

# 钛合金动态铣削力预测及其影响因素分析

## Dynamic Cutting Force Prediction and Analysis Influence for Milling Titanium Alloy

北京航空制造工程研究所 刘畅 王焱

**[摘要]** 建立动态铣削力模型,通过 TC4-DT 铣削试验确定铣削力系数,预测不同切削用量下钛合金瞬时铣削力,并分析了计算结果和影响因素,提出误差补偿方法,为钛合金薄壁件加工变形控制提供了理论基础。

**关键词:** 动态铣削力 铣削力系数 钛合金

**[ABSTRACT]** The instantaneous expression of milling force is established and the cutting force coefficients are determined by TC4-DT milling experiment. The results and factors of predicted forces with different milling parameters are analyzed and an error compensation method is given, which provides a theory for the deformation control of milling titanium thin-wall workpieces.

**Keywords:** Dynamic milling force Milling force coefficients Titanium alloy

### 1 铣削力预测的实际应用

钛合金具有比强度高、耐腐蚀和高温等特点,是制造部分航空结构件的首选材料,而且这些零件通常具有复杂的轮廓和几何外形,通过数控铣削来实现其粗、精加工。另一方面,钛合金强度高、导热性差、加工硬化严重,是典型的难加工材料,易导致刀具快速磨损或崩刃,如图 1 所示。由于弹性模量较低,钛合金构件在切削加工过程中容易变形,发生超差和过切现象。

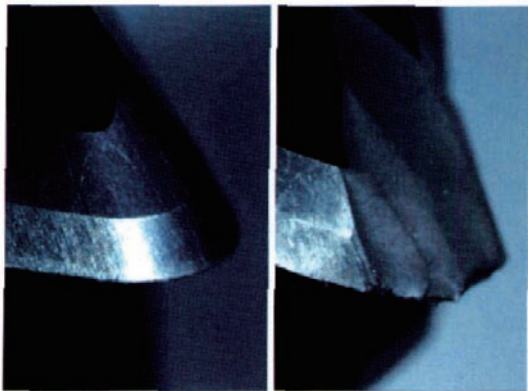


图1 硬质合金铣刀切削钛合金崩刃前后对比

Fig.1 Comparison of tool edge before and after breaking when milling titanium

为了解决以上问题,需要建立模型,仿真加工物理

过程。铣削力是反映刀具磨损、工件变形与铣削用量之间关系的重要参数,如图 2 所示。已知铣削力,可以确定机床功率、工件加工过程的几何变形和偏差、型腔的振动特性和强度要求、刀具和夹具设计方案以及实际加工系统<sup>[1]</sup>。在实际生产中,为了延长刀具寿命和减小加工误差,也需要对铣削力进行建模并选取合理的铣削参数将其控制在适当的范围内。

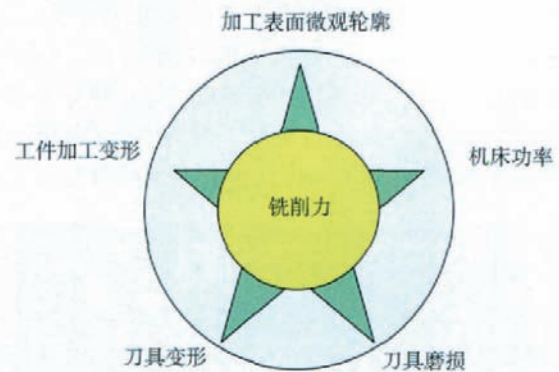


图2 铣削力反映的主要参数

Fig.2 Parameters responded by milling force

### 2 动态铣削力建模方法

铣削力建模通常采用 2 种方法:多元回归分析和微元切削力建模。对于切削力,通过回归分析可以得到相应的经验模型公式,该方法不用考虑切削的机理和材料去除过程,可以寻找出切削力和切削参数背后的数学规律。例如常用指数模型作为铣削力最大值模型:

$$F_{x,y,z,max} = C \cdot V^k \cdot f^l \cdot a_p^m \cdot a_e^n$$

其中,  $F_{x,y,z,max}$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三向铣削力的最大值,  $v$  为刀具转速,  $F$  为进给速度,  $a_p$  为铣削深度,  $a_e$  为铣削宽度,  $C$ 、 $k$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  为待定系数。对试验测定的多组数据进行拟合,可求出  $C$ 、 $k$ 、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  值,建立铣削力的一种数学表达式。但该模型存在 3 点缺点:

- (1) 该公式只能预测铣削力最大值,不能反映铣削过程中力随刀具运动的变化规律;
- (2) 为了保证拟合公式的准确性,需要采集多组试验数据;
- (3) 应用范围有限,无法解决与铣削机理相关的问题。

题,如分析刀具变形对铣削形貌的影响、建立铣削过程的有限元模型等。

针对上述问题,有必要对刀具切削材料的物理过程建立数学模型,本试验采用微元切削力建模方法对钛合金动态铣削力进行了预测。

立铣刀沿轴向可以被分为许多微小的切削层单元  $dz$ ,切向( $F_t(\phi)$ )、径向( $F_r(\phi)$ )和轴向( $F_a(\phi)$ )切削力被表示为变化的切削面积( $h(\phi)dz$ )和切削刃接触长度( $dz$ )的函数<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} dF_t(\phi) = [K_{tc}h(\phi) + K_{te}]dz \\ dF_r(\phi) = [K_{rc}h(\phi) + K_{re}]dz \\ dF_a(\phi) = [K_{ac}h(\phi) + K_{ae}]dz \end{cases}, \quad (1)$$

$\phi$  为铣刀齿切削时转过的角度,如图 3 所示。

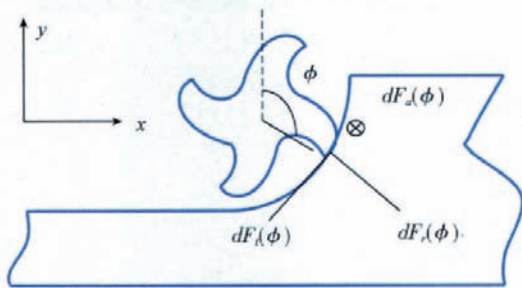


图3 铣削示意图  
Fig.3 Diagram of end milling

$F_t(\phi)$ 、 $F_r(\phi)$  和  $F_a(\phi)$  分别是切向、径向、轴向切削力,将它们投影到  $x, y, z$  坐标系有

$$\begin{cases} dF_x = -dF_t \cdot \cos \phi - dF_r \cdot \sin \phi \\ dF_y = dF_t \cdot \sin \phi - dF_r \cdot \cos \phi \\ dF_z = dF_a \end{cases}, \quad (2)$$

$h(\phi)$  为切屑厚度,随  $\phi$  变化而变化,如果近似认为铣刀齿外端运动的轨迹为圆弧,则

$$h(\phi) = f \cdot \sin \phi, \quad (3)$$

其中,  $f$  为每齿进给量,把铣刀刃看做空间螺旋线,将(1)、(3)式代入(2)式并将刀具参与加工的部分沿螺旋线积分便可求得  $x, y, z$  三向的瞬时铣削力。

$K_{tc}$ 、 $K_{rc}$  和  $K_{ac}$  分别为剪切作用对切向、径向和轴向切削力的作用系数,  $K_{te}$ 、 $K_{re}$  和  $K_{ae}$  是刃口力系数。切削力系数的确定是切削力解析和建模的重要研究内容,本课题对于特定的刀具和材料,通过试验方法标定这些系数,具体方法如下。

根据平均力的数学定义,每齿的平均切削力  $\bar{f}_q$  应为:

$$\bar{f}_q = \frac{1}{2\pi - 0} \int_0^{2\pi} F_q(\phi) d\phi, \quad q = x, y, z。$$

由于铣刀有  $N$  个刀齿,所以总铣削平均力为:

$$\bar{F}_q = N \cdot \bar{f}_q = N \frac{1}{2\pi - 0} \int_0^{2\pi} F_q(\phi) d\phi。$$

由于每个刀齿参与切削的范围为  $\phi_{st}$  到  $\phi_{ex}$ ,且齿间角  $\phi_p = 2\pi/N$ ,所以上式可改写为:

$$\begin{aligned} \bar{F}_q &= \frac{1}{\phi_p} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} F_q(\phi) d\phi, \text{ 即} \\ \left\{ \begin{aligned} \bar{F}_x &= \frac{Naf}{8\pi} [K_{tc} \cos 2\phi - K_{rc}(2\phi - \sin 2\phi)] + \\ &\quad \frac{Na}{2\pi} (-K_{te} \sin \phi + K_{re} \cos \phi) \Big|_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\ \bar{F}_y &= \frac{Naf}{8\pi} [K_{tc}(2\phi - \sin 2\phi) + K_{rc} \cos 2\phi] - \\ &\quad \frac{Na}{2\pi} (K_{te} \cos \phi + K_{re} \sin \phi) \Big|_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}, \\ \bar{F}_z &= \frac{Na}{2\pi} [-K_{ac} \cos \phi + K_{ae} \phi] \Big|_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}。 \end{aligned} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)的平均力可以改写为进给率  $f$  的线性函数形式,

$$\bar{F}_q = F_{qc} \cdot f + F_{qe}, \quad q = x, y, z。$$

固定铣削深度和  $\phi$ ,使用 Kistler 测力仪获得在不同进给率  $f$  下的动态铣削力,通过积分求得平均力  $\bar{F}_q$ ,刃口力的分量  $F_{qc}$ 、 $F_{qe}$  可以通过对这些数据线性回归得到,与式(4)对照,便可求得  $K_{tc}$ 、 $K_{rc}$ 、 $K_{ac}$ 、 $K_{te}$ 、 $K_{re}$  和  $K_{ae}$ 。

为了减小误差,  $\bar{F}_q$  采用如下方法获得,选取动态铣削力一段时间内的图像进行积分,再对该段时间的积分求算术平均值,如图 4 所示。

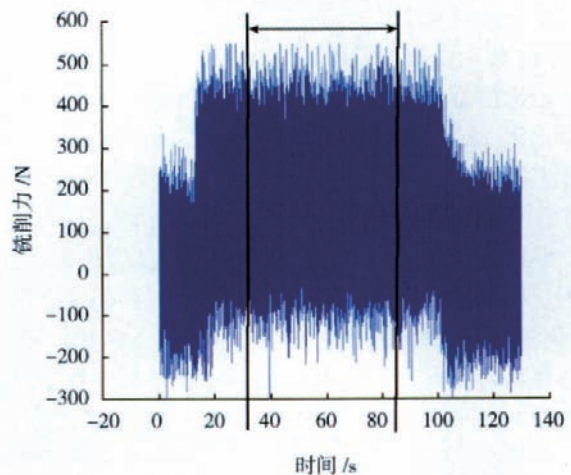


图4 对动态铣削力积分  
Fig.4 Integral of dynamic milling force

### 3 试验结果验证及分析

采用上述方法对 TC4-DT 钛合金进行铣削力建模后的预测值和实测值对比,如图 5 所示。

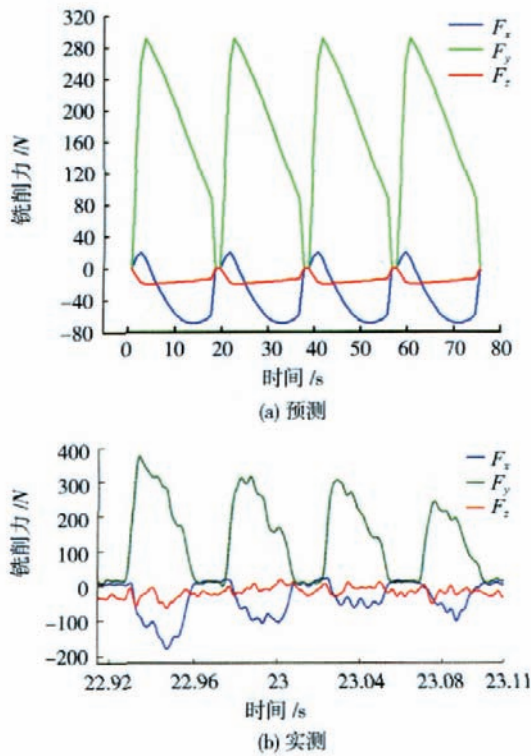


图5 动态铣削力图像对比  
 $(a_p=2\text{mm}, a_e=4\text{mm}, f=0.08\text{mm/齿}, v=20\text{m/min})$   
 Fig.5 Comparison of dynamic milling force  
 $(a_p=2\text{mm}, a_e=4\text{mm}, f=0.08\text{mm/齿}, v=20\text{m/min})$

计算所得的铣削力与实测值在变化趋势以及幅值大小等方面均基本吻合,可以为钛合金薄壁件加工误差补偿提供理论基础。

铣削力理论预测值与实测值相比存在误差,导致误差的主要因素有 3 点:

(1) 理论模型不完善。

理论模型只考虑到瞬时铣削力与被切除材料的体积成正比,未考虑铣削中铣削速度的变化和振动对铣削力产生的影响。

(2) 刀具偏心的影响。

理论上,铣削力周期为  $2\pi/N$ ,  $N$  为铣刀齿数,每齿切削过程完全一致。但在试验过程中,刀具的装卡以及系统刚度不能保证铣刀轴线完全垂直于进给方向,在切削时存在刀具偏心,在刀具旋转 360 度过程中每个刀齿受力都不相同。

由图 5 中可以看出:在 4 齿铣刀切削过程中,存在 4 个幅值不同、呈周期性变化的铣削力。由于铣削力系数是由若干周期铣削力的平均值计算得到,理论铣削力的峰值介于最大峰值和最小峰值之间。许多文献提出了铣削力建模中刀具轴线与理论轴线不重合的补偿方法,本研究将给出一种适用于实际生产的简单计算方法。

如图 6 所示,计算铣削力系数  $K_{tc}$ 、 $K_{rc}$ 、 $K_{ac}$ 、 $K_{te}$ 、 $K_{re}$  和

$K_{ae}$  时,选取受力较大刀齿的铣削力积分计算平均力,采用该方法的计算结果更接近实测铣削力的最大值,如图 7 所示。

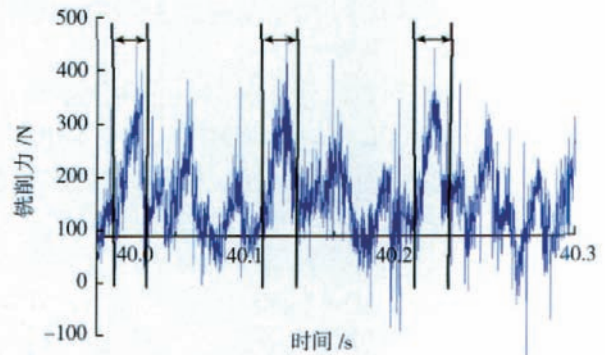


图6 计算受力最大刀齿的平均铣削力  
 Fig.6 Calculation of average milling force of tooth under maximal force

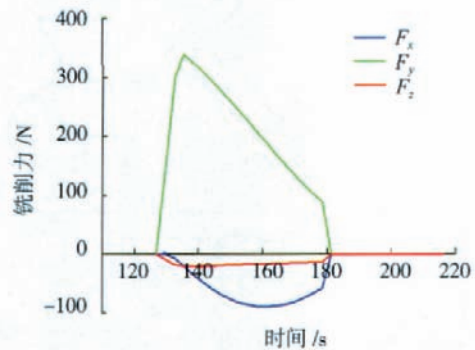


图7 补偿后的铣削力预测值  
 Fig.7 Predicted milling force after compensation

(3) 去噪方法。

试验测得的原始铣削力数据所含高频噪声较多,直接与原始信号进行比较困难较大,必须进行去噪处理。切削力信号受到许多未知参数的影响,不同的去噪方法得到的切削力信号也会有所差别。该试验利用了平滑滤波去噪的方法消除了高频噪声,但同时也可能扭曲切削力信号,使原始信号的某些特征被消除。

### 4 结论

本研究建立了钛合金 TC4-DT 动态铣削力模型,可以比较准确地预测铣削力的变化和幅值,为实现钛合金高精度加工、优化铣削参数提供了有效的理论依据。

### 参考文献

[1] Budak E, Altintas Y, Armarego E J A. Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(5): 216-224.  
 [2] Yusuf Altintas. 数控技术与制造自动化. 北京: 化学工业出版社, 2003. (责编 小城)