

# 电镀金刚石线锯锯切轨迹的研究

张辽远, 褚桂君, 慕丽

(沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 基于冲量理论和振动加工理论, 对电镀金刚石线锯锯切过程进行了分析, 并对锯切过程中各个阶段的接触状态进行了有限元计算, 得出在稳定接触状态下应力沿工件宽度方向分布均匀的结论。结合电镀金刚石锯切实验, 采用叠加原理建立了锯切轨迹的数学方程, 得到了轨迹计算曲线。通过与实际切割轨迹形貌的对比, 计算曲线和实际轨迹曲线之间的误差小于 15%, 吻合程度较高, 为金刚石线锯锯切工艺参数的优化提供了参考依据。

**关键词:** 机械制造工艺与设备; 电镀金刚石线锯; 锯切轨迹; 应力分析; 轨迹方程

**中图分类号:** TG669      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2011)05-0607-06

## Research on the Sawing Trajectory of Electroplated Diamond Wire Saw

ZHANG Liao-yuan, CHU Gui-jun, MU Li

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China)

**Abstract:** The cutting process of electroplated diamond wire saw was researched based on impulse and vibration machining theories. From the finite element calculation of different contact states in the cutting process, it is shown that the cutting stress is uniformly distributed along the direction of the workpiece width in a steady state. The mathematical equation of sawing trajectory was established using a superposition principle through the cutting experiment of diamond wire saw, and the trajectory curve was calculated using the equation. The trajectory curve difference between the theoretical and the calculated is less than 15%. The result will be provided the theoretic basis for optimizing the cutting process parameters of diamond wire saw.

**Key words:** machinofature technique and equipment; electroplated diamond wire saw; sawing trajectory; stress analysis; trajectory equation

## 0 引言

近年来电镀金刚石线锯发展迅速, 在硬脆材料加工中应用越来越广泛, 促使人们更加重视其锯切机理和加工过程的研究。为了提高电镀金刚石线锯的加工质量和生产效率<sup>[1]</sup>、降低成本, 锯切时选用合理的工艺参数<sup>[2]</sup>, 本文在理论分析及实验的基础上分析了锯切时的受力情况, 研究电镀金刚石线锯

的锯切轨迹, 给出了切片的实验结果, 并对实际加工参数的选择提出建议。

## 1 电镀金刚石线锯锯切轨迹分析

### 1.1 电镀金刚石线锯锯切过程

电镀金刚石锯丝是有一定弹性的连续体<sup>[3]</sup>, 由两导向轮(间距  $L$ ) 定位, 在加工过程中不会产生折点。因此, 开始锯切时线锯(张力  $F_{tc}$ ) 和工件(宽度

收稿日期: 2010-07-26

基金项目: 辽宁省创新团队项目(2008T164)

作者简介: 张辽远(1962—), 男, 教授。E-mail: zly6217@tom.com

b) 只在局部的棱角处相接触<sup>[4]</sup>,随着加工的进行,接触点变成切割线,最后形成一条连续光滑的加工曲线<sup>[5-6]</sup>。同样切割抗力也分为两种状态:一是切割开始后切割抗力逐渐增加的过渡状态;二是切割抗力总是保持固定值的稳定状态,如图 1 所示。在过渡状态下,切割负荷(切割力)集中作用于工件端部,工件中心部分则处在几乎无切割力作用的状态。因此,工件只有端部处在被削掉状态,线锯开始发生挠曲(挠曲角  $\theta_1, \theta_2$ )。但是,当挠曲量增加到一定程度时,工件中心也开始受到切割力的作用。最后整个切割区域都受到均匀切割力的作用,这种状态为稳定状态<sup>[7]</sup>。达到稳定状态后,线锯的挠曲量也会稳定下来,切割抗力总是保持固定值的稳定状态,切割便以定速进行。

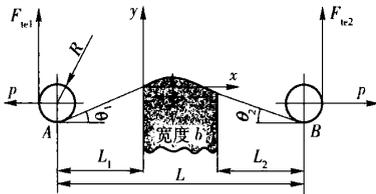


图 1 线锯模型

Fig. 1 Wire saw model

## 1.2 电镀金刚石锯丝受力

把金刚石锯丝假设成一条连续的弹性线如图 1, 取出一段微量分离体  $A'B'$  进行受力分析, 如图 2 所示。图中  $r$  为  $A'B'$  段的曲率半径,  $F$  为线锯拉力。由于锯丝直径很小, 故其所受的重力可以忽略。

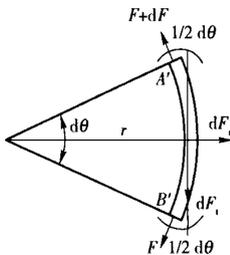


图 2 金刚石锯丝受力分析

Fig. 2 Diamond wire saw stress analysis

$A'B'$  段锯丝所受工件的径向力为

$$dF_r = F \sin \frac{d\theta}{2} + (F + dF) \sin \frac{d\theta}{2}. \quad (1)$$

因为  $d\theta$  很小, 故  $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$ ,

$$dF_r = F \cdot d\theta + \frac{1}{2} dF \cdot \theta, \quad (2)$$

式中  $\frac{1}{2} dF \cdot d\theta$  为高阶无穷小, 可以忽略, 则

$$dF_r = dF \cdot d\theta. \quad (3)$$

设单位长度的锯丝对工件的压力为  $dp$  (称为单位线压力), 则锯丝对工件的压力为

$$dF'_r = dp \cdot r \cdot d\theta. \quad (4)$$

由于  $dF_r$  和  $dF'_r$  大小相等, 方向相反, 则由 (3) 式、(4) 式得

$$dp = dF/r. \quad (5)$$

若在加工过程中, 锯丝上某点对工件的线压力  $dp$  大于其它点, 则在该点处加工速度加快, 线锯曲率半径变小, 从而使线锯上该点对工件材料的线压力  $dp$  减小, 直至和相邻点处的相等。加工开始阶段就是这种情况的特例。由以上讨论可知, 电镀金刚石线锯工作曲线稳定的必要条件是锯丝上各点的线压力  $dp$  都相等, 即在加工的任一瞬时:

$$dp = \frac{dF}{r} = c, \quad (6)$$

式中  $c$  为常量。

在锯切过程中, 锯丝上各点所受拉力  $F$  并不相等, 在锯丝松边  $F$  值较小, 而从松边到紧边,  $F$  将随锯丝接触弧长的增加而增加。此外, 锯丝曲率半径变化大的部位  $F$  值增加的也大, 如图 3 所示,  $OC$  为渐开线基圆半径。由此可知: 开始锯切时由于锯丝和工件只在局部的棱角处相接触, 其应力很大, 切割速度较快。随着切割的进行, 接触弧线的长度增加, 应力逐渐减小, 最后达到稳定的状态, 应力分布均匀, 形成一条连续光滑的曲线。

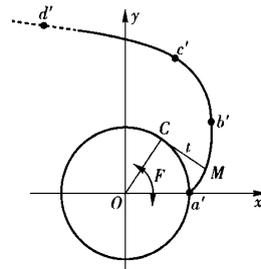


图 3 线压力与接触半径的关系

Fig. 3 Relationship between line pressure and contact radius

## 1.3 电镀金刚石线锯锯切轨迹的受力

首先对锯丝在稳定状态下因切割抗力产生的应力进行解析, 建立切割加工时的模型<sup>[8]</sup>, 通过考虑工件切割部分的力平衡, 求出线锯的切割轨迹。

由 1.2 节可知切割抗力沿工件宽度方向产生了

均布负荷,将切割力  $F_n$ 、 $F_t$  分别设为沿工件宽度方向作用的均布载荷  $F_{ni}$ 、 $F_{ti}$ ,从  $F_n$  到  $F_{ni}$  使用(7)式。从  $F_t$  到  $F_{ti}$  也同样处理。

$$\begin{cases} F_{ni} = \frac{F_n}{b}, \\ F_{ti} = \frac{F_t}{b}. \end{cases} \quad (7)$$

图 4 为图 1 中切割部分的放大模型,以锯丝和工件开始接触的部位为原点,取水平方向为  $x$  轴、铅直方向为  $y$  轴,线锯接触工件的任意点  $(x, y)$  的张力和挠曲角分别设为  $F_{te}$  和  $\theta$ 。另外,锯丝的形状、接触工件和滑轮的部分为曲线状;除此之外则为直线。如果考虑任意点  $(x, y)$  的  $x$  轴方向、 $y$  轴方向的力平衡,则可分别用(8)式、(9)式表示。

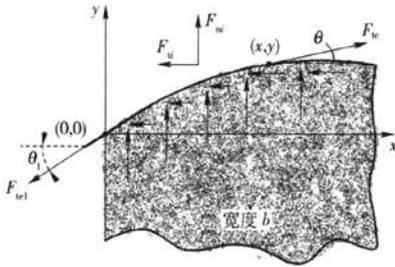


图 4 锯丝受力模型

Fig. 4 Load model of saw wire

$$F_{te1} \cos \theta_1 + F_{ti} \cdot x = F_{te} \cos \theta, \quad (8)$$

$$F_{te1} \sin \theta_1 + F_{ni} \cdot x = F_{te} \sin \theta. \quad (9)$$

由(8)式、(9)式,可按(10)式求出锯丝在任意点  $(x, y)$  的倾角,因此可按(11)式求出锯丝的挠曲量  $y$ :

$$\frac{F_{te1} \sin \theta_1 + F_{ni} \cdot x}{F_{te1} \cos \theta_1 + F_{ti} \cdot x} = \tan \theta = \frac{dy}{dx}. \quad (10)$$

由(10)式在工件宽度  $b$  上积分得

$$y = \frac{F_{ni} F_{te1} \cos \theta_1 + F_{ti} F_{te1} \sin \theta_1}{F_{ti}^2} \ln (F_{te1} \cos \theta_1 + F_{ti} \cdot x) - \frac{F_{ni}}{F_{ti}} x - \frac{(F_{ni} F_{te1} \cos \theta_1 + F_{ti} F_{te1} \sin \theta_1)}{F_{ti}^2} \ln (F_{te1} \cos \theta_1). \quad (11)$$

由曲线可知:在其它条件一定时张力  $F_{te}$  在一定范围内增大,曲线的直线度越好,包角越小。曲线直线度高的地方在工件宽度的中间部分,工件越宽,直度相对长度越大,而夹持位置可以使直线度高的部

位发生偏左或者偏右的移动。在加工中可以对这些误差进行补偿,提高切割精度。

#### 1.4 电镀金刚石线锯锯切过程的有限元计算

##### 1.4.1 电镀金刚石线锯有限元模型的建立

由于电镀金刚石线锯锯丝建模复杂,而仿真只是验证切割过程中应力的变化情况,故锯丝模型简化为光滑的金属丝。简化后模型<sup>[9-10]</sup>简单直接用有限元软件 ANSYS11.0 直接建立模型。

按照 ANSYS 的要求,对锯丝定义如下材料属性:杨氏模量  $E = 2.2 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\mu = 0.28$ ,质量密度  $\rho = 7.8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。工件的材料属性:杨氏模量  $E = 2.5 \times 10^3$  MPa,泊松比  $\mu = 0.21$ ,质量密度  $\rho = 4.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。

工件的单元类型选用弹性结构空间问题中使用比较广泛的 SOLID45 体单元;锯丝选用 SOLID92 体单元。由于整个模型为轴对称的实体模型,从提高精度的方面考虑和网格划分要求,锯丝采用自由网格划分,前期工件采用映射网格划分,后期采用自由网格划分。

根据实验的实际装夹要求,在锯丝两端施加  $x$ 、 $y$  位移约束, $z$  方向施加力约束  $F$ (限制锯丝  $x$ 、 $y$  自由度,保留  $z$  自由度(每个节点有 3 个自由度)。工件在侧面上施加  $z$ 、 $y$  位移约束, $x$  方向施加力约束  $p$ 。为保证工件各点位移沿  $x$  方向一致,在侧面上进行耦合自由度约束。

##### 1.4.2 电镀金刚石线锯锯切仿真结果

有限元仿真通过图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)、图 5(d)4 个子阶段来模拟整个锯切过程的应力分布变化情况,锯切过程的仿真结果如图 5 所示。图 5(a)是锯切的开始阶段,锯丝刚接触工件表面,此时锯丝和工件的端部点接触,曲率半径很小(即图 3 中  $a'$ ),相同张力  $dF_{te}$  的作用下,应力  $dp = dF_{te}/r$  很大,主要集中在端部呈点状分布,挠曲量  $y$  开始出现;图 5(b)阶段是将图 5(a)段应力达到材料破碎极限的地方去除后得到的状态,即锯丝与工件端部的点接触变为弧线接触如图 3 中  $b'$ ,曲率半径变大,应力  $dp = dF_{te}/r$  分布呈短线条状,挠曲量  $y$  开始积累;图 5(c)阶段是加工过渡状态与稳定状态的转变阶段,接触弧长进一步加大(如图 3 中  $c'$ ),曲率半径进一步变大,应力  $dp = dF_{te}/r$  分布平缓呈长线条状,挠曲量  $y$  进一步积累;图 5(d)阶段是稳定阶段,工件中心也开始受到切割力的作用(如图 3 中  $d'$ ),应力  $dp = dF_{te}/r$  趋向于定值,应力分布均匀,挠曲量  $y$  基本稳定,切割达到稳定状态。