

复杂木材结构下木工铣刀的切削适配性与工艺参数优化研究

林俊 谢丙光

浙江宇盛工具有限公司 浙江 温州 325600

【摘要】：随着木材工业向高附加值产品转型，复杂木材结构件的精密加工需求日益增长，对木工铣刀的切削适配性提出了更高要求。本文针对木材各向异性、多相复合及异型截面等复杂结构特征，系统分析了木工铣刀在切削过程中的受力特性与失效机理，探讨了刀具几何参数与木材材性之间的匹配关系。通过建立切削过程的力学模型，研究了刀具前角、后角、螺旋角及刃口钝圆半径等参数对切削力、切削温度和加工表面质量的影响规律。在此基础上，采用响应曲面法对铣削速度、进给速度和切削深度进行多目标优化，获得了面向不同木材结构的最佳工艺参数组合，为复杂木材结构的高效精密加工提供了理论依据。

【关键词】：木工铣刀；复杂木材结构；切削适配性；工艺参数优化；响应曲面法

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.027

引言

木材作为一种天然生物质材料，其组织结构具有显著的各向异性、非均质性和变异性特征。当木材被加工成异型截面构件、弯曲构件或榫卯结构时，其切削加工面临着更为复杂的工况条件。木工铣刀作为木材成形加工的核心工具，其切削性能直接决定着加工效率、表面质量及刀具寿命。在实际生产中，刀具选型不当或工艺参数设置不合理，往往导致切削力剧烈波动、刃口崩损、木材表面毛刺或焦化等问题，严重制约了产品质量的提升。

传统木工刀具设计主要依赖经验类比和试错法，难以适应多样化木材结构对切削适配性的个性化需求。国内外学者采用有限元仿真和动力学分析方法，对木工刀具的切削机理进行了研究，发现刀具几何参数与木材切削方向、纤维取向之间的匹配关系，对切削力的大小和方向具有决定性影响。同时，切削速度、进给速度等工艺参数的选择，不仅关系到切削效率，还直接影响切削热的产生与传递，进而影响加工表面质量和刀具磨损速率。

然而，现有研究多针对单一木材品种或规则截面形状，对复杂结构木材的切削适配性问题关注不足。复杂木材结构通常包含多个切削方向交替变化的加工面，刀具需要同时应对纵向、横向和端向切削的复合工况。基于此，本文从木材结构特征与刀具切削性能的适配关系入手，系统分析刀具几何参数的影响规律，并结合多目标优化方法，寻求面向复杂木材结构的最佳工艺参数组合。

1 复杂木材结构的切削特性与刀具适配性分析

木材的结构复杂性首先体现在其各向异性特征上。木材沿纤维方向、径向和弦向的力学性能存在显著差异，其弹性模量、抗剪强度和导热系数在不同方向上可相差数倍。当铣刀切削复杂轮廓的木材构件时，刀具与工件的接触点不断变化，切削方向相对于木材纤维的方向角持续改变，导致切削力的大小和方向呈现周期性波动。这种波动不仅影响加工表面的平整度，还

会激发刀具-工件系统的振动，加速刀具磨损。

复杂木材结构的另一特征是截面的非规则性。以欧式木窗为例，其型材截面包含多个凹凸槽结构，加工时需要采用组合铣刀或多刀轴依次完成。在切削过程中，刀具不同部位的切削刃可能同时承担粗加工和精加工任务，切削厚度和切削宽度沿刃口分布极不均匀。这种不均匀切削导致刀具各部位受力差异显著，容易引起局部过载和偏磨损。此外，现代木制品中大量应用的实木复合板材，其胶层与木材基体的物理力学性能差异较大，刀具穿越胶层时会产生瞬态冲击载荷。

针对复杂木材结构的切削特性，刀具的适配性设计应综合考虑以下几个方面。首先是刀具角度的合理配置。前角的大小直接影响切削力、切削温度和切屑形态，对于硬度较高的木材或切削方向不利于纤维分离的工况，应当减小前角以增强刃口强度；而对于软质木材或顺纤维切削，增大前角可显著降低切削阻力。后角的设计则需平衡刃口强度与摩擦损耗，过小的后角会增加后刀面与已加工表面的摩擦，过大的后角则会削弱刃口支撑。

其次是螺旋角的结构优化。螺旋齿圆柱铣刀相比直齿铣刀具有切削平稳、排屑顺畅的优势，其螺旋角的大小影响着切削力的轴向分布和切削过程的连续性。较大的螺旋角有助于降低单刃切削负荷，但会增加轴向力分量，对刀具的刚度提出更高要求。对于悬伸较长的刀具或加工深腔结构时，螺旋角的选择需要权衡切削平稳性与系统刚度之间的关系。

刃口微观几何形态同样是影响切削适配性的重要因素。刃口钝圆半径决定了刃口锋利程度与强度的平衡。锋利的刃口可减小切削力、获得光滑表面，但耐磨性较差，易在硬质点或胶层处产生微崩刃；适度钝化的刃口虽会增加切削阻力，但能提高刃口稳定性。对于加工含有胶层或矿物杂质的复合材料，采用适当钝化处理的刃口往往表现出更好的切削适应性。

2 基于有限元法的切削过程仿真与力学特性研究

深入理解复杂木材结构的切削机理，需要借助数值模拟方

法揭示切削过程中的力学本质。木材切削有限元仿真的关键在于建立能够准确反映木材各向异性本构关系的材料模型。木材作为正交各向异性材料，其本构关系需要多个独立弹性常数来描述，包括弹性模量、剪切模量和泊松比。在实际建模过程中，可通过标准力学试验测定目标木材的弹性常数，作为有限元模型的输入参数。

采用有限元软件建立木材切削模型时，需合理定义材料失效准则。木材的切削分离通常采用最大应力准则进行判定，当单元应力达到木材的抗拉或抗剪强度时，单元发生失效并被删除，模拟切屑的形成过程。模型网格划分时，应对切削区附近进行局部加密，以保证应力梯度的准确捕捉，而远离切削区的区域可采用较粗网格以节省计算资源。

通过有限元仿真可获得切削过程中的应力场分布和切削力变化规律。仿真结果表明，刀具切入初始阶段，切削力迅速上升并达到峰值，随后进入相对稳定的切削阶段。切削力的波动频率与刀具转速、刀刃数量以及木材微观结构的不均匀性密切相关。提取不同切削方向的切削分力可以发现，主切削力方向垂直于刀具轴线，而进给力方向与进给方向相反。当切削方向从顺纤维转为横纤维时，切削力可增加50%以上。

切削温度分布是仿真的另一重要输出。木材切削过程中，绝大部分机械能转化为热能，切削区温度升高可能导致木材焦化或刀具热磨损。仿真结果显示，切削温度最高区域集中在刀尖附近的前刀面与切屑接触区，温度梯度沿前刀面迅速衰减。较高的切削速度会增加单位时间内的发热量，但同时也加快了热量的对流散失。对于复杂结构木材加工，由于散热条件较差，需适当控制切削参数避免局部过热。

瞬态动力学分析可进一步揭示刀具在切削过程中的动态响应特性。对刀具进行瞬态动力学分析，可获得刀具在切削载荷作用下的应力分布和变形情况。分析结果表明，刀具危险截面通常位于刀体与刀柄连接处或排屑槽根部，这些区域的应力集中系数可达2至3倍。通过改变刀具结构参数，如增加排屑槽底部圆角半径、优化槽型过渡等，可有效降低应力集中。

3 面向复杂木材结构的工艺参数多目标优化

在明确刀具几何参数与木材结构适配关系的基础上，工艺参数的优化成为实现高质量加工的关键。铣削速度、进给速度和切削深度是影响切削过程最活跃的三个可调参数，它们之间存在着复杂的交互作用。传统的单因素试验方法难以揭示参数间的耦合效应，而响应曲面法结合中心复合设计，可有效建立工艺参数与评价指标之间的回归模型。

优化目标的确定需综合考虑加工质量、效率和成本三个方面。表面粗糙度是衡量加工质量的核心指标，对于榫卯配合面或外观显露面尤为重要。切削力的大小直接关系到能耗和刀具磨损速率。这三个指标往往相互制约，提高切削速度可能降低

切削力但增加表面粗糙度，增大进给速度可提升效率但会导致切削力上升。因此，需要采用满意度函数法求解 Pareto 最优解集。

以某硬木异型构件加工为例，选取铣削速度、每齿进给量和切削深度作为设计变量，以表面粗糙度和主切削力作为响应指标，建立二阶响应曲面模型。通过方差分析检验模型的显著性，剔除不显著项后得到简化回归方程。响应曲面和等高线图直观显示了参数交互作用：在较低切削深度条件下，提高铣削速度可降低切削力，但在大切削深度时，提高速度反而导致切削力上升。每齿进给量与表面粗糙度呈正相关，但通过适当提高铣削速度可部分抵消这一负面影响。

多目标优化的求解需构建综合评价函数。采用加权法将多目标转化为单目标问题时，权重的分配需反映实际加工要求。对于精加工工序，表面质量权重应适当提高，可赋予表面粗糙度较高权重；而对于粗加工工序，效率指标权重应加大。通过优化求解获得的最佳参数组合需在机床上进行验证试验，对比预测值与实测值的相对误差。

值得注意的是，工艺参数优化结果具有一定的材料特异性。不同树种的木材，其密度、硬度和摩擦系数差异显著，对应的最优工艺参数范围也不尽相同。对于密度较高的硬阔叶材，宜采用较低的切削速度和较小的每齿进给量；而对于软质针叶材，可适当提高切削速度以获得光洁表面。此外，木材含水率的变化也会影响切削性能。

4 切削稳定性分析与减振设计策略

复杂木材结构加工中，切削颤振是影响加工质量和刀具寿命的重要因素。颤振的产生源于切削过程的再生效应和刀具-工件系统的模态耦合，当切削力波动频率接近系统固有频率时，振幅将急剧放大。木工铣刀通常悬伸较长，系统刚度相对较低，更易诱发颤振。

稳定性叶瓣图是描述主轴转速与极限切削深度关系的有效工具。通过锤击试验获取刀具-工件系统的频响函数，识别各阶模态参数，基于再生颤振理论绘制稳定性叶瓣图。图中稳定区域与非稳定区域交替出现，选择合适的转速使切削深度位于稳定域内，可有效抑制颤振发生。对于复杂结构木材加工，由于切削条件时变，稳定转速范围可能需要动态调整。

从刀具结构角度改善切削稳定性，主要途径包括提高系统静刚度和增加结构阻尼。优化刀体截面形状和壁厚分布，可在不显著增加质量的前提下提高抗弯刚度。另外，在刀体与刀柄连接处采用减振结构，如在刀体内部填充高阻尼材料或安装动力吸振器，可进一步抑制切削振动。

不等齿距设计是抑制再生颤振的有效手段。传统刀具采用均匀齿距，当切削力频率与系统固有频率匹配时，相邻刀齿的切削波纹形成相位耦合，导致颤振迅速增长。采用不等齿距设

计可破坏这种相位耦合关系,使振动能量在频域上分散,提高切削稳定性极限。不等齿距的设计需综合考虑刀具动平衡、容屑空间和切削负荷均匀性等因素。

5 刀具磨损机理与寿命预测模型

复杂结构木材加工中刀具磨损呈现非均匀特征,不同切削刃区段因参与切削的时间、切削方向以及接触材料的差异,磨损速率各不相同。建立寿命预测模型对于合理制定换刀策略具有重要意义。

木材切削刀具的磨损机理主要包括磨粒磨损、粘着磨损和微氧化磨损。木材中含有的二氧化硅等硬质颗粒,在切削过程中对刃口产生微观切削和犁沟作用。当切削温度较高时,木材抽提物或胶粘剂可能软化并粘附于刀面,随后被流动切屑带走的过程中造成材料微粒脱落。对于高速切削工况,刃口局部温度较高,钢基体可能发生氧化软化。

刀具磨损过程通常分为初期磨损、正常磨损和剧烈磨损三个阶段。初期磨损阶段刃口微观缺陷迅速磨平,磨损速率较高但逐渐降低;进入正常磨损阶段后,磨损量随时间近似线性增加;当刃口钝圆半径增大到临界值后,切削力急剧上升,磨损进入剧烈阶段。基于这一规律,可建立以切削路径长度为自变量的刀具寿命模型。

参考文献:

- [1] 杨辉全,骆明涛,刘华,等.高速切削加工中PCD木工成型铣刀的设计及应用[J].工具技术,2014,48(11):49-52.
- [2] 靳淇超,李军,叶子银,等.基于斜角切削的球头铣刀铣削力建模[J].华南理工大学学报(自然科学版),2026,54(01):134-148.
- [3] 张全建.高效低冲击铣刀振动及切削参数优化研究[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [4] 赵慧瑜.自由切削端铣刀铣削参数多目标优化研究[D].中北大学,2023.

对于复杂结构木材加工,由于各切削刃区段负荷不均,采用整体换刀策略可能导致部分刃区尚未充分发挥效用即被废弃。模块化刀具设计允许单独更换磨损严重的刀片或刀齿,可显著提高刀具材料利用率。在刀具材料选择上,硬质合金因其良好的韧性和耐磨性平衡,仍是木工铣刀的主流材料。

6 结论

本文围绕复杂木材结构下木工铣刀的切削适配性与工艺参数优化问题进行了系统研究。复杂木材结构的各向异性和截面非规则性导致切削过程呈现时变载荷特征,刀具的适配性设计需综合考虑前角、后角、螺旋角及刃口钝圆半径等参数的合理配置。基于有限元法的切削仿真能够有效揭示切削过程中的应力分布和力学特性,瞬态动力学分析可识别刀具危险截面。采用响应曲面法建立的工艺参数优化模型可定量描述切削参数与评价指标之间的映射关系,多目标优化求解可获得面向不同加工要求的参数组合。切削稳定性分析对于复杂结构加工具有重要意义,通过稳定性叶瓣图选择合理转速、优化刀具结构提高系统刚度可有效抑制切削颤振。刀具磨损呈现阶段性特征,基于切削路径长度的寿命预测模型可为换刀策略制定提供依据。本文研究成果可为复杂木材结构的高效精密加工提供理论指导。