

基于PCD刀具的TA15钛合金精密铣削工艺优化及刀具磨损研究

罗育银^{*#}, 段周波

深圳市创世纪机械有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年9月4日; 录用日期: 2023年10月17日; 发布日期: 2023年10月23日

摘要

采用聚晶金刚石(PCD)刀具对TA15钛合金进行高效精密铣削试验, 对比研究主轴转速、铣削深度、铣削宽度及每齿进给量等铣削参数对钛合金加工表面质量的影响, 根据优化的铣削参数开展PCD刀具的磨损实验研究。钛合金铣削实验结果表面, 当主轴转速 N 、铣削深度 a_p 、铣削宽度 a_e 、每齿进给量 f_z 分别为12,000 r/min、3 mm、20 μm 、0.02 mm/z时, PCD刀具侧铣TA15钛合金的切削性能最好, 钛合金铣削表面粗糙度可达0.055 μm 。磨损实验结果表明, PCD刀具的磨损趋势与理论磨损曲线相吻合, 经历初期磨损、稳定磨损、剧烈磨损三个状态, 刀具磨损量及铣削表面粗糙度随铣削长度的累加而增长, 当铣削长度为210 m时后刀面局部最大磨损宽度达到259.9 μm , 同时钛合金表面粗糙度可达0.312 μm , 表面存在少量的粘钛, 但是刀具在铣削218 min后仍能保证一定的切削性能, 能有效实现TA15钛合金长时间的高效精密铣削加工。

关键词

PCD刀具, 钛合金, TA15, 磨损, 铣削

Process Optimization and Tools Wear of Precision Milling of TA15 Titanium Alloy Based on PCD Tools

Yuyin Luo^{*#}, Zhoubo Duan

Shenzhen Chuangshi Machinery Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Sep. 4th, 2023; accepted: Oct. 17th, 2023; published: Oct. 23rd, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 罗育银, 段周波. 基于 PCD 刀具的 TA15 钛合金精密铣削工艺优化及刀具磨损研究[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(5): 464-473. DOI: 10.12677/met.2023.125051

Abstract

Polycrystalline diamond (PCD) tools were used to carry out high-efficiency precision milling tests on TA15 titanium alloy, to comparatively study the influence of milling process parameters such as spindle speed, milling depth, milling width and feed per tooth on the surface quality of titanium alloy machining, and to carry out experimental studies on the wear of PCD tools according to the optimised process parameters. The results of titanium alloy milling experiments show that when the spindle speed N , milling depth a_p , milling width a_e , and feed per tooth f_z are 12,000 r/min, 3 mm, 20 μm , and 0.02 mm/z, respectively, the PCD tool has the best cutting performance in side milling of TA15 titanium alloy, and the roughness of the milled surface of titanium alloy is up to 0.055 μm . The results of the wear experiments show that the wear trend of PCD tool is in line with the theoretical wear curve. The wear trend coincides with the theoretical wear curve, through the initial wear, stable wear, intense wear of three states, the amount of tool wear and milling surface roughness with the accumulation of the milling length and growth, when the milling length of 210 m, the maximum width of the rear face of the local maximum wear width of 259.9 μm , and at the same time, the surface roughness of the titanium alloy up to 0.312 μm , the surface of the small amount of adhesion to the surface of the titanium alloy, but the tool can still ensure a certain degree of cutting performance after 218 min of milling. However, the cutting performance of the tool can still be guaranteed after 218 min, which can effectively realize the efficient and precise milling of TA15 titanium alloy for a long time.

Keywords

PCD Tools, Titanium Alloy, TA15, Wear, Milling

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

TA15 钛合金因其高比强度、良好的热稳定性和高温耐腐蚀性等优异性能, 被广泛应用于航空航天、生物医学、石油化工、汽车船舶等多个领域[1] [2] [3]。但是低弹性模量与高屈服应力比的特性只允许钛合金发生少量塑性变形, 增大刀具的摩擦路程及切削力[4], 同时其摩擦系数大及导热差的特性, 导致工件表面与刀具后刀面间、刀具前刀面与切屑间因挤压摩擦聚集大量的切削热, 且 TA15 钛合金中主要元素 Ti 与 Al 在高温下与大多数切削刀具材料的化学活性强, 使得刀具与工件表面间极易发生粘结和扩散现象, 从而导致刀具的高扩散磨损率及工件表面钛合金残余物的粘附, 在减少刀具寿命的同时降低钛合金加工表面质量, 极大影响了钛合金的可加工性[5]。

针对目前钛合金加工存在的粘刀、工件表面粘屑的问题, 学者提出许多方法, 如采用刀具涂层技术, 在刀刃表面涂覆单层、双层或多层功能涂层, 减少刀具基体的磨损率, 提高刀具使用寿命[6]、采用多能场辅助加工技术, 在传统切削工艺中加入超声波、电火花、激光等辅助技术[7] [8] [9]、优化刀具的结构[10]、结合新型的冷却润滑技术, 改善刀具与工件表面接触区域的冷却润滑情况[11]等。目前切削钛合金的常用刀具大多为硬质合金刀具, 结合上述方法一定程度上能提高刀具的加工性能, 但由于切削温度高, 刀具与工件材料间的粘附严重, 刀具失效过快, 影响加工效率[12]。与硬质合金刀具相比, PCD 刀具的

导热系数是其四倍[4], 硬度是其两倍多, 其软化温度更是高于市面上的其他切削材料[13]。同时因其低摩擦系数、与非铁基金属元素化学亲和力低等优越性能, 能有效地改善目前钛合金加工中刀具磨损严重、加工表面质量差的问题, 被应用于钛合金的加工实践中[14], 尤其是在钛合金的高速切削中, PCD 刀具表现出更优越的抗粘附、抗摩擦和抗磨损性能。Oosthuizen 等[4]对比研究 PCD 刀具和涂层硬质合金刀具在超过 100 m/min 的高速铣削下的刀具寿命、切削力和表面粗糙度, 研究表明 PCD 刀具的磨损进程更慢, 刀具寿命更长。苏宏华等[3]对比研究 PCD 与 PCBN 刀具在高速铣削加工下的刀具性能和磨损机理, 研究表明 PCD 刀具在 350 m/min 下刀具寿命能达到 59 min, 在相同条件下的刀具寿命远高于 PCBN 刀具的 3 min。王晓明[15]研究高速铣削下切削参数对表面粗糙度的影响趋势曲线, 验证高速铣削下的表面粗糙度模型。

目前 PCD 刀具铣削钛合金的研究大多数集中于高转速大进给的粗加工, 对于 TA15 钛合金的高效精密铣削的研究甚少。研究表明 PCD 刀具在切削温度控制良好的情况下, 对于有色金属的精加工表现出极强的耐磨性, 在钛合金的精密铣削加工拥有极好的刀具寿命, 避免频繁的换刀, 有效保证产品尺寸的一致性[16]。因此本文采用 PCD 铣刀对 TA15 钛合金进行精密铣削实验, 对比研究主轴转速、铣削深度、铣削宽度和每齿进给量等铣削参数对钛合金铣削表面质量的影响, 根据优化的铣削参数研究钛合金精密铣削磨损实验中 PCD 刀具的磨损情况和工件加工表面质量的变化, 实现 TA15 钛合金长时间的高效精密铣削加工。

2. 实验设计及设备

钛合金的精密铣削实验均在台群精机钻铣三轴加工中心 T-500Bplus 上进行, 如图 1 所示, 铣削方式为顺铣及侧铣。刀具采用 4 刃 $\phi 10$ mm 的 PCD 立铣刀, 前角为 0° , 后角为 15° , 螺旋角为 6° 。加工工件材料为 TA15 钛合金, 其化学成分和室温下物理力学性能分别如表 1 和表 2 所示。采用 ALPHA COOL 800 环保型合成切削液进行冷却处理。

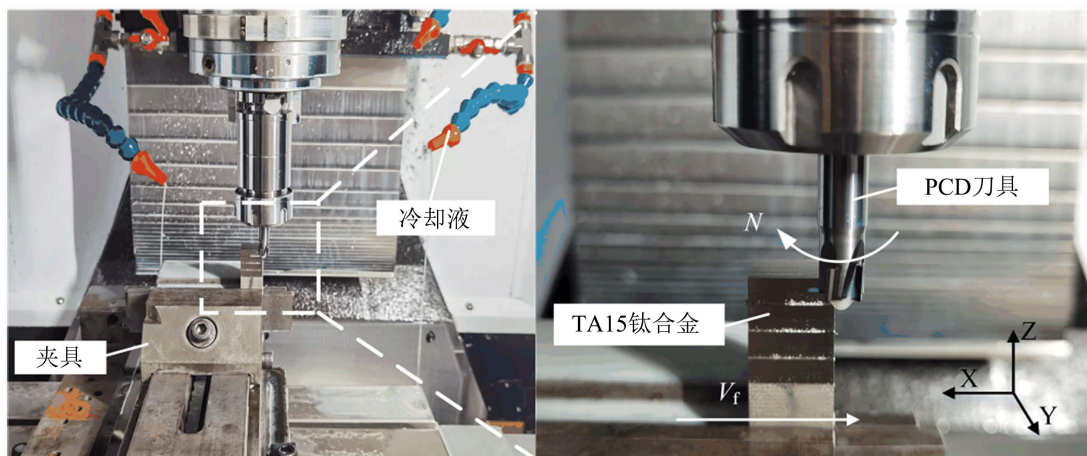


Figure 1. Experimental device for the precision milling process of titanium alloy

图 1. 钛合金精密铣削实验装置

Table 1. Chemical composition of TA15 titanium alloy (%)

表 1. TA15 钛合金的化学成分(%)

标准	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
GB/T 3620.1-2018	5.5~6.5	3.5~4.5	≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.2	余量

Table 2. Physical and mechanical properties of TA15 titanium alloy at room temperature
表 2. TA15 钛合金室温物理力学性能

性能	密度(g/cm ³)	弹性模量(GPa)	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	延伸率(%)	硬度(HBS)
参数值	4.45	118	880	950	10	225~341

采用单因素实验, 以主轴转速 N 、铣削深度 a_p 、铣削宽度 a_e 、每齿进给量 f_z 为研究对象, 采用 PCD 刀具, 在忽略刀具磨损情况下, 对比研究四种不同变量对钛合金加工表面质量的影响, 详细铣削参数如表 3 所示。采用 SEM 扫描电子显微镜检测工件已加工表面形貌, 利用激光共聚焦 3D 显微镜测量钛合金铣削表面粗糙度, 针对每组参数, 沿进给速度方向重复测量 5 处, 取 5 次测量结果的平均值作为此组实验参数的表面粗糙度 R_a 。

根据单因素试验优化后的铣削参数, 进行钛合金的精密铣削磨损实验, 研究 PCD 刀具在精加工中磨损和加工表面质量的变化趋势, 优化的铣削参数为主轴转速 $N = 12,000$ r/min、铣削深度 $a_p = 3$ mm、铣削宽度 $a_e = 20$ μm 、每齿进给量 $f_z = 0.02$ mm/z。实验加工过程中每当铣削长度达到 30 m 时, 卸下铣刀, 通过 SEM 扫描电子显微镜检测刀具的磨损形貌、钛合金加工表面形貌及后刀面磨损带宽度, 根据立铣刀寿命判定依据, 第一后刀面平均磨损带宽度 VB 达到 0.3 mm 或磨损带局部最大宽度 VB_{\max} 达到 0.5 mm 作为刀具磨钝标准[17], 由于 PCD 刀具刀尖区域承受更多的热/机械疲劳应力, 磨损最为严重, 因此取刀具后刀面参与铣削区域的磨损带局部最大宽度 VB_{\max} 作为刀具的磨损量; 利用激光共聚焦 3D 显微镜测量钛合金铣削表面粗糙度, 沿进给速度方向重复测量 10 处, 取其平均值作为钛合金的加工表面粗糙度。

Table 3. Experimental parameter table of the milling process of titanium alloy
表 3. 钛合金铣削实验加工参数表

序号	主轴转速 N (r/min)	铣削深度 a_p (mm)	铣削宽度 a_e (μm)	每齿进给量 f_z (mm/z)
1	8000	3	20	0.02
2	10000	3	20	0.02
3	12000	3	20	0.02
4	14000	3	20	0.02
5	12000	2	20	0.02
6	12000	4	20	0.02
7	12000	5	20	0.02
8	12000	3	10	0.02
9	12000	3	30	0.02
10	12000	3	40	0.02
11	12000	3	20	0.01
12	12000	3	20	0.03
13	12000	3	20	0.04

3. 实验结果与讨论

3.1. 铣削参数对表面粗糙度及形貌的影响

当主轴转速 $N = 12,000$ r/min、铣削深度 $a_p = 3$ mm、铣削宽度 $a_e = 20$ μm 、每齿进给量 $f_z = 0.02$ mm/z 时, 钛合金加工表面粗糙度最佳, 可达 0.055 μm , PCD 刀具铣削 TA15 钛合金工件表面形貌如图 2 所示。

图3给出了表3加工参数条件下, TA15 工件加工表面粗糙度的测量结果, 通过分析得到四个铣削参数对工件表面粗糙度的影响。

由图3(a)可以看出, 钛合金加工表面粗糙度随着主轴转速升高, 呈现先减后增的趋势, 但是在 8000 到 12,000 r/min 之间, 钛合金加工表面粗糙度变化不明显, 在每齿进给量不变下, 高转速带来高进给速度, 而在合适的进给速度下, 加工表面质量变化不明显, 却能有效提高效率, 而在低转速的加工中, 刀具与工件的接触时间较长, 切削热不能有效及时地排出, 残余热量的累积影响加工表面质量; 而随着转速的提高, 高速下机床本身的振动对加工精度的影响变大, 导致刀具运行不稳定, 加工表面形成振纹。因此可在保证振动对加工表面质量的弱影响下提高主轴转速, 提高加工效率。

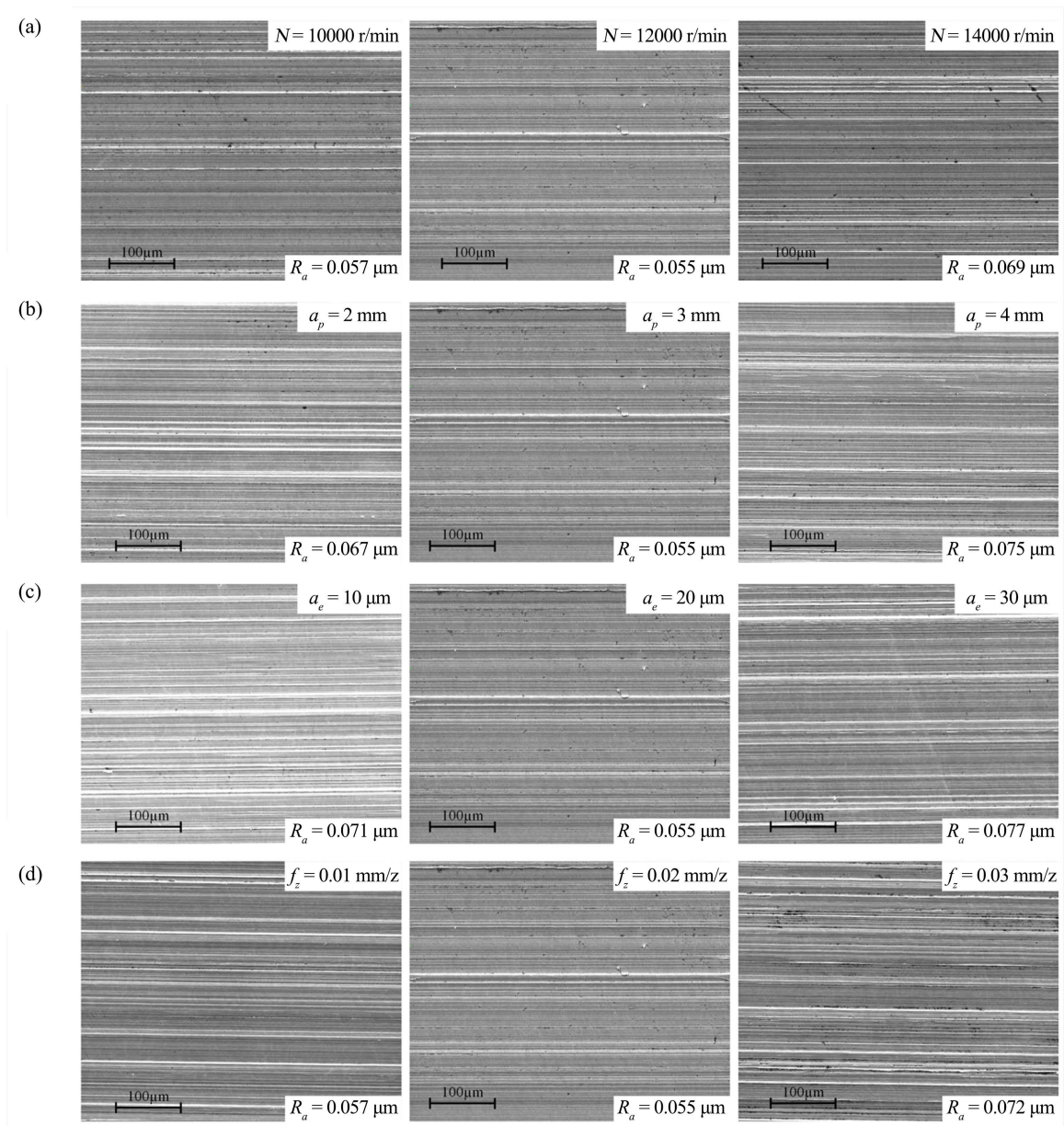


Figure 2. The surface morphology of titanium alloy under different machining parameters: (a) spindle speed N ; (b) milling depth a_p ; (c) milling width a_c ; (d) feed per tooth f_z

图2. 不同加工参数下钛合金表面形貌图: (a) 主轴转速 N ; (b) 铣削深度 a_p ; (c) 铣削宽度 a_c ; (d) 每齿进给量 f_z

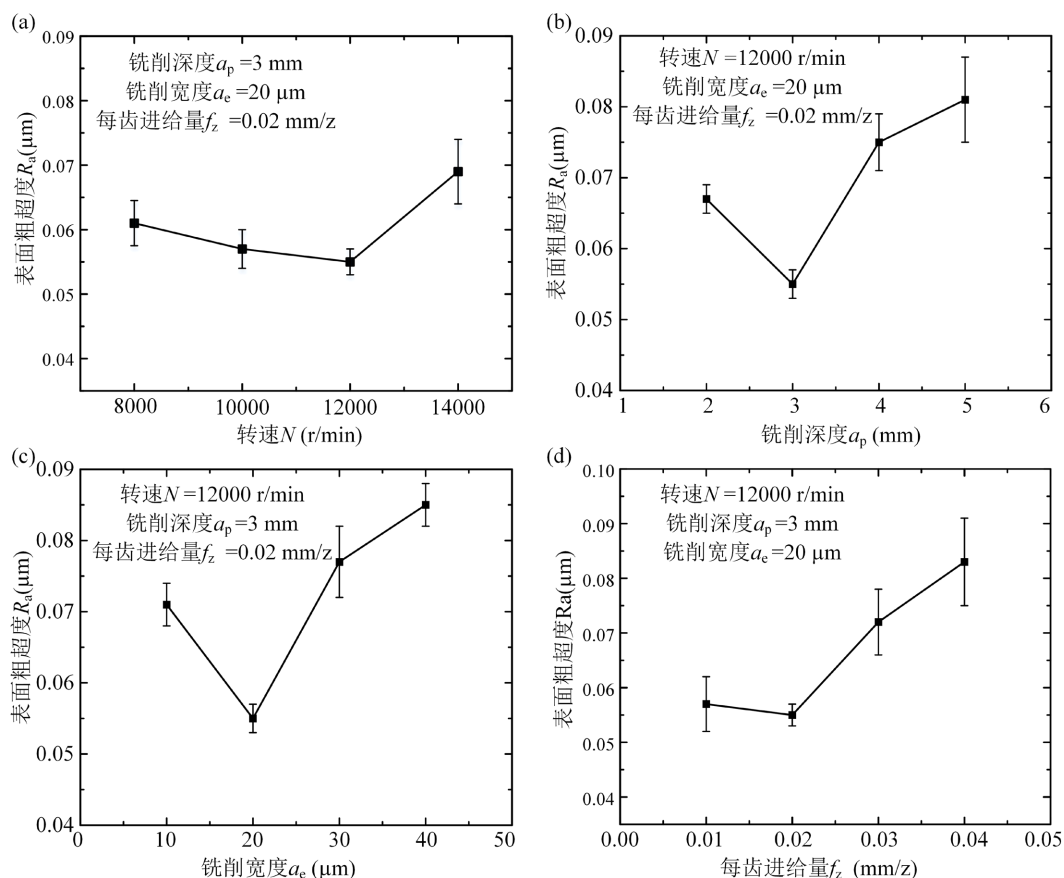


Figure 3. The changes in surface roughness of titanium alloy under different influencing factors: (a) spindle speed N ; (b) milling depth a_p ; (c) milling width a_c ; (d) feed per tooth f_z

图 3. 不同影响因素下钛合金加工表面粗糙度的变化情况: (a) 主轴转速 N ; (b) 铣削深度 a_p ; (c) 铣削宽度 a_c ; (d) 每齿进给量 f_z

从图 3(b)可以看出, 随铣削深度 a_p 的增加, PCD 刀具铣削 TA15 钛合金表面粗糙度值呈对勾趋势, 即先降后急剧上升在缓缓增加。由于铣削深度太小, 刀具磨粒突出, 加工中会导致工件表面不平滑, 有沟壑; 而随着切削深度的增加, 达到临界值, 去除效果将达到最佳, 表面粗糙度值达到最佳; 当超过临界值时, 铣削深度的增大会使得刀具与工件表面接触面积增大, 切削力增大, 振动加强, 工件表面出现振纹等缺陷, 导致加工表面粗糙度值增加。在产品机械加工中, 在保证加工表面质量下, 可适量增大切削深度。

切削宽度是影响加工效率的一个重要因素, 在实际加工过程中应该在能够达到表面质量要求的情况下选择较大的切削宽度。由图 3(c)可以看出, 当铣削宽度 $a_c = 20$ μm 时, 钛合金加工表面粗糙度最佳, 可达 0.055 μm , 且随着铣削宽度的增加, 加工表面粗糙度出现先减小, 而后急剧增大的趋势, 其原因在于随着切削宽度的增加, 刀具与工件表面接触面积增大, 工件材料去除量增加, 刀具所受切削阻力变大, 加速刀具磨损, 同时切屑在前刀面的摩擦程度加剧, 切削刃处更易形成积屑瘤, 导致加工表面粗糙度值的增加。

当每齿进给量 f_z 为 0.01 和 0.02 mm/z 时, 钛合金加工表面粗糙度变化不大, 但由于前者过小的每齿进给量, 增大了加工过程中机床振动带来的每齿切削量波动幅度, 使得加工表面更不稳定; 而随着每齿进给量的提高, 刀具后刀面的接触长度也随之增加, 在刀具与工件的接触区域产生更多的切削热, 促进

钛屑粘附, 同时每齿进给量的增大使得单位时间内材料去除量增大, 切削力增大, 增加刀具的磨损, 进而导致表面粗糙度值增大。

3.2. 刀具磨损实验分析

如图 4 所示, PCD 刀具的理论磨损可归结为初期磨损、稳定磨损、剧烈磨损三个典型的状态[18], 初期磨损持续时间较短, 主要为刀具表面微小缺陷的消除, 到稳定磨损状态时, 刀具以平缓速率产生磨损, 待进入剧烈磨损后, 刀具的切削性能急剧下降, 加工表面质量显著降低, 随着磨损量急剧上升, 刀具快速失效。实际 TA15 钛合金铣削加工中 PCD 刀具的磨损曲线如图 5 所示, 图中可看出, PCD 刀具随着铣削长度 L 的积累, 第一后刀面磨损带局部最大宽度 VB_{\max} 急剧上升, 当铣削长度 L 达到 210 m 时, 磨损带局部最大宽度 $VB_{\max} = 259.9 \mu\text{m}$ 。为准确反应刀具后刀面磨损量变化, 验证理论磨损曲线与实际磨损曲线的吻合程度, 引入磨损速率 VB_v 衡量刀具磨损的快慢及判断刀具磨损状态, 磨损速率 VB_v 计算公式为

$$VB_v = \frac{\sum_{i=0}^n [VB_{\max}(i+1) - VB_{\max}(i)]}{l} \quad (1)$$

式中, l 为单次铣削长度, VB_{\max} 为磨损带局部最大宽度, n 为实验次数。根据刀具磨损实验可得, $l = 30 \text{ m}$, $n = 7$ 。

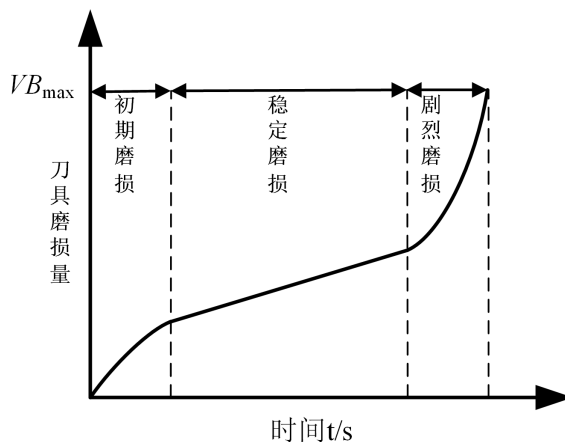


Figure 4. Theoretical wear curve of PCD tool

图 4. PCD 刀具的理论磨损曲线图

根据式(1)计算得到磨损实验的 7 个阶段的磨损速率, 如图 5 所示。图 6 为钛合金铣削过程中 PCD 刀具的磨损形貌。当铣削长度达到 30 m 时, PCD 刀具铣削钛合金的磨损速率为 $0.570 \mu\text{m}/\text{m}$, 略高于长度为 60 m、90 m 时的磨损速率, 对比图 6(a)和图 6(b)中 PCD 刀具形貌, 可发现铣削 30 m 后刀具后刀面出现均匀的磨损带, 切削刃上仅出现由于局部应力集中而产生的凹痕微崩刃, 无明显的崩刃及材料损失现象, 因此认为刀具在铣削长度 0~30 m 内处于刀具的初期磨损状态。铣削长度处于 30 m 到 120 m 时, PCD 刀具的磨损速率数值在 0.44~0.60 内波动, 同时刀具后刀面的最大磨损宽度也在平缓地增长, 刀具的磨损处于一个稳定磨损的阶段; 结合图 6(c)和图 6(d)分析得, 相比于初期磨损, 刀具铣削 60 m 后出现明显粘附现象, 大量小型粘附物聚集于后刀面上, 随着切削长度的累加, 刀具的粘结磨损开始显著表现, 刀具后刀面材料随着粘附层的脱落而损失, 前刀面处形成的积屑瘤, 在一定程度上抑制前刀面的剥落。当铣削长度达到 120 m 时, 刀具的磨损速率为 $0.692 \mu\text{m}/\text{m}$, 与长度为 90 m 时相比磨损速率出现了一个小幅度

增长, 同时在铣削长度大于 120 m 时, 刀具的磨损速率出现了大幅度的急增, 数值从 0.69 急增到 3.057, 同时刀具的前刀面和后刀面的磨损量急剧上升, 刀具进入剧烈磨损状态; 从图 6(e) 中可看出刀尖区域出现由机械疲劳应力作用产生的断口, 且由于刀具循环热/机械负荷的累加, 刀具材料的剥落开始向前刀面蔓延, 同时在磨损带下沿开始出现较大的块状钛合金粘附物; 刀尖区域由于断口存在, 切削刃处施加的接触应力集中增加促进工件材料粘附, 同时钛合金工件和切屑中的碳、氮、氧化物等微细硬质点通过循环过程不断对断口及粘附进行划擦和剥落, 导致如图 6(f) 和图 6(g) 中刀尖区域被逐渐磨平以及磨损带的不断扩张; 当铣削长度到达 210 m 时, 刀具最大磨损宽度达到 259.9 μm , 从图 6(h) 中可明显发现刀尖作用区域粘结磨损严重, 在粘附层的去除剥落的同时拉出刀具中焊接 PCD 晶粒, 使得金刚石颗粒从钴结合剂中脱落, 形成图 6(h) 刀尖区域中粗糙的凹陷磨损表面, 同时在循环的机械断裂作用下切削刃出现明显的崩刃现象, 刀具的切削性能整体下降。图 5 和图 6 表明 PCD 刀具的磨损经历三个阶段, 由于刀具表明微小缺陷较少, 前期磨损时间较短, 在铣削长度为 120 m 前刀具处于稳定磨损状态, 当刀尖出现断裂后, 刀具进入剧烈磨损状态, 其磨损趋势与理论磨损曲线基本吻合。

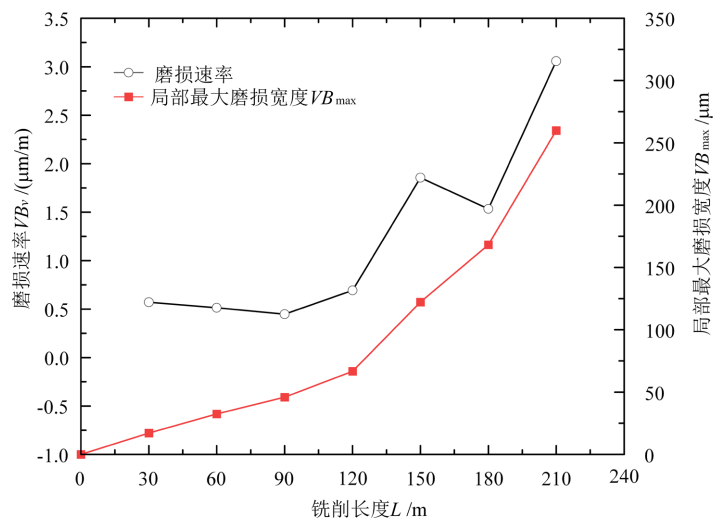


Figure 5. Curve of PCD tool wear during the milling process of titanium alloy
图 5. 钛合金铣削过程中 PCD 刀具磨损曲线

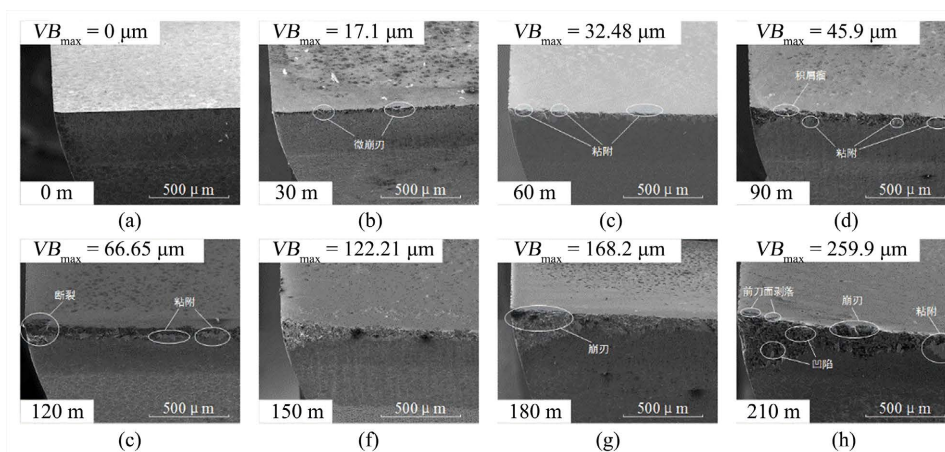


Figure 6. Morphologies of PCD tool wear
图 6. PCD 刀具磨损形貌

图 7 和图 8 分别为磨损实验中钛合金的加工表面形貌及加工表面粗糙度。在主轴转速 $N = 12,000$ r/min、铣削深度 $a_p = 3$ mm、铣削宽度 $a_e = 20$ μm 、每齿进给量 $f_z = 0.02$ mm/z 的铣削参数下, 使用 PCD 刀具铣削 TA15 钛合金表面粗糙度随着铣削长度的增加而增长; 在稳定磨损状态下工件表面粗糙度随着刀具磨损的稳定增长而逐渐变大, 工件铣削表面较为光滑, 加工质量波动较小, 刀具的切削性能在平缓降低; 但是当刀具进入剧烈磨损状态, 即铣削长度大于 120 m 时, 工件表面质量波动较大, 刀具的切削性能急剧下降, 同时当铣削长度为 210 m 时加工表面粘附着部分未及时排出的钛合金切屑。

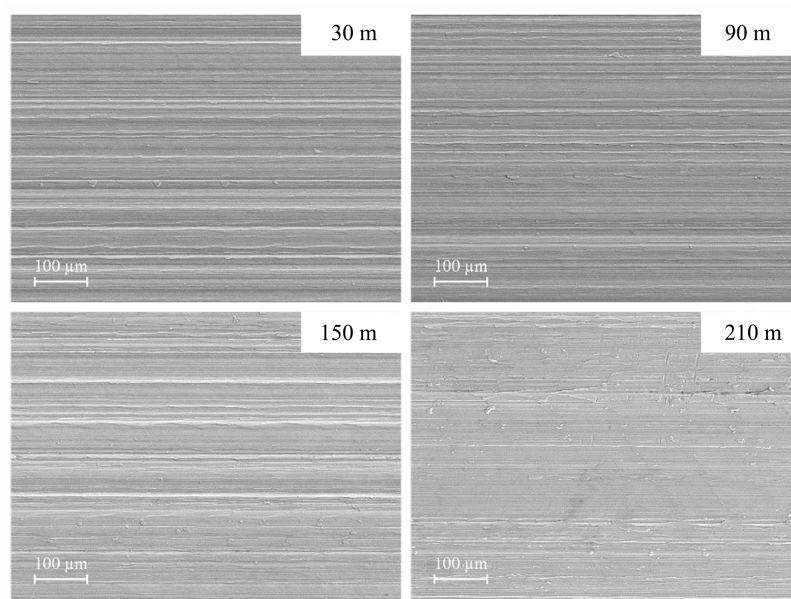


Figure 7. The machined surface morphology of titanium alloy in wear experiment
图 7. 磨损实验中钛合金的加工表面形貌

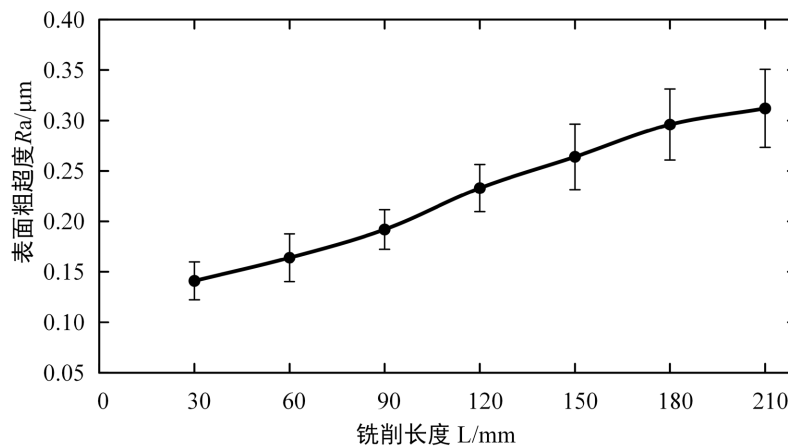


Figure 8. The machined surface roughness R_a of titanium alloy in wear experiment
图 8. 磨损实验中钛合金的加工表面粗糙度 R_a

4. 结论

(1) 当主轴转速 N 、铣削深度 a_p 、铣削宽度 a_e 、每齿进给量 f_z 分别为 12,000 r/min、3 mm、20 μm 、0.02 mm/z 时, PCD 刀具铣削 TA15 钛合金的加工效果最佳, 钛合金铣削表面粗糙度度可达 0.055 μm 。

(2) 根据优化的铣削参数, PCD 刀具铣削 TA15 钛合金的磨损趋势与理论磨损曲线相吻合, 同时刀具的主要磨损形式为前后刀面的粘结磨损、磨粒磨损以及刀尖区域的严重崩刃。

(3) 当铣削长度达到 210 m, 刀具后刀面局部最大磨损宽度 VB_{\max} 达到 259.9 μm , 此时刀具处于剧烈磨损状态, 但刀具仍保留良好的切削性能, 钛合金加工表面粗糙度为 0.312 μm , 能有效实现 TA15 钛合金长时间的高效精密铣削加工。

参考文献

- [1] Zhao, Q., Sun, Q., Xin, S., *et al.* (2022) High-Strength Titanium Alloys for Aerospace Engineering Applications: A Review on Melting-Forging Process. *Materials Science & Engineering: A*, **845**, Article ID: 143260. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143260>
- [2] Kaur, M. and Singh, K. (2019) Review on Titanium and Titanium Based Alloys as Biomaterials for Orthopaedic Applications. *Materials Science & Engineering: C*, **102**, 844-862. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.064>
- [3] Su, H., Liu, P., Fu, Y., *et al.* (2012) Tool Life and Surface Integrity in High-Speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools. *Chinese Journal of Aeronautics*, **25**, 784-790. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60445-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60445-7)
- [4] Oosthuizen, A.G., Akdogan, G. and Treurnicht, N. (2011) The Performance of PCD Tools in High-Speed Milling of Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **52**, 929-935. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2804-2>
- [5] Cygan, S., Jaworska, L., Putyra, P., *et al.* (2017) Thermal Stability and Coefficient of Friction of the Diamond Composites with the Titanium Compound Bonding Phase. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **26**, 2593-2598. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2712-9>
- [6] Lü, W., Li, G., Zhou, Y., *et al.* (2020) Effect of High Hardness and Adhesion of Gradient TiAlSiN Coating on Cutting Performance of Titanium Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **820**, Article ID: 153137. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153137>
- [7] Sorgato, M., Bertolini, R., Ghiotti, A. and Bruschi, S. (2021) Tool Wear Analysis in High-Frequency Vibration-Assisted Drilling of Additive Manufactured Ti6Al4V Alloy. *Wear*, **477**, Article ID: 203814. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203814>
- [8] Khoshaim, A.B., Muthuramalingam, T., Moustafa, E.B., Elsheikh, A., *et al.* (2023) Influences of Tool Electrodes on Machinability of Titanium α - β Alloy with ISO Energy Pulse Generator in EDM Process. *Alexandria Engineering Journal*, **63**, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.059>
- [9] Chen, N., Li, Z.J., Wu, Y., Zhao, G.L., Li, L. and He, N. (2019) Investigating the Ablation Depth and Surface Roughness of Laser-Induced Nano-Ablation of CVD Diamond Material. *Precision Engineering*, **57**, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.04.009>
- [10] Denkena, B., Lucas, A. and Bassett, E. (2011) Effects of the Cutting Edge Microgeometry on Tool Wear and Its Thermo-Mechanical Load. *CIRP Annals*, **60**, 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.098>
- [11] Nguyen, V.C., Nguyen, T.D. and Tien, D.H. (2021) Cutting Parameter Optimization in Finishing Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy under MQL Condition Using TOPSIS and ANOVA Analysis. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, **11**, 6775-6780. <https://doi.org/10.48084/etasr.4015>
- [12] Li, A., Zhao, J., Wang, D., *et al.* (2013) Failure Mechanisms of a PCD Tool in High-Speed Face Milling of Ti-6Al-4V Alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **67**, 1959-1966. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4622-1>
- [13] Ezugwu, O.E., Bonney, J., Silva, D.B.R., *et al.* (2007) Surface Integrity of Finished Turned Ti-6Al-4V Alloy with PCD Tools Using Conventional and High Pressure Coolant Supplies. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, **47**, 884-891. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.005>
- [14] Pan, W., Ding, S. and Mo, J. (2014) Thermal Characteristics in Milling Ti6Al4V with Polycrystalline Diamond Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **75**, 1077-1087. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6094-y>
- [15] 王晓明, 韩江. TC4 钛合金高速铣削表面粗糙度研究[J]. 机械设计与制造, 2019(5): 232-236, 240. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.2019.05.058>
- [16] 姚炀. PCD 刀具车削超硬铝合金的切削性能及参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [17] 李志强. 钛合金车削用 PCD 刀具优选及切削参数优化[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [18] 李阳阳. PCD 刀具切削钛基复合材料试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.