

# Research on Micro-wear Mechanism and Control of Ultra-precision Turning Tools

Tao Xiong

Guizhou Aerospace Control Technology Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550009, China

## Abstract

Ultra-precision turning is the core process for achieving nanometer-level processing accuracy in the high-end manufacturing field. Tool micro-wear is the key bottleneck that restricts processing quality, efficiency, and tool lifespan. This paper focuses on the research of tool micro-wear in ultra-precision turning, systematically analyzing the action mechanisms of four factors - tool material, workpiece material, cutting parameters, and processing environment - on micro-wear. It clarifies the internal paths and collaborative rules of micro-wear triggered by different factors. Based on this, targeted control strategies are proposed from four dimensions: tool material optimization and surface modification, precise control of cutting parameters, optimization of processing environment, and online monitoring and real-time compensation. The research results can provide theoretical support and technical references for effectively suppressing tool micro-wear in ultra-precision turning, and have significant importance for improving the processing accuracy and stability of high-end parts.

## Keywords

Ultra-precision turning processing tools; Micro-wear; Wear mechanism

# 超精密车削加工刀具微磨损微磨损机理及其控制研究

熊涛

贵州航天控制技术有限公司, 中国·贵州 贵阳 550009

## 摘要

超精密车削是高端制造领域实现纳米级加工精度的核心工艺, 刀具微磨损是制约加工质量、效率及刀具寿命的关键瓶颈。本文围绕超精密车削刀具微磨损展开研究, 系统分析了刀具材料、工件材料、切削参数及加工环境四大因素对微磨损的作用机理, 明确了不同因素引发微磨损的内在路径与协同规律。在此基础上, 从刀具材料优化与表面改性、切削参数精准调控、加工环境优化、在线监测与实时补偿四个维度, 提出针对性控制策略。研究结果可为超精密车削刀具微磨损的有效抑制提供理论支撑与技术参考, 对提升高端零件加工精度与稳定性具有重要的意义。

## 关键词

超精密车削加工刀具; 微磨损; 磨损机理

## 1 引言

随着航空航天、精密仪器等高端制造领域的快速发展, 对零件加工精度与表面质量的要求已提升至纳米级, 超精密车削技术的重要性日益凸显<sup>[1]</sup>。目前, 关于刀具微磨损的研究仍存在机理分析不够系统、控制策略针对性不足等问题。因此, 深入探究超精密车削刀具微磨损机理, 提出科学有效的控制方法, 对推动超精密加工技术发展、提升高端制造水平具有重要的理论与工程价值。

## 2 超精密车削加工刀具微磨损微磨损机理分析

### 2.1 超精密车削加工刀具微磨损机理分析

#### 2.1.1 刀具材料

刀具材料的理化性质是影响微磨损内在因素, 不同材料的成分与结构差异, 导致其微磨损机理存在本质区别。PCD 刀具硬度极高, 但脆性较大, 超高温环境下会发生石墨化转变。加工含硬质点复合材料时, 硬质点对刃口的微观冲击会引发微小裂纹, 导致疲劳磨损与刃口崩损。低速切削塑性材料时, 虽粘结磨损轻微, 但刃口微观缺陷在切削力作用下会导致金刚石颗粒脱落。CBN 刀具耐热性优异, 可在 1200°C 以上保持良好性能, 微磨损以热化学磨损与氧化磨损为主。其与铁族元素在高温下亲和性强, 易发生化学反应生成脆性化合物, 在切削力作用下脱落形成磨损坑。表面氧化生成脆性氧化物, 进一步加剧磨粒磨损, 高速切削淬硬钢时,

【作者简介】熊涛 (1993-), 男, 中国贵州贵阳人, 本科, 工程师, 从事精密制造, 智能制造技术研究。

两种磨损协同加速刀具失效。陶瓷刀具韧性不足、内部易有烧结缺陷,切削力波动会导致刃口裂纹扩展,引发脆性崩损,且化学稳定性差,高温下易与工件反应,轻微热化学磨损会进一步降低刃口强度。涂层刀具的微磨损取决于涂层与基体的协同性能,涂层脱落是磨损加剧的关键。涂层与基体结合力不足时,切削力与热应力会导致涂层剥离,剥离后基体直接与工件接触,磨损速率显著提升。各类刀具材料的微磨损机理均与其自身性能密切相关,不存在最优材料,需根据加工需求合理选用。

### 2.1.2 工件材料

工件材料作为切削直接作用对象,其物理化学性能与微观组织,通过改变切削摩擦、切削力与温度,间接影响微磨损。工件硬度存在合理匹配范围,硬度过高接近刀具硬度时,表面硬质点会强烈犁削刃口,加剧磨粒磨损。硬度过低、塑性过强时,虽磨粒磨损轻微,但易粘结在刀具表面形成积屑瘤,积屑瘤反复脱落会导致刀具微观凹陷,加速微磨损。硬度不均匀性还会引发切削力波动,加剧刃口疲劳磨损。工件韧性主要影响粘结磨损与刃口崩损,韧性强的塑性材料切削时塑性变形剧烈,与刀具紧密接触形成粘结点,粘结点断裂会带走刀具材料,切削力波动则易引发刃口疲劳裂纹<sup>[2]</sup>。韧性差的硬脆材料切削时易脆性断裂,切削力稳定、粘结磨损轻微,但断裂碎片会冲击犁削刃口,加剧磨粒磨损。导热性通过影响切削温度间接作用于微磨损。导热差的材料会导致切削热聚集,加速刀具氧化与热化学磨损。导热好的材料则可降低切削温度,减轻各类微磨损。工件微观结构中,硬质点越多、晶粒越粗大,磨粒磨损越严重。反之则微磨损更轻微。工件与刀具的化学亲和性越强,越易发生热化学磨损与粘结磨损,这也是PCD刀具适用于车削钢铁材料、CBN刀具不适用于此类材料的核心原因。

### 2.1.3 切削参数

切削参数通过改变切削力、温度、摩擦状态,协同调控微磨损类型与程度,存在最优区间,并非单一参数越优越好。切削速度是最关键参数,低速切削时温度低,氧化与热化学磨损轻微,但摩擦时间长、切削力大,易产生粘结磨损与磨粒磨损,且积屑瘤易形成。中高速切削时温度升高,超过刀具耐高温极限会导致热软化,加剧氧化与热化学磨损,但切屑与刀具接触时间缩短,粘结磨损减轻。速度过高会导致刀具氧化失效、刃口熔化,微磨损速率急剧上升,需根据刀具材料匹配最优速度区间。超精密车削进给量通常为0.01-0.1mm/r,微小变化即影响微磨损。进给量过小时,刃口接触压力增大,切削层厚度小于刃口钝圆半径,只能通过摩擦挤压去除材料,磨粒磨损加剧。进给量过大时,切削力激增,刃口易产生疲劳裂纹引发崩损,同时温度升高、切屑接触面积增大,氧化、热化学与粘结磨损均会加重。进给量均匀性也很关键,波动会导致切削力波动,加剧刃口疲劳磨损。切削深度对微磨损影响相对较小,但需匹配加工余量与

刀具刚性。切削深度增大时,切削力与切削热增加,硬质点犁削作用增强,磨粒、氧化与热化学磨损均加剧,脆性刀具易发生刃口崩损。深度过小时,无法有效去除硬质点,硬质点持续摩擦刃口,加剧磨粒磨损且降低效率。需通过正交试验优化参数组合,平衡各参数影响,实现微磨损最小化。

### 2.1.4 加工环境

加工环境通过影响润滑、冷却效果及切削稳定性,间接影响微磨损,其中润滑与冷却是核心。润滑的核心作用是降低摩擦系数、减少接触压力,避免粘结点形成,同时清除切屑碎片。传统浇注式润滑不均、利用率低,易加剧粘结与磨粒磨损。最小量润滑、气液两相润滑可将切削液精准输送至切削区,形成稳定润滑膜,有效抑制微磨损。油性切削液适用于低速塑性材料加工,减少粘结磨损。水性切削液适用于高速切削,减少氧化磨损。纳米切削液可形成保护膜,显著提升抗磨损能力。冷却的核心是降低切削区温度,抑制氧化与热化学磨损。喷雾冷却效率远高于传统浇注式,可快速带走切削热。低温冷却可将切削区温度降至极低水平,有效抑制氧化与热扩散,适用于高速与难加工材料加工。空化冷却结合超声振动,可实现高效冷却与清洗,抑制积屑瘤产生。需根据切削工况动态调整切削液流量、喷射角度等参数,确保冷却均匀稳定。环境洁净度与振动状态间接影响微磨损,环境中的灰尘、金属碎屑会进入切削区,与硬质点共同犁削刃口,加剧磨粒磨损,还会影响润滑效果。振动会导致刃口周期性冲击,加剧疲劳磨损与崩损,破坏切削稳定性。超精密车削需在洁净车间进行,采用高刚性机床与刀具,优化装夹方式,减少振动源,确保切削稳定。

## 3 超精密车削加工刀具微磨损微控制策略

### 3.1 刀具材料优化与表面改性控制策略

刀具材料自身的性能,是影响微磨损的核心因素。对此,可通过材料优化与表面改性技术,从源头上提升刀具的抗磨损能力,达成微磨损控制目的。材料优化上,结合刀具材料的类型、特点以及加工工况,采用针对性的优化方式。以PCD刀具为例,可调整金刚石颗粒的尺寸与分布,提升其耐磨性。采用细颗粒聚晶金刚石材料,在保持较高硬度的同时,增强刃口抗崩刃能力。添加Co、Ni等粘结剂,提升其致密度、耐磨性与韧性。表面改性上,通过PVD、CVD、离子注入、激光强化等技术,在刀具表面形成高硬度防护层,减少各类微磨损。以PVD为例,可于刀具表面沉积硬度极高的TiN、TiAlN等硬质涂层,阻断切削过程中刀具与工件材料的直接接触,降低磨粒磨损和粘结磨损的发生。

### 3.2 切削参数的精准调控与自适应优化

切削参数是影响超精密车削加工刀具微磨损的关键工艺因素,切削参数不合理会导致切削力、温度异常升高,诱发并加剧微磨损,降低加工精度与刀具使用寿命。对此,需遵循“低切削热、小切削力、稳切削状态”的原则,做好

切削参数的精准调控与自适应优化。匹配刀具及工件材料特性,是切削参数优化的基点。应根据刀具类型,合理设定切削速度。PCD 刀具具有硬度高、耐磨性强的特点,在加工有色金属及非金属材料时,可将切削速度设置为 800-2000m/min,充分发挥其切削性能并减少摩擦热。CBN 刀具高温状态下稳定性较好,适用于淬火钢、铸铁等高硬度材料的加工,可将切削速度控制在 50-150m/min,避免因速度过高导致刀具热化学磨损加剧。进给量及切削深度的设定,需结合加工精度与刀具刚性,以免刃口压力过大或硬质点持续摩擦。采用正交试验、响应面法,确定参数组合。针对工况动态变化的问题,构建多源数据采集机制,在切削力、温度等数据采集的基础上,利用人工智能算法,动态调整参数,实现自适应优化。

### 3.3 加工环境优化与微磨损防护

加工环境不佳是导致超精密车削加工刀具微磨损的重要因素。对此,需聚焦润滑、冷却两大核心系统,优化加工环境,做好刀具微磨损防护。润滑系统方面,优化切削液的选型,确保其具备优异的润滑性能、冷却性能及抗压抗磨性能,且与刀具、加工材料高度适配。例如,硬脆材料可选用水性或纳米水性切削液,塑性材料则选用油性或纳米油性切削液。改进切削液的供给方式,通过高压喷射润滑,精准地将切削液喷射至切削区,形成润滑膜,从而减少刀具与工件、切屑之间的直接接触,控制摩擦导致的微磨损。冷却系统方面,通过喷雾冷却、低温冷却、空化冷却等方式,降低切削区的温度。以喷雾冷却为例,可将压缩空气与冷却液混合形成微小雾滴,通过特制喷嘴高速喷射到切削区域,雾滴在接触高温切削区时迅速汽化,吸收大量热量,有效控制高温导致刀具材料软化、硬度下降而产生的微磨损。加装温度传感器,实时监测切削区温度,根据监测结果,动态调整切削液参数,实现精准冷却。此外,也要重视环境洁净度、机床振动状态等间接因素,避免杂质与振动加剧磨损,形成全方位防护体系。

### 3.4 刀具微磨损在线监测与实时补偿控制

检测是超精密车削加工刀具微磨损控制的重要一环。

微磨损具有隐蔽性强、发展快的特征,传统的检测方式以离线检测为主,难以及时预警。数字技术的发展为检测方式的创新提供了技术支持。需利用数字技术,构建在线监测机制,动态反馈刀具微磨损情况,并根据监测结果,实时补偿控制。在线监测包括接触式、非接触式两类,前者通过力传感器、温度传感器来捕捉刀具切削力、温度的变化,识别微磨损程度。后者借助激光陀螺仪、机器视觉、AE 监测,实现非接触监测,不干扰切削。以 AE 监测为例,其能捕捉刀具切削过程中因材料断裂、摩擦等产生的应力波信号,再对信号进行频谱分析与特征参数提取,实现对微磨损的识别。两类监测方式均可实现微磨损的早期识别与定量评估,对微磨损的控制具有重要价值。实时补偿控制以监测结果为依据,包括位置补偿、参数补偿两类,能实现监测、分析、补偿的闭环<sup>[3]</sup>。位置补偿指调整刀具在加工坐标系中的位置坐标,补偿因微磨损导致的刀具尺寸变化。参数补偿指依据微磨损状态对切削参数进行动态优化。例如,当监测结果显示,刀具存在轻微磨损时,适当降低切削速度或进给量,减少刀具的磨损速率,从而延长刀具使用寿命。此外,要立足智能制造,集成多模态数据融合算法,构建补偿模型,提升监测与补偿准确性。

## 4 结语

本文聚焦超精密车削加工刀具微磨损现象,明确了刀具材料、工件材料、切削参数及加工环境四大因素对微磨损的作用机理,围绕材料优化、参数调控、环境改进、在线监测与补偿四个方面,提出了全方位控制策略。

### 参考文献

- [1] 高国富,何全茂,董小磊,向道辉,赵波.PCD刀具超声铣削SiCp/Al复合材料的试验研究[J].制造业自动化,2010,32(3):41-44.
- [2] 励政伟,陈杰,安庆龙.基于微量润滑的钛合金高速切削涂层刀具磨损机理[J].航空制造技术,2018,61(6):70-77.
- [3] 刘宏岩,杨鑫,杨健,张云庭,罗凤吉,罗付强,何铠锋.断刀检测及刀具磨损自动补偿技术研究[J].现代制造技术与装备,2021,57(1):33-34.