

金刚石刀具刃口轮廓新型检测方法与技术*

A New Measuring Method and Technology for Diamond Tool Edge Profile

孙 涛 董 申

(哈尔滨工业大学)

摘 要:研究了原子力显微镜扫描方式及原子力微探针坐标方式的刃口轮廓测量技术。原子力探针新型检测方法与技术可以在亚微米尺度内很好地克服传统测量方法精确度低的缺点,而且操作简便,为目前超精密加工领域中金刚石刀具研磨技术水平的提高提供了有利的技术手段。

关键词:金刚石刀具 刃口轮廓 原子力显微镜

天然金刚石切削是重要的超精密加工方法之一。为了指导刃磨工艺,其刃口锋利度的高精度检测是重要的相关技术。

目前测量锋利度较高的刃口锋利度的方法是用扫描电子显微镜(SEM)来测量。当刃口半径 $R < 0.1\mu\text{m}$ 时,用 SEM 观察分辨率不够,要实现精确测量比较困难。1986 年日本精密工学会专门成立了金刚石刀尖评价委员会,先后提出一些测量刀具刃口半径的方法,如金线压痕法^[1]、改进的 SEM 法^[2]等。刃口半径的测量精度应当在 5~10nm 左右才能满足当今金刚石刀具刃磨技术对刃口半径检测的需求,而目前国际上通用的 SEM 测量法因分辨率较低而无法实现纳米级刃口形状的测量;其他改进的方法也有如准确度不高、各种方法均为间接测量法等问题。因此,随着超精密加工精度的提高以及金刚石刀具刃磨质量的提高,目前这一前沿技术研究中应率先解决的关键技术难题是纳米级刃口锋锐轮廓的精确测量问题。

1 原子力显微镜扫描检测方法

20 世纪 80 年代末原子力显微镜(AFM)是用于研究材料微观纳米构成的一种新的超高分辨率的测试仪器。1993 年美国 Oklahoma 大学的 D. A. Lucca 教授就用 AFM 对金刚石刀具刃口半径进行了研究^[3]。其原理是将金刚石刀具垂直安放在 AFM 探头下面的二维工作台上,使刀刃位于探针尖的正下方。用 AFM 上的探针垂直于刀刃扫描,得到一族曲线,将这些刀刃的扫描点值对比探针运动的标准坐标值,就可以得到刃口半径。我们也应用美国 DI 公司 Dimension3100 型原子力显微镜进行了刃口轮廓测量^[4]。测量扫描图象参见

图 1。图 1a 为扫描测量三维图象,扫描范围为 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$,图形垂直高度约为 400nm。图 1b 为其任意截面的刃口表面轮廓测量数据曲线,横纵坐标每小格标尺均为 50nm,按圆弧曲线的评定方法进行某一截面的圆弧段评定,其刃口半径约为 110nm。不考虑测量误差下的评定误差在 10nm 以下。

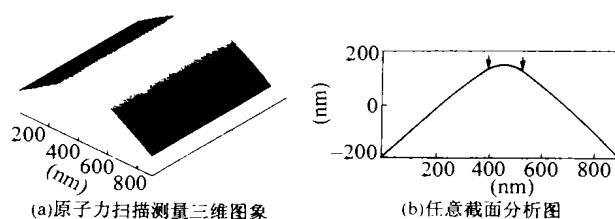


图 1 金刚石刀具刃口原子力扫描图象

2 基于原子力微探针的坐标测量方法

2.1 各类原子力探针微尺寸测量系统

日本松下电器产业公司 1993 年曾提出并开发了装有原子力测头的 UA3P 型三坐标测量机^[5]。其原子力测头的曲率半径有 0.5mm 和 $2\mu\text{m}$ 两种,其测量力为 $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}\text{N}$,已远远大于原子力范畴。经计算,测量力仍完全属于宏观机械接触力,其接触力造成的变形误差在亚微米级。

利用原子力显微镜使其具有纳米计量仪器的特性,可以进行微小尺寸的测量,如德国 PTB 研制的计量型原子力显微镜^[6]。也有学者提出并研制了计量型扫描力显微镜^[7]。这些方法都是在显微镜基础上进行的研究。为了测量更微小的尺寸,近几年美国开始研制分子测量机^[8]。在隔振、恒温、防尘的真空基架内装有可进行三维位置控制的操作平台,一个 STM 头在光

* 国家自然科学基金重点项目“微纳米加工表层形成机理及相关技术基础”(项目编号:59835180)资助

学干涉系统监测下完成对分子尺度测量,其测量分辨率据报道可达 0.05nm 以内,是目前所报道的最高尺寸重复性的微尺寸测量仪器。但其造价很高。

由此可见,刃口轮廓测量这种三维微小尺度测量的关键是利用微探针作为工具,并在高精度监测的基础上进行坐标测量。

2.2 系统结构与工作原理

根据日本松下公司关于原子力测头的设想,我们设计并研制了利用原子力微探针作为三维测头的坐标测量机,整体测量结构采用三坐标机的龙门式结构,采用水平工作台与垂直方向测头分离型(图2)。

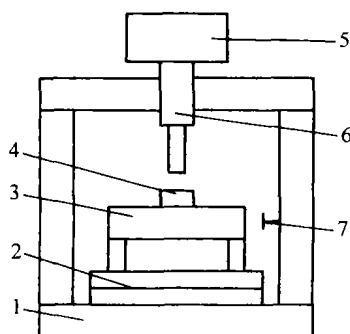


图2 三维测量结构简图

1. 底座 2. 粗工作台 3. 柔性工作台 4. 夹具及被测刀具
5. z向粗、精调机构 6. z向瞄准系统 7. 监测系统

这样的结构制造装调容易,对水平方向的运动控制也比较简单。由于垂直方向陶管只作上下运动而不作扫描,所以其探针及光学系统质量对探针测量并无影响。二维工作台采用双柔性对称结构。垂直方向经过粗、精两级调整后,保证针尖与样品的表面接触。此时,调整半导体激光器发出的光经探针悬臂射到PSD的中心位置左右,微调光点位置,使PSD输出的光电流保证为设定的常数,即可开始进行三维坐标测量。

当水平方向作定位运动时,通过垂直方向陶管伸缩保证光电流值不变,垂直方向高精度电容传感器获取的陶管伸缩值即为原子力探针组成的测头的位移量,并与水平方向定位移动值组成一族三维空间坐标的 x 、 y 、 z 测量值。

其中二维柔性闭环控制系统框图参见图3。两只高精度电容传感器作为柔性工作台的反馈测量元件,电容传感器的标定利用HP5528干涉仪进行。在工作台的反馈控制中,每次反馈位移的时间经反复实验设定为 3.4s ,一般经过 $4 \sim 5$ 次位移控制可达到 $\leq \pm 5\text{nm}$ 的技术指标,所以一般每个定位点的闭环电容反馈时间在 $3.4 \times 5 = 17\text{s}$ 以内,我们设定 20s 作为闭环控制的

时间常数,既保证定点控制又保证蠕变恒定。此时位移量已经很小,蠕变量更小,经测试位移偏差 $\Delta \leq 0.02\mu\text{m}$ 。几秒钟后的蠕变 $\leq 0.01\mu\text{m}$ 。

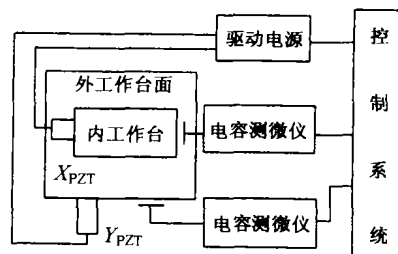


图3 二维柔性微定位系统框图

由于实验系统中这种原子力测头具有极其微小的接触力,因而其接触力误差在坐标测量中几乎可以不计。经测定其 Z 向重复性可达 $\pm 0.02\mu\text{m}$,整个三维测量系统的测量重复性可以达到 $\pm 0.04\mu\text{m}$ 。

2.3 测量实验结果

由以上测量数据获得的刃口锋锐轮廓三维测量图象参见图4。这里为了更好表达刃口处的圆弧,测量范围各为 $\pm 3\mu\text{m}$ 。根据文献[4]得到评定公式,对测量结果进行评定,可以得到各截面的刃口锋锐轮廓半径评定值。得到刃口为 109nm 。

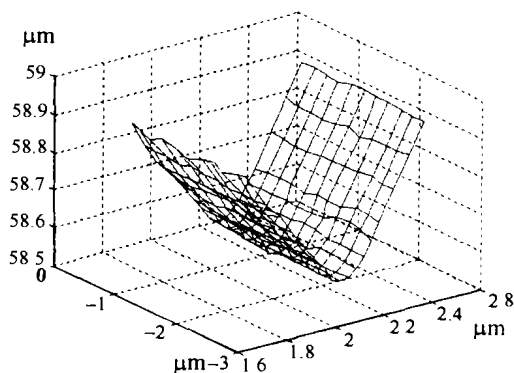


图4 三维测量图象

3 结语

本文提出应用原子力微探针作为金刚石刀具刃口轮廓的检测手段是其刃口检测发展方向之一。原子力显微镜扫描法操作方便,纹理清晰,但扫描范围较小。而结合微探针的坐标测量方法,由于采用原子力准接触(接触力 $10^{-6} \sim 10^{-9}\text{N}$),完全消除了接触式测头的弹性变形误差和测杆变形随机误差及光学非接触方法的误差,使测头的测量精度得到较大提高。由于探针较细小有利于微小尺寸测量,适当增加坐标测量范围就可实现整个刃口的全范围测量,同时这一方法也是

蜗形凸轮加工机理研究及廓面误差分析

Study on Machining Principle and Analysis on the Profile Error of Globoid Cam

尹明富^{①、②} 吕传毅^② 褚金奎^①

(^①西安理工大学 ^②山东工程学院)

摘 要:深入地研究和分析了蜗形凸轮廓面加工机理,应用空间啮合原理及旋转变换张量法,建立了蜗形凸轮数控加工刀具误差对凸轮轮廓法向误差影响的通用计算方法,对提高蜗形凸轮的加工精度、改进其加工方法奠定坚实的理论基础。

关键词:蜗形凸轮 加工 误差 计算方法

1 前言

蜗形凸轮机构在自动机械中应用极为广泛,主要应用于两垂直交错轴间的间歇分度步进传动,如果不考虑从动件滚子的形式,主要有两种类型,如图 1 所示。其中图 1a 的综合性能较好,适合于高速高精度场

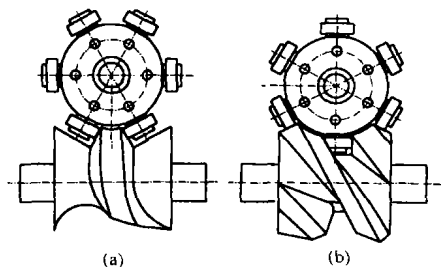


图 1

合^[1]。该机构的最大优点是可以通过调整中心距的方法来消除由于制造、装配或使用过程中的磨损引起的间隙;另外就是在定位时,不需任何其它机构就可以实现精确定位;从动件的规律任选,从而可以适应不同的工作条件以获得最好的性能,在高速情况下得到平稳的运动,较小的振动和噪声^[2],其廓面的设计方法已经

较为完满^[3]。但由于此机构的设计理论及制造技术比较复杂,而国内对该机构的研究起步又较晚,一些关键的理论尚处于进一步的探讨之中,尤其是该机构的加工精度、加工方法的研究不足。

2 蜗形凸轮廓面加工方法

蜗形凸轮的轮廓属于空间不可展螺旋面,其廓面的加工有以下几种方法:一是廓面按自由曲面来处理,采用端面铣刀^[4]或球头刀^[5]进行,这样凸轮与刀具间已经失去了原来的包络性质,加工过程复杂,效率低,数据处理量大,加工误差大;二是在通用机床上按包络原理进行廓面加工^[6],特点是机床调整复杂,利用率低,适合于单件加工或修配时采用;三是采用专用机床,是目前国内外普遍采用的一种方法,数控成形铣削最后修研装配^[7]。在加工过程中,粗加工阶段,采用比滚子直径小的铣刀,大进给量铣削,在最后精铣工序中,必须使用与滚子直径一样的铣刀。加工过程中采用同一程序,以从动件滚子运动中心进行编程,不进行刀具补偿,如采用刀具补偿,补偿量也很小,同时易造成廓面的失真,机构动态特性变差^[2]。主要原因是刀

高精度测头的发展方向之一。

参 考 文 献

- 1 中山一雄,王晓渡,新井实.金细线へ转写による切刃棱の測定. 1989 年度精密工学会春季大会学术讲演会论文集,1989:789~790
- 2 堀尾健一郎,河西敏雄,大川哲男.走査電子顕微鏡によるダイヤモンド工具の刃先測定. 1989 年度精密工学会春季大会学术讲演会论文集,1989:793~794
- 3 D. A. Lucca, Y. W. Seo, Aspects of Surface Generation in Orthogonal Ultra-precision Machining. Annals of the CIRP 1994, 43(1):43~46
- 4 孙涛.金刚石刀具刃口轮廓三维测量技术的研究.哈尔滨工业大学博士学位论文,1999:76~81
- 5 吉住惠一,久保圭司.原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定

机. National Technical Report, 1993.39(5)

- 6 K. Bienias, K. Hasche, R. Seemann, K. Thiele, 赵克功,高思田,徐毅. 计量型原子力显微镜. 计量学报,1998,19(1)
- 7 Y. Xu, S. T. Smith, P. D. Atherton. A Metrological Scanning Force Microscope. Precision Engineering, 1996(19):46~55
- 8 P. A. McKeown. Form Precision Engineering to Micro and Nano-technologies. Proceeding of Symposium on Nano-metrology in Precision Engineering, Hong Kong, 1998.

第一作者:孙涛,哈尔滨工业大学 413 信箱,邮编:150001

(编辑 周富荣)

(收稿日期:2000-12-28)



制造技术与机床
2002 年第 8 期