

基于原子力显微镜扫描的金刚石刀具纳米刃口轮廓测量方法研究*

孙涛 谭久彬 董申 (哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

摘要 基于扫描探针理论, 本文介绍了一种超精密加工用金刚石刀具刃口锋锐轮廓的测量方法, 给出了测量图象并分析了测量结果, 首次对金刚石刀具刃口轮廓参数进行了AFM扫描原理下的初步评定。这一方法可提高金刚石刀具刃口锋锐度的测量准确度, 对进一步分析刃口参数如何影响超精密加工表面质量具有指导意义。

关键词 金刚石刀具 刃口轮廓测量 原子力显微镜(AFM) 刃口参数

Study on a Measuring Method for Cutting Edges of Diamond Tools by Atomic Force Microscope (AFM)

Sun Tao Tan Jiubin Dong Shen (Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

Abstract On the basis of the scanning probe theory, a new measuring method for cutting edges of diamond tools used in the ultraprecision machining is presented. The error of measuring image and the analysis is given. Parameters of cutting edges are assessed. By above method, the measuring accuracy for cutting edges of diamond tools is improved. The method has a directive significance to analysis cutting edges parameters which influence on the surface performance.

Key words Diamond tool Measurement of cutting edges Atomic force microscope (AFM) Parameter of cutting edges

1 引言

应用天然金刚石刀具对铁族以外的金属及非金属材料进行超精密切削加工是极其重要的一种超精密加工方法。金刚石刀具纳米级刃口轮廓参数对超精密加工表面质量的影响极为重要。近年来的研究成果表明, 切削量进入纳米量级后, 切削面表层质量、最小切削厚度、表面微观形貌、表面冷硬度、晶格组织位错等都与天然金刚石刀具刃口锋利度有着非常直接的关系, 不同的刃口轮廓值将会产生不同的表面几何和物理特征。因此, 研究每次切削加工后的表层质量, 首先应当准确了解刃口轮廓的准确值及在本次加工中是否有磨损量或缺陷产生等, 这需要一种特定的可靠方法实时

测量金刚石的刃口轮廓。无论从理论上进行能量平衡原理分析, 还是从最小切薄实验结果看, 刃口锋锐轮廓可以被研磨到几个纳米。因此, 精确测定刃口几何锋锐轮廓, 就可以进一步分析刀具对加工表层质量的影响机理, 尤其是对纳米加工表层微观组织结构、微机械特性的影响机理。

目前刃口锋利度一直用刃口半径值表示, 测量锋利程度在亚微米级的刃口半径的通用方法是扫描电子显微镜(SEM)测量法^[1]。当锋利度大于 $0.1\mu\text{m}$ 时(即刃口半径值 $\rho < 100\text{nm}$), 此方法比较可靠, 是国际上一种通用的测量方法。近十几年随着加工精度的提高, 超精加工所用的刀具刃口半径往往小于 $0.1\mu\text{m}$, 一般在几十纳米, 用SEM观测 $\rho < 100\text{nm}$ 的刃口半径分辨率不够, 图像边缘比较模糊, 要实现精密测量比较困难, 而且由于表面镀了一层厚度不确定的导电金膜, 使通过观察得到的传统方法的结果有很大误差, 且不适于实时测量。

* 本文于1998年11月收到。

“九五”国防重点预研项目“纳米加工与检测”(18.6.1-3)资助项目。

为了准确测定纳米量级的刃口半径,八十年代末期,世界上掀起了一个研究超精刃口测量方法的热潮,一些方法先后提出,如印膜法^[2]、切屑法^[3]、改进的 SEM 法^[4]等。但这些方法均为间接测量,精度不能达到纳米量级。九十年代随着原子力显微镜在工业领域应用的逐步扩大,国外有学者提出了应用原子力显微原理测量金刚石刀具刃口半径的方法^{[5][6]}。其基本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,探针垂直于刃口进行扫描,得到刃口的 AFM 扫描图像。但文献[5][6]中只给出刃口的 AFM 扫描图象,均未给出刃口半径的准确测量值,也未对刃口各参数进行评定。事实上,刃口半径的定义不一定是很确切的,也可用其他方式如椭圆、抛物线等作评定标准。基于应用 AFM 可以测量金刚石刀具刃口半径这一思想,笔者在以国产 AFM 为核心构造的实验系统上进行了测量实验研究,得到了扫描图象和一组刃口截面的坐标值,并首次进行了刃口锋锐轮廓数值 AFM 扫描原理下的评定。

2 测量原理

2.1 基于 AFM 的刃口半径测量原理

原子力显微镜(AFM)是利用一个一端固定,而另一端装有针尖的弹性微悬臂检测样品表面性质及特征的^[7]。弹性微悬臂对微弱力的作用非常敏感,当通过控制使探针和被测样品相互接近并轻轻接触(产生

可以根据微悬臂的弹簧刚度实现微弱力的测量,并得到被测样品表面形貌。

测量装置主体为 CSPM - 930 型原子力显微镜 (图 1)。金刚石刀具刀头颗粒 5 粘贴在位于扫描陶管 3 上方的样品台 4 上,刀具预先用酒精清洗并用清洁的空气吹干,被测刀具刀刃垂直向上正对探针 6。测量前控制系统操纵步距角为 0.3° 的精密电机实现探针的微进给,当探针逼近被测刀具时,通过位置检测器检测激光反射点位置的变化反映微悬臂的形变。聚焦在微悬臂上的光反射到光位置检测器 10 上,微悬臂变形量将由检测器 4 个象限中的强度差值得到,这一差值发生变化说明已完成探针的逼近,步进电机自动停止。刀具刀刃的对准及探针的逼近均可由显微摄像系统 11 在监视器上观察。

测量时,扫描陶管 3 扫描,即采用样品扫描方式,反馈系统根据检测器电压的变化通过加给扫描陶管 3 Z 方向电压不断调整被测刀具 Z 向位置,以保持针尖与刀具的作用力恒定,记录下的 Z 向电压对应着加给陶管 3 的 x 及 y 向电压(x 和 y 向电压表达 x 和 y 向的扫描位置),即可通过图象处理程序表现被测样品——刀具刃口的空间三维形貌。

2.2 标准量系统的校准

由于 X、Y 坐标上的获取值是按扫描管驱动电压推算出来的,所以无严格的测量意义。本系统采取实验前利用云母的原子像进行 X、Y 方向的特性校准。其 X、Y 扫描范围为 $360 \times 360\text{nm}$ 时,其校准误差限定在 $\pm 2\text{nm}$ 。而 Z 方向采用标准阶梯高度的扫描电压数据与此电压下的电容传感器检测扫描陶管的输出值进行比较,其校准误差为 $\pm 5\text{nm}$ 。

3 实验数据及分析

3.1 AFM 仪器测量数据

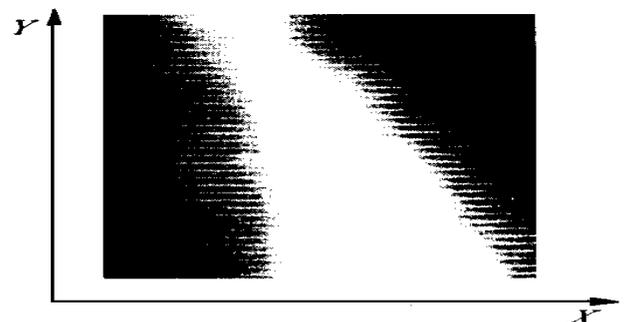
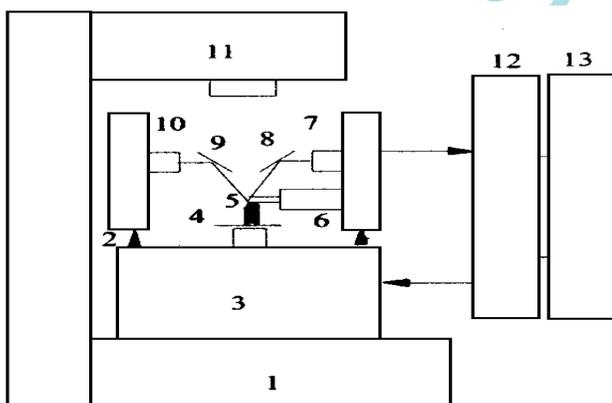


图 2 刃口扫描显示图像

选取仪器参数:



1 基座 2 微进给装置 3 扫描陶管 4 样品台
5 被测刀 6 探针及微悬臂 7 激光器 8 前反射镜
9 后反射镜 10 位置检测器 11 显微摄像系统
12 控制系统 13 主控计算机

图 1 用 AFM 测量金刚石刀具刃口的基本原理图

$10^{-8} \sim 10^{-11}\text{N}$ 的库仑排斥力)时,二者其中之一作扫描运动,探针与被测样品相对位置变化,将使微悬臂自由端随着被测表面的起伏产生变形。检测这一形变,就

ScanGain = 30 V Gain = 2 I Gain = 5

扫描得到的图象经数据转化, 变为 Windows 下的 BMP 图形文件, 如图 2 所示。

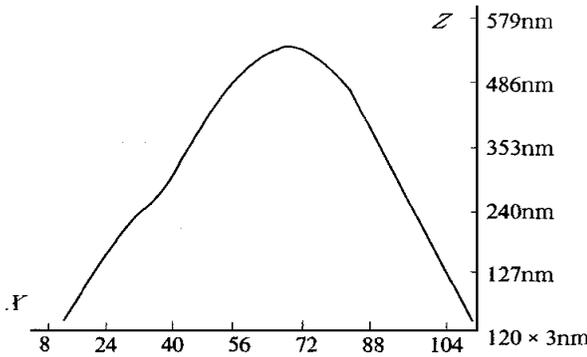


图3 某一截面刃口锋锐轮廓测量图

此扫描图象经图形处理程序处理, 得到如下图形参数:

Z_{min} = - 810 Z_{max} = 919 Times = 13 00

某一截面的各点 Z 值由经图形处理程序得到的截面测量图表示(图 3)。XY 方向的扫描范围为 360 000 × 418 500nm。而当每个 AD 单位折合成的电压值是 2.44mV, 扫描器电压系数为 175A / V 时, 图 3 中 Z 向最大尺寸为:

$$\Delta Z = [(Z_{max} - Z_{min}) \times 2.44 \div 1000 \times 15 \div V_{Gain}] \times 175A / V = 537nm$$

3.2 刃口锋锐轮廓初步评定

3.2.1 对测量结果的传统评定方法 由于刀具刃磨时线性很好, 只取 XZ 截面就可表征刃口锋锐程度, 所以只在 XZ 平面内作二维评定。

根据前述分析, 选取刃口半径 ρ 作为评定刃口锋锐度的参数。由图 3 测量图, 并根据刀具刃口几何角度: 前角 0°; 后角 7°; 在截面测量图基础上建立如图 4 圆评定的直角坐标系。

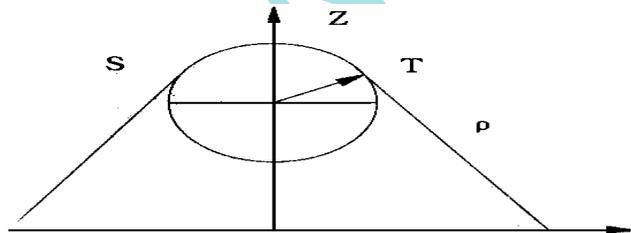


图4 刃口圆半径评定坐标图

刃口截面形状是由曲线圆弧和两个直线段连接而成, 直线部分只由前角和后角决定, 其对微切削的影响这里不再讨论, 曲线部分是要主要讨论的, 若按传统的刃口半径评定方法, 可以按非整圆弧的最小二乘数学

模型建立曲线方程, 其方程为:

$$(X_i - a)^2 + (Z_i - b)^2 = \rho^2 + \epsilon$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (n > 3)$$

ε 为 n 个相互独立且服从同一正态分布的随机变量。由各 (X_i, Z_i) 即可回归出最小二乘圆弧的圆心坐标 (a, b) 和半径 ρ

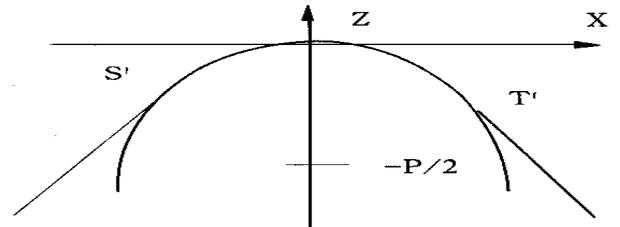


图5 刃口抛物线评定坐标图

3.2.2 新型评定方法 由于传统方法中圆方程本身是非线性方程, a, b, ρ 值相互影响, 数据处理非常不便, 一般可采用近似于最小二乘的方法求 a, b, ρ, 这里将存在原理误差, 也有利用 ε 的平方差的平方和求最小二乘值^[8], 数据较为准确, 但计算较繁杂。本文采用将圆方程转换为二元线性方程的方法^[9], 即“曲线改直法”, 其原理是: 通过变量变换的方法, 将直角坐标系中的圆方程转换为二元线性方程, 可在避免原理误差的前提下用最小二乘法求出 a, b, ρ。经计算得 ρ = 120nm, 其计算误差 e = 11nm。

考虑到圆评定中其计算误差较大, 还可以通过综合评定方式进行讨论。综合评定方式的二维曲线的通用公式^[4]设定为:

$$x(t, p) = \frac{X(t, p)}{W(t, p)}$$

$$z(t, p) = \frac{Y(t, p)}{W(t, p)}$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } X(t, p) &= [(1-p)Q_{sx} - 2PQ_{ox} + (1-p)Q_{tx}]t^2 \\ &\quad - 2[(1-p)Q_{sx} - pQ_{ox}]t + (1-p)Q_{sx} \\ Z(t, p) &= [(1-p)Q_{sz} - 2PQ_{oz} + (1-p)Q_{tz}]t^2 \\ &\quad - 2[(1-p)Q_{sz} - pQ_{oz}]t + (1-p)Q_{sz} \\ W(t, p) &= 2(1-2p)t^2 - 2(1-2p)t + (1-p) \end{aligned}$$

对参数 t 进行讨论, 当 t = 0 时为 S 点, t = 1 时为 T 点。根据另一个参数 p 对曲线分类为: 0 < p < 0.5 时为椭圆, p = 0.5 时为抛物线, 0.5 < p < 1 时为双曲线。

如果以椭圆、双曲线或抛物线表达刃口锋锐轮廓, 无论 t 取何值将得到比圆半径参数更好的评定结果。

因为圆弧与直线的交点处, 曲率半径为无限大, 以最小二乘圆或最小区域圆法得到的数值计算误差很大, 而其他方法特别是抛物线法则不同。以 X² = - 2pZ 表示其方程(图 5), 用抛物线表示刃口部分同样要与

直线交于 S' 和 T' , 处理方法与圆评定类似, 需反复验算。这种方法中刃口处抛物线近似的不偏分散度是圆近似的二十分之一^[4], 焦点参数 p 大, 则刃口较钝, 本次测量的刃口, 其 p 值约为 70nm。还可以推出其计算误差在 6nm 以内。

当然, 还有其他一些刃口的二维评定方法^[10], 这里不再赘述。

3.3 影响误差的因素分析

测量误差和评定的计算误差是引起刃口锋锐轮廓评定值的主要因素, 其中测量误差包括: 光路及位置检测器的误差造成的图象误差; XOZ 平面与 Y 向的不垂直度误差; 探针半径大小不同而造成图象畸变以及校准误差对半径参数的影响等。

4 结 论

这种测量方法一改传统的 SEM 方法, 操作简便, 数据可靠, 可实时测量, 不失为一种很好的刃口锋锐轮廓的测量方法。

其评定方法中以刃口圆半径为评定参数, 符合传统习惯, 直观。但数据处理不科学; 以抛物线参数 p 为评定参数虽不很直观, 但数据更接近真实值。

此方法还需做如下改进: 刃口对准困难, 需一套长物距的放大系统来实现探针的瞄准; 由于仪器本身限定为样品扫描, 还不能完成大尺寸样品的测量, 若将仪器改为探针扫描则更好, 这样可以实现其他类型刀具

的大样品扫描; 还应进一步完善刃口的三维评定理论。

参考文献

- 1 周明 超精切削中影响切削变形和加工表面质量若干因素的研究 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1993, 12
- 2 中山一雄等 细线への转写による切れ刃稜の锐利さの测定 精密工学会志, 1989(12).
- 3 A sai S et al. Observations of Chip Producing Behavior in Ultra-precision Diamond Machining and Study on Mirror-like Surface Generating Mechanism. Precision Engineering 1990, (12).
- 4 浅井昭一等 改良走査电子显微镜(SEM)による单结晶ダイヤモンド工具の切れ刃稜丸み半径の測定と解析 精密工学会志, 1990, (7).
- 5 D. A. Lucca, Y. W. Seo. Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultra-precision Machining Annals of the CIRP, 1993, 43(1):
- 6 E. Brinksmeier et al. Characterization of Micromachined Surfaces by Atomic Force Microscopy. Industrial Diamond Review, 1996, (2).
- 7 白春礼 扫描隧道显微术及其应用 上海科学技术出版社, 1992, 10
- 8 吴蔚 圆零件测量的数据处理 计量学报, 1986, (2).
- 9 何力 球形硬度压头的曲率半径测量方法及数据处理 计量技术, 1994, (8).
- 10 刘亚南 评定圆弧圆度误差的最小二乘法原理及测量中的几个问题 中国计量测试学会几何量专业委员会 1990 年全国年会论文集, 1990 年, 北京

(上接第 53 页)

端 CCD 输出的信号输入显示缓存控制部分。图 7 是从显示缓存输出的彩条信号, 图中截取的是大画面的信号。从中可看出彩条信号经过显示缓存窗口控制后整齐地显示在大画面对应的输出位置上, 说明系统显示缓存窗口控制是正确的、成功的。

5 结 论

系统基于锁相原理得到了标准的 PAL 制式的同步信号和稳定可靠的提供给 FPGA 的高频主时钟。系统采用目前最新的器件 FIFO、VRAM 构成了系统的核心部分系统的视频显示缓存。系统采用目前先进的 FPGA 技术实现系统全部逻辑功能, 产生所有控制信号, 包括 CCD 驱动信号, 复杂的显示缓存中 FIFO、VRAM 的所有控制信号。FPGA 技术的使用一方面极

大缩短了调试的周期, 提高了系统的可靠性; 另一方面由于其包含大量的门电路使系统控制板集成度高, 体积小。由于 FPGA 器件的使用, 系统具有极强的灵活性、适应性和通用性, 并可在不更改硬件电路的基础上, 在短时间内实现对现有功能的修改和扩充。

参考文献

- 1 S M Greengrass, M Cunningham. Endoscopy. Measurement + Control, 1993, 26:
- 2 查良镒 内窥镜在消化系统疾病中的应用 天津科学技术出版社, 1984
- 3 刘宝琴, 张芳兰, 田立生 ALTERA 可编程逻辑器件及其应用 清华大学出版社, 1995
- 4 王庆有, 孙学珠 CCD 应用技术 天津大学出版社, 1992
- 5 彩色摄像机维修手册 北京电视设备厂, 1985