

镍基单晶高温合金微磨削形貌仿真及实验研究

巩亚东, 苏志朋, 孙 瑶, 金丽雅

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于单个磨粒微磨削几何运动学规律和最小值函数, 推导出全局磨粒的微磨削运动轨迹表达式, 建立工件微磨削加工表面的包络线函数集合, 得出磨削加工微观形貌仿真预测模型, 并通过开展 DD5 镍基单晶高温合金微磨削加工工艺实验验证模型结果的正确性. 实验结果表明: 仿真预测微观形貌与实际微观形貌具有相似特征, 仿真预测线轮廓高度与实际加工微磨削线轮廓高度误差为 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$; 不同磨削参数下的表面粗糙度对比结果也表明预测模型与实验所得的表面粗糙度变化趋势一致.

关 键 词: 微磨削; 形貌仿真; 微磨削轨迹; 表面粗糙度; 镍基单晶高温合金

中图分类号: TG 584

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2020)07-0949-06

Morphology Simulation and Experimental Study on Micro-grinding of Nickel-Based Single Crystal Superalloy

GONG Ya-dong, SU Zhi-peng, SUN Yao, JIN Li-ya

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Based on the regularity of geometric kinematics for a single abrasive micro-grinding and the minimum function, the global abrasive micro-grinding trajectory expression was deduced. The envelope function set of a micro-grinding workpiece surface was established, the simulation prediction model of grinding processing microstructures was obtained, and the correctness of the model was verified by conducting the micro-grinding processing experiment of DD5 nickel-based single crystal superalloy. The experimental results showed that the simulated predicted micro-morphology has similar characteristics to those of the actual micro-morphology. The error between the simulated predicted line contour height and the actual machined micro-grinding line contour height is $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$. The comparison results of surface roughness under different grinding parameters also showed that the prediction model is consistent with the experimental results.

Key words: micro-grinding; morphology simulation; micro-grinding trajectory; surface roughness; nickel-based single crystal superalloy

随着微电子、微机械、微流器件在诸多领域的广泛应用, 微切削加工技术, 如微铣削、微车削、微磨削等顺势而生^[1]. 由于微车削和微铣削存在棱角和毛刺等加工质量问题, 难以满足加工要求, 而微磨削具有效率高、质量好且适应性强等优点被广泛应用于高质量和高精度要求的微小零件及微结构加工中, 主要成果有: Perveen 等^[2]研究 4 种不同形状的 PCD 微磨具, 在 BK7 玻璃进行的微细磨削试验结果表明 D 形微磨具的磨削力最小,

正四棱柱形微磨具获得的表面粗糙度最小, D 形和圆柱形微磨具的磨损较少. 程军等^[3]深入分析了硬脆材料微磨削中的材料去除机理, 并根据硬脆材料微磨削中材料去除过程与传统磨削方式的不同建立微磨削表面形成模型. 周云光等^[4]分析了进给速度、磨削深度、主轴转速及微磨棒悬伸量对 K445 磨削表面质量的影响规律, 并对其原因进行了深入分析, 为镍基高温合金微小零件的加工提供重要的理论依据.

综上,众多学者已对微磨削加工工艺进行大量研究,揭示了其材料去除机理与加工工艺规律,但在微观形貌可视化上仍鲜有研究. 本文根据微磨削干涉加工成型机理,建立微磨削加工形貌仿真预测模型,通过与实验结果进行对比分析,验证预测模型的正确性.

1 模型的建立

本文基于考虑磨粒形状、尺寸和排布方式的实际微磨具形貌,通过工件与工具之间的坐标参数关系,建立微磨具任意磨粒的轨迹干涉函数,生成微磨削加工表面预测模型,其建立过程可以分为三部分:1) 基于微磨具实际形貌,简化磨粒形状,生成微磨具仿真形貌;2) 建立微磨削表面单磨粒划擦轨迹函数;3) 计算合成全部磨削轨迹,建立微磨削加工微观形貌预测模型.

基于对磨粒形状、尺寸的观测结果如图 1a 所示,将磨粒简化为八面体模型,如图 1b 所示.

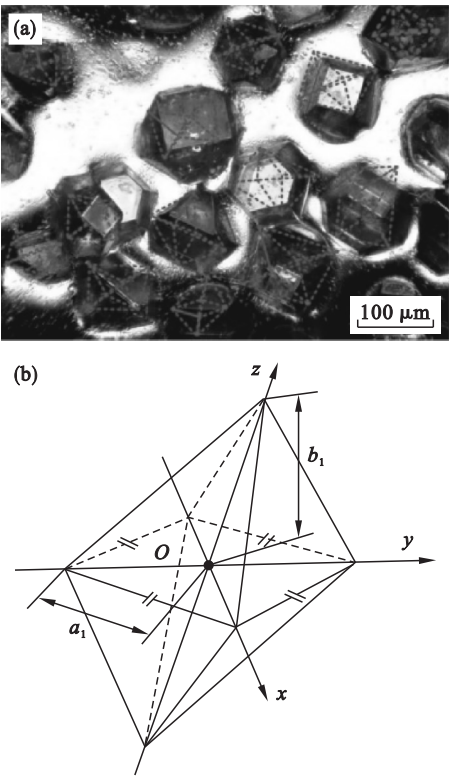


图 1 磨粒实际尺寸排布及磨粒简化模型
Fig. 1 Actual size arrangement of abrasive particles and simplified model of abrasive grains
(a)—实际磨粒尺寸排布; (b)—简化磨粒函数模型.

根据式(1),假设八面体对角线长半轴长度 b_1 和八面体对角线短半轴长度 a_1 服从二维高斯分布以改变磨粒轮廓,使其更加符合实际情况;建

立放缩矩阵改变磨粒尺寸大小,使磨粒出刃高度不同;基于旋转矩阵改变磨粒转角使磨粒的出刃角度不同;假设磨粒排布服从均匀分布,建立磨粒排布模型. 因为实际磨粒分布不会出现位置重合,因此,排布模型中出现间距小于设定值 K (不发生重合允许的最小值) 则重新计算,直至出现满足条件的排布模型为止. 磨粒局部排布见图 2a,磨粒尺寸分布比例曲线(图 2b)拟合良好.

$$P(b_1, a_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_{b_1}\sigma_{a_1}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(1-\mu_{b_1})^2}{\sigma_{b_1}^2} + \frac{(1-\mu_{a_1})^2}{\sigma_{a_1}^2}\right]\right\}. \quad (1)$$

式中: $P(b_1, a_1)$ 为二维高斯分布的概率密度函数; σ_{b_1} 为八面体对角线长半轴方差; σ_{a_1} 为八面体对角线短半轴方差; μ_{b_1} 为长半轴的均值; μ_{a_1} 为短半轴的均值.

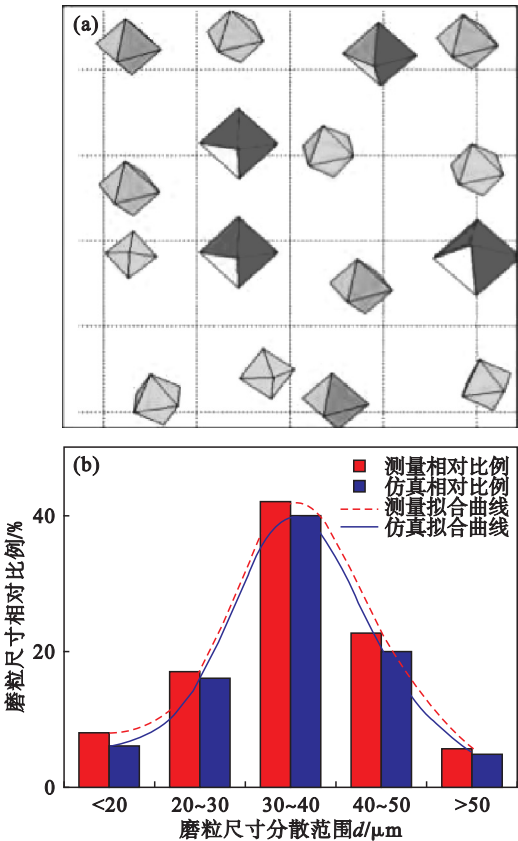


图 2 简化磨粒排布模型及磨粒尺寸分布比例
Fig. 2 Simplified grain layout model and proportion of grain size distribution

(a)—简化微磨具磨粒排布;
(b)—实际和仿真磨粒尺寸分布比例.

本文实验加工中选用的是工业应用最广泛的直径 800 μm 、粒度 250#CBN 微磨具,如图 3a 所示,观测结果表明,其裸露高度约占磨粒尺寸的 1/3. 定义电镀层高度后^[5-7],生成微磨具形貌如图 3b 所示. 仿真和实际的微磨具形貌对比结果表

明, 仿真微磨具形貌能很好地反映实际微磨具形貌特征.

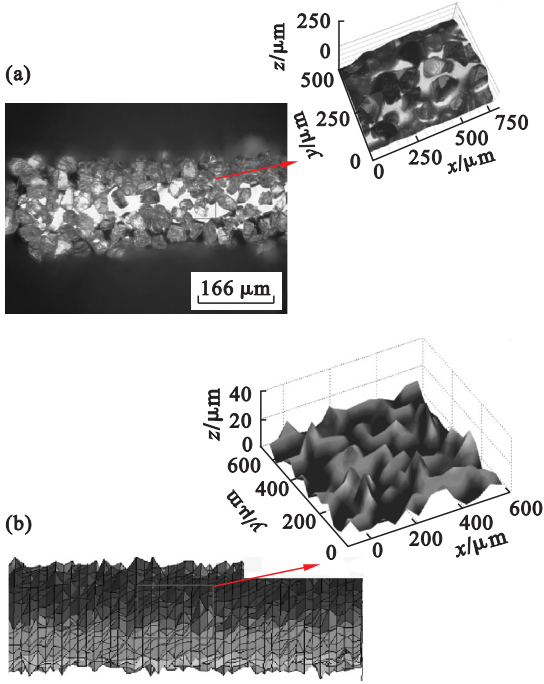


图 3 微磨具形貌对比

Fig. 3 Geomorphology comparison of the micro-abrasive tool

- (a) — 实验用 800 μm M 250# 微磨具;
(b) — 仿真用 800 μm M 250# 微磨具.

磨粒的微磨削运动轨迹如图 4 所示, 可以看出微磨削轨迹为一摆线. 当以水平运动方向为 y 轴, 以竖直运动方向为 z 轴, 建立坐标系, 其几何运动关系可以表示为^[8-9]

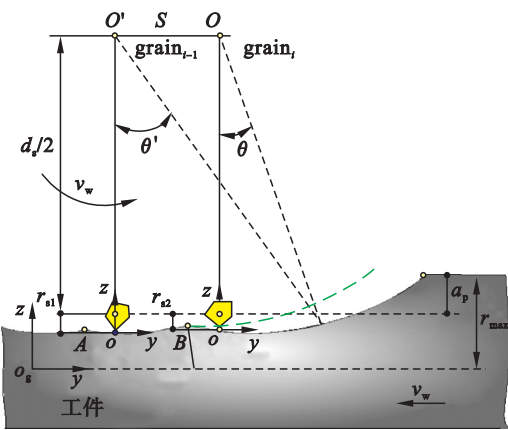


图 4 磨粒运动轨迹

Fig. 4 Trajectory of abrasive particles

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{d_s}{2} \frac{v_w}{v_s} \theta + \frac{d_s}{2} \sin \theta, \\ z &= \frac{d_s}{2} (1 - \cos \theta). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: y, z 为磨粒位置坐标; d_s 为微磨具直径, μm ; v_w 为工件进给速度, $\mu\text{m/s}$; v_s 为主轴转速,

r/min ; θ 为磨粒的相对转角, rad .

在微磨削过程中 $\theta \ll \theta'$, 此时式 (2) 可化简为一抛物线方程式 (3)^[5]:

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{y^2}{d_s g (1 + v_w/v_s)^2}, \\ \theta &\approx \sin \theta, \theta^2 \approx 1 - \cos \theta, v_s t = d_s \theta / 2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

此外, 在微磨具基体上, 磨粒常以不等间隔排布. 两相邻磨粒运动轨迹坐标系的平移距离 S 可以由式 (4) 表示. 则以第一颗磨粒的坐标系为全局坐标系, 后一颗磨粒的运动轨迹可以表示为式 (5). 依此类推, 以第一颗磨粒的运动轨迹最低点为全局坐标系, 第 n 颗磨粒的运动轨迹方程可以表示为式 (6).

$$S = \frac{L \cdot v_w}{v_s}, \quad (4)$$

$$z^{(2)} = \frac{\left(y^{(2)} - L \frac{v_w}{v_s} \right)^2}{d_s \cdot (1 + v_w/v_s)^2} + (r_{s1} - r_{s2}), \quad (5)$$

$$z^{(n)} = \left[\frac{y^{(n)} - L(n-1) \frac{v_w}{v_s}}{d_s^{1/2} \cdot (1 + v_w/v_s)} \right]^2 + (r_{s1} - r_{sn}). \quad (6)$$

在计算出全部磨粒运动轨迹位置后, 以微磨具最高出刃点的最大切深处为全局坐标系原点 O_g , 则多磨粒在全局坐标系下的工件创成表面包络线集合可以由式 (7) 中的集合 P 表示, 工件微磨削表面由最小值函数式 (8) 求得. 微磨削表面形貌仿真具体流程如图 5 所示, 首先输入微磨具

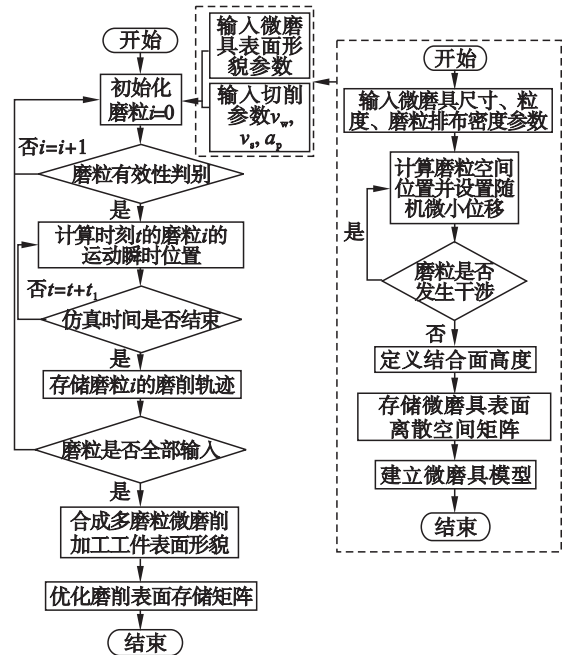


图 5 微磨削表面形貌仿真流程图

Fig. 5 Simulation flow chart of the micro-grinding surface topography

形貌参数,根据实际测得的微磨具形貌参数,确定磨粒的出刃高度、尺寸大小和周向间隔 L ,生成微磨具形貌模型. 设定工艺参数 a_p, v_s 和 v_w ,同微磨具形貌模型一起作为输入参数. 计算合成有效的磨粒磨削轨迹,生成工件形貌并输出.

$$P = \begin{cases} z^{(i)} = \frac{\left[y^{(i)} - L(n-1)\frac{v_w}{v_s}\right]^2}{d_s \cdot (1 + v_w/v_s)^2} + (r_{sl} - r_{sn}), \\ i = 1, 2, \dots, n; \\ x^{(i)} = x_c^{(i)} + x_{rand}^{(i)}. \end{cases} \tag{7}$$

$$Q = \min(z^{(1)}, z^{(2)}, \dots, z^{(n)}). \tag{8}$$

2 实验验证

为验证仿真预测模型的正确性,选择工业生产应用广泛的直径 $d_s = 800\ \mu\text{m}$,磨粒粒度 M250# 的微型磨具,开展 DD5 镍基单晶高温合金微磨削加工工艺实验. 实验设备为 JX-1A 精密磨床,定位精度为 $0.006\ \text{mm}$,对刀精度为 $0.002\ \text{mm}$,最大工作负重为 $30\ \text{kg}$. 采用 VHX-1000E 超景深数

码显微系统. 观测被加工磨削表面的形貌,采用 OLYMPUS OLS4100 激光共聚焦显微镜测量工件加工表面粗糙度.

2.1 形貌对比分析

不同磨削加工参数下 DD5 表面微观形貌观测结果和模型预测结果如图 6~图 8 所示,结果表明微磨削加工表面存在明显的磨粒划痕,这是由于磨粒和工件的干涉结果造成的,与模型预测结果相符合;此外实验测量结果表明工件表面也存在切屑黏结以及由于犁耕作用造成的表面隆起^[10-11],而在模型预测结果中由于并没有考虑材料属性对工件形貌的影响^[12],故其没有反映出材料变形回弹作用,工件表面起伏相对平缓,使得模型预测得到的形貌要比实验所得的磨削表面更为光整. 微磨削表面线轮廓高度变化能有效反映磨削表面质量. 对比分析不同加工参数下 $70\ \mu\text{m}$ 取样长度内实际线轮廓变化高度 $h1$ 和模型预测线轮廓变化高度 $h2$ 的偏差量 Δh ,结果表明:在图 6~图 8 所示的三种典型加工参数下线轮廓高度偏差量 Δh 在 $0.2 \sim 0.3\ \mu\text{m}$ 之间,模型能够很好地反映线轮廓高度变化情况.

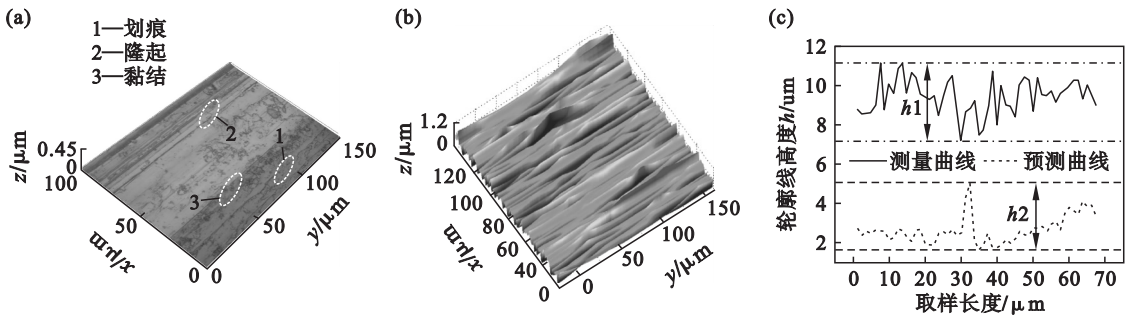


图 6 当进给速度 $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$,主轴转速 $n = 3.5 \times 10^4\ \text{r/min}$,切深 $a_p = 8\ \mu\text{m}$ 时,DD5 表面微观形貌对比结果
Fig. 6 DD5 surface morphology comparison results at the feed speed $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$,spindle speed $n = 3.5 \times 10^4\ \text{r/min}$,cutting depth $a_p = 8\ \mu\text{m}$

(a) —测量表面; (b) —预测表面; (c) —线轮廓对比.

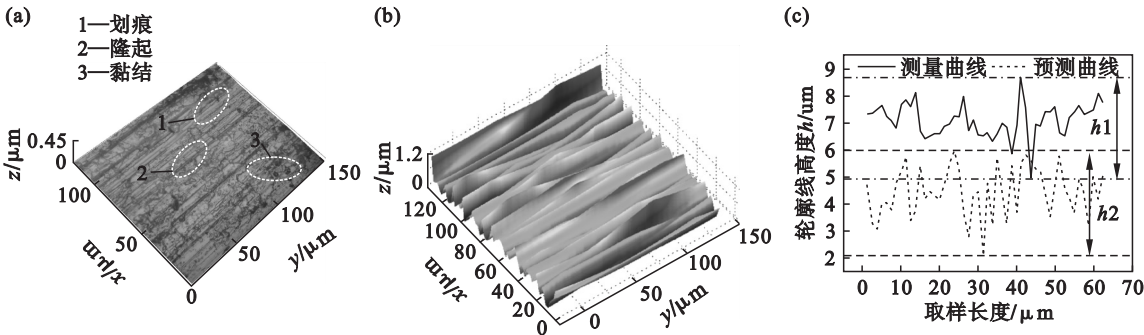


图 7 当进给速度 $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$,主轴转速 $n = 1.5 \times 10^4\ \text{r/min}$,切深 $a_p = 18\ \mu\text{m}$ 时,DD5 表面微观形貌对比结果
Fig. 7 DD5 surface morphology comparison results at the feed speed $v_w = 20\ \mu\text{m/s}$,spindle speed $n = 1.5 \times 10^4\ \text{r/min}$,cutting depth $a_p = 18\ \mu\text{m}$

(a) —测量表面; (b) —预测表面; (c) —线轮廓对比.

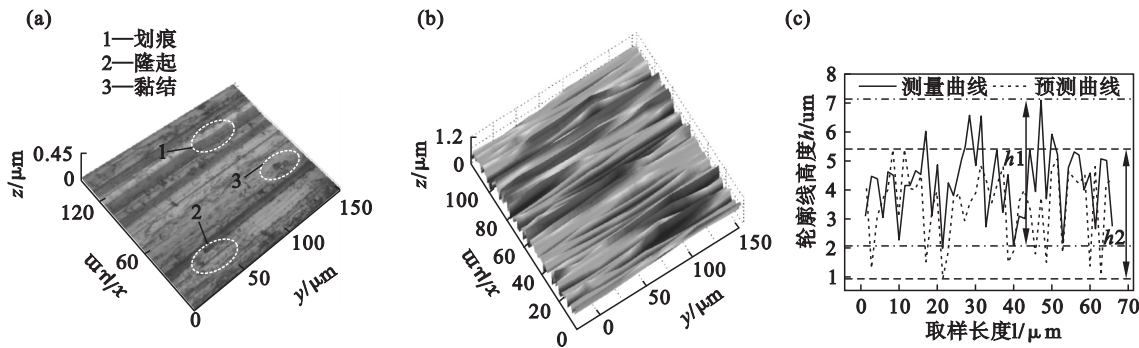


图 8 当进给速度 $v_w=100\text{ }\mu\text{m/s}$, 主轴转速 $n=3.5\times10^4\text{ r/min}$, 切深 $a_p=18\text{ }\mu\text{m}$ 时, DD5 表面微观形貌对比结果
Fig. 8 DD5 surface morphology comparison results at the feed speed $v_w=100\text{ }\mu\text{m/s}$, spindle speed $n=3.5\times10^4\text{ r/min}$, cutting depth $a_p=18\text{ }\mu\text{m}$
(a) —测量表面; (b) —预测表面; (c) —线轮廓对比.

2.2 表面粗糙度对比分析

从图 9 中可以看出表面粗糙度^[13-14]的预测结果和实验结果具有相同的变化趋势. 当切深分别为 10 和 15 μm 时, 模型预测 R_a 分别为 0.264 和 0.390 μm , 实验测量 R_a 分别为 0.334 和 0.537 μm , 如图 9a 所示. 在图 9b 中, 主轴转速分别为 15 000 和 45 000 r/min 时, 模型预测 R_a 分别为 0.571 和 0.420 μm , 实验测量 R_a 分别为 0.994 和 0.759 μm . 图 9c 中, 进给速度分别为 20 和

80 $\mu\text{m/s}$ 时, 模型预测 R_a 分别为 0.288 和 0.492 μm , 实验测量 R_a 分别为 0.388 和 0.780 μm . 三组加工参数下 R_a 的平均预测误差约 0.260 μm . 对比分析结果表明, 仿真预测与实验所测得的表面粗糙度变化趋势一致, 但仍存在一定误差. 这主要是由于预测模型没有考虑材料属性以及加工过程中的微磨具磨损、切屑黏结和刀具振动^[15]等因素的影响, 使仿真预测得到的结果均小于实验结果.

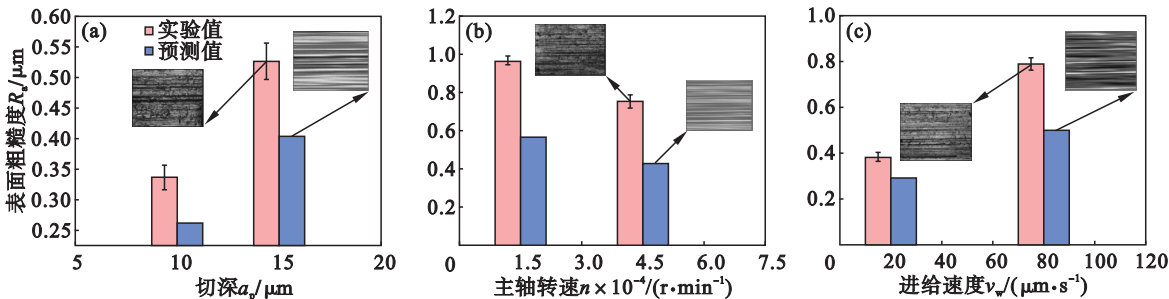


图 9 表面粗糙度对比
Fig. 9 Comparison of surface roughness

(a) — $v_w=40\text{ }\mu\text{m/s}$, $n=3.5\times10^4\text{ r/min}$; (b) — $v_w=40\text{ }\mu\text{m/s}$, $a_p=10\text{ }\mu\text{m}$; (c) — $n=3.5\times10^4\text{ r/min}$, $a_p=10\text{ }\mu\text{m}$.

3 结 论

1) 本文基于形状简化磨粒尺寸分布比例曲线拟合的微磨具形貌模型及单个磨粒微磨削运动轨迹和最小值函数, 推导出全局磨粒的磨削轨迹表达式, 得到工件磨削加工表面的包络面函数集合, 构建了微磨削加工微观形貌仿真预测模型. 模型预测数据与微磨削实验检测结果基本一致, 验证了仿真预测模型的有效性和准确性.

2) 不同磨削参数下, 模型预测与微磨削实验检测的表面轮廓线的波动变化量误差在 0.2 ~

0.3 μm 之间, 模型能够较准确地反映线轮廓高度变化情况; 模型仿真预测表面粗糙度 R_a 值均小于微磨削实验检测的表面粗糙度 R_a 值, 预测误差平均约为 0.26 μm .

参考文献:

[1] Sun Y, Gong Y D, Wen X L, et al. Micromilling characteristics of LS-WEDM fabricated helical and corrugated micro end mill [J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2020, 167: 185 – 207.
[2] Perveen A, San W Y, Rahman M. Fabrication of different geometry cutting tools and their effect on the vertical micro-grinding of BK7 glass [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61 (1/2/3/4): 101 – 115.

- [3] 程军, 巩亚东, 阎旭强, 等. 硬脆材料微磨削延性域复合临界条件建模及试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 191 – 198.
(Cheng Jun, Gong Ya-dong, Yan Xu-qiang, et al. Modeling and experimental study of complex critical condition for ductile-regime micro-grinding of hard brittle material [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 191 – 198.)
- [4] 周云光, 巩亚东, 温雪龙, 等. 高温合金 K445 微磨削表面质量实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 218 – 222.
(Zhou Yun-guang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Experimental study on surface quality in micro-grinding of superalloy K445 [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(2): 218 – 222.)
- [5] 刘月明, 巩亚东, 曹振轩. 基于数值建模的砂轮形貌仿真与测量[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 184 – 190.
(Liu Yue-ming, Gong Ya-dong, Cao Zhen-xuan. Simulation and measurement of grinding wheel morphology based on numerical modeling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 184 – 190.)
- [6] 蔡明, 巩亚东, 冯耀利, 等. 镍基高温合金磨削表面工艺性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 234 – 238.
(Cai Ming, Gong Ya-dong, Feng Yao-li, et al. Experimental study on grinding surface performance of nickel base superalloy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(2): 234 – 238.)
- [7] Li H N, Yu T B, Zhu L D, et al. Modeling and simulation of grinding wheel by discrete element method and experimental validation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9/10/11/12): 1921 – 1938.
- [8] 程凯, 霍德鸿, 丁辉. 先进制造技术丛书: 切削技术基础与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 33 – 60.
(Cheng Kai, Huo De-hong, Ding Hui. Advanced manufacturing technology series: cutting technology foundation and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 33 – 60.)
- [9] 斯蒂芬·马尔金. 磨削技术理论与应用[M]. 蔡光起, 巩亚东, 宋贵亮, 译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002: 33 – 60.
(Malkin S. Theory and application of grinding technology [M]. Translated by Cai Guang-qi, Gong Ya-dong, Song Gui-liang. Shenyang: Northeastern University Press, 2002: 33 – 60.)
- [10] Jin D, Liu Z Q, Yi W, et al. Influence of cutting speed on surface integrity for powder metallurgy nickel-based superalloy FGH95 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56(6): 553 – 559.
- [11] Zhou W H, Chen H F. A comprehensive investigation of plowing and grain-workpiece micro interactions on 3D ground surface topography [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 114: 639 – 653.
- [12] Gabler J C, Schafer L, Menze B, et al. Micro abrasive pencils with CVD diamond coating [J]. *Diamond and Related Materials*, 2003 12(3): 707 – 710.
- [13] Denkena B, Gottwik L, Grove T, et al. Material removal mechanisms in grinding of mixed oxide ceramics [J]. *Procedia Cirp*, 2017, 65: 70 – 77.
- [14] Agarwal S. On the mechanism and mechanics of material removal in ultrasonic machining [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 96: 1 – 14.
- [15] Liu C, Ding W, Yu T, et al. Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites [J]. *Precision Engineering*, 2015, 51: 70 – 89.