

高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 的刀具磨损试验研究

袁芳,徐亮,王新永,王凯,陈旭辉,宋楠,韩军,严伟容,王松
(航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

摘 要:针对切削加工 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金时刀具磨损迅速、加工效率低的问题,开展硬质合金刀具高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 的刀具寿命试验,以研究刀具的磨损机理,分析刀面磨损的发展以及对切削力的影响。利用扫描电子显微镜观察了后刀面磨损区域的微观形貌并对元素成分进行了能谱分析。实验结果表明:高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 时硬质合金刀具的磨损形式为后刀面带状磨损与局部崩刃,伴有明显的切屑黏附与热裂纹;磨损区域有工件材料的元素向硬质合金内扩散的迹象出现;切屑流的黏附与撕扯导致硬质合金的颗粒脱落,切削刃逐步退化为洼形区域,其与后刀面交界的棱边代替原切削刃进行切削直至剥落。

关键词:高速切削;Ti-10V-2Fe-3Al;硬质合金刀具;刀具磨损;切削力

中图分类号:TG714 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)01-0051-05

Experiment Study on Tool Wear of High-speed Milling Ti-10V-2Fe-3Al

YUAN Fang, XU Liang, WANG Xinyong, WANG Kai, CHEN Xuhui, SONG Nan, HAN Jun, YAN Weirong, WANG Song
(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: To solve the problems of rapid tool wear and low processing efficiency of machining Ti-10V-2Fe-3Al alloy, the experiments on the tool life of high-speed milling Ti-10V-2Fe-3Al with the carbide insert were carried out to study the tool wear mechanism and analyze the development of flank wear and its influence over the cutting force. The scanning electron microscope was utilized to observe the microcosmic morphology of the wear region and make energy spectrum analysis on the element compositions. The experiment results show that in the process of high-speed milling Ti-10V-2Fe-3Al, carbide tool wear appears in the form of flank wear band and local edge chipping at the tool flank face, accompanied by obvious chip adhesion and comb cracks. The elements diffusion from the workpiece to tool material reveals its sign in the wear region. The adhesion and tearing of chip flow leads to the collapse of carbide grains, resulting in cutting edge degeneration to a crater-like region, together with which, the intersection edge of flank face replaces the original cutting edge in cutting function until spalling.

Keywords: high-speed cutting; Ti-10V-2Fe-3Al; carbide tool; tool wear; cutting force

0 引言

Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金(国内牌号为 TB6)是一种具有高强度、高断裂韧性、良好淬透性和优良抗裂纹扩展性能的高强度近 β 型钛合金。Ti-10V-2Fe-3Al 的综合力学性能与 30CrMnSiA 结构钢相当,但其比强度更高^[1],正在逐步应用于飞机发动机以及飞机构件上,以替代结构钢与 Ti-6Al-4V,从而达到减质量的目的。空客 A380 的主起落架支柱应用 Ti-10V-2Fe-3Al 后可为飞机减质量 270 kg,并且避免了用钢件的应力腐蚀问题^[2]。此外,由于 Ti-10V-2Fe-3Al 具有优良的疲劳强度,也被广泛应用于直升机旋翼系统的桨毂^[3]。

目前对 Ti-10V-2Fe-3Al 等 β 型钛合金的切削加工还存在材料去除率低下以及刀具磨损迅速等问题,制约着生产效率的提升与成本的压缩。许多研究者都认为,在所有类型的钛合金中, β 型钛合金的切削加工最为困

难^[4-5],原因在于 β 型钛合金即使在高温下($\geq 400^\circ\text{C}$)其力学性能也强于 Ti-6Al-4V 等 $\alpha+\beta$ 型钛合金^[6],而 β 晶粒使得切削区内的金属剪切变形需要消耗更多的能量,从而产生更多的切削力与大量的切削热^[7],恶化刀具的工作环境,加剧了刀具磨损。在切削钛合金时,切削速度对刀具寿命有着显著的影响。蒋理科等^[8]使用硬质合金刀具以 30 m/min 的切削速度铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 时,刀具出现了积屑瘤,且在 25 m/min~30 m/min 的切削速度范围内,多个厂商提供的硬质合金刀具都发生了崩刃的问题。MACHAI C 等^[9]研究了高速车削 Ti-10V-2Fe-3Al 轴类零件时的刀具磨损,发现沟槽磨损是硬质合金刀具失效的主要形式,即使在低切削速度($v_c=50\text{ m/min}$)下也无法完全避免,而在高速切削($v_c=150\text{ m/min}$)时后刀面上有积屑瘤生成,伴有突发性的崩刃。

针对 Ti-10V-2Fe-3Al 切削加工面临的材料去除率低以及刀具磨损迅速的问题,进行了高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 的硬质合金刀具寿命试验,研究了刀具寿命内后

刀面磨损以及切削力的发展,讨论了刀具磨损对切削力的影响,并对高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 时硬质合金刀片的磨损机理进行了分析,从而为加工以 Ti-10V-2Fe-3Al 为代表的 β 型钛合金时合理使用高速切削工艺提供了有益的借鉴。

1 试验方法与设备

1.1 工件材料

Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金属于 β 型钛合金,试验中 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金工件的质量分数见表 1。Ti-10V-2Fe-3Al 的强度、弹性模量、硬度等力学性能列于表 2^[1,10]。

Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-6Al-4V 与 30CrMoSiA 的材料

密度、强度与比强度的对比如图 1 所示^[11-12]。由于 Ti-10V-2Fe-3Al 拥有优良的比强度,因此其在航空零件上的应用,例如起落架与发动机机翼接头等,正在逐步扩展以替代目前使用的 Ti-6Al-4V 与 30CrMoSiA 等材料,从而进一步减轻零件的质量。

表 1 Ti-10V-2Fe-3Al 工件的质量分数 单位:%

V	Fe	Al	Ti
10.13	1.93	2.95	其余

表 2 Ti-10V-2Fe-3Al 的力学性能

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性模量 E /GPa	硬度/ HV	断裂韧性 K_{IC} / (MPa $\cdot$ m $^{1/2}$)
1 168	1 090	106	390	50~60

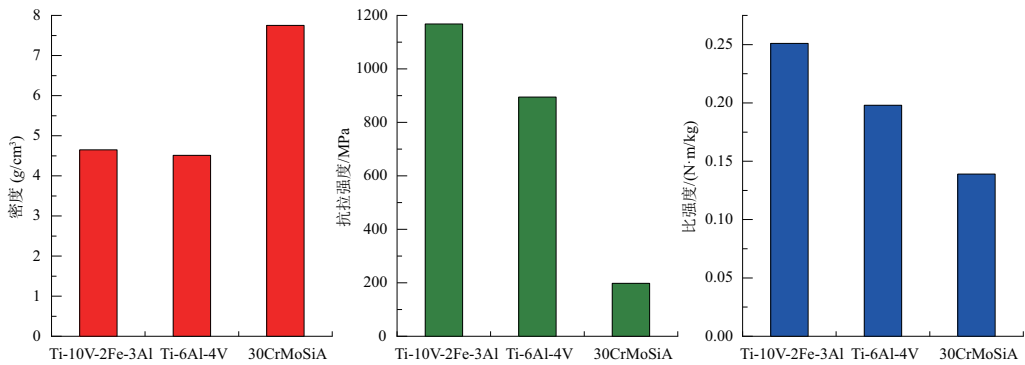


图 1 Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-6Al-4V, 30CrMoSiA 的材料性能对比

1.2 刀具

试验使用的刀具如图 2 所示,可转位刀片的 ISO 代号为 ZDGT150420R-K85,刀具的规格参数列于表 3,EDS 检测得到的质量分数列于表 4,试验刀片的硬质合金近似于原国标 YG6,成分为 W、C 与 Co。

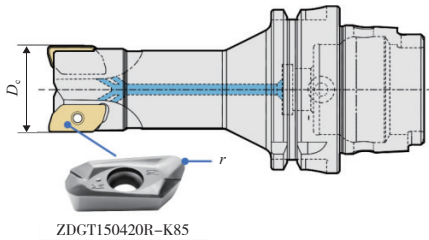


图 2 试验刀具

表 3 试验刀具的规格参数

前角 $\gamma/(\circ)$	后角 $\alpha/(\circ)$	主偏角 $K_r/(\circ)$	螺旋角 $\beta/(\circ)$	刀尖圆角 半径 r /mm	刀具直径 D_c /mm
25	15	90	0	2	25

表 4 刀片硬质合金质量分数 单位:%

W	C	Co
85.69	8.62	5.69

1.3 试验参数

高速切削试验在 NQ-VC1060 立式加工中心上进行,切削参数见表 5。切削方式为顺铣,使用了微量润滑 (MQL) 油雾冷却 (Blaser Vascomill MMSFA12 切削油,喷射流量 30 mL/h)。刀具在试验中仅安装单个刀片,以后刀面磨损 (VB) 达到 0.3 mm 作为判定磨损的标准。

表 5 实验切削参数

切削速度 $v_c/(m/min)$	每齿进给 $f_z/(mm/z)$	切深 $a_p/(mm)$	切宽 $a_e/(mm)$
100	0.1	5	1
200	0.1	5	1
300	0.1	5	1

1.4 表征方法

实验使用压电式切削力测量系统,测量了高速切削 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金的切削力,该系统由 Kistler9625B 三向测力仪、Kistler 5073A 型电荷放大器、数据处理板卡以及配套的 DynoWare 数据采集与处理软件组成,采样频率设定为 10 000 Hz。 F_x 平行于切宽方向, F_y 平行于刀具的进给方向, F_z 平行于主轴轴向,如图 3 所示。实验每次切削行程 L 为 80 mm,在单段切削行程中,取稳定切削状态下各方向切削力峰值的平均值为切削力的数值,切削力

的最大值提取与平均值计算使用 MATLAB 软件计算完成。

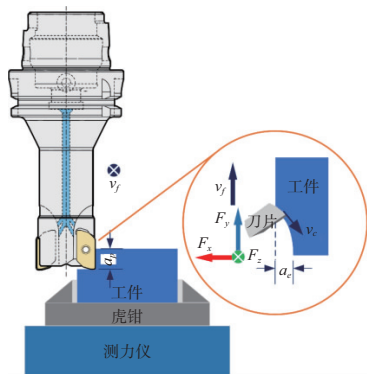


图3 切削力的测量

试验使用了 CXSP-2KCH 型 CCD 显微相机及其配套测量软件以观察刀片的后刀面磨损量 (VB), 以 VB 达到 0.3 mm 作为判定刀具磨损的标准。在试验结束后, 对已经达到磨损标准的刀片进行了部分酸洗处理。部分酸洗处理使用经过稀释的氢氟酸, 对刀片的磨损区域所黏附的钛合金进行微量的腐蚀, 可以达到去除部分黏附物的效果, 显露出磨损后的硬质合金刀片基体的同时也能保留部分的黏附物。随后使用扫描电子显微镜 (Zeiss EVO18) 观测试验刀片的磨损区域微观形貌, 并使用配套的 BRUKER 能谱仪 (EDS) 检测了磨损区黏附物的化学成分。

2 结果与讨论

试验在不同切削速度 ($v_c = 50/100/200/300$ m/min) 下, 测试了切削 Ti-10V-2Fe-3Al 的刀具寿命。各切削速度下的刀具全寿命切削行程 (即在达到磨损标准前的总切削行程) 与金属去除率 Q 如图 4 所示。切削速度的提高能成比例地提高材料去除率, 但进行高速切削时, 刀具的使用寿命相应地不断减少, $v_c = 100$ m/min 时的全寿命切削行程为 3 760 mm (折合净切削时间约为 30 min); $v_c = 200$ m/min 时的全寿命切削行程为 2 240 mm (折合净切削时间约为 9 min); 而 $v_c = 300$ m/min 时的全寿命切削行程仅为 1 840 mm (折合净切削时间约为 5 min)。显然, 在高速切削 Ti-10V-2Fe-3Al 时刀具的寿命对切削速度的提高非常敏感。

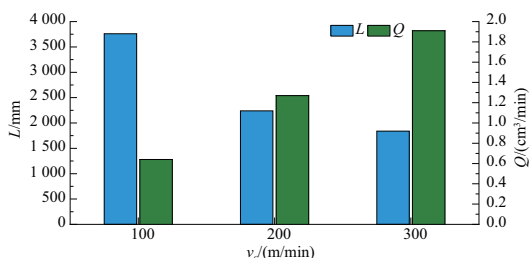


图4 不同切削速度下的刀具全寿命行程与金属去除率

试验记录了高速切削过程中后刀面磨损量 (VB) 的发展以及各向切削力随刀具磨损发展的变化。本文选取其中典型的高速切削 ($v_c = 300$ m/min) 参数进行分析。硬质合金刀具后刀面磨损量 (VB) 的发展情况如图 5 所示, 根据增长的速度, 可以由先后大致划分为初始磨损阶段、

快速磨损阶段与缓慢磨损阶段, 与通常的“初始磨损—稳定磨损—剧烈磨损”磨损发展规律的经验有所差异。其中, 初始磨损阶段最为短暂, 仅仅持续了约 400 mm 的切削行程, 随后后刀面磨损量 (VB) 开始了快速增长, 但这种增长并不稳定, 直到切削行程达到 1 520 mm 后, 开始了缓慢而大致呈线性的增长。

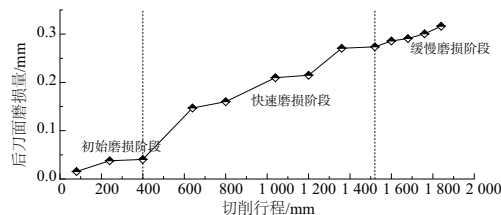


图5 后刀面磨损量的增长过程

图 6 显示了 $v_c = 300$ m/min 时, 各向切削力随后刀面磨损量 (VB) 的变化过程。随着后刀面磨损量 (VB) 的增长, 各向切削力中变化最为明显的是切宽方向的切削力 F_x 。而进给方向切削力 F_y 的变化幅度远远小于 F_x , F_z 则基本保持了恒定, 仅有小幅的波动。切削力 F_x 的变化与后刀面磨损量 (VB) 的各个发展阶段总体上相互对应, 在初始磨损阶段有小幅增长, 随后切削力 F_x 的增长则相对平缓, 直到进入缓慢磨损阶段, 此时切削力 F_x 相对前一阶段的增长又相对加快。

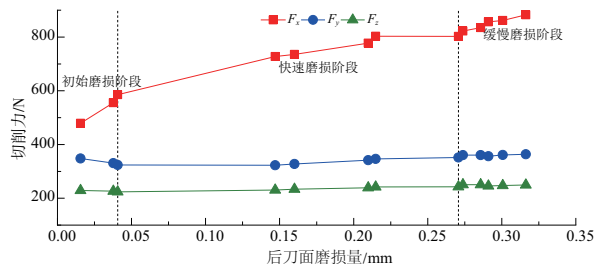


图6 后刀面磨损量对切削力的影响

全切削寿命内的后刀面磨损的发展过程如图 7 所示。

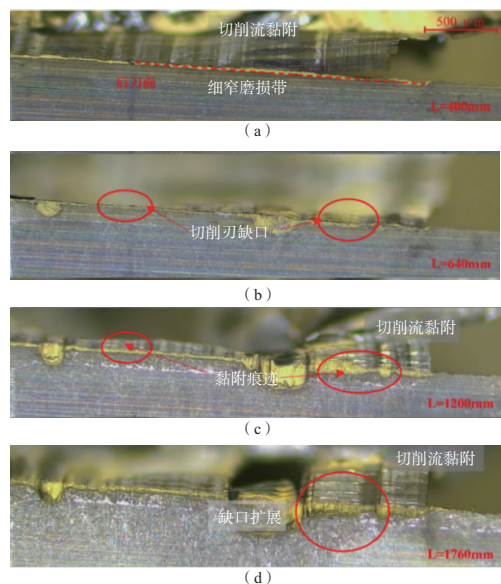


图7 后刀面磨损的发展

在初始磨损阶段,刀具的后刀面接近刃口的位置形成了大致均匀的细窄磨损带,如图 7(a) 所示;进入快速磨损阶段后,切削刃与后刀面交界处出现了明显的缺口,如图 7(b) 所示;并且能观察到在快速磨损阶段的后期,缺口中出现了钛合金黏附的痕迹,如图 7(c) 所示;随着切削历程累积,后刀面上的缺口逐步扩大,如图 7(d) 所示。不仅沿刃口方向扩展其宽度,还向刀片内部方向逐步深入。在各磨损阶段,刀具刃口附近都出现了不同程度的节块状切屑流黏附。与高速车削 Ti-0V-2Al-3Fe 的实验不同^[9],并没有在最大切深处发现有沟槽磨损的痕迹,试验中后刀面磨损最为严重的部位即是切削刃局部崩刃形成的缺口。经过部分酸洗后利用扫描电镜对缺口部位进行了观察,如图 8 所示。在缺口部位黏附有明显的层叠切屑流,从后刀面起,覆盖了切削刃并一直延伸到前刀面。经过部分酸洗后,显露出后刀面上黏附物覆盖的部分硬质合金。

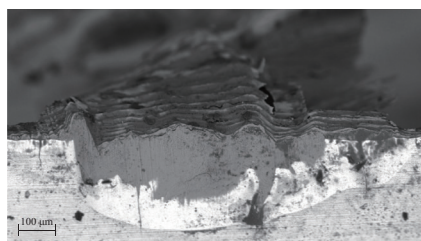


图 8 缺口处的切屑流黏附

切削刃上局部的崩刃有可能是由切削刃自身的微观缺陷在高速切削的恶劣工况下不断扩展造成的。一旦形成初始缺口,切屑流的连续冲刷使得缺口不断扩大,而扩大的缺口则为更多切屑流的汇集提供了空间,进一步促进了缺口的扩展。带状磨损区域受到的切屑流冲击向缺口位置分流了一部分,从而导致带状磨损区域扩展幅度小于缺口磨损区域。使用扫描电镜观察部分酸洗后的刀片磨损区域,在靠近切削刃但并未参与切削的后刀面上,发现了层叠状的黏附物,如图 9 所示。对后刀面某处的黏附物进行了 EDS 检测,黏附物主要成分的质量分数列于表 6。黏附物的主要成分为 Ti,同时含有少量的 W、V、C、Al 与 Fe。因此可以判定,黏附物主要成分来自于工件材料,少量的 W 与 C 可能来自硬质合金基体中的 W、C。图 9 中硬质合金基体上规则的微小平直沟槽是刀片经过抛磨处理留下的表面划痕,而在黏附物上则出现了相对规则的竖直划痕。

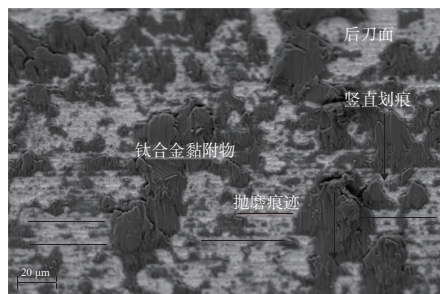


图 9 后刀面上的黏附物

表 6 黏附物中各主要元素质量分数 单位:%

Ti	W	V	C	Al	Fe
75.47	9.35	7.33	4.00	2.31	1.54

图 10 显示了部分酸洗后,显露出的原先被黏附物所遮盖的不规则洼形磨损区。洼形磨损区内出现了热裂纹,以大致均匀的间距沿切削刃分布。如图 11 所示,裂纹两侧的硬质合金颗粒发生了穿晶断裂与沿晶断裂。垂直于切削刃的梳齿状热裂纹是高速铣削的典型产物^[13],在高速铣削的过程中,刀具高频切入工件与切出工件,切入产生大量的切削热,与切出后的环境温度形成了巨大的温度梯度,引发硬质合金热疲劳,最终产生热裂纹^[14]。

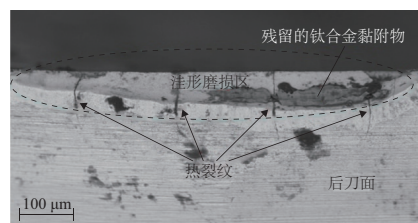


图 10 沿切削刃排布的热裂纹

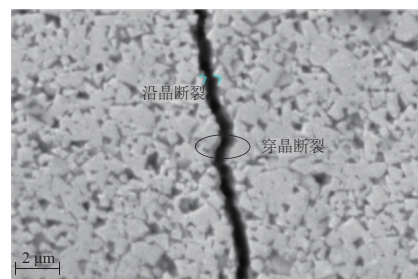


图 11 热裂纹局部

在后刀面黏附的切屑流上发现了些许散落的颗粒,如图 12 所示。根据 EDS 检测结果,其含有的主要元素为 W、Ti、Co 以及 C,可见是被黏附物裹挟的硬质合金 W、C 颗粒。这些 W、C 颗粒中含有的 Ti、Al、V 等元素,显然来自于工件材料。工件与刀具间 Ti 元素含量的梯度与高温高压工况为活泼的 Ti 元素向硬质合金内扩散提供了条件。

图 13 显示了缺口区域的局部形貌。缺口区域萌生的热裂纹延伸到了缺口外的后刀面上,在热裂纹中填充有钛合金黏附物。缺口区域内的硬质合金基体已经显露出来,表面平整,与未磨损后刀面表面的平直抛磨划痕形成对比。

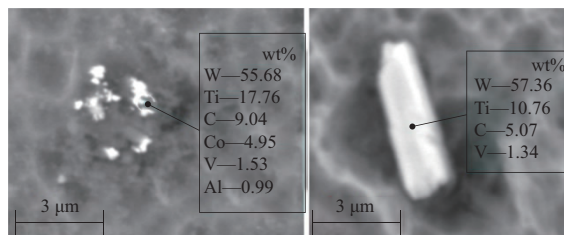


图 12 黏附物上的 W、C 颗粒

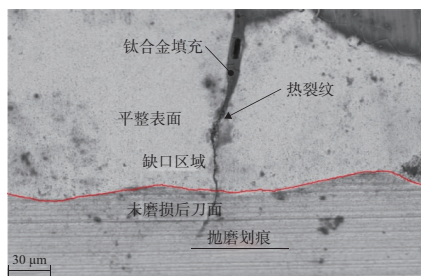


图 13 后刀面缺口区域

结合对磨损区形貌的宏观与微观观察以及黏附物成分的检测,可以对高速切削 Ti-10V-2Fe-3Al 时硬质合金刀具的磨损机理形成较为深入的认识,如图 14 所示。在刀具寿命的初期,切削刃上形成了细窄、均匀的磨损带。受到高速切削过程中高频机械冲击,切削刃上的微小缺陷逐步扩展,最终突发崩刃,形成缺口。而伴随高频切入切出过程的交变热应力的作用,导致切削刃上出现了热裂纹。在高速切削的高温高压下,切削流黏附于磨损带上,为工件与刀具间元素的扩散提供了条件。受到源源不断的后续切屑流的推动,黏附物撕扯磨损区域表面的硬质合金导致一些 W、C 颗粒脱落。脱落的 W、C 颗粒则被切屑流所裹挟。在切屑流不断冲刷下,切削刃最终退化为前后刀面间的洼形台阶。当洼形区域逐步成型后,其与后刀面交界的棱边代替原有的切削刃进行切削。由于此时在磨损带内已经萌生有热裂纹以及硬质合金材料脱落的影响,加之随机成形的“代切削刃”可能前角过小,其强度并不足以支持高速切削的冲击负载,最终发生切削刃的局部剥落,形成了缺口。剥落后的磨损区域在随后的切削过程中与工件材料不断摩擦,剥落后的硬质合金基体表面被逐步磨平。后刀面上新生成的“代切削刃”则继续这一磨损过程。

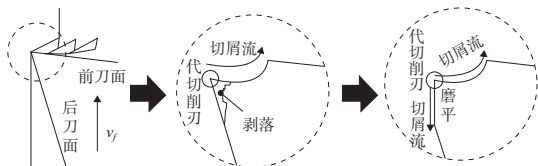


图 14 切削刃磨损的过程

3 结语

1) 使用硬质合金刀具高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 的刀具寿命与切削速度成反比,实际的生产中应该统筹考虑材料去除率与刀具寿命两者间的关系。

2) 使用硬质合金刀具高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 时,在后刀面上形成带状磨损区域的同时也伴有切削刃局部崩刃导致的缺口。

3) 后刀面上崩刃缺口扩展的幅度大于带状磨损区域扩展幅度,切屑流对切削刃局部崩刃缺口的冲刷是缺口扩展的推动因素。

4) 高速切削中,切削刃丧失了原有的结构,在切屑流冲刷与机械/热载荷的冲击下退化为前后刀面交界处的洼形过渡区域并伴随有热裂纹。洼形过渡区域与后刀面交界处的棱边成为了实际上的切削刃,在切削的冲击下新的切削刃将发生剥落,此处磨损区域在后刀面与已加工表面的摩擦中最终形成了平面。

参考文献:

- [1] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [2] 李重河,朱明,王宁,等. 钛合金在飞机上的应用[J]. 稀有金属,2009,33(1):84-91.
- [3] 刘刚强,李寒松,牛岫,等. 高效精密电解铣磨加工钛合金 Ti-6Al-4V 试验研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6):32-35.
- [4] ZLATIN N, FIELD M. Procedures and precautions in machining titanium alloys[J]. Titanium Science and Technology, 1973:489-504.
- [5] MACHAI C, IQBAL A, BIERMANN D, et al. On the effects of cutting speed and cooling methodologies in grooving operation of various tempers of β -titanium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7):1027-1037.
- [6] MACHAI C, ABRAHAMS H, BIERMANN D. Machining of β -titanium under cryogenic conditions: process cooling by CO₂-snow [C]//Future Trends in Production Engineering, [S.I.:s.n.], 2013:109-120.
- [7] ARRAZOLA P J, GARAY A, IRIARTE L M, et al. Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5):2223-2230.
- [8] 蒋理科,陈文清,陈志同,等. TB6 钛合金铣削刀具优选测评技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19):26-29, 51.
- [9] MACHAI C, BIERMANN D. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6):1175-1183.
- [10] MACHAI C, BIERMANN D. Machining of a hollow shaft made of β -titanium Ti-10V-2Fe-3Al [C]//2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Tampere, Finland: IEEE, 2011:1-6.
- [11] JACKSON M, DASHWOOD R, FLOWER H, et al. The microstructural evolution of near beta alloy Ti-10V-2Fe-3Al during subtransus forging [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(5):1317-1327.
- [12] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000, 24(3):218-223.
- [13] 李亮. 钛合金高速铣削机理及其工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2004.
- [14] 美国金属学会. 硬质合金工具的破损及其断裂韧性[M]. 马卫建,译,北京:冶金工业出版社, 1989.

收稿日期:2021-09-06