

细粒度金刚石砂轮表面磨粒识别研究

霍凤伟*, 金洙吉, 康仁科, 郭东明, 杨春

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 准确地评价砂轮表面形貌对磨削机理研究、磨削过程优化、磨削过程的建模与仿真等具有重要意义,而准确的磨粒识别是砂轮形貌测量和评价的关键.对超精密磨削所用细粒度金刚石砂轮磨粒粒径的分布特点和砂轮表面上磨粒的轮廓波长进行了分析.从采样间隔和取样面积的角度对金刚石砂轮表面三维形貌测量仪器的选择进行了探讨.应用数字滤波消除砂轮表面三维数字信息中的高频分量,然后提取金刚石磨粒的几何特征,提出了依据磨粒轮廓频率特征、磨粒间距和磨粒曲率半径识别金刚石磨粒的方法.采用基于扫描白光干涉原理的三维表面轮廓仪对#3000金刚石砂轮表面形貌进行了测量,对砂轮表面中包含的金刚石磨粒进行了识别,实验结果证明所提出的磨粒识别方法合理有效.

关键词: 金刚石砂轮; 表面形貌; 金刚石磨粒; 超精密磨削; 识别

中图分类号: TG580 **文献标识码:** A

0 引言

磨削是利用砂轮工作表面上突出于结合剂之外的磨粒进行微量切削的加工过程.砂轮表面上磨粒出刃高度和磨粒密度影响磨粒的切削深度,进而对材料去除机理、磨削力、磨削温度场、磨削表面完整性产生重要影响,准确地测量和评价砂轮的表面形貌不仅有助于加深对磨削机理的认识,而且对磨削过程优化、磨削过程的建模与仿真等具有重要意义^[1].在对砂轮形貌进行三维测量时,得到的测量结果是砂轮表面高度的三维数字信息,在视觉上是彩色或灰色图片,不包含磨粒的颜色、纹理等能与结合剂相互区别的特征,只有采用适当的方法将磨粒从测量数据中识别出来才能对砂轮表面磨粒的出刃高度、静态有效磨粒密度和磨粒间距等参数进行分析,磨粒识别的精度是决定砂轮形貌测量和评价效果的关键因素.

目前常用的砂轮表面形貌三维测量方法有触针式轮廓仪法^[2]、立体照片测量法^[3]、激光三角测量法^[4]、光学轮廓仪法^[5]等.这些方法只适用于普通磨料砂轮或较粗粒度金刚石砂轮的表面形貌测量,不仅存在分辨率低、采样面积小等缺点,而且磨粒的识别一般是根据砂轮表面轮廓图的色差用目测来实现的,费时费力、随意性大,易造成误

判.为了提高磨削质量,对硬脆材料进行超精密磨削时,一般使用细粒度的金刚石砂轮,但迄今为止,对细粒度金刚石砂轮表面形貌三维测量及磨粒识别仍缺少有效的方法.本文对此进行研究.

1 砂轮磨粒粒径分布特点和砂轮表面形貌测量仪器的选择

1.1 砂轮磨粒粒径分布特点

金刚石砂轮的磨粒粒度一般用磨粒粒径的上、下限,以及平均粒径来描述.各国标准对砂轮用磨料粒径组成,如细粒、基本粒、粗粒、最粗粒的百分含量都有严格规定.例如我国机械行业标准 JB/T 7990-1998规定不得含有大于粗粒最大尺寸的磨粒,且粗粒和细粒的含量分别不得超过3%和8%.目前金刚石砂轮制造厂商为了提高单晶硅、陶瓷等硬脆材料的磨削质量,越来越严格控制砂轮磨料粒径的分散度^[6].实验研究表明,对于超精密磨削用细粒度砂轮,其磨粒粒径服从截尾正态分布^[7],即粒径 d 的概率密度函数 $f(d)$ 可以表示为

$$f(d) = \begin{cases} \frac{A}{e} \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d-e}{\sigma}\right)^2\right]; & d_1 < d < d_2 \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-10-19; 修回日期: 2007-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(重大项目 50390061); 国家杰出青年科学基金资助项目(50325518).

作者简介: 霍凤伟*(1970-),男,博士生, E-mail huofengwei@sohu.com.

式中: d_1 、 d_2 分别为磨粒粒径下限和上限, 根据 3^e 原则, 常数 $A = 1.0063$, $\lambda = (d_1 + d_2) / 2$, $e = (d_2 - d_1) / 6$. 即超精密磨削所用金刚石砂轮中 99.7% 的磨粒在 $[d_1, d_2]$, 因此砂轮表面上磨粒轮廓的长波长为 d_2 , 短波长为 d_1 , 对应频率分别为 $1/d_2$ 和 $1/d_1$. 由采样定理可知, 在砂轮表面形貌测量时, 测量仪器的采样频率必须大于 $2/d_1$ 才能识别出磨粒, 而在实际测量中, 为了更准确地描述磨粒的细节特征, 应采用更高的采样频率.

1.2 砂轮形貌测量仪器的选择

在先进的表面测量系统中, 一般首先对实际表面进行离散化处理, 测量结果是被测表面的三维数字化信息. 在欧几里得坐标系中, 物体的表面可用连续函数 $Z(x, y)$ 表示, 其中 x, y 是相互独立的变量, 通过对该表面选取样本点阵来获得离散的数字表面 $Z(x_i, y_j)$. 三维表面测量系统受有限传递频带宽度的限制, 只能“拾取”特定范围内的频率成分, 所能测量的频率上限取决于采样间隔, 而所能测量的频率下限与采样面积的大小有关^[8]. 假设在形貌测量中的采样间隔为 $\Delta_x \Delta_y$, 数据点数量为 $M \times N$, 则测量仪器能够“拾取”的频率为

$$u = \frac{i}{M\Delta_x}, v = \frac{j}{N\Delta_y} \quad (2)$$

其中 $i = 0, 1, \dots, M/2; j = 0, 1, \dots, N/2$.

频率下限为

$$\begin{cases} u_l = \frac{1}{M\Delta_x} \\ v_l = \frac{1}{N\Delta_y} \end{cases} \quad (3)$$

频率上限为

$$\begin{cases} u_h = \frac{1}{2\Delta_x} \\ v_h = \frac{1}{2\Delta_y} \end{cases} \quad (4)$$

由于砂轮表面轮廓包含了很宽范围的频率成分, 即使是同一被测表面, 如果所用测量仪器的横向分辨率不同, 得到的测量结果将有很大区别. 采样间隔直接决定测量的短波长界限, 在功能应用和参数评估中具有重要意义, 因此, 从功能观点来看, 采样间隔大小最重要. 采样间隔过大, 可能丢失重要的频率成分; 而采样间隔过小, 可能会因数据点过多而增加计算时间. 砂轮中磨粒的位置及其粒径大小一般呈随机分布, 因此磨粒出刃高度、磨粒密度、磨粒间距等砂轮形貌的评价参数只能用统计量来描述. 从统计观点来看, 采样面积的大小很重要, 它直接关系到评定参数的统计可

靠性. 然而, 采样间隔和采样面积的选择还受到测量仪器能力的限制, 如触针式轮廓仪、激光扫描共焦显微镜等传统的三维测量仪器的采样面积和采样间隔之间存在相互制约关系, 在实际应用过程中只能在两者之间折中选择, 测量精度难以保证. 而基于扫描白光干涉原理的三维表面轮廓仪, 由于其具有极高的垂直分辨率 (可达 0.1 nm) 和横向采样间隔 (可达 0.055 μm), 较大的测量区域 (通过图像拼接功能实现) 等优点, 比较适合测量细粒度金刚石砂轮的三维形貌.

2 磨粒识别方法

经过三维表面轮廓仪测量得到的砂轮表面形貌中分布着大量的微小尖峰, 还不宜直接对磨粒进行识别, 为此, 本文先利用数字滤波技术对测量得到的原始数据进行处理.

数字滤波技术已在微电子学、图像处理等领域得到广泛的应用. 根据傅里叶变换原理, 信号具有频率特性, 即可表示为各种频率成分的正弦波之和, 时域、空域上的原函数中有包含全部信息量的频谱函数, 而频谱函数中也含有原函数, 因此可以在时域、空域与频域之间对信号进行相互变换, 即采用傅里叶变换来实现. 对于三维表面的 $M \times N$ 数字阵列 $Z(x_i, y_j)$, 其中 $0 \leq i \leq M, 0 \leq j \leq N$, 其二维离散傅里叶变换为

$$F(u_p, v_q) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} Z(x_{k+1}, y_{l+1}) e^{-j2\pi \left(\frac{pk}{M} + \frac{ql}{N} \right)} \quad (5)$$

其中 $p = 0, 1, \dots, M-1; q = 0, 1, \dots, N-1$.

沿 x, y 方向的频率分别为

$$u_p = \frac{p}{M\Delta_x}; v_q = \frac{q}{N\Delta_y} \quad (6)$$

正弦波的频率为

$$k_{pq} = \sqrt{u_p^2 + v_q^2} \quad (7)$$

数字滤波的数学运算通常采用频域法, 即利用快速傅里叶变换算法对输入信号进行离散傅里叶变换, 分析其频谱, 然后根据所希望的频率特性对其进行滤波, 再利用傅里叶反变换恢复时域信号. 这种方法具有较好的频域选择特性和灵活性, 并且由于信号频率与所希望的频谱特性是简单的数乘关系, 比计算等价的时域卷积快得多. 在本研究中, 为了去除高频分量, 采用了理想的低通滤波, 即当频率超过截止频率时, 对应的输出全部衰减为 0; 而当频率低于截止频率时, 其正弦分量不受影响. 理想的低通滤波器的传递函数为

$$H_{lp}(u_p, v_q) = \begin{cases} 1; k_{pq} \leq k_c \\ 0; \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中 k_1 为低通滤波的截止频率.

滤波系统的频域输出为

$$G(u_p, v_q) = H_b(u_p, v_q) \cdot F(u_p, v_q) \quad (9)$$

然后应用傅里叶逆变换即可得到滤波后的砂轮表面三维形貌:

$$Z(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{p=0}^{M-1} G(u_p, v_q) e^{-jx \left(\frac{p}{M\lambda} + \frac{q}{N\lambda} \right)} \quad (10)$$

在超精密磨削过程中,位于砂轮工作表层的结合剂在工件和磨屑的反向微切削作用下逐渐被去除,与磨粒的轮廓相比,结合剂表面的粗糙度较小,而且较为平坦^[9, 10]. 因此在砂轮工作表面,结合剂表面的微小凸起所对应轮廓的频率远高于磨粒轮廓所对应的频率,而且幅值较小^[11]. 所以,通过截止频率为 $1/d_1$ 的理想低通数字滤波,可以滤掉结合剂表面的绝大部分微小凸起轮廓,那些没有被滤掉的凸起的轮廓曲率半径要远大于磨粒的曲率半径;而金刚石磨粒形成的凸起,则由于其轮廓所对应的频率小于截止频率,也不会被滤掉.

用于超精密磨削砂轮的金刚石磨粒,大部分只有一个切削刃,只有少量磨粒是连生晶体的聚合物,可能有多个切削刃. 假设这种磨粒由体积相近的两个聚合物构成,经过数字滤波后,分别对应凸起 A 和凸起 B ,则 A B 之间的距离 L 应近似等于该磨粒直径的一半. 研究表明,立方堆积模型能较准确地描述磨粒在砂轮结合剂中的排列分布,根据该模型对于磨粒体积含量为 60% 的砂轮,两相邻磨粒之间的平均间距为磨粒特征粒径的 1.414 倍,大部分相邻的磨粒彼此不接触^[12]. 因此,当两个相邻凸起的间距 L 小于 $d_2/2$ 时,可以判定凸起 A 和凸起 B 同属一个磨粒,反之则可以认为是两个不同的磨粒. 基于以上分析,当砂轮工作表面的凸起满足下列 3 个条件时,可以确定为磨粒.

(1) 频率条件 通过理想的低通数字滤波,去除砂轮形貌中的高频成分,截止频率 k_1 由金刚石磨粒粒径的下限 d_1 确定:

$$k_1 = 1/d_1 \quad (11)$$

(2) 磨粒间距条件 两个磨粒的间距 L 必须不小于 $d_2/2$

$$L \geq d_2/2 \quad (12)$$

若两磨粒的间距小于 $d_2/2$,舍弃较低的凸起.

(3) 曲率条件 磨粒的曲率半径 R 必须不大于 $d_2/2$

$$R \leq d_2/2 \quad (13)$$

其中 R 为凸起的曲率半径.

3 砂轮形貌测量中的磨粒识别实例

以用于硅片超精密磨削的 # 3000 树脂结合剂金刚石杯形砂轮为例,对其表面形貌进行测量和磨粒识别. 在进行测量之前,用此砂轮进行了连续的磨削加工,以保证所测量的砂轮表面处于稳定的磨削状态. 砂轮参数和磨削条件见表 1.

表 1 砂轮参数和磨削条件

Tab. 1 Parameters of the grinding wheel and grinding conditions

砂轮参数		磨削条件	
砂轮类型	杯形	磨床型号	V G401M K
磨粒粒度	# 3000	磨削方法	硅片自旋转磨削
结合剂	树脂	砂轮转速	2 400 r/min
浓度	200	工件转速	121 r/min
粒径下限	$2 \mu\text{m}$	进给速度	$2 \mu\text{m}/\text{min}$
粒径上限	$6 \mu\text{m}$	工件材料	单晶硅片

在砂轮形貌测量时,采用了美国 Zygo 公司生产的 NewView 5022 型非接触式三维表面轮廓仪,该轮廓仪的工作原理如图 1 所示. 干涉物镜安装在可精确闭环控制的压电扫描器件 PZT 上,从光源发出的光线经过分光棱镜后分为两束,一束投向参考平面,另一束投向样品表面,经样品表面反射后两束光产生明暗相间的干涉条纹. 扫描器件沿被测物体垂直方向进行扫描时,由 CCD 摄像头采集一系列的干涉图像,并利用频域分析 (frequency domain analysis) 技术获得相应的高度值,其测量结果是一个与物镜放大倍数和光强无关的三维图像,其垂直分辨率和横向采样间隔分别可达 0.1 nm 和 0.055 μm . 此外,还可以利用该轮廓仪的图像拼接功能,在不损失垂直分辨率和横向分辨率的条件下,获得较大的测量范围^[10],见图 1(b).

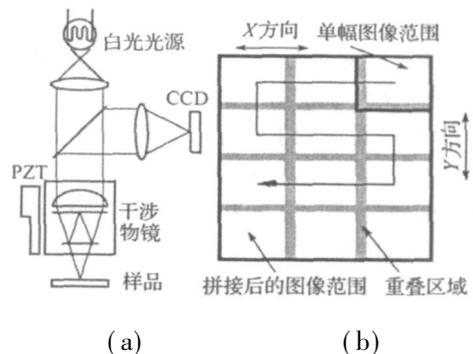


图 1 NewView 5022 型三维表面轮廓仪的工作原理

Fig. 1 Principle of 3D surface profiler NewView 5022

对于 # 3000 树脂结合剂金刚石砂轮, 其工作表面上磨粒轮廓的最高频率为 $0.5 \mu\text{m}$, 为保证砂轮形貌测量精度, 测量时选用 50 倍的 Mirau 物镜, CCD 设为 $640 \text{像素} \times 480 \text{像素}$ 模式, 图像缩放设置为 2 倍, 系统的总放大率为 2000 倍, 视场面积为 $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$, 垂直分辨率为 0.1nm , 横向采样间隔为 $0.11 \mu\text{m}$. 图 2 为测得的三维形貌, 可以看出, 未滤波的三维数字表面中含有大量的高频成分, 无法识别出金刚石磨粒的轮廓. 将 $d_1 = 2 \mu\text{m}$ 代入式 (11) 可得截止频率 $k_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 图 3 为经过截止频率为 $0.5 \mu\text{m}$ 低通滤波后得到的砂轮表面形貌, 可以看出, 砂轮表面分布着高低不等、直径大小不一的金刚石磨粒, 磨粒与磨粒之间、磨粒与结合剂之间界限分明, 说明利用三维表面轮廓仪 New View 5022 在上述测量条件下的分辨率能够满足要求. 为了增大取样面积, 提高砂轮形貌测量和评价的精度, 在前述测量条件下, 连续测量 12 张取样面积为 $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$ 的图像, 利用轮廓仪的拼接功能, 设定重叠度为 10%, 得到了一个面积为 $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$ 由 1792×1776 个像素组成的砂轮三维数字表面 (见图 4).

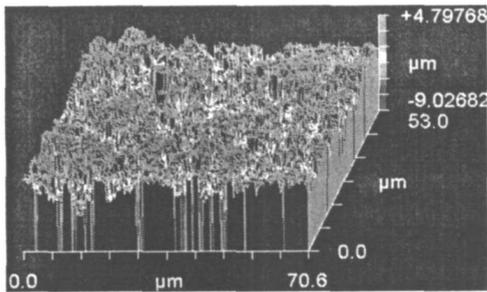


图 2 测得的砂轮三维形貌 (测量面积 $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$)

Fig. 2 Surface topography of the grinding wheel with a measuring area of $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$

得到砂轮表面的三维数字信息后, 即可以利用所提出的磨粒识别方法进行磨粒识别. 首先根据式 (11) 所确定的截止频率对砂轮三维形貌进行低通滤波, 滤波后的三维形貌见图 5, 通过计算得到凸起数量为 4 461 个, 然后利用式 (12) 所确定的磨粒间距条件对 4 461 个凸起进行判断, 得到满足间距条件的凸起数量为 624 个; 最后根据式 (13) 所确定的曲率条件对 624 个凸起进行判断, 得到满足曲率条件的凸起为 579 个, 因此, 在面积为 $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$ 的砂轮表面上存在 579 个金刚石磨粒. 确定砂轮表面上金刚石

磨粒的数量和位置后, 需要求出各磨粒在滤波前的三维坐标, 然后即可以计算金刚石磨粒在砂轮表面的出刃高度、砂轮的静态有效磨粒密度、磨粒平均间距等参数.

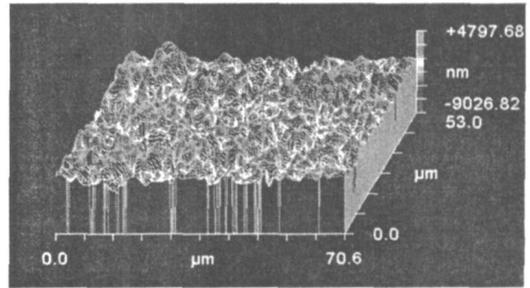


图 3 低通数字滤波后的砂轮三维形貌 (测量面积 $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$)

Fig. 3 Surface topography after low-pass digital filtering with a measuring area of $0.07 \text{mm} \times 0.053 \text{mm}$

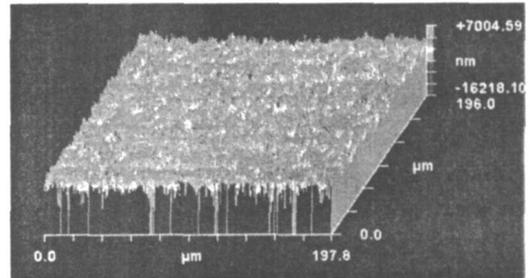


图 4 测得的砂轮三维形貌 (测量面积 $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$)

Fig. 4 Surface topography of the grinding wheel with a measuring area of $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$

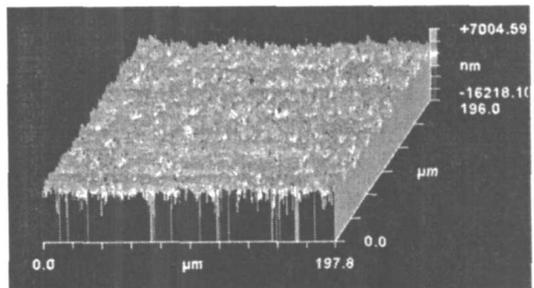


图 5 低通数字滤波后的砂轮三维形貌 (测量面积 $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$)

Fig. 5 Surface topography after low-pass digital filtering with a measuring area of $0.1978 \text{mm} \times 0.1962 \text{mm}$

4 结 论

(1) 为了确保磨粒识别的精度, 用于测量砂轮表面形貌的三维测量仪器必须有足够高的垂直

和横向分辨率,同时还须具有足够大的取样面积。

(2) 基于扫描白光干涉原理的三维表面轮廓仪可以精确地测量金刚石砂轮的三维形貌。

(3) 采用三维测量仪器测得的砂轮表面三维形貌中含有大量的高频成分,通过理想的低通数字滤波能够有效地去除这些高频分量。

(4) 提出了基于磨粒轮廓的频率条件、磨粒间距条件和磨粒曲率条件的磨粒识别方法,利用此方法可以准确地识别金刚石砂轮表面的磨粒。

参考文献:

- [1] MALKIN S. *Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives* [M]. Chicester: Ellis. Horwood Limited, 1989
- [2] TAMAKI J. Evaluation of surface topography of metal bonded diamond wheel utilizing three-dimensional profilometry [J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 1995, **35**(10): 1339-1351
- [3] 庄司克雄. 金属结合剂金刚石砂轮的修整研究 (I) [J]. *磨料磨具与磨削*, 1993, **74**(2): 5-11
- [4] CAI R, ROWE W B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding [J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2004, **44**(11/12): 1391-1402
- [5] INASAKI I. Grinding process simulation based on the wheel topography measurement [J]. *Annals of the CIRP*, 1996, **45**(1): 347-350

- [6] KLOCKE F, GERENT O. Flat rates on future silicon wafers precision grinding [J]. *Ind Diamond Rev*, 2000, **60**(2): 149-156
- [7] KOSHY P, JAIN V K, LAI G K. A model for the topography of diamond grinding wheels [J]. *Wear*, 1993, **169**(2): 237-242
- [8] STOUT K J. *Development of Method for the Characterization of Roughness in Three Dimensions* [M]. British. Penton Press, 2000
- [9] 佐川克雄, 江田弘, 周立波, 等. $\Phi 300$ シリコンウエハ超精密研削加工シミュレーション [J]. *砥粒加工学会誌*, 2003, **47**(8): 440-445
- [10] SALISBURY E J, DOMALA K V, MOON K S, *et al.* A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding, Part 2 Grinding wheel surface texture model [J]. *ASME J Eng Ind*, 2001, **123**: 582-590
- [11] LIAO T W, LI K, MCSPADDEN S B. Wear mechanisms of diamond abrasives during transition and steady stages in creep-feed grinding of structural ceramics [J]. *Wear*, 2000, **242**(1/2): 28-37
- [12] PANDIT S M, SATHYANARAYANAN G. A model for surface grinding based on abrasive geometry and elasticity [J]. *ASME J Eng Ind*, 1982, **104**: 349-357

Recognition of diamond grains on surface of fine diamond grinding wheel

HUO Feng wei*, JIN Zhu ji, KANG Ren ke, GUO Dong ming, YANG Chun

(Key Lab. for Precis. & Non tradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract Accurate evaluation of grinding wheel surface topography is indispensable for the investigation of grinding principle, optimization, modeling and simulation of grinding process, which, to a large extent, depends on accurate recognition of abrasive grains from the measured wheel surface. Detailed analyses of the grain size distribution characteristics and the grain profile wavelength of fine diamond grinding wheel used for ultra-precision grinding are presented. The requirements of spatial sampling interval and sampling area for instruments to measure the surface topography of diamond grinding wheel are discussed. In order to recognize the diamond grains, digital filtering is used to eliminate high frequency noise from the measured 3D digital surface and then the geometric characteristics of diamond grains are extracted. A method based on the grain profile frequency characteristics, the distance between two adjacent diamond grains and the diamond grain curvature is proposed to recognize the diamond grains. A 3D non-contact profiler based on scanning white light interferometry is used to measure the surface topography of a # 3000 resin bonded diamond grinding wheel, and then the diamond grains are recognized. The experimental results show that the newly proposed method is reasonable and effective.

Key words diamond grinding wheel; surface topography; diamond grains; ultra-precision grinding; recognition