

# 硬质合金刀具铣削镍基单晶高温合金 DD5 磨损试验

巩亚东, 梁彩霞, 李 强, 刘洺君  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为探究在干切削和水基微量润滑(WMQL)条件下刀具磨损对 DD5 铣削表面质量的影响规律, 采用四刃 PVD-TiAlN 涂层硬质合金刀具以及超景深显微镜和扫描电镜等设备, 以刀具副后刀面磨损宽度为主要评价指标, 对硬质合金刀具副后刀面磨损形态、磨损机理进行分析和研究, 并采用三维轮廓仪对零件表面粗糙度进行测量. 研究表明, 与干切削相比, 采用水基微量润滑冷却技术, 能够延长刀具寿命并改善材料的铣削加工性; 硬质合金刀具的主要磨损机理为粘结磨损、磨粒磨损、氧化磨损和扩散磨损.

**关 键 词:** 单晶高温合金 DD5; 铣削; 刀具磨损; 磨损机理; 水基微量润滑

中图分类号: TH 161      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2018)09-1283-06

## Wear Experiment of Carbide Tool for Milling Nickel-Based Single Crystal Superalloy DD5

GONG Ya-dong, LIANG Cai-xia, LI Qiang, LIU Ming-jun  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: ydgong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To explore the regulation of tool wear on milling surface of DD5 under the conditions of dry cutting and water-based minimum quantity lubrication(WMQL), carbide tool with four blades and PVD-TiAlN coating, super depth of field microscope and scanning electron microscopy(SEM) were employed. Taking the wear width of minor flank surface of cutting tool as the evaluation indicator, tool wear forms and wear mechanism were analyzed and studied. Three-dimensional measuring system profiler was used to measure the machined surface roughness. The result shows that, compared to dry cutting, water-based MQL technology can prolong tool life and improve the milling performance. The wear of carbide tool is caused by adhesion wear, oxidative wear, abrasive wear and diffusion wear.

**Key words:** single crystal superalloy DD5; milling; tool wear; wear mechanism; water-based minimum quantity lubrication(WMQL)

镍基单晶高温合金是以镍为主要元素的无晶界高温合金,具有良好的抗氧化性、组织稳定性和使用可靠性<sup>[1-2]</sup>,比多晶高温合金具有更优异的高温强度和良好的蠕变抗力,在瞬时高温环境下,不存在高温进阶弱化、纵向晶界裂纹等问题,因此,近年来成为航空发动机以及燃气涡轮叶片的关键材料<sup>[3-4]</sup>.然而镍基高温合金属于难加工材料,合适的刀具和冷却技术可以改善铣削过程中存在的加工效率低、成本高等问题,因此,不同冷却条件下铣削刀具磨损试验研究具有重要理论意义和实用价值.目前,涂层硬质合金刀具已获得广泛应用<sup>[5]</sup>,对于不同涂层材料硬质合金刀具磨损破损形态及磨损机理已有深入研究<sup>[6]</sup>.Najiha等<sup>[7]</sup>研究表明水基 MQL 条件下磨损后刀具呈现出完整几何形状,切削刃出现边界磨损和微小崩刃现象;Zhuang等<sup>[8]</sup>在不同冷却条件下研究镍基高温合金加工性能,结果发现 MQL 技术能够减轻刀具磨损,改善表面质量,减小表面粗糙度,并提高加工效率.就目前文献来看,很少有铣削 DD5 刀具磨损机理的试验研究,因此,有必要对

刀具磨损过程进行深入探究.

试验采用 TiAlN 硬质合金刀具对单晶镍基高温合金 DD5 进行不同冷却条件下铣削试验,针对刀具副后刀面磨损宽度及刀尖形貌,采用超景深显微镜和扫描电镜进行观察检测并对失效刀具表面元素进行能谱分析,研究干切削和水基 MQL 技术下 TiAlN 涂层刀具铣削 DD5 的刀具寿命和磨损机理,期望能够为高效、绿色环保的铣削镍基合金提供试验依据.

1 试验条件和方法

1.1 试验材料

试验材料为镍基单晶高温合金 DD5,除有质量分数 56.7% 的基体元素 Ni 外,还添加了一些其他的合金元素(质量分数),如 3% Re,7.5% Co,7% Cr,6.2% Al 及 6.5% Ta,在各种合金元素的综合作用下,DD5 表现出了优异的物理性能.另外,单晶高温合金消除了多晶高温合金的晶界,存在各向异性,金相组织如图 1 所示.本次试验在(001)晶面上沿[110]方向进行槽铣加工,材料形状和几何尺寸如图 1 所示.

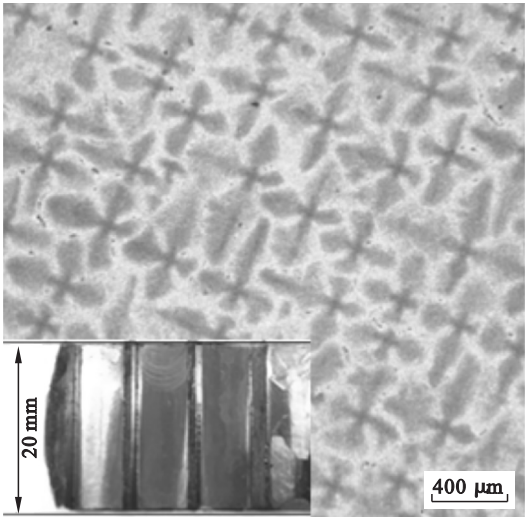


图 1 工件尺寸与材料金相图

Fig. 1 Workpiece size and material metallography

1.2 试验方案

相关文献<sup>[9]</sup>将后刀面磨损量作为刀具失效评价指标,而试验中槽底面与刀具副后刀面直接接触,对材料表面质量有直接影响,因此,试验将副后刀面作为检测对象.随着加工过程进行,副后刀面与槽底面不断摩擦,产生明显磨损,且磨损宽度容易测量,因此试验中采用的评价标准如下:

1) 副后刀面最大磨损宽度 ( $VB_{max}$ ) 达到

0.3 mm,将达到标准前的累积切削距离作为刀具寿命;

2) 刀尖或切削刃出现崩刃.为测量刀具副后刀面磨损宽度并研究刀具磨损机理,在切削加工过程中对铣刀进行监测.试验将探究冷却条件对切削距离和磨损机理的影响,每种冷却条件进行 3 次试验.根据厂家推荐标准,刀具优选试验切削参数分别设置为:线速度( $v_s$ )=37.7 m/min,每齿进给量( $f_z$ )=13  $\mu$ m,切削深度( $a_p$ )=0.18 mm,切削宽度为 6 mm.

1.3 试验条件

试验刀具选用 GM-4E PVD-TiAlN 涂层硬质合金刀具,直径为 6 mm,如图 2 所示.该刀具采用超细微粒(0.6  $\mu$ m)钨钢基体,具有极高的耐磨性和强度,可加工高硬度材料,能实现高温下的稳定加工.而通过前期的工作发现,适用于切削多晶镍基高温合金 Inconel 718 的 PVD-AlTiN 涂层硬质合金刀具并不适用于该材料的铣削加工,其原因可能是由于涂层中较高 Al 元素含量导致的过强亲和性而引起的粘结造成的<sup>[10-11]</sup>.

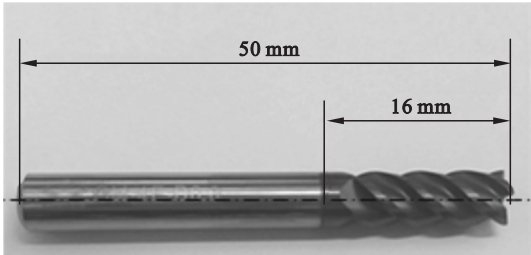


图 2 试验刀具

Fig. 2 Experimental tool

试验采用 KS-2107 油气水三相复合润滑冷却系统,其结构原理如图 3 所示,将双喷头对称固定在铣刀两侧,水和油在压缩空气和雾化喷嘴的作用下,会以高速喷射到切削区,实现润滑和冷却作用.微量润滑系统根据油脂化学、界面化学反应原理制造,可自然降解的油分子能够在水分子的界面上形成一层薄油膜.

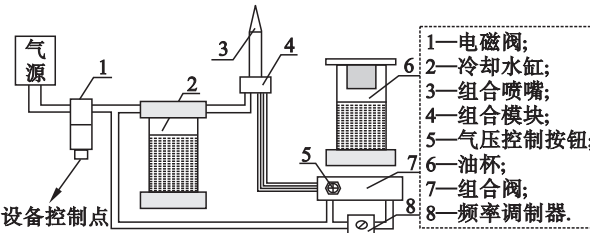


图 3 微量润滑系统原理图

Fig. 3 Schematic of minimum quantity lubrication system

试验选用 TH5650 立式加工中心,最大转速 6 000 r/min;采用三维轮廓测量仪测量零件表面粗糙度( $R_a$ ), $R_a$  是基于区域形貌的评定参数,以随机 5 个点的平均值作为材料的  $R_a$ ;采用 KEYENCE VHX-1000E 数字光学显微镜实现副后刀面磨损宽度的测量和工件表面形貌的检测,并采用扫描电镜和能谱分析(EDX)检测磨损后刀具及其表面元素成分。

## 2 试验结果分析

### 2.1 刀具寿命比较

加工过程中刀面和材料被加工表面不断挤压摩擦,使得刀具涂层开裂剥落,服役寿命缩短。冷却条件对刀具寿命具有重要影响,干切削能够节约成本,但会加剧刀具磨损<sup>[12]</sup>;浇注式冷却能够延长刀具寿命,但会对环境和工作人员身体健康产生危害。水基 MQL 技术在高压空气流作用下能够将可降解的植物油和水雾化成微米级小液滴<sup>[13]</sup>,可实现有效润滑和减少刀具磨损,且绿色环保。

图 4 分别为干切削和水基 MQL 条件下刀具达到  $VB_{\max}$  前的累积切削距离,在试验条件范围内,基于水基 MQL 技术的累积切削距离比干切削约增加 30%。试验结果表明,基于干切削的刀具磨损曲线具有三个磨损阶段,切削距离在 0~0.8 m 和 1.4~1.9 m 磨损较快,呈线性上升趋势,分别为初期磨损和剧烈磨损阶段;在 0.8~1.4 m 副后刀面磨损宽度变化缓慢,为正常磨损阶段。由于刀具涂层不均匀,初期磨损较快;随着切削过程的进行,刀具表层接触面积较小的凸起部分已经磨掉,受到比较均匀的摩擦作用,副后刀面与已加工表面的接触面积逐渐增大,刀具进入正常磨损阶段;当刀具进一步磨损,副后刀面磨损宽度累积到 170  $\mu\text{m}$  时,刀具开始加剧磨损。加工过程中应当避免进入剧烈磨损阶段,磨损后的刀具会影响工件表面质量,从而影响零件服役稳定性。

水基微量润滑技术下,磨损曲线呈持续上升趋势,在达到失效标准前能够切削更长的距离,说明水基微量润滑能够改善刀具的磨损速率。在 1.3~1.5 m 磨损曲线出现陡然上升现象,主要原因可能是前 1.3 m 累积切削过程对刀具涂层产生严重机械冲击,最终在这一阶段出现涂层大面积脱落的情况,导致刀具副后刀面磨损宽度剧增。

图 5 是刀具副后刀面磨损区域的大小随切削

距离的变化。干切削条件下,刀具副后刀面出现明显粘结,磨损区域逐渐增大;水基 MQL 技术条件下,刀尖表面无明显粘结,但三角形磨损区域同样逐渐向内侧扩大。

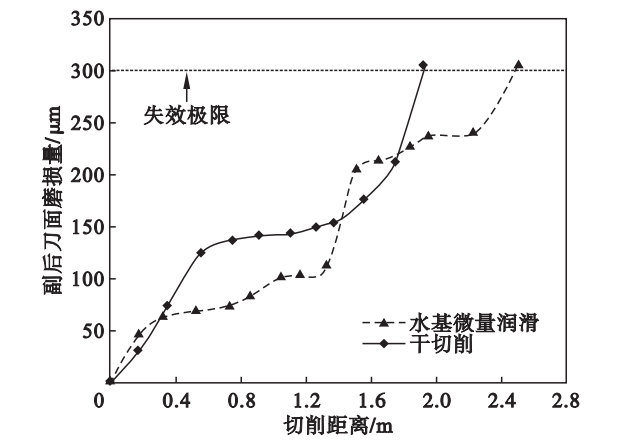


图 4 累积切削距离与刀具前刀面磨损曲线  
Fig. 4 Curves of the tool flank wear with the accumulated milling distance

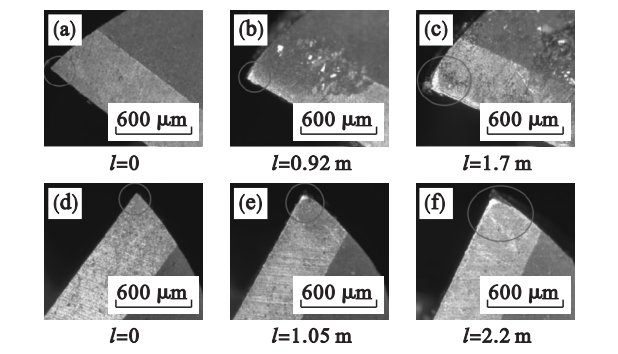


图 5 不同冷却条件下刀具副后刀面随切削距离变化显微照片  
Fig. 5 Micrograph of tool flank wear development with cutting distance under different cooling conditions

(a), (b), (c)—干切削; (d), (e), (f)—水基 MQL。

### 2.2 刀具磨损机理

试验中为探究刀具磨损机理,采用超景深显微镜和扫描电镜检测铣刀副后刀面的磨损形貌,主要观察副后刀面是否存在粘结、涂层脱落、切削刃崩刃、微崩刃等现象;采用能谱仪对磨损后刀具副后刀面元素进行检测,分析刀具表面和工件材料元素之间的相互作用。

#### 2.2.1 磨粒磨损

磨粒磨损是工件材料中的硬质点连续滑擦刀具表面所形成的条纹状磨损带(如图 6a 所示)。主要由于切削时,刀具表面和工件不断循环接触中摩擦产生热量,导致表面硬度降低。干切削条件下也存在磨粒磨损,如图 7 所示,但其程度明显低于水基 MQL 条件。



2.2.2 粘结磨损

通过比较图 5 两把铣刀的副后刀面发现,干切削条件下的切屑粘结现象比较严重,主要原因是切屑得不到及时清理,在工件表面不断堆积并与刀具摩擦,由热、力、化学等综合作用形成粘结.图 7 和图 8 分别对两种切削条件下副后刀面元素含量进行定性分析,结果表明刀具表面均存在镍基高温合金中的主要元素 Ni,因此可以判断刀具表面产生粘结,存在粘结磨损,且干切削的粘结磨损更为严重.

试验中刀具涂层和工件材料均含有 Al 元素,由于元素本身的亲和性,极易在刀具表面形成粘结,粘结层在机械冲击作用下易从刀面脱落,脱落过程将会撕裂刀具涂层,造成刀具粘结磨损.断续切削过程不断重复,粘结层又重新形成并脱落,会加剧粘结磨损的进行,最终涂层会大面积撕裂并露出基体材料(如图 6c 所示).

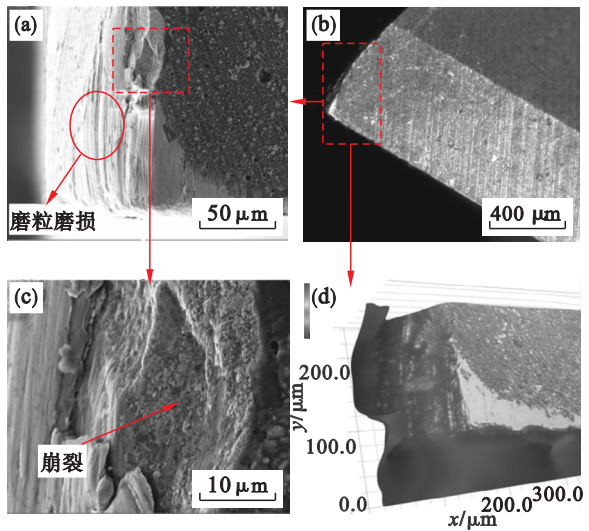


图 6 水基 MQL 条件下刀具失效形貌显微图  
Fig. 6 Micrograph of failure tool under water-MQL cutting  
(a) — 刀具磨损形貌; (b) — 刀尖磨损二维图; (c) — 刀具磨损放大图; (d) — 刀尖磨损三维形貌光学放大图.

2.2.3 氧化磨损

图 7 和图 8 表明,两种冷却条件下,刀具磨损

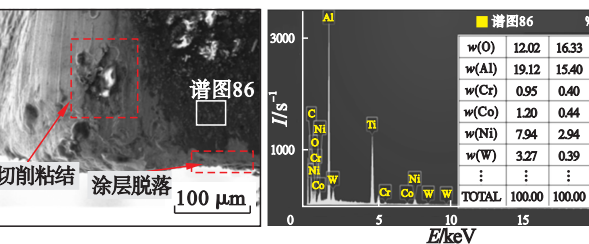


图 7 干切削条件下刀具 SEM 和 EDS 分析  
Fig. 7 SEM micrograph and EDS analysis of tool adhesion under dry cutting

后表面均存在氧元素,说明铣削加工时,刀具材料中的一些元素可以与空气中的氧发生化学反应,生成氧化产物<sup>[6]</sup>,例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ . Al 和 O 具有较高的亲和性<sup>[14]</sup>,极易形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  附着在刀具表面,随着铣削加工的进行,氧化层易于被切屑带走或被工件摩擦破坏,造成刀具的氧化磨损.图 9 中的 EDS 分析表明直线上氧元素含量每点各不相同,说明氧化程度不统一.较靠近磨损区域的氧含量较多,证明切削区有利于氧结合其他元素形成化合物,而距离磨损区域较远的位置氧含量相对较少.

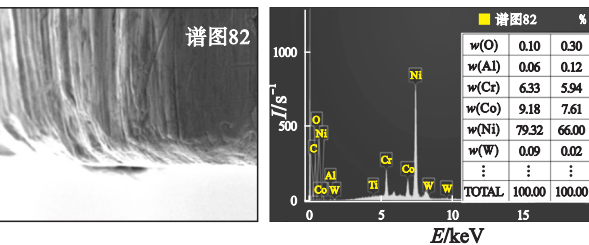


图 8 水基 MQL 条件下刀具 SEM 和 EDS 分析  
Fig. 8 SEM micrograph and EDS analysis of tool adhesion under water-MQL cutting

2.2.4 扩散磨损

通过刀尖线扫描分析可以探究刀具磨损过程中是否存在扩散磨损.图 9 为水基 MQL 条件下的线扫描分析,由 Ti 元素含量可知刀尖涂层已经脱落而漏出基体材料,而基体材料中 Co 元素的分布波动说明 Co 元素在切削过程中向粘结层发生了扩散,造成刀尖处 Co 元素含量的降低,影响刀具切削性能,造成刀具的扩散磨损.

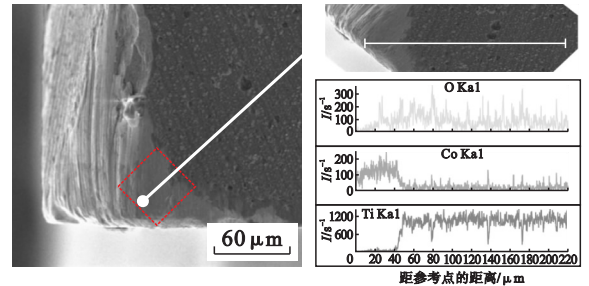


图 9 水基 MQL 条件下刀具 SEM 和 EDS 线扫描分析  
Fig. 9 SEM micrograph and EDS analysis of tool adhesion under water-MQL cutting

2.3 刀具磨损对表面质量的影响

加工过程中其他参数保持不变,刀具副后刀面磨损宽度成为主要变量,因其直接与材料槽底面接触,其磨损宽度直接影响工件表面质量.工件表面质量一般包括表面形貌和表面粗糙度,试验对被加工零件槽底面形貌进行了观察,如图 10 所示.

材料表面形貌是由刀具运动轨迹和表面缺陷共同构成,观察两种切削条件下被加工表面形貌发现,新刀加工时,加工表面的圆弧形纹理浅而密;随着磨损量的增加,刀具运动轨迹凹槽加深、凸起增高.干切削条件下,切削距离为 1.74 m 时,材料表面的凹凸痕迹已经非常明显,如图 10c 所示;而水基 MQL 条件下,切削距离达到 2.51 m 时,被加工表面出现明显滑擦痕迹,如图 10f 所示.

通过比较两种冷却条件下刀具失效前槽底的最大  $R_a$  值可知,水基微量润滑比干切削约降低 10%.干切削条件下,刀具失效前铣槽底  $R_a$  值已经达到初始值 2 倍,如图 11 所示.被加工表面质量的变化主要由以下两方面原因引起:副后刀面的磨损宽度逐渐增大引起刀具在已加工表面上残留面积增大,从而增加刀具副后刀面和槽底面的摩擦;涂层脱落减弱切削刃和刀尖切削能力,引起

粗糙度值上升和表面滑擦.

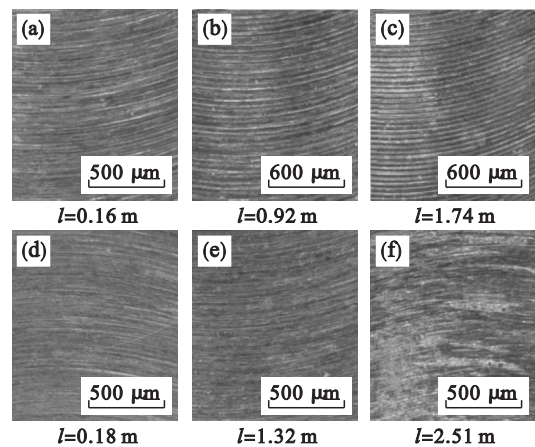


图 10 不同切削距离表面形貌变化显微照片  
Fig. 10 Micrograph of surface topography under different cutting distances  
(a), (b), (c)—干切削; (d), (e), (f)—水基 MQL.

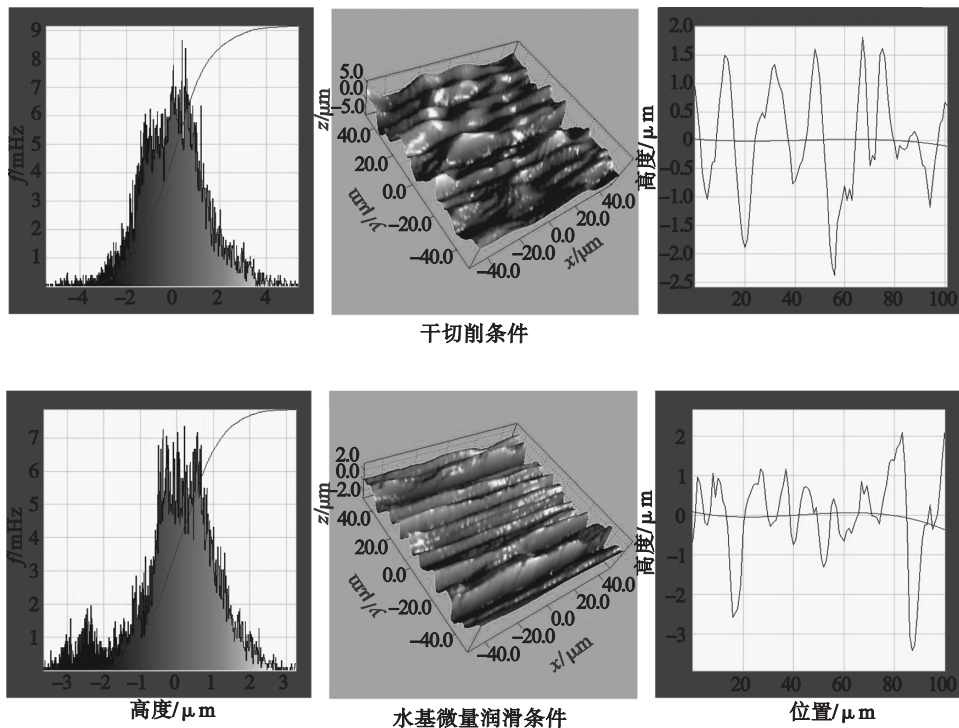


图 11 不同切削条件下刀具表面形貌  
Fig. 11 Surface topography under different cutting conditions

比较可知,水基 MQL 条件下的刀具表面形貌要优于干切削,证明水基微量润滑技术有明显冷却润滑效果,不仅能够延长刀具寿命,还能够改善被加工表面质量.

### 3 结 论

1) 刀具磨损试验表明,干切削条件下,GM 铣刀加工 DD5 时具有标准的磨损曲线;刀具在水

基 MQL 技术条件下的切削距离比干切削长约 0.6 m,证明水基微量润滑技术能够延长刀具寿命,减缓刀具磨损.

2) 采用扫描电镜和能谱分析对 GM 铣刀磨损机理的探究结果表明,铣削 DD5 硬质合金刀具失效是磨粒磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损的共同作用.

3) 比较发现,刀具在干切削条件下有更明显  
(下转第 1326 页)