

文章编号 1004-924X(2015)04-0996-08

基于修整力的树脂结合剂金刚石砂轮机械修整

仇中军*, 邹大程, 闫广鹏

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:研究了树脂结合剂金刚石砂轮修整过程中修整力与修整效果的关系,基于修整力的变化表征了砂轮的表面形貌及磨削性能。首先,对碳化硼、碳化硅、白刚玉 3 种砂轮修整工具进行实验,并采集了修整过程中修整力的变化;然后,利用白光干涉仪观测修整后砂轮的表面形貌;最后,对修整后砂轮进行磨削验证实验,得到不同修整工具修整后砂轮的磨削性能。基于上述实验,分析并验证了修整力的变化与砂轮表面形貌和砂轮磨削性能的关系。结果表明,法向力 F_n 能够表征砂轮的磨粒切削刃密度以及磨粒突出高度;修整比率 β 反映了砂轮的锋锐程度,当 β 稳定时,砂轮达到充分修整。因此修整力反映了砂轮表面形貌和磨削性能,根据修整力的变化可以把握砂轮的修整进程。

关键词:磨削;机械修整;树脂结合剂金刚石砂轮;修整力;表面形貌

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0996

Mechanical dressing of resin bond diamond grinding wheel based on dressing force

QIU Zhong-jun*, ZOU Da-cheng, YAN Guang-peng

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instrument,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: qiuzhongjun@gmail.com

Abstract: The relationship between dressing force and dressing effect in resin bond diamond grinding wheel processing was researched. The topography and the grinding performance of a grinding wheel were characterized by the variation of dressing forces. Firstly, the dressing experiments for resin bond diamond grinding wheel were performed by using boron carbides, silicon carbides and the corundum, and the variation of dressing forces was collected. Then the topography of dressed grinding wheel was observed by a white light interferometer. Finally, the grinding tests were conducted to obtain the grinding performance. On the basis of the experiments above mentioned, the relationship between the variation of dressing forces and the topography of dressed grinding wheel was analyzed and verified. Experimental results show that the normal force F_n represents the cutting edge density and the protrusion of diamond abrasive, and the dressing ratio β reflects the sharpness of diamond abrasive. In addition, the dressing process is sufficient when β begins to stability. So the dressing forces are related to the topography and the grinding performance of grinding wheels, and the dressing

收稿日期:2014-07-08;修订日期:2014-09-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375336);天津市自然科学基金资助项目(No. 12JCZDJC27900)

processing is controlled based on the variation of dressing forces.

Key words: grinding; mechanical dressing; resin bond diamond grinding wheel; dressing force; topography

1 引言

目前,磨削仍然是工业上用于硬脆材料零部件加工制造的主要方式之一^[1],其中基于树脂结合剂金刚石砂轮的超精密磨削方法由于能够获得更好的硬脆材料表面质量和材料去除效率,在复杂光学型面的磨削加工中得到了广泛应用^[2]。不过,树脂结合剂砂轮在磨削过程中其形状容易受到破坏,保持能力较差,同时砂轮堵塞、磨粒磨钝等会导致砂轮的材料去除能力下降,甚至会破坏工件表面,因此磨削过程中针对砂轮进行修整就显得尤为重要,它直接影响着被加工硬脆材料工件的加工质量、生产效率和制造成本^[3-4]。

树脂结合剂金刚石砂轮修整的常用方法主要有机械修整、特种修整等。Stompe 等人提出用激光在径向对砂轮进行修整,切向对砂轮进行整形的方法,该方法可用于修整树脂结合剂砂轮,但是得到的砂轮形状精度不高,并且激光系统搭建复杂,成本较高^[5-7]。机械修整方法装置简单,成本较低,并且修整效果较好,是目前树脂结合剂金刚石砂轮修整最常用的方法^[8-10]。机械修整过程中修整力为可以即时测得的信号,其大小与砂轮修整进程和状态息息相关,人们对机械修整过程中的修整力进行了大量研究。Inasaki 发现修整时每个磨粒所受力越大则修整效率越高^[11]。Huang 根据修整实验得出了修整粒度较大的砂轮需要选用大磨粒载荷,而粒度较小的砂轮则选用小磨粒载荷的结论^[12]。Sung 分析了杯型砂轮修整立方氮化硼(CBN)砂轮时,转速比以及进给速度对修整力的影响,并得出修整力与磨削力成反比的结论^[13]。Rascalha 等人利用测压元件采集修整力,得出影响修整力的主要因素是修整工具的进给速度以及进给切深^[14]。

由于砂轮修整力能够实时观测,如果能够根据砂轮修整力判断砂轮的修整状态以及磨削性能,就可以缩短修整时间,这对于耗时较长的机械

修整方法具有重要意义。目前,大多数研究者主要研究砂轮修整过程中修整力的变化规律,而研究修整力和砂轮修整效果的关系,用以指导和表征金刚石砂轮的修整过程的报道较少。本文选用常用的3种修整砂轮工具:碳化硼(B_4C)、碳化硅(SiC)和白刚玉(Al_2O_3),通过监测修整过程中的修整力,并结合修整前后砂轮表面的形貌变化,分析不同修整工具修整砂轮时产生的修整力和砂轮表面形貌间的对应规律,建立了修整力与修整效果的关系,为金刚石砂轮机械修整过程和修整效果的评价提供理论依据。

2 实验原理及方法

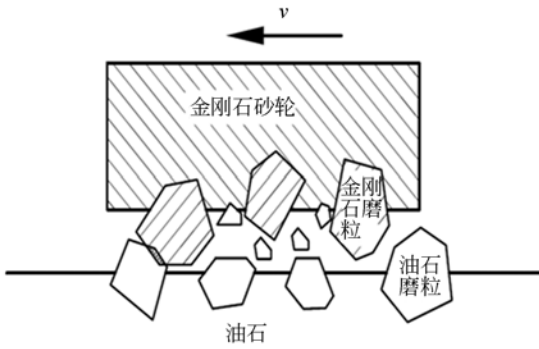
树脂结合剂金刚石砂轮机械修整通常是通过将砂轮和修整工具对磨实现的,修整时修整工具与砂轮的相互作用如图1(a)所示。当每次进给量小于砂轮表面磨粒的原始突出时,修整过程中以修整工具磨粒和金刚石磨粒碰撞为主要方式,与砂轮结合剂接触较少。金刚石磨粒与修整工具磨粒碰撞的过程中会产生法向力和切向力,同时,击碎的工具磨粒对结合剂不仅产生切削作用,也会产生法向力以及切向力,而后者是一个细微的研磨过程,产生的力较小^[16],因此修整力主要指磨粒碰撞产生的力。

假设金刚石磨粒和修整工具磨粒均为刚体,碰撞时没有产生变形,因此二者碰撞部位可认为是面接触。图1(b)为金刚石磨粒与修整工具磨粒碰撞的模型,合力 F 的方向垂直于两磨粒碰撞时的接触面, F 可以分解为法向力 F_n 以及切向力 F_t 。定义修整力比率 β 为:

$$\beta = F_n / F_t = \tan(\alpha/2), \quad (1)$$

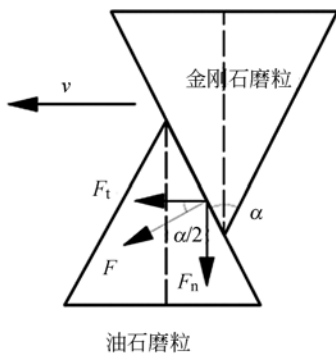
式中: α 为磨粒顶圆锥角。金刚石磨粒破碎后得到的磨粒切削刃越锋利, α 角度越小,得到的 β 值也越小,因此 β 值可以用来评价金刚石磨粒的锋锐程度。

利用 Abbott-Firestone 曲线对砂轮的锋锐程



(a) 金刚石砂轮机械修整机理

(a) Dressing mechanism of diamond grinding wheel



(b) 金刚石磨粒与修整工具碰撞模型

(b) Colliding model of diamond abrasive and dressing tool

图 1 实验原理

Fig. 1 Experimental principle

度以及表面形貌进行表征。如图 2 所示,在一定的取样长度内,Abbott-Firestone 曲线能够获得 2 个参数:峰顶粗糙度 R_{pk} 和谷底粗糙度 R_{vk} ,分别用来表征砂轮表面磨粒的突出和气孔状态。本文引入峰值高度以上所占比例 M_{r1} 、低谷深度以上所占比例 M_{r2} 、材料填充轮廓峰体积 V_1 、冷却液填充轮廓谷体积 V_2 等参数来表征砂轮表面的组织状态。具体表征参数如表 1 所示。

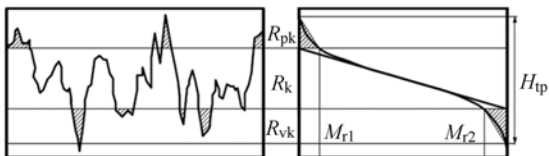


图 2 Abbott-Firestone 曲线

Fig. 2 Abbott-Firestone curve

表 1 输出参数及其表征

Tab. 1 Specifications of output parameters

输出参数	参数说明
R_{pk} (Core roughness depth)	简约峰高是指粗糙度核心轮廓上方的轮廓峰的平均高度
R_{vk} (Reduced valley depth)	简约谷深是指从粗糙度核心轮廓延伸到材料内的轮廓谷的平均深度
M_{r1} (Peak material component)	峰值高度以上所占比例;本研究中来表征砂轮磨粒的切削刃密度。
M_{r2} (Valley material component)	低谷深度以上所占比例;本研究设 $M_{r3} = 1 - M_{r2}$,因此 M_{r3} 能够表征砂轮表面的气孔密度
V_1 (Material filled profile peak volume)	材料填充轮廓峰体积;即在切入的过程中材料被去除掉的体积 $V_1 = M_{r1} \cdot R_{pk} / 200$,用来表征砂轮磨粒的锋锐度
V_2 (Lubricant filled profile valley volume)	冷却液填充轮廓谷体积;即在加工过程中填充润滑油的体积 $V_2 = (100 - M_{r2}) \times R_{pk} / 200$,用来表征磨粒的脱落难易程度
H_{tp}	截取轮廓支撑率曲线所得的最大高度差,用于表征磨粒的突出高度

3 砂轮修整实验

3.1 实验方法

本研究采用的修整装置如图 3 所示,被修整砂轮安装在立式五轴联动机床的主轴上,随主轴进行高速旋转。测力仪安装在机床工作台上,修整工具被固定在测力仪上。修整时,砂轮沿 Y 方向往复运动,同时在 X 方向做间歇式进给。实验参数如表 2 所示。

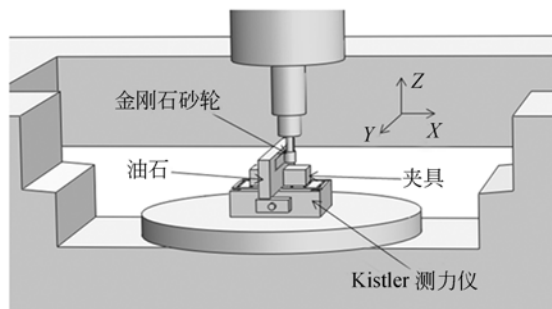


图 3 修整系统搭建

Fig. 3 Dressing and truing system

表 2 实验参数

Tab. 2 Dressing and truing conditions

参数	详情
实验机床	自主研发的五轴联动加工机床
砂轮	W40 树脂结合剂金刚石砂轮
修整工具	800 # B ₄ C; 800 # SiC; 800 # Al ₂ O ₃
测力仪	Kistler 9256C2; Charge amplifier 5070A
冷却液	乳化液
砂轮转速/(r · min ⁻¹)	2 000
Y 向进给速度/(mm · min ⁻¹)	12
X 向进给/μm	4

3.2 实验结果及讨论

在修整过程中,测力仪输出的修整力信号含有冷却液以及高频噪声信号成分。为了获得准确的修整力信号,本文通过测量砂轮与修整工具接触时的力信号,以及砂轮与修整工具未接触时的力信号,两者做差滤除干扰成分,即可得出修整时的精确力信号。

基于上述实验原理和实验方法,得到法向力随修整次数的变化如图 4 所示。比较图中不同工具修整曲线可知,法向力最大的是 B₄C,其次是 SiC 和 Al₂O₃。这是由于法向修整力主要是在磨粒切入时由切削材料的反作用力和摩擦力产生的,而三者中 B₄C 的硬度最大,金刚石磨粒与 B₄C 磨粒碰撞时产生的反作用力大,频繁的大力撞击会使金刚石磨粒产生破碎,形成更多的切削刃,使磨粒切削刃密度增大。因此得到的砂轮切削刃密度最大的修整工具是 B₄C,其次是 SiC 和 Al₂O₃。同时,法向力越大,砂轮磨粒对修整工具的法向挤压作用越明显,破碎工具的磨粒粒度越小,导致砂轮表面磨粒的突出高度降低,因此由法向力也可以推断修整后砂轮的突出高度从大到小依次是 Al₂O₃、SiC 以及 B₄C。

图 5 所示为砂轮修整过程中修整力比率 β 的变化。从图中可知, SiC 修整力比率最大,而 Al₂O₃ 修整力比率最小。根据式(1)可知, SiC 修整得到的砂轮锋锐度最差, Al₂O₃ 得到的砂轮锋锐度最好。对于每一种修整工具,随着修整次数的增多, β 都是先增大后减小,这是由于初始修整时砂轮磨粒还没有形成微刃,同时修整工具磨粒还没有形成微破碎进入到砂轮表面的磨粒中,对结合剂进行去除。砂轮和修整工具间的相互去除作用较弱,彼此都形成了材料去除的残余积累,导

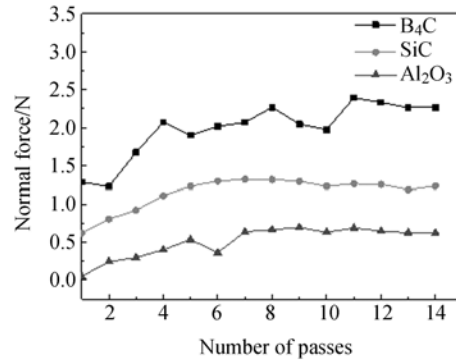


图 4 法向力随修整进给次数的变化

Fig. 4 Variation of normal dressing force with number of passes

致修整力比率增加。而且随着砂轮与工具接触面积的增大,也会导致修整工具对砂轮的修整力增大。当法向修整力增大到一定程度并达到稳定时(见图 4),此时砂轮形状达到稳定状态,而图 5 中对应 β 值则上升到最大。在较大的法向力和修整工具磨粒频繁撞击下,砂轮磨粒的微刃开始出现,并且随着修整工具磨粒的破碎,对砂轮结合剂的去除作用增加,砂轮表面的金刚石磨粒突出高度增大,因此砂轮金刚石磨粒的锋锐度增大,修整力比率 β 开始减小直至趋于稳定。此时说明砂轮的形状和锋锐度都达到了稳定状态,可以停止修整。

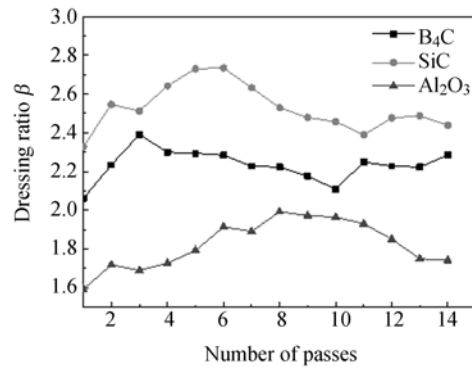


图 5 β 值随修整进给次数变化

Fig. 5 Variation of β with number of passes

通过白光干涉仪测量可以获得修整后砂轮的 Abbott-Firestone 曲线。图 6 为不同修整工具修整前后砂轮的 Abbott-Firestone 曲线,从图中可以看出,修整后砂轮的表面形貌有了明显的改善,磨粒的突出高度以及砂轮表面的凹坑数量都有不同程度的增大。

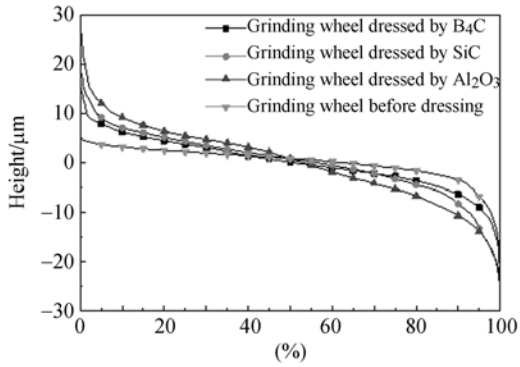
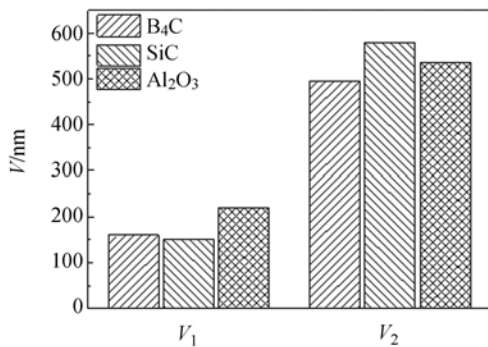


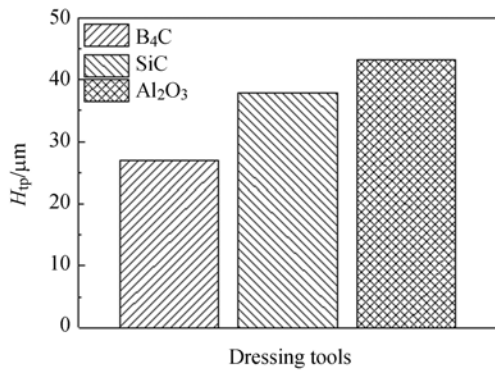
图 6 修整前后砂轮 Abbott-Firestone 曲线

Fig. 6 Abbott-Firestone curves of grinding wheels before and after dressing

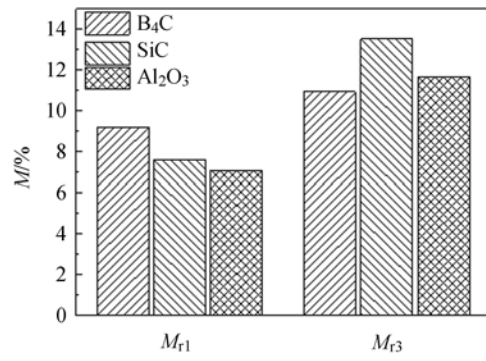
图 7 为砂轮修整后的白光观测参数。不同的修整工具在相同条件修整砂轮时, Al_2O_3 修整后砂轮的 V_1 最大, 然后是 B_4C 和 SiC ; SiC 修整砂轮得到的 V_2 最大, Al_2O_3 次之, B_4C 则最小; H_{tp} 最大的是 Al_2O_3 , 其次是 SiC 和 B_4C ; M_{r1} 最大的是 B_4C , 之后是 SiC , 最小的是 Al_2O_3 ; M_{r3} 最大的是 SiC , 其次是 Al_2O_3 以及 B_4C 。



(a) V_1 和 V_2



(b) H_{tp}



(c) M_{r1}, M_{r3}

图 7 修整后砂轮白光观测参数

Fig. 7 Parameters of dressed wheels obtained by Vecco

综合表 1 可知, B_4C 修整得到的砂轮磨粒切削刃密度最大, 结合剂对磨粒的把持能力最好, 但是磨粒突出高度和表面气孔密度较低, 磨粒的锋锐度一般; SiC 修整后的砂轮表面气孔密度最高, 但磨粒锋锐度最差, 磨粒易脱落; Al_2O_3 修整后的砂轮切削刃密度较低, 但磨粒锋锐度最好, 磨粒突出高度最高, 结合剂对磨粒的把持能力也较好。这与前述根据修整力得到的砂轮表面形貌分析结论相吻合, 因此, 根据修整力可以推断得到砂轮的表面形貌。

4 磨削验证实验

4.1 实验装置

为了进一步验证树脂结合剂金刚石砂轮的修整效果, 本文分别使用不同修整工具修整后的树脂结合剂金刚石砂轮进行了磨削验证实验。磨削装置和磨削参数分别如图 8 和表 3 所示。磨削过

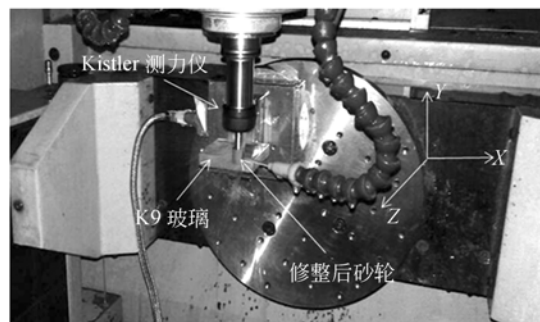


图 8 磨削验证实验

Fig. 8 Grinding tests of K9 glass

程中通过测力仪记录磨削力的变化。磨削后利用白光干涉仪对磨削表面进行测量。

表 3 磨削验证实验参数

Tab. 3 Grinding conditions

参数	详情
实验机床	自主研发五轴联动加工机床
砂轮	修整后的树脂结合剂金刚石砂轮
工件	K9 玻璃 50 mm×50 mm×12 mm
砂轮转速/(r·min ⁻¹)	8000
纵向进给量/μm	2
横向进给速度/(mm·min ⁻¹)	8
冷却液	乳化液

4.2 实验结果及讨论

比磨削能表示磨削过程中磨削单位体积材料所消耗的能量,砂轮磨粒锋利时,比磨削能小;钝化后,比磨削能加大。磨削过程中,随着磨削时间的延长,比磨削能逐渐增大。若比磨削能 e_s 小,而且增加缓慢,则说明磨削性好,其计算式为^[16]:

$$e_s = \frac{F_t v_s}{v_w ab}, \quad (2)$$

式中: F_t 为切向磨削力, v_s 为砂轮速度, v_w 为工件速度, a 为磨削深度, b 为磨削宽度。

磨削过程中利用测力仪得出切向磨削力 F_t ,代入公式(2),可得出比磨削能的变化如图 9 所示。由图中可以看出,Al₂O₃ 修整后砂轮 e_s 最小,变化比较缓慢;SiC 修整后砂轮 e_s 最大,且变化比较剧烈;B₄C 修整后砂轮比磨削能介于两者之间。由此说明,Al₂O₃ 修整后砂轮磨削性能更好, SiC 修整后的砂轮磨削性能较差, B₄C 修整后的砂轮磨削性能一般。

磨削比定义为工件的去除质量与砂轮的磨损质量之比。磨削比越高,说明去除单位体积的工件材料所导致的砂轮损耗越小^[16]。从图 10 中可以看出,磨削比较大的是 Al₂O₃ 和 B₄C 修整后的砂轮, SiC 修整后的砂轮磨削比最小,说明 Al₂O₃ 和 B₄C 修整后结合剂对磨粒的把持能力较强,磨削时砂轮损耗较少;而 SiC 修整后砂轮结合剂对磨粒的把持能力较弱,磨削时砂轮的损耗较多。

图 11 为修整后砂轮磨削工件的表面质量,磨削工件表面质量最好的是 Al₂O₃ 修整后的砂轮, B₄C 和 SiC 修整后砂轮磨削工件的表面质量

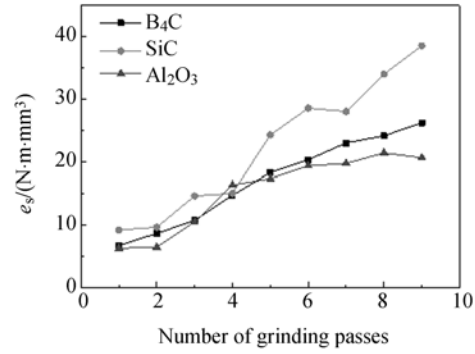


图 9 不同修整工具修整后砂轮比磨削能

Fig. 9 Specific grinding energies of various dressed grinding wheels

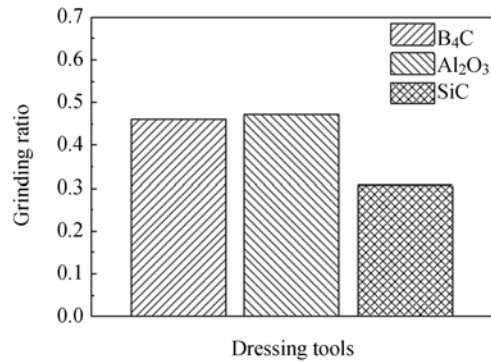


图 10 不同修整工具修整后砂轮磨削比

Fig. 10 Grinding ratios of dressed grinding wheels

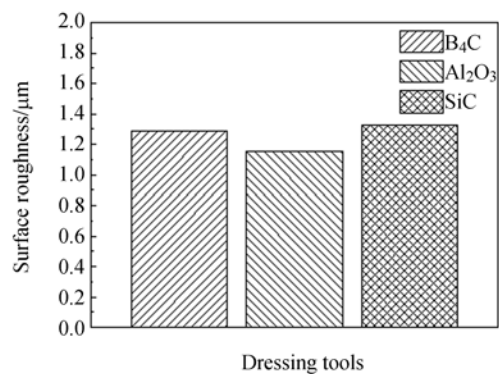


图 11 磨削工件表面粗糙度

Fig. 11 Surface roughnesses of workpieces

较差。Al₂O₃ 修整后砂轮的锋锐度更好,磨粒突出高度较高,容屑和冷却润滑能力相对较好,因此工件表面质量最好; B₄C 修整后砂轮磨削工件表面质量差是因为其磨粒突出高度不高,容屑和冷却空间不足; SiC 的容屑和润滑冷却能力虽然较

好,但是由于砂轮锋锐度不高并且磨粒脱落较多,无法实现稳定的切削厚度,因此得到的工件表面质量最差。

综合砂轮修整实验和磨削实验可知,3种修整工具中, Al_2O_3 修整过程中的法向力 F_n 以及修整力比率 β 最小,修整后砂轮最锋利,磨粒突出高度较高,磨削加工能够得到较好的工件表面质量,磨削性能最好; B_4C 修整过程中的修整力比率 β 较小,法向力 F_n 最大,修整后砂轮虽然较为锋利,但磨粒突出高度较差,得到的工件表面质量相对较差,磨削性能一般;而 SiC 修整过程中,法向力 F_n 较小,修整力比率 β 最大,尽管砂轮容屑和冷却润滑能力较好,但磨粒锋锐程度较差,磨粒容易脱落,相比 Al_2O_3 修整砂轮,得到的工件表面质量较差,磨削性能最差。上述验证实验结果表明,利用修整时法向力 F_n 以及修整力比率 β 的变化能够反映修整后砂轮的表面形貌及磨削性能,

因此可以根据法向力 F_n 以及修整力比率 β 的变化指导和评价砂轮修整进程。

5 结 论

本文针对机械修整时的修整力变化以及砂轮表面形貌展开了研究,通过不同修整工具对树脂结合剂金刚石砂轮进行了机械修整实验,分析了修整过程中力与砂轮表面形貌的对应关系,并结合修整后树脂结合剂金刚石砂轮的磨削实验进行了验证。实验结果表明,机械修整过程中力的变化能够反映砂轮的表面形貌,法向力 F_n 越大,磨粒切削刃密度越高,突出高度越小;修整比率 β 越小,砂轮磨粒越锋利,砂轮的磨削性能越好。当 β 趋于稳定时,砂轮的形状及锋锐度也随着修整过程达到稳定,因此能够根据修整力比率 β 指导修整过程,以减小修整时间。

参考文献:

- [1] FESS E, BECHTOLD M, WOLFS F, *et al.*. Developments in precision optical grinding technology [J]. *SPIE*, 2013, 8884: 88840L-88840L-5.
- [2] 仇中军,周立波,房丰洲,等.石英玻璃的化学机械磨削加工[J].*光学精密工程*,2010,18(7):1554-1561.
QIU ZH J, ZHOU L B, FANG F ZH, *et al.*. Chemical mechanical grinding for quartz glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1554-1561. (in Chinese)
- [3] 刘运凤,荆君涛,李占杰.旋转超声磨削加工中刀具结合剂类型与加工性能的关系[J].*光学精密工程*,2012,20(9):2021-2028.
LIU Y F, JING J T, LI ZH J. Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2021-2028. (in Chinese)
- [4] 张璧,程晓敏.磨削加工对纳米结构陶瓷涂层耐磨性能的影响[J].*纳米技术与精密工程*,2010,8(6):475-483.
ZHANG B, CHENG X M. Wear performance of ground nanostructured ceramic coatings [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2010, 8(6): 475-483. (in Chinese)
- [5] DENG H, CHEN G Y, ZHOU C, *et al.*. Processing parameter optimization for the laser dressing of bronze-bonded diamond wheels [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 290: 475-481.
- [6] STOMPE M, WITZENDORFF P, CVETKOVIC S, *et al.*. Concept for performance-enhancement of ultra-precision dicing for bulk hard and brittle materials in micro applications by laser dressing [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 98: 544-547.
- [7] WALTER C, RABIEY M, WARHANEK M, *et al.*. Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fibre laser [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 279-282.
- [8] 谢晋,阮兆武.光学自由曲面反射镜模芯的镜面成型磨削[J].*光学精密工程*,2007,15(3):344-349.
XIE J, RUAN ZH W. Mirror form grinding of free-form surface of reflector mold core [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 344-349. (in Chinese)
- [9] SUZUKI H, OKADA M, YAMAGATA Y, *et al.*. Precision grinding of structured ceramic molds by diamond wheel trued with alloy metal [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 283-286.

- [10] DANESHI A, JANDAGHI N, TAWAKOLI T. Effect of dressing on internal cylindrical grinding [J]. *Procedia CIRP*, 2014, 14: 37-41.
- [11] INASAKI I. Dressing of resin bond diamond grinding wheels [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1989, 38(1): 315-318.
- [12] HUANG H. Effects of truing/dressing intensity on truing/dressing efficiency and grinding performance of vitrified diamond wheels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 117(1): 9-14.
- [13] OH S H. *Dressing Characteristics in Nitriding Treated Bearing Steel under Ceramic Wheel Grinding Conditions*[M]. Berlin:Springer, Green and Smart Technology with Sensor Applications, 2012: 151-158.
- [14] RASCALHA A, BRANDÃO L C, RIBEIRO F S L M. Optimization of the dressing operation using load cells and the Taguchi method in the centerless grinding process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5-8): 1103-1112.
- [15] 庄司克雄,周立波,唐建设. 陶瓷结合剂金刚石砂轮的修整研究 II [J]. *金刚石与磨料模具工程*, 1992 (5): 6-12.
- SHOJI K, ZHOU L B, TANG J SH. Research on dressing and truing of vitrified bonded grinding wheels II [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 1992 (5): 6-12. (in Chinese)
- [16] 任敬心,华定安. 磨削原理[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- REN J X, HUA D A. *Grinding Theory* [M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)

作者简介:



仇中军(1974—),男,吉林长春人,副教授,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事超精密加工、微纳制造技术方面的研究。E-mail: qiuzhongjun@ gmail. com.



邹大程(1990—),男,江西南昌人,硕士研究生,2012年于同济大学获得学士学位,主要从事超精密磨削方面的研究。E-mail:dachengzou666@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)