

新型TC21钛合金高速铣削加工中的刀具磨损研究

Research on Tool Wear Used in High-Speed Milling New TC21 Titanium Alloy

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 周成 李海滨
中国航天科技集团公司六院7103厂 周长军

TC21 钛合金铣削比车削加工困难,铣削时切削刃区域容易与钛发生粘结,刀齿易崩刃,刀具耐用度低。通过铣削刀具磨损试验以及扫描电镜(SEM)观察手段,来研究高速铣削 TC21 合金时刀具磨损的形式和形成机理,获得高效加工参数。

钛合金是航空航天工业中典型难加工材料,因其导热系数小,化学活性高,摩擦系数大,导致加工时,刀具磨损严重,严重影响了钛合金的加工效率和加工质量^[1]。因此,研究刀具的磨损机理,防止刀具过早、过多磨损,以便延长刀具的使用寿命显得非常重要。

TC21 钛合金是我国具有自主知识产权的第一个高强高韧损伤容限型钛合金^[2],目前,国内同行仅对材料的物理、化学和力学性能进行了初步研究,在机械加工领域尤其是高速铣削^[3]的研究还是一片空白。在实际加工中没有成熟的理论根据,只能不断摸索,总结优化。

TC21 钛合金铣削比车削加工困难,铣削时切削刃区域容易与钛发生粘结,刀齿易崩刃,刀具耐用度低^[4]。通过铣削刀具磨损试验以及扫描电镜(SEM)观察手段^[5],来研究高速铣削 TC21 合金时刀具磨损的形式和形

成机理,获得高效加工参数。

刀具磨损试验

1 试验条件

试验材料选用尺寸为 140mm × 140mm × 140mm 的 TC21 钛合金,主要成分为 Ti6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb。试验在三坐标数控加工中心 TK5680 上进行;使用的是美国 SGS 公司生产的带 TiAlN 涂层的整体硬质合金刀具(硬质合金 K30,刀具直径为 20mm,齿数为 4),如图 1 所示。

采用刀具磨损量体式显微镜测量系统,显微镜型号为 Leica DMLM/11888605。采用扫描电子显微镜(SEM)JSM-6360LV 对 TC21 钛合金不同加工方式下的刀具刀尖磨损微观形貌进行观察和分析,并利用 SEM 自带的能谱仪 EDS 对磨损产物进行成分的定性分析。

2 试验方案

在评定刀具切削性能和研究试



图1 数控铣削加工刀具

验时,都以刀具表面的磨损量作为刀具的磨钝标准^[6-7]。根据国际标准 ISO 规定,以 1/2 切削深度处后刀面上测量的磨损带宽度作为刀具磨钝标准。

由于铣削加工刀具为 4 齿的整体硬质合金刀具,在铣削过程中,刀具 4 个齿均参与切削加工,磨损发生在 4 个齿上,为简化研究过程,在考

察刀具磨损情况时,以磨损最为严重的齿的平均磨损量 V_B 为考察对象。

针对钛合金切削加工的刀具磨损试验成本高昂、耗时巨大等缺点,为能用较少的试验次数取得较正确的试验结果,本文采用正交试验设计方法四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 形式来安排试验,如表 1 所示。然后分别进行直观极差分析法、方差分析法研究切削加工刀具磨损试验结果。

表1 试验因素水平表

因素	切削速度 $v / (m \cdot min^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (mm \cdot z^{-1})$	切削深度 a_p / mm	切削宽度 a_e / mm
水平 1	20	0.05	10	0.5
水平 2	60	0.10	20	1.0
水平 3	100	0.15	30	1.5

试验结果分析

1 试验结果

铣削 TC21 钛合金材料,测得刀具磨损的正交试验结果以及对结果进行极差分析,如表 2 所示。分析结果可以看出各影响因素的极差关系为: $R_A > R_B = R_C > R_D$, 由此可以得到影响刀具后刀面磨损量各因素的主次

顺序为: 线速度 $A >$ 每齿进给量 $B =$ 切削宽度 $C >$ 切削深度 D 。

对正交试验刀具磨损量进行极差分析,各影响因素对刀具后刀面磨损量的影响趋势直观图(图 2)。从图中可以看出因素 A 对铣削加工时的刀具磨损影响最大,当铣削加工时线速度较低或较高均会造成刀具磨损严重;随着每齿进给量的增加,刀具磨损量单调递增;切削宽度变化

时刀具磨损量存在最大值,切削深度变化时刀具磨损量存在最小值。

从图 2 可以直观分析得到获得刀具后刀面磨损量较小的优化铣削加工参数组合方案: $A_2 B_1 C_3 D_2$, 即切削线速度为 $60m/min^{-1}$ 、每齿进给量为 $0.05mm/z$ 、切削宽度为 $1.5mm$, 切削深度为 $20mm$ 。

方差分析及 F 值显著性检验结

表2 铣削TC21刀具磨损量的极差分析表

试验编号	切削速度 $v / (m \cdot min^{-1})$	每齿进给量 $f_z / (mm \cdot z^{-1})$	切削深度 a_p / mm	切削宽度 a_e / mm	刀具磨损量 V_B / mm
X-1	20	0.05	0.5	10	0.25
X-2	20	0.10	1.0	20	0.30
X-3	20	0.15	1.5	30	0.27
X-4	60	0.05	1.0	30	0.16
X-5	60	0.10	1.5	10	0.13
X-6	60	0.15	0.5	20	0.20
X-7	100	0.05	1.5	20	0.35
X-8	100	0.10	0.5	30	0.45
X-9	100	0.15	1.0	10	0.60
k_1	0.27	0.2533	0.3000	0.33	
k_2	0.16	0.2933	0.3533	0.28	
k_3	0.47	0.3567	0.2500	0.29	
极差 R	0.30	0.1033	0.1033	0.04	
顺序	$A > B = C > D$				
优水平	A_2	B_1	C_3	D_2	
优组合	$A_2 B_1 C_3 D_2$				

果如表 3 所示。

正常本次试验无空列,因 D 列偏差平方和较小,故以 D 列作为误差列。方差分析及显著性检验分析表明,对于给定显著水平 $\alpha=0.01$ 或 0.05 ,只有因素 A 对刀具磨损程度的影响是最为显著的,其他因素对铣削加工中刀具磨损的影响不显著。

为分析铣削 TC21 的 9 种情况刀具磨损量随切削量的磨损行为,在最终切削相同的金属切除量的条件下,分别采集 5 个时间点做出刀具磨损量随切削量变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,当切削线速度为 $100m/min$ 时,3 种切削条件的刀具磨损都较其他情况严重,而线速度为 $60m/min$ 时 3 种切削条件与 $20m/min$ 磨损行为曲线规律近似,但磨损量降低。为实现高效加工工厂的实际切削速度有望从 $20m/min$ 提高到 $60m/min$ 。

2 刀具磨损形态及行为的研究

2.1 宏观分析

高速铣削航空钛合金时刀具受到更大的冲击,同时切削温度高导致切削过程有着强烈的化学作用,刀具

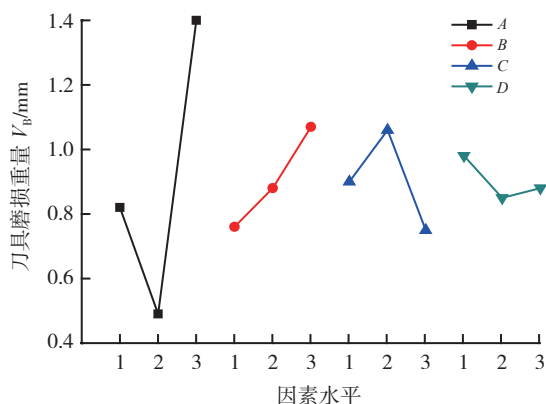
图2 各铣削参数对铣削TC21刀具后刀面磨损量 V_B 的影响趋势图

表3 方差分析及显著性检验表

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F值	F_{α}	显著水平
A	0.1415	2	0.0707	45.8058	$F_{0.05}(2,2)=19.00$	*
B	0.0163	2	0.0081	5.2734	$F_{0.01}(2,2)=99.01$	
C	0.0160	2	0.0080	5.1871		
D 误差 e	0.0031	2	0.0015			
总和	0.1769	8				

的崩刃破损现象会出现更多,特别是粗加工,崩刃现象尤为严重。刀具在正交设计试验铣削钛合金 TC21 时,刀具后刀面磨损的宏观形态,如图 4 所示($\times 100$ 倍)。

从图 4 可以看出, TC21-X-3、TC21-X-4、TC21-X-5、TC21-X-6 这 4 组刀具的刀刃没有破损,只是涂层的磨损。其他组的刀具刀刃均有不同程度的崩刃现象。如果单从切削速度来考虑问题的话,在不同的铣削速度下,刀具后刀面磨损形态也是不同。在 20m/min 时,刀具后刀面磨

损沿切削深度方向的分布,在靠近最大切深处的沟槽磨损比较严重,此处磨损带宽度的进展也较快。切削速度升高到 60m/min,刀具磨损的现象明显降低,并且刀具后刀面磨损带主要发生在靠近切削刃中部的的位置,且磨损带发展比较均匀,这将有利于延长刀具的使用寿命。当切削速度达到 100m/min,刀具磨损加剧,最大切深线附近的沟槽磨损严重,其磨损带宽度和发展速度均超过其他部位。此时磨损带不是均匀发展,而是集中在最大切深处附近,使后刀面磨损

很快达到磨钝标准。得到的结论是:铣削速度过低或过高时均磨损严重,导致出现崩刃现象,当铣削速度为 60m/min 时有利于刀具寿命的延长。另外,从图 4 中也可以看到钛合金铣削过程中,除在后刀面产生磨损带以外,切削刃附近的刀具材料会因摩擦和粘结等原因而受到磨损,使切削刃在整体上产生“后退”现象,并且不能保持其原来比较锐利的形状,切削力和切削温度进一步升高,使磨损过程加剧。

2.2 微观分析

通过 EDS 分析了刀具涂层的元素情况,分析结果如表 4 所示。

为了更进一步研究后刀面的磨损机理,再对磨损后的后刀面做 EDS 分析,从表 5 可以分析切削钛合金时刀具磨损的微观机制。

(1) 存在粘结磨损现象,谱图 2 可以证实,测到了 TC21 钛合金的主要组成元素如 Ti、Al、Cr、Sn 等粘着于刀具上。造成刀具粘着磨损的重要原因有:钛合金弹性模量小,切削时接触面积增加;化学活性高,与刀具的亲合力强;刀具涂层为 TiAlN 涂层,与工件材料中的 Ti 具有无限互溶性,容易粘刀。

(2) 刀面上存在着氧化磨损现象,通过 EDS 分析中发现了氧元素的存在。由于铣削时切削区有很高的温度,刀具材料和钛合金在高温下与空气中的氧气发生氧化反应,从而

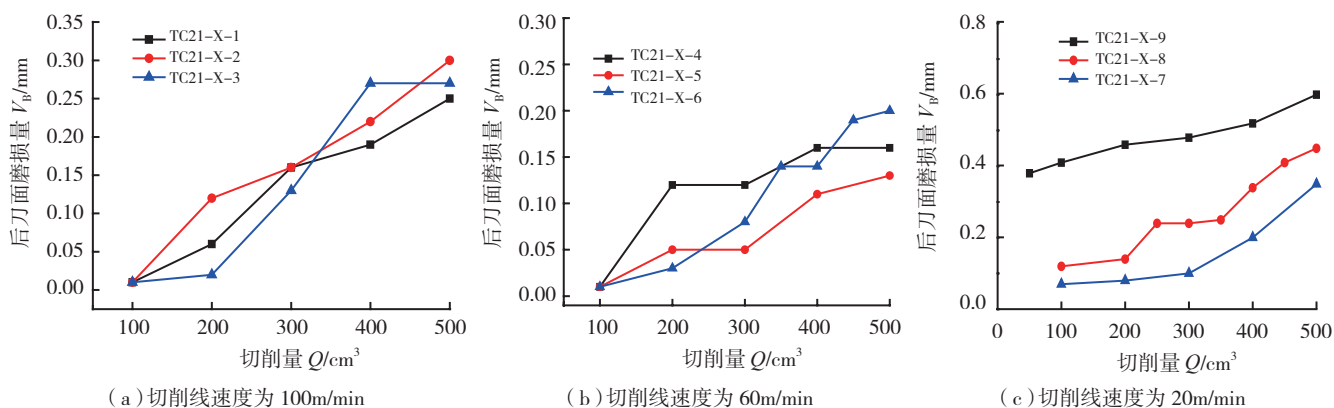


图3 铣削TC21刀具磨损量随切削量的变化曲线

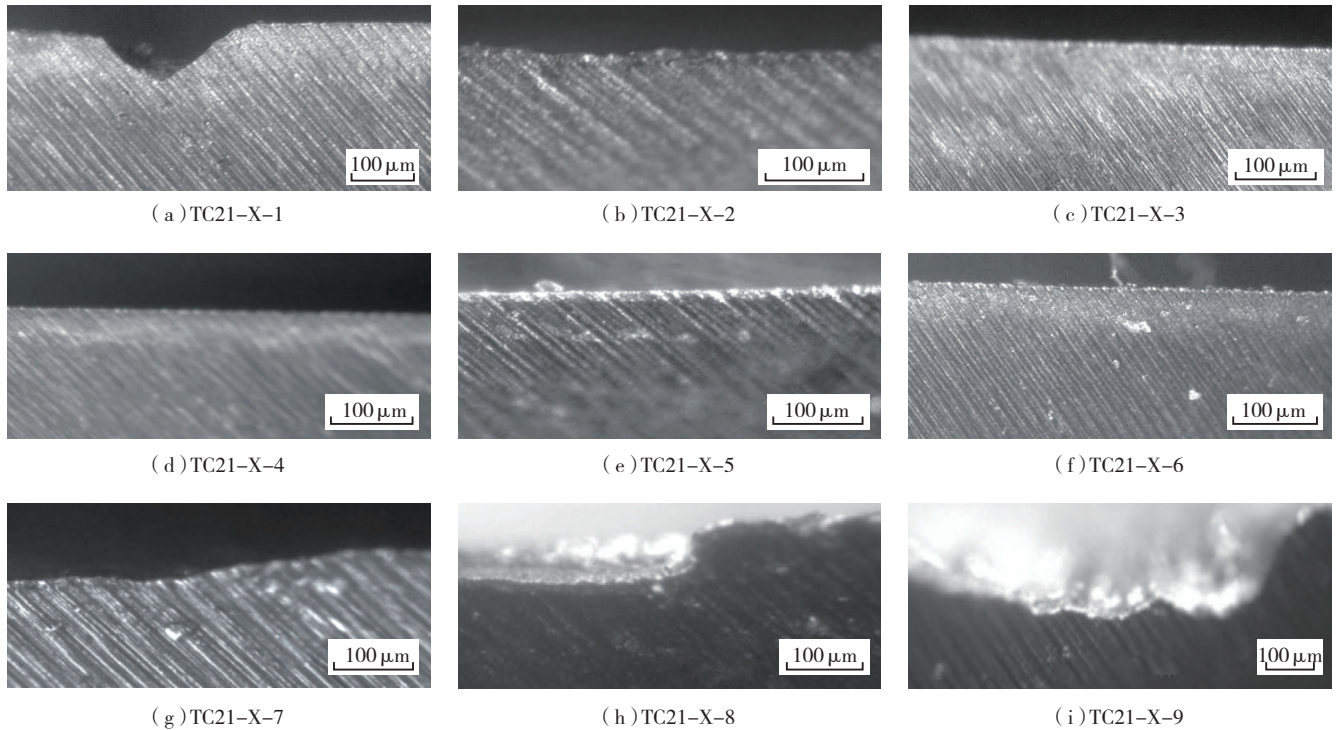


图4 正交试验设计下的9种切削参数下的刀具后刀面磨损形貌

加剧刀具的磨损。

此外,刀具存在扩散磨损。在切削高温的影响下,工件材料和刀具材料化学元素会相互扩散,也会造成刀具的磨损。扩散的同时往往伴有化学置换反应($Ti+WC=TiC+W$)。

针对上述3种磨损机理,在选用切削液时应采取能够有效冷却润滑降低切削区的温度,并且避免高温下

与钛合金反应的切削液。植物油基切削液能够在工件表面形成较厚的润滑薄膜,润滑效果更明显,而且具有较高的熔点,有利于提高金属切削率和实施清洁生产。

结论

根据极差分析结果,从刀具寿命的角度考虑,铣削参数可以选择较大的切削宽度,较小的每齿进给量和轴向铣削深度,适当的铣削速度(60m/min)。各种磨损形式之间既有区别又有着紧密的联系,粘结材料会产生氧化和扩散,而氧化则为磨粒磨损提供了硬质点,刀具的磨损失效是在多种磨损机制下共同作用的结果。针对各种机理从提

高刀具寿命的角度,应选择植物油基的切削液。

参考文献

- [1] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用,北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 周长军. 钛合金材料高效加工切削机理及参数优化研究[D]. 西安:西北工业大学,2012.
- [3] 魏树国,吴照银,马光锋,等. 钛合金的切削加工性及其改善方法. 工具技术, 2005, 39(12):50-51.
- [4] 李友生,邓建新,石磊. 高速切削加工钛合金的刀具材料. 制造技术与机床, 2007(8):2-27.
- [5] Amin N A K M, Ismail A F, Khairussima N M K. Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy-Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2007(4): 1-12.
- [6] Ezugwu E O, Silva R B D, Bonney J, et al. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2005(45):1009-1014.
- [7] Rahman M, Wang Z G, Wong Y S. A review on high-speed machining of Titanium alloys. JSME International Journal, Series C, 2006, 49(1):11-20.

(责编 深蓝)

表4 刀具涂层EDS元素重量百分比

谱图	N	Al	Ti	总量
谱图 2	12.83	22.85	64.32	100.00
平均	12.83	22.85	64.32	100.00
标准偏差	0.00	0.00	0.00	-
最大	12.83	22.85	64.32	-
最小	12.83	22.85	64.32	-

表5 X-1组刀具磨损产物EDS元素质量百分比

谱图	O	Al	Ti	Cr	Co	Sn	W	总量
谱图 1	11.18		6.33	-	6.31	-	76.19	100.00
谱图 2	-	5.84	77.34	3.69	-	2.34	10.79	100.00
谱图 3	-	10.19	88.03	1.78	-	-	-	100.00
最大	11.18	10.19	88.03	3.69	6.31	2.34	76.19	-
最小	11.18	5.84	6.33	1.78	6.31	2.34	10.79	-