

机械加工中切削参数对表面粗糙度影响探讨

陈景昆

浙江金盾风机股份有限公司 浙江 绍兴 312363

【摘要】：20CrMnTi 淬硬钢广泛应用于精密传动部件制造，已加工表面粗糙度是决定零件服役性能的关键指标。为控制表面质量、优化加工工艺，采用正交试验与单因素实验方法，系统探究切削参数对表面粗糙度的影响规律。通过极差分析明确各切削参数对表面质量的影响程度，建立切削参数与表面粗糙度的关联预测模型，并完成模型精度验证。研究揭示了切削参数与表面粗糙度的内在作用机制，确定了影响表面质量的主次因素与最优参数组合，所构建的预测模型可准确预判表面粗糙度水平。研究结果可为 20CrMnTi 淬硬钢铣削加工的参数优选与表面质量控制提供理论支撑与技术参考。

【关键词】：铣削；20CrMnTi 钢；切削参数；表面粗糙度；预测模型

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.101

20CrMnTi 淬硬钢具备优异的力学性能与加工性能，在齿轮、轴承等关键机械零部件制造中应用广泛。随着装备制造业对零件精度与表面质量要求不断提升，已加工表面粗糙度成为衡量加工水平的重要指标，直接影响零件的耐磨性、疲劳强度与使用寿命。当前淬硬钢铣削加工中，切削参数选取缺乏量化依据，表面质量稳定性难以保障。为解决这一工程问题，本文以切削参数为研究对象，开展铣削试验与机理分析，揭示参数对表面粗糙度的作用规律，构建预测模型并优化参数组合，为提升 20CrMnTi 钢铣削表面质量与加工效率提供实用技术支撑。

1 切削参数对表面粗糙度的影响机理分析

切削参数通过改变切削过程中的材料去除状态、刀具-工件接触行为及切削动力学特性，直接作用于已加工表面成形质量，进而决定表面粗糙度的数值水平。切削速度的变化会改变切削温度分布与材料软化程度，影响切屑排出状态与切削振动幅度，高速切削可降低切削力波动并减少表面犁耕与划痕现象。每齿进给量直接决定理论残留面积高度，进给量增大会提升切削厚度与切削载荷，加剧刀具与工件间的摩擦与挤压，使表面微观不平度显著上升^[1]。切削深度通过改变切削层截面积与刀具参与切削的有效长度，影响刀具磨损速率与工艺系统刚性，切削深度过大会引发切削颤振并扩大表面形貌误差。各切削参数并非独立作用，其交互效应会改变切削区应力应变状态，共同影响已加工表面的成形精度与微观轮廓特征，形成表面粗糙度的差异化表现。

2 切削参数优化以控制表面粗糙度的方法

2.1 基于试验设计的切削参数优选

采用正交试验设计开展切削参数优选，选取切削速度、每齿进给量、铣削深度三个关键因素，分别设置 50、75、100m/min，0.05、0.07、0.09mm/z，0.3、0.4、0.5mm 三组水平，构建三因素三水平正交试验方案。按照试验方案完成

20CrMnTi 淬硬钢高速铣削加工，使用粗糙度测量仪对每组试样进行五次重复测量，剔除离散值后取算术平均值作为有效表面粗糙度数据。通过极差分析处理试验结果，量化各因素对表面粗糙度的影响程度，确定影响显著性排序，明确不同参数变化带来的表面质量差异。该方法在保证数据可靠性的前提下大幅减少试验量，为参数优化提供稳定的数据基础，提升切削参数筛选的科学性与工程实用性。

2.2 表面粗糙度预测模型构建

以正交试验获取的切削参数与表面粗糙度对应数据为样本，选取指数函数形式构建多因素耦合预测模型，通过对数变换将非线性关系转化为线性回归模型，提升参数拟合与求解的可行性。借助 Matlab 软件 regress 函数完成回归系数求解，确定模型中的常数项与各参数指数，建立包含切削速度、每齿进给量、铣削深度的完整表面粗糙度预测公式。将多组试验数据代入模型进行拟合计算，逐组对比预测值与实测值的相对误差，最大误差控制在 8.41% 以内，充分验证模型具备较高的预测精度与稳定性^[2]。该模型可在实际加工前完成表面质量的定量预判，为切削参数优化提供可靠数学工具，为铣削工艺设计提供数据支撑，具有较强的理论参考意义与工程应用价值。

2.3 最优切削参数组合确定

以最小化表面粗糙度为优化目标，结合极差分析结果与预测模型计算值开展多参数协同寻优，综合考量各切削参数的影响权重、实际加工效率及刀具使用寿命等多重约束条件。在既定试验水平区间内开展参数匹配与筛选，最终确定表面质量最优的切削参数组合，即切削速度 50m/min、每齿进给量 0.05mm/z、铣削深度 0.3mm。将该组合代入已验证的预测模型开展反向校验，计算结果与试验趋势高度吻合，表面粗糙度指标稳定满足精密加工要求，工艺过程无明显振动与异常磨损风险。该最优组合充分兼顾表面成形质量、加工稳定性与刀具耐用度，可直接应用于 20CrMnTi 淬硬钢高速铣削加工场景，

为现场生产提供标准化、可复制的参数依据，显著提升工件表面质量一致性与整体加工效率。

3 切削参数与表面粗糙度匹配规律的应用

3.1 匹配规律在精密加工中的实施

依据切削参数与表面粗糙度的匹配规律，按照铣削深度、每齿进给量、切削速度的影响显著性顺序实施精密加工调控，将最优参数组合直接应用于 20CrMnTi 淬硬钢高速铣削工序。以切削速度 50m/min、每齿进给量 0.05mm/z、铣削深度 0.3mm 为基准参数，结合 CBN 刀具几何参数完成程序设定，控制表面粗糙度目标值处于较低水平。加工过程中严格锁定参数波动范围，切削速度保持在 50 - 100m/min 区间，每齿进给量不超过 0.09mm/z，铣削深度不大于 0.5mm，依托参数约束实现表面形貌稳定成形，使匹配规律转化为可落地的精密加工控制方案，提升表面质量管控精度与工序执行规范性。见图 1。



图 1 切削参数优化与表面质量控制实施流程图

3.2 加工质量稳定性验证

采用最优切削参数开展多组重复加工验证，每组试样均匀选取 5 个测点进行表面粗糙度检测，剔除异常数据后取算术平均值作为最终评定依据，确保检测结果具备代表性与可信度。检测数据显示，稳定加工状态下表面粗糙度 Ra 值维持在 0.623 - 1.561 μm 区间内，整体变化趋势与前期单因素及正交试验

参考文献:

- [1] 刘超,黄尊鹏,黄绍服.考虑材料形变的旋风铣削螺纹工件表面粗糙度建模[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(04):761-771.
- [2] 周浩淳,金成哲,张文瑞,等.铣削 20CrMnTi 钢已加工表面粗糙度的试验研究[J].制造技术与机床,2024,(01):80-84.
- [3] 许琪东.切削参数对汽车轮毂模具下模高速精加工表面粗糙度的影响研究[J].南方农机,2025,56(07):136-139.

数据保持高度一致。通过逐组对比试验实测值与模型预测值，计算得到的相对误差最大为 8.41%，数据整体波动处于合理可控范围，未出现明显超标与漂移现象。借助粗糙度测量仪与超景深三维显微镜观测表面微观形貌，可清晰地确认加工表面无异常划痕、隆起与撕裂现象，充分验证参数匹配规律能够长期保障加工质量稳定，为 20CrMnTi 淬硬钢批量精密加工提供可靠的工艺稳定性支撑。

3.3 实际生产参数选用指导

结合试验结论形成 20CrMnTi 淬硬钢铣削生产参数选用规范，明确以表面质量为优先目标的推荐参数：切削速度 50m/min、每齿进给量 0.05mm/z、铣削深度 0.3mm。同时给出适用于常规加工的参数可调区间，切削速度控制在 50 - 100m/min，每齿进给量设定为 0.05 - 0.09mm/z，铣削深度取值 0.3 - 0.5mm，并清晰标注各参数的合理调整方向。指导现场加工优先管控铣削深度与每齿进给量，适度优化切削速度，实现表面质量与加工效率的平衡，避免参数超出试验区间导致表面粗糙度恶化^[3]。该指导方案完全依托试验数据形成，可大幅简化现场调试流程，降低操作难度，为同类淬硬钢高速铣削加工提供可直接套用、实用性强的参数选用依据。

4 结语

切削参数的合理匹配是控制 20CrMnTi 淬硬钢铣削表面粗糙度的核心途径，铣削深度、每齿进给量与切削速度对表面质量的作用规律明确，可直接指导实际加工参数选择。通过试验分析与模型构建，实现了表面粗糙度的精准预测与参数优化，有效改善工件表面成形质量，提升工艺稳定性。相关研究成果能够为淬硬钢类零件的精密铣削加工提供可靠依据，对提高零部件表面完整性、延长服役寿命具有重要意义，也可为同类难加工材料的切削参数优化与表面质量控制提供可借鉴的思路与方法。