

文章编号 1004-924X(2016)06-1413-11

激光超声复合切削硬质合金的刀具磨损 及其对工件表面质量的影响

张昌娟, 焦 锋*, 赵 波, 牛 赢

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 基于激光加热辅助切削和超声椭圆振动切削提出了激光超声复合切削加工工艺。采用聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具对YG10硬质合金进行了常规切削, 超声椭圆振动切削, 激光加热辅助切削和激光超声复合切削对比试验。检测了刀具磨损量、刀具磨损形貌、工件表面粗糙度以及工件表面形貌, 并通过扫描电镜(SEM)对刀具磨损区域进行了能谱分析, 同时研究了激光超声复合切削硬质合金时PCBN刀具的磨损及其对工件表面质量的影响。最后, 与常规切削、超声振动切削及激光加热辅助切削进行了对比试验。结果表明: 激光超声复合切削时刀具使用寿命显著增加, 加工后的工件表面粗糙度平均值分别降低了79%、60%和64%, 且工件表面更加平整光滑。激光超声复合切削硬质合金时, PCBN刀具的前刀面磨损表现为平滑且均匀的月牙洼磨损, 后刀面磨损表现为较窄的三角形磨损带和较浅的凹坑和划痕; 刀具的失效机理主要为黏接磨损、氧化磨损和磨粒磨损的综合作用。

关键词: 激光超声复合切削; 硬质合金; 聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具; 刀具磨损; 表面质量

中图分类号: TG665; TG506.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1413

Tool wear in laser ultrasonically assisted cutting cemented carbide and its effect on surface quality

ZHANG Chang-juan, JIAO Feng*, ZHAO Bo, NIU Ying

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

* Corresponding author, E-mail: jiaofeng@hpu.edu.cn

Abstract: A laser ultrasonically assisted machining was proposed based on laser heating assisted machining and ultrasonically elliptical vibration machining. A series of comparison experiments were conducted by conventional cutting, ultrasonically elliptical vibration cutting, laser assisted cutting and laser ultrasonically assisted cutting for YG10 cemented carbide with Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) tools. The tool wear mechanism and its effect on surface quality of a workpiece were discussed by detecting the tool wear conditions, the surface morphology and surface roughness of the workpiece and by analyzing the energy spectrum of worn areas with a Scanning Electron Microscopy (SEM). The comparison was carried out with conventional cutting, ultrasonically elliptical vibration cutting and laser assisted cutting. The results show that the flank wear of PCBN tool obtained by laser ultrasonically assisted cutting is reduced, and the average surface roughnesses of the workpieces

收稿日期: 2016-02-10; 修订日期: 2016-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075127, No. 51175153); 河南省机械制造及其自动化省级重点学科资助项目

are reduced by almost 79%, 60% and 64% respectively. Therefore, the tool life is obviously lengthened and the workpiece surface is smoother by laser ultrasonically assisted cutting. In laser ultrasonically assisted machining cemented carbide, the wear on rake face is characterized by the smooth and uniform crater, the flank face has a narrow triangular wear land, shallow pits and scratches, and PCBN tool failure mechanisms are the synergistic interaction of adhesive wear, oxidation wear and abrasive wear.

Key words: laser ultrasonically assisted cutting; cemented carbide; polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN) tool; tool wear; surface quality

1 引言

光学零件的模压成型技术作为一种高精度光学元件加工技术,已成为国际上最先进的光学零件制造技术之一^[1]。该项技术需要设计专用的模压机床,采用高质量的模具和选用合理的工艺参数,其中高质量成型模具的材料选择与加工制造成为关键。最具代表性的模具材料是以 WC 等超硬合金为基体,表面涂镀氮化钛等薄膜。但由于模具材料硬度高、脆性大,在加工过程中容易产生裂纹,影响工件的加工性能,因此对模具材料加工中所使用的刀具和加工方法提出了较高要求。在这些模具材料的精密加工过程中,除了必需使用高刚性、高分辨率的超精密数控机床,目前一般采用先磨削加工后抛光精加工成光学镜面^[2]。特别是在高精度非球面模具加工中,为了进一步提高精度和减轻磨削的痕迹,必需超精加工的多次反复^[3]。导致高精度光学零件成型模具的制造成本较高,制约了该技术的进一步发展。本文将超声振动切削和激光加热辅助切削引入到常规切削中,提出激光超声复合切削加工工艺,采用 PCBN 刀具对 YG10 硬质合金进行超精密加工实验研究,来实现硬质合金等硬脆材料的高效超精密制造,对促进光学零件模压成型技术的实际应用和以经济高效的方式进行光学元器件的加具有现实意义。

激光加热辅助切削(Laser Assisted Cutting, LAC)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^[4]。王扬^[5]、吴雪峰^[6]、鄢铨^[7]等人分别对复合材料、氮化硅陶瓷和氧化铝陶瓷进行了激光加热辅助切削的理论与试验研究,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,热应力容易使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形成的热超声辅助切削加工技术在难加工材料的高效精密加工中得到应用,但取得的相关研究成果较少。C. Y. Hsu 等^[8]利用气焊枪加热工件,将超声振动与高温辅助切削相复合,研究了切削参数对切削力及工件表面粗糙度的影响。Riaz Muhammad 等^[9-10]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与切削力试验研究。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,针对刀具的磨损及其机理方面的研究较少,且加热工件时的热源为气焊枪加热或加热器加热,缺乏关于激光超声复合切削的研究。

此外,研究人员在使用 PCBN 刀具切削淬硬钢、铸铁及高温合金等材料时的刀具磨损机理及切削性能等研究方面取得了较大进展,而有关加工硬质合金时的刀具磨损特性及切削性能等方面的研究相对较少。关佳亮等^[11]采用 ELID 磨削和机械研磨抛光复合技术对硬质合金表面进行了超精密加工试验,研究了各工艺参数对加工表面粗糙度的影响,并获得了表面粗糙度 Ra 18 nm 的精密加工表面,但没有涉及刀具磨损的研究。郭锐等^[12]对硬质合金进行超高速切削,研究了硬质合金在超高速切削过程中达到一定切削速度后切削力不增反降的原理,对刀具磨损也没有进行研究。邹吉才^[13]对纳米硬质合金刀具进行了在线电解修整(ELID)磨削,研究了纳米硬质合金与大理石的摩擦磨损特性,但没有针对刀具磨损进

行研究。郇吉才、张飞虎^[14]采用 ELID 磨削技术对纳米硬质合金的磨削性能也进行了试验研究,分析了磨削工艺参数对磨削性能的影响,该研究同样没有涉及刀具磨损。

由以上文献可知,针对难加工材料激光超声复合切削方面的研究和 PCBN 刀具切削硬质合金时的刀具磨损及其机理方面的研究较少,而在激光超声复合切削硬质合金的过程中刀具磨损严重,且刀具的微量磨损即会导致零件加工质量较差,难以满足元器件表面质量达到超精密级的光学工程需要。因此,开展激光超声复合切削硬质合金时的 PCBN 刀具磨损特性的研究很有必要。本文进行了 PCBN 刀具常规切削(Conventional Cutting, CC)、超声振动切削(Ultrasonically Assisted Cutting, UAC)、激光加热辅助切削(LAC)以及激光超声复合切削(Laser Ultrasonically Assisted Cutting, LUAC) YG10 硬质合金刀具磨损对比试验,通过刀具磨损及工件表面质量的观测,揭示激光超声复合切削硬质合金时 PCBN 刀具的磨损规律及磨损机理,研究刀具磨损对工件表面质量的影响,为 PCBN 刀具超精密切削硬质合金的应用提供技术支持并指导生产实践。

2 激光超声复合切削加工原理

切削原理如图 1 所示,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局部加热到较高的温度,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^[5-6];同时对刀具施以纵弯复合振动使其以椭圆振动轨迹对工件表面进行切削,以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^[15]。显然,激光超声复合切削加工将激光加热辅助切削和超声加工相结合,充分利用超声加工和热加工的优点,以期在一定程度上减小刀具磨损、降低加工成本、提高加工质量。

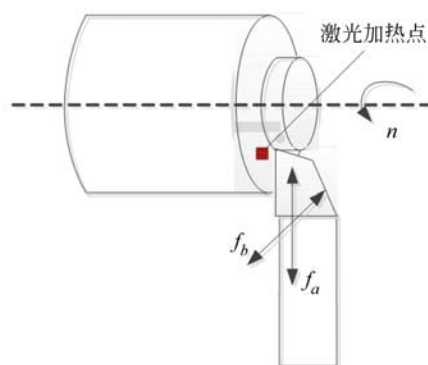


图 1 激光超声复合切削原理

Fig. 1 Principle of LUAC

图 1 中,工件以转速 n 做旋转运动,同时刀具沿径向做进给运动,以实现端面切削。将高能激光束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。因此,激光超声复合加工有望实现刀具磨损的降低及提高工件表面质量。

3 实验

3.1 工件与刀具

试验选用直径为 $\varphi 49$ mm 的 YG10 硬质合金轴件,WC 含量为 90%,Co 含量为 8%。所用的 PCBN 菱形刀片型号为 DCGW070204、边长为 7 mm,根据刀片尺寸,通过 DMG 加工中心在变幅杆顶端加工出大小对应的刀槽,用螺钉将 PCBN 刀片固定在变幅杆上,装夹后的刀具几何参数如表 1 所示。图 2 所示为经超景深显微镜检测的切削试验前的 PCBN 刀具。

表 1 刀具几何参数

Tab. 1 Geometry parameters of PCBN tool

参数名称	数值
前角/(°)	0
后角/(°)	7
刃倾角/(°)	0
主偏角/(°)	62.5
刀尖圆弧半径/mm	0.4

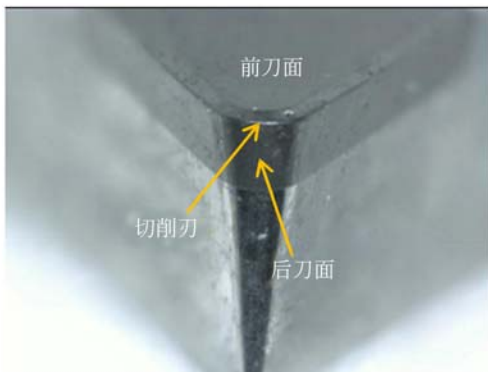


图 2 试验前的 PCBN 刀具
Fig. 2 PCBN tool before tests

3.2 试验设置

激光超声复合切削试验装置如图 3 所示,采用最小分辨率为 10 nm 的 SPHERE360 超精密金刚石数控车床和 YAG 激光加热系统。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,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。超声振动系统包括超声波发生器、纵向压电换能器、开斜槽变幅杆和车刀,可实现加工过程中刀具的二维纵弯复合振动。实验过程中,将二维超声振动装置与测力仪连接在一起固定在机床工作台上,实现超声振动装置和激光聚焦装置在切削过程中时刻保持同步。

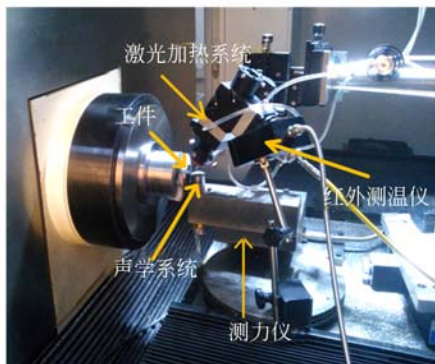


图 3 试验装置
Fig. 3 Test equipment

利用德国欧普士生产的 OPRIS-CT 红外测温仪在线测量工件表面温度(见图 3),通过阻抗分析仪和激光位移传感器对声学系统进行振动频

率和振幅测试。实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数
Tab. 2 Experimental conditions

参数名称	数值
切削速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	15
进给量/($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	0.010
切削深度/ μm	10
激光波长/ μm	1.06
激光功率/W	350
激光入射角/ $^{\circ}$	60
激光光斑直径/mm	0.4
激光光斑距刀尖距离/mm	3
切向超声振幅/ μm	1.4
轴向超声振幅/ μm	2.1
超声振动频率/kHz	35

研究表明,当温度高于 400°C 时,硬质合金的硬度大幅度下降,材料被软化,塑性增强^[16-17]。图 4 所示为表 2 实验条件下的工件加热区域纵切面温度场的分布,同时测得工件表面激光光斑中心的平均温度为 665°C ,刀尖点的平均温度为 400°C 。在此温度下,工件材料的可加工性能得到一定改善,同时刀尖也不会因温度过高而缩短寿命。因此,在室温下进行传统切削及二维超声振动切削试验,在刀尖平均温度为 400°C 左右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使用一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 超景深显微镜和 SEM 扫描电镜观测刀具磨损并对刀具磨损区域进行能谱

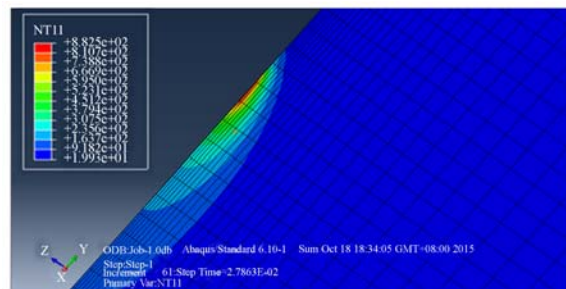


图 4 工件加热区域的温度场分布
Fig. 4 Temperature distribution of workpiece

分析,用白光干涉仪对工件加工表面形貌及表面粗糙度进行检测。

4 试验结果

图5~12以及表3中,CC表示普通切削,UAC表示超声振动切削,LAC表示激光加热辅助切削,LUAC表示激光超声复合切削。

4.1 刀具后刀面磨损特性

图5所示为不同切削条件下PCBN刀具切削YG10硬质合金时的后刀面磨损曲线。可以看出,从常规切削、超声振动切削、激光加热切削到激光超声复合切削,切削路程相同时PCBN刀具后刀面磨损量逐渐减小,且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,常规切削、超声切削及激光加热切削时刀具磨损速度较快,且磨损量明显高于激光超声复合切削。

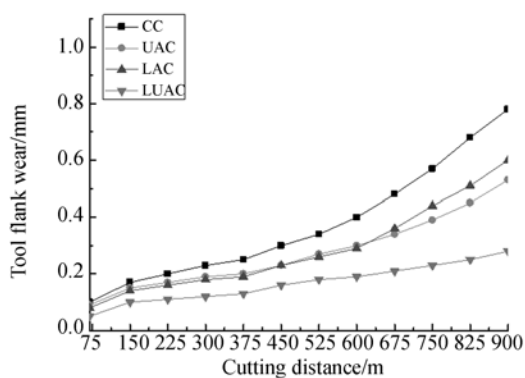
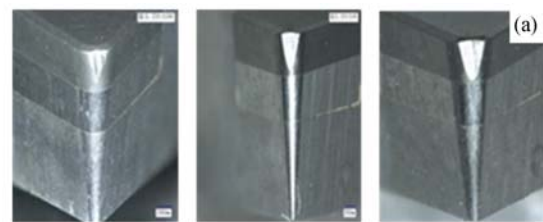


图5 刀具后刀面磨损曲线
Fig. 5 Tool flank wear curves

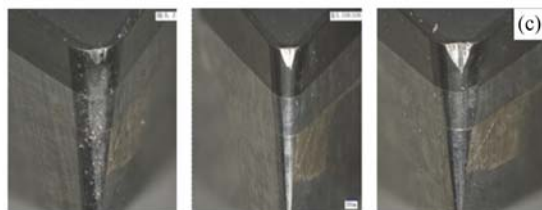
图6所示为切削路程分别为283.4 m、368.3 m和584.4 m时不同切削条件下的刀具磨损形貌图。可以看出,4种切削方式下刀具后刀面均形成三角形状的磨损带。在切削距离为283.4 m时刀具出现了较程度的磨损,后刀面磨损带内出现了沿切削方向的沟槽,且常规切削和激光加热辅助切削时的磨损程度最为严重,其次是超声振动切削,激光超声复合切削时刀具后刀面磨损较轻。此时4种切削方式下刀具均处于初期磨损状态。



(a)CC



(b)UAC



(c)LAC



(d)LUAC

图6 不同切削距离时的刀具磨损形貌(从左至右,切削距离依次为283.4m、368.3、584.4m)

Fig. 6 Tool wear morphologies at different cutting distances (from left to right, the cutting distances are respectively 283.4m, 368.3 and 584.4m)

切削距离为368.3 m时,4种切削方式下刀具后刀面磨损带宽度逐渐增加,后刀面磨损区域呈现平滑且均匀的状态。常规切削时后刀面磨损带宽度及长度明显增加,超声振动切削时在刀具前刀面近切削刃区域出现了明显的月牙洼磨损,激光加热辅助切削时刀具后刀面磨损区域近切削刃区域出现了明显的沟槽,而激光超声复合切削

时刀具后刀面磨损程度依然较轻。此时刀具处于正常磨损阶段。

切削距离达到 584.4 m 时,4 种切削条件下的刀具前、后刀面磨损形貌分别如图 7、图 8 所示。可以看出,刀具磨损程度继续增加,刀具后刀面磨损带的宽度持续增大,且磨损带内沟槽的数量及深度均增加。其中,常规切削时磨损最为严重,前刀面近切削刃处出现了脆性剥落且后带面磨损带内甚至出现了裂纹;超声振动切削时由于刀尖部位受高频断续冲击,刀具前刀面近切削刃附近出现了片状脱落^[18];激光加热辅助切削时近切削刃处出现了崩刃现象,且后刀面磨损带内的沟槽深度较深。另外,激光加热辅助切削及激光超声复合切削时刀具后刀面磨损带内均出现了不同程度的“麻斑”现象。此时,激光超声复合切削时刀具仍然处于正常磨损阶段,而另外 3 种切削方式下刀具均已处于剧烈磨损阶段。

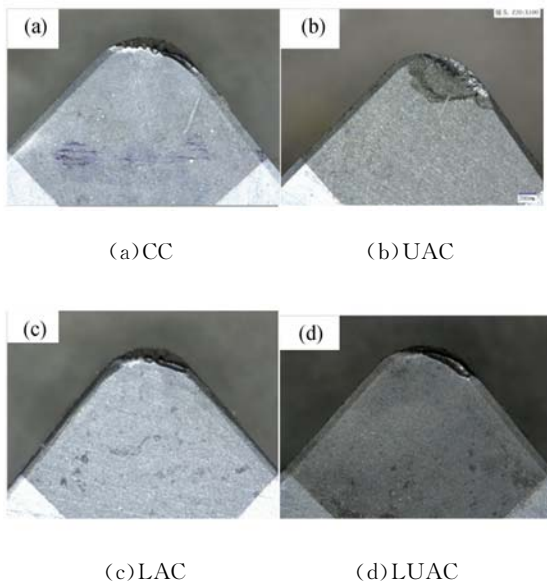
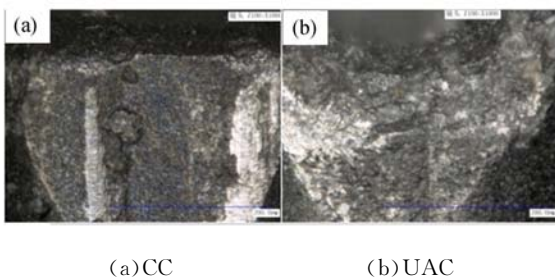
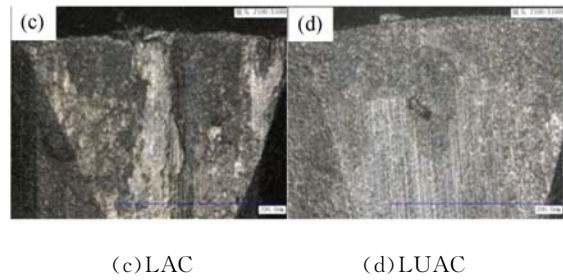


图 7 切削距离为 584.4 m 时的刀具前刀面磨损形貌
Fig. 7 Tool wear morphologies on rake face after the cutting distance of 584.4 m



(a)CC (b)UAC



(c)LAC (d)LUAC

图 8 切削距离为 584.4m 时的刀具后刀面磨损形貌
Fig. 8 Tool wear morphologies on flank face after the cutting distance of 584.4 m

4.2 刀具磨损对工件表面质量的影响

图 9 所示为切削路程增加时不同切削方式下的工件表面粗糙度。可以看出,在相同的加工工艺参数下,从常规切削、超声振动切削、激光加热辅助切削到激光超声复合切削,加工后的工件表面粗糙度值呈现减小的趋势,激光超声复合切削时表面粗糙度值最小。试验中,当切削距离为 100.08 m 时 4 种切削方式下获得的表面粗糙度值均最小,但与常规切削、超声振动切削以及激光超声复合切削相比,激光超声复合切削所获得的表面粗糙度 R_a 值分别降低约 68%、42% 和 14%,整个切削路程中获得的表面粗糙度平均值分别降低 79%、60% 和 64%。

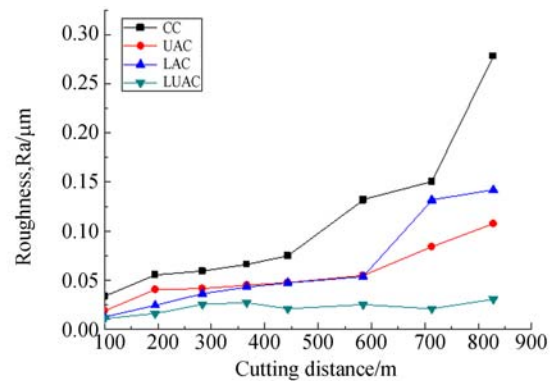


图 9 不同切削距离时的工件表面粗糙度
Fig. 9 Surface roughness of workpiece at different cutting distances

另外,随着切削路程的增加,4 种切削方式下的工件表面粗糙度值均增加,其中激光超声复合切削时工件表面粗糙度值的变化较小。常规切削时在切削距离达到 444 m 之前以及超声振动切削及激光超声复合切削方式下切削距离未超过 584 m 时,工件表面粗糙度值随着切削距离的增加仅有小幅上升,说明刀具磨损处于平缓稳定的

正常磨损阶段,可获得较高表面质量的工件。而常规切削时切削距离超过 444 m、超声振动切削及激光加热辅助切削时切削距离超过 584 m 时,与达到此距离前相比,工件表面粗糙度值急剧增加,当切削距离达到 830 m 时,这 3 种切削方式下的工件表面粗糙度值 R_a 分别增至 $0.28 \mu\text{m}$ 、 $0.11 \mu\text{m}$ 和 $0.14 \mu\text{m}$,与 3 种切削方式下的最小表面粗糙度值相比分别增加了 727%、480% 和 1 036%,说明这 3 种切削方式下刀具处于不稳定的剧烈磨损阶段,随着刀具磨损的加剧,已无法获得高质量的工件表面。而激光超声复合切削方式下切削距离达到 830 m 时的表面粗糙度 R_a 值为 $0.03 \mu\text{m}$,比最小粗糙度值增加了 184%,说明此时刀具仍处于正常磨损阶段,依然可以获得较高的工件表面质量。

图 10 所示为 4 种切削条件下工件的表面微观形貌。可以看出,沿进给方向工件已加工表面存在明显的加工纹理,常规切削时工件表面分布着较深而窄的刀痕,呈现明显的脆性去除的沟槽特征,而超声振动切削时工件表面上刀痕两边的材料往两边伸展,刀痕呈现显微塑性变形,工件表面上存在近塑性去除的加工纹理,沟槽变得宽而浅。而激光加热辅助切削和激光超声复合切削时工件表面呈现明显的塑性变形,沟槽基本消失,表面完整性良好,尤其是激光超声复合切削时的工件表面形貌更加平整、光滑。

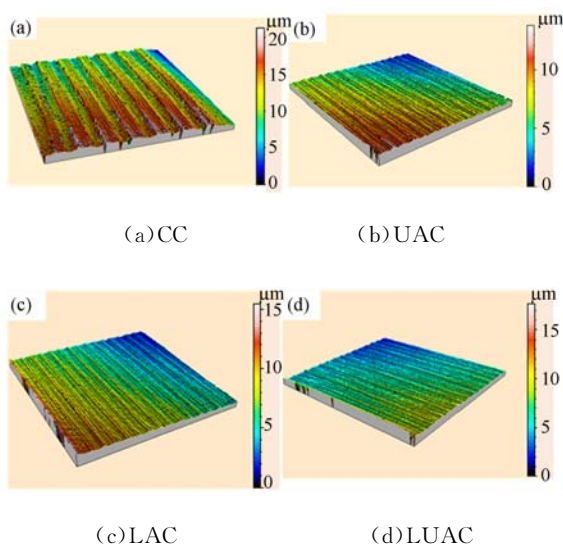


图 10 不同切削方式下的工件表面形貌

Fig. 10 Surface morphology of workpiece

4.3 分析与讨论

在刀具的初期和正常磨损阶段刀具比较锋利以及 PCBN 刀具良好的导热性使得 4 种切削方式下的刀具后刀面磨损量以及工件表面粗糙度值平稳增加。常规切削时工件材料的高硬度及低塑性使得切削过程中刀具和工件之间的作用力较大,而刀具与工件的连续接触也不利于热量的散失,从而造成严重的刀具磨损以及较低的工件表面质量;超声振动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,使得刀具的磨损量小于常规切削且刀具寿命较长。另外,超声振动过程中的高频振动致使刀具在切削方向上产生较大的加速度,刀尖上聚集了极高的动能,工件材料被瞬间切除,剪切带材料断裂后的裂纹还没来得及向四周扩展,刀具已经卸载对工件力的作用,减少了表面撕裂的可能,这些都使得超声振动切削获得的工件表面粗糙度值较小、表面质量较高;激光加热辅助切削过程中工件材料被软化、塑性增强,大大降低了切削力并避免了常规切削和超声振动切削中刀具与工件表面的一些脆硬性冲击作用,从而使得刀具磨损和工件表面粗糙度值大大降低、工件表面表面质量大大提高。激光超声复合切削融合了激光软化工件材料的能力和超声振动断续切削和方便排屑的优点,大大降低了对刀具和工件表面产生破坏的可能性,刀具的磨损量更小、使用寿命更长,工件表面更加平整、光滑。

图 11 所示为切削力随刀具磨损的变化。可以看出,在刀具的剧烈磨损阶段,刀具的锋利性降低以及刀具与工件之间的接触面积增大造成切削力大幅度增加,切削温度急剧上升,从而导致刀具的磨损量急剧增加,工件表面质量明显降低。与超声振动切削相比,激光加热辅助切削时工件材料较大的塑性变形以及较高的切削温度使得切削力增大、刀具磨损增加、工件表面质量降低。激光超声复合切削时由于刀具依然处于正常磨损阶段,因此刀具的磨损量及工件表面粗糙度值平稳增加,工件表面质量较好。

在切削的初始阶段,由于刀具的磨损较小且刃口锋利,在切削刃处容易形成应力集中;此外,PCBN 车刀较大的负倒棱前角 (-20°) 使得刀具前刀面上的作用力和切削温度大大增加。因此,与后刀面相比,刀具前刀面上近切削刃处的区域

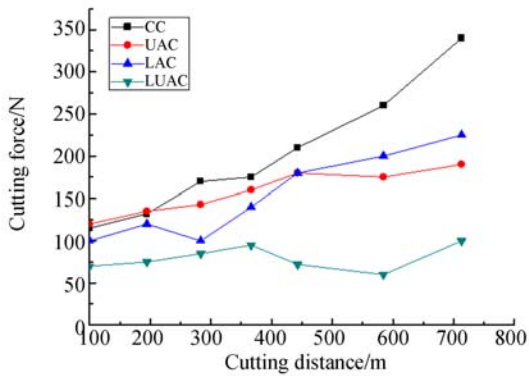


图 11 不同切削距离时的切削力

Fig. 11 Cutting force at different cutting distances

承受着高温高压的作用,扩散和氧化成为前刀面磨损中的主要原因^[19]。随着切削距离的增加,刀具前后刀面受到一定程度的磨损致使刀具的锋利性下降,从而在一定程度上降低了前刀面上近切削刃处的应力集中;此外,切削过程中较小的切削用量以及工件材料的高硬度与低塑性的特性使得在刀具前刀面上不会存留大量的切屑,使得切屑底部与前刀面之间的相对运动对刀具前刀面磨损的影响较小;但是,由于 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,聚晶体的实际强度远低于其理论值,刀具切削刃在切削力的作用下容易产生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^[20]。

切削过程中刀具后刀面与工件已加工表面之间的挤压、摩擦、弹性恢复以及相对运动形成了两者之间复杂的相互作用力和较高的切削温度。在切削的初始阶段,刀具较好的锋利性使得后刀面与已加工表面之间的实际接触面积较小,因此,两者之间的作用力较小。但是,由于 PCBN 刀具由 CBN 颗粒和黏结相烧结而成,硬质合金中的硬质点对刀具后刀面的刮擦、研磨作用使得作为粘结相的金属产生磨损,从而致使刀具中的 CBN 颗粒突露出表面,受到冲击或因松动,CBN 颗粒很容易产生剥落。因此,在切削路程的初始阶段,磨粒磨损和粘接剂磨损成为刀具磨损的主要原因,从而导致刀具后刀面呈现出分布有不同程度凹坑和刀痕的磨损亮带。随着切削距离的增加,后刀面与已加工表面之间的实际接触面积以及后

刀面磨损量均逐渐增大,且后刀面磨损量的增加又使得刀具实际后角减小,再加上 PCBN 车刀较大的负倒棱前角使得切屑的流出方向几乎接近后刀面,这些因素导致刀具后刀面承受的作用力明显增加,而这又进一步降低了刀具的磨损和工件表面质量,刀具后刀面呈现出明显的划痕、凹坑以及麻斑现象。图 12 及表 3 为 4 种切削方式下通过 SEM 对 PCBN 刀具后刀面磨损区域近切削刃处进行能谱分析结果。

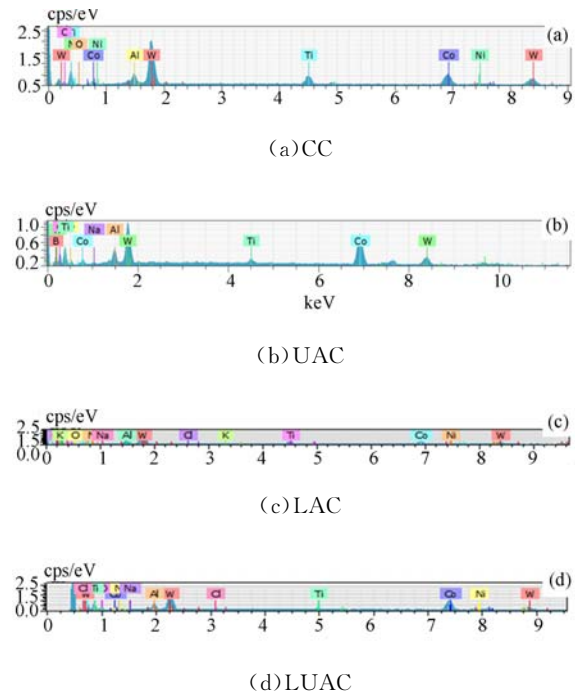


图 12 刀具后刀面磨损区域能谱

Fig. 12 Energy spectrum of flank wear area

表 3 刀具后刀面磨损区域能谱

Tab. 3 Energy spectrum analysis of flank wear area

切削方式	元素质量分数(%)							
	W	B	N	Co	C	Ti	Al	O
CC	43.61	—	20.49	13.61	8.33	5.27	3.62	3.11
UAC	21.35	21.75	19.10	17.89	13.09	1.04	2.27	2.96
LAC	36.18	—	15.28	17.64	12.28	5.60	2.93	5.82
LUAC	27.26	—	22.48	24.13	10.80	1.24	2.82	6.28

分析图 12 及表 3,4 种切削方式下元素质量分数的变化说明 4 种切削方式下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 刀具的黏接磨损,而刀具材

料中金属 Ni 的存在则会进一步增强三者之间的黏接强度,从而加剧了黏接磨损,易导致切削刃微崩刃或崩刃。同时,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,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。另外,PCBN 刀具中 B 元素的大幅减小,特别是在常规切削、激光加热辅助切削及激光超声复合切削时刀具后刀面未能检测到 B 元素,证明此处已被黏接的工件材料覆盖,刀具出现不同程度的黏接磨损。而超声切削及激光超声复合切削时 Ti、Al 等元素的减小说明由于超声高频断续冲击的作用,刀具出现了不同程度的磨粒磨损。

因此,常规切削 YG10 硬质合金时,磨粒磨损和黏接磨损是 PCBN 刀具的主要磨损形式;超声振动切削时,刀具的主要磨损形式为磨粒磨损;激光加热辅助切削时,刀具的磨损由黏接磨损和氧化磨损共同作用产生;而激光超声复合切削时,黏接磨损、氧化磨损和磨粒磨损共同导致了刀具的磨损。

参考文献:

- [1] 尹韶辉,王玉方,朱科军,等.微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟[J].光子学报,2010,39(11):2020-2024.
YIN SH H, WANG Y F, ZHU K J, *et al.*. Numerical simulation of ultraprecision glass molding for micro aspherical glass lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010,39(11):2020-2024. (in Chinese)
- [2] 王平,张春河,张飞虎,等.光学玻璃的磨削加工方法[J].光学精密工程,1996,4(1):53-58.
WANG P, ZHANG CH H, ZHANG F H, *et al.*. Grinding manufacture of optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(1):53-58. (in Chinese)
- [3] 罗松保,张建国.非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J].光学精密工程,2003,11(1):75-78.
LUO S B, ZHANG J M. Ultraprecision machining equipment and technology of aspheric optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(1):75-78. (in Chinese)
- [4] 朱海红,卢宏,程祖海.激光加热辅助切削工程陶瓷研究及应用现状[J].激光与光电子学进展,2006,43(6):58-63.
ZHU H H, LU H, CHENG Z H. Research and application status of laser-assisted cutting engineering ceramic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006,43(6):58-63. (in Chinese)
- [5] 王扬,杨立军,齐立涛. Al₂O₃ 颗粒增强铝基复合材料激光加热辅助切削的切削特性[J].中国机械工程,2003,14(4):344-346.
WANG Y, YANG L J, QI L T. Laser-assisted hot cutting characteristics of Al₂O₃ particle reinforced Al-matrix composite [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003,14(4):344-346. (in Chinese)

5 结 论

本文通过超声振动切削和激光加热辅助切削复合加工工艺,利用 PCBN 刀具对 YG10 硬质合金进行了激光超声复合超精密切削。结果表明:随着切削路程的增加,4 种切削方式下的刀具磨损量及工件表面粗糙度值均增加,其中激光超声复合切削时变化较小。对比普通切削、超声椭圆振动切削和激光加热辅助切削,激光超声复合切削 YG10 硬质合金时 PCBN 刀具使用寿命明显增加,工件加工后的表面粗糙度平均值分别降低 79%、60%和 64%。普通切削和超声椭圆振动切削硬质合金时 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硬质合金时 PCBN 刀具易于在刃口产生崩刃;4 种切削方式下刀具后刀面磨损形式主要表现为三角形状的磨损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。切削 YG10 硬质合金时,PCBN 刀具承受着机械、扩散、黏接、氧化和微裂解的综合作用,激光超声复合切削 YG10 硬质合金时 PCBN 刀具的磨损主要是黏接磨损、氧化磨损和磨粒磨损共同作用的结果。

- [6] 吴雪峰,王 扬,张宏志. 激光加热辅助切削氮化硅陶瓷实验研究[J]. 宇航学报,2010,31(5):1457-1462.
WU X F, WANG Y, ZHANG H ZH. Experimental research on laser assisted cutting of silicon nitride ceramics [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5):1457-1462. (in Chinese)
- [7] 刘为桥,鄢 铨,谢林春,等. 脉冲激光辅助切削氧化铝陶瓷工艺参数选取的研究[J]. 中国激光,2014,41(7):0703005.
LIU W Q, YAN C, XIE CH L, *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)
- [8] HSU C Y, LIN Y Y, LEE W S, *et al.*. Machining characteristics of Inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 198(1-3): 359-365.
- [9] RIAZ M, AGOSTINO M, ANISH R, *et al.*. Hot ultrasonically assisted machining of β -Ti alloy [J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 336-341.
- [10] RIAZ M, AGOSTINO M, MURAT D, *et al.*. Thermally enhanced ultrasonically assisted machining of Ti alloy[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, 7(2): 336-341.
- [11] 关佳亮,吴衍才,肖小华,等. 基于 ELID 磨削 WC-Co 硬质合金表面机械研抛研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 11-14.
GUAN J L, WU Y C, XIAO X H, *et al.*. The mechanical polishing research on the surface of WC-Co cemented carbide based on electrolytic in-process(ELID) grinding [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2010, 30(5): 11-14. (in Chinese)
- [12] 郭锐,刘秀波. 硬质合金超高速切削机理的研究[J]. 科技视界, 2014, (34): 121.
GUO R, LIU X B. Research on hard alloy ultra-high speed cutting mechanism [J]. *Science & Technology Vision*, 2014, (34): 121. (in Chinese)
- [13] 邹吉才. 纳米硬质合金与大理石的摩擦磨损特性[J]. 工具技术, 2012, 46(9): 48-51.
KUAI J C. Friction and wear characteristics of nano-cemented carbide vs marble [J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(9): 48-51. (in Chinese)
- [14] 邹吉才,张飞虎. 纳米硬质合金的 ELID 磨削[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(12): 57-58.
KUAI J C, ZHANG F H. ELID grinding of nano-cemented carbide [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(12): 57-58. (in Chinese)
- [15] TOSHIMICHI M, EIJI S. Ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1995, 44(1): 31-34.
- [16] MILMAN Y V, LUYCKX S, GONCHARUCK V A, *et al.*. Results from bending tests on sub-micron and micron WC-Co grades at elevated temperatures [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2002, 20(1): 71-79.
- [17] 黄道远,易丹青,刘会群,等. 硬质合金强度随温度的变化及失效机理的研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(5): 105-108.
HUANG D Y, YI D Q, LIU H Q, *et al.*. Effect of temperature on bending strength and failure mechanism of cemented carbide [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, 28(5): 105-108. (in Chinese)
- [18] 刘运凤,荆君涛,李占杰. 旋转超声磨削加工中刀具结合剂类型与加工性能的关系[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2021-2028.
LIU Y F, JING J T, LI ZH J. Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2021-2028. (in Chinese)
- [19] 温试铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
WEN SH ZH, HUANG P. *Principles of Tribology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)

[20] 葛英飞,徐九华,傅玉灿. 高速铣削 SiCp/Al 复合材料时聚晶金刚石刀具的磨损机理[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2907-2918.

GE Y F, XU J H, FU Y C. Wear Mechanisms of

PCD tool in high-speed milling of SiCp/Al composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2907-2918. (in Chinese)

作者简介:



张昌娟(1980—),女,河南民权人,博士研究生,副教授,2005年于河南理工大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料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,河南焦作人,博士研究生,教授,博士生导师,2008年于上海交通大学获得博士学位,主要从事硬脆材料精密加工、超声特种加工等方面研究。E-mail:jiaofeng@hpu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)