

垂直磨削中磨削参数对磨削痕迹分布的影响

陈冰¹ 李顺顺¹ 罗良¹ 邓朝晖¹ 姚洪辉²

(1 湖南科技大学机电工程学院, 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

(2 中山联合光电科技股份有限公司, 中山 528437)

文 摘 针对垂直磨削中磨削痕迹分布规律不明晰而使得磨削表面质量难以准确控制的问题, 开展垂直磨削中磨削参数对磨削痕迹分布规律影响的研究。依据单颗磨粒磨削痕迹分布方程、仿真分析和探讨了砂轮转速、工件转速、进给速度、转速比和相移对磨削痕迹分布的影响, 基于磨削参数对磨削痕迹分布和残留高度的影响, 优选出了磨削痕迹分布相对合理的磨削参数组合, 并进行磨削加工对比实验。结果表明, 垂直磨削法中, 磨削参数通过改变磨削痕迹的长度、间距、数量、位置关系和分布情况等影响磨削后工件的表面质量。其中, 相移的大小会影响磨削痕迹的首尾相接与相互错开情况, 直接决定着磨削纹理的形成与否, 进而成为影响磨削后工件表面质量的关键因素; 此外, 尽管磨削参数中工件转速相差很小, 但磨削痕迹分布状况会出现显著的差异, 进而导致工件表面纹理和破碎情况显著不同及表面粗糙度 Ra 存在 59~125 nm 的差距。因此, 基于磨削参数对磨削痕迹分布的影响, 合理的匹配磨削加工参数可大幅提高工件表面质量。

关键词 垂直磨削法, 磨削参数, 相移, 磨削痕迹分布

中图分类号: TH162

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.005

Influence of Grinding Parameters on Grinding Traces Distribution in Cross Grinding

CHEN Bing¹ LI Shunshun¹ LUO Liang¹ DENG Zhaohui¹ YAO Honghui²

(1 Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 Union Optech (Zhongshan) Technology Co., Ltd., Zhongshan 528437)

Abstract Unclear distribution of grinding traces in cross grinding leads to difficult control of grinding surface quality. To identify grinding traces distribution pattern in response to process parameters, the influence of main grinding parameters on surface quality was investigated. According to the grinding traces distribution formula of single abrasive diamond, the influence of the wheel speed, workpiece speed, feed rate, speed ratio and phase shift on the grinding traces distribution was analyzed and discussed. Based on the influence of grinding parameters on grinding traces distribution and scallop height, optimal grinding parameters combination was selected, and comparative grinding experiments were carried out. The results show that changes of grinding parameters would affect traces length, spacing, quantity, position and distribution in cross grinding therefore influence the ground surface quality of the workpiece. In particular, the extend of phase shift affects position relationship of grinding traces from end-to-end to staggered and directly determines how the grinding marks are formed. It is one of the key factors affecting the ground surface quality. In addition, small difference of workpiece speed in grinding experiment generates significant variation in grinding traces distribution with distinguished surface texture and cracks on workpiece and discrepancy in surface roughness Ra values between 59 to 125 nm. Therefore, based on the influence of grinding parameters on the grinding traces distribution, the surface quality of workpiece could be greatly improved with

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52175401); 湖南省研究生科研创新项目(QL20210239)

第一作者简介: 陈冰, 1986 出生, 博士, 副教授, 主要从事难加工材料的精密加工及其加工过程的在线监测技术研究。E-mail: chenbing@hnust.edu.cn

reasonable matching of grinding process parameters.

Key words Cross grinding, Grinding parameters, Phase shift, Grinding traces distribution

0 引言

超精密磨削加工技术是实现众多高强韧金属材料 and 硬脆非金属材料精密加工的重要手段之一,且适用于多种金属材料、陶瓷材料和玻璃材料等不同物理性能材料的加工,加工后的工件表面能够达到纳米级的表面粗糙度微米以及亚微米级的面形精度,已广泛应用于航天航空、天文、生物医学、光学等领域关键零部件的制造^[1-4]。

垂直磨削法是大尺寸非球面光学元件磨削加工中的一种常用加工方法,然而,当磨削参数选择不合理时,会造成加工后的工件表面残留具有规则图案或明显方向性的磨削纹理图案,降低工件的表面强度和表面质量,甚至诱发光学元件表面产生强烈的光学衍射与散射效应,降低其光学性能^[5-11]。

近年来,国内外学者发现了磨削痕迹分布对磨削后的表面质量具有较大影响,并开展了大量关于磨削痕迹分布规律的研究。田业冰等^[12]在硅片自旋转磨削加工中引入了磨削痕迹长度、磨削痕迹间距、磨削痕迹密度和磨削稳定周期等来描述磨削痕迹的特征。B. CHEN 等^[6]研究了垂直磨削法中不同磨削参数组合下磨削点的分布规律,研究发现,在磨削参数微量变化下,磨削点分布却发生了显著变化,且磨削后工件表面的破碎情况和表面粗糙度差异较大,然而,垂直磨削法中磨削参数对磨削痕迹分布的影响规律尚不明晰。王玉珏等^[13]仿真分析了磨削纹理对密封面润滑和密封性能的影响规律,结果表明,通过增加砂轮块个数或者砂轮转速与工件转速的比值,能够增大磨削纹理的密度,在一定程度上可以改善磨削后的工件表面质量。陈海滨等^[14]研究了硅片双面磨削中参数对磨削痕迹分布的影响规律,结果表明,磨削纹理的形状和分布情况与砂轮和工件的速比密切相关,但与各自的值无关;此外,磨削纹理也会受到工件旋转方向的影响,当砂轮和硅片旋转方向相同时,工件表面会出现紫荆花磨削图案,导致磨削痕迹分布不均匀。Z. J. PEI 等^[15-16]在硅片的自旋转磨削加工的研究表明,砂轮转速和工件转速会影响相邻磨削痕迹之间的距离,且随着砂轮转速的增加,磨削痕迹之间的距离减小;随着工件转速的增加,磨削痕迹之间的距离增大。F. W. HUO 等^[17]通过仿真与磨削实验研究了硅片自旋转磨削中磨削参数对磨削痕迹形状和分布的影响规律,结果表明,通过选择适当的砂轮转速与工件转速的比值能够在一定程度上减少磨削痕迹的聚集现象,从而使得磨削痕迹分布更为均匀。L. ZHOU 等^[18]分析了直径为 300 mm 硅晶片自旋转磨削中磨削痕迹的形状和分布,结果表明,当工件转速与砂轮转速比为 0.5 时,磨削痕

迹呈直线分布,在其他情况下,磨削痕迹都呈现出曲线分布,而这种现象在相同转速比且砂轮与工件转速不同时均存在,这意味着磨削痕迹的图案由砂轮转速与工件转速之间的比值决定。Y. C. PAN 等^[19]研究了平行磨削法中磨削参数对磨削痕迹形状和分布的影响,结果表明,砂轮转速与工件转速之比为整数和非整数下的磨削痕迹图案存在明显差异,且当转速比为整数时,工件表面磨削痕迹的图案为直扇形,磨削纹理数量与转速比相等。S. S. CHEN 等^[20-22]通过仿真磨削实验研究了平行磨削法加工过程中相移对磨削痕迹分布的影响规律,结果表明,相移是影响工件表面磨削痕迹分布的关键因素,当相移从 0 增加到 0.4 时,磨削痕迹的密度增加;而当相移等于 0.5 时,磨削痕迹的密度将显著降低。

综上,关于磨削痕迹分布的研究,针对硅片对磨过程中磨削参数对磨削痕迹分布影响的研究较多,并形成了一定的理论体系;而针对非球面加工的平行磨削法和垂直磨削法,关于磨削痕迹分布的研究才刚刚起步,特别是垂直磨削法中磨削痕迹分布的研究还不够深入。同时,不同的磨削方式下,磨削参数对磨削痕迹分布的影响规律存在较大的差异。因此,本文开展了垂直磨削加工中磨削参数对磨削痕迹分布规律影响的研究,仿真分析和探讨了砂轮转速、工件转速、进给速度、转速比和相移对磨削痕迹分布的影响,基于磨削参数对磨削痕迹分布和残留高度的影响,优选出磨削痕迹分布相对合理的磨削参数组合,并进行磨削加工对比实验。

1 磨削参数对磨削痕迹分布的影响

在垂直磨削加工中,工件表面形成的磨削痕迹是由磨粒和工件的相互运动关系决定的,垂直磨削法加工中形成的磨削痕迹数量、形状和分布受磨削加工参数影响,且不同参数匹配下的磨削痕迹分布状况不同,垂直磨削法中单颗磨粒去除材料残留在工件表面的磨削痕迹分布方程为^[23]:

$$\begin{cases} X = \left(R \cos\left(\frac{3}{2}\pi + w_1 t\right) + v_t t \right) \cos(w_2 t) \\ Y = \left(R \cos\left(\frac{3}{2}\pi + w_1 t\right) + v_t t \right) \sin(w_2 t) \\ Z = R \sin\left(\frac{3}{2}\pi + w_1 t\right) + (R - h) \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为砂轮半径; t 为当前磨削时刻; v_t 为进给速度; w_1 为砂轮转动角速度, $w_1=2\pi N/60$; N 为砂轮转速; w_2 为工件转动角速度, $w_2=2\pi n/60$, n 为工件转速; h 为残留高度,可表示为^[23]:

$$h = R - \sqrt{R^2 - (f/2)^2} \quad (2)$$

式中, f 为螺旋线节距, $f = v_t/n$, 约等于磨削痕迹长度 L , 可表示为:

$$L = f = v_t/n \quad (3)$$

磨削痕迹间距指的是相邻两个磨削痕迹之间的距离 D , 可以表示为:

$$D = \frac{2\pi r_z}{m} \quad (4)$$

式中, r_z 是当前磨削位置距离旋转中心的距离, 而 m 是工件表面每一周的磨削痕迹数目, $m = [N/n]$, 即砂轮转速除以工件转速的整数部分。

1.1 砂轮转速对磨削痕迹分布的影响

当其他参数不变的情况下, 只改变砂轮转速, 探究不同砂轮转速下的磨削痕迹分布情况, 依据课题

组之前的研究经验以及机床主轴适用范围, 最终确定的仿真参数如表 1 所示, 基于磨削痕迹分布方程获得表 1 参数下的仿真结果如图 1 所示。图 1 可知, 垂直磨削法加工后的工件表面残留的磨削痕迹自中心到边缘呈散射状分布, 具体表现为: 从工件中心到边缘, 磨削痕迹间距逐渐增大, 中心区域磨削痕迹分布相对密集, 而边缘区域磨削痕迹分布相对稀疏。这

表 1 砂轮转速变化的磨削参数

Tab. 1 Grinding parameters with different wheel speeds

砂轮半径 /mm	砂轮转速 /r·min ⁻¹	工件转速 /r·min ⁻¹	进给速度 /mm·min ⁻¹
37	4500, 6000, 7500	150	3

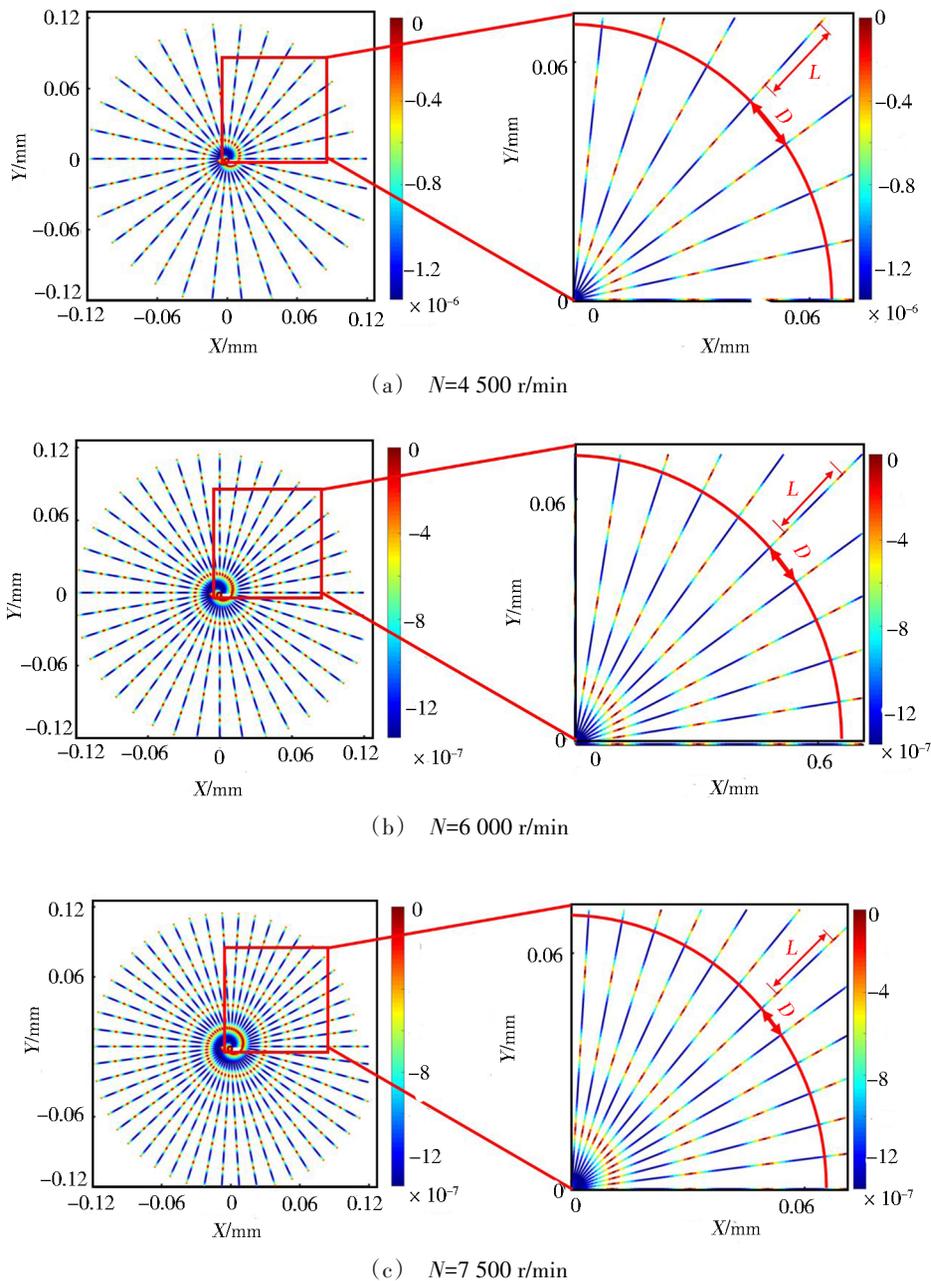


图 1 砂轮转速对磨削痕迹分布的影响

Fig. 1 Grinding traces distribution with different wheel speed

是因为从工件中心到边缘半径 r_2 逐渐增大,由式(4)可知,随着 r_2 的增大,磨削痕迹间距 D 逐渐增大。此外,随着砂轮转速的增大,工件表面残留的磨削痕迹总体分布更加密集,推测磨削加工表面质量会提高。这是由于砂轮转速的增大使得在相同的时间内磨粒划过工件表面的次数增多,工件表面周向的磨削痕迹数量 m 增多,造成磨削痕迹间距 D 减小,磨粒与工件表面摩擦后磨削痕迹间的干涉作用会加剧。同时,由图1和式(3)可知,磨削痕迹长度 L 与砂轮转速无关,图1中所有参数下的 L 相等。因此,砂轮转速越高,磨削痕迹分布越密集, D 越小, L 不变,磨削后的表

面质量越好。

1.2 工件转速对磨削痕迹分布的影响

在保持其他参数不变的情况下,只改变工件转速的数值,探究不同工件转速下的磨削痕迹分布情况,仿真参数如表2所示,基于磨削痕迹分布方程获得表2参数下的仿真结果如图2所示。

表2 工件转速变化的磨削参数

Tab. 2 Grinding parameters with different workpiece speeds

砂轮半径 /mm	砂轮转速 /r•min ⁻¹	工件转速 /r•min ⁻¹	进给速度 /mm•min ⁻¹
37	6000	100, 200, 300	3

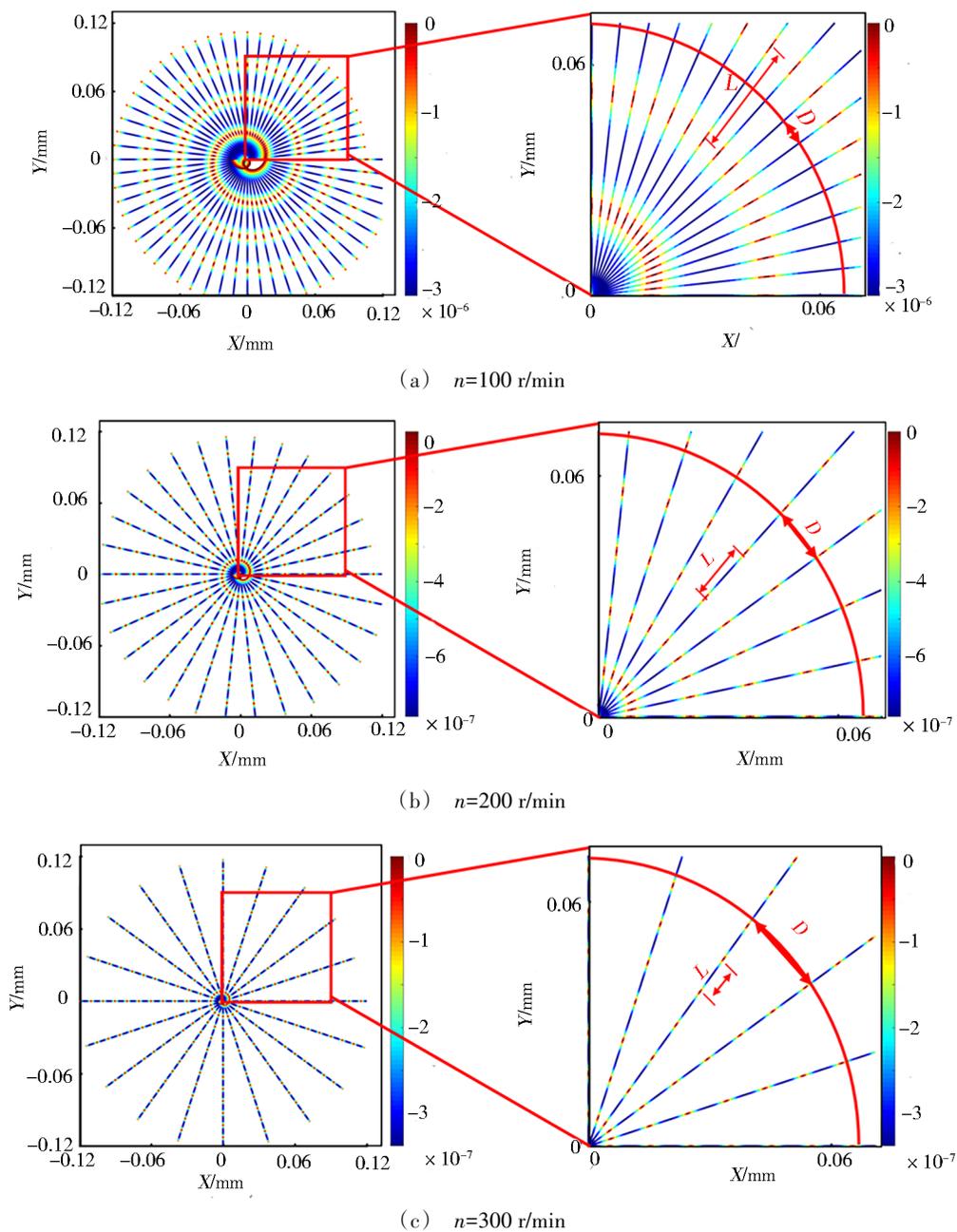


图2 工件转速对磨削痕迹分布的影响

Fig. 2 Grinding traces distribution with different workpiece speed

由图2可知,随着工件转速的增大,磨削痕迹周向数目减小,相同位置处磨削痕迹的间距增大,磨削痕迹长度变小,磨削痕迹分布变得稀疏。理论上,当进给速度和砂轮转速均相同时,工件上残留的磨削痕迹总数量相同。因此,上述参数仿真后,磨削痕迹的总数量相同,不同的是,当工件转速较低时,工件表面的磨削痕迹分布是由长而密的磨削痕迹组成的,长的磨削痕迹由于其残留高度过大不利于获得较优的表面质量,而密的磨削痕迹周向干涉强度大,利于获得较优的表面质量;而当工件转速较高时,工件表面磨削痕迹分布是由短而稀疏的磨削痕迹组成的,短的磨削痕迹由于其残留高度较小利于获得较优的表面质量,而稀疏的磨削痕迹周向干涉强度小,不利于获得较优的表面质量。综上,基于工件转速对磨削痕迹分布的影响,并不是工件转速越高表面质量越好,也不是工件转速越低表面质量越好,而是当工件转速使得磨削痕迹长度和间距存在合理关系时,才能获得相对理想的磨削表面质量。

然而,由残留高度的公式可知,在其他参数不变的情况下,残留高度随着工件转速的变化而变化。依据表2中参数,设置工件转速为30~300 r/min,基于残留高度公式,获得如图3所示的残留高度与工件速度之间的曲线关系图。

由图3可知,残留高度随着工件转速的增大而减小。实际磨削加工过程中,一般情况下,残留高度越

小,表面质量越好,而由图3可知,当其他参数不变时,工件转速大于128 r/min时,残留高度对表面粗糙度的影响小于2 nm。

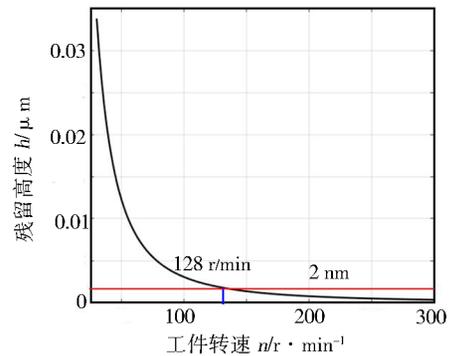


图3 工件转速对残留高度的影响

Fig. 3 Scallop height with different workpiece speeds

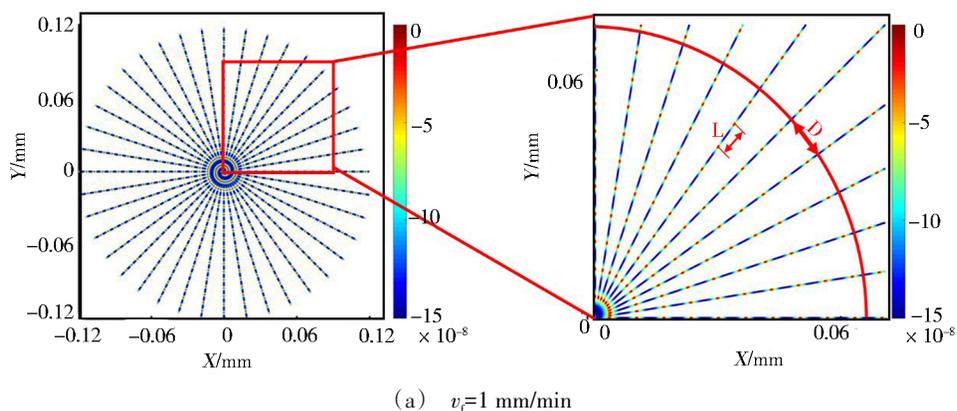
1.3 进给速度对磨削痕迹分布的影响

在保持其他参数不变的情况下,只改变进给速度的数值,探究不同进给速度下的磨削痕迹分布情况,仿真参数如表3所示,基于磨削痕迹分布方程获得表3参数下的仿真结果如图4所示。

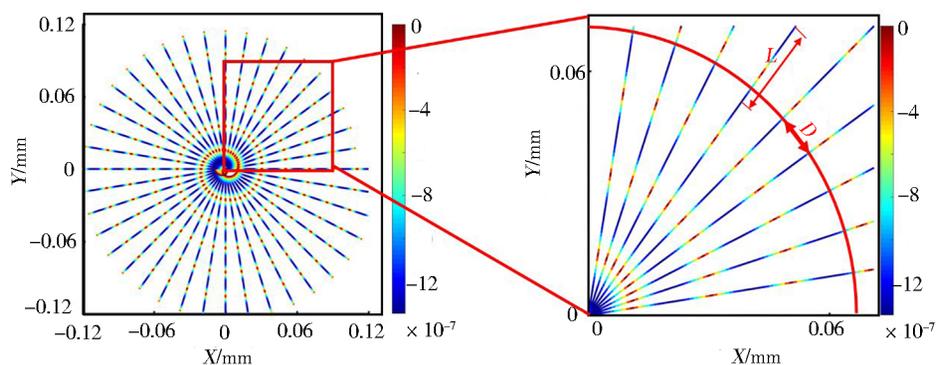
表3 进给速度变化的磨削参数

Tab. 3 Grinding parameters with different feed rates

砂轮半径 /mm	砂轮转速 /r·min ⁻¹	工件转速 /r·min ⁻¹	进给速度 /mm·min ⁻¹
37	6000	150	1, 3, 5



(a) $v_f=1$ mm/min



(b) $v_f=3$ mm/min

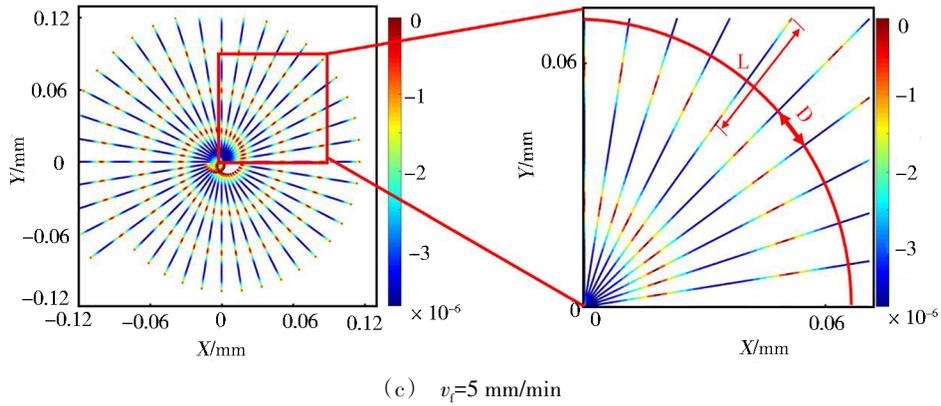


图4 进给速度对磨削痕迹分布的影响

Fig. 4 Grinding traces distribution with different feed rates

由图4可知,随进给速度不断增大,工件表面的磨削痕迹长度不断增大,相同位置处的磨削痕迹间距不变,磨削痕迹的总数量不断减小。理论上,当其他参数不变时,进给速度的增大,使砂轮与工件磨削时间减小,磨削痕迹数目减小。当进给速度增大时,相同位置处的磨削痕迹间距不变,周向干涉关系不变,而磨削痕迹长度和残留高度增大,进而降低工件表面质量。因此,基于进给速度对磨痕分布的影响,理论上进给速度越小,磨削痕迹总数量越多,磨削表面质量越好,但是考虑到磨削效率,进给速度也不应过小。

此外,由残留高度的公式可知,在其他参数不变的情况下,残留高度随着进给速度的变化而变化。据表3中参数,设置进给速度为0~10 mm/min,基于残留高度公式获得图5所示的残留高度与进给速度

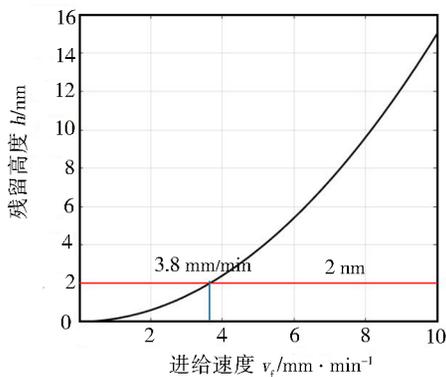


图5 进给速度对残留高度的影响

Fig. 5 Scallop height with different feed rates

之间的曲线关系。可知,残留高度随着进给速度的增大而增大,当其他参数不变时,进给速度小于3.8 mm/min时,残留高度对表面粗糙度影响小于2 nm。

1.4 转速比对磨削痕迹分布的影响

转速比是指砂轮转速与工件转速的比值,用 k 表示,当工件转速能被砂轮转速整除时, k 为整数,否则, k 存在小数部分,小数部分被称为相移^[22]。采用如表4所示的参数,探究转速比对磨削痕迹分布的影响。基于磨削痕迹分布方程获得表4参数下的仿真结果如图6所示。

由图6(a)(b)可知,当砂轮与工件的转速比为整数时,工件表面的磨削痕迹均呈放射状分布,且磨削痕迹首尾相接,放射线的数量等于转速比的值。随着砂轮与工件的转速比的增大,工件每旋转一周的磨削痕迹数量增多,相同位置处磨削痕迹的间距减小,磨削痕迹分布更加密集。此外,由图6(b)(c)可知,尽管两者砂轮与工件的转速比相同,相同位置处的磨削痕迹间距相同,然而,由于图6(c)中砂轮转速更大,磨削痕迹总数量更多,磨削痕迹长度更短,残留高度更小,理论上磨削后的表面质量会更好。同时,由图6(c)(d)可知,虽然两者砂轮与工件转速比相差很小,工件旋转一周形成的磨削痕迹数量几乎相同,但是工件表面的磨削痕迹分布状况截然不同,图6(c)中工件表面相邻圈的磨削痕迹间首尾相接,

表4 转速比变化的磨削参数

Tab. 4 Grinding parameters with different rotation speed ratios

组号(对应图6)	砂轮半径/mm	砂轮转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	工件转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	转速比	进给速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
(a)	37	4500	150	30	3
(b)	37	6000	150	40	3
(c)	37	7200	180	40	3
(d)	37	7065	180	39.618	3

形成方向性很强的40条磨削纹理,而图6(d)中的工件表面磨削痕迹错开一定的角度,没有出现明显的规律性或方向性磨削纹理现象。磨削痕迹首尾相接使得交接处发生破碎耦合和扩展,加剧磨削痕迹的

破碎程度,形成磨削纹理现象,降低磨削表面质量,而错开分布的磨削痕迹,可能会抑制磨削纹理现象,提高磨削表面质量^[23]。

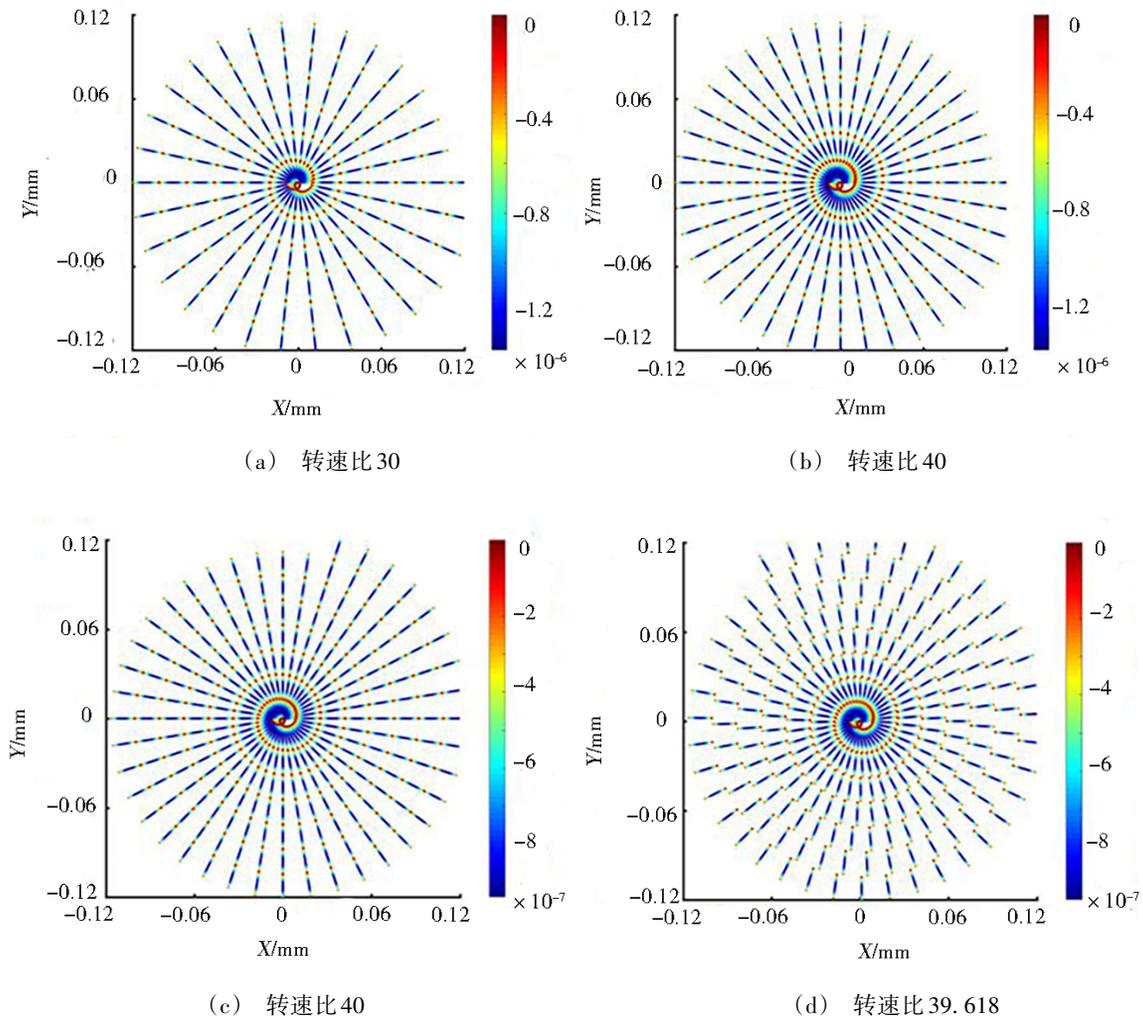


图6 转速比对磨削痕迹分布的影响

Fig. 6 Grinding traces distribution with different rotation speed ratios

1.5 相移对磨削痕迹分布的影响

由1.4节分析可知,当砂轮转速与工件转速的比值k为整数和非整数时工件表面的磨削痕迹分布情况差异很大,而垂直磨削法中的转速比小数部分即相移对磨削痕迹的分布规律影响尚不明晰。为了研究相移对磨削痕迹分布的影响规律,进行了不同相移下的磨削痕迹分布数值仿真,仿真参数中保持工件转速为180 r/min不变,只改变砂轮转速,而砂轮转速从7 020 r/min逐渐增加到7 146 r/min,每次增加18 /min,从而保证相移从0开始以0.1为间隔逐渐增加到0.7,基于磨削痕迹分布方程获得仿真结果如图7所示。

由图7所示,随着相移从0增加到0.5时,相邻两圈磨削痕迹从首尾相接到相互错位越来越大,而随着相移从0.5增加到0.7时,相邻两圈磨削痕迹的相互错位又越来越小,推测当相移逐渐增加至1时,相邻两圈磨削痕迹再次首尾相接,与相移为0时相同。理论上,相移为0.5时,磨削痕迹相互错位最大,磨削纹理生成的可能性越小,磨削后的表面质量会越好;然而,如图7(f)所示,当相移为0.5时,磨削痕迹形成了隔圈在一条放射线上的关系,有可能形成隔圈磨削纹理现象。综上,基于相移对磨削痕迹分布的影响,当相移在0.5附近,而非0.5时,所生成的磨削痕迹分布可获得更好的磨削质量。

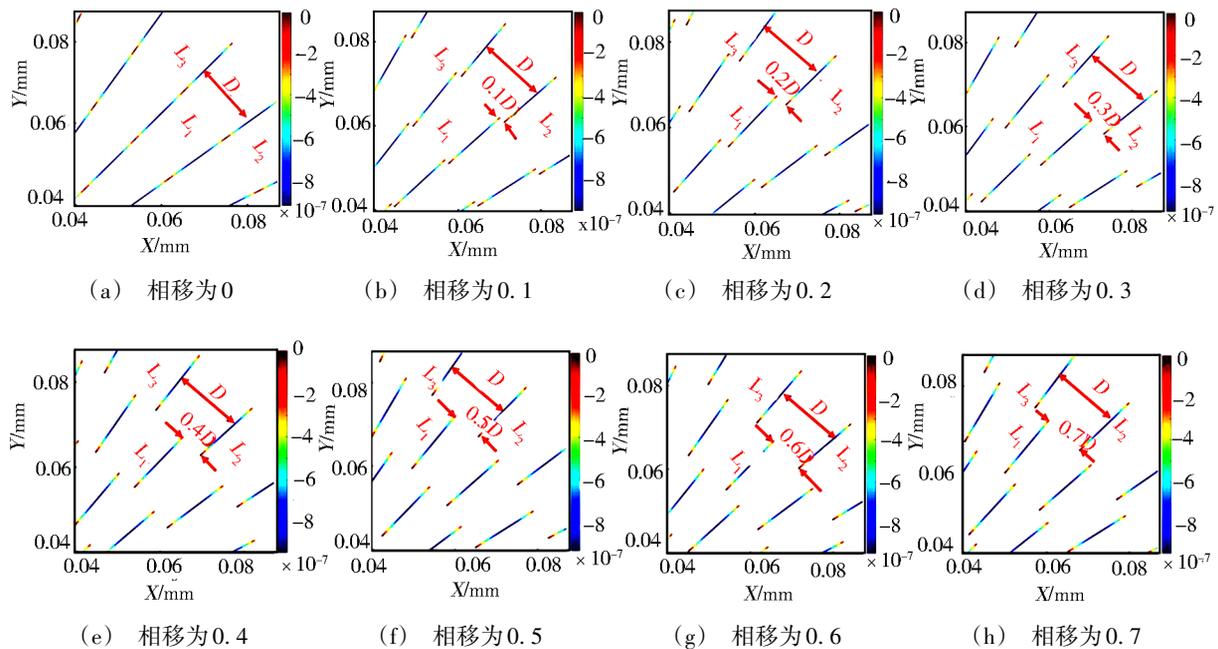


图7 相移下的磨削痕迹分布示意图

Fig. 7 Grinding traces distribution with different phase shifts

2 磨削参数的确定和实验

超精密磨削加工实验在 Moore Nanotech 350FG 超精密磨床上磨削加工球径为 25 mm 的单晶硅凸球面,如图 8 所示,砂轮半径为 37.5 mm,单晶硅外圆直径为 20 mm、厚度为 10 mm,采用水基冷却液,采用圆弧树脂基结合剂金刚石砂轮,磨粒大小 $46\ \mu\text{m}$,浓度号 C100,磨削前采用旋转 GC 磨棒端部在位精密修整方法对砂轮进行修整,并基于上述磨削参数对磨削痕迹分布的影响规律选择参数。

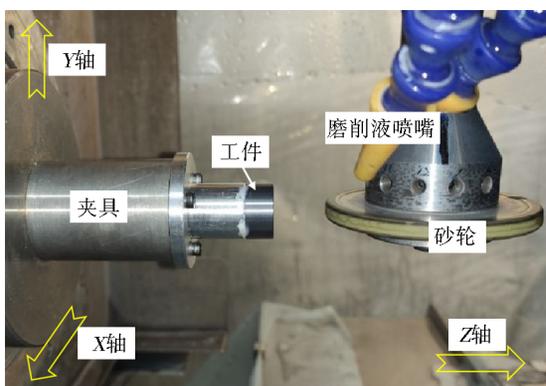


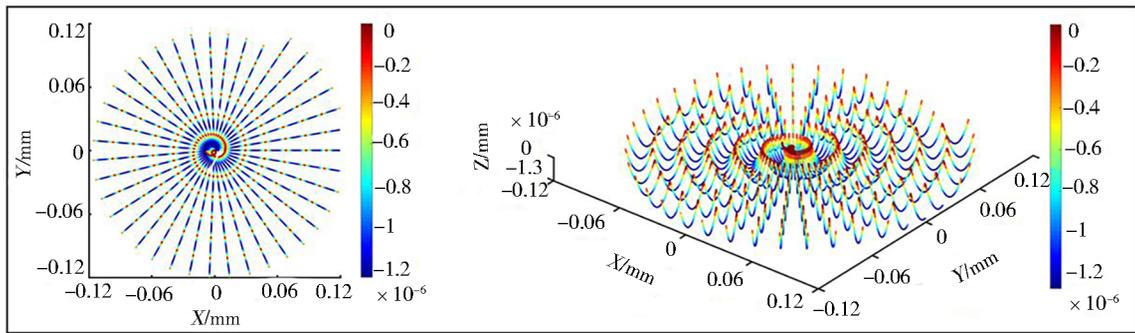
图8 磨削加工实验平台

Fig. 8 Grinding experimental setup

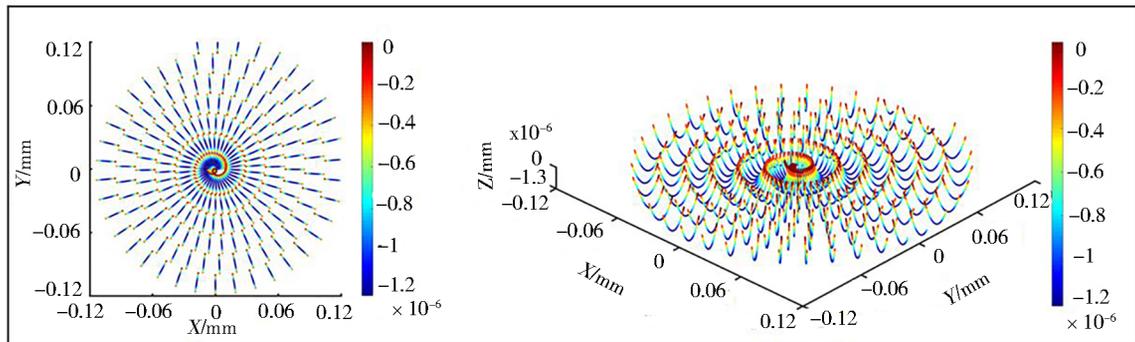
首先,机床磨削主轴的工作范围是 $0\sim 10\ 000\ \text{r/min}$,砂轮主轴的合适工作转速一般为最高转速的 $60\%\sim 80\%$ 左右,再结合砂轮转速对磨削痕迹分布的影响规律,砂轮转速越高,磨削痕迹数量越多,磨削表面质量越好,磨削实验选择砂轮转速为 $6\ 045\ \text{r/min}$;

其次,由进给速度对磨削痕迹分布和残留高度影响分析可知,进给速度越小越好,且当进给速度小于 $3.8\ \text{mm/min}$ 时,磨削痕迹的残留高度小于 $2\ \text{nm}$,综合考虑磨削效率,本实验选择进给速度为 $3\ \text{mm/min}$;然后,工件转速并不是越大表面质量越好,也不是越小表面质量越好,综合考虑磨削痕迹残留高度和单圈磨削痕迹数量,工件转速选择为 $155\sim 159\ \text{r/min}$ 之间;最后,当砂轮转速为 $6\ 045\ \text{r/min}$ 时,工件转速为 $155\ \text{r/min}$ 、 $156\ \text{r/min}$ 、 $157\ \text{r/min}$ 、 $158\ \text{r/min}$ 、 $159\ \text{r/min}$ 对应的相移分别为 0 、 0.75 、 0.5 、 0.26 、 0.02 ,根据相移对磨削痕迹分布的影响,选择其中距离相移为 0.5 最近而非 0.5 的 0.26 ,即工件转速为 $158\ \text{r/min}$,同时与工件转速为 $155\ \text{r/min}$ (相移为 0) 磨削后的工件表面做对比实验,探究磨削加工参数组合选择的有效性。

基于磨削痕迹分布方程仿真获得的工件转速分别 $155\ \text{r/min}$ 和 $158\ \text{r/min}$ 对应的磨削痕迹分布如图 9 所示。如图 9(a) 所示,工件转速为 $155\ \text{r/min}$ 匹配的工艺参数组合获得的磨削痕迹分布图中,磨削痕迹首尾相接,可能会获得磨削纹理现象,而工件转速为 $158\ \text{r/min}$ 匹配的工艺参数组合获得的磨削痕迹分布图中,磨削痕迹错开分布,可能会抑制磨削纹理现象。依据磨削加工经验,磨削深度选择为 $2\ \mu\text{m}$,磨削加工后采用扫描电镜观测工件表面形貌,采用 Taylor Hobson PGI 1240 轮廓仪在工件表面自中心至外缘分为中心、中间、边缘三个位置,采样长度为 $4\ \text{mm}$,观测工件表面粗糙度和截面轮廓。



(a) $n=155$ r/min



(b) $n=158$ r/min

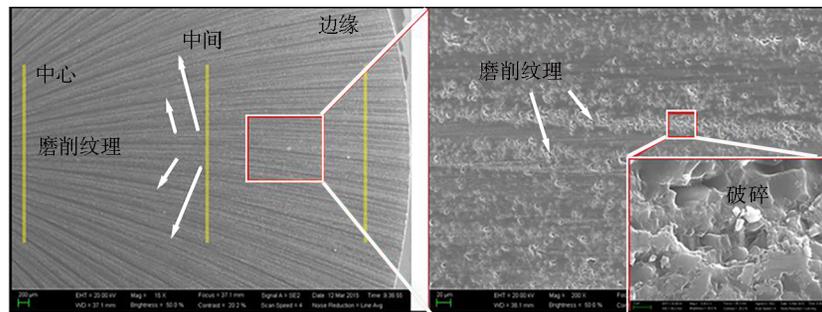
图9 磨削痕迹分布

Fig. 9 Grinding traces distribution

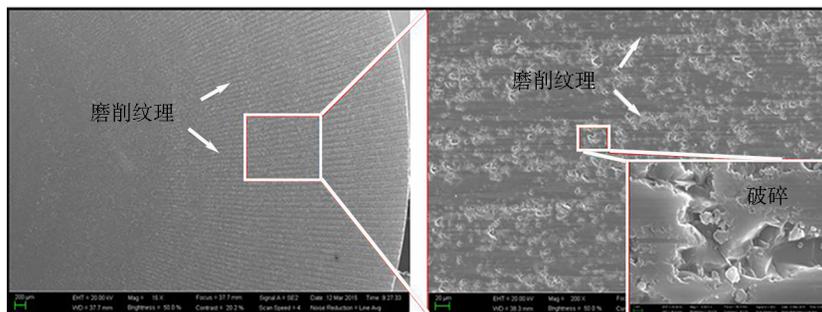
3 实验结果分析

图10为工件转速为155和158 r/min匹配的工艺参数组合磨削后获得的扫描电镜图。由图10(a)可知,基于磨削参数对磨削痕迹的分布影响选择的对

比实验组,工件转速为155 r/min匹配的工艺参数组合获取的表面磨削纹理现象比较明显,表面破碎更严重且面积更大,磨削沟槽更深,表面质量更差,且磨削痕迹和磨削纹理分布与图9(a)仿真结果十分吻



(a) $n=155$ r/min



(b) $n=158$ r/min

图10 磨削后表面扫描电镜图

Fig. 10 SEM of ground surfaces

合。而如图10(b)所示,优选出工件转速为158 r/min匹配的工艺参数组合获取的表面磨削纹理现象更弱,表面破碎更轻,磨削沟槽更浅,表面质量更好,磨削痕迹和磨削纹理分布也与图9(b)基本吻合。

图11为工件转速为155和158 r/min匹配的工艺参数组合磨削后获得的表面粗糙度和截面轮廓图。

可知,两种参数下,工件表面粗糙度 R_a 和 R_z 均是自中心至外缘越来越大,这由仿真中所述的自中心至外缘磨削痕迹间距变大引起。由图11(a)可知,工件转速为155 r/min匹配的工艺参数组合获取的表面截面轮廓形成了周期性峰谷现象,在工件中间和外缘位置更加明显,表明磨削纹理之间是周期性波

峰波谷过渡,会降低工件表面质量;而如图11(b)所示,优选出工件转速为158 r/min匹配的工艺参数组合获取的表面截面轮廓在中心、中间和边缘任一位置周期性峰谷现象均不明显,表面质量会更好。此外,对比图11(a)(b)可知,实验组工件转速为155 r/min匹配的工艺参数组合表面粗糙度 R_a 和 R_z 在3个位置处均大于优选出工件转速为158 r/min匹配的工艺参数组合获得的表面粗糙度,差值在59~125 nm之间,同时,同一工件3个位置之间的最大差值分别是197和131 nm,表明工件转速为158 r/min匹配的工艺参数组合获得的表面质量在不同位置处的一致性和均匀性更好。

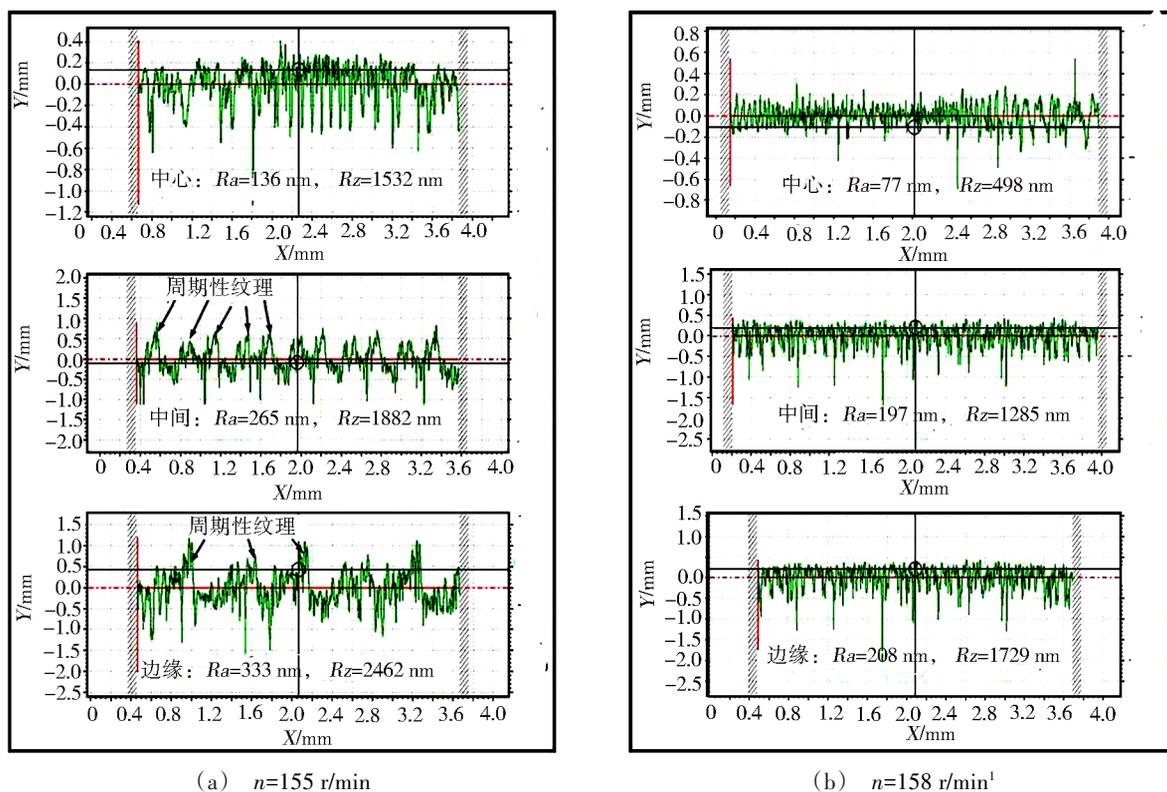


图11 磨削后表面粗糙度和截面形貌

Fig. 11 SEM of ground surfaces and cross section morphology

综上所述,基于磨削参数对磨削痕迹的分布影响优选出的工件转速为158 r/min匹配的工艺参数组合磨削后的工件表面破碎更少,表面粗糙度更小,表面质量更好。

4 结论

(1)垂直磨削法中,磨削参数通过改变磨削痕迹的长度、间距、数量、位置关系和分布情况等影响磨削后工件的表面质量。其中,相移(砂轮与工件转速比小数部分)的大小会影响磨削痕迹的首尾相接与相互错开情况,直接决定着磨削纹理的形成与否,进而成为影响磨削后工件表面质量的关键因素。

(2)基于磨削参数对磨削痕迹分布和残留高度的影响,以及垂直磨削加工的实际条件,优选出了磨

削痕迹分布相对合理的工艺参数组合,并进行磨削加工对比实验,结果表明:尽管磨削参数中仅工件转速相差很小,磨削痕迹分布状况却出现了显著的差异,进而导致工件表面纹理和破碎情况显著不同,且表面粗糙度 R_a 存在59~125 nm的差距;合理地匹配磨削加工参数可大幅提高工件表面质量。

垂直磨削法中,磨削参数之间存在一定的联系,而本文优化的磨削参数不是唯一的优解。如何解析磨削参数之间的联系及其对垂直磨削加工机理的影响,并提出更加快速、有效的磨削参数优化策略是下一步关于磨削参数优化的主要研究方向。

参考文献

- [1] RAHMAN M S, SALEH T, LIM H S, et al. 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第6期

Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(7-8):887-895.

[2] 徐领娣, 房安利, 于建海, 等. 微晶材质自由曲面反射镜精密超声铣磨加工技术[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2564-2570.

XU L D, FANG A L, YU J H, et al. . Ultrasonic-vibration assisted grinding of a zero-douur freeform optical mirror[J]. *Optics Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2564-2570.

[3] 王紫光, 康仁科, 周平, 等. 单晶硅反射镜的超精密磨削工艺[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(05):1087-1095.

WANG Z G, KANG R K, ZhOU P, et al. . Ultra-precision grinding of monocrystalline silicon reflector[J]. *Optics Precision Engineering*, 2019, 27(05):1087-1095.

[4] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B, RABIEY M. Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4 [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42:883-891.

[5] WU J, HUANG C, LIAO C. Fracture strength characterization and failure analysis of silicon dies [J]. *Microelectronics and Reliability*, 2003, 43(2):269-277.

[6] CHEN B, LI S, DENG Z, et al. Grinding marks on ultra-precision grinding spherical and aspheric surfaces [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2017, 4(4):419-429.

[7] 郭兵, 张春雨, 王金虎, 等. ALON 高梯度薄壁保形非球面的超精密磨削工艺[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(01): 93-99.

GUO B, ZHANG C Y, WANG J H, et al. . Ultra-precision grinding process of high-gradient thin conformal aspheric on ALON ceramic[J]. *Optics Precision Engineering*, 2017, 25(01): 93-99.

[8] HUANG Y, FAN B, WAN Y, et al. Improving the performance of single point diamond turning surface with ion beam figuring [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 172:540-544.

[9] 王朋, 杜雪, 回长顺. 金刚石车削表面微纳结构的气囊抛光改进[J]. *光学学报*, 2015, 35(3):270-276.

WANG P, DU X, HUI C S. Airbag polishing improvement of micro-nano texture on diamond turning surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3):270-276.

[10] LIU Q, CHENG J, LIAO Z, et al. Incident laser modulation by tool marks on micro-milled KDP crystal surface: Numerical simulation and experimental verification[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105610.

[11] CHEN M J, CHENG J, YUAN X D, et al. Role of tool marks inside spherical mitigation pit fabricated by micro-milling on repairing quality of damaged KH_2PO_4 crystal [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1):14422.

[12] 田业冰, 金洙吉, 康仁科, 等. 硅片自旋转磨削的运动几何学分析[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(20):1798-1801.

TIAN Y B, JIN ZH J, KANG R K, et al. Kinematic geometry analysis of silicon wafer spin grinding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(20):1798-1801.

[13] 王玉珏, 许黎明, 李冬冬, 等. 摆动式展成球面磨削表面的纹理分析[J]. *上海交通大学学报(自然版)*, 2012, 46(05):740-745.

WANG Y J, XU L M, LI D D, et al. Sphere generation grinding based spherical surface marks analysis [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(5):740-745.

[14] 陈海滨, 周旗钢, 万关良, 等. 300 mm 双面磨削硅片表面纹路模拟[J]. *稀有金属*, 2007, 31(6):742-745.

CHEN H B, ZHOU Q G, WAN G L, et al. Simulation of surface texture on 300 mm double-sided grinding silicon wafer [J]. *Rare Metals*, 2007, 31(6):742-745.

[15] CHIDAMBARAM S, PEI Z J, KASSIR S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for grinding marks [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(15):1595-1602.

[16] PEI Z J, STRASBAUGH A. Fine grinding of silicon wafers: designed experiments [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42(3):395-404.

[17] HUO F H, KANG R K, LI Z, et al. Origin, modeling and suppression of grinding marks in ultra-precision grinding of silicon wafers [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 66:54-65.

[18] ZHOU L, SHIMIZU J, SHINOHARA K, et al. Three-dimensional kinematical analyses for surface grinding of large scale substrate [J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(2): 175-184.

[19] PAN Y, ZHAO Q, GUO B, et al. An investigation of the surface waviness features of ground surface in parallel grinding process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 170:105351.

[20] CHEN S, CHEUNG C F, ZHANG F, et al. Three-dimensional modelling and simulation of vibration marks on surface generation in ultra-precision grinding [J]. *Precision Engineering*, 2018:221-235.

[21] CHEN S, FAI C C, HU Z F. An experimental and theoretical analysis of surface generation in the ultra-precision grinding of hard and brittle materials [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97:2715-2729.

[22] CHEN S, CHEUNG C, ZHAO C, et al. Simulated and measured surface roughness in high-speed grinding of silicon carbide wafers [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 91:719-730.

[23] 陈冰, 罗良, 焦浩文, 等. 基于磨削痕迹仿真的磨削纹理生成机理[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(14):1677-1685.

CHEN B, LUO L, JIAO H W, et al. Generation mechanism of grinding marks based on grinding trace simulations [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(14):1677-1685.