

超精密加工表面特性的功率谱密度表征与分析

于光¹, 李鹏², 赵清亮², 姚俊³, 黄海涛³, 刘宪芳⁴, 张伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 哈尔滨 150001, peng.li.hit007@gmail.com; 3. 上海机床厂有限公司 上海市军工路 1146 号 上海 200093; 4. 上海三一科技有限公司 上海市浦东新区川沙工业园川大路 319 号 上海 201200)

摘要: 为了了解加工方法和参数对加工表面特性 PSD 表征结果的影响规律, 采用功率谱密度方法 (PSD) 对超精密磨削加工表面进行了表征与分析. 应用 Dimension 3100 原子力显微镜对超精密加工表面进行测量, 得到三维微观形貌和数据, 以空间波长为横坐标, 功率谱密度为纵坐标输出 PSD 图像, 简单直观地分析了加工表面空间波长分布及不同波长在表面所占的比重, 对比分析了加工方法和参数对 PSD 表征结果特征的影响. 实验结果表明, 超精密加工表面 PSD 图像的主导频率、波长分布特点以及各波长的 PSD 值大小等参数不仅可以同时体现横向尺寸及高度尺寸特性, 而且能够得到表面误差的空间频率分布和方向特性信息.

关键词: 超精密加工; 表征; 功率谱密度

中图分类号: TG580.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0029-04

Characterization of ultra-precision machined surfaces with power spectral density

YU Guang¹, LI Peng², ZHAO Qing-liang², YAO Jun³, Huang Hai-tao³, LIU Xian-fang⁴, ZHANG Wei¹

(1. Centre for Spatial Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Centre for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, peng.li.hit007@gmail.com; 3. Shanghai Machine Tool Works Co., Ltd., No. 1146 Jungong Road, Shanghai 200093, China; 4. Shanghai Sany Science & Technology Co., Ltd., No. 319 Chuanda Road, Shanghai Chuansha Economic Park, Shanghai 201200, China)

Abstract: To investigate the effects of machining techniques and parameters on the ultra-precision machined surfaces, the power spectral density (PSD) method was employed to characterize the ultra-precision machined surfaces. Dimension 3100 AFM was used to measure the surfaces, and then the 3D micromorphology and corresponding data were obtained. The PSD graph was drawn with the spatial wavelength as horizontal axis and the power spectral density as vertical axis. The spatial wavelength distribution as well as the proportion on the machined surfaces was simply and directly analyzed. The relationship between power spectral density and machining methods as well as the machining parameters was comparatively analyzed. Experimental results show that by using the PSD method to characterize the ultra-precision machined surfaces, the lateral and height size features can be illustrated, and the distribution information of spatial wavelength of the machined surfaces can be obtained. Meanwhile, the anisotropic features of the machined surfaces can be also analyzed through the 3-D power spectral density graph.

Key words: ultra-precision machining; characterization; power spectral density

功率谱密度 (PSD) 表征方法^[1-5] 以其独特的表面表征特性将功率谱密度函数应用于光学元件抛光

加工的在线测量. 文献[6]在 NIF 光学元件波面误差评定中采用功率谱密度 (PSD) 的方式来限定波纹度和光洁度的指标, 讨论了光学元件表面低频和中高频空间频率 PSD 对光场分布的影响, 并给出了强激光光学元件表面 PSD 函数曲线的几个实测结果. 国防科技大学的柯宏发等^[7]用二维功率谱密度分析工程表面特征, 总结出从功率谱中提取信息的方法.

收稿日期: 2008-09-28.

基金项目: 黑龙江省博士后基金资助项目 (LBH-Z07114).

作者简介: 于光 (1974—), 女, 博士, 讲师;

赵清亮 (1968—), 男, 教授, 博士生导师;

张伟 (1962—), 男, 教授, 博士生导师.

本文应用 Dimension 3100 原子力显微镜对超精密磨削和车削表面进行测量,得到加工表面的三维微观形貌和数据,然后采用功率谱密度对超精密加工表面进行表征,并对超精密磨削表面的表征结果与加工方法和各加工参数的关系进行分析.

1 功率谱密度表征方法

功率谱密度函数(PSD)是具有综合分析意义的概率统计函数,从频域上考虑问题,研究随机振动的各频率成分的统计含量.利用功率谱密度对超精密加工表面进行评价,不仅能显示轮廓波形是由哪些频率成分组成,而且还可以反映出不同空间频率(波长)的成分在整个轮廓中所占的比重,从而揭示出不同空间频率(波长)成分对表面粗糙度的影响程度.功率谱密度的意义和基本计算推导^[8-9]在这里不予赘述.

2 实验结果与分析

2.1 粗糙度近似的表面对比分析

分别以空间波长和功率谱密度值为横纵坐标输出功率谱密度图形,可以更为直观地分析加工表面空间波长的分布情况.图1(a)、(b)分别为 Sa 值分别为 17.880、17.919 nm 的超精密磨削光学玻璃表面的表面形貌以及对这两个表面的二维轮廓和三维形貌的功率谱密度表征结果.可以看出,两表面虽然 Sa 相近,但实际形貌却相差较大,这时用粗糙度值来评价这两个表面是不可靠的.从图中的一维和二维功率谱密度图也可以看出前一表面在各个方向上的波长分布都比较均匀,这说明该表面没有明显的纹理;而后一表面则在 y 方向上分布的峰值和空间波长范围都很小,反映了该表面有比较明显的 y 方向纹理.

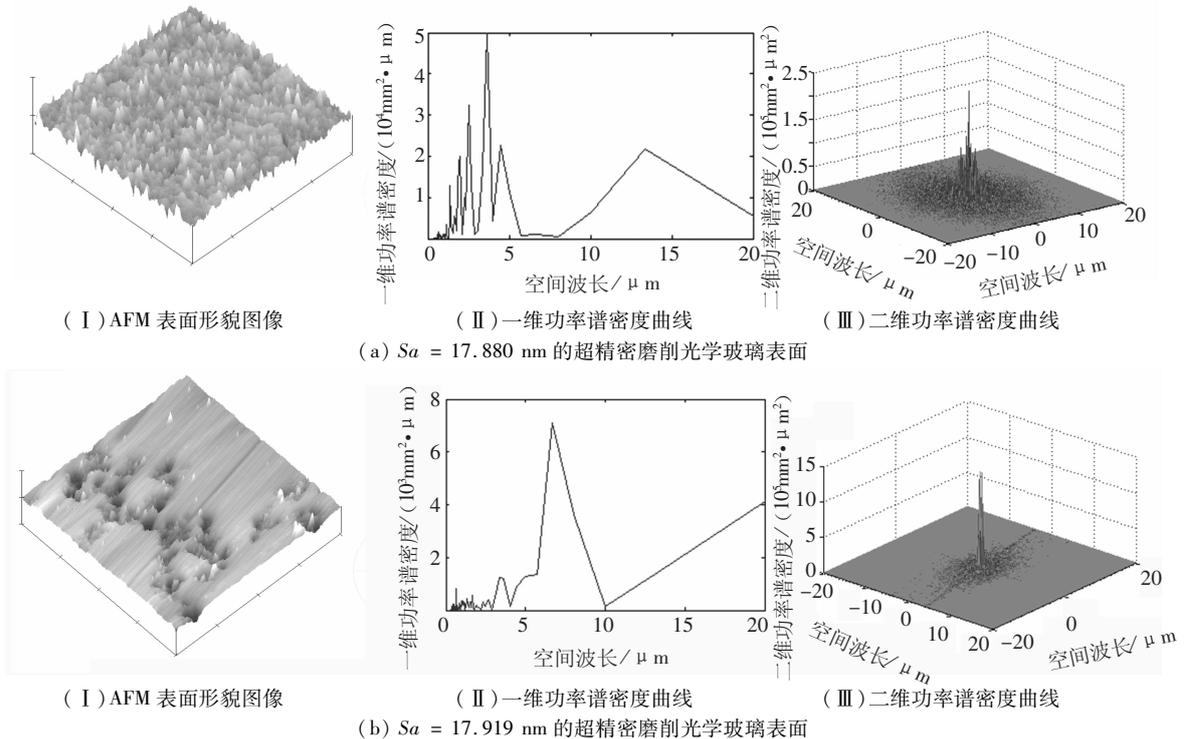


图1 表面粗糙度相近的超精密磨削光学玻璃表面

2.2 不同加工表面的对比分析

图2(a)、(b)是超精密车削和磨削加工得到

的表面轮廓和它们的功率谱密度曲线.

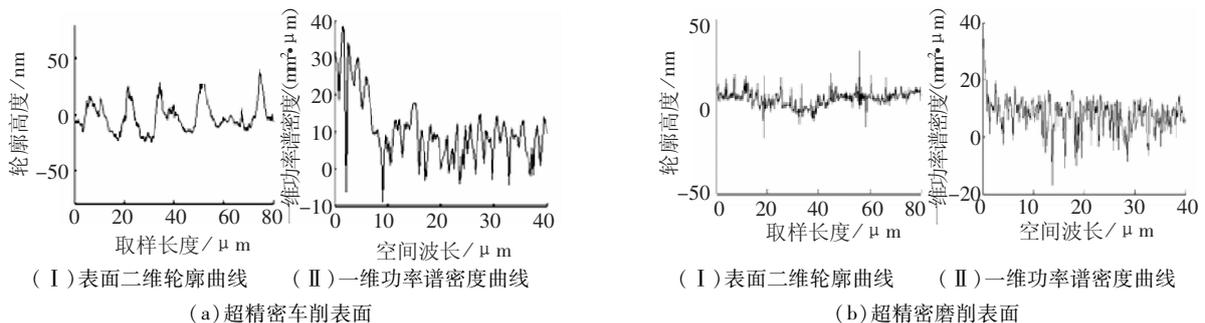


图2 超精密车削和磨削表面轮廓和一维功率谱密度对比

可以看出车削表面的功率谱密度主导频率比较明显,表现为各向异性;而磨削表面并无明显主导频率,表现为各向同性.在车削过程中,工件表面形貌主要由切削刃轮廓通过螺旋运动复映到工件表面上形成的,所以,表面有明显的刀具切削的痕迹,这些痕迹是与加工参数有关的纹理,因此,车削表面微观轮廓呈现出明显的主导频率,表现为各向异性;而磨削表面是由砂轮和磨料中无数的磨粒形成的微刃同时对材料表面进行滑擦、耕犁和切削,在表面形成了无数随机的微观凸起和凹坑,没有明显的纹理,PSD表现为无明显主导频率,而表现为各向同性.因此 PSD 有无明显的主导频率,反映了被表征表面的方向特性.

2.3 超精密磨削参数的影响

2.3.1 磨削深度的影响分析

图3、4分别为对 Spectrosil 光学玻璃进行超

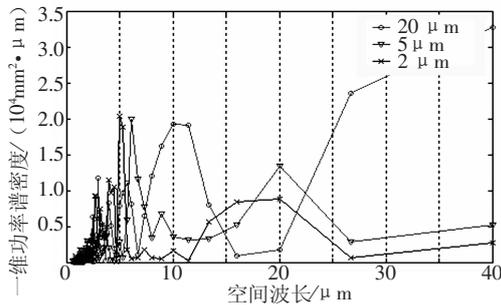


图3 变化磨削深度对功率谱密度曲线的影响

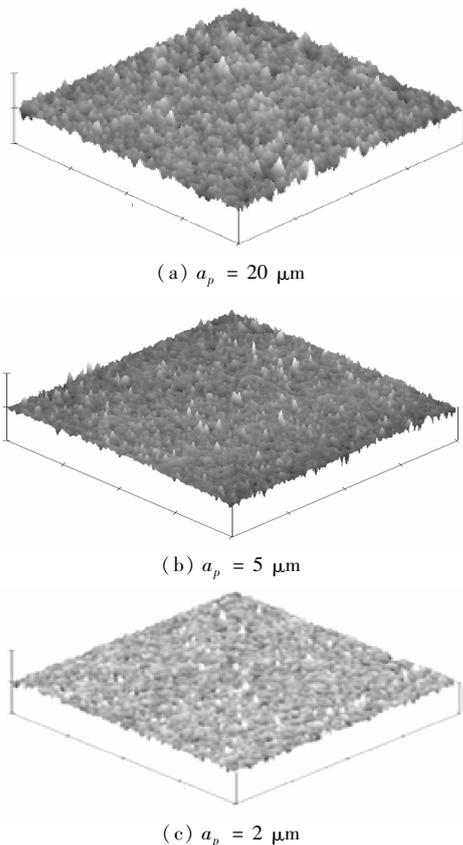


图4 磨削深度不同时表面形貌的变化

精密磨削,磨削深度为 20、5、2 μm 时的 PSD 曲线和 AFM 表面形貌图(测量范围 80 μm × 80 μm).从图 3 中可以看到,磨削深度在 20 μm 时,得到轮廓的波长主要集中在 10 ~ 12 μm 空间波段内;磨削深度在 5 μm 时,得到的轮廓的波长主要集中在 5 ~ 6 μm 空间波段内;磨削深度为 2 μm 时,5 μm 的空间波长在整条轮廓曲线中则占主要比重.从图 4 中可以看到,磨削深度为 20 μm 时,表面有许多尺寸较大的微峰和凹陷;磨削深度为 5 μm 时,微峰和凹陷明显减少;在磨削深度为 2 μm 时,微峰和凹陷的尺寸减小,表面比较平整、细腻.从以上功率谱密度曲线的变化中可以得出:磨削深度越小,表面微观突起越细小,表面轮廓越细腻,对应的 PSD 曲线主导波长越小.

2.3.2 磨削进给量的影响分析

图 5 是 BK7 每转进给量不同时的表面形貌变化及其功率谱密度表征.可以看到(a)中的表面各向异性,(c)中的表面各向同性比较好,而(b)中的表面介于两者之间.从右侧的二维功率谱密度图中可以看到,磨削进给量变化时,加工表面在不同方向上的波长分布:磨削进给量为

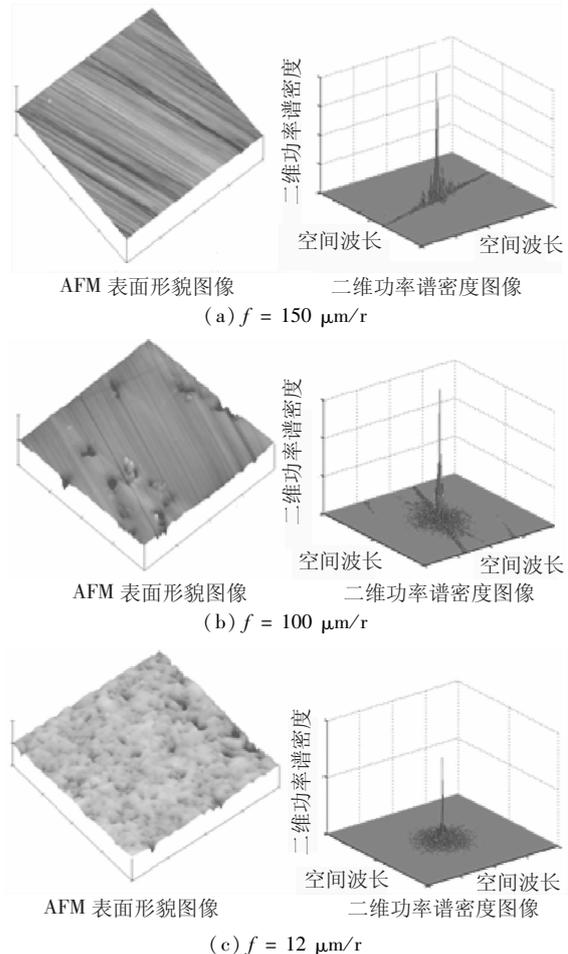
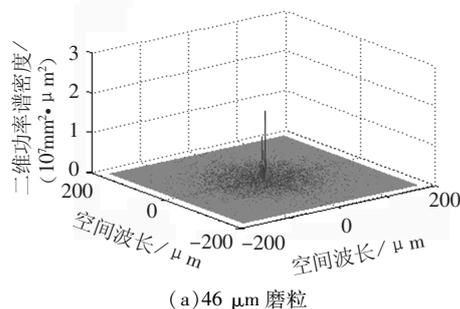


图5 超精密磨削进给量不同时的表面 AFM 形貌和二维功率谱密度对比

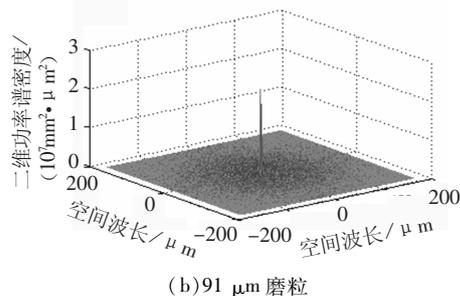
150 $\mu\text{m}/\text{r}$ 时,沿进给方向上含有很多不同长度的空间波长,垂直进给方向上几乎没有空间波长分布,可以判断表面为各向异性表面;磨削进给量为 12 $\mu\text{m}/\text{r}$ 时,表面在不同方向上的空间波长分布差不多,为各向同性表面;磨削进给量为 100 $\mu\text{m}/\text{r}$ 时,表面波长分布介于它们之间.同时,可以看到它们的主导波长均在 1 μm 以下,并且随着进给量的增大,在表面中较大空间波长分布增多.对比图中左侧的表面形貌图可知,磨削进给量的变化对加工表面的方向特性和表面光滑程度均有影响.磨削进给量增大,表面会变得更粗糙,同时也趋于呈现出各向异性特征.

2.3.3 金刚石砂轮磨粒大小影响分析

图6是对用 46 μm 和 91 μm 的金刚石砂轮磨削得到的碳化硅表面进行二维 PSD 表征结果.可以看到 46 μm 磨粒下得到的表面的空间波长主要集中在 0 ~ 20 μm ,主导波长约为 1 ~ 3 μm ; 91 μm 磨粒下得到的表面的空间波长主要集中在 0 ~ 50 μm ,主导波长约为 2 ~ 5 μm .砂轮中磨粒的大小直接影响到被加工表面的粗糙度和生产效率.一般情况下,磨粒越大,表面的粗糙度值越高,生产效率越高.磨粒增大,可以加速表面材料的去除,磨粒对表面耕犁、刻划、打磨的尺寸增大,在表面形成的划痕、耕犁尺寸增大,表面微突体尺寸增大,表面粗糙程度增大,使功率谱密度表征结果中的空间波长增大,且功率谱分布的空间波长范围增大,表面轮廓频率成分更复杂.



(a) 46 μm 磨粒



(b) 91 μm 磨粒

图6 磨粒不同时的二维功率谱密度对比

3 结论

1) 采用功率谱密度表征方法可以明显区分

出粗糙度值近似的超精密车削和磨削加工表面之间的不同微观形貌特征,主要表现为 PSD 主导波长以及波长分布的差异.

2) 对超精密磨削表面进行功率谱密度表征时,磨削深度越小,表面微观突起越细小,表面轮廓越细腻,对应的 PSD 曲线主导波长越小.进给量增大,在表面中较大空间波长分布增多,表面会变得更粗糙,同时也趋于呈现出各向异性特征.磨粒增大,表面粗糙程度增大,使得功率谱密度对应的空间波长增大,且功率谱分布的空间波长范围更大,表面轮廓频率成分更复杂.

3) 采用功率谱密度对超精密加工表面进行研究,不仅可以同时体现横向尺寸及高度尺寸特性,而且能够得到表面误差空间频率分部信息;通过二维功率谱密度图不仅可以观察到表面波长的分布情况,还可以判断表面的方向特性.

参考文献:

- [1] 许乔, 顾元元, 柴林, 等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. 光学学报, 2001, 21(31): 344-347.
- [2] 沈卫星, 徐德衍. 强激光光学元件表面功率谱密度函数估计[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 392-396.
- [3] LAWSON J K, AIKENS S M, ENGLISH R E. Power spectral density specifications for high-power laser systems[C]//Proc SPIE, Glasgow: The International Society for Optical Engineering, 1996: 345-356.
- [4] AIKENS D M, WOLFS C R, LAWSON J K. The use of power spectral density functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]//Proc SPIE. Tokyo: The International Society for Optical Engineering, 1995: 281-292.
- [5] 陈伟, 姚汉民, 伍凡, 等. 用于大口径非球面的波前功率谱密度检测[J]. 光电工程, 2006, 33(3): 20-23.
- [6] LIU Yaohong, TENG Lin, LI Daqi, et al. Application of power spectral density to specify optical super-smooth surfaces[C]//Proc SPIE. [S. l.]: The International Society for Optical Engineering, 2006: 311-315.
- [7] 柯宏发, 杨俊, 张耀辉, 柳新民. 用二维功率谱密度分析工程表面特征[J]. 工具技术, 1997, (08): 38-41.
- [8] ELSON J M, BENNETT J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Applied Optics, 1995, 34(1): 201-208.
- [9] 张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 661-664.
- [10] WHITEHOUSE D J. Handbook of Surface Metrology [M]. Wilson: IOP Publishing, 1994.
- [11] SAYLES R S, THOMAS T R. Surface topography as a non-stationary random process[J]. Nature, 1978, 271: 431-434.

(编辑 杨波)