

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.03.006

金刚石套料钻头齿表面形貌测量与建模

杨癸庚, 马 灵, 李淑娟

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 金刚石套料钻在硬脆材料加工中起着重要作用, 套料钻头齿表面形貌建模是套料加工过程研究的关键问题之一。针对该问题, 提出了一种刀具表面形貌测量与形貌建模方法。结合套料钻头齿形貌的特点, 通过对实际刀具的表面形貌进行测量, 获得了刀具表面磨粒的形状、面积密度、粒径和出刃高度的近似正态分布规律, 并基于测量结果将磨粒形状简化为截角八面体, 提出了刀具表面形貌的建模方法。结果表明, 虚拟模型与实际刀具的表面形貌特征一致性较好, 形貌建模方法合理有效。

关键词: 硬脆材料; 金刚石套料钻; 刀具表面形貌; 截角八面体

中图分类号: TG74

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)03-0345-09

Tool tooth surface topography measurement and modeling of diamond core-drill

YANG Guigeng, MA Ling, LI Shujuan

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Diamond core-drill plays an important role in machining hard brittle materials. The modeling of tool tooth surface topography is one of the key problems in the research on the processing of hard brittle materials. To address this problem, a method for measuring and modeling tool tooth surface topography is proposed. First, combined with the surface topography characteristics of the core-drill tool tooth, the approximate normal distributions of the shape, area density, particle size and cutting edge height of the abrasive particles on the tool tooth surface are obtained by experimental measurement. Then, based on the measurement results, the shape of abrasive particles is simplified as octahedron, with the modeling method of tool tooth surface topography proposed. Results show that the virtual model is in great agreement with the surface topography of the actual tool tooth, and that the topography modeling method is reasonable and effective.

Key words: hard brittle materials; diamond core-drill; tool tooth surface topography; truncated octahedron

随着光伏光电、半导体集成电路制造等高新技术制造业的快速发展, 碳化硅、蓝宝石、多晶硅、石英玻璃等材料的应用需求不断增长。然而, 这些材料属于难加工硬脆材料, 具有大模量、高硬度、高强度、高耐磨性等特点, 其加工过程需要采用多种金刚石工具, 如金刚石线锯、金刚石砂轮和金刚石套料钻等^[1,2]。金刚石套料钻加工具有加工效率高、加工质量好及机床能耗小等特点, 在硬脆材料的大直径

深孔加工^[3]及掏棒加工^[4]中起着重要作用。

金刚石套料钻的刀具表面镶嵌着大量的超硬金刚石磨粒, 磨削加工过程本质上是由大量离散分布在刀具表面的金刚石磨粒同时与被加工材料相互作用来实现材料去除的过程。目前, 国内外学者重点针对单颗磨粒进行磨削加工机理研究^[5-8]。磨粒仿真中通常是根据磨粒的某一几何特征或加工特性, 采用如球体、圆锥体、球头圆锥体、多棱锥体^[7]等简

收稿日期: 2021-01-20; 网络出版日期: 2021-06-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210607.1654.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805430); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-365)

第一作者: 杨癸庚, 男, 博士, 讲师, 研究方向为机械系统建模、仿真与优化。E-mail: guigengyang@xaut.edu.cn

化的几何体来模拟磨粒的形状。然而,单颗磨粒磨削加工研究只是认识磨削加工机理的第一步,而实际加工中是多颗磨粒同时与工件材料相互作用,磨粒切削刃形状、尺寸、位置的随机多样性等多种因素相互影响,导致单颗磨粒的仿真结果难以与实际磨削加工过程相符^[8]。因此,进一步开展考虑多颗磨粒共同作用的磨削加工过程仿真及磨削加工机理研究具有重要意义。为了保证考虑多颗磨粒共同作用的磨削加工仿真结果符合实际,必须对磨料磨具的表面形貌进行准确测量与建模^[9,10]。

国内外学者在磨料磨具表面形貌的三维建模方面已经取得了一定的进展^[11-15]。Gong 等^[11]将磨粒简化为球形,阐述了虚拟砂轮的表面形貌特征,并利用其形貌特征预测了工件的表面粗糙度。Doman 等^[12]总结了砂轮的一维、二维和三维数值模型,提出了砂轮建模的总体框架,以磨粒的随机分布为基础,统计并分析了砂轮表面形貌特征。商维等^[13]通过测量砂轮表面形貌、简化磨粒形状等方法对砂轮的表面特征进行研究,得出了磨粒的凸出高度及间距分布规律。宿崇等^[14]针对磨粒的随机分布问题提出了虚拟网格法,根据砂轮表面磨粒的平均分布密度,将表面划分为规则的网格,使磨粒在网格内随机分布,既实现了磨粒的随机分布,又避免了重叠现象的发生。刘月明^[15]运用振动模型方法确定各个磨粒的中心坐标,建立磨粒在空间内随机分布的模型,然后将球形磨粒替换为不规则六面体模型,再引入修整轨迹函数施加到砂轮形貌模型中,建立了更符合实际的砂轮表面形貌模型。然而,现有的表面形貌测量与建模研究主要集中于金刚石砂轮。砂轮表面的金刚石磨粒分布虽然具有一定随机性,但总体分布密度相对均匀,而套料钻刀齿表面金刚石磨粒分布的随机性非常强,具有总体分布稀疏、部分区域分布密集的特点,这导致砂轮的形貌建模方法不能直接应用于金刚石套料钻。因此,需要针对金刚石套料钻提出新的表面形貌建模方法。

为了实现金刚石套料钻刀齿表面形貌的测量与建模,首先,结合套料钻刀齿形貌的特点,建立刀齿表面磨粒尺寸、出刃高度与结合面轮廓面积、出刃角之间的数学关系;然后,采用超景深三维显微系统对实际刀具的表面形貌进行测量,获得刀齿表面磨粒的形状、面积密度、粒径和出刃高度的近似正态分布规律;其次,基于测量结果将磨粒形状简化为截角八面体,提出刀齿表面形貌的建模方法;最后,通过虚拟模型与实际刀齿的表面形貌特征数据对比,验证了形貌建模方法的有效性。

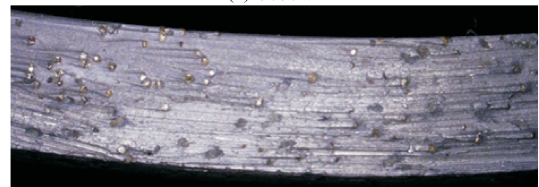
1 刀齿表面形貌特征描述

1.1 套料钻模型

本文研究的金刚石套料钻如图 1 所示,套料刀具的刀头外径为 132 mm,内径为 124 mm;共包含 12 个刀齿,每个刀齿径向厚度为 4 mm,外径弧长约为 20 mm。该套料钻可用于粗加工、半精加工的场合,刀齿端面上的磨粒对应的粒度号为 70/80 和 80/100,其尺寸参数标准可查阅 GB/T 6406—2016。



(a) 套料钻



(b) 某刀齿端面的磨粒分布

图 1 某金刚石套料钻实物模型

Fig. 1 Physical model of a diamond core-drill

1.2 表面形貌特征描述

刀齿表面形貌特征包括磨粒形状、磨粒分布密度、磨粒尺寸、出刃高度等,结合实际套料钻的特点合理地描述其表面形貌特征,为形貌测量实验和形貌建模提供理论依据。

1.2.1 磨粒形状

图 1 所示套料钻的金刚石磨粒属于等积形磨粒^[16],表面以四边形、六边形为主。一方面,在描述磨粒分布和计算磨粒尺寸时,可以先将磨粒等效为球体,基于球体模型推导磨粒几何尺寸之间的关系;另一方面,考虑到与实际磨粒形状的吻合性,形貌建模时采用由 6 个正方形、8 个正六边形组成的截角八面体^[17](将正八面体的六个顶点切去得到)来模拟磨粒的形状,如图 2 所示。

1.2.2 磨粒分布

图 1 所示的金刚石套料钻,其刀齿由金属粉末和磨粒经过配料、混料、预压、烧结成型,其中金刚石磨粒的浓度较小,使得在混料过程中磨粒难以搅拌均匀。该制备过程导致刀齿端面的磨粒分布具有如下特点:①磨粒位置分布具有强随机性;②总体分布

较为稀疏,部分区域分布密集。

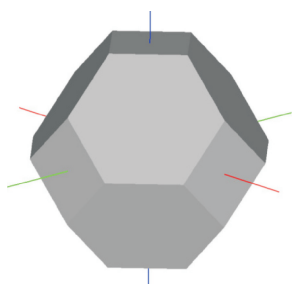


图2 截角八面体磨粒

Fig. 2 Truncated octahedral abrasive

1.2.3 磨粒尺寸

磨具在加工过程中起磨削作用的是凸出的磨粒,磨粒的形状、粒径大小和出刃高度共同决定了磨具的磨削力、加工效率等性能^[18]。

实验测量中,采用显微镜观察和拍摄的刀齿表面的磨粒图像通常为二维图像,从图像上观察到的是凸出于结合剂基体表面部分的磨粒轮廓投影图像,如图3中红色线条所示的多边形,通过实验测量很容易得到磨粒轮廓投影多边形的面积。通常,磨粒一半以上的部分位于结合剂表面之下,因此,磨粒轮廓投影多边形即为磨粒与基体的结合面轮廓。



图3 磨粒轮廓投影图像

Fig. 3 Projection image of an abrasive profile

为了得到磨粒的粒径和出刃高度特征,首先将磨粒等效为球体模型,如图4所示,基于球体模型推导磨粒粒径、出刃高度与结合面轮廓面积之间的关系。金刚石磨粒等效为球体后,其剖面内粒径与出刃高度的几何关系如图5所示,磨粒粒径、出刃高度与结合面轮廓面积之间的关系为:

$$h_g = \frac{d_g}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_g}{2}\right)^2 - \frac{S_g}{\pi}} \quad (1)$$

式中: h_g 为磨粒出刃高度; d_g 为磨粒粒径; OA 为磨粒中心距离结合面的高度; AC 为磨粒轮廓截面的等效圆半径; S_g 为磨粒与基体的结合面轮廓面积,其值等于磨粒轮廓投影多边形的面积,需要通过实验测量来确定。

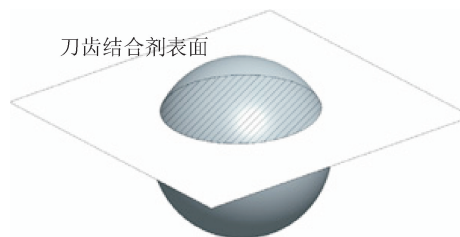


图4 磨粒等效为球体模型

Fig. 4 Equivalent sphere model of an abrasive

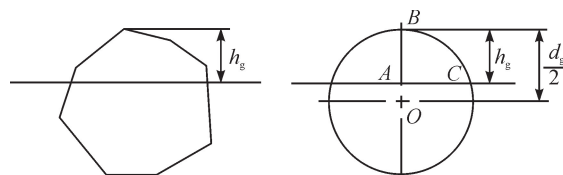


图5 球体模型剖面内粒径与出刃高度的几何关系

Fig. 5 Geometric relationship between abrasive size and abrasive protrusion height in profile of sphere model

其次,为了进一步分析磨粒出刃角度对磨削性能的影响,将出刃部分等效为圆锥体模型,如图6所示,由此可得磨粒出刃高度与结合面轮廓面积和出刃角之间的关系:

$$h_g = \sqrt{\frac{S_g}{\pi}} / \tan \frac{\beta}{2} \quad (2)$$

式中: β 为磨粒的出刃角度,出刃角度可取平均值 111° ^[19]。

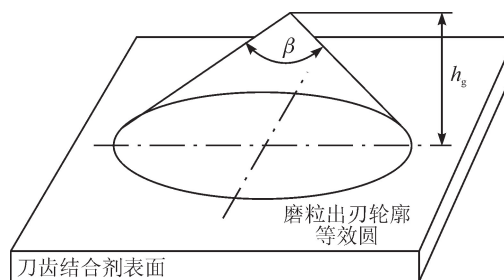


图6 出刃部分等效为圆锥体模型

Fig. 6 Equivalent cone model of the cutting edge part

联立式(1)和(2)可得磨粒粒径:

$$d_g = \sqrt{\frac{S_g}{\pi}} \left(1 / \tan \frac{\beta}{2} + \tan \frac{\beta}{2} \right) \quad (3)$$

综上,只需通过实验测量得到 S_g , 即可由式(2)和(3)计算出 h_g 和 d_g 的大小。

2 刀齿表面形貌测量与分析

通过实验测量获取刀齿表面形貌特征,包括磨粒形状、磨粒分布密度、磨粒尺寸、出刃高度等。一方面,可以验证第1节表面形貌特征描述方法的合理性;另一方面,可以为后续刀齿形貌建模提供输入参数。

2.1 测量实验

2.1.1 测试设备

采用日本基恩士公司生产的型号为 VHX - 5000 的超景深三维显微系统来拍摄与收集刀齿表面的形貌图像信息,如图 7 所示。该数字显微镜集观察、拍摄、测量于一体,操作、观测方便简单且速度快,镜头放大倍率可调范围广,并且其系统可实时对观测画面进行尺寸测量,同时保存测量图像和测量结果。



图 7 超景深三维显微系统
Fig. 7 Super depth of field 3D microscope system

2.1.2 实验方法

进行测量实验时,将深孔套料钻固定于平台上,调整仪器的光学镜头,使其与刀具的轴线方向平行,然后调整显微镜的镜头放大倍数进行表面形貌观察和测量,如图 8 所示。当显微镜镜头放大倍数为 20 时,拍摄得到的某刀齿表面磨粒的形貌图像如图 1(b)所示。

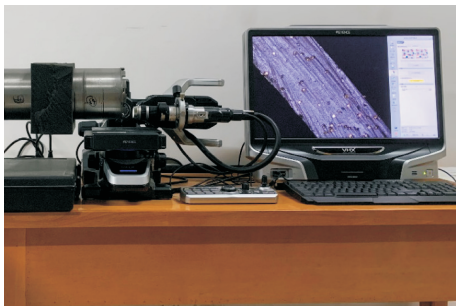


图 8 套料钻刀齿形貌测量实验系统
Fig. 8 Experimental system for the surface topography measurement of diamond core-drill

为了更加清晰地显示刀齿表面磨粒的形状及尺寸,将显微镜镜头放大 150 倍,此时的拍摄范围为 $2\ 340\ \mu\text{m} \times 1\ 749\ \mu\text{m}$,图像画面正好铺满整个显示器屏幕界面,形貌图像效果如图 9 所示。在显微镜镜头放大 150 倍的条件下,针对 12 个刀齿,每个刀齿拍摄 3~5 张图像,一共拍摄 50 张。基于该 50 张图像,对刀齿表面形貌特征进行统计分析。



图 9 显微镜镜头放大 150 倍时的形貌图像
Fig. 9 Topography image with microscope lens magnified 150 times

2.2 测量结果分析

2.2.1 磨粒形状

将形貌图像中的磨粒进行局部放大,如图 10 所示。总体上,磨粒的晶形较为规则,有清晰的晶棱和顶角,晶面较平整,表面以四边形、六边形为主,磨粒的形状与截角八面体较为吻合。

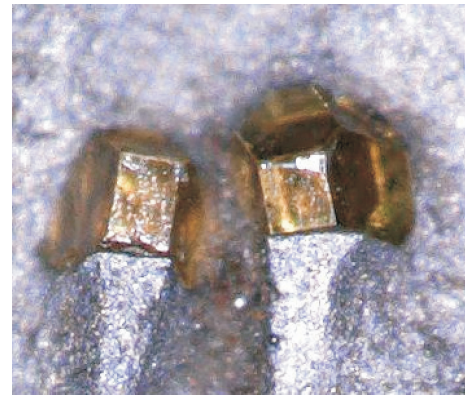


图 10 形貌图像中的磨粒局部放大
Fig. 10 Local magnification of the abrasives in topography image

2.2.2 磨粒分布

金刚石套料钻的刀齿端面表面的磨粒分布情况如图 1(b)和图 9 所示。可以看出,磨粒位置分布的随机性很强,分布很不均匀,磨粒总体分布较为稀疏,少部分磨粒存在密集分布的情况。通过对 50 张形貌图像进行统计可知,不同区域的磨粒分布情况存在较大差异。在各个图像中,磨粒数目最多为 14 个,最少为 2 个,大部分为 5~6 个,50 张图像共包含 251 个磨粒。

需要指出的是,磨粒的出刃完整性^[16]决定着磨粒是否能够在实际加工中起到有效的磨削作用。因此,在后续统计磨粒尺寸和进行形貌建模时,仅考虑出刃完整性较好的磨粒。上述 50 张图像中,出刃完整性较好的磨粒数目为 239 个。基于此,刀齿表面磨粒分布的平均面积密度为 $1.17\ \text{个}/\text{mm}^2$,第 3 节将采用该面积密度进行形貌建模。

2.2.3 磨粒尺寸

针对 50 张形貌图像中出刃完整性较好的 239 个磨粒,各个磨粒的出刃高度和粒径值可通过两种方案得到。方案 1:仅测量各个磨粒轮廓投影多边形的面积;然后,根据式(2)和(3)计算得到各个磨粒的出刃高度和粒径值,记为计算值。方案 2:直接通过测量得到各个磨粒轮廓投影多边形的面积和出刃高度的实测值;然后,根据式(1)得到磨粒的粒径值,记为磨粒粒径的实测值。

磨粒出刃高度、粒径的计算值与实测值的分布情况如表 1 和表 2 所示。磨粒出刃高度和粒径的分布直方图如图 11 所示。根据分布趋势可知,磨粒粒径和出刃高度近似符合正态分布规律。基于正态分布函数对磨粒出刃高度、粒径的计算值和实测值进行曲线拟合,拟合曲线如图 11 所示。磨粒粒径、出刃高度的取值范围、均值及标准偏差结果如表 3 所示。

表 1 出刃高度分布

Tab. 1 Protrusion height distribution of the abrasives

编号	分布范围/ μm	磨粒数/个	
		计算值	实测值
1	(38,41]	6	7
2	(41,44]	24	23
3	(44,47]	31	32
4	(47,50]	42	46
5	(50,53]	49	51
6	(53,56]	47	44
7	(56,59]	26	22
8	(59,62]	10	10
9	(62,65]	3	4
10	(65,68]	1	0

表 2 磨粒粒径分布

Tab. 2 Size distribution of the abrasives

编号	分布范围/ μm	磨粒数/个	
		计算值	实测值
1	(152,164]	5	5
2	(164,176]	24	16
3	(176,188]	32	37
4	(188,200]	42	48
5	(200,212]	49	53
6	(212,224]	46	44
7	(224,236]	26	28
8	(236,248]	10	9
9	(248,260]	4	1
10	(260,272]	1	0

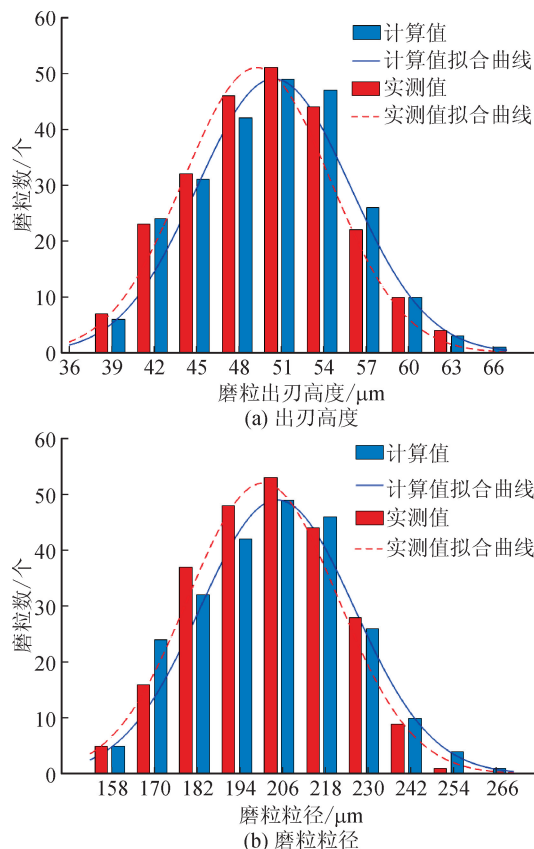


图 11 磨粒出刃高度和粒径的分布直方图
Fig. 11 Distribution histograms of protrusion height and abrasive size

表 3 计算与实测得到的磨粒粒径和出刃高度特征量对比
Tab. 3 Comparison of calculated and measured characteristic values of abrasive particle size and protrusion height

参数	计算值	实测值	相对误差/%	
粒径/ μm	取值范围	(152,263]	(152,251]	12.1
	均值	203	199	2.0
	标准偏差	21.8	21.2	2.7
出刃高度/ μm	取值范围	(38,65]	(38,63]	8.0
	均值	50.5	49.3	2.4
	标准偏差	5.4	5.2	3.8

根据测量结果可知,磨粒粒径取值范围的计算值与实测值分别为 152~263 μm 和 152~251 μm ,其相对误差为 12.1%。图 1 所示的套料钻刀齿上的磨粒对应的粒度号为 70/80 和 80/100,根据参数标准,这两种磨粒的粒径取值范围为 100.2~252.4 μm 。所有磨粒粒径的实测值均满足标准范围,而计算值中满足标准范围的磨粒也占到了 98.7%,只有 3 个磨粒(1.3%)的粒径计算值稍微超出了标准范围,这表明方案 1 的结果是合理有效的。

磨粒粒径均值、标准偏差的计算值与实测值之

间的相对误差分别为 2.0% 和 2.7%，出刃高度均值、标准偏差的计算值与实测值之间的相对误差分别为 2.4% 和 3.8%。结果表明，根据式(2)和(3)得到的磨粒出刃高度和粒径的计算值与实测值之间的相对误差较小，说明计算值是正确有效的。因此，相较于方案 2，方案 1 可以减小测量工作量。

3 刀齿表面形貌建模

3.1 建模方法

根据 1.2 节和 2.2 节的分析与测量可知，套料钻头刀齿中的磨粒可以近似简化为图 2 所示的截角八面体，并作如下设定：①截角八面体的正方形与六边形的边长相等；②截角八面体的最长体对角线作为其直径。

刀齿表面的形貌特征包括磨粒形状、粒径、出刃高度、磨粒分布面积密度等特征信息，这些特征均具有随机性。为了建立同实际刀齿表面微观形貌具有相同统计规律的三维模型，基于 Monte-Carlo 原理^[20]，按照正态分布规律生成表面形貌的三维模型。图 12 为刀齿表面形貌的建模流程图，具体分为四个步骤。

1) 设定模型的基本参数，包含：刀齿模型的尺寸参数 $X_t \times Y_t \times Z_t$ ，刀齿端面 $X_t \times Y_t$ 区域内磨粒分布的面积密度值，以及实验测得的磨粒粒径分布的均值 μ_d 、标准偏差 σ_d 和出刃高度的均值 μ_h 、标准偏差 σ_h 。

2) 基于 Monte-Carlo 方法，按照正态分布 $N(\mu_d, \sigma_d)$ 和 $N(\mu_h, \sigma_h)$ 分别随机产生磨粒粒径向量 $\mathbf{d}_g = (d_{g1}, d_{g2}, \dots, d_{gn})^T$ 和出刃高度向量 $\mathbf{h}_g = (h_{g1}, h_{g2}, \dots, h_{gn})^T$ 。

3) 确定各个磨粒的中心位置坐标，任意磨粒 i 的中心坐标可表示为 (x_i, y_i, z_i) ；磨粒 i 的中心坐标 (x_i, y_i) 在 $X_t \times Y_t$ 区域内随机产生，需满足 x_i, y_i 的取值范围分别为 $[d_{gi}/2, X_t - d_{gi}/2]$ 、 $[d_{gi}/2, Y_t - d_{gi}/2]$ ；磨粒中心坐标 z_i 的取值与出刃高度相关，磨粒中心点与出刃高度之间的几何关系如图 13 所示，由此可得：

$$z_i = Z_t + h_{gi} - d_{gi}/2 \quad (4)$$

式中： h_{gi} 、 d_{gi} 分别为磨粒 i 的出刃高度、粒径。

在确定磨粒 $i(i \geq 2)$ 的中心位置时，为了避免磨粒之间相互嵌入，需要判断磨粒 i 与已经生成的 $i-1$ 个磨粒的中心之间的距离，即：

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \geq \frac{d_{gi} + d_{gj}}{2} \quad (5)$$

式中： $L_{ij}(j = 1 \sim i-1)$ 为磨粒 i 与磨粒 j 的中心之间的距离； d_{gi} 和 d_{gj} 分别磨粒 i 与磨粒 j 的粒径。

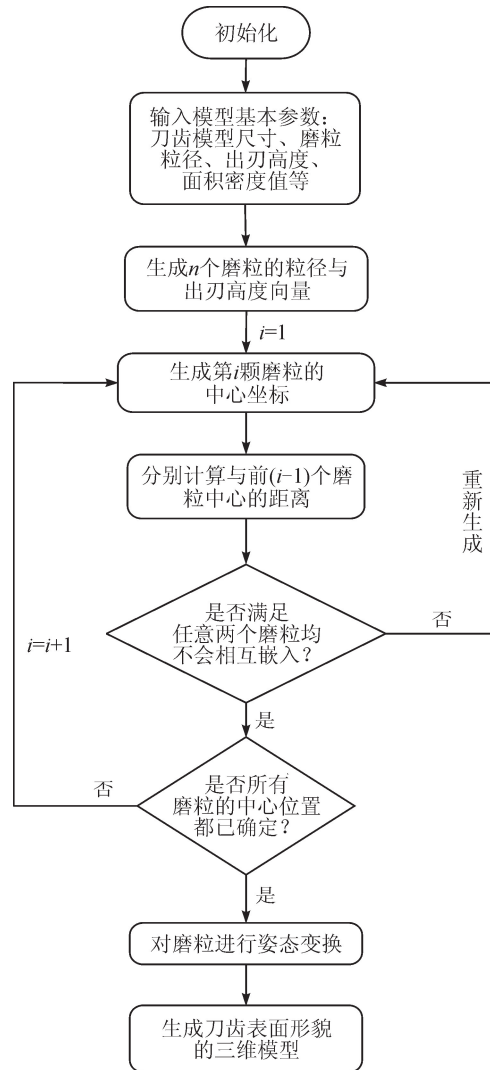


图 12 刀齿表面形貌建模流程图

Fig. 12 Flow chart for the modeling of diamond core-drill tool tooth surface

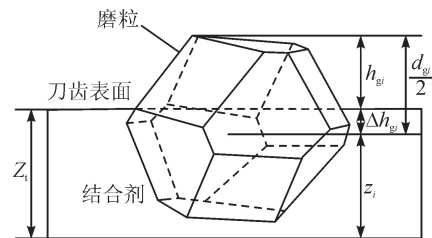


图 13 磨粒中心点与出刃高度之间的几何关系
Fig. 13 Geometric relationship between abrasive center and abrasive protrusion height

4) 对各个磨粒进行姿态变换。磨粒的空间分布包括空间位置和姿态两个特征，同一颗磨粒即使中心位置一样，磨粒姿态的不同也会影响其磨削性能，同一磨粒的不同姿态如图 14 所示。

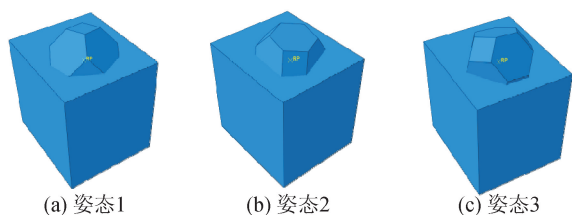


图 14 同一磨粒的不同姿态

Fig. 14 Different postures of the same abrasive particle

令任意磨粒 $i(i = 1 \sim n)$ 相对于自身中心位置做旋转变换,其绕 $X、Y、Z$ 三个坐标轴旋转的角度可表示为 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 。其中, $\alpha_i、\beta_i$ 和 γ_i 在 $[0, \pi]$ 内随机取值。

综上, n 颗磨粒的位姿参数矩阵可表示为:

$$R_n = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i & \alpha_i & \beta_i & \gamma_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & \alpha_n & \beta_n & \gamma_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 结果分析

图 1 所示的套料钻头包含 12 个刀齿,忽略每个刀齿的曲面形状,每个刀齿均可看作 $20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的长方体。因此,刀齿模型的尺寸参数为 $X_i = 20 \text{ mm}, Y_i = 4 \text{ mm}, Z_i = 0.5 \text{ mm}$ 。根据 2.2 节的实验测量可得,刀齿表面磨粒的面积密度为 $1.17 \text{ 个}/\text{mm}^2$,磨粒粒径分布的均值和标准偏差分别为 $203 \mu\text{m}$ 和 $21.8 \mu\text{m}$,出刃高度的均值和标准偏差分别为 $50.5 \mu\text{m}$ 和 $5.4 \mu\text{m}$ 。

采用 3.1 节的形貌建模方法,建立套料钻 12 个刀齿的三维形貌虚拟模型,进而得到金刚石套料钻刀头的整体三维模型,如图 15 所示。随机选取其中的 5 个刀齿,其表面形貌模型如图 16 所示。对比图 16 与图 1(b)可知,虚拟模型中的磨粒分布特点与实际刀齿基本一致,磨粒分布随机性很强,总体分布较为稀疏,部分磨粒集中分布。

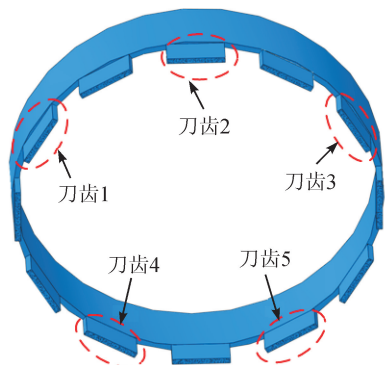


图 15 金刚石套料钻头整体三维模型

Fig. 15 Overall 3D model of the diamond core-drill

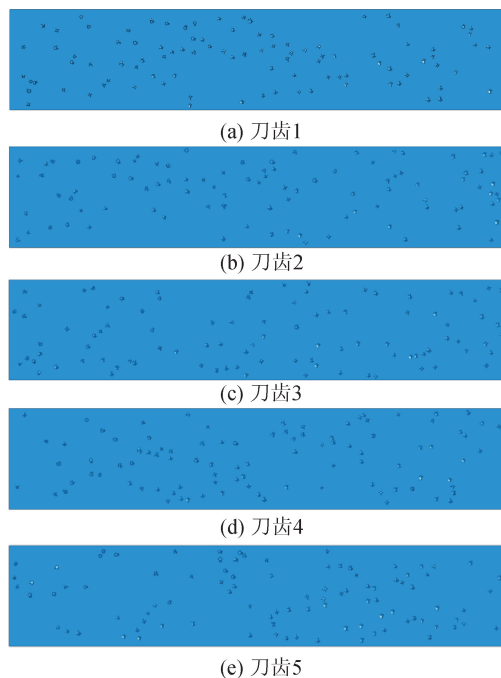


图 16 随机选取的 5 个刀齿的形貌模型

Fig. 16 Topography model of five randomly selected cutter tooth

为了便于与实物模型对比,分别于图 16 的 5 个刀齿形貌模型中各截取 10 个大小为 $2340 \mu\text{m} \times 1749 \mu\text{m}$ 的矩形区域,截取方法如图 17 所示。一共可得到 50 个矩形区域(与实验测量的 50 张形貌图像的覆盖区域面积一致),共有 255 颗磨粒。统计该 255 颗磨粒的粒径和出刃高度可知,粒径和出刃高度值基本上服从正态分布规律,如图 18 所示。磨粒粒径分布的均值和标准偏差分别为 $204 \mu\text{m}$ 和 $22.2 \mu\text{m}$,出刃高度的均值和标准偏差分别为 $52.3 \mu\text{m}$ 和 $6.2 \mu\text{m}$ 。



图 17 在刀齿表面等间隔地选取 10 个矩形区域
Fig. 17 Selection of 10 rectangular areas at equal intervals on the cutter tooth

虚拟模型与实物模型中,磨粒分布面积密度、粒径及出刃高度的数据对比如表 4 所示。在相同的测量区域内,虚拟模型与实物模型磨粒分布面积密度的相对误差为 6.7% ,磨粒粒径分布的均值、标准偏差的相对误差分别为 0.49% 和 1.8% ,出刃高度的均值、标准偏差的相对误差分别为 3.6% 和 11.1% 。结果表明,虚拟模型与实物模型的表面形貌特征数据相对误差较小,说明虚拟模型与实际刀齿的表面形貌较为一致,建模方法合理有效。本研究可为考虑多颗磨粒共同作用的金刚石套料加工过程仿真和加工机理研究奠定基础。

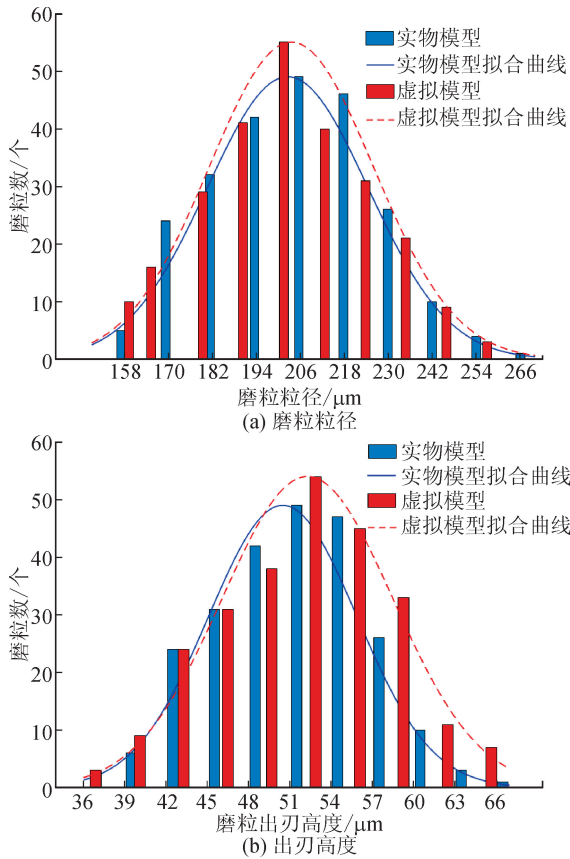


图 18 虚拟模型与实物模型的表面形貌特征对比
Fig. 18 Comparison of surface topographies between virtual model and physical model

表 4 虚拟模型与实物模型的表面形貌特征数据对比
Tab. 4 Comparison of surface topography data between virtual model and physical model

参数	实物模型	虚拟模型	相对误差/%	
磨粒数/个	239	255	6.7	
面积密度/ (个·mm ⁻²)	1.17	1.25	6.7	
粒径/ μm	均值	203	204	0.49
	标准偏差	21.8	22.2	1.8
	均值	50.5	52.3	3.6
出刃高度/ μm	标准偏差	5.4	6.0	11.1

4 结论

本文提出了一种金刚石套料钻的刀齿表面形貌测量与建模方法,通过对实际刀具的表面形貌进行测量,获得了刀齿表面磨粒的形状、面积密度、粒径和出刃高度的分布规律,并基于测量结果将磨粒形状简化为截角八面体,提出了刀齿表面形貌的建模

方法。

1) 金刚石套料钻刀齿表面磨粒分布具有总体分布稀疏、部分区域分布密集的特点,磨粒粒径和出刃高度值近似服从正态分布规律。

2) 磨粒出刃高度的计算值与实测值对比表明,只需通过实验测量得到结合面轮廓面积,即可通过理论公式计算得出磨粒出刃高度的大小,该方法可以减少测量工作量。

3) 虚拟模型与实际刀齿的表面形貌特征一致性较好,基于截角八面体的刀齿表面形貌建模方法合理有效,可为考虑多颗磨粒共同作用的金刚石套料加工过程仿真和加工机理研究奠定基础。

参考文献:

[1] 刘伟, 刘一波, 曹彩婷, 等. 光电材料加工用套料钻头和研磨减薄砂轮关键制造技术[J]. 超硬材料工程, 2019, 31(2): 39-44.
LIU Wei, LIU Yibo, CAO Caiting, et al. Key manufacturing technology of diamond core bits and thinning grinding wheels used in processing photoelectric materials[J]. Superhard Material Engineering, 2019, 31(2): 39-44.

[2] 徐良, 刘一波, 徐强. 晶硅和蓝宝石加工用金刚石工具[J]. 超硬材料工程, 2018, 30(6): 47-51.
XU Liang, LIU Yibo, XU Qiang. Diamond tools for processing crystal silicon and sapphire[J]. Superhard Material Engineering, 2018, 30(6): 47-51.

[3] 王化德. 硬脆材料钻孔加工技术的研究[J]. 光学技术, 1991(1): 16-22.
WANG Huade. Technique for drilling hard and brittle material[J]. Optical Technique, 1991(1): 16-22.

[4] 徐良, 刘一波, 徐强. 蓝宝石套料用金刚石钻头关键制备技术研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(4): 27-30, 37.
XU Liang, LIU Yibo, XU Qiang. Study on key preparation technology of diamond core drill bit for sapphire[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017, 37(4): 27-30, 37.

[5] ZHANG Yanbin, LI Changhe, JI Heju, et al. Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 122: 67-83.

[6] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 172-182.
YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yiming. Grinding mechanism based on single grain cutting simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 172-182.

- [7] WU Mingtao, GUO Bing, ZHAO Qingliang, et al. Precision grinding of a microstructured surface on hard and brittle materials by a microstructured coarse-grained diamond grinding wheel [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(7): 8026-8034.
- [8] 刘伟, 刘仁通, 邓朝晖, 等. 单颗磨粒磨削仿真研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(4): 1-8.
LIU Wei, LIU Rentong, DENG Zhaohui, et al. Research progress on single abrasive grain grinding simulation [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2018, 48(4): 1-8.
- [9] 傅玉灿, 田霖, 徐九华, 等. 磨削过程建模与仿真研究现状[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 197-205.
FU Yucan, TIAN Lin, XU Jiuhua, et al. Development and application on the grinding process modeling and simulation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7): 197-205.
- [10] 邓辉, 朱鹏程, 王林青, 等. 砂轮表面测量方法研究进展[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(4): 599-607.
DENG Hui, ZHU Pengcheng, WANG Linqing, et al. Research progress in measurement methods of grinding wheel surface [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(4): 599-607.
- [11] GONG Y D, WANG B, WANG W S. The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1-3): 123-126.
- [12] DOMAND A, WARKENTIN A, BAUER R. Finite element modeling approaches in grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(2): 109-116.
- [13] 商维, 张沐玥, 郭俊, 等. 基于虚拟砂轮建模的钢轨打磨材料去除仿真研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(4): 30-36.
SHANG Wei, ZHANG Shuyue, GUO Jun, et al. Simulation study on material removal of rail grinding based on virtual grinding wheel modeling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(4): 30-36.
- [14] 宿崇, 施志辉, 刘元伟. 陶瓷 CBN 砂轮地貌建模与磨削仿真 [J]. *中国机械工程*, 2012, 23(14): 1742-1745.
SU Chong, SHI Zhihui, LIU Yuanwei. Topography modeling and grinding simulation of vitrified bonded CBN wheel [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(14): 1742-1745.
- [15] 刘月明. 磨削过程建模与点磨削工艺的若干研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
LIU Yueming. Research on the model of grinding process and the technology of point grinding [D]. Shen Yang: Northeastern University, 2012.
- [16] 邓朝晖, 赵小雨, 刘伟, 等. 基于球切多面体和光密度的砂轮建模与测量[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(21): 190-197.
DENG Zhaohui, ZHAO Xiaoyu, LIU Wei, et al. Research of grinding wheel modeling and measuring based on the spherical coordinate and optical density [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 190-197.
- [17] 刘伟, 邓朝晖, 万林林, 等. 单颗金刚石磨粒切削氮化硅陶瓷仿真与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(21): 191-198.
LIU Wei, DENG Zhaohui, WAN Linlin, et al. Simulation and experiment study for silicon nitride cutting with single diamond grain [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(21): 191-198.
- [18] 栗正新, 余威, 王丽晶. 金刚石磨具磨粒出刃高度的测试与调控研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2019, 39(4): 48-55.
LI Zhengxin, YU Wei, WANG Lijing. Progress of research on testing and regulating of grain protrusion height of diamond abrasives [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2019, 39(4): 48-55.
- [19] 谢晋, 万启伟, 韦凤. 金刚石砂轮微观出刃形貌的参数化评价[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(4): 46-51.
XIE Jin, WAN Qiwei, WEI Feng. Parameterized evaluation of microscopic protrusion topography of diamond grinding wheel [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(4): 46-51.
- [20] 智耕, 李学崑, 融亦鸣. 基于数字化模型的砂轮表面地貌特性研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2014, 34(1): 18-22, 27.
ZHI Geng, LI Xuekun, RONG Yiming. Analysis of the grinding wheel topographical properties based on the digital wheel model [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2014, 34(1): 18-22, 27.

(责任编辑 周 蓓)