

考虑电流和振动的涂层铣刀磨损规律实验研究

王民^{1,2},吕约澎¹,侯劲松³,杨斌¹

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院先进制造技术重点实验室,北京 100124;
2. 电火花加工技术北京市重点实验室,北京 100191; 3. 北京新立机械有限责任公司,北京 100039)

摘要:随着切削技术向着高速、高效和干式加工等方向发展,刀具涂层和切削状态监测技术成为影响切削技术发展的主要因素,研究刀具涂层以及刀具磨损引起的切削状态改变对促进制造业发展具有重要意义。利用铣削实验得到了相同切削条件下,不同涂层的3把硬质合金刀具的加工磨损情况。通过分析各个刀具磨损过程中铣削力信号、主轴电流信号以及切削振动信号的变化,得到了无涂层、TiAlN涂层以及AlTiN涂层刀具在切削过程中表现出的磨损规律。结果表明:AlTiN涂层的耐磨性能更好,3把刀具的主轴电流有效值和切削振动信号质心频率的变化均有效反映了刀具磨损情况。在立铣加工过程中,可以将上述两种特征值用于刀具磨损实时在线监测。

关键词:铣削加工;刀具涂层;磨损;铣削力;主轴电流;振动

中图分类号:TH117; TG54 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)05-0013-04

Experimental Study of Wear Laws of Coated Milling Tools in Consideration of Current and Vibration

WANG Min^{1,2}, LV Yuepeng¹, HOU Jingsong³, YANG Bin¹

(1. Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Electro-machining Technology, Beijing 100191, China; 3. Beijing Xinli Machinery Works, Beijing 100039, China)

Abstract: With the development of high-speed, high-efficiency and dry-type cutting mechanism, tool coating and cutting state monitoring become the main factors having influence on the development of the cutting mechanism. It is of great significance to the study. By the milling experiments, the wear datum of three different coated cemented carbide tools on the same cutting condition are obtained. The change of the cutting force signals, spindle current signals and vibration signals in the process of the tool wear is analyzed and the wear laws of the uncoated, TiAlN coated and AlTiN coated tools are obtained. The results show that the wear resistance of AlTiN coated tool is the best. The change of the spindle current effective value and the gravity frequency of the cutting vibration effectively reflects the tool wear condition, which can be used as the characteristic parameters for real-time online monitoring of the tool wear.

Keywords: milling; tool coating; wear; milling force; spindle current; vibration

0 引言

随着加工过程对高速、高精度要求的提升,普通的铣削刀具已难以满足,涂层刀具结合了基体高强度、高韧性和涂层高硬度、高耐磨性的优点,提高了刀具的切削性能和使用寿命,由此逐渐得到广泛应用,已占全部刀具使用总量的50%以上^[1-2]。其中,TiAlN和AlTiN涂层刀具具有良好的耐磨性和力学性能,国内外的学者对其切削过程中所表现出的切削性能进行了一定的研究。N.Zhong等人^[3]研究了TiN、TiCN和TiAlN涂层刀具对40Cr钢的切削性能,结果表明:TiCN和TiAlN涂层刀具的耐磨性能约是TiN涂层刀具的3倍,尤其是在高速切削条件下,优势更为明显。Z.B.Qi等人^[4]研究了高Al含量的AlTiN涂层

的高温氧化行为与高温摩擦特性之间的关系。一定温度条件下氧化行为可以提高涂层的耐磨性,

当温度超过900℃时,大量TiO₂的生成使得磨损机制转变为塑性变形,涂层的磨损率增加。以上对刀具涂层的研究主要集中在涂层的耐磨性能,对由磨损引起的切削状态变化考虑较少,而切削状态的变化将影响加工过程的效率和精度,研究伴随刀具磨损切削状态的变化对机械加工过程自动化和智能化的实现具有重大意义。

本文采用铣削实验,综合考虑切削过程的切削力、主轴电流、切削振动和刀具磨损情况等切削状态的变化,通过对比无涂层、TiAlN涂层和AlTiN涂层刀具在铣削加工过程中表现出的磨损规律,得到铣削过程中随着刀具磨损

切削力信号、主轴电流信号以及切削振动信号特征值的变化趋势,找出涂层刀在铣削加工环境下的磨损形态,为进一步开发刀具涂层材料和实现刀具磨损在线监测提供实验依据。

1 实验设备与条件

1.1 实验设备

铣削实验在 DM1007 加工中心中进行,使用 KISTLER 三向测力仪采集 3 个方向的切削力信号,使用 CHG-500F 电流互感器采集主轴电流信号,使用 YD-193 三向加速度传感器采集振动信号,通过数据采集系统对上述信号进行实时显示和保存(图 1)。

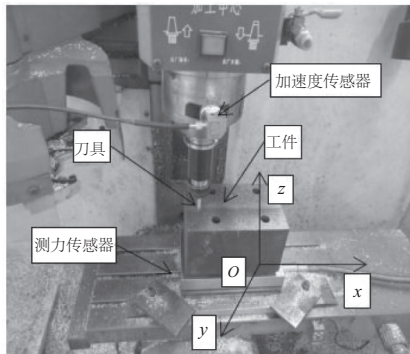


图 1 加工现场图

1.2 具体实验条件

加工参数:3 组实验采用相同的加工参数,轴向切深 $a_p = 1 \text{ mm}$, 径向切宽 $a_e = 4 \text{ mm}$, 进给速度 $v_f = 1000 \text{ mm/min}$, 主轴转速 $n = 3000 \text{ r/min}$ 。

刀具:实验用刀具为 3 把不同涂层的硬质合金平头立铣刀,分别为无涂层刀具、TiAlN 涂层刀具、AlTiN 涂层刀具(图 2),其直径 $D = 8 \text{ mm}$, 刀齿数 $Z = 4$,两种涂层的主要性能参数如表 1 所示(数据来源于上海工具厂)。

表 1 涂层材料特性

涂层材料	纳米硬度/HV	摩擦系数	最高工作温度/°C
TiAlN	3 500	0.5	800
AlTiN	3 800	0.7	900

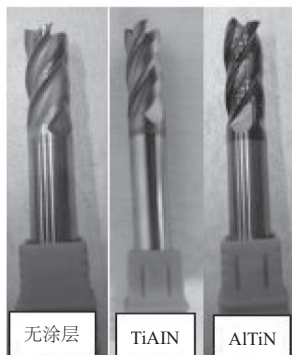


图 2 实验用刀具

工件材料:采用 45# 钢矩形毛坯,工件尺寸为 $170 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。

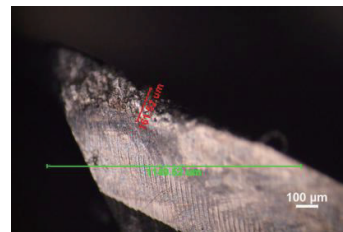
铣削方式:半接触顺铣,干式切削。

为了确保实验的可对比性,每把刀具切削长度均为 85 m (连续加工 120 min)。

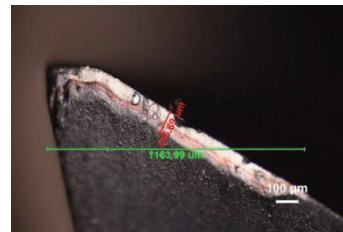
2 实验结果与分析

2.1 刀具磨损情况

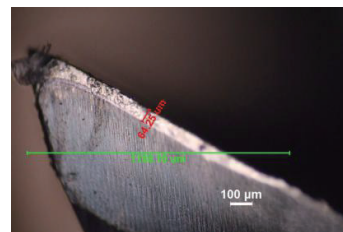
每把刀具完成切削实验后使用奥林巴斯 BX51M 显微镜拍照观测后刀面磨损情况,测量计算出无涂层刀具、TiAlN 涂层刀具、AlTiN 涂层刀具的 3 个刀齿平均后刀面磨损量 VB 值分别为 0.332 mm 、 0.135 mm 和 0.102 mm (图 3)(本刊为黑白印刷,相关问题请咨询作者)。



a) 无涂层刀具



b) TiAlN 涂层刀具



c) AlTiN 涂层刀具

图 3 实验后刀具磨损情况

2.2 切削力信号

实验中切削力信号每 40 min 保存 1 次,每把刀具总共采集 4 组长度为 120 s 的数据。其中第 1 组和最后 1 组数据分别来源于每把刀具铣削加工初始阶段和最终阶段,中间 2 组数据均匀间隔采集,4 组数据可以有效反映整个加工过程切削力的变化。

本铣削实验中,主轴方向定义为 z 向,此方向的力为轴向铣削力 F_z ;铣削进给方向为 x 方向,此方向力为进给铣削力 F_x ;水平面上垂直于 x 方向的力为径向切深抗力 F_y 。刀具后刀面磨损对轴向切削力 F_z 影响不大,且加工过程 F_z 数值较小,不再予以考虑。铣削过程采用顺铣单向吃刀,每刀进给的实际加工时间为 6 s ,因此选取每把刀

具各组数据中稳定切削 6 s 的 4 段数据进行分析,通过计算每个阶段切削力 F_x 以及 F_y 的绝对值均值^[5]来对比切削力的大小关系。

图 4 为 3 把刀具 x 方向切削力在刀具旋转一个周期内的时域波形。无涂层刀具的切削力幅值大于涂层刀具的切削力幅值,AlTiN 涂层刀具的切削力幅值最小。

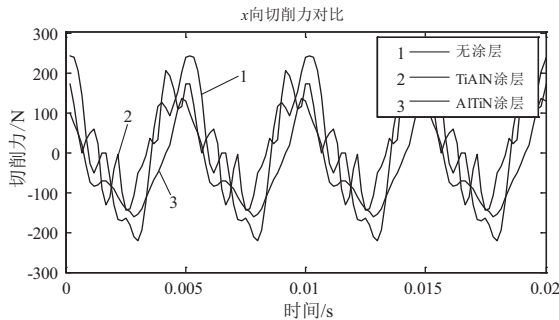
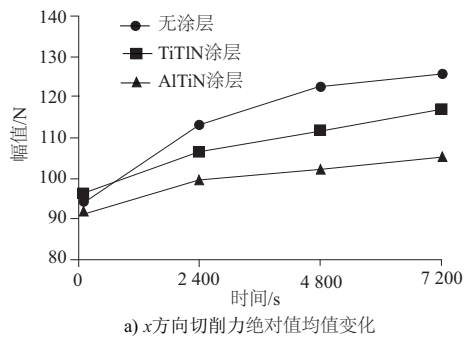


图 4 切削力信号时域图

图 5 为每把刀具铣削实验中 4 个阶段切削力绝对值均值变化趋势图,随着加工过程刀具不断磨损,3 把刀具 x 方向和 y 方向切削力均有增大的趋势。



a) x 方向切削力绝对值均值变化

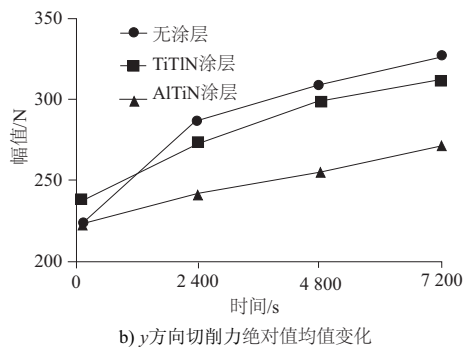


图 5 切削力绝对值均值

2.3 电流信号

实验中电流互感器套装在主轴电缆线上,通过采集卡与工控机相连,完成电流信号的连续采集和保存。分析切削过程中 3 把刀具在其他参数不变的情况下随着刀具磨损电流时域内有效值的变化,如图 6 所示。

从电流信号有效值变化趋势图上可以看出整个加工过程 3 把刀具电流有效值呈现增大的趋势,无涂层刀具切削 3 600 s 之前电流有效值增加显著。该时段对应无涂层刀具初期磨损阶段,此阶段刀具磨损剧烈,引起切削力迅

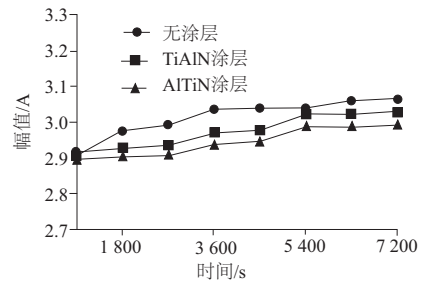


图 6 电流有效值变化趋势图

速增大,电流有效值随之迅速增加。当刀具进入正常磨损阶段,电流变化趋于缓和。2 把涂层刀具耐磨性较好,初期磨损阶段相比于无涂层刀具磨损率较小,不存在电流有效值迅速升高的现象。3 把刀具整体电流有效值的关系为无涂层刀具最大,AlTiN 涂层刀具最小,该结果与切削力大小关系相对应。

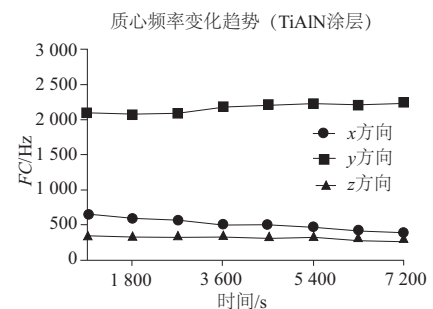
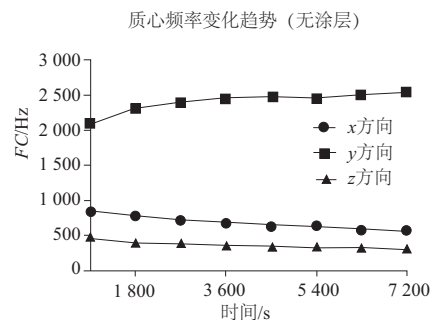
2.4 振动信号

实验中三向加速度传感器固定在机床主轴(图 1),振动信号 x 方向对应进给切削力方向, y 方向对应径向切深抗力方向, z 方向为机床主轴方向。不同的磨损状态,某些频率的振动幅值发生变化会在很大程度上影响功率谱质心位置。从频谱统计的角度获取频域能量频率分布情况更加全面和可靠,计算切削过程中 3 把刀具在其他参数不变的情况下随着刀具磨损振动信号频域特征参数质心频率 FC 的变化^[6]。

$$\text{质心频率: } FC = \frac{\int_0^{+\infty} fS(f)df}{\int_0^{+\infty} S(f)df} \quad (1)$$

式中: $S(f)$ 为时域信号 $x(t)$ 的功率谱, f 为采样频率。

由图 7 可知,在立铣加工中 3 把刀具 x 向振动信号质心频率随着刀具磨损逐渐减小, y 向振动信号质心频率呈现上升趋势, z 向振动信号质心频率几乎不受刀具后面



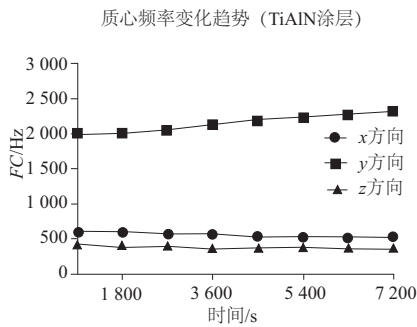


图7 振动信号质心频率变化趋势图

磨损的影响。随着刀具磨损 x 向振动信号功率谱质心位置向低频带靠近, 频谱能量分布在低频带更集中, y 方向振动信号有相反的趋势。

2.5 结果分析

1) 刀具磨损程度

铣削 45#钢时, 无涂层刀具在加工初始阶段和涂层刀具切削性能差别不大, 但随着加工进行刀具磨损剧烈, 有刀具出现严重崩刃现象, 实验最终阶段后刀面磨损量 VB 值和切削力值最大; TiAlN 涂层刀具后刀面磨损带磨损量均匀, 切削力值较无涂层刀具减小, 但刀尖位置磨损相对严重, 后刀面上有较多划痕, 主切削刃已不再锋利, AlTiN 涂层耐磨性最好, 切削力值最小, 刀尖出现轻微破损, 但未出现明显划痕。

2) 涂层材料特性

综上所述, 在同样切削条件下, TiAlN 涂层和 AlTiN 涂层可以有效改善刀具的切削性能, 并且涂层材料对涂层刀具的耐磨性有很大影响, 其中 AlTiN 涂层刀具后刀面磨损量最小, 耐磨性能最好。分析原因, 首先, 由于两种涂层材料本身的硬度要高于刀具基体材料(硬质合金), 所以产生延缓刀具后刀面磨损的现象; 其次, 可能由于两种涂层材料都含有 Al 元素, 高温切削环境下会在涂层表面形成一层很薄的 Al_2O_3 惰性保护膜, Al_2O_3 具有极高的硬度和抗高温性能, 使产生的切削热大大降低, 有效提高刀具的高温加工寿命。最后, 尽管 AlTiN 涂层的摩擦系数高于 TiAlN 涂层, 但由于 AlTiN 中的 Al 原子含量要比 Ti 原子高, 而 TiAlN 中正好相反, 原子分数比的不同必然带来性能上的差异^[7]。AlTiN 晶体薄膜中, Al 原子置换 TiN 中的一部分 Ti 原子后使晶格发生畸变。晶格畸变度大的涂层中晶界增多, 位错多并且不易滑动, 导致涂层硬度的提高, 因而 AlTiN 涂层表现出更好的耐磨性能。

3) 切削状态变化

刀具后刀面发生磨损以后改变了刀具与工件之间的接触方式, 由线接触变为面接触, 随着刀具磨损量的增加, 刀具后刀面与工件的接触面积增加。这样就使得刀具后刀面与工件的摩擦力加大, 吃刀抗力增大, 在立铣加工中反映在 x - y 平面内便是切削力 F_x 和 F_y 均增大。随着刀具磨损量的不断增大, 摩擦将继续加剧, 切削力 F_x 和 F_y 亦将不断增大; 切削力的增大引起主轴转矩增大, 进而切削功率增大, 在电压不变的情况下, 功率的增加电流有效值势必增大, 主轴电流信号有效值大小与刀具磨损情况密

切相关, 其变化曲线斜率的大小反映刀具磨损率的大小, 进而判断当前刀具所处的磨损阶段。此外, 刀具在切削过程中后刀面和工件已加工表面的接触压力很大, 特别是刀具磨损后, 接触区域内的温度很高, 此时刀具后刀面(磨损面)同工件表面的摩擦可以认为属于内摩擦。随刀具后刀面磨损值的增大, 实际内摩擦面积也逐渐增加。因此, 改变了刀具、工件系统的接触振动阻尼^[8], 从而使 x 向振动信号低频段的功率谱值增大, 功率谱质心向低频方向移动。

3 结语

1) 刀具涂层可以改善刀具磨损情况, 进而使刀具切削力减小, 不同的涂层材料效果差异较大, AlTiN 涂层的耐磨性能优于 TiAlN 涂层。

2) 相比于摩擦系数, 涂层的硬度属性对刀具耐磨性能影响更大, 在开发新的涂层材料时需重点考虑涂层的硬度; 此外, 在高温铣削环境下涂层元素之间以及涂层元素与空气介质和工件材料之间都有可能发生相互反应, 因此涂层的热稳定性也不容忽视; 涂层中 Al 元素存在, 一方面可以在高温切削环境下生成一层 Al_2O_3 惰性保护膜, 另一方面通过改变晶体结构提高了涂层的硬度, 适量增加涂层中 Al 元素的含量是提高刀具耐磨性不错的选择。

3) 通过研究切削力信号、电流信号以及振动信号的变化, 确定切削力与刀具磨损之间的高度相关性, 且随着刀具磨损, 3 把不同涂层刀具的主轴电流信号有效值和切削振动信号质心频率有显著变化。克服三向测力仪价格昂贵, 安装不便等缺点, 针对不同涂层的刀具均可通过监测主轴电流信号有效值和切削振动信号质心频率的变化, 实现立铣加工过程中刀具磨损实时在线监测。

参考文献:

- [1] 张文毓. 硬质合金涂层刀具研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(1): 59-63.
- [2] KOK Y N, Wen J G, PETRO I, et al. Influence of ion bombardment on structure and tribological performance of nanoscale multilayer C/Cr PVD coatings[J]. Surface Engineering, 2006, 22(2): 92-98.
- [3] N Zhong, Y X Zhou, X F Zhu, et al. Microstructure and cutting performance of carbonitride coated tools in high speed machining of 40Cr steel[J]. Surface Engineering, 2011, 27(4): 306-310.
- [4] Z B Qi, P Sun, F P Zhu, et al. Relationship between tribological properties and oxidation behavior of TiAlN coatings at elevated temperature up to 900°C [J]. Surface and Coating Technology, 2013, 231: 267-272.
- [5] 邵杉, 洪荣晶, 张金, 等. 精密成形铣齿主支撑位置切削力信号分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014, 3: 20-25.
- [6] 张利群, 朱利民, 钟秉林, 等. 几个机械状态监测特征量的特性研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 20-21.
- [7] Liu A, Deng J, Cui H, et al. Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 31: 82-88.
- [8] 于化东. 刀具磨损时振动信号的分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 1991(1): 44-47.

收稿日期: 2018-07-18