文章编号:1674-2974(2024)04-0020-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024166

结构化砂轮磨削蓝宝石微沟槽底面质量的研究

周飞[1,2],许金凯[1,2†],张文通[1,2],于化东[3]
(1. 长春理工大学 机电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 跨尺度微纳制造教育部重点实验室,吉林 长春 130022;
3. 吉林大学 机械与航空航天工程学院,吉林 长春 130025)

摘 要:针对蓝宝石这类超硬材料表面微结构难加工的问题,提出一种基于结构化砂轮的磨削表面微结构方法.采用电火花线切割(Wire Electrical Discharge Machining, WEDM)技术对砂轮表面进行结构化修整,利用修整后的结构化砂轮磨削蓝宝石表面微结构,研究顺磨和逆磨方式下,结构化砂轮磨削速度、磨削深度和进给速度对蓝宝石微沟槽底部表面粗糙度的影响规律.研究结果表明,结构化砂轮磨削蓝宝石表面微沟槽形貌基本完整,且相对120 μm的加工深度,尺寸误差仅为1.4 μm,微沟槽的垂直度较好,垂直度偏差仅为4.9°;顺、逆磨方式下,随着磨削速度增大,磨削深度和进给速度减小,都可以减小蓝宝石微沟槽底部表面粗糙度;相较于逆磨方式,顺磨方式下微沟槽底面微坑较小,底面质量更优;在较优加工参数砂轮磨削速度35 m/s、磨削深度1 μm、工件进给速度200 mm/min下,表面粗糙度从4.487 μm降低至2.923 μm.

关键词:蓝宝石;磨削;表面粗糙度;结构化砂轮;磨削方式;微沟槽
中图分类号:O786 **文献标志码**:A

Research on Quality of Bottom Surface of Sapphire Micro-grooves Ground by Structured Grinding Wheels

ZHOU Fei[1,2], XU Jinkai[1,2†], ZHANG Wentong[1,2], YU Huadong[3]
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficult machining of micro-structured surfaces of super-hard materials such as sapphire, a microstructure technology for grinding surfaces based on structured grinding wheels is proposed. In this paper, the surface of the grinding wheel is structured through Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) technology, and the structurally dressed wheel was utilized to grind the microstructure of the sapphire surface. The influence law of structured wheel grinding speed, grinding depth, and feed rate on the surface roughness at the bottom of sapphire microgrooves in both down and up grinding modes was carried out. The results show that the

* **收稿日期**:2023-10-14
基金项目:吉林省重大科技专项(20230301005GX),Major Science and Technology Special Project of Jilin Province (20230301005GX);吉林省创新创业人才资助项目(2021Z002),Jilin Innovation and Entrepreneurship Talent Funding Project (2021Z002)
作者简介:周飞(1994—),男,安徽铜陵人,长春理工大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:xujinkai2000@163.com

microgroove morphology of the sapphire surface ground by the structured wheel is basically complete, the dimensional error is only 1.4 μm relative to the cutting depth of 120 μm, and the perpendicularity of the microgrooves is better, with a perpendicularity deviation of only 4.9°; The surface roughness at the bottom of the sapphire microgroove can be reduced by increasing the grinding speed and decreasing the grinding depth and feed rate in both down and up grinding modes; Compared with the up-grinding method, the micro-pits on the bottom surface of the micro-groove are smaller, and the bottom surface quality is better in the down-grinding method. The bottom surface roughness is reduced from 4.487 μm to 2.923 μm under the better machining parameters of grinding speed of 35 m/s, grinding depth of 1 μm, and workpiece feed speed of 200 mm/min.

Key words: sapphire; grinding; surface roughness; structured grinding wheels; grinding method; microgroove

蓝宝石材料具有良好光学性能和较高化学稳定性,而且强度高、硬度大、耐磨损,广泛用于航空航天、集成电路及光电工程等领域[1-4]. 蓝宝石材料因强度高、硬度大,是典型的难加工硬脆材料,而磨削加工是硬脆材料最主要的加工方法.

一些学者针对硬脆材料的磨削加工进行了大量的研究[5-10]. Ren 等[11]研究了磨削参数和各种微磨具对工件表面磨削质量的影响,并采用电镀金刚石微磨具对单晶硅进行磨削试验,研究结果表明,进给速度是影响其表面粗糙度最显著的因素. Li 等[12]基于多步磨削工艺,研究了轮速对 Zerodur 微晶玻璃表面形貌、表面粗糙度和亚表面损伤的影响,分析结果表明,提高轮速可以抑制脆性断裂的发生和扩展,使得微坑和微裂纹越来越少,塑性流动的迹象越来越明显. Gong 等[13]通过试验研究了螺旋微磨具对蓝宝石表面质量、边缘断裂特征和亚表面损伤行为的影响,并分析了螺旋微细磨具的几何结构和磨削参数对蓝宝石表面形貌、截面轮廓高度和表面粗糙度的影响. Sun 等[14]对比研究了具有微细螺旋容屑槽的微细磨具与普通圆柱形微细磨具磨削蓝宝石过程,研究发现,具有微细螺旋容屑槽的微细磨具在促进碎屑排出和提高耐磨性方面表现出优异的性能,但螺旋容屑槽的存在显著影响晶粒分布、磨削/微磨削过程中的接触面积和表面生成机制;节距长度的增加会使微细螺旋容屑槽的微细磨具难以实现蓝宝石的塑性区域加工,但与普通微细磨具相比,这种新型微细磨具在高进给速度下有可能获得更好的表面质量. Lu 等[15]采用干式放电修整技术,获得了高晶粒突起和锐利的微晶粒切割边缘,研究了砂轮转速、切削深度和进给速度等磨削工艺参数对蓝宝石磨削表面质量、磨削力和磨削力比的影响,揭示了磨削力与磨削表面质量之间的关系,结果表明,采用干式电火花修整的粗金刚石砂轮表面的晶粒突出高度可以达到 168.5 μm,磨削的蓝宝石表面最小线粗糙度 R_a 和表面粗糙度 S_a 分别为 0.194 μm 和 0.736 μm. Zhang 等[16]对用于蓝宝石磨削的固定磨粒金刚石磨具进行了研究,开发了 4 种不同晶粒尺寸(40 μm、20 μm、7 μm、2.5 μm)的陶瓷树脂复合结合剂金刚石磨具;使用开发的金刚石磨具进行磨削试验,通过比较蓝宝石的表面粗糙度和材料去除率来评估 4 种磨具的磨削性能;试验结果表明,随着晶粒尺寸的增加,材料去除率和表面粗糙度均增加.

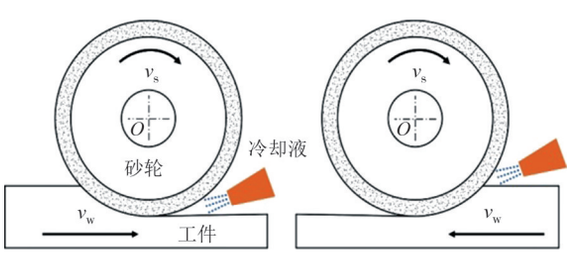
然而,在磨削加工过程中,顺、逆磨削方式对其加工表面质量有着非常显著的影响[17]. Xiao 等[18]采用顺、逆磨削方式进行了镍基高温合金砂带磨削试验,研究了磨削比、表面粗糙度和表面残余应力. 研究结果表明,顺磨方式下的材料去除率较低,但具有较高的磨削比;而逆磨方式下的磨削表面粗糙度较大. 对于磨削表层中的残余应力,逆磨方式下的残余应力是顺磨的 2.23 倍,并且均以残余压应力形式存在. Setti 等[19]采用顺、逆磨削方式进行了 16MnCr5 硬化钢磨削试验. 通过对比两种磨削方式下的磨削表面微观形貌,发现顺、逆磨削模式之间存在明显差异,这与铣削过程中的表面形貌生成类似. Liu 等[20]在表面磨削硬化试验的基础上,对 65Mn 钢的磨削硬化质量进行了研究. 研究结果表明,随着磨削方式的改变,硬化层的均匀性和深度发生了相应变化,较大切削深度和较小工作台速度以及顺-逆磨削或顺-逆-顺磨削的磨削方法相结合,可以有效地控制硬化工件的深度和均匀性,从而提高磨削硬化的质量.

综上所述,尽管一些学者对磨削加工进行了大量的研究,并取得许多阶段性成果.但磨削方式对蓝宝石微沟槽底面质量的研究却鲜有报道.为此,本文研究了顺、逆磨削方式下,砂轮线速度、磨削深度和进给速度对蓝宝石微沟槽底面质量的影响规律,这一研究为蓝宝石高精度、低损伤的微结构表面加工提供了一定的指导意义.

1 不同磨削方式下砂轮的磨削特性

在砂轮磨削加工过程中,根据砂轮与工件接触点处相对运动关系,可将磨削方式分为顺磨和逆磨.不同磨削方式下砂轮的磨削过程示意图如图1所示.

通过分析顺、逆磨削过程可知,当采用逆磨方式时,磨削过程中的切削厚度从零开始增大至最大值后迅速减小至零,整个磨削过程由滑擦、耕犁、切削3个阶段构成.使得砂轮磨粒经过整个磨削过程时,产生的热量在磨削弧区内可以得到充分的消散,导致材料在一定程度上温度有所降低,材料软化效应降低.当采用顺磨方式时,在整个磨削过程中,磨粒几乎不经过滑擦而直接进入耕犁和切削2个阶段,这将导致材料在处于磨削弧区内温度相对逆磨方式而言较大,材料软化效应明显.



(a)顺磨 (b)逆磨

图1 不同磨削方式下砂轮的磨削过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the grinding process of the grinding wheel under different grinding methods

根据Kaczmarek[21]的研究,在磨削加工过程中,砂轮磨粒以及磨削方式对单颗磨粒平均未变形切屑厚度有显著影响,其公式为:

$$h_m = \frac{v_w}{v_s \pm 2v_w}\frac{b}{B}l\sqrt{\frac{a_p}{d_s}} \tag{1}$$

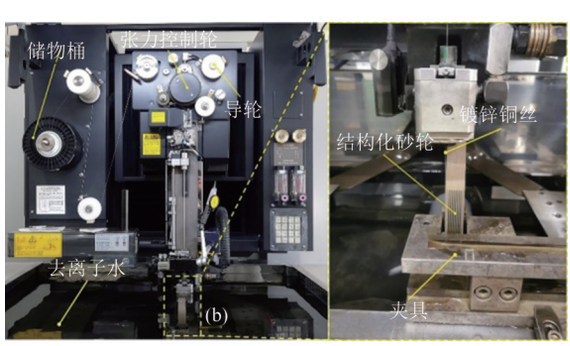
式中:h_m为单颗磨粒的未变形切屑厚度;v_s为砂轮线速度;v_w为工件进给速度;b为砂轮有效磨削宽度;B为砂轮宽度;l为砂轮工作面上磨粒间的平均距离;a_p为磨削深度;d_s为砂轮直径;+指逆磨;−指顺磨.

由式(1)可知,在顺、逆磨削过程中,单颗磨粒平均未变形切屑不相等,顺磨时的单颗磨粒平均未变形切屑厚度要大于逆磨时的单颗磨粒平均未变形切屑厚度,这将导致顺磨方式下磨削力大于逆磨方式.而磨削过程中做功与磨削力直接相关,顺磨方式下磨削力大于逆磨,则顺磨方式下磨削力做功比逆磨方式下做功多,这也将导致顺磨方式下将产生更多热量,最终促使顺磨过程中的磨削温度比逆磨高,材料软化效应明显.

2 试验过程

2.1 磨削试验

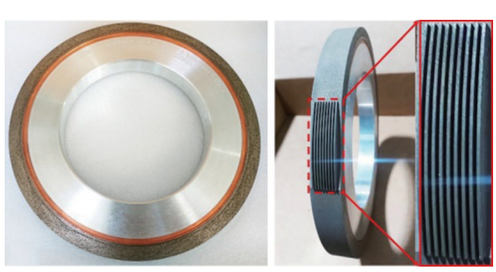
本节将进行蓝宝石表面微沟槽磨削试验,首先利用电火花线切割技术修整结构化砂轮,然后,采用修整后的结构化砂轮磨削蓝宝石表面微沟槽.使用电火花线切割加工设备对砂轮进行跨尺度结构化修整,如图2所示.本研究使用的砂轮为树脂和金属复合结合剂金刚石砂轮,磨粒粒度为240#,砂轮直径为210 mm,砂轮宽度为20 mm,砂轮实物图如图3(a)所示,经电火花线切割修整后的结构化砂轮实物图如图3(b)所示.



(a)电火花线切割加工装置 (b)局部放大图

图2 电火花线切割加工系统

Fig.2 Wire electrical discharge machining system



(a)未结构化砂轮 (b)结构化砂轮

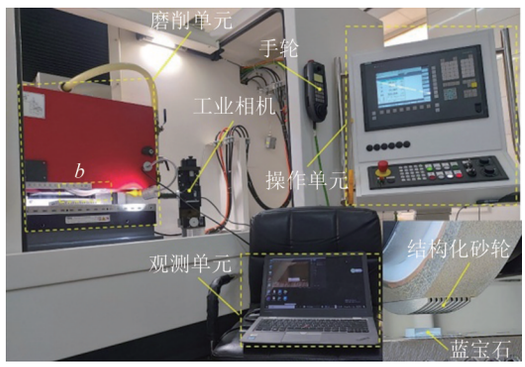
图3 砂轮

Fig.3 Grinding wheel

修整的结构化砂轮表面微凸起宽度为900 μm.在精密磨床(BLOHM Orbit 36)上进行蓝宝石表面微沟槽磨削试验,其最小分辨率可以达到0.001 mm,最大砂轮线速度可达到50 m/s,最大转速可达7 000 r/min,磨削试验系统如图4所示,磨削试验之前,使用平衡支架对砂轮进行静平衡.

由于蓝宝石属于单晶材料,不同晶面上的力学性能不同.本研究选用了晶面间距最大的C面蓝宝石作为磨削试样,晶面间距越大,相邻原子层之间的结合能越弱,因此C面蓝宝石材料最容易去除[22].所用试件尺寸的长、宽、高分别为10 mm、10 mm、3 mm,其主要性能参数如表1所示.

顺磨方式下,蓝宝石表面微结构SEM图如图5所示.由图5可知,结构化砂轮磨削蓝宝石表面微沟槽形貌基本完整,微沟槽宽度相对于结构化砂轮表面微凸起宽度的尺寸误差仅为1.5%.此外,测量了蓝宝石表面微沟槽的高度,相对120 μm的设计加工深度,尺寸误差仅为1.4 μm,如图6所示.从图6可以看出,微沟槽的垂直度较好,垂直度偏差仅为4.9°.



(a)磨削装置图　　(b)局部放大图

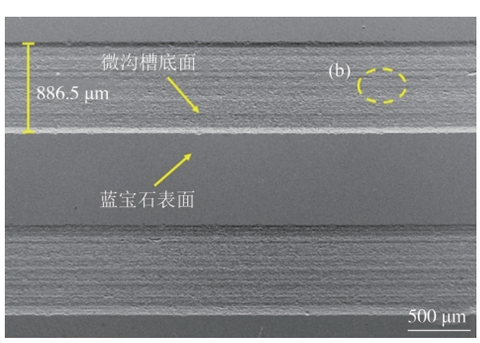
图4　磨削试验系统

Fig.4　Grinding experimental system

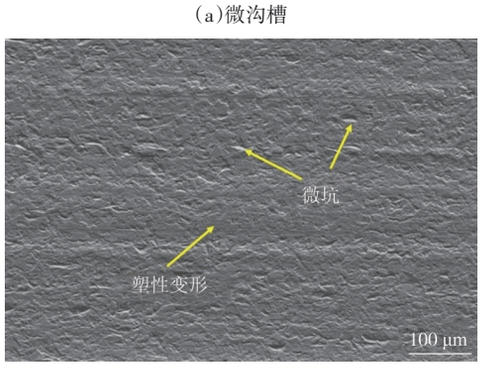
表1　蓝宝石材料的性能参数[4]

Tab.1　Performance parameters of the sapphire materials [4]

位置	熔点/℃	导热系数/[W/(m·K)]	热膨胀系数/(10^{-6}℃$^{-1}$)	莫氏硬度	维氏硬度/GPa	密度/(g·cm^{-3})	抗压强度/MPa	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
垂直C面	2 050	23~40	5.0~8.31	9	18~20	3.97~3.99	2 000~2 940	335~400	1 540	345~494	0.27~0.30
平行C面	2 050	26~40	6.6~9.03	9	16~17	3.97~3.99	2 000~2 940	335~400	1 030	345~494	0.27~0.30



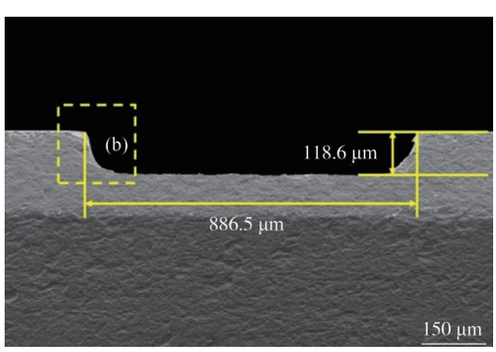
(a)微沟槽



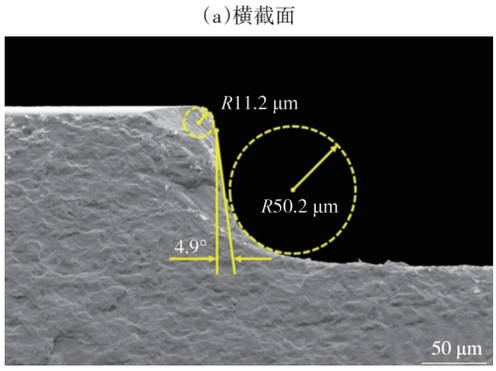
(b)局部放大图

图5　蓝宝石表面微结构SEM图

Fig.5　Microstructural SEM images of the sapphire surface



(a)横截面



(b)局部放大图

图6　微沟槽SEM图

Fig.6　SEM images of microgroove

所修整的结构化砂轮表面微凸起宽度为873 μm. 在精密磨床(BLOHM Orbit 36)上进行蓝宝石表面微沟槽磨削试验，磨削试验系统如图4所示，磨削试验之前，使用平衡支架对砂轮进行静平衡.

2.2 试验设计和测量

磨削试验在缓进给模式下，探究磨削过程中2种磨削方式和磨削参数(砂轮线速度v_s，磨削深度a_p和进给速度v_f)对微沟槽底面质量的影响规律. 为了节约时间和试验成本，每个因素取四个水平，不同磨削方式下的磨削参数如表2所示. 在所有试验中，都使用了水基磨削液.

表2 磨削参数

Tab.2 Grinding parameters

水平	砂轮线速度v_s/(m·s^{-1})	磨削深度a_p/μm	进给速度v_f/(mm·min^{-1})
1	5	1	200
2	15	2	400
3	25	4	600
4	35	6	800

采用激光共聚焦显微镜作为测量微沟槽底面形貌的仪器，以确定蓝宝石微沟槽底面三维形态及表面粗糙度；采用扫描电子显微镜观测蓝宝石微沟槽底面微观形貌，以确定微沟槽底面形貌和材料去除机制；采用接触式粗糙度测量仪用于测量微沟槽底面的粗糙度. 在蓝宝石微沟槽底面粗糙度测量过程中，为了减小试验结果的误差，每个试件测量5组数据，去掉试验数据中的最大值和最小值，试验结果采用3组数据的平均值，以确保其结果可靠性和重复性.

3 结果和讨论

3.1 不同磨削方式下砂轮线速度对微沟槽底面质量的影响

砂轮线速度v_s对微沟槽底面粗糙度R_a的影响如图7所示. 由图7可知，在顺、逆磨方式下，随着砂轮线速度v_s逐渐增加，蓝宝石微沟槽底面粗糙度R_a逐渐减小. 这是因为随着砂轮线速度v_s增大，最大未变形切削厚度减小，单颗金刚石磨粒磨削力减小，比磨削能增加，增加了蓝宝石磨削时塑性去除所占比例，所以蓝宝石微沟槽底面粗糙度R_a呈现下降趋势. 由此可见，适当提高砂轮线速度，可以获得较好的蓝宝石微沟槽底面质量. 随着砂轮线速度增大，相较于逆磨方式，顺磨方式下蓝宝石微沟槽底面粗糙度较小，表面质量更优.

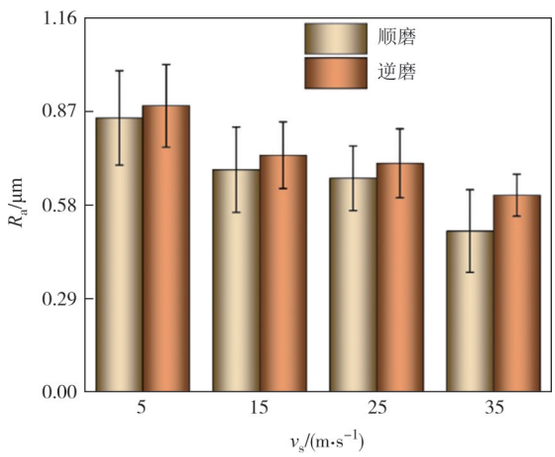


图7 砂轮线速度v_s对微沟槽底面粗糙度R_a的影响

Fig.7 Effect of grinding speed v_s on the bottom roughness R_a of microgroove

3.2 不同磨削方式下磨削深度对微沟槽底面质量的影响

磨削深度a_p对微沟槽底面粗糙度R_a的影响如图8所示. 由图8可知，在顺、逆磨方式下，随着磨削深度a_p增加，微沟槽底面粗糙度R_a总体上呈增大趋势. 这是因为随着磨削深度a_p增加，磨粒对工件表面划痕加深，当磨削层厚度超过材料的脆-塑性转变临界深度时，蓝宝石表面材料去除机理由大量的塑性去除逐步转化为以脆性去除为主，从而导致蓝宝石微沟槽底面粗糙度值升高. 随着磨削深度a_p增大，相较于逆磨方式，顺磨方式下蓝宝石微沟槽底面粗糙度R_a整体较小.

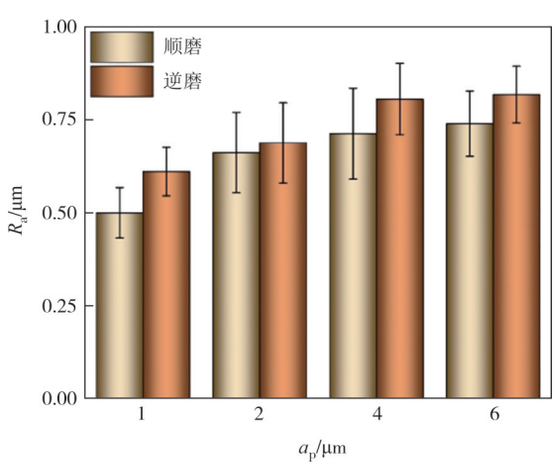


图8 磨削深度a_p对微沟槽底面粗糙度R_a的影响

Fig.8 Effect of grinding depth a_p on the bottom roughness R_a of microgroove

3.3 不同磨削方式下进给速度对微沟槽底面质量的影响

进给速度 v_f 对微沟槽底面粗糙度 R_a 的影响如图 9 所示. 由图 9 可知,在顺、逆磨方式下,随着进给速度 v_f 逐渐增大,蓝宝石微沟槽底面粗糙度随之增大. 其原因是:当进给速度增大时,单颗磨粒参与的加工次数减少,促使磨削区热量积累减少,塑性去除所占比例减小;同时单颗磨粒的磨削厚度增加,材料的去除率增加,因此磨削表面粗糙度随之增大.

实践证明,适当减小进给速度有助于提高微沟槽底面质量. 由图 9 可以得出,相较于逆磨方式,顺磨方式下蓝宝石微沟槽底面粗糙度 R_a 整体偏小,获得的微沟槽底面质量较优.

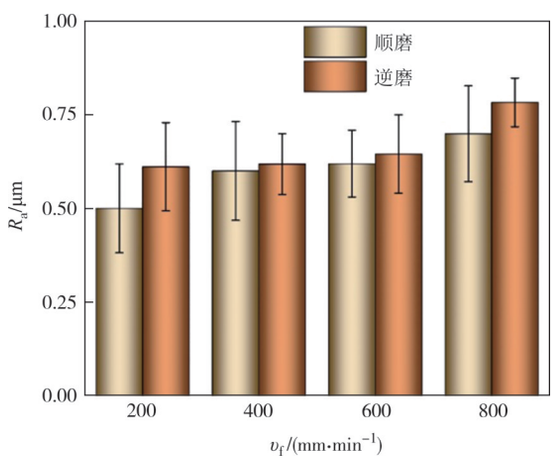
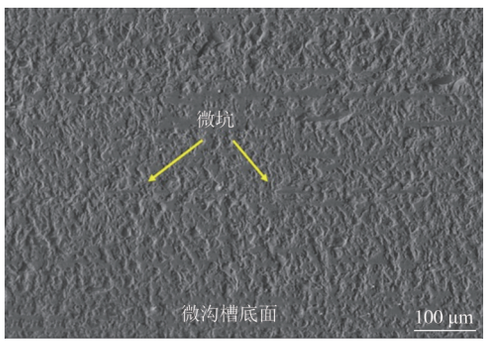


图 9　进给速度 v_f 对微沟槽底面粗糙度 R_a 的影响

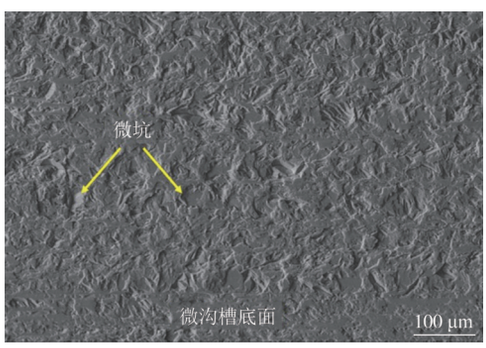
Fig.9　Effect of feed speed v_f on the bottom roughness R_a of microgroove

4　试验结果验证

根据所研究磨削参数范围内的蓝宝石微沟槽底面粗糙度的影响规律,取相同磨削参数:砂轮线速度 v_s 为 35 m/s,磨削深度 a_p 为 1 μm,工件进给速度 v_f 为 200 mm/min. 在该磨削参数下通过电子扫描显微镜对磨削后蓝宝石表面微沟槽底面进行观察,不同磨削方式下微沟槽底面 SEM 图如图 10 所示. 由图 10 可知,顺磨方式下,蓝宝石微沟槽底面形貌变化比较均匀,表面微坑较小;而逆磨方式下,蓝宝石微沟槽底面形貌变化较大,表面微坑较大,这表明了顺磨方式在表面质量上具有显著优势. 采用激光共聚焦显微镜测量顺、逆方式下蓝宝石微沟槽底面三维形貌,如图 11 所示. 由图 11 可知,蓝宝石微沟槽底面存在高度和宽度不同的波峰和波谷,这种波峰和波谷间接地反映出蓝宝石微沟槽底面质量. 相较于逆磨方式,顺磨方式下蓝宝石微沟槽底面表面粗糙度 S_a 从 4.487 μm 降低至 2.923 μm,获得的微沟槽底面表面质量较优.



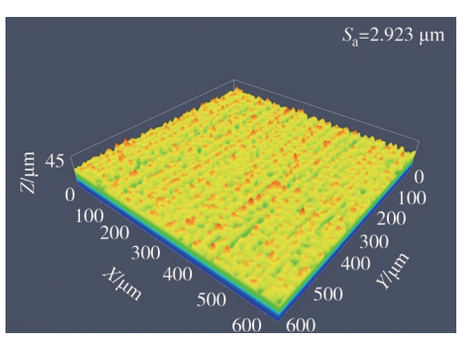
(a)顺磨方式



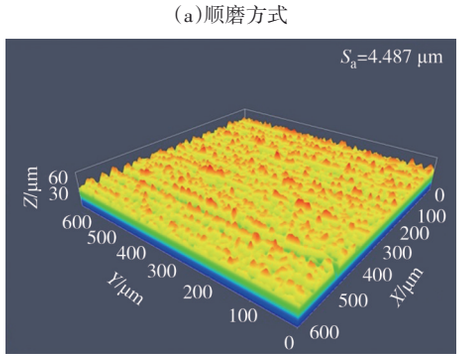
(b)逆磨方式

图 10　不同磨削方式下微沟槽底面 SEM 图

Fig.10　SEM images of the bottom surface of microgrooves under different grinding methods



(a)顺磨方式



(b)逆磨方式

图 11　不同磨削方式下微沟槽底面三维形貌图

Fig.11　Three-dimensional morphology of the bottom surface of microgrooves under different grinding methods

5 结 论

本文研究了顺、逆磨方式下,砂轮线速度,磨削深度和工件进给速度对蓝宝石微沟槽底面质量的影响规律.主要发现可总结如下:

1)蓝宝石微沟槽磨削加工时,微沟槽底面粗糙度随磨削参数的变化而变化,选择合适的磨削参数有利于提高蓝宝石微沟槽表面加工效率,并且获得较好的微沟槽底面质量.

2)研究结果表明,提高砂轮线速度,减小磨削深度和进给速度可以有效抑制蓝宝石磨削底面脆性断裂的发生,减小蓝宝石微沟槽底面微坑尺寸.

3)在相同磨削参数条件下,顺磨方式下蓝宝石微沟槽底面质量优于逆磨方式下微沟槽底面质量.这一研究为实现蓝宝石微沟槽的低损伤和高效率加工提供了一定的指导意义.

参考文献

[1] KATYBA G M, ZAYTSEV K I, DOLGANOVA I N, et al. Sapphire shaped crystals for waveguiding, sensing and exposure applications[J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2018, 64(4): 133-151.

[2] KATYBA G M, ZAYTSEV K I, DOLGANOVA I N, et al. Sapphire waveguides and fibers for terahertz applications [J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2021, 67(3): 100523.

[3] KATYBA G M, CHERNOMYRDIN N V, DOLGANOVA I N, et al. Step-index sapphire fiber and its application in a terahertz near-field microscopy [C]//Proceeding SPIE 11164, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XII. Strasbourg: SPIE 2019, 11164: 125-131.

[4] DOBROVINSKAIA E R. Sapphire: materials, manufacturing, applications[M]. London: Springer London, Limited, 2009: 5-10.

[5] WANG L J, HU Z W, CHEN Y, et al. Material removal mechanism of sapphire substrates with four crystal orientations by double-sided planetary grinding [J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 7813-7822.

[6] WANG S, ZHAO Q L, YANG X D. Surface and subsurface microscopic characteristics in sapphire ultra-precision grinding[J]. Tribology International, 2022, 174: 107710.

[7] LUO B, YAN Q S, PAN J S, et al. Influences of processing parameters on metal-bonded diamond wheel wear when grinding a sapphire wafer[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 113: 108275.

[8] CHENG J, WU J, GONG Y D, et al. Grinding forces in micro slot-grinding (MSG) of single crystal sapphire[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 112: 7-20.

[9] CHEN S S, CHEUNG C F, ZHANG F H. 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(5): 2715-2729.

[10] ZHANG J J, BING G, ZHANG J G. Simulation and experiments of material-oriented ultra-precision machining[M]. Singapore: Springer Singapore Pte., Limited, 2019: 201-236.

[11] REN Y H, LI C F, LI W, et al. Study on micro-grinding quality in micro-grinding tool for single crystal silicon [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42: 246-256.

[12] LI P, JIN T, XIAO H, et al. Effects of wheel speed on surface/subsurface damage characteristics in grinding of glass-ceramics[J].Ceramics International, 2020,46(11):17717-17728.

[13] GONG S Q, ZHU X M, SUN Y, et al. Experimental research on surface characteristics and subsurface damage behavior of monocrystal sapphire induced by helical micro abrasive tools[J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 21459-21472.

[14] SUN Y, SU Z P, JIN L Y, et al. Modelling and analysis of micro-grinding surface generation of hard brittle material machined by micro abrasive tools with helical chip pocket [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117242.

[15] LU Y J, LUO W, WU X Y, et al. Efficient and precise grinding of sapphire glass based on dry electrical discharge dressed coarse diamond grinding wheel[J]. Micromachines, 2019, 10(9): 1-13.

[16] ZHANG Y, GAO S, KANG R K, et al. Grinding performance of diamond grinding tools for sapphire crystal [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1017: 544-548.

[17] WAGER J G, GU D Y. Influence of up-grinding and down-grinding on the contact zone [J]. CIRP Annals, 1991, 40(1): 323-326.

[18] XIAO G J, SONG K K, LIU S, et al. Comprehensive investigation into the effects of relative grinding direction on abrasive belt grinding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 753-761.

[19] SETTI D, ARRABIYEH P A, KIRSCH B, et al. Analytical and experimental investigations on the mechanisms of surface generation in micro grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 149: 103489.

[20] LIU J D, YUAN W, XIONG J K, et al. Quality and control of grinding-hardening in workpieces[J]. Key Engineering Materials, 2012, 522: 87-91.

[21] KACZMAREK J. Principles of machining by cutting abrasion and erosion[M]. Warsaw: Peter Peregrinus Limited, 1976: 125-138.

[22] WEN Q L, ZHANG P C, CHENG G H, et al. Crystalline orientation effects on material removal of sapphire by femtosecond laser irradiation [J]. Ceramics International, 2019, 45(17): 23501-23508.