钛合金 TB6 刀具磨损铣削实验研究

刘　东　　王　放　　王建民　　薛　源　　薛　晶

（北方工业大学机械与材料工程学院，北京　100144）

文　摘　使用硬质合金刀具对钛合金 TB6 进行正交铣削实验，对比分析不同切削参数下的刀具磨损情况，并用实验结果进行回归分析得到刀具磨损的回归公式。结果表明：刀具主要磨损在后刀面，其磨损大都呈现一条带状磨损带，在速度增大时大磨损带变长，刀具易发生脆性破损，且在刀具表面会出现钛合金粘连；对刀具耐用度的影响大小依次为切削速度、进给量、切削宽度和切削深度；刀具磨损回归方程具有良好的回归方差，能够很好的对刀具寿命进行预测。

关键词　刀具耐用度，钛合金 TB6，硬质合金刀具，磨损测量

中图分类号：TG506.1　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2018.02.017

Experimental Study on Tool Life in Milling TB6 Titanium Alloy

LIU Dong　　WANG Fang　　WANG Jianmin　　XUE Yuan　　XUE Jing

（College of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing　100044）

Abstract　Tool wear was studied using orthogonal experiment method while milling titanium alloy TB6 in different milling parameters. The flank face wear was measured by the photomicrograph after a certain period of milling during the milling process. The regression equation of TB6 tool wear was established by the experimental data. The experimental data indicated that the tool wear mainly occurred on the flank face and mostly showing a banded wear. The length of the band increases with the cutting speed increases. The brittle failure was occrured and the adhension of titanium was found on the tool face. The parameters effect on the tool life were cutting speed, feed speed, cutting width and cutting depth in turn. The regression equation has good regression variance and can predict the tool life well.

Key word　Tool life, Titanium alloy TB6, Carbide tool, Wear measurement

0　引言

钛合金因具有高比强度、高比模量、低线胀系数、耐冲击、耐磨，耐热等优良性能[1]而应用广泛。但钛合金难加工[2]，在实际切削加工中，刀具耐用度低，刀具磨损严重，加工成本高，大大的阻碍了这类材料的应用与推广[3]。钛合金 TB6 是一种高韧、高强并且拥有优秀热加工性的近 β 型钛合金，和同强度结构钢或其他一些钛合金相比可大大降低结构质量[4]。

在金属切削加工过程中，刀具磨损是人们普遍关注的一个问题[5]。因为它涉及到很多方面的问题，对刀具寿命、加工的经济性、加工精度、加工工件的表面质量、可靠性等方面都有很大影响。国内外很多学者都对切削时刀具磨损进行了大量研究。ATTANASIO 等对硬质合金刀具切削 AISI1045 时的刀具磨损进行了预测[6]。FILICE 等对切削中碳钢时刀具磨损情况进行了预测[7]。郑敏利等使用未涂层硬质合金刀具进行钛合金外圆切削实验，发现刀具的磨损以扩散磨损、粘连磨损为主，且随切削速度和进给量的增大，刀具磨损加剧[8]。陈燕等使用软件对高速切削钛合金 TC4 时的刀具磨损进行了有限元分析，发现随切削速度增加刀具磨损加快，且切削速度为 300

收稿日期：2017-06-12

基金项目：北方工业大学大学生科技活动项目资助，北京市教师队伍建设-教师教学促进-双培计划虚拟教学团队建设项目资助，北京市教委基本科研业务项目资助

第一作者简介：刘东，1976 出生，副教授，主要研究方向为先进制造技术。

m/min 时刀具寿命仅为 130 m/min 的 1/3[9]。

本文通过在不同切削参数下对钛合金 TB6 进行干式正交切削试验,对比分析不同切削参数下的刀具磨损情况,并用实验结果进行回归分析得到刀具磨损的回归公式,为优化切削参数、提高刀具耐用度,降低加工成本提供一定参考。

1 实验

1.1 试验方案

本次实验根据生产经验、文献数据、刀具厂商推荐值等综合考虑选定 9 组铣削参数,进行正交切削实验,铣削方式为顺铣。使用 9 把相同刀具进行实验。根据推荐的的耐用度实验标准,选取后刀面磨损量 $VB=0.25\sim0.3$ mm 作为刀具的磨损标准。使用显微照相机检测刀具的磨损情况,按实验预定的铣削参数加工工件,每隔一定时间停止加工,拍摄实验过程中刀具后刀面磨损图像,在软件中处理磨损图像,可得到当前刀具磨损情况。

采用正交试验方法设计实验,设计四因素三水平正交试验,四个因素为铣削速度、每齿进给量、切削深度,切削宽度。各因素水平见表 1。

表 1 切削因素水平表

Tab. 1 Cutting factor and level table

因素水平	切削速度 v_c/m·min^{-1}	每齿进给量 f_z/mm·z^{-1}	切削深度 a_p/mm	切削宽度 a_e/mm
水平 1	15	0.04	1	0.12
水平 2	25	0.08	1.5	0.17
水平 3	35	0.12	2	0.22

1.2 加工机床和加工刀具

图 1 为实验所用机床 MVC1000,图 2 为实验所用硬质合金刀具,55°整体合金立铣刀,φ6R0.5×15×φ6×50L×55°×4T。



图 1 实验用机床

Fig. 1 Experimental machine

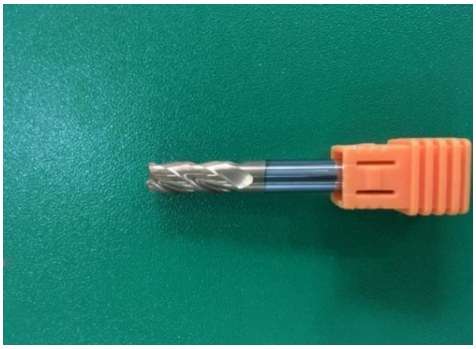


图 2 实验用刀具

Fig. 2 Experimental tool

1.3 实验材料

实验采用 TB6 长方体材料,又称 Ti-1023(典型的近 β 型钛合金),名义成分为 Ti-10V-2Fe-3Al。其化学成分及力学性能如表 2 表 3 所示。

表 2 TB6 钛合金化学成分

Tab. 2 Chemical composition of TB6 titanium alloy

wt%

H	O	N	Fe	Al	V	Ti
0.01	0.03	0.03	1.93	2.95	10.2	余量

表 3 TB6 钛合金的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of TB6 titanium alloy

抗拉强度 σ_b/MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$/MPa	伸长率 δ/%	收缩率 ψ/%	冲击韧性 α_k/J·cm^{-2}
1145	1082	11.1	64.4	60

1.4 实验仪器

使用显微照相机测量刀具的磨损情况。照相机与计算机相连,使用相关软件可将刀具磨损情况放大,便于在计算机上观察。将照相机固定在机床上,并将装夹好的刀具移到适当位置,记录当前坐标。经过一定时间的切削后,暂停切削,将刀具移到预先记录的坐标处,使用照相机观察并记录磨损情况。如未达到预定磨损量可继续切削一定时间后,暂停切削再次将刀具移到预先记录的坐标处,观察磨损情况,直至刀具达到预定磨损量为止。

1.5 测试标准

在评定刀具材料切削性能和研究试验时,都以刀具表面的磨损量作为衡量刀具的磨钝标准。国际 ISO 推荐的刀具耐用度磨钝标准为后刀面磨损量:$VB=0.3$ mm,在实际应用经常根据所加工材料和刀具的具体情况在 025 ~0.3 mm 之间选择。由于钛合金为难加工材料,加工过程中刀具破坏形态比较复杂,

所以在本次试验中取后刀面磨损量 $VB=0.26$ mm 作为本次试验的磨损标准。

2 结果与讨论

按照指定的实验方案,在每组切削参数下,以后刀面磨损量 VB=0.26 mm 作为刀具的磨损标准,计算出每组所需要的切削时间并记录(表 4)。实验所用试件为一长方体钛合金,切削时沿一个方向进行多次重复切削,记录下每组实验重复切削次数和时间,当刀具后刀面磨损量 0.26 mm 时停止切削,此时所切削的时间即为刀具耐用度。

表 4 刀具耐用度实验结果表

Tab. 4 Experimental results of tool durability

实验号	水平组合	铣削深度 a_p/mm	铣削宽度 a_e/mm	进给量 f_z/mm·z^{-1}	切削速度 v_c/ m·min^{-1}	耐用度 t/min	切削次数
1	A1B1C1D1	1	0.12	0.04	15	218	154
2	A1B2C2D2	1.5	0.17	0.08	15	190	270
3	A1B3C3D3	2	0.22	0.12	15	65	138
4	A2B1C2D3	1.5	0.22	0.04	25	144	170
5	A2B2C2D1	2	0.12	0.08	25	38	90
6	A2B3C1D2	1	0.17	0.12	25	25	90
7	A3B1C3D2	2	0.17	0.04	35	55	92
8	A3B2C1D3	1	0.22	0.08	35	18	60
9	A3B3C2D1	1.5	0.12	0.12	35	8	40

图 3 为某一次显微照相机通过计算机对切削时刀具磨损情况的测量,刀尖处白亮带为刀具磨损,通过计算机测量其宽度。



图 3 刀具后刀面磨损

Fig. 3 Tool wear of the flank face

使用 spss 对实验结果进行回归分析,得到刀具耐用度的回归方程:

$$T = 3741 \times a_p^{0.051} \times a_c^{0.13} \times f_z^{-0.624} \times v_c^{-0.745}$$

回归公式的模型误差如表 5 所示,可以看出回归方程 R 方差及调整 R 方差均在 0.9 以上,能够很好地对刀具耐用度进行预测。

表 5 模型误差汇总

Tab. 5 Error of the model

模型	R	R 方差	调整 R 方差	标准估计的误差
1	0.982	0.965	0.929	0.13

通过图 4 ~ 图 7 几幅散点图,可以看出,切削深度和切削宽度与时间的线性关系不显著,而进给量和切削速度与时间的线性关系较为显著。

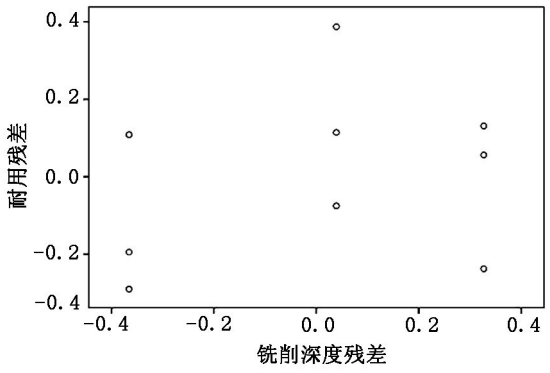


图 4 铣削深度与耐用度回归残差散点图

Fig. 4 Regression residual scatter plot of depth of cut and cutting time

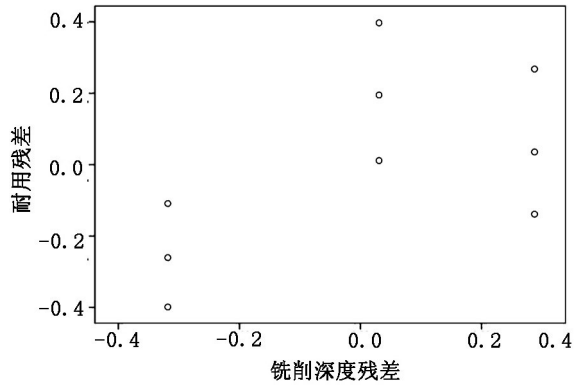


图 5　铣削宽度与耐用度回归残差散点图

Fig. 5　Regression residual scatter plot of width of milling and cutting time

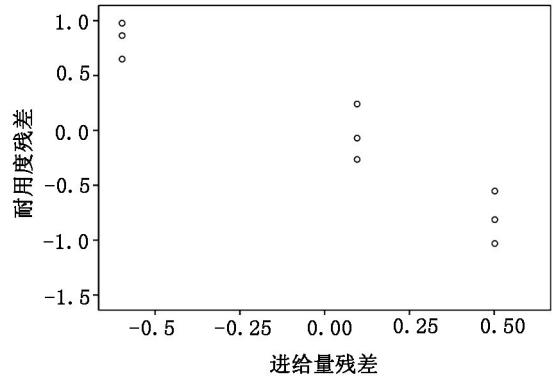


图 6　进给量与耐用度回归残差散点图

Fig. 6　Regression residual scatter plot of feed speed and cutting time

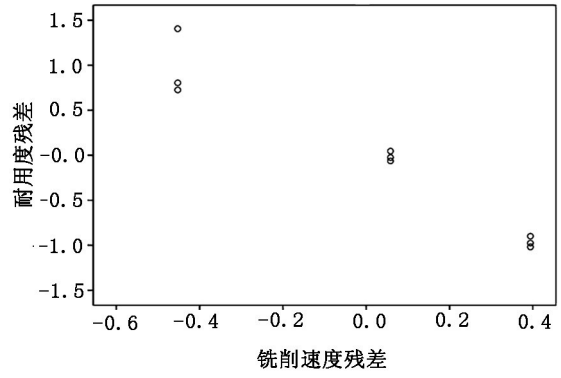


图 7　切削速度与耐用度回归残差散点图

Fig. 7　Regression residual scatter plot of cutting speed and cutting time

3　结论

通过研究不同切削参数下切削钛合金 TB6 时刀具的磨损情况，得出以下结论：

(1)在不同切削参数下的刀具主要磨损位置相似，大都出现在后刀面位置，前刀面磨损较后刀面不明显。后刀面的磨损大都呈现一条带状磨损带，且随速度增大磨损带会变长。在速度增大时，刀具易发生脆性破损，且在刀具表面会出现钛合金粘连。

(2)通过本次试验可以看出，在 TB6 铣削加工时，切削速度、进给量，切削宽度和切削深度都会影响刀具耐用度。而对耐用度的影响较大的是切削速度，，其次分别为进给量、切削宽度和切削深度。

(3)通过实验得到的实验数据，实用软件进行回归分析，得到了刀具磨损时间回归方程，且可靠性良好。

参考文献

[1] 胡宏楠，董明. 颗粒增强金属基复合材料切削加工工艺的新进展[J]. 金属材料与冶金工程，2009，37(1)：3-7.

[2] 陈五一，袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究发展[J]. 航空制造技术，2010(15)：25-30.

[3] ARAMESH M，SHI B，NASSEF A O，et al. Meta-modeling optimization of the cutting process during turning titanium metal matrix composites[J]. Procedia CIRP，2013(8)：576-581.

[4] 王美娇，孟祥军，廖志谦，等. Ti-1023 合金的研究现状[J]. 材料开发与应用，2009，24(5)：66-69.

[5] 张宗阳，艾兴，刘战强，等. 高效切削铁基高温合金刀具磨损特性研究[J]. 制造业自动化，2011(10)：48-52.

[6] ATTANASIO A，CERETTI E，FIORENTINO A，et al. Investigation and FEM-based simulation of tool wear in turning operations with uncoated carbide tools[J]. Wear，2010，269(5-6)：344-350.

[7] FILICE L，MICARI F，SETTINERI L，et al. Wear modeling in mild steel orthogonal cutting when using uncoated carbide tools[J]. Wear，2007，262(5-6)：545-554.

[8] 郑敏丽，范依航. 高效切削典型难加工材料刀具摩擦与磨损机理研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011(6)：22-30.

[9] 陈燕，杨树宝，傅玉灿，等. 钛合金 TC4 高速切削刀具磨损的有限元仿真[J]. 航空学报，2013，34(9)：2230-2240.