doi: 10.12052/gdutxb.230151

硬脆材料超精密磨削技术研究进展综述

夏江南，阎秋生，潘继生，雒梓源，汪　涛
（广东工业大学　机电工程学院, 广东　广州 510006）

摘要: 硬脆材料因其优异的物理与化学性质广泛应用于5G通讯、航空航天、电子电力等领域，高效率的超精密磨削技术是其加工流程中的重要一环。为了提高硬脆材料加工质量，需要对超精密磨削技术进行系统化的深入研究。本文从超精密磨削装备设计优化的角度出发，对自旋转磨削、双面磨削和磨抛一体化3种磨削方法的原理与机床设备进行了详细说明，介绍了超硬磨粒砂轮的制备、砂轮磨损检测与分析、砂轮修整技术的研究进展；从压痕/划痕实验、纳米磨削实验、模拟仿真分析3个角度对硬脆材料的磨削机理进行了深入探索；进一步总结了硬脆材料表面粗糙度及表面形貌、亚表面损伤、面形精度的控制方法。分析了硬脆材料超精密磨削的重点研究方向与发展趋势，为后续硬脆材料超精密磨削技术的研究提供了指导。

关键词: 硬脆材料；超精密磨削；磨削设备；磨削机理；表面质量
中图分类号: TG580　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1007–7162(2023)06–0032–12

State-of-the-art of Ultra-precision Grinding Technology for Hard and Brittle Materials

Xia Jiang-nan, Yan Qiu-sheng, Pan Ji-sheng, Luo Zi-yuan, Wang Tao
(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Hard and brittle materials are extensively utilized in various fields, such as 5G communication, aerospace, and electronic power, owing to their exceptional physical and chemical properties. High-efficiency ultra-precision grinding technology plays a crucial role in their processing. Conducting systematic and thorough research on ultra-precision grinding technology is essential to enhance the processing quality of these materials. A detailed description is presented for three grinding methods: self-rotating grinding, double-sided grinding, and grinding-polishing integration, from the perspective of designing and optimizing ultra-precision grinding equipment. Furthermore, research progress is introduced on the preparation, wear detection, and dressing of super-hard abrasive grinding wheels. A thorough analysis is also provided of the grinding mechanism of hard and brittle materials, considering aspects such as indentation and scratch, nano-grinding, and simulation analysis. The control methods for surface roughness, surface morphology, subsurface damage, and surface shape accuracy of hard and brittle materials are also summarized.

Key words: hard and brittle materials; ultra-precision grinding; grinding equipment; grinding mechanism; surface quality

科技的发展与技术革新对新材料的性质提出了更高的要求[1-2]。硬脆材料如光学玻璃[3-4]、半导体基片[5-6]、工程陶瓷[7]等由于具有高硬度、高耐磨性、低热膨胀系数、抗氧化性、抗腐蚀性等良好的物理与化学特性，广泛应用于航空航天、远距离通讯、高精度激光元件和电子信息等领域。然而正是因为这些特点，硬脆材料成为了典型的难加工材料，而且要应用于高新领域，需要通过超精密加工的手段使其达到纳

收稿日期： 2023-09-25
基金项目： 国家重点研发计划项目(2023YFE0204400)；国家自然科学基金资助项目(52075102)；广东省基础与应用基础研究项目(2023A1515010922)
作者简介： 夏江南(1999–)，男，硕士研究生，主要研究方向为光电晶片超精密磨削理论与技术等
通信作者： 潘继生(1980–)，男，教授，博士，主要研究方向为光学材料超精密加工、机械传动装置与高性能传动系统设计，E-mail：panjisheng@gdut.edu.cn

米级别的表面粗糙度，并要消除凹坑、划痕和表面/亚表面裂纹等缺陷[8]。目前，在诸多加工方法之中，超精密磨削技术以高效率、低成本的优点成为了硬脆材料加工中的重要一环[9-10]。

超精密磨削是以人造金刚石[11-13]、立方氮化硼[14-15]等超硬磨料砂轮为磨具对氧化铝、碳化硅等材料进行加工，以获得纳米级粗糙度表面的加工方法。随着对硬脆材料需求的大幅增加，如何快速获得高质量的材料表面成为研究的重点。为了提高加工效率、缩短工艺流程，以磨代研、以磨代抛、多主轴集成、磨抛一体化等想法不断被提出，给超精密磨削技术带来一次次革新与挑战。

本文围绕硬脆材料超精密磨削技术，介绍了目前主流磨削方法的原理及所使用磨床的特点，对超硬磨料砂轮的制备、检测与修整技术进行了详细说明；从不同研究方法的角度出发，系统地总结了目前各学者对硬脆材料的材料去除方式及表面层损伤机理的研究进展；最后对硬脆材料表面质量控制水平进行分析，指出目前研究中的不足并展望了未来发展趋势，为后续硬脆材料超精密磨削的研究提供指导。

1　硬脆材料磨削装备

1.1　超精密磨床

1.1.1　自旋转磨削

自旋转磨削[16-18]是目前较为成熟的一种硬脆材料磨削方法，可达到硬脆材料无表面/亚表面损伤、高面形精度、低表面粗糙度的要求，也常用于大尺寸晶圆背面快速减薄，其原理如图1所示。磨削时，工件吸附于多孔陶瓷真空吸盘上，随着旋转工作台做低速转动，杯形砂轮绕自身主轴做自旋转运动，同时进行轴向进给，实现材料去除。旋转工作台与杯形砂轮呈一定角度，实现半接触磨削，降低了磨削力与磨削温度，并且通过调整主轴角度能够控制被磨工件的表面形状，获得较高的面形精度。

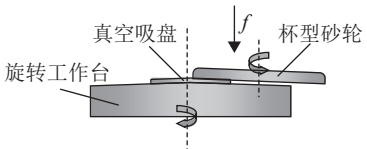


图 1　自旋转磨削原理示意图

Fig.1　The schematic diagram of self-rotating grinding principle

超精密磨床一般要求有高刚度的主轴与导轨系统、高定位精度与高稳定性，这是实现纳米磨削的必要条件。日本、德国、法国在超精密磨床的设计与研发领域处于领先状态，而我国尚处于起步阶段。如日本Lapmaster SFT Corp公司生产的立式旋轴超精密端面磨床DMG-6011V，该磨床由大刚度主轴系统、IPG在线测量厚度装置、旋转工作台与杯形砂轮等组成，能够高效率实现硬脆材料平整化加工，满足使用要求。

1.1.2　双面磨削

双面磨削[19-20]可同时对硬脆材料正反两面进行磨削加工，节省了二次装夹所耗费的时间，并且减少了面形误差，极大提高了加工效率，其原理如图2所示。磨削时，材料由送料盘夹持，两杯型砂轮位于送料盘两面平行放置，做相对旋转运动，通过轴向进给实现材料去除。

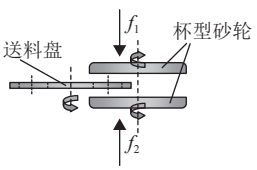


图 2　双面磨削原理示意图

Fig.2　The schematic diagram of double-sided grinding principle

法国Fives Group工业集团生产了立式双端面磨床VDD系列，该系列磨床有多种进给方式，如旋转进给方式、贯穿进给方式、摆动进给方式等，且可自动上下料，通过伺服控制修整定位，实现高精度、高效率磨削加工[21]。

1.1.3　磨抛一体化

随着工艺水平的进步，对加工的要求越来越高。为了实现硬脆材料的高效高质量加工，研究人员提出了磨抛一体化的思路。磨抛一体化主要运用了集成的思想，将磨削砂轮与抛光轮共同用于同一机床上。如温海浪等[22]提出了使用内外圈升降砂轮来实现磨抛一体化的方法，即在主轴位安装两个同心砂轮，外圈为抛光轮，内圈为磨削砂轮。通过砂轮高度切换，实现磨削–抛光工艺的转变。日本DISCO公司通过在磨床上集成抛光主轴并且添加多工位来实现磨抛一体化，以达到对材料高效高精度的自动化加工的要求，其原理如图3所示。

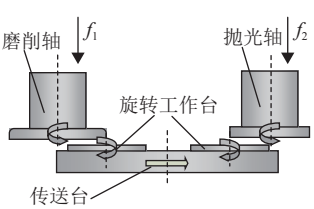


图 3　磨抛一体化原理示意图

Fig.3　The schematic diagram of grinding and polishing integration principle

日本DISCO公司生产的全自动晶圆磨抛机DGP8761集成了背面磨削与去应力加工，可实现粗磨、精磨与抛光3道工序，提高了加工效率[23]。

1.2 超硬磨料砂轮

1.2.1 砂轮制备

超硬磨料砂轮在硬脆材料磨削工艺中起着至关重要的作用，直接影响硬脆材料的磨削效果。以金属、陶瓷、树脂等作结合剂，以人造金刚石、立方氮化硼(Cubic Boron Nitride,CBN)为磨料的超硬磨料砂轮被广泛应用于超精密磨削中。图4为#325金属结合剂杯型金刚石砂轮，由铝合金基体与金刚石砂轮结块两大部分组成。

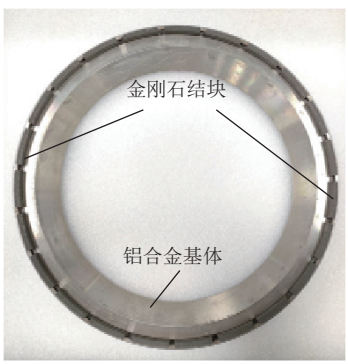


图4 #325金属结合剂金刚石砂轮

Fig.4 # 325 metal bond diamond grinding wheel

目前有关金刚石砂轮制备的研究主要集中在造孔剂、结合剂、添加剂等砂轮组织成分的优选，以及控制磨粒有序排布、刻划沟槽等砂轮表面微结构的设计[24]两大方面。Zhao等[14]制备了多孔金属结合剂CBN砂轮磨削Ti-6Al-4V合金，通过对磨削过程中孔隙率的检测，确定了CBN砂轮能够保证有足够的空间容纳磨屑与磨削液，砂轮有良好的自锐性，磨削材料后能得到较好的表面质量。轩闯等[25]制备了一种以空心氧化铝微球为造孔剂的陶瓷结合剂金刚石砂轮，通过测试其磨削性能，发现空心微球质量分数与粒径大小对砂轮的硬度与强度有较明显的影响。研究表明该砂轮能够对石英玻璃(SiO_2)表面进行磨削，磨削后其表面粗糙度由0.51 μm降低为0.02 μm。陈哲等[12]制备了树脂结合剂堆积磨料金刚石砂轮，对YG8硬质合金开展磨削研究，发现当金刚石磨粒堆积分数达到30%时，砂轮硬度最高，达到最佳磨削性能，比单颗磨粒金刚石砂轮磨削效率提高了40%。宋英桃等[26]采用化学镀覆的方法制备了金属–陶瓷复合结合剂金刚石砂轮，在没有破坏陶瓷结合剂砂轮整体结构的情况下，进一步提高了磨削性能。

张钰奇等[27]通过仿真优化制备了一种磨粒有序排布的金刚石砂轮，如图5所示，通过显微观察，发现磨粒出刃情况良好，磨粒呈一定规律有序分布。滕世国等[28]通过脉冲激光烧蚀砂轮结块表面，制备出梯形沟槽和直角沟槽两种砂轮，通过对比普通砂轮，发现结构化砂轮的磨粒破碎和脱落的情况明显减少(见图6)，结果表明微结构有利于提高砂轮的磨削性能，降低磨削损耗。Wu等[29]使用脉冲激光在金刚石砂轮表面生成了形状精度高、侧壁倾角小的微结构，使用该砂轮磨削SiC后发现材料脆性去除得到抑制，裂纹数量减少，获得了纳米级别表面粗糙度。Guo等[30]使用纳秒脉冲激光在金刚石砂轮表面烧蚀出不同深度的连续微凹槽，制备成一种新型微结构砂轮用于光学玻璃磨削，实验表明微结构砂轮有较好的容屑效果，磨削过程中的法向力和切向力显著降低，磨粒尖端和微结构侧边缘均出现了磨平痕迹，证实微结构在磨削过程中起到了有效作用。



图5 金刚石砂轮表面形貌[27]

Fig.5 Surface morphology of diamond grinding wheel

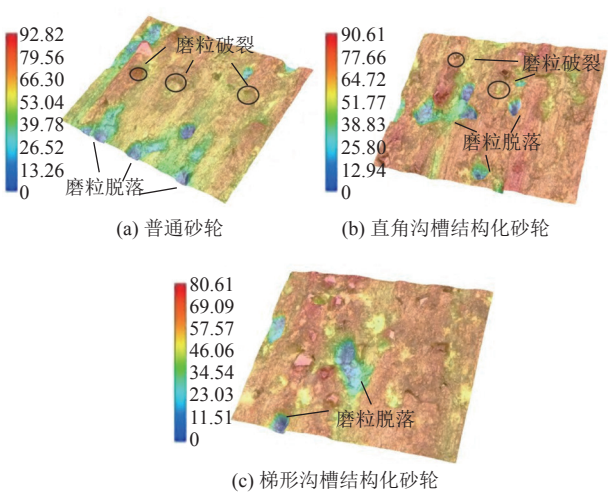


图6 3种金刚石砂轮磨损对比[28]

Fig.6 Comparison of three kinds of diamond grinding wheel wear

1.2.2 砂轮磨损检测与分析

在磨削过程中，砂轮的磨损对硬脆材料表面质量会有较大的影响，因此各学者对砂轮磨损过程、磨损机理等进行了持续探索。研究砂轮表面形貌，不可

避免需要用到检测设备，检测主要分为直接检测和间接检测两大类，直接检测既包括使用微型探针接触、划刻等接触式检测，也包括使用高清显微镜、激光共聚焦显微镜、白光干涉仪和扫描电子显微镜等非接触式检测；间接检测主要是利用力、温度、声信号等指标[31-32]间接反映砂轮磨削情况。

Luo等[33]研究了金属结合剂金刚石砂轮在磨削蓝宝石过程中的磨损机理，发现在磨削过程中砂轮存在缓慢磨损—快速磨损—缓慢磨损—稳定磨损4个阶段，金刚石磨粒以磨耗磨损为主，局部区域出现磨粒破碎、脱落的现象，磨削量达到240 μm时，砂轮需要进行修整以恢复磨削性能。张红轩等[34]使用高速横向减薄机，研究了树脂结合剂金刚石砂轮的磨损过程，使用高清显微镜在位跟踪检测砂轮磨粒状态。研究发现，砂轮主要有磨耗磨损、黏附磨损、磨粒破碎、磨粒脱落4种磨损形式，随着磨削的进行，磨损形式由以破碎磨损为主慢慢变为以黏附磨损、磨粒脱落为主。Seongkyul等[35]提出了利用边缘衍射效应的非接触式检测方法，在线监测砂轮磨损量，观察砂轮表面磨粒状态，实时对磨削工艺进行补偿修正。汪旋等[36]设计了温度采集系统，通过标定K型热电偶采样模块收集砂轮磨削温度实现砂轮磨损在线监测，确定砂轮失效时的温度阈值为171 °C。Chen等[37]建立了旋转声发射在线监测系统，通过对加工过程的实时监测，矫正砂轮垂直方向位置误差，提高了加工效率。石建等[32]通过磨削力与声发射(Acoustic Emission，AE)信号相结合的方法，对磨削过程中砂轮磨损情况进行检测，通过神经网络算法识别，准确率达到98%以上。母德强等[38]提出了一种基于激光三角法原理的砂轮磨损量检测方法(见图7)，对砂轮磨损量进行非接触式检测，可实现大范围、低误差的整周期测量。

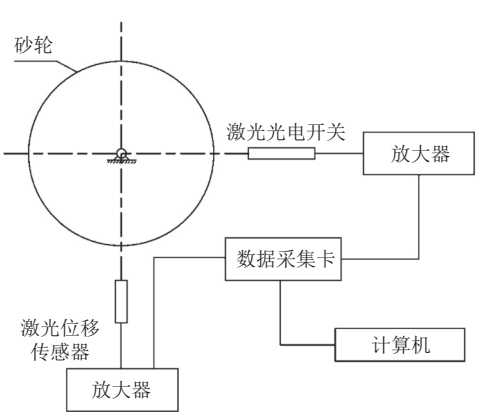


图 7　砂轮磨损量检测系统原理图[38]

Fig.7　Grinding wheel wear detection system schematic diagram

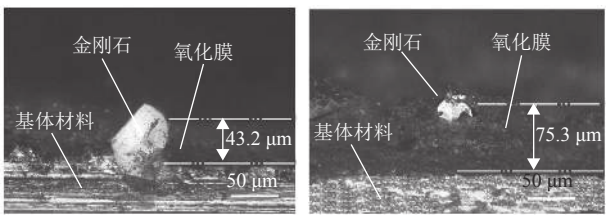
1.2.3　砂轮修整技术

为了保证磨削效率和磨削质量，需要对超硬磨粒砂轮进行修整，去除磨粒外包裹的结合剂，使其露出锋利的刃角，并提高砂轮尺寸精度与轮廓精度。而由CBN、金刚石等磨粒制成的砂轮硬度高，修整难度较大，选取合适的修整方法极其重要[39]。

机械修整法由于其便捷且低成本的优点是最常用的修整方法[40-41]。机械修整法主要包括单点金刚石笔车削修整[42-43]、通过磨石等修整工具的磨削修整[44]以及金刚石滚轮修整[45]。Zhou等[44]提出了一种绿碳化硅滚磨修整金刚石砂轮的方法，建立了运动学轨迹模型，修整后砂轮跳动误差大幅降低，面形误差峰谷值（Peak to Valley，PV）和均方根（Root Mean Square，RMS分别降到3.50 μm和0.60 μm。吴玉厚等[46]提出了一种针对大直径凸弧金刚石砂轮的修整方法，利用凸弧修整轮与砂轮磨粒之间产生的挤压微磨削作用修整砂轮，通过实验表明，该修整方法可以实现金刚石砂轮精密修整，修整后金刚石砂轮的磨削性能得到大幅提升。梁志强等[47]提出了一种碳化硅修整轮切向磨削修整方法，对微结构磨削中金刚石砂轮尖端进行修整，使树脂和金属结合剂金刚石砂轮的尖端圆弧半径分别达到3.5 μm和2.0 μm，获得了较好的修整效果。Wang等[48]研究了电镀金刚石修整轮修整弧形金刚石砂轮的修整效果，发现修整轮的粒径是影响砂轮修整精度的关键因素，使用粒径为213 μm的修整轮将弧形金刚石砂轮的径向跳动误差与截面弧轮廓误差分别降低到1.9 μm和10 μm，磨粒出刃情况良好，显著提高了砂轮的磨削性能。

除传统机械修整方法外，各种先进修整技术逐渐被开发。Guo等[49]提出了一种使用脉冲激光修整V型电镀CBN砂轮的方法，通过实验证明激光修整时的磨削力与修整后砂轮表面粗糙度均低于传统的机械修整方法，且达到同样修整效果所需时间大幅降低。Yang等[50]使用激光辅助超声振动修整技术修整CBN砂轮，实验发现通过增加激光功率等能够降低修整力，且修整后砂轮磨粒出刃高度基本一致，具有良好的磨削效果。伍俏平等[51]将碳纳米管添加到电解液中，使用电解在线修整(Electrolytic In-process Dressing，ELID)的方法对钎焊金刚石砂轮进行修整，实验发现使用含有碳纳米管的电解液电解砂轮后，砂轮表面磨损的磨粒被疏松氧化层覆盖(见图8)，使其在磨削过程中易于脱落，砂轮自锐性提高。单子昭等[52]研究了不同放电介质下电火花修整金属结合剂金刚石砂轮的修整效果，发现使用二氧化硅粉末的

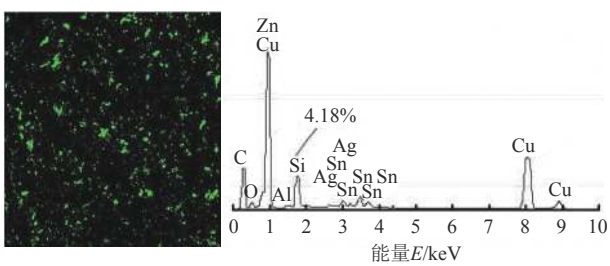
混粉电火花修整砂轮后，砂轮表面磨粒出刃高度增加，整体较为平整，表面硅元素含量升高(见图9)，耐磨性更好。



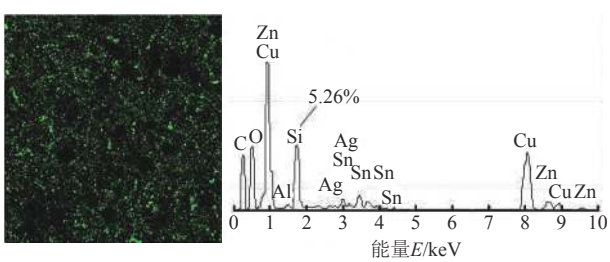
(a) 无碳 (b) 含碳

图 8 有无碳纳米管的电解液生成氧化膜厚度[51]

Fig.8 The thickness of oxide film formed by electrolyte with or without carbon added nanotubes



(a) 修整前砂轮表面Si元素分布与含量



(b) 修整后砂轮表面Si元素分布与含量

图 9 砂轮混粉修整前后其表面Si元素的分布与含量[52]

Fig.9 Distribution and element content of Si of grinding wheel before and after EDD under condition

综上所述，磨削装备是研究磨削过程的基础，是技术研发的核心所在，此方面日本、德国和法国较为领先，国内尚处于起步阶段。超精密磨床未来的研发将朝着增加系统精度与稳定性、提高集成度与自动化水平的方向发展。超硬磨料砂轮需要详细研究结合剂种类和砂轮微结构对不同硬脆材料的具体影响，进一步优化砂轮磨损检测与修整的方法，提高磨削水平。

2 硬脆材料磨削机理

研究硬脆材料的材料去除方式与表面层损伤机理对实际加工有重要的指导意义。1991年，Bifano等[53]提出了延性域磨削这一概念，即脆性材料在特定情况下能实现塑性去除，并给出计算材料临界切削深度的数学公式，使得磨削机理的研究进入到新的领域。之后，各国学者从不同角度对硬脆材料超精密磨削机理进行探索，大体分为3个方向：压痕/划痕实验、纳米磨削实验、模拟仿真分析。

2.1 压痕/划痕实验

研究者使用单颗磨粒等对硬脆材料开展实验，分析磨削机理。Ge等[54]通过纳米压痕/划痕技术确定了单晶硅(Si)实现脆−塑转变的临界法向力为26 mN，通过控制法向力的大小，能实现单晶Si的无裂纹线锯切割。潘继生等[55]设计了6H-SiC纳米压痕/划痕实验，发现在磨粒的作用下SiC存在5种不同的材料去除形式(见图10)，其中发生脆−塑转变的临界载荷为63 mN。段念等[56]采用不同尖端圆角半径的金刚石磨粒划擦单晶SiC，发现材料去除方式主要由微裂纹与切向滑移组成，随着圆角半径的增大，在脆性去除区域的微裂纹逐渐扩展从而产生崩碎(见图11)。Guo等[57]通过单晶AlN压痕实验，发现该材料中存在尺寸诱导的脆塑性转变，通过扫描电子显微镜（Scanning Electronic Microscopy，SEM）与透射电子显微镜（Transmission Electron Micros TEM）表征，发现该转变与位错、滑移、微裂纹扩展有关。Meng等[58]采用纳米划痕的方法在6H-SiC表面进行实验，在透射显微镜的检测下，发现了划痕底部表面下存在非晶相，推测SiC的塑性去除是由位错、滑移以及高压非晶相变组合而成。

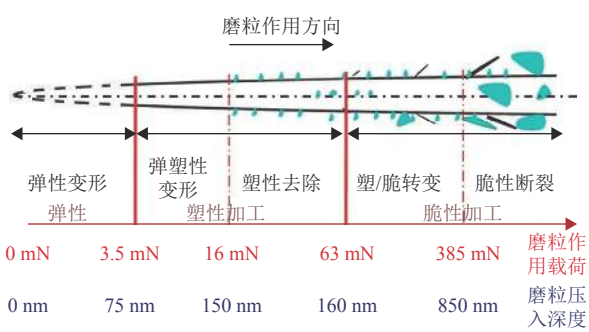


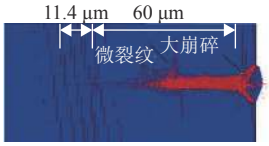
图 10 6H-SiC 5种材料去除方式图[55]

Fig.10 Five material removal methods for 6H-SiC

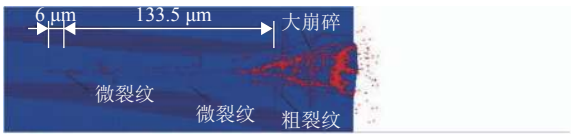
2.2 纳米磨削实验

单颗磨粒对硬脆材料的压痕/划痕实验简洁明了地展示了材料去除方式。但在实际磨削时条件更加复杂，由压痕/划痕实验得出的结论未必能直接挪用，因此，更多学者采用磨削实验的方法对硬脆材料的磨削机理展开研究。

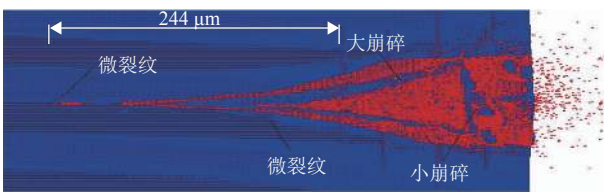
Yan等[59]使用#325金属结合剂金刚石砂轮对6H-SiC开展磨削实验，通过OLS4000激光共聚焦显微镜



(a) 尖端圆角半径为0.02 mm



(b) 尖端圆角半径为0.08 mm



(c) 尖端圆角半径为0.20 mm

图 11　圆角半径不同的磨粒划擦SiC的表面形貌图[56]

Fig.11　The surface topography of SiC scratched by abrasive particles with different fillet radius is obtained.

检测SiC表面形貌，采用解理截面法对SiC亚表面损伤进行检测，研究表明当磨粒切削深度较大时，SiC表面多为凹坑、沟壑和破碎块，亚表面中位裂纹和横向裂纹多而深，表面粗糙度值较大，脆性去除占主要成分；当磨粒切削深度减小，磨削表面的破碎、凹坑等脆性去除痕迹减少，以耕犁等塑性去除为主，表面粗糙度大幅降低。吴柯等[60]使用不同粒度的金刚石砂轮磨削蓝宝石，发现保持其他工艺参数不变，#325砂轮磨削蓝宝石是以脆性断裂的方式去除材料；#500砂轮以脆性−塑性相结合的方式去除材料；#1000砂轮以犁耕、划擦等塑性流动方式去除材料，实现了延性域磨削。周云光等[61]使用电镀金刚石砂轮对SiC进行磨削实验，结果表明材料去除形式以裂纹扩展形成的脆性断裂为主，磨削划痕、沟槽等塑性去除痕迹较少。Gao等[62]通过纳米磨削实验对β-Ga_2O_3晶体展开研究，发现塑性去除由位错、层错、纳米晶、纳米孪晶等损伤构成，且使用细粒度砂轮时能够减小纳米晶层厚度，产生容易去除的非晶层，表面质量提高，为后续抛光工艺打下良好基础。Li等[63]研究了SiC陶瓷超声振动辅助磨削机理，借助扫描电镜等测量出SiC陶瓷脆−塑转变临界深度为76.304 nm，通过与机械磨削对比发现，加入超声振动后，材料表面脆性破坏减少、塑性去除增多，说明加入超声振动更容易满足延性域磨削的条件。Chen等[64]进一步通过实验分析了超声振动辅助磨削蓝宝石的机理，发现当超声波方向平行于蓝宝石表面时，材料去除以划擦等塑性去除为主；当超声波方向垂直于蓝宝石表面时，由于超声波冲击作用，蓝宝石表面/亚表面裂纹快速扩展，材料以脆性破坏的方式被去除，加工效率更高，但表面质量较差。纳米磨削实验从宏观视角分析了材料去除机理，但仍旧难以对加工瞬态过程进行观察分析。

2.3　模拟仿真分析

随着计算机技术的不断发展，数字模拟的仿真分析方法被广泛使用。吴焕杰等[65]通过有限元仿真建模研究了SiC陶瓷的磨削过程，仿真结果表明在磨削时，材料以脆性和塑性方式去除，脆性去除部分受到摩擦、切削两种力，塑性去除则是多出一种犁削力。蒋培军等[66]以有限元分析的方法对工件表面/亚表面的温度场进行模拟，温度匹配法建立的热源模型优于瑞利热源模型，仿真结果与实验结果一致，磨削温度随距离表面深度的增加而降低(见图12)，磨削烧伤深度范围为0~0.75 mm。Xiao等[67]通过分子动力学仿真(Molecular Dynamics，MD)的方法研究了6H-SiC的延性域去除机理，发现塑性去除是位错与相变的结合。Zhang等[68]使用MD仿真分别研究了GaN的N面与Ga面在纳米磨削中表现出的特性，发现磨削后N面位错与相变数多于Ga面，且磨削温度更高。邱鸿晶等[69]以MD仿真为手段研究了SiC的延性域磨削机理，发现在磨削时金刚石磨粒对SiC表面原子产生挤压作用导致了晶格变形，随着变形进一步扩大，SiC原子键断裂，实现延性域去除，如图13所示。比起磨削实验，仿真分析能更好地观察磨削时的瞬态过程，便于直观分析材料去除机理，但在实际加工环境多变、材料自身的组分结构复杂时，仿真的准确性以及适用性需要仔细考量。

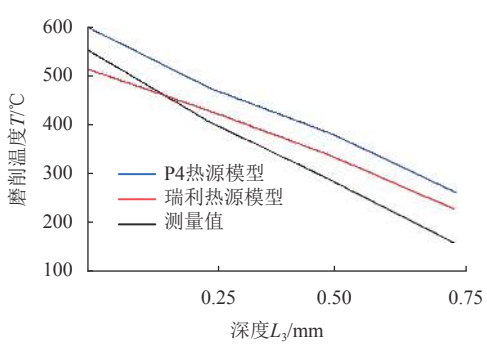


图 12　磨削温度随深度变化对比图[66]

Fig.12　Grinding temperature changing with depth

综上所述，各学者通过纳米压痕/划痕实验、纳米磨削实验、模拟仿真3个方向对磨削机理展开深入研究。发现硬脆材料在超精密磨削过程中，表面层损伤方式由位错、滑移和微裂纹扩展等组成，通过降低

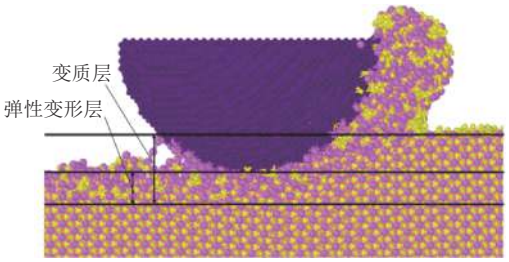


图13 磨削SiC仿真结果[69]

Fig.13 Simulation results of grinding SiC

磨粒切削深度，能够将材料去除方式由脆性去除转变为塑性去除，大幅提高表面质量。但在实际磨削时受到材料类型和磨粒状态等因素的影响，容易出现实验结果偏差，需要不断改进实验流程、提高仿真水平，以便进一步向实际磨削过程靠拢，优化材料去除模型，准确预测不同材料的脆–塑转变临界切削深度。

3 硬脆材料磨削表面质量控制

3.1 表面粗糙度及表面形貌

表面粗糙度及表面形貌是评价硬脆材料超精密磨削表面质量的重要指标。磨削方法、磨削工艺及磨具类型等均对磨削效果有较大影响。姚松林等[70]借助仿真手段研究了超声振动辅助磨削对材料表面粗糙度的影响。发现当对砂轮施加轴向超声振动后，材料表面粗糙度明显降低，说明超声振动辅助磨削的方法比普通磨削效果更优。进一步研究不同工艺参数发现，增大超声振动幅度、扩大频率、提高主轴转速、降低磨削深度和进给速度均能降低材料表面粗糙度。Sun等[71]使用旋转超声振动辅助垂直磨削与平行磨削对非球面玻璃陶瓷进行加工，发现玻璃陶瓷在垂直磨削后其表面轮廓总高度P_t与RMS值远低于平行磨削，而表面粗糙度算术平均高度S_a与轮廓最大高度S_z只略高于平行磨削，说明垂直磨削的方法比平行磨削更加适合非球面玻璃陶瓷的高效加工。Yin等[72]通过超精密磨削的方法加工熔融石英薄壁管状光学元件，轮廓精度PV达到1.6 μm，线粗糙度算术平均高度(Arithmetic mean roughness R_a)降至10 nm。Pan等[73]研究了不同磨削参数对单晶SiC表面粗糙度的影响，发现改变进给速度对磨削后SiC表面粗糙度影响最大，砂轮转速其次，工件盘转速的影响最小，且晶片表面的粗糙度分布存在一定的规律，从中心到边缘表面粗糙度整体呈上升趋势。表面形貌变化规律与粗糙度值一致，高进给速度下主要为脆性破坏，表面遍布破碎块，凹坑和沟壑深度较大；在降低进给速度后，塑性去除占主要部分，凹坑和沟壑的数目减少，深度减小。通过正交试验优化工艺参数，最终获得了粗糙度R_a为12 nm的光滑表面。王紫光等[74]研究了#5000、#8000、#30000陶瓷结合剂金刚石砂轮磨削单晶Si的表面质量，发现随着砂轮目数增大，磨削后Si片表面粗糙度值逐渐降低，R_a值依次为14，7，5 nm，表面质量得到改善。Luo等[33]使用#325金属结合剂金刚石砂轮对蓝宝石开展实验，研究发现磨削量对蓝宝石的表面粗糙度也有一定的影响，随着磨削量的增大表面粗糙度先降低后升高，当磨削量为200 μm时，表面粗糙度最低，达到0.168 μm。

磨削时工件表面会产生规律的磨削纹路，对表面质量有较大影响。Huo等[75]研究了磨削Si片表面磨纹的形成机理，即杯型金刚石砂轮的轴向跳动使得材料无法被均匀去除，产生了规律的磨削纹路，并提出了一种通过控制砂轮主轴与工件盘转速比的方法来抑制磨纹的产生。王建彬等[76]通过仿真分析发现单颗磨粒在一个周期内产生的磨纹数目为工件盘转速n_2与砂轮转速n_1之比后不可再约分的分母。因此，改变砂轮与工件的转速比能够有效控制磨纹数量与磨纹密度(见图14)。进一步实验表明，磨削后晶片表面的磨纹由中心向四周发散，且磨纹数量越多、磨纹密度越大，晶片表面粗糙度值越低，如图15所示，中心区域磨纹密度大于边缘区域，表面粗糙度S_a为11.43 nm，小于边缘区域的16.02 nm。

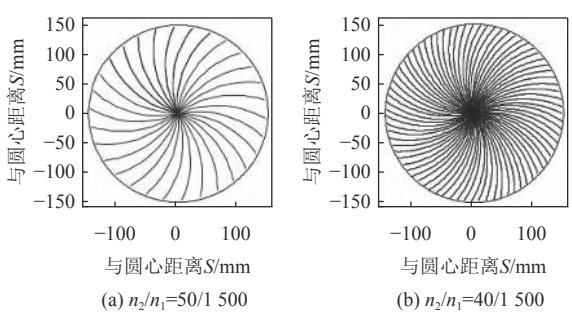


图14 在不同转速比条件下的表面宏观纹理图[76]

Fig.14 Surface macro texture map under different speed ratio conditions

3.2 亚表面损伤

硬脆材料磨削过程中极易产生亚表面损伤，需要通过后续研抛等手段去除，不但提高了加工成本，而且会对材料性能有严重的负面影响，因此，各学者针对此问题展开了深入探索。田海兰等[77]通过仿真与实验相结合的手段对单晶Si纳米磨削亚表面损伤形成机理展开分析，并且提出了相应的抑制策略。单晶Si纳米磨削后亚表面损伤主要由结构相变和非晶化引起，通过降低磨削深度(见图16(a))，增大砂轮转速(见图16(b))能有效降低亚表面损伤层厚度。宋健

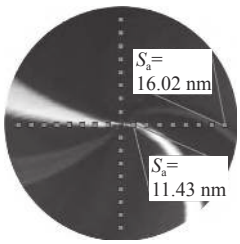


图 15　晶片不同位置的表面粗糙度[76]

Fig.15　Surface roughness at different positions of the wafer

等[78]通过分子动力学仿真的方法，对单晶GaN的亚表面损伤成因进行分析，发现亚表面层缺陷主要由层错、位错和相变组成(见图17)。戴剑博等[79]研究了高速磨削对多晶SiC亚表面损伤的影响机制，实验表明提高磨削速度对降低亚表面裂纹损伤深度有显著作用，当磨削速度由20 m/s提高至160 m/s时，亚表面损伤深度由12.1 μm降至6 μm。高尚等[80]研究了不同粒度的金刚石砂轮对磨削石英玻璃的亚表面损伤影响机制，发现亚表面损伤深度随着磨粒粒径的减小而降低。当材料被脆性去除时，亚表面损伤主要表现为微裂纹；当材料被塑性去除时，亚表面损伤主要表现为塑性变形。

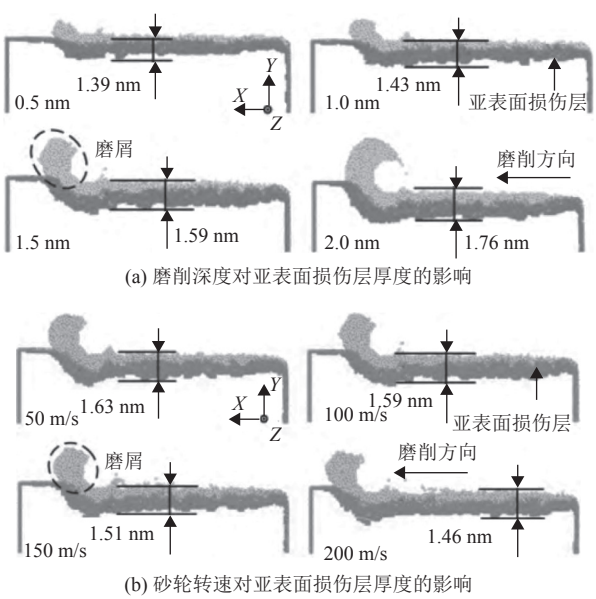


图 16　单晶Si不同条件下亚表面损伤层厚度变化[77]

Fig.16　Thickness variation of subsurface damage layer of single crystal Si under different conditions

3.3　面形精度

硬脆材料的面形精度是影响其应用的重要因素之一。王丽娟等[81]通过双面磨削对蓝宝石衬底进行研究，发现随着磨削压力的增加，蓝宝石的总厚度偏差（Total Thickness Variation，TTV）值逐渐升高，在较低的磨削压力(22.5 kPa)下，能够获得较优的面形

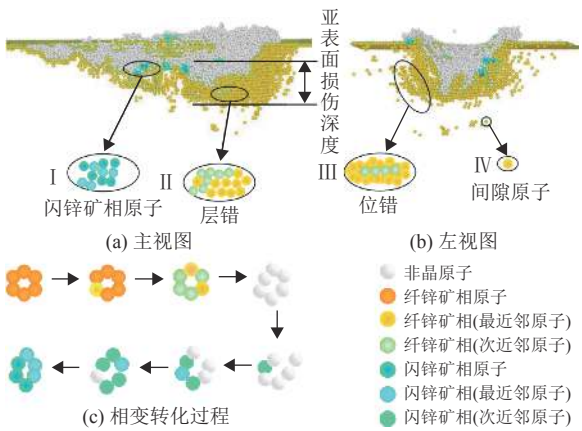


图 17　单晶GaN亚表面损伤组成[78]

Fig.17　Subsurface damage composition of single crystal GaN

精度。自旋转磨削可以通过调整主轴角度来实现对工件面形精度的准确控制。刘子阳等[82]分析了晶圆自旋转磨削过程中TTV值产生的原因，提出了不同情况下TTV值的调整方法，通过调整主轴与承片台的角度，将直径300 mm晶圆的TTV值控制在了3 μm以内。田业冰等[83]对硅片自旋转磨削时面形控制开展了研究，发现硅片磨削时主轴偏角和真空吸盘修整时主轴偏角是影响硅片磨削面形的主要因素。Gao等[84]研究了自旋转磨削真空吸盘的修整形状对于晶片面形的影响规律，通过理论分析与实验验证，发现真空吸盘修整形状受修整装置和修整参数的影响，可以通过调整砂轮主轴角度，控制真空吸盘表面形状，进一步调整晶片面形精度。姚卫华等[85]借助仿真手段研究了影响晶圆留边磨削面形精度的因素，建立了晶圆面形模型，提出了降低磨削残留高度与调整砂轮轴倾角来控制晶圆面形精度的方法。

综上所述，现阶段对于硬脆材料表面质量的影响因素与控制方法的研究均取得了一定的成果，建立了相关的理论预测模型。但实际工况十分复杂，除去机床精度与砂轮质量的影响，材料自身的属性也有明显差异，仍需要深入研究各因素对硬脆材料表面质量的影响规律，便于应对各种复杂工况。

4　结论

本文以硬脆材料超精密磨削为主题，分别对磨削装备、磨削机理和表面质量控制进行了综述，得出以下结论。

(1) 超精密磨床、超硬磨料砂轮等超精密磨削装备是实现超精密磨削的必要条件，直接决定了硬脆材料加工质量的上限。日本、法国、德国等在此方面处于世界领先地位，而国内尚处于起步阶段。超精密

磨床以加工效率为优化标准，由单轴自旋转磨削，向着多轴、磨抛一体化等发展。超硬磨料砂轮制备工艺较为成熟，目前更多学者将目光聚焦在砂轮组分优化与微结构设计两方面。砂轮磨损检测与砂轮在线修整也是研究的一大重点。

(2) 以磨削的方法加工硬脆材料，效率很高，但材料表面质量无法保证，而延性域磨削的深入研究改变了这一现状。硬脆材料在特定条件下能够由脆性去除转变为塑性去除，表面质量得到质的提升，易实现低损伤/无损伤纳米磨削，极大地节省了后续抛光工艺时间，降低了加工成本。未来研究重点依旧是围绕如何实现延性域磨削这一关键问题，希望能更加准确地计算不同硬脆材料延性域磨削的临界转变值，继续优化数学模型与仿真模型，以便应对复杂的实际情况。

(3) 表面粗糙度及表面形貌、亚表面损伤、面形精度是评价硬脆材料表面质量的重要指标。超精密磨床的精度、超硬磨粒砂轮的属性、磨削的工艺参数均对加工质量有较大影响。目前控制硬脆材料表面质量的研究主要集中于以下3个方面：改变砂轮的组织与结构，如制备超细粒度砂轮、设计不同的磨粒排布结构、使用软磨料砂轮；通过实验与仿真的手段调整砂轮转速、工件盘转速和进给速度等工艺参数，以实现延性域磨削；开发磨削新技术或将其他技术与磨削相整合，如高速超高速磨削、超声振动辅助磨削、激光辅助磨削等。这3个方向也将是各学者在未来很长一段时间的研究重点。

参考文献：

[1] 宿彦京, 杨明理, 祝伟丽, 等. 新材料研发智能化技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 161-169.
SU Y J, YANG M L, ZHU W L, *et al*. Development of key technologies for intelligent research and development of new materials [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 161-169.

[2] ESWARAPPA P S, POLLOCK T M, RAABE D, *et al*. Materials for extreme environments [J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(2): 81-88.

[3] 王丽荣, 石澎. 精密模压用低熔点光学玻璃的发展概况[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2022, 50(7): 1-13.
WANG L R, SHI P. Development of low-melting optical glass for precision molding [J]. Glass & Enamel, 2022, 50(7): 1-13.

[4] 王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. 应用光学, 2005(5): 61-66.
WANG Y X. Development and applications of optical glasses [J]. Journal of Applied Optics, 2005(5): 61-66.

[5] GUPTA C, PASAYAT S S. Vertical GaN and vertical Ga_2O_3 power transistors: status and challenges [J]. Physica Status Solidi (A), 2022, 219(7): 2100659.

[6] MANE S. Semiconductor technologies [J]. International Journal of All Research Education and Scientific Methods, 2022, 10: 76-82.

[7] LAKHDAR Y, TUCK C, BINNER J, *et al*. Additive manufacturing of advanced ceramic materials [J]. Progress in Materials Science, 2021, 116: 100736.

[8] 潘继生, 阎秋生, 路家斌, 等. 集群磁流变平面抛光加工技术[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 205-212.
PAN J S, YAN Q S, LU J B, *et al*. Cluster magnetorheological effect plane polishing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 205-212.

[9] BRINKSMEIER E, MUTLUGÜNES Y, KLOCKE F, *et al*. Ultra-precision grinding [J]. CIRP Annals, 2010, 59(2): 652-671.

[10] 王盛, 赵清亮, 王生, 等. 蓝宝石复杂表面光学元件精密–超精密磨削机理及关键技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 69-80.
WANG S, ZHAO Q L, WANG S, *et al*. Research progress on precision and ultra-precision grinding mechanism and key technology on sapphire optical elements with complex surface [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 69-80.

[11] 郭泫洋, 徐钰淳, 曹剑锋, 等. 金属结合剂金刚石砂轮表面微槽的激光修整技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(3): 364-372.
GUO X Y, XU Y C, CAO J F, *et al*. Laser dressing technology for micro-grooves on the surface of metal-bonded diamond wheels [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(3): 364-372.

[12] 陈哲, 陈春晖, 刘一波, 等. 树脂结合剂金刚石堆积磨料砂轮磨削YG8硬质合金[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(6): 25-30.
CHEN Z, CHEN C H, LIU Y B, *et al*. Grinding YG8 cemented carbide with resin bond grinding wheels made of diamond agglomerate abrasive [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(6): 25-30.

[13] 丁玉龙, 苗卫鹏, 骆苗地, 等. 陶瓷结合剂金刚石砂轮组织结构对其性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 19-23.
DING Y L, MIAO W P, LUO M D, *et al*. Influence of structure of vitrified bond diamond grinding wheel on its performance [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 19-23.

[14] ZHAO B, DING W, XIAO G, *et al*. Effects of open pores on grinding performance of porous metal-bonded aggregated cBN wheels during grinding Ti–6Al–4V alloys [J]. Ceramics International, 2021, 47(22): 31311-31318.

[15] ZHANG C, QU S, XI W, *et al*. Preparation of a novel vitrified bond CBN grinding wheel and study on the grinding performance [J]. Ceramics International, 2022, 48(11): 15565-15575.

[16] 郭东明, 康仁科. 硅片的超精密磨削理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.

[17] TAO H, LIU Y, ZHAO D, *et al*. Prediction and measurement for grinding force in wafer self-rotational grinding [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 258: 108530.

[18] TAO H, LIU Y, ZHAO D, *et al*. The material removal and surface generation mechanism in ultra-precision grinding of silicon wafers [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 222: 107240.

[19] NIKITINA I P, POLYAKOV A N. Improving thermal characteristics of double-sided face grinding machines[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 112-121.

[20] NIKITINA I P, POLYAKOV A N. Experimental study of double-sided face grinding machine tool [J]. Journal of physics. Conference series, 2019, 1399(4): 44026.

[21] FIVES. Product information[EB/OL]. (2023-05-28) [2023-08-28]. https://www.fivesgroup.com/high-precision-machines/grinding-technologies/surface/vdd-305/355/455/510/585/576

[22] 温海浪, 陆静, 李晨, 等. 大尺寸单晶金刚石磨抛一体化加工研究[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(5): 941-947.
WEN H L, LU J, LI C, *et al*. Integrated processing of grinding and polishing for large-size single crystal diamond [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2022, 51(5): 941-947.

[23] DISCO. Product information[EB/OL]. (2023-07-05) [2023-08-28]. https://www.disco.co.jp/eg/products/polisher_etcher/dgp8761.html.

[24] 郭兵, 张庆贺, 郭振飞, 等. 基于结构化砂轮的结构表面高效精密磨削技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 50-59.
GUO B, ZHANG Q H, GUO Z F, *et al*. Research on high-efficiency precision grinding of structured surfaces basedon structured grinding wheels [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 50-59.

[25] 轩闯, 王超超, 白福厚, 等. 基于空心氧化铝微球造孔的陶瓷结合剂金刚石砂轮[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(4): 442-448.
XUAN C, WANG C C, BAI F H, *et al*. Vitrified bond diamond grinding wheel based on hollow corundum microspheres [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(4): 442-448.

[26] 宋英桃, 侯永改, 李文凤, 等. 镍磷对陶瓷-金属结合剂性能与结构的影响[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(11): 2130-2134.
SONG Y T, HOU Y G, LI W F, *et al*. Effect of Ni-P on properties and structure of ceramic-metal bond [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(11): 2130-2134.

[27] 张钰奇. 磨粒有序排布金刚石砂轮研制及其性能分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.

[28] 滕世国, 张松辉, 张晓红, 等. 不同结构化金刚石砂轮磨削碳化硅陶瓷的试验研究[J]. 工具技术, 2021, 55(8): 38-43.
TENG S G, ZHANG S H, ZHANG X H, *et al*. Experimental study on grinding SiC ceramics with different structured diamond wheels [J]. Tool Engineering, 2021, 55(8): 38-43.

[29] WU M, GUO B, ZHAO Q, *et al*. High efficiency precision grinding of micro-structured SiC surface using laser micro-structured coarse-grain diamond grinding wheel [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019, 6(3): 577-586.

[30] GUO B, WU M, ZHAO Q, *et al*. Improvement of precision grinding performance of CVD diamond wheels by micro-structured surfaces [J]. Ceramics International, 2018, 44(14): 17333-17339.

[31] 母德强, 张发奎, 赵世彧, 等. 基于差压技术的砂轮磨损量检测研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(2): 79-81.
MU D Q, ZHANG F K, ZHAO S Y, *et al*. Research on test of grinding wheel wear based on differential pressure technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(2): 79-81.

[32] 石建, 丁宁. 基于声发射技术的砂轮磨损状况在线检测[J]. 长春大学学报, 2013, 23(8): 931-936.
SHI J, DING N. On-ine detection of the state of grinding wheel wear based on acoustic emission technique [J]. Journal of Changchun University, 2013, 23(8): 931-936.

[33] 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.

[34] 张红轩, 阎秋生, 陈海阳. 树脂结合剂金刚石砂轮磨削蓝宝石的磨损过程研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(1) : 1-4.
ZHANG H X, YAN Q S, CHEN H Y, Experimental study of resin-bonded diamond wheel wear in grinding of sapphire[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(1) : 1-4.

[35] JEON S, ZOLFAGHARI A, LEE C. Dicing wheel wear monitoring technique utilizing edge diffraction effect [J]. Measurement, 2018, 121: 139-143.

[36] 汪旋. 基于磨削温度的砂轮磨损状态在线监测技术研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.

[37] CHEN B, GUO B, ZHAO Q. Online monitoring of truing arc-shaped diamond wheel by acoustic emission signal [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:Journal of Engineering Manufacture, 2018, 232(8): 1484-1490.

[38] 母德强, 郑金涛, 司苏美, 等. 基于激光三角法的砂轮磨损量检测[J]. 长春工业大学学报, 2021, 42(3): 200-204.
MU D Q, ZHENG J T, SI S M, *et al*. Research on wear measurement of grinding wheel based on laser triangulation [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2021, 42(3): 200-204.

[39] GUO B, ZHAO Q. Ultra-precision machining of hard and brittle materials with coarse-grained grinding wheels[C]// Zhang J, Guo B, Zhang J. Simulation and experiments of material-oriented ultra-precision machining. Singapore:

Springer Singapore, 2019: 201-236.

[40] 焦锋, 李成龙, 牛赢, 等. 砂轮修整技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20): 2435-2448.
JIAO F, LI C L, NIU Y, *et al*. Review and prospect of grinding wheel dressing technique [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(20): 2435-2448.

[41] 王楠. 磨削机床砂轮修整专利技术分析[J]. 金属加工(冷加工) , 2017(19): 22-23.

[42] MUKHOPADHYAY M, KUNDU P K, CHATTERJEE S, *et al*. Impact of dressing infeed on SiC wheel for grinding Ti-6Al-4V [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(1): 54-60.

[43] LI M, DING W, LI B, *et al*. Morphological evolution and grinding performance of vitrified bonded microcrystal alumina abrasive wheel dressed with a single-grit diamond [J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 19669-19678.

[44] ZHOU L, WEI Q, ZHENG N, *et al*. Dressing technology of arc diamond wheel by roll abrading in aspheric parallel grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5-6): 2699-2706.

[45] XU L M, FAN F, ZHANG Z, *et al*. Fast on-machine profile characterization for grinding wheels and error compensation of wheel dressing [J]. Precision Engineering, 2019, 55: 417-425.

[46] 吴玉厚, 高龙飞, 李颂华, 等. 大直径凸弧金刚石砂轮精密修整工艺研究[J]. 现代制造工程, 2022(7): 97-103.
WU Y H, GAO L F, LI S H, *et al*. Research of precision dressing process for large diameter convex arc diamond grinding wheel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(7): 97-103.

[47] 梁志强, 吴立飞, 周天丰, 等. 金刚石砂轮V形尖端切向磨削修整试验研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 196-202.
LIANG Z Q, WU L F, ZHOU T F, *et al*. Experimental study on diamond wheel V-tip truing using a tangential grinding truing method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 196-202.

[48] WANG S, ZHAO Q, GUO B. Wear characteristics of electroplated diamond dressing wheels used for on-machine precision truing of arc-shaped diamond wheels [J]. Diamond and Related Materials, 2022, 129: 109372.

[49] GUO B, MENG Q, LI S, *et al*. Pulse laser precision truing of the V-shaped coarse-grained electroplating CBN grinding wheel [J]. Materials & Design, 2022, 217: 110650.

[50] YANG Z, SUN W, HE D, *et al*. Effect of laser-assisted ultrasonic vibration dressing parameters of a cubic boron nitride grinding wheel on grinding force, surface quality, and particle morphology [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 691-701.

[51] 伍俏平, 欧阳志勇, 阳慧, 等. 碳纳米管对大粒度多层钎焊金刚石砂轮电解修整磨削性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(7): 231-239.
WU Q P, OUYANG Z Y, YANG H, *et al*. Influence of carbon nanotubes on electrolytic dressing grinding performance of a multi-layer brazed coarse-grained diamond wheel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(7): 231-239.

[52] 单子昭, 周聪, 陈根余, 等. 超硬磨料砂轮不同介质中电火花修整试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(5): 79-84.
SHAN Z Z, ZHOU C, CHEN G Y, *et al*. Experimental study on electro-discharge dressing of super-abrasive grinding wheel using different dielectric [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(5): 79-84.

[53] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials [J]. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME, 1991, 113(2): 184-189.

[54] GE M, ZHU H, HUANG C, *et al*. Investigation on critical crack-free cutting depth for single crystal silicon slicing with fixed abrasive wire saw based on the scratching machining experiments [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 74: 261-266.

[55] 潘继生. 单晶SiC基片超精密磨粒加工机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.

[56] 段念, 黄身桂, 于怡青, 等. 不同圆角半径金刚石划擦单晶SiC过程中的材料去除机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 171-180.
DUAN N, HUANG S G, YU Y Q, *et al*. The material removal mechanism of monocrystal SiC scratching by single diamond grit with different tip radius [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 171-180.

[57] GUO J J, MADHAV R K, HIRATA A, *et al*. Sample size induced brittle-to-ductile transition of single-crystal aluminum nitride [J]. Acta Materialia, 2015, 88: 252-259.

[58] MENG B, ZHANG Y, ZHANG F. Material removal mechanism of 6H-SiC studied by nano-scratching with Berkovich indenter [J]. Applied Physics A, 2016, 122(3): 247.

[59] YAN Q S, CHEN S K, PAN J S, *et al*. Surface and subsurface damage characteristics and material removal mechanism in 6H-SiC wafer grinding [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(sup2): S2-S742.

[60] 吴柯, 陆新明, MEHMOOD AWAIS, 等. 基于固结磨粒的单晶蓝宝石自旋转磨削加工方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(16) : 2002-2007.
WU K, LU X M, MEHMOOD A, *et al*, Fixed abrasive based self-rotation grinding for single crystal sapphire[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(16) : 2002-2007.

[61] 周云光, 李红阳, 田川川, 等. SiC陶瓷磨削机理与表面质量研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 156-160.
ZHOU Y G, LI H Y, TIAN C C, *et al*. Study on grinding mechanism and surface quality of SiC ceramics [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(3): 156-160.

[62] GAO S, WU Y, KANG R, *et al*. Nanogrinding induced surface and deformation mechanism of single crystal β-Ga_2O_3

[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 79: 165-170.

[63] LI C, ZHANG F, MENG B, *et al*. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics [J]. Ceramics International, 2017, 43(3): 2981-2993.

[64] CHEN Y, HU Z, YU Y, *et al*. Processing and machining mechanism of ultrasonic vibration-assisted grinding on sapphire [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 142: 106470.

[65] 吴焕杰. 金刚石砂轮磨削碳化硅陶瓷的有限元仿真与实验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.

[66] 蒋培军. 基于温度匹配法的平面磨削3D有限元仿真及试验[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(5) : 96-101.
JIANG P J. Three dimensional simulation and experiment of plane grinding temperature field based on temperature matching method[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(5) : 96-101.

[67] XIAO G, TO S, ZHANG G. The mechanism of ductile deformation in ductile regime machining of 6H SiC [J]. Computational Materials Science, 2015, 98: 178-188.

[68] ZHANG C, DONG Z, ZHANG S, *et al*. The deformation mechanism of gallium-faces and nitrogen-faces gallium nitride during nanogrinding [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 214: 106888.

[69] 邱鸿晶. 基于分子动力学的4H-SiC延性域超精密磨削机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

[70] 姚松林, 郑金涛, 母德强. 超声振动辅助磨削加工表面质量的研究[J]. 中国仪器仪表, 2021(2): 33-37.
YAO S L, ZHENG J T, MU D Q. Research on surface quality of ultrasonic vibration assisted grinding [J]. China Instrumentation, 2021(2): 33-37.

[71] SUN G, SHI F, ZHANG B, *et al*. Surface generation mechanism of the rotary ultrasonic vibration–assisted grinding of aspheric glass ceramics [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(7-8): 2579-2595.

[72] HANG Y, SHENG W, QINGLIANG Z, *et al*. Ultra-precision grinding and accuracy measurement of the hard-brittle thin-walled tubular optics [C]// 10th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing and Metrology Technologies. Chengdu: SPIE, 2021: 120710H.

[73] PAN J, ZHANG X, YAN Q, *et al*. Experimental study of surface performance of monocrystalline 6H-SiC substrates in plane grinding with a metal-bonded diamond wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 619-627.

[74] 王紫光, 刘金鑫, 尹剑, 等. 细粒度金刚石砂轮超精密磨削硅片的表面质量[J]. 中国机械工程, 2023, 34(2): 245-251.
WANG Z G, LIU J X, YIN J, *et al*. Surface quality of ultra-precision grinding of silicon with fine diamond grinding wheels [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(2): 245-251.

[75] HUO F W, 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 and Manufacture, 2013, 66: 54-65.

[76] 王建彬, 周立波. 工件自旋转平面磨削单晶功能材料的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(7): 1388-1395.
WANG J B, ZHOU L B. Study progress of single crystal functional materials by rotary infeed surface grinding [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(7): 1388-1395.

[77] 田海兰, 韩涛, 闫少华, 等. 单晶硅纳米磨削亚表面损伤形成机制及其抑制研究[J]. 制造技术与机床, 2023(3): 24-30.
TIAN H L, HAN T, YAN S H, *et al*. Study on formation mechanism and suppression of subsurface damage during nano-grinding of monocrystalline silicon [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(3): 24-30.

[78] 宋健. 单晶氮化镓的磨削特性研究及其分子动力学仿真[D]. 盐城: 盐城工学院, 2023.

[79] 戴剑博, 苏宏华, 傅玉灿等. 磨削速度对碳化硅陶瓷磨削损伤影响机制研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(21): 316-330.
DAI J B, SU H H, FU Y C, *et al*. Effect of grinding speed on mechining damage of silicon carbide ceramics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(21): 316-330.

[80] 高尚, 耿宗超, 吴跃勤, 等. 石英玻璃超精密磨削加工的表面完整性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 186-195.
GAO S, GENG Z C, WU Y Q, *et al*. Surface integrity of quartz glass induced by ultra-precision grinding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 186-195.

[81] 王丽娟. 蓝宝石衬底的双面行星磨削加工机理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.

[82] 刘子阳, 常庆麒, 崔洁. 晶圆磨削中TTV的优化方法[J]. 电子工业专用设备, 2019, 48(5): 7-9.
LIU Z Y, CHANG Q Q, CUI J. Optimum method of TTV in wafer grinding [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2019, 48(5): 7-9.

[83] 田业冰. 大尺寸硅片磨削平整化理论与工艺技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[84] GAO H, TIAN Y B, JIA Z Y, *et al*. Investigation on the dressing shape of vacuum chuck in wafer rotation grinding [J]. Key Engineering Materials, 2005, 291-292: 171-176.

[85] 姚卫华. 晶圆留边磨削面形仿真与控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

（责任编辑：杨耀辉　英文审核：熊荣斌）