

# 大进给铣削 TC21 钛合金的刀具磨损试验研究<sup>\*</sup>

## Experimental Study on Tool Wear in High Feed Milling of Titanium Alloy TC21

南京航空航天大学机电学院 史琦 李亮 何宁 赵威

**[摘要]** 对大进给铣削 TC21 钛合金时的刀具磨损形态进行了宏观和微观分析:由宏观来看,大进给铣刀的前、后刀面磨损不均匀,其磨损严重区域在最大切深附近;由微观来看,大进给铣刀的前、后刀面都有大量的钛合金粘附物、间距不等的热裂纹和刀具材料的剥落出现。

**关键词:** 钛合金 大进给 铣削 刀具磨损

**[ABSTRACT]** Tool wears are studied with macro-analysis and micro-analysis method in high feed milling of titanium alloy TC21. From the macro-analysis, it can be seen that tool wears in rake face and flank face are not uniform and the serious worn area is near the maximum cutting depth. From the micro-analysis, much attached titanium alloy, cracks with different distance between adjacent ones and breakage are found in both faces.

**Keywords:** Titanium alloy High feed Milling Tool wear

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.051

钛合金因其优越的综合使用性能而被广泛地应用到各个领域<sup>[1]</sup>。TC21 是我国自主研发的一种高强度钛合金,具有很好的高温性能(高温静强度、持久性能),同时还具有结构钛合金很好的服役性能,如疲劳强度、腐蚀环境疲劳、腐蚀环境裂纹扩展、应力和温度负载疲劳及裂纹扩展等性能达到了设计使用要求。因此,TC21 钛合金适用于制造飞机的中后机身、机翼、发动机附近、起落架等对强度及耐久性要求高的重要或关键承力部件,其典型应用有承力框梁、发动机框架、水平安定面旋转体等重要部件<sup>[2-3]</sup>。

目前,对于钛合金零件的生产主要是通过切削加工方式实现的,而切削加工中最为活跃的因素莫过于刀具。大进给铣削作为近年来兴起的一种高效去除材料的加工方式越来越受关注,而在大进给铣削中刀具磨损严重,导致刀具的使用寿命短,制约了大进给铣削在生产中的应用。目前对大进给铣削的研究较少,对于在大进给铣削中的刀具磨损形态及磨损机理的研究就更少

见。鉴于此,本文着重研究大进给铣削 TC21 时的刀具磨损形态及磨损机理,进而为在大进给铣削 TC21 钛合金及其他钛合金时延长刀具的使用寿命提供指导作用。

## 1 试验条件及方案

### 1.1 试验条件

(1) 工件材料: TC21 是一种高强度的  $\alpha+\beta$  型两相钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-3Mo-2Nb-2Sn-2Zr-1Cr (具体化学成分组成见表 1)。TC21 钛合金具有高强度、高韧性、高损伤容限性能、优良的疲劳性能(优于 TC4、TA15 等中强度钛合金)和焊接性能(电子束焊接接头综合性能达到与母材相当的水平)等综合性能,是目前我国高强韧钛合金综合力学性能匹配优异的钛合金材料。TC21 钛合金与美国第四代战斗机 F/A-22 上应用的 Ti-6-22-22s 同属高强损伤容限型钛合金,但 TC21 钛合金在化学成分和工艺控制上均有自己的特色,主要体现在具有非常优异的综合力学性能和简单可行的工艺性能。

表1 TC21化学成分 %

元素	Al	Si	Zr	Nb	Mo	Sn	Cr	Ti
质量分数	6.78	0.09	2.19	2.31	2.87	2.32	0.77	其余

(2) 刀具: TC21 的强度、硬度高,导热系数低,导致切削加工时力和温度都很高,所以使用的刀具材料必须具有较高的热硬性和高温强度;加之铣削加工是断续切削,刀具承受着周期性的冲击载荷而极易破损,因此要求刀具具有较高的冲击韧性。目前,硬质合金刀具在钛合金的切削加工中使用广泛,据此本试验选用德国 Walter 公司提供的 Tiger·Tec Silver 系列高性能硬质合金涂层刀片 WKP35S,刀片型号为 P23696-1.0,其刀具前角为  $16^\circ$ ,刀具主偏角为  $0\sim 15^\circ$ ,刀具直径为 25mm,轴向最大切深为 1mm,每齿进给量最高可达 3.5mm。

(3) 机床: Mikron UCP 710 五坐标高速加工中心。

(4) 刀具磨损测量工具: JSM-5610LV 型扫描电镜。

### 1.2 试验方案

采用顺铣方式进行单齿大进给铣削,试验中使用乳化液进行冷却,并固定铣削用量如下:  $v=100\text{m/min}$ ,  $f_z=1.00\text{mm/Z}$ ,  $a_e=12.5\text{mm}$ ,  $a_p=0.7\text{mm}$ 。

<sup>\*</sup> 国家重大专项课题(2012ZX04003021)。

通过大进给铣削 TC21 钛合金试验观察刀具磨损状态,预先设定刀具后刀面的磨钝标准为  $V_B=0.6\text{mm}$ ,此时停止大进给铣削试验,进而采用扫描电镜观察试验中刀片的磨损图片并进行分析。通常试验后的刀片上粘附有钛合金材料而无法清晰地看到刀具的实际磨损情况,因此需要将粘附的钛合金材料腐蚀掉再观察。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 刀具磨损的宏观分析

刀具后刀面磨损是铣削时最常发生的磨损状态,所以通常以后刀面磨损量来判定刀具是否磨钝而失效。图1为大进给铣削 TC21 时铣削长度对刀具磨损的影响。可见,随着铣削长度的增加,刀具后刀面磨损量总体上呈增长趋势。当铣削长度小于 600mm 时(即初期磨损阶段),后刀面磨损量迅速增加;随着铣削长度的进一步增长(即正常磨损阶段),后刀面磨损量的增加相对平缓;当铣削长度超过 3000mm 后,刀具开始急剧磨损,很快达到预先设定的磨钝标准。此时观察刀具的宏观磨损形态发现,刀具后刀面的磨损并不均匀,与图 2 所示的大进给铣削示意图对比可以看出,后刀面磨损最严重处在最大切深  $a_{pmax}$  附近;同理,前刀面磨损与后刀面磨损相对应,也发生在最大切深附近,可见此处为刀具的薄

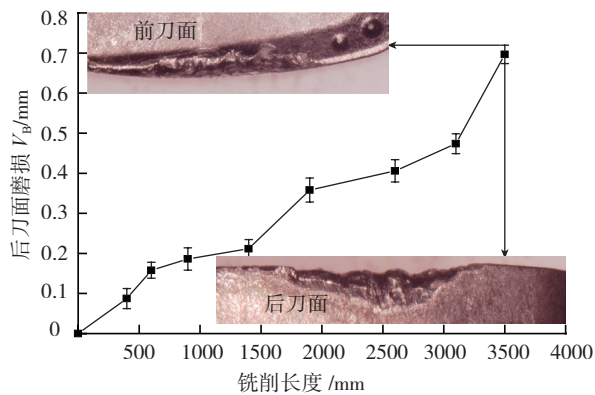


图1 铣削长度对刀具磨损的影响  
Fig.1 Effect of cutting length on tool wear

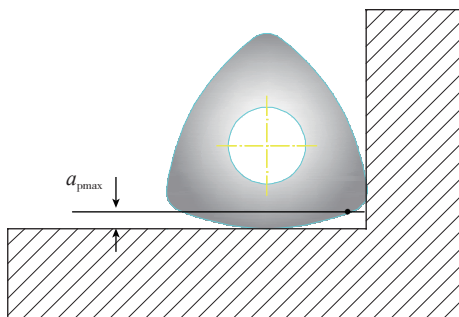


图2 大进给铣削示意图  
Fig.2 Diagram of high feed milling

弱部位,最易发生磨损而导致刀具失效。

### 2.2 刀具磨损的微观分析

为了能够清楚地展现刀具磨损的形式,研究刀具磨损的微观形貌是一种行之有效的手段,并且刀具磨损的微观相貌可以预示将来可能会发生的磨损形态。本试验采用扫描电镜分别在两种不同的状态下采集刀具的微观形貌,一种是采集刀具微观形貌的原始状态;一种是通过腐蚀液去掉粘附在刀具上的钛合金材料后采集刀具的微观形貌。

图3为大进给铣削 TC21 时刀具微观形貌的原始状态。由图可见,大进给铣削钛合金时,前刀面上有不规则的钛合金粘附物和较大的层片块状崩落,后刀面被呈层叠状的钛合金覆盖。钛合金粘附物的存在以及这种粘附的无限量增加,必然会产生粘附物被带走时而导致刀具发生粘结撕裂磨损<sup>[4]</sup>现象。

图4为腐蚀掉粘附的钛合金后大进给铣削 TC21 时

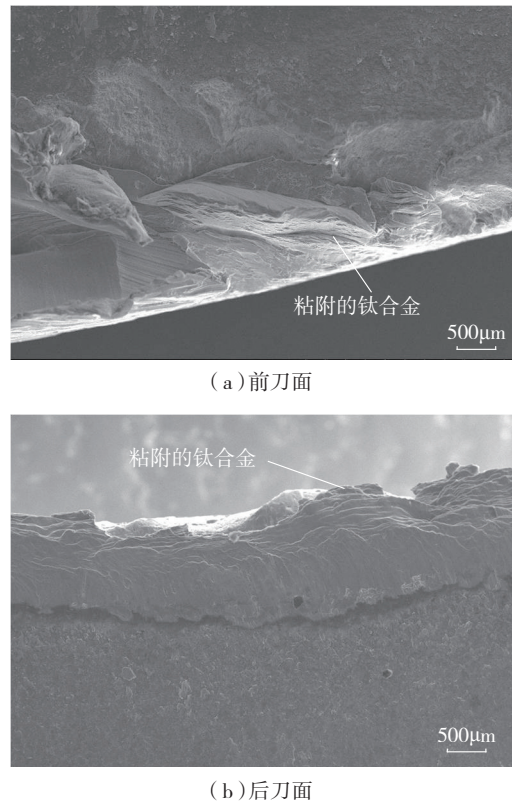
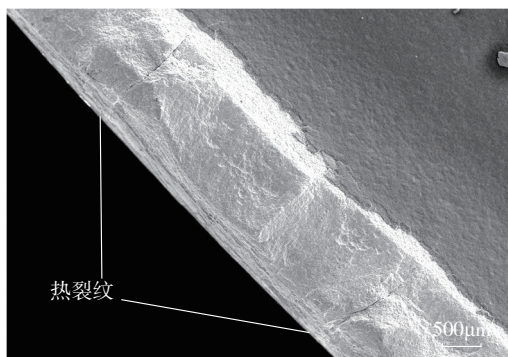


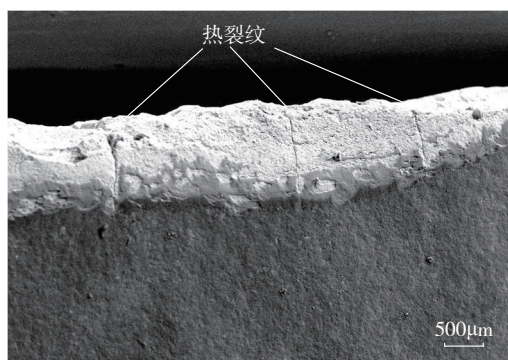
图3 刀具微观相貌的原始状态

Fig.3 Micro morphology of cutting tool at original state

的刀具微观磨损形貌图。由图可见,前刀面磨损区表面凹凸不平,这是由不平整的层片块状剥落形成的;且前刀面上有垂直于切削刃并相互平行的裂纹,通常刀具上的这种裂纹被认为是在机械应力和热应力的相互冲击作用以及刀具表面的塑性变形作用而产生的,并称为热裂纹<sup>[5-6]</sup>。后刀面的磨损区较为平整,没有明显的摩擦



(a) 前刀面



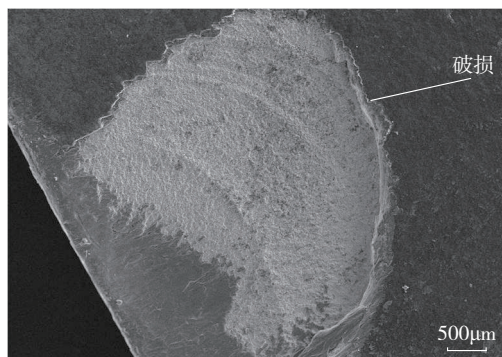
(b) 后刀面

图4 腐蚀掉钛合金后的刀具微观形貌

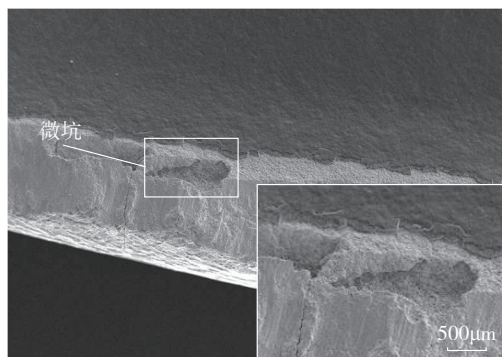
Fig.4 Micromorphology of cutting tool after eating off attached titanium alloy

刮痕,但可见垂直于切削刃的热裂纹。与侧铣刀具产生的热裂纹相同的是,此处的热裂纹也是由后刀面经过刃口延伸至前刀面,且在热裂纹上有很多不规则的小坑,这些小坑是由钛合金粘附物撕裂硬质合金颗粒而形成的,这些小坑的形成会进一步扩宽裂纹,从而降低刀具的强度,最终导致切削刃的碎裂或断裂而引起大块剥落,使刀具失效;与侧铣刀具产生的热裂纹不同的是,此处热裂纹不是均匀排布的,其间距大小不一致,且热裂纹的间距在越靠近最大切深处越小,其最大的裂纹间距可达 $750\mu\text{m}$ ,最小的裂纹间距则为 $250\mu\text{m}$ ,然而即使是最小的裂纹间距也要比侧铣的裂纹间距 $100\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>大很多。

刀具的失效除了由于逐渐磨损至失效外,还有突发的、随机的破损而导致的失效。图5为大进给铣削TC21时的刀具破损形貌图,其中图5(a)所示为贝壳状的片状剥落。产生这种片状剥落的主要原因是由于铣削是断续切削,刀/屑接触区有比较严重的热应力疲劳,在这种热应力疲劳和切屑的冲击下,刀具表面容易产生平行于切削刃的裂纹,并不断扩展。当裂纹扩展到一定程度就会使刀具表层发生脱落,并引起大面积的片状剥落,如此反复就导致刀具失效。除此之外,还会出现一些如图5(b)所示的微坑,这是由于粘附在刀具上的钛合金移动时造成的。当刀具材料的受拉力大于硬



(a) 贝壳状的片状剥落



(b) 微坑

图5 刀具破损形态

Fig.5 Breakage morphology of cutting tool

质合金颗粒间的结合力时,切屑流动会带走粘附的钛合金,并连同撕裂一些刀具材料而形成这些微坑,如此反复进行下去,微坑就会变成大坑,最后大块刀具材料的损耗致使刀具失效。

### 3 结论

通过研究大进给铣削TC21钛合金时的刀具磨损形态,可以得到如下结论:(1)大进给铣刀的磨损形态主要表现在前刀面磨损、后刀面磨损和破损。前、后刀面上的磨损并不均匀,磨损最严重的区域在最大切深附近,也即为刀具的最薄弱部位。(2)在进行平面大进给铣削TC21钛合金时,大进给铣刀前、后刀面上粘附的钛合金会使刀具产生粘结,撕裂磨损;前、后面上热裂纹的扩展会导致刀具急剧磨损,越靠近最大切深处裂纹越密集,刀具磨损也越严重。另外,前刀面片状剥落和微坑会使刀具大量消耗而破损失效。

### 参考文献

[1] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 68: 262-274.

[2] Fei Y H, Zhou L, Qu H L, et al. The phase and microstructure of  
(下转第57页)

径长度:

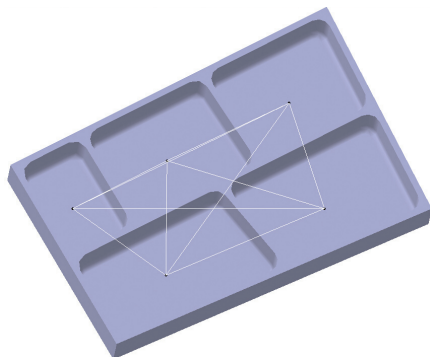
$$S_7': a_{12}, a_{15}, a_{34}, a_{23}, d_7' = 225.562;$$

$$S_9': a_{12}, a_{15}, a_{34}, a_{24}, d_9' = 238.172;$$

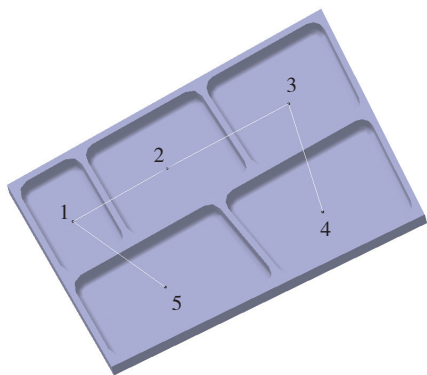
$$S_{55}': a_{12}, a_{34}, a_{25}, a_{45}, d_{55}' = 246.76;$$

$$S_{58}': a_{12}, a_{34}, a_{25}, a_{35}, d_{58}' = 269.741。$$

比较路径的长度可以得到,最短回路为  $S_7'$ ,最短切削路径为  $BP_5-BP_1-BP_2-BP_3-BP_4$ ,如图 4(b)所示。



(a) 所有路径



(b) 最短路径

图4 腹板元特征排序

Fig.4 Bottom meta-feature sequencing

## 6 总结

针对现有加工特征定义导致的加工特征排序存在刀具非切削行程过长的的问题,本文提出元特征定义和基于最小耗费分支定界算法的元特征排序方法。该方法具有以下优点:

(1) 元特征与加工操作一一对应,避免了继承原加工特征排序导致的刀具非切削行程。

(2) 针对飞机结构件的加工特点,指定了异类元特征排序遵循的特殊规则。

(3) 基于最小耗费分支定界算法对元特征排序实现刀具非切削行程最短,且排序效率高。

## 参考文献

[1] Li Y G, Ding Y F, Mou W P, et al. Feature recognition technology

for aircraft structural parts based on a holistic attribute adjacency graph. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(2): 271-278.

[2] Industrial automatic systems and integration--Product data representation and exchange--Application protocol : Mechanical product definition for process planning using machining features. International Standard. ISO10303-224, 2000(E).

[3] Gao S M, Shah J J. Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph. Computer Aided Design, 1998, 30(9): 727-739.

[4] Tseng Y J, Joshi S B. Recognition of interacting rotational and prismatic machining features from 3-D mill-turn parts. International Journal of Production Research, 1998, 36(11): 3147-3165.

[5] Yan X, Yamazaki K, Liu J. Recognition of machining features and feature topologies from NC programs. Computer Aided Design, 2000, 32(10): 605-616.

[6] Waiyagan K, Bohez E L J. Intelligent feature based process planning for five-axis mill-turn parts. Computers in Industry, 2009, 60(5): 296-316.

[7] Britton G, Thimm G, Beng T S. A graph representation scheme for process planning machined parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(6): 429-438.

[8] Wong T N, Chan L C F, Lau H C W. Machining process sequencing With fuzzy expert system and genetic algorithms. Engineering With Computer, 2003, 19(2/3): 191-202.

[9] Krishna A G, Rao K M. Optimisation of operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(1/2): 159-164.

[10] Deja M, Siemiatkowski M S. Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture. Journal of Intelligent Manufacturing, Accepted: 20 February 2012.

[11] 梁吉元, 郁鼎文, 张玉峰, 等. CAM 系统中孔加工路径的优化处理. 计算机集成制造系统, 2000, 6(1): 74-76.

[12] 袁青, 李迎光, 王伟. 基于遗传算法的飞机结构件加工特征排序. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 86-91.

[13] 胡银厚. 求解 TSP 算法的研究与改进 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.

(责编 谷雨)

(上接第 53 页)

TC21 alloy. Materials Science and Engineering, 2008A, 494(1/2): 166-172.

[3] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用. 北京: 国防工业出版社, 2012: 157-178.

[4] 刘战强, 艾兴. 高速切削刀具磨损表面形态研究. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 468-471.

[5] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys. Wear, 2005, 258(5/6): 752-758.

[6] Su Y, He N, Li L, et al. An experimental investigation of effects of cooling / lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V. Wear, 2006, 261(7/8), 760-766.

[7] 徐九华, 耿国盛. 硬质合金刀具高速铣削钛合金技术. 航空制造技术, 2010(11): 38-40.

(责编 谷雨)