

引文格式: 江一帆, 田辉, 马梁栋, 等. 新型超高强度钛合金大进给铣削刀具磨损机理研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(19): 90-96.
JIANG Yifan, TIAN Hui, MA Liangdong, et al. Investigation of tool wear in high feed milling novel ultra-strength titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(19): 90-96.

新型超高强度钛合金大进给铣削刀具磨损机理研究*

江一帆¹, 田辉², 马梁栋², 李亮¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;
2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 为了深入理解大进给铣削 M28 超高强度钛合金的刀具磨损机理, 使用 M35 与 P45 硬质合金刀片进行了大进给铣削试验。试验观测了两种硬质合金刀片的磨损演变和磨损对切削力的影响, 借助对磨损区域的扫描电镜观察和黏附物成分的能谱检测, 分析了刀具磨损的机理。硬质合金刀片在大进给铣削 M28 时迅速磨损, 刀片局部受到毛边与硬化层冲击发生沟槽磨损。随着刀具与黏附物间相对运动, 硬质相颗粒不断被黏附物拔出, 同时硬质合金基体受到剪切作用引发裂纹, 最终产生片层状剥落。剥落程度的大小与硬质合金的粒度有关, 由于大粒度硬质合金的耐磨性更强, P45 硬质合金刀片的剥落程度相对 M35 更小。

关键词: β 钛合金; M28; 大进给铣削; 硬质合金; 磨损机理; 沟槽磨损; 黏附磨损

Investigation of Tool Wear in High Feed Milling Novel Ultra-Strength Titanium Alloy

JIANG Yifan¹, TIAN Hui², MA Liangdong², LI Liang¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Carbide inserts of ISO grade M35 and P45 were utilized in the experiment of highfeed milling M28, a kind of ultra-strength titanium alloy to make a further understanding of the tool wear. The flank wear development and its effect on cutting forces were compared between these two kinds of carbides. The flank wear region was observed by the scanning electron microscope (SEM), and the components of adhesion material were detected by the energy dispersive spectrometer (EDS) to analyze the wear mechanism in M28 high feed cutting. The carbide tools were rapidly worn out. Notch wear was caused in a specific region of the edge by burrs and hardening layer. With the relative motion between the adhesion and the tool, WC grains were pulled out by the adhesion material, and cracks grew as the result of shear in the carbide matrix. Finally, the slice-like peeling was formed on the flank face. The peeling dimension is associated with WC grain size. The P45 carbide tool with coarser grains shows relatively less wear damage than that of the M35 carbide tool since the coarse grain can offer better wear resistance.

Keywords: β titanium alloy; M28; High feed milling; Carbide; Wear mechanism; Notch wear; Adhesion wear

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.19.090

钛合金按其晶体组织可以划分为 α 型、 β 型和 $\alpha+\beta$ 型 3 种, 其中 β 型钛合金的比强度最高^[1], 随着对飞

机性能要求的不断提升, β 类钛合金在航空结构上的应用已经逐步得到了推广^[2-3]。我国新近研制成功的 β 型超高强度钛合金 M28, 其强度与抗疲劳性能突出, 已应用于新一代飞机的重要结构件上。

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52075251)。

刀具的磨损一直是钛合金切削加工中的突出问题,严重制约了切削加工的效率提升,这主要是由于钛合金中钛元素化学性质活泼、弹性模量小、导热性差等原因造成的^[4]。刀具磨损严重这一问题在切削 β 型钛合金时表现得尤为明显。在20世纪70年代,Zlatin等^[5]就已经发现,切削 β 型钛合金是钛合金切削加工中难度最大的,切削区的温度迅速升高,导致了严重的刀具磨损,因此不得不对切削速度与进给量予以限制。Arrazola等^[6]对Ti5553与Ti-6Al-4V的切削性能进行了对比研究,发现切削Ti5553时单个刀片失效前的金属去除量仅为切削Ti-6Al-4V时的56%,在低速切削($v_c=50\text{m/min}$)时,由于Ti元素的扩散,后刀面出现了主要成分为Ti与TiC的黏结层。Ezugwu^[7]对不同热处理状态下 β 钛合金的加工性能进行了对比研究,发现 β 钛合金经过淬火处理后产生的局部硬质颗粒使刀具发生了磨粒磨损。Rahman等^[8]在对Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al的铣削试验中发现切削速度超过 100m/min 后刀具就会急剧磨损直至失效。航空工业昌飞的蒋理科等^[9]利用相对磨损率快速试验法评估了不同厂家的刀具切削TB6时的寿命,发现硬质合金刀具在常规切削速度($v_c=30\text{m/min}$)下出现了积屑瘤。Machai等^[10]在Ti-10V-2Fe-3Al钛合金的车削试验中发现将切削速度控制在 50m/min 以下时刀具磨损发展较为平缓,能避免沟槽磨损的发生,此外切削液外冷方式下制约刀具寿命的主要因素是工件毛刺对刀具高频冲击引起的沟槽磨损^[1]。

受限于钛合金的难加工特性,通过增加切深切宽的方式提升材料去除效率的潜力有限。由于在提升材料去除效率方面有着独特的优势^[11],大进给铣削技术在对典型 $\alpha+\beta$ 类钛合金(如TC-4,TC-21)零件的加工中展现了优异的效果,在航空零件的制造中得到了越来越多的应用^[12-13]。为了在M28钛合金加工中应用大进给铣削技术,需要更深入地理解大进给铣削的刀具磨损。本文通过切削试验,对比了两种硬质合金刀片的后刀面磨损发展以及磨损量对其切削力的影响,并对大进给铣削M28钛合金时硬质合金刀片的磨损机理进行了分析。

1 试验及方法

1.1 工件材料

M28钛合金的名义成分为Ti-4Al-5Mo-5V-6Cr-1Nb,是一种亚稳态 β 钛合金,有着优异的材料性能,经过时效处理后其室温下的抗拉强度可以达到 1350MPa ^[2],是制造飞机整体框、起落架、接头等重要结构件的理想材料。试验所用M28钛合金(经过时效

处理)工件的材料成分见表1。

1.2 刀具

切削试验使用了两种硬质合金大进给刀片,两种刀片均为三角形圆弧底刀外形结构,如图1所示,硬质合金牌号分别为ISO标准下的M35与P45。ISO标准的P类硬质合金为WC-TiC-Co硬质合金,M类硬质合金则在P类硬质合金成分的基础上添加了一定的TaC或NbC,从而提高了硬质合金的高温硬度与高温强度^[14]。但是由于硬质合金牌号的ISO分类标准基于切削得到的切屑形态进行划分,而且出于保护商业秘密等考量,ISO标准并未指定硬质合金的具体成分,因此也存在P类牌号硬质合金中含有TaC或NbC的情况,如P15、P25等^[14]。

1.3 试验参数

切削试验在Mikron UCP710五坐标加工中心上进行,采用顺铣方式切削,冷却方式为切削液外冷。试验中取刀具后刀面磨损带的最大宽度(VB)0.3mm作为判定磨损的标准,其中切削速度 v_c 为 45m/min ,每齿进给 f_z 为 0.8mm/z ,切深 a_p 为 0.5mm ,切宽 a_c 为 4mm 。

1.4 检测设备

切削力测量系统由Kistler 9625B型三向压电式测力仪与Kistler 5073A型电荷放大器以及配套的数据处理板卡与DynoWare测量软件组成,如图2所示。测力仪的测量性能见表2,试验的采样频率设定为 5000Hz 。 F_x 的方向与刀具进给方向平行, F_y 的方向与刀具切宽方向平行, F_z 的方向与主轴轴向平行。本文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。

观测刀片的后刀面磨损量使用了CXSP-2KCH型CCD显微相机及其配套测量软件,对后刀面磨损区的微观观测与成分分析则使用了Hitachi公司TM-3000

表1 M28钛合金工件的成分(质量分数)

Table 1 Components of M28 alloy (mass fraction) %

Al	Mo	V	Cr	Fe	Nb	Ti
3.73	4.98	4.09	5.82	0.29	1.08	余量

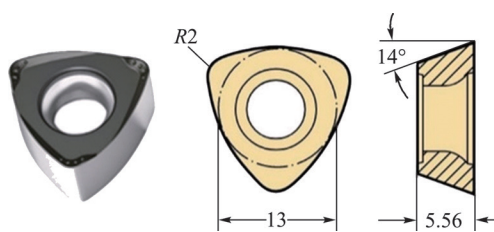


图1 大进给铣削刀片(mm)

Fig.1 High feed milling insert (mm)

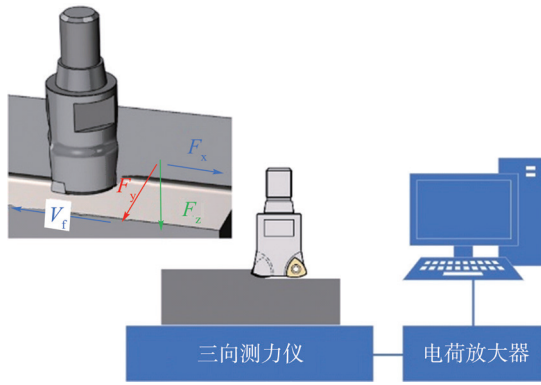


图2 切削力测量系统
Fig.2 Dynamometer system

表2 Kistler 9625B测力仪性能
Table 2 Performances of Kistler 9625B

测量方向	量程/kN	灵敏度PC/N	固有频率/kHz
X/Y	-15~15	8	1.5
Z	-20~30	3.7	2.5

型扫描电子显微镜以及配套的能谱仪。用电火花线切割方式取下部分加工后的工件并沿刀具进给方向剖开,抛磨后使用 HXS-1000A 显微硬度计对已加工表面的硬度进行测量。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

研究记录了 M35 与 P45 两种牌号的刀片在大进给铣削中的后刀面磨损,如图 3 所示。M35 与 P45 刀片在大进给铣削 M28 钛合金时的磨损发展都较为迅速。按照通用的刀具磨钝标准($VB=0.3\text{mm}$), M35 刀片在达到磨损标准前的切削行程约为 8m,而 P45 刀片达到磨损标准前的切削行程约为 11m。当后刀面磨损量超过 0.25mm 后, M35 刀片磨损量的增加速度相对先前有所加快,而 P45 材质刀片的后刀面磨损量超过 0.2mm 后,也出现了相同的现象。

M35 与 P45 两种刀片在大进给切削中的磨损对各个方向切削力的影响分别如图 4 和 5 所示。通常刀具磨损可以大致划分为初期磨损、均匀磨损与剧烈磨损 3 个阶段。而在大进给铣削 M28 钛合金时,初期磨损与均匀磨损这两个阶段在整个磨损曲线中相对都很短暂,无论是 M35 材质刀片还是 P45 材质刀片,都很快达到了 $VB=0.3\text{mm}$ 的磨钝标准。

大进给铣削 M28 钛合金时,刀片后刀面磨损量 VB 对进给方向切削力 F_x 的影响并不显著,在 M35 刀片的磨损曲线上,当 VB 值超过 0.6 时, F_x 出现了较为明显

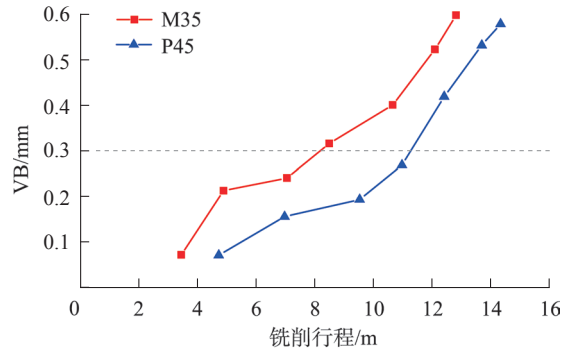


图3 后刀面磨损量随切削行程的发展
Fig.3 Development of flank wear with cutting length

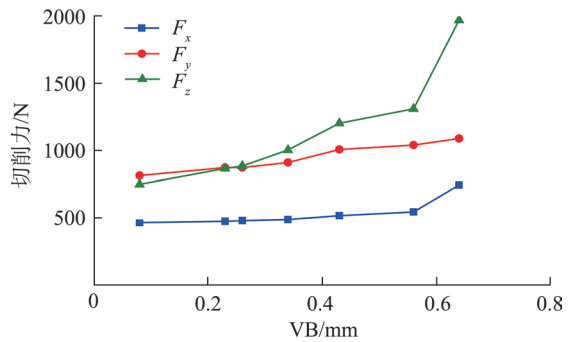


图4 M35刀片磨损对切削力的影响
Fig.4 Effect of tool wear M35 on cutting forces

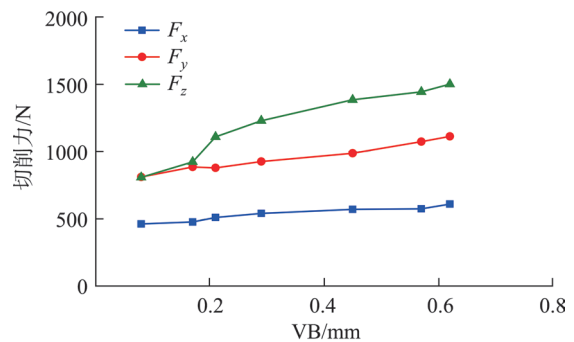


图5 P45刀片磨损对切削力的影响
Fig.5 Effect of P45 tool wear on cutting forces

的增大, P45 刀片的磨损曲线上也有类似的现象出现,但此时刀片已经进入了剧烈磨损阶段。而在 VB 值超过 0.6 之前,使用 M35 刀片铣削时 F_x 随后刀面磨损量的增长趋势平缓,而 P45 刀片的则相对更大一些。M35 刀片与 P45 刀片两者切宽方向的切削力 F_y 受到后刀面磨损的影响,呈现出近似线性的增长趋势, P45 刀片 F_y 随后刀面磨损的增长相对更平缓一些。后刀面磨损对大进给铣削的轴向切削力 F_z 的影响最为显著。使用 M35 刀片时, F_z 随后刀面磨损的增加迅速增长,直至进入剧烈磨损阶段,而使用 P45 刀片时,在 VB 值超过 0.2

直至达到 0.6 的过程中, F_z 的增长速度相比 M35 刀片缓慢, 即使是超过 0.6 后也没有发生剧烈增加的现象。

对已加工表面的硬度测量如图 6 所示, 由表层向内, 在约 25 μm 的深度上存在硬度的峰值 (446.7HV)。

2.2 磨损机理分析

图 7 展示了初期磨损、均匀磨损和剧烈磨损 3 个阶段中 P35 与 M45 刀片各自后刀面磨损的演变情况。观察两者前刀面和后刀面的磨损状态可以发现, 大进给刀片的圆弧底刃上并没有形成均匀的磨损带, 而是在刃口一处位置形成了明显的沟槽磨损缺口。初期形成较小的沟槽缺口, 在均匀磨损阶段逐步扩展为较大缺口, 此时缺口位置的刃口丧失了原有的结构, 最终在剧烈磨损阶段缺口不断向垂直刀刃方向、沿刀刃方以及刀片内部扩展。

沟槽磨损形成的缺口出现在刃口与切削层中最大切深处接触的位置, 如图 8 所示。这一现象可能是由于刀具高频冲击表层加工硬化层造成的。此外, 伴随铣削过程中刀具的剧烈冲击, 切削层边缘的最大切深位置处不断有细小毛刺毛边形成, 图 9 为工件的俯视图, 已加工表面与未加工表面间的分界处即是切削形成的毛刺毛边。这些细小的毛刺毛边以及切屑的锯齿状外缘在铣削中高频冲击局部刃口造成应力集中, 也可能是最终导致沟槽磨损的原因之一。

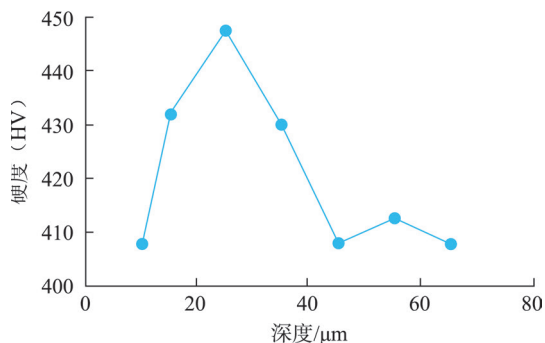


图6 已加工表面硬度
Fig.6 Hardness of finished layer

进入剧烈磨损阶段的 M35 刀片后刀面出现了大块的磨损区域, 磨损区域内可以非常明显地观察到片层状的剥落, 并伴有凹坑形貌, 如图 10 所示。在磨损区域中仍残存有部分的黏附物 (图 10 红圈位置), 放大后观察可在黏附物表面发现层叠纹理, 同时也有方向一致的划擦痕迹, 如图 11 (a) 所示。黏附物成分的能谱检测发现其中除了 M28 钛合金中含有的 Ti、V、Al 等元素外, 还含有 W 与 Co, 具体成分如表 3 所示。黏附物的表面划擦痕迹上有零星的硬质合金颗粒, 此外还可以观察到硬质合金基体上出现的裂纹, 如图 11 (b) 所示。

P45 刀片后刀面磨损区也存在类似的片层状剥落纹理, 如图 12 所示。P45 刀片后刀面的片层纹理在靠

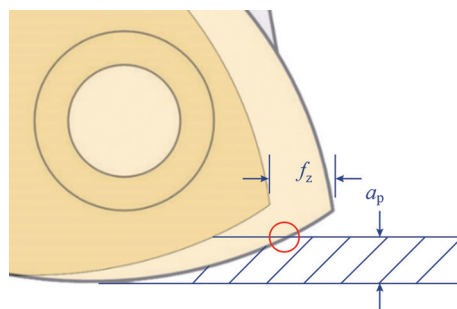


图8 沟槽磨损的位置
Fig.8 Notch wear position

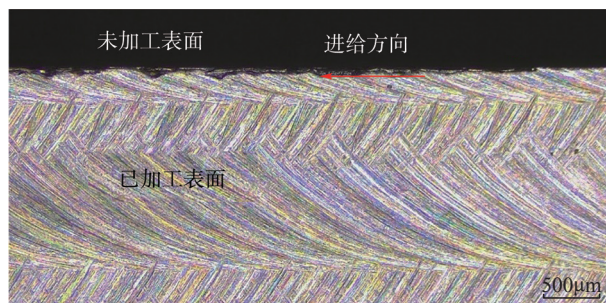


图9 工件毛边
Fig.9 Burrs on workpiece

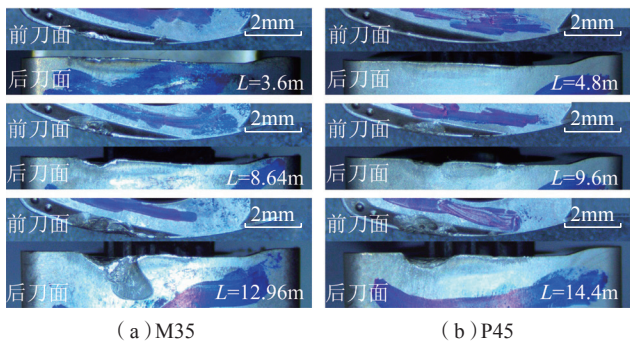


图7 后刀面磨损的发展
Fig.7 Development of flank wear

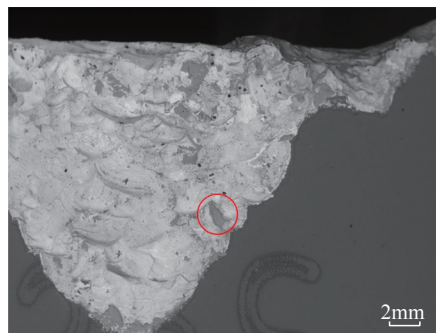


图10 M35刀片后刀面磨损
Fig.10 Flank wear of M35 tool

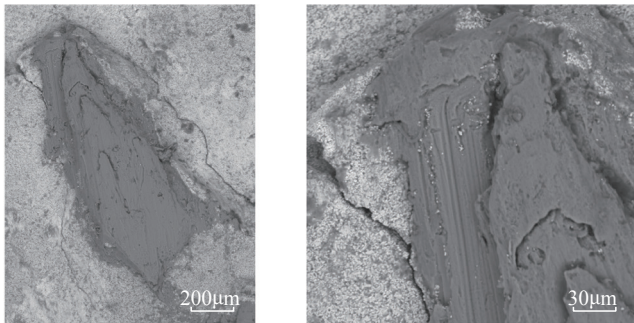
近刃口位置的分布相对密集一些，远离刃口方向的片层剥落纹理较少，后刀面上的剥落没有形成明显的凹坑形貌，在后刀面上有残留的黏附物。

放大观察 P45 刀片后刀面黏附物(图 12 红圈位置)，同样可以发现表面的层叠纹理以及方向一致的划痕，如其周边位置出现了一些呈规则多边形的微坑(图 13 中红圈)，以及裹挟在黏附物中半露的硬质合金颗粒(图 13 中蓝圈)。对黏附物成分的 EDS 能谱分析显示，黏附物中除了 M28 钛合金中含有的 Ti、Al、V、Cr 元素外，还含有一定的 C、W、Co 等元素，具体含量如表 4 所示。

在 P45 刀片后刀面黏附物附近也发现了裂纹，如图 14 所示。

堆叠层积的黏附物以及黏附物表面方向一致的划痕可能是其在后刀面上发生相对运动的痕迹。由于大进给刀片主偏角较小，使得切削力可以更多地沿轴向

分解，如图 15 所示，同时钛合金本身弹性模量小，已加工表面的回弹较为明显，两者共同作用下使得后刀面与已加工表面间发生了强烈的挤压与摩擦，并必然产生很高的切削热量，刃口发生的沟槽磨损也为部分切屑流向后刀面运动提供了通道，这就为 M28 与硬质合金间的黏附，甚至是可能的元素扩散创造了条件。黏附物周围出现的规则多边形微坑表明该位置原有的



(a) 划擦痕迹 (b) 裂纹

图11 M35刀片后刀面的黏附物

Fig.11 Adhesion material on flank face of M35 tool

表3 M35刀片后刀面黏附物成分(质量分数)

Table 3 Components of adhesion material on flank face of M35 tool (mass fraction) %

Ti	Al	V	Cr	W	Co
50.56	4.02	2.80	3.66	7.42	5.81

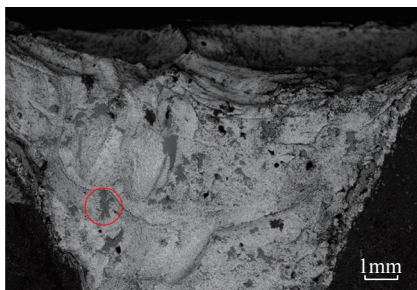


图12 P45刀片的磨损区域

Fig.12 Flank wear of P45 tool

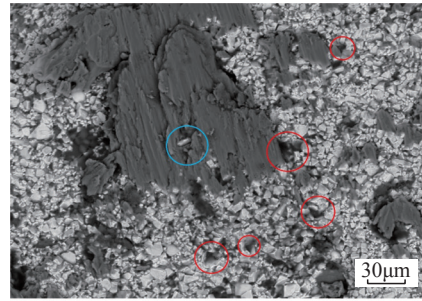


图13 P45刀片后刀面的黏附物

Fig.13 Adhesion material on flank face of P45 tool

表4 P45刀片黏附物成分(质量分数)

Table 4 Components of adhesion material on P45 tool (mass fraction) %

Ti	Al	V	Cr	W	Co	C	O
63.06	2.57	4.35	3.81	4.63	1.77	5.66	8.91

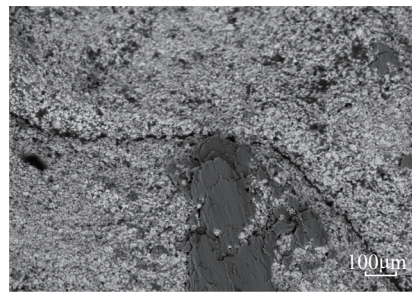


图14 P45刀片的裂纹

Fig.14 Crack of P45 tool



图15 大进给铣削的切削力分布

Fig.15 Cutting forces distribution in high feed milling

WC 晶粒已经流失。伴随着刀片每次切入与切出, 刀具与加工表面在高压下的相对运动带动黏附于后刀面的钛合金沿垂直刃口的方向(即平行于切削速度的方向)运动, 后刀面局部硬质合金与黏附于其上的钛合金这一共同体内随之发生剪切。硬质合金刀具的裂纹是切削过程中机械冲击与热冲击综合作用的产物。后刀面上黏附物的相对运动可能也加剧了裂纹的萌生与扩展。由于 M28 属于 β 型钛合金, 其含有的大量 β 相组织能提高钛合金材料的剪切强度^[7], 因而剪切破坏更容易发生在黏附物靠近硬质合金的一侧内, 如图 16 所示, 在刀具与已加工表面间的相对运动中, 已加工表面的回弹以及轴向切削力挤压导致的摩擦使刀具后刀面以及黏附于其上的钛合金材料受到剪切作用, 由于 M28 钛合金较高的剪切强度, 已经受到频繁冲击的硬质合金刀具基体更容易出现裂纹。当硬质合金中的硬质相颗粒受到的拉力超过其与黏结相结合力时, 硬质相颗粒将被黏附物拔出, 形成一个微坑。黏附物裹挟着的一些 WC 颗粒(图 11 和图 13)也从侧面说明了这一过程。硬质合金刀片在不断的“黏附—剪切—剥落”过程中, 最终形成了片层状的后刀面形貌。

在切削区的高温高压下, 由于 Ti 元素活泼的化学特性, 硬质合金含有的 TiC 易与工件钛合金亲和, 促进了后刀面黏附的形成^[15]。黏附的钛合金会吸引硬质合金中元素向“刀—屑”界面迁移扩散^[16-17]。硬质合金主要成分中含有的 W、Co、C 元素在“刀—屑”界面间具备了浓度梯度, 满足了高温高压下元素扩散迁移的条件。以钛合金成分为主的黏附物中出现了一定量的 W、Co、C 元素, 说明上述元素从“刀—屑”界面硬质合金一侧扩散进入了钛合金黏附物中。Co 元素在硬质合金中起黏结作用, Co 的流失会削弱硬质合金中 WC 颗粒受

到的把持, 使得 WC 颗粒更易被拔出^[18]。W 元素与 C 元素向黏附物中扩散则可能是硬质合金中硬质相的分解导致的^[15], 这同样将降低硬质合金的抗磨性能。

M35 刀片后刀面的片层状剥落较之于 P45 刀片的后刀面层状剥落尺寸更大, 形成的凹坑也更深。这一现象可能与两种刀片硬质合金的材质有关。硬质合金中硬质相的晶粒大小与黏结相 (Co) 含量对其磨损表现有着明显的影响。观察 M35 与 P45 硬质合金的微观结构, 如图 17 所示, 可以发现虽然两者的微观结构中都有粗细混合晶粒, 但 P45 的晶粒尺寸明显更大。在切削区的高压高温与高频冲击的作用下, 由于黏结相与硬质相两者的热膨胀系数差异, 较软的 Co 层产生了极大的应变^[19], 很容易产生裂纹, 随着起黏结作用的 Co 层在热应力与机械磨损的综合作用下迅速消耗, 逐渐失去把持的 WC 颗粒将不可避免地脱落。裂纹在细晶中的扩展速度通常大于其在粗晶中的扩展速度^[20]。更大的 WC 晶粒度有助于硬质合金中 WC 结晶完整, 亚晶粒增大, 缺陷减少, 粒度均匀, 减少了 WC/WC 界面、WC/Co 界面和 WC 颗粒的聚集区, 从而改善合金韧性^[21]。此外, 较粗大的硬质相颗粒与 Co 层之间有着更大的接触面积, 因而受到 Co 层的把持也更为牢固^[22-23]。粗大晶粒间的黏结层也更厚, 有助于吸收冲击能量, 增强硬质合金的韧性与耐磨性^[14, 22-23]。

3 结论

(1) M28 钛合金是一种难加工材料。应用大进给切削技术时, 硬质合金刀片的磨损发展迅速, 主要形式是发生在刀刃与切削层最大切深处接触的位置上的沟槽磨损与后刀面上的片层剥落, 在加工表面下约 25 μm 的深度发现了硬化层。大进给铣削方式产生的高轴向切削力与被加工表面回弹等因素综合作用导致了后刀面的剧烈摩擦磨损。

(2) 在后刀面磨损区内出现了片层剥落的形貌, 这是铣削的机械载荷冲击以及钛合金—硬质合金间黏

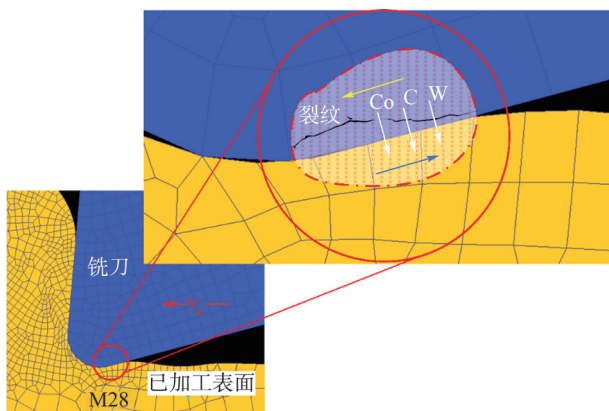
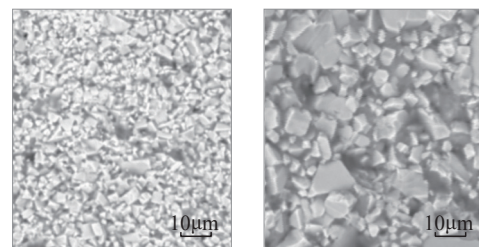


图16 后刀面层状剥落示意图
Fig.16 Peeling on flank face



(a) M35 (b) P45
图17 M35与P45硬质合金的微观结构
Fig.17 Micro structure of M35 and P45 carbide

结与扩散反应综合作用的产物。后刀面出现的裂纹可能由钛合金黏附物与后刀面相对运动时发生在靠近硬质合金基体一侧的剪切破坏所造成。黏附物成分中除了M28钛合金含有的元素外,还渗入了一定的W、Co、C元素,Co的流失可能加剧了硬质合金中WC颗粒被黏附物拔出。

(3) M35硬质合金刀片后刀面磨损量的发展更为迅速,磨损区内的片层剥落状况更严重,而有着较大硬质合金粒度的P45刀片对这两点均有所改善。

参考文献

[1] 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): 1175-83.

[2] 陈玮,刘运玺,李志强. 高强 β 钛合金的研究现状与发展趋势[J]. *航空材料学报*, 2020, 40(3): 63-76.

CHEN Wei, LIU Yunxi, LI Zhiqiang. Research status and development trend of high-strength β titanium alloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(3): 63-76.

[3] PETERS C L M. Titanium and titanium alloys[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

[4] 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.

LI Liang. Study on the mechanism and process of high speed milling of titanium alloys[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.

[5] ZLATIN N, FIELD M. Procedures and precautions in machining titanium alloys[M]. Boston: Springer US, 1973.

[6] 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.

[7] EZUGWU E O. High speed machining of aero-engine alloys[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2004, 26: 1-11.

[8] RAHMAN R A, SUN S, WANG G, et al. An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 63: 58-69.

[9] 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.

JIANG Like, CHEN Wenqing, CHEN Zhitong, et al. Research and application of measurement technology about milling tool of TB6 titanium alloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(19): 26-29, 51.

[10] MACHAI C, BIERMANN D. Machining of a hollow shaft made of β -titanium Ti-10V-2Fe-3Al[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). Tampere, 2011.

[11] 李亮. 钛合金的高速粗加工——大进给铣削技术[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(12): 32-35.

LI Liang. High speed rough machining: High feed milling of titanium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(12): 32-35.

[12] 史琦. TC21钛合金高性能铣削工艺基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI Qi. Research on high performance milling of titanium alloy TC21[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[13] 陈清良,何宁,李亮,等. 钛合金大进给铣削数控加工程序优化及应用[J]. *机械制造与自动化*, 2014, 43(1): 47-51.

CHEN Qingliang, HE Ning, LI Liang, et al. NC program optimization and application in high feed milling titanium alloys[J]. *Machine Building & Automation*, 2014, 43(1): 47-51.

[14] 羊建高,谭敦强,陈颖. 硬质合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.

YANG Jiagao, TAN Dunqiang, CHEN Hao. Cemented carbide [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.

[15] 李法庆,邵芳. 基于热力学的硬质合金刀具加工钛合金的研究[J]. *工具技术*, 2008(9): 33-35.

LI Faqing, SHAO Fang. Machining titanium alloys with carbide tools based on thermodynamics [J]. *Tool Engineering*, 2008(9): 33-35.

[16] BAI D, SUN J, CHEN W, et al. Wear mechanisms of WC/Co tools when machining high-strength titanium alloy TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al)[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9): 2863-2874.

[17] JIANXIN D, YOUSHEG L, WENLONG S. Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools[J]. *Wear*, 2008, 265(11): 1776-1783.

[18] ZHANG S, LI J F, DENG J X, et al. Investigation on diffusion wear during high-speed machining Ti-6Al-4V alloy with straight tungsten carbide tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 44(1): 17-25.

[19] KRAKHMALOV P V, SUKUMARAN J, GÅÅRD A. Effect of microstructure on edge wear mechanisms in WC-Co[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, 25(2): 171-178.

[20] 张忠健,赵声志,彭文,等. 硬质合金疲劳裂纹的萌生与扩展行为[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(12): 3031-3041.

ZHANG Zhongjian, ZHAO Shengzhi, PENG Wen, et al. Behavior of fatigue crack initiation and propagation of cemented carbides[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(12): 3031-3041.

[21] REN X, MIAO H, PENG Z. A review of cemented carbides for rock drilling: An old but still tough challenge in geo-engineering[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 39: 61-77.

[22] JAWAID A, SHARIF S, KOKSAL S. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 99(1): 266-274.

[23] LUYCKX S, SACKS N, LOVE A. Increasing the abrasion resistance without decreasing the toughness of WC-Co of a wide range of compositions and grain sizes[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, 25(1): 57-61.

通讯作者: 李亮,教授,博士,主要研究方向为机械制造及自动化。

(责编 古系)