

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201707057



钎焊金刚石砂轮磨削 AA4032 铝合金试验

余凯峰, 陈世隐, 黄国钦

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过磨削试验,研究钎焊金刚石砂轮磨削 4032 铝合金(AA4032)在不同磨削参数时的磨削特性. 结果表明:磨削力和磨削表面粗糙度都随着磨削深度和工件进给速度的增加而增大,随着砂轮线速度的增加而减小;法向磨削力与切向磨削力有良好的线性关系,其力比为 2.6;AA4032 主要以塑性方式去除,其被加工表面由光滑区、划痕、磨屑粘附、白色析出颗粒及孔组成,表面质量随磨削速度增大而明显提高;磨削比能随单颗磨粒切削厚度($h_{c,max}$)增大而减小,在相同 $h_{c,max}$ 下,高速磨削有利于降低磨削能耗.

关键词: 钎焊金刚石砂轮; 磨削; AA4032 铝合金; 磨削力; 磨削比能; 粗糙度

中图分类号: TG 582; TG 74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0001-06

Experimental Study on Grinding 4032 Aluminum Alloy With Brazed Diamond Wheel

YU Kaifeng, CHEN Shiyin, HUANG Guoqin

(Institution of Manufacture Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: An investigation was carried out to assess the characteristics of grinding 4032 aluminum alloy (AA4032) with a brazed diamond wheel under different grinding parameters. The results indicate that the grinding forces and ground surface roughness increase with the increase of depth of cut and feed rate, and decrease with the increase of grinding speed. The normal grinding force has a good linear proportion to the tangential grinding force, and their ratio is about 2.6. During grinding, the AA4032 is mainly removed in ductile mode. The ground surface has such characteristics as smooth area, scratches, smeared material, white precipitated particles and holes. The ground surface quality is promoted significantly with the increase of the grinding speed. The specific grinding energy decreases with the increase of the cutting thickness of single grinding grain ($h_{c,max}$). With an identical value of $h_{c,max}$, high speed grinding is beneficial to reduce the grinding energy consumption.

Keywords: brazed diamond grinding wheel; grinding; 4032 aluminum alloy; grinding forces; specific grinding energy; roughness

钎焊金刚石技术实现了金刚石、结合剂、金属基体三者之间的化学冶金结合,极大提升了钎料对磨粒的把持能力,使磨粒的出刃高度达 70%~80%。因此,钎焊金刚石砂轮具有强把持和大容屑等特点。近 20 多年来,钎焊金刚石砂轮是磨削领域备受关注的研究热点。关于钎焊砂轮的应用研究,以往主要集

收稿日期: 2017-07-23

通信作者: 黄国钦(1981-),男,副教授,博士,主要从事硬脆性材料高效精密加工技术、超硬材料工具制备及应用的研究. E-mail: smarthgq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51235004, 51575198); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划项目(1611303041)

中在硬脆难加工材料(如石材^[1-2]、陶瓷^[3-5]、玻璃^[5]等)和高温强韧合金(如高温镍基合金^[6]和钛合金^[7]等),但对塑性较好、易堵塞的铝合金材料的相关研究甚少. AA4032 铝合金具有高硬度、耐磨和低热膨胀系数等优势,主要用于发动机电活塞、录音机磁头等耐磨零件的制造. 虽然铸造、锻造是其主要成形方式,但磨削也是提高其制件精度与质量的关键手段. 本文以 AA4032 铝合金为加工对象,考察不同磨削参数时,钎焊金刚石砂轮的磨削特性.

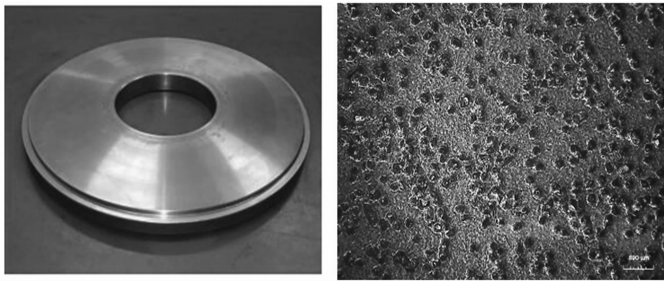
1 试验条件

1.1 工件与砂轮

工件选用 AA4032 铝合金材料,尺寸为 20 mm×12 mm×20 mm,磨削加工在 20 mm×12 mm 表面上进行. 砂轮基体为 45 钢,直径为 350 mm,磨削宽度为 15 mm. 钎料采用镍基合金粉末 BNi82CrSiBFe. 金刚石磨料粒度为 140/170 目(粒径为 90~105 μm),随机分布,平均面浓度为 8 颗·mm⁻². 钎焊工艺采用真空炉加热,参数如下:钎焊温度为 1 030 ℃,保温时间为 10 min,真空度为 0.10 Pa. 制备得到的钎焊金刚石砂轮及砂轮表面磨粒分布情况,如图 1 所示.

1.2 试验装置和参数

试验在 BLOHM 型高速平面磨床上进行,试验系统如图 2 所示.



(a) 砂轮整体实物图 (b) 砂轮表面磨粒分布情况

图 1 砂轮实物和表面磨粒分布

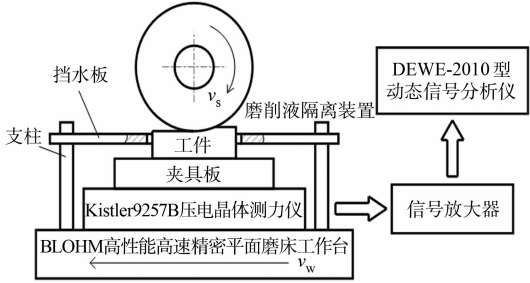


图 2 磨削试验示意图

Fig. 1 Grinding wheel and distribution of abrasive particles

Fig. 2 Schematic diagram of grinding test

采用 Kistler9257B 型压电晶体测力仪测量不同加工参数下的磨削力. 磨削力的原始信号通过 DEWE-2010 型动态信号分析仪实时显示和采集. 磨削方式采用带冷却液的顺磨. 磨削参数如表 1 所示. 表 1 中: v_s 为砂轮线速度; a_p 为磨削深度; v_w 为工件速度.

表 1 磨削试验参数

每种工况下做 3 次相同的磨削试验,取平均值作为最终的结果. 设计磨削液隔离装置(图 2)的目的是为了避免冷却液的冲击对测力仪的影响^[8],提高磨削力测量的精确度.

Tab. 1 Grinding experiment parameters

磨削参数	变化值
$v_s/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	30, 60, 90, 120
$a_p/\mu\text{m}$	20, 40, 60, 80
$v_w/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	2, 4, 8, 12

1.3 磨削加工表面表征

用 Mahr XR20 型三维轮廓仪(德国马尔公司)测量磨削加工表面粗糙度,采样长度为 4.2 mm. 每个方向测量 6 个位置,求其平均值作为该试样表面粗糙度值. 用 Phenom ProX 型扫描电镜观察加工表面微观形貌.

2 结果与分析

2.1 磨削参数对磨削力的影响

钎焊金刚石砂轮磨削 AA4032 铝合金测得的磨削力结果,如图 3~5 所示. 图 3~5 中: F_n 为法向磨削力; F_t 为切向磨削力. 由图 3~5 可知:法向磨削力和切向磨削力的大小都随砂轮线速度的提高而减小,随工件进给速度和磨削深度的增大而增大,这与单颗磨粒切削厚度变化有关.

采用角正回归法,其回归一致性效果,如图 6 所示. 可得到磨削 AA4032 铝合金的磨削力公式为

$$F_n = 1.268\,0 v_s^{-0.708\,2} v_w^{0.386\,3} a_p^{0.969\,1}, \tag{1}$$

$$F_t = 0.717\,5 v_s^{-0.871\,2} v_w^{0.459\,9} a_p^{0.884\,0}. \tag{2}$$

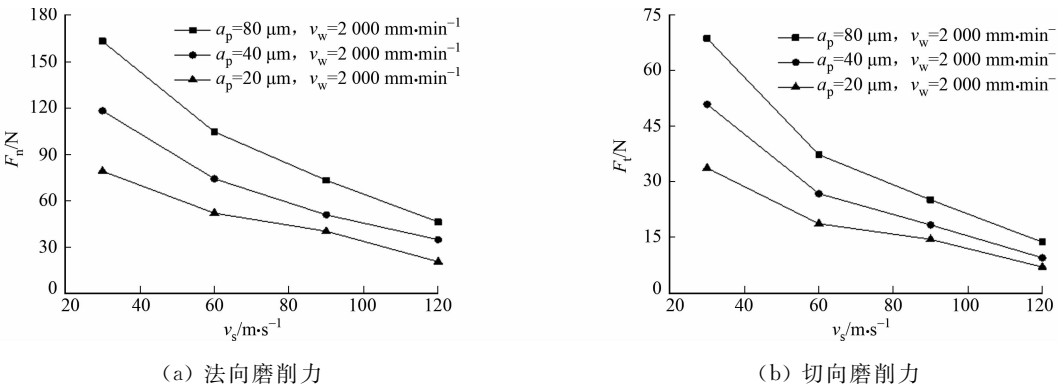


图 3 砂轮线速度对磨削力的影响

Fig. 3 Influence of peripheral wheel speed on grinding forces

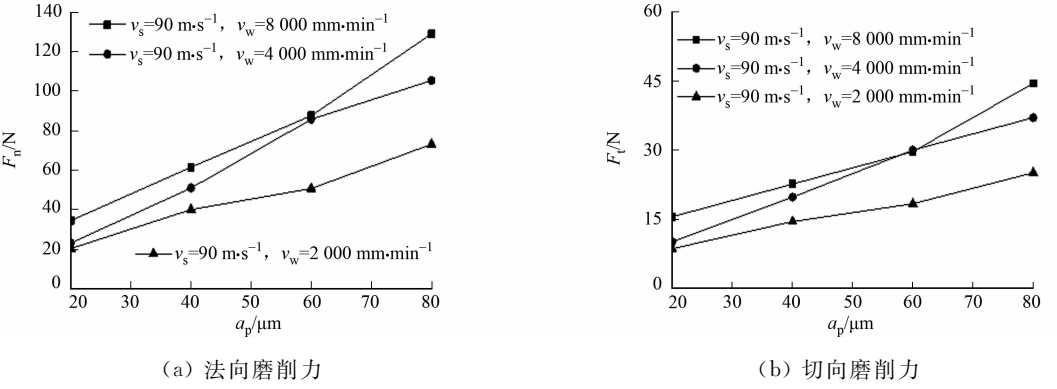


图 4 磨削深度对磨削力的影响

Fig. 4 Influence of depth of cut on grinding forces

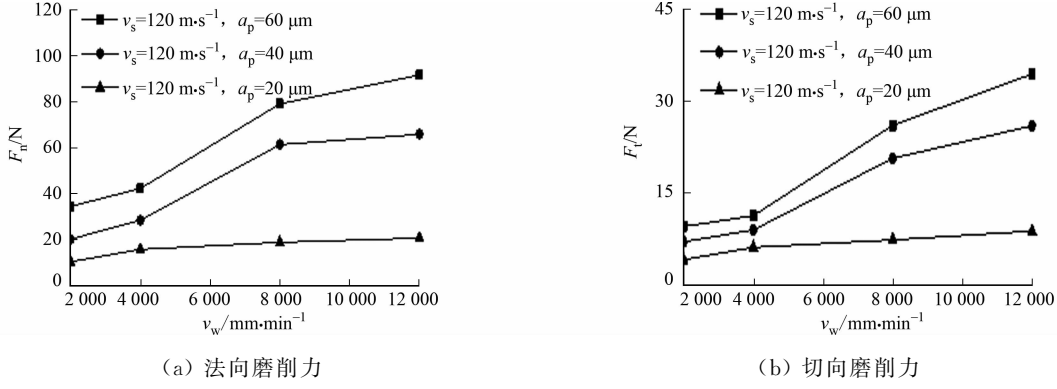


图 5 进给速度对磨削力的影响

Fig. 5 Influence of feed rate on grinding forces

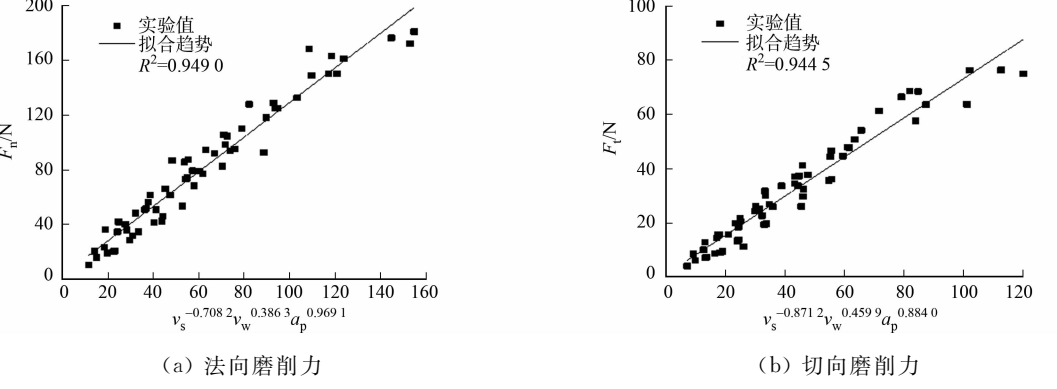


图 6 磨削力与磨削参数的回归分析

Fig. 6 Regression analysis of grinding force and grinding parameters

由式(1),(2)的指数系数可知:砂轮线速度对切向和法向磨削力的影响是负指数效应,而磨削深度和工件进给速度对其影响则是正指数效应;不管是法向还是切向磨削力,磨削深度对其影响程度远比另两个参数明显.因此,在实际磨削过程中,应严格控制单次磨削深度;在保证磨削效率的情况下,应适当提高砂轮线速度和减小磨削深度,可以降低磨削力的大小,提高砂轮的使用寿命.

2.2 磨削力比特征

法向与切向磨削力的比值 F_n/F_t (磨削力比),可反映砂轮表面磨粒的锋利度,砂轮越锋利,磨削力比越小,不同磨削参数下的磨削力比,如图 7 所示.由图 7 可知:在磨削过程中,法向与切向磨削力之间存在一定的线性关系,其斜率(即力比)为 2.6,主要与钎焊金刚石砂轮磨粒出刃高、大容屑空间带来的优异加工性能有关.因此,将钎焊金刚石砂轮应用到 AA4032 铝合金塑性难加工材料的加工上是可行的.

2.3 单颗磨粒平均磨削力

单颗磨粒的平均法向磨削力及平均切向磨削力的计算式^[9]为

$$f_n = F_n / (C_a b l_c), \quad f_t = F_t / (C_a b l_c). \tag{3}$$

式(3)中: C_a 为有效磨粒的密度, $C_a = \eta C$, η 取 0.75, C 为砂轮表面静态磨粒密度,文中为 $8 \text{ 颗} \cdot \text{mm}^{-2}$; l_c 为磨削区域接触弧长, $l_c = \sqrt{a_p \cdot d_s}$, d_s 为砂轮的直径; b 为磨削宽度.

最大未变形切屑厚度 $h_{c,max}$ 用于衡量单颗磨粒进出磨削弧区的单次最大切削量,其计算式^[10]为

$$h_{c,max} = \sqrt{\frac{3}{C_a \tan \theta} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p}{d_s}}}. \tag{4}$$

式(4)中: θ 为磨粒顶锥半角,取值为 60° .

单颗磨粒平均磨削力与最大未变形切屑厚度的关系,如图 8 所示.由图 8 可知:两者之间存在一定的线性关系,随着 $h_{c,max}$ 的增大,单颗磨粒平均磨削力(f_n, f_t)都在增大;速度为 $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的磨削力明显小于速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的磨削力.因此,为了延长砂轮的寿命,降低单颗磨粒上的载荷,提高砂轮线速度是一个很好的措施.

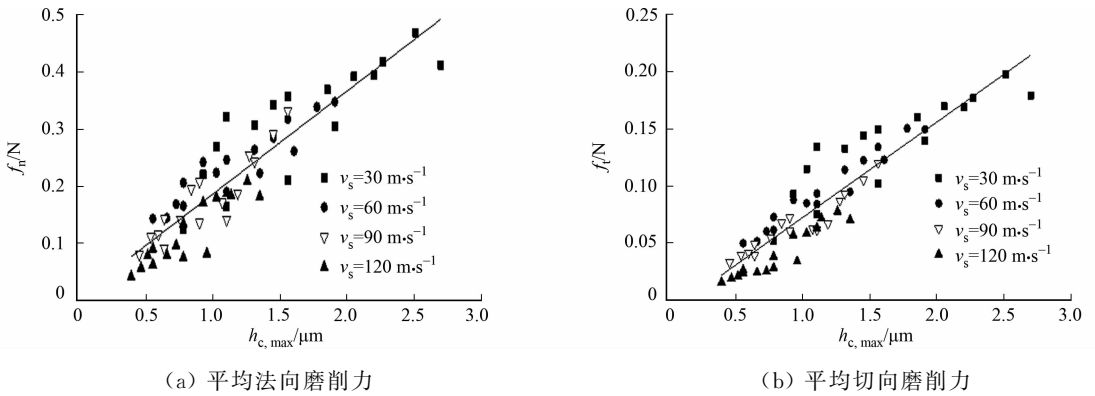


图 8 单颗磨粒平均磨削力与最大未变形切屑厚度的关系

Fig. 8 Relationship between average grinding forces of single abrasive grain and maximum undeformed chip thickness

2.4 磨削参数对磨削比能的影响

磨削比能是指去除单位体积材料所消耗的能量,其大小取决于砂轮切向磨削力及加工参数的数值.计算式^[10]为 $u = F_t v_s / (a_p v_w b)$.

当砂轮线速度不同时,钎焊金刚石砂轮磨削 AA4032 铝合金,磨削比能随单颗磨粒最大未变形切屑厚度的变化,如图 9 所示.当速度为 30, 60, 90, 120 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,分别对磨削比能 u 与单颗磨粒最大未变

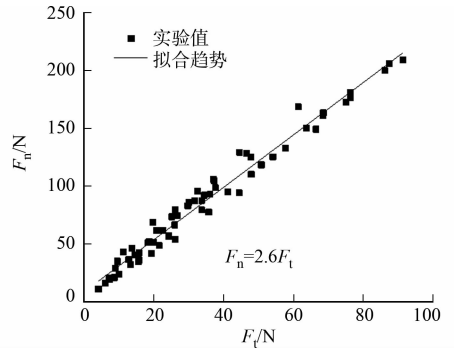


图 7 不同磨削参数下的磨削力比

Fig. 7 Grinding force ratio under different grinding parameters

形切屑厚度 $h_{c,max}$ 进行拟合, 得到 4 条曲线及其对应的拟合公式, 如图 9 所示. 拟合所用的计算式^[11]为

$$u = A/h_{c,max} + B. \tag{5}$$

式(5)中: A, B 为常数.

由图 9 可知: 砂轮线速度越大, 常数 A 越大; 不同速度下, 磨削比能随着最大未变形切屑厚度 $h_{c,max}$ 的增大而减小.

2.5 磨削加工表面分析

2.5.1 表面形貌 当 $a_p=80\text{ }\mu\text{m}, v_w=8\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 不同砂轮线速度对应的工件表面形貌, 如图 10 所示.

由图 10 可知: AA4032 铝合金工件本体内存在大量白色颗粒, 其主要成分是硅和硅化镁颗粒^[12]. 这些白色颗粒作为该材料的硬质点, 提高了其耐磨性. 在磨削过程中, 白色颗粒会以挖除、切断、破碎、保持完整等形式存在. 当颗粒破碎或被挖除时, 磨削后工件表面会留下小孔; 当颗粒被切断时, 磨削后工件表面出现光滑区, 光滑区面积占比越大, 工件表面质量就越好; 此外, 磨屑会通过再沉积作用在工件表面产生大量磨屑粘附. AA4032 铝合金主要以塑性方式去除, 其加工表面主要是由光滑区、划痕、磨屑粘附、白色析出颗粒及孔组成. 对比图 10(a), (b) 不难发现, 砂轮线速度提高可以明显改善加工表面质量, 光滑区明显增加, 磨屑粘附减少, 这与单颗磨粒切削厚度变薄有直接关系.

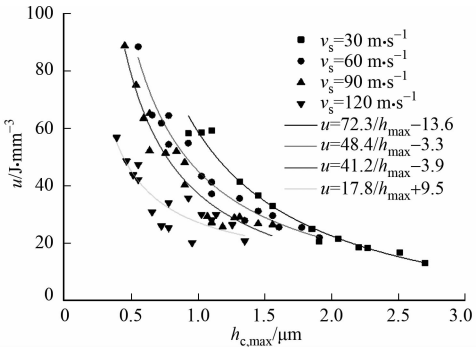
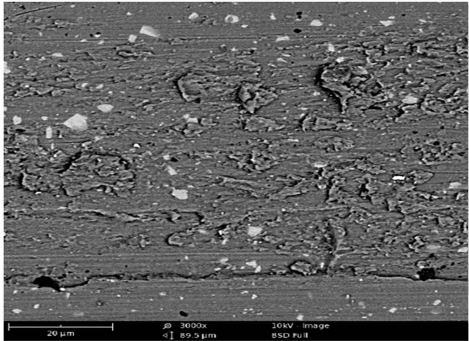
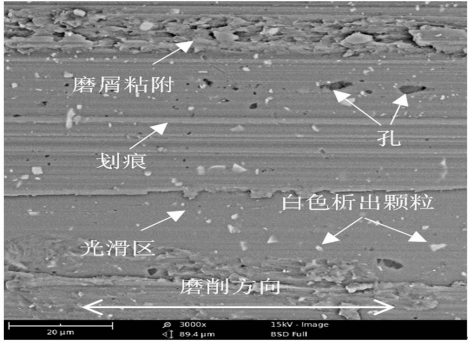


图 9 磨削比能和单颗磨粒最大未变形切屑厚度的关系

Fig. 9 Relationship between specific grinding energy and maximum undeformed chip thickness of single abrasive grain



(a) $v_s = 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

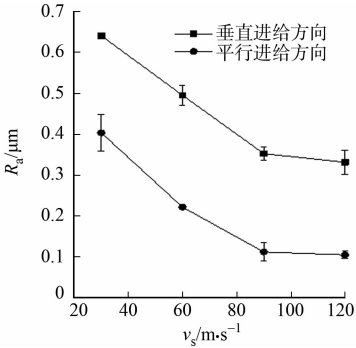


(b) $v_s = 120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

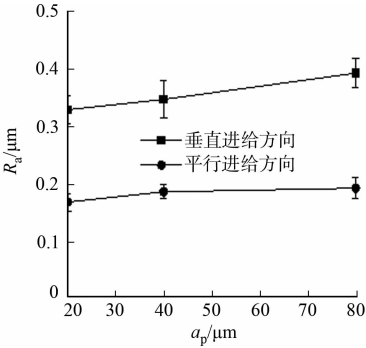
图 10 工件表面形貌

Fig. 10 Workpiece surface topography

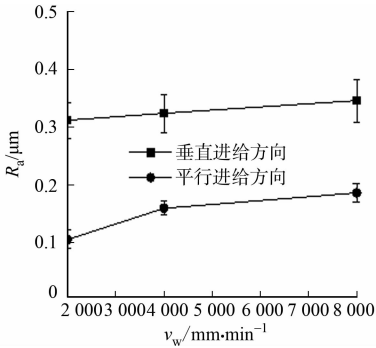
2.5.2 表面粗糙度 磨削参数对表面粗糙度(R_a)的影响, 如图 11 所示.



(a) 砂轮线速度



(b) 磨削深度



(c) 工件进给速度

图 11 磨削参数对表面粗糙度的影响

Fig. 11 Influence of grinding parameters on surface roughness

当 $a_p=80\text{ }\mu\text{m}, v_w=2\text{ }000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 表面粗糙度随砂轮线速度的变化, 如图 11(a) 所示. 由图 11(a) 可知: 随着砂轮线速度的增加, 工件表面粗糙度呈下降的趋势. 这是因为当砂轮线速度增加时, 单位时间内参与磨削的磨粒数量增加, 单颗磨粒负荷减小, 工件塑性变形和犁沟两侧塑性隆起减小, 导致

表面粗糙度值减小.

当 $v_s = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $v_w = 8\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 表面粗糙度随磨削深度的变化, 如图 11(b) 所示. 由图 11(b) 可知: 随着磨削深度的增加, 表面粗糙度呈上升的趋势. 其原因是增大磨削深度会使单颗磨粒未变形切屑厚度增大, 磨削力加大, 塑性变形的程度增大, 从而使表面粗糙度值增大.

当 $v_s = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $a_p = 40 \text{ } \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度随进给速度的变化, 如图 11(c) 所示. 由图 11(c) 可知: 随着进给速度的增加, 表面粗糙度呈上升趋势. 这是因为增大进给速度会使单位时间内金属材料去除率增加, 单颗磨粒切厚增大, 塑性变形量增大, 导致表面粗糙度值增大.

综上所述可知, 平行于磨削方向的表面粗糙度为 $0.1 \sim 0.4 \text{ } \mu\text{m}$, 垂直于磨削方向的表面粗糙度为 $0.35 \sim 0.65 \text{ } \mu\text{m}$. 平行于磨削方向的表面粗糙度较小, 这是因为每颗磨粒在表面都会进行耕犁划擦并留下沟槽, 而沟槽的方向与磨削方向一致(图 10(b)). 因此, 平行磨削方向测量时, 基本是沿着平行沟槽的方向进行, 而沿着平行沟槽方向的形貌比垂直于沟槽方向的平坦, 所以平行于磨削方向的粗糙度较小.

3 结论

1) 磨削力随着磨削深度和工件进给速度的增加而增大, 随着砂轮线速度的提高而明显减小. 对磨削力影响最大的是磨削深度, 其次是磨削速度. 磨削力比为 2.6 左右.

2) 磨削加工表面平行于磨削方向时, 工件表面粗糙度为 $0.1 \sim 0.4 \text{ } \mu\text{m}$; 垂直于磨削方向时, 工件表面粗糙度为 $0.35 \sim 0.65 \text{ } \mu\text{m}$. AA4032 主要以塑性方式去除, 其被加工表面由光滑区、划痕、磨屑粘附、白色析出颗粒及孔组成. 随着磨削速度增大, 磨削加工表面光滑区增多, 磨削表面粗糙度明显减小, 表面质量明显提高.

3) 试验中, 磨削比能集中在 $20 \sim 90 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$. 在相同的 $h_{c, \max}$ 下, 高速磨削有利于降低磨削能耗.

参考文献:

- [1] 刘文锋, 黄国钦, 徐西鹏. 细粒度钎焊金刚石砂轮磨削花岗岩的磨削力特征分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2012, 32(2): 39-42. DOI:10.13394/j.cnki.jgszz.2012.02.013.
- [2] 张大将, 黄国钦. 金刚石结块磨粒排布层间距实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 288-293. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201703002.
- [3] CHEN Jianyi, HUANG Hui, XU Xipeng. An experimental study on the grinding of alumina with a monolayer brazed diamond wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(1/2): 16-23. DOI:10.1007/s00170-008-1459-8.
- [4] 李曙生. 新型单层钎焊金刚石砂轮磨削工程陶瓷的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 61-109.
- [5] ZHANG Bei, FU Yucan. Grinding of brittle materials with brazed diamond grinding wheel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9/10/11/12): 2845-2852. DOI:10.1007/s00170-012-4697-8.
- [6] LI Qilin, XU Jiuhua, SU Honghua, *et al.* Fabrication and performance of monolayer brazed CBN wheel for high-speed grinding of superalloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5/6/7/8): 1173-1180. DOI:10.1007/s00170-015-7125-z.
- [7] TEICHER U, KÜNZANZ K, GHOSH A, *et al.* Performance of diamond and CBN single-layered grinding wheels in grinding titanium[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2008, 23(3): 224-227.
- [8] KLOCKE F, BAUS A, BECK T. Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, 49(1): 241-244.
- [9] XU Xipeng, LI Yuan, MALKIN S. Forces and energy in circular sawing and grinding of granite[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(1): 305-312. DOI:10.1115/1.1344900.
- [10] 马尔金 S. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起, 等译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002: 41-45.
- [11] HWANG T W. Grinding energy and mechanisms for ceramics[D]. Amherst: University of Massachusetts Amherst, 1997.
- [12] 史瑱. 4032 铝合金高温变形行为及涡旋盘精密模锻数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 23-25.