

# 超低温大进给铣削 Ti6Al4V 钛合金的刀具磨损试验研究

许清<sup>1</sup>, 任斐<sup>2</sup>, 赵威<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 何宁<sup>1</sup>, 宫乐<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学; <sup>2</sup>上海航天设备制造总厂

**摘要:** 以液氮作为冷却介质,对难加工材料 Ti6Al4V 钛合金进行了大进给铣削试验。研究分析了刀具耐用度、刀具磨损区的宏观形态与微观形态,并与干铣削进行了对比分析。研究表明:相对于干切削,液氮冷却下超低温、大进给铣削 Ti6Al4V 钛合金可以减缓热裂纹的产生,显著提升刀具耐用度;两种冷却润滑条件下的刀具使用寿命主要由沟槽磨损决定。

**关键词:** Ti6Al4V 钛合金;大进给铣削;刀具磨损;超低温切削;液氮冷却

**中图分类号:** TG506;TH161

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Tool Wear in Cryogenic High Feed Milling of Ti-6Al-4V

Xu Qing, Ren Fei, Zhao Wei, Li Liang, He Ning, Gong Le

**Abstract:** In this study, liquid nitrogen is used as coolant in high feed milling of Ti-6Al-4V. Tool wears are studied with analysis of tool durability, macro-analysis and micro-analysis method. The results show that the generation of thermal cracking can be slowed down and tool life can be improved remarkably in cryogenic compared with dry milling. Tool life is determined by main type of notch wear in cooling condition.

**Keywords:** Ti6Al4V; high feed milling; tool wear; cryogenic machining; liquid nitrogen

## 1 引言

以液氮作为切削介质的超低温冷却润滑由于其能延长刀具寿命、改善加工表面质量以及提升材料去除率等方面的优异性能,多年来一直是难加工材料机加工领域的研究热点<sup>[1]</sup>。特别是在刀具磨损及使用寿命方面,与干切削及传统浇注乳化液冷却条件相比,液氮冷却有着显著的优势<sup>[2,3]</sup>。Su Y. 等<sup>[4]</sup>发现与干铣削相比,在 -10℃ 低温氮气冷却条件下的刀具使用寿命可以提升一倍以上。Lee I. 等<sup>[5]</sup>开展了不同涂层刀具在不同冷却条件下的刀具磨损试验,发现相对于干铣削而言,液氮冷却可以提高刀具寿命 44% - 55%。

大进给铣削因其在加工效率方面成倍提升的优势,近年来受到了学术界和工业界的普遍关注。与传统铣削方式相比,大进给铣削可以获得极大的金属材料去除率,提升加工效率 1 - 3 倍,缩短了加工时间<sup>[6]</sup>。为此,本文综合应用超低温切削和大进给铣削对 Ti6Al4V 钛合金进行加工试验,从刀具耐用度、刀具宏观与微观磨损形态三方面进行重点分析。

## 2 试验条件及方案

### 2.1 试验条件

工件材料:Ti6Al4V 是一种中等强度的  $\alpha + \beta$  型钛合金,具体化学成分组成如表 1 所示。Ti6Al4V 有着优异的综合性能,其比强度、耐腐蚀性、耐热性、生物相容性等均较好,因此被广泛应用于航空领域中。试验采用退火态 Ti6Al4V 钛合金,试验工件尺寸 58mm × 73mm × 60mm。

表 1 Ti6Al4V 化学成分 (%)

合金元素			杂质					
Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O	其他
5.5 - 6.8	3.5 - 4.5	余量	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.2	≤0.5

刀具:选用 Walter 三角形可转位硬质合金涂层刀片 WSP35S,刀片型号 P23696 - 1.0,具体参数如表 2 所示。

表 2 刀具参数

刀具厂商	刀片型号	刀片材料	主偏角	刀具半径
Walter	P23696 - 1.0	WSP35S, 涂层硬质合金	0 - 21°	25mm

机床:采用常州机床厂生产的 TH5660A 立式加工中心。

测量与分析仪器:利用工具显微镜测量刀具磨损,采用 JSM - 5610LV 型扫描电镜观察刀具磨损区域的微观形貌。

冷却润滑条件:YDZ - 50 型自增压液氮罐,液

氮喷射压力为 0.08MPa, 流量 1kg/min, 采用外喷方式, 冷却区域为刀具前刀面。

## 2.2 试验方案

采用顺铣方式进行单齿大进给铣削, 采用干铣削和液氮冷却两种冷却润滑条件根据前期试验设置铣削用量  $v = 80\text{m/min}$   $f_z = 0.8\text{mm/r}$ 、 $a_e = 12.5\text{mm}$ 、 $a_p = 0.6\text{mm}$ 。

试验研究刀具磨损状态, 主要测定后刀面平均磨损宽度值  $VB$  和沟槽磨损值  $VN$ , 只要其中有一项达到磨钝标准, 即视为刀具失效<sup>[7]</sup>。由于大进给铣削用于粗加工, 因此预先设定刀具磨钝标准为  $VB = 0.6\text{mm}$ ,  $VN = 1.0\text{mm}$ <sup>[8]</sup>。当刀具失效后, 为了研究刀具磨损的微观形貌, 采用扫描电镜观察刀具的磨损并进行分析。由于试验后钛合金材料会粘附在刀片表面而无法清晰看到刀具实际的微观形貌, 因此需先对失效刀具进行酸洗腐蚀处理, 以去除粘附的钛合金材料。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 刀具耐用度分析

在大多数评定刀具切削性能和试验研究过程中, 由于刀具后刀面平均磨损值较易测量, 因此均以刀具后刀面磨损  $VB$  值来判定刀具是否失效。但在试验过程中发现沟槽磨损也是影响大进给刀具的主要因素, 因此对刀具后刀面的沟槽磨损  $VN$  与  $VB$  同时进行了测量, 以便深入研究液氮冷却条件下的大进给刀具的刀具磨损规律。

在干铣削和液氮超低温铣削两种不同方式下, 刀具后刀面磨损值  $VB$  随铣削行程的变化曲线对比见图 1。可见, 当刀具失效时, 干铣削条件下的刀具后刀面磨损值  $VB$  为 0.3mm 左右, 而液氮冷却条件下的后刀面磨损值  $VB$  为 0.2mm 左右, 两者均未达到刀具磨损标准 ( $VB = 0.6\text{mm}$ )。因此在干铣削和液氮冷却条件下, 刀具磨损标准 ( $VB = 0.6\text{mm}$ ) 均不能作为刀具失效标准。在两种铣削方式下, 在初期磨损阶段刀具磨损值都在极短的铣削行程 ( $L < 720\text{mm}$ ) 内达到了一定值, 这是由于初始阶段刀具较为锋利, 在前期进行钝化磨合。当磨合稳定后, 随着铣削行程的增大, 后刀面磨损增量较小。但在干铣削条件下, 刀具没有明显的正常磨损阶段, 后刀面磨损值以较为一定的速率增大。而在液氮冷却条件下, 在其正常磨损阶段随着铣削行程的增加, 刀具后刀面磨损量的增加相对缓慢。在干铣削条件下, 当铣削行程为 720mm 时刀具后刀面磨损值达到

0.15mm; 在液氮冷却条件下, 直到铣削行程为 2500mm 时才达到相对应的磨损值。因此液氮能够很好地抑制刀具后刀面磨损。

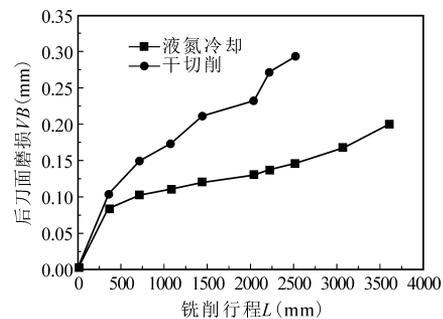


图1 铣削行程对刀具后刀面磨损  $VB$  的影响

图 2 为两种铣削条件下刀具后刀面沟槽磨损  $VN$  随铣削行程的变化曲线。由图可见, 在大进给铣削中沟槽磨损是影响刀具寿命的决定性因素。液氮作为冷却介质在一定程度上减轻了沟槽磨损, 提高了刀具使用寿命, 但效果弱于对刀具后刀面磨损  $VB$  的影响。在铣削行程 360mm 时, 干铣削出现沟槽磨损, 而液氮冷却条件下在 1000mm 时才出现沟槽磨损。与干铣削相比, 液氮冷却条件下的刀具铣削行程增加了 43% 左右。

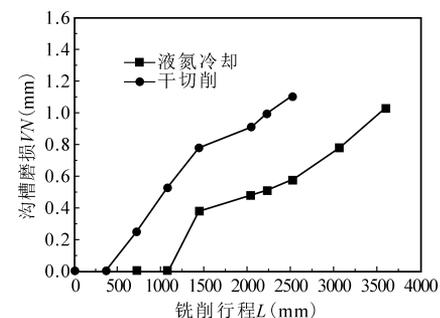


图2 铣削行程对刀具沟槽磨损  $VN$  的影响

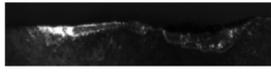
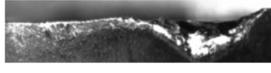
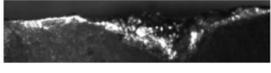
### 3.2 刀具磨损的宏观分析

通过对不同铣削行程下刀具磨损宏观形貌的研究分析刀具磨损的具体变化形态。不同冷却润滑条件下不同铣削行程的刀具磨损宏观变化见表 3。

在铣削行程为 720mm 时, 干铣削已出现明显的刀具磨损, 除后刀面磨损外, 还有明显的沟槽磨损及崩刃; 而液氮冷却条件下, 也出现了微崩刃, 但后刀面基本完好。随着铣削行程的增加, 沟槽磨损成为影响刀具使用寿命的主要磨损形式。在铣削行程为 1440mm 时, 干铣削刀具的沟槽磨损增大, 出现明显的崩刃现象; 当铣削行程为 2520mm 时, 刀具沟槽磨损继续增大并开始产生崩刃, 进而导致刀具失效; 而当铣削行程为 720 - 2040mm 之间时, 液氮超低温铣削才出现明显的沟槽磨损; 铣削行程 2040 -

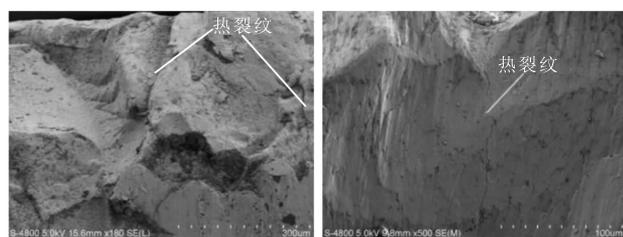
3600mm时,后刀面磨损值 $VB$ 的变化并不明显,但沟槽磨损值 $VN$ 变化较大。因此试验结果表明,在干铣削和液氮超低温铣削过程中,沟槽磨损是决定刀具寿命的关键因素。

表3 刀具磨损宏观变化

干铣削	液氮冷却条件
 (a) 铣削行程 720mm	 (d) 铣削行程 720mm
 (b) 铣削行程 1440mm	 (e) 铣削行程 2040mm
 (c) 铣削行程 2520mm	 (f) 铣削行程 3600mm

### 3.3 刀具磨损的微观分析

为了清晰地展现不同切削条件下的刀具磨损形态,研究刀具磨损的微观形貌是一种行之有效的手段。试验采用扫描电镜分别观察两种切削条件下已酸洗并去除掉粘附在刀具上的钛合金材料的刀具微观形貌。



(a) 干切削

(b) 液氮冷却条件

图3 腐蚀掉钛合金后的刀具微观形貌

图3为两种冷却条件下刀具后刀面磨损区域的微观形貌图。可以看出,在干铣削条件及液氮冷却条件下刀具后刀面都产生了垂直于切削刃的热裂纹,而热裂纹通常被认为是在机械应力和热应力的相互作用及刀具表面的塑性变形作用下产生的<sup>[10]</sup>。而对于切削钛合金材料,热应力是主要因素,这是由于钛合金较差的导热性致使切削温度达到 $1000^{\circ}\text{C}$ 以上<sup>[11]</sup>。此外,铣削加工是一种断续切削过程,因此在铣削钛合金过程中,刀具切削刃处的温度变化剧烈,产生较大的热应力,最终出现热裂纹,进而不断扩展,当扩展到一定程度时刀具会出现崩刃或表层剥落。相比于液氮冷却条件,干切削下的热裂纹分布更加密集,导致刀具较早出现崩刃,最终影响到刀具耐用度。而液氮可以有效降低切削温度,减缓热裂纹的产生,提升刀具耐用度。

## 4 结语

通过研究不同条件下大进给铣削Ti6Al4V钛合金的刀具耐用度、刀具宏观和微观磨损分析,可以得到以下结论:

(1)相对于干切削,液氮冷却下大进给铣削Ti6Al4V钛合金时,刀具耐用度显著提升;

(2)两种冷却条件下,大进给刀片的主要磨损形式均为后刀面磨损和沟槽磨损,其中沟槽磨损对刀具寿命的影响更大;

(3)相对于干切削,液氮冷却可以减缓热裂纹的产生,提升刀具耐用度。

## 参考文献

- [1] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
  - [2] Venugopal K A, Paul S, Chattopadhyay A B. Growth of tool wear in turning of Ti6Al4V alloy under cryogenic cooling [J]. *Wear*, 2007, 262(9): 1071 - 1078.
  - [3] 陈冲, 赵威, 何宁, 等. 液氮冷却下大进给铣削TC4钛合金的试验研究[J]. *工具技术*, 2014, 48(8): 13 - 17.
  - [4] 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 [J]. *Wear*, 2006, 261(7 - 8): 760 - 766.
  - [5] Lee I, Bajpai V, Moon S, et al. Tool life improvement in cryogenic cooled milling of the preheated Ti - 6Al - 4V [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1 - 4): 665 - 673.
  - [6] 李亮. 钛合金的高速加工——大进给铣削技术[J]. *航空制造技术*, 2008(12): 32 - 35.
  - [7] Sadik M I, Isakson S, Malakizadi A, et al. Influence of coolant flow rate on tool life and wear development in cryogenic and wet milling of Ti - 6Al - 4V [J]. *Procedia Cirp*, 2016, 46: 91 - 94.
  - [8] 史琦, 李亮, 何宁, 等. 大进给铣削TC21钛合金的刀具磨损试验研究[J]. *航空制造技术*, 2015(3): 51 - 53.
  - [9] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys [J]. *Wear*, 2005, 258(5 - 6): 752 - 758.
  - [10] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 134(2): 233 - 253.
- 第一作者: 许清, 硕士研究生, 南京航空航天大学机电学院, 210016 南京市
- First Author: Xu Qing, Postgraduate, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China