

# 新型 Ta-C 涂层铣刀切削性能研究

张而耕, 黄彪, 何澄, 周琼

(上海应用技术大学 机械工程学院, 上海 201418)

**摘要:** **目的** 研究 Ta-C 涂层刀具与普通类金刚石涂层刀具切削 2A50 铝合金时的性能对比。**方法** 通过实验比较两刃、四刃 Ta-C 涂层铣刀和两刃、四刃普通类金刚石涂层铣刀, 在干式切削条件下切削 2A50 铝合金的性能。通过相同切削条件下刀具切削距离的长短, 比较刀具的使用寿命, 并在显微镜下观察切屑的表面形貌, 用表面粗糙度仪检测铝合金表面的粗糙度。**结果** 两刃 Ta-C 涂层铣刀干式切削铝合金时的使用寿命最长, 切削距离为 116 m。Ta-C 涂层铣刀与普通类金刚石涂层铣刀加工工件的表面粗糙度总体呈上升趋势, 两刃 Ta-C 涂层铣刀加工出来的工件表面质量较好, 工件表面粗糙度均值为 0.692  $\mu\text{m}$ 。**结论** 相同刀刃数量且结合力良好的涂层铣刀相比较, Ta-C 涂层铣刀较普通类金刚石涂层铣刀加工出来的工件表面粗糙度平均值低, 同种涂层加工得到的切屑表面微观形貌无明显差别。Ta-C 涂层铣刀与普通类金刚石涂层铣刀切削铝合金时, 抑制粘刀效果都十分明显, 但 Ta-C 涂层铣刀效果更优。

**关键词:** Ta-C 涂层; 类金刚石涂层; 铝合金; 切屑; 表面粗糙度

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0125-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.019

## Machinability of New Type Ta-C Coating Milling Cutter

ZHANG Er-geng, HUANG Biao, HE Cheng, ZHOU Qiong

(School of Mechanical and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study performance comparison of Ta-C coating milling cutter and common diamond-like coating milling cutter in cutting 2A50 aluminum alloy. Experiment was performed to compare the performance of two-bladed, four-bladed Ta-C coating cutters as well as two-bladed, four-bladed common diamond-like coating cutters in cutting 2A50 aluminum alloy under the condition of dry cutting. Service life of the cutters were compared based upon cutting distance under the same cutting condition. A microscope was used to observe surface morphology of cuttings, and surface roughness tester was used to inspect roughness of aluminum alloy surface. The two-bladed Ta-C coating milling cutter had the longest service life in dry-cutting aluminum alloy, and the cutting distance was 116 m. Surface roughness of Ta-C coating milling cutter and common diamond-like coating cutter was increasing as a whole in machining workpieces. Workpieces machined with two-bladed Ta-C coating milling cutter exhibited good surface quality, the average surface roughness was 0.692  $\mu\text{m}$ . Comparison of coating milling cutter in same number of blades and of good adhesion indicates that, average surface roughness of workpieces machined with Ta-C coating milling cutter is lower than that of those machined with common diamond-like coating cutter. There is no

收稿日期: 2017-02-24; 修订日期: 2017-03-22

**Received:** 2017-02-24; **Revised:** 2017-03-22

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51475311)

**Fund:** National Nature Science Foundation of China (51475311)

**作者简介:** 张而耕 (1973—), 男, 博士后, 教授, 研究方向为超硬纳米 PVD 涂层、机械制造、材料失效分析。

**Biography:** ZHANG Er-geng (1973—), Male, Postdoctor, Professor, Research focus: superhard nano-micron PVD coating, machinery manufacturing, failure analysis of materials.

significant difference in morphology of cuttings obtained in the same mode of coating machining. Both cutters can prevent sticking effectively when cutting aluminum alloy, but Ta-C coating milling cutter prevails.

**KEY WORDS:** tetrahedral amorphous carbon coating; diamond-like coating; aluminum alloy; cuttings; surface roughness

类金刚石 (DLC) 膜是一种以  $sp^3$ 、 $sp^2$  键结合为主的非晶碳膜, 具有类似于金刚石薄膜的优良性能, 如摩擦系数低、硬度高、化学稳定性好等, 可作为抗磨减摩涂层应用于航空航天、医学以及有色金属切削等领域<sup>[1-3]</sup>。根据制备方法和技术的不同, 可以制备得到两类不同的 DLC 膜: 一类是完全由碳元素组成的涂层膜, 即不含氢非晶碳膜 (Ta-C 膜); 另一类是既含有碳元素也含有氢元素的涂层膜, 即含氢非晶碳膜 (普通类金刚石膜)<sup>[4]</sup>。Ta-C 膜的  $sp^3$  键含量为 80%~90%, 主要成分为四面体碳 (tetrahedral carbon), 含氢非晶碳膜中  $sp^2$  含量较高<sup>[6]</sup>。随着对工件质量要求的不断提高, 普通类金刚石涂层刀具在加工过程中受硬度、摩擦系数等性能的局限, 不能满足生产加工需求, 如铝合金加工。铝合金由于具有比重小、耐腐蚀、耐磨、强度高、导热性好以及便于回收再利用等优点, 广泛应用于汽车、飞机、坦克及船用发动机等工业部门中<sup>[7]</sup>。然而, 由于铝合金在切削过程中, 切屑极易粘刀, 导致切削热急剧增加, 严重影响了加工的继续进行<sup>[8]</sup>。因此寻找并制备得到一种硬度更高、摩擦系数更低以及加工成本低的涂层铣刀成为了研究的重点方向。

仇健等<sup>[9]</sup>在硬质合金立铣刀高速铣削铝合金切削力实验研究中发现, 在高速切削铝合金时, 主切削力方向的幅值波动很大, 加工的工件表面粗糙度较差。Montoya 等<sup>[10]</sup>用 TiAlCrN 和 AlTiSiN 涂层刀具切削铝合金研究, 发现涂层刀具的寿命和未涂层刀具相当。Qu 等<sup>[11]</sup>采用 YW1 硬质合金刀具切削铝铜合金, 发现刀具粘刀现象明显。张而耕等<sup>[12]</sup>、冯吉福等<sup>[13]</sup>、肖长江等<sup>[14]</sup>在对金刚石涂层与 PCD 刀具切削铝合金的切削性能对比研究中, 发现加工的工件表面粗糙度平均值在 0.650  $\mu\text{m}$  左右。从这些研究可以发现, 未涂层以及 Ti-Al-N 类涂层刀具加工的工件不具有良好的表面质量, 金刚石涂层加工铝合金虽然能够得到良好的表面质量, 但成本太高, 因此制备得到一种成本较低且能加工得到良好铝合金工件表面质量的涂层刀具是本实验的主要研究内容。

通过实验比较两刃、四刃 Ta-C 涂层铣刀和两刃、四刃普通类金刚石涂层铣刀, 在干式切削条件下切削 2A50 铝合金的性能, 用切削距离的长短比较刀具的使用寿命, 并用表面粗糙度仪检测加工工件的表面粗糙度, 从而发现一种成本低、使用寿命长以及能加工得到良好铝合金工件表面质量的涂层铣刀。

## 1 实验

### 1.1 刀具及材料

#### 1.1.1 实验刀具

在文献[9—14]等切削铝合金的研究基础上, 本文研究比较两刃、四刃普通类金刚石涂层铣刀和两刃、四刃 Ta-C 涂层铣刀在干式切削条件下切削 2A50 铝合金的性能, 实验刀具编号及状态如表 1 所示。

表 1 实验刀具编号和状态  
Tab.1 Serial number and status of the experimental tools

编号	状态
1 <sup>#</sup>	两刃 $\phi 8$ mm 普通类金刚石涂层铣刀
2 <sup>#</sup>	四刃 $\phi 8$ mm 普通类金刚石涂层铣刀
3 <sup>#</sup>	两刃 $\phi 8$ mm Ta-C 涂层铣刀
4 <sup>#</sup>	四刃 $\phi 8$ mm Ta-C 涂层铣刀

#### 1.1.2 涂层制备

实验用的 Ta-C 涂层膜与普通类金刚石涂层膜, 均采用物理气相沉积在 YG6 硬质合金基体上沉积得到。其中, 普通类金刚石涂层通过 ARCPROICS-04 涂层设备制得, Ta-C 涂层通过 PLASMAADS400 设备制得。在普通类金刚石刀具和 Ta-C 涂层刀具涂覆前, 同时对基体进行抛光、酒精清洗、蒸馏水清洗、烘干处理, 然后将制备普通类金刚石薄膜的 YG6 硬质合金基体用夹具加紧后放入 ARCPROICS-04 设备中, 制备 Ta-C 薄膜的 YG6 硬质合金基体用夹具加紧后放入 PLASMAADS400 设备中。两种制备工艺和参数对比如表 2 所示。

制备的普通类金刚石涂层的微观形貌如图 1 所

表 2 两种涂层制备工艺和参数对比  
Tab.2 Two kinds of coating preparation process and parameters

涂层制备类型	普通类金刚石薄膜	Ta-C 薄膜
涂层技术	阴极电弧	磁过滤阴极电弧沉积技术
碳元素来源	乙炔	石墨
电流/A	110	0.2
电压/V	21	380
氩气流量 (sccm)	80~100	37.3
转炉架偏压/V	-80	0

示, Ta-C 涂层的微观形貌如图 2 所示。图 1 和图 2 是在 500 倍显微镜下观察得到的。如图 1—2 所示, 普通类金刚石涂层和 Ta-C 涂层的涂层颗粒较细小, 涂层表面较平坦, 表面粗糙度低。

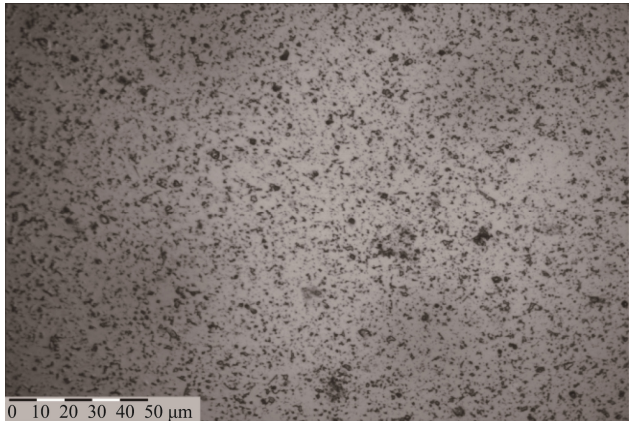


图 1 普通类金刚石涂层的微观形貌  
Fig.1 The microstructure of common types diamond-like coating

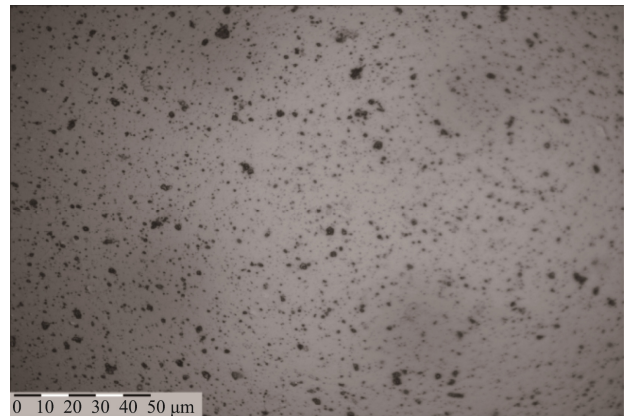


图 2 Ta-C 涂层的微观形貌  
Fig.2 The microstructure of Ta-C

1.1.3 材料

本次实验的加工材料为 2A50 铝合金, 抗拉强度  $\sigma_b \geq 355$  MPa。在铝合金的加工过程中, 切屑易粘着在刀具上并对工件产生划痕, 工件表面粗糙度值升高, 不易于直接加工得到表面质量良好的工件。本次实验采用的 Ta-C 涂层刀具和普通类金刚石涂层刀具具有自润滑及摩擦系数小等优点, 能大幅提高加工效率, 同时也能提高工件的表面精度。

1.2 加工方式

本次切削实验在 VMC-1000II 机床上进行干式切削, 主轴转速为 3980 r/min, 每齿进给量为 0.05 mm, 背吃刀量为 2 mm。干切削加工技术是一种切削加工过程不用或少许使用切削液的加工技术, 相对于湿切削, 干切削不产生油污, 是一种对环境污染源头进行控制的清洁、环保的加工工艺<sup>[15—17]</sup>。高速干式铣削,

因缺少冷却液的降温和润滑作用, 普通刀具会急剧磨损。实验采用的 Ta-C 涂层刀具和普通类金刚石涂层刀具具有自润滑及摩擦系数小等特点, 在铣削过程中切屑不易粘附在刀具表面, 切削过程中产生的热量绝大部分被切屑带走, 刀具切削寿命提高。

1.3 表面粗糙度测试

使用手持式粗糙度仪 TR220 对实验工件表面粗糙度进行测量, 测量范围为 0.005~16  $\mu\text{m}$ , 最高显示分辨率为 0.001  $\mu\text{m}$ , 示值误差  $\leq 10\%$ 。实验时, 取切削 10 m 处为第一个测量点, 随后两刃 Ta-C 涂层铣刀、两刃普通类金刚石涂层铣刀每加工 10 m 取一个测量点, 四刃 Ta-C 涂层铣刀、四刃普通类金刚石涂层铣刀每加工 5 m 取一个测量点, 最后一点取刀具切削失效点(在切削过程中出现异常振动或声音则判定为刀具失效)。

2 结果及讨论

通过切削距离来比较不同状态刀具的切削寿命, 通过比较加工工件的表面粗糙度及切屑的微观形貌, 来判断不同状态刀具的加工性能。高速干式切削 2A50 铝合金加工实验切削距离结果见表 3。

表 3 高速干式切削 2A50 铝合金加工实验切削距离  
Tab.3 The processing cutting distance experiment results of high-speed dry cutting 2A50 aluminum alloy

编号	加工距离
1 <sup>#</sup>	加工约 83 m 后失效
2 <sup>#</sup>	加工约 56 m 后失效
3 <sup>#</sup>	加工约 116 m 后失效
4 <sup>#</sup>	加工约 48 m 后失效

表 3 中的加工失效距离为 3 次切削铝合金实验结果的平均值。由表 3 可知, 3<sup>#</sup>刀具的切削失效距离最长, 1<sup>#</sup>刀具次之, 4<sup>#</sup>刀具的切削失效距离最短。原因在于 3<sup>#</sup>刀具与 1<sup>#</sup>刀具相比, 其涂覆的涂层耐磨性更高, 摩擦系数更小, 在相同切削条件下, 磨损相同厚度的 Ta-C 涂层和普通类金刚石涂层, Ta-C 涂层需要更长的时间, 因此 3<sup>#</sup>刀具的切削距离较 1<sup>#</sup>刀具的切削距离长。

1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>两刃涂层铣刀较 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>四刃涂层铣刀的切削距离长, 原因在于切削材料为韧性较强的 2A50 铝合金, 切屑不易于断裂排除, 而两刃铣刀较四刃铣刀在切削过程中更易于切屑的排除, 因此 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>两刃涂层铣刀较 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>四刃涂层铣刀, 在相同切削条件下, 切屑对刀具的磨损较小, 加工长度相同时, 两刃铣刀比四刃铣刀的磨损量更少。4<sup>#</sup>刀具较 2<sup>#</sup>刀具的切削失效距离短, 原因在于虽然 4<sup>#</sup>刀具与 2<sup>#</sup>刀具相比, 其涂



层的耐磨性更高,摩擦系数更小,但是 4<sup>#</sup>四刃铣刀在切削过程中涂层出现剥落现象,涂层剥落后的刀具急剧磨损。3<sup>#</sup>两刃 Ta-C 涂层铣刀较 4<sup>#</sup>两刃 Ta-C 涂层铣刀加工距离长,原因在于 Ta-C 涂层附着在刀具表面时应力较强,四刃铣刀较两刃铣刀刀刃之间的曲率大,Ta-C 涂层不易良好地附着在四刃铣刀表面,在切削过程中出现涂层剥落现象,普通类金刚石涂层不会出现这种现象。

金属切削过程中,金属材料在大应变和高温下产生塑性变形和断裂,最终形成切屑,切屑的形成反映了切削过程的内在机理。图 3—4 为 Ta-C 涂层铣刀切削 2A50 铝合金的切屑,图 5—6 为普通类金刚石涂层铣刀切削 2A50 铝合金的切屑。由图 3—4 可知,切屑表面形貌无明显区别,表面纹理不明显,表面非常光滑。图 5、图 6 所示的切屑表面形貌无明显区别,表面纹理较清晰。由图 3—6 可知,Ta-C 涂层铣刀与普通类金刚石涂层铣刀相比,其切削 2A50 铝合金切屑的表面形貌更光滑,因为 Ta-C 涂层较普通类金刚石涂层的摩擦系数小,使切削过程中切屑与刀具的前刀面之间的摩擦较小,因此,切屑的表面较光滑。

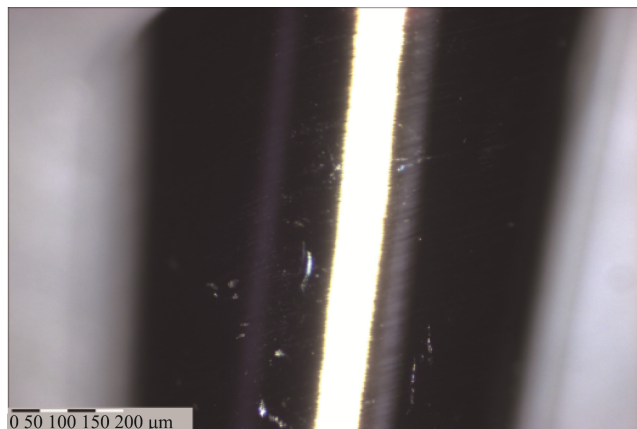


图 3 四刃 Ta-C 涂层铣刀切屑

Fig.3 The chip of four blade Ta-C coating milling cutter

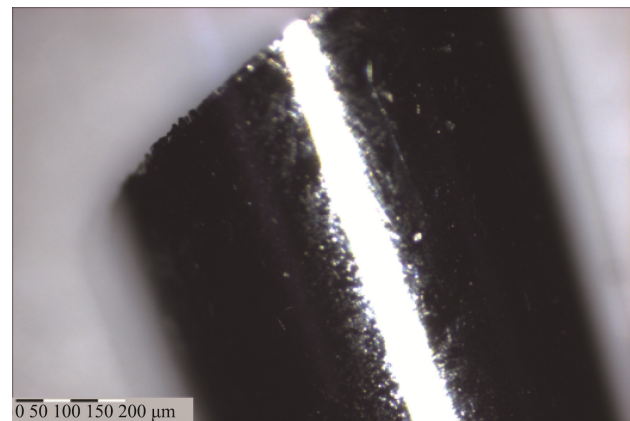


图 4 两刃 Ta-C 涂层铣刀切屑

Fig.4 The chip of two blade Ta-C coating milling cutter

两刃、四刃 Ta-C 涂层铣刀和两刃、四刃普通类金刚石涂层铣刀干式切削 2A50 铝合金工件的表面粗糙度值与切削距离关系如图 7 所示,两刃 Ta-C 涂层铣刀、两刃普通类金刚石涂层铣刀切削 2A50 铝合金表面粗糙度的平均值分别为 0.692、0.76  $\mu\text{m}$ ,四刃 Ta-C 涂层铣刀、四刃普通类金刚石涂层铣刀切削 2A50 铝合金表面粗糙度的平均值分别为 0.714、0.72  $\mu\text{m}$ 。由图 7 可知,加工初期,随着加工距离的增加,工件表面粗糙度值稍有下降,后总体呈上升趋势,原因在于加工初期刀刃比较尖锐,对工件表面产生细微划痕,影响工件的表面粗糙度,随着加工的继续,刀刃尖锐部分被磨损,使工件表面粗糙度值有所降低,之后刀具表面涂层逐渐被磨损,工件表面粗糙度值呈上升趋势。同种涂层在加工初期,四刃铣刀比两刃铣刀加工的工件表面粗糙度值更低,因为相同主轴转速下,四刃铣刀较两刃铣刀单位时间内参与切削的刃多,加工出的表面质量较好。

两刃 Ta-C 涂层铣刀较两刃普通类金刚石涂层铣刀加工表面的表面粗糙度低,因为 Ta-C 涂层具有自

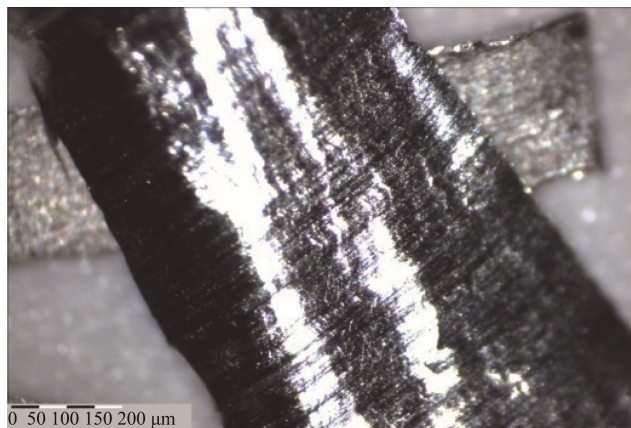


图 5 四刃普通类金刚石涂层铣刀切屑

Fig.5 The chip of four blade common types diamond-like coating milling cutter

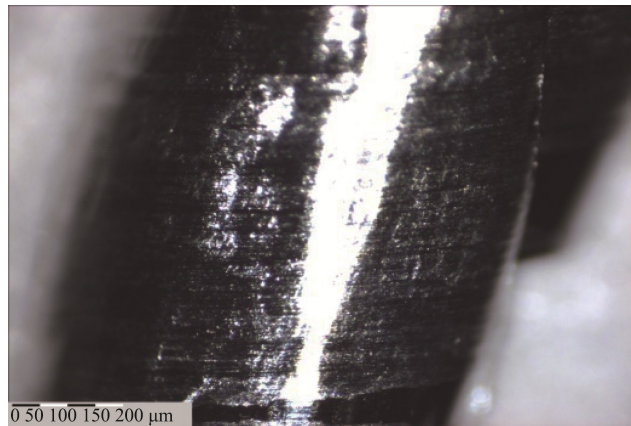


图 6 两刃普通类金刚石涂层切屑

Fig.6 The chip of two blade common types diamond-like coating milling cutter

润滑性能, 且较普通类金刚石涂层的摩擦系数小, 加工工件的表面比较光滑。四刃 Ta-C 涂层铣刀与四刃普通类金刚石涂层铣刀在加工初期之后, 加工工件的表面粗糙度急剧上升, 因为四刃 Ta-C 涂层铣刀和四刃普通类金刚石涂层铣刀不利于 2A50 铝合金切屑的排出, 随着切削的进行, 未及时排出的切屑加剧了刀具的磨损, 影响工件的表面质量。此外四刃 Ta-C 涂层铣刀出现了涂层剥落, 对工件的加工质量也造成了负面影响, 涂层剥落之后的四刃 Ta-C 涂层铣刀, 其加工的工件表面粗糙度值上升最快。

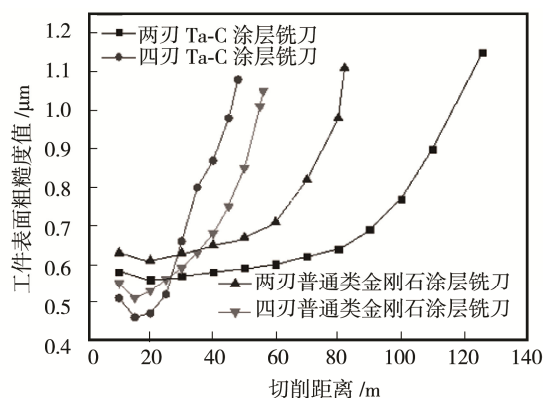


图 7 工件表面粗糙度值与切削距离关系

Fig.7 The relationship of workpiece surface roughness and cutting distance

### 3 结论

1) 两刃、四刃普通类金刚石涂层铣刀和两刃、四刃 Ta-C 涂层铣刀, 在干式切削条件下切削 2A50 铝合金, 两刃 Ta-C 涂层铣刀的使用寿命最长, 两刃普通类金刚石涂层铣刀的使用寿命次之, 四刃 Ta-C 涂层铣刀的使用寿命最短。

2) 在切削 2A50 铝合金等韧性较强的金属时, 两刃铣刀较四刃铣刀更利于切屑的排出, 刀具的使用寿命较长。

3) Ta-C 涂层铣刀与普通类金刚石涂层铣刀加工工件的表面粗糙度总体呈上升趋势, 两刃 Ta-C 涂层铣刀加工出来的工件表面质量较好, 平均粗糙度为  $0.692 \mu\text{m}$ , 与金刚石涂层刀具加工出来的表面平均粗糙度  $0.650 \mu\text{m}$  相近, 降低了加工成本。

4) 刀刃数量相同且结合力良好的涂层铣刀相比较, Ta-C 涂层铣刀较普通类金刚石涂层铣刀加工出来的工件表面粗糙度平均值低, Ta-C 涂层铣刀更适合加工韧性较强的金属。

### 参考文献:

[1] UCUN I, ASLANTAS K, BEDIR F. The Performance of

DLC-coated and Uncoated Ultra-fine Carbide Tools in Micromilling of Inconel 718[J]. Precision Engineering, 2015, 41: 135—144.

[2] KHADEM M, PENKOV O V, PUKHA V E, et al. Ultra-thin Nano-patterned Wear-protective Diamond-like Carbon Coatings Deposited on Glass Using a C 60 Ion Beam[J]. Carbon, 2014, 80(1): 534—543.

[3] MA Guo-jia, LIN Guo-qiang, WANG Ming-e, et al. Wettability Study of Different Films Prepared by Magnetron Sputtering Hybrid Deposition on the Ti Alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42: 170—173.

[4] 苏俊宏, 葛锦蔓, 徐均琪, 等. 类金刚石薄膜及其进展[J]. 应用光学, 2015, 36(5): 799—806.

SUN Jun-hong, GE Jin-man, XU Jun-qi, et al. Diamond-like Carbon Films and Their Progress[J]. Applied Chemistry, 2015, 36(5): 799—806.

[5] 蔡建, 杨巍, 柯培玲, 等. 氩气流量对四面体非晶碳膜结构和摩擦性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(8): 740—745.

CAI Jian, YANG wei, KE Pei-ling, et al. Influence of Ar Flow Rate on Microstructures and Tribological Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Films[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(8): 740—745.

[6] 于翔, 张旭, 王成彪, 等. 四面体无定型无氢非晶碳膜的制备及其摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 135—139.

YU Xiang, ZHANG Xu, WANG Cheng-biao, et al. Preparation and Study of the Tribological Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon Film[J]. Journal of Tribology, 2005, 25(2): 135—139.

[7] 袁跃峰. 硅铝合金切削加工性研究[D]. 太原: 中北大学, 2006.

YUAN Yue-feng. Study on Machinability of Aluminum-Silicon Alloy[D]. Taiyuan: North University of China, 2006.

[8] 汪洋. 切削铝合金汽车零部件的“软”涂层刀具的试验与研究[J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(7):46—49.

WANG Yang. Research and Test on Soft Coating Tools for Cutting Aluminum Automobile Parts[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2014, 42(7):46—49.

[9] 仇健, 李晓飞, 马晓波, 等. 硬质合金立铣刀高速铣削铝合金切削力实验研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(13): 1555—1560.

QIU Jian, LI Xiao-fei, MA Xiao-bo, et al. Experimental Study of Cutting Forces on High Speed Milling Aluminum Alloy Using Carbide End Mill[J]. Chinese Journal of

- Mechanical Engineering, 2012, 23(13): 1555—1560.
- [10] MONTOYA M, CALAMAZ M, GEHIN D, et al. Evaluation of the Performance of Coated and Uncoated Carbide Tools in Drilling Thick CFRP/Aluminium Alloy Stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2111—2120.
- [11] QU Sheng-guan, SUN Fu-jian, ZHANG Liang, et al. Effects of Cutting Parameters on Dry Cutting of Aluminum Bronze Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1): 669—698.
- [12] 张而耕, 黄彪, 陈强. 金刚石涂层立铣刀与 PCD 立铣刀切削铝合金性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 149—153.
- ZHANG Er-geng, HUANG Biao, CHEN Qiang. Research on Performance of Coating End Mill and PCD End Mill Cutting Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 149—153.
- [13] 冯吉福, 林峰, 李立惟, 等. PDC 刀具切削硅铝合金的表面粗糙度研究[J]. 超硬材料工程, 2013, 25(3): 6—10.
- FENG Ji-fu, LIN Feng, LI Li-wei, et al. Study on Surface Roughness of Turning Silicon Aluminum Alloy with PCD Cutting Tool[J]. Superhard Material Engineering, 2013, 25(3): 6—10.
- [14] 肖长江, 朱玲艳, 李娟, 等. 切削镁铝合金用金刚石单晶刀具的制备和切削研究[J]. 工具技术, 2016, 50(6): 51—55.
- XIAO Chang-jiang, ZHU Ling-yan, LI Juan, et al. Preparation and Cutting Research of Single Crystal Diamond Tool for Cutting Magnesium-Aluminum Alloy[J]. Tool Engineering, 2016, 50(6): 51—55.
- [15] 宫笃麓. 浅议干式切削技术[J]. 科技创新导报, 2011(30): 79.
- GONG Du-chi. Extraction of Dry Cutting Technology[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(30):79.
- [16] 仲为武. 铝合金干切削和少量润滑切削试验及模糊监控研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHONG Wei-wu. Experimental Research on Dry Cutting/Alittle Quantity Lubricant Cutting of Aluminum Alloy and Process Fuzzy Monitoring[D]. Nanjin: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [17] 马平, 胡爱玲, 白钊. 高速干切削及其关键技术[J]. 新技术新工艺, 2004(4): 14—17.
- MA Pin, HU Ai-ling, BAI Zhao. High Speed Dry Cutting and Its Key Technologies[J]. New Technology and New Process, 2004(4): 14—17.