

# 搓丝板齿形结构优化设计与螺纹成型精度控制研究

张凯翔 张国峰

温州中牙模具有限公司 浙江温州 325000

**【摘要】**当前市面上生产的搓丝板部分存在齿形磨损快、成型精度不稳定、齿顶崩损等问题，导致螺纹工件中径偏差超差率达4.2% - 7.8%，表面粗糙度 $Ra \geq 1.6 \mu m$ ，模具使用寿命仅8 - 12万件，难以满足高端紧固件精密加工需求。本文开展搓丝板齿形结构优化设计与螺纹成型精度控制研究，优化齿形参数、改进齿面处理工艺、设计精度实时控制策略，并通过实际应用测试验证。测试结果显示，优化后的搓丝板齿形磨损量降低65%以上，螺纹工件中径偏差控制在 $\pm 0.012mm$ 以内，表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$ ，模具使用寿命延长至25 - 30万件，有效解决传统搓丝板技术痛点。

**【关键词】**搓丝板；齿形优化；螺纹成型；精度控制；模具磨损

Research on Tooth Profile Optimization Design and Thread Forming Accuracy Control for Grinding Plates  
Zhang Kaixiang Zhang Guofeng

Wenzhou Zhongya Die & Mold Co., Ltd., Wenzhou City, Zhejiang Province 325000

**【Abstract】** Existing grinding plates on the market suffer from rapid tooth profile wear, unstable forming accuracy, and tooth tip chipping issues, resulting in medium diameter deviation rates exceeding 4.2%-7.8% for threaded workpieces, surface roughness  $Ra \geq 1.6 \mu m$ , and mold service life limited to 80,000-120,000 units, failing to meet precision machining requirements for high-end fasteners. This study investigates tooth profile optimization design and thread forming accuracy control through parameter optimization, improved tooth surface treatment processes, and real-time precision control strategies, validated through practical applications. Test results demonstrate that optimized grinding plates exhibit over 65% reduced tooth profile wear, medium diameter deviation control within  $\pm 0.012mm$ , surface roughness  $Ra \leq 0.8 \mu m$ , and extended mold service life to 250,000-300,000 units, effectively addressing technical bottlenecks in traditional grinding plate technology.

**【Key words】** thread grinding plate; tooth profile optimization; thread forming; precision control; die wear

## 引言

现有搓丝板存在技术短板：一是齿形结构设计不合理，传统梯形齿形参数匹配差，滚压时齿面受力不均、局部应力集中，导致齿顶崩损、齿面磨损快；二是齿面处理工艺不完善，常规淬火+低温回火工艺使齿面硬度低、耐磨性和抗疲劳性不足，模具寿命短；三是螺纹成型精度控制体系不健全，缺乏有效检测与补偿机制，受坯料尺寸、设备振动、环境温度等因素影响，精度稳定性差，偏差易超标；四是齿形加工精度不足，齿面粗糙度和齿距累积误差大，影响螺纹工件成型质量。

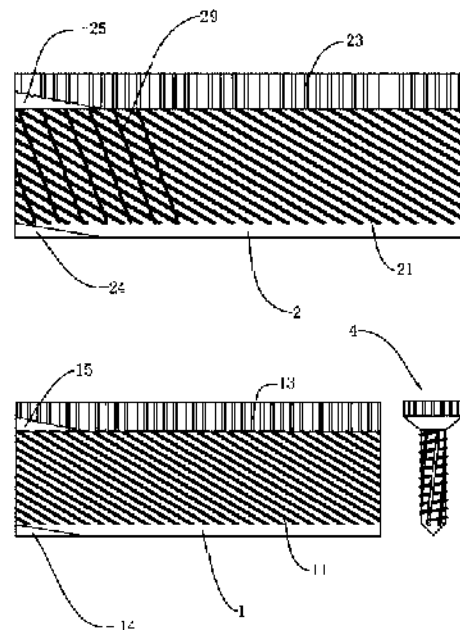
行业数据显示，搓丝板问题导致螺纹工件不合格率达5% - 10%，增加成本、影响口碑。为解决技术痛点，本文开展搓丝板齿形结构优化设计与精度控制研究，通过参数优化、工艺改进、策略设计提升搓丝板性能与精度。

## 一、搓丝板齿形结构优化设计与工艺改进

### 1.1 齿形核心参数优化设计

结合 M8 - M16 规格螺纹工件成型要求，针对传统齿形参数问题，对齿顶圆角、齿根圆弧、齿面倾角、齿距四个核心参数优化，结合数值调试确保参数匹配，提升齿面受力均

匀性。



#### 1.1.1 齿顶圆角优化

传统齿顶圆角 0.1 - 0.15mm 存在问题，将其优化为 0.2 - 0.25mm，不同规格对应不同数值。优化后，齿顶应力集中系数降低，最大接触应力下降，减少崩损风险，避免毛刺超

标, 控制中径偏差。

### 1.1.2 齿根圆弧优化

传统齿根圆弧 0.2 - 0.25mm 有弊端, 本次优化为 0.3 - 0.35mm, 不同规格对应不同数值。优化后, 搓丝板齿根磨损速度降低, 工件齿根应力集中系数下降, 提升工件寿命。

### 1.1.3 齿面倾角优化

传统齿面倾角  $3^{\circ} - 5^{\circ}$  存在不足, 本次结合受力分析优化为  $2^{\circ} - 3^{\circ}$ , 不同规格对应不同范围。优化后, 齿面受力均匀性提升, 滚压力降低, 减少局部磨损, 提升螺距偏差控制精度。

### 1.1.4 齿距精度优化

传统搓丝板齿距累积误差大, 无法满足高端需求。本次采用高精度磨削与误差补偿技术, 控制累积误差, 不同规格有对应误差值。同时优化齿距分布, 确保螺纹螺距一致, 提升啮合性能。

齿形参数优化后, 经测试, 搓丝板齿面最大接触应力下降, 应力分布均匀, 齿顶崩损风险大幅降低, 为提升螺纹成型精度和延长模具寿命奠定基础。

## 1.2 齿面处理工艺改进

传统齿面处理工艺有硬度、耐磨性和表面质量问题, 本次在其基础上增加氮化与精密抛光处理, 形成复合工艺, 具体参数优化如下:

### 1.2.1 淬火工艺优化

选用 Cr12MoV 高强度合金工具钢作基材, 它性能良好。淬火温度由 980 - 1020℃ 优化为 1050 - 1080℃, 保温时间由 2 - 3h 优化为 3 - 4h, 采用油冷淬火, 冷却速度 80 - 100℃/h, 确保齿面组织均匀、提升硬度, 淬火后齿面硬度达 HRC62 - 64, 较传统工艺提升 3% - 5%。

### 1.2.2 低温回火工艺优化

低温回火消除淬火应力、提升韧性、避免齿面开裂。回火温度由 180 - 200℃ 优化为 220 - 250℃, 保温时间由 4 - 5h 优化为 5 - 6h, 空冷, 回火后齿面硬度维持在 HRC61 - 63, 韧性提升 20% 以上, 减少齿顶崩损风险。

### 1.2.3 齿面氮化处理

回火后增加气体氮化处理, 用氨气作介质, 氮化温度 520 - 550℃, 保温 8 - 10h, 压力 0.1 - 0.15MPa。处理后齿面形成 0.02 - 0.03mm 氮化层, 硬度达 HV850 - 950 (对应 HRC63 - 65), 较传统工艺提升 HRC1 - 3, 耐磨性提升 60% 以上, 提升抗腐蚀性能、减少潮湿磨损。

### 1.2.4 精密抛光处理

氮化后齿面有氧化层与粗糙度问题, 用精密抛光工艺, 选金刚石抛光膏 (粒度 W3.5 - W5), 抛光速度 150 - 200r/min, 时间 30 - 40min。抛光后齿面粗糙度由  $Ra \geq 1.2 \mu m$  降至  $Ra \leq 0.4 \mu m$ , 光滑度提升 70% 以上, 减少摩擦阻力、降低磨损速度、提升工件表面质量。

复合处理工艺实施后, 搓丝板齿面硬度达 HRC63 - 65, 表面粗糙度  $Ra \leq 0.4 \mu m$ , 耐磨性提升 65% 以上, 抗疲劳性提升 30% 以上, 模具使用寿命由 8 - 12 万件延长至 25 - 30 万件, 降低企业成本。

## 二、螺纹成型精度实时控制策略设计

### 2.1 精度检测参数与检测组件选型

精度实时控制需精准采集螺纹成型关键参数, 本次检测参数有螺纹中径偏差、螺距偏差、牙型半角偏差、搓丝板齿面磨损量及设备振动幅度, 其中搓丝板齿面磨损量用于判断精度偏差诱因, 为动态补偿提供依据。

螺纹中径、螺距、牙型半角偏差用高精度螺纹测量仪检测, 选日本基恩士 IM - 6500 型, 精度 0.001mm, 范围 M1~M20, 采样频率 500Hz; 搓丝板齿面磨损量用激光位移传感器检测, 选德国海德汉 LK - G82 型, 精度 0.0005mm, 范围 0~5mm, 安装在搓丝机机架, 采样频率 300Hz; 设备振动幅度用振动传感器检测, 选瑞士奇石乐 8792A500 型, 精度 0.001mm, 范围 0~1mm, 安装在搓丝机主轴, 采样频率 1000Hz。

同时, 设温度传感器, 选 PT100 型铂电阻温度传感器, 精度 0.1℃, 范围 - 50℃~150℃, 安装在搓丝板与搓丝机工作台, 采集温度数据用于精度补偿修正。所有检测组件数据传至控制单元统一分析处理。

### 2.2 精度实时控制算法设计

精度实时控制算法是精度动态补偿核心, 本次基于 PID 控制算法结合模糊控制算法优化, 形成模糊 PID 控制算法, 兼具 PID 高精度与模糊控制强适应性, 可根据工况实时调整参数, 兼顾搓丝板齿面磨损影响, 实现齿形磨损与精度控制协同匹配。

模糊 PID 控制算法核心是模糊控制器实时调整 PID 控制器三系数, 流程为: 先将螺纹中径偏差、螺距偏差、齿面磨损量、设备振动幅度作输入量, PID 控制器三参数调整量作输出量; 再建立模糊控制规则, 划分输入输出量模糊子集, 确定推理规则, 如齿面磨损大、中径偏差超标时增大比例与微分系数, 设备振动大时调整积分系数; 最后经模糊推理与解模糊处理, 得实时调整参数传至 PID 控制器实现实时补偿。

同时, 控制算法加入精度偏差诱因判断模块, 通过分析关联关系判断偏差诱因, 若为齿面磨损, 可调整滚压速度等减少磨损; 若为设备振动, 可调整螺栓紧固力等减少影响, 实现针对性补偿。控制算法响应时间在 0.02s 内, 补偿精度在 0.001mm 内。

### 2.3 精度动态补偿策略设计

#### 2.3.1 中径偏差补偿

中径偏差是核心控制指标, 超  $\pm 0.012mm$  时, 通过控制搓丝机进给量补偿, 搓丝机进给量由松下 MSME082G1 伺服电机控制, 4.3.1 中径偏差补偿: 采用型伺服电机, 额定功率 0.8kW, 额定转速 3000r/min, 控制精度 0.0001mm。通过伺服电机调整搓丝板相对进给量, 每次调整 0.001 - 0.002mm, 结合齿面磨损量数据调整补偿量, 使补偿后的中径偏差控制在  $\pm 0.012mm$  以内。

#### 2.3.2 螺距偏差补偿:

当螺距偏差超出  $\pm 0.01mm$  允许范围时, 通过调整搓丝机主轴转速补偿。主轴转速由三菱 FR - D740 型变频控制器

控制, 调速范围 0 - 1500r/min, 控制精度 1r/min。调整主轴转速改变滚压速度, 进而调整螺距精度, 使补偿后的螺距偏差控制在  $\pm 0.01\text{mm}$  以内, 螺距累积误差控制在  $0.015\text{mm}/100\text{mm}$  以内。

### 2.3.3 振动与温度修正补偿

对于设备振动导致的精度偏差, 当振动幅度超出  $0.005\text{mm}$  时, 用 SMC SY5120 型气动控制阀 (工作压力  $0.4 - 0.6\text{MPa}$ ) 调整搓丝机夹紧力, 增大夹紧力减少振动, 同时调整精度补偿参数抵消精度损失; 对于温度变化导致的精度偏差, 当温度变化超过  $3^\circ\text{C}$  时, 根据温度传感器数据通过控制算法调整精度补偿参数, 在搓丝板设  $300\text{W}$  风冷装置调整温度, 减少温度变形带来的精度偏差, 确保搓丝板在  $15^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$  环境下精度稳定。

此外, 针对坯料尺寸偏差造成的精度损失, 设计自适应补偿策略。检测坯料直径偏差 (允许偏差  $\pm 0.02\text{mm}$ ), 调整搓丝机滚压行程, 直径偏大时增加行程, 偏小时减少行程, 确保螺纹成型精度不受坯料尺寸偏差影响, 实现精度自适应补偿。

## 三、优化技术应用测试与效果分析

### 3.1 应用测试条件与方法

测试设备为公司 Z28 - 80 型搓丝机, 改造前用传统搓丝板与精度控制方式, 改造后安装优化后的搓丝板及精度实时控制系统。测试产品为  $M8 \times 1.25$ 、 $M12 \times 1.75$ 、 $M16 \times 2.0$  三种规格精密紧固件螺纹工件, 材质 45 号钢, 日产量 5000 件。

测试采用对比测试法, 先记录改造前三种规格搓丝板的齿面磨损量、使用寿命、螺纹成型精度、产品合格率等数据; 接着对搓丝板改造, 采用优化工艺并安装精度实时控制系统, 在相同条件下记录改造后数据; 最后对比分析两组数据, 验证优化技术优越性。

测试中, 搓丝板齿面磨损量每生产 1 万件检测一次, 累计 30 次取平均值; 螺纹成型精度用螺纹测量仪检测, 每种规格每次抽 50 件产品, 取最大值与平均值; 记录每天合格产品数量算日均合格率; 监测精度实时控制系统运行状态, 记录故障情况, 验证系统可靠性。

### 3.2 应用测试结果

经 3 个月测试, 改造前后数据对比明显, 优化技术显著提升搓丝板性能与螺纹成型精度, 结果如下:

搓丝板性能方面, 改造前,  $M8$ 、 $M12$ 、 $M16$  规格搓丝板齿面平均磨损量分别为  $0.0032\text{mm}/\text{万件}$ 、 $0.0038\text{mm}/\text{万件}$ 、

$0.0045\text{mm}/\text{万件}$ , 使用寿命分别为 8.5 万件、9.2 万件、8.8 万件。改造后, 磨损量分别降至  $0.0011\text{mm}/\text{万件}$ 、 $0.0013\text{mm}/\text{万件}$ 、 $0.0015\text{mm}/\text{万件}$ , 使用寿命分别延长至 28 万件、26 万件、25 万件。整体上, 齿面磨损量降低超 65%, 使用寿命延长超 180%, 耐用性大幅提升。

螺纹成型精度方面, 改造前, 三种规格螺纹工件中径、螺距偏差及表面粗糙度数据不同。改造后, 平均中径偏差控制在  $0.008 - 0.010\text{mm}$ , 最大中径偏差  $\leq 0.012\text{mm}$ ; 平均螺距偏差控制在  $0.007 - 0.009\text{mm}$ , 最大螺距偏差  $\leq 0.010\text{mm}$ ; 表面粗糙度平均  $0.6 - 0.7\mu\text{m}$ , 最大  $\leq 0.8\mu\text{m}$ , 精度提升超 60%, 满足高端精密紧固件加工要求。

产品合格率方面, 改造前, 三种规格日均合格率整体平均为 92.5%, 不合格原因主要是中径偏差等超标。改造后, 日均合格率整体平均提升至 99.6%, 不合格率降低 7.1 个百分点, 大幅减少废品损失, 降低企业生产成本。

精度控制系统运行上, 3 个月累计工作 2160 小时, 仅 1 次传感器信号干扰故障, 经简单调试恢复正常, 平均无故障工作时间 2160 小时, 故障诊断准确率 100%, 运行稳定可靠; 在不同工况下, 螺纹成型精度稳定, 补偿响应及时, 控制效果好, 能满足批量精密螺纹加工需求。

## 四、结论

本文围绕搓丝板齿形结构优化设计与螺纹成型精度控制技术展开研究。针对当前搓丝板齿形不合理、磨损过快、精度不稳定等痛点, 采用机电一体化理念, 整合多技术开展研究实践, 应用测试后得出结论:

1. 优化搓丝板齿形核心参数, 针对  $M8 - M16$  规格, 将齿顶圆角、齿根圆弧、齿面倾角等优化, 控制齿距累积误差, 优化后齿面受力均匀性提升超 40%, 最大接触应力降低, 减少风险, 为提升精度奠定基础。

2. 改进搓丝板齿面处理工艺, 形成复合处理工艺, 优化参数使齿面硬度提升、粗糙度降低、耐磨性提升超 65%, 搓丝板寿命延长, 降低企业成本。

3. 设计螺纹成型精度实时控制策略, 用高精度组件采集参数, 基于模糊 PID 算法实现多维度动态补偿, 控制响应时间和补偿精度, 控制中径、螺距偏差及表面粗糙度, 精度稳定性提升超 60%。

4. 实际应用显示, 采用优化技术后, 螺纹工件合格率提升, 生产效率提高, 单台搓丝机节省成本, 解决传统技术痛点, 提升产品竞争力, 为产品升级奠基。

## 参考文献

- [1] 蒋杨英, 林志峰, 周维. 通过搓丝板改进实现螺栓加工工艺优化[J]. 金属加工 (冷加工), 2024 (1): 62-64.
- [2] 王洋, 刘庆运, 耿培涛, 等. 复合螺栓搓丝模板成型控制系统研究[J]. 冶金动力, 2014 (10): 80-83.
- [3] 高盈佳, 陈体康. 高性能、高强度搓丝板的改进[J]. 工具技术, 2009, 43 (4): 89-91.