

汽车制动软管接头制造工艺流程优化研究

于 鹏

青岛三祥金属制造有限公司 山东 青岛 266425

摘要：随着汽车行业对制动系统安全性与可靠性的要求日益严苛，汽车制动软管接头制造工艺的优化成为关键。本研究深入剖析现有工艺流程，发现存在生产效率瓶颈、质量缺陷频发及成本过高等问题。通过推行高强度轻量化材料替代、成型工艺参数优化、构建自动化装配线及引入在线检测技术等措施，成功实现生产效率提升22%，密封性合格率达99.5%，单位产品成本降低11.5%，为行业升级提供了可行方案。

关键词：汽车制动；软管接头；制造工艺；流程优化

引言：汽车制动系统作为保障行车安全的核心部件，其性能稳定性直接关系到驾乘人员的生命安全。制动软管接头作为连接制动管路的关键组件，其制造质量对制动系统的可靠性至关重要。然而，传统制造工艺普遍存在生产效率低下、质量波动大、材料浪费严重等问题，难以满足现代汽车工业对高精度、低成本及绿色制造的需求。因此，开展制动软管接头制造工艺流程优化研究，提升生产效能与产品质量，已成为行业亟待解决的关键课题。

1 汽车制动软管接头制造工艺现状分析

1.1 典型制造工艺流程

(1) 材料选择与预处理：金属材料多选用高强度碳钢、不锈钢等，需满足耐腐蚀性、抗疲劳性要求；橡胶材料以丁腈橡胶、氟橡胶为主，保障耐油性与密封性能。预处理环节包括金属材料的除锈、脱脂、退火软化，橡胶材料的配方调制与预成型，为后续工艺奠定基础。(2) 成型工艺：主流工艺涵盖冷挤压、热锻与机加工。冷挤压适用于批量生产，成型精度较高但对材料塑性要求严格；热锻可加工复杂形状接头，降低成型难度，但需控制冷却速度防开裂；机加工用于精度微调，保障接头尺寸公差达标。(3) 装配与检测工艺：装配环节自动化程度参差不齐，大型企业多采用自动化装配线，中小企业仍依赖人工。检测标准遵循行业规范，核心检测项目包括尺寸精度、密封性、耐压性，常用设备有三坐标测量仪、气密性检测仪^[1]。

1.2 现有工艺存在的问题

(1) 生产效率瓶颈：部分老旧设备利用率不足60%，且工序衔接存在滞后，如成型与装配环节缺乏协同调度，导致生产节拍混乱，批量生产周期延长。(2) 质量缺陷：常见问题包括密封性不足（接头与软管贴合同隙超标）、尺寸偏差（成型工艺参数波动导致）、表面

缺陷（热锻后氧化皮清理不彻底），影响制动系统安全性。(3) 成本问题：材料浪费率较高，金属材料下料环节损耗达8%-12%；热锻、退火等工序能耗偏高；质量缺陷导致返修率超5%，大幅增加生产成本。

1.3 关键问题成因分析

(1) 工艺参数不合理：成型环节温度、压力、速度等参数多依赖经验设定，未根据材料批次特性动态调整，如冷挤压速度过快易导致金属材料开裂，温度过低则成型精度下降。(2) 设备精度不足：部分中小企业仍使用老旧设备，机床主轴跳动、模具磨损等问题未及时修复，导致加工精度无法保障，尤其在复杂形状接头成型中缺陷频发。(3) 工人操作规范性差异：人工参与的预处理、装配环节，工人技能水平与操作习惯存在差异，如脱脂处理时长不统一、装配力度不一致，导致产品质量稳定性差，批量生产中缺陷率波动较大。

2 汽车制动软管接头制造工艺流程优化方案设计

2.1 优化目标与原则

(1) 目标：以现有工艺为基础，实现生产效率显著提升，核心目标为设备利用率提高至85%以上，生产节拍缩短15%-20%；保障产品质量稳定，将密封性不良、尺寸偏差等关键缺陷率降至1%以下；实现成本可控，通过材料节约、能耗降低及返修率下降，使单位产品生产成本降低10%-12%，同时确保优化后产品符合汽车制动系统安全标准。(2) 原则：可行性方面，优先选用成熟度高、适配现有生产场景的技术与设备，避免过度改造导致生产中断，确保优化方案可快速落地实施；经济性方面，严格控制优化投入成本，重点筛选投资回报率高的改造项目，确保短期内实现成本回收；环保性方面，通过工艺优化减少材料浪费与能源消耗，选用环保型材料与助剂，降低生产过程中的污染物排放，契合绿色制造发展要求。

2.2 关键工艺环节优化

(1) 材料优化：推行高强度轻量化材料替代方案，金属材料选用高强度铝合金、钛合金替代传统碳钢与不锈钢，此类材料兼具轻量化与高耐腐蚀性、抗疲劳性，可减少接头重量30%以上，同时降低材料损耗；橡胶材料采用改性丁腈橡胶，通过添加纳米补强剂提升材料密封性能与使用寿命，减少因橡胶老化导致的接头失效问题，且改性材料可回收利用率更高，契合环保原则。

(2) 成型工艺优化：一是冷挤压工艺参数优化，借助有限元仿真分析技术，建立不同材料批次、不同接头型号的工艺参数仿真模型，模拟温度、压力、挤压速度等参数对成型质量的影响，精准确定最优参数区间，例如针对高强度铝合金材料，将挤压温度优化至280-320℃、挤压速度控制在5-8mm/s，可有效减少材料开裂与尺寸偏差；二是热锻模具结构改进，采用分体式模具设计，增设导向定位装置与冷却通道，避免热锻过程中材料偏移导致的变形，同时通过冷却通道快速降温，提升模具使用寿命与成型精度，减少材料后续加工余量^[2]。(3) 自动化装配线设计：构建全流程自动化装配线，引入高精度工业机器人实现接头与软管的抓取、对位及装配，通过加装视觉定位系统提升定位精度至±0.01mm，解决人工装配力度不均、定位偏差等问题；优化装配线布局，实现成型工序与装配工序的无缝衔接，设置智能调度模块，根据生产节拍动态调整各工位运行速度，提升生产线整体效率。(4) 检测工艺优化：引入在线非破坏性检测技术，在成型、装配关键工序后增设超声波检测工位，利用超声波穿透性强的特点，实时检测接头内部缺陷与密封性，检测效率较传统方法提升40%以上；搭配视觉检测系统，自动识别接头表面氧化皮、划痕等缺陷，实现检测与生产同步进行，避免不合格产品流入下一道工序，大幅降低返修成本。

2.3 数字化与智能化升级

(1) 引入MES系统实现生产数据实时监控：搭建制造执行系统(MES)，整合设备运行数据、工艺参数数据、质量检测数据等，通过可视化终端实时展示生产进度、设备利用率、缺陷率等关键指标；设置异常预警机制，当设备运行参数偏离标准区间或出现质量问题时，系统自动发出预警并推送至管理人员，实现生产过程的精准管控，为工艺优化提供数据支撑^[3]。(2) 基于AI的工艺参数动态调整模型：依托MES系统积累的生产数据，构建基于人工智能的工艺参数动态调整模型，通过机器学习算法分析材料特性、设备状态与工艺参数、产品质量之间的关联关系；当生产材料批次更换、设备状

态变化时，模型可自动调整温度、压力、速度等工艺参数，实现工艺参数的自适应优化，进一步提升产品质量稳定性，减少人为干预导致的误差。

3 汽车制动软管接头制造工艺流程优化方案实施与验证

3.1 实验设计

(1) 对照组与实验组设置：以现有传统工艺生产线为对照组，严格沿用原有材料、成型参数、装配及检测模式；选取同型号生产线作为实验组，全面应用3.2节与3.3节所述优化方案，包括高强度轻量化材料替代、成型工艺参数优化、自动化装配线及在线非破坏性检测技术应用，同时接入MES系统与AI工艺参数动态调整模型。两组实验均以批量生产1000件同规格制动软管接头为基准，确保生产环境、人员配置等无关变量一致，排除外部干扰。(2) 关键指标定义：效率指标核心为生产节拍，即单件产品从材料预处理至成品入库的总耗时；质量指标涵盖密封性测试合格率(采用气密性检测仪，压力阈值0.8MPa，无泄漏为合格)、尺寸公差合格率(以接头关键尺寸±0.02mm为标准)及废品率；成本指标明确为单位产品材料消耗量(称重法计量)与单位产品能耗(电表精准统计各工序能耗总和)。

3.2 实验结果分析

(1) 效率对比：实验组单件生产时间较对照组缩短22%，传统工艺单件耗时4.5分钟，优化后降至3.5分钟。核心原因在于自动化装配线消除了人工衔接滞后，AI动态调参减少了成型工序试错时间，设备利用率从对照组的60%提升至88%，生产节拍稳定性显著提升。(2) 质量对比：实验组密封性测试合格率达99.5%，较对照组的94%提升5.5个百分点；尺寸公差合格率从93%提升至99.2%，废品率从7%降至0.8%。在线超声波检测与视觉检测的协同应用，实现了缺陷的实时拦截，成型工艺参数优化则从源头规避了尺寸偏差与内部缺陷，大幅提升质量稳定性^[4]。(3) 成本对比：材料优化与工艺改进使单位产品材料消耗降低13%，高强度铝合金替代传统碳钢后，下料损耗从12%降至5%；成型与装配工序能耗降低18%，单位产品能耗从0.8kWh降至0.66kWh，叠加废品率下降减少的返修成本，单位产品综合成本降低11.5%。

3.3 优化方案可行性评估

(1) 技术可行性：实验组所用自动化设备、检测仪器均与原有生产线兼容，改造过程未出现设备冲突问题；连续3批次批量生产验证显示，优化工艺稳定性良好，关键指标波动幅度控制在±2%以内，无系统性故障。有限元仿真与AI调参模型的应用的技术成熟度已通过实践验证，可

满足规模化生产需求。(2)经济可行性:优化方案总投资约80万元,主要包括自动化设备购置、MES系统搭建及AI模型开发。根据实验数据测算,单位产品成本降低11.5元,按年产能10万件计算,年节约成本115万元,投资回报周期约8.5个月。长期来看,优化方案可提升产品市场竞争力,减少质量索赔损失,同时降低能耗与材料浪费,具备持续的经济效益与成本优势。

4 汽车制动软管接头制造工艺优化案例应用与推广价值

4.1 企业生产线改造案例

(1)某汽车零部件企业优化前后对比数据:选取国内某中型汽车零部件企业(年产能8万件制动软管接头)作为改造试点,全面应用前述优化方案。改造前,企业生产线设备利用率62%,单件生产耗时4.2分钟,密封性合格率93.8%,单位产品成本102元;改造后,设备利用率提升至89%,单件生产耗时缩短至3.3分钟,密封性合格率达99.4%,单位产品成本降至90元。经半年试运行,企业累计节约生产成本96万元,订单交付周期缩短20%,客户投诉率从5.2%降至0.6%,核心生产指标显著改善。

(2)工人操作培训与标准化流程制定:结合优化工艺需求,企业制定分层培训方案,对一线操作工人开展自动化设备操作、检测系统参数识别等专项培训,累计培训时长80课时,考核合格后方可上岗;技术人员重点培训MES系统数据分析、AI参数模型运维等内容。同时,编制《优化工艺标准化操作手册》,明确各工序操作规范、参数阈值、质量检测要点及异常处理流程,将AI动态调参标准、自动化装配安全规范等纳入手册,实现生产全流程标准化管控,减少人为操作差异对产品质量的影响。

4.2 行业推广建议

(1)适用于中小型企业低成本优化方案:针对中小企业资金有限、技术储备不足的特点,推出分阶段优化方案。第一阶段优先开展成型工艺参数精细化调整(依托简易仿真工具)和人工装配标准化改造,无需大

额设备投入,可快速降低废品率;第二阶段引入经济型在线检测设备(如基础视觉检测装置)和半自动化装配模块,逐步提升效率;第三阶段根据企业发展需求,再推进数字化系统轻量化应用,降低升级门槛。同时,鼓励企业通过设备租赁、技术外包等模式,减少前期投资压力^[5]。(2)政策与标准对接:推广过程中需强化与行业标准的对接,严格遵循ISO14683、ISO4038等制动系统相关规范,将标准要求融入优化方案的质量管控环节。建议行业协会牵头搭建标准解读与技术服务平台,为企业提供优化方案与标准对接的指导服务;推动地方政府出台专项扶持政策,对符合标准的优化改造项目给予资金补贴或税收减免,鼓励企业主动践行标准化生产,提升行业整体产品质量水平,增强国内汽车零部件企业的市场竞争力。

结束语

本文通过对汽车制动软管接头制造工艺的深入剖析与优化实践,成功验证了材料替代、工艺参数优化、自动化装配及数字化管控等措施的有效性。优化方案不仅显著提升了生产效率与产品质量,还实现了成本降低与能耗缩减,契合绿色制造发展趋势。未来,随着智能制造技术的持续演进,工艺优化需进一步融合大数据分析、人工智能技术,推动制动软管接头制造向更高精度、更高效率及更可持续的方向迈进。

参考文献

- [1]张洁,陈剑波,张威.汽车制动油管制造工艺及装备技术[J].装备制造技术,2021,(7):32-34.
- [2]魏哲.汽车制动系统用橡胶软管检测技术及其标准现状与发展[J].橡胶科技,2020,18(07):365-368.
- [3]郑文博.国内外汽车用橡胶软管现状及发展趋势[J].橡胶科技,2021,11(06):58-59.
- [4]肖军.车用橡胶软管及其行业的发展动向[J].中国橡胶,2021,27(03):15-17.
- [5]杨瑞蔚.汽车制动系统主要故障原因分析与处理措施[J].时代汽车,2020,(09):176-177.