

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711013



# 金刚石砂轮表面二维形貌 全场测量和分析

杨栖凤, 崔长彩, 黄国钦

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了实现金刚石砂轮表面二维形貌的全场测量,有效评价砂轮形貌对磨削力、磨削深度、功率消耗、磨削温度、加工精度的影响,提出基于机器视觉的测量方法;结合 CCD 感光元件和自动砂轮驱动回转技术实现砂轮形貌的非接触全场测量.根据测量对象尺寸和测量特征量优化选取单次采样面积,通过不重叠拼接实现全场成像;对图像进行处理,提取特征磨粒,分析金刚石砂轮表面形貌的二维关键指标.采用搭建的系统对钎焊金刚石砂轮进行测量实验研究,提取磨粒总数为 1 518 颗,磨粒分布密度为  $0.5 \text{ 颗} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,磨粒平均面积为  $0.404 \text{ mm}^2$ ,磨粒平均粒径为  $0.359 \text{ mm}$ .实验结果表明:文中方法可实现对钎焊金刚石砂轮表面形貌的非接触全场测量,并提供砂轮表面磨粒数、粒径及位置等关键参数.

**关键词:** 金刚石砂轮; 表面形貌; 机器视觉; 不重叠拼接; 图像处理

**中图分类号:** TP 394.1; TH 691.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0479-06

## Measurement and Analysis of Two-Dimensional Surface Topography of Whole Grinding Wheel

YANG Qifeng, CUI Changcai, HUANG Guoqin

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To realize the measurement and analysis of the whole grinding wheel two-dimensional surface topography for the effective evaluation of the grinding force, grinding depth, power consumption, grinding temperature and machining quality related with the surface, a machine vision-based method was proposed. It combined CCD technology with automatic drive rotary technology to realize the non-contact measurement. The size of sampling areas was determined according to the measured object and measured features and they were stitched together without overlap. The image was processed for grain feature analysis and some key parameters were extracted. A brazed grinding wheel was measured using the system. The results: the number of abrasive grains is 1 518, the grain density is  $0.5 \text{ grain} \cdot \text{mm}^{-2}$ , the average area of grains is  $0.404 \text{ mm}^2$  and the average diameter of grinding wheel is  $0.359 \text{ mm}$ . Experimental results indicate that the proposed method can realize the non-contact measurement of the whole brazed grinding wheel topography and provide some important parameters such as grain number, grain average diameter and its location.

**Keywords:** grinding wheel; surface topography; machine vision; non-overlapping stitching; image processing

**收稿日期:** 2017-11-21

**通信作者:** 崔长彩(1972-),女,教授,博士,主要从事表面形貌评定技术、表面形貌测量技术及自动测量仪器的研究.  
E-mail: cuic@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51235004, 51475176, 51575198); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611303058)

金刚石磨料因其硬度高、抗压强度高、耐磨性好等特性,成为磨削硬脆材料及硬质合金的理想工具.现代精密、超精密加工产业中主要采用金刚石砂轮表面磨削技术,其中,金刚石砂轮表面形貌对磨削力、磨削深度、功率消耗、磨削温度等磨削性能具有较大的影响,从而影响磨削工件的表面质量<sup>[1-2]</sup>.砂轮表面的磨粒大小、形状和分布等因素,与加工产品表面质量密切相关<sup>[3]</sup>.因此,开展对砂轮表面形貌的测量与分析,对于提升磨削加工质量具有重要的指导意义.砂轮的表面测量方法有二维和三维测量技术,相应的表面形貌分析方法可分为二维和三维分析技术<sup>[4-5]</sup>.自 20 世纪 60 年代以来,随着技术的进步,为实现对砂轮的切削能力和磨削效果的预测及加工过程的最优化控制,研究者开展了砂轮形貌学的研究.国内外在检测砂轮形貌的实验研究方面,先后提出了十余种检测方法<sup>[6]</sup>.其中,最早使用的是触针法<sup>[7]</sup>,但其对形貌比较复杂的砂轮表面测量容易造成触针损伤,也会导致砂轮表面再次划伤.光学无损检测方法<sup>[8-10]</sup>,如光截观察法、电镜观察法、光学测量法<sup>[11-12]</sup>、显微镜测量法等能较好地观察或测量砂轮表面的局部形貌,但是对于实现砂轮表面的全场观测,还存在一定的局限性,包括检测速度、数据存储空间等.液压法、激光功率谱法<sup>[13]</sup>、光电检测法、测温测力法等检测方法可以实现砂轮表面形貌监测,但这些检测方法由于自身的检测特性,如检测精度和测量环境要求等限制,不适于砂轮表面形貌全场测量.本文在机器视觉系统的基础上,结合 CCD 感光元件和自动砂轮驱动回转技术,实现砂轮形貌的非接触全场测量.同时,采用图像处理软件对测量系统采集到的图像进行处理<sup>[14]</sup>,提取和分析金刚石砂轮表面的二维关键指标.

1 砂轮表面二维形貌全场测量方法

1.1 测量原理和方案

采用面阵 CCD 实现金刚石砂轮表面二维形貌测量,配合 360°回转平台实现全场成像测量.图 1 为金刚石砂轮表面测量系统.

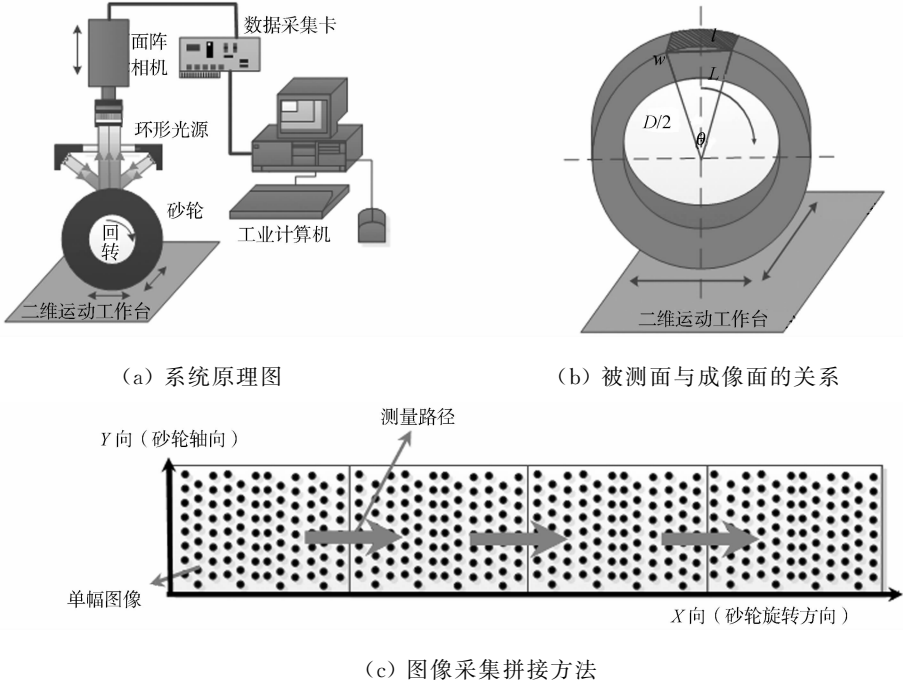


图 1 金刚石砂轮表面测量系统

Fig. 1 Diamond wheel surface measurement system

图 1(b)中: $D$  为被测砂轮外径, $w$  为宽度,系统需要测量的砂轮二维表面面积为  $\pi Dw$ . 因为 CCD 拍摄到的砂轮表面不是砂轮真实的弧面  $lw$ ,而是投影面  $Lw$ ,若将拍摄的二维平面图像当成砂轮弧面去拼接就会产生边缘误差.因此,单次拍摄砂轮表面形貌的尺寸要合理确定.

设单次测量对应的圆心角为  $\theta$ ,则弧长  $l(l=\pi D\theta/360)$  对应的弦长  $L=D \cdot \sin(\theta/2)$ . 设可测成像尺寸为  $L$ ,对应的单次测量圆心角度  $\theta=2\arcsin(L/D)$ ,测量精度  $\delta=l-L$ . 根据系统精度要求,测量精度

要高于系统精度,确定测量精度后,根据圆心角度计算式可获取砂轮每次旋转角度和单次采样面积。

为了获取砂轮表面全场二维形貌,采取连续采集表面图像,对图像不重叠拼接的方法.通过电动精密水平旋转台带动金刚石砂轮,再通过机器视觉系统获取多方位砂轮表面图像,如图 1(c)所示。

首先,根据实验要求确定光源类型、投射方式,以及系统其他组件的类型.其次,对砂轮的二维平面图像做砂轮弧面拼接而产生的边缘误差进行分析,并与单颗磨粒的平均直径(根据砂轮粒度号或其他测量设备获取)进行比较,选取合适的系统精度,调节实验系统其他参数匹配所需系统精度.标定系统后,进行整周测量,通过匹配 CCD 拍摄和电动旋转台的旋转速度,砂轮转动一个角度,停止后拍摄一幅图像,再转动一个角度,停止后获取一幅图像;如此循环往复,获取样本多方位图像,在误差允许范围内进行不重叠拼接,获取样本全场图像.最后,通过相关软件对全场图像进行图像处理,获取所需特征参数。

### 1.2 实验平台的搭建

根据测量对象及测量对象的特征,获取所需特征参数的精度要求,以及不重叠拼接的误差允许范围内的拼接精度要求,确定系统误差,再进行系统组件型号匹配,搭建系统实验平台。

以钎焊金刚石砂轮为例,砂轮外径为 120 mm,内径为 31.5 mm,宽度为 8 mm.实验系统精度要求:实验测量对象钎焊金刚石砂轮磨粒粒度号为 35/40,粒径尺寸大小范围为 425~500  $\mu\text{m}$ .为在一幅砂轮图像上得到砂轮表面磨粒的信息,设系统误差小于磨粒直径的 1/10.根据实验测量精度的要求,则系统误差要小于 0.040 mm.选取实验器材如下:MER-125-30UM(-L)型 CCD、0850MM 型变焦镜头、MRS102-GD 型电动精密旋转平台、SC103 型步进电机驱动器和普通环形光源.将选购的实验器材进行组装和调试,搭建金刚石砂轮表面二维形貌全场测量实验装置,如图 2 所示。

根据计算分析可得,若被测砂轮外径为 120 mm,要使测量误差在允许范围内,按  $\delta=0.04\text{ mm}$  的系统精度计算,则拍摄砂轮最长对应的圆心角  $\theta$  要在  $15^\circ$  范围内.如果超过  $15^\circ$ ,则会产生较大的边缘误差,影响后期的图像拼接,所以单张图像的长度要小于 15.66 mm。

### 1.3 照明光强选取和系统标定

首先,对光源、CCD 和镜头等系统关键组成部分进行定位.改变视场和光强,获取不同测量条件下的砂轮表面图像,并对图像进行处理和分析,获取最佳系统定位.不同光源强弱下的砂轮表面图像,如图 3 所示。

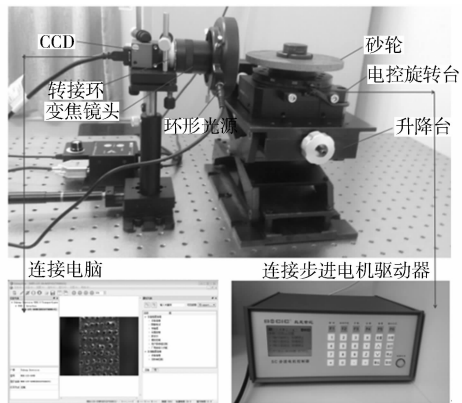


图 2 二维形貌全场测量实验装置  
Fig.2 Measurement experimental device of whole two-dimensional surface topography

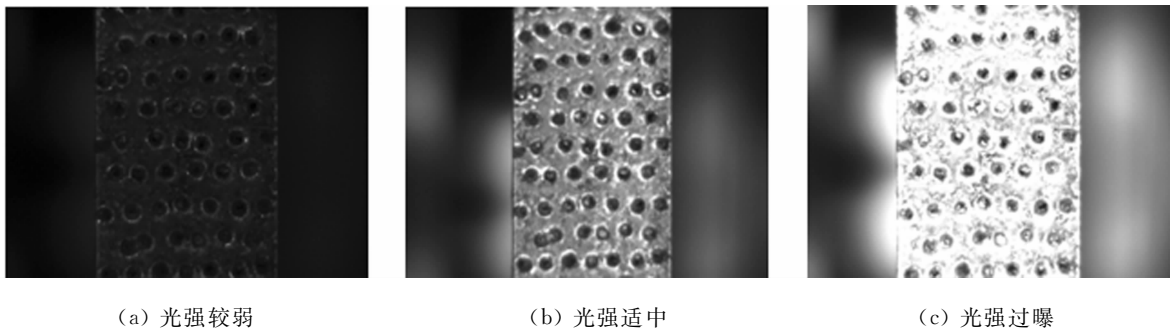


图 3 不同光源强弱下的砂轮表面图像

Fig.3 Wheel surface images under different light intensity

由图 3(a)可知:光源光强过弱的砂轮表面图像,磨粒和砂轮基底对比度不够,图像处理后会现很多噪声.由图 3(c)可知:光源光强过高的砂轮表面图像,虽然磨粒与砂轮基底对比度很强,但由于磨粒顶端会产生反射,会丢失磨粒.由图 3(b)可知:中等光源强度照射下,砂轮表面图像基底和磨粒对比度较强,比较容易分割基底和磨粒。

通过对不同视场、不同光强下的砂轮表面形貌图像的处理分析发现,光源对砂轮表面形貌信息的获

取有很大的影响. 在本测量系统中, 获取最佳砂轮表面形貌图像的最佳条件是: 中等强度的光源、最佳光照距离(镜头的定焦长度).

确定系统各部件位置后, 采用传统摄像机标定方法对系统进行标定, 通过建立标定物上的点与拍摄图像上的对应点间的对应关系所得的数学模型来标定摄像机内外参数. 选用游标卡尺(上海恒量 0~150 mm)作为标准标定物, 用 CCD 拍摄游标卡尺, 并对拍摄的图像进行处理, 建立游标卡尺上的点与拍摄图像上的对应点之间的数学模型.

经过计算可知: 实验平台机器视觉系统的放大倍数为  $\beta=369\times3.75/1\,000/5=0.276\,75$  倍(游标卡尺 5 mm 对应 369 个像素), 即缩小了  $1/0.276\,75=3.613\,4$  倍. CCD 的单次成像面积为  $964\text{ px}\times1\,292\text{ px}$ , 像素尺寸为  $3.75\text{ }\mu\text{m}\times3.75\text{ }\mu\text{m}$ (即  $3.615\text{ mm}\times4.845\text{ mm}$ ), 对应实际拍摄的图像尺寸为  $13.06\text{ mm}\times17.51\text{ mm}$ .

## 2 砂轮表面形貌图像处理

### 2.1 表面形貌图像拼接

为了提高图像利用率, 对图像进行不重叠拼接. 由于砂轮表面是弧面, 而 CCD 相机获取的是二维平面, 则必然存在边缘误差, 若边缘误差小于系统误差, 不会影响后续的图像处理和特征参数的提取. 据上文实验平台搭建部分计算所得, 单张图像的长度只要小于 15.66 mm, 则在误差允许范围之内.

根据机器视觉系统的标定结果, 可以得到 CCD 拍摄到的图像的长对应实际视场的长为 13.06 mm, 在误差允许范围之内. 因此, 根据圆心角度计算式, 对应拍摄砂轮图像的角度为  $12.5^\circ$ , 即电控精密旋转台每转  $12.5^\circ$ , CCD 拍摄一张砂轮图像, 共拍摄 29 张, 最后一张只截取砂轮图像的  $4/5$ , 将得到的 29 张砂轮图像进行不重叠拼接, 就能得到完整的  $360^\circ$  砂轮全场表面形貌. 金刚石砂轮表面拼接部分图像, 如图 4 所示. 图 4 中: 矩形框所示部分为拼接部分. 由图 4 可知: 两张图像拼接的接缝并不明显, 磨粒的连接自然.

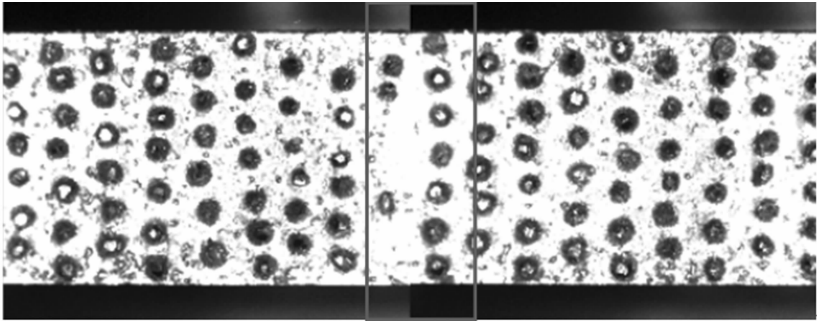


图 4 金刚石砂轮表面拼接部分图像

Fig. 4 Part of stitching image of whole grinding wheel surface topography

### 2.2 表面形貌图像预处理

首先, 对拼接后的图像进行背景去除. 然后, 通过 MATLAB 的 `Imadjust` 函数调节灰度图像的亮度, 增加对比度, 并利用 `Imfilter` 和 `Fspecial` 函数, 以  $7\times7$  的平均模板进行平均平滑处理, 减少和抑制图像的噪声. 通过 `Im2bw` 函数进行二值化, 手动选择阈值, 最终确定阈值为 0.333 3; 再利用 `Imopen` 函数进行开运算, 试图断开粘结磨粒间的连线. 之后, 采用 `Bwareaopen` 函数进行去除小面积处理, 去除小连通域的噪声, 利用 `Imfill` 函数进行填洞处理. 最后, 通过 `Bwlabel` 函数进行区域标记, 结果如图 5 所示. 由于原图像过长, 显示部分处理后砂轮表面形貌的图像.

### 2.3 特征参数提取和误差分析

利用 `Regionprops` 函数对区域特征参数进行提取, 获取磨粒个数和磨粒面积, 再通过对当量圆的求解, 计算出磨粒粒径和磨粒位置. 统计部分磨粒信息和参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $S$  为磨粒面积;  $d$  为磨粒粒径;  $x, y$  分别表示  $x, y$  轴坐标. 经统计, 磨粒总数为 1 518 颗, 磨粒平均面积为  $0.404\text{ m}^2$ , 磨粒平均粒径为  $0.359\text{ m}$ .

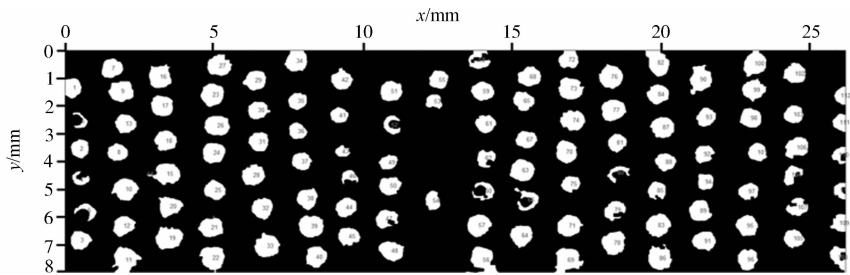


图 5 处理后部分砂轮的表面磨粒分布

Fig. 5 Part of abrasive grains distribution of processed grinding wheel surface

磨粒实际个数为 1 490 颗, 根据磨粒参数统计表, 发现磨粒个数大于钎焊金刚石砂轮表面磨粒实际个数. 实验测量对象钎焊金刚石砂轮磨粒粒度号为 35/40, 粒径尺寸大小范围为 425~500  $\mu\text{m}$ , 磨粒平均粒径小于实际磨粒粒径. 对拼接处理后的图像进行分析, 由于拼接后的原图像过长, 观察其中一个位置的图像, 以  $100^{\circ}\sim 125^{\circ}$  的砂轮表面形貌图像为例, 结果如图 6 所示.

由图 6 可知: 圆形标志的磨粒边缘信息丢失比较严重. 究其主要原因, 可能是由于光强太强, 导致磨粒顶部反射较强, 而图像处理时, 只计入提取到的磨粒区域, 导致磨粒面积及磨粒粒径偏小. 因此, 一方面, 可以通过重新选取光源, 使光均匀地分布在砂轮表面, 从而防止磨粒边缘信息的丢失, 获取较为清晰准确的磨粒信息图像; 另一方面, 可以在图像处理时, 利用凸包算法, 填充丢失边缘及顶部面积, 获取较为准确的磨粒面积.

表 1 磨粒具体参数统计表

Tab. 1 Abrasive grain specific parameters table

编号	S/mm <sup>2</sup>	d/mm	x/mm	y/mm
1	0.317	0.318	0.256	1.361
2	0.306	0.312	0.502	3.550
3	0.351	0.334	0.509	6.858
4	0.144	0.214	0.509	4.665
5	0.100	0.178	0.550	2.566
6	0.173	0.235	0.746	5.778
7	0.376	0.346	1.568	0.658
8	0.317	0.318	1.758	3.690
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 518	0.100	0.178	376.051	1.390

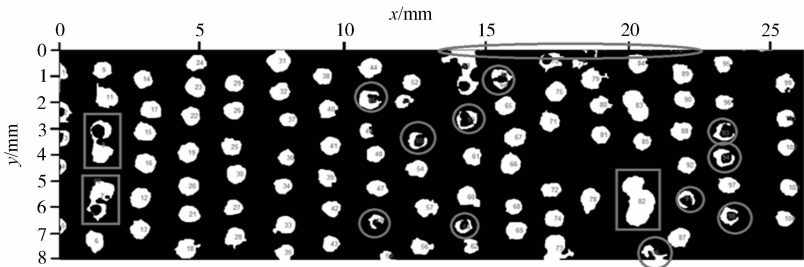


图 6  $100^{\circ}\sim 125^{\circ}$  的砂轮表面形貌图像

Fig. 6  $100^{\circ}\sim 125^{\circ}$  wheel surface topography images

由图 6 还可知: 椭圆标志的部分有一些没有处理掉的图像噪声, 而且和一些边缘磨粒粘结在一起, 图像处理时, 区域没有断开, 当做一颗磨粒计入磨粒个数; 方形标志的是一些粘结在一起的磨粒, 图像处理时, 当做一颗磨粒计入磨粒个数, 由于磨粒粘结的问题, 可以通过图像处理进行改进, 统计磨粒粒径, 将磨粒粒径大于 500  $\mu\text{m}$  的提取出来进行再次分割, 获取更准确的磨粒个数. 根据分析, 磨粒个数应该小于磨粒实际个数, 而实际图像处理获取的磨粒个数大于磨粒实际个数, 可能是由于阈值分割的时候, 把结合剂当做磨粒处理, 导致磨粒个数增多. 这些可以通过后期的图像处理函数的优化, 改进算法, 获取准确的磨粒颗数.

根据实验平台搭建部分分析可知, 实验系统精度要求为 0.040 mm, 平台机器视觉系统的放大倍数为 0.276 75 倍, 像素尺寸 3.75  $\mu\text{m}\times 3.75 \mu\text{m}$ . 系统实际能获取的最小单元为 13.55  $\mu\text{m}\times 13.55 \mu\text{m}$ , 若一个磨粒粒径最少覆盖 10 个单元, 本系统最小可测磨粒粒径为 135.5  $\mu\text{m}$ , 而磨粒粒径尺寸大小范围在 425~500  $\mu\text{m}$  之间, 所以本系统满足磨粒检测要求. 如果更换不同的砂轮, 根据精度要求可以调节变焦镜头的焦距及单张砂轮图像的采样面积, 从而调节系统的相关参数搭建合适的采样系统, 获取砂轮表面

二维形貌图像.

3 结 束 语

根据砂轮表面二维形貌全场检测的要求,提出基于机器视觉的测量方法,并搭建砂轮表面形貌实验系统以验证方法的可行性. 对其中的测量原理、测量条件和误差分析进行探讨,表明该方法可用于微米量级磨粒砂轮表面二维形貌全场测量. 实验结果表明:基于机器视觉的测量系统可实现对钎焊金刚石砂轮表面形貌非接触全场测量,获取砂轮表面磨粒颗数、粒径及位置等关键评价指标,对于评价磨削性能,优化工艺参数,提高产品质量具有实际意义.

参考文献:

[1] 高国富,薛进学,赵波,等. 细粒度金刚石砂轮椭圆超声振动修整试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2008(6):55-60. DOI:10.3969/j.issn.1006-852X.2008.06.013.

[2] 张大将,王颖达,陈世隐,等. 钎焊金刚石砂轮磨削 YG8 硬质合金的试验研究[J]. 超硬材料工程,2017,29(3):19-23.

[3] MENG Xinxin,LIN Youxi,REN Zhiying,*et al.* Surface quality of grinding optical glasses using eletroplated diamond wheel[J]. Diamond and Abrasives Engineering,2017,37(3):91-95. DOI:10.13394/j.cnki.jgszz.2017.3.0018.

[4] 周丽君. 基于垂直扫描白光干涉测量法的砂轮磨粒测量及评定[D]. 厦门:华侨大学,2013.

[5] YAN Lan,ZHOU Zhixiong,JIANG Feng,*et al.* The application of three-dimensional surface parameters to characterizing grinding wheel topography[J]. Advanced Materials Research,2010,126/127/128:603-608. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.603.

[6] 刘伟,商圆圆,邓朝晖,等. 砂轮表面形貌检测方法的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2017,37(6):70-78. DOI:10.13394/j.cnki.jgszz.2017.6.0013.

[7] BLUNT L,EBDON S. Application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography[J]. Precision Engineering,1997,20(2):145-146. DOI:10.1016/S0141-6359(97)81201-9.

[8] OJIMA H,NAGAYAMA T,ZHOU Libo,*et al.* Research on development of on-machine 3D measuring system of grinding wheel surface topography by stereo images[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering,2016,82(2):186-191. DOI:10.2493/jjspe.82.186.

[9] 陈锋,陈五一,陈志同. 基于激光三角法的 CBN 杯形砂轮表面形貌检测[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(10):1321-1325. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2011.10.003.

[10] DARAFON A,WARKENTIN A,BAUER R. Characterization of grinding wheel topography using a white chromatic sensor[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2013,70(7):22-31. DOI:10.1016/j.ij-machtools.2013.03.003.

[11] 崔长彩,余卿,张邀,等. 金刚石砂轮表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3167-3174. DOI:10.3788/OPE.20142212.3167.

[12] 杜哈,陈根余,周聪,等. 光纤激光在线整形金刚石砂轮检测系统设计[J]. 激光技术,2016,40(6):930-934. DOI:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.032.

[13] 杨勇生,王珉,李汉中. 砂轮形貌的激光功率谱特性及其检测[J]. 南京航空航天大学学报,1997,29(1):79-84.

[14] 吴文艺,崔长彩,叶瑞芳,等. 采用二次灰度直方图的砂轮磨粒图像阈值分割[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(4):422-426. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201604006.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)