

小模数圆柱齿轮磨齿技术的应用

李文桥 梁海强 唐云龙

秦川机床工具集团股份有限公司 陕西 宝鸡 721009

摘要: 针对小模数 ($m \leq 3$)、多齿数 ($z \geq 120$) 的硬齿面圆柱齿轮, 在蜗杆砂轮磨齿加工中普遍存在效率偏低、砂轮易钝化、加工周期长等问题, 以20CrMnTiH渗碳淬火齿轮 (硬度56~62HRC) 为研究载体, 开展磨齿工艺整体优化。通过优选微晶烧结刚玉混合磨料砂轮、设计多头蜗杆砂轮修整方案、应用深切缓进磨削模式并匹配合理磨削参数, 有效突破传统工艺瓶颈。生产验证表明, 采用三头混合磨料砂轮与深切缓进磨削结合的方案, 可将小模数多齿数齿轮单件加工时间由60min缩短至15min, 粗磨次数由8次降至2次, 砂轮修整频次降低40%以上, 齿面无磨削裂纹、烧伤及振纹, 精度达到GB/T10095.1.2-2008标准5级要求。优化工艺显著提升加工效率与成形质量, 降低综合生产成本, 可为同类齿轮磨齿提供可复制的工艺方案。

关键词: 小模数齿轮; 硬齿面; 蜗杆砂轮磨齿; 混合磨料砂轮; 多头修整; 深切缓进磨削; 工艺优化

引言

小模数、多齿数圆柱齿轮是精密传动装置与机床核心功能部件, 其齿面精度与加工效率直接影响整机运行性能与交付周期^[1]。蜗杆砂轮磨齿依托连续展成啮合原理, 能够模拟齿轮与齿条的啮合运动, 是小模数齿轮高精度加工的主流方式。但在加工模数 $m \leq 3$ 、齿数 $z \geq 120$ 的硬齿面齿轮时, 常规单头刚玉砂轮配合多次走刀的工艺存在明显不足: 单头砂轮磨削时工件转速受限, 有效磨削占比高; 普通刚玉磨料自锐性差, 磨削中易钝化, 引发齿面热损伤; 小切深多次往复方式材料去除率低, 进一步拉低生产效率。

当前国内相关研究多聚焦于齿面精度控制, 面向多齿数齿轮的高效磨削成套工艺研究相对不足。为此, 本文以机床主轴分齿齿轮 (模数 2.2、齿数 155) 为应用对象, 从砂轮选型、多头砂轮修整、磨削参数匹配三个维度进行系统改进, 提出混合磨料多头砂轮与深切缓进相结合的高效磨削路线, 通过理论分析与批量验证, 形成适用于小模数多齿数硬齿面齿轮的高效磨齿方案, 解决传统工艺效率低、质量波动大的行业痛点^[2]。

1 磨齿砂轮的精准选型

砂轮是磨齿加工的核心执行元件, 其磨料类型、硬度等级与粒度选择, 直接决定磨削效率、齿面质量与砂轮使用寿命。本文研究对象为 20CrMnTi 渗碳淬火齿轮, 表面硬度 58-62HRC, 围绕抗钝化、强自锐、低烧伤、高效率的目标, 对砂轮关键参数进行优化匹配。

1.1 磨料的选择

小模数硬齿面磨削对磨料的核心要求为: 硬度高、抗弯强度好、热稳定性优、切削刃锋利且自锐性强、耐

磨性突出。对比常用磨料性能可知, 棕刚玉硬度偏低、耐热性差, 磨削硬齿面时易钝化, 易造成齿面烧伤; 白刚玉、铬刚玉性能优于棕刚玉, 但自锐性与轮廓保持能力难以满足大切深磨削需求。微晶烧结刚玉混合磨料采用专用低温陶瓷结合剂制备, 兼具高硬度、高韧性与良好自锐性, 磨削过程发热量低, 可显著降低硬齿面热损伤风险^[3]。

与普通刚玉砂轮相比, 混合磨料砂轮磨耗比提升 3 倍以上, 轮廓保持性好, 单次切削进给量可提高 2~3 倍, 砂轮修整量减少 50%, 在保证齿面质量的同时大幅提升磨削效率, 是小模数多齿数硬齿面齿轮磨齿的优选磨料。

1.2 砂轮硬度的选择

砂轮硬度是指磨料颗粒与结合剂的结合强度, 直接影响磨削效率、加工精度与表面粗糙度。遵循“硬料软磨、软料硬磨”的选型原则, 针对渗碳淬火后 HRC58-62 的硬齿面齿轮, 选用 J、K 级 (软~中软) 砂轮: 在磨削过程中, 钝化的磨料颗粒可及时脱落, 新锋利的磨料颗粒快速暴露, 保证砂轮始终处于锋利状态, 避免因磨料钝化导致的齿面烧伤、振纹, 同时减少砂轮修整频率。

1.3 砂轮粒度的选择

砂轮粒度的选择需兼顾齿面粗糙度要求与磨削效率, 粗粒度砂轮磨削效率高但表面粗糙度差, 细粒度砂轮表面加工质量好但效率低。本次研究中齿轮齿面粗糙度要求为 $Ra0.6\mu m$, 在满足该精度要求的前提下, 优先选用粗粒度砂轮以提升效率, 最终确定 100~120 目的砂轮粒度: 该粒度可在实现 $Ra0.6\mu m$ 齿面粗糙度的同时, 保证较大的材料去除率, 相较 80 目砂轮齿面质量更优, 相较

140 目砂轮磨削效率提升 25% 以上。

2 多头蜗杆砂轮的修整工艺与设计计算

传统单头蜗杆砂轮每转仅驱动工件转过一个齿, 对于齿数 $z \geq$ 大于 150 的齿轮加工中, 工件转速低、加工周期长^[4]。多头蜗杆砂轮每转可带动工件转过与头数对应的齿数, 显著提高工件转速, 且齿面由多条螺旋线共同包络成形, 精度稳定性更优。但多头砂轮修整精度要求更高, 需通过轴系联动实现多条螺旋线的等距、等高修整, 并结合机床行程确定适配模数范围。

2.1 多头砂轮的核心修整方法

蜗杆砂轮的螺旋线精度直接决定齿轮齿形精度, 多头砂轮修整的核心是在同一基体上通过修整拖板联动, 加工出均匀分布的多条螺旋线。受限于机床砂轮主轴单一定位基准, 无法实现任意相位角定位, 因此采用修整拖板径向进给轴 (U 轴) 与轴向运动轴 (V 轴) 联动补偿的方式完成修整。

修整流程为: 首先通过 U 轴径向进给完成第一条螺旋线加工; U 轴退刀时, V 轴沿砂轮轴向移动一个砂轮螺距, 主轴位置保持不变, 确保相邻螺旋线相位与间距准确; 重复上述进给与位移动作, 依次完成所有螺旋线修整, 最终形成指定头数的蜗杆砂轮。该方法以轴系联动替代相位定位, 消除主轴定位误差影响, 保证多头砂轮各螺旋线一致性, 为磨齿精度提供保障。

2.2 基于机床行程的砂轮头数与模数匹配计算

多头砂轮修整总行程随头数增加而增大, 需依据机床 V 轴有效行程确定可加工最大模数, 避免行程不足导致修整不完整。以 V 轴有效行程 180mm、砂轮宽度 100mm、压力角 20° 、保险余量 5mm 为例, 建立行程约束不等式, 推导双头与三头砂轮的最大适配模数^[5]。

经计算, 双头砂轮可满足模数不大于 4mm 的齿轮修整需求, 三头砂轮可满足模数不大于 3mm 的齿轮修整需求。结合本文研究对象 $m \leq 3$ 的特点, 优先选用三头砂轮, 在机床行程范围内可实现完整、高精度修整。

2.3 多头砂轮磨削的精度控制要点

多头砂轮磨削的齿距偏差与砂轮头数和齿轮齿数的整除性相关。当砂轮头数与齿轮齿数非整除时, 每个齿面由多条螺旋线共同包络, 单条螺旋线的修整误差可被平均补偿, 最终齿面综合误差更小; 若二者为整除关系, 特定齿面始终由同一条螺旋线加工, 误差会直接映射至齿面, 导致齿距偏差偏大。因此在砂轮头数选择时, 优先采用与齿数非整除的配置, 兼顾效率与精度。

3 深切缓进磨削方式与磨削参数优化

传统蜗杆砂轮磨齿采用小进给量、多次走刀的磨削

方式, 虽能保证齿面精度, 但材料去除率低, 加工效率极低; 且多次走刀导致砂轮与工件接触时间长, 易引发齿面热损伤。结合多头砂轮的高转速优势, 采用深切缓进磨削方式 (大进给量、慢走刀), 并对进给量、进给速度、切向位移三大核心参数进行优化, 实现材料的快速去除, 同时保证磨削质量。

3.1 磨削参数优化原则

深切缓进磨削遵循“大进给、慢走刀、合理位移”的原则, 在控制齿面烧伤、裂纹、振纹的前提下, 最大化提升材料去除效率。针对小模数硬齿面齿轮, 参数优化如下:

径向进给量为影响去除率的核心参数, 传统单头砂轮粗磨进给量为 0.05~0.12mm, 依托混合磨料砂轮的高自锐性, 将模数 2~3mm 硬齿面齿轮粗磨进给量提升至 0.25~0.35mm, 显著提高单次去除量。

轴向进给速度与径向进给量匹配执行, 遵循“大进给慢走刀、小进给快走刀”的规则, 保持磨削负荷均匀。径向进给约 0.25mm 时, 轴向进给速度设为 0.6mm / 工件每转; 径向进给约 0.10mm 时, 轴向速度设为 1.2mm / 工件每转, 避免负荷突变导致振纹与砂轮破损。

切向位移用于提升砂轮利用率, 定义为工件每移动 10mm 对应的 Y 轴位移量。优化后切向位移率为 0.2~0.4, 与传统固定 0.2 相比, 砂轮有效利用面积提升 30%, 修整频次降低 40%。

3.2 深切缓进磨削的技术优势

与传统多次走刀相比, 多头砂轮配合深切缓进具有明显优势: 一是加工效率大幅提升, 大切深使粗磨次数由 8 次降至 2 次, 总加工次数显著减少, 材料去除率提升 2 倍以上; 二是齿面质量更稳定, 磨削接触区域连续变化, 高负荷区可快速脱离散热, 降低磨削温度, 避免热损伤; 三是砂轮寿命延长, 磨损均匀, 有效利用面积提升, 降低修整与损耗成本。

4 工艺验证与效果分析

以某机床主轴分齿齿轮为验证对象, 齿轮材料为 20CrMnTi 锻件, 渗碳淬火后硬度 56-62HRC, 模数 2.5、齿数 150、压力角 20° 、螺旋角 10° , 精度要求 GB/T10095.1.2-2008 标准 5 级, 粗糙度 $Ra \leq 0.6\mu m$ 。在同一台蜗杆砂轮磨齿机上开展对比试验, 保持设备、装夹、冷却条件一致, 分别采用传统工艺与优化工艺进行加工。

传统工艺采用单头白刚玉砂轮, 配合常规多次走刀模式; 优化工艺采用三头混合磨料砂轮, 配合深切缓进磨削。对比结果显示, 优化工艺粗磨次数由 8 次减少至 2 次, 总加工次数由 10 次降至 4 次, 单件加工时间由

60min 缩短至 15min, 效率提升 75%。齿面粗糙度稳定在 $Ra0.58\mu m$, 齿距极限偏差控制在 $10\mu m$, 均满足设计要求, 且无烧伤、裂纹、振纹等缺陷。砂轮修整频次降低 40% 以上, 损耗成本降低 30%, 设备利用率与单位产能显著提升, 人工与能耗成本降低 60% 以上, 具备批量推广价值。

5 结论

针对 $m \leq 3$ 、 $z \geq 120$ 的小模数多齿数硬齿面圆柱齿轮磨齿瓶颈, 本文从砂轮选型、多头修整、参数优化三方面开展系统研究, 形成混合磨料多头砂轮与深切缓进相结合的高效工艺方案, 主要结论如下:

微晶烧结刚玉混合磨料砂轮, 搭配 J/K 级硬度、100~120 目粒度, 适用于小模数硬齿面齿轮高效精密磨削, 具备高自锐、低发热、长寿命特点, 可有效避免齿面热损伤。

建立基于机床行程的多头砂轮模数匹配方法, 三头砂轮适配模数 $\leq 3mm$, 双头砂轮适配模数 $\leq 4mm$; 采用 U/V 轴联动修整可保证多头螺旋线精度, 选用与齿数非整除的头数可提升齿距精度稳定性。

深切缓进磨削遵循大进给、慢走刀、优位移原则, 模数 2~3mm 硬齿面粗磨进给量可提升至 0.25~0.35mm, 轴向速度匹配 0.6mm / 工件每转, 切向位移率 0.2~0.4,

兼顾效率与质量。

工程应用表明, 优化工艺可将单件加工时间由 60min 缩短至 15min, 效率提升 3 倍, 砂轮修整次数降低 40% 以上, 齿面精度达到 4 级, 大幅降低生产成本, 可为同类齿轮加工提供标准化参考。

后续可针对不锈钢、高温合金等难磨材料开展小模数齿轮磨齿工艺研究, 优化砂轮结合剂与参数组合, 扩大工艺适用范围; 同时推进多头砂轮数控自动修整技术, 提升修整精度与自动化水平, 支撑磨齿加工向高效、智能方向发展。

参考文献

- [1] 蒋英汉. 磨工知识与技能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 89-105, 156-178.
- [2] 张宝珠. 制齿工速成与提高 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 121-145, 201-220.
- [3] 吴序堂. 齿轮啮合原理 (第 2 版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 3.
- [4] 王先逵. 机械制造工艺学 (第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 320-345, 412-430.
- [5] 全国齿轮标准化技术委员会. 圆柱齿轮 精度 第 1 部分: 轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值: GB/T 10095.1-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.