

钛合金振动攻丝刀具破损监测的研究

张德远 韩云台 陈鼎昌

(北京航空航天大学 707 教研室, 北京, 100083)

STUDY ON MONITORING OF TOOL BREAKAGE FOR VIBRATION TAPPING IN TITANIUM ALLOYS

Zhang Deyuan, Han Yuntai, Chen Dingchang

(Faculty 707 of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 对振动攻丝的力学模型进行了研究, 找出了钛合金振动攻丝刀具破损失效时的力学特征, 并建立了钛合金振动攻丝的振动控制、破损监测和报警停机的自动监控系统。

关键词 攻丝, 钛合金, 应力测量, 扭转振动

中图分类号 V261.2, TB535

Abstract Tapping small size thread in deep holes in titanium alloy is a very difficult technology in airplane manufacture. The primary problem is that the frictional torque in the flank face of the tap is very big and makes the tap break or rupture. Although we have improved this operation remarkably by vibration tapping technique, with continuously running the vibration tapping process, the tap teeth are worn gradually and it makes the tap break or rupture also. Therefore, this paper describes some new researches including the study of mechanics model for vibration tapping, the analysis of mechanics characteristic in tap failure, and the method to create an automated monitoring and control system used for vibration control, tap breakage detection and alarm.

Key words taps, titanium alloy, stress measurement, torsional vibration

对钛合金攻小深孔螺纹是较难加工的工序, 一般通过修磨丝锥, 选用适当的切削液, 靠经验丰富的工人手攻加工, 加工效率和丝锥寿命都很低。而采用振动攻丝方法可使丝锥寿命和加工效率大幅度提高^[1~4]。本文在解决了钛合金攻丝问题之后, 为了避免丝锥折断, 又对钛合金振动攻丝刀具破损特征进行了研究, 提出了通过检测相邻振动周期攻丝扭矩幅值的变化率, 可以在线监测振动攻丝的丝锥破损。为其在自动生产线上的应用创造了条件。

1 力学模型

1.1 攻丝扭矩的力学模型

振动攻丝是在丝锥回转方向附加一个扭转振动来进行攻丝, 扭转振动采用步进电机驱动主轴周期性正反转来实现, 扭转振动的角位移波形为三角波形。设丝锥的直径为 D , 回转角速度为 ω , 切削齿齿数为 Z , 齿宽为 b , 各切削齿的刃口圆角半径为 r , 前角为 0° , 一次后角为 0° , 二次后角为 α , 切削深度为 a_c 。实际上丝锥的多齿周向切削过程

1992年8月17日收到, 1992年12月7日收到修改稿

航空科学基金资助课题

相当于相同齿形(只是齿宽为 Zb)的单刃镗削过程。为便于分析,把丝锥的周向切削工艺系统抽象成图 1 所示的单自由度力学模型。图中 K 代表工艺系统在回转方向上的刚度($N \cdot m / (^\circ)$); M 为攻丝扭矩($N \cdot m$)。设工件是静止的, O 点代表步进电机转子回转运动的周向位置; O' 点代表丝锥回转运动中刀齿的周向位置; θ 代表转子的回转角位移; θ' 代表丝锥刀齿的回转角位移。 $o \rightarrow a \rightarrow c \rightarrow g$ 是步进电机转子的扭转振动角位移,但由于攻丝扭矩引起工艺系统扭转变形使丝锥刀齿扭转振动实际角位移沿着 $o' \rightarrow a' \rightarrow c' \rightarrow g'$ 。

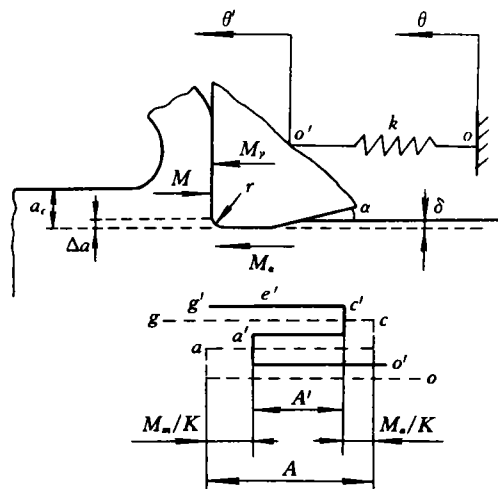


图 1 攻丝过程简化的力学模型

图 2 是振动攻丝扭矩变化的力学模型,模型中的斜线(其斜率等于系统刚度 K)代表刀齿运动方向突然改变或攻丝扭矩突然增大时刀齿与工件之间处于静摩擦状态,这时的攻丝扭矩 M 与转子的扭转角位移 $\theta(\theta = \omega t, t$ 为时间)成正比变化,即 $M = K\theta$ 。模型中的水平线代表刀齿相对工件匀速滑动或切削,这时的攻丝扭矩 M 基本不变。设每一振动周期中,刀齿的净前进角位移(切削金属层的长度)为 L_r ,刀齿最大后退角位移为 A 。即,

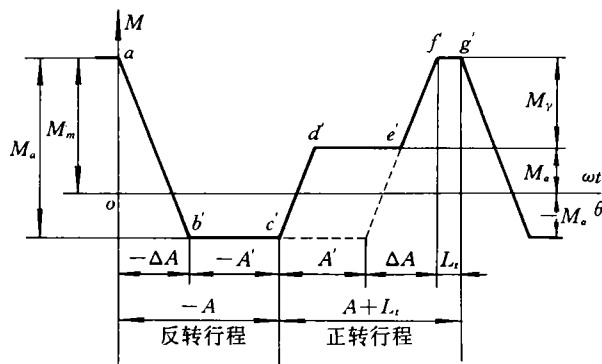


图 2 振动攻丝扭矩的力学模型

正转行程为 $L_r + A$, 反转行程为 $-A$ 。设刀齿切削金属层 a_c 时前刀面作用力引起的攻丝扭矩为 M_y , 后刀面作用的摩擦力引起的攻丝扭矩为 M_x 。即, 刀齿切削金属层时的攻丝扭矩峰值 $M_m = M_y + M_x$, 后退时(前刀面与工件分离)的攻丝扭矩谷值为 $-M_x$ 。于是, 丝锥的攻丝过程按图 1 和图 2 描述为, 刀齿切削 a_c 厚的金属层 L_r 角长度到达 a' 位置(此时 $M = M_m$, 系统正向扭转变形为 M_m / K)后, 转子开始反转, 丝锥不能马上反转, 而是等到正向扭转变形消除并产生一个克服后刀面摩擦扭矩 $-M_x$ 的系统反向扭转变形 $-M_x / K$ 时, 丝锥刀齿才开始从切削区分离。这时转子已经运动了 $\Delta A = (M_y + 2M_x) / K$ 的角位移。接着丝锥和转子一同转动, 分别到达 c' 角位置和 c 角位置时反转行程结束。丝锥刀齿实际从切削区分离的角位移量为

$$A' = A - (M_y + 2M_x) / K \tag{1}$$

然后转子又从 c 位置开始正转, 但丝锥不能马上正转, 而是等到系统反向扭转变形 $-M_x / K$ 消除并产生一个克服后刀面摩擦扭矩 M_x 的系统正向扭转变形 M_x / K 后, 丝

锥刀齿才开始相对工件正向滑动, 并逐渐接近切削层金属。正向滑动 A' 角行程后, 在 e' 位置刀齿前刀面重新接触到切削层金属。当攻丝扭矩从 M_x 逐渐增大到 M_m (系统正向变形从 M_x/K 增大到 M_m/K) 后, 刀齿又开始切削金属, 切削 L_f 长度后到达 g' 点。完成了一个振动周期的攻丝过程, 并形成了阶梯脉冲状攻丝扭矩波形。

1.2 丝锥破损的力学模型

对钛合金攻丝的主要特点是已加工表面弹性回复很大, 使刀齿后刀面产生很大的摩擦力。普通攻丝时很快就使个别刀齿或整个丝锥卡住, 引起崩刃或丝锥折断。振动攻丝(在 A 较大, L_f 较小的合理振动参数下)刀齿对已加工表面的往复熨压作用, 可以大幅度减小已加工表面的弹性回复, 显著地降低后刀面摩擦力, 而且是间断的瞬时的切削过程, 所以在刀齿磨钝前一般不会发生个别刀齿或整个丝锥卡死, 只有在刀齿磨钝后才会引起丝锥破损。振动攻丝扭矩的阶梯脉冲波形随丝锥刀齿的磨损而变化。图 3 所示, 把振动攻丝过程分为三个阶段

① 丝锥未磨损阶段(图 3(a))

刃口圆角半径 r 较小, 使熨压层厚度 Δa 及其被刀刃熨压后的表面回弹量 δ 都很小, 前刀面作用力形成的扭矩分量 M_y 和后刀面摩擦力形成的扭矩分量 M_x 都较小, 从而产生较大的分离量 A' , 形成低矮均匀的阶梯脉冲状扭矩波形。

② 丝锥正常磨损阶段(图 3(b))

刃口圆角半径 r 增大, Δa 和 δ 均加大, 使 M_y 和 M_x 逐渐增大, A' 逐渐减小, 从而形成较大峰值、较低谷值和较窄阶梯的脉冲波形, 并且随着丝锥磨损的加剧, 这种趋势逐渐增强。

③ 丝锥磨钝阶段(图 3(c))

刃口圆角变钝, 使刀齿的切削抗力, 尤其是后刀面摩擦力急剧增大, 以至在一个振动周期中最大系统正向变形(L_f+A)所能形成的正向抗扭矩 $K(L_f+A)$ 也无法使刀齿切削金属, 最大系统反向变形 $-A$ 所能形成的反向抗扭矩 $-KA$ 也无法使刀齿从切削区分离, 使刀齿相对工件静止。这时的扭矩脉冲波形无阶梯部分, 随攻丝过程的继续, 每增加一个振动周期, 系统正向变形就增加一个 L_f 角长度, 攻丝扭矩峰值 M_m 就有一个增量 KL_f , 谷值也

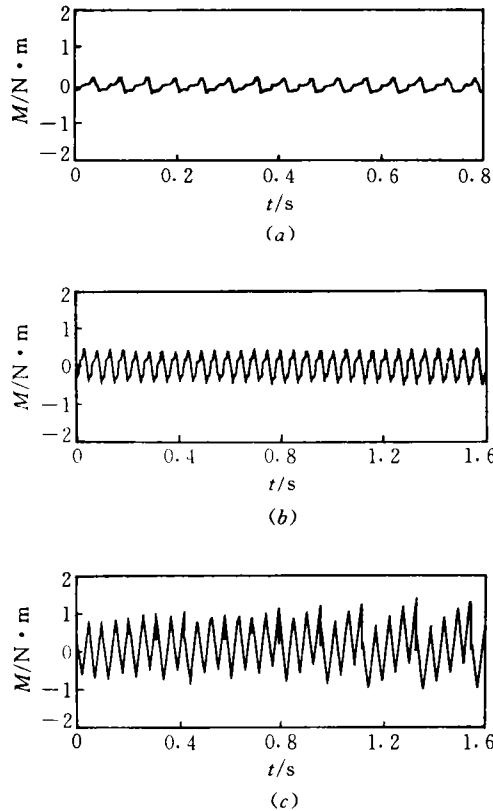


图 3 振动攻丝扭矩波形随丝锥磨损的变化

(a) 未磨损时的攻丝扭矩波形;

(b) 磨损时的攻丝扭矩波形;

(c) 磨钝时的攻丝扭矩波形

向上平移相同的量。增加到第 N 个 (N 值为静止累积脉冲数) 振动周期时, $M_m = K(NL_r + A)$ 。这个 M_m 值大到足以使刀齿能切削金属层 a_c 时, 由于这时刃口变凸, 所以一般产生挤裂切屑, 使刀齿切削 a_c 金属层过程中扭矩出现波动 (如图 3(c) 头几个脉冲中有的峰值处有波动)。这种最终能切削金属的静止累积脉冲数较小, 一般为 $N = 1 \sim 3$ 。由于这种挤裂切屑的冲击, 常常也伴随着微崩刃, 所以使刀齿很快进入失效状态, N 值进一步增大, 产生更大的系统累积变形抗扭矩 $K(NL_r + A)$, 以至使承受重载荷的刀齿崩刃。崩刃后攻丝扭矩将从最大峰值处突然下降 (如图 3(c) 后几个脉冲), 使积累的能量全部释放, 系统的扭转变形趋于零。接着又使刀齿进行新的系统变形累积, 扭矩峰值足够大后, 又使刀齿进一步破损。从而形成扭转方向上剧烈的冲击振动。如果继续进行, 很快使整个丝锥卡在孔中, 引起丝锥折断。

振动攻丝在每一振动周期中扭矩的变化幅值 (从峰值 M_m 到谷值 $-M_x$ 的差值) 为 $M_a = M_m + M_x$ 。在刀齿磨钝前, 攻丝扭矩幅值是连续缓慢变化的; 在刀齿磨钝引起崩刃时, 攻丝扭矩将从较大峰值跌入低谷值, 产生很大的扭矩幅值。但单从幅值的大小不易确定丝锥破损时的幅值门限值。为了找出一种无量纲的能反映出丝锥破损特征的物理量, 取相邻振动周期的两个扭矩幅值 $M_a[i-1]$ 和 $M_a[i]$ 的比值 (即扭矩幅值变化率) $K_m[i]$ 作为第 i 个振动周期的力学特征。即

$$K_m[i] = \frac{M_a[i-1]}{M_a[i]} \quad (2)$$

在刀齿磨钝前攻丝扭矩幅值缓慢变化, 使 $K_m[i] \rightarrow 1$; 在刀齿磨钝后只有在刀齿发生破损瞬间 $K_m \gg 1$, 其余的 $K_m \rightarrow 1$ 。当然, 振动攻丝过程中, 由于一些偶然因素 (如碰到硬质点, 机床振动等), 有时也会随机出现 $K_m[i] > 1$ 的情况, 但一般这种 K_m 值比刀齿磨钝引起破损时的 K_m 值要小得多, 适当确定一个大于 1 的门限值 K_{m0} 就可以滤出这些偶然因素的影响。为了进一步防止误判, 可采用判据: 为 n_0 个振动周期内出现 n 次 $K_m > K_{m0}$ 的振动周期, 则认为丝锥已发生破损。其算法如下

- ① 赋初值, 周期数 $i = 0$, 破损次数 $j = 0$;
- ② 求 $M_a[i] = M_m[i] + M_x[i]$;
- ③ 如果 $i > 0$, 则 $K_m[i] = \frac{M_a[i-1]}{M_a[i]}$;
- ④ 如果 $K_m[i] > K_{m0}$, 则 $m[j] = i$, $j = j + 1$;
- ⑤ $i = i + 1$, 如果 $j > n$, 则如果 $m[j-1] - m[j-1-n] \leq n_0$, 则报警, 否则转 ②。

2 丝锥破损监测试验

2.1 监测系统

如图 4 所示, 步进电机装在机床主轴上, 由单板机经功率放大来控制步进电机周期性地正反转。测力仪装在工作台上, 工件浸入蓖麻油中。测力仪输出的攻丝扭矩信号, 经

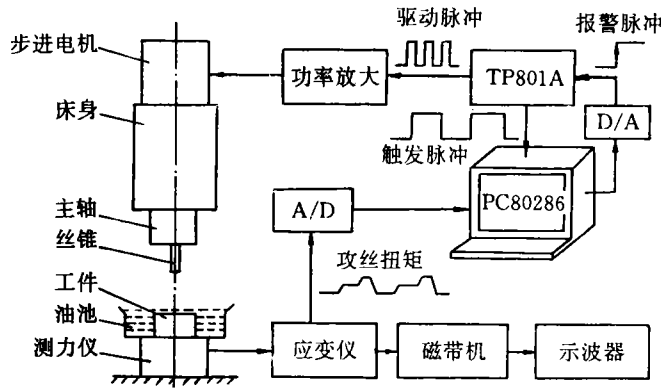


图 4 丝锥破损监控系统

应变仪放大和 A/D 转换采集到 PC 机进行计算。这种数据采集由单板机输出的触发脉冲来触发。触发脉冲的时序图如图 5 所示。为了克服电机转子和主轴的回转惯性，单板机在控制脉冲换向前加几个制动脉冲(图 5 中每次换向前加一个制动脉冲，即打剖面线的脉冲)。在开始发制动脉冲的同时，发出数据采集的触发脉冲(上升沿触发)。这样就可以采集到每一振动周期中攻丝扭矩的峰值 $M_m[i]$ 和谷值 $M_s[i]$ ，得出攻丝扭矩幅值 $M_a[i]$ 。

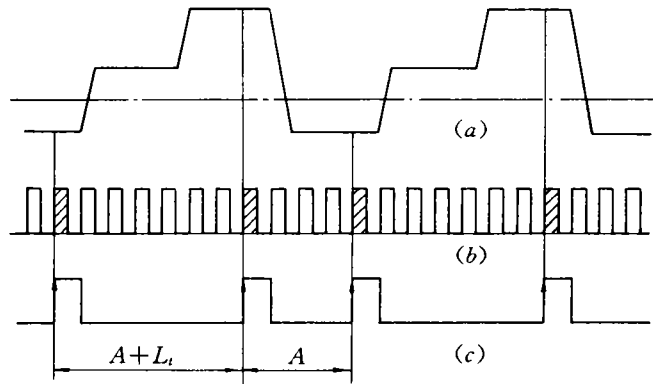


图 5 数据采集触发脉冲的时序图

(a) 攻丝扭矩; (b) 驱动脉冲; (c) 触发脉冲

2.2 试验结果

实验的工件材料为 TC4; 加工螺纹为 M3.5×0.6; 底孔直径为 3mm; 孔深为 15mm; 丝锥材料为高速钢; 振动参数为 $A=18 \times 0.75^\circ$ 、 $L_i=2 \times 0.75^\circ$ 、驱动脉冲频率 $F_0=870\text{Hz}$ 。图 6 与图 7 分别是正常振动攻丝过程中与丝锥磨钝后攻丝扭矩变化的峰谷值、幅值和幅值变化率的实测和计算结果。图中的横坐标 i 代表振动周期数。比较图 6 和图 7 的两组结果可以看出，正常攻丝过程的扭矩峰值和幅值较小且均匀; 而丝锥磨钝后的扭矩峰值呈大锯齿状波动，扭矩幅值明显增大，而且在破损瞬间扭矩幅值剧增。从扭矩幅值的变化率可以看出，正常攻丝过程中 $K_m \rightarrow 1$; 丝锥磨钝后只有在破损瞬间 K_m 明显大于 1，其余的 $K_m \rightarrow 1$ 。破损门限值 K_{mo} 的确定，本试验对 M3.5 的钛单面抽钉振动攻丝的振动参数优化结果⁽¹⁾，取 $A=18 \times 0.75^\circ$ 、 L_i 和 F_0 根据加工效率和攻丝扭矩匹配而定。这种在丝锥直径变化不大、 A 值恒定的情况下，破损瞬间的扭矩幅值变化率接近某一值。试验表明，丝锥破损时的扭矩幅值变化率一般在 1.6 以上，因此确定门限值 $K_{mo}=1.4$ 。在图 7(c) 中的 50 个振动周期中共出现了 6 个 $K_m > K_{mo}$ 的异常点。如果以 50 个振动周期中出现

3 个异常点为破损判据, 则可准确判定此时丝锥已经破损, 在第 3 个尖峰处就报警退出丝锥, 避免丝锥折断在孔中。其它振动攻丝条件(如大直径丝锥)下需作一些试验确定合理的 K_{m0} 值。但从理论分析来看大直径丝锥破损时的扭矩峰值会更大, 在同样 A 值下破损时的 K_m 值会更大, 所以采用 $K_{m0} = 1.4$ 也完全可以判断大直径丝锥的破损。

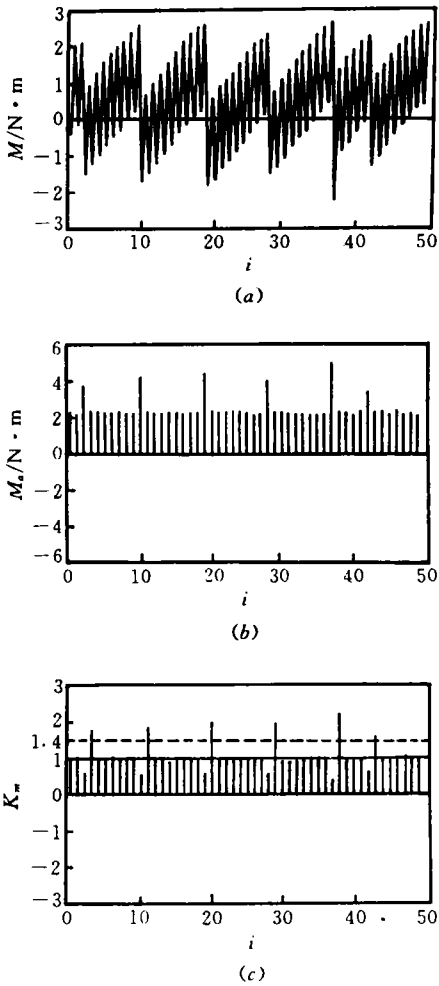
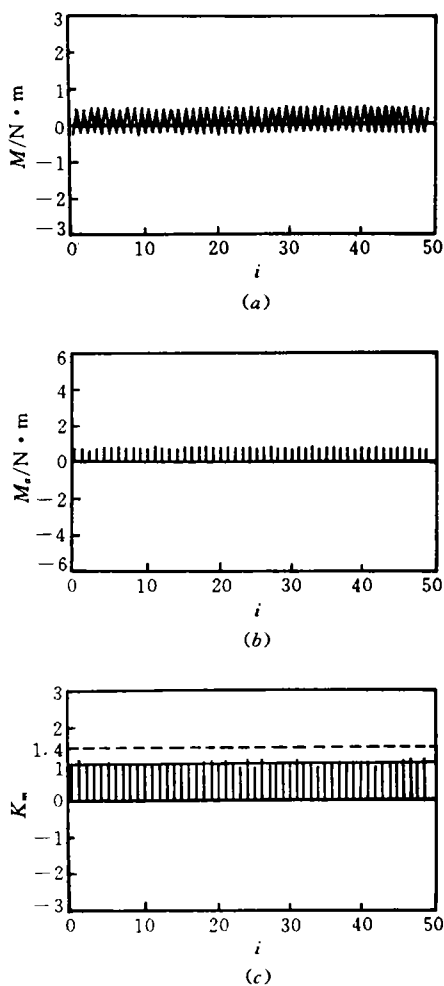


图 6 正常振动攻丝过程的攻丝扭矩

- (a) 扭矩峰谷值;
- (b) 扭矩幅值;
- (c) 扭矩幅值变化率

图 7 丝锥磨钝后的攻丝扭矩

- (a) 扭矩峰谷值;
- (b) 扭矩幅值;
- (c) 扭矩幅值变化率

3 结 论

- (1) 振动攻丝丝锥磨钝前的攻丝扭矩为阶梯脉冲波形。
- (2) 采用攻丝扭矩幅值变化率可以判断振动攻丝的丝锥破损。
- (3) 取阈值 $K_{mo}=1.4$, 能满足大多数振动攻丝丝锥破损监测的需要。
- (4) 采用单板机和 PC 机能够实现低频振动攻丝的实时控制和丝锥破损在线监测。

参 考 文 献

- 1 张德远, 陈鼎昌. 钛合金振动攻丝的工艺参数优化. 航空学报, 1992; 13(10): B571-B573
- 2 张德远, 陈鼎昌. 振动攻丝机的结构及其动特性的研究. 见: 航空科学基金办公室编. 航空科学基金论文集(2), 1992: G193-G198
- 3 隈部淳一郎, 立花亨. 精密振动ねじ立て. 精密机械, 1982; 48(8): 24-31
- 4 Patil S S, Pande S S, Somasundaram S. Some investigations on vibratory tapping process. International Journal Machine Tools Manufacture, 1987; 27(3): 343-350