

金刚石涂层立铣刀与 PCD 立铣刀切削铝合金性能研究

张而耕, 黄彪, 陈强

(上海应用技术学院 机械工程学院, 上海 201418)

摘要: 目的 研究金刚石涂层立铣刀和 PCD 立铣刀切削铝合金时, 铝合金表面粗糙度以及刀具的使用寿命。方法 通过实验比较 1 μm 、5 μm 金刚石涂层四刃立铣刀和 PCD 立铣刀在高速干式切削条件下切削铝合金的性能, 并通过走刀距离比较不同状态刀具的使用寿命以及在走刀过程中的粘刀情况, 用表面粗糙度测量仪测量加工的铝合金表面粗糙度。结果 1 μm 、5 μm 金刚石涂层立铣刀加工铝合金失效距离分别为 25 m、75 m, PCD 立铣刀加工铝合金 96 m 后失效; 1 μm 、5 μm 金刚石涂层立铣刀切削铝合金表面粗糙度平均值分别为 1.07 μm 、1.10 μm , PCD 立铣刀切削铝合金表面粗糙度平均值为 0.80 μm 。结论 5 μm 金刚石涂层立铣刀是 1 μm 金刚石涂层立铣刀寿命的 5 倍, PCD 立铣刀使用寿命最长; 1 μm 、5 μm 金刚石涂层立铣刀切削铝合金表面较 PCD 立铣刀粗糙, 在相同切削环境下切削铝合金时, PCD 立铣刀使用寿命较金刚石涂层立铣刀提高, 且在抑制粘刀方面效果十分明显。

关键词: 聚晶金刚石 PCD; 金刚石涂层; 立铣刀; 粘刀

中图分类号: TG174.444; TG71 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)05-0149-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.023

Performance of Coating End Mill and PCD End Mill Cutting Aluminum Alloy

ZHANG Er-geng, HUANG Biao, CHEN Qiang

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

ABSTRACT: **Objective** To research the performance of coating end mill and PCD end mill on cutting aluminum alloy. **Methods** In this paper, four-flute end mill with 1 μm diamond coating, four-flute end mill with 5 μm diamond coating and PCD end mill were taken as the objects to study the tool life and chip sticking situation, the feeding length of cutting aluminum alloy in the process of high-speed dry cutting of which was compared in the experiment, furthermore, the surface roughness of aluminum alloy was tested with the surface roughness tester. **Results** The results showed that the failure distance of end mill with 1 μm diamond coating or 5 μm diamond coating was 25 meter or 75 meter and that of PCD end mill was 96 meter when cutting aluminum alloy. The average surface roughness of end mill with 1 μm diamond coating or 5 μm diamond coating was 1.07 μm

收稿日期: 2015-12-25; 修订日期: 2016-03-11

Received: 2015-12-25; Revised: 2016-03-11

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

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

or 1.10 μm and that of PCD end mill was 0.80 μm . **Conclusion** The life of the end mill with 5 μm diamond coating was four times more than that of the end mill with 1 μm diamond coating, while the PCD end mill has the longest service life. The roughness of end mill with 1 μm diamond coating or 5 μm diamond coating was higher than that of PCD end mill when cutting aluminum alloy. PCD end mill had longer life than diamond coating end mill and could also significantly reduce the sticking situation when cutting aluminum alloy in the same cutting environment.

KEY WORDS: polycrystalline diamond PCD; diamond coating; end mill; stick knife

随着机床的更新换代和涂层技术及涂层材料的不断更新,现代机械加工技术朝着高速度、高精度方向发展。随着对复杂零件、特种零件需求的增加以及对工件表面质量要求的提高,对切削工具的性能也提出了更高的要求。开发在各种切削环境下具有良好切削性能且使用寿命长的超硬切削工具,是必然的发展趋势^[1-2]。

金刚石是目前地球上发现的,众多天然存在的物质中最坚硬的物质,具有化学性质稳定和导热率高等特性。金刚石刀具是加工 SiC 质量分数达到 15% 以上的难加工材料的理想工具,但自然界中蕴藏的天然金刚石资源极为稀少,难以制备成刀具毛坯材料。经研究,金刚石可以作为刀具涂层材料,且制备的金刚石涂层刀具使用寿命长,加工精度高。此外,金刚石涂层可以被涂在各种形状刀具表面。因此,金刚石涂层工具在切削加工领域具有广阔的应用前景^[3-8]。

Montoya 等^[9]用 TiAlCrN 和 AlTiSiN 涂层刀具切削铝合金,发现涂层刀具的寿命和未涂层刀具相当。Qu 等^[10]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。也有学者对金刚石涂层硬质合金刀具和未涂层刀具进行铝合金切削性能研究,发现当涂层刀具达到稳定磨损阶段时,无涂层刀具磨损较快,涂层刀具耐磨性较好,加工工件表面质量相对较稳定^[11-12]。

本文通过实验,比较涂层膜厚为 1 μm 、5 μm 的 $\phi 12\text{mm}$ 四刃涂层立铣刀和 PCD 立铣刀在高速干式切削条件下切削铝合金性能,通过切削距离比较不同状态刀具的使用寿命以及在走刀过程中的粘刀情况。

1 实验

在前人的研究基础上^[9-11],本文对金刚石涂层立铣刀和 PCD 立铣刀切削铝合金性能进行测试,实验刀具的编号和状态见表 1。

表 1 实验刀具的编号和状态

Tab.1 Serial number and status of the experimental tools

| 编号 | 刀具状态 |
|----|--|
| 1 | 四刃 $\phi 12\text{ mm}$ 螺旋标准立铣刀, 涂层 1 μm |
| 2 | 四刃 $\phi 12\text{ mm}$ 螺旋标准立铣刀, 涂层 5 μm |
| 3 | 四刃 $\phi 12\text{ mm}$ 螺旋标准 PCD 立铣刀 |

实验用金刚石涂层刀具,先对牌号为 YG6 的硬质合金基体进行抛光、酒精清洗、蒸馏水清洗、烘干处理,再用化学气相沉积法在合金基体上沉积一层金刚石膜涂层,然后将处理好的基体放入型号为 CY-OTF-1200X-5-III-D4 的涂层设备中进行自动镀膜。

金刚石涂层的微观形貌如图 1 所示,从图中可以看出,金刚石涂层晶粒细小、呈球形,晶粒间相互紧密结合在一起形成薄膜,金刚石涂层的表面粗糙度低,较为平坦光滑。

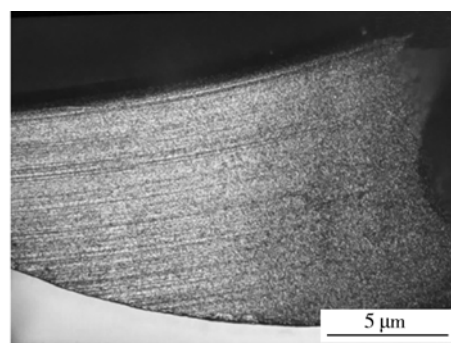


图 1 金刚石涂层表面微观形貌

Fig.1 Surface microstructure of diamond coating

实验采用的刀具材料为硬质合金,一般理想的工具材料必须具备好的耐磨性和高的断裂韧性,高速钢工具和陶瓷工具不同时具备这两个特点,前者有较好的断裂韧性,但其耐磨性相对较低,后者有较好的耐磨性,但断裂韧性又相对较低。WC-Co 硬质合金综合了高速钢材料韧性好、陶瓷材料硬度高等优点,是一种理想的刀具材料。以硬质合金为基体,将金刚石涂层附着在硬质合金上制成金刚石涂

层工具，具备极高的硬度和高韧性^[13-14]。

实验采用的涂层材料是金刚石涂层，硬度非常高，如果基体的硬度和涂层材料的硬度相差大则涂层的优越性得不到体现。由于基体硬度不足，在切削阻力作用下涂层易剥落或塌陷，从而严重影响刀具的寿命，以硬质合金为基体，金刚石涂层的性能的优越性可以得到体现。

实验的加工材料为铝合金，铝合金既弥补了纯铝在强度上的不足，同时也保留了良好的塑性，比强度远高于钢，耐磨性也优于钢。生活中需要的 Si 含量较高的铝合金日益增多，但是 Si 的质量分数在 12% 上的高硅铝合金在加工时极易造成刀具损伤，降低刀具的使用寿命。另外，在切削铝合金时刀具刃部容易发生粘刀现象，加工工件的表面粗糙度受到影响^[15-18]。

实验采用高速干切削，主轴转速为 7500 r/min，进给量为 3000 mm/min，背吃刀量为 0.1 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，也是一种对环境污染源头进行控制的清洁、环保的加工工艺。高速干切削中，因缺乏切削液的冷却、润滑和排屑作用，会加快刀具的磨损^[19-20]。近些年随着涂层刀具技术的快速发展，各种涂层材料不断涌现，使得涂层刀具的性能也得到的提升^[21-22]。

本文采用 NDT110 测量仪测量表面粗糙度，测量范围为 0.05~15 μm，示值精度为 0.01 μm，示值误差为±(7~10)%。1 μm 金刚石涂层的 φ12 mm 四刃立铣刀切削铝合金时每加工 5 m 取一个观测点测量加工表面粗糙度值，5 μm 金刚石涂层的 φ12 mm 四刃立铣刀和 PCD 立铣刀切削铝合金时第一个观测点取加工 5 m 处的点，之后每加工 10 m 取一个观测点测量加工表面粗糙度值。

2 结果及讨论

实验通过比较 1 μm、5 μm 金刚石涂层立铣刀和 PCD 立铣刀在高速干式切削条件下切削硅质量分数达 12.2% 的 4032 铝合金的性能，并通过切削距离比较不同状态刀具的使用寿命以及在走刀过程中的粘刀情况，用表面粗糙度测量仪测量加工的铝合金表面粗糙度。高速干式切削铝合金加工实验结果见表 2。

表 2 高速干式切削铝合金加工实验结果
Tab.2 The experimental results of high-speed dry cutting aluminum alloy

| 刀具 编号 | 背吃刀量 /mm | 进给量 /(mm·min ⁻¹) | 主轴转速 /(r·min ⁻¹) | 加工失效 距离/m |
|----------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 1 | 0.1 | 3000 | 7500 | 15 |
| 2 | 0.1 | 3000 | 7500 | 75 |
| 3 | 0.1 | 3000 | 7500 | 96 |

表 2 中的加工失效距离是 3 次切削铝合金实验结果的平均值，失效立铣刀为刀具体后刀面磨损宽度 0.05 mm，切削实验后的失效立铣刀如图 2 所示。由表 2 可见，2 号刀具的加工失效距离是 1 号的 5 倍。3 号 PCD 立铣刀在切削中与铝合金工件的摩擦系数小，铝合金工件对 PCD 立铣刀的磨损量少，PCD 立铣刀加工距离最长。

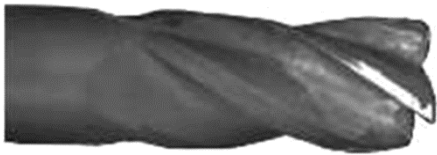


图 2 立铣刀切削实验后的失效照片
Fig.2 Failure figure of end mill after experiment

金刚石涂层立铣刀和 PCD 立铣刀在加工铝合金时，在粘刀方面有明显的区别，主要体现在加工工件表面的粗糙度。PCD 立铣刀加工出来的工件如图 3 所示，金刚石涂层的硬质合金铣刀加工出来的工件如图 4 所示，金刚石涂层的硬质合金铣刀加工铝合金表面比 PCD 立铣刀加工的铝合金表面明显要粗糙。

1 μm、5 μm 金刚石涂层的 φ12 mm 四刃立铣刀和 PCD 立铣刀加工出来的工件表面粗糙度值如



图 3 PCD 立铣刀加工出来的表面
Fig.3 Surface processed by PCD end mill



图 4 金刚石涂层立铣刀加工出来的表面
Fig.4 Surface processed by diamond coating end mill

图 5 所示。1 μm 、5 μm 金刚石涂层立铣刀切削铝合金表面粗糙度平均值分别为 1.07 μm 、1.10 μm ，PCD 立铣刀切削铝合金表面粗糙度平均值为 0.80 μm 。1 μm 金刚石涂层的 $\phi 12\text{ mm}$ 四刃立铣刀和 5 μm 金刚石涂层的 $\phi 12\text{ mm}$ 四刃立铣刀和 PCD 立铣刀切削铝合金时的表面粗糙度值，随着加工距离的增加，工件表面的粗糙度总体呈上升趋势。1 μm 金刚石涂层的立铣刀和 5 μm 金刚石涂层立铣刀切削铝合金时，第一个观测点粗糙度值比第二个观测点粗糙度值高的原因在于，加工初期刀尖发生粘着现象，切屑的排出受到很大影响，对加工工件表面粗糙度造成不利影响。此后随着切削的进行，涂层刀具刃口产生磨损，粘在金刚石涂层立铣刀上的粘屑从刀具上脱落，这使加工面粗糙度有所降低。随着切削距离的增加，刀具进入稳定磨损阶段，表面粗糙度逐渐上升直至涂层全部磨损。PCD 立铣刀切削铝合金时第一个观测点的粗糙度值高于第二个测点的粗糙度值的原因在于，加工初期立铣刀刃口锋利，易产生细微划痕。

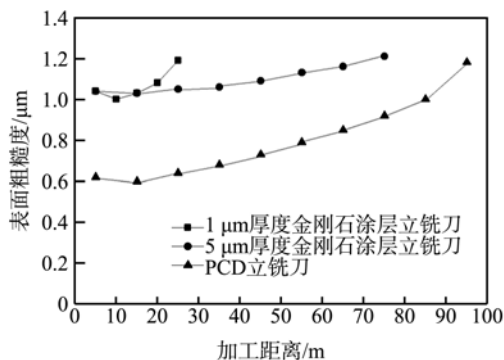


图 5 铝合金表面粗糙度值
Fig.5 Surface roughness value of aluminum alloy

3 结论

1) 5 μm 金刚石涂层立铣刀寿命约是 1 μm 金刚石涂层立铣刀寿命的 5 倍，PCD 立铣刀的寿命最长。

2) 实际应用中，立铣刀的金刚石涂层会适当加厚，立铣刀的使用寿命将会得到提升，加工过程中加工相同工件刀具的换刀次数将减少，加工效率得到提高。

3) 1 μm 、5 μm 金刚石涂层立铣刀和 PCD 立铣刀加工出来的工件表面粗糙度值总体呈上升的趋势，PCD 立铣刀抑制粘刀方面效果十分明显，加工出来的铝合金工件的表面粗糙度得到了显著改善。

参考文献

- [1] 吕继磊, 满卫东. 硬质合金 CVD 金刚石涂层最新进展[J]. 硬质合金, 2011, 28(5): 321—331.
LYU Ji-lei, MAN Wei-dong. The Latest Progress in Cemented Carbide CVD Diamond Coating[J]. Carbide, 2011, 28(5): 321—331.
- [2] 张而耕, 陈强. 类金刚石涂层的研究进展及其应用[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(5): 60—65.
ZHANG Er-geng, CHEN Qiang. The Research Progress and Application of Diamond-like Coating[J]. Powder Metallurgy Industry, 2015, 25(5): 60—65.
- [3] 黄世玲, 张迎九, 杨德林. 金刚石化学镀镍的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 65—70.
HUANG Shi-ling, ZHANG Ying-jiu, YANG De-lin. Research of Diamond Electroless Plating Ni[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 65—70.
- [4] 马玉平, 陈明, 孙方宏. CVD 金刚石涂层硬质合金衬底预处理新方法研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 1: 7—12.
MA Yu-ping, CHEN Ming, SUN Fang-hong. New Method Research on CVD Diamond Coated Cemented Carbide Substrate Pretreatment[J]. Diamond Abrasives and Engineering, 2009, 1: 7—12.
- [5] 徐泓辉. 金刚石涂层刀具硬质合金基体显微结构与力学性能的关系[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
XU Hong-hui. The Relationship between Diamond Coated Tools of Cemented Carbide Substrates Microstructure and Mechanical Properties[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [6] 许幸新, 张晓辉, 张春林, 等. CVD 金刚石涂层刀具铣削高体分 SiC_p/Al 复合材料特性研究[J]. 现代制造工程, 2014, 7: 71—76.

- XU Xing-xin, ZHANG Xiao-hui, ZHANG Chun-lin, et al. Research on Properties of CVD Diamond Coated Tools Milling High Body SiC_p/Al Composite Materials[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014, 7: 71—76.
- [7] 张晓辉, 许幸新, 张春林, 等. YT 类硬质合金金刚石涂层成形刀具对高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的铣削特性研[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(5): 60—64.
- ZHANG Xiao-hui, XU Xing-xin, ZHANG Chun-lin, et al. Research on YT Carbide Diamond Coating Forming Cutter for High Volume Fraction Milling Characteristics of SiC_p/Al Composite Materials[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(5): 60—64.
- [8] 江文清, 骆忠良. 聚晶金刚石薄膜合成工艺的研究[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 114—117.
- JIANG Wen-qing, LUO Zhong-liang. Research of Polycrystalline Diamond Thin Film Synthesis Process[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 114—117.
- [9] MONTOYA, CALAMAZ. 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.
- [10] 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.
- [11] 杨海东, 孔晓玲, 韦山. 金刚石涂层刀具干切削硅铝合金性能研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2003, 26(6): 1276—1278.
- YANG Hai-dong, KONG Xiao-lin, WEI Shan. Performance Study Diamond Coated Tools Dry Cutting Silicon Aluminum Alloy[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2003, 26(6): 1276—1278.
- [12] 杨小璠, 李友生, 鄢国洪, 等. 金刚石涂层刀具铣削高硅铝合金的性能研究[J]. 工具技术, 2012, 46(5): 7—10.
- YANG Xiao-fan, LI You-sheng, YAN Guo-hong, et al. Performance Research Diamond Coated Tools Milling High Silicon Aluminum Alloy[J]. Tool Technology, 2003, 26(6): 1276—1278.
- [13] 孟宪明, 唐伟忠, 黑立富. 化学气相沉积金刚石涂层硬质合金工具及其应用[J]. 新材料产业, 2006, 10: 65—69.
- MENG Xian-ming, TANG Wei-zhong, HEI Li-fu. Chemical Vapor Deposition of Diamond Coated Cemented Carbide Tools and Applications[J]. Advanced Material Industry, 2006, 10: 65—69.
- [14] ZHANG Lin, LIU Zi, TIAN Wei, et al. Experimental Studies on the Performance of Different Structure Tools in Drilling CFRP/Al Alloy Stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 241—251.
- [15] 丁伟. 金刚石涂层刀具在有色金属加工中的研究与应用[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- DING Wei. The Research and Application of Diamond Coated Tools on Non-ferrous Metal Processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [16] DAISUKE H. Ultra-precision Cutting of an Aluminum Alloy Improvement of the Cutting Edge Shape Using a Straight Diamond Tool[J]. International Conference on Renewable Energy Research & Applications, 2012, 2(1): 1—6.
- [17] FU Xiu-li. Research on Predictive Model Surface Roughness in High Speed Milling for Aluminum Alloy 7050-T7451[C]. International Conference on Computing, Control & Industrial Engineering, 2010, 2: 186—189.
- [18] 严伟强, 杨文忠. 3A21 型铝合金高效复合型表面处理液的工艺研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 109—113.
- YAN Wei-qiang, YANG Wen-zhong. Technology Research of 3A21 Aluminum Alloy Efficient Composite Liquid Surface Treatment[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 109—113.
- [19] 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. Aluminum Alloy Dry or a Small Amount of Lubrication Cutting Test and Fuzzy Control Research[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [20] 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 Ping, HU Ai-ling, BAI Zhao. High-speed Dry Cutting and Key Technologies[J]. New Technology and New Technology, 2004, 4: 14—17.
- [21] 刘凯. 金刚石涂层刀具在干式切削中的性能分析[J]. 机械制造与自动化, 2013, 1: 63—65.
- LIU Kai. Analysis of Diamond Coated Cutting Tools in Dry Cutting Performance[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2013, 1: 63—65.
- [22] LIANG Xue-bing. Predicted Interfacial Thermal Conductance and Thermal Conductivity of Diamond/Al Composites with Various Interfacial Coatings[J]. Rare Metals, 2011, 30(5): 544—549.