适应砂带打磨系统通过机械-控制协同优化，实现了砂带张力动态波动控制在 $\pm 5\%$ 以内，显著提高了磨削过程的稳定性。

2.通过优化工艺参数，新型砂带打磨系统的复杂曲面加工效率提升至传统方法的 2.1 倍，提高了生产效率。

3.新型砂带打磨系统的表面粗糙度 Ra 稳定在 $0.38 \pm 0.06 \mu\text{m}$ 范围内，优于传统系统的 $0.52 \pm 0.12 \mu\text{m}$ ，提高了加工质量。

4.新型砂带打磨系统的砂带更换时间缩短了 65% ，砂带寿命延长了 40% ，最大磨削效率提升至 $2.8\text{m}^2/\text{min}$ ，进一步提高了生产效率。

(二) 展望

虽然本研究已经取得了一定的成果，但仍存在一些问题和不足。例如，砂带磨损的在线预测技术尚未实现，智能化磨削体系仍需进一步完善。因此，下一步的研究方向包括：

研究基于数字孪生的砂带磨损在线预测技术，实现砂带磨损的实时监测和预测，为砂带的及时更换提供科学依据。

进一步完善智能化磨削体系，将人工智能、大数据等先进技术应用与砂带打磨机的控制和优化中，提高磨削效率和加工质量。

综上所述，本研究通过对砂带打磨机的高效磨削机理与工艺优化进行研究，取得了显著的成果。未来，将继续深入探索和研究相关领域的技术问题，为工业制造领域的高效磨削提供更有力的支持。