

切削参数对 PDC 刀具切削铝合金表面质量的影响

钟玮

广东岭南职业技术学院, 广东 广州 510630

DOI: 10.61369/VDE.2025280004

摘 要 : 聚晶金刚石 (PDC) 刀具因其极高的硬度、耐磨性和良好的导热性, 在铝合金等有色金属的高精度、高效率加工中展现出显著优势。铝合金加工的表面质量直接影响工件的疲劳强度、耐腐蚀性及装配性能, 是评价加工工艺优劣的核心指标之一。本文系统研究了切削速度、进给量、切削深度以及切屑形态等关键切削参数对 PDC 刀具切削铝合金时工件表面粗糙度的影响规律与作用机理。研究表明, 各参数对表面质量的影响呈非线性交互关系, 其中进给量与切削速度是影响表面粗糙度的最敏感因素。基于此, 本文进一步提出了面向表面质量优化的 PDC 刀具切削参数协同选择策略、刀具几何与刃口处理优化方案、冷却润滑条件改进方法以及基于过程监控的工艺稳定性控制策略, 旨在为实际生产中实现高效率、高质量铝合金加工提供理论依据与实践指导。

关 键 词 : PDC 刀具; 铝合金; 表面粗糙度; 切削参数; 切屑形态; 表面完整性

The Influence of Cutting Parameters on the Surface Quality of Aluminum Alloy Machined by PDC Cutting Tools

Zhong Wei

Guangdong Lingnan Institute of Technology, Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract : Polycrystalline Diamond Compact (PDC) cutting tools exhibit remarkable advantages in the high-precision and high-efficiency machining of non-ferrous metals such as aluminum alloy, owing to their ultra-high hardness, excellent wear resistance and favorable thermal conductivity. The surface quality of machined aluminum alloy directly affects the fatigue strength, corrosion resistance and assembly performance of workpieces, and it is one of the core indicators for evaluating the merits of machining processes. This paper systematically investigates the influence laws and action mechanisms of key cutting parameters, including cutting speed, feed rate, depth of cut and chip morphology, on the surface roughness of aluminum alloy workpieces during machining with PDC tools. The research results show that the influence of each parameter on surface quality presents a nonlinear interactive relationship, among which feed rate and cutting speed are the most sensitive factors affecting surface roughness. On this basis, this paper further proposes a series of optimization strategies: a collaborative selection strategy for PDC tool cutting parameters oriented to surface quality optimization, an optimization scheme for tool geometry and edge preparation, an improvement method for cooling and lubrication conditions, and a process stability control strategy based on process monitoring. The research aims to provide theoretical basis and practical guidance for achieving high-efficiency and high-quality aluminum alloy machining in actual production.

Keywords : PDC cutting tools; aluminum alloy; surface roughness; cutting parameters; chip morphology; surface integrity

引言

聚晶金刚石 (PDC) 刀具由金刚石微粉在超高压高温下烧结而成, 其硬度仅次于单晶金刚石, 同时具备各向同性、摩擦系数低、导热率高等特点, 在加工铝合金时能有效抑制积屑瘤产生、减少刀具磨损, 是实现镜面或近镜面加工的理想工具之一^[1]。随着对零部件性能及可靠性要求的不断提高, 对其加工表面质量提出了日益严苛的要求。因此, 深入探究各切削参数与 PDC 刀具加工铝合金表面质量之间的映射关系与内在机理, 并据此制定工艺优化策略, 对于充分发挥 PDC 刀具性能、提升铝合金零件制造水平具有重要的理论与工程价值。

一、切削参数对PDC刀具切削铝合金表面质量的影响

(一) 切削速度对铝合金表面粗糙度的影响

切削速度是影响表面粗糙度的关键因素之一。在采用PDC刀具切削铝合金时,一般而言,随着切削速度的提高,表面粗糙度值(如Ra)呈现先减小后趋于稳定或略有上升的趋势^[2]。在较低速度区间(如 $v < 200$ m/min),提高切削速度有助于减少积屑瘤形成的倾向,这是因为较高的切削速度缩短了刀具与切屑的接触时间,降低了界面化学亲和与材料粘附的可能性,同时PDC刀具优异的热导率能使切削区的热量快速散出,进一步抑制了因材料软化黏附而产生的积屑瘤,从而获得更光滑的表面。当速度提升至中高范围(如200-800 m/min),切削过程趋于稳定,塑性变形层减薄,材料主要以剪切方式平滑去除,表面粗糙度主要受刀具几何形状复映和振动影响,此时粗糙度值较低且变化平缓。然而,当速度超过某一临界值,可能诱发高频颤振,或在极高速度下因空气动力效应导致切屑排出不畅而划伤已加工表面,反而导致粗糙度恶化^[3]。因此,针对特定机床——刀具——工件系统,存在一个最优的切削速度窗口,以实现最佳的表面光洁度。

(二) 进给量对铝合金表面粗糙度的影响

进给量是对表面粗糙度影响最为直接且显著的参数。在理想几何复制情况下,理论粗糙度值与进给量的平方成正比,遵循公式 $R_t \approx f^2 / (8 \times r \epsilon)$ (其中 f 为每转进给量, $r \epsilon$ 为刀尖圆弧半径)。使用PDC刀具时,由于其刃口通常可以制备得非常锋利且保持性极好,这一几何复映效应尤为明显。随着进给量的增大,残留面积高度显著增加,导致表面粗糙度急剧上升。尤其在精加工阶段,为追求高表面质量,必须采用极小的进给量(如 $f < 0.1$ mm/r)。但需注意,过小的进给量可能导致刀具在工件表面产生“犁耕”效应而非正常剪切,或因材料弹性恢复引起摩擦加剧,反而可能使表面质量下降^[4]。此外,进给量还通过影响切屑厚度和切削力间接作用于表面质量。较大的进给量意味着更大的切削力和可能引发的工艺系统变形与振动,这些都会在实际加工中恶化表面纹理。因此,在PDC刀具加工铝合金的工艺规划中,应在满足效率要求的前提下,尽可能选用较小的进给量,并优化刀尖圆弧半径以平衡残留高度与切削抗力^[5]。

(三) 切削深度对铝合金表面粗糙度的影响

进给力对表面粗糙度的影响虽然不是直接作用,但也不可忽视。当进给量较小时($a_p \leq 0.5$ mm),进给量变化对表面粗糙度影响不大,在此范围内,刀尖圆弧起主要切削作用,切屑形成过程稳定。但是增大切削深度又会带来以下不同方面的影响:一是由于切削力增加、切削热量增多和切削功耗增加等原因会导致机床的颤振和振动更加剧烈,在系统刚度不足的情况下将直接传递到制品表面上去,导致产生更多毛刺,增大了粗糙度值;第二是大进给量往往伴随着大尺寸切屑及更大的切削区域,也会影响到切削液浸润性和冷却效果,在加工一些易粘连的铝合金时,过高的温度可能会引起积屑瘤的形成或改变其塑性变形规律,这对产品表面光洁度不利。另外对PDC刀具而言,虽然具备出色的刚性和

耐磨性能,在大切削深度应用下,有高载荷引起的刀片微小裂纹风险,尤其是经过精密修形后用于超精加工的部位。因此在实际应用中多采用“浅吃刀大走刀”或“深吃刀小走刀”的组合方式,并根据具体工艺和机床刚性来确定^[6]。

(四) 切屑形状对铝合金表面粗糙度的影响

切屑是切削过程中的一个直观反映,可明显反映出切削过程及材料状态,并且与已加工表面质量紧密相关。在PDC刀具切削铝合金料中,理想的切屑形态为连续性带状屑或断续性能良好的“C”型屑^[7]。如果是不规则的锯齿屑或者碎片崩碎屑,则很可能存在断续的切削力及颤动现象,这种动态扰动会传递至工件表面引起不良的切削质量。切屑形态受切削参数组合、刀具的几何角度、切削条件、铝合金材料本身性质等多种因素影响。例如过高的切削速度或过小的进给量有时会导致切屑缠绕在刀具或工件上,若不及时处理将刮伤已加工面;而合理的刀具断屑槽型或通过适当参数调整,如降低切削速度、增大进给,可促进切屑顺利而不受阻地成形并折断,确保废料排出通畅,保护已加工面。因此,监测控制切削残屑形貌成为表征优化表面性能的重要手段之一。

二、PDC刀具切削铝合金表面质量提升策略

(一) 切削参数的协同优化与智能选择策略

首先我们应从整体上进行协调以提升表面质量,而不能单个调节一个变量。根据前文所述,我们应当建立以表面粗糙度为主要目的函数的同时兼顾生产率、刀具寿命等多个指标的目标函数的优化模型^[8]。具体而言,精密加工时优先选用中高切削速度,稳定切削域并避免颤振;最小的进给量以避免“犁地效应”;适宜的切削深度以确保整个系统的刚度足够大。可采用田口方法、响应曲面法(RSM),也可以利用人工智能预测模型如人工神经网络、基因算法等来寻求最优的多参数组合,获得满足一定表面质量指标的最佳加工窗口区域;同时采用恒定表速切削、高主轴转速小进给铣削方式以及刀具路径及切入切离方法优化可以有效提升表面纹路均匀性;参数优化应结合在线监测手段如振动监测、冲击声发射信号监测。为方便及时采集信息对参数进行细微调整来适应加工过程中出现的不确定性。

(二) PDC刀具几何参数与刃口处理定制化设计

刀具的几何特征直接决定着被切削表面的状态。对于铝合金高质量切削而言,PDC刀具的几何参数至关重要:较大的前角可降低切削力、减小塑性变形,有利于获得光洁外圆表面;锋利修磨良好的刃口能有效避免挤轧现象以及擦伤。以达到减小外切削力的目的。刀尖圆弧半径应该随进给量而变化,精加工中较大的刀尖圆弧半径有利于降低理论残留高度,但会带来更大的径向切削力,所以应在机床装备允许范围内进行抉择。同时合理的后角可减小后刀面与已加工表面的摩擦,此外用合适角度来控制切屑的方向,在铣刀方面可以通过不等齿距的形式在一定范围内抵抗强迫振动的影响。当然不仅考虑总体几何形状也应关注PCD剖削刃的微观特征,只有采用高级打磨工艺才能获得无缺陷、平滑的

剖削边，从而可直接生产出高质量的外表面。不同种类的铝合金材料如高含 Si 的铸造铝合金属易磨损材料，在刀具的前部增加抛光型剪切区或涂覆薄层可进一步降低摩擦和黏着^[9]。

（三）冷却润滑条件的精确匹配与新型冷却方式应用

有效的冷却润滑对于维持稳定的切削温度减少摩擦，确保切屑顺利排除及防止产生积屑瘤至关重要。传统上 PDC 刀具在加工铝合金用到的切削液主要是用水基乳化液或是微量注油（MQL），MQL 是指以非常细小的润滑油雾滴搭配压缩空气。然后再将之均匀喷涂在切削区，这种方式不仅可以起到良好的润滑减小切削力的作用，而且还可以免去大量使用切削液的成本以及环境处理的问题，在高速切削方面优势比较突出，可显著提升表面粗糙度等级。若进一步追求完美，则需要考虑采用以下方案，这时可以考虑采用低温冷风或者低温 MQL 的方法来进一步冷却切削区域。此外还有一些新型润滑技术如静态雾化润滑技术和纳米流体润滑技术等正在开发中，有更加优异的减磨降温及改性表面效果。对于冷却润滑液供给参数而言，例如：压力、流量、喷射角度及位置等都要正确匹配切削参数以实现润滑剂到达刀具——切屑——工件间的接触点；在铣削这样的间歇切割过程中，采用从刀具内部经过主轴、刀柄中部出水的方式（即冷却液），会产生更直接有效的冷却和排屑作用。

（四）基于过程稳定性监控与工艺系统强化的综合保障

为保障最终面的质量稳定性，我们依赖于整个制造过程的刚性和动态特性及其连续运行能力。首先提高生产线刚性，选用高刚性的机台，合理的刀长设置，高品质高强度的刀头系统如热缩刀头或液压刀头，其次要保证零件固定可靠，以减少变形及振

动；再者是过程监督控制，如采用粘贴到主轴或者刀具上的振动传感器、声发射传感器、力传感器来监测加工过程中的振动大小以及频谱特性^[10]。对于存在产生颤振或损伤倾向的信号进行分析后可以实现对主轴转速或者进给量的自动补偿以抑制不稳定的形成从而保证面加工过程的稳定性；定期检测 PDC 刀尖锐度并建立按时间或者切削长度的刀具报废标准，避免因刀尖破损或者过度磨损而带来的表面质量恶化。将改进后的切削条件、专用刀头及精准的冷却方式结合到可靠的生产条件下，建立一个完整的质量保障体系才是保证 PDC 刀头加工铝合金获得稳定高阶面质的正确途径。

三、结语

PDC 刀具在铝合金高效精密加工中具有不可替代的优势，其所能达到的表面质量是切削参数、刀具特性、冷却条件及工艺系统稳定性等多因素复杂交互的结果。本文研究表明，切削速度、进给量、切削深度及由此衍生的切屑形态对表面粗糙度的影响存在内在规律。基于这些认识，本文系统地提出了从切削参数智能协同优化、PDC 刀具几何与刃口定制化设计、冷却润滑条件精确匹配到全过程稳定性监控与系统强化的表面质量提升综合策略。随着智能传感、数字孪生及自适应控制技术在加工领域的深度融合，PDC 刀具切削铝合金的工艺将朝着更精准、更自适应、更可靠的方向发展，为实现铝合金零件超精密、高性能制造提供更强有力的支撑。

参考文献

- [1] 耿青. 超声振动—脉冲激光复合加工高硅铝合金切削机理研究 [D]. 长春工业大学, 2025.
- [2] 刘泽华. 润滑方式对 7075 铝合金高速切削加工表面完整性和耐腐蚀性影响 [D]. 广东海洋大学, 2024.
- [3] 岳修杰, 王优强, 张平, 于晓, 王雪兆. 中断时效对 7075 铝合金切削表面质量及刀具磨损影响研究 [J]. 表面技术, 2024, 53(04): 152-161.
- [4] 孙健淞. 超声切削蜂窝材料的加工机理与表面质量研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [5] 于晓. 7N01 铝合金切削—超声滚压复合加工强化机理及表面摩擦学性能研究 [D]. 青岛理工大学, 2023.
- [6] 薛磊. 铝合金轴向超声振动车削机理及切削参数优化研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [7] 刘俊伶. 热处理对 7075 铝合金微切削表面完整性及耐腐蚀性的影响 [D]. 烟台大学, 2023.
- [8] 闫冬, 李国和, 王丰, 范建勋, 王大春. 铝锂合金切削加工试验研究进展 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(06): 108-118.
- [9] 王杨敏. 干式切削工艺环境污染和表面完整性评价与优化技术 [D]. 南京理工大学, 2023.
- [10] 莫培程, 陈超, 陈家荣, 谢德龙, 肖乐银, 潘晓毅, 蒋燕麟, 林峰. 切削参数对 PDC 刀具切削铝合金表面质量的影响 [J]. 超硬材料工程, 2020, 32(01): 6-10.