

游离磨料加工影响因素及材料去除模型研究进展

何春雷, 李东洋, 任成祖

(天津大学机械工程学院, 天津 300354)

摘要: 本文对游离磨料加工的影响因素及材料去除率预测模型进行综述。首先, 对游离磨料加工的典型方法及原理进行了介绍, 其次分析了加工参数对加工效率与表面质量的影响规律; 最后总结了材料去除模型的建模方法, 并对未来研究方向进行了初步展望。

关键词: 机械制造工艺与装备; 游离磨料加工; 材料去除模型; 影响因素

中图分类号: TG519.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1123-19

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240176

Research progress on influencing factors and material removal models for free abrasive machining

HE Chun-lei, LI Dong-yang, REN Cheng-zu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: This article reviews the parameters that influence free abrasive processing procedures and the models used to predict material removal. The text begins by introducing the common methods and principles of free abrasive processing. It then analyzes the impact of machining parameters on machining efficiency and surface quality. Finally, it summarizes the modeling method for material removal and provides prospects for future research directions.

Key words: machinery manufacturing technology and equipment; free abrasive machining; material removal model; influencing factor

0 引言

游离磨料加工 (Free abrasive machining, FAM) 是使用自由磨料颗粒从工件表面去除材料的加工方法, 主要包括游离磨料研磨和游离磨料抛光。相比于固结式磨粒加工, 游离磨料加工虽然效率较低, 但可获得极佳的表面精度和表面质量。随着现代科技的发展, 新型加工方法不断涌现, 如磨料流加工、磁流变抛光、弹性发射加工等, 加工对象从金属、玻璃等传统材料扩展到光学元

件、功能陶瓷以及半导体材料等^[1-3], 应用于电子信息、航空航天、医疗器械等高速发展的领域。

对游离磨料加工, 常见加工参数包括磨料种类、磨粒粒径、磨粒质量分数、加工载荷、工件转速等。目前已有诸多学者研究了这些参数对加工结果的影响, 但大部分研究仅适用于某一种特定方法。游离磨料加工方法繁多, 对不同方法而言, 这些参数的影响规律虽不能完全互相参考, 但在很多方面具有相似性, 需要总结其共性规律。另外,

收稿日期: 2024-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52175430).

通信作者: 何春雷 (1988-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 超精密加工机理与工艺. E-mail: clhe@tju.edu.cn

部分新型加工方法除上述加工参数外,还涉及其他参数,如化学机械抛光中的加工液 pH 值、磁场辅助加工中的磁感应强度等,这些参数对这些特定方法的影响程度较为显著,其影响规律需要单独讨论。

本文旨在总结和分析游离磨料加工过程中的关键影响因素以及材料去除模型,并对研究进展进行评述。首先,简要概述了游离磨料加工领域的新兴研究方法;其次,对加工参数的共性和特性规律展开了深入分析,归纳其对游离磨料加工的影响,最后,总结建立材料去除模型所使用的方法及特点。尽管新型建模方法为优化加工工艺、提高加工效率和加工质量提供了有力支持,但仍存在进一步改进和完善的空间。通过系统综述和分析游离磨料加工过程中的影响因素和材料去除模型,将更全面地理解加工过程中各个环节的作用机制,揭示影响加工结果的关键因素,这不仅有助于优化和改进游离磨料加工工艺,也可为开发新型游离磨料加工方法提供参考。

1 游离磨料加工原理

常用的游离磨料加工设备如图 1 所示^[4]。在加工过程中,随着加工液的作用和工件与工具之间的相对运动,游离磨粒被引导进入加工区域,在载荷作用下使工件表面发生塑性变形或脆性断裂并去除材料,随后磨粒和碎屑随加工液排出^[5]。由于新的磨粒不断进入加工区域,磨料颗粒的磨损影响较小、材料去除过程较稳定。对游离磨料加工,材料去除分为二体材料去除和三体材料去除,如图 2 所示^[6]。

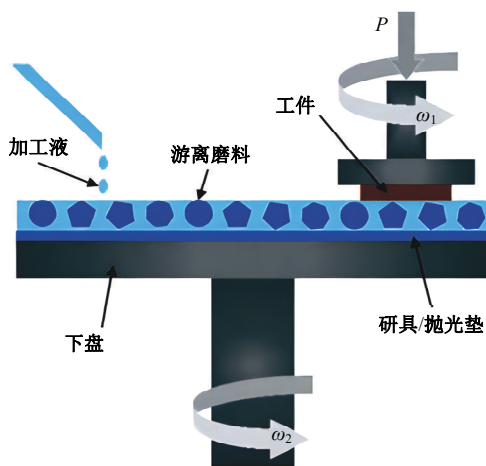


图 1 游离磨料加工设备

Fig. 1 Free abrasive machining equipment

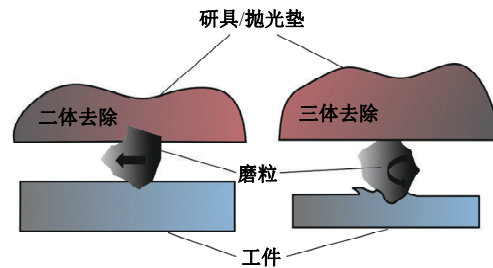


图 2 二体与三体去除

Fig. 2 Two-body and three-body removal

二体去除是指磨料刚性地附着在研具之上,磨粒直接切削工件表面去除材料的方式,二体去除的磨料松散地分布在研具和工件材料之间。三体去除是通过磨粒-工件和磨粒-磨粒之间的相互作用去除材料的去除方式^[4],三体去除可分为滑动磨料去除和滚动磨料去除,如图 3 所示。在相同的负载条件下,二体去除的材料去除率高,但表面质量较差。三体去除存在磨料分散性较差、易团聚等缺陷,其磨料颗粒与工件的接触具有较高的不确定性且加工效率低下^[6],其优点是加工的表面质量更高^[7,8]。

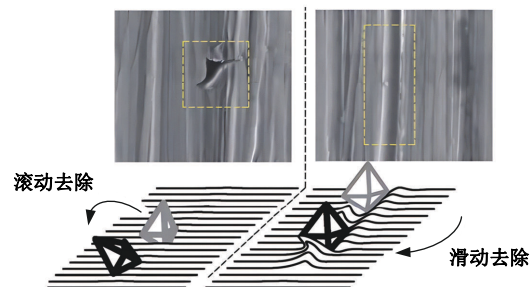


图 3 滚动去除与滑动去除

Fig. 3 Roll removal and slide removal

游离磨料加工涵盖了研磨和抛光等典型方法,这些方法依赖于不同类型的磨料介质,通过磨料与工件表面的摩擦和冲击作用,实现材料去除。表 1 详细列出了常见的游离磨料加工方法及其所使用的磨料介质,这些方法应用范围广泛,在超精密加工领域发挥着重要作用。

1.1 游离磨料研磨

研磨加工通常使用硬度比工件材料更高的磨粒,并且在硬质研磨盘施加载荷的条件下实现工件表面的微量材料去除,使工件形状、尺寸精度达到要求,同时降低表面粗糙度、改善加工变质层和表面缺陷。随着研磨加工进行,部分磨粒在载荷作用下压入研磨盘中,其露出的尖端对工件表面进行微切削,其切削力和切削深度较大,因此,去

表 1 游离磨料加工方法及其磨料介质

Table 1 Free abrasive machining methods and corresponding abrasive media

加工方法	磨料
化学机械抛光	化学溶液、磨粒
超声振动研磨	硬质磨粒
弹性发射加工	软质磨粒
磁流变抛光	磁流变液、磨粒
磁磨料抛光	磁性磨粒
磁性研磨	磁化磨料
磨料流加工	半固态黏弹性介质
摩擦化学抛光	硬质磨粒与化学作用
剪切增稠抛光	剪切增稠流体、磨粒

除量也较大。其余部分磨粒则在工件与研磨盘之间进行滚动或滑动,发生滚轧作用^[9]。

在研磨过程中,根据去除机理的不同,材料去除主要分为脆性去除和塑性去除两种方式,如图 4 所示^[10,11]。脆性去除则是指材料在加工过程中主要发生脆性断裂,依靠裂纹扩展来实现去除^[10],常发生于硬脆材料的加工过程。而塑性去除则是通过研磨颗粒在材料表面的滑擦、耕犁等作用,使材料发生塑性变形和微切削,适用于塑性材料的加工,如金属、塑料等。

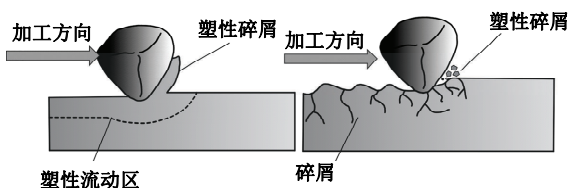


图 4 塑性域去除与脆性去除示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plastic domain removal and brittle removal

然而,对硬脆材料和合金材料等具有特殊性质的加工对象,单纯的脆性去除或塑性去除通常难以满足加工要求。因此,需要引入一些特殊的研磨方法。其中,超声振动辅助研磨和磨料流加工是近年来发展起来的先进研磨技术,其具有较高的加工效率和加工精度,适用于各种材料的研磨加工,具有材料适应性广、工艺灵活性高等优点。通过引入超声振动或流动的研磨介质,能够更好地适应不同材料的研磨需求,提高加工效率和表面质量。

超声振动辅助研磨基于传统研磨的原理,通过在研具上施加额外的超声振动,使磨粒在研具运动和超声振动共同作用下对工件表面进行冲击。该加工方法广泛应用于硬脆材料加工^[12-15],

其原理如图 5 所示^[15]。超声振动施加到研磨盘和被研磨工件之间,作用于研磨区域的研磨液中的磨粒。这种振动使磨粒在研磨液中分散、更新、搅拌,并对研磨过程起作用。同时通过不断补充研磨液,磨粒对工件进行磨削加工^[13]。在超声作用下,研磨液中会出现空化现象,空化现象产生的高速射流能将固体颗粒、污渍和沉积物从表面或细小孔隙中去除并推动了磨料颗粒的运动,提高了加工效率^[14]。

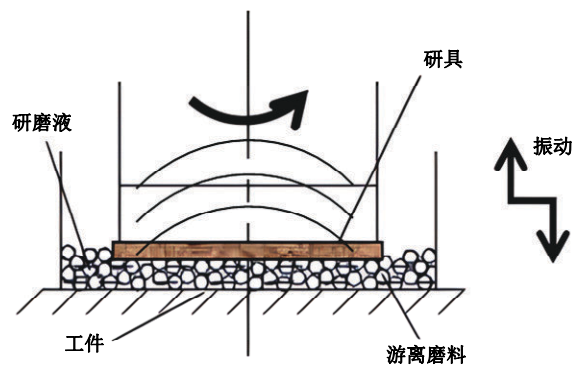


图 5 超声振动研磨

Fig. 5 Ultrasonic vibration lapping

磨料流加工又称挤压研磨,是利用黏弹性含有磨料的半流动介质,在一定压力下往复流过加工面,通过颗粒磨料的切削作用去除工件表面材料,获得高质量表面的工艺方法^[16-18],对材料的适用性强,应用广泛,其原理如图 6 所示^[17]。磨料流加工的优点在于材料去除量较少且加工时间短,同时还能提高工件尺寸精度而不会破坏原有的形

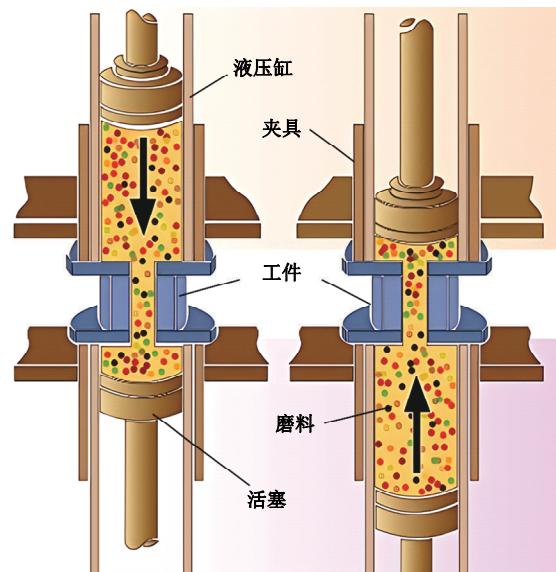


图 6 磨料流加工

Fig. 6 Abrasive flow machining

状精度,此外,磨料流加工的加工介质几乎不损耗,可反复使用,其寿命也较长,该方法适用于金属、陶瓷等硬塑性材料的超精密加工。

1.2 游离磨料抛光

抛光加工通常使用颗粒尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 以下的细微磨粒,在软质抛光工具或化学加工液、电磁场等辅助作用下,可以减小磨粒对工件表面的切削力,避免划痕损伤,减少或消除表面的变质层,实现表面光滑化。由于磨料对工件表面的滚压和微小切削作用较弱,抛光加工对尺寸精度和几何形状精度几乎没有影响,抛光的主要目的是使工件表面更加光滑。抛光加工时磨粒对工件的作用力和材料去除量较小,其材料去除方式一般认为是塑性去除。

根据接触情况的差异,抛光可分为面成型抛光和确定性抛光。面成型抛光包括机械抛光、化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP),其抛光模的尺寸远超过工件的尺寸,抛光过程中工件绝大部分始终与抛光模基体接触,其效率较高,但面成型抛光的抛光模需要根据加工零件的形状单独设计,无法加工形状复杂的表面。确定性抛光包括离子束抛光、磁流变抛光等曲面抛光方法。在确定性抛光工艺中,抛光模具的尺寸小于工件的尺寸,虽然加工效率较低,但可应用于复杂曲面表面抛光,并且可以对工件表面进行局部修正^[19]。

本节介绍 4 种游离磨料抛光的代表性先进技术,包括化学机械抛光、剪切增稠抛光、弹性发射加工和磁流变抛光,这些新型抛光方法致力于解决传统抛光方法面临的问题,如效率低下、表面质量不均、对某些材料的适用性有限等,且在许多领域中具有广阔的应用前景,如微电子、光学、生物医学和先进制造等。

化学机械抛光是在机械抛光的基础上,根据工件表面的化学性质加入相应化学添加剂,从而提升抛光的效率和质量,如图 7 所示。游离磨料以抛光液的形式存在,材料去除表现为机械犁耕作用与化学作用协同去除^[20],该工艺方法可获得高质量表面^[21]。化学机械抛光中化学作用和机械作用相辅相成,如果机械作用太强,那么产生的表面就会留下划痕,而且抛光的副产品可能会重新沉积到工件表面;如果化学作用太强,表面的平面性将很难保证,表面粗糙度可能会增大,因此,

需掌握化学作用和机械作用的平衡以稳定获得高表面质量^[22]。

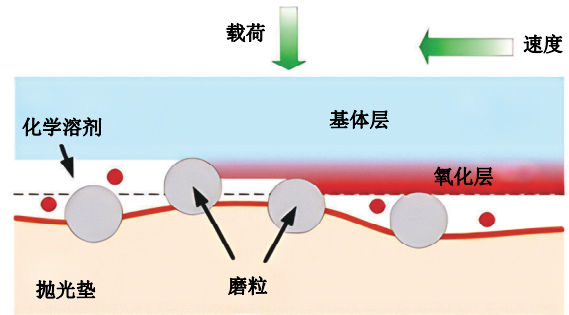


图 7 化学机械抛光

Fig. 7 Chemical mechanical polishing

Li 等^[23]提出了剪切增稠抛光(Shear thickening polishing, STP),其加工原理如图 8 所示。将磨料颗粒添加到非牛顿流体中制备抛光液,抛光头旋转使抛光液快速流动,在工件与抛光液接触区域产生剪切增稠效应,抛光液中固体胶态粒子包裹磨粒形成粒子簇,这就相当于一个流动柔性的微磨具,实现对工件表面材料的微观去除,该方法可加工复杂曲面工件^[24]。

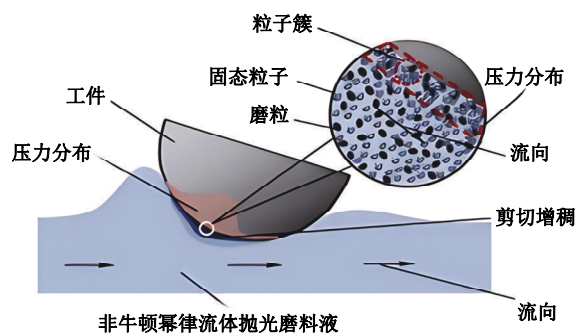


图 8 剪切增稠抛光方法的微观原理

Fig. 8 Microscopic principle of shear thickening polishing

非接触式抛光是近年来逐渐发展起来的一种新型抛光方法^[25],它不需要直接接触工件表面,而是通过特定的能量场或力场作用于工件表面,实现抛光的目标。这种抛光方法通常应用于对脆弱或敏感表面的处理,以避免工件表面受到额外的损害。弹性发射加工(Elastic emission machining, EEM)就是一种典型的非接触式抛光方法。弹性发射加工基本原理如图 9 所示。将工件和聚氨酯球体(可弹性变形并快速恢复)浸泡在抛光液中,电机驱动聚氨酯球体旋转带动抛光液产生流体动压,从而实现了原子级的材料去除。影响材料去除的因素主要包括抛光液的流体特性、抛光

颗粒的运动特性和化学特性等^[26]。

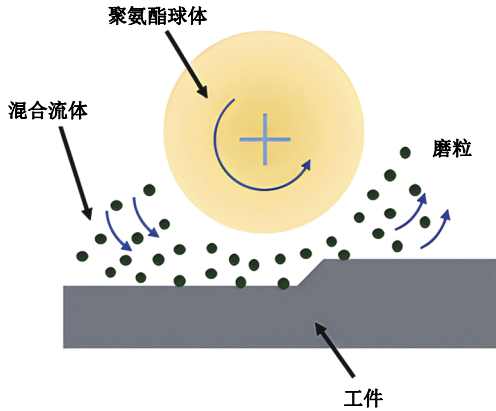


图9 弹性发射加工的原理

Fig. 9 Principle of elastic emission machining

磁场辅助抛光是一种先进的加工技术,通过精确控制磁场的强度或分布,进一步调整磨粒在加工过程中的运动状态,从而实现工件表面的精细抛光。这种加工方法结合了磁场控制和磨削技术的优势,使抛光过程更加高效、精准和可控。肖作义^[27]从理论上提出利用提高磁场强度和磁场梯度的方法来提高加工效率和加工质量的观点。

磁流变抛光(Magnetorheological polishing, MRP)是一种适用于非球面,尤其是具有小曲率半径凹面的磁场辅助加工技术^[28]。其加工原理如图10所示,在磁流变抛光液输送至小间隙附近时,由于梯度磁场的作用,抛光液的黏度明显增加,从而在加工区域内形成了一种具有一定硬度的流变介质。当高黏度的流变液进入小间隙时,与工件表面接触的区域会产生一定的剪切力,同时可以对流变区域的形状和硬度进行控制,此时

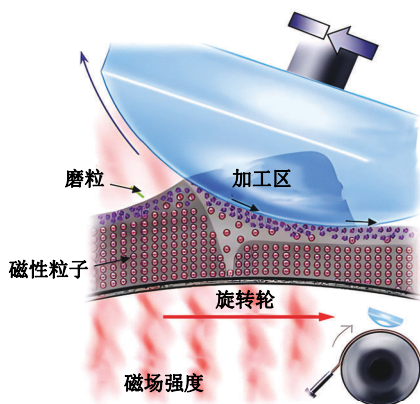


图10 磁流变抛光的加工原理

Fig. 10 Machining principle of magnetorheological polishing

磨粒吸附在链状结构的铁粉表面。通过调整抛光液流速和抛光时间,磁流变抛光可以有选择性地去除工件表面部分区域的材料,实现材料的微量去除^[29,30]。

2 游离磨料加工影响因素

游离磨料加工主要影响因素包括材料因素和设备因素两方面,其中材料因素包括磨粒种类、磨粒粒径、磨粒质量分数、加工液流速、温度等,设备因素包括加工载荷和工件转速等。而评价指标主要是材料去除率和表面粗糙度,这两个指标分别代表加工效率及表面质量。宏观层面上的材料去除率广泛采用 Preston 方程进行描述:

$$R = K_p PV \quad (1)$$

式中: R 为材料去除率; K_p 为比例常数; P 为加工压力; V 为工件和研具之间的相对速度。表面粗糙度常用算数轮廓平均偏差(R_a)来衡量,其表达式为:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x) - \delta| dx \quad (2)$$

式中: δ 为轮廓函数的算术平均中线高度; L 为取样长度; R_a 从几何角度表示轮廓函数与算术平均中线上所围面积与取样长度的比值。

在游离磨料加工中,追求加工质量的同时保证加工效率是最核心目标,需要探讨哪些因素为游离磨料加工的重要影响因素。学者们揭示了加工载荷^[31,36]、磨粒质量分数^[31-35]和研磨液相关因素^[32-34,36]等对实验结果影响显著,阐述了这些因素如何影响材料去除率和表面粗糙度。通过实验研究和理论分析,进一步揭示各因素之间的相互作用机制,为优化加工工艺和提高加工效率提供理论支持。

本章重点考虑磨粒种类、磨粒粒径、磨粒质量分数、加工载荷、工件转速和特定参数6个影响因素,通过对学者们的研究结果进行综述,总结出这些因素对游离磨料加工中材料去除率和表面质量的影响规律,从而更全面综合地了解游离磨料研磨和抛光相关参数的控制方法。

2.1 磨粒种类的选择

磨粒是加工过程中必不可少的一个重要组成部分,对加工结果起着决定性作用。根据加工目的差异,不同加工过程会使用不同磨粒以达到加工效果。磨粒的种类很多,一般按照硬度来划分。硬度最高的是金刚石;其次就是碳化物类,如黑碳

化硅、绿碳化硅、碳化硼等;再次是硬度较高的刚玉类;硬度最低为氧化物类,常见磨粒种类及特性见表 2。

表 2 常见磨粒种类划分

Table 2 Classification of common abrasive grain types

系列	名称	特性
氧化铝系	棕刚玉	硬度高,韧性大,便宜
	白刚玉	硬度更高,韧性较低
	单晶刚玉	球状颗粒,硬度韧性较高
	铬刚玉	韧性高,磨削粗糙度低
	微晶刚玉	磨粒为微小晶体,强度高
碳化物系	黑碳化硅	硬度高,脆且锋利
	绿碳化硅	硬度仅次于碳化硼和金刚石
	碳化硼	硬度高,耐磨性好
金刚石系	人造金刚石	硬度高,脆,表面粗糙
	天然金刚石	硬度最高,价格贵
氧化物系	氧化铁	质软
	二氧化硅	硬度适中,分散性好

由于天然磨料通常含有大量杂质,其磨粒大小和形状各异,这不仅影响了加工结果,还增加了不确定性,另外,天然磨料的市场价格通常较贵,优质磨粒相对稀缺。目前人造磨料的使用越来越普遍,人造磨料通过先进的生产工艺和技术,可以制造出粒度均匀、形状规则、杂质含量低的磨粒,在超硬材料加工、陶瓷加工、光学玻璃加工等领域,人造磨料的应用已经取得了显著的成果,正逐渐取代天然磨料成为主流磨削材料。

Neauport 等^[37]观测了同一尺寸下多种磨粒的形状,观测结果表明:氧化铝颗粒边缘较为光滑,碳化硼和碳化硅颗粒出现尖锐边缘的概率较大,并出现更复杂的随机形状。Asghar 等^[38]使用 KMnO_4 作为氧化剂,氧化铝和二氧化硅作为磨粒,对氮化镓表面进行了化学机械抛光,结果表明:氧化铝磨料的材料去除率高于含二氧化硅,但二氧化硅磨粒可以产生无缺陷的氮化镓表面。

Deshpande 等^[39]认为磨粒种类对表面粗糙度的影响显著,硬度越大则表面粗糙度越高。石榴石、氧化铝和碳化硅研磨不锈钢和青铜的研磨结果表明:尽管碳化硅比氧化铝更硬,但氧化铝磨料比碳化硅能更有效地去除材料,即材料去除率更容易受磨粒边缘的形状影响,并且随着研磨进行,磨粒边缘形状会变圆。

磨粒的运动以及滚动磨粒和滑动磨粒之间的比例也影响研磨效率^[40]。Heisel 等^[41]分析了研磨过程中磨粒的运动(滚动和滑动),以及不同形状

的晶粒如何参与加工过程。由于同批次磨粒分布不均匀,部分磨粒不能参与加工,部分磨粒可能被挤压断裂,只有形状、大小都合适的磨粒发生滚动或滑动,形成切屑的材料去除过程取决于磨料颗粒的形状。

2.2 磨粒粒径的影响

不同加工方法粒径的使用范围也有所不同,表 3 为常见游离磨料加工方法所使用的磨粒粒径大概范围^[42-46]。研磨是通过机械作用去除材料,通常用于去除较大的材料余量,如粗磨、去毛刺等,以达到粗化的表面效果,研磨所使用的磨粒粒径通常较大,一般为 $1\sim 500\ \mu\text{m}$ 。而抛光则是通过精细的研磨和化学腐蚀等手段,使表面更加光滑、平整和光泽,以达到更高的表面质量,如镜面加工、光学元件的抛光等,抛光所使用的磨粒粒径则较小,一般在 $15\ \mu\text{m}$ 以内,甚至达到 $0.01\ \mu\text{m}$ 的量级。

表 3 常用磨粒粒径范围

Table 3 Commonly used abrasive particle size range

加工方法	粒径范围/ μm
磨料流加工	63~425
超声振动辅助研磨	0.5~5
磁流变抛光	3~10
磁性研磨	180
化学机械抛光	0.01~0.2
剪切增稠抛光	3~15

Werrell 等^[47]研究了 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CeO_2 等磨粒对纳米金刚石薄膜化学机械抛光结果的影响,结果表明:直径小的磨粒比直径大的磨粒能够达到更低的表面粗糙度。这意味着纳米金刚石薄膜的抛光遵循一种接触面积机制,即粗糙度的降低由磨粒与表面的接触面积决定,较小的磨粒能够更多地与纳米金刚石薄膜表面结合,使更多的 C-C 键弱化,从而实现精密抛光。

Tam 等^[48]研究了金刚石磨粒对 SiC 工件的加工,分别使用粒度中值为 1 、 6 、 $10\ \mu\text{m}$ 的金刚石颗粒进行研磨加工。研究表明:加工过程对金刚石磨料颗粒的大小很敏感,在 $1\ \mu\text{m}$ 金刚石颗粒下表面粗糙度达到最低值,所需时间也最长。Su 等^[49]同样在对 SiC 单晶基体的研磨中得到了相似的结论。

张克华等^[50]研究了磨料流加工中磨粒大小对轴向力和切向力的影响,如图 11 所示。研究表明:轴向力随着磨粒粒径的增大而减小,增大

粒径会导致轴向力与径向力的比值提高,从而提高材料去除率。李俊焯等^[51]通过对不同磨粒粒径下的磨粒流加工结果的实验研究得到了类似结果:随着粒径的变小,表面质量提高,但加工效率下降。

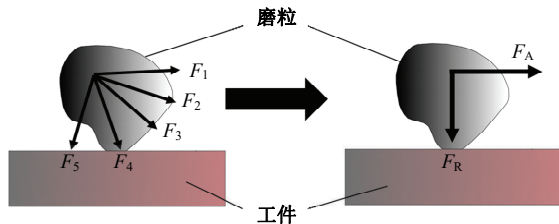


图 11 磨粒对工件表面作用力

Fig. 11 Abrasive grain force on workpiece surface

Basim 等^[52]认为,采用低浓度磨粒进行磨削时,磨粒与磨粒之间的相互作用要弱得多,但在高压高浓度的作用下,较大粒径的磨粒通常会在表面产生更多的局部缺陷,大粒径的磨粒会在晶圆表面形成凹坑,导致表面粗糙度和表面变形效果显著。研究表明^[53-56]:在蓝宝石、SiC 和 GaN 等单晶衬底的加工制造过程中,使用小磨粒可以改善工件表面质量。这是因为小颗粒对工件表面的渗透率很低,所以表面划痕也较浅^[57]。

2.3 磨粒质量分数的影响

在游离磨料加工中,磨料质量分数表示单位质量的加工液中磨料颗粒所占比例,在很多研究中也使用磨料浓度来表示该指标^[58,59]。对不同游离磨料加工方法,磨料质量分数通常被控制在 30% 以下,如表 4 所示。磨料质量分数的精确控制是实现高效、高精度加工的关键。许多学者都对磨料浓度进行了深入研究,揭示其对加工效果的作用机制,这些研究为提高加工质量和效率提供了宝贵经验。

表 4 常用磨粒质量分数范围

Table 4 Range of mass fractions of commonly used abrasive grains

加工方法	质量分数/%
磨料流加工	30~50
超声振动辅助研磨	2.5~10
磁流变抛光	10~30
机械研磨	5~20
化学机械抛光	0~30

Sasani 等^[60]使用 SiC 研磨液进行砷化镓晶片的研磨实验,随着磨粒质量分数的升高,砷化镓所需的研磨时间缩短。Park 等^[61]得出了 CMP 的材

料去除率随着磨粒质量分数升高而增大的结论。Yan 等^[35]使用螺旋式研磨方法,通过螺杆带动 SiC 磨料加工合金钢工件的孔内壁,结果表明:随着磨粒质量分数的升高,表面粗糙度增大。Cong 等^[62]在双面研磨蓝宝石晶圆实验中的数据表明:磨粒质量分数越高,材料去除率越大,浓度达到一定值后去除率不再提高,即认为去除率达到上限值。Deaconescu 等^[63]通过平面研磨实验研究发现:磨粒质量分数升高,材料去除率增大。李俊焯等^[64]通过数值模拟和实验研究磨料浓度对磨粒流加工的影响,结果表明:磨料浓度增强了磨削效果。汤勇等^[65]认为当磨料浓度过高时不仅会使加工液的流动性变差,还造成挤压力增大,系统刚性难以承受。

2.4 加工载荷的影响

Tseng 等^[66]提出了一种基于固体力学和流体力学相结合的化学机械抛光的去除率新模型,根据该模型,载荷增大导致材料去除率变大。Gullu 等^[67]研究了铸钢研磨过程中压力对表面粗糙度的影响,发现低压状态下表面粗糙度更接近最佳值,高压下表面粗糙度最终值较高,表面质量较差。邓家云^[68]考察了 SiC 晶片抛光时不同抛光载荷对去除率和表面粗糙度的影响。随着抛光载荷的增大,去除率呈现近乎线性增长趋势。卓志佳^[69]对单晶氮化镓的 CMP 机理进行了研究,结果表明:抛光压力与去除效率正相关,过大的抛光压力导致磨料过深地嵌入 GaN 表面,从而使 GaN 表面十分容易产生划痕。郑锦华等^[70]开发了研磨抛光微孔表面织构技术,研究表明:研磨载荷越大,表面粗糙度越大。郑宸曦等^[71]的研究结果表明:随着载荷的增加,磨料流加工的去除率和粗糙度均增大。

2.5 工件转速的影响

Tseng 等^[66]在 CMP 实验中得出速度与材料去除率正相关的结论。Chang 等^[72]使用双盘研磨机对量块进行研磨和抛光实验,发现转速越高,表面粗糙度越低。在抛光实验中,主轴转速的加快会提高机械去除效率并加快切屑的输送速度。Li 等^[73]在纳米机械抛光单晶氧化镓的研究中,利用分子动力学模拟,得出表面粗糙度随抛光转速的增加而减小的结论。但转速不宜过快,否则会产生高流速的磨粒结块现象,降低表面质量。Ye 等^[74]通过氧化铝研磨钛金属表面的实验,发现随

随着主轴转速的提高,研磨液的流动加快,提高了机械去除效率并避免了切屑对工件表面的损伤,提高了表面质量。Kala等^[75]通过响应面研究发现,在低转速下,表面粗糙度变化率随转速的加快而增大,当转速达到一定数值后,表面粗糙度的变化率随转速的增大而减小。舒坤等^[76]综述了转速对超声振动辅助磁粒研磨表面粗糙度的影响,结果表明:转速对粗糙度的影响无明显规律。

2.6 特定因素的影响

除磨粒种类、粒径、加工压力、加工速度等参数的影响,对非传统游离磨料加工方法,如化学、磁场辅助加工等,还需要考虑相关影响因素,包括酸碱性、场强等,这些因素在特定的加工方法中起着至关重要的作用。在本节中,将重点讨论化学辅助加工和磁场辅助加工中特定因素的影响,提供更全面的加工参数优化建议。

对磁场辅助加工,磨粒的运动和受力很大程度上受磁场影响,磁场的强度及分布等是这些加工方法中的重要影响因素。Jha等^[77]使用羰基铁粉和碳化硅磨粒进行磁流变抛光,结果表明:零磁场时磨粒只在工件表面流动,无抛光作用;随着磁场强度增大到 0.5 T,表面粗糙度由 0.5 μm 降低到了 0.3 μm 。肖强等^[78]在磁流变抛光中同样增大磁场强度到 0.5 T,工件的表面粗糙度值从 2 nm 增大到 10 nm,因此,得出表面粗糙度随着磁场强度增大而增大的结论。在 Jha等^[77]的研究中,由于工件粗糙度初始值较高,使用的磨粒粒径也较大(37 μm),因此,需要更大磁场作用于磨粒,进行材料去除,改善表面,做粗加工。而肖强等使用了更小粒径的磨粒和表面更加光滑的工件,在这种精加工的情况下,较大的磁场会增加磨粒嵌入工件表面的深度,在塑性去除域内,磨粒嵌入深度的增加会降低表面质量。舒坤等^[76]研究了超声振动辅助研磨的发展概况,目前常见磁粒研磨的磨粒沿磁感线分布。

化学辅助游离磨料加工溶液的酸碱性影响 Zeta 电位(Zeta 电位越大,磨料间的静电斥力越强,分散性越好,抛光液能稳定保存的 Zeta 电位通常为 30 mV 以上^[79]),因此,pH 值一定程度上反映了载液中的颗粒聚集,而颗粒聚集通常被认为是不利于加工的,小颗粒聚集成较大的悬浮颗粒会在表面形成较大的划痕,降低加工表面质量,并且密度较大的颗粒会沉积在工件表面,这不仅

加剧了表面缺陷还降低了加工效率。Yin等^[80]在使用 SiC 研磨液加工蓝宝石时,发现碱性条件下,pH 值使 SiC 颗粒分散性更好,加工表面为较多的微划痕和较少的粗划痕,证明了 SiC 颗粒聚集效应在碱性条件下被抑制,如图 12 所示。

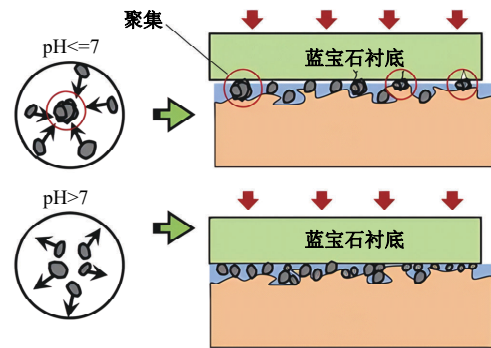


图 12 不同 pH 值对颗粒聚集的影响

Fig. 12 Effect of different pH values on particle aggregation

Khanna等^[81]将颗粒的聚集过程分为脱离区、过渡区和聚集区,针对不同过程改变剪切率和颗粒浓度可以较好控制颗粒的聚集现象。

阎秋生及其团队^[82]同样探讨了硅溶胶分散稳定性在不同 pH 值下的影响。研究表明:酸性环境会削弱碱性硅溶胶的稳定性,导致其 Zeta 电位绝对值下降,易产生絮凝现象。程佳宝等^[83]研究发现,碱性抛光液中高浓度的 OH^- 可以提高二氧化硅磨粒的稳定性。具体而言, OH^- 的加入可以增加硅溶胶表面的电荷量,增大硅溶胶的 Zeta 电位绝对值,并增加粒子之间的排斥力。Luo等^[84,85]在铜的抛光实验中制备了抑制剂和氧化剂(BTA(苯并三唑)和硝酸铁),既防止铜被腐蚀又有效溶解游离的氧化铜。后续又使用了次氯酸钠作为氧化剂和 BTA 作为抑制剂也得到了较高的抛光效率。

2.7 影响因素总结

通过总结以上研究成果,各因素对游离磨料加工的材料去除及表面质量的影响规律如下:

(1)磨料种类:对不同材料和不同加工方法,磨料种类的选择会在很大程度上影响加工结果。通常认为磨粒硬度越高,材料去除效果越明显,但高硬度的磨粒会导致更差的表面粗糙度。由于制造的差异,磨粒的批尺寸一致性、边缘锋利程度、硬度均有所不同。同一批磨粒尺寸一致性越高,研磨结果越均匀。不同种类的磨粒出现尖锐边缘的概率也不同,边缘较尖锐且质地较硬的磨粒容

易划伤表面,适用于对表面质量要求不高的场合。球形磨粒则更容易发生滚动的三体去除,对材料的去除作用缓和,不会造成新的损伤,适用于表面质量要求较高的加工场合。

(2)磨粒粒径:由于研磨和抛光需求的不同,一般来说研磨使用磨粒的粒径更大。磨粒粒径对表面质量和材料去除率均有显著影响,大粒径颗粒加工效率更高,但更容易造成表面缺陷进而导致表面质量较差,小颗粒可获得较好的表面质量但效率低下。在进行加工时,需根据具体需求选择合适的磨粒粒径,可通过实验验证磨粒粒径对加工效果的影响,确定最佳的磨粒粒径范围,以达到加工效率和表面质量的平衡,并注意对表面缺陷的控制。

(3)磨粒质量分数:磨粒质量分数主要影响材料去除率,材料去除率随着磨料浓度的升高而增大,但磨粒质量分数达到某一阈值时材料去除率不再提高。造成这种现象的一个原因是随着磨料浓度进一步升高,磨粒间的摩擦作用在混料过程中增强,当磨料达到饱和后会在加工液中沉积,导致加工液不均匀流动,从而限制材料去除率的提高。另一个原因是随着磨粒数量的增加,单颗磨粒承载的压力降低,磨粒数量的增加趋势与研磨压力的降低趋势达到某种平衡,导致加工效率不再提高。由于加工方法和加工设备的影响,磨粒质量分数达到饱和的条件也不尽相同,为提高加工效率,可通过预实验探究质量分数的上限,在不发生沉积的前提下应尽可能接近该上限值。

(4)加工载荷:载荷与材料去除率和表面粗糙度均成正相关,载荷越大磨粒的磨削作用越强,加工效果越明显。但提高加工载荷一般不利于表面质量的改善,过高的压力会导致磨粒嵌入深度增加,从而更容易划伤工件表面。在游离磨料加工中应重点关注载荷的大小,为保证加工精度和表面质量,载荷不宜过大,若加工效率较低可通过改变其他相关因素进行改善。

(5)工件转速:Preston方程已给出转速对材料去除率的影响,即材料去除率随着加工速度的提高而提高,该研究结论已经通过实验获得进一步证实,而转速对表面质量的影响无明显规律。

(6)其他因素:对磁场辅助加工,磁感线分布影响着磁性磨粒的分布,磁场强度则对磨粒嵌入深度造成影响,因此,要想获得更光滑的表面,既要保证磨粒均匀分布,也要保证磨粒嵌入深度不

会过大。磨粒嵌入深度可以通过白光干涉仪、共聚焦显微镜、轮廓仪等设备测量,从而推导其与磁场强度的关系。对有化学反应参与的加工,其酸碱性会影响化学反应和Zeta电位值,进而影响磨粒在载液中的分散性,而颗粒的聚集会影响加工表面的划痕深度,因此,相关因素间接影响了粗糙度和去除率。溶液酸碱性的选择标准尽可能以提高Zeta电位为目的,以避免颗粒聚集现象。

3 游离磨料加工材料去除模型

3.1 材料去除模型理论基础

目前,学者们建立材料去除模型的主要手段是改进Preston方程,近年来新型的游离磨料加工方法中,材料去除还会受到其他特殊因素的影响,改进方法通常是研究不同加工方法中对材料去除造成影响的关键因素,通过将更多参数引入Preston方程进行材料去除模型的构建。

虽然材料去除率可由改进的Preston方程进行定量预测,但该方程却不能很好地解释微观层面的材料去除机制,从而造成一定误差,目前很多学者的研究涉及磨粒的微观接触理论。以最典型的弹性接触理论——赫兹接触理论为例:赫兹接触理论是研究两物体在压力作用下接触表面发生的微小弹性变形和应力。其假设接触的两物体应变较小且在弹性范围内,与物体接触的是弹性体,接触面积远小于物体半径,接触表面连续、不确定,无摩擦。根据赫兹接触理论的推导,半径为 R 的球体在弹性半空间压出的凹痕深度为 d ,若产生的接触区域半径为 $a = \sqrt{2Rd}$,则作用力 $F = (3/4) E^* R^{1/2} d^{3/2}$,其中 E^* 为等效弹性模量,而理想状态下的磨粒多以球形存在,磨粒与研具的接触状态可看作球体与弹性半空间的接触。

赫兹接触理论在接触曲面形状近似为二次抛物曲面且弹性形变量远小于接触物体表面的曲率半径时可较好地评估实际接触情况。与之不同,游离磨料加工的实际情况较为复杂,很多因素需要考虑,如:接触面上其他方向的分力,接触表面的塑性变形,接触物体发生了滚动和滑动等情况。因此,要想准确描述磨粒在物体表面的微观接触情况,须对原有理论进行补充和扩展。

3.2 常见材料去除模型

学者们基于Preston方程和磨粒微观接触理论,针对不同游离磨料加工过程中材料去除方式

的特点,建立了不同的材料去除率模型(见表 5)。 学机械材料去除模型、流变辅助加工材料去除模
本章将材料去除模型分为机械材料去除模型、化 型以及基于智能算法的材料去除模型进行综述。

表 5 材料去除模型总结

Table 5 Summary of material removal model

作者	材料去除模型	符号含义	建模特点
Wei 等 ^[86]	$\frac{dV}{dt} = K_0 \frac{3C_s}{8\pi R^3} \left[\frac{(r(\zeta) + R)^2}{ r(\zeta) } - r(\zeta) \right] d\zeta dx \cdot k_1 \frac{\int p_a d\delta_x}{H_V} v(\zeta)$	C_s 为体积分数; ζ 为坐标; p_a 为加工压力; H_V 为硬度; R 为粒径; v 为流速;	将单磨料模型与活性磨料的统计模型相结合
薛进学等 ^[87]	$\frac{dH}{dt} = \int_{-b}^b K_p \frac{V}{v_1} \sqrt{\frac{F}{\pi L} \frac{\frac{r_i r_{\text{大}}}{r_{\text{大}} - r_i}}{1 - \mu_1^2 + \frac{1 - \mu_2^2}{E_1 + E_2}}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{b_i}\right)^2} dx$	V 为研具转速; v_1 为工件转速; F 为加工压力; r 为工件半径; μ 为泊松比; E 为弹性模量; b_i 为接触线半宽	先整体分割,每个单元单独计算积分得到
Cheng 等 ^[88]	$MRR = K_m \times K_t \times P \times A \times v \times t$	K_m 为介质常数; K_t 为时间常数; P 为加工压力; A 为接触面积; v 为加工液流速; t 时间	扩展系数 K , 从考虑载液的流变特性
Zhao 等 ^[89]	$MRR = K(V) \left[(fD_a)^{2/3} - (\rho_m)^{2/3} \right]$	$K(V)$ 为相对速度; D_a 为孔密度; ρ_m 为工件接触顶点处压力; f 为研具所受载荷	确定了软质研具下压力 P 的阈值及非线性关系
Runnels ^[90]	$MRR = K(P)(\sigma_t + D\sigma_t^2)$	$K(P)$ 为材料、化学性质系数; D 为孔密度; σ_t 为剪切应力	建模结合了断裂力学与化学腐蚀
Luo 等 ^[91]	$MRR = C_1 \left(1 - \varphi \left[3 - C_2 P_0^{1/3} \right] \right) \sqrt{P_0} V$	C_1 为常数; φ 为活性磨粒概率密度; P_0 为接触应力; V 为工件与研具相对速度	整合了硬度、研具粗糙度、磨料尺寸和形状
Sundararajan 等 ^[92]	$MRR = \frac{M_{Cu}}{\rho_{Cu}} \times \frac{D \sqrt{K_{eq} C_F C_N}}{0.893 \Delta_{avg}} \times (1 + \alpha \tau_w C_A)$	M_{Cu} 为铜分子量; ρ_{Cu} 为铜密度; K_{eq} 为化学平衡常数; $C_N C_F$ 为化学剂浓度; D 为扩散率; C_A 为磨粒浓度	考虑了化学反应、载液流体力学及研磨颗粒形状
李敏等 ^[93]	$MRR = k_0 \cdot \frac{3nKU^{n+1}}{R\delta^{n+1}} \left[\frac{\cos^{2n-1}\varphi}{2n} \sin\varphi + \frac{2n-1}{2n} \int \cos^{2n-2}\varphi d\varphi - \frac{1}{2n} \sin\varphi \cos^{2n+1}\varphi - \frac{2n+1}{2n+2} \int \cos^{2n}\varphi d\varphi \right]$	k_0 为系数; n 、 K 为体黏参数; U 为速度; R 为工件半径; δ 为剪切层厚度; φ 为常数; n 为黏性指数	引入黏度特性,考虑非牛顿剪切增稠幂律流体的影响
张峰 ^[94]	$MRR = K(P_d + P_m)V$	K 为普雷斯顿系数; P_d 为流体动压力; P_m 为磁流变液的磁化压力; V 为速度	考虑了磁流变抛光的流体动压力和磁化压力
Li 等 ^[23]	$MRR = K_0 \cdot \frac{3nK}{R} \cdot \left(\frac{U}{h_0}\right)^{n+1} \cdot f(n, \varphi)$	K_0 、 K 为系数; n 为黏度指数; U 为加工液流速; φ 为常数; h_0 为间隙大小; R 为工件半径	考虑了抛光液的黏性指数和稠度系数
张学成等 ^[95]	$MRR = K \frac{\tau}{f} U = K \frac{W}{f}$	K 为准 Preston 常数; τ 为表面剪切应力; f 为摩擦因数; U 为磁射流冲击速度; W 为冲击射流做功	基于 CFD 方法得到功率 W 与材料去除率的关系

机械材料去除是指磨料颗粒通过研具施加机械作用力对工件进行材料去除。材料去除模型重点在于描述切削或磨削过程中磨粒、研具与工件之间的力学相互作用,需要考虑切削或磨削力的产生、传递和消耗过程,以及材料的变形、剪切和去除规律。该建模方法适用于机械研磨、机械抛光、磨料流加工等。

化学机械加工是在机械材料去除的基础上添加化学添加剂或利用摩擦作用产生化学反应辅助磨粒的机械去除作用。材料去除模型需要考虑化

学添加剂对材料表面的作用机理,如化学腐蚀作用、化学反应和机械作用之间的耦合关系等。此类建模方法主要适用于化学机械抛光、摩擦化学加工等。

流变辅助加工是指通过辅助场(如电场、磁场等)作用改变材料的流变特性,使其相态发生转变实现材料去除。材料去除模型的建立需深入研究具有流变效应的加工液特性,如浓度、流变特性的波动,通过控制辅助场实现加工液流变性能如黏度、硬度等的稳定性和可控性,该建模方法适用于

磁流变抛光、剪切增稠(力流变)抛光等加工方法。

基于智能算法的材料去除模型是利用数值计算、机器学习等技术,如神经网络、遗传算法、粒子群优化等,通过加工参数拟合和数据分析来对材料去除过程进行优化,可以根据实时数据和反馈进行调整,优化加工参数,提高加工效率和精度。这种模型适用于复杂的加工过程,能够快速适应不同的加工方法和材料。

3.2.1 机械材料去除模型

Zhou 等^[96]用可变半径槽板研磨陶瓷球的过程,在赫兹接触的基础上建立了陶瓷球的轮廓高度分布矩阵的材料去除模型,矩阵中的值表示球面轮廓与最小球面的偏差。Zhou 等^[86]将接触点区域分为凹型或凸型,该模型将宏观的球形轮廓偏差划分为多个不同高度点的材料去除,轮廓高度分布矩阵在研磨过程动态更新。

Farsakoglu 等^[97]对大口径透镜的制造使用了游离磨料的研磨工艺,建立了横向断裂概念的模型,它是基于滚动磨料颗粒对光学玻璃材料的去除,颗粒通过横向断裂去除玻璃材料,实验验证滚动磨料颗粒横向断裂的模型能准确描述研磨结果。

Wei 等^[86]提出了一个新型磨料流加工材料去除预测模型,模型是基于单一磨料的材料去除模型和活性磨料的统计模型的结合。对单一磨粒材料去除模型进行了简化,将介质及其他磨粒对单一磨粒的作用力分解为 F_n 、 F_t ,结合维氏硬度计算压痕面积以及切割长度,得到单一磨粒的去除量,并根据磨粒是否进入接触状态,划分了有效磨料区统计活性磨粒^[88],如图 13 所示,在假设磨粒均匀分布的前提下,结合加工区的表面轮廓,计算活性磨料区体积,进而得到活性磨料数量。

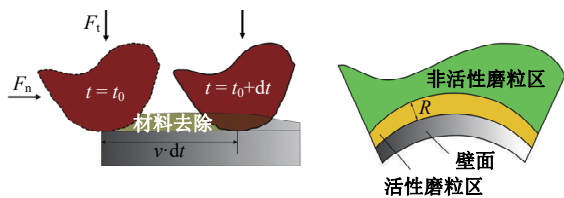


图 13 单个磨粒的材料去除

Fig. 13 Material removal of single abrasive grains

薛进学等^[87]通过离散化方法研究了圆锥滚子贯穿式超精研的材料去除形式,如图 14 所示,将滚子沿其轴向进行离散化,每个离散化单元可看作圆柱与凹型弧面的接触。通过赫兹接触分析可得滚子离散单元的应力分布,代入 Preston 方程

可计算出接触单元的材料去除率。该方法可求出整个锥面的接触应力,适用于圆锥轴承滚子的二体材料去除机制研究,但由于研磨过程中油石与滚子接触弧面也发生了材料去除,其弧面形状不断发生变化,该模型可以考虑油石随时间的磨损来进一步优化。

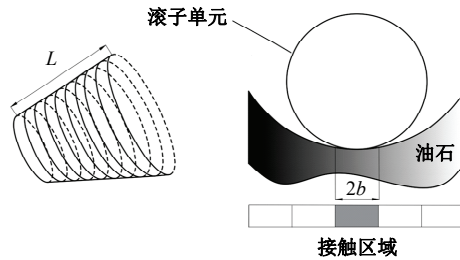


图 14 圆锥滚子离散化单元接触分析

Fig. 14 Discretized unit contact analysis of tapered rollers

Cheng 等^[88]提出了一个改进的 Preston 方程,该模型以磨料研磨或抛光的基本切削力学为基础,将流体建模表示为机械形式,假设每个磨粒都与一个弹簧和一个阻尼器相连,如图 15 所示,弹

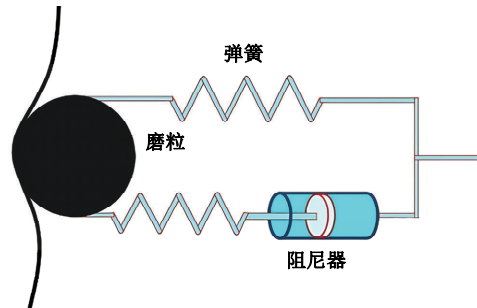


图 15 磨粒简化黏度模型

Fig. 15 Simplified viscosity model for abrasive grains

簧和阻尼器分别用于模拟流体的刚度和黏度,验证了该方程预测材料去除率的准确性。改进后的 Preston 模型可有助于优化磨料流加工过程,对材料去除率进行预测。

Zhao 等^[89]在 Preston 方程的基础上对加工载荷参数进行了改进,从而修正了 Preston 方程,修正后的材料去除模型表明:工件与抛光点之间由于存在相互摩擦作用,在抛光过程中会产生一个阈值压力,只有当抛光压力高于该阈值时,抛光加工才得以稳定进行。

3.2.2 化学机械材料去除模型

Jin 等^[98]在对超硬纳米孪晶金刚石(Ultrahard nanotwinned diamond, nt-D)的抛光实验中,发现在抛光的初始阶段金刚石颗粒首先被打破,进而破坏抛光盘表面,产生铁屑,铁屑经历摩擦高温发

生氧化形成 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, 在这个阶段, nt-D 表面材料在机械压力和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 作用下发生软化, 实现非晶化的过程, 从而实现材料去除, 如图 16 所示。

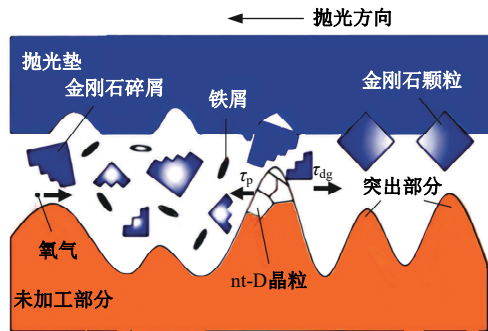


图 16 nt-D 材料去除过程

Fig. 16 nt-D material removal process

Runnels 等^[90]将 CMP 抛光液定义为具有恒定黏度的牛顿流体, 用不可压缩稳态牛顿流体的二维 N-S 方程模拟流体流动, 建立了流体腐蚀模型。该模型可以将颗粒尺度上建模的化学效应与晶圆尺度上建模的工艺条件联系起来, 得到抛光液在半导体晶圆表面的剪切应力, 推导得到材料去除数学模型并证明模型与实验的去除率曲线呈现出一致性。

Luo 等^[91,99]开发了一个 CMP 材料去除率的预测模型, 通过在赫兹接触理论中引入拟合的晶圆硬度和化学机械特性来预测材料去除率, 对不同的磨料尺寸和磨粒尺寸分布的标准偏差, 材料去除率的预测表现出良好的一致性。Suratwala 等^[100-102]通过在单一磨料中应用拟合的化学去除作用扩展了 Luo 的模型。模拟的表面形态充分展现了粗糙度、表面纹理和功率谱密度等特征, 并证明了纳米级材料去除深度的预测值接近实验值。

Sundararajan 等^[92]在对 CMP 材料去除的研究中根据润滑理论和雷诺方程建立二维润滑模型和质量运输模型。其中质量运输模型通过速度场来预测铜 CMP 的抛光率, 涉及铜在 CMP 中的化学溶解, 考虑了抛光液中化学反应速率、流动条件、泥浆成分和颗粒浓度分布, 结合流体压力 $P(x)$ 和流速 U 求解得出。

Hu 等^[103]进一步研究了在铜圆片上的 CMP 过程中热效应对化学反应的影响, 进行了静态蚀刻测试, 通过结合修正后的 Preston 方程的化学机械去除率和动态蚀刻得到总的材料去除模型。

3.2.3 流变辅助加工材料去除模型

李敏等^[93]分析了力流变抛光的抛光液流体

特性和影响因素, 对 Preston 方程进行修正, 推导了非牛顿幂律流体的切应力, 将 Preston 系数 k_0 延伸为 k_1 、 k_2 、 k_3 3 个系数, 其中 k_1 与工件材料硬度相关, k_2 与磨粒粒径相关, k_3 与其他因素相关, 各个系数通过对轴承钢圆柱曲面的剪切增稠抛光试验进行确定, 由此得到修正后的 Preston 方程, 该模型对材料去除的预测误差在 5% 以内。

张峰^[94]基于 Preston 方程建立了磁流变抛光材料去除模型, 该模型被用于研究工件表面材料去除率与压力的相关性。结果表明: 工件表面所受的压力 P 主要由流体动压力 P_d 和磁化压力 P_m 两部分构成, 并推导了其数学表达式, 实验证明: 该去除模型对压力的预测具有一定的合理性。

Kordonski 等^[104]通过对加工过程中磨料颗粒表面的纳米压痕的研究, 提出了磨粒与较大磁性颗粒在壁面附近的剪切流动中碰撞理论, 并基于悬浮液中颗粒的动量守恒原则, 建立了磁流变加工的材料去除模型, 通过对工件表面压力的测量, 验证了该模型对工件表面压力的预测准确度。张争艳等^[58]根据磨粒受力以及磁流变液的流变特性以及磨粒的受力情况, 得到了磨粒的压入深度模型。

Li 等^[23]基于 Preston 方程和流体动力学理论, 将抛光液本构方程与流体剪切边界层分析进行结合, 得到力流变抛光材料去除模型, 该模型将抛光液的黏性指数和稠度系数引入 Preston 方程, 实现对材料去除率的高精度预测。

彭小强等^[105]在研究磁流变抛光材料去除模型时, 将 Preston 方程中的加工载荷分为 3 个部分: P_d 为磁流变的流体动压力, P_m 为磁流变液的磁化压力, P_g 为磁流变液的浮力, 通过对加工载荷的扩展得到了材料去除模型的数学表达式。该模型充分考虑了磁流变抛光中的磁性因素和抛光液的黏滞力, 较准确地反映了实际加工效率, 但由于忽视了抛光液和液相中固态核的惯性力, 与实际存在微小偏差。

3.2.4 基于智能算法的材料去除模型

张学成等^[95]采用计算流体力学方法对磁射流抛光区进行了深入研究, 模拟了冲击流场的流体动力学特性, 并分析了磁射流抛光技术的材料去除机理, 得到材料去除模型。结果表明: 磁流变液射流通过径向扩散在工件表面引起剪切作用, 从而使材料被去除, 计算流体力学(CFD)方法可以准确地预测抛光区去除率的三维分布。

Lee^[106]开发了微型磁共振流体(MR)射流抛光系统,以研究微型模具材料(黄铜和镍合金)的抛光特性。为了评估所开发的微型MR流体喷射抛光系统的稳定性,研究了抛光点和截面轮廓与抛光时间的关系。结果表明:通过所开发的微型MR流体喷射抛光系统,可对材料去除率随抛光时间的变化情况进行预测。

郭继通等^[107]采用遗传算法优化BP神经网络,建立了研磨加工的预测模型。此预测模型展现了加工参数与表面粗糙度、材料去除率之间的映射关系。与未优化的BP神经网络相比,遗传算法改进的BP神经网络在训练精度上有了明显提高,训练误差率降低了8%。此外,训练过程的迭代次数也减少了40%。然而这种算法并不能彻底摆脱BP神经网络遇到局部极小值时的困境,仍存在训练过程无法达到收敛的可能,最终导致预测模型的性能不佳。

潘杰等^[108]提出一种粒子种群算法(PSO)与BP神经网络相结合的表面粗糙度和材料去除率预测模型,该方法基于改进Sigmoid函数来实现,将工件弹性模量、磨粒弹性模量、抛光垫弹性模量、粗糙度初始值、粗糙度和去除率的要求值作为输入层,将转速、压力、磨粒粒径、磨粒百分比4个待调整的加工参数作为输出层,搭建6-10-4结构的神经网络。结果表明:该模型对比传统PSO-BP预测模型具有更快收敛速度和精度,预测的工艺参数与加工结果更接近真实加工水平。

Jain等^[109]建立了一个简单的磨料流加工过程的神经网络模型,通过实验分析了加工参数对材料去除率和表面质量的影响,在此基础上,确定了模型的输入和输出,并使用反向传播算法进行了模型训练。结果证实了这种方法的可行性,在大部分的加工条件下模型与实验的结果表现出良好的一致性。

卜达等^[110]在单因素实验的基础上,通过Design-Expert软件对CMP抛光压力、抛光盘转速和抛光液流量进行了响应曲面分析,拟合了材料去除率的回归方程,实验结果与模型预测值的误差仅有3.7%。

4 结论

(1)材料去除率与表面粗糙度是衡量磨料加工效率和质量的重要指标,磨粒种类应同时满足

高硬度、批次尺寸均匀、接近球形以同时保证加工效率和加工质量,在磨料种类确定的前提下,增大磨粒粒径不利于表面粗糙度的改善,大磨粒甚至会划伤表面;磨粒质量分数和工件转速主要影响材料去除率,加工速度和磨粒质量分数的提高有利于材料去除,但质量分数过大会导致沉积现象,不利于加工的稳定性;载荷的提高利于材料去除但不利于表面质量的改善,因此,载荷大小应根据实际需要进行精确控制。而对有其他因素参与的游离磨料加工,可总结为:增加磨粒切入工件深度的因素有利于材料去除而不利于表面质量的改善,其中磁场辅助加工需考虑磁感线的分布和场强对磨粒的分布及压入深度的影响,化学辅助加工则需保证加工液处于合适的Zeta电位值以避免颗粒在加工液中的聚集。

(2)目前大部分材料去除模型以Preston方程为基础,结合具体加工方法中的微观特性进行模型的建立,如化学机械抛光中的化学腐蚀特性、磁流变抛光中的加工液流变特性等。改进的材料去除模型可实现对材料去除率的预测,但这种方法建立的材料去除率表达式在一定条件下为恒定值,实际上在磨粒的加工过程中,随着磨具的磨损和工件表层材料的去除,材料去除率也在不断变化,改进Preston方程的建模方法存在一定的误差,并且由于加工方法繁多,Preston方程的改进方式较为复杂,因此,新型建模方法也在不断发展。目前基于智能算法建立的预测模型,可以利用关键参数的潜在变化规律来进行加工结果的预测,建立加工中输入参数和输出参数之间的映射关系。

(3)虽然已有的模型对特定参数组合下的材料去除率的预测精度较高,但现有模型忽略了加工过程的时间特性,并未深入研究多因素耦合作用下的复杂工艺环境和多尺度下的动态变化过程。而游离磨料加工是一个具有时效性的过程,研具或抛光垫的磨损、系统的状态均在不断变化,模型的参数需要随着时间的推移不断更新,因此,需要建立能够捕捉时间特征的新型智能算法模型,揭示材料去除与时间演化的内在规律,这将有助于深入理解多因素耦合作用下复杂工艺环境和多尺度下的动态变化过程,并为游离磨料加工领域提供更精确可靠的加工控制方法。

参考文献:

- [1] 黄卫清, 宁青双, 安大伟, 等. 压电超声辅助研磨抛光技术研究进展[J]. 压电与声光, 2020, 42(2): 240-244, 247.
Huang Wei-qing, Ning Qing-shuang, An Da-wei, et al. Advances in piezoelectric ultrasonic assisted grinding and polishing technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(2): 240-244, 247.
- [2] 万林林, 戴鹏, 刘志坚, 等. 蓝宝石超精密研磨加工研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 115-123.
Wan Lin-lin, Dai Peng, Liu Zhi-jian, et al. Research progress in ultra-precision lapping process of sapphire [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(1):115-123.
- [3] 徐慧敏, 王建彬, 李庆安, 等. 碳化硅晶片的化学机械抛光技术研究进展[J]. 现代制造工程, 2022(6): 153-161, 116.
Xu Hui-min, Wang Jian-bin, Li Qing-an, et al. Research progress of chemical mechanical polishing technology of silicon carbide wafer[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(6):153-161, 116.
- [4] 刘宁, 朱永伟, 李学, 等. 硬脆材料平面研抛的材料去除机理研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 86-97.
Liu Ning, Zhu Yong-wei, Li Xue, et al. Research progress of material removal mechanism in plane lapping and polishing of hard-brittle materials[J]. Materials Review, 2022, 36(7):86-97.
- [5] 李长河, 侯亚丽, 蔡光起, 等. 游离磨粒精密光整加工方法综述[J]. 精密制造与自动化, 2009(1): 4-9.
Li Chang-he, Hou Ya-li, Cai Guang-qi, et al. Overview of precision finishing with unbonded abrasive[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2009(1):4-9.
- [6] Kang J, Hadfield M. Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements[J]. Wear, 2005, 258(1-4): 2-12.
- [7] Marinescu I D, Rowe W B, Dimitrov B, et al. Tribology of Abrasive Machining Processes[M]. Norwich: William Andrew, 2004.
- [8] Kim H M, Park G H, Seo Y G, et al. Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body modes as a function of diamond abrasive size [J]. Wear, 2015, 332: 794-799.
- [9] Evans C J, Paul E, Dornfeld D, et al. Material removal mechanisms in lapping and polishing[J]. CIRP Annals, 2003, 52(2): 611-633.
- [10] Zhao F, Lin B, He Y, et al. Cross-point effect of high-speed cross scratch on hard brittle materials[J]. Ceramics International, 2021, 47(7): 9317-9324.
- [11] 李琛, 张飞虎, 张宣, 等. 硬脆单晶材料塑性去除机理研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 181-190.
Li Chen, Zhang Fei-hu, Zhang Xuan, et al. Research progress of ductile removal mechanism for hard-brittle single crystal materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3):181-190.
- [12] Ya G, Qin H W, Yang S C, et al. Analysis of the rotary ultrasonic machining mechanism[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1-3): 182-185.
- [13] 郝晓丽, 苑泽伟, 温泉, 等. 超声振动辅助研磨单晶碳化硅晶片工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(3):268-274.
Hao Xiao-li, Yuan Ze-wei, Wen Quan, et al. Process research on ultrasonic vibration assisted lapping of single crystal silicon carbide[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(3):268-274.
- [14] Zhong M, Yuan J, Yao W, et al. Double-curved disc ultrasonic-assisted lapping of precision-machined crowned rollers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 175-188.
- [15] 朱子俊, 刘顺, 韩冰, 等. 超声振动复合研磨 K9 光学玻璃工艺研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4):74-80.
Zhu Zi-jun, Liu Shun, Han Bing, et al. Study on hybrid technology of ultrasonic vibration assisted abrasive lapping K9 optical glass[J]. Surface Technology, 2020, 49(4):74-80.
- [16] Sambharia J, Mali H S. Recent developments in abrasive flow finishing process: a review of current research and future prospects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(2): 388-399.
- [17] 杨范轩, 孙玉利, 马杰, 等. 航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 452-460.
Yang Fan-xuan, Sun Yu-li, Ma Jie, et al. Study on surface integrity of aviation stainless steel in abrasive flow machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 55(3):452-460.
- [18] 王家明. 微细磨粒喷射加工的机理及其实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2011.
Wang Jia-ming. Mechanism of micro-abrasive Jet

- machining and its experimental study[D]. Nanjing: College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [19] 谢国宏. 光学元件表面抛光创成及其形貌研究[D]. 长春: 吉林大学机械与航空航天工程学院, 2022.
Xie Guo-hong. Research on surface polishing creation and surface morphology of optical element[D]. Changchun School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, 2022.
- [20] 王林. 抛光垫微观接触对化学机械抛光材料去除的影响及其跨尺度建模方法[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2021.
Wang Lin. Effect of the micro-scale contact status on the material removal process during the chemical mechanical polishing (CMP) and crossscale modeling of the CMP process[D]. Dalian: School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, 2021.
- [21] Lee H, Lee D, Jeong H. Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17: 525-536.
- [22] Steigerwald J M, Murarka S P, Gutmann R J, et al. Chemical processes in the chemical mechanical polishing of copper[J]. Materials Chemistry and Physics, 1995, 41(3): 217-228.
- [23] Li M, Lyu B, Yuan J, et al. Shear-thickening polishing method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [24] 李敏, 袁巨龙, 吴喆, 等. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 178-191.
Li Min, Yuan Ju-long, Wu Zhe, et al. Progress in ultra-precision machining methods of complex curved parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 178-191.
- [25] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
Yuan Ju-long, Zhang Fei-hu, Dai Yi-fan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [26] 李佳慧, 侯溪, 张云, 等. 弹性发射光学制造技术研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1089-1103.
Li Jia-hui, Hou Xi, Zhang Yun, et al. Research progress of elastic emission machining in optical manufacturing[J]. Chinese Journal of Optics, 2021, 14(5): 1089-1103.
- [27] 肖作义. 磁粒研磨加工机理的研究[J]. 机械制造, 2004(12): 39-41.
Xiao Zuo-yi. Study on machining mechanism of magnetic abrasive finishing[J]. Machinery, 2004(12): 39-41.
- [28] Golini D, Kordonski W I, Dumas P, et al. Magneto-rheological finishing(MRF) in commercial precision optics manufacturing[C]//Optical Manufacturing and Testing III, Denver, USA, 1999: 80-91.
- [29] 王嘉琪, 肖强. 磁流变抛光技术的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 317-328.
Wang Jia-qi, Xiao Qiang. Research progress of magnetorheological polishing technology[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 317-328.
- [30] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
Yuan Ju-long, Wu Zhe, Lyu Bing-hai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 167-177.
- [31] Gorana V K, Jain V K, Lal G K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(2-3): 201-211.
- [32] Jain R K, Jain V K. Simulation of surface generated in abrasive flow machining process[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 403-412.
- [33] Jain V K, Adsul S G. Experimental investigations into abrasive flow machining(AFM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [34] Jain R K, Jain V K. Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(12): 1689-1704.
- [35] Yan B H, Tzeng H J, Huang F Y, et al. Finishing effects of spiral polishing method on micro lapping surface[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(6): 920-926.
- [36] Cong W L, Zhang P F, Pei Z J. Experimental investigations on material removal rate and surface roughness in lapping of substrate wafers: a literature review[J]. Key Engineering Materials, 2009, 404: 23-31.
- [37] Neauport J, Destribats J, Maunier C, et al. Loose abrasive slurries for optical glass lapping[J]. Applied

- Optics, 2010, 49(30): 5736-5745.
- [38] Asghar K, Qasim M, Das D. Effect of polishing parameters on chemical mechanical planarization of C-plane(0001) gallium nitride surface using SiO₂ and Al₂O₃ abrasives[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2014, 3(8): 277-284.
- [39] Deshpande L S, Raman S, Sunanta O, et al. Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze [J]. Wear, 2008, 265(1-2): 105-116.
- [40] Kim J D, Choi M S. Stochastic approach to experimental analysis of cylindrical lapping process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(1): 51-59.
- [41] Heisel U, Avrutine J. Process analysis for the evaluation of the surface formation and removal rate in lapping[J]. CIRP Annals, 2001, 50(1): 229-232.
- [42] 李国梁. 磨粒流加工工艺参数对表面质量影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2022.
Li Guo-liang. Study on the effect of process parameters on surface quality in abrasive flow machining[D]. Dalian: School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, 2022.
- [43] 邱腾雄, 丘永亮. k9 光学玻璃磁性研磨抛光的工艺研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(1): 112-115.
Qiu Teng-xiong, Qiu Yong-liang. Research of process in k9 optical glass polishing of magnetic abrasive finishing[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2016, 44(1):112-115.
- [44] 邱腾雄, 阎秋生, 高伟强, 等. 曲面磁性研磨加工的表面粗糙度特性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008(3):26-30.
Qiu Teng-xiong, Yan Qiu-sheng, Gao Wei-qiang, et al. Research on surface roughness characteristics of curved surface in magnetic abrasive finishing[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2008(3):26-30.
- [45] 徐江. 小工具头磁流变抛光工艺及抛光轨迹研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2015.
Xu Jiang. Research on process and polishing trace of magnetorheological polishing with a small tool[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2015.
- [46] 何潮, 牛新环, 刘江皓, 等. 半导体材料 CMP 过程中磨料的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(1): 27-40.
He Chao, Niu Xin-huan, Liu Jiang-hao, et al. Research progress of abrasives in semiconductor material CMP process[J]. Micronanoelectronic Technology, 2024, 61(1):27-40.
- [47] Werrell J M, Mandal S, Thomas E L H, et al. Effect of slurry composition on the chemical mechanical polishing of thin diamond films[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2017, 18(1): 654-663.
- [48] Tam H Y, Cheng H B, Wang Y W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 276-280.
- [49] Su J X, Xu R, Wang Y P, et al. Study on lapping paste of 6H-SiC single-crystal substrate in tribochemical mechanical lapping[J]. Journal of the Institution of Engineers(India): Series E, 2020, 101: 141-148.
- [50] 张克华, 闵力, 丁金福, 等. 磨料流微去除力学分析与可控因素影响[J]. 中国机械工程, 2014, 25(18): 2432-2438.
Zhang Ke-hua, Min Li, Ding Jin-fu, et al. Micro-cutting of driving force and controllable influencing factors in abrasive flow machining[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(18): 2432-2438.
- [51] 李俊烨, 胡敬磊, 杨兆军, 等. 离散相磨粒粒径对磨粒流研抛共轨管质量的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(2):492-499.
Li Jun-ye, Hu Jing-lei, Yang Zhao-jun, et al. Effect of the size of discrete phase abrasive particles on the abrasive flow polishing quality[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(2):492-499.
- [52] Basim G B, Adler J J, Mahajan U, et al. Effect of particle size of chemical mechanical polishing slurries for enhanced polishing with minimal defects[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(9): No. 3523.
- [53] Li Z C, Pei Z J, Funkenbusch P D. Machining processes for sapphire wafers: a literature review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225: 975-989.
- [54] Namba Y, Tsuwa H. Ultrafine finishing of sapphire single crystal[J]. ANN CIRP, 1977, 26: 325-329.
- [55] Su J X, Liu X L, Zhang Z Q, et al. Influence of lapping parameters on 6H-SiC crystal substrate (0001) C surface based on diamond particle[J]. Advanced Materials Research, 2012, 565: 237-242.
- [56] Wang Y, Xu Z, Yin S. Removal characteristics and performance of brick-shape permanent magnet-assisted magnetorheological lapping[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,

- 105: 4461-4480.
- [57] Farahnakian M, Shahrajabian H. Experimental study on surface roughness and flatness in lapping of AISI 52100 steel[J]. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 2016, 9(2): 61-68.
- [58] 张争艳, 戴立达, 乔国朝. 磁流变抛光表面形貌仿真与试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2023, 52(2): 1-8.
Zhang Zheng-yan, Dai Li-da, Qiao Guo-chao. Simulation and experimental study on surface topography of magnetorheological polishing[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2023, 52(2):1-8.
- [59] 褚清清, 蔡瑾瑜, 李倍, 等. 无心超精研磨 GCr15 轴承钢圆柱滚子的圆度优化正交试验研究[J]. *科技与创新*, 2023(7):16-20.
Chu Qing-qing, Cai Jin-yu, Li Bei, et al. Orthogonal experimental study of roundness optimization of centerless super-finish ground GCr15 bearing steel cylindrical rollers[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2023(7):16-20.
- [60] Sasani K, Abbasi S P, Kolian B S, et al. Relationship between concentration, time and surface roughness of GaAs wafer in lapping process: an experimental investigation[C]//Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO), Wuhan, China, 2011: 1-4.
- [61] Park C, Kim H, Lee S, et al. The influence of abrasive size on high-pressure chemical mechanical polishing of sapphire wafer[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology*, 2015, 2: 157-162.
- [62] Cong W L, Zhang P F, Pei Z J. Experimental investigations on material removal rate and surface roughness in lapping of substrate wafers: a literature review[J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 404: 23-31.
- [63] Deaconescu T, Deaconescu A. Developing an analytical model and computing tool for optimizing lapping operations of flat objects made of alloyed steels[J]. *Materials*, 2020, 13(6): No. 1343.
- [64] 李俊焯, 乔泽民, 杨兆军, 等. 介观尺度下磨料浓度对磨粒流加工质量的影响[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2017, 47(3): 837-843.
Li Jun-ye, Qiao Ze-min, Yang Zhao-jun, et al. Influence of abrasive concentration on processing quality of abrasive flow in mesoscopic scale[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(3):837-843.
- [65] 汤勇, 周德明, 杨钢, 等. 磨料流光整加工性研究[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2001, 29(9): 17-19.
Tang Yong, Zhou De-ming, Yang Gang, et al. Machinability of abrasive flowing machining[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2001, 29(9):17-19.
- [66] Tseng W T, Wang Y L. Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical-mechanical polishing processes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144(2): 15-17.
- [67] Gullu A, Calimli H. The investigation of the effects of machining parameters on surface roughness in lapping[J]. *Gazi University Journal of Science*, 2005, 18(2): 229-237.
- [68] 邓家云. 单晶 SiC 电芬顿化学机械抛光机理研究[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2022.
Deng Jia-yun. Mechanism of electro-fenton chemical mechanical polishing for single crystal SiC[D]. Guangzhou: School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, 2022.
- [69] 卓志佳. 单晶 GaN 电芬顿化学机械抛光加工机理研究[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2022.
Zhuo Zhi-jia. Mechanism research of electro-fenton chemical mechanical polishing for single crystal GaN [D]. Guangzhou: School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, 2022.
- [70] 郑锦华, 魏新煦, 吴双, 等. 载荷及研磨颗粒粒径对金属表面微孔织构的影响[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(7): 200-206.
Zheng Jin-hua, Wei Xin-xu, Wu Shuang, et al. Influence of load and size of abrasive particle on micro-pore texture on metal surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(7): 200-206.
- [71] 郑宸曦, 陈书凝, 张鑫龙. 磨料流光整加工理论与技术研究进展[J]. *表面技术*, 2024(17): 17-40, 111.
Zheng Chen-xi, Chen Shu-ning, Zhang Xin-long, et al. Research progress of theory and technology in abrasive flow machining[J]. *Surface Technology*, 2024(17):17-40, 111.
- [72] Chang K Y, Song Y H, Lin T R. Analysis of lapping and polishing of a gauge block[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20: 414-419.
- [73] Li Y, Lai M, Fang F. Effects of polishing speed and a water environment on the mechanism of nanometric mechanical polishing of single-crystal lutetium oxide [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30:

- No. 103194.
- [74] Ye K, Wang J, Gao H, et al. Optimization of lapping process parameters of CP-Ti based on PSO with mutation and BPNN[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9-10): 2859-2866.
- [75] Kala P, Pandey P M. Experimental investigations into ultrasonic-assisted double-disk magnetic abrasive finishing of two paramagnetic materials[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, 231(6): 1021-1038.
- [76] 舒坤, 孙岩, 陈燕. 超声振动辅助磁粒研磨技术的研究进展[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(6): 39-54, 78. Shu Kun, Sun Yan, Chen Yan. Review of research progress on ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing technology[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6): 39-54, 78.
- [77] Jha S, Jain V K. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological abrasive flow finishing(MRAFF) process[J]. *Wear*, 2006, 261(7-8): 856-866.
- [78] 肖强, 王嘉琪, 靳龙平. 磁流变抛光表面粗糙度建模与仿真[J]. *工具技术*, 2022, 56(4): 52-59. Xiao Qiang, Wang Jia-qi, Jin Long-ping. Modeling and simulation of surface roughness in magnetorheological finishing[J]. *Tool Engineering*, 2022, 56(4): 52-59.
- [79] Yao C, Wang C, Niu X, et al. The stability of a novel weakly alkaline slurry of copper interconnection CMP for GLSI[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39(2): 82-89.
- [80] Yin T, Wang Z D, Kurokawa S, et al. Characteristic of SiC slurry in ultra precision lapping of sapphire substrates[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(6): 1021-1029.
- [81] Khanna A J, Gupta S, Kumar P, et al. Study of agglomeration behavior of chemical mechanical polishing slurry under controlled shear environments[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2018, 7(5): 238-242.
- [82] 阎秋生, 徐沛杰, 路家斌, 等. 硅溶胶抛光液稳定性及对 SiC 化学机械抛光的影响[J]. *半导体技术*, 2018, 43(9): 664-668. Yan Qiu-sheng, Xu Pei-jie, Lu Jia-bin, et al. Stability of colloidal silica polishing solution and its effect on SiC chemical mechanical polishing[J]. *Semiconductor Technology*, 2018, 43(9): 664-668.
- [83] 程佳宝, 石芸慧, 牛新环, 等. CMP 抛光液中 SiO₂ 磨料分散稳定性的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2024, 61(2): 31-41. Cheng Jia-bao, Shi Yun-hui, Niu Xin-huan, et al. Research progress on dispersion stability of SiO₂ abrasive in CMP slurr[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2024, 61(2): 31-41.
- [84] Luo Q, Ramarajan S, Babu S V. Modification of the preston equation for the chemical-mechanical polishing of copper[J]. *Thin Solid Films*, 1998, 335(1-2): 160-167.
- [85] Luo Q, Campbell D R, Babu S V. Chemical-mechanical polishing of copper in alkaline media[J]. *Thin Solid Films*, 1997, 311(1-2): 177-182.
- [86] Wei H, Peng C, Gao H, et al. On establishment and validation of a new predictive model for material removal in abrasive flow machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 138: 66-79.
- [87] 薛进学, 贾松阳, 杨柏松. 贯穿式超精研圆锥滚子的研磨特性分析[J]. *制造业自动化*, 2016, 38(1):33-37. Xue Jin-xue, Jia Song-yang, Yang Bai-song. The polish properties analysis of through-feed superfinishing tapered roller[J]. *Manufacturing Automation*, 2016, 38(1):33-37.
- [88] Cheng K, Shao Y, Jadva M, et al. Development of the improved preston equation for abrasive flow machining of aerofoil structures and components[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2019, 233(9): 1397-1404.
- [89] Zhao B, Shi F G. Chemical mechanical polishing: threshold pressure and mechanism[J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 1998, 2(3):No. 145.
- [90] Runnels S R. Feature-scale fluid-based erosion modeling for chemical-mechanical polishing[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1994, 141(7): 1900-1904.
- [91] Luo J, Dornfeld D A. Effects of abrasive size distribution in chemical mechanical planarization: modeling and verification[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, 16(3): 469-476.
- [92] Sundararajan S, Thakurta D G, Schwendeman D W, et al. Two-dimensional wafer-scale chemical mechanical planarization models based on lubrication theory and mass transport[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, 146(2): 761-766.

- [93] 李敏, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 剪切增稠抛光材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7):142-151.
Li Min, Lyu Bing-hai, Yuan Ju-long, et al. Material removal mathematics model of shear thickening polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7):142-151.
- [94] 张峰. 磁流变抛光数学模型的建立[J]. 光学技术, 2000(2): 190-192.
Zhang Feng. Oundation of mathematics model of magnetorheological finishing[J]. Optical Technique, 2000(2): 190-192.
- [95] 张学成, 戴一帆, 李圣怡, 等. 基于CFD的磁射流抛光去除机理分析[J]. 国防科技大学学报, 2007(4): 110-115.
Zhang Xue-cheng, Dai Yi-fan, Li Sheng-yi, et al. Analysis of material removal mechanism in magnetorheological jet polishing by CFD[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007(4): 110-115.
- [96] Zhou F, Yao W, Yuan J, et al. Establishment of material removal model for lapping ceramic balls with variable-radius groove plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111: 2577-2587.
- [97] Farsakoglu O F, Kocabas H, Bayar M, et al. Lapping with loose abrasives in lens manufacturing[C]//Current Developments in Lens Design and Optical Systems Engineering, San Diego, USA, 2000: 451-460.
- [98] Jin T, Ma M, Li B, et al. Mechanical polishing of ultrahard nanotwinned diamond via transition into hard sp²-sp³ amorphous carbon[J]. Carbon, 2020, 161: 1-6.
- [99] Luo J, Dornfeld D A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2001, 14(2): 112-133.
- [100] Suratwala T, Feit M, Steele W, et al. Microscopic removal function and the relationship between slurry particle size distribution and workpiece roughness during pad polishing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(1): 81-91.
- [101] Suratwala T I, Feit M D, Steele W A. Toward deterministic material removal and surface figure during fused silica pad polishing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 93(5): 1326-1340.
- [102] Suratwala T, Steele W, Feit M, et al. Relationship between surface μ -roughness and interface slurry particle spatial distribution during glass polishing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(7): 2790-2802.
- [103] Hu Y, Shi D, Hu Y, et al. Investigation on the material removal and surface generation of a single crystal SiC wafer by ultrasonic chemical mechanical polishing combined with ultrasonic lapping[J]. Materials, 2018, 11(10): 1-13.
- [104] Kordonski W, Gorodkin S. Material removal in magnetorheological finishing of optics[J]. Applied Optics, 2011, 50(14): 1984-1994.
- [105] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡. 磁流变抛光材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2004(4): 67-70.
Peng Xiao-qiang, Dai Yi-fan, Li Sheng-yi. Material removal model of magnetorheological finishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004(4): 67-70.
- [106] Lee J W, Ha S J, Cho Y K, et al. Investigation of the polishing characteristics of metal materials and development of micro MR fluid jet polishing system for the ultra precision polishing of micro mold pattern [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29: 2205-2211.
- [107] 郭继通, 郑方志, 徐成宇, 等. 基于遗传算法和神经网络的软脆工件研磨加工工艺智能决策系统[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 23-29, 46.
Guo Ji-tong, Zheng Fang-zhi, Xu Cheng-yu, et al. Intelligent decision system for lapping process of soft and brittle workpiece based on genetic algorithm and neural network[J]. Surface Technology, 2020, 49(4):23-29,46.
- [108] 潘杰, 陈凡, 杨炜, 等. 基于SPSO-BP神经网络的自适应抛光工艺参数匹配[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 387-399.
Pan Jie, Chen Fan, Yang Wei, et al. Adaptive polishing process parameter matching based on SPSO-BP neural network[J]. Surface Technology, 2022, 51(8):387-399.
- [109] Jain R K, Jain V K, Kalra P K. Modelling of abrasive flow machining process: a neural network approach[J]. Wear, 1999, 231(2): 242-248.
- [110] 卞达, 宋恩敏, 倪自丰, 等. 基于响应面法的单晶硅CMP抛光工艺参数优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(6): 745-752.
Bian Da, Song En-min, Ni Zi-feng, et al. Optimization of CMP processing parameters for Si based on response surface method[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(6): 745-752.