

DOI: 10.3901/JME.2019.19.195

渐变强化刃刀具硬切削过程切屑流动和 刀具磨损研究*

陈 涛 宋立星 李素燕 郭 健 刘献礼
(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080)

摘要：刃口倒棱结构在提升切削刃强度的同时也进一步增大了切削过程中的热力载荷，进而影响着硬切削加工的切屑流动、刀具磨损和加工表面质量。利用高速摄影方法，对比分析了渐变强化刃和定值倒棱两种结构 PCBN 刀具的切屑流动特性，发现渐变强化刃结构具有协调切屑流动的作用，能有效地解决硬切削过程切屑积聚问题。结合硬切削试验，开展了渐变强化刃刀具磨损特性研究，结果表明：与定值倒棱刀具相对集中的磨损带不同，渐变强化刃刀具磨损区域则更为狭长，后刀面磨损带呈现为长三角形，具备了更为优异的刃口保持性和耐用度，当进入到刃形改变阶段，其磨损机制由磨粒磨损机制逐渐变化为磨粒、氧化和扩散等多种机制的混合形式。渐变强化刃结构刀具在改善切屑流动和提升刀具耐用度方面均体现出了明显的优势，具备了良好的推广应用前景。

关键词：硬切削；渐变强化刃；PCBN 刀具；切屑流动；刀具磨损

中图分类号：TG501

Research into Chip Flow and Tool Wear in Hard Cutting Using Tool with Variable Strengthening Edge

CHEN Tao SONG Lixing LI Suyan GUO Jian LIU Xianli

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract : The edge chamfered structure not only enhances the strength of cutting edge, but also increases the thermal load in the cutting process, which affects the chip flow, tool wear and machining surface quality in hard cutting. The high-speed photography is used to compare the characteristics of chip flow from the two PCBN tools respectively with variable strengthening edge and invariable chamfered edge, and it is found that the variable strengthening edge can effectively coordinate chip flow, and get rid of chip accumulation in hard cutting. Through the hard cutting experiment, the wear characteristics of the PCBN tool with variable strengthening edge are researched. The results indicated that the wear zone is relatively concentrated for the tool with invariable chamfered edge, while the one is narrow and long for the tool with variable strengthening edge, and especially the flank wear belt is a long triangle. Thus, the latter has better cutting edge retention and tool durability. When the edge form got to change, the flank wear mechanism gradually is changed into a mixture of abrasive, oxidation and diffusion wear from the abrasive wear. The tool with variable strengthening edge is obviously advantageous in improving chip flow and increasing tool life. Thus its widespread application is promising.

Key words : hard cutting ; variable strengthening edge ; PCBN tool ; chip flow ; tool wear

0 前言

PCBN 刀具具有硬度高和耐磨性好等优点^[1]，广泛应用于高硬度零件的精加工中。由于 PCBN 刀具材料硬脆的特点，切削加工中易出现崩刃现象^[2]，

因此通常需要在刃口磨制负倒棱以提高刀具刃口强度。然而，倒棱结构的存在加剧了切削区的剪切摩擦作用，导致加工过程中产生的切削力和切削温度显著升高，切削机制随之变得更为复杂。同时，剧烈的热力载荷进一步加速了刀具的磨损，进而影响加工表面质量^[3-4]。

国内外学者针对 PCBN 刀具切削性能开展了相关的工作。MOREHEAD 等^[5]基于淬硬轴承钢

* 国家自然科学基金资助项目(51475125)。20181014 收到初稿，20190425 收到修改稿

切削试验,获得了切削参数和刀具磨损对切屑形态以及锯齿化程度影响规律。KOUNTANYA 等^[6]开展了 PCBN 刀具高速硬切削淬硬钢 100Cr6 试验研究,发现切屑形态受切削速度和倒棱角度影响较大,而受刀尖圆弧半径影响则相对较小。ÖZEL 等^[7]开展了变钝圆结构 PCBN 刀具硬切削过程有限元仿真和试验研究,发现变钝圆结构能够降低刀具表面的切削热力载荷,延缓刀具磨损,提升刀具寿命。MAHFOUDI 等^[8-10]结合硬切削刀具磨损试验和理论分析,揭示了刀屑接触区热载荷对前刀面磨损作用机制。ARSECULARATNE 等^[11]开展了 PCBN 刀具切削淬硬钢 D2 试验研究,获得了切削参数对刀具磨损的影响规律。HUANG 等^[12]建立了 PCBN 刀具前刀面月牙洼磨损深度预测模型,并试验验证了模型的准确性。FULEMOVA 等^[13]研究了刃口结构及参数对 PCBN 刀具切削性能的影响,发现刃口半径为 $15\ \mu\text{m}$ 的 PCBN 刀具寿命最长、加工表面粗糙度最低、受力载荷最小。

综上所述,目前关于硬切削加工中针对切屑流动和刀具磨损的研究还主要集中在定值倒棱结构 PCBN 刀具^[14-17],与定值倒棱结构相比,渐变强化刃口结构形成的空间曲线刃在控制切屑流动、改善刀具排屑散热性能等方面具备了明显的优势^[18-19],已引起相关研究人员高度关注。本文以渐变强化刃 PCBN 刀具为研究对象,基于高速硬切削试验,开展了渐变强化刃和定值倒棱 PCBN 刀具切屑流动和刀具磨损特性的对比研究。

1 试验方案

为分析高速硬切削条件下渐变强化刃刀具的切屑流动和刀具磨损特性,本文设计了相应的高速硬切削试验,装夹后试验系统如图 1a 所示。试验机床选用大连机床厂生产的 CK6150 型数控车床,加工工件为硬度 58~62 HRC 的淬硬轴承钢 GCr15 圆环件,其内、外直径及宽度分别为 47 mm、62 mm 和 17 mm。选用自制的渐变强化刃和定值倒棱两种 PCBN 刀片,刀片的材质及形状均相同,仅倒棱结构有所不同。其中,刀片的形状为 80° 菱形,刀尖圆弧半径为 0.8 mm;PCBN 复合片的 CBN 微粒体积含量为 50%、粒度为 $1.5\ \mu\text{m}$,结合剂为 TiN。定值倒棱刀具的结构参数倒棱宽度和倒棱角度均为定值,分别是 0.1 mm 和 30° 。渐变强化刃刀具仅倒棱角度与定值倒棱刀具不同,角度是逐渐变化的,且关于刀尖圆弧区域的中心线对称,如图 1b 所示,倒棱角度由直线刃区域的 15° ,逐渐增加到刀尖圆

弧区域中心线处的 30° ,即从渐变倒棱区域的剖视图来看,经过刀尖点截面 C 的倒棱角度最大为 30° ,然后沿倒棱面由截面 C 向两侧逐渐减小,至截面 A 和截面 B 时减小至 15° 。

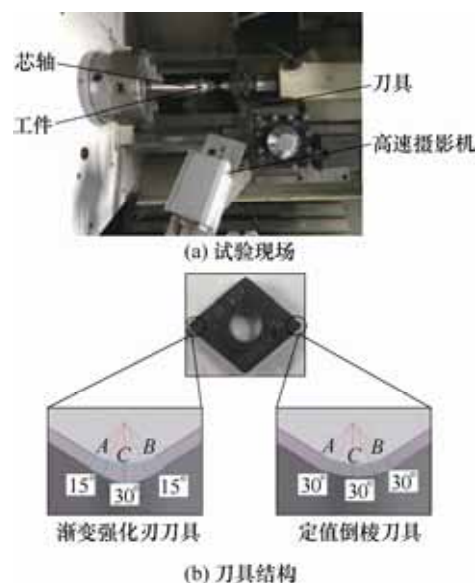


图1 试验现场和刀具

试验中,固定切削参数:切削速度为 150 m/min,切削深度为 0.1 mm,进给量为 0.2 mm/r。先后采用渐变强化刃和定值倒棱 PCBN 刀具进行 3 次重复切削试验,并使用 NACE-10 型高速摄影机记录切屑流出过程,每走刀 20 次,将试验刀片和工件从机床上拆卸下来,分别对刀片磨损特性和工件加工质量进行检测,其中刀具磨损形貌及磨损区材料成分检测分别采用 VHX-1000 型超景深显微镜和 SU3500 型扫描电子显微镜,工件表面质量测量采用 Taylor CCI 型表面三维轮廓测量仪,直至刀片发生崩刃,试验结束。

2 试验结果分析

2.1 切屑流动过程

为了对比两种刀具切屑流出状态,以便准确的获得切屑流出方向、角度以及积屑位置等状态量。如图 2 所示,在切削区建立包含 X 轴、Y 轴、Z 轴及原点 O 的坐标系,其中刀具与工件的切触点为坐标系的原点,切削的深度、进给和速度方向分别为坐标系的 X、Y、Z 轴正方向(分别表达为 +X、+Y、+Z),相反的方向即为 X、Y、Z 轴负方向(分别表达为 -X、-Y、-Z);并由各坐标轴将整个坐标系分解成 8 个空间区域, +X、+Y、+Z 组成的第一区间,沿 +Z 逆时针,形成相应的二、三、四区间,与上述区域相对称位置分别为五至八区间。

图 2a、2b 分别是定值倒棱刀具切削初始和结束两个时刻的切屑流动状态。切削初始时刻, 如图 2a 所示, 切屑形成于第二区间, 呈现为卷曲状, 并在重力的作用下回落至刀具的表面区域。随切削进行, 切屑堆积现象越来越严重, 至切削结束时, 如图 2b 所示, 积累的切屑已几乎占据了刀具的整个表面。

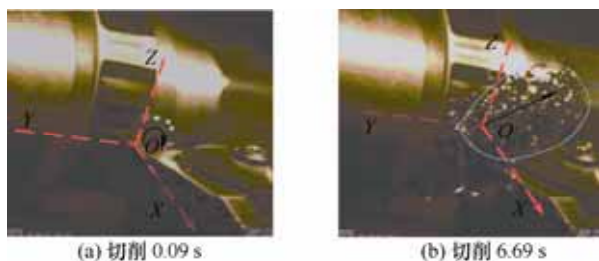


图 2 定值倒棱刀具切削时切屑流动状态

图 3 为渐变强化刃 PCBN 刀具切削时的切屑流动状态。刀具切入工件时, 因倒棱面上各区域的倒棱角度不同, 刀具首先由远离刀尖的小倒棱角度处开始逐渐切入工件, 此时工件材料则向刀尖一侧的大倒棱角度处流动, 即切屑沿+Y 略偏+Z 侧向流出, 如图 3a 所示的切削初始时刻, 形成于第四区间。随切削进行, 在切屑自重作用下, 导致其流出方向出现偏转, 最终垂落在第五区间, 如图 3b 所示。整个切削过程中形成了稳定的切屑流向, 始终流向工件的未加工表面一侧, 未出现切屑阻塞现象, 刀具表面也没有出现明显的切屑积聚。

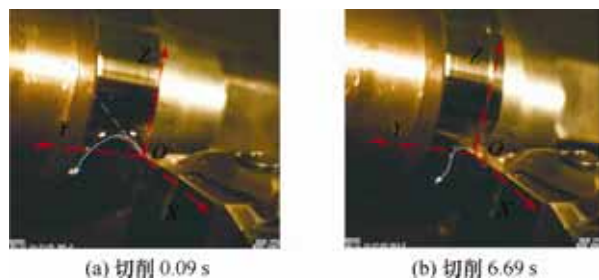


图 3 渐变强化刃刀具切削时切屑流动状态

2.2 渐变强化刃刀具切屑流动及形成机制分析

如图 4a 所示, 定值倒棱刀具的刃口包括圆锥面和斜平面部分, 并分别由圆锥面和斜平面与后刀面相交形成中间的圆弧刃和两侧的直线刃。切削过程中, 刀具与工件的切触位置主要集中在圆弧刃及圆锥面区域, 在单元切削刃剪切作用下, 从工件去除的微元材料将沿圆锥面流向圆锥锥顶点 (圆锥母线方向), 并在流动过程中逐渐汇聚形成切屑。继而在切屑自重作用下, 发生弯曲回落到刀具表面上, 随着切削进行, 切屑不断的积聚, 将堆积于刀具表面, 阻塞流动通道, 导致切削刃区的热量累积和切屑缠绕粘附。

如图 4b 所示, 渐变强化刃刀具的刃口结构与定值倒棱刀具差别较大, 包括了凹谷形曲面和斜平面部分, 并分别由凹谷形曲面和斜平面与后刀面相交形成中间的下凹曲线刃和两侧的直线刃。刀具切削工件过程中, 切除的微元材料在下凹曲线刃协调的作用下, 初始流出方向得到有效的控制, 并在流动过程中经平滑渐变的凹谷形曲面引导逐渐汇聚形成切屑, 最终在刀具侧面的未加工表面顺利流出, 避免了切屑积聚, 由此形成了顺畅的流屑通道, 进而降低了切削阻力和切削温度。

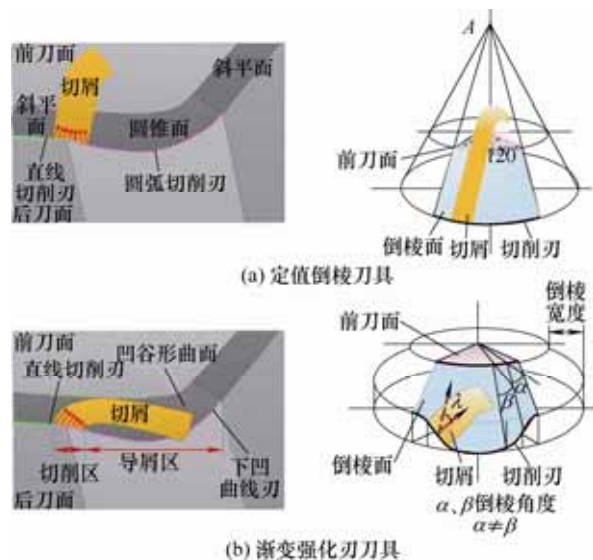


图 4 切屑流动分析

图 5 为渐变强化刃刀具切屑形成的机制分析。刀具切削工件过程中, 在下凹曲线刃剪切作用下, 刀具和工件接触面上产生从 15° 倒棱处开始沿刀尖方向逐渐减小的水平切削力, 使得切屑内部形成水平偏转力矩 M_c , 力矩 M_c 将迫使剪切滑移面朝侧向发生倾斜。同时, 因凹谷形曲面的挤压作用下, 刀具和工件接触面的垂直平面上则产生了以切削刃为起始端一直延伸至前刀面梯度下降的垂直切削力, 这种递减的切削力分布将在切屑内部形成垂直力矩 M_e 。

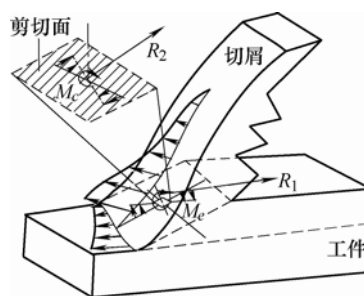


图 5 渐变强化刃刀具切屑形成机制分析

力矩 M_c 和 M_e 共同作用将促使第一变形区内的剪切滑移面出现侧向偏转, 导致切屑从剪切滑移面

处开始,呈曲线形沿前刀面的斜上方流出,继而在凹凸形曲面导屑作用下,形成了两侧差异明显的卷曲状波浪形切屑,如图 6 所示。同时,还使得刀具对被加工材料的剪切作用增强、挤压作用减弱,有效的减小了被加工工件材料的变形及内应力。图 7 为渐变强化刃刀具产生切屑的微观特征,与图 8 所示定值倒棱刀具的切屑微观特征存在着较大的差异。

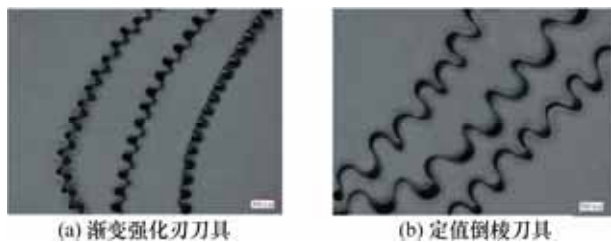


图 6 切屑宏观形态

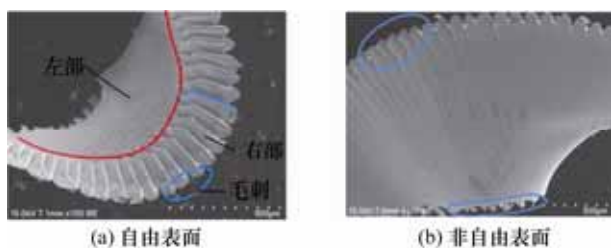


图 7 渐变强化刃刀具切屑的微观形态

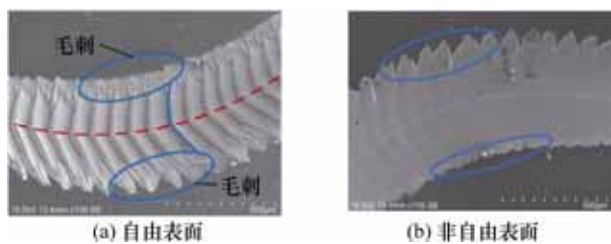


图 8 定值倒棱刀具切屑的微观形态

图 7a 为渐变强化刃刀具切屑自由表面的微观形态。由图中可观测到切屑自由表面被明显分成了两个部分,左侧呈现为细小裂纹和滑移线混合的不规则特征;右侧则表现为明显的层片状规则特征。同样,在非自由表面的两侧,切屑微观形态也体现出了明显的差异,如图 7b 所示。一侧可以明显观察到层片剪切滑移后的痕迹,另一侧则出现不规则的毛边。图 8 中定值倒棱刀具切屑的微观形态,与渐变强化刃刀具切屑的微观形态明显不同,其自由表面微观形态则呈现为较规则的层片状特征,两侧差异也相对较小。

2.3 渐变强化刃刀具磨损过程

图 9 和图 10 根据两种刀具切削刃磨损形态的演变历程,将刀具磨损过程按照先后顺序分成了刃形保持阶段与刃形改变阶段。在第一阶段,随切削行程的增加,前刀面月牙洼磨损带向切削刃逐渐延伸,

刃口参与切削区域将不断变小,导致刀具所受应力载荷不断增加,此时后刀面磨损宽度和月牙洼磨损面积也进一步加速增长。当月牙洼磨损区与切削刃相接时,两种刀具逐渐进入了第二阶段,刀具刃口上出现了离散分布的小尺寸磨钝面,随着切削的进行,刃口磨钝面逐渐扩展,致使切削刃形状改变越来越明显。

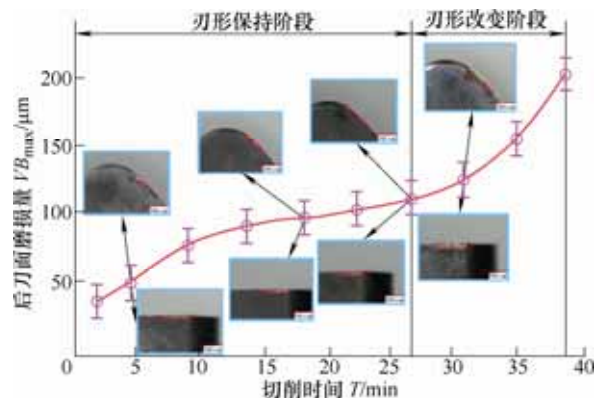


图 9 渐变强化刃刀具磨损形态演变

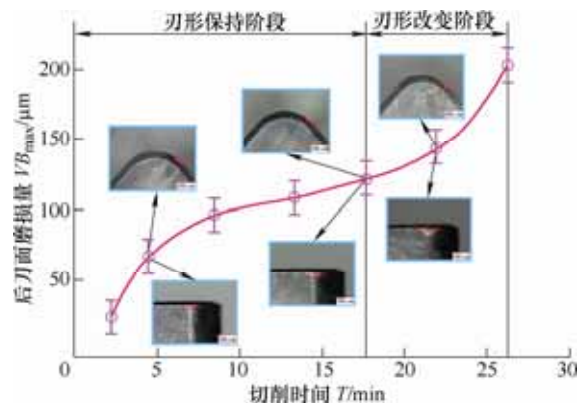


图 10 定值倒棱刀具磨损形态演变

渐变强化刃刀具的两个磨损阶段历时均长于定值倒棱刀具。在刃形保持阶段,因渐变倒棱刀具对切屑的协调和引导作用,一方面减小了切屑阻塞,另一方面增加了刀屑的接触面积,致使切削刃和接触面上的热力载荷明显降低,进而促使刀具磨损速度出现减缓。在刃形改变起始阶段,如图 11 所示,渐变强化刃刀具的月牙洼磨损深度和后刀面磨损深度较浅,切削刃相对锋利,切削过程中的剪切作用大于挤压作用,使得刀具寿命也得到了有效的延长。

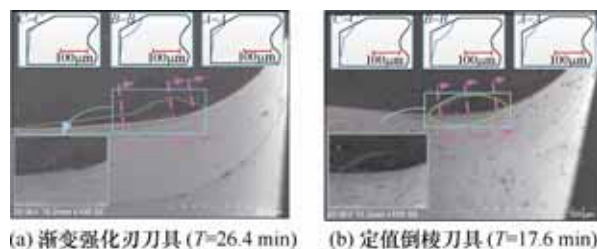


图 11 刃形改变阶段的两种刀具刃口形态

而定值倒棱刀具则出现了较深的月牙洼磨损和后刀面磨损区,此时前刀面和后刀面磨损带已连为一体,切削刃钝化相对较为明显。

图 12 为渐变强化刃 PCBN 刀具刃形保持和改变两阶段的加工表面形貌对比。刃形改变增加了切屑的积聚趋势和冲击作用,使得加工表面形貌变得更为复杂和崎岖,从而导致加工表面质量出现一定程度的下降,如图 12b 所示,加工表面粗糙度 R_a 已上升至 $0.61 \mu\text{m}$ 。

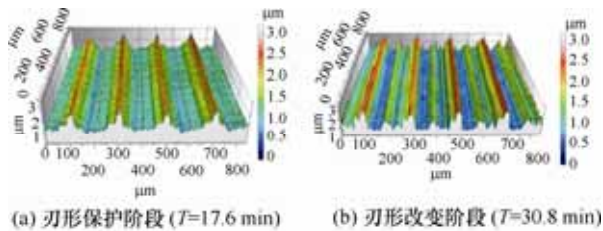


图 12 渐变强化刃刀具加工表面质量

2.4 渐变强化刃刀具磨损形貌和机制分析

如图 13 所示,渐变强化刃刀前刀面磨损带靠近切削刃,呈长月牙形,而后刀面磨损区仅出现了轻微的划痕,磨损带相对平整,呈长三角形。分别取前刀面 A 区和后刀面 C 区材料元素进行分析,结果表明这两处除了刀具基体元素以外,还检测到了铁元素、硅元素以及少量氧元素,证明了此时的磨损机制主要为磨粒磨损,并伴随着少量的氧化和粘结磨损。而通过对刀具刃口附近 B 区的元素分析,发现检测到 B 区的氧元素以及铁元素等的含量都相对 A 和 C 区要小得多。

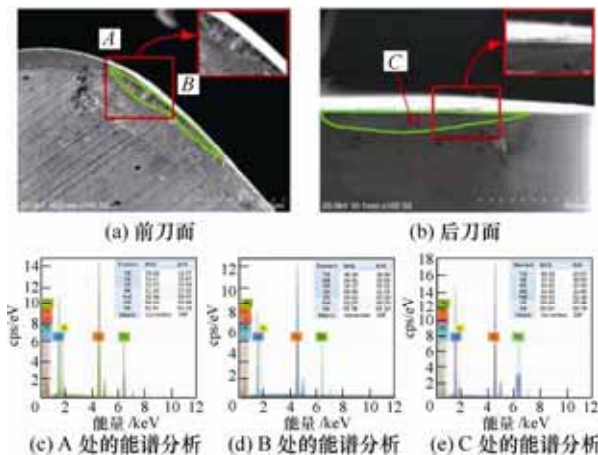


图 13 渐变强化刃刀具磨损形貌($T=17.6 \text{ min}$)

渐变强化刃刀具进入刃形改变阶段时刀具的磨损形貌如图 14 所示,此时前刀面上月牙洼磨损区域已扩展至切削刃,并与后刀面磨损带逐渐重合,刀具刃口已经出现了少量的不连续缺口。对图示中的 B 区进行元素分析,发现该区域的氧元素和工件材

料元素含量出现增长,但刀具基体元素含量却出现减少。究其原因这是由于该区域承受着较大的热力载荷,这极大的增加了刀具、工件及空气中包含元素的动能,促使刀具基体硼元素与活跃的氧元素发生反应,造成 CBN 晶粒摘除和脱落;另外,随着工件中元素不断的向刀具扩散,使 CBN 复合片强度出现下降,加快了刀具基体材料被切屑带走的速度,严重时将导致切削刃出现大面积崩塌。通过对图中的 A 和 C 两区进行元素分析,可知这两个区域的氧元素以及工件材料元素含量均较高,这说明此阶段氧化和扩散磨损机制已逐渐占据主导。

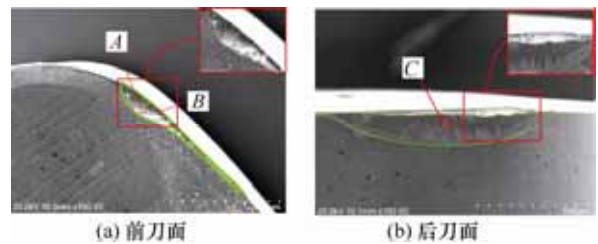


图 14 渐变强化刃刀具磨损形貌($T=30.8 \text{ min}$)

3 结论

(1) 两种结构刀具的切屑流动特性存在较大的差异,其中,定值倒棱刀具切屑呈现为卷曲状,并在重力的作用下回落至刀具表面上,形成切屑阻塞;而渐变强化刃刀具所形成的侧向卷曲切屑,始终流向工件的未加工表面一侧,未出现切屑阻塞和积聚。

(2) 获得了渐变强化刃刀具切屑形成机制,在下凹曲线刀剪切和渐变倒棱面挤压共同作用下,使第一变形区内的剪切滑移面出现侧向偏转,并在凹谷形曲面导屑作用下,产生非自由表面两侧差异明显的卷曲状波浪形切屑。

(3) 渐变强化刃刀具无论是在刃形保持阶段还是刃形改变阶段的历时均明显长于定值倒棱刀具,具有更为优异的刃口保持性和刀具耐用度,但刃形改变却增加了切屑的积聚趋势和冲击作用,使得加工表面质量出现一定程度的下降。

(4) 渐变强化刃刀前刀面磨损带呈长月牙形,而后刀面磨损带则呈长三角形,当刀具磨损由刃形保持阶段进入到刃形改变阶段后,在强热力载荷作用下,其后刀面的氧化和扩散磨损机制则明显增强,磨损机制也由磨粒磨损机制逐渐变化为磨粒、氧化和扩散等多种机制的混合形式。

参 考 文 献

- [1] DOSBAEVA G, HAKIM M, SHALABY M, et al. Cutting

- temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials , 2015 , 50 : 1-8.
- [2] DOGRA M , SHARMA V , SACHDEVA A , et al. Tool wear , chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning : A review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing , 2010 , 11 (2) : 341-358.
- [3] BHEMUNI V , CHALAMALASETTI S , KONCHADA P , et al. Analysis of hard turning process : Thermal aspects[J]. Advances in Manufacturing , 2015 , 3(4) : 323-330.
- [4] COHEN G , SEGONDS S , MOUSSEIFNE M , et al. Thermal and mechanical modeling during dry turning operations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 2012 , 58(1-4) : 133-140.
- [5] MOREHEAD M , HUANG Y , LUO J. Chip morphology characterization and modeling in machining hardened 52100 steels[J]. Machining Science and Technology , 2007 , 11(3) : 335-354.
- [6] KOUNTANYA R , AL-ZKERI I , ALTAN T. Effect of tool edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2009 , 209(11) : 5068-5076.
- [7] ÖZEL T. Computational modelling of 3D turning : Influence of edge micro-geometry on forces , stresses , friction and tool wear in PCBN tooling[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2009 , 209(11) : 5167-5177.
- [8] MAHFOUDI F , LIST G , MOLINARI A , et al. High speed turning for hard material with PCBN inserts : Tool wear analysis[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials , 2008 , 3(1/2) : 62-79.
- [9] MOLINARI A , NOUARI M. Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting[J]. Wear , 2002 , 252(1) : 135-149.
- [10] MOLINARI A , NOUARI M. A new thermomechanical model of cutting applied to turning operations. Part I. Theory[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture , 2005 , 45(2) : 166-180.
- [11] ARSECULARATNE J , ZHANG L , MONTROSS C , et al. On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2006 , 171(2) : 244-252.
- [12] HUANG Y , DAWSON T. Tool crater wear depth modeling in CBN hard turning[J]. Wear , 2005 , 258(9) : 1455-1461.
- [13] FULEMOVA J , JANDA Z. Influence of the cutting edge radius and the cutting edge preparation on tool life and cutting forces at inserts with wiper geometry[J]. Procedia Engineering , 2014 , 69(1) : 565-573.
- [14] ZHOU J , WALTER H , ANDERSSON M , et al. Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture , 2003 , 43(3) : 301-305.
- [15] SEAH K , RAHMAN M , LI X , et al. A three-dimensional model of chip flow , chip curl and chip breaking for oblique cutting[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture , 1996 , 36(12) : 1385-1400.
- [16] HAZZA M. Experimental study of flank wear in high speed turning of stainless steel AISI 304[J]. Journal of Advanced Science and Engineering Research , 2013 , 3(2) : 96-103.
- [17] SUTTER G , MOLINARI A , LIST G , et al. Chip flow and scaling laws in high speed metal cutting[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering , 2012 , 134(2) : 21005-21013.
- [18] KLOCKE F , KRATZ H. Advanced tool edge geometry for high precision hard turning[J]. CIRP Annals : Manufacturing Technology , 2005 , 54(1) : 47-50.
- [19] 陈涛 , 王道源 , 李素燕 , 等. 渐变倒棱 PCBN 刀具设计制造及磨削精度检测[J]. 机械工程学报 , 2018 , 54(11) : 214-221.
- CHEN Tao , WANG Daoyuan , LI Suyan , et al. Design , manufacture and grinding accuracy detection of PCBN tools with variable chamfer edge[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2018 , 54(11) : 214-221.

作者简介:陈涛,男,1979 年出生,博士,教授。主要研究方向为高效切削及刀具技术。

E-mail : dotnetchen@163.com