

# 高速切削条件下木工铣刀的动态特性与振动抑制研究

谢丙光 林俊

浙江宇盛工具有限公司 325600

**【摘要】**随着木材加工行业向高效精密化方向发展,木工铣刀高速切削技术的应用日益广泛,但随之而来的切削振动问题成为制约加工质量提升的关键因素。本文针对高速切削条件下木工铣刀的动态特性展开研究,分析了铣刀在高速旋转状态下的受力特征与振动产生机理。通过建立铣刀-工件系统的动力学模型,研究了刀具结构参数对固有频率和模态振型的影响规律,揭示了切削速度与切削力波动之间的关联。在此基础上,探讨了刀具几何结构优化、不等齿距设计以及阻尼减振结构等多种振动抑制策略,提出了基于稳定性叶瓣图的工艺参数优选方法。研究表明,合理配置刀具结构参数并选择稳定的切削区域,可显著降低切削振动幅值,为高速木工铣刀的设计与应用提供了理论参考。

**【关键词】**木工铣刀; 高速切削; 动态特性; 振动抑制; 稳定性分析

Research on Dynamic Characteristics and Vibration Suppression of Woodworking Milling Cutters Under High-Speed Cutting Conditions

Xie Bingguang Lin Jun

Zhejiang Yusheng Tools Co., Ltd. 325600

**【Abstract】** With the wood processing industry advancing toward high-efficiency precision, high-speed cutting technology for woodworking milling cutters has seen widespread application. However, associated cutting vibrations have become a critical factor constraining quality improvement in machining processes. This study investigates dynamic characteristics of woodworking milling cutters under high-speed cutting conditions, analyzing force distribution patterns and vibration generation mechanisms during high-speed rotation. Through establishing a dynamic model of the cutter-workpiece system, we examine how tool structural parameters influence natural frequencies and modal vibration modes, revealing correlations between cutting speed and cutting force fluctuations. Building on these findings, multiple vibration suppression strategies—including tool geometry optimization, unequal tooth pitch design, and damping vibration reduction structures—are explored. A process parameter optimization method based on stability lobe diagrams is proposed. The research demonstrates that rational configuration of tool structural parameters and selection of stable cutting zones can significantly reduce cutting vibration amplitudes, providing theoretical references for high-speed woodworking milling cutter design and application.

**【Key words】** woodworking milling cutter; high-speed cutting; dynamic characteristics; vibration suppression; stability analysis

## 引言

木材加工业快速发展对切削效率提出更高要求,高速切削技术因能显著提高效率和质量而受广泛关注。木工铣刀高速旋转时,刀具与工件相互作用呈现复杂动态特性,切削振动不仅影响加工表面平整度,还会加速刀具磨损甚至引发崩刃,尤其当转速达每分钟数万转时,微小不平衡或波动都可能导致剧烈振动,制约高速切削技术推广。

切削振动本质源于刀具-工件系统动态特性与切削激励的相互作用,木工铣刀长径比较大,结构刚度较低,高速下易发生颤振。颤振降低加工精度,产生高分贝噪声,恶化工作环境。因此,深入研究高速木工铣刀动态特性,探索有效振动抑制方法,对提升木材加工水平具有重要意义。

国内外学者在刀具动态特性领域开展了大量研究,通过有限元和动力学仿真分析了刀具结构参数对模态参数的影响,提出多种减振结构。然而现有研究多针对金属切削刀具,针对木工铣刀高速切削动态特性的系统研究尚不充分。木工

铣刀切削对象的特殊性使其载荷特征和失效模式与金属切削刀具存在显著差异,需要针对性理论分析。本文将从动力学基本理论出发,系统研究高速切削条件下木工铣刀的动态特性,探讨多种振动抑制策略的机理与效果。

## 一、高速切削条件下木工铣刀的受力特征与振动产生机理

高速切削条件下木工铣刀的受力状态与常规切削速度下有显著差异,随着切削速度的提高,切削力的大小和方向均发生复杂变化,惯性力的影响逐渐凸显。铣刀在高速旋转时,每个刀齿周期性切入和切出工件,产生周期性的冲击载荷。这种周期性激励的频率与主轴转速和刀齿数量直接相关,当激励频率接近刀具系统的某一阶固有频率时,系统将发生共振,导致振幅急剧放大。

木材作为一种各向异性材料,其切削阻力随切削方向相对于纤维方向的变化而改变。在铣刀旋转一周的过程中,每

个刀齿经历的切削方向连续变化,导致切削力呈现复杂的波动形态。高速切削时,这种切削力波动的频率范围更宽,可能同时激发刀具的多阶模态,使振动形态更加复杂。此外,高速旋转产生的离心力会使刀具产生径向膨胀,改变刀具的几何形状和刚度分布,进而影响其动态特性。

切削振动的产生机理可从再生颤振理论角度加以解释,当刀具在切削表面留下波纹状痕迹时,下一刀齿切削时将切入起伏的表面,切削厚度发生周期性变化,导致切削力波动。这种波动又会加剧表面波纹的形成,形成正反馈效应,使振动不断增长直至达到极限环。高速切削条件下,由于单位时间内刀齿切削次数增加,再生效应的作用更为显著,颤振发生的可能性随之提高。

刀具系统的阻尼特性对振动发展具有重要影响,结构阻尼来源于材料内部摩擦和连接界面间的相对滑动,空气动力学阻尼则来源于刀具旋转时与空气的相互作用。高速切削时,空气动力学效应增强,可能对刀具振动产生一定的抑制作用,但同时也会引发气流激振问题。当刀具表面气流发生分离形成涡流时,涡流脱落的频率若与刀具固有频率接近,同样会激发共振。

## 二、木工铣刀动态特性的理论建模与仿真分析

建立准确的动力学模型是研究木工铣刀动态特性的理论基础,铣刀可简化为具有分布质量和连续弹性的悬臂梁结构,其横向振动可由欧拉-伯努利梁理论或铁木辛柯梁理论描述。考虑到木工铣刀通常具有螺旋槽结构,其截面惯性矩沿轴向变化,需要采用变截面梁模型以提高计算精度。

有限元方法为复杂结构刀具的动态特性分析提供了有效手段,采用三维实体单元建立刀具的几何模型时,需准确反映排屑槽形状、刀体壁厚分布以及刀柄连接方式等细节特征。网格划分时应对应力集中区域进行局部加密,同时控制单元数量以保证计算效率。材料属性的设定需考虑刀具基体的弹性模量、密度和泊松比。

模态分析是获取刀具动态特性的基本途径,通过有限元软件进行模态求解,可获得刀具的前若干阶固有频率和振型。分析结果表明,木工铣刀的低阶模态主要表现为弯曲振动,一阶弯曲振型发生在与刀柄连接处,二阶弯曲振型则出现两个反相节点。随着阶次提高,扭转模态和纵向模态逐渐出现,但对切削过程影响最为显著的仍然是低阶弯曲模态。刀具悬伸量对固有频率具有显著影响,悬伸量增大时各阶固有频率均呈下降趋势。

谐响应分析可揭示刀具在周期性激励作用下的响应特性,在刀齿位置施加简谐切削力,计算不同激励频率下刀具的振幅响应,可获得幅频特性曲线。曲线峰值对应的频率即为共振频率,峰值高度取决于系统阻尼。分析结果显示,刀具振幅对激励频率的变化极为敏感,在共振频率附近即使微小的频率偏差也会导致振幅显著变化。

瞬态动力学分析能够模拟刀具在切削过程中的真实响应,将实测或理论计算的切削力时程作为载荷输入,求解刀

具在时域内的位移响应。分析结果可用于评估切削过程的稳定性,预测可能发生的颤振频率和幅值。对于复杂木材结构加工,由于切削力具有非平稳特征,瞬态分析可捕捉切削过程中的瞬态响应峰值。

## 三、刀具结构参数对动态特性的影响规律

刀具几何结构是影响其动态特性的内在因素,刀体直径和壁厚直接决定刀具的刚度,增大直径和壁厚可提高截面惯性矩,提升固有频率和刚度。但直径增大同时会增加刀具质量,可能降低某些模态的频率,因此需在刚度和质量之间寻求平衡。研究表明,将刀体内壁加厚呈台阶状结构,可在不显著增加质量的前提下提高抗弯刚度,使刀具静刚度提升10%以上,共振频率显著提高。

排屑槽的存在使刀体截面呈现非对称特征,导致刀具在相互垂直的两个方向上的刚度存在差异,这种差异使得原本重合的两个弯曲模态发生分裂,形成两个频率相近但振型正交的模式。模态分裂的程度取决于排屑槽的深度、宽度和螺旋角。较深的排屑槽有利于排屑但会降低刀具刚度,螺旋槽则可使刚度沿轴向均匀分布,减小模态分裂。

刀体与刀柄的连接方式是影响系统刚度的关键环节,采用整体式结构可获得最佳刚度,但刀具制造成本较高且刃磨后刀体直径减小,影响使用经济性。可拆式连接便于更换刀体,但连接界面存在接触刚度,降低了系统整体刚度。优化连接界面设计,如增加配合长度、提高配合精度、采用锥度配合等,可有效减小接触变形,提升连接刚度。

刀具材料对动态特性的影响主要体现在弹性模量和密度两个方面,硬质合金的弹性模量约为高速钢的三倍,密度约为高速钢的两倍,这使得硬质合金刀具具有更高的比刚度,有利于获得较高的固有频率。粉末冶金高速钢和金属陶瓷等新型材料在保持较高硬度的同时改善了韧性,为刀具动态性能的进一步提升提供了材料基础。

## 四、基于动态特性调控的振动抑制策略

针对高速切削条件下的振动问题,可从刀具结构设计角度采取多种抑制策略,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,相邻齿距差一般控制在10%至20%之间。

阻尼减振结构是另一类重要的振动抑制手段,在刀体内部设置阻尼层,利用阻尼材料的耗能特性吸收振动能量,可显著降低共振峰值。约束阻尼层结构由基体、阻尼层和约束层组成,阻尼层在剪切变形中耗散能量,约束层则限制阻尼层的自由变形,增强剪切效应。研究表明,合理选择阻尼材料的厚度和约束层的刚度,可使共振峰值降低

30%以上。

刀具-工件系统的模态参数可通过结构修改进行调整,增加辅助支撑是提高系统刚度的直接手段,如采用稳定支承或导向套支撑刀具悬伸部分,可大幅提高系统刚度,提升稳定性极限。对于无法增加支撑的工况,可通过调整刀具悬伸量改变系统固有频率,使其避开主要激励频率。

基于切削稳定性理论,可绘制以主轴转速和切削深度为坐标的稳定性叶瓣图。图中稳定区域与非稳定区域交替出现,在稳定区域内选择切削参数可避免颤振发生。叶瓣图的绘制需通过模态试验获取刀具系统的频响函数,识别模态质量、模态刚度和阻尼比等参数,基于再生颤振理论计算临界切削深度随转速的变化规律。

## 五、切削状态监测与自适应控制方法

实现高速切削振动抑制不仅需要优化刀具结构和工艺参数,还需建立切削状态监测系统,实时识别振动征兆并采取控制措施。切削状态的在线监测可基于多种物理量信号,包括切削力信号、振动加速度信号、声发射信号以及主轴功率信号等。不同信号对振动敏感程度不同,多传感器融合可提高状态识别的可靠性。

信号处理是状态监测的核心环节。采集到的原始信号包含大量噪声和干扰成分,需要采用滤波、小波变换或经验模态分解等方法提取特征信息。切削颤振发生前,信号频谱中通常会出现与某阶固有频率相关的频率成分,其幅值随时间增长。通过实时跟踪这一频率成分的幅值变化,可在颤振充分发展前识别其发生趋势。快速傅里叶变换是常用的频谱分析方法,但对于非平稳信号,短时傅里叶变换或小波分析具有更好的时频局部化能力。

基于监测结果的自适应控制是振动抑制的高级形式,当监测系统识别到颤振征兆时,可通过调整主轴转速破坏颤振发展的相位条件。研究表明,适当改变主轴转速可改变相邻刀齿切削波形的相位关系,从而抑制再生颤振的进一步发展。转速调整的幅度和方向需根据当前切削条件和振动频率确定,通常采用微小扰动试探的方式寻找稳定转速。

智能控制策略的发展为振动抑制提供了新途径,基于模糊逻辑或神经网络的智能控制器,可建立切削参数与切削状态之间的非线性映射关系,根据实时监测结果自主调整切削参数。深度学习方法的引入进一步提高了状态识别的准确性和控制决策的适应性。

## 参考文献

- [1]洪培强.高速切削刀具在复杂零部件加工中的应用研究[J].中国机械, 2025, (12): 55-57+61.
- [2]杨帆,姜彬,成远清,等.振动作用下高效铣刀瞬时切削位姿偏置特性[J].振动与冲击, 2025, 44(01): 30-40.DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.01.004.
- [3]陈薇,房玉杰.铣刀振动对切削用量的影响[J].机械工程师, 1998, (04): 47.
- [4]方海涛.铣削力建模及可转位铣刀动态特性研究[D].华中科技大学, 2012.

## 六、高速切削刀具磨损机理与寿命评估

高速切削条件下刀具磨损机理具有自身特点。随着切削速度提高,刀齿与木材的接触时间缩短,但单位时间内的冲击次数增加,刀齿承受的交变载荷频率升高。这种高频交变载荷易引起刀具材料的疲劳损伤,在硬质合金刀具中表现为微裂纹的萌生和扩展。同时,高速切削产生的热量虽然被切屑迅速带走,但刀尖局部温度仍可能达到数百度,加速刀具材料的氧化和软化。

刀具磨损过程通常分为三个阶段,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。高速切削条件下,由于切削力波动更为剧烈,刀具可能越过正常磨损阶段直接从初期磨损进入剧烈磨损。

刀具寿命评估需综合考虑切削参数、刀具材料和木材特性等多重因素,基于切削路径长度的寿命模型适用于常规切削条件,但高速切削下需考虑冲击载荷频率的影响。可引入冲击次数作为寿命评估参量,建立基于累积损伤理论的寿命预测模型。模型参数需通过系统的磨损试验标定,获得不同切削速度下刀具磨损速率与切削参数的关系。

刀具状态识别技术为合理换刀提供依据,通过监测切削过程中的功率消耗、振动幅值或加工表面质量变化,可间接判断刀具磨损状态。当监测参数超过设定阈值时发出换刀信号,避免因刀具过度磨损导致加工质量下降。

## 结论

本文系统研究了高速切削条件下木工铣刀的动态特性与振动抑制问题,高速切削时受力特征与常规速度差异显著,周期性冲击载荷与再生效应是引发振动的主要机理。基于有限元法的模态分析可获得刀具固有频率和振型,揭示结构参数影响规律。刀体壁厚、排屑槽形状及刀柄连接方式对系统刚度具有重要影响,合理配置可提高动态性能。振动抑制可从不等齿距设计、阻尼减振结构及工艺参数优化入手,稳定性叶瓣图可指导切削参数选择。切削状态监测与自适应控制是实现稳定切削的重要保障,多传感器融合与智能算法为切削过程控制提供新途径。高速切削刀具磨损呈现高频疲劳特征,需建立基于累积损伤的寿命评估模型,结合刀具状态识别实现合理换刀。研究成果可为高速木工铣刀设计与应用提供理论参考。