

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.003

复合钻削刀具负载的建模与验证研究^{*}

李江连¹, 胡春美², 倪敬^{1*}, 张志霄¹

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江畅尔智能装备股份有限公司, 浙江 丽水 321404)

摘要:针对复合钻削刀具钻孔过程负载计算误差较大, 负载动态特性预测精度较低的问题, 对复合钻削的切削负载动态过程进行了研究。基于斜角切削理论, 针对主切削刃负载和倒角刃单元负载受力分析, 分别建立了主切削刃和倒角刃的等效切削模型。由于复合钻削过程的复杂性, 采用数学分析和经验值相结合的方法, 提出了钻削过程动态负载模型。同时考虑钻削过程中主轴径向跳动对切削性能的影响, 进一步优化了复合钻削负载模型。通过对复合刀具不同刃不同切削工况的负载叠加融合, 提出了复合钻削动态负载模型, 并进行了仿真和实验。结果表明, 考虑主轴径向跳动所建立模型相较于未考虑主轴径向跳动模型更能够准确地描述复合钻削刀具的动态负载特性, 其负载误差比未考虑主轴跳动的情况减小了10%。

关键词:复合钻削; 等效模型; 主轴径向跳动; 斜角切削

中图分类号:TH161; TG713⁺.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0224-06

Establishment and verification of compound drilling tool load model

LI Jiang-lian¹, HU Chun-mei², NI Jing¹, ZHANG Zhi-xiao¹

(Mechanical Engineering School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. CHR Intelligent Equipment Co., LTD., Lishui 321404, China)

Abstract: Aiming at the problem that the models of drilling force have big errors and could not accurately predict the dynamic load, the dynamic load of compound drilling was investigated. Based on the oblique cutting theory, the force of drilling was analyzed. The equivalent model of drilling force was established by analyzing the load of unit main cutting edge and chamfer edge. Because of the complexity of drilling process, the models of dynamics drilling torque were established by combination of math analysis and empirical data. Considering the effects of the spindle radial runout during the drilling, the model of drilling force was further optimized. By means of figuring up the load of the different cutting edge about compound cutting tool in the different operating condition, the dynamic load model of compound drilling can be established. Through the experiment and simulation, the results indicate that the model which was considered the spindle radial runout is more accurate than the model which was not considered the spindle radial runout to predict the the characteristic of dynamic compound drilling load. The error of the cutting load is less 10% than the result which was not considered the spindle runout.

Key words: compound drilling; equivalent model; spindle radial runout; oblique cutting

0 引 言

复合钻削加工技术被广泛应用于航空航天、兵器、电站和汽车零部件等精密加工制造领域。复合钻头参与的钻削负载受到钻头的几何形状的复杂性和切削过

程受到机床自身的震颤以及主轴的径向跳动^[1], 使其不易被测试监测和补偿, 一直是复合钻削加工精确化、高效化和稳定化实现中的难点^[2], 如何更详细地表示复合钻削的钻削过程中的负载特性, 减少钻削消耗, 提高复合钻削过程的稳定性和可靠性是钻削行业中亟待

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375129)

作者简介: 李江连(1990-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事钻削加工技术研究。E-mail: lijianlianhdu@163.com

通信联系人: 倪敬, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: nijing2000@163.com

解决的问题之一。因此,准确地建立钻削负载计算模型,对提高对孔的加工精度和刀具寿命,具有非常重要的理论与实际意义。

目前,国内外学者对钻削加工进行了大量的研究工作。Jian wu 等^[3]基于难加工材料提出了钻削的等效模型,该模型考虑其进给运动对刀具工作角度影响,并进行修正,但模型没有考虑其切削的整个过程。易格等^[4]基于平面表像理论和单元刀具线性综合理论提出了钻削功率模型,该模型该模型考虑了后刀面的切削的影响,以及钻芯刻画区,但是未考虑进给对工作角度的影响,其实验方案是基于车刀加工,所测得力与钻削有一定区别。黄若峰等^[5-6]基于斜角切削力模型,提出了任意曲线刃的钻削力模型,该模型忽略了横刃的刻画区,且利用近似的钻削力比例来分析受力。T. Matsumura 等^[7]提出了最小切削能量模型,考虑了流屑对切削力的影响,不足在于切削过程的渗透和钻头钻出时过程未进行分析。Ravi Shankar Anand 等^[8]提出了微孔钻削机理模型,该模型考虑了刀刃的半径和最小切削厚度的影响,不足点是未能体现出钻削力的动态性。Tooraj Arvajeht 等^[9]基于 Ulsoy^[10]的动态钻削模型,提出了新的弯曲振动模型,考虑了因扭矩振动作用带来的扰度再生作用,但该模型没有考虑其轴向力和径向力的影响。K. Ahmadi 等^[11]基于钻削的动态过程,提出了一个广义的稳态模型,该模型考虑了自振时刀具在轴向径向和扭矩上的扰度而引起的对切削厚度的再生影响,未考虑主轴跳动时对切削厚度的影响。然而,上述文献涉及的研究内容,一方面大都将刀刃与工件的切削作用稳态化分析,以得到钻削负载的经验模型,没有详细地考虑钻削的机理以及钻削负载的动态特性;另一方面忽略了主轴跳动对切削厚度的影响。因此,钻削负载特性的计算模型还有待于进一步研究。

本研究基于斜角切削模型,将复合钻削负载分为主切削刃负载和倒角刃负载进行分析,并对整个切削动态过程进行研究。笔者通过引入主轴跳动对整个钻削过程的影响,提出优化后的复合钻削模型。

1 钻削负载计算模型分析

1.1 负载分析

复合钻削的实际切削过程原理如图1所示。

钻削加工方式主运动为钻头旋转运动 n 和轴向运动为主轴横向的进给运动 v_f 进行切削材料。图1中,钻削负载分为两部分:沿着剪切方向的摩擦力 F_f 和垂直

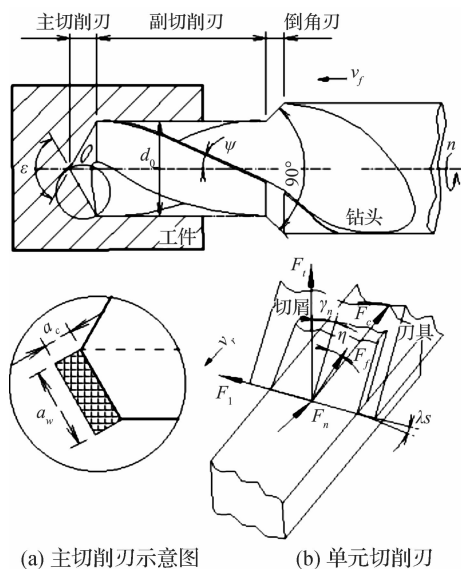


图1 钻削切削原理图

d_0 —钻头的直径, 2ε —钻头顶角

于前刀面的正压力 F_n 。摩擦力 F_f 包括:主切削刃的摩擦力 F_{f1} 和倒角刃的摩擦力 F_{f2} ;正压力 F_n 包括:主切削刃的正压力 F_{n1} 和倒角刃的正压力 $F_{n2}^{[12]}$ 。可以描述为:

$$F_n = \begin{cases} F_{n1}, 0 \leq t < T_1 \\ F_{n1} + F_{n2}, T_1 \leq t \leq T_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$F_f = \begin{cases} F_{f1}, 0 \leq t < T_1 \\ F_{f1} + F_{f2}, T_1 \leq t \leq T_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_1 —主切削刃刚接触工件开始到倒角刃刚接触工件所需的时间, T_2 —工件加工完成时间。

在钻削过程中,经大量的复合钻削加工实验研究发现:两个主切削刃和副刃以及倒角刃近似为对称分布,因此可以假设切削径向力为零;两个副切削刃有修刮孔壁的作用,即对孔壁有摩擦;钻削过程中由于存在主轴的跳动,使切削厚度会按一定的规律变化,切削过程中负载存在着波动;由于复合刀具加工的复杂性,对复合刀具的整体建模用来预测和预报钻削力有一定的必要。

因此,实际复合钻削切削负载不仅包含经典理论所述的稳态模型,还包括主轴跳动在钻削过程中的周期性变化的负载。基于上述特征,本研究将先从主切削单刃钻削负载建模,然后对倒角刃负载进行建模分析,建立复合刀具的钻削负载特性计算模型。

1.2 单主切削刃负载计算模型

在实际切削金属过程中,切削时的切屑变形并不是二维的,是三维切削。因此可以等效为斜角切削模型。单刃斜角切削模型中,选取主切削刃上的一个单元刀进行受力分析,如图1(b)所示。通过对钻头的主切削刃负载分析,可将负载 F_n 和 F_{n1} 分解为轴向力负载 F_t 径向力负载 F_r 和切向力负载 F_c 。

主切削刃的单元切削力由下式给出:

$$dF_c = \theta_a K_f A_c + \theta_b K_n A_c \quad (3)$$

式中: $\theta_a = (\sin\eta \sin\lambda_s + \cos\eta \cos\lambda_s \sin\gamma_n)$; $\theta_b = (\cos\lambda_s \cos\gamma_n)$; γ_n —主切削刃负载的法向前角, K_f —主切削刃切削时的摩擦力压强, K_n —主切削刃切削时的法向力压强, A_c —主切削刃切削时的切削面积。根据 Stable 经验准则, 当刃倾角 λ_s 的值不是很大时, 可近似认为其刃倾角 λ_s 与流屑角 η 相等。

钻头的主切削刃示意图如图 2 所示, 根据文献 [13], 对主切削刃几何特征的分析, 切削面积 A_c 可表示为:

$$A_c = a_c a_w = \frac{v_f \cos\lambda_s \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{2} dr \quad (4)$$

式中: v_f —每转的进给量, dr —主切削刃单元中点到钻头轴心的轴向半径。

复合钻削加工的过程中, 主切削刃切削工件时, 参与切削的刀刃宽度随着进给时间 t 的增加而增宽, 直到整个主切削刃全部参与切削。根据文献 [13], 参与切削的主切削刃部分的切削宽度由 $r(t)$ 表示, $r(t)$ 随时间 t 变化:

$$r(t) = \begin{cases} \sqrt{r_c^2 + \Delta^2 + 2\Delta \sqrt{r_c^2 - t_c^2}}, & r < \frac{d_0}{2} \\ \frac{d_0}{2}, & r \geq \frac{d_0}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta = tv_f \tan(\varepsilon/2)n/60$, r_c —横刃的半径, t_c —横刃厚度。

故主切削刃产生的扭矩可表示为:

$$M_1(t) = 2 \int_{r_c}^{r(t)} r dF_c \quad (6)$$

1.3 倒角刃负载计算模型

在钻削过程中, 钻头进给长度接近 L 时, 刀具除了主切削刃上进行切削外, 还需要对工件进行切削 45° 倒角, 倒角深度为 l , 倒角刃如图 2 所示。由于倒角刃和主切削刃切削过程具有相似性, 本研究对钻头的倒角刃单元负载分析^[14], 可将负载 F_{f2} 和 F_{n2} 分解为轴向力负载、径 F_{n1} 向力负载 F_{n1} 和切向力负载 F_{c1} , 计算公式如下:

$$dF_{c1} = \theta_1 K_{f1} A_{c1} + \theta_2 K_{n1} A_{c1} \quad (7)$$

式中: $\theta_1 = (\sin\eta \sin\lambda_{s1} + \cos\eta \cos\lambda_{s1} \sin\gamma_{n1})$; $\theta_2 = (\cos\lambda_{s1} \cos\gamma_{n1})$; λ_{s1} —倒角刃的刃倾角; γ_{n1} —倒角刃法向前角; K_{f1} —倒角刃切削时的摩擦力压强, K_{n1} —倒角刃切削时的法向力压强, A_{c1} —倒角刃切削时的切削面积。其中 A_{c1} 计算式如下:

$$A_{c1} = a_{w1} a_{c1} = \frac{v_f \sin\psi}{2} dr_1 \quad (8)$$

式中: a_{c1} —倒角刃的切削厚度, a_{w1} —倒角刃的切削宽度, ψ —螺旋角, dr_1 —倒角刃单元中点到钻头轴心的轴向半径。

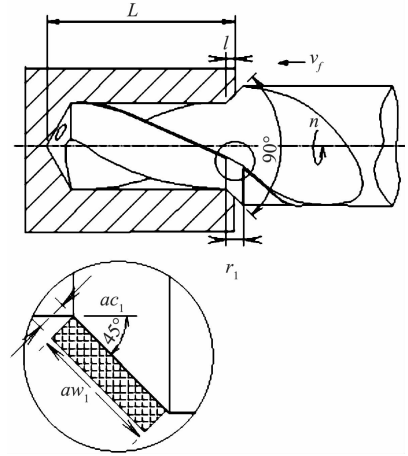


图 2 倒角刃示意图

基于钻削过程分析, 参与切削的倒角刃宽度也随着进给深度增加而增加。参与切削的倒角刃部分切削宽度由 $r_1(t)$ 表示, $r_1(t)$ 随时间 t 变化, 钻头的倒角刃示意图如图 2 所示。

$$r_1(t) = \begin{cases} \frac{tv_f \sin\Phi}{2}, & T_1 < t \leq T_2 \\ 0, & 0 \leq t < T_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: Φ —倒角角度, T_1 —主切削刃刚接触工件开始到倒角刃刚接触工件所需的时间, T_2 —工件加工完成时间。 T_1 和 T_2 表示如下:

$$T_1 = \frac{L-l}{v_f} \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{L}{v_f} \quad (11)$$

式中: L —钻削深度, l —倒角深度。

故倒角刃产生的扭矩可表示为:

$$M_2(t) = 2 \int_0^{r_1(t)} r_1 dF_{c1} \quad (12)$$

1.4 复合钻削优化模型

经大量实际钻削试验发现, 复合刀具在切削金属时由于钻削过程中转动的主轴存在一定的径向跳动, 使其负载并不是稳态状态^[15]。主轴跳动过程示意图如图 3 所示, 主切削刃由位置 $A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 A_9$ 做进给运动 v_f 。由于主轴跳动, 其实际位置为 $B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 B_6 B_7 B_8 B_9$ 。径向跳动对钻削过程的进给量产生变化, 继而影响其切削厚度, 使其产生具有波动的负载特性, 当切削刃在某一位置跳动时, 假设其跳动方

向的一条切削刃 BB_1 其进给量 f_1 增加,背离跳动方向的另一条切削刃 B_1B_2 进给量 f_2 减少,当主轴旋转 180° 后,其切削厚度变化刚好相反,即切削刃 BB_1 的进给量 f_1 减少,切削刃 B_1B_2 的进给量 f_2 增加。

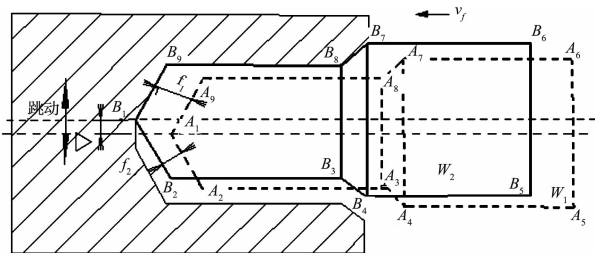


图3 主轴跳动过程示意图

由进给量 v_f 和主轴跳动 ∇ 的几何关系,主切削刃 BB_1 的切削厚度 a_{c2} 可表示为:

$$a_{c2} = \begin{cases} \left\{ \frac{v_f}{2} + \frac{\nabla}{\tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)} \right\} \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right), T_5 \leq t \leq T_6 \\ \left(\frac{v_f}{2} - \nabla \right) \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right), T_6 \leq t < T_7 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $T_5 = 2kT_4$, $T_6 = (2k+1)T_4$, $T_7 = 2(k+1)T_4$, k 为自然数, $k = 0, 1, 2, \dots$; ∇ — 径向跳动的变化量; T_4 — 主轴旋转 180° 所需时间,其 T_4 计算如下:

$$T_4 = \frac{30}{n} \quad (14)$$

式中: n — 主轴转速。

故可得,考虑其主轴跳动的主切削刃 BB_1 的扭矩负载为:

$$M_{11} = \int_{r_c}^{r_1(t)} \Lambda \cdot a_{c2} \cos \lambda_s r dr, 0 \leq t \leq T_2 \quad (15)$$

式中: $\Lambda = \theta_a K_f + \theta_b K_n$ 。

故另一条主切削刃 B_1B_2 的切削厚度 a_{c3} 可表示为:

$$a_{c3} = \begin{cases} \left(\frac{v_f}{2} - \nabla \right) \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right), T_5 \leq t < T_6 \\ \left\{ \frac{v_f}{2} + \frac{\nabla}{\tan\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)} \right\} \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right), T_6 \leq t \leq T_7 \end{cases} \quad (16)$$

考虑其主轴跳动的主切削刃 B_1B_2 的扭矩负载为:

$$M_{12} = \int_{r_c}^{r_1(t)} \Lambda \cdot a_{c3} \cos \lambda_s r dr, 0 \leq t \leq T_2 \quad (17)$$

由图3,可知当钻头由位置 w_1 运动到位置 w_2 时,由几何关系可知其倒角刃 B_7B_8 的进给量与主切削刃 BB_1 的进给量实际长度相等为 f_1 ,同理倒角刃 B_3B_4 进给量与主切削刃 B_1B_2 是相同的实际长度为 f_2 。

故由进给量 v_f 和主轴跳动 ∇ 的几何关系,倒角刃 B_7B_8 的切削厚度 a_{c4} 可表示为:

$$a_{c4} = \begin{cases} \left(\frac{v_f}{2} + \nabla \right) \sin \psi, T_5 \leq t < T_6 \\ \left(\frac{v_f}{2} - \nabla \right) \sin \psi, T_6 \leq t < T_7 \end{cases} \quad (18)$$

因此,考虑其主轴跳动的倒角刃 B_7B_8 的扭矩负载为:

$$M_{21}(t) = \int_0^{r_1(t)} \Lambda_1 \cdot r_1 a_{c4} dr_1, T_1 \leq t \leq T_2 \quad (19)$$

式中: $\Lambda_1 = \theta_1 K_{f1} + \theta_2 K_{n1}$ 。

倒角刃 B_3B_4 的切削厚度 a_{c5} 可表示为:

$$a_{c5} = \begin{cases} \left(\frac{v_f}{2} - \nabla \right) \sin \psi, T_5 \leq t < T_6 \\ \left(\frac{v_f}{2} + \nabla \right) \sin \psi, T_6 \leq t < T_7 \end{cases} \quad (20)$$

故考虑其主轴跳动的倒角刃 B_3B_4 的扭矩负载为:

$$M_{22}(t) = \int_0^{r_1(t)} \Lambda_1 \cdot r_1 a_{c5} dr_1, T_1 \leq t \leq T_2 \quad (21)$$

1.5 钻削负载计算模型

该复合钻削加工过程涉及主切削刃和倒角刃两部分切削,由于横刃长度很小^[16],故其负载可忽略不计。故钻削负载由两条主切削刃负载和两条倒角刃负载之和,钻削的扭矩负载 $M(t)$ 由主切削刃和倒角刃上的切向力产生,优化后的计算模型具体公式如下:

$$M(t) = M_{11}(t) + M_{12}(t) + M_{21}(t) + M_{22}(t), 0 \leq t \leq T_2 \quad (22)$$

2 实验系统和实验方案

2.1 实验机床及麻花钻

为了验证模型的有效性,本研究以 G-H041 型号钻削攻丝一体专机为实验平台。实验系统机床如图4所示,所示的钻削专机(弹簧钢板销钻攻丝一体专机),钻头为德国 GUHRING 硬质合金钻头^[17],主要参数如表1、表2所示。

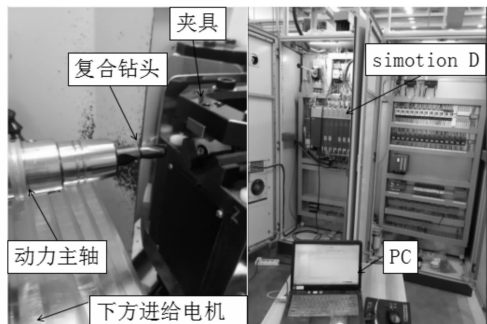


图4 实验机床和钻削实验系统

表 1 刀具几何参数

几何参数	参数值	单位
钻头直径 d_0	14.6	mm
横刃顶角 ε	120	°
横刃偏角 b_ψ	48	°
流屑角 η	20	°
螺旋角 ψ	45	°
横刃半径 r_c	0.5	mm
横刃厚度 t_c	0.12	mm
刀具长 L	26.0 ± 0.2	mm
倒角刃长 r_1	4	mm

表 2 主轴参数表

参数名称	参数数值	单位
主轴电机功率	3.7	kW
同步带减速比	1:1	
电机额定转速	3 000	r/min
电机最大转速	8 000	r/min

2.2 实验测试工况和仪器设备

复合钻削负载扭矩 M 由 SIEMENS 运动控制器 SIMOTION D 采集。SIMOTION SCOUT 软件提供了 Trace 工具,可以记录一组随时间变化的信号曲线。使用 Trace 工具的步骤如下:①选择要 Trace 的驱动器;②选择要 Trace 的信号参数;③设置 Trace 记录数据的采样时间;④设置 Trace 总时间长度;⑤选择 Trace 的触发条件;⑥开始 Trace。这里 Trace 的采样频率为 250 Hz,具体实验工况参数如表 3 所示。

表 3 实验系统参数表

参数名称	参数值	单位
进给速度 v_f	0.174	mm/r
主轴转速 n	2 100	r/min

2.3 实验材料

实验工件材质为 45#钢,其初始尺寸为 $\Phi 30.25 \times 155$,加工孔的尺寸为 $\Phi 14.6 \times 33$ 。此外根据参考文献 [18]可知,复合钻削工件材料性能如表 4 所示。

表 4 实验材料参数

参数名称	参数值	单位
硬度	229	HBS
屈服强度	0.589	GPa
伸长率	16	%
冲击韧性	0.49	MJ/m ²

3 实验及结果分析

笔者根据本研究提出的复合钻削负载模型和钻削实验方案进行了仿真及实验分析,钻削实验做 10 组,由于每组的实际钻削负载曲线具有相同的规律,笔者

抽取一组典型的曲线作为研究对象。具体采用的仿真参数如下: $\Phi = 45^\circ, \eta = 20^\circ, \lambda_s = 18.8^\circ, \lambda_{s1} = 0^\circ, K_n \approx K_{n1} = 770.89, K_f \approx K_{f1} = 400.45, l = 2 \text{ mm}, L = 33 \text{ mm}, \nabla = 0.03 \text{ mm}$ 。实验和仿真结果如图 5、图 6 所示,横坐标为钻削时间,纵坐标为钻削扭矩,图中的曲线沿时间轴分为 4 个阶段,包括钻削初始阶段、主切削刃完全切削阶段、倒角刃倒角阶段和结束阶段。

由图 5、图 6 的复合钻削负载特性曲线可以得到:

(1)考虑主轴径向跳动对复合钻削的影响。由图 5 分析可得:①在主切削刃刚切削的初始阶段,扭矩逐渐增大,主要是因为此时的主切削刃参与切削的宽度逐渐增大;②在主切削刃完全切削阶段,主切削刃完全参与切削,切削刃宽度不变,扭矩呈现出波峰波谷的交替变化;③在倒角刃参与切削时,因为这时主切削刃和倒角刃同时参与切削,且在倒角过程中倒角刃逐渐变长,故扭矩负载再次呈现逐渐上升增大趋势;④结束阶段,主切削刃和倒角刃都不参与切削,故负载变为零。实线为钻削实验结果,最大钻削扭矩 M 在倒角结束前值为 $9.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,曲线呈现先逐渐上升,然后进入相对平稳期,再次逐渐上升后减小的趋势,且为波峰波谷交替变化的曲线。虚线表示考虑了主轴跳动的仿真计算结果,最大仿真钻削扭矩负载 M 为 $9.0 \text{ N} \cdot \text{m}$,且同样呈现出波峰波谷的交替变化,与实验负载数据相比具有较好的吻合度,其最大误差从图中可知存在于主切削刃刚完全参与钻削时,误差为 13.7%,其余切削阶段的负载误差均小于 10%。主要误差原因有以下 3 个方面:首先切削建模过程中忽略了横刃对负载的影响,而使仿真值偏小;其次该模型未考虑副切削刃对孔壁的刮削作用会使其建模负载结果存在偏小;最后,由于机床自身存在震颤,导致切削厚度发生变化,导致实验负载结果偏大。

(2)未考虑主轴径向跳动的影响。从图 6 中看出最大误差同样呈现于初始切削阶段和完全切削阶段的交界处,分析可得误差为 23.7%,其余切削阶段的误差小于 20%。其仿真的曲线没有负载波动,而实验得到的切削力负载有着明显的波动,但其整个负载变化趋势与实验结果有着一致性。

(3)优化模型对钻削负载计算的准确性和可靠性。在复合钻削过程中^[19]通过对比图 5 和图 6 的仿真和实验结果,可知考虑其主轴跳动对钻削负载影响较大,考虑其影响后的计算模型能有效的减少其计算负载误差,提高钻削负载的计算精度,相较于未考虑主轴跳动的负载模型,其误差缩小了 10%,说明了主轴跳动是影响计算模型误差较大的主要因素。

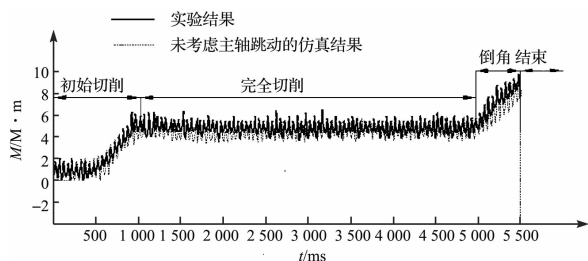


图5 考虑主轴跳动的钻削负载曲线

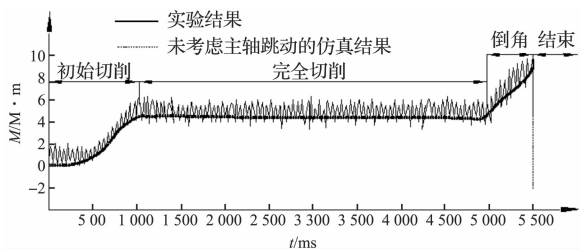


图6 未考虑主轴跳动的钻削负载曲线

4 结束语

(1)本研究综合考虑了复合钻削的整个动态过程,针对主轴跳动现象提出了切削厚度周期变化的特性,并建立了钻削负载特性模型。

(2)本研究将复合钻削分为主切削刃切削和倒角刃切削,针对不同的切削刃分别建立切削模型,从而提高了钻削负载的计算精度。钻削的动态特性主要取决于参与切削的切削刃长度、主轴径向跳动和主轴的转速。

(3)仿真与试验结果表明,本研究建立的钻削负载特性模型具有较好的计算精度和稳定性,可为实际钻削加工中复合钻头参数优化和刀具设计及主轴选型提供良好的技术指导。

参考文献 (References):

- [1] 王慧荣. BAT 深孔钻削力学特性及钻杆稳定性研究[D]. 太原:中北大学机械工程学院,2015.
- [2] 彭厚良. 控制钻孔位置精度的探讨[J]. 机电工程技术, 2016,43(5):18-20.
- [3] WU Jian, WEN Jian-min, WANG Zi-yue. Study on the predicted model and experiment of drilling forces in drilling Ti6Al4V[J]. *Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2016,38(2):465-472.

- [4] 易 格. 双曲面麻花钻的刃磨参数及螺旋沟槽结构参数节能优化[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2013.
- [5] 黄若峰. 麻花钻前刀面曲线发生线节能优化设计[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2014.
- [6] 王 可,张善进,孙兴伟. 麻花钻钻削工艺参数对钻削性能影响的研究[J]. 机械,2015,42(5):64-66.
- [7] MATSUMURA T, LEOPOLD J. Cutting force model for analysis of burr formation in drilling process[J]. *Verlag Berlin Heidelberg*,2010,834(1-4):47-53.
- [8] ANAND R S, PATRA K, STEINER M, et al. Mechanistic modeling of micro-drilling cutting forces[J]. *Adv Manuf Technol*,2016(1):1-14.
- [9] ARVAJEH T, ISMAIL F. Machining stability in high-speed drilling-Part 1: Modeling vibration stability in bending[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006,46(12-13):1563-157.
- [10] ULISOY A G, TEKINALP O. Dynamics modeling of transverse drill bit vibration[J]. *Annals of CIRP*,1984,33(1):253-258.
- [11] AHMADI K, ALTINTAS Y. Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2013,68(3):63-74.
- [12] LEE J, GOZEN B A, OZDOGANLAR O B. Modeling and experimentation of bone drilling forces[J]. *Journal of Biomechanics*,2012,45(6):1076-1083.
- [13] LAZAR M B, XIROU CHAKIS P. Mechanical load distribution along the main cutting edges in drilling[J]. *Journal of Material Processing Technology*. 2013,213(2):245-260.
- [14] CHYAN H C, EHMANN K. F. Curved helical drill-points for micro-hole drilling[J]. *Proc. Instn Mech. Engrs Part B: Journal of Engineering Manufacture*,2002,216(1):61~75.
- [15] 熊良山. 麻花钻刃形优化与刃磨方法的研究[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2006.
- [16] KARIMI N Z, HEIDARY H. Critical thrust and feed prediction models in drilling of composite laminates[J]. *Composite Structures*,2016,148(1):19-26.
- [17] REY P A, LEDREF J. Modelling of cutting forces in orbital drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2016(1):1-14.
- [18] 吴建. 典型难加工材料钻削相关技术的基础研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2010.
- [19] 陈书琼. 一种唇模斜水孔钻削及孔找正方法[J]. 包装与食品机械,2016(4):70-72.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李江连,胡春美,倪 敬,等. 复合钻削刀具负载的建模与验证研究[J]. 机电工程,2017,34(3):224-229.

Li Jiang-lian, Hu Chun-mei, NI Jing, et al. Establishment and verification of compound drilling tool load model[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(3):224-229.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>