

高速车削加工中切屑形态演变规律及控制策略

陈致欣

大连科技学院

摘要：高速车削加工（High Speed Turning, HST）作为现代制造技术的重要发展方向，在提高加工效率、改善表面质量、降低能耗等方面具有显著优势。然而，高速切削条件下的切屑形成与分离机理显著不同于常速加工，其切屑形态的变化规律直接影响刀具磨损、加工表面完整性以及系统稳定性。本文系统分析了高速车削中切屑形态的演变规律，探讨了切削速度、进给量、切削深度及刀具几何参数等因素对切屑形态的影响，阐述了切屑变形与断裂的微观机理，并结合实验与仿真研究提出切屑控制的优化策略，包括刀具几何优化、冷却润滑技术改进及切屑分断槽设计等，以期为高效高质的精密车削提供理论与实践参考。

关键词：高速车削；切屑形态；切削机理；刀具优化；控制策略

随着制造业的高速发展和精密加工需求的提升，高速切削技术已成为先进制造体系的重要组成部分。与传统切削相比，高速车削在切削速度超过临界范围（一般为 300~800 m/min）时，切削温度、应变率及材料流动特性均发生显著变化，切屑生成过程呈现出复杂的热力耦合行为。切屑形态不仅影响加工区的温度分布与应力状态，还决定了切削力波动、刀具寿命和工件表面完整性。特别是在加工高强度合金钢、钛合金及难加工材料时，连续切屑容易缠绕刀具或工件，导致表面划伤甚至加工中断，因此切屑控制成为保障加工稳定性与质量的关键环节。

现有研究多聚焦于切削参数优化或刀具材料改进，但对切屑形态演变机理及其动态控制策略的系统研究仍相对薄弱。本文旨在通过分析高速车削中切屑形成、分离及演化的规律，揭示切屑形态的内在机制，并提出可行的控制策略，为精密与高效加工提供理论依据和工程指导。

1 高速车削加工中的切屑形成机理与影响因素

1.1 切屑形成过程的基本特征

在高速车削过程中，材料在刀具前刀面作用下经历弹性变形、塑性变形与剪切断裂三个阶段。当切削速度较低时，切屑以连续带状形态为主；而在高速条件下，剪切区应变率显著提高，导致材料发生强烈的绝热剪切效应（Adiabatic Shear），形成锯齿状或分段切屑。切屑的形成受材料流动性、温度场分布、刀具前角与摩擦系数的综合影响，其演变过程反映出材料宏观流变行为与微观组织变化的耦合特征。连续切屑一般伴随较高的刀具—切屑黏附与摩擦，易产生积屑瘤，影响表面光洁度；而锯齿状切屑在高速条件下能够有效断裂并带走热量，利于热量扩散与刀具寿命延

长。因此，在不同加工场景下合理控制切屑形态对于实现加工效率与质量的平衡至关重要。

1.2 切削参数对切屑形态的影响规律

切削速度、进给量和切削深度是影响切屑形态的三大核心工艺参数。切削速度的提升会导致材料温升加快，塑性流动增强，使切屑由连续向锯齿状转变。当速度超过某一临界点时，切屑间断明显，出现“绝热剪切带”，使得切屑分离周期缩短。进给量的增大则会增加切削厚度，导致切屑卷曲半径减小，切屑厚度增加。切削深度对切屑形态影响相对较弱，但会影响切削热积聚与断裂频率。实验表明，当进给量为 0.15~0.25 mm/r、切削速度为 500~700 m/min 时，45# 钢可形成规则的分段锯齿切屑，实现较好的切屑控制效果。此外，刀具几何参数（前角、后角、刃口圆弧半径）对切屑形态也有重要影响。较大的前角可降低切削变形抗力，促进材料沿剪切面流动；而过大的前角会削弱刀刃强度，导致磨损加剧。刀具磨损与摩擦条件的变化会进一步改变切屑卷曲方向和分离方式，从而影响整体切削稳定性。

2 切屑形态演变的微观机理分析

2.1 绝热剪切带的形成与作用

在高速车削过程中，切削变形区的应变速率极高，通常可达 $10^3 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。此时，材料的塑性功几乎完全转化为热能，而由于切削接触时间极短、热传导速率不足，大量热量被局限在主剪切带内，形成局部高温区，即所谓的“绝热剪切带”。该带的瞬时温升可达 600~900℃，远高于材料的再结晶温度，使得晶粒发生严重细化甚至再结晶，导致局部软化与流动失稳。结果，切屑沿剪切带周期性分裂，形成具有明显锯齿结构的切屑形态。

显微组织观察表明,绝热剪切带内部晶粒尺寸通常小于 $0.5\mu\text{m}$,局部甚至出现非晶化层或孪晶界面。这种显微组织特征反映出强烈的热—力耦合作用,是高速切削下切屑周期性断裂的根本机理。由于剪切带的周期性生成与消失,切削力呈脉动特征,导致加工系统产生高频振动和刀具负载波动。因此,掌握绝热剪切带的形成规律,对于预测切削稳定性与优化加工参数具有重要意义。

2.2 塑性变形与断裂演化规律

在切屑形成过程中,材料先经历弹性变形与塑性滑移阶段,随后在主剪切面上发生严重的局部剪切。塑性变形导致晶格滑移、位错密度急剧增加,当局部应力集中超出材料的流动应力时,便发生剪切带的萌生与扩展。随着切削速度升高,应变率效应使材料的流动应力增加,但热软化效应又使其降低,两者之间的竞争关系决定了切屑的断裂模式。当热软化占主导地位时,形成延性断裂的分段锯齿切屑;而当应变率强化作用明显时,则可能出现脆性断裂切屑。

实验与有限元分析结果表明,切屑分段间距与材料的流动应力呈反比关系,与切削速度、进给量呈正相关关系。高速下的周期性断裂使切屑表面出现微裂纹网络,并伴随显著的塑性拉伸痕迹。此类断裂行为对加工表面残余应力与硬化层厚度产生重要影响,合理控制切削热与剪切速率可有效改善表面完整性。

2.3 切屑与刀具的摩擦耦合效应

在高速车削环境中,切屑与刀具前刀面之间的摩擦区成为热量和应力集中的关键区域。切屑—刀具接触长度随着切削速度提高而缩短,但单位面积接触压力显著增加,使界面摩擦更加剧烈。摩擦过程不仅影响切屑的卷曲与排出轨迹,还直接决定积屑瘤的生成与消退周期。高速条件下,积屑瘤通常不稳定,易在高温和振动作用下周期性剥落,导致切削力波动和刀具崩缺。

研究显示,刀具前角、涂层材料及表面粗糙度对摩擦行为均有显著影响。较大的前角可降低切削抗力,但同时削弱刀具强度;而涂层刀具通过降低界面黏附与扩散作用,能显著改善摩擦条件。例如, TiAlN 或 AlCrN 涂层可在高温下保持较低的摩擦系数,从而稳定切屑卷曲和排屑过程。此外,冷却与润滑条件的优化亦能有效抑制摩擦热的积聚。微量润滑 (MQL) 与高压冷却 (HPC) 技术的联合应用,可在切屑—刀具界面形成瞬时润滑膜,减少摩擦磨损并促进切屑断裂。

2.4 热—力—材料三场耦合机制

切屑演化实质上是热场、力场与材料组织场的耦

合结果。高速切削下,切削区的温度梯度可达数百摄氏度/mm,剧烈的热膨胀与塑性应变引起材料流动行为的高度非线性。同时,材料的动态再结晶、晶粒细化及相变行为进一步影响应力分布与剪切带稳定性。有限元热—力仿真结果显示,切削区的最大温度位于前刀面附近,而最大剪切应变集中在主剪切带中间位置;二者的相互叠加造成周期性的热软化与强度恢复,从而形成切屑的波状断裂形态。

从能量角度分析,切屑形成过程中 70% 以上的切削能量以热能形式被切屑带走,约 15% 传导至刀具,剩余部分扩散至工件。若切屑形态过于连续或卷曲严重,热量无法及时排出,将导致刀具局部烧结、磨损加剧。因而,研究切屑形态的演变规律不仅关乎加工效率,也直接决定热管理与刀具寿命。

2.5 微观组织与材料特性的影响

不同材料在高速切削中的切屑形态差异明显。对于高塑性钢和铝合金,材料具有较强的延展性,易形成连续或半连续切屑;而对高强度钛合金、镍基高温合金等,因其导热性差、应变强化显著,易形成剧烈的锯齿切屑。显微组织结构(如晶粒尺寸、相分布、析出物形态)在高应变条件下的响应特征,决定了切屑分段频率与断裂形态。晶粒细化材料因滑移系统丰富,能吸收更多塑性变形能量,呈现较稳定的锯齿周期;而粗晶或强化相较多的材料则更易在剪切带中形成脆性断裂。

3 切屑控制策略与工程优化路径

3.1 刀具几何结构优化

刀具几何参数对切屑流动路径与分离行为具有决定性影响。前角、分断槽和切削刃形状是切屑控制设计的关键要素。通过优化分断槽结构,可在切屑内引导应力集中点,使切屑在特定位置断裂。槽深、槽距及倾角的设计需根据材料塑性与切削速度协同优化。例如,在加工不锈钢时,采用半圆弧形分断槽可实现稳定断屑;加工钛合金时,则需设计浅槽加大倾角,以减轻切屑黏附。此外,复合刃口刀具在不同区域采用不同前角与涂层组合,如在主切削区采用 TiAlN 涂层以提高耐热性,在分断区采用 ZrN 涂层以减少黏附,可显著改善切屑排出性能与刀具寿命。

3.2 冷却与润滑技术改进

传统冷却方式主要以洪流式或喷雾式为主,但在高速车削条件下,由于切削区温度高、时间短,冷却液难以有效进入切削界面。为此,可采用微量润滑 (MQL) 和高压冷却 (HPC) 技术。MQL 通过油雾在刀具与切屑间形成润滑膜,减少摩擦热;HPC 则通过

高压液流直接作用于切削区,快速带走热量并促进切屑卷曲断裂。研究表明,采用 HPC 后切屑卷曲半径减少 30%,刀具寿命延长 40%,同时加工表面粗糙度降低约 25%。此外,低温冷却(如液氮冷却)在加工高温合金时具有独特优势,可抑制刀具黏附与氧化反应,形成清晰断屑,提高工艺稳定性。

3.3 材料与刀具界面的摩擦调控

通过刀具表面工程手段改善刀具一切屑界面特性,是当前切屑控制的重要研究方向。常见方法包括物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)涂层以及表面微织构设计。微织构刀具可通过沟槽、凸点等微结构储存润滑油膜并诱导切屑流动,降低切削升温 and 摩擦系数。实验表明,当刀具前刀面微织构深度控制在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 时,切屑卷曲角度减小 15° 以上,断屑更为稳定。

3.4 切屑监测与智能控制技术

随着智能制造的发展,基于信号特征识别的切屑监测系统逐渐应用于车削现场。通过实时采集切削力、振动和声发射信号,可实现切屑形态的在线识别。结合机器学习算法(如支持向量机 SVM 或卷积神经网络 CNN)对切屑特征进行分类,可提前预测切屑缠绕风险并动态调整切削参数,实现闭环控制。未来,切屑智能控制系统将与数字孪生加工平台结合,实现从“经验调节”向“数据驱动决策”的转变。

4 结论

高速车削切屑形态的演变是一个由热、力及材料特性共同驱动的复杂过程。研究表明,随着切削速度的提升,材料在高应变率作用下形成绝热剪切

带,导致切屑由连续转变为分段锯齿形态,这是加工区热-力失稳的典型表现。切屑与刀具间剧烈摩擦引起的周期性断裂不仅影响切削力波动,也直接决定刀具磨损与表面质量。通过合理调控切削参数、优化刀具几何结构、采用高压冷却与微量润滑等手段,可有效控制切屑形态、改善排屑条件并延长刀具寿命。

参考文献:

- [1] 林洁琼,解略,于行,等.脉冲激光-超声复合辅助车削 SiCp/Al 的切屑形成演变过程分析[J].表面技术,2025,54(08):167-179.
- [2] 宁福达.镍基高温合金高速铣削切屑形成机理与表面粗糙度研究[D].大连理工大学,2014.
- [3] 王雨溥.钛合金 Ti6Al4V 切屑形成过程的实验研究与有限元模拟[D].大连理工大学,2017.
- [4] 庞俊忠,牛苜森,黄晓斌,等.高速铣削淬硬钢时的切屑形态试验研究[J].机械设计与制造,2021,(01):152-155.
- [5] 崔方圆,李鹏阳,李言,等.钛合金高速切削锯齿状切屑形态演变规律仿真模拟研究[J].工具技术,2025,59(08):78-84.
- [6] 安虎平.高锰钢高速切削机理及其影响因素研究[D].兰州理工大学,2022.
- [7] 张诗曼,黄树涛,许立福,等.高速铣削高强度钢切屑形态及影响因素研究[J].工具技术,2021,55(12):19-24.
- [8] 王兵.高速切削材料变形及断裂行为对切屑形成的影响机理研究[D].山东大学,2016.