

不同材质刀具在7075铝合金高速铣削中的磨损研究

邵伟平¹ 张 韬^{1,2} 彭广盼¹ 薛 喆²

(1 无锡职业技术学院 机械技术学院, 无锡 214121)

(2 张家港市微纳新材料科技有限公司, 苏州 201316)

文 摘 为了研究7075铝合金高速铣削中不同材质刀具的磨损与选用,采用化学气相沉积法(CVD)制备微米(MCD)/纳米(NCD)金刚石涂层刀具,利用场发射扫描电镜观察膜层的表面形貌,结合拉曼谱仪分析CVD金刚石涂层刀具薄膜的结构和成分;分别采用同规格尺寸的硬质合金刀具、MCD涂层刀具在无润滑干切条件下,进行粗加工高速铣削试验,观测两种刀具在加工一定距离后的磨损状况;分别采用同规格尺寸的硬质合金刀具、MCD涂层刀具、NCD涂层刀具在无润滑干切条件下,进行精加工高速铣削试验,观测和分析工件精加工铣削后的表面粗糙度值。结果表明:在大切深高速粗加工铣削7075铝合金时,MCD涂层刀具的寿命为硬质合金刀具的3倍;在小切削深度大进给的高速精加工7075铝合金中,三种刀具铣削后的工件表面粗糙度平均值分别为0.981、1.122和0.960 μm ,NCD涂层刀具的加工效果要优于MCD涂层刀具;同时通过同一材质刀具的粗、精加工试验对比,发现同规格尺寸的刀具在小切深大进给高速精加工中的寿命是大切深大进给高速粗加工寿命的10倍。这说明7075铝合金的粗加工铣削优选MCD涂层刀具,精加工铣削优选NCD涂层刀具。

关键词 金刚石涂层,铣刀,粗加工,精加工,切削参数,磨损寿命,工件表面质量

中图分类号:TH145.9

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.05.014

Study on the Wear of Different Materials Cutting Tools in High Speed Milling of 7075 Aluminum Alloy

SHAO Weiping¹ ZHANG Tao^{1,2} PENG Guangpan¹ XUE Zhe²

(1 Department of Mechanical Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121)

(2 Zhangjiagang Micro Nano Materials Technology Co. Ltd., Suzhou 201316)

Abstract In order to study the wear and selection of different materials cutting tools in high speed milling of 7075 aluminum alloy, micro (MCD)/nano (NCD) diamond coated tools were prepared by chemical vapor deposition. The surface morphology of the film was observed by field emission scanning electron microscopy. Analysis of the structure and composition of CVD diamond coated tool films were analyzed by Raman spectroscopy. The same size cemented carbide cutting tool and MCD coated cutting tool were used to carry out rough machining high-speed milling experiment under the condition of dry cutting without lubrication. The wear condition of the two kinds of cutting tools after machining a certain distance was observed. In order to observe and analyze the surface roughness of the workpiece after finish milling, the same size cemented carbide tools, MCD coated tools and NCD coated tools were used to finish high-speed milling experiments under the condition of dry cutting without lubrication. The results show that the life of MCD coated tool is three times longer than that of cemented carbide tool when milling 7075 aluminum alloy with large depth and high speed. In the high-speed finish machining of 7075 aluminum alloy with small cutting depth and large feed, the average surface roughness of the workpiece milled by three kinds of cutting tools is 0.981 μm , 1.122 μm and 0.960 μm . The machining effect of NCD coated tool is better than that of MCD coated tool. At the same time, through the comparison of rough and finish machining experiments of the same material tool, it is found that the life of the same specification tool in small cutting depth and large feed high-speed finish machining is ten times of that in large cutting depth and large feed high-speed rough machining. The results show that MCD coated tool is the best for rough milling and ncd coated tool is the best for finish milling of 7075 aluminum alloy.

收稿日期:2021-07-30

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20201142)

第一作者简介:邵伟平,1973年出生,高级实验师,主要从事数控技术与加工工作。E-mail:swp523@sina.com

通信作者:张韬,1984年出生,博士,副教授,主要从事CVD金刚石的制备及应用工作。E-mail:zhangt@wxit.edu.cn

Key words Diamond coating, Milling cutter, Rough milling, Finish milling, Cutting parameters, Wear life, Workpiece surface quality

0 引言

7075 铝合金是一种常用的高强度合金,合金材料中包含有锌和镁,其中锌在里面是主要合金元素,加了少量镁,使合金材料的热处理效果比一般的铝锌二元合金更佳^[1]。同时合金材料中一般都加入了少量的铜、铬等,使材料拥有非常高的强度,抗拉强度 ≥ 560 MPa,适合飞机构架及高强度配件^[2],很多数控加工切削制造的零部件用的都是 7075 铝合金。由于 7075 铝合金材料强度高、比较硬,加工薄壁工件时容易变形,所以在加工工艺上一般是先粗加工,然后半精修和精加工。针对 7075 铝合金的切削加工研究,殷继花等^[3]选用硬质合金刀具进行铣削实验,研究了高速铣削锯齿形切屑的形成过程及机理;李小龙等^[4]以硬质合金刀具为研究对象,通过四因素三水平正交试验对刀具磨损行为进行了研究;马殿文等^[5]选用 PCD 刀具对 7075 铝合金进行车削试验,对切削试验中的切削力和表面粗糙度进行了分析;候鹏宇^[6]选用单晶金刚石刀具进行铝合金车削试验,研究了单晶金刚石刀具在较长切削距离下切削铝合金的刀具磨损和热变形问题。可以看出,在 7075 铝合金工件的切削加工研究中,大都采用了硬质合金刀具,有的还选用了 PCD 刀具与单晶金刚石刀具进行车削试验研究。由于 7075 铝合金材料的高强度高硬度特性,切削加工过程中硬质合金刀具的磨损往往比较厉害,刀具表面容易粘结积屑瘤,产生粘结磨损;单晶金刚石刀具的磨损形式主要是机械摩擦磨损并伴有崩刃和断裂现象;PCD 刀具的加工表面质量要好于硬质合金刀具,但价格成本比较高。

化学气相沉积法(CVD)金刚石涂层刀具是一种在硬质合金成形刀具的基体表面上,利用 CVD 沉积了一层金刚石薄膜涂层的刀具^[7]。金刚石薄膜具有优异的力学性能,能直接沉积在不同形状的衬底上,是一种理想的工业涂层^[8-9],金刚石薄膜涂层的刀具提高了耐磨性和表面硬度,延长了刀具的使用寿命,对切削一些铝、铝硅合金、石墨、氧化锆等有色金属及硬脆的难加工材料有较好的效果^[10-14]。CVD 金刚石涂层刀具主要有两种:微米金刚石(MCD)涂层刀具和纳米金刚石(NCD)涂层刀具,其中 MCD 涂层刀具表面粗糙度相对较大韧性稍差,但硬度很高;NCD 涂层刀具表面粗糙度相对较小韧性高,但硬度相对稍低^[15]。随着 7075 铝合金材料在工业生产中的大量应用,发现有关 CVD 金刚石涂层刀具用于 7075 铝合金切削加工的相关研究报道还比较少,查阅文献资料,只有王宜豹等^[16]在无润滑干切条件下用单层金刚石涂层刀具和多层金刚石涂层刀具对 7075

铝合金的切削性能进行了比较;张程焱等^[17]选取纳米金刚石涂层刀具对 7075 铝合金进行了干式车削实验,研究了切削参数对表面完整性的影响规律。已有的研究主要是针对金刚石涂层刀具的制备以及通过车削实验来观察金刚石涂层刀具的加工工艺性能;而金刚石涂层刀具用于 7075 铝合金的高速铣削实验以及不同材质刀具对 7075 铝合金的切削性能比对研究至今还很少。本文根据 7075 铝合金的切削性能、机床性能以及切削加工工艺特点,选取粗、精加工两组铣削参数来进行高速铣削试验,选取硬质合金刀具、微米(MCD)/纳米(NCD)金刚石涂层刀具在同一组参数条件下对 7075 铝合金进行高速干切削,在工件铣削加工一定长度后对刀具的磨损、工件表面粗糙度进行比对研究,分析不同材质刀具对 7075 铝合金材料加工的适用性。

1 实验

1.1 金刚石涂层刀具制备

采用 7075 铝合金切削铣刀为 YG6 的三刃平底立铣刀,其直径为 $\Phi 8$ mm。为保证金刚石涂层质量,首先应对铣刀基体进行预处理。先将数把该型号铣刀浸泡在 Murakami 溶液($\text{KOH}:\text{K}_3(\text{Fe}(\text{CN})_6):\text{H}_2\text{O} = 1:1:10$)中进行 30 min 超声清洗,再将其浸泡在 Caro 混合酸溶液($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 1:10$)中进行 5 min 的刻蚀以去除刀具表层的钴元素^[18],从而提高金刚石薄膜与硬质合金基体之间的附着强度。再对酸碱预处理后的刀具进行研磨处理,每把刀具须处理约 5 min,研磨粉可采用核桃壳和金刚石混合颗粒,主要是去除刀具表面的疏松层和残留的钴元素含量。研磨之后,所有样品都需要在去离子水和丙酮的超声波浴中清洗 5 min,以去除混合颗粒。薄膜的沉积在密闭的真空反应室中进行,用丙酮溶液作为碳源,试验用钨丝作为热丝提供热源,热丝温度保持在 2 200 °C 左右,基体表面温度保持在 800 °C 左右^[19]。

制备结束后利用场发射扫描电镜(FESEM, Zeiss ULTRA55)、拉曼谱仪(SPEX1403)对涂层铣刀上的金刚石薄膜的表面形貌及纯度进行表征^[20]。

1.2 7075 铝合金铣削实验

为了对比不同材质的刀具对 7075 铝合金的铣削性能,将实验分为粗加工铣削实验和精加工铣削实验两组进行,其切削参数的选用如表 1 所示。在粗加工实验中没有用纳米金刚石涂层铣刀来做实验比对是因为工件的粗加工一般主要是去除工件的大部分余量,不追求工件的表面质量和精度要求,粗晶粒的微米金刚石涂层铣刀相对于纳米金刚石涂层铣刀性价比,切削性能相差不大,同时在粗加工实验中主

要是观察涂层刀与未涂层刀之间的磨损情况和使用寿命。采用沈阳机床公司生产的机床,电机直连驱动方式,可实现 10 000 r/min 的主轴转速和 8 m/min 进给速度的高速铣削加工,该机床 x 轴、 y 轴、 z 轴轴向定位精度和重复定位精度分别为 8 和 5 μm ; 样件采用 200 mm \times 100 mm \times 50 mm 的方块料。

表 1 粗、精加工铣削实验切削参数

Tab. 1 Cutting parameters of rough and finish milling experiments

分组实验	a_p/mm	$v_f/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	$n/r\cdot\text{min}^{-1}$	a_e/mm
粗加工	2	2 000	5 000	4
精加工	0.2	5 000	8 000	4

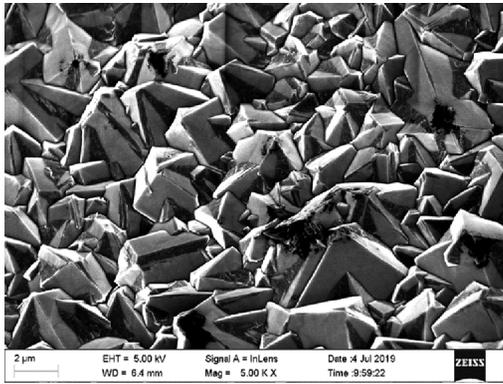
采用型号为 Motic SMZ-171 的智能体视显微镜来观测刀具切削刃的磨损程度以及工件切削后的表面形貌;采用型号为 SJ-310 的日本三丰粗糙度仪来检测工件切削后的表面粗糙度值。

2 结果分析

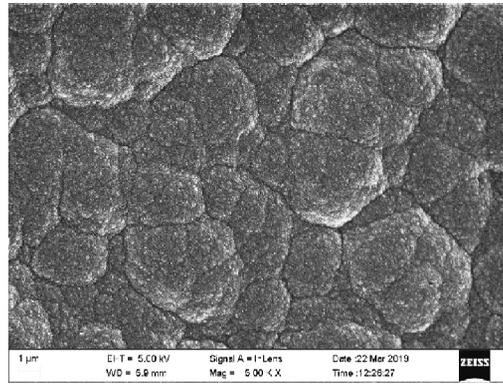
2.1 CVD 金刚石涂层刀具物理性能

两种制备好的铣刀经 FESEM 观测后,可以看到:微米金刚石涂层的晶粒尺寸在 1~4 μm 波动,晶粒呈 (111) 取向生长,且排布致密,无明显生长缺陷;纳米金刚石涂层表面由许多球形纳米颗粒组成,粒径为 20~40 nm,呈团簇状生长,表面致密,且其表面平整度较微米涂层有所提高,如图 1 所示。

图 2 是两种涂层对应的 Raman 谱图,由图 2(a) 可以看出微米金刚石涂层仅在 1 335.86 cm^{-1} 处有一明显特征峰,这表面薄膜的主要成分为金刚石 sp^3 结构,说明金刚石纯度较高。由图 2(b) 可以看出纳米金刚石涂层在 1 332 cm^{-1} 附近的特征峰的宽度明显增加,这表示薄膜中纳米尺度的金刚石晶粒逐渐增多,同时,代表石墨相结构的 D 峰 (~1 350 cm^{-1}) 和 G 峰 (~1 580 cm^{-1}) 也很明显,它们是由薄膜中的 sp^2 成分引起的^[18]。



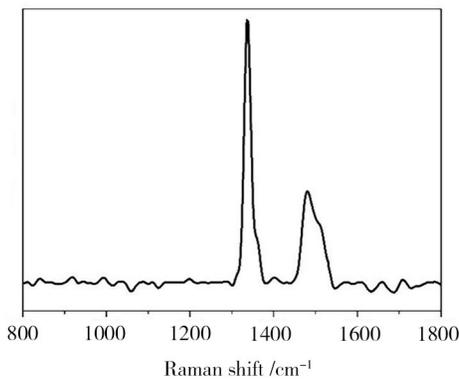
(a) 微米金刚石涂层刀具



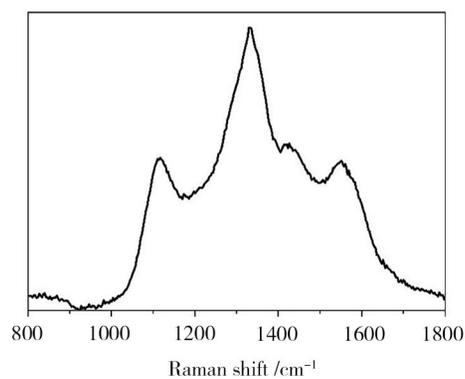
(b) 纳米金刚石涂层刀具

图 1 微米和纳米金刚石涂层刀具的表面形貌

Fig. 1 Surface topography of diamond coated tools



(a) 微米金刚石涂层刀具



(b) 纳米金刚石涂层刀具

图 2 微米和纳米金刚石涂层刀具的拉曼光谱

Fig. 2 Raman spectra of diamond coated tools

2.2 粗加工铣削实验分析

图 3 是硬质合金铣刀刀刃在未切削工件及分别切削工件 10、20、30 m 后的检测情况。由图 3(a) 看

到硬质合金铣刀在未切削前,侧刃及端面刃完整,侧刃与端面刃交界处的刀尖部位有倒角。直径 $\Phi 8$ mm 的硬质合金铣刀在粗加工铣削 7075 铝合金 10 m 后,

刀刃部位就出现了明显的磨损崩刃现象,如图3(b)所示。由于磨损范围较小且切削加工是面铣削,为了能比对不同材质刀具的切削性能,试验继续进行下去;铣削到20 m后,刀尖部位的磨损区域扩大;铣

削30 m后,经过体视显微镜观测到磨损崩刃部位扩大严重,刀具已不能用于铣削加工,如图3(d)所示。图4是微米金刚石涂层铣刀刀刃在未切削工件及分别切削工件10、20、30 m后的检测情况。

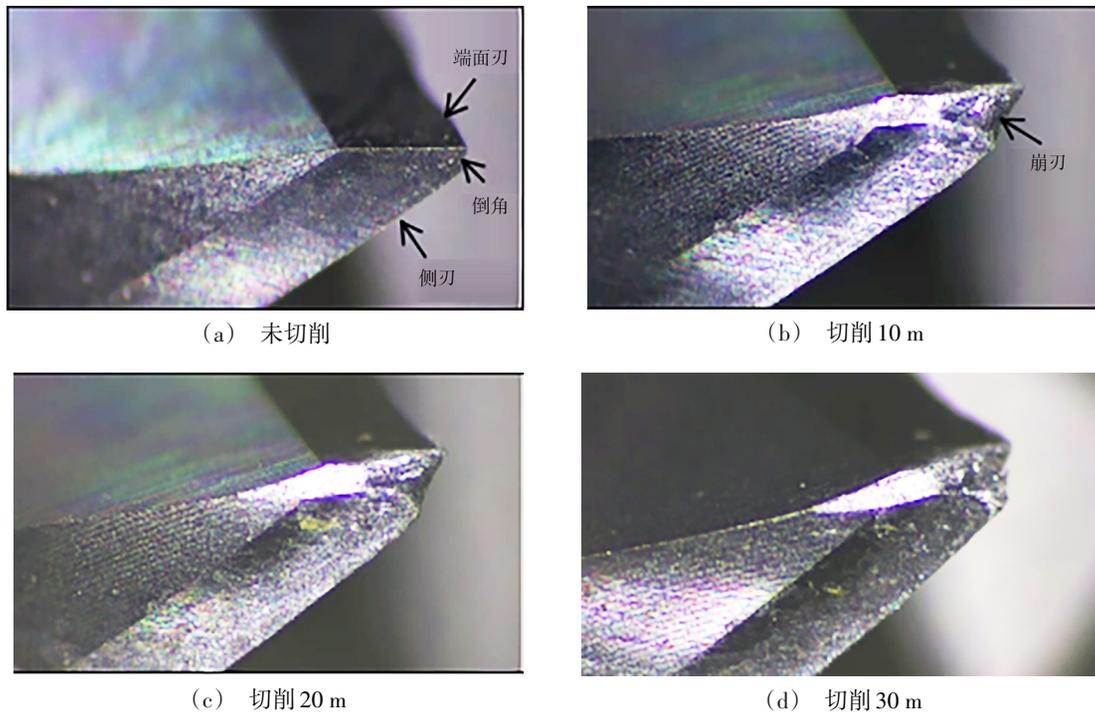


图3 硬质合金刀刃检测图

Fig. 3 Inspection drawing of carbide blade

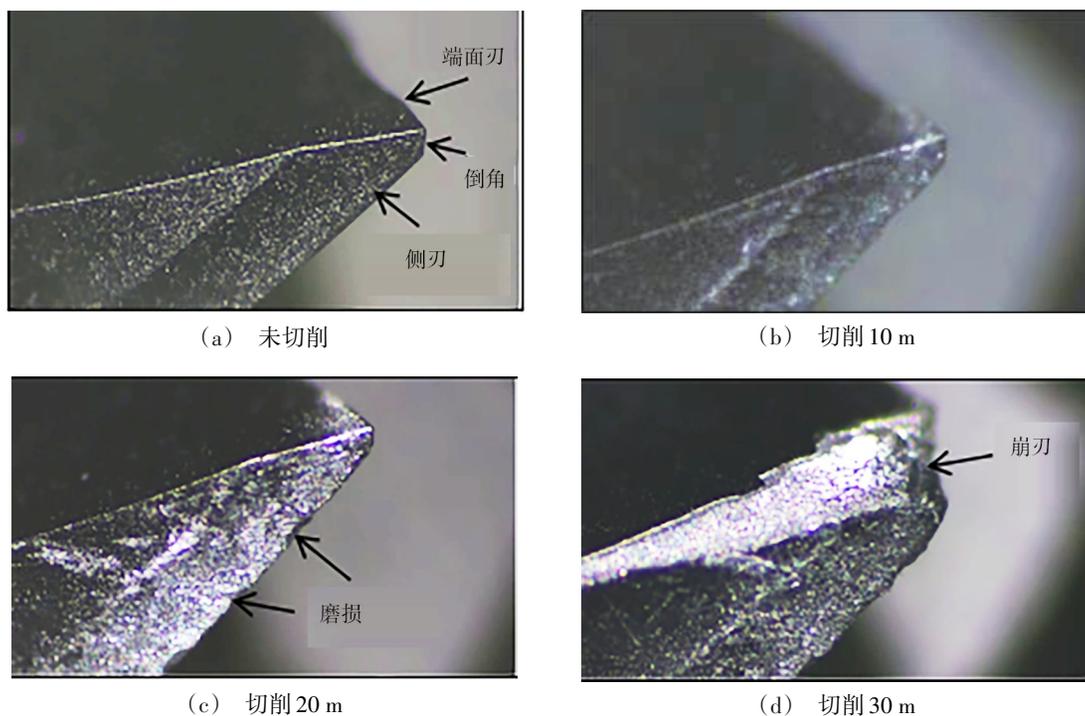


图4 微米金刚石涂层刀刃检测图

Fig. 4 Inspection diagram of micron diamond coated blade

由图4(a)看到微米金刚石涂层铣刀在未切削前,侧刃及端面刃完整,刀尖部位有倒角,涂层均匀完整。

直径 $\Phi 8$ mm的微米金刚石涂层铣刀在粗加工铣削7075铝合金10 m后,刀刃部位完整,涂层未有脱落或磨损,

侧刃面上有少量白色的铝印痕;铣削加工 20 m 后,刀具侧刃面上白色印痕增多,侧面刀刃有少量的涂层磨损;铣削加工 30 m 后,刀具切削部位的涂层明显剥落,且刀尖部位磨损崩刃,如图 4(d)所示。在切削加工过程中,刀具与工件接触区的压力、温度会升高,同时刀具与材料实际接触的面积增加,刀具和刚从工件材料内部切削出的新鲜表面间会形成强烈的粘结,刀具易产生切削粘结磨损。硬质合金刀具在铣削 10 m 后就出现了轻微的粘结磨损,而微米金刚石涂层刀具还未发现涂层脱落或磨损现象,刀刃完整,原因是金刚石热导率高,不会出现较高的切削温度区域,铝屑不会因高温软化附着在刀具上,涂层对刀具起到了很好的保护作用。本试验中用制备的晶粒尺寸在 1~4 μm 的微米金刚石涂层刀具铣削 7075 铝合金,采用轴向切削深度 $a_p=2\text{ mm}$ 的高速粗加工切削方式,切削长度达到了 30 m 左右,是同等试验条件下硬质合金刀具寿命的 3 倍。此外,王宜豹用制备的单层金刚石涂层刀具和未涂层刀具进行切削实验,切削 2 h 后未涂层刀具明显磨损,单层金刚石刀具涂层开始脱落,刀刃钝化。张而耕等^[21]用金刚石涂层立铣刀(膜层 1 μm)和 PCD 立铣刀切削铝合金,采用切削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$ 高速切削方式,得到刀具的失效距离分别是 15 和 96 m。

2.3 精加工铣削实验分析

采取工件每间隔铣削 50 m 长度作为一个检测单元,在每个检测单元上沿着铣削方向等间距检测 5 个点的工件表面粗糙度(Ra)值,计算出这 5 个检测点 Ra 值的算术平均值作为该单元的 Ra 值。表 2 为三种不同材质的铣刀在精加工铣削 7075 铝合金一定长度后,测得的工件 Ra 值;图 5 为工件 Ra 的趋势图。

表 2 不同材质刀具精加工铣削实验结果

Tab. 2 Milling experiment results of different materials cutting tools

刀具	$Ra/\mu\text{m}$					
	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m	300 m
硬质合金刀具	0.997	1.019	1.133	0.953	0.920	0.865
MCD 涂层刀具	1.157	1.103	1.040	1.016	1.189	1.228
NCD 涂层刀具	0.944	1.099	0.904	0.926	0.957	0.893

从图 5 中可以看出硬质合金铣刀在加工的前 150 m 阶段,工件切削后表面的 Ra 值是逐步增大的。加工的前 150 m 是硬质合金铣刀刀刃处积屑瘤逐步形成的阶段^[22],所以 Ra 值逐步增大;切削加工 150 m 后由于刀具表面产生的积屑瘤也能起到一定的切削作用,所以在切削 150 m 后,工件的 Ra 值反而逐步有所降低。从 MCD 涂层刀具与 NCD 涂层刀具的实验数据中可以看出,NCD 涂层刀具切削加工工件的 Ra 明显好于 MCD 涂层刀具切削加工工件。这也印证了涂层刀具中,微米涂层的颗粒由于大于纳米涂层的

颗粒,铣削加工中对工件 Ra 的影响比较大。通过表 2 的 Ra 值比较,甚至能看出硬质合金铣刀在切削 7075 铝合金工件后的工件 Ra 值还优于使用 MCD 涂层铣刀切削的工件 Ra 值,原因是硬质合金铣刀表面是经过镜面抛光的, Ra 要小于 MCD 涂层铣刀;NCD 涂层铣刀的试验数据与硬质合金铣刀的试验数据差不多,说明刀具在涂纳米涂层后不影响刀具的 Ra 。

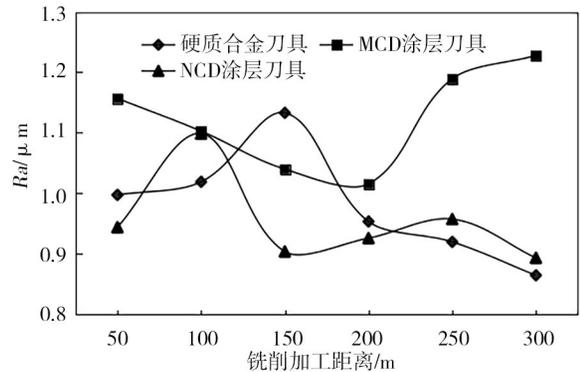


图 5 工件表面粗糙度趋势图

Fig. 5 Trend chart of workpiece surface roughness

图 6 为三种不同材质刀具在精加工铣削 7075 铝合金后侧刃用体视显微镜在物镜放大 5 倍的条件下所拍的图片。从照片中可以看到硬质合金铣刀在精加工铣削 300 m 后刀具侧面和端面上有明显的不能去除的积屑瘤^[23],而微米涂层铣刀和纳米涂层铣刀侧面和端面上除了有白色的铝印痕外,表面没有形成积屑瘤,原因是金刚石热导率高,在切削刃处不会出现高的温度区域,切削产生的铝屑不会因高温产生软化附着在刀具表面。同时也能对比看出纳米涂层铣刀侧面优于微米涂层铣刀的侧面,原因是纳米金刚石涂层刀具表面的金刚石颗粒要小于微米涂层的颗粒,涂层颗粒与工件的摩擦较小,铣削加工后刀具表面能保持光洁不易粘附工件切屑。

图 7 为三种不同材质刀具在精加工铣削 7075 铝合金 300 m 后工件表面的形貌图。从图中能看出纳米涂层铣刀铣削后,工件表面的亮度优于其他两种刀具铣削后的效果,原因由图 1 微米和纳米金刚石涂层刀具的表面形貌图也可以看出,纳米金刚石涂层晶粒成团簇状,结构致密,平整的表层晶粒使纳米涂层刀具表面的 Ra 相对较低。纳米涂层刀具铣削过程中切屑与工件分离后受刀具前刀面挤压并与前刀面进行摩擦,而工件已加工表面发生弹性和塑性恢复变形,并与刀具后刀面发生摩擦^[24],由于纳米金刚石涂层刀具 Ra 低,切削过程中与工件的接触摩擦因数较小,工件铣削出来的已加工表面相当于被刀具后刀面进行了碾磨抛光处理,铣削出的工件 Ra 就很高^[25],在光线的照耀下产生了反光,所以在对比精铣后的工件时,会发现纳米金刚石涂层刀具铣削的工

件亮度较高。

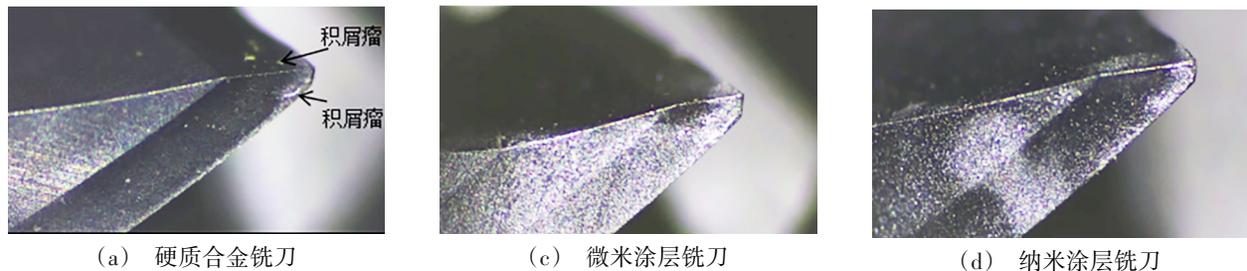


图6 精加工铣削300 m后不同材质刀具的侧刃图

Fig. 6 Side edge drawing of different materials cutting tools after finishing milling 300 m

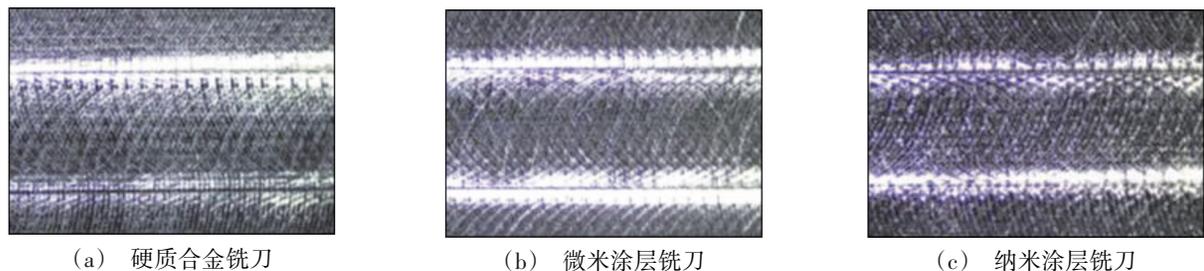


图7 精加工铣削300 m后工件表面形貌图

Fig. 7 Surface topography of workpiece after finishing milling 300 m

通过以上实验也能发现同一种材质刀具在粗、精加工铣削7075铝合金中,粗加工铣削采用大切削深度、大进给速度的方式对刀具的磨损影响非常大;在小切削深度、大进给速度、高转速的精加工铣削中,刀具的寿命是粗加工铣削方式的10倍以上。

3 结论

(1)在大切深高速粗加工时,CVD微米金刚石涂层刀具的寿命约为普通硬质合金刀具的3倍。

(2)在小切深大进给的精加工实验中,应用纳米金刚石涂层和未涂层刀具可获得更好的表面质量, R_a 约为 $0.9\ \mu\text{m}$ 。

(3)加工结果显示CVD金刚石涂层刀具可减小积屑瘤的形成,这主要归因于金刚石具有较高的热导率继而加快了刀具的散热。

参考文献

[1] 陈芙蓉,李国伟. 7075 铝合金的研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2019(1):1-7.

CHEN Furong, LI Guowei. Research status of 7075 aluminum alloys [J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2019(1): 1-7

[2] 朱晨曦. 介观尺度车削加工精度与误差控制研究[D]. 北京理工大学,2016.

ZHU Chenxi. Research on meso scaleturning precision and error control [D]. Beijing University of Technology, 2016.

[3] 殷继花,林有希,孟鑫鑫,等. 航空铝合金7075-T651高速铣削锯齿形切屑的形成机理研究[J]. 表面技术,2019,48(5): 275-285.

YIN Jihua, LIN Youxi, MENG Xinxin, et al. Formation of sawtooth chip in high speed milling of aeronautical aluminum alloy 7075-T651 [J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 275-285.

mechanism of sawtooth chip in high speed milling of aeronautical aluminum alloy 7075-T651 [J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 275-285.

[4] 李小龙,周燕,刘江,等. 高速切削铝合金用硬质合金刀具磨损机理研究[J]. 粉末冶金技术,2018,36(4):256-260.

LI Xiaolong, ZHOU Yan, LIU Jiang, et al. Research on wear mechanism of carbide tool for high-speed cutting aluminum alloy [J]. Powder Metallurgy Technology, 2018, 36(4): 256-260.

[5] 马殿文,沈春根,张宇,等. PCD刀具车削超硬铝合金的切削性能研究[J]. 工具技术,2020,54(3):15-20.

MA Dianwen, SHEN chungeng, ZHANG Yu, et al. Research on cutting performance of PCD tool for turning super-hard aluminum alloy [J]. Tool Engineering, 2020, 54(3): 15-20.

[6] 侯鹏宇. 铝合金超精密切削金刚石刀具热变形研究[D]. 哈尔滨工业大学,2014.

HOU Pengyu. Research on the thermal deformation of diamond tool in ultraprecision cutting of aluminum alloys [D]. Harbin University of Technology, 2014.

[7] 陆峰,查丽琼,刘鲁生,等. 基于硬脆材料加工的金刚石涂层硬质合金刀具制备及切削性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金,2018,46(4):78-82,86.

LU Feng, CHA Liqiong, LIU Lusheng, et al. Research on preparation and cutting performance of diamond-coated cemented carbide tools used in hard brittle material machining [J]. Rare metals and Cemented Carbides, 2018, 46(4): 78-82, 86.

[8] WEI Q P, YU M Z, ASHFOLD M N R, et al. Synthesis of micro-or nano-crystalline diamond films on WC-Co substrates with various pretreatments by hot filament chemical vapor deposition [J]. Appl. Surf. Sci., 2010, 256(13): 4357-4364.

[9] SARANGI S K, CHATTOPADHYAY A,

CHATTOPADHYAY A K. Effect of pretreatment, seeding and interlayer on nucleation and growth of HFCVD diamond films on cemented carbide tools[J]. Int. J. Refract. Met. Hard Mater., 2008,26(3):220-231.

[10] ARUMUGAM P U, MALSHE A P, BATZER S A. Dry machining of aluminum-silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts[J]. Surf. Coat. Technol., 2006, 200(11):3399-3403.

[11] CHOU Y K, LIU J. CVD diamond tool performance in metal matrix composite machining[J]. Surf. Coat. Technol., 2005, 200(5):1872-1878.

[12] ALMEIDA F A, SACRAMENTO J, OLIVEIRA F J, et al. Micro- and nano-crystalline CVD diamond coated tools in the turning of EDM graphite[J]. Surf. Coat. Technol., 2008, 203(3): 271-276.

[13] SEIN H, AHMED W, JACKSON M, et al. Performance and characterisation of CVD diamond coated, sintered diamond and WC-Co cutting tools for dental and micromachining applications[J]. Thin Solid Films, 2004, 447-448(0):455-461.

[14] KUO C, WANG C, KO S. Wear behaviour of CVD diamond-coated tools in the drilling of woven CFRP composites[J]. Wear, 2018, 398-399: 1-12.

[15] 张林, 马乐娟, 薛海鹏, 等. 硬质合金刀具表面微/纳米金刚石复合涂层制备研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 6-8.

ZHANG Lin, MA Lejuan, XUE Haipeng, et al. Deposition of micro/nano-structured diamond composite coating on cemented carbide cutting tool [J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(2): 6-8.

[16] 王宜豹, 黄楠, 刘鲁生, 等. 加工7075航空铝合金用金刚石涂层刀具的制备及其切削性能[J]. 材料研究学报, 2019, 33(1): 15-26.

WANG Yibao, HUANG Nan, LIU Lusheng, et al. Preparation and cutting performance of diamond coated hard alloy cutting tools for 7075 aviation Al-alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(1): 15-26.

[17] 张程焱, 王立新, 孟五洲, 等. 7075-T6铝合金干式切削表面完整性研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3): 148-151.

ZHANG Chengyan, WANG Lixin, MENG Wuzhou, et al. Study on surface integrity of dry cutting of 7075-T6 aluminum alloy [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(3): 148-151.

[18] 沈彬. 超光滑金刚石复合薄膜的制备、摩擦学性能及

应用研究[D]. 上海交通大学, 2009.

SHEN bin. Study on the deposition, tribological properties and applications of ultra-smooth composite diamond films [D]. Shanghai Jiaotong University, 2009.

[19] 郭振海, 邓福铭, 赵鑫, 等. 加工碳/碳复合材料的复合金刚石涂层刀具的制备及切削试验研究[J]. 材料保护, 2020, 53(12):1-5, 12.

GUO Zhenhai, DENG fuming, ZHAO Xin, et al. Preparation and cutting test of composite diamond coated tools for Processing C/C composites [J]. Materials Protection, 2020, 53(12): 1-5, 12

[20] 邓福铭, 朱灏, 王双, 等. 不同结构金刚石涂层刀具的制备及性能参数优化[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(7):1353-1358, 1365.

DENG fuming, ZHU Hao, WANG Shuang, et al. Preparation and properties parameter optimization of different structural diamond coated tools[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(7): 1353-1358, 1365

[21] 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 Ergeng, HUANG Biao, CHEN Qiang. Performance of coating end mill and PCD end mill cutting aluminum alloy [J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 149-153.

[22] 邓福铭, 陈立, 刘畅, 等. 微米、纳米及微/纳米复合金刚石涂层的切削性能研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(4):1-5, 10.

DENG fuming, CHEN Li, LIU Chang, et al. Study on the cutting properties of micro-nano-and micro/nano diamond coatings [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(04): 1-5, 10.

[23] 顾佳超, 徐恒斌, 王爽, 等. 微细铣削时积屑瘤现象的研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(13): 77-80.

GU Jiachao, XU Hengbin, WANG Shuang, et al. Study on the phenomenon of built-up edge micro milling [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(13): 77-80.

[24] 王海龙. 6061铝合金超精密金刚石切削表面生成机理研究[D]. 广东工业大学, 2020.

WANG Hailong. Investigation on surface generation mechanism of ultra-precision diamond cutting for aluminum alloy 6061 [D]. Guangdong University of Technology, 2020.

[25] 刘丽红. CVD金刚石涂层刀具切削性能与磨损机理研究(英文)[J]. 机床与液压, 2020, 48(18): 75-79.

LIU Lihong. Study on cutting performance and wear mechanism of CVD diamond coated tools[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(18): 75-79.