

超声 ELID 复合磨削磨削力模型研究

赵波 刘折 郑友益 卞平艳

(河南理工大学机械与动力工程学院,焦作 454000)

文 摘 以 ELID 电解原理为基础,结合超声振动辅助磨削过程中单颗磨粒的运动学分析,建立了超声 ELID 复合磨削条件下的磨削力数学解析模型,并对模型进行了分析和仿真。对模型的分析表明:超声振动改变了磨粒的运动轨迹,使同等条件下的未变形切屑厚度减小,砂轮的在线电解修整使磨粒始终处于锋锐状态,而且影响砂轮的实际切削深度,进而对磨削力产生影响。磨削力随着超声振动频率、振幅、电解电压、脉冲比、电解液电阻率的增大而减小;随着切削深度、工件速度的增大而增大。

关键词 磨削,超声振动,ELID,磨削力,模型

中图分类号:TG663

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.005

Grinding Force Modeling for Ultrasonic ELID Composite Grinding

ZHAO Bo LIU Zhe ZHENG Youyi BIAN Pingyan

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000)

Abstract Based on electrolytic principle and the kinematics analysis for single abrasive grit with ultrasonic vibration, the mathematical model of grinding force for ultrasonic ELID composite grinding is proposed. The analysis and simulation are conducted to the model. The analysis of the model shows that: ultrasonic vibration changes the motion trajectory of the abrasive grains, and the undeformed chip thickness is reduced under the same conditions. The in-process dressing of grinding wheel maintains the abrasive grits in the fengrui state, but also affects the actual depth of cut of the grinding wheel. All that will impact on the grinding force. The grinding force decreases with the increase of ultrasonic vibration frequency and amplitude, the electrolysis voltage, the pulse ratio, the electrolyte resistivity, and increases as the depth of cut, the workpiece speed increases.

Key words Grinding, Ultrasonic vibration, ELID, Grinding force, Mode

0 引言

工程陶瓷因其强度高、耐高温、耐磨损、耐腐蚀而广泛应用于机械、电子、宇航、汽车、冶金、化工等领域。然而由于工程陶瓷硬度和脆性极高,成形加工十分困难,其加工成本达整个陶瓷元件成本的 80% ~ 90%。因此,如何高效地获得超精密的加工表面,降低加工成本一直是该领域亟待解决的主要问题^[1]。

目前在硬脆材料的精密超精密制造方面,应用较多的是 ELID 镜面磨削和超声精密加工技术。ELID 镜面磨削技术虽然能获得超精密的加工表面,但其加工效率较低,成本较高。文献[2-3]表明,在硬脆材

料的加工中引入超声波振动,不仅能够大幅度提高磨削效率,而且能有效地改善陶瓷磨削表面质量。因此,将超声振动辅助磨削技术与 ELID 磨削技术相复合,形成一种多工艺复合的高效镜面加工技术将可能在高效的同时获得超精密的加工表面,大大降低硬脆材料的加工成本。

目前,将超声振动辅助磨削技术与 ELID 磨削技术相结合的相关文献很少,仅台湾海洋大学游祥志采用超声复合 ELID 磨削碳钢,获得一定范围内加工表面粗糙度几乎不受切削深度影响的规律^[4],然而,仅是做了一些简单的实验,并没有对复合条件下的磨削

收稿日期:2013-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(E51175153)

作者简介:赵波,1956 年出生,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术、硬脆材料精密超精密与特种加工研究。E-mail:zhaob@hpu.edu.cn

机理进行深入研究。本文在对 ELID 电解原理以及单颗磨粒运动轨迹分析的基础之上,结合现有磨削力模型,建立了超声 ELID 复合磨削条件下的磨削力数学解析模型,并对模型进行了分析和仿真。

1 超声 ELID 复合磨削技术的实现

超声 ELID 复合磨削技术是将超声振动辅助磨削与 ELID 砂轮在线电解修整技术相复合的高效精密加工方法。如图 1 所示,金属结合剂砂轮在作轴向高频振动的同时,还充当着电解池的阳极,实现砂轮的在线电解修整。该复合技术充分发挥了超声振动辅助磨削高质高效以及 ELID 超精密加工的优点,是一种新的高效超精密加工技术。

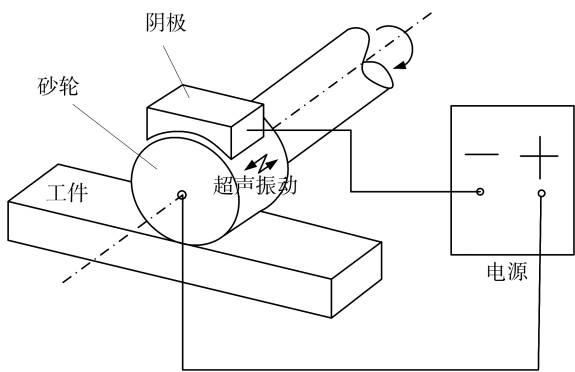


图 1 超声 ELID 复合磨削装置示意图

Fig.1 Schematic illustration of ultrasonic ELID composite grinding

2 超声 ELID 复合磨削磨削力模型的建立

2.1 磨削力的组成分析

磨削力主要由切屑变形力和摩擦力两部分组成,单颗磨粒的法向和切向磨削力可表示为

$$\begin{cases} F_{gn} = F_{gnc} + F_{gns} \\ F_{gt} = F_{gtc} + F_{gts} \end{cases} \quad (1)$$

式中, g 表示单颗磨粒, n 和 t 分别表示法向和切向, c 和 s 分别表示力的性质是切屑变形力和摩擦力。

由文献[5]可知,磨削过程中由摩擦引起的法向力和切向力分别为

$$\begin{cases} F_{gns} = S\bar{p} \\ F_{gts} = \mu S\bar{p} \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 为单颗工作磨粒的顶面积, \bar{p} 为磨粒磨钝平面与工件表面之间的平均接触压力,与材料硬度有关, μ 为摩擦因数。

此时,磨削力的表达式可写为

$$\begin{cases} F_n = F_{nc} + F_{ns} = F_{nc} + N_1 S\bar{p} \\ F_t = F_{tc} + F_{ts} = F_{tc} + N_1 \mu S\bar{p} \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_1 为磨削过程中的有效磨粒数。

欲求磨削力 F_n 和 F_t 还需求出切屑变形力 F_{nc}

和 F_{tc} 以及磨削过程中的有效磨粒数 N_1 。

2.2 切屑变形力 F_{nc} 和 F_{tc}

轴向超声振动单颗磨粒运动轨迹如图 2 所示。

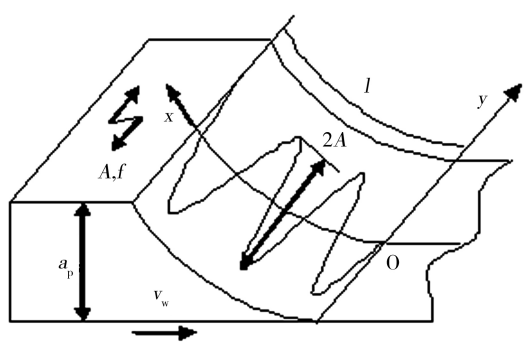


图 2 轴向超声振动单颗磨粒运动轨迹

Fig.2 Cutting trace of a single abrasive grains in axial direction with ultrasonic vibration

由简谐振动特点,单颗磨粒的运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = (v_s + v_w)t \\ y = A\sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

消去时间 t , 得

$$y = A\sin\left(\omega \frac{x}{v_s + v_w} + \varphi\right) \quad (5)$$

则,在接触弧长 l 内,单颗磨粒的运动路线长度

$$\begin{aligned} l_s &= \int_0^l \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx \\ &= \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2A\pi f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w}x + \varphi\right) \right]^2} dx \end{aligned} \quad (6)$$

磨削过程中单位时间内去除材料的体积为

$$V_c = a_p b v_w \quad (7)$$

a_p 为实际切削深度, b 为砂轮与工件的接触宽度, v_w 为进给速度。

单位时间内参加切削的磨粒数:

$$N = M b v_s \quad (8)$$

式中, M 为单位面积磨粒数, v_s 砂轮线速度。

则单颗磨粒去除材料的体积为

$$V_g = \frac{v_c}{N} = \frac{a_p v_w}{M v_s} \quad (9)$$

可得单颗磨粒的平均切削横断面积为

$$S = \frac{V_g}{l_s} = \frac{a_p v_w}{M v_s \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2A\pi f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w}x + \varphi\right) \right]^2} dx} \quad (10)$$

根据平均切削断面面积理论,作用在单颗磨粒上的法向磨削力与切屑横断面面积成正比,即:

$$F_{gnc} = K S \quad (11)$$

式中, K 为系数(常数)

如果只考虑切削作用于磨粒前面的法向力而忽略切屑与磨粒的摩擦力,并假定磨粒为圆锥形,按几何关系有^[6]:

$$\frac{F_{gnc}}{F_{gtc}} = \frac{4}{\pi} \tan\theta \quad (12)$$

式中, θ 为磨粒半顶锥角。

所以,

$$F_{gtc} = \frac{\pi K S}{4 \tan\theta} \quad (13)$$

将(10)式带入(11)式和(13)式可得单颗磨粒的法向和切向磨削力

$$\left\{ \begin{aligned} F_{gnc} &= \frac{K a_p v_w}{M v_s \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2A\pi f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w} x + \varphi\right) \right]^2} dx} \\ F_{gtc} &= \frac{\pi K a_p v_w}{4 \tan\theta M v_s \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2A\pi f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w} x + \varphi\right) \right]^2} dx} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

在整个接触弧段上的切屑变形力为

$$\left\{ \begin{aligned} F_{nc} &= N_1 F_{gnc} = M b l F_{gnc} \\ F_{tc} &= N_1 F_{gtc} = M b l F_{gtc} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

将(14)式带入(15)式,可得

$$F_{nc} = \frac{K b l a_p v_w}{v_s \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2\pi A f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w} x + \varphi\right) \right]^2} dx} \quad (16)$$

$$F_{tc} = \frac{\pi K b l a_p v_w}{4 \tan\theta v_s \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2\pi A f}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w} x + \varphi\right) \right]^2} dx} \quad (17)$$

2.3 磨削过程中的有效磨粒数

假设在磨削过程中为有效磨粒的条件为:

- (1) 磨粒由结合剂和氧化膜共同束缚;
- (2) 磨粒下端露出氧化膜表面。

图3为ELID磨削过程中砂轮表面示意图。

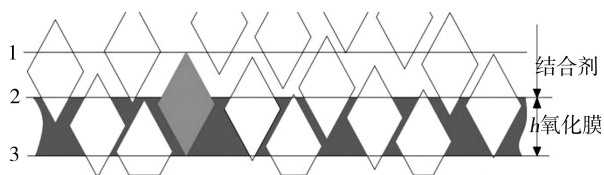


图3 砂轮表面示意图

Fig. 3 Schematic illustration of wheel surface

图3中灰色磨粒下端刚刚不露出氧化膜下表面,上端与1线相接触,处于临界状态,所以只要磨粒上

顶端在1线和2线之间即满足假设条件。

设磨粒的体积分数为 V_m , 磨粒直径 d , 氧化膜厚度 h , 砂轮宽度 b , 接触弧长 l , 弧段内有效磨粒数 N_1 , 单位体积磨粒数 N_v , 砂轮直径 D , 半径 R 。

假设磨粒为球形,则:

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 N_v = V_m \quad (18)$$

则,

$$N_v = \frac{6V_m}{\pi d^3} \quad (19)$$

假设磨粒在砂轮中均匀分布,那么可以认为磨粒顶端在砂轮中也是均匀分布,所以只要求出介于1线和2线之间砂轮的体积(有效体积 V_y)即可求得有效磨粒数。

有效体积为:

$$V_y = [\pi(R-h)^2 - \pi(R-d)^2] \frac{bl}{\pi D} \quad (20)$$

有效磨粒数为:

$$N_1 = N_v V_y = \frac{6V_m}{\pi d^3} \frac{bl}{D} (D-h-d)(d-h) \quad (21)$$

2.4 ELID 对实际磨削深度的影响

在ELID磨削过程中,砂轮的修整是靠金属结合剂的电解作用,而金属结合剂的电解又会影响砂轮的实际切削深度,进而影响工件的形状精度,所以有必要计算砂轮的实际磨削深度。

由法拉第电解定律^[7]可知

$$\frac{dV_v}{dt} = \eta \frac{MI}{zF\rho} \quad (22)$$

式中, V_v 为去除金属结合剂的体积, t 为有效电解时间, η 为电流的效率, M 为金属结合剂的分子量, z 为金属元素的化合价, ρ 为金属结合剂的密度, F 为法拉第常数。

则去除金属结合剂的体积为

$$V_v = \eta \frac{MIt_e}{zF\rho} \quad (23)$$

阳极溶解厚度:

$$l_e = \eta \frac{MIt_e}{zF\rho A_a} \quad (24)$$

式中, A_a 为阳极部分进行传导的有效区域面积。

根据欧姆定律

$$I = \frac{U}{R} \quad (25)$$

R 由电解液电阻 R_e 和氧化膜电阻 R_o 决定。

$$R_e = \frac{\rho_e h_e}{A_e} \quad (26)$$

$$R_o = \frac{\rho_o h}{A_e} \quad (27)$$

式中, ρ_e 为电解液电阻率, h_e 为极间间隙, ρ_o 氧化膜电阻率, h 氧化膜厚度, A_e 阴极有效面积。

将(26)、(27)式带入(25)式

$$I = \frac{U}{R} = \frac{UA_e}{\rho_e h_e + \rho_o h} \quad (28)$$

将(28)式带入(24)式可得

$$l_e = \eta \frac{Mt_e}{zF\rho A_a} = \frac{\eta Mt_e UA_e}{zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h)} \quad (29)$$

$$F_n = \frac{Kbl[zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h)a'_p - \eta Mt_e UA_e]v_w}{v_s F\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h) \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2\pi Af}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w}x + \varphi\right) \right]^2} dx} + \frac{6v_m}{\pi d^3} \frac{bl}{D}(D-h-d)(d-h)S\bar{p} \quad (31)$$

$$F_t = \frac{\pi Kbl[zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h)a'_p - \eta Mt_e UA_e]v_w}{4\tan\theta v_s zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h) \int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2\pi Af}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w}x + \varphi\right) \right]^2} dx} + \mu \frac{6v_m}{\pi d^3} \frac{bl}{D}(D-h-d)(d-h)S\bar{p} \quad (32)$$

3 关于模型的几点分析

(1)由模型的建立过程可知,式中的第一项为材料的切屑变形力,第二项为砂轮磨钝引起的摩擦力。磨削力随着超声振动频率、振幅、电解电压、脉冲比、电解液电阻率的增大而减小;随着切削深度、工件速度的增大而增大。

(2)超声振动改变了磨粒的运动轨迹,使同等条件下的未变形切屑厚度减小,进而使磨削力减小。砂轮的在线电解修整使磨粒始终处于锋锐状态,还影响砂轮的在线实际切削深度,进而对磨削力产生影响。

(3)氧化膜的厚度对有效磨粒数有很大影响,氧化膜越厚,有效磨粒数越少,抛光能力越强,氧化膜薄,则有效磨粒数多,抛光性能差。

(4)超声振动主要影响切屑变形力,由式(16)可知,无超声振动时的切屑变形力为:

$$F'_{nc} = \frac{Kbl[zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h_o)a'_p - \eta Mt_e UA_e]v_w}{v_s zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h_o)l} \quad (33)$$

由此可知,同等条件下,无超声振动时的切屑变形力与附加超声振动时切屑变形力的关系为:

$$\frac{F'_{nc}}{F_{nc}} = \frac{l}{\int_0^l \sqrt{1 + \left[\frac{2\pi Af}{v_s + v_w} \cos\left(\frac{2\pi f}{v_s + v_w}x + \varphi\right) \right]^2} dx} \quad (34)$$

所以,可得磨削深度为

$$a_p = a'_p - l_e = a'_p - \frac{\eta Mt_e UA_e}{zF\rho A_a(\rho_e h_e + \rho_o h)} \quad (30)$$

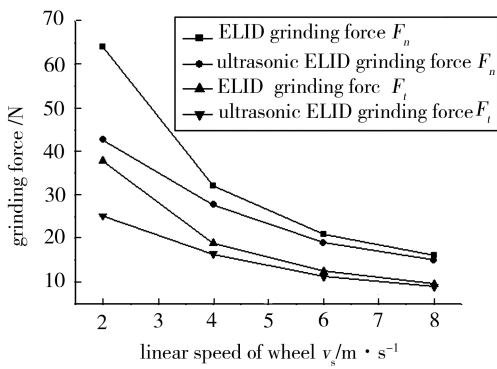
式中, a'_p 为名义磨削深度。

2.5 磨削力模型的建立

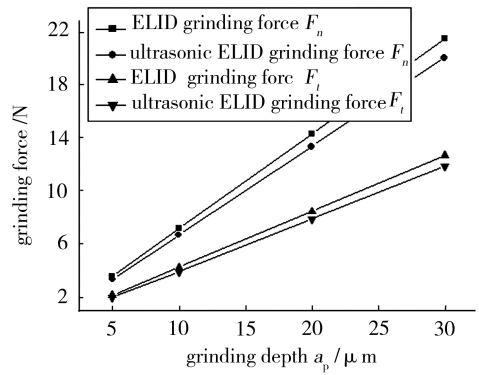
将(16)、(17)、(21)式带入(3)式,并将(30)式带入,可得超声 ELID 复合磨削磨削力数学模型,即

4 磨削力模型的仿真分析

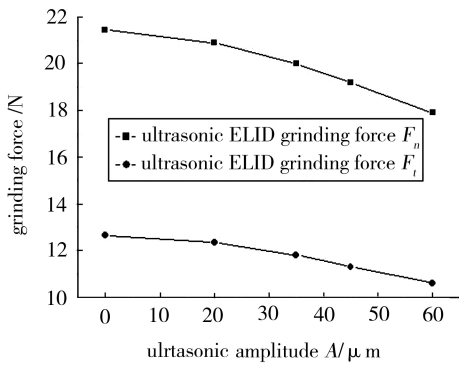
以超声 ELID 复合内圆磨削纳米复相 ZTA 陶瓷为例对模型进行仿真分析。选用金属结合剂金刚石砂轮,粒度 280#, 浓度 100%, 外径 20 mm, 宽度 18 mm; 工件尺寸, 内径 35 mm, 宽度 100 mm。基于仿真所选定的磨削条件, 令磨粒顶半角 $\theta=53^\circ$, 磨粒顶面积 $S=3 \mu\text{m}^2$, 摩擦因数 μ 取 0.2。文献[8-9]电解电压取 90 V, 电解效率 η 取 50%, 脉冲比 50%。以砂轮转速 6 m/s, 磨削深度 30 μm , 工件转速 150 r/min, 超声振幅 15 μm , 频率 35 kHz 为基本的仿真参数对模型进行仿真。当模型中振幅取 0 时即为 ELID 磨削下的磨削力, 所以本节分别对 ELID 和超声 ELID 复合磨削下的磨削力进行仿真, 以观察超声振动对磨削力的影响。对不同砂轮速度、磨削深度、超声频率和振幅下的磨削力进行仿真, 仿真结果如图(4)所示。由图 4 可以看出, 无论是 ELID 磨削还是超声 ELID 复合磨削, 磨削力均随着砂轮速度的增大而减小, 随着切削深度的增大而增大, 但是超声 ELID 复合磨削下的磨削力小于 ELID 磨削, 这是由于超声振动使同等条件下的未变形切屑厚度减小所致。从图中还可以看出, 随着超声振幅、频率的增大磨削力逐渐减小, 所以工程应用中, 在保持声学系统稳定的前提下, 应尽量增大超声振动的振幅和频率。



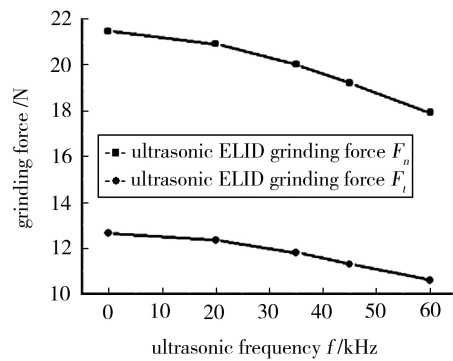
(a) 砂轮速度



(b) 磨削深度



(c) 不同振幅



(d) 超声频率

图4 模型仿真图

Fig. 4 Simulation of the modeling

5 结论

(1) 超声振动的引入有助于减小磨削力,且磨削力随着超声振动振幅、频率的增大而减小。

(2) 氧化膜的厚度对有效磨粒数有很大影响,进而影响磨削力,加工过程中要合理控制加工参数,以维持最佳的氧化膜厚度。

(3) 磨削力随着超声振动频率、振幅、电解电压、脉冲比、电解液电阻率的增大而减小;随着切削深度、工件速度的增大而增大。

参考文献

- [1] 邓朝晖,张璧,孙宗禹. 陶瓷磨削材料去除机理的研究进展[J]. 中国机械工程,2002,13(18):1608-1611
- [2] Zhao Bo, Zhao Chongyang, Du Baoyu. Experimental study on damage mechanism of nano-ceramic surface/subsurface under ultrasonic vibration aided grinding[J]. Diffusion and Defect Data Pt. B: Solid State Phenomena, 2011,175:107-111
- [3] 梁志强,王西彬,吴勇波. 超声振动辅助磨削技术的现状与新进展[J]. 兵工学报,2010,31(11):1530-1535

[4] 游祥志. 电解在线削锐与激振加工在精密磨削制程分析与规划之应用[M]. 国立台湾海洋大学,2003

[5] 李力均,傅杰才. 磨削力数学模型的研究[J]. 湖南大学学报,1979(3):44-55

[6] (日)白井英治. 切削磨削加工学[M]. 北京:机械工业出版社,1982

[7] Bifano T, Krishnamoorthy R, Fawcett H, et al. Fixed-load electrolytic dressing with bronze bonded grinding wheels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME,1999,121:20-27

[8] Dai Y, Ohmori H, Lin W. A fundamental study on optimal oxide layer of fine diamond wheels during ELID grinding process[J]. Key Engineering Materials,2006(304):178-180

[9] Zhang Kaifei, Ren Chengzu, Yang Lijian. Precision internal grinding of bearing steel based on the state control of oxide layer with electrolytic in-process dressing[J]. Journal of Material Processing Technology,2012,212(7):1611-1621

(编辑 李洪泉)