

文章编号: 1006-852X(2008)06-0018-05

# 先进光学磨削中杯形修整技术开发及应用\*

王振忠 郭隐彪 黄浩 何良宇  
(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要** 对于金刚石砂轮修整, 尤其是有高精度要求的圆弧金刚石砂轮, 杯形砂轮修整技术可以获得较好的砂轮磨削性能以及修整效率。本文开发了配套超精密平面磨床使用的杯形修整器, 分析了其机械误差影响, 并完成了修整实验及砂轮表面测量及半径拟合处理, 从宏观上考察了该修整器对砂轮磨削性能的提高, 结果证明该修整器可以进行有效修整, 提高了加工工具精度, 能满足金刚石砂轮修整使用要求。

**关键词** 超精密磨削; 杯形砂轮; 修整; 表面质量; 数据处理

中图分类号 TG74 文献标识码 A

## Development and application of cup truer in advanced optical grinding

Wang Zhenzhong Guo Yinbiao Huang Hao He Liangyu

(Dept of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005 China)

**Abstract** For the diamond wheel truing and dressing especially for high precision arc diamond wheel, the GC cup truing technology is often adopted to obtain fine grinding performance and truing efficiency. This paper presents a cup truer used in surface grinding machine, and analyzes the influence of mechanical error. Truing and dressing experiments and surface measurement of grinding wheel are carried out to obtain improvement of grinding performance and accuracy. The results show that the cup truer developed can well meet the truing and dressing demand.

**Keywords** ultra-precision grinding; cup wheel; truing and dressing; surface quality; data processing

### 0 前言

在先进光学制造领域, 尤其是大口径光学元件加工, 超精密磨削加工应用越来越广泛。

针对不同机床、砂轮及工件类型, 单晶金刚石、金刚石滚轮、ELD 在线电解修整、电火花修整、杯形修整、激光修锐技术等被提出并加以应用<sup>[1-3]</sup>, 其中的电

加工修整方法只适用于金属结合剂金刚石砂轮。已有研究表明, 对比各修整方式所能达到的磨粒状态、形状精度、表面粗糙度及修整效率等指标, 在成形修整方面, 杯形砂轮修整技术是比较理想的工作方式<sup>[4-5]</sup>。本文主要就三轴超精密数控平面磨床上平面、圆弧砂轮的杯形精密修整技术进行研究, 开发一种杯形砂轮修整器, 并进一步探讨其应用。

\* 863 计划重点项目 (2008AA042501); 福建省科技重大专项 课题 (2004HZ0002-4)

## 1 修整原理

先进光学元件主要指大口径 ( $\phi 300$  mm 以上) 平面、非球面、离轴非球面、楔形非球面及自由曲面等, 加工材料为光学玻璃、微晶玻璃等硬脆性材料, 其特点是大口径、高精度面形、超光滑表面和特殊外形。根据机床的运动坐标控制方式和种类, 可以组合出非球面的多种加工方式, 如加工轴对称非球面的 XZ 轴、XZB 轴机床坐标控制等方式, 加工自由曲面的 XYZ 轴、XYZC 轴等方式。从机床制造和加工通用性方面来看, 以数控高精度 XYZ 三轴联动的平面磨床配上平面砂轮、圆弧砂轮可以实现平面、非球面等高质量磨削。利用杯形修整技术, 能得到直线度非常高的砂轮截面, 同时进行修锐。利用这一特性, 就能修整出任意凸形截面, 易于得到较高的砂轮形状精度。平面及圆弧金刚石砂轮的杯形砂轮修整原理如图 1 所示, 杯形砂轮修整器安装于平面磨床工作台上。目前, 超精密磨削加工大口径先进光学元件所采用金刚石砂轮直径  $\phi 300$  mm 或  $\phi 400$  mm, 粗磨阶段砂轮粒度号 #200~#600, 精磨阶段砂轮粒度号 #800~#1500。

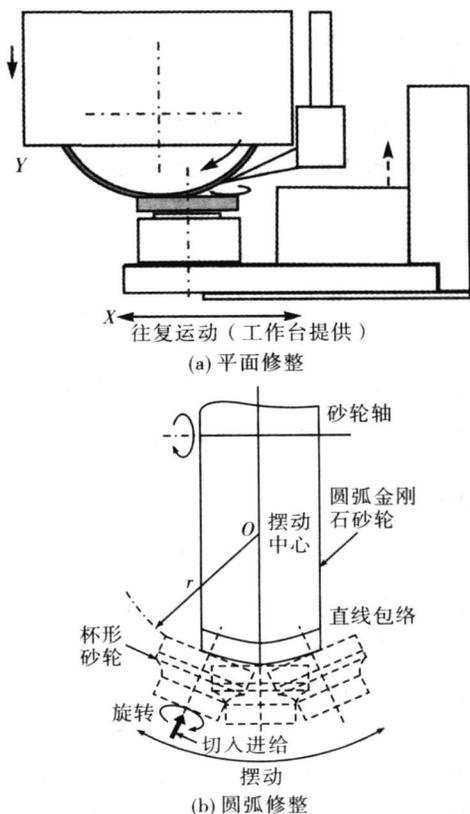


图 1 杯形砂轮修整原理

从图 1 中可以看出, 平面金刚石砂轮修整过程中, 运动关系有平面金刚石砂轮和杯形砂轮的各自旋转以及工作台的往复运动, 修整进给可以由机床或修整器提供。对于圆弧修整, 被修整圆弧金刚石砂轮只进行旋转运动; 杯形砂轮修整器提供摆动和修整进给运动, 还进行杯形砂轮自身的旋转运动, 往复运动同样由机床工作台提供。

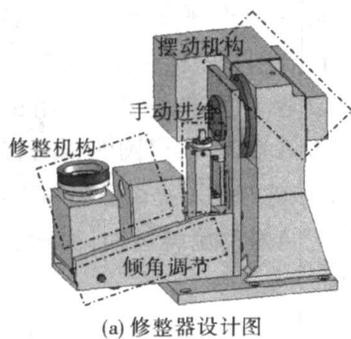
## 2 修整器开发

庄司克雄等人提出的 GC 杯形砂轮修整法, 其修整机理如下: 修形过程中从杯形砂轮上脱落下来的磨粒对金刚石磨粒和结合剂的冲击以及研磨作用产生修形效果, 即可整形, 也可同时修锐。但这样就造成了砂轮修整器的损耗较大, 同时需用较复杂的专用修形装置。

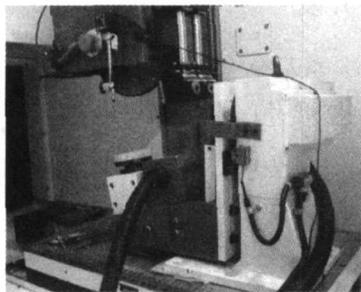
通常修整中, 由于杯形砂轮和金刚石砂轮之间呈水平布置, 两者间接触弧长较短。可设计带倾角杯形砂轮修整器增加接触弧长度, 从而提高修整效率和获得良好表面误差分布。为了达到最大接触弧长, 且保证修整器修形砂轮和金刚石砂轮不干涉, 通常修整器倾角设定为  $10^\circ$ 。

针对现有平面磨床上的安装位置, 本文所设计的杯形砂轮修整器如图 2 所示, 主要有四部分组成: 修整机构、摆动机构、手动进给调节机构、倾角调节机构。修整机构中由直流调速电机通过圆弧齿形同步带传动驱动杯形砂轮轴转动来提供修整旋转运动。摆动机构中采用伺服电机通过圆弧齿形同步带传动驱动摆动轴旋转来提供圆弧修整摆动运动, 考虑圆弧砂轮圆弧部分半经常用范围  $60$  mm ~  $90$  mm, 修整的切角范围在  $5^\circ$  ~  $12^\circ$  之间, 因此通过限位开关限制摆动运动在左右  $15^\circ$  范围内, 摆动步长最小  $0.01^\circ$ 。手动进给调节机构包括螺杆和螺母, 在修整时手动调节修整进给余量, 倾角调节通过修整机构底座的转轴和支撑螺母来实现倾角  $0^\circ$  ~  $15^\circ$  可调。

修整器电气系统部分如图 3 所示, 由单轴数控系统、伺服电机、伺服变压器、伺服电源、冷却风扇、系统电源、超程限位、电源保护等组成。考虑经济性和设计需要, 单轴数控系统采用北京凯恩帝公司的 KND K1SB, 伺服电机采用华大电机 30ST-M0772Q 扭矩  $7.7$  Nm。



(a) 修整器设计图



(b) 修整器实物图

图 2 修整器设计结构及实物

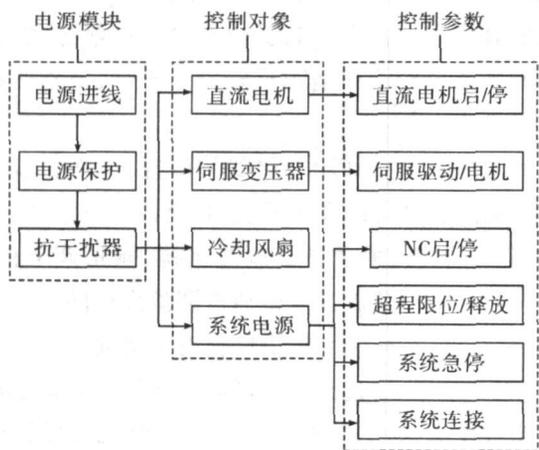


图 3 电气控制

### 3 修整器误差分析

杯形砂轮修整器在平面磨床上的安装固定误差影响着修整精度,包括修整器底座的调整、修整机构的调整、轴线调整等,在圆弧修整时,还有倾角调整。这里采用电感测微仪进行接触式测量调整。

在杯形砂轮修整器使用中,有两个因素对修整精度影响较大,一是杯形砂轮的旋转轴是否垂直机床工作台面;二是杯形砂轮旋转轴线与摆动轴线是否重合。已有研究表明<sup>[4]</sup>,采用径向切入式修整方式,如果杯形

砂轮的旋转轴没有调整到同机床工作台面完全垂直,则该旋转轴偏斜量会复印到砂轮截面形状上,且旋转轴线倾斜角度同金刚石砂轮截面形状倾角在大小上基本一致。杯形砂轮旋转轴线与摆动轴线不重合将导致圆弧砂轮截面误差,如图 4 所示。

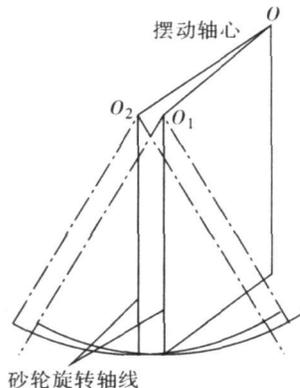


图 4 不重合误差影响

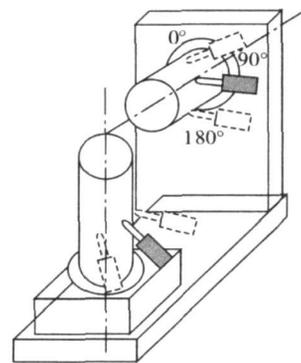


图 5 误差校正方法

通常修整对刀时,采用被修整圆弧金刚石砂轮两个端面分别与杯形砂轮外圆直接接触,在得到这两个位置的机床坐标后,取其平均值作为砂轮修整对刀位置,之后修整过程中缺省认为金刚石砂轮圆弧面中心与杯形砂轮宽度方向中截面重合。因此需要保证摆动轴线与杯形砂轮轴线重合,但目前无相应的手段和方法直接测量该轴线位置。在修整器制造时,这两个误差可通过机械部件加工精度及装配精度要求保证。为在使用中方便校正此误差,采取间接方法,即采用验棒方式。如图 5 所示,在摆动轴和杯形砂轮旋转轴上插入验棒,在机床主轴上固定接触式传感器或打表对验棒半圆上进行三个最大位置测量,通过测机床坐标的方式来确定摆动轴线与杯形砂轮轴线的重合度。理想状态下,两验棒上测量位置的机床坐标应该一致。

### 4 修整实验

本文所开发的杯形砂轮修整器可以修整平面砂轮及圆弧砂轮。修整平面砂轮时,将倾角调整为  $0^\circ$ ,修整器调整为水平状态,不做摆动。具体修整过程如图 6 所示,虚线框中即为砂轮修整加工循环步骤。

基于杯形砂轮修整原理,对修整器砂轮的选择,其粒度号要比被修整金刚石圆弧砂轮稍小,其硬度选择 H-J。因为硬度较低,GC 磨粒脱落越容易,脱落磨粒直径越大,对金刚石砂轮的冲击也越大,修整比也大。

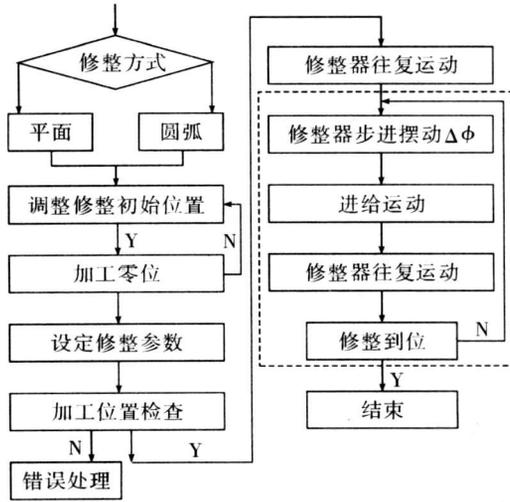


图 6 修整控制流程

平面金刚石砂轮修整实验中, 杯形砂轮为 GC 磨粒砂轮, 粒度号 W 63, 用于修整# 600D91 平面金刚石砂轮。修整参数: 金刚石砂轮转速  $S1=191\text{ r/m in}$ , GC 砂轮转速  $S2=480\text{ r/m in}$ , 机床工作台提供往复运动速度  $v_x=200\text{ mm/m in}$ , 修整进给量  $0.02\text{ mm}$ , Y 向修整总量  $2\text{ mm}$ 。为检验修整效果, 分别用修整前后的 D91 平面金刚石砂轮磨削  $\phi 100\text{ mm}$  光学玻璃, 采用磨削参数: X 轴速度  $v_x=4500\text{ mm/m in}$ , Z 轴速度  $v_z=120\text{ mm/m in}$ , 修整进给量  $0.02\text{ mm}$ , 磨削总量  $0.1\text{ mm}$ 。图 7 为修整前后金刚石砂轮的磨削效果对比, 可以很直观的看到修整前的磨削表面质量, 划痕多而且深, 呈不规则分布, 明显差于砂轮修整后的磨削质量, 从宏观上验证了所开发修整装置的有效性及其砂轮磨削性能的提高。

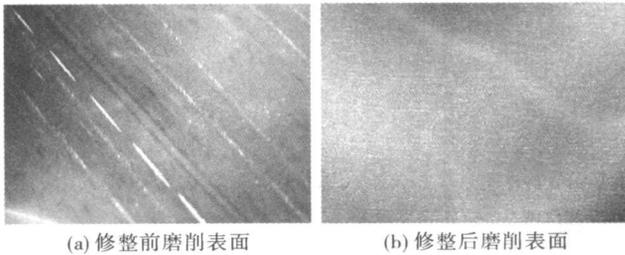


图 7 平面金刚石砂轮修整实验

同样进行了圆弧金刚石砂轮修整实验, 用于修整# 600D91 圆弧金刚石砂轮。修整参数: 圆弧砂轮转速  $S1=480\text{ r/m in}$ , GC 杯形砂轮转速  $S2=480\text{ r/m in}$ , 修整进给量  $\Delta Y=1\text{ }\mu\text{m}$ , 工作台提供往复运动速度  $v_x=300$

$\text{mm/m in}$ , 步进摆角  $\Delta\phi=1.5^\circ$ , 摆动范围  $\pm 7.5^\circ$ , 设置修整延后率  $\epsilon=33\%$ 、倾角为  $10^\circ$ , 修整总量  $0.2\text{ mm}$ 。为检验圆弧修整效果, 本文采用圆弧砂轮磨削碳片来复写修整表面质量。如图 8 所示, 左边为 D91 圆弧砂轮尚未经过修整时磨削的碳片表面, 划痕多且深; 右边为用 GC 杯形砂轮修整后磨削的碳片表面, 划痕仍然存在, 但比较均匀且深度有所减小。

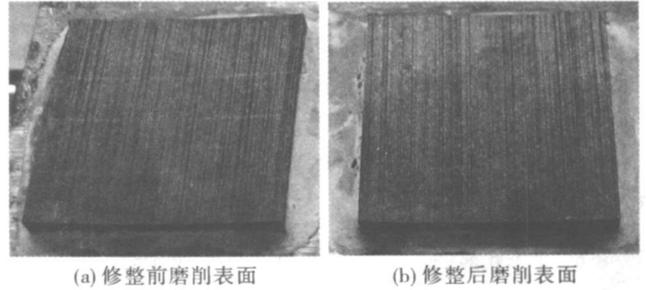


图 8 圆弧金刚石砂轮修整实验

### 5 砂轮测量及半径拟合

金刚石砂轮修整完成后下一步工作就是如何精确测量表面形貌并获得砂轮半径等参数用于磨削加工轨迹的计算。接触式测量方式会造成测头磨损, 不适合于直接测量砂轮表面, 非接触测量方式对于粒度号小的较粗糙砂轮表面误差会较大。同时为了避免砂轮安装过程中引入新误差, 提高加工精度, 测量过程中砂轮不能取下。因此采取如上述的碳片复写间接测量方法简单可靠, 选取接触/非接触测量传感器均可。本文采取接触式传感器对复写碳片进行测量, 在碳片上选取数个圆弧截面, 如表 1 所示为两个圆弧截面数据。圆弧金刚石砂轮宽度  $20\text{ mm}$ , 测量范围  $17\text{ mm}$ , 测量间距  $0.5\text{ mm}$ , 共 35 个点。

对砂轮表面测量数据进行处理要得到以下参数: 平面砂轮的直线度误差, 以及圆弧砂轮圆弧部分半径大小及圆度误差。数据处理流程主要包括预处理及拟合处理两部分, 其中预处理包括标度变化、系统误差修正、剔除粗大误差及平滑处理等。对于平面砂轮, 拟合处理采取一次多项式进行最小二乘法拟合, 可计算得到表面误差数据。在圆度评定与回转精度评定中, 由于数学解析式严谨、几何与统计意义清晰, 最小二乘圆方法得到广泛应用。文中对于圆弧砂轮, 采取该方法进行半径拟合处理及误差计算。如图 9 所示, 通过

表 1 圆弧砂轮圆弧截面测量数据

X	Y1	Y2	X	Y1	Y2
0	0	0	9.0	-0.44	-0.4265
0.5	-0.0475	-0.047	9.5	-0.439	-0.4245
1.0	-0.092	-0.0935	10.0	-0.433	-0.4185
1.5	-0.134	-0.131	10.5	-0.426	-0.4105
2.0	-0.173	-0.1745	11.0	-0.415	-0.399
2.5	-0.21	-0.212	11.5	-0.402	-0.385
3.0	-0.2445	-0.2445	12.0	-0.386	-0.369
3.5	-0.2775	-0.2765	12.5	-0.368	-0.3495
4.0	-0.3065	-0.3045	13.0	-0.347	-0.3265
4.5	-0.3325	-0.3296	13.5	-0.3225	-0.3015
5.0	-0.3555	-0.3515	14.0	-0.2945	-0.2735
5.5	-0.376	-0.3705	14.5	-0.265	-0.2435
6.0	-0.393	-0.387	15.0	-0.232	-0.2105
6.5	-0.4075	-0.401	15.5	-0.196	-0.178
7.0	-0.42	-0.4115	16.0	-0.156	-0.1405
7.5	-0.429	-0.4205	16.5	-0.115	-0.1005
8.0	-0.435	-0.4255	17.0	-0.069	-0.0575
8.5	-0.439	-0.4275			

M atlab 计算出数据 Y1 对应的砂轮表面圆弧半径  $R1=90\ 988\ 1\text{mm}$ , 数据 Y2 对应的圆弧半径  $R2=91\ 089\ 5\text{mm}$ 。结合修整金刚石砂轮粒度大小考虑砂轮表面粗糙度, 从拟合的数据来看,  $R1$  和  $R2$  相差  $101.4\ \mu\text{m}$ , 偏差只有  $0.1\%$ , 符合精度要求。取  $R1$  和  $R2$  的均值, 最终  $R=91\ 038.8\text{mm}$ 。如图 9 所示, 可以发现拟合残差基本控制在  $\pm 5\ \mu\text{m}$  以内, 说明数据处理算法准确有效。

## 6 结语

根据杯状砂轮修整金刚石砂轮的原理, 设计并实现了相应砂轮修整控制系统, 进行了相应砂轮修整实验, 结果表明: 所开发杯形砂轮修整器实现了对平面砂轮及圆弧砂轮的有效修整, 提高了加工工具精度控制。采用碳片复写间接测量方式及最小二乘法拟合方法可以满足砂轮表面测量及数据处理要求。通过大量修整实验来获得运动参数与杯形砂轮磨损之间的相对关系, 可实现修整的精确控制, 并进一步提高修整精度。

## 参考文献

- [1] Zhang C, Shin Y C. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels [ J ]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 825-835
- [2] Bandyopadhyay B P, Ohmori H. Efficient and stable grinding of ceramics by electrolytic in process dressing (ELID) [ J ]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66: 18-24
- [3] 庄司克雄. 陶瓷结合剂金刚石砂轮的修整研究 ( I ) [ J ]. 金刚石与磨料磨具工程, 1992, ( 5 ): 6-12
- [4] 庄司克雄. 陶瓷结合剂金刚石砂轮的修整研究 ( II ) [ J ]. 金刚石与磨料磨具工程, 1992, ( 6 ): 6-11
- [5] 郭隐彪, 张翊, 徐雅珍, 庄司克雄. 圆弧金刚石砂轮的修形及修锐技术研究 [ J ]. 制造技术与机床, 2003, ( 4 ): 38-42

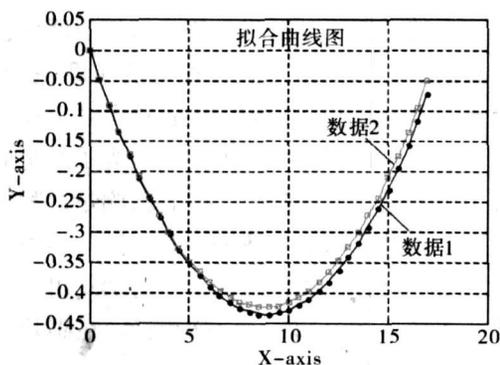
## 作者简介

王振忠, 男, 1981 年 11 月生, 博士研究生, 主要研究方向: 精密加工及装备技术。

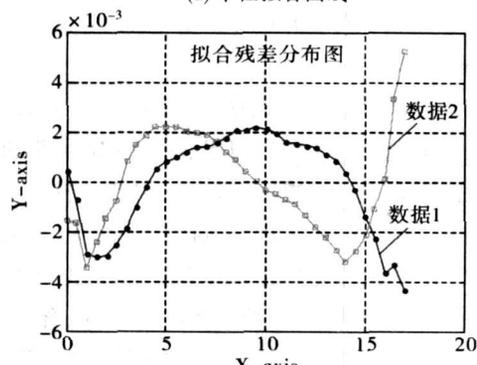
Email: wangzhenzhong@xmu.edu.cn

收稿日期: 2008-09-29

(编辑: 王琴)



(a) 半径拟合曲线



(b) 拟合残差分布

图 9 圆弧砂轮圆弧部分半径结果