

文章编号 1004-924X(2017)10-2697-09

金刚石刀具刀尖圆弧波纹度的测量及评价

雷大江*, 岳晓斌, 崔海龙, 张晓峰

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:为实现金刚石刀具刀尖圆弧波纹度超精密测量,构建了基于原子力显微镜(AFM)和精密回转轴系的刀尖圆弧轮廓测量系统,研究了刀尖圆弧波纹度评价方法和控制测量系统引入误差的策略。提出了评价刀尖圆弧波纹度时截止波长的确定原则和方法,并介绍了刀尖圆弧波纹度测量原理及评价流程。讨论了精密回转轴系径向回转误差的测量和评定、刀具安装偏心和偏角误差的控制和原子力扫描系统 Z 向非线性误差的校准方法。最后,在构建的测量系统上测量了金刚石刀具刀尖圆弧波纹度并对测量不确定度进行了分析。实验测量显示:所评价金刚石刀具的刀尖圆弧波纹度为 $0.106\ \mu\text{m}$,测量不确定度为 $23.8\ \text{nm}$,表明所构建的测量系统基本满足金刚石刀具刀尖圆弧波纹度纳米级测量及评价的需求,测量结果稳定可靠、精度高。

关键词:金刚石刀具;刀尖圆弧波纹度;径向回转误差;偏心偏角误差;非线性误差

中图分类号: TG580.619.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2697

Measurement and evaluation of tool tip arc waviness of diamond tool

LEI Da-jiang*, YUE Xiao-bin, CUI Hai-long, ZHANG Xiao-feng

(*Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: leidajiang@163.com*

Abstract: To realize the ultra-precision measurement for tip arc waviness of diamond tools, an arc profile measurement system based on an atomic force microscopy and an ultra-precision spindle was established. The evaluation method of tool tip arc waviness and the scheme to control measuring error were investigated. Firstly, the selection principle of waviness cut-off wavelength was proposed in the arc waviness evaluation and the flowchart of tool tip arc waviness measurement was presented. Then, the measurement and evaluation for radial rotation errors of the ultra-precision spindle were discussed, the control for mounting errors of eccentric and declination angles and the calibration for nonlinear error of atomic force scan system were described. Finally, the tip arc waviness of a diamond tool was measured by self-developed ultra-precision profile measurement system, and the measurement accuracy and uncertainty were analyzed. Experimental results show that the tip arc waviness of diamond tools can be accurately described by proposed method, the waviness is $0.106\ \mu\text{m}$, and the uncertainty is $23.8\ \text{nm}$. These results satisfy the system requirements for higher precision and stabilization.

收稿日期:2017-05-02;修订日期:2017-06-29.

基金项目:国家重大科技专项资助项目(No. 2013ZX04006011)

Key words: diamond tool; tip arc waviness; radial rotation error; eccentric and declination angle error; nonlinear error

1 引言

在超精密金刚石切削加工中,如果金刚石刀具刀尖圆弧轮廓在切削过程中曲率保持不变,工件容易获得极高的面形精度,这在国防、宇航、航空、光学、天文、核技术中球面、非球曲面等零件的超精密切削加工中有着巨大的现实意义和潜在需求^[1-4]。

金刚石刀具刀尖圆弧由刀尖圆轮廓、波纹度轮廓和粗糙度轮廓组成。在超精密切削过程中,刀尖圆弧轮廓误差(圆度和波纹度)将“复印”到工件轮廓上,从而对工件轮廓的面形精度造成重要影响。由于高精度刀具刀尖圆弧的圆度精度一般在亚微米量级,刀尖圆弧波纹度的精度一般在数十纳米至百纳米量级,对其进行精确测量极为困难。近几十年来,国内、外学者和相关研究机构针对刀尖圆弧轮廓的测量及评价开展了大量的研究工作,取得了许多重要成果,逐步形成了光学法、扫描电镜法(SEM)、原子力显微镜法(AFM)等测量方法。较具代表性的有英国康图、日本大阪金刚石等刀具生产厂商采用光学显微和图像数字放大的方式获取刀尖圆弧轮廓图像,通过数据处理获得刀尖圆弧圆度误差和波纹度误差的方法;不过受限于光衍射效应,这种方法光学成像系统的极限分辨率约为 $2/5$ 波长,不能满足百纳米及以内精度的测量需求^[5]。日本东北大学的高伟改进了光学显微法,采用激光聚焦光斑对刀尖圆弧轮廓进行扫描,实现了对刀尖圆弧轮廓的高速无损检测;该装置虽可以获得 10 nm 的分辨率^[6],但装置结构复杂,且所测范围小,并不能满足毫米级刀尖圆弧半径下亚微米量级精度的测量需求。由于 SEM 的分辨率可达 $1\sim 2\text{ nm}$,日本东芝公司的 S. Asai、哈工大的周京博等采用 SEM 来测量刀尖圆弧轮廓^[7-8],大幅提升了测量精度;但 SEM 无法直接获得圆弧轮廓上各点的三维坐标,需要采用图像处理手段来计算圆弧轮廓误差;同时,由于 SEM 观测的刃口区域小,只适用于数十微米量级刀尖圆弧轮廓的测量。考虑 AFM 具有 pm 量级的分辨率,近年来国内、外学者开始用其进行

刀尖圆弧轮廓的测量,如 Oklahoma 大学的 Lucca 提出采用 AFM 来测量刀具刃口^[9]。哈工大的李增强等^[10]提出将刀具装夹在精密回转轴系上,刀具随精密回转轴系转动,通过检测 AFM 探针针尖高度的变化来获得刀尖圆弧轮廓数据;此套系统从原理上来说可以达到纳米级的测量精度,但需要解决高精度回转轴系和百纳米级刀尖圆弧轮廓精度评定等难题。北京航空精密机械研究所的李迪等^[11]采用德国 FAG 公司 FMS4210 形位误差测量仪(测头分辨率为 $0.001\text{ }\mu\text{m}$,主轴回转精度小于 $0.04\text{ }\mu\text{m}$)来测量刀尖圆弧轮廓,并对刀尖圆弧波纹度进行了评价,但其测量方法复杂,测量效率较低。

本文在前人研究的基础上,讨论了百纳米量级金刚石刀具刀尖圆弧波纹度评定时截止波长的确定原则和方法,构建了基于 AFM 和精密回转轴系的刀尖圆弧轮廓测量系统;分析了测量系统中精密回转轴系径向回转误差、刀具调平调心误差和 AFM 的 Z 向非线性误差及其误差控制方法。最后,在所构建的测量系统上完成了刀尖圆弧波纹度的测量,并对测量不确定度进行了分析。

2 刀尖圆弧波纹度评定方法和测量系统构建

2.1 刀尖圆弧波纹度评定方法

典型金刚石刀具如图 1 所示。刀具前、后刀面相交形成了刀尖圆弧,高精度刀具的刀尖圆弧轮廓精度极高,一般在亚微米量级。

刀尖圆弧波纹度是指刀尖圆弧轮廓上间距比粗糙度大得多的、随机的或接近周期形式成分构成的轮廓不平度。波纹度评定参数较多,有 W_a 、 W_z 和 W_q 等参数,刀尖圆弧波纹度一般选用来 W_a 评定。 W_a 是指在有效取样范围(l_w)内,中频段轮廓偏距绝对值的平均值,如式(1)所示。

$$W_a = \frac{1}{l_w} \int_0^{l_w} |z(x)| dx \quad (1)$$

或近似为:

$$W_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2)$$

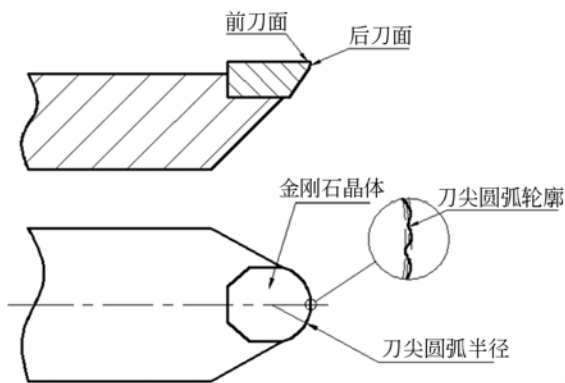


图 1 金刚石刀具示意图
Fig. 1 Diamond tools

由于波纹度是中频范围的轮廓起伏,滤波是波纹度分离的重要环节。但在进行滤波前,应采用最小二乘拟合的方法在刀尖圆弧轮廓上去除其公称形状(刀尖圆弧半径)。

截止波长的确定是进行波纹度分离的关键环节。一般而言,应在高斯滤波器传输系数为 0.5 的条件下,确定短波区界的截止波长 λ_c 和长波区界的截止波长 λ_f 。通过采用 λ_f 轮廓滤波器抑制长波成分,采用 λ_c 轮廓滤波器抑制短波成分,从中分离出波纹度数据。如图 2 所示。

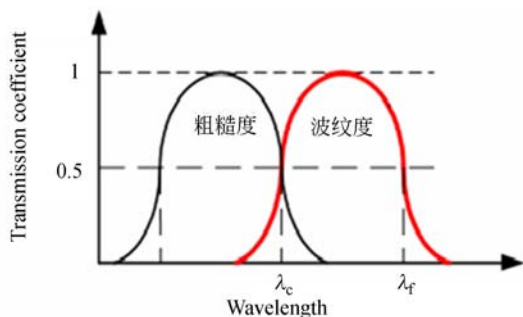


图 2 实际轮廓的波纹度截止波长
Fig. 2 Waviness cut-off wavelength of real profile

由于高精度金刚石刀具刀尖圆弧波纹度一般在数十至百纳米量级,根据 GB/T 1031-2009《表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值》可知,刀尖圆弧波纹度测量精度和尺度已超出常规波纹度评定范畴,进入到粗糙度的评定范围,如果依据现有国标进行评定,势必造成较大的误差。

因此,在国标和国际标准所允许的规则下,通过采用等比例缩放,对截止波长 λ_c 、 λ_f 进行适当的拓展和延伸。拓展和延伸的合理性和有效性则通过测量数据处理结果是否具有较好的重复性和稳

定性来判定。

对刀尖圆弧波纹度在数十至百纳米量级的高精度金刚石刀具而言, λ_f 的取值初步确定为 0.25~0.8 mm 之间,长波截止波长和短波截止波长的比值 $\lambda_f:\lambda_c$ 按国标推荐取为 10:1。 λ_f 的实际取值最终通过测量实验来确定。

2.2 刀尖圆弧轮廓测量原理及其系统构成

由于刀尖圆弧波纹度是指圆弧轮廓上属于中频范围的轮廓起伏,因此,对刀尖圆弧轮廓数据滤波可分离出刀尖圆弧波纹度。刀尖圆弧波纹度测量原理如图 3 所示。原子力测头固定不动,其扫描探针始终与刀尖圆弧轮廓接触并进行 0 范围扫描;精密回转轴带动被测刀具旋转,在旋转过程中,随着角度的变化,刀尖圆弧轮廓表面的高度变化将引起原子力扫描探针 Z 向数据的变化,适时采集每一特定角度(θ)下原子力扫描探针的 Z 向数据,可得到某段刀尖圆弧轮廓数据,对此数据进行处理,即可获得刀尖圆弧波纹度。

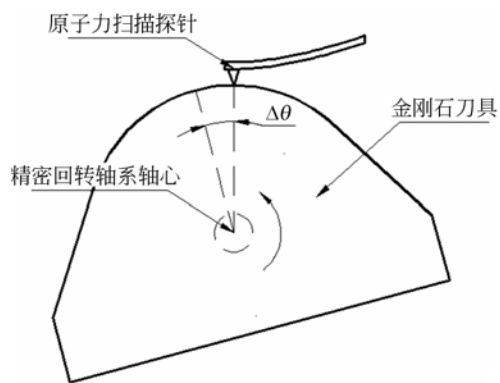


图 3 测量原理
Fig. 3 Block diagram of measuring principle

实际测量流程如图 4 所示。将待测刀具安装在刀夹机构上,首先通过光学观察与测量子系统观察,测量刀尖圆弧并对刀具进行调平和粗调心;随后,通过随行夹具系统保证被测刀具移动到精密回转轴系上时刀尖圆弧中心与回转轴系轴线的同轴度在 20 μm 以内。在此基础上,采用原子力测量系统对刀具进行精调心,进一步提升同轴精度,将刀尖圆弧中心与精密回转轴系轴线的同轴度调整到 2 μm 以内,使得刀尖圆弧轮廓在旋转过程中的表面高度变化满足原子力测量系统的测量要求。然后,将原子力测量系统的扫描范围设定为 $0\times 0 \mu\text{m}$,进行 0 范围扫描(只获得 Z 向的位移数据);在此条件下,通过控制系统启动精密回

转轴系,轴系带动刀具回转一定的角度(所需测量的刀具刀尖圆弧包角);同时,每间隔一定的角度,适时获取随精密回转轴系角度(θ)变化而导致的刀尖圆弧轮廓表面 Z 向数据(原子力扫描探针的 Z 向位移数据),即可获得刀尖圆弧轮廓数据。最后,对刀尖圆弧轮廓数据进行数据处理,获得刀尖圆弧波纹度。

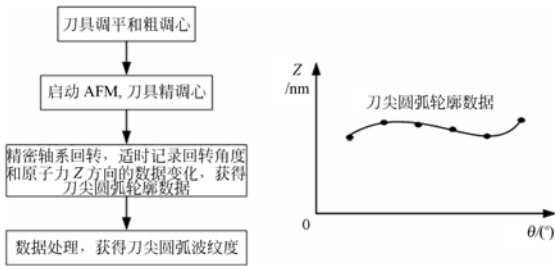


图 4 刀尖圆弧波纹度测量流程框图

Fig. 4 Flowchart of tool tip arc waviness measurement

根据上述的测量原理和测量流程,构建刀尖圆弧轮廓测量系统。测量系统主要由光学观察与测量子系统、原子力测量子系统、精密回转轴系和控制子系统等组成。其中:光学观察与测量子系统由光学镜头、CCD 相机和图像采集卡等构成;精密回转轴系由回转轴、刀具精调心及刀夹机构、伺服电机、圆光栅等构成;控制子系统由原子力扫

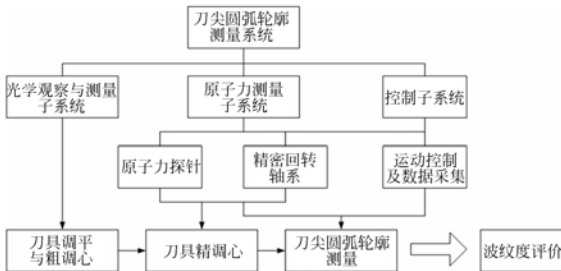


图 5 测量系统原理图

Fig. 5 Block diagram of measuring system



图 6 测量系统

Fig. 6 Measuring system

描控制器、回转运动控制卡等构成。测量系统原理框图和构建的测量系统如图 5 和图 6 所示。

3 测量系统引入的误差控制

在上文构建的刀尖圆弧轮廓测量系统中,主要测量误差来源于精密回转轴系的径向回转误差、刀具安装所产生的偏心和偏角误差、原子力扫描系统 Z 向非线性误差等,对其进行控制是实现百纳米量级精度测量的基础。

3.1 精密回转轴系径向回转误差

精密回转轴系是本测量系统的核心部件之一,轴系的径向回转误差将对刀尖圆弧轮廓的测量结果产生重要影响。因此,应尽可能采用高精度的回转轴系,以满足刀尖圆弧轮廓的测量需求。

基于小孔节流的气体静压轴承可获得纳米级的回转精度,是本测量系统的首选方案。通过优化气体静压轴承的关键结构和工艺参数,在超精密制造、装配条件下获得本测量系统所需的精密回转轴系。

精密回转轴系径向回转误差的测量及评定采用反向法进行,所采用的标准球为德国 Mahr 公司圆度误差为 36 nm 的陶瓷标准球。反向法测量原理和方法^[12-14]如图 7 所示。首先将标准球固定在精密回转轴系上,并将标准球与精密回转轴系轴线的同轴度找正在 $0.5 \mu\text{m}$ 以内,以精密回转轴系回转圆周上的某确定点(如回转轴系圆光栅上的零点)为测量起点,精密回转轴系旋转 360° ,传感器 T 读取标准球上的数据变化,得到一组测量数据;然后,轴系不动,将标准球和传感器 T 同时反向 180° ,精密回转轴系再旋转 360° ,传感器 T 获得另一组测量数据 $T'(\theta_i)$ 。通过 $T(\theta_i)$ 和 $T'(\theta_i)$,可以解算出精密回转轴系轴系的径向回转误差和标准球的圆度误差。

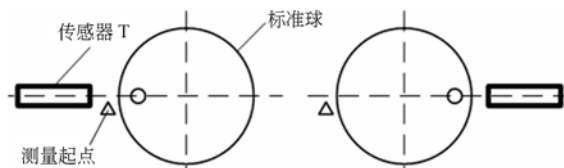


图 7 反向法测量原理图

Fig. 7 Block diagram of reversal measurement

反向法测量原理下的 $T(\theta_i)$ 和 $T'(\theta_i)$ 可表示为:

$$T(\theta_i) = S(\theta_i) + R(\theta_i), \quad (3)$$

$$T'(\theta_i) = S(\theta_i) + R(\theta_i), \quad (4)$$

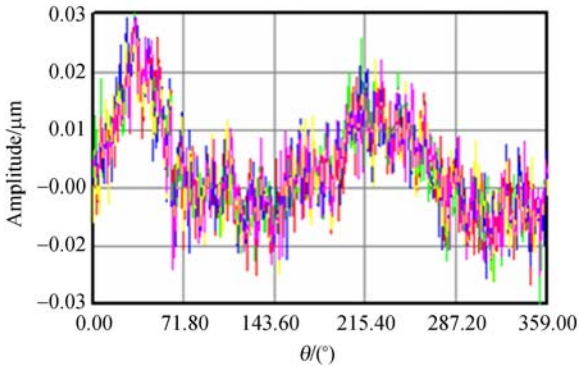
其中: $S(\theta_i)$ 为标准球的圆度误差信号; $R(\theta_i)$ 为主轴回转误差信号。

由式(3)和式(4)可容易得到标准球圆度误差 $R(\theta_i)$ 和气体静压轴承径向回转误差 $S(\theta_i)$, 如式(5)、(6)所示:

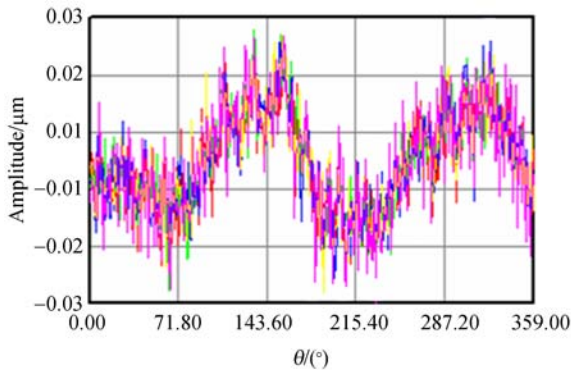
$$S(\theta_i) = \frac{T(\theta_i) + T'(\theta_i)}{2}, \quad (5)$$

$$R(\theta_i) = \frac{T(\theta_i) - T'(\theta_i)}{2}. \quad (6)$$

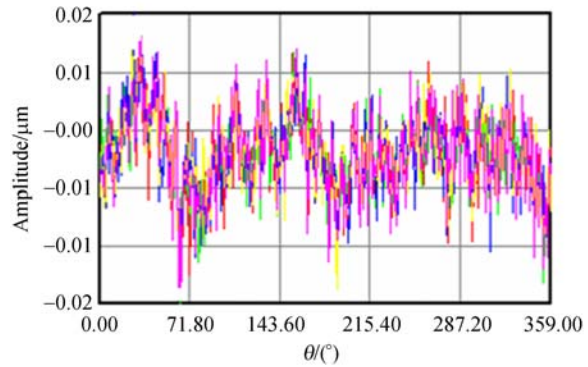
对本测量系统的精密回转轴系进行了 5 次测量, 获得的数据如图 8 所示。在图 8(a)、8(b) 中的 X 轴表示精密回转轴系旋转 360° 时的角度变化(从 $0^\circ \sim 359^\circ$), Y 轴表示在某一特定角度下传感器 T 所读取的轴系径向回转时的高度数据变化。



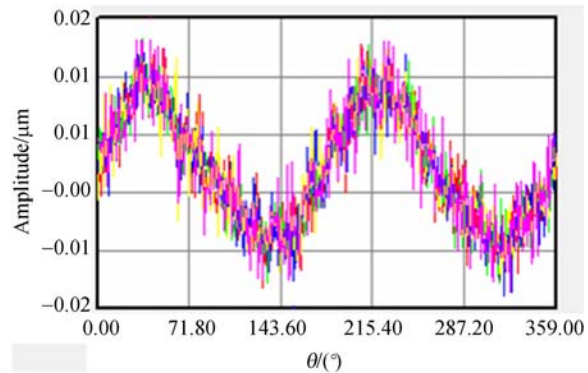
(a) 测量数据
(a) Measuring data



(b) 反向后测量数据
(b) Measuring data of reversal



(c) 标准球圆度误差
(c) Roundness error of reference ball



(d) 精密轴系径向回转误差
(d) Radial rotation error of spindle

图 8 测量数据和误差分离

Fig. 8 Measuring data and error separating

图 8(a)、8(b) 分别为式(3)、式(4)的测试数据, 可以看出, 在 360° 圆周上, 精密回转轴系的径向回转误差在 $0.06 \mu\text{m}$ 以内, 其原因在于此结果包含了标准球的圆度误差。

图 8(c)、8(d) 分别为在 360° 圆周上随角度变化时标准球和精密回转轴系的径向位移变化数据。即通过式(5)、式(6)分离获得的标准球圆度误差和精密回转轴系径向回转误差, 如表 1 所示。

表 1 回转轴系径向回转误差及标准球圆度误差

Tab. 1 Radial rotation error of spindle and Roundness error of reference ball (μm)

	1	2	3	4	5
回转误差	0.032	0.033	0.029	0.031	0.030
圆度误差	0.035	0.037	0.036	0.036	0.038

从表 1 可以看出, 所测精密回转轴系的径向

回转误差为 $0.029 \sim 0.032 \mu\text{m}$, 实验标准偏差为 $0.0016 \mu\text{m}$; 分离得出的标准球圆度误差均值为 $0.035 \sim 0.038 \mu\text{m}$, 实验标准偏差为 $0.0014 \mu\text{m}$, 获得的标准球圆度误差值与标准球的标称值吻合。

上述结果表明, 此套精密回转轴系的径向回转误差在 $0.03 \mu\text{m}$ 左右, 精度较高, 可以满足百纳米量级的刀尖圆弧轮廓测量需求。

3.2 刀具安装偏心和偏角误差

在刀尖圆弧轮廓测量时, 刀具安装偏心和偏角误差必然存在, 如图 9 所示。

研究表明: 安装偏心和偏角误差都将对测量结果带来一定的影响, 必须进行调整。虽然安装偏心误差可通过消一次谐波的方式处理掉, 但考虑到 AFM 探针的量程(数微米量级)和测量过程中所产生的非线性误差, 并兼顾刀尖圆弧轮廓的实际精度, 安装偏心至少应调整至 $2 \mu\text{m}$ 以内, 甚至更高。而当安装偏角误差为 1° 时, 将对测量结果带来 $0.7 \mu\text{m}$ 的误差, 且此误差很难通过数据处理消除掉。因此, 在刀具的安装过程中, 应尽量保证刀尖圆弧轴线和精密回转轴系轴线重合。计算表明, 为了保证偏角对测量结果的影响小于 3 nm , 则要保证安装时刀尖圆弧轴线与精密回转轴系回转轴线的平行度为 $\pm 3'^{[5]}$ 。对应在本测量系统中, 则需控制精密回转轴系轴端和刀具安装面的平行度小于 0.02 mm 。

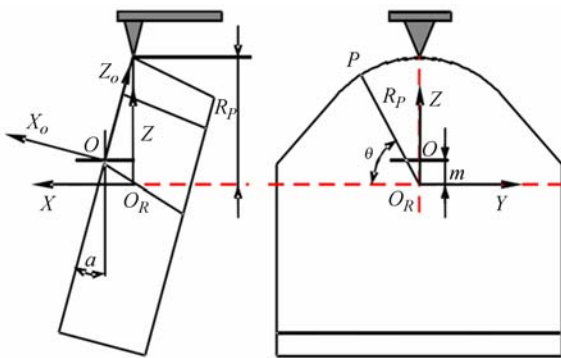


图 9 安装同时存在偏心和偏角时示意图^[5]

Fig. 9 Schematic diagram of eccentric and declination angles in mounting tools

本测量系统的刀具安装夹具和位置姿态调整系统采用的材料是可加工陶瓷, 经过精密制造及装配工序后, 刀具安装面与精密回转轴系轴端的平行度优于 0.02 mm , 且结构稳定, 不易变形, 如

图 10 所示。



图 10 刀具装夹结构

Fig. 10 Structure of tool clamp

3.3 原子力扫描系统 Z 向非线性误差

由于商品化原子力扫描系统 Z 向非线性误差的允差一般在 0.5% 左右, 而高精度金刚石刀具刀尖圆弧轮廓度一般在百纳米量级, 再加上刀具安装时存在的偏心误差(即便精调心后仍然存在), 则原子力扫描系统将可能在变化范围为 $2 \mu\text{m}$ 的 Z 向上进行扫描, 此时, 由原子力扫描系统 Z 向非线性误差引入的测量误差将可能达到 10 nm , 这在高精度刀尖圆弧轮廓测量时不能忽略, 必须对原子力扫描系统 Z 向进行校正。

本测量系统采用 VLSI 公司的标准纳米台阶对原子力扫描系统 Z 向进行校正, 标准纳米台阶高度为 180 nm , 校准后的原子力扫描系统 Z 向非线性误差为 0.17% 。此时, 即便在变化范围为 $2 \mu\text{m}$ 的 Z 向上进行扫描, 由原子力扫描系统的 Z 向非线性误差引入的测量误差也可控制在 3 nm 左右。

4 测量实验及不确定度分析

4.1 测量实验

应用上述构建的测量系统对金刚石刀具刀尖圆弧轮廓进行测试和评价, 如图 11 所示, 主要步骤如下:

(1) 基本设置: 包括 AFM 扫描范围、扫描速度和反馈增益等;

(2) 测量准备: 包括刀具对准、刀具调平调心、精密回转轴系转速设定等;

(3) 原始数据获得与读取: 获得刀尖圆弧轮廓的数据点 $\Delta z_i = [\Delta z_1 \cdots \Delta z_n]$ 和 $\Delta \theta_i = [\Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_n]$;

(4) 刀尖圆弧波数求解。

针对某把 KDP 晶体飞切用金刚石刀具(公

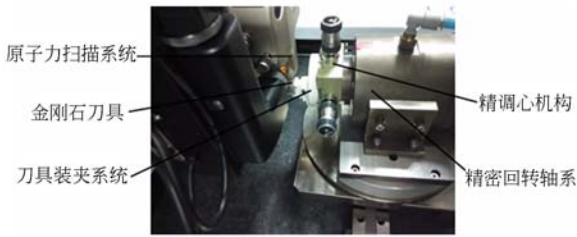


图 11 测量装置

Fig. 11 Measuring equipment

称刀尖圆弧半径 5 mm),采用测量系统中的光学观察与测量系统,对刀尖圆弧半径进行多次测量,并用最小二乘拟合得到刀尖圆弧半径,如图 12 和表 2 所示。

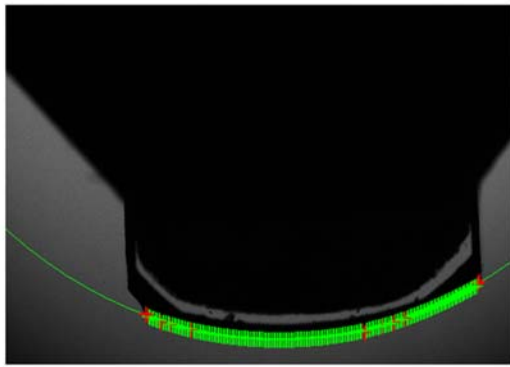


图 12 刀尖圆弧半径测量

Fig. 12 Measurement of tool tip radius

表 2 刀尖圆弧半径测量结果

Tab. 2 Measuring results of tool tip radius (mm)

测量次数	1	2	3	4
测量结果	5.303	5.301	5.297	5.298

从表 2 可以看出,刀尖圆弧半径为 5.298~5.303 mm,实验标准偏差为 0.002 mm。

以刀尖圆弧顶点为中心,在包角为 10° 的范围内进行 5 次刀尖圆弧轮廓测量,并采用 λ_f 轮廓

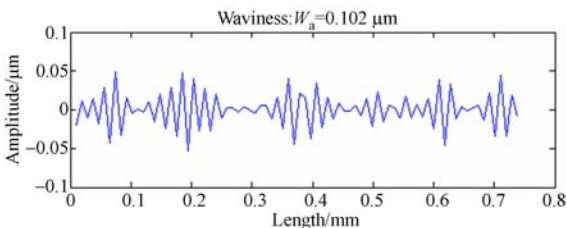


图 13 刀尖圆弧波纹度测量结果

Fig. 13 Measurement results of tool tip arc waviness

滤波器和 λ_c 轮廓滤波器对数据进行滤波,抑制其长波和短波成分,分离出刀尖圆弧波纹度。在本次滤波中, λ_f 的取值确定为 0.25~0.8 mm,而长波截止波长和短波截止波长的比值为 $\lambda_f : \lambda_c$ 按国标推荐取为 10 : 1。

当 λ_f 取值为 0.25 mm 时,得到的刀尖圆弧波纹度结果如图 13 和表 3 所示。

表 3 刀尖圆弧波纹度数据表

Tab. 3 Data of tool tip arc waviness (μm)

测量次数	1	2	3	4	5
测量结果	0.102	0.103	0.106	0.115	0.102

从表 3 可以看出,刀尖圆弧波纹度均值为 0.106 μm ,标准偏差为 11 nm,根据 5 组测量数据分离出来的波纹度数据的稳定性和一致性较好。

4.2 不确定度分析

刀尖圆弧波纹度不确定度可以由各不确定度分量计算得到,主要包括以下几个部分:

(1)刀尖圆弧轮廓坐标点的不确定度。(a)原子力扫描系统 Z 向分辨率导致的不确定度。本测量系统采用的是 Bruker 公司的 Dimension I-CON,其 Z 向的分辨率为 35 pm,通常认为分辨率导致的误差为均匀分布,包含因子为 $\sqrt{3}$,则由原子力扫描系统 Z 向分辨率导致的不确定度分量小于 0.1 nm,可以忽略;(b)精密回转轴系径向回转误差导致的不确定度。通过分析轴系误差测量系统和回转误差测量过程可以发现,此不确定度主要包含径向误差评价算法、标准球、传感器、反向精度等不确定度分量,分析测量数据并计算得到精密回转轴系导致的不确定度分量为 11.7 nm;(c)刀具调平误差导致的不确定度。由于本测量系统精密回转轴系轴端和刀具安装面的平行度优于 0.02 mm,此不平量导致的 Z 向数据误差小于 3 nm,则可得到刀具调平误差导致的不确定度分量为 1.73 nm。

(2)波纹度评价算法不确定度。多次计算得到的波纹度数据没有变化,则评价算法的不确定度分量为 0。

(3)原子力扫描系统非线性误差引入的不确定度。原子力扫描系统存在非线性误差,需采用纳米台阶标定,其标定误差为 0.17%,误差分布

为正态分布,正态分布的包含因子为 2.58。由于刀尖圆弧轮廓测量范围不大于 $2\ \mu\text{m}$,则可得此不确定度分量为 $1.3\ \text{nm}$ 。

上述不确定度灵敏度系数均为 1,由此可得到刀尖圆弧波纹度的合成标准不确定度为 $11.9\ \text{nm}$,扩展不确定度为 $23.8\ \text{nm}(k=2)$ 。

分析上述数据可以发现,原子力扫描系统非线性误差引起的不确定度分量在刀尖圆弧波纹度不确定度中占比较小;精密回转轴系回转不确定度是刀尖圆弧波纹度不确定度的主要分量,调平调心误差导致的不确定度次之。因此,要进一步提升刀尖圆弧波纹度的测量精度,其核心是要提升精密回转轴系的径向回转精度和回转稳定性。

参考文献:

- [1] 袁巨龙,王志伟,文东辉,等.超精密加工现状综述[J].机械工程学报,2007,43(1):35-48.
YUAN J L, WANG ZH W, WEN D H, *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 35-48. (in Chinese)
- [2] 李荣彬,孔令豹,张志辉,等.微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J].机械工程学报,2013,49(19):144-155.
LEE W B, KONG L B, ZHANG ZH H, *et al.*. An overview of ultra-precision diamond machining of microstructured freeform surfaces[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(19): 144-155. (in Chinese)
- [3] 王志标,杨辉.超精密加工技术在新形势下面临的任務[J].航空精密制造技术,2004,40(3):1-5.
WANG ZH B, YANG H. Role of ultraprecision machining technique in new situation[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2004, 40(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 罗松保.金刚石超精密切削刀具技术概述[J].航空精密制造技术,2007,43(1):1-4.
LUO S B. The development of diamond ultraprecision turning tool technology[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, 43(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 李增强.圆弧刃金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

5 结 论

本文根据高精度金刚石刀具刀尖圆弧波纹度的测量需求,提出了波纹度评价时截止波长 λ_f 和 λ_c 确定原则和方法;构建了刀尖圆弧轮廓测量系统;讨论了系统中精密回转轴系径向回转误差、刀具调平调心误差、原子力扫描系统 Z 向非线性误差对测量结果的影响规律和控制方法;在此基础上,对某金刚石刀具进行了测量,获得刀尖圆弧波纹度为 $0.106\ \mu\text{m}$,不确定度为 $23.8\ \text{nm}(k=2)$ 。实验结果证明:本文方法可以实现金刚石刀具刀尖圆弧波纹度纳米量级精度的测量和评价,测量结果稳定且可靠。

- LI Z Q. *Mechanical lapping and measurement techniques of nose arc of rounded diamond cutting tools*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] JANG S H, SHIMIZU Y, ITO S, *et al.*. A micro optical probe for edge contour evaluation of diamond cutting tools[J]. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2014, 3(1): 69-76.
- [7] LUCCA D A, SEO Y W, KOMANDURI R. Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultra-precision machining[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1993, 42(1): 83-86.
- [8] ASAI S, TAGUCHI Y, HORIO K, *et al.*. Measuring the very small cutting-edge radius for a diamond tool using a new kind of SEM having two detectors[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39(1): 85-88.
- [9] 周京博,李增强,王亚奇,等.微圆弧金刚石刀具刀尖圆弧的测量及评价[J].纳米技术与精密工程,2013,11(4):334-340.
ZHOU J B, LI Z Q, WANG Y Q, *et al.*. Tool tip arc measurement and characterization of micro-arc diamond tools[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(4): 334-340. (in Chinese)
- [10] LI Z Q, SUN T, LI P, *et al.*. Measuring the nose roundness of diamond cutting tools based on atomic force microscopy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2009, 27(3): 1394-1398.

- [11] 李迪, 房建国, 罗智. 单晶金刚石刀具精密检测与评价方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(2): 10-13.
LI D, FANG J G, LUO ZH. Research on precision measurement and evaluation of single crystal diamond tools[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(2): 10-13. (in Chinese)
- [12] WHITEHOUSE D J. Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1976, 9(7): 531-536.
- [13] DONALDSON R R. A simple method for separating spindle error from test ball roundness error [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1972, 21(1): 125-126.
- [14] MARSH E R, ARNESON D A, MARTIN D L. A comparison of reversal and multiprobe error separation [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1): 85-91.

作者简介:



雷大江(1974—),男,四川达州人,高级工程师。1996年于西安石油学院获得学士学位,2002年于武汉科技大学获得硕士学位,主要从事超精密加工及检测方面的研究。E-mail: leidajiang@163.com



岳晓斌(1969—),男,四川巴中人,研究员,中国工程物理研究院机械制造工艺研究所所长,1992年于东南大学获得学士学位,2016年于复旦大学获得博士学位,主要从事超精密加工工艺与装备、测量研究。E-mail: yuexbin@sohu.com