

PCBN 刀具激光超声复合切削硬质合金的磨损机理

张昌娟, 焦 锋, 牛 赢

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 结合激光加热辅助切削和超声振动切削提出了激光超声复合切削加工工艺。采用 PCBN 刀具对 YG10 硬质合金进行普通切削、超声振动切削、激光加热辅助切削和激光超声复合切削对比试验, 采用超景深显微镜观测刀具磨损量及磨损形貌, 通过扫描电子显微镜(SEM)对刀具磨损区域进行能谱分析, 研究激光超声复合切削条件下刀具的磨损规律、磨损形态及磨损原因。研究结果表明: 与普通切削、超声振动切削及激光加热辅助切削相比, 激光超声复合切削时刀具后刀面磨损量平均值分别降低 57.5%、46%、41.3%, 刀具使用寿命明显提高; 刀具磨损形态主要表现为前刀面磨损、后刀面磨损和崩刃; 激光超声复合切削硬质合金时粘接磨损、氧化磨损、相变磨损和微裂解磨损是引起 PCBN 刀具磨损的主要原因。

关键词: 激光超声复合切削; 激光加热辅助切削; 超声振动切削; PCBN 刀具; 刀具磨损
中图分类号: TG506; TG712 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0806002

PCBN tool wear mechanism in laser ultrasonically combined cutting cemented carbide

Zhang Changjuan, Jiao Feng, Niu Ying

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Laser ultrasonically combined cutting was proposed based on ultrasonic vibration cutting with laser heating assisted cutting. A series of experiments were conducted in conventional cutting, ultrasonic vibration cutting, laser heating assisted cutting and laser ultrasonically combined cutting YG10 cemented carbide with PCBN tools. The tool wear characteristics and tool wear mechanism were observed by using digital microscope with super depth, the energy spectrum analysis was carried out in worn areas of tools by scanning electron microscopy (SEM). The experimental results indicate that the average flank wear of PCBN tool obtained by laser ultrasonically combined cutting is reduced by almost 57.5%, 46% and 41.3% respectively when compared with that by conventional cutting, ultrasonic vibration cutting and laser heating assisted cutting, therefore the tool life is obviously lengthened. The main wear types are crater wear, flank wear and tipping for PCBN tools in cutting YG10 cemented carbide. And the adhesion, oxidation, phase transformation and micro dissociation are the main reasons for the wear of PCBN tool in laser ultrasonically combined cutting YG10 cemented carbide.

Key words: laser ultrasonically combined cutting; laser heating assisted cutting; ultrasonic vibration cutting; PCBN tool; tool wear

收稿日期: 2015-12-07; 修订日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51075127); 河南省机械制造及其自动化省级重点学科资助项目

作者简介: 张昌娟(1980-), 女, 副教授, 博士生, 主要从事精密超精密加工方面的研究。Email: zhangcj@hpu.edu.cn

导师简介: 焦锋(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事硬脆材料精密加工、特种加工方面的研究。Email: jiaofeng@hpu.edu.cn

0 引言

硬质合金具有强度、硬度高、耐磨性好及良好的红硬性等一系列优良性能,已成为现代工业部门和新技术领域不可缺少的工具材料和结构材料,广泛应用于难加工材料的切削加工刀具、精密工模具、高强度高硬耐磨零部件和特种工具等机械加工领域以及地质勘探、矿山开采等工业领域^[1-2],例如,硬质合金刀具比高速钢切削速度高 4~7 倍,刀具寿命高 5~80 倍;制造模具、量具,寿命比合金工具钢高 20~150 倍。然而,作为难加工材料,其脆性高、断裂韧性低、材料弹性极限和强度非常接近,导致切削力大、切削温度高、刀具磨损严重,采用传统的加工方法已难以满足精密及超精密加工技术的要求。

激光加热辅助切削 (Laser Heating Assisted Cutting, LHAC) 是解决硬脆材料、非金属材料等难加工材料加工的一种新型加工技术^[3]。将高功率激光束聚焦在切削刃前的工件表面,在材料被切除前的短时间内将其局部加热到很高的温度,使材料的切削性能在高温下发生改变,屈服应力和硬度降低,切削变形从脆性转变为塑性或者准塑性,材料软化,从而达到降低切削力、提高切削效率和减小刀具磨损的目的^[4-5]。激光加热时,由于激光具有能够灵活控制、能准确照射到工件待加工位置、光斑形状和大小能够调节等特性,因此激光加热的热作用区以及热影响区都非常小,可以很好地满足硬质合金等难加工材料切削加工的要求。王扬等^[6]对颗粒增强基复合材料进行了激光加热辅助切削试验研究,解释了切削力下降、刀具磨损降低及表面机械性能提高的主要原因。吴雪峰等^[7]对氮化硅陶瓷材料进行了激光加热辅助切削的材料塑性去除和切屑形成机理研究,并分析了不同切削状态的刀具磨损形式和磨损原因。刘为桥等^[8]对氧化铝陶瓷进行了脉冲激光辅助切削工艺参数选取的理论与试验研究,有效保证了激光加热切削硬脆性材料的工艺要求。然而,激光加热辅助切削硬脆材料时,热应力容易引起工件加工表面产生微裂纹,从而影响加工质量。针对这一问题,将超声振动引入到加热辅助切削过程中,从而形成了热超声辅助切削加工技术。C.Y.Hsu 等^[9]利用气焊枪加热工件,将超声振动与高温辅助切削相复合,通过正交试验研究了切削参数对切削力及工件

表面粗糙度的影响,发现与硬质合金刀具相比,使用陶瓷刀具热超声辅助切削时形成的切屑较少,且工件表面粗糙度及切削力要小。Riaz Muhammad 等^[10-12]利用带状电阻加热器加热工件对热超声辅助切削钛合金进行了普通、超声、加热辅助切削及热超声辅助切削热力学特性仿真研究及工件表面粗糙度及切削力试验研究,发现与普通切削及超声切削相比,热辅助切削及热超声辅助切削过程中产生的切削力及工件表面粗糙度值要小,尤其是热超声辅助切削。因此,目前针对难加工材料热超声复合切削的研究主要集中在切削力、切削温度以及工件表面质量等方面,且加热工件时的热源为气焊枪加热或加热器加热,对复合切削条件下的刀具磨损机理的研究不够深入。而热超声复合切削过程中刀具的微量磨损即会引起零件的精度误差,从而影响加工效率及加工成本;同时,热超声复合切削时切削区域非常复杂,刀具的磨损包含着各种复杂的机械、物理、化学及热应力等各方面的因素^[13-15]。因此,开展热超声复合切削条件下的刀具磨损特性研究是必要的。

文中将超声振动切削 (Ultrasonic Vibration Cutting, UVC) 引入到激光加热辅助切削硬质合金的过程中,提出激光超声复合切削加工工艺 (Laser Ultrasonically Combined Cutting, LUCC), 针对 PCBN 刀具进行了激光超声复合切削 YG10 硬质合金的试验研究。通过普通切削 (Conventional Cutting, CC)、超声振动切削、激光加热辅助切削及激光超声复合切削 4 种切削方式下的 PCBN 刀具磨损对比试验,研究了 PCBN 刀具激光超声复合切削硬质合金时的刀具磨损机理,为切削超硬合金时 PCBN 刀具的应用提供技术支持并指导生产实践。

1 激光超声复合切削加工原理

如图 1 所示,该研究提出的激光超声复合切削加工是在激光加热辅助切削的基础上对刀具附加超声椭圆振动的复合加工方法。复合加工中超声加工和激光加热辅助加工同时进行,将高能激光束以一定的入射角打到刀具切削方向的前方,对工件进行预加热,以改善材料的切削特性;同时对切削刀具在切向和径向分别施以同频超声振动 f_a 和 f_b , 以实现对软化后的工件材料进行椭圆超声振动切削,避免刀具后刀面与已加工表面之间的长时间摩擦,同时缓解

刀具的崩刃破损和对工件加工质量的不利影响^[16]。显然, 激光超声复合切削加工将激光加热与超声振动相结合, 充分利用两者的优点, 有望实现刀具磨损的降低以及工件表面质量的提高。

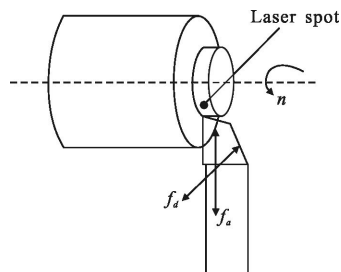


图 1 激光超声复合切削原理
Fig.1 Principle of LUCC

2 试验

2.1 试验材料

试验过程中采用 PCBN 车刀端面切削直径为 $\phi 49$ mm 的 YG10 超硬合金轴件 (其性能参数如表 1 所示)。试验选用型号 DCGW07020、边长 7 mm 的 PCBN 菱形刀片, 装夹后的刀具几何参数见表 2。

表 1 YG10 硬质合金材料特性

Tab.1 Material properties of YG10 cemented carbide

Parameters	Magnitude
Workpiece diameter/mm	49
Co contents	10%
WC contents	90%
Density/g · cm ⁻³	14.5
Hardness/HRA	88.5
Bending strength/MPa	2 160
Impact toughness/J · cm ⁻²	4

表 2 PCBN 刀具几何参数

Tab.2 Geometry parameters of PCBN tool

Parameters	Magnitude
Rake angle/(°)	0
Clearance angle/(°)	7
Inclination angle/(°)	0
Edge angle/(°)	62.5
Nose radius/mm	0.8
Nose angel/(°)	55

2.2 试验装置

激光超声复合切削试验装置如图 2 所示, 在最小分辨率为 10 nm 的 SPHERE360 超精密金刚石数控车床上利用三爪卡盘装夹工件并通过对刀仪调整工件中心轴线与机床主轴轴线的重合度。将激光器的聚焦装置通过光纤连接到激光器主机, 用支架固定在车床工作台上, 通过对激光头位置和角度进行调节, 光斑同刀尖保持一定距离。同时也将超声振动装置固定在车床工作台上, 以实现超声振动装置和激光聚焦装置在切削过程中保持同步。

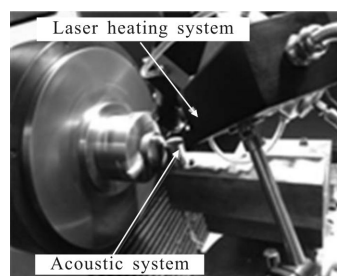


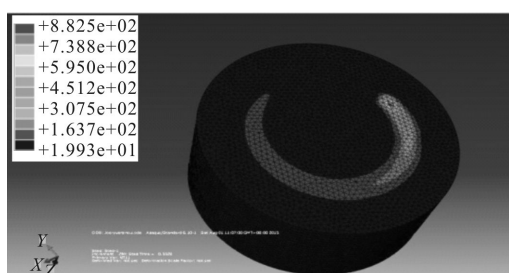
图 2 试验装置
Fig.2 Test equipment

试验采用的 YAG 激光加热系统由激光主机、激光电源、冷却系统、激光指示定位系统、光纤传输系统、导光聚焦系统等组成, 激光波长为 1.06 μm , 激光额定平均功率 ≥ 550 W, 脉冲宽度为 0.1~20 ms, 激光频率调节范围为 1~300 Hz。激光工艺参数为: 光斑直径 $d=0.8$ mm, 光斑距刀尖 4 mm, 入射角为 60°, 激光功率 $P=350$ W。超声振动系统包括超声波发生器、纵向压电换能器、开斜槽变幅杆和刀片, 可实现加工过程中刀具的二维纵弯复合振动, 根据刀片尺寸, 通过 DMG 加工中心在变幅杆顶端加工出一个大小对应的刀槽, 用螺钉将 PCBN 刀片固定在变幅杆上。经阻抗测试, 声学系统纵弯复合振动频率为 34.596 kHz, 采用激光位移传感器测得刀具切向及径向振动振幅分别为 1.4 μm 和 2.1 μm 。

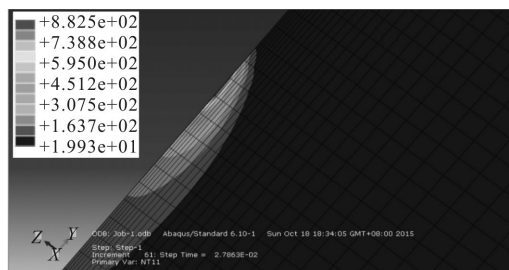
2.3 试验方案

试验过程中工件以转速 n 做旋转运动, 同时刀具沿径向做进给运动, 切削速度 $v=15$ m/min, 进给量 $f=0.01$ mm/r。图 3 为上述激光超声复合工艺参数条件下的工件加热区域温度场的分布, 当温度高于 400 °C 时, 硬质合金材料出现软化, 此时对应的软化层深度为 0.015 mm, 考虑到仿真计算时假设条件的

影响,选取切削深度 $a_p=0.01\text{ mm}$ 。利用红外测温仪测量工件表面温度,在室温下进行传统切削及二维超声振动切削试验,在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时进行激光加热辅助切削和激光超声复合切削试验。另外,当开启超声波发生器时为二维超声振动切削和激光超声复合切削,关闭超声波发生器时为传统切削和激光加热辅助切削。在每一种切削条件下分别使用几何参数相同的 3 把车刀对工件进行端面切削,走刀到直径 37 mm 时退刀。每走一段路程后取下刀具,用 KEYENC VHX-2000C 超景深显微镜观测刀具磨损并取其磨损量平均值。



(a) 表面
(a) On surface



(b) 垂直工件部分
(b) In vertical section of workpiece
图 3 工件加热区域的温度场分布

Fig.3 Temperature distribution of workpiece heating area

3 结果与讨论

4 种切削方式下的刀具磨损规律及磨损形态如图 4~图 7 所示。以下各图中,CC 表示普通切削,UVC 表示超声振动切削,LHAC 表示激光加热辅助切削,LUCC 表示激光超声复合切削。

3.1 刀具磨损规律

图 4 为不同切削条件下 PCBN 刀具切削 YG10 超硬合金时的后刀面磨损曲线。

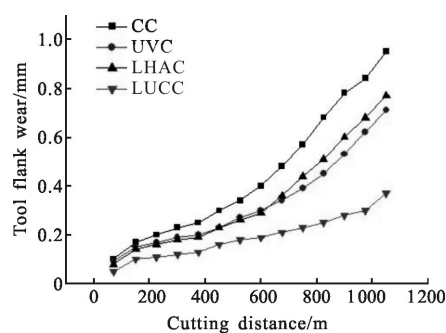


图 4 刀具磨损曲线

Fig.4 Tool wear curves

可以看出,从普通切削、超声切削、激光加热切削到激光超声复合切削,PCBN 刀具后刀面磨损量逐渐减小。另外,4 种切削方式下 PCBN 刀具磨损量随着切削路程的增加均不断增大,但不同阶段的磨损增长率不同:初期磨损阶段,4 种切削方式后刀面磨损率差别不大;正常磨损阶段,超声切削与激光加热切削磨损量基本相同,而激光超声复合切削磨损量则明显减小且持续时间较长;后期磨损阶段,普通切削、超声切削及激光加热切削时刀具磨损速度很快,且磨损量明显高于激光超声复合切削。

分析认为,在初期磨损阶段,刀具比较锋利、与工件实际接触面积较小以及 PCBN 刀具良好的导热性使得 4 种切削方式下的刀具磨损率相差不大;在正常磨损阶段,超声切削时工件和刀具的断续接触和分离大大降低了切削力和摩擦力,激光加热辅助切削时的工件材料软化提高了其切削性能,因此超声切削与激光加热切削刀具磨损基本相同且明显小于普通切削。而激光超声复合切削则充分结合超声和激光加热的优点,从而使得刀具磨损量及磨损率均大大降低;在后期磨损阶段,当切削路程达到 650 m 时,激光超声复合切削仍处于正常磨损阶段,但普通切削、超声切削和激光加热切削时刀具磨损量均已超过磨钝标准 0.3 mm ,处于急剧磨损阶段,切削力及切削温度显著增大,使得刀具磨损率迅速上升,甚至导致刀具破损。另外,在后期磨损阶段,由于超声切削时的断续切削,使得超声切削及激光超声复合切削时的刀具磨损要小于普通切削和激光加热切削。

3.2 刀具磨损形态

图 5、图 6 分别为放大 100 倍和 1000 倍时 4 种切削方式下的刀具磨损形貌。图 7 为不同切削路程

时激光超声复合切削刀具的磨损形貌。

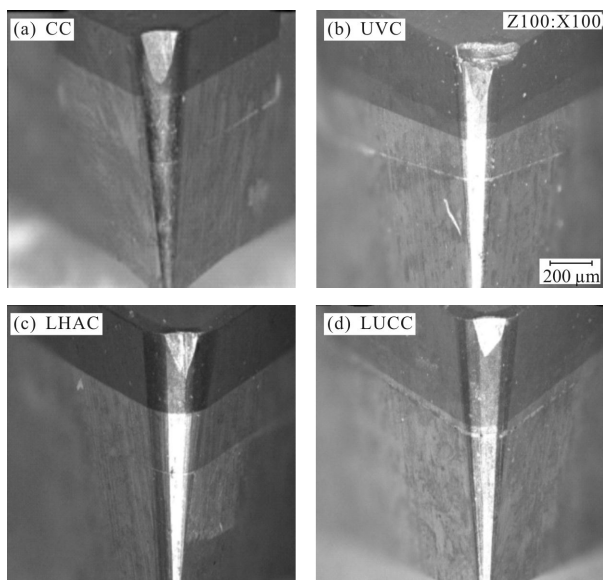


图 5 刀具磨损形貌

Fig.5 Tool wear morphology

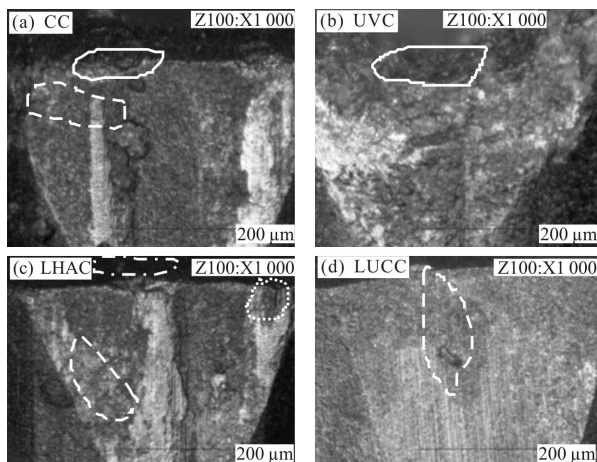


图 6 刀具磨损形貌

Fig.6 Tool wear morphology

可以看出,4 种切削方式下 PCBN 刀具切削 YG10 时后刀面均会形成三角形状的磨损亮带(图 5),但超声切削和激光超声复合切削时磨损带宽度较低,磨损表面上有许多凹坑和长条沟状划痕(图 6),其中,普通切削时磨损最为严重,甚至出现了裂纹(图 6(a)中虚线包围区域),而激光超声复合切削时凹坑和划痕较浅,表面更光滑。这是由于:一方面,PCBN 刀具是由 CBN 颗粒和粘结相烧结而成,YG 硬质合金中的硬质点对刀具后刀面的刮擦、研磨作用使得粘结相中的金属材料产生磨损,从而致使刀

具中的 CBN 颗粒突露出表面,受到冲击或因松动很容易产生剥落;另一方面,切削过程中刀具后刀面与工件已加工表面之间的摩擦挤压使得该接触区温度较高,同时 PCBN 车刀较大的负倒棱前角(-20°)使得切屑的流出方向几乎接近后刀面,从而导致高温高压下刀具后刀面容易产生氧化、粘结及扩散等磨损,刀具硬度降低,刀具表面形成凹坑和划痕^[17];另外,超声切削时的断续切削和激光加热切削时的材料软化作用使得其刀具后刀面磨损程度低于普通切削,而结合了超声和激光加热优点的激光超声复合切削过程中刀具和工件已加工表面之间的作用力及切削温度相对较低,从而大大降低了刀具的后刀面磨损。

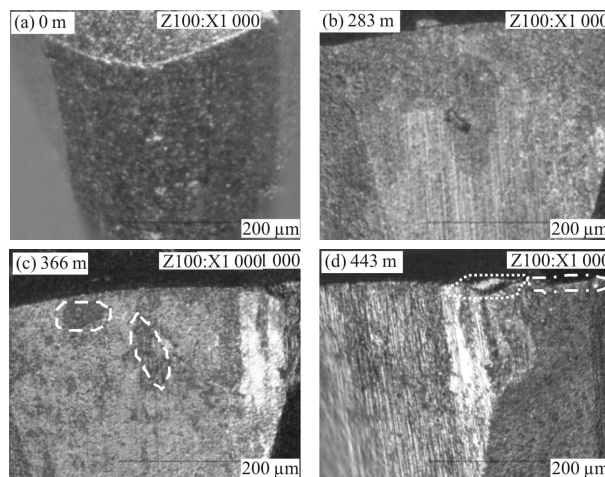


图 7 激光超声复合切削时的刀具磨损形貌

Fig.7 Tool wear morphology in LUCC

采用 PCBN 刀具切削 YG10 硬质合金过程中,4 种切削方式下前刀面磨损形式表现为不同程度的剥落和崩刃。普通切削时,PCBN 刀具连续切削 YG10 硬质合金,工件材料的低韧性及工件中硬质点对刀具的挤压摩擦致使前刀面容易出现脆性剥落(图 6(a)中实线包围区域);超声切削时,由于刀尖部位受高频断续冲击^[18],在前刀面近切削刃附近出现片状脱落(图 6(b)实线包围区域);而在激光加热切削和激光超声复合切削时,由于 PCBN 刀具的结构特性,其晶界处存在着不均匀的内应力使得晶界强度大大降低,因此在高温高压条件下,切屑流过刀具前刀面时,工件材料中的硬质点对刀具产生微冲击和瞬时热应力,且复杂的切削力和切削热则主要集中在切削刃附近,另外高温时粘接、扩散及相变等因素均使得刀具在刀尖处产生崩刃(图 6(c),图 7(d)中点划线包围区域)。

3.3 刀具磨损原因

3.3.1 机械磨损

4 种切削方式下切削 YG10 硬质合金时,刀具与工件之间的相对运动引起的剧烈摩擦和工件材料中的硬质点对刀具表面的划伤作用使得由机械摩擦引起的刀具磨损是最常见且主要的磨损因素。图 5、图 6 中的刀具前刀面上的剥落现象以及后刀面上的磨损亮带和划痕,都证明了刀具前后刀面都承受着较大的机械摩擦作用。

3.3.2 氧化磨损

表 3 为 4 种切削方式下刀具磨损区域的成分对比,图 8 为激光超声复合切削时通过 SEM 对刀具磨损区域进行的能谱分析。

表 3 能谱分析结果

Tab.3 Results of energy spectrum analysis

Elements	CC	UVC	LHAC	LUCC
W	30.83%	15.42%	27.52%	16.84%
Co	9.62%	12.92%	15.81%	14.90%
O	2.2%	2.14%	4.43%	3.88%

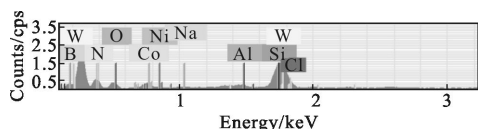


图 8 激光超声复合切削刀刃附近磨损区域能谱

Fig.8 Energy spectrum of wear area near blade in LUCC

由图 8 可以看出,刀具磨损区域增加了 W、C、Na 和 Cl 等元素,表 3 表明了 4 种切削条件下 W、Co 和 O 元素的不同含量。分析各元素的变化,可以发现:(1)在激光加热辅助切削和激光超声复合切削时,O 元素的大幅增加说明切削过程中较高的温度使得 Co 元素和空气中的 O 元素发生化学反应以及 CBN 中的氮元素会被氧元素替换,容易在刀具磨损边缘形成氧化膜,切削时受工件表面冷硬层及硬质点的连续挤压摩擦,从而造成刀具后刀面的氧化磨损,当磨损量达到一定程度时,就会形成氧化磨损沟槽。(2)Na 和 Cl 元素来源于 CBN 微粉净化处理过程的残留,其质量分数很小,因此不考虑其对刀具磨损的影响。

3.3.3 粘接磨损和相变磨损

在 4 种切削方式尤其是激光加热切削和激光超

声复合切削过程中:一方面,W 元素和 Co 元素质量分数的变化说明刀具与工件之间产生了元素间的相互扩散,这使得 CBN 的惰性不断降低,与合金元素的亲和倾向增加,当刀具、切屑以及工件之间的作用力及温度达到一定程度时,就产生了 PCBN 刀具的粘接磨损(图 6(c)、图 7(d)中圆点包围区域)。而刀具材料中金属 Ni 的存在(见图 8)则会进一步增强三者之间的粘接强度,从而加剧了粘接磨损。另一方面,立方氮化硼在高温作用下发生逆转化 CBN-HBN(六方氮化硼),硬度极低的 HBN 部分将会失去切削能力并被带走,从而造成 PCBN 刀具磨损。另外,切削过程中的氧化反应又在 CBN→HBN 的逆转化中起到了催化剂的作用,从而进一步加剧了刀具的相变磨损,有时会出现许多不均匀的“麻斑”(图 6(c),6(d)及图 7(c)中虚线包围区域)。图 6 中刀具后刀面磨损表面中的凹坑及前刀面上的剥落现象均表明了刀具磨损过程中不同程度的粘接磨损和相变磨损的存在。

3.3.4 微裂解磨损

PCBN 是由无数微小而无方向性的 CBN 单晶组成。在 CBN 聚晶过程中通过触媒或添加剂向材料中扩散进去的“杂质”(如 Si、Ca、Cu 等元素)存在于晶界间,致使晶界处的强度较低。另外,即使在烧结良好的情况下,在原始晶粒内部以及晶界处也均存在着内应力,这些因素导致聚晶体的实际强度远低于其理论值。在 4 种切削方式尤其是激光加热切削和激光超声复合切削时,PCBN 刀具刀刃部分由于高温高压的作用,产生了微小单晶颗粒脱落的现象,即微裂解,而多个 CBN 颗粒的剥落则形成了崩刃现象^[9]。

4 结论

(1) 对比普通切削、超声振动切削、激光加热辅助切削及激光超声复合切削 YG10 硬质合金时 PCBN 刀具的后刀面磨损曲线,激光超声复合切削时刀具后刀面磨损量平均值分别降低 57.5%、46%、41.3%,刀具使用寿命明显提高。

(2) 切削 YG10 超硬合金时,普通切削和超声振动切削时 PCBN 刀具前刀面上呈现出不同程度的脆性剥落和片状剥落,而激光加热辅助切削及激光超声复合切削时 PCBN 刀具易于在刃口产生崩刃;后刀面磨损形式主要表现为三角形状的磨损亮带以及

磨损表面上的凹坑和划痕,其中,激光超声复合切削时磨损带较窄且凹坑和划痕较浅。

(3) 在 4 种切削方式下加工 YG10 超硬合金时,PCBN 刀具承受着机械、扩散、相变、粘接、氧化和微裂解的综合作用,但激光加热切削以及激光超声复合切削时粘接磨损、氧化磨损、相变磨损及微裂解磨损是主要原因。

参考文献:

- [1] Mukhopadhyay Amartya, Basu Bikramjit. Recent developments on WC-based bulk composites [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(3): 571-589.
- [2] Zhang Weibing, Liu Xiangzhong, Chen Zhenhua, et al. Latest development of WC-Co cemented carbide [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2015, 39(2): 178-185. (in Chinese)
- [3] Zhu Haihong, Lu Hong, Cheng Zuhai. Research and application status of laser-assisted cutting engineering ceramic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 58-63. (in Chinese)
- [4] Yang Lijun, Zhang Hongzhi, Wu Xuefeng, et al. Laser cutting technology with the effect of thermal often and thermal stress [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1038-1043. (in Chinese)
- [5] Wang Yang, Li Chunqi, Yang Lijun, et al. Research on unconventional laser cutting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 448-454. (in Chinese)
- [6] Wang Yang, Yang Lijun, Qi Litao. Laser-assisted hot cutting characteristics of Al_2O_3 particle reinforced Al-matrix composite [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(4): 344-346. (in Chinese)
- [7] Wu Xuefeng, Wang Yang, Zhang Hongzhi. Experimental research on laser assisted cutting of silicon nitride ceramics [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1457-1462. (in Chinese)
- [8] Liu Weiqiao, Yan Cuo, Xie Linchun, et al. Research on parameter selection of pulsed laser-assisted cutting of alumina ceramics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0703005. (in Chinese)
- [9] Hsu C Y, Lin Y Y, Lee W S, et al. Cutting characteristics of Inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3): 359-365.
- [10] Riaz Muhammad, Anish Roy, Vadim V Silberschmidt. Finite element modelling of conventional and hybrid oblique cutting processes of titanium alloy [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 510-515.
- [11] Riaz Muhammad, Agostino Maurotto, Anish Roy, et al. Hot ultrasonically assisted cutting of β -Ti alloy [J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 336-341.
- [12] Riaz Muhammad, Agostino Maurotto, Murat Demiral, et al. Thermally enhanced ultrasonically assisted cutting of Ti alloy [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, 7(2): 336-341.
- [13] Zareena A R, Veldhuis S C. Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision cutting of titanium [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3): 560-570.
- [14] Saketi S, Sveen S, Gunnarsson S, et al. Wear of a high cBN content PCBN cutting tool during hard milling of powder metallurgy cold work tool steels [J]. *Wear*, 2015, 332-333: 752-761.
- [15] José C Camargo, Dany Sanchez Domingueza, Emmanuel O Ezugwub, et al. Wear model in cutting of hardened steel with PCBN tool [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 47: 61-70.
- [16] Toshimichi Moriwakia, Eiji Shamotoa. Ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1995, 44(1): 31-34.
- [17] Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of Tribology [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 399-401. (in Chinese)
- [18] Liu Yunfeng, Jing Juntao, Li Zhanjie. Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 2021-2028. (in Chinese)
- [19] Ge Yingfei, Xu Jiuhua, Fu Yucan. Wear mechanisms of PCD tool in high-speed milling of SiCp/Al composites [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2907-2918. (in Chinese)