DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.048

基于应力集中理论的磨削力模型*

林开荣[1,2]　徐西鹏[1]　李　远[1]　方从富[1]

(1.华侨大学脆性材料加工教育部工程研究中心,厦门 361021;2.集美大学机械工程学院,厦门 361021)

【摘要】 将应力集中理论引入磨削过程研究,分析了磨削过程中的应力集中现象,建立了基于应力集中的单颗磨粒磨削力模型,应用该模型分析了磨削力随磨粒磨损面积率的变化机理,并分别建立了单颗磨粒磨削法向力、切向力随磨粒磨损面积率变化的解析式,由解析式可知磨削法向力、切向力都与磨粒磨损面积率呈二次函数关系,得出了磨削后工件材料的累积残切厚度增大是磨削法向力增大的重要原因。在此基础上,结合实际生产中使用的砂轮特点,推导出了适用于实际磨削过程的基于应力集中的多颗磨粒砂轮磨削力随磨粒磨损面积率变化的解析式,用所建模型计算的结果与试验数据吻合较好。

关键词:磨削力　应力集中　磨粒　磨损面积率

中图分类号:TG580.1⁺1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2012)11-0261-06

Model of Grinding Force Based on Stress Concentration Theory

Lin Kairong[1,2]　Xu Xipeng[1]　Li Yuan[1]　Fang Congfu[1]

(1. *Engineering Research Center for Machining of Brittle Materials*, *Ministry of Education*, *Huaqiao University*, *Xiamen* 361021, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Jimei University*, *Xiamen* 361021, *China*)

Abstract

Stress concentration theory was introduced into study of grinding, and the stress concentration phenomenon in grinding process was analyzed. A single-grit model of grinding force was established based on stress concentration theory. The influence mechanism of grit-wear-area rate on cutting force was clarified with the model. Functions between grinding force and grit-wear-area rate was established. The functions showed the quadratic function relationship between grinding force and grit-wear-area rate, and the increase of the cumulative residual-grinding-thickness results in the rapid increase of normal grinding force. Furthermore, by taking the feature of the grinding wheel in use into consideration, functions of grinding force for multi-grit grinding wheel was established. The validity of the model was verified by the experimental data.

Key words　Grinding force, Stress concentration, Grit, Wear-area rate

引言

磨削力是磨削加工中的重要参数,虽有许多学者提出了很多的磨削模型和计算公式,但这些模型真正用于实际磨削过程的预测和计算时存在较大误差[1~3]。

众所周知,在动载荷,特别是冲击载荷的作用下,不论塑性材料还是脆性材料,应力集中对其强度都有严重的影响[4]。尽管应力集中在磨削过程中普遍存在,但是从应力集中角度入手分析磨削过程并进行建模的研究尚不多见。本文尝试采用应力集中理论建立磨削力模型,并用实际试验数据对所建立的模型进行比较分析。

收稿日期:2012-04-20　修回日期:2012-06-12

*国家自然科学基金资助项目(50825505)

作者简介:林开荣,博士生,集美大学讲师,主要从事硬脆性材料先进加工以及加工过程摩擦学研究,E-mail:kaironglin@163.com

通讯作者:徐西鹏,教授,博士生导师,主要从事硬脆性材料先进加工以及加工过程摩擦学研究,E-mail:xpxu@hqu.edu.cn

1 磨粒磨削过程的应力集中现象

磨粒的磨削过程一般要经历滑擦、耕犁和切屑形成3个阶段[5~8]。从材料变形和破坏过程看,当磨粒刚与工件接触时,接触处的压力使工件产生弹性变形,材料的内应力逐渐增大,当剪切应力达到材料能够承受的最大值时,材料就开始滑移而产生塑性变形,并在切刃处产生切口,形成应力集中源,随着切刃的不断楔入,切刃将切屑层与工件分隔开,并且切屑层受到的剪切应力和弯曲应力越来越大,直至切屑层断裂,然后沿前刀面流出去,最后形成切屑。在此过程中,切屑层经历了弹性变形、塑性变形、材料屈服形成缺口(裂纹),产生应力集中源,然后由于应力集中使材料受到的应力急剧增大,裂纹迅速扩展,最后切屑层与工件分离,形成切屑;磨粒继续前行,开始进入下一个切屑形成的过程,如此周而复始,直到工件加工完成。

从以上分析可知,在耕犁阶段磨粒压入工件材料并形成切口开始,直到一个完整切屑的形成都存在应力集中现象,图1所示的 B 点切口处为应力集中源。

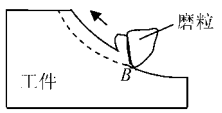


图1 单颗磨粒磨削示意图

Fig. 1 Illustration of single-grit grinding

2 基于应力集中理论的磨削力模型

2.1 基于应力集中的单颗磨粒切向磨削力模型

图1所示的单粒磨削模型在其磨削过程中,切屑层受到磨粒传递的剪切力、垂直于前刀面且指向切屑层的分布力以及前刀面和切屑层之间摩擦力的作用,其中作用在缺口两侧的分布力可以等效地以集中剪切力 J 和弯矩 M 代替,因而图1的单粒磨削模型切屑形成过程的力学模型可以简化为如图2a所示的带有凹口的半无限大板(横力)弯曲-剪切应力集中模型。与剪切作用相比弯矩的作用要小得多,所以可以忽略弯矩的作用,将模型进一步简化为具有凹口的半无限大板的剪切应力集中模型,如图2b所示。图中 ρ 为凹口前端的曲率半径,d 为凹口最前端到自由边的距离。

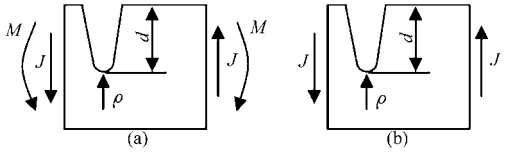


图2 磨削中应力集中简化模型

Fig. 2 Simplified model of stress concentration in grinding

(a) 弯曲-剪切应力集中模型 (b) 剪切应力集中模型

由于切削刃一般较锋锐,磨削时所形成的凹口前端的曲率半径 ρ 很小,因此上述剪切模型的应力集中系数 β 可表达为[3~4,9]

$$\beta = 2d^{0.5}\rho^{-2} \tag{1}$$

通常切向磨削力可以认为由磨削变形力和摩擦力两部分组成[2,5,7],即

$$F_t = F_{tc} + \mu F_n \tag{2}$$

式中 F_t——切向磨削力 F_{tc}——磨削变形力

μ——摩擦因数 F_n——法向磨削力

在考虑应力集中时,应力集中的影响使得磨削变形应力被放大为不考虑应力集中时的 β 倍。因而可近似认为在相同的工件材料强度下,要实现磨削,其磨削变形力只需为原来的 $1/\beta$ 即可,故考虑应力集中时切向磨削力 F_t^* 可表示为

$$F_t^* = F_{tc}/\beta + \mu F_n \tag{3}$$

将 $\beta = 2d^{0.5}\rho^{-2}$ 代入式(3),可得

$$F_t^* = F_{tc}\rho^2/(2d^{0.5}) + \mu F_n \tag{4}$$

定义磨粒磨损面积率 A 为砂轮表面上单位面积的磨损面积,可用磨损面积百分率度量。为了便于研究,假设磨粒为近似的球体,并具有一定的负前角,单颗磨粒磨损的最大允许面积为 S_{max},对于某一具体单颗磨粒,其 S_{max} 为定值,其值可以通过试验测得;磨削过程某一时刻的磨粒磨损面积为 S_{temp}。由于假设磨粒为近似的球体,因此单颗磨粒磨损面积 S_{temp} 可近似为 $\pi\rho'^2$。则单颗磨粒磨损面积率

$$A = S_{temp}/S_{max} = \pi\rho'^2/S_{max} \approx \pi\rho^2/S_{max} \tag{5}$$

式中 ρ'——磨粒磨损面积处的曲率半径,与 ρ 近似相等

根据式(1)和式(5)可知应力集中系数 β 和磨粒磨损面积率 A 关系为

$$\beta = \frac{2\pi d^{0.5}}{S_{max}}\frac{1}{A} \tag{6}$$

由于应力集中系数 β 难以用仪器直接测量,而它与磨粒磨损面积率 A 又具有式(6)所示的确定关系,磨粒磨损面积率 A 可以通过测量瞬时的磨粒磨损面积和试验得到的磨粒磨损的最大允许面积,通过式(5)计算得到。因此可以通过研究磨削力与磨粒磨损面积率 A 的关系来间接研究磨削力与应力集中系数 β 的关系。为了研究方便,本文都采用该方法研究磨削力与应力集中系数 β 的关系。

将式(4)和式(5)联合可求得

$$F_t^* = \frac{F_{tc}S_{max}}{2\pi d^{0.5}}A + \mu F_n \tag{7}$$

2.2 基于应力集中的单颗磨粒法向磨削力模型

根据式(3)可知,由于切削刃曲率半径变大,引起应力集中系数变小,去除工件材料需要的切向磨

削力增大，从而工件材料较难去除，即相对于刚参与磨削的完整磨粒而言，磨损后的磨粒每转从工件上去除的工件材料较薄。定义未磨损的完整磨粒每转磨削去除工件材料的厚度与磨损后的磨粒每转去除工件材料的厚度之差为残切厚度 ε。随着磨粒磨损的加大，每转磨削后材料残切厚度 ε 增大，并且不断累积，故当切削刃曲率半径较大时，其法向力和切向力都将增大。

文献[2,5]研究表明法向磨削力与磨粒磨损面积率具有密切的关系，残切厚度 ε 与磨粒磨损面积率 A 呈比例，即

$$\varepsilon = mA \tag{8}$$

式中　m——比例系数

假设砂轮磨粒完全修锐且刚投入使用时，为了维持正常磨削所需要的法向力为 F_{n0}，它引起的磨削系统初始变形量为 C，即在磨削开始时虽然磨粒未磨损，但为保证砂轮能够磨削工件，砂轮与工件之间存在法向力为 F_{n0}，该力引起的磨削系统初始变形量为 C。同时磨削系统的综合刚性系数 k 可近似为常数，则 F_n 与残切厚度 ε 的累积总和呈线性关系。

若用累积残切厚度 T 表示用完全修锐的砂轮开始磨削工件直到磨粒磨损面积率 A 为某一定值时的整个过程残切厚度 ε 之和，则由于磨粒磨损面积率 A 的增大以及残切厚度 ε 的累积都是渐进的过程，累积残切厚度 T 可表示为

$$T = \int_0^{\varepsilon} \varepsilon \mathrm{d}\varepsilon = \int_0^{A} mA\mathrm{d}A = \frac{m}{2}A^2 \tag{9}$$

因此 F_n 可以表示为

$$F_n = k(C+T) = kC + \frac{km}{2}A^2 \tag{10}$$

从式(10)可知法向磨削力 F_n 与磨损面积率 A 呈二次函数关系。

将式(10)代入式(7)可得

$$F_t^* = \frac{\mu km}{2}A^2 + \frac{F_{tc}S_{\max}}{2\pi d^{0.5}}A + \mu kC \tag{11}$$

从式(11)可知切向磨削力 F_t^* 与磨损面积率 A 也呈二次函数关系。

2.3　多颗磨粒砂轮的切向和法向磨削力模型

对于实际生产中使用的砂轮，由于其磨粒分布具有随机性，且砂轮具有自锐性，各磨粒的磨损面积率与磨削性能都处于动态变化中，难于精确估算或测量其磨损面积率[10~14]。为了研究其磨削力与磨损面积率的关系，可以用视频跟踪采集系统采集和统计某个时刻或某个极小时间段内砂轮上所有磨粒各自的磨损形态，然后将该时刻各种磨损形态磨粒的磨损面积率乘以各自所占的百分比，再相加，然后开平方可得到折算的砂轮总体磨损面积率 S，即

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} p_i A_i^2} \tag{12}$$

式中　p_i——各种磨损形态的磨粒所占的百分比

A_i——各种磨粒磨损形态的磨损面积率

将得到的砂轮总体磨损面积率 S 取代式(9)中的 A，即可得到完全修锐的砂轮从开始磨削工件到某一统计时刻为止的累积残切厚度 T，即

$$T = \frac{m}{2}S^2 = \frac{m}{2}\sum_{i=1}^{n} p_i A_i^2 \tag{13}$$

进而根据式(10)易求得法向磨削力

$$F_n = k(C+T) = kC + \frac{km}{2}\sum_{i=1}^{n} p_i A_i^2 \tag{14}$$

为了后面计算和试验的方便性，将式(14)中的 kC 和 $km/2$ 分别看成一个整体变量 P、Q 进行求解。即将式(14)变换为

$$F_n = P + QS^2 \tag{15}$$

前面已知 P 是完全修锐的砂轮和工件之间在刚开始磨削时的法向力。P 可以通过在试验刚开始阶段直接用测力仪测定，也可通过将试验初始测试得到的 2 或 3 个总体磨损面积率 S 与相应的磨削法向力直接代入式(15)，得到一个仅含有 P 和 Q 两个未知参量的方程组，求解该方程组便可求得 P 和 Q 值。

同理可求得，切向磨削力 F_t^* 关于砂轮总体磨损面积率 S 的函数为

$$F_t^* = \frac{\mu km}{2}S^2 + \frac{F_{tc}S_{\max}}{2\pi d^{0.5}}S + \mu kC \tag{16}$$

令 $M = \dfrac{\mu km}{2}$，$N = \dfrac{F_{tc}S_{\max}}{2\pi d^{0.5}}$，$D = \mu kC$，则

$$F_t^* = MS^2 + NS + D \tag{17}$$

2.4　模型计算实例与分析

磨粒磨损面积率 A 的变化将导致磨削力的变化，为了确定它们之间的关系，文献[2]进行了有益的探索，用代号为 SAE1018 的钢材测试了切入平面磨削中砂轮切向力和法向力。磨削条件[2]：v_s = 30 m/s，d_s = 200 mm，v = 4.6 m/min，a_p = 25 μm，b = 6.4 mm。试验证实了对于一定的机床结构，磨削中砂轮切向力和法向力随磨损面积率 A 的增加而增加，并用折线进行了拟合，如图 3a 和 3c 所示，但文献[2]未说明形成该趋势的机理。

应用上述的磨削应力集中模型，可知由于切削刃曲率半径变大，即磨损面积率 A 增大，引起应力集中系数变小，去除工件材料需要的切向磨削力增大，从而工件材料较难去除，导致材料残切厚度 ε 增大，并且累积残切厚度 T 不断累积，故当切削刃曲

率半径较大时,累积残切厚度 T 增加较快,其法向力和切向力都增大较多。图 3b 和 3d 是根据文献[2]试验数据,应用上述模型(式(15)和式(17))计算得到的法向和切向磨削力曲线,从图 3b 和 3d 可看出上述模型计算得到的法向和切向磨削力与文献[2]中试验得到的值非常接近。

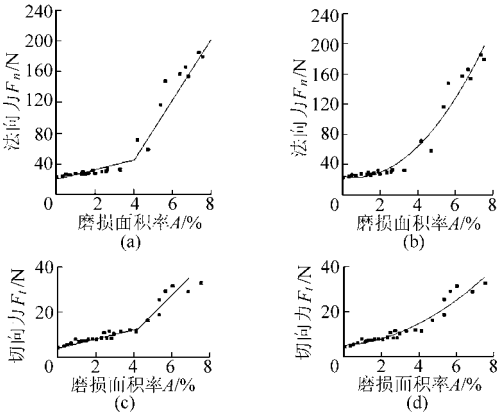


图 3 切入平面磨削中砂轮切向力和法向力曲线

Fig. 3 Curves of grinding force in plunge surface grinding

(a) 文献[2]折线拟合的 F_n 曲线 (b) 模型计算的 F_n 曲线

(c) 文献[2]折线拟合的 F_t 曲线 (d) 模型计算的 F_t 曲线

为了进一步验证模型的正确性,再次根据文献[5]中两种不同砂轮磨削得到的试验数据,分别应用式(15)和式(17)计算法向和切向磨削力,并且绘制曲线,结果如图 4 所示。通过对比可以看出应用模型计算得到的磨削力与文献[5]中试验得到的值在大部分情况下也很接近,因此进一步验证了法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 与磨损面积率 A 呈二次函数关系的正确性。

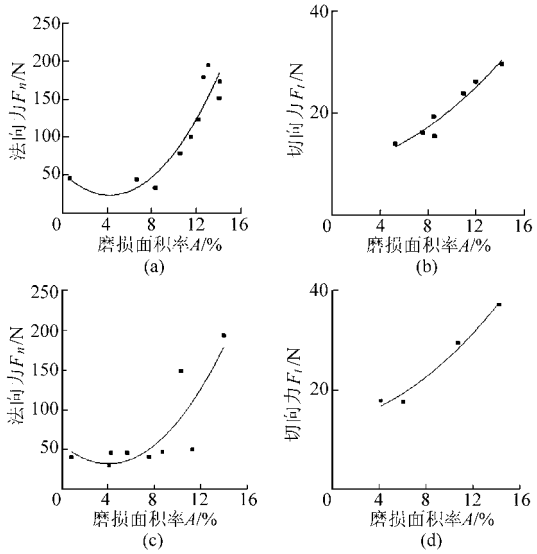


图 4 磨削力与磨损平面面积率计算曲线

Fig. 4 Curves of grinding force *vs* wear-area rate of grits

(a) A46M7V 砂轮法向力 (b) A46M7V 砂轮切向力

(c) A46K7V 砂轮法向力 (d) A46K7V 砂轮切向力

从图 3 和图 4 可以看到,磨削力的二次函数曲线最小值点并不在 F_n 和 F_t 数轴上,而是略微向右偏移,产生这种现象的原因是有些新修整的磨具磨粒在修整过程中受到了损伤,或磨粒本身虽然锋锐但由于强度不够导致磨粒破碎或磨损,而无法有效磨削,故累积残切厚度 T 增加,从而引起新修整的磨具在开始磨削时磨削力较大;但随着磨削的进行,原受损伤磨粒的破碎形成新的切削刃,以及过于锋锐但强度不足的磨粒其末端的磨损,导致其强度增加;因此虽然此时磨损平面面积率增加,但参与有效磨削的磨粒数目增加,累积残切厚度 T 减小,从而磨削力减小,达到最小值。此后因磨损面积率 A 继续增大,引起应力集中系数变小,从而工件材料较难去除,累积残切厚度 T 增加,其法向力和切向力都增大。

3 试验

为了更好地验证模型的准确性,考虑到各磨粒磨削性能处于动态变化中,设计了花岗石超大切深锯切试验平台及锯片表面监测系统进行试验验证。

试验中锯片的金刚石为 ISD-1600 高品级金刚石,浓度为 35%,粒度为 30/40(美制筛网),平均粒径约为 512 μm。工件材料为均匀细密的花岗石,工件尺寸为 25 cm×14 cm×15 cm。加工参数:锯切深度 51 mm,进给速度 150 cm/min,转速 1 146 r/min。

采用 Kistler 9257BA 型动态测力仪监测锯切过程中的垂直力和水平力,并同时采用带模拟电压输出的 GX3 型三相功率电能表来监测加工中主轴电动机所消耗的功率,这些信号由美国 NI 公司的 DAQCard-AI-16E-4 型 A/D 转换器采集后传输并存储到计算机中。根据测量得到的垂直力、水平力以及功率,即可得到锯切切向力和法向力[15~16]。

利用 Hirox KH-1000 HI-SCOPE 型三维视频显微系统跟踪观测砂轮表面状况。本次试验跟踪统计了锯片工作表面上所有金刚石磨粒,试验中将金刚石的磨损状态划分成 12 种,划分标准如表 1 所示。

试验进行了 16 次金刚石表面形貌的观察,将各次观测时刻锯片工作面所有金刚石的磨损形态按表 1的标准分成 12 组,并统计了各组所占的百分比。为了便于定量计算,用各自范围值上下限的平均值代替观测到的各种磨损形态(磨损面积率)范围值。

然后将每次观测得到的 12 组磨损面积率和各组所占的百分比代入式(12),从而计算得到某次观

表 1　12 种金刚石磨损状态划分

Tab. 1　Identification of twelve sorts of diamond worn states

状态编号	磨损状态划分标准
A	刚出露
B	完整(出刃高度小于 1/8 磨粒高度)
C	完整(出刃高度大于 1/8 磨粒高度)
D	磨平面积小于 1/3 晶面面积
E	磨平面积大于 1/3、小于 1/2 晶面面积
F	磨平面积大于 1/2 晶面面积
G	破碎面积小于 1/3 晶面面积
H	破碎面积大于 1/3、小于 1/2 晶面面积
I	破碎面积大于 1/2、小于 2/3 晶面面积
J	破碎面积大于 2/3 晶面面积
K	基本与胎体相平
L	脱落

测时刻的锯片总体磨损面积率,通过计算得到的 16 次观测时刻的总体磨损面积率如表 2 所示。

表 2　不同磨损面积率的法向锯切力

Tab. 2　Radial grinding force *vs* wear-area rate of grits

观测次数	磨损面积率 A/%	计算值/N	试验值/N
1	4.959	1 868.1	1 868.3
2	5.152	1 945.8	1 945.8
3	5.737	2 200.6	1 785.8
4	5.503	2 095.3	2 196.0
5	6.089	2 366.7	2 434.6
6	6.397	2 520.3	3 231.0
7	6.381	2 512.3	2 936.7
8	6.463	2 554.0	2 907.6
9	6.450	2 547.7	2 514.2
10	6.342	2 492.2	3 248.6
11	6.762	2 712.2	2 897.2
12	6.725	2 692.3	2 689.0
13	6.521	2 584.5	2 290.4
14	6.679	2 667.6	2 690.5
15	6.751	2 706.2	2 710.6
16	6.691	2 674.2	2 775.8

根据前述对式(15)的分析可知,式(15)中的 P 在本试验中是完全修锐的锯片与工件之间在锯切面积很小时(趋于零)的法向力,即刚开始锯切时的法向力。如前所述它可以通过在试验刚开始阶段直接用测力仪测定或将试验初始测试得到的 2 或 3 个总体磨损面积率 S 和相应锯切法向力直接代入式(15),得到一个仅含有 P 和 Q 两个未知参量的方程组,求解该方程组便可求得 P 和 Q 值。本次试验通过上述方法得到 $P=885.53$,$Q=39.95$。

将以上计算得到的 16 次观测时刻的锯片总体磨损面积率和前面求得的 $P=885.53$、$Q=39.95$ 代入式(15)便可计算得到 16 次观测时刻的法向锯切力。表 2 中分别列出了 16 次观测时刻的总体磨损面积率、计算得到的法向锯切力和试验得到的法向锯切力。

根据式(17),按照计算法向锯切力类似方法也可计算得到 16 次观测时刻的切向锯切力,表 3 中分别列出了 16 次观测时刻的总体磨损面积率、计算得到的切向锯切力和试验得到的切向锯切力。

表 3　不同磨损面积率的切向锯切力

Tab. 3　Tangential force *vs* wear-area rate of grits

观测次数	磨损面积率 A/%	计算值/N	试验值/N
1	4.959	169.9	179.2
2	5.152	182.7	185.8
3	5.737	221.3	179.2
4	5.503	205.9	201.3
5	6.089	244.6	229.9
6	6.397	264.9	312.6
7	6.381	263.8	298.5
8	6.463	269.2	282.8
9	6.450	268.4	266.8
10	6.342	261.3	289.3
11	6.762	289.0	284.8
12	6.725	286.5	264.1
13	6.521	273.1	233.8
14	6.679	283.5	256.7
15	6.751	288.3	250.4
16	6.691	284.3	341.5

计算得到的锯切力和试验得到的锯切力随锯切面积的变化曲线如图 5 所示。

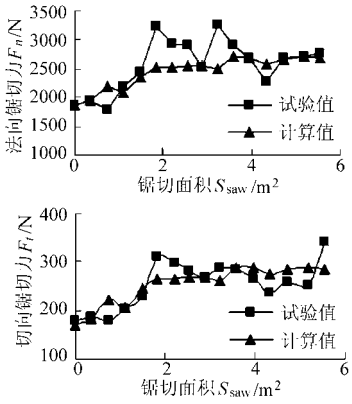


图 5　锯切力随锯切面积的变化曲线

Fig. 5　Curves of sawing force *vs* sawing area

从表 2、表 3 和图 5 都可以看出,通过模型计算得到的锯切力除了极个别处与试验得到锯切力有较大的差别(约 20%)外。其它的误差很小,在 5% 左右。另外通过观察可以发现,差别较大的点都是试验数据发生突变的点,有可能是锯切设备、测试设备或锯切对象的不均匀性造成的。因而前述的模型是

合理的。

此外结合表 2、表 3 和图 5 可以看到随锯切面积的增加,锯片总体磨损面积率不是一直增加的,而是有时在减少,说明锯片在锯切过程中具有自锐性,它也和实际锯切过程中观察到的现象相吻合。

4 结论

(1)将应力集中理论引入磨削过程研究,分析了磨削过程中的应力集中现象,建立了基于应力集中的单颗磨粒磨削力模型,应用该模型分析了磨削过程中磨削力的变化机理。

(2)根据基于应力集中的磨削力模型分别建立了单颗磨粒磨削法向力、切向力随磨粒磨损面积率变化的解析式,由解析式可知磨削法向力、切向力都与磨粒磨损面积率呈二次函数关系,用所建模型计算的结果与试验数据吻合较好。

(3)结合实际生产中使用的砂轮特点,根据上述的基于应力集中的单颗磨粒磨削力模型,建立了适用于实际磨削过程的基于应力集中的多颗磨粒磨削力模型,推导出了多颗磨粒砂轮的磨削力随磨粒磨损面积率变化的解析式,并通过试验验证了建立模型的合理性。

(4)根据磨削力的应力集中模型及所建立的磨削法向力、切向力随磨粒磨损面积率变化的解析式,可知由于磨粒磨损面积率增大,即切削刃曲率半径变大,引起磨削时应力集中系数变小,切向磨削力增大,这直接导致了去除工件材料的难度增加。随着磨粒磨损面积率增大,磨粒每转从工件上去除工件材料的厚度变小,因此导致工件上的残切厚度增大,并且累积残切厚度将不断累积。因此磨粒磨损面积率增大,导致工件材料累积残切厚度增大是磨削法向力增大的重要原因。

参 考 文 献

1 谢桂芝,尚振涛,盛晓敏,等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011,47(11):169 ~ 176.
Xie Guizhi, Shang Zhentao, Sheng Xiaomin, et al. Grinding force modeling for high-speed deep grinding of engineering ceramics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11): 169 ~ 176. (in Chinese)

2 Malkin S. Grinding of metals: theory and application[J]. Journal of Applied Metalworking, 1984, 3(2):95 ~ 109.

3 叶勇,徐西鹏. 单颗金刚石磨削花岗石中力的离散单元分析及试验验证[J]. 摩擦学学报, 2009,29(3):215 ~ 220.
Ye Yong, Xu Xipeng. Discrete element analysis and experimental validation of forces in grinding of granite with single diamond grain[J]. Tribology, 2009,29(3):215 ~ 220. (in Chinese)

4 西田正孝. 应力集中[M]. 李安定,译. 北京:机械工业出版社,1986.

5 任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

6 Upadhyaya R P, Malkin S. Thermal aspects of grinding with electroplated CBN wheels[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering,2004, 126(1): 107 ~ 114.

7 Shi Z, Malkin S. Wear of electroplated CBN grinding wheels[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128 (1):110 ~ 118.

8 巩亚东,仇健,李晓飞,等. 超高速点磨削相关机理研究[J]. 机械工程学报,2010,46(17):172 ~ 178.
Gong Yadong, Qiu Jian, Li Xiaofei, et al. Study on the correlative mechanism of super high-speed point grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17):172 ~ 178. (in Chinese)

9 王钟羡,吴春笃. 测定应力集中系数的灰色建模方法[J]. 农业机械学报,2004,35(4):163 ~ 166.
Wang Zhongxian, Wu Chundu. Gray modeling method for prediction of stress concentration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4):163 ~ 166. (in Chinese)

10 Pei Z J, Strasbaugh A. Fine grinding of silicon wafers[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(5):659 ~ 672.

11 修世超,蔡光起. 快速点磨削侧边接触层模型及 CBN 砂轮磨损特性[J]. 机械工程学报,2010, 46(3):187 ~ 192.
Xiu Shichao, Cai Guangqi. Model of side contact layer and wear performance of CBN wheel in quick-point grinding process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 187 ~ 192. (in Chinese)

12 徐西鹏. 天然岩材料的金刚石锯切研究进展[J]. 机械工程学报,2003, 39(9): 17 ~ 22.
Xu Xipeng. Advances in the research of diamond stone sawing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 17 ~ 22. (in Chinese)

13 Liao Y S, Luo S Y. Wear characteristics of sintered diamond composite during circular sawing[J]. Wear, 1992, 157(2): 325 ~ 337.

14 Luo S Y. Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 70(1): 1 ~ 8.

(下转第 243 页)