

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.04.005

金刚石砂轮的磨削整形法研究*

尤佳旗,张尚雄,程浩,郑方志,于谋宇

(上海航天精密机械研究所,上海 201600)

摘要:为研究金刚石砂轮修整的工艺,采用绿碳化硅砂轮对金刚石砂轮进行磨削整形法修整。通过改变修整量、修整速比、切削进给量、工作台速度得出修整参数对砂轮磨削性能的影响规律。研究表明,工件表面粗糙度随着修整量增加而增大,修整量增加到一定次数时粗糙度变化不大;修整速比增大时,工件表面粗糙度值增大;切削进给量增大时,工件磨削表面粗糙度增大;工作台速度增大时,工件表面粗糙度增大。所得结论为绿碳化硅砂轮修整金刚石砂轮的工艺参数选取提供了切实有效的参考价值。

关键词:金刚石砂轮;磨削整形法;表面粗糙度;修整速比

中图分类号:TG580.6

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)04-0017-04

Research on Grinding Dressing Method for Diamond Grinding Wheel

YOU Jia-qi, ZHANG Shang-xiong, CHENG Hao, ZHENG Fang-zhi, YU Mou-yu

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

Abstract: To study the dressing process of diamond grinding wheel, the diamond grinding wheel is dressed by green silicon carbide grinding wheel with grinding dressing method. By changing the dressing quantity, dressing speed ratio, cutting feeding, speed of workbench, the influence law of dressing parameters on grinding wheel grinding effect is concluded. The research results show that the workpiece surface roughness increases with the amount of trimming, and the roughness changes little when the amount of trimming increases to a certain number of times; the workpiece surface roughness increases with the increase of dressing speed ratio; when the cutting feeding increases, the workpiece surface roughness increases; and when the workbench velocity increases, the workpiece surface roughness increases. It provides a practical and effective reference value for selecting the technological parameters of dressing the diamond grinding wheel with green silicon carbide grinding wheel.

Key words: diamond grinding wheel; grinding dressing method; surface roughness; dressing speed ratio

0 引言

金刚石砂轮具有容屑空间大,磨粒排布有序,磨粒切削性能好、强度高的特点,在高速磨削、难加工材料磨削等领域拥有广泛的应用^[1]。然而,在磨削一段时间后,砂轮磨粒会发生磨损钝化、破碎、粘着、磨粒堵塞砂轮气孔等现象,降低了砂轮的磨削性能,从而影响磨削工件的表面质量,因此磨削性能的好坏关键在于砂轮的修整^[2]。

国内外在超硬材料砂轮的磨削修整方面已经有了比较深入的研究,文献[3]采用金刚石杯形砂轮修整法对单层钎焊金刚石砂轮进行了整形,使修整效率提高的同时避免了过度腐蚀造成的磨粒破损开裂。文献[4]开发了一种改进的形状挤压成形系统,通过此系统对各种陶瓷结合剂砂轮进行了成形压碎修整砂轮试验,结果表明该系统对脆性结合剂砂轮修整具有普遍的适用性。文献[5]从修整速比、修整进给量方面研究了滚轮修整器磨削修整金刚石砂轮后的砂轮表面形貌特征。文献[6]采用金刚石笔修整树脂

结合剂金刚石,采用机械化学形式修整钎焊砂轮,通过修整后砂轮磨粒形貌和磨削玻璃的表面粗糙度评价整形效果。文献[7]分别用金刚石微粉烧结棒和杯形砂轮对金刚石砂轮进行修整,使用修整后的砂轮磨削插尺刀作为两种修整法的检测手段,得出杯形砂轮修整法更经济、高效。

砂轮的修整技术评判包括磨粒锋利程度、容屑空间、磨粒等高性。等高性越好,每颗磨粒切削厚度越均匀,磨削材料后的表面形貌也更光洁。磨粒越锋利,磨削力越小,材料去除效率越高,越不易因磨削热造成表面热损伤。金刚石砂轮根据磨削适用范围可选用不同的结合剂,针对结合剂不同的化学成分和特性,选用的修整方法也有所不同。目前,国内外在金刚石砂轮的修整中采用了激光整形、高温高压整形、振动整形、化学整形以及传统的机械磨削修整^[8-10]。然而大多数整形方法需专用设备,制造成本高且过程复杂。因此开展技术成熟、经济性好、修整精度高且效率高的整形方法是未来趋势。笔者采用磨削整形

* 收稿日期:2023-11-16

作者简介:尤佳旗(1992-),男,上海人,工程师,研究方向:精密制造。

法对金刚石砂轮进行修整,在取得良好修整精度的前提下保证经济性和高效性,为传统机械整形金刚石砂轮提供一定的参考价值。

1 磨削整形及工艺应用

磨削整形法是以绿碳化硅或白刚玉作为磨料,使滚轮工具与金刚石砂轮对磨整形的一种方法。修整进给量、修整速比对修整后金刚石砂轮的磨削性能有重要影响^[11]。磨削整形法修整过程中,从滚轮上脱落的磨粒一方面可以对金刚石砂轮的结合剂进行切削去除,使磨粒突出表面;另一方面可以频繁冲击金刚石磨粒形成新的切削刃,达到修锐磨粒的效果^[12]。该方法的主要优点是技术成熟简单、经济性好、适用范围广、修整效率高、修整力小。

1.1 实验过程

磨削实验机床为德国斯来福林 KP-48T 平面精密磨床,如图 1 所示。被修整对象为树脂结合剂金刚石砂轮,型号为 DW40-B,尺寸为直径 300 mm,宽度为 30 mm。使用直径 100 mm,宽度 20 mm 的绿碳化硅滚轮对金刚石砂轮进行修整,如图 2 所示。实验采用顺修的方法。顺修时滚轮与砂轮接触点线速度方向相同,旋转方向相反,速差为两速度相减。



图 1 斯来福林 KP-48T 平面磨床



图 2 绿碳化硅滚轮修整金刚石砂轮

1.2 修整效果的评价方法

试验中,修整量对砂轮磨削效果的影响、滚轮与砂轮的相对移动速度对磨削效果的影响、修整速比对磨削效果的影响都是通过修整后砂轮磨削工程陶瓷表面粗糙度值进行评价。工程陶瓷表面粗糙度采用 Taylor FTS i200 白光干涉仪测量,砂轮表面形貌使用 LK-G80 激光测距仪和扫描电镜进行观察。

1.3 实验结果和分析

实验所用参数与修整后测得的工件表面粗糙度如表 1 所列。

图 3 是修整量为 $5\ \mu\text{m}\times 3$ 次、 $5\ \mu\text{m}\times 6$ 次、 $5\ \mu\text{m}\times 9$ 次和 $5\ \mu\text{m}\times 12$ 次时工件表面粗糙度的变化。

从图 3 中可以看出,当修整量增加时,工件表面粗糙度值从 $0.242\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.205\ \mu\text{m}$,砂轮表面磨粒高度至砂轮基体中心的距离整体趋向均匀一致,磨削后工件表面粗糙度更小。修整次数增加到一定值

时,粗糙度改善不明显。这是因为在未充分修整前,砂轮表面磨粒存在较大的高度差,磨粒刃口较钝,磨削性能不佳。在修整量达到 $5\ \mu\text{m}\times 9$ 时,金刚石砂轮表面磨粒已经达到最佳磨削状态,再加大修整量反而是过度损耗砂轮磨粒层。

表 1 实验参数与修整后工件表面粗糙度

滚轮速度 / (m/s)	砂轮速度 / (m/s)	修整速比	修整进给量 / μm	工作台速度 / (mm/min)	工件表面粗糙度 / μm
20	15	1.33	5	1 500	0.237
20	20	1	5	1 500	0.224
20	30	0.67	5	1 500	0.208
20	25	0.8	2	1 500	0.198
20	25	0.8	5	1 500	0.216
20	25	0.8	10	1 500	0.233
20	25	0.8	5	1 000	0.210
20	25	0.8	5	2 000	0.221
20	25	0.8	5	3 000	0.242

根据表 1 可得出修整速比、修整进给量、工作台速度与工件表面粗糙度的关系,结果如图 4~6 所示。

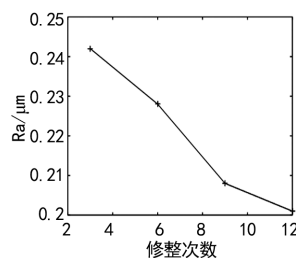


图 3 修整量对表面粗糙度的影响

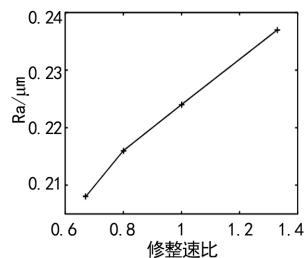


图 4 修整速比对表面粗糙度的影响

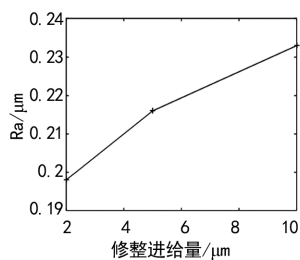


图 5 修整进给量对表面粗糙度的影响

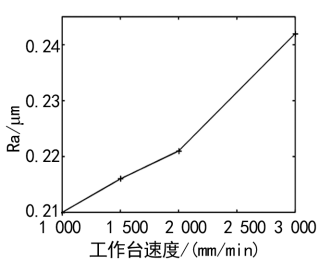


图 6 工作台速度对表面粗糙度的影响

由图 4 可以得出,当修整速比从 0.67 增大到 1.33 时,工件表面粗糙度从 $0.208\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.237\ \mu\text{m}$ 。随着修整速比的升高,滚轮与砂轮之间研磨挤压作用增强,磨削力增大,砂轮表面与工件表面碰撞效应趋于剧烈,降低了树脂结合剂对金刚石磨粒的附着力,引起砂轮磨粒脱落或断裂破碎,修整出来的砂

轮磨粒形貌起伏不平,刃口崩碎程度显著,在磨削工程陶瓷时表面留下较明显的沟痕,产生的刮擦和挤压现象增大了工件的表面粗糙度。相反,修整速比减小时,砂轮之间的挤压研磨效果减弱,磨削力降低,金刚石磨粒修整得更平齐,锐利程度下降,在磨削工件时,磨粒形成切削金属一般的犁耕效果,表面粗糙度降低。因此为获得良好的修整效果,需降低修整速比。

由图5可以看出,修整进给量从 $2\ \mu\text{m}$ 增大到 $10\ \mu\text{m}$ 时,工件表面粗糙度从 $0.198\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.233\ \mu\text{m}$ 。对于平面磨削,其公式^[13]为:

$$h_{\max} = 2\lambda_{\text{sl}} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a_p}{d_e}} \quad (1)$$

式中: λ_{sl} 为连续切削磨粒间隔,mm; v_s 为砂轮线速度,m/s; v_w 为工作台速度,m/min; a_p 为进给量, μm ; d_e 为砂轮的当量直径,mm。

进给量是影响工件加工表面粗糙度的重要因素,在其它因素不变的情况下,其与表面粗糙度呈反比关系,进给深度越大,最大未变形切削厚度 h_{\max} 就越大,工件加工后表面粗糙度越大;进给量作为公式中重要的变量,其影响程度远超过线速度和工作台速度,它对材料的脆性去除或塑性去除起决定性影响。随着进给量增大,金刚石砂轮磨粒受到的法向力增大,磨粒内部晶格断裂,晶格成核扩展,最终剥落形成微细破碎锐角,导致砂轮的磨粒刃口过于锋利。磨粒在磨削工件时,产生明显的沟痕。因此为获得良好的修整效果,需降低修整进给量。

由图6可得出,相对移动速度增大,工件表面粗糙度值增大。这是因为提高相对移动速度,砂轮有效磨粒间距增大,单位面积上受到切削的磨粒数量减少,此时砂轮表面粗糙度增大,故反映到工件表面上的粗糙度也相应增大。

1.4 修整前后形貌特征

在修整量 $5\ \mu\text{m} \times 9$ 次、修整速比0.8、修整进给量 $5\ \mu\text{m}$ 、工作台速度 $1\ 000\ \text{mm}/\text{min}$ 情况下,使用绿碳化硅砂轮修整金刚石砂轮后表面形貌及微观特性,结果如图7、8所示。使用LK-G80激光测距仪测量金刚石砂轮外表面轮廓度,结果如图9、10所示。

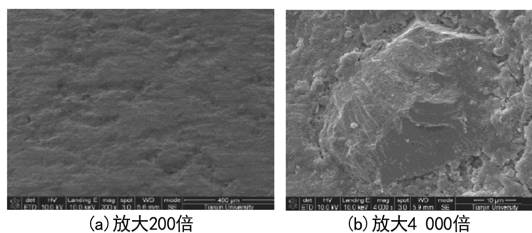


图7 修整前砂轮表面形貌

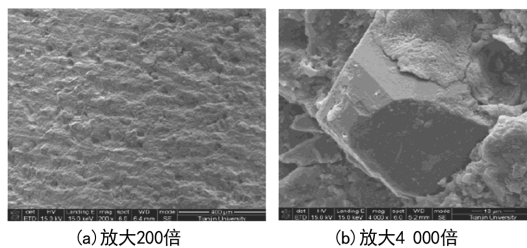


图8 修整后砂轮表面形貌

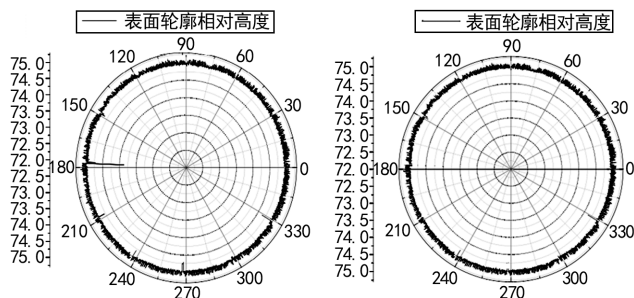


图9 修整前轮廓度

图10 修整后轮廓度

使用 Taylor FTS i200 白光干涉仪获得了工件表面轮廓形貌及微观特性,其结果如图11、12所示。

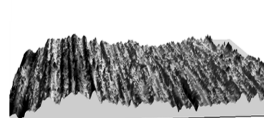


图11 修整前工程陶瓷表面形貌

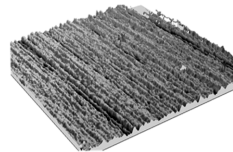


图12 修整后工程陶瓷表面形貌

由图7可见金刚石砂轮未修整前表面平滑、磨粒刃口钝化、容屑空间不足,磨削性能较差。由图8可见修整后金刚石砂轮表面磨粒刃口锋利、磨粒突出结合剂效果明显,存在较多凹坑,具备较好的容屑和储油能力。根据激光测量轮廓度可得,图9未修整前砂轮的平均高度为 $162\ \mu\text{m}$,回转误差为 $287\ \mu\text{m}$ 。图10修整后砂轮平均高度为 $127\ \mu\text{m}$,回转误差为 $139\ \mu\text{m}$,修整后砂轮回转误差降低了 $148\ \mu\text{m}$,表面磨粒高度排布呈均匀一致。由图11可见,未修整前,由于金刚石砂轮表面磨粒大小、形状、间隔、高度不均匀,磨削工件时留下的磨痕和材料脆性成块脱落留下的凹坑会使工件表面粗糙度成倍增大。由图12可见,修整后,金刚石砂轮表面平整,磨粒均匀,因此工程陶瓷以塑性去除为主,工件表面光洁完整,没有裂纹等损伤现象,用白光干涉仪观测可以看到只有类似金属切削时的犁犁划痕,表面轮廓曲线高低起伏较小,分布有规律。

2 分析结果总结

文章使用绿碳化硅砂轮对金刚石砂轮进行磨削

整形,以修整量、修整速比、修整进给量、工作台转速为研究因素,通过对修整后的砂轮磨削工程陶瓷表面粗糙度的评判,获得如下结果。

(1) 当修整量增加时,工件表面粗糙度下降,修整效果更好,但是当修整量增加到一定程度时,工件粗糙度变化不大,因此选择合理的修整量可以保证修整效果的同时较大地提高了砂轮的使用寿命,避免了砂轮的过度修整,建议修整量选择 $5\ \mu\text{m}\times 9$ 次。

(2) 修整速比增大时工件粗糙度增大,建议选择 2:3 的比例关系。

(3) 修整进给量增大时,工件粗糙度增大,需要设计粗整形和精整形以确保效率和质量并存。

(4) 工作台速度增大时修整效果变差,工件表面粗糙度增大。因此为了获得良好的修整效果,应选择较小的相对移动速度,推荐工作台移动速度在 $1\ 000\sim 1\ 500\ \text{mm}/\text{min}$ 之间。

3 结 语

文章在以便捷、高效、低投入为特点的绿碳化硅砂轮磨削整形法修整金刚石砂轮实验条件下,获得了最佳修整参数,改善了金刚石砂轮表面磨粒锋利程度、等高程度,对于提高树脂结合剂金刚石砂轮的磨削性能具有较强的指导意义。

参考文献:

[1] 武志斌,肖冰,徐鸿钧.单层钎焊金刚石砂轮工艺研究初探

(上接第 16 页)

综上所述,文章所研究的分析方法及结果可为数控机床电主轴热误差模型的建立以及轴芯冷却相关研究提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 陈裕明,陈鹏满,王柱,等.基于 ANSYS 的 KX-1 电主轴热特性仿真分析[J].机电工程技术,2022,51(10):169-173.
- [2] 陈玉球.高速电主轴热态性能的分析[J].机械研究与应用,2019,32(4):30-32.
- [3] 孙树文,高振涛,乔云飞,等.高速电主轴热特性建模与冷却系统参数优化方法研究[J].制造技术与机床,2023,10(17):90-97.
- [4] 李毅,陈国华,夏铭,等.电主轴冷却系统设计与仿真优化[J].工程设计学报,2023,30(1):39-47.
- [5] 沈志东,杜雄,李郝林,等.基于响应面优化算法的静压电主轴精确建模研究[J].机械强度,2022,44(5):1179-1185.
- [6] 代贵松.高速电主轴热特性分析及其热误差建模补偿研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [7] Harris T A, Kotzalas M N. Rolling Bearing Analysis, Part 2: Advanced Concepts of Bearing Technology[M]. 5th ed. Beijing: China

- [J].机械设计与制造工程,2001,30(1):53-54.
- [2] 王爱珍,王战.陶瓷 CBN 砂轮修整方法及修整工艺研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2008,164(2):65-68.
- [3] 张宾,沈剑云,徐西鹏,钎焊金刚石砂轮修整试验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2007(6):19-22.
- [4] Derkx J M, Hoogstrate A M, Saurwalt J J, et al. From Crush Dressing of Diamond Grinding Wheels[J]. Manufacturing Technology, 2008, 53(4):349-352.
- [5] Li W, Wang Y, Fan S, et al. Wear of Diamond Grinding Wheels and Material Removal Rate of Silicon Nitrides under Different Machining Conditions[J]. Manufacturing Letters, 2007, 61(7):54-58.
- [6] 王帅.金刚石砂轮修整技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [7] 于晓娟,赵文祥,王西彬.金刚石微粉烧结棒与杯形砂轮修整碟形金刚石砂轮的对比试验研究[J].工具技术,2007,39(5):34-37.
- [8] 肖德明.超硬砂轮的成形修整[J].磨床与磨削,1997,22(3):47-50.
- [9] 王艳,邓琦林,胡德金,等.金刚石砂轮修整新技术的研究[J].电加工与模具,2003,5(5):1-4.
- [10] 王建军.成形磨削中砂轮修整精度的研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2002(5):48-49.
- [11] 李亚非,赵文祥.GC 杯形砂轮修整碟形金刚石砂轮实验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2003,137(5):28-32.
- [12] 胡忠辉,袁哲俊.CBN 砂轮修整方法及其对磨削表面完整性的影响[J].磨料磨具与磨削,1992(3):2-7.
- [13] 任敬心,华定安.磨削原理[M].西安:西北工业大学出版社,1988.

- Machine Press, 2011.
- [8] 王丽锋.高速电主轴热态特性分析及冷却系统实验研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
- [9] Liu J, Zhang P. Thermo-mechanical Behavior Analysis of Motorized Spindle Based on a Coupled Model[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1):1-12.
- [10] Chien C H, Jang J Y. 3-D numerical and experimental analysis of a built-in motorized high-speed spindle with helical water cooling channel[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17):2327-2336.
- [11] 徐荣飞,范开国.基于数字孪生的电主轴热特性研究[J].中国机械工程,2022,33(16):1965-1971.
- [12] 王旭,栗心明,杨萍,等.喷嘴结构及参数对油气润滑轴承性能的影响[J].轴承,2023(1):50-56.
- [13] 林奇,单文桃,曹伟长,等.永磁同步电主轴的热态特性分析[J].微电机,2023,56(5):12-18.
- [14] 刘道钱,陈涛,沈顺成,等.数控铣床主轴部件动态特性分析[J].机械设计与制造,2008(4):172-174.
- [15] 问梦飞,钟建琳,彭宝莹,等.高速电主轴热-结构耦合及选材分析[J].机床与液压,2023,51(4):158-163.