

铍铜合金断续切削后刀面磨损机理研究

郑嘉灿, 林有希, 左俊彦

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

摘要: **目的** 研究断续切削过程温度变化对刀具粘结现象、涂层剥落和刀具磨损的影响。**方法** 搭建了仿铣削加工的断续车削实验平台, 采用热电偶法测量了断续切削过程中刀具后刀面在不同速度下的切削温度, 利用带有能谱仪(EDS)的扫描电镜(SEM)观察后刀面随速度变化的磨损形貌并分析后刀面磨损区域的元素组成, 阐述了后刀面温度和刀具磨损之间的联系, 研究了 TiAlN 涂层硬质合金刀具断续切削铍铜合金 C17200 时的后刀面磨损机理。**结果** 随着切削速度的增加, 刀具温度在 $v=500$ m/min 出现峰值, 温度越高, 后刀面的涂层剥落和粘结磨损现象越严重, 涂层剥落和粘结磨损现象在切削速度为 500 m/min 时最严重, 而后随着刀具温度的降低而减缓, 切削速度 600 m/min 时的涂层剥落和粘结磨损现象相比 500 m/min 时有所减轻。**结论** 断续切削过程中, 刀具持续性地经受“负载—卸载”、“升温—降温”产生的高温、冲击和加工环境的不稳定性, 是引起粘结现象、涂层剥落和刀具磨损的主要原因。涂层剥落和粘结磨损是导致铍铜合金断续切削刀具失效的主要磨损形式。

关键词: 铍铜合金; 断续切削; 切削温度; 涂层剥落; 粘结磨损

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0319-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.040

Flank Wear Mechanism in Intermittent Machining of Beryllium Copper Alloy

ZHENG Jia-can, LIN You-xi, ZUO Jun-yan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of temperature variation on tool adhesion, coating peeling and tool wear during intermittent machining. An experimental platform based on intermittent turning which imitated milling process was built. The cutting temperature of the flank at different cutting speed during intermittent machining was measured by thermocouple method, the wear morphology of the flank changing with cutting speed was observed by scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS) and the element composition of the tool wear area was analyzed. The relationship between the flank temperature and tool wear was described and the flank wear mechanism of TiAlN coated cemented carbide tools in intermittent machining of beryllium copper alloy C17200 was investigated. The tool temperature showed a peak at

收稿日期: 2019-04-06; 修订日期: 2019-06-20

Received: 2019-04-06; Revised: 2019-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51975123); 福州市科技计划项目(2019-G-42)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51975123) and Fuzhou Science and Technology Bureau(2019-G-42)

作者简介: 郑嘉灿(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为加工摩擦学。

Biography: ZHENG Jia-can(1994—), Male, Master, Research focus: processing tribology.

通讯作者: 林有希(1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面改性及摩擦学。邮箱: lyx@fzu.edu.cn

Corresponding author: LIN You-xi(1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface modification and tribology. E-mail: lyx@fzu.edu.cn

引文格式: 郑嘉灿, 林有希, 左俊彦. 铍铜合金断续切削后刀面磨损机理研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 319-326.

ZHENG Jia-can, LIN You-xi, ZUO Jun-yan. Flank wear mechanism in intermittent machining of beryllium copper alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 319-326.

$v=500$ m/min with the increase of cutting speed. The higher the temperature was, the more severe the coating peeling and adhesive wear on the flank were. The coating peeling and adhesive wear were the most severe at a cutting speed of 500 m/min. Then, this phenomena slowed down as the tool temperature decreased. Coating peeling and adhesive wear at a cutting speed of 600 m/min were reduced compared to that at 500 m/min. The high temperature, impact and instability of processing environment generated by the tool continuously subjected to “loading-unloading” and “heating-cooling” during intermittent machining process are the main causes of adhesion phenomenon, coating peeling and tool wear. Coating peeling and adhesive wear are the main wear form leading to tool failure in intermittent machining of beryllium copper alloy.

KEY WORDS: beryllium copper alloy; intermittent machining; cutting temperature; coating peeling; adhesive wear

铍铜合金作为一种新型高科技特种合金材料,具有高强度、高硬度和高弹性极限,并且具有良好的稳定性、较高的比强度、较强的耐腐蚀性等诸多优点,被广泛应用于弹簧、齿轮、隔膜、阀门,以及制作各种高级弹性元件和电子元件,已经逐步发展为一种不可或缺的工业材料^[1-3]。但由于材料硬度高、耐磨性好、粘附性强,导致其加工性能差,属于典型的难加工材料^[4-6]。近年来,对铍铜合金的加工特性,国内外学者已经进行了大量研究^[7-9]。

铣削加工属于典型的断续切削方式,在铣削过程中,随着刀具的旋转,热源强度和热源面积发生复杂演变,增加了瞬态切削温度理论和实验分析的难度,但断续加工由于其加工效率高,适合复杂零件的加工成形,已广泛应用于难加工材料的高精度加工^[10]。不同于连续切削方式,在断续切削过程中,切削刃循环性切入和切出工件,在较短时间内,刀具会受到周期性的升温-降温、负载-卸载,从而受到热冲击影响,刀具所经受的切削力和切削温度不断变化引起加工环境的不稳定,导致铣刀发生磨损和破损失效,影响切削加工的效率和成本^[11]。

断续切削时,在摩擦副接触峰点产生瞬现的高温,容易引发粘结现象^[12],主要是由于切削刃在切入工件的过程中,在高温、冲击的情况下,刀具表面容易与已加工表面的工件材料和部分切屑产生粘结现象而生成粘结物。铍铜合金材料由于其较强的热软化性和粘附性,更易与刀具表面发生粘结现象,粘结物的产生影响切削过程中刀具的散热和加工,缩短刀具的使用寿命,因此研究铍铜合金断续加工过程切削温度的变化对降低刀具磨损、优化加工质量有着十分重要的意义。针对刀具的磨损机制,Liu^[13]发现刀具的粘结磨损是由于涂层磨损、刀具和工件材料的元素亲和力和力作用等引起的,刀具在高应力和高温梯度下更容易发生粘结磨损。然而Liu主要从元素之间的作用入手,并没有从温度变化的角度对粘结磨损的影响进行深入分析。Li A^[14]发现涂层刀具的失效形式与切削速度有关,随着切削速度的增加,会产生不连续或碎块的切屑,甚至是熔融的切屑,所以在高速下可以收集的切屑很少,刀具磨损过程以大面积涂层剥落、剧烈磨损和严重的粘着为主。同样地,Hou^[15]等人发现,

在切削速度较高时,刀具前刀面和切削刃不仅存在粘附的切屑,还会发生涂层剥落、热裂纹等缺陷。他们从切削速度对刀具磨损的影响做了详尽的分析,得出切削速度是切削用量中影响刀具磨损的主要因素,但他们并没有具体从切削温度的角度入手,对刀具磨损进行研究,对于粘结现象和粘着磨损的分析就更为稀少,且他们主要从前刀面入手进行考虑,并没有具体分析切削热对后刀面磨损的影响,而后刀面磨损会对工件的加工质量产生直接影响。

铣削加工时,由于刀具处于旋转状态,刀具温度难以采集,使切削温度对刀具磨损影响的理论分析存在困难^[16]。为了解决铣削过程旋转刀具温度不易检测的问题,又保证铣削加工断续切削的特性,本研究采用仿铣削加工的断续车削方法进行实验,然而由于铣削过程中单个切削刃切除材料的厚度是随时间变化的,而车削过程的切削厚度是固定不变的,故断续切削深度参考Wang C^[17]提出的切削转换模型,将三维铣刀模型等效计算铣削深度转换为直角正交切削模型。搭建了TiAlN涂层硬质合金刀具断续车削铍铜合金C17200的实验平台,采用单一因素法分析切削速度对刀具温度的影响,选择热电偶法对后刀面温度进行采集,从温度变化的角度对刀具表面存在的粘结现象和刀具磨损形态进行剖析,通过对磨损现象的观察和讨论,揭示了刀具的磨损机理。

1 实验设计

1.1 实验系统的建立

传统铣削方式存在加工过程中旋转刀具温度难以测量的问题,因而本研究采用仿铣削加工的断续车削方法进行实验。将刀具旋转、工件固定的情况转化为刀具固定、工件旋转,以此达到采集刀具温度的目的。实验时将工件均匀分布在预先设计的圆盘状夹具周围,实验设计的圆盘状夹具直径为230 mm,工件突出圆盘状夹具10 mm的长度,工件宽度20 mm,如图1a所示。圆盘夹具与机床的主轴相连接,在刀具固定不动的条件下,通过圆盘夹具的旋转实现刀具对工件的断续切削加工。

实验采用热电偶法对刀具温度进行采集。采用电



图 1 实验设计

Fig.1 Experimental setup: a) intermittent turning experimental scheme which imitates milling process; b) thermocouple installation; c) experimental platform

火花线切割的方法，在车刀片后刀面上距切削刃 0.8 mm 处预先加工一个直径 0.5 mm 的线槽，选用 K 型热电偶 GG-K-30，将热电偶埋在后刀面槽上，如图 1b 所示，热电偶焊点顶端位于切削刃上。编写 labview 测温程序，选用数字信号采集与分析仪器对刀具温度信号进行采集，实验平台布置如图 1c 所示。

1.2 实验条件与实验参数

切削加工实验在数控车床（CAK3665）上进行，通过调整主轴的转速来改变切削速度。铍铜合金选用铍青铜 C17200，其物理特性和化学成分如表 1 和表 2 所示，可见铍青铜是一种高强度、高硬度的难加工材料，实验所用铍青铜工件尺寸为 78 mm×20 mm×3 mm 矩形板。刀具采用 TiAlN 涂层硬质合金刀具，选用厦门金鹭特种合金有限公司生产的菱形 80°有孔的 CCMT09T304-GP 刀片搭配 SCLCR1616H09 的螺钉夹紧型外圆车刀杆，刀具主偏角为 95°，前角为 8°，后角为 7°，涂层厚度 4 μm。实验过程中，分别在刀具切削长度达到 5、10、15、20 m 时取下刀片，在体式显微镜下观察刀具的磨损形貌及后刀面的磨损量、磨损面积。磨损面积的计算是将刀具的磨损区域划分为一系列规则形状，如三角形、梯形、四边形等，分别计算后再进行求和。在场发射扫描电子显微镜

（SEM）下进一步观察刀具磨损的微观形貌，对磨损刀具进行材料微区域 EDS 元素分析。温度信号采集系统由美国 NI 公司提供的 PXIe-4353 热电偶输入模块和 TB-4353 前置式接线盒组成。

采用单一因素法研究切削速度对刀具温度和刀具磨损的影响。分别采用等间隔的 5 种切削速度进行干切削实验。切削参数为：切削速度 $v=200、300、400、500、600$ m/min，进给量 $f=0.05$ mm/r，切削深度参考切削转换模型进行计算，取 $a_p=0.5$ mm。

表 1 室温下铍青铜 C17200 的物理特性
Tab.1 Physical properties of beryllium copper C17200 at room temperature

Parameter	Value
Tensile strength/MPa	1105
Yield strength/MPa	1035
Specific gravity/(g·cm ⁻³)	8.3
Ductility/%	1
Elastic modulus/GPa	128
Hardness (HRC)	38~44
Thermal conductivity (20 °C)/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	105
Conductivity/IACS%	18

表 2 铍青铜 C17200 的化学成分
Tab.2 Chemical composition of C17200

wt%							
Element	Be	Co	Ni	Si	Fe	Al	Cu
Content	1.90~2.15	0.35~0.65	0.20~0.25	<0.15	<0.15	<0.15	Balance

2 结果与分析

2.1 断续切削过程速度对刀具温度的影响

断续切削周期可以分为切削时间与非切削时间两个阶段，在切削时间阶段，刀具与工件处于热量积聚状态，而在非切削时间阶段，刀具与工件处于热量

散失状态^[18]。图 2 所示是切削速度为 300 m/min 时所得的一段切削刃切入切出工件周期的后刀面温度变化波形图，由于实验过程中工件所处的位置圆周直径较大，工件宽度较小，故将工件加工段投影近似为直线。在 A 位置，切削刃刚切入工件，切削厚度最大，切削温度开始升高。随着切削刃的不断运动，随着切削的进行，切削厚度不断减小，切削温度也不断上升。

切削到位置 C 处时,一次切削结束,切削刃即将离开工件,切削温度最高,此时的刀具与工件的温度相接近。随后切削刃离开工件,处于非切削时间阶段,刀具得到冷却,切削温度不断降低。当切削刃运动到 D 处时,切削厚度达到最大,切削温度又开始上升,如此循环下去。因此在断续切削的加工过程中,工件与刀具温度始终处于升高、降低的循环交替变化过程。切削刃切入切出过程交替变化,刀具和工件经受周期性热载荷,热载荷的面积和密度均随时间变化。不同于连续切削的切削热源在切削开始后迅速达到稳态条件,断续切削的温度变化更为复杂,切削过程中刀具持续性地经受“升温—降温”,对刀具磨损的影响也更为严重。

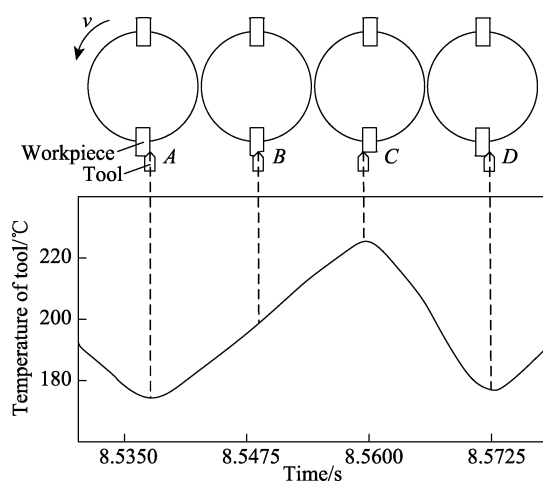


图2 一个切削周期刀具温度变化曲线

Fig.2 Variation curve of tool temperature for one cutting cycle

关于切削温度与切削速度的关系, Carl Salomon 指出,金属切削引起的温升随着切削速度的增大而增大,达到临界值后,随着切削速度的增大而减小。图3是刀具断续切削过程中后刀面平均温度与切削速度的关系曲线,因矩形块工件表面质量不高,存在斑点、凹坑等缺陷,会对采集到的刀具温度产生影响,故此处平均温度取刀具断续切削达到稳定波动阶段后刀面的平均温度,即刀具温度波动较为显著阶段的平均温度。因平均温度的计算会存在一定的误差,故不同切削速度下的刀具平均温度的变化曲线采用添加误差棒的形式,误差数据选择刀具温度数据的标准偏差。从图3可以看出,切削速度对刀具温度的影响较为显著,刀具温度随着切削速度的增加,呈现先上升后下降的趋势,这与 Salomon 理论相符。

切削速度的提高会引起工件材料剪切变形程度的增加,刀具与切屑、工件之间的摩擦变得更为剧烈,导致三大热源在单位时间内产生更多的热量,引起刀具温度的升高。而切削速度提高到一定程度时会使得更多的切削热被切屑带走,进入刀具的热流密度降低,同时使得一个切削周期内切削时间减少,切削热传递

到刀具的时间减少,引起刀具温度下降。根据 Liu 和 Chou^[19]的研究观点,较高的切削速度还会增强非切削时间内刀具与空气的热对流作用,也会促使刀具温度快速降低。然而,铍铜合金高温下较强的粘附性使得其在加工过程中容易与刀具表面发生粘结现象,产生粘结物,降低刀具与空气的热对流作用,影响刀具寿命。

综上所述,铍铜合金断续切削刀具温度的变化趋势,取决于三大热源的产生与空气的对流二者作用的强弱。三大热源的热量生成占主导作用,则刀具温度升高;若刀具与空气的热对流作用占主导,则刀具温度降低。同时刀具温度的变化趋势也受切削时间与非切削时间之比的影响。

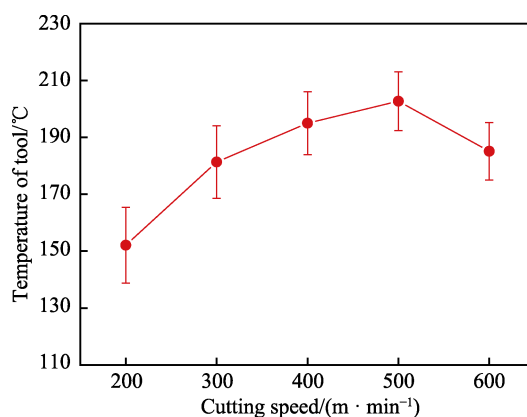


图3 刀具温度随切削速度的变化曲线

Fig.3 Variation curve of tool temperature with cutting speed

图4是在每个切削速度下刀具温度的变化曲线,可以看出每个速度下,后刀面温度具体的变化趋势。结合图2可以知道,切削开始后,随着切削过程的进行,每一次切削开始前,由于切削产生的温升,难以在短时间内冷却到室温,使得刀具的热量不断累积,导致刀具温度持续升高,只有在切削完全结束后,刀具才会得到冷却,从而在整个切削过程中,刀具温度呈现先升高后降低的趋势。切削结束后,由于工件加工时所积聚毛刺的影响,刀具温度下降的过程中还伴随着轻微上升下降的变化趋势。同时,随着切削速度的提高,刀具切入切出工件材料时刀具温度的变化峰值区间逐渐减小,这是由于切削速度的提高使热源变化频率升高,热源持续作用时间变短,切削热传导至刀具的时间变短,同时刀具面与邻近空气的热对流系数增大,因此刀具升温降温的频率增大,刀具温度的变化峰值区间减小。切削速度的提高也使切削周期变短,刀具温度的变化周期变短。热源变化频率升高和变化周期变短导致刀具升温降温频率的提高,从而引起刀具表面出现不均匀的温度场,使得刀具产生局部高温。铍青铜材料受高温影响发生软化,更易与刀具粘结,生成粘结物,降低了刀具的表面强度,影响刀具的使用性能,刀具也更容易受到破坏。

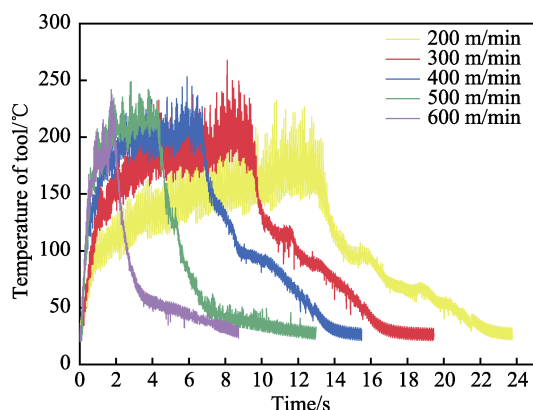


图 4 不同切削速度下刀具温度变化曲线
Fig.4 Variation curve of tool temperature with different cutting speed

2.2 基于粘结效应的涂层剥落机理分析

加工过程中, 由于切削刃部位较为尖锐, 导致切削刃处的应力较大, 温度较高。在较大应力和温度的作用下, 铍青铜材料因较强的粘附性, 容易与刀具表面发生粘结, 形成粘结物。铍青铜材料所形成的粘结节点强度较低, 导致切削刃部位的涂层强度降低。此外, 由于切削刃在断续切削铍青铜时将持续性地经历“负载—卸载”、“受热—冷却”的过程, 这将导致刀具在工作时承受周期性的热应力和热流动, 在刀具表面产生高温、冲击。断续切削过程中刀具所经受的切削力和切削温度不断变化导致的加工环境不稳定, 使刀具的强度和硬度下降, 刀具更容易发生磨损, 而切削刃和刀尖部分的涂层较其他部位的涂层强度低, 更容易受到破坏。同时, 铍青铜材料自身的强度、硬度较高, 在材料成形过程中由于工艺缺陷所产生的铍青铜材料颗粒和加工过程中产生的碎屑, 在加工过程中与刀具表面间相对运动产生摩擦, 容易导致刀具表面产生划痕和沟槽等缺陷。图 5 所示分别是在 200 m/min 和 400 m/min 下, 切削长度达到 15 m 时的刀具后刀面形貌图。可以看到, 刀具表面除了存在大量的涂层剥落现象, 还存在一定的沟槽以及沿切屑流出方向的划痕, 刀具表面的这些沟槽和划痕使刀具容易产生局部高温和不均匀的温度场, 降低了刀具强度, 在加工过程中, 刀具更容易受到破坏。

切削刃在切入工件的过程中, 在高温、冲击的情况下, 铍青铜材料受温度影响, 容易发生软化, 较强的粘附性使得工件材料与刀具表面产生粘结现象, 形成粘结节点, 引起局部高温。而在切削刃切出工件的过程中, 摩擦副表面发生相对滑动, 产生剪切拉力, 摩擦副形成的粘结节点在高温作用下软化, 强度降低, 在剪切力的作用下容易发生剪切断裂。在粘结节点被去除的同时, 刀具表面受到损坏的涂层容易被撕裂, 造成涂层剥落。图 5b 涂层区域 B 和剥落区域 A 的能谱分析结果如图 6 所示, TiAlN 涂层的 Ti 元素和 Al 元素是图 5b 中涂层区域 B 的主要元素, 质量分数

分别 24.97% 和 16.72%, 大量存在的 Al 元素和 Ti 元素表明了该区域的涂层仍未受到破坏。在涂层剥落区域 A 检测到硬质合金刀具基体的主要元素 C 和 W 的归一化质量分别是 16.24% 和 16.37%, 刀具涂层的主要元素 Al 和 Ti 质量分数仅为 4% 和 3.2%。大量的 W、C 元素及少量的 Al、Ti 元素, 表明该区域的涂层已经发生剥落, 刀具涂层损坏较为严重。不过, 在涂层剥落区域 A 也检测到大量铍青铜材料的 Cu 元素, 这表明在涂层剥落后的基体上存在着明显的粘结现象, 铍青铜受到切削热的影响, 容易粘附在切削刃上, 形成粘结物。

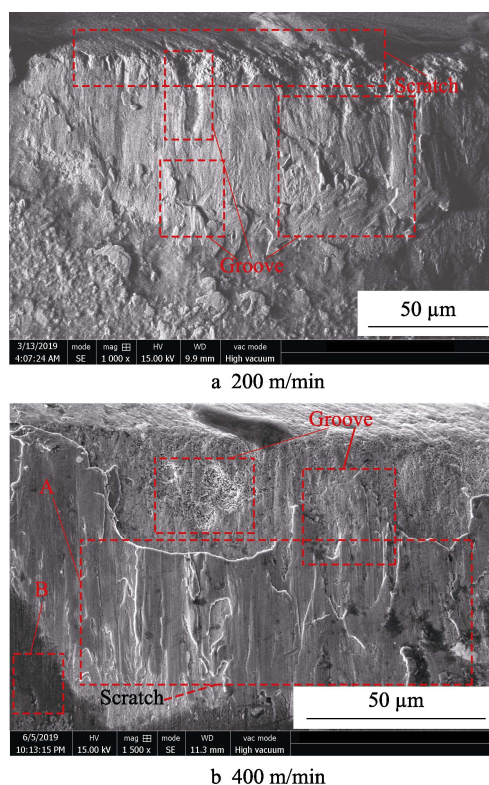


图 5 两个切削速度下后刀面的涂层缺陷和磨损形貌
Fig.5 Coating defects and wear morphology of flank at two cutting speed

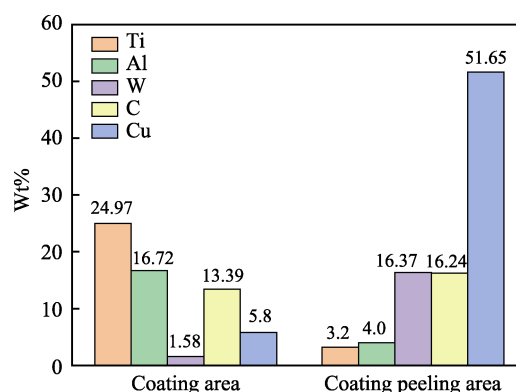


图 6 切削速度 400 m/min 下后刀面的能谱分析图
Fig.6 EDS analysis diagram of flank at a cutting speed of 400 m/min

图7是不同速度下切削长度达到20 m的磨损量和磨损面积,磨损量和磨损面积随着速度的增大而增大,速度500 m/min时的磨损量和磨损面积达到峰值,200 m/min时磨损量和磨损面积最小,这与后刀面温度存在关联。随着温度的升高,铍青铜材料热软化程度加强,导致其粘附性增强,更多的材料与后刀面发

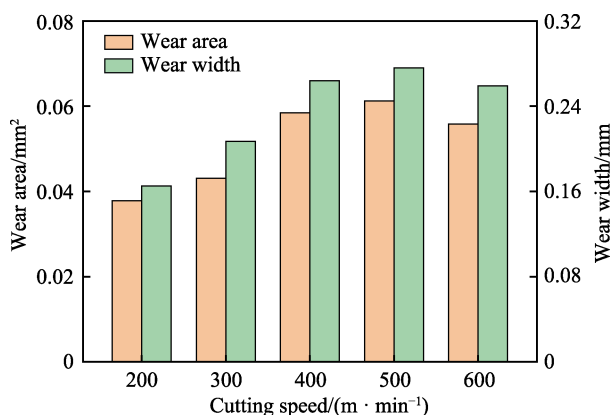


图7 不同速度下的磨损量和磨损面积

Fig.7 Effect of cutting speed on wear width and wear area

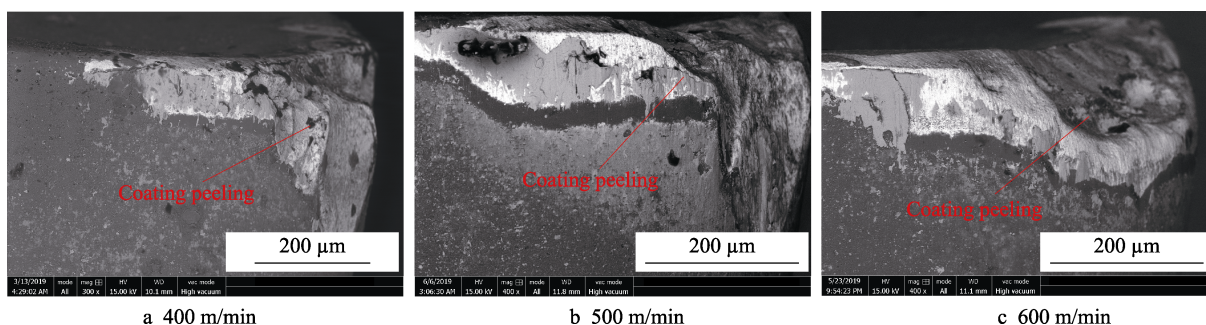


图8 不同切削速度下的刀具涂层剥落形貌

Fig.8 Peeling morphology of tool coating at different cutting speed

2.3 粘结磨损机理分析

铍青铜材料的综合力学性能较好,热软化温度较低,加工时塑性变形大,引发的切削温度高,切削力大^[20]。在断续切削过程中,涂层剥落会进一步引发刀具基体的粘结磨损,刀具在涂层剥落后强度下降,在高温、冲击和刀具所经受的切削力和切削温度不断变化导致的加工环境不稳定的影响下,切削刃在切入工件的过程中,铍青铜材料受热软化,更易与基体表面发生粘结现象,形成粘结物。图9是不同速度下,切削长度达到20 m时,刀具基体表面EDS元素分析所得的铍青铜材料粘结物Cu元素含量对比图。可以看出,在200 m/min时,刀具上的Cu元素的归一化质量为33.88%,Cu元素粘结现象最轻。而后随着速度的增加,粘结的Cu元素含量增多。在500 m/min时,刀具上的Cu元素的归一化质量为59.51%,铍青铜材料的粘结现象最严重;在600 m/min时,刀具上的Cu元素的归一化质量为40.58%,相比较500 m/min

生粘结,粘结现象越严重,对磨损程度的影响越大。600 m/min时磨损量和磨损面积减缓,这是由于随着速度的增大,后刀面温度下降,导致粘结现象减轻。

图8是峰值处三个速度、切削长度20 m时的涂层剥落情况形貌图,刀具涂层剥落面积参考磨损面积进行估算。可见在400 m/min和500 m/min时,涂层的剥落现象相差较小,磨损程度的大小影响着剥落情况。参考图7可知,500 m/min的速度下,涂层剥落的现象最严重,结合上述分析可知,这是由后刀面温度不同所导致。联系图3以及上述分析可以发现,随着速度的提高,温度升高,在高温、冲击的作用下,铍青铜材料受热软化后粘附性提高,容易与刀具表面发生粘结,生成粘结物,涂层受粘结现象的影响,更容易在刀具切出时被撕裂,因而涂层剥落的情况更加严重。然而当速度提高到一定程度后,温度呈下降趋势,工件材料的粘附性不如高温时严重,因而磨损程度和涂层剥落较高温时减轻,如图8切削速度达到600 m/min时,刀具涂层剥落情况相比500 m/min时有所改善。

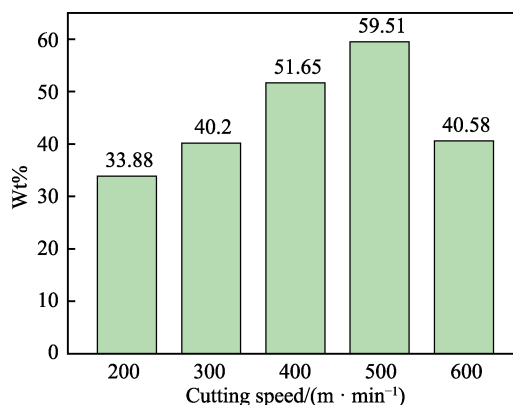


图9 不同速度下刀具基体Cu元素含量对比图
Fig.9 Comparison of Cu content in tool substrate at different cutting speed

时的粘结程度有所减轻。

图10a、11a、12a分别是切削长度达到20 m时,三个切削速度400、500、600 m/min下粘结物的Cu元素含量出现峰值处的,刀具基体的磨损形貌。观察

图 10b、11b 和 12b 所示 A 区域放大图, 可以看到涂层剥落后的基体上都形成了一定的粘结物, 综合图 3 以及上述分析可以发现, 刀具温度随着速度的升高而升高, 到达临界值后逐渐降低, 刀具的粘结现象随着温度的升高而越来越严重, 之后随着温度的降低而减轻。这是由于切削温度较高时, 铍青铜材料受高温影响, 更容易发生热软化, 更易与刀具表面发生粘结, 而刀具由于涂层剥落后强度降低, 更容易产生不均匀

的温度场和局部高温, 铍青铜材料粘附在刀具表面形成粘结物, 因此 500 m/min 时刀具温度最高, 粘结现象最严重。然而当切削速度达到一定程度后, 热源变化频率升高, 刀具升温降温的频率增大, 热源持续作用时间变短, 切削热传导至刀具的时间变短, 热源在刀具和工件的热分配比变小, 温度不再提高, 因此刀具的粘结现象显得更轻微, 所以到速度 600 m/min 时, 粘结现象有所减轻。

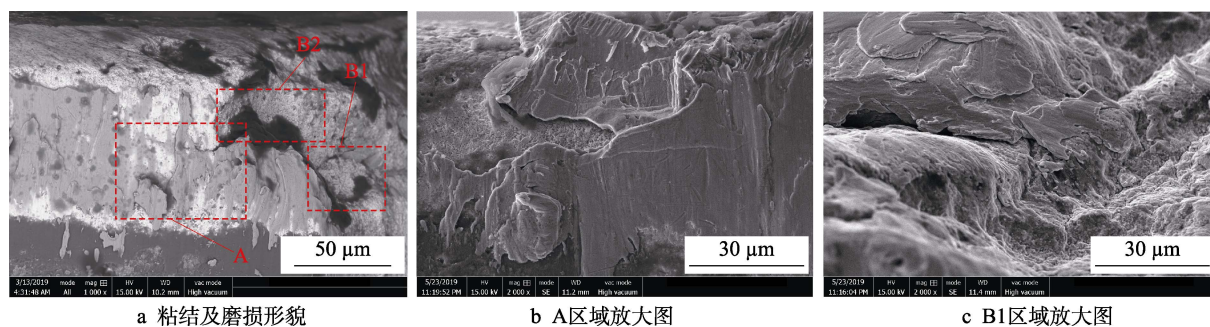


图 10 400 m/min 条件下刀具基体形貌

Fig.10 Morphology of tool substrate at 400 m/min: a) morphology of adhesion and wear on tool substrate at 400 m/min; b) magnified of area A; c) magnified of area B1

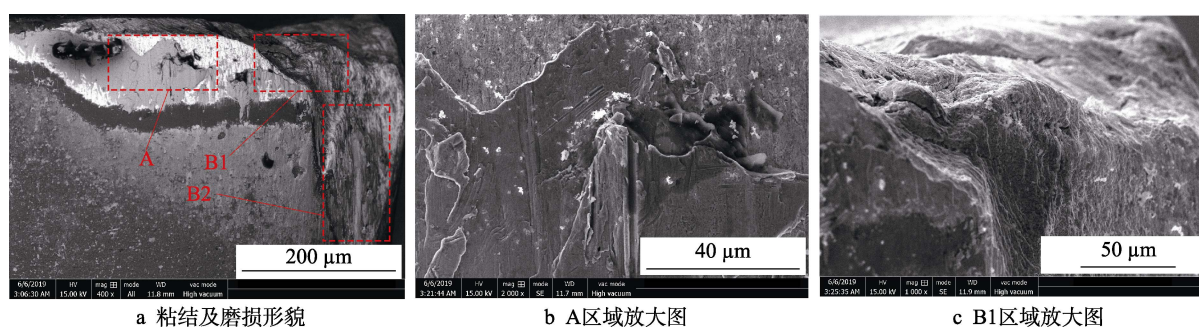


图 11 500 m/min 条件下刀具基体形貌

Fig.11 Morphology of tool substrate at 500 m/min: a) morphology of adhesion and wear on tool substrate at 500 m/min; b) magnified of area A; c) magnified of area B1

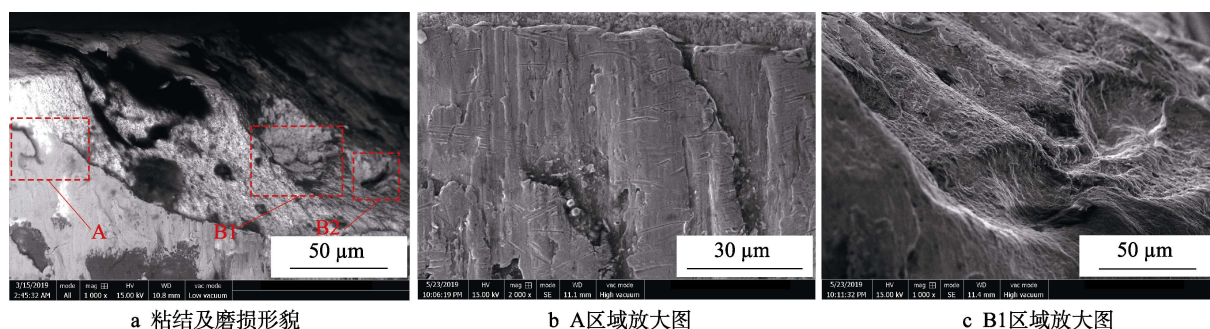


图 12 600 m/min 条件下刀具基体形貌

Fig.12 Morphology of tool substrate at 600 m/min: a) morphology of adhesion and wear on tool substrate at 600 m/min; b) magnified of area A; c) magnified of area B1

工件材料受温度变化的影响在刀具上形成的粘结物容易被带入切削区域, 加工时与工件表面发生摩擦和挤压, 对刀具性能和工件表面质量产生影响。而铍青铜材料较强的粘附性使其与刀具发生粘结现象, 产生一定的粘结节点, 导致切削过程中产生的热不易

被切屑带走, 大部分积聚在刀具的刀尖、刀刃附近, 加剧了刀具磨损。断续切削过程中, 随着加工的进行, 粘结点表面的表面压力和温度持续提高, 强度降低, 在切削刃切出过程中剪切力的作用下容易发生断裂。而在粘结物被去除的过程中, 刀具基体表面由于强度降

低,容易被撕裂,形成凹坑和撕裂带,如图 10a、11a、12a 中的 B1、B2 区域所示。图 10c、11c、12c 是其 B1 区域放大图,可以清晰地看出,刀具基体表面形成凹坑现象,三个速度下形成的凹坑都较为明显。凹坑、撕裂带的形成与粘结物的形成有关,温度越高,粘结现象越严重,后期在粘结物被去除的过程中形成的凹坑和撕裂带就相对较多,如图 11a 所示 500 m/min 下刀具基体形貌的 B2 区域就是一块较大的撕裂带,500 m/min 下刀具磨损最为严重,由于其温度最高,粘结最严重,而 600 m/min 磨损相比 500 m/min 有所减轻。

断续切削过程中切削刃周期性地切入切出工件材料,导致加工时基体表面粘结物形成、破坏、再形成的交替变化,切削过程这种粘结、破坏、再粘结的交替过程就形成了刀具的粘结磨损。刀具基体的粘结磨损是由应力场、温度场和刀具涂层磨损共同决定的。温度越高,在高温、冲击的作用下,刀具基体的强度进一步下降,更容易在刀具切出时被破坏,同时铍青铜材料受温度影响的热软化程度越高,更容易与刀具表面发生粘结现象,形成粘结物,粘结现象越严重,引发的粘结磨损越严重。

3 结论

1) 切削速度对刀具温度的影响较为明显,刀具温度随着切削速度的增加,呈现先升高后降低的趋势。切削速度的提高使切削周期变短,刀具温度的变化频率升高、变化峰值区间减小。刀具温度变化频率升高导致刀具表面产生局部高温和热冲击,影响刀具磨损。

2) 在断续切削过程高温、冲击以及刀具所经受的切削力和切削温度不断变化导致的加工环境不稳定的作用下,铍青铜材料受热软化程度变大,更容易与刀具表面发生粘结现象,生成粘结物。温度越高时,铍青铜材料和刀具表面受温度的影响程度越高,后刀面粘结现象越严重。

3) 断续切削时“负载—卸载”、“升温—降温”产生的高温、冲击以及刀具所经受的切削力和切削温度不断变化导致的加工环境不稳定的作用下,刀具涂层的强度和硬度下降,涂层表面受到一定的破坏,产生沟槽和划痕,在粘结物被去除的过程中,刀具表面被破坏的涂层在剪切力的作用下容易被撕裂,造成涂层剥落,温度越高,涂层剥落现象越严重。

4) 断续切削过程中,铍铜合金材料和刀具基体在高温、冲击的作用下,涂层剥落区域更容易形成粘结物,刀具基体上发生粘结、破坏、再粘结的交替过程,就形成了刀具的粘结磨损。刀具基体的粘结磨损是由应力场、温度场和刀具涂层磨损共同决定的。温度越高,粘结现象越严重,后刀面的粘结磨损越严重。

参考文献:

- [1] SHARMA A, DATTA D, BALASUBRAMANIAM R. An investigation of tool and hard particle interaction in nano-scale cutting of copper beryllium[J]. Computational materials science, 2018, 145: 208-223.
- [2] SHERLOCK P, ERSKINE A, LORENZETTO P, et al. Application of a diffusion bonding methodology to develop a Be-Cu HIP bond suitable for the ITER blanket[J]. Fusion engineering & design, 2003, 66(3): 425-429.
- [3] 王伟. 铍铜合金的生产和应用前景分析[J]. 有色金属加工, 2014, 43(2): 9-12.
- [4] WANG Wei. Production status and application prospect of beryllium copper alloy[J]. Nonferrous metals processing, 2014, 43(2): 9-12.
- [5] 曹迪, 王宇鑫, 高伟东, 等. 铍青铜材料的加工工艺研究进展[J]. 金属功能材料, 2018, 25(4): 35-40.
- [6] CAO Di, WANG Yu-xin, GAO Wei-dong, et al. Research progress on processing technology of beryllium bronze material[J]. Metallic functional materials, 2018, 25(4): 35-40.
- [7] ALISHA S, VENKATESWARAN T, AMRUTH M, et al. Effect of heat treatment on the mechanical properties of copper-beryllium alloy (C17200)[J]. Materials science forum, 2015(830-831): 168-171.
- [8] NAGEL N. Beryllium und kupfer beryllium legierungen [J]. Chemie ingenieur technik, 2017, 89(1-2): 92-96.
- [9] KHODABAKHSHI A, ABOUEI V, MORTAZAVI N, et al. Effects of cold working and heat treatment on microstructure and wear behaviour of Cu-Be alloy C17200[J]. Tribology—materials, surfaces & interfaces, 2015, 9(3): 118-127.
- [10] YUAN W, TANG Y, YANG X, et al. On the processing and morphological aspects of metal fibers based on low-speed multi-tooth dry cutting[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, 66(5-8): 1147-1157.
- [11] KOU Z, WAN Y, CAI Y, et al. Burr controlling in micro milling with supporting material method[J]. Procedia manufacturing, 2015, 1: 501-511.
- [12] 张金, 黄筱调, 彭琪, 等. 铣齿断续切削机理的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 186-192.
- [13] ZHANG Jin, HUANG Xiao-diao, PENG Qi, et al. Mechanism of intermittent cutting in gear milling[J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(13): 186-192.
- [14] CUI X, JIAO F, ZHAO B, et al. A review of high-speed intermittent cutting of hardened steel[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017(4): 1-10.
- [15] SU R, HUANG C, ZOU B, et al. Study on cutting burr and tool failure during high-speed milling of compacted graphite iron by the coated carbide tool[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 98(1): 201-211.

- [3] LIU C R, BARASH M M. Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface[J]. *Journal of engineering for industry*, 1982, 104(3): 257-264.
- [4] 高尚, 耿宗超, 吴跃勤, 等. 石英玻璃超精密磨削加工的表面完整性研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 186-195. GAO Shang, GENG Zong-chao, WU Yue-qin, et al. Surface integrity of quartz glass induced by ultra-Precision grinding[J]. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2019, 55(5): 186-195.
- [5] 陈鑫, 王栋, 刘昱范. 高速磨削对 18CrNiMo7-6 表面完整性的影响研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 268-274. CHEN Xin, WANG Dong, LIU Yu-fan. Influence of high speed grinding on surface integrity of 18CrNiMo7-6[J]. *Surface technology*, 2018, 47(9): 268-274.
- [6] DAHLMAN P, GUNNBERG F, JACOBSON M. The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning[J]. *Journal of materials processing technology*, 2004, 147(2): 181-184.
- [7] BASHIR K, ALKALI A U, ELMUNAFI M H S, et al. Experimental investigation into effect of cutting parameters on surface integrity of hardened tool steel[J]. *IOP conference series: Materials science and engineering*, 2018, 344: 012020.
- [8] WANG B, LI X, LIU J, et al. Comparison of atmospheric corrosion behavior of Al-Mn and Al-Zn-Mg-Cu alloys in a tropical coastal environment[J]. *Materials and corrosion*, 2017, 458: 653.
- [9] ZHANG Y, JIANG S, ZHU X, et al. Influence of heat treatment on complex-shape rotating disk subjected to isothermal precision forging[J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2017, 31(1): 141-147.
- [10] LI F, WU H, QIN M. Effects of processing parameters on the extrusion by continuous variable cross-section direct extrusion with 7A09 aluminium alloy[J]. *Modern physics letters B*, 2016, 53: 1650053.
- [11] 马冬威, 李森泉, 罗皎, 等. 基于应变影响的 7A09 铝合金等温压缩流动应力模型[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(5): 954-960. MA Dong-wei, LI Miao-quan, LUO Jiao, et al. Flow stress model considering contribution of strain in isothermal compression of 7A09 aluminum alloy[J]. *The Chinese journal of nonferrous metals*, 2011, 21(5): 954-960.
- [12] LUO J, LI M Q, MA D W. The deformation behavior and processing maps in the isothermal compression of 7A09 aluminum alloy[J]. *Materials science & engineering: A (structural materials: properties, microstructure and processing)*, 2012, 532: 548-557.
- [13] LUO J, LI M Q, MA D W. Microstructure and mechanical properties of 7A09 aluminium alloy after isothermal compression and solution treatment[J]. *Journal of materials processing technology*, 2012, 212(5): 1039-1048.
- [14] CHEN Q, XIA X, YUAN B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 7A09 high strength aluminium alloy processed by backward extrusion at room temperature[J]. *Materials science and engineering: A*, 2013, 588: 395-402.
- [15] JI Hong-zhi, YUAN Lin, SHAN De-bin. Study on cooling contraction behavior of 7A09 aluminum alloy at different cooling rates[J]. *Materials science and technology*, 2011, 23: 412.
- [16] WANG W W, JIA B B, LUO S J. Effect of heat treatment on mechanical properties of thixoformed 7A09 aluminum alloy[J]. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2009, 19(S2): 1345.
- (上接第 326 页)
- [13] LIU G, ZHOU Z, QIAN X, et al. Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed milling of stainless steel[J]. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2018, 31(1): 1-10.
- [14] LI A, ZHAO J, HOU G. Effect of cutting speed on chip formation and wear mechanisms of coated carbide tools when ultra-high-speed face milling titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2017, 9(7): 1-13.
- [15] HOU Jun-zhan, ZHOU Wei, DUAN Hong-jian, et al. Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy [J]. *International journal of manufactural technology*, 2014, 70(9-12): 1835-1845.
- [16] ABUGSHIM N, MATIVENGA P, SHEIKH M. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: a review and implications for high speed machining[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2006, 46(7): 782-800.
- [17] WANG C, DING F, TANG D, et al. Modeling and simulation of the high-speed milling of hardened steel SKD11 (62HRC) based on SHPB technology[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2016, 108: 13-26.
- [18] JIANG F, LIU Z, YANG F, et al. Investigations on tool temperature with heat conduction and heat convection in high-speed slot milling of Ti6Al4V[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, 96(5-8): 1847-1858.
- [19] LIU J, CHOU Y K. On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2007, 47(3-4): 635-645.
- [20] YILDIZ Y, SUNDARAM M M, RAJURKAR K P. Empirical modeling of the white layer thickness formed in electrodischarge drilling of beryllium copper alloys[J]. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2013, 66(9-12): 1745-1755.