

# 基于静电喷雾的金刚石磨粒微表面均布特性研究

陈逢军, 张磊, 尹韶辉, 黄帅, 郝姗姗

(湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082)

**摘要:** **目的** 改善精密/超精密成形磨削中砂轮存在磨粒分布不均匀的问题。**方法** 仿真分析针-环电极空间电场强度的分布特性, 以及喷嘴轴线上场强随喷嘴直径、环状电极直径、电极间距的变化规律。金刚石磨粒均匀分散在静电喷雾溶液中, 在高压电场和压力泵的作用下将喷出形成微表面。通过网格分析法和截距法定量分析金刚石颗粒微表面分布的均匀性。**结果** 针-环电极产生的空间电场是对称分布的, 电场线集中分布在喷嘴附近, 其电场强度沿轴线向外急剧降低。由于尖端效应, 喷嘴直径减小, 其尖端处的电场强度明显增大; 电极间距增大, 喷嘴处的场强降低。网格计数法中, 网格划分得越细, 微表面颗粒分布偏差越大, 即分布均匀性越差, 但更能反映真实的颗粒整体分布情况, 且各偏差曲线分布的趋势基本相同, 仅在液体流量 20 mL/h 处出现了与理论的变化规律不符合的情况。截距法中, 当液体流量增大时, 颗粒间距离偏差值逐渐降低, 且在液体流量 20 mL/h 处明显下降。**结论** 在金刚石颗粒微表面分布的定量化分析中, 网格计数法只能体现区域分布的均匀性, 而对某块区域内颗粒的距离不敏感, 无法区分颗粒聚集的情况, 导致计算结果出现偏差。截距法则对颗粒的间距比较敏感, 因此有效地结合网格计算法和截距法可以对金刚石磨粒的分布情况做出准确分析。

**关键词:** 静电喷雾; 金刚石磨粒; 磨粒均布; 颗粒均匀性量化; 电场强度仿真; 磨粒微表面

**中图分类号:** TG580.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)07-0015-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.07.003

## Uniform Distribution Characteristic of Fine Diamond Abrasive Particles Based on High Voltage Electrostatic Spraying

CHEN Feng-jun, ZHANG Lei, YIN Shao-hui, HUANG Shuai, HAO Shan-mei

(National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve uneven distribution of abrasive particles in grinding wheel during precision/ultra-precision forming grinding. Distribution characteristic of space electric field intensity was simulated for needle-ring electrode. Variation of field strength on axis with the nozzle diameter, diameter of annular electrode and electrode gap was analyzed. The diamond abrasive particles were evenly dispersed in electrostatic spraying solution, which would form a micro surface under the action of high voltage electric field and pressure pump. The micro-surface distribution uniformity of diamond particles was quantitatively analyzed using grid analysis method and intercept method. The electric field produced by needle-ring electrode was symmetrical, and electric field line was concentratedly distributed near the nozzle. Its electric field intensity decreased sharply

收稿日期: 2018-02-27; 修订日期: 2018-04-27

Received: 2018-02-27; Revised: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675171)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51675171)

作者简介: 陈逢军 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为超精密加工与控制, 智能自动化制造。

**Biography:** CHEN Feng-jun (1979—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: ultra-precision machining and control, intelligent automatic manufacturing.

outward along the axis. Because of tip effect, the nozzle diameter decreased, and the electric field intensity at the tip increase obviously. The electrode gap increased and field strength at the nozzle decreased. In grid counting method, when the grid was fine, particle distribution deviation of micro surface was greater, and the distribution uniformity was worse. However, the method could reflect real situation of overall particle distribution, and distribution trends of deviation curves were basically the same. The situation appeared at the liquid flow of 20 mL/h was not consistent with theoretical variation. In intercept method, when the liquid flow rate increased, the distance deviation between particles decreased gradually, and decreased obviously at the liquid flow rate of 20 mL/h. According to quantitative analysis of diamond particles micro surface distribution, grid counting method can only reflect regional distribution uniformity, but it is not sensitive to particle spacing in a certain region and cannot distinguish particle segregation, which leads to deviation in results. The intercept method is sensitive to particle spacing. The distribution of diamond particles can be accurately analyzed in the combination of grid counting method and intercept method.

**KEY WORDS:** electrostatic spraying; diamond abrasive particles; uniform particle distribution; quantification of particle uniformity; electric field strength simulation; micro-surface

磨削加工中, 砂轮表面磨粒的浓度及分布的均匀性将直接影响加工件的磨削精度和表面质量<sup>[1]</sup>。传统砂轮表面的磨粒大多呈无规则随机密布状态, 砂轮中的有效磨粒仅占磨粒总数的很少部分。大量冗余的磨粒不仅增加了砂轮的制造成本, 而且导致容屑空间减小, 砂轮堵塞, 从而导致磨削表面质量下降, 甚至会出现表面过度磨削、烧结的情况。因此从提高砂轮磨削的表面质量和节约加工成本等方面考虑, 要求砂轮的表面磨粒必须实现均匀分布<sup>[2-3]</sup>。

静电喷雾技术的独特优势吸引着众多的研究人员进行深入的理论和应用研究。Hayashi<sup>[4]</sup>等人利用静电喷雾技术制备了不同聚合物颗粒, 研究了聚合物种类及浓度对颗粒形貌的影响, 并且获得了具有红细胞外貌的颗粒, 此颗粒可应用在磁共振成像和巧光成像上。G. Tepper 等人<sup>[5]</sup>用交流电场在声表面波器件上制备了高度均匀的聚合物薄膜, 喷雾过程形成的雾滴尺寸约 30 nm, 均匀性远远优于喷枪法。Huang 等人<sup>[6]</sup>利用静电喷雾技术制备了含硅羧基磷酸钙的均匀涂层, 研究发现, 此涂层可促进人骨细胞的粘附和生长。王飞俊等人<sup>[7]</sup>采用静电喷雾技术, 在电压为 10 kV、液面距离为 20 mm、流速为 10 mL/h 的条件下, 制备了控释性能良好的载药微胶囊。Xie 等人<sup>[8]</sup>利用静电喷雾制备了 PLGA 包覆牛血清白蛋白 (BAS) 的复合微球, BAS 包载率达到 76%。

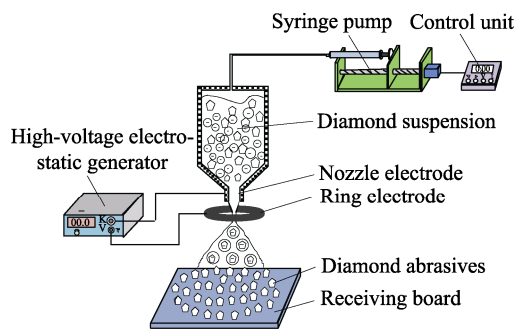
文中采用静电喷雾的方法喷射均布金刚石磨粒, 基于静电喷雾理论仿真分析了针-环电极空间电场的分布特性, 制备了金刚石悬浮液及搭建了静电喷雾实验装置, 并比较了不同的金刚石颗粒均匀性量化分析方法。

## 1 表面磨粒静电喷雾工艺

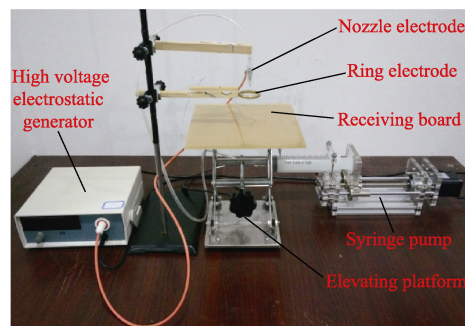
如图 1a 所示, 磨粒微表面的静电喷雾工艺通过高压在喷雾电极之间产生强静电场, 在压力泵作用

下, 喷雾溶液被输送至喷嘴, 溶液流经带高压的喷嘴时, 根据静电感应原理, 液体表面会产生电荷。当电荷量达到瑞利极限值<sup>[9]</sup>时, 液滴将发生破碎, 形成细小的雾滴, 雾滴之间因带有同性电荷而相互排斥、分散。微细颗粒在液体射流破碎后包裹在液滴内部, 含有颗粒的带电液滴经过蒸发和库仑爆炸后, 直径可以变得足够小, 甚至能包含单个微细颗粒<sup>[10-11]</sup>。另一方面, 带电液滴在同性电极的排斥、异性电极的吸引下包裹着微细颗粒沿电场线运动。

如图 1b 所示, 静电喷雾实验装置由微量注射泵、高压静电发生器、环状电极、喷嘴电极、接收板等部



a 静电喷雾原理



b 静电喷雾实验装置

图 1 静电喷雾原理及装置

Fig.1 Schematic diagram (a) and experimental setup (b) of electrostatic spraying

分组成。高压静电发生器（GLOW28720）负极与喷嘴电极相连，正极与环状电极相连，喷嘴电极和环状电极之间产生的高压电场为液滴雾化提供能量。微量注射泵为供液装置，流量精度为 0.1 mL/h。喷嘴电极直径为 1 mm，环状电极直径为 30 mm，电极间距为 10 mm。实验结果用超景深显微镜观察，图片放大 500 倍。

## 2 空间电场强度仿真

利用 MAXWELL 仿真软件建立静电喷雾装置空间电场的仿真模型，探索高压条件下针-环组合电极间电场强度的分布特性，以及喷嘴电极轴线上场强随喷嘴直径、环状电极直径、电极间距的变化。用一直径为 1 mm、长度为 10 mm 的圆柱体模拟喷嘴电极，材料设置为不锈钢，用一内径为 30 mm、外径为 35 mm 的圆环模拟环状电极，材料设置为铜，电极间

距为 10 mm。计算误差要求为 1%，最大迭代次数设为 10，每次迭代加密剖分单元比例为 50%。在喷嘴电极上施加 10 kV 的电压，仿真结果如图 2 所示。轴向距离越大，表示距喷嘴电极越近。

如图 2a 所示，针-环电极产生的空间电场是对称分布的，电场线集中分布于喷嘴附近。如图 2b 所示，喷嘴轴线上场强的最大值在喷嘴处，大小为  $7.49 \times 10^6$  V/m。在距离喷嘴 2 mm 的区域，场强发生了骤降，大小仅为  $1.02 \times 10^6$  V/m。如图 2c 所示，在距离喷嘴 0.5 mm 的区域内，由于尖端效应，喷嘴直径变小，电场强度显著增大。而在距喷嘴 0.5~10 mm 的区域内结果相反，喷嘴直径越大，电极电容增大，电场强度增大，但其差值较小。因此为了保证较好的荷电效果，宜选取直径较小的喷嘴。如图 2d 所示，增大电极间的距离，电场强度降低，特别是喷嘴处的场强降低明显。

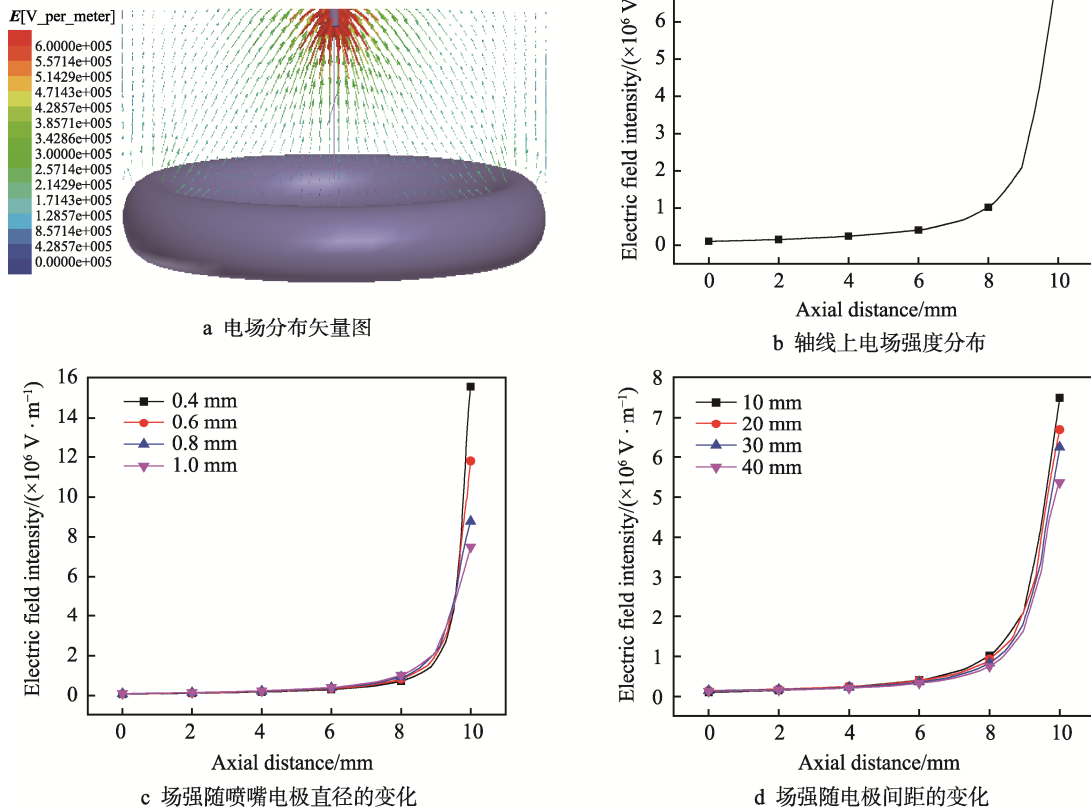


图 2 电场仿真结果

Fig.2 Simulation results of electric field: a) Vector diagram of electric field distribution; b) Distribution curve of electric field intensity on axis; c) Variation of electric field intensity with nozzle electrode diameter; d) Variation of electric field intensity with electrode gap

## 3 金刚石颗粒分布定量化分析

### 3.1 网格计数法分析

本文将网格计数法<sup>[12]</sup>应用到微表面金刚石颗粒

的分布，并做相应的改变，其表达式为：

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - \bar{p}|}{n\bar{p}} \quad (1)$$

式中： $n$  为网格数目； $p_i$  为第  $i$  个网格中的颗粒

数;  $\bar{p}$  为平均颗粒数。式(1)所表达的物理意义为各个网格区域颗粒数与平均颗粒数的偏差之和与总颗粒数的比值,反映了微表面整个观测区域内颗粒分布的偏差情况,其值越小,表示颗粒的分布均匀度越高。

在电极电压为 6 kV, 金刚石大小为 w10, 喷嘴电极直径为 1 mm, 环状电极直径为 30 mm, 电极间距为 10 mm 的条件下, 得到不同喷雾流量下金刚石磨粒的分布情况, 如图 4 所示。根据网格计数法, 通过不同网格划分规则对图 4 中不同液体流量下微表面金刚石磨粒分布偏差进行定量计算, 得到如图 4e 所示的曲线。可知网格划分得越细, 分布偏差越大,

即颗粒分布均匀性越差。因为网格数增大时, 获取的数据增多, 计算的颗粒分布偏差值增大, 更能反映真实的颗粒整体分布情况, 且各偏差曲线分布的趋势基本相同。液体流量从 5 mL/h 增加到 15 mL/h 的过程中, 颗粒的分布偏差逐渐增大, 在液体流量为 20 mL/h 处却突然下降, 而在图 4d 中金刚石磨粒分布并无明显改善。分析原因是, 网格计算法本身只能体现区域分布的均匀性, 而对某块区域内颗粒的距离不敏感, 即无法区分颗粒团聚的情况, 所以导致计算结果和理论出现偏差。可见网格计算法难以对颗粒分布的真实情况做出准确的判断, 因此寻求其他的方法来综合评定金刚石磨粒分布的均匀性显得十分必要。

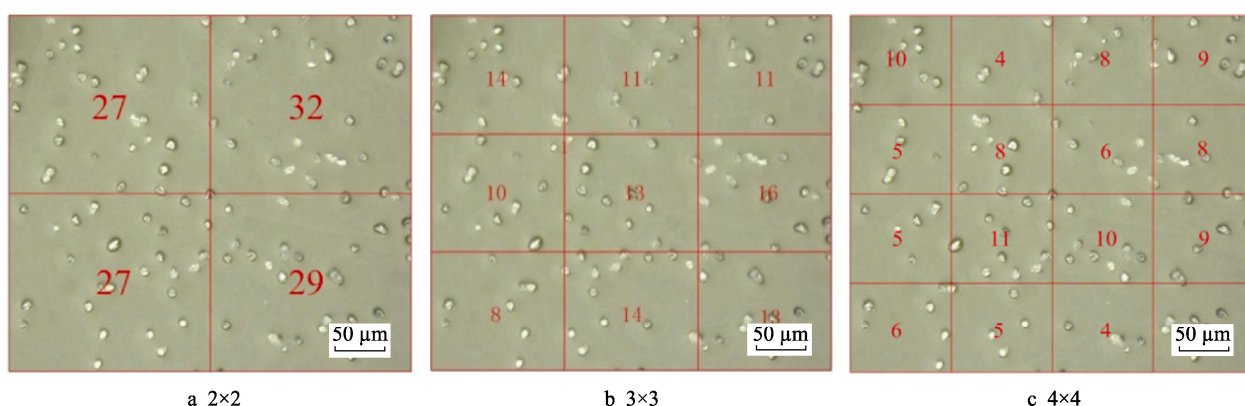


图 3 不同网格划分  
Fig.3 Different grid partition

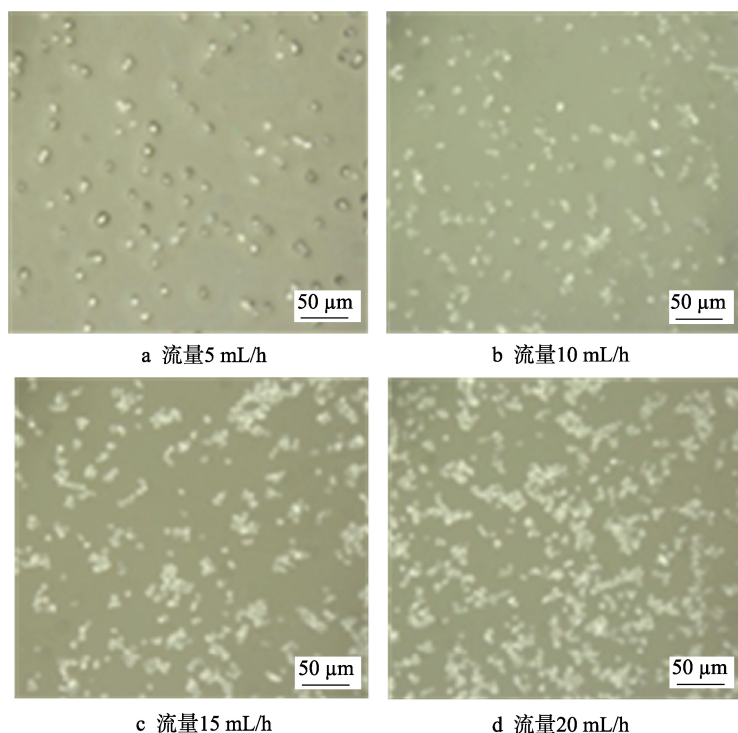
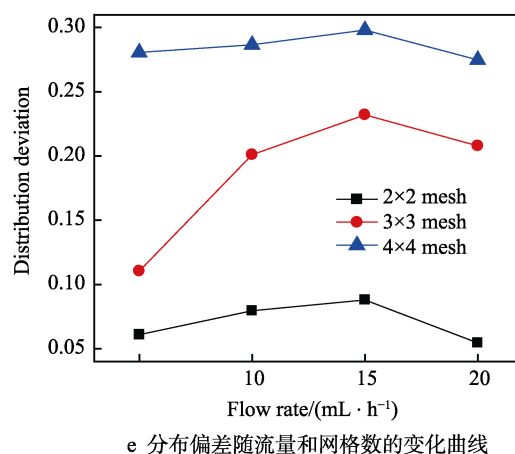


图 4 不同流量下金刚石磨粒分布及颗粒分布偏差随流量和网格数的变化曲线

Fig.4 Variation of diamond particles distribution and distribution deviation at different flow rates with flow rate and meshnumber: (a) Flow rate 5 mL/h; (b) Flow rate 10 mL/h; (c) Flow rate 15 mL/h; (d) Flow rate 20 mL/h; (e) Variation of the distribution deviation with the flow rate and the mesh number



e 分布偏差随流量和网格数的变化曲线



### 3.2 截距法分析

截距法将图片划分为若干个网格, 利用等间隔直线截取图片中各颗粒边缘之间的距离, 测定颗粒间的间距  $\lambda_i$  ( $i=1, \dots, N$ ), 由  $\lambda_i$  求出  $N$  个截距的标准偏差。一般来说, 网格数越多, 截的颗粒也多, 精度也越高。截距法对颗粒的间距较敏感, 是纵横方向一维线上分布的分析。如图 5 所示, 线段 L2 截取了 6 个目标颗粒, 则产生了 5 个截距, 截距法测颗粒均匀度的表达式为:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\lambda_i - \bar{\lambda})^2} \quad (2)$$

式中:  $N$  为截距数,  $\lambda_i$  为颗粒间距,  $\bar{\lambda}$  为截距平均数。

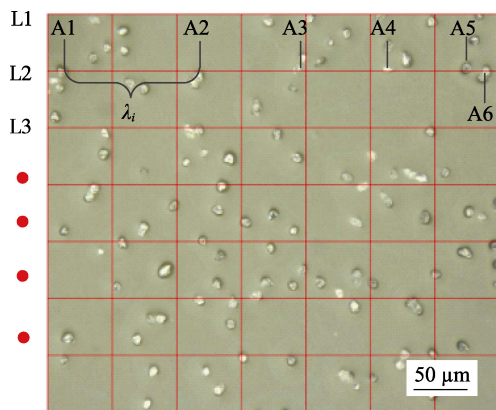


图 5 截距法测颗粒均匀度

Fig.5 Particle uniformity measured in intercept method

将图片划分为  $7 \times 7$  的网格, 利用截距法同样对上述不同液体流量下微表面的金刚石磨粒分布进行分析计算, 且只做横向上的分析。图 6 所示的曲线表明, 当液体流量增大时, 颗粒间距离偏差值逐渐降低。这是因为截取的颗粒有部分聚集在一起, 导致距离偏差值中出现多个 0, 最后得出的平均偏差值较小。特别是在  $20 \text{ mL/h}$  处, 偏差值从 3 急剧下降到 1.267, 表

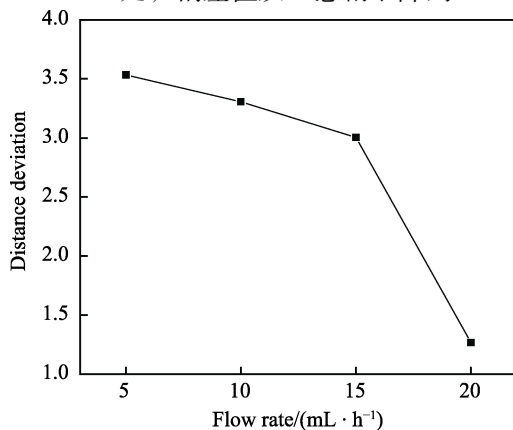


图 6 距离偏差随流量的变化曲线

Fig.6 Variation of distance deviation with flow rate

明此时的聚集现象已十分明显, 与理论分析的情况相符。因此结合图 4 与图 6 中的曲线可以得出, 液体流量较低时, 颗粒的分布比较分散, 均匀性也较好。流量增大时, 颗粒分布的区域均匀性有可能提高, 但是在其他条件不变的情况下, 流体的单位雾化能量降低, 所以颗粒的聚集现象将越来越明显。

### 4 结论

1) 仿真结果表明, 针-环电极产生的空间电场是对称分布的, 电场线集中分布在喷嘴附近, 喷嘴轴线上场强由喷嘴向外急剧降低。由于尖端效应, 喷嘴直径越小, 电场强度越大; 环状电极直径增大, 电场强度略微降低; 电极间距增大, 喷嘴处的场强明显降低。

2) 在金刚石颗粒分布的定量化分析中, 网格计算法能体现颗粒分布的区域均匀性, 但由于网格计算法本身的缺陷, 对于颗粒聚集等情况不能很好地识别, 会导致计算结果出现偏差。截距法则对颗粒的间距比较敏感, 反映的是颗粒间距离的平均偏差。因此, 结合网格计算法和截距法可以对金刚石磨粒的分布情况做出准确分析。

### 参考文献

- [1] 梁国星, 吕明, 刘圣晨, 等. 电镀单层 CBN 薄片砂轮磨粒分布的实验研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(7): 766-767.  
LIANG Guo-xing, LYU Ming, LIU Sheng-chen, et al. Experimental Study on Abrasive Distribution of Electroplating Single-layer CBN Thin-grinding-wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(7): 766-767.
- [2] YIN S H, WANG M, YU J W, et al. Manufacturing and Experimental Research of Fine Grain Diamond Grinding Wheel Based on Magnetic Field Controlling[J]. Key Engineering Materials, 2011, 487: 195-198.
- [3] 龚艳丽, 邓朝晖, 伍俏平, 等. 新型金刚石纤维的制备及其切削性能研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 185-192.  
GONG Yan-li, DENG Zhao-hui, WU Qiao-ping, et al. Study on Preparation and Cutting Performance of a New Diamond Grinding Fiber[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 185-192.
- [4] HAYASHI K, ONO K, SUZUKI H, et al. Electrosprayed Synthesis of Red-blood-cell-like Particles with Dual Modality for Magnetic Resonance and Fluorescence Imaging[J]. Small, 2010, 21(6): 2384-2391.
- [5] SARKAR S, LEVIT N, TEPPER G. Deposition of Polymer Coatings onto SAW Resonators Using AC Electrospray[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2006, 114(2): 759-761.
- [6] HUANG J, JAYASINGHE S N, BEST S M, et al. Novel Deposition of Nano-sized Silicon Substituted Hydroxyapatite by Electrostatic Spraying[J]. Journal of Materials

- Science: Materials in Medicine, 2005, 16(12): 1137-1142.
- [7] 王飞俊, 陆方妹, 邵自强. 静电喷雾法制备羧甲基纤维素/壳聚糖液芯微胶囊[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(9): 117-121.
- WANG Fei-jun, LU Fang-shu, SHAO Zi-qiang. Fabrication of Carboxymethyl Cellulose/Chitosan Microcapsules by Electrospray Technique[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(9): 117-121.
- [8] XIE J W, WANG C H. Encapsulation of Proteins in Biodegradable Polymeric Microparticles Using Electrospray in the Taylor Cone-jet Mode[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, 97(5): 1278-1290.
- [9] RAYLEIGH F R S. On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charged with Electricity[J]. Phil Mag, 1882, 14: 184-186.
- [10] BROWN N A, GLADSTONE J N, CHIAROT P R. Evolution of Nanoparticle Deposits Printed Using Electrospray[J]. Journal of Micro and Nano-manufacturing, 2015, 3(1): 014502-4.
- [11] SUH J, HAN B, OKUYAMA K, et al. Highly Charging of Nanoparticles Through Electrospray of Nanoparticle Suspension[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 287(1): 135-140.
- [12] CHRISTIANSEN J E. The Uniformity of Application of Water by Sprinkler Systems[J]. Agricultural Engineering, 1941, 22: 89-92.