

变进给高效铣削 Ti40 阻燃钛合金的刀具磨损规律

吕东升¹, 徐九华², 傅玉灿², 丁文锋²

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 211167)

(2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 主要采用变进给试验法, 开展了正弦变进给高效铣削 Ti40 阻燃钛合金试验和理论研究。建立了正弦变进给变化幅度、变化周期及进给步持续时间与刀具耐用度的关系模型, 并对模型参数进行优化。结果表明: 当进给变化幅度为 11.72%, 变化周期为 120 s, 进给步持续时间为 5 s 时, 刀具耐用度相比传统铣削, 增长幅度最高可达 33%。变进给铣削 Ti40 阻燃钛合金改变了刀具磨损的形态和机理, 主要表现是增大前刀面与切屑的接触面积, 改变月牙洼磨损的位置, 同时减小月牙洼磨损的深度和磨损速率, 增强铣削中刀具切削刃强度, 从而提高了刀具耐用度。

关键词: Ti40 阻燃钛合金; 变进给; 铣削; 刀具磨损

中图分类号: TG544; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)04-1213-07

传统的切削加工方式^[1-8]都是在切削参数保持稳定情况下进行的, 往往因某一种磨损形态导致刀具快速失效。如果在切削过程中, 以一定方式按照某规律不断改变某一切削参数 (譬如进给速度), 对刀具的磨损和寿命将会产生重大影响。1995 年, Balazinski 等^[9]通过变进给方法提高了铣削 Inconel 600 材料的刀具耐用度, 试验结果表明采用该方法在加工效率不变的情况下刀具磨损可减小 30%, 使刀具发挥最大的切削功能。此后, Klim 等^[10]又采用该方法对 17-4PH 不锈钢进行了铣削加工, 加工结果表明相比传统铣削加工, 变进给切削加工的方法使刀具寿命平均提高了 20%~43%, 最高可以达到 100%。由此可见, 变进给切削加工可以实现在不改变外界条件下, 仅通过对进给速度的改变就能降低刀具磨损, 提高刀具寿命, 是一种实现绿色高效切削的优良途径。但是, 国内外对于变进给等变切削参数加工的研究还很少。

Ti40 阻燃钛合金是一种单一 β 相钛合金, 是新一代航空发动机机匣零件的重要材料^[11-17]。但是, Ti40 阻燃钛合金优异的力学性能也给切削加工带来了巨大挑战, 如导致硬质合金刀具磨损快, 寿命短等问题颇为突出, 是一种典型的难加工材料。前期研究发现, 同等条件下, 硬质合金刀具铣削 Ti40 阻燃钛合金的耐用度仅为铣削 Ti-6Al-4V 钛合金的 $1/6$ ^[18-20]。为提高加工 Ti40 阻燃钛合金的刀具耐用度, 本研究将运用变进给铣削代替传统的铣削方式对 Ti40 阻燃钛合金的铣

削进行研究, 以分析进给变化幅度、变化周期及进给每步持续时间对刀具耐用度的影响规律, 阐明变进给铣削降低刀具磨损、提高刀具耐用度的机理。

1 实验

采用前期优选的铣削刀具 (SECO 公司 Ti(C, N)-Al₂O₃ 复合涂层的 XOEX120431R-M07 立铣刀), 基本参数如下: 前角 20°, 后角 12°, 刀尖圆弧 3.1 mm, 刀杆 25 mm。机床为 TH5660A 立式数控加工中心, 油冷浇注冷却。单齿顺铣, 粗加工铣平面, 采用的变进给用量见表 1。

采用的线性变进给函数 $f_1(t)$ 可描述为:

$$f_1(t) = f_{av} \left[1 + a \left(2 \left\{ \frac{t}{p} - \text{int} \left(\frac{t}{p} \right) \right\} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

采用的正弦变进给函数 $f_a(t)$ 可描述为:

$$f_a(t) = f_{av} \left[1 + a \sin \left(2p \frac{t}{p} + \frac{3p}{2} \right) \right] \quad (2)$$

表 1 变进给铣削用量参数

Table 1 Parameters of variable feed milling

Milling speed, $v/m \cdot \text{min}^{-1}$	Axial depth, a_p/mm	Radial depth, a_e/mm	Feed for each revolution, $f_z/\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$	Material removal rate/ $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
30	1.5	25	0.06~0.14	1500

收稿日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51475233); 江苏省青年基金项目 (BK20160777)

作者简介: 吕东升, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 南京工程学院智能制造装备研究院, 江苏 南京 211167, E-mail: lds198688@126.com

其中, a 为变进给幅度, $a = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2f_{\text{av}}}$; t 为切削时间;

f_{av} 为平均每齿进给量, $f_{\text{av}} = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_i$; n 为一个周

期内变化步数, m 为一定时间内的变化周期数。

当线性变进给的变化幅度 a 为 10%, 平均每齿进给量 f_{av} 为 0.1 mm/z, 变化周期时间 p 为 120 s, 每步持续时间 τ 为 5 s 时, 线性变进给的变化模型如图 1a 所示。当正弦变进给变化幅度 a 为 10%, 平均每齿进给量 f_{av} 为 0.1 mm/z, 变化周期时间 p 为 120 s, 每步持续时间 τ 为 5 s 时, 正弦变进给的变化模型如图 1b 所示。

2 实验结果

2.1 变进给铣削方式的优选

首先, 对比分析常规进给方式与变进给方式(线性变进给和正弦变进给)铣削 Ti40 阻燃钛合金过程中的刀具耐用度。其中, 变化周期 p 为 60 s, 每步持续时间 τ 为 5 s, 变化幅度 a 为 10%。结果表明, 相对于常规进给方式, 变进给方式可在一定程度上提高刀具耐用度, 而且正弦变进给能更加有效地提高刀具耐用度, 如图 2 所示。原因主要在于, 与图 1a 所示的线性变进给过程的循环变化(从 0.09 mm/z 逐渐上升到 0.11 mm/z, 再从 0.11 mm/z 直接下降到 0.09 mm/z)相

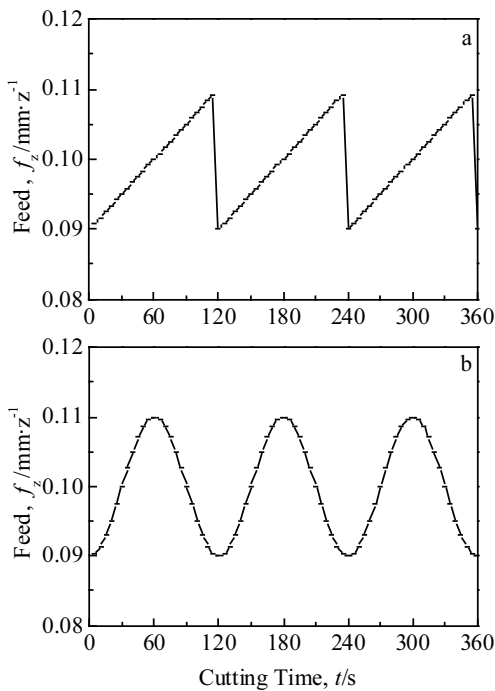


图 1 每齿进给量变进给的变化模型

Fig.1 Variable feed modes of linear feed (a) and sinusoidal feed (b)

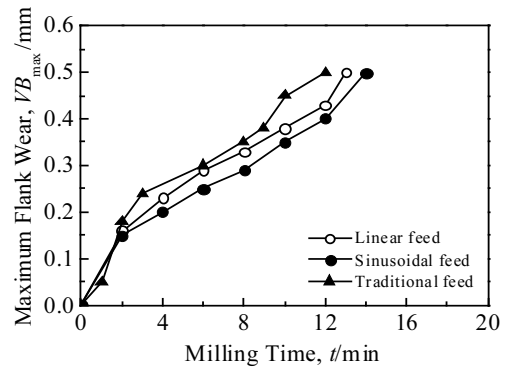


图 2 不同进给的刀具磨损对比曲线

Fig.2 Tool wear curves for different feed modes

比, 正弦变进给所涉及的循环过程(例如, 从 0.09 mm/z 逐渐上升到 0.11 mm/z, 再从 0.11 mm/z 逐渐下降到 0.09 mm/z, 如图 1b 所示)的变化速率更加均匀, 这使得铣削刀具承受的切削力和温度变化不剧烈, 因此正弦变进给比线性变进给加工能更加减轻刀具磨损。因此, 本研究将针对正弦变进给铣削开展研究。

2.2 变进给主因素与刀具耐用度的关系模型及其参数优化

在正弦变进给铣削 Ti40 阻燃钛合金过程中, 影响刀具耐用度的因素主要有变进给变化幅度 a 、每步持续时间 τ 、变化周期 p 。但是, 这些因素对刀具耐用度的影响规律还不明确。因此, 需要建立刀具耐用度与正弦变进给影响因素的关系模型, 优化出最佳的正弦变进给参数。本研究采用响应曲面法建模, 分析 3 个因素变量对刀具耐用度的影响规律。选择二次响应曲面方程, 考虑所有的一次项、二次项和两两交叉项。刀具耐用度响应和 3 个因素变量之间的关系表示如下:

$$T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{23}x_{23} + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (3)$$

$$T = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^4 b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

式中, T 是刀具耐用度, x_1 是变化幅度, x_2 是每步持续时间, x_3 是变化周期, b_0 、 b_i 、 b_{ii} 、 b_{ij} 为系数。

每个因素选择 5 个水平见表 2, 并采用中心复合设计试验。试验结果见表 3。采用响应曲面法计算回归系数。通过试验及回归分析, 得出在油冷浇注切削时刀具铣削耐用度数学模型为:

$$T = 6.56 + 0.371a + 0.227\tau + 0.138p + 0.008a\tau - 0.002ap - 0.004p\tau - 0.009a^2 - 0.033\tau^2 - 0.0003p^2 \quad (5)$$

对回归方程进行 F 检验。由表 4 可以看出, 二次回归模型 F 值为 5.43, 其对应的概率 $P < 0.0001$, 表明

表 2 正弦变进给铣削响应曲面法因素水平表

Table 2 Level and factors of response surface method for sinusoidal variable feed milling

Level	Factors of sinusoidal variable feed		
	Amplitude, $a/\%$	Period, p/s	Step duration, τ/s
1	0	40	3
2	10	60	5
3	25	90	7.5
4	40	120	10
5	50	140	12

表 3 正弦变进给铣削响应曲面法试验设计及其结果

Table 3 Design and results of response surface method for sinusoidal variable feed milling

Test serial number	Amplitude, $a/\%$	Step duration, τ/s	Period, p/s	Tool life, T/min
1	40	10	120	8
2	25	12	120	13
3	25	3	90	16
4	25	7.5	140	15
5	25	7.5	90	15
6	0	7.5	90	12
7	10	10	60	14
8	10	10	120	14.5
9	40	10	60	7
10	40	5	120	9
11	10	5	60	15
12	50	7.5	90	6
13	40	5	60	10
14	25	7.5	40	14
15	10	5	120	18
16	25	7.5	90	15.5

表 4 刀具耐用度回归模型 F 检验表

Table 4 F test table of regression model for tool life

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F ratio	P value	Significance
Regressions	188.18	9	20.91	5.43	<0.0001	Significance
Error	19.26	5	3.49			
Total errors	207.43	14				

每步持续时间 τ 为 5 s 时, 此时刀具耐用度最高为 18 min, 材料去除量也最大, 达到 27 000 mm³。在每齿进给量变化幅值 a 为 40% 时, 刀具耐用度均较低 (分别为 7、8、9、10 min), 低于常规进给的刀具耐用度 12 min。分析原因, 主要在于变化幅值较高时, 在每齿进给量最高为 0.14 mm/z 时切削力较大, 切削温度较高, 刀具发生了快速磨损甚至微崩刃。

依据公式(3)各因素的影响系数可以发现, 变化幅值 a 对刀具耐用度的影响最大, 其次是每步持续时间 τ , 变化周期 p 对刀具耐用度的影响结果最小。图 3 为变进给各影响因素与刀具耐用度之间的响应曲面。由图 3a 可知, 选用较小的变化幅值和较小的每步持续时间有利于提高刀具耐用度。由图 3b 可知, 选用较小的变化幅值和较高的变化周期有利于提高刀具耐用度。由图 3c 可知, 变化周期的大小对于刀具耐用度的影响较小。

由式(5)及图 3 可以看出, 刀具耐用度与变化幅值、每步持续时间、变化周期并非线性关系, 而是呈非线性二次函数关系, 说明刀具耐用度或存在一个最优值。本研究为获取最大的刀具耐用度值及其相应的正弦变进给因素参数, 对建立的数学模型进行最优化。最优化数学模型如下:

目标函数为:

$$\begin{aligned} \text{Max}(T) = & 6.56 + 0.371a + 0.227\tau + 0.138p + \\ & 0.008a\tau - 0.002ap - 0.004p\tau - \\ & 0.009a^2 - 0.033\tau^2 - 0.0003p^2 \end{aligned} \quad (6)$$

对刀具耐用度建立的回归模型是显著的, 拟合的模型具有较高的准确性。经检验结果表明, 采用响应曲面法建立的刀具耐用度的回归模型是有效的, 可以用此模型对刀具耐用度进行分析和预测。

由表 3 正弦变进给刀具耐用度试验结果可知, 在每齿进给量变化幅值 a 为 10%, 变化周期时间 p 为 120 s,

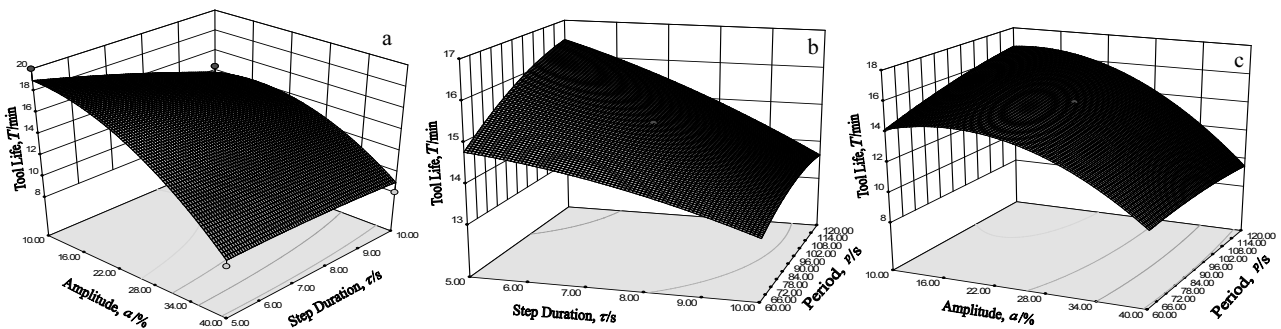


图 3 变进给铣削刀具耐用度与影响因素之间的响应曲面

Fig.3 Response surface of tool life and variable factors: (a) between tool life and amplitude, step duration, (b) between tool life and step duration, period, and (c) between tool life and amplitude, period

约束方程为:

$$\begin{cases} 0 \leq a \leq 50 \\ 40 \leq p \leq 140 \\ 3 \leq \tau \leq 12 \end{cases} \quad (7)$$

选用初始值为[0 0 0], 求得最优解为[11.72 5 120], $Max(T)=18.19$, 即在给定参数范围内选取变化幅值 11.72%, 每步持续时间 5 s, 变化周期 120 s 时, 可获得最高铣削刀具耐用度值 18.19 min。这与试验中的参数变化幅值 10%, 每步持续时间 5 s, 变化周期 120 s 时, 可获得铣削刀具耐用度值 18 min 是非常一致的, 因此, 本研究认为最优的正弦变进给参数为变化幅值 11.72%, 每步持续时间 5 s, 变化周期 120 s。

2.3 变进给铣削对前刀面磨损的影响分析

2.3.1 前刀面磨损面积和月牙洼深度对比

在常规进给铣削和变进给铣削的对比试验过程中, 采用 KH7700 三维视频显微镜和 Sensofar S NEOX 光学轮廓仪对刀具前刀面每隔一个进给变化周期进行观察和测量, 如图 4 所示。由此, 可以清晰比较常规进给铣削和变进给铣削对刀具磨损影响的不同之处, 如图 5 所示 (横坐标表示切削刃位置, 纵坐标表示月牙洼磨损深度)。

常规进给方式铣削 Ti40 阻燃钛合金, 铣削时间为 4 min 时, 刀具前刀面发生了集中在前刀面的磨损, 如图 6a 所示; 铣削时间 8 min 时, 刀具前刀面集中磨损处发生了微崩刃, 如图 6c 所示; 铣削 10 min 时刀具前刀面发生了明显的边界磨损, 如图 6e 所示; 铣削 12 min 时, 刀具前刀面会由于磨损而快速形成深度约 0.2 mm 的月牙洼, 如图 6g 所示。在此情况下, 刀刃横截面尺寸的锐减导致刀具崩刃或刀具的早期破损。

变进给铣削可以有效避免刀具崩刃和早期破损, 前刀面总体磨损均匀, 没有形成明显的月牙洼磨损, 仅在前刀面发现几个极小的月牙洼, 从而延长了刀具寿命。当每齿进给量变化幅值 $a=10\%$ 、变化周期 $p=120$ s、

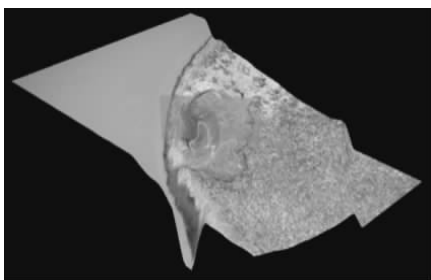


图 4 三维视频显微镜测量刀具月牙洼磨损形貌与深度
Fig.4 Crater wear morphologies and depth with three-dimensional video microscopy

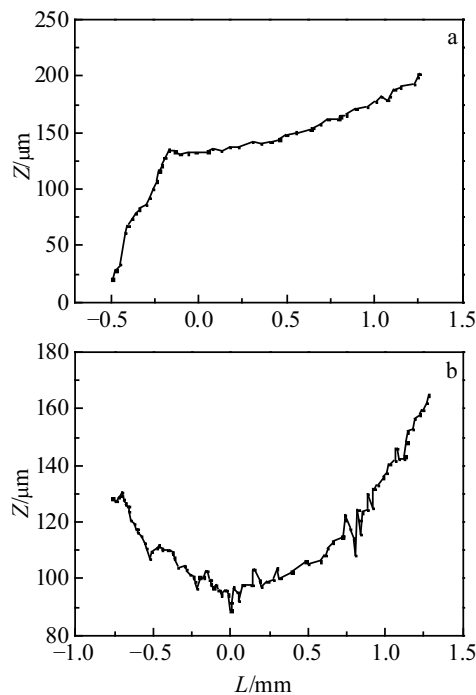


图 5 刀具月牙洼磨损测量结果对比
Fig.5 Comparison of crater wear measurement between variable feed (a) and traditional feed (b)

每步持续时间 τ 为 5 s 时, 刀具耐用度达到最大值, 为 18 min。进一步观察前刀面磨损形貌可以发现, 变进给铣削时前刀面的月牙洼磨损中心随进给速度变化, 其中心位置也在前刀面上不断变动, 这使得变进给铣削的前刀面磨损面积总是大于常规铣削时的前刀面磨损面积, 在变进给铣削 10 min 时最大可以达到 20%, 如图 6f 和 6h 所示。但是, 相对于常规进给铣削形成的固定的前刀面月牙洼磨损而言, 变进给铣削显著降低了月牙洼磨损深度, 对比结果如图 7 与图 8。

图 7 为常规进给和变进给铣削时前刀面月牙洼最大磨损深度随加工时间的变化曲线。可以发现, 变进给铣削时月牙洼磨损深度近似呈线性增大, 增加速度明显低于常规进给铣削方式。例如, 铣削加工 8 min 后, 常规进给铣削的刀具磨损速率成指数增长, 直到刀具失效; 相比之下, 变进给铣削的刀具磨损速率较低, 一直线性增加至 14 min 为止。图 8 为二者月牙洼磨损速率对比图, 常规进给时, 月牙洼磨损速率先是在初期较大, 随后有一个剧烈下降的短暂时期, 最后呈现增大趋势, 直到失效。变进给铣削时, 刀具磨损速率开始较高, 随后磨损速度降低并呈现一个稳定的趋势, 直到刀具失效。

同时, 采用三维视频显微镜对前刀面刀屑接触面积进行了测量, 图 9 给出了常规进给和变进给铣削时

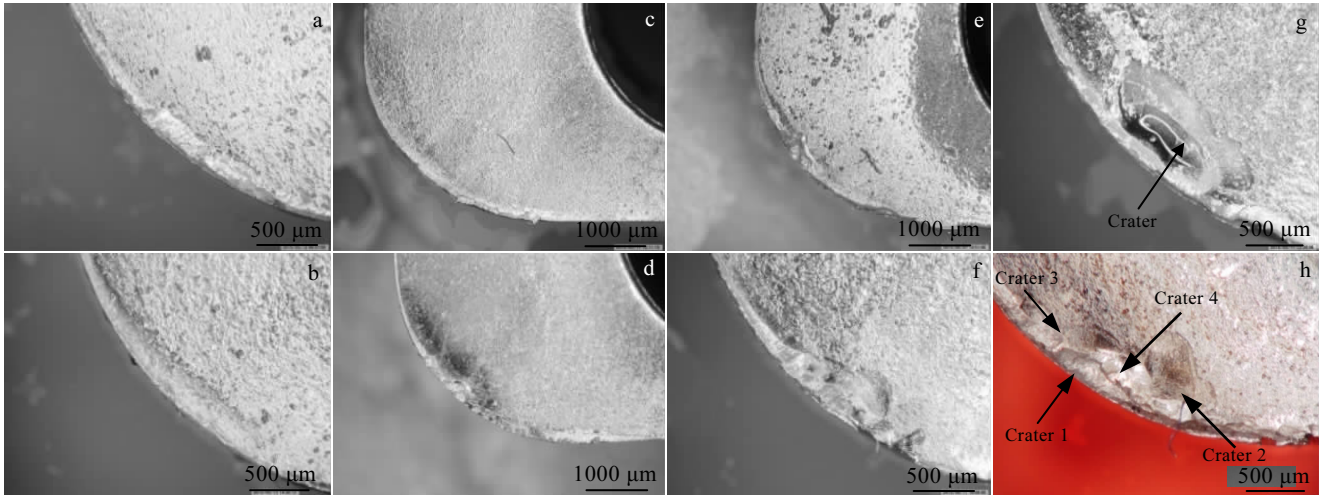


图 6 不同铣削时间的传统进给与变进给铣削刀具前刀面的磨损形貌对比

Fig.6 Comparison of rake face wear morphologies between traditional feed (a, c, e, g) and variable feed (b, d, f, h) with different milling time: (a, b) 4 min, (c, d) 8 min, (e, f) 10 min, and (g, h) 12 min

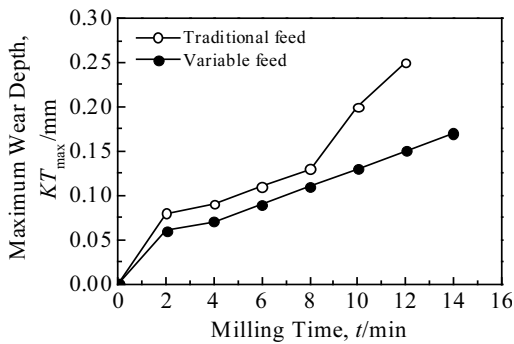


图 7 最大月牙洼切削深度随时间变化曲线

Fig.7 Maximum crater wear depth versus milling time

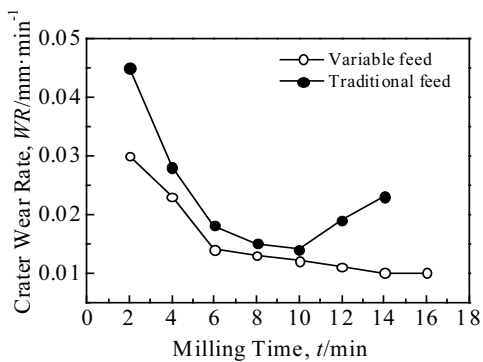


图 8 前刀面月牙洼磨损速率与切削时间的关系

Fig.8 Crater wear rate versus milling time

前刀面刀屑接触面积随时间的变化情况。可以看出，切削初期 4 min 时，变进给铣削的刀屑接触面积 5.35 mm²

明显大于常规进给铣削的 3.15 mm²；随着切削时间延长至 12 min 时，常规进给的刀屑接触面积逐渐增大为 5.3 mm²，而变进给刀屑接触面积 5.47 mm²无明显变化。

2.3.2 前刀面月牙洼磨损机理分析

切削温度高时，扩散磨损是刀具前刀面磨损的重要原因，并且扩散磨损引起的典型前刀面磨损形态就是月牙洼磨损。常规进给方式的铣削过程中，由于切削温度最高处通常位于刀刃前刀面刀屑接触处，因此前刀面月牙洼最大磨损深度位置通常位于刀屑接触区中心位置附近。切削过程中，切屑与刀具前刀面的摩擦作用对切削力、切削温度、刀具磨损等具有较大的影响。

试验所采用的 Ti(C, N)-Al₂O₃ 涂层硬质合金刀具的外层涂层是耐高温 Al₂O₃ 薄膜组织结构，具有较好的隔热作用，但 Al₂O₃ 断裂韧性较差。铣削过程中当冲击载荷强度大于涂层与基体间的结合强度时，开始

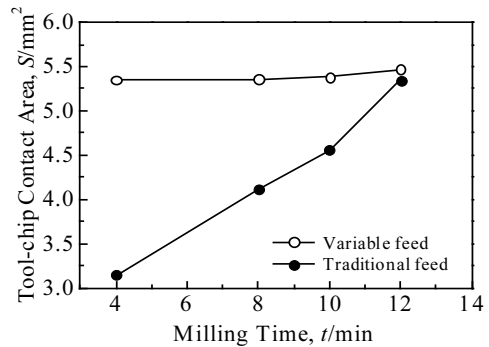


图 9 刀-屑接触面积随切削时间的变化

Fig.9 Tool-chip contact area versus milling time

出现微崩刃和 Al_2O_3 外涂层剥落，随后切屑直接作用于 $Ti(C, N)$ 涂层及基体。切屑形成过程可描述如下：当刀具和工件开始接触的最初瞬间，切削刃和前刀面在接触点挤压工件，使工件内部产生压力和弹性变形；随着切削运动的继续，切削刃和前刀面对工件材料的挤压作用加强，使工件材料内部的应力和变形逐渐增大，当应力达到材料屈服强度极限时，被切削层的金属开始沿剪应力最大的方向滑移，产生塑性变形。因此，随着每齿进给量的变化，前刀面刀屑接触长度也随之发生变化，月牙洼磨损中心的位置也会跟着发生相应的移动，如图 10 所示。随着每齿进给量增大，刀屑接触区域增大，刀具切削温度升高，前刀面切削温度最高处相对切削刃发生远离。因此，可以推断，每齿进给量与最高切削温度位置存在直接关系。每齿进给量变化影响着最高切削温度的位置，每齿进给量的变化顺序直接决定着最大切削温度位置变化顺序，进而决定着月牙洼磨损的最大深度和月牙洼位置。

通常，变进给铣削刀具的前刀面表现出均匀平整的磨损，这是由于刀-屑接触面的不断变化而形成的。铣削过程中，进给速度的变化不断改变着切屑在前刀面的作用位置，因此前刀面会呈现出较大的磨损面积；进给速度的变化顺序改变着刀屑接触点和刀屑接触长度，月牙洼磨损深度因此明显降低。对于 $Ti40$ 阻燃钛合金这种具有优异物理力学性能的材料，铣削过程的切削力和温度都较高，刀具刃部承受的切削力往往接近刀具材料的极限值，因此切削刃形状很小的变化也会在刀刃内部产生巨大的应力变化，从而导致破损现象的发生。变进给铣削方式中，刀具切削刃磨损均匀，

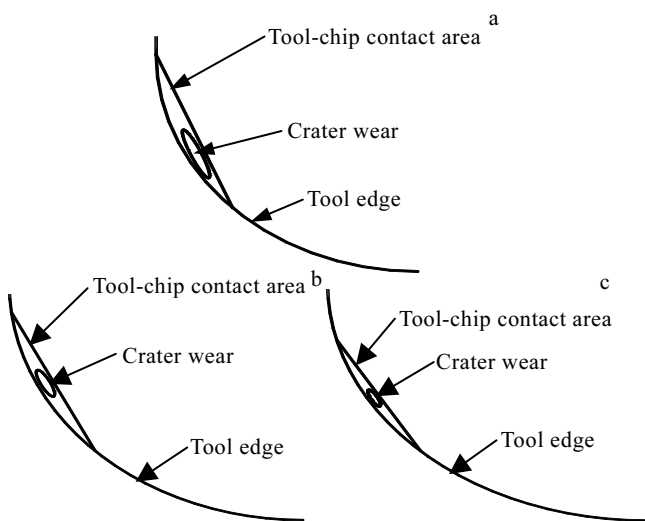


图 10 不同进给时月牙洼磨损位置的演变

Fig.10 Change of crater wear position with variable feed: (a) $f_z=0.11$ mm/z, (b) $f_z=0.10$ mm/z, and (c) $f_z=0.09$ mm/z

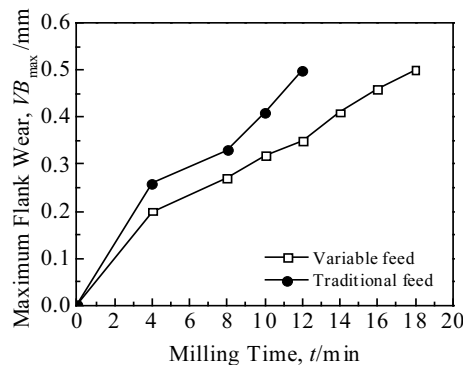


图 11 后刀面最大磨损随铣削时间的变化

Fig.11 Maximum flank wear versus milling time

使得刀刃在更长的时间内保持着更加完善的切削刃形状，避免了早期的崩刃和破损。由此可知，合适的变进给铣削能够显著延长刀具的寿命。

2.4 变进给铣削对后刀面磨损的影响

后刀面最大磨损曲线对比如图 11 所示。总的来讲，变进给铣削方式也可以显著降低后刀面磨损量，从而提高刀具耐用度。铣削时间为 4 min 时，常规进给和变进给铣削过程的后刀面磨损差异并不显著；铣削时间为 8 min 时，变进给铣削的后刀面磨损明显小于常规进给铣削；铣削 12 min 时，常规进给铣削刀具的后刀面出现了沟槽磨损和微崩刃，而变进给铣削未发生微崩刃现象，变进给铣削的后刀面最大磨损量 VB_{max} 相比常规进给铣削减少了 30% 左右。变进给铣削时的刀具耐用度为 18 min，相比常规进给铣削的刀具耐用度 12 min 提高了 50%。变进给铣削能够降低后刀面磨损的原因如前所述，主要在于改变了刀具磨损位置，使得刀具切削刃磨损均匀，确保刀刃在更长的时间内保持着更加完整的切削刃形状，避免了早期崩刃和破损。

3 结论

1) 通过变进给铣削和传统铣削的刀具磨损试验对比，结果表明正弦变进给铣削能更加有效地提高刀具耐用度，充分发挥刀具切削能力。

2) 运用曲面响应法，建立和验证了正弦变进给主要因素与刀具耐用度的关系模型，分析结果表明，变化幅值 a 对刀具耐用度的影响最大，其次是每步持续时间 τ ，变化周期 p 对刀具耐用度的影响结果最小；选用较小的变化幅值和较小的每步持续时间有利于提高刀具耐用度；选用较小的变化幅值和较高的变化周期有利于提高刀具耐用度。对各因素参数进行优化，当每齿进给量 f_z 变化幅值 a 为 11.72%，变化周期 p 为 120 s，每步持续时间 τ 为 5 s 时，刀具耐用度最高，

相比传统铣削提高幅度最大可达 33%。

3) 通过对正弦变进给铣削和传统铣削过程中刀具前刀面磨损的对比研究,发现正弦变进给铣削方式显著改变了刀具前刀面的月牙洼磨损形态,具体表现为刀屑接触面积增加,月牙洼数量增多,但磨损深度明显降低,从而增大铣削中刀具刃部的强度,提高了刀具耐用度。

参考文献 References

- [1] Su Y, He N, Li L *et al. Wear*[J], 2006, 261(7-8): 760
- [2] Kaynak Y, Karaca H E, Noebe R D *et al. Wear*[J], 2013, 306(1-2): 51
- [3] Sun Y, Huang B, Puleo D A *et al. Procedia CIRP*[J], 2015, 31: 477
- [4] Hong S Y, Markus I, Jeong W. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2001, 41(15): 2245
- [5] Hong S Y, Ding Y C. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2001, 41(10): 1417
- [6] Khan A A, Ahmed M I. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 196(1-3): 149
- [7] Rashid R A R, Sun S, Wang G *et al. International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2012, 63: 41
- [8] Rashid R A R, Sun S, Wang G *et al. International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2012, 63: 58
- [9] Balazinski M, Songmene V, Kops L. *CIRP Annals*[J], 1995, 44(1): 55
- [10] Klim Z, Ennajimi E, Balazinski M *et al. Wear*[J], 1996, 195(1-2): 206
- [11] Zhao Yongqing (赵永庆), Zhou Lian(周廉), Deng Ju(邓炬). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(2): 77
- [12] Zhao Yongqing(赵永庆), Zhao Xiangmiao(赵香苗), Zhu Kangying(朱康英) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1996, 25(5): 1
- [13] Lai Yunjin(赖运金), Zhang Pingxiang(张平祥), Xin Shewei(辛社伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(8): 2067
- [14] Han Yuanfei, Zeng Weidong, Zhao Yongqing *et al. Materials and Design*[J], 2010, 31(9): 4380
- [15] Sun Huanying(孙欢迎), Cao Jingxia(曹京霞), Wang Bao(王宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(11): 2351
- [16] Zhu Yanchun, Zeng Weidong, Zhang Fusheng *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 553: 112
- [17] Sun Huanying(孙欢迎), Cao Jingxia(曹京霞), Wang Bao(王宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(12): 2541
- [18] Lv Dongsheng, Xu Jiuhua, Ding Wenfeng *et al. Journal of Material Processing Technology*[J], 2016, 229: 641
- [19] Lv Dongsheng(吕东升), Xu Jiuhua(徐九华), Ding Wenfeng(丁文锋) *et al. Tribology*(摩擦学学报)[J], 2014(3): 268
- [20] Liu Yuqing(刘玉庆), Xu Jiuhua(徐九华), Ding Wenfeng(丁文锋) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013(14): 48

Tool Wear Characteristics in High Performance Milling of Ti40 Alloy Through Variable Feed Method

Lv Dongsheng¹, Xu Jiuhua², Fu Yucan², Ding Wenfeng²

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

(2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A method was presented for improving the cutting tool life by varying the feed throughout the milling process of Ti40 burn resistant titanium alloy. The model between tool life and the feed variation amplitude, period and step duration of the milling was constructed and the optimal feed variation parameters were selected. Experimental results show that the optimal sinusoidal feed milling parameters are 11.72% sinusoidal feed variation amplitude, with 120 s one period and 5 s incremental steps, which increase the cutting tool life by a maximum of 33%. In comparison with constant feed processes, variable feed milling changes the mechanism of the tool rake face by increasing the tool-chip contact area, changes the crater position and decreases the crater wear depth, thus strengthening the tool edge and increasing tool life.

Key words: Ti40 burn resistant titanium alloy; variable feed; milling; tool wear

Corresponding author: Lv Dongsheng, Ph. D., Lecturer, Research Department of Intelligent Manufacturing Equipment, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, P. R. China, Tel: 0086-25-86118993, E-mail: lds198688@126.com