Feb. 2024

doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20230222001

弹性基体软固结磨料磨具的材料去除机理

王家庆 郭 磊 1,2 刘天罡 3 郭万金 1 吕景祥 1 靳淇超 1

- (1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室 西安 710064;
 - 2. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044;
 - 3. 中天引控科技股份有限公司 西安 710010)

摘要:基于弹性磨具的磨抛工艺为硬脆材料超精密加工效率与加工质量的兼顾平衡提供了新的解决思路,但其磨抛过程的材料去除机理尚未明确。为研究弹性磨抛过程中的材料去除行为,以硅橡胶作为磨具基体材料,混合微米级金刚石磨料制备弹性基体软固结磨料磨具,利用有限元仿真分析方法研究弹性基体软固结磨粒的受力状态,结合接触力学与运动学分析建立考虑单颗磨粒磨损行为与有效磨粒数量的材料去除模型,通过石英玻璃试件的弹性磨抛加工试验验证预测模型的准确性。结果表明:石英玻璃试件的材料去除率随着磨抛压力、主轴转速、磨具偏角的增大而显著增加,而磨料粒径对其影响程度较小;当工艺参数组合为磨料粒径 100 μm、磨抛压力 7 N、主轴转速 1 500 r/min、磨具偏角 20°时,经 60 min 磨抛后,工件已加工表面粗糙度由 1.069 μm 降至 0.089 μm,材料去除率为 8.893×10⁸ μm³/min;该试验条件下,建立的材料去除模型预测准确度相比 Preston 经典模型提高 36.7%。研究成果可为实现硬脆材料的确定性材料去除提供技术支持和理论依据。

关键词:弹性基体磨具;软固结磨料;磨削抛光;材料去除效率;多因素模型中图分类号:TG58

Material Removal Mechanism of the Elastic Soft-bonded Abrasive Tool

WANG Jiaqing ¹ GUO Lei ^{1, 2} LIU Tiangang ³ GUO Wanjin ¹ LÜ Jingxiang ¹ JIN Qichao ¹

- (1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang' an University, Xi' an 710064, China;
- State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
 Zhongtian Control Technology Co., Ltd., Xi' an 710010, China)

Abstract: Hard and brittle materials such as sapphire (α-Al₂O₃), silicon carbide (SiC), and optical glass are widely used in aerospace, biomedicine, optoelectronic information, and other advanced fields. The compound demand for efficiency and quality has been a long-standing problem in the development of ultraprecision machining technology for hard and brittle materials. Abrasive tools based on rubber or other matrix materials can achieve nanometer-scale surface roughness while maintaining a high material removal efficiency and avoiding surface scratches and damage through elastic contact adaptive grinding and polishing. However, the grinding and polishing processes based on elastic abrasive tools are complex, and the material removal mechanism is unclear. An elastic soft-bonded abrasive tool is proposed to evaluate the mechanism of flexible-contact ultraprecision grinding and polishing. Silicon

基金项目: 国家自然科学基金 (51805044); 中国博士后科学基金 (2020M673318); 陕西省自然科学基础研究计划 (2022JM-254); 机械传动国家重点实验室开放基金 (SKLMT-MSKFKT-202006)。

Fund: National Natural Science Foundation of China (51805044); China Postdoctoral Science Foundation (2020M673318); Basic Research Plan of Provincal Natural Science of Shaanxi (2022JM-254); Open Fund of State Key Laboratory of Mechanical Transmission (SKLMT-MSKFKT-202006).

收稿日期: 2023-02-22; 修改日期: 2023-04-17; 接受日期: 2023-05-05; 上线日期: 2023-12-15。

Received February 22, 2023; Revised April 17, 2023; Accepted in revised form May 5, 2023; Available online December 15, 2023.

引用格式: 王家庆, 郭磊, 刘天罡, 等. 弹性基体软固结磨料磨具的材料去除机理[J]. 中国表面工程, 2024, 37(1): 192-204.

Citation format: WANG Jiaqing, GUO Lei, LIU Tiangang, et al. Material removal mechanism of the elastic soft-bonded abrasive tool[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(1): 192-204.

rubber is selected as the matrix material, and an elastic soft-bonded abrasive tool is prepared by mixing micrometer-sized diamond abrasives. A contact model between the elastic matrix and the processing object is established based on the Hertz contact theory. The stress distribution in the contact area is then visualized and analyzed. The stress state of the soft-bonded abrasive grains in the matrix during the grinding and polishing processes is analyzed using theoretical derivation and finite element simulation. Based on the Preston equation, contact stress distribution, and kinematic analysis, an optimal material removal model for compliant grinding and polishing is proposed, which considers the wear mechanism of a single abrasive grain and the number of effective abrasive grains. The material removal rate and material removal profile in the machining area of the single-point dwell grinding and polishing are predicted. The accuracy of the predictive model is verified by conducting compliant grinding and polishing experiments on quartz glass specimens. The results showed that the material removal profiles measured by the theoretical simulation and experiment did not exactly match; however, they had a high similarity, and the maximum deviation in the material removal depth was 13.1%. In the y-z profile, the cross-sectional curve of the material-removal profile was distributed axially symmetrically. In the x-z profile, the position of the maximum material removal shifted slightly along the x-axis direction. This is because the relative velocities in the contact area are not symmetrically distributed when the elastic abrasive tool is at a certain inclination angle. The material removal rate of the quartz glass specimen significantly increased with an increase in the grinding and polishing pressure, spindle speed, and tool inclination angle, whereas the effect of the abrasive grain size was relatively small. When the process parameters were set to the abrasive grain size of 100 μm, grinding and polishing pressure of 7 N, spindle speed of 1 500 r / min, and tool inclination angle of 20°, after 60 min of grinding and polishing, the surface of the workpiece changed from having obvious grooves to having good uniformity and the surface roughness of the machined workpiece was reduced from 1.069 µm to 0.089 µm; the material removal rate was 8.893×10⁸ μm³ / min, obtaining excellent surface quality while maintaining a high material removal rate. Under the aforementioned experimental conditions, the accuracy of the material removal model proposed in this study was 36.7% higher than that of the classic Preston model. The elastic abrasive tool has good technical feasibility in ultra-precision grinding and polishing for hard and brittle materials The optimized material removal model can effectively describe the compliant grinding and polishing process of the elastic abrasive tool, and provides technical and theoretical bases for deterministic material removal of hard and brittle materials.

Keywords: elastic abrasive tool; soft-bonded abrasive; grinding and polishing; material removal rate; multi-factor model

0 前言

以蓝宝石、光学玻璃和陶瓷为代表的硬脆材料 以其高强度、高硬度、耐高温及化学稳定性好等 优点而备受关注, 在航空航天、光电能源、生物 医疗等领域得到广泛应用[1-3]。硬脆材料具有高硬 度、低断裂韧性等特点,属于典型的难加工材 料[4-5], 传统加工方法难以满足其超精密制造过程 对材料去除效率和工件表面质量的复合要求。目 前用于硬脆材料超精密磨削抛光的工艺方法依据 加工过程中磨料颗粒的运动行为与材料去除方式 主要分为两类:基于流体载运的游离磨料磨削抛 光与基于工具接触的固结磨料磨削抛光。其中流 体载运式磨抛方法主要包括磁流变液抛光[6]、电 流变液抛光[7]、射流抛光[8]等,单纯的流体运载 磨料抛光方法普遍存在着磨削抛光效率较低、材 料去除函数稳定性不足、辅助能场应用场景受限 以及成本高、环境友好性差等问题[9]。相比而言, 传统的刚性基体工具接触式磨抛工艺可以达到较 高的材料去除效率,但工具与工件的刚性接触极易造成工件表面及亚表面微破碎、微裂纹以及损伤层等显著缺陷^[10],难以满足以光学应用为代表的超精密加工工艺需求^[11]。

为了应对上述问题, 国内外学者开展研究将磨 料与橡胶、硅胶等弹性材料混合制成弹性基体软固 结磨料磨具。采用弹性基体磨具磨抛硬脆材料,磨 具与工件之间的弹性接触,不仅能够减少材料的表 面和亚表面损伤,而且有助于对曲面工件进行仿形 加工: 弹性基体材料力学性能较弱, 更容易损耗, 使磨具表面的磨粒不断更新替换,具有一定自锐性。 BEAUCAMP 等[12]提出一种形状自适应磨削 (Shape adaptive grinding, SAG) 工具, 其以 Kevlar 织物加 固的球形橡胶膜为基体,通过橡胶膜顶部沉积有金 刚石磨料颗粒的第二变形层来进行磨削;通过碳化 硅磨削试验,得到的工件表面粗糙度(Ra)为 0.4 nm, 材料去除率为 100 mm3/min。徐西鹏等[13]提出一种 基于凝胶原理的大面积细粒度磨抛工具, 在加工单 晶硅片时,采用 5 um 磨粒的凝胶工具加工后的硅片 表面粗糙度可以降低到 0.3 nm。LI 等[14]提出一种以 液态硅胶、改性碳化硅、固化剂、增韧剂混合成型的圆柱基体半球形端部的弹性磨具,研究了碳化硅磨粒大小以及含量对磨具接触变形的影响。NIE等^[15]通过固化具有不同杨氏模量的硅酮材料,制备了具有迷宫、凹坑和混杂纹理的可变形抛光工具,并进行定点抛光试验。结果表明,采用具有迷宫纹理表面的抛光工具加工得到的表面质量最好,表面粗糙度为 10 nm。上述针对弹性基体固结磨料磨具磨抛硬脆材料的研究多侧重于磨具设计制备以及磨抛工艺方法研究,然而针对弹性基体固结磨料磨具磨抛过程中的磨粒运动状态及其作用下的材料去除机理等相关研究鲜有报道。

本文以硅橡胶为基体材料混合微米级金刚石磨料制备弹性基体软固结磨料磨具,深入分析外力作用下弹性基体内软固结磨粒的运动状态,并对弹性基体磨具与工件之间接触区域内的应力分布和速度分布进行研究。在此基础上,结合单颗磨粒材料去除机理与磨抛区域内有效磨粒数量计算建立了弹性基体磨具磨抛过程的多因素材料去除模型。最后,通过石英玻璃的磨抛加工试验,验证材料去除模型的准确性。

1 弹性磨具磨抛机理

1.1 弹性基体软固结磨料磨具磨抛加工

常规固结磨料磨具主要以金属、陶瓷、酚醛树 脂等作为结合剂材料粘合磨料颗粒以实现特定形状 磨具的制备,其磨削过程通过磨具与工件间的刚性 接触式确定性加工完成材料去除及表面光整[16]。然 而采用刚性基体固结磨料磨具加工时,磨具与工件 间的刚性接触导致有效加工区域面积较小,并且容 易出现因磨粒粒径差异导致的磨粒出刃等高性较差 等问题,如图 1a 所示,只有少数较大粒径磨粒完成 有效加工行为:同时,磨削过程中磨具作用于工件 表面的法向磨削力主要由上述较大粒径磨粒分担, 导致其成为加工区域内硬质点, 在工件表面造成刻 痕、裂纹、凹坑等损伤。实际生产中, 采用弹性材 料(橡胶、聚氨酯等)作为基体制成的具有柔性特 点的磨具可以有效减小固结磨料磨具刚性接触及其 磨料粒径差异对加工表面造成的损伤。如图 1b 所 示,弹性基体软固结磨料磨具加工时,磨具受力发 生弹性变形使得磨具与工件间的接触面积增大,进 而增加了参与有效加工的磨粒数量,减小了单颗磨 粒承担载荷,提高了磨具磨粒出刃等高性,改善了

传统刚性磨具以刚克刚、以硬碰硬的加工模式带来的诸多弊端,兼顾了磨削加工效率和表面损伤控制,并且具有特定模量的弹性基体磨具能够通过力位控制与复杂曲面随形贴合,以实现复杂面型结构工件的超精密加工。

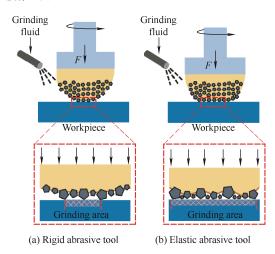


图 1 不同基体固结磨料磨具对比

Fig. 1 Grinding by different fixed abrasive tools

1.2 软固结磨粒受力分析

对与弹性基体软固结磨料磨具而言, 当磨具以 一定压力和速度与工件接触时,软固结磨粒的受力 分析如图 2a 所示,弹性基体对磨粒产生一个水平作 用力 F_x 和垂直作用力 F_y ,同时工件表面对磨粒产生 一个反作用力 F_c ,其垂直分量 F_{cv} 与 F_v 相互平衡。 弹性基体软固结磨料磨具中磨粒与基体间的结合强 度较弱,当工件对磨粒反作用力的水平分量 F_{cx} 超 过水平作用力 F_x 时,磨粒逐渐从磨具表面脱落成为 游离状态。为了确定磨抛过程中磨粒在弹性基体与 工件之间的运动状态,在 Abaqus 对外力作用下,对 磨粒在弹性基体与工件间的受力状态进行仿真。二 维模型由弹性基体、磨粒和工件三部分组成, 线弹 性材料参数设置如表 1 所示。硅橡胶基体材料选用 Mooney-Rivlin 模型对其超弹性特性进行描述,参 数 C_{10} =0.290 MPa, C_{01} =0.060 MPa, D_1 =0^[17]。设 置磨粒与基体相互作用,磨粒的轮廓面为主面, 与磨粒相接触的弹性基体表面为从面;将工件底 部设置为铰接 ($U_1=U_2=0$), 保持工件固定, 选取 弹性基体上表面,设定 $U_1=0$, $U_2=-0.05$; 创建分 析步, 在场输出量中选定应力 S; 网格划分结果 如图 2b, 其中工件的网格类型采用 CPS3, 单元 形状为三角形,单元数量为100个,磨粒和基体 的网格类型均采用 CPS4R, 单元形状为四边形,

单元数量分别为 166 个和 461 个;然后进行有限元分析。从图 2c 的结果可以观察到,磨具表面磨粒出刃高度不同时,外力作用下基体的弹性变形使磨粒在弹性基体中产生一定"退让"行为,减小磨粒出刃高度差异,增加参与材料去除的磨粒数量。从图 2d 的结果可以观察到,对弹性基体同时施加均匀载荷和横向位移时,磨粒与弹、性基体由原来的紧密接触,到逐渐出现接触缝隙,弹性基体对磨粒的包镶把持力减弱,最终磨粒从

弹性基体中脱离为游离磨粒。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Elastic modulus / GPa	Poisson' s ratio	Density / (kg • m ⁻³)
Silicone rubber matrix	0.006	0.47	910
Diamond abrasive	1 100	0.10	3 470
Quartz glass workpiece	72.5	0.14	2 200

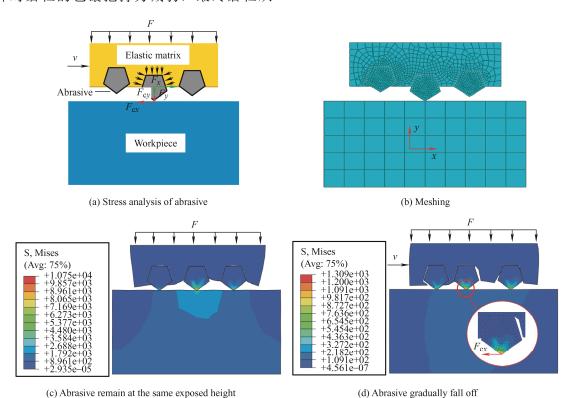


图 2 弹性基体软固结磨粒的不同状态

Fig. 2 Different states of abrasive fixed in the elastic matrix

图 3 为磨粒顶部单元所受应力 F_{cx} 随模拟时间的变化情况,可以看出,刚开始 F_{cx} 随着时间逐渐增大,然后在 t 约为 1 s 左右时, F_{cx} 达到最大值 1.53 N,并发生突变。这是因为刚开始时基体对磨粒的固结作用力 F_x 能与 F_{cx} 保持平衡,而当 F_{cx} 不断增大,超过 F_x 的临界最大值时,基体不再能够维持力平衡, F_{cx} 无法继续增大,而磨粒开始逐渐从基体中脱落,由此得出 F_x 临界最大值为 1.53 N。由此可推断,采用弹性基体软固结磨料磨具加工时,弹性磨具中的软固结磨粒首先以二体磨损的形式进行磨削加工,随着加工过程的进行,部分软固结磨粒受力脱落转化为在磨具与工件间运动的游离磨粒,并以三体磨损形式完成抛光加工。因此,理论上将同时存在着二体磨损主导的磨削

加工和三体磨损主导的抛光加工称作"磨-抛"协同加工,简称磨抛加工。

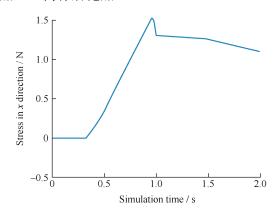


图 3 磨粒失效时的受力突变

Fig. 3 Change of stress when abrasive falling off

2 多因素材料去除模型

弹性基体软固结磨料磨具的材料去除机制涉及 弹性基体、磨料颗粒和工件之间的多种影响因素相 互作用。如图 4 所示,为理论建模的流程,首先建 立基于宏观尺度上的弹性基体与工件之间的接触应 力和运动学分析,然后建立单颗磨粒与工件之间的 微观接触模型,最后结合单颗磨粒去除机理和有效 磨粒数量的计算,建立一种多因素材料去除模型。

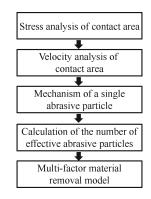


图 4 材料去除模型建模流程

Fig. 4 Material removal model modeling process

在理论推导过程中,设置如下假设条件以简化模型:

- (1)弹性磨具与抛光表面接触后产生弹性变形, 且在接触区域保持平坦。
- (2)磨削液流体压力、弹性基体磨具表面粗糙 度、接触区域不稳定性等因素对磨具与工件间接触 特性的影响可忽略不计。
- (3) 材料去除体积由磨料颗粒受力作用下工件 材料发生的塑性变形主导。

2.1 磨具与工件间接触应力分布

弹性磨具与工件之间接触区域的接触应力直接 影响磨抛过程的材料去除效率。Hertz 接触理论^[18] 广泛用于建立应力分布模型。根据 Hertz 接触理论, 两个球体接触区域为一个圆形。弹性磨具与工件接 触模型简化结果如图 5 所示。当磨抛时的法向正压 力为 F 时,接触圆的半径 b 为^[19]:

$$b = \left(\frac{3FR_{\rm pw}}{4E_{\rm pw}}\right)^{1/3} \tag{1}$$

式中, E_{pw} 为弹性基体与工件的相对弹性模量, R_{pw} 为接触时的等效曲率半径:

$$\frac{1}{E_{\rm pw}} = \frac{1 - \upsilon_{\rm p}^2}{E_{\rm p}} + \frac{1 - \upsilon_{\rm w}^2}{E_{\rm w}} \; ; \quad \frac{1}{R_{\rm pw}} = \frac{1}{R_{\rm p}} + \frac{1}{R_{\rm w}} \tag{2}$$

式中, R_p 、 E_p 、 v_p 分别为弹性磨具的半径、弹性模

量和泊松比; $R_{\rm w}$ 、 $E_{\rm w}$ 、 $v_{\rm w}$ 分别为工件的半径、弹性模量和泊松比。

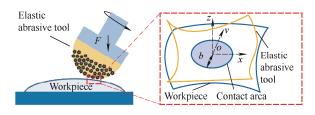


图 5 弹性磨具与工件接触模型

Fig. 5 Contact model between the elastic abrasive tool and workpiece

以接触区域中心为原点 o,建立o-xy坐标系,将点o处的法向量方向作为 z 轴,则坐标系o-xy内圆形接触区域的应力分布可表示为:

$$p(x,y) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$
 (3)

式中, p_0 为接触圆中心o处的压强,可表示为:

$$p_0 = \frac{3F}{2\pi b^2} \tag{4}$$

利用 Matlab 对式(3)进行数值模拟,以确定接触区域应力分布特性。本文中弹性磨具的半径为 R_p =15 mm,弹性基体材料为 Smooth-On Ecoflex 0050 硅橡胶,工件为平面石英玻璃,其弹性模量和泊松比分别为 E_p =6 MPa, v_p =0.47, E_w =72.5 GPa, v_w =0.14。当磨抛压力F为6N时,接触区域内的应力分布如图6所示,可以看出接触应力呈高斯分布,接触区域中心的应力最大,应力随着与中心距离的增大逐步减小,且接触应力是围绕接触区域中心对称分布的。

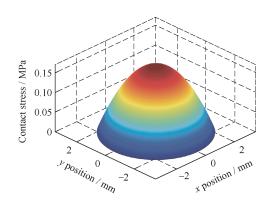


图 6 接触应力分布数值模拟

Fig. 6 Simulation of the contact stress distribution

为了验证模型的正确性,利用 Abaqus 模拟弹性磨具在平面工件上的接触状态。对弹性磨具和工件进行建模,弹性磨具为半径 R_p =15 mm 的半球形,弹性基体材料的本构模型与 1.2 节相同;工件为

40 mm×40 mm×10 mm 的立方体, 线弹性材料参 数见表 1; 初始时,设置工件为完全固定状态,弹 性磨具与工件表面临界接触; 在磨具上表面施加均 匀载荷 F=6 N; 然后进行划分网格, 结果如图 7 所 示,弹性磨具的网格类似采用 C3D10,单元形状为 四面体,单元数量为8441个;工件的网格类型采 用 C3D8R,单元形状为六面体,单元数量为 32 500 个;最后进行有限元分析,结果如图 8 所示,接触 应力由中心向外围逐渐减小。在工件表面沿接触圆 直径方向均匀取 11 个点,并提取其应力值,与理论 模型对比,结果如图 9 所示。应力分布曲线的有限 元模拟值略大于理论推导值,整体分布情况均呈现 出接触区域中心应力较大而区域边缘应力较小的特 征,考虑到有限元仿真分析模型网格敏感性及边界 条件设置等因素导致的误差,本研究理论推导模型 能够较为准确地反映接触区域应力分布特征。

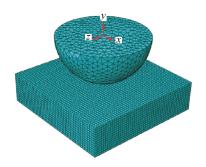


图 7 网格划分 Fig. 7 Meshing model

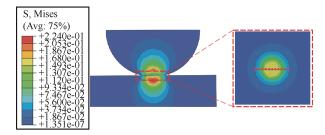


图 8 接触状态有限元仿真

Fig. 8 Finite element simulation of the contact state

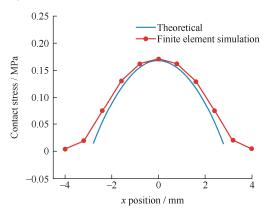


图 9 接触区域应力分布对比

Fig. 9 Comparison of stress distribution in contact area

2.2 磨具与工件间接触区域速度分布

磨具相对于工件表面的运动速度也是决定磨具 材料去除能力大小的重要因素。弹性磨具与工件接 触区域的速度分布与磨具的几何尺寸、偏角以及主 轴转速有关,需要对接触区域的速度分布进一步分 析,弹性磨具加工平面工件示意如图 10 所示。

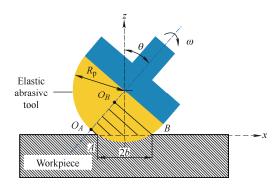


图 10 弹性磨具与平面工件的接触示意

Fig. 10 Contact between the elastic polishing tool and the plane workpiece

对接触区域内任意一点 G(x, y)建立如图 11 所示的几何模型,进行速度分析。当磨具偏角为 θ ,主轴转速为 ω ,弹性磨具半径为 R_p ,接触圆半径为 b 时,则接触区域内任意一点 G(x, y)处的速度为:

$$v_{\omega}(x,y) = \omega \sqrt{y^2 + (x\cos\theta + \sqrt{R_{\rm p}^2 - b^2}\sin\theta)^2} \quad (5)$$

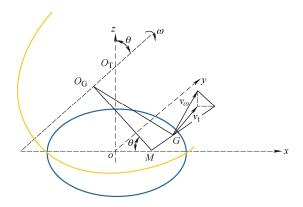


图 11 接触区域的速度分布几何模型

Fig. 11 Velocity distribution in the contact area

速度 v_{ω} 可以分解为法向速度 v_{n} 和切向速度 v_{τ} ,法向速度 v_{n} 在实际的磨抛过程中非常小,对磨抛过程中材料去除的影响可以忽略不计,因此接触区域任意一点 G(x,y)的相对速度 $v_{\tau}(x,y)$ 可以表示为:

$$v_{\rm r}(x,y) = v_{\rm r}(x,y) = \omega \cdot \sqrt{(y\cos\theta)^2 + (x\cos\theta + \sqrt{R_{\rm p}^2 - b^2}\sin\theta)^2}$$
 (6)

当主轴转速 ω 为 1 000 r/min,磨抛压力 F 为 6 N,磨具偏角 θ 为 30° 时,利用 Matlab 对式(6)

进行数值模拟,此时接触区域的速度分布情况如图 12 所示,接触区域内的速度关于 x-z 截面呈对称分布,而沿着 x 轴方向呈线性变化。

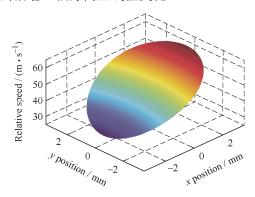


图 12 接触区域速度分布数值模拟

Fig. 12 Simulation of the velocity distribution

根据 Preston 方程,材料去除可以表达为:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = kpv \tag{7}$$

式中, ΔH 为接触区域的材料去除深度,p 为接触区域内的正压力,v 为弹性磨具与工件之间的相对速度。k 为 Preston 系数,受除磨抛正压力和相对速度以外的其他因素如弹性磨具基体材料、磨料与工件材料等的影响,其值一般由试验确定。在已知接触区域应力分布和相对速度分布的情况下,就可以计算磨抛区域的材料去除率为:

$$MRR_{p} = k \cdot \iint p(x, y) \cdot v(x, y) dxdy$$
 (8)

式中,p(x,y)为接触区域的应力分布函数,v(x,y)为相对速度分布函数。假设加工过程中应力分布函数和速度分布函数恒定不变。弹性基体软固结磨料磨具的材料去除机制涉及弹性基体、磨料颗粒和工件之间的多种影响因素相互作用,其中有许多影响因素(如磨粒尺寸、磨料浓度、有效磨粒数量等)Preston经验方程并没有考虑到,而它们在磨抛过程中也有很大的影响。

2.3 单颗磨粒的材料去除

当采用含有磨料的弹性磨具磨抛硬脆材料工件时,材料去除主要依靠磨粒在法向压力下对工件表面的切入,应考虑法向压力下磨粒与工件之间的接触形式。弹塑性变形的临界变形量公式为^[20]:

$$\delta_{\rm w} = \left(\frac{3\pi K_{\rm dw} H_{\rm w}}{4E_{\rm dw}}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \tag{9}$$

式中, E_{dw} 为磨粒与工件的相对弹性模量,可表示为:

$$\frac{1}{E_{\rm dw}} = \frac{1 - \nu_{\rm d}^2}{E_{\rm d}} + \frac{1 - \nu_{\rm w}^2}{E_{\rm w}}$$
 (10)

式中, K_{dw} 为工件表面平均接触因子,一般取 0.4; H_{w} 为工件材料的硬度, δ_{w} 为磨粒与工件接触的弹性 塑性转变的临界切削深度, E_{d} 和 v_{d} 为磨粒的弹性模量和泊松比, E_{w} 和 v_{w} 为工件的弹性模量和泊松比,假设磨粒粒径均匀,形状为球形,且直径为 D。

本文选择的磨粒为金刚石磨粒,其弹性模量 $E_{\rm d}$ =1 100 GPa, 泊松比 $v_{\rm d}$ =0.1; 工件材料为石英玻璃,其弹性模量 $E_{\rm w}$ =72.5 GPa,泊松比 $v_{\rm w}$ =0.14,表面硬度 $H_{\rm w}$ =9.48 GPa。将各参数的值代入式(9),得弹塑变形的临界变形量为 $\delta_{\rm w}$ =0.004 4D。在实际加工中,磨粒切入工件的深度一般大于临界变形量 $\delta_{\rm w}$,因此可以假设金刚石磨粒对石英玻璃工件的去除过程为塑性去除。

假设弹性磨具磨抛石英玻璃时,磨粒与材料表面的接触变形为塑性变形,磨粒与工件的接触情况如图 13 所示。假设磨粒是刚性的,在压力 F_0 作用下,磨粒在工件表面产生塑性变形,并形成一个凹槽,材料被塑性去除,切入深度为 δ ,切入深度远小于磨粒半径,且与投影接触圆的半径 a 有关,可以表示为:

$$a^{2} = \left(\frac{D}{2}\right)^{2} - \left(\frac{D}{2} - \delta\right)^{2} = \delta(D - \delta) \approx D\delta \quad (11)$$

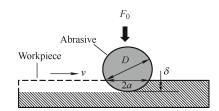


图 13 单颗磨粒与工件的接触模型

Fig. 13 Contact model between a single abrasive grain and the workpiece

根据材料的弹性力学机理可知,磨粒受到的压力 F_0 与切入工件的深度 δ 关系为:

$$F_0 = \pi D H_{\rm w} \delta \tag{12}$$

弹性基体和磨粒之间的有效接触面积约等于 $\pi D^2/4$,则施加在磨粒上的力 F_0 可以表示为:

$$F_0 = \frac{\pi D^2 p(x, y)}{4}$$
 (13)

则磨粒切入工件的深度 δ 可表示为:

$$\delta = \frac{Dp(x, y)}{4H_{w}} \tag{14}$$

对于单颗磨粒,时间 t 内的材料去除量为:

$$\Delta V = K \cdot \Delta S \cdot v \cdot t \tag{15}$$

式中,K为一个常数, ΔS 为磨粒在工件表面形成的

凹槽横截面积, v 为磨粒的瞬时速度。

图 14 所示为磨粒在工件表面形成的凹槽横截面,其面积 ΔS 可以近似为:

$$\Delta S = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot 2a = a\delta \approx \delta^{3/2} D^{1/2}$$
 (16)

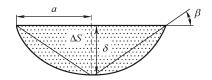


图 14 切深凹槽横截面

Fig. 14 Sketch of the contact area

根据 Rabinowicz 理论^[21]可得 K 的表达式为:

$$K = \frac{3}{\pi} \tan \beta \approx \frac{3}{\pi} \frac{\delta}{a} \approx \frac{3}{\pi} \frac{\delta}{\sqrt{D\delta}} = \frac{3}{\pi} \left(\frac{\delta}{D}\right)^{1/2}$$
 (17)

2.4 有效磨粒数量

弹性基体软固结磨料磨具磨抛加工时,接触区域内参与磨抛的磨粒数量会直接影响材料去除率。

由于磨粒尺寸远远小于磨具与工件之间的接触区域尺寸,可以忽略磨粒形状对磨粒分布的影响。假设磨具中的磨料均匀分布,且磨粒形状为球形,磨粒分布简化结果如图 15 所示。当磨具的磨料浓度为c,磨料粒径为D,磨粒密度为 ρ ,接触圆半径为b时,接触区域内参与磨抛的有效磨粒数量N。为:

$$N_{\rm a} = \frac{N \cdot S_{\rm c}}{S_{\rm p}} = \frac{N \cdot 2\pi R_{\rm p} (R_{\rm p} - \sqrt{R_{\rm p}^2 - b^2})}{2\pi R_{\rm p}^2} = \frac{N(R_{\rm p} - \sqrt{R_{\rm p}^2 - b^2})}{R_{\rm p}}$$
(18)

式中,N为磨削层中的磨粒数量,可表示为:

$$N = \frac{c[R_{\rm p}^3 - (R_{\rm p} - D)^3]}{2\rho \left(\frac{D}{2}\right)^3} = \frac{4c[R_{\rm p}^3 - (R_{\rm p} - D)^3]}{\rho D^3}$$
(19)

式中, S_p 为磨具的表面积, S_c 为接触区域的面积。 磨削层定义为磨具最外层厚为D 的体积空间。

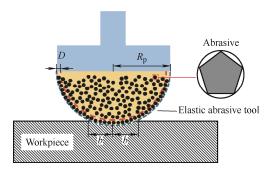


图 15 弹性磨具磨粒分布示意

Fig. 15 Distribution of abrasive fixed in elastic polishing tool

根据材料去除的定义,材料去除深度可表示为:

$$\Delta H = \frac{N_{\rm a} \Delta V}{A_{\rm n} t} = \frac{N_{\rm a} \cdot K \cdot \Delta S \cdot v}{A_{\rm n}}$$
 (20)

式中, A_n 为磨粒与工件之间的宏观接触面积,这里近似为磨具整体与工件之间的接触面积。

将式 (6)、(14)、(16) \sim (18) 代入式 (20),可得材料去除深度为:

$$\Delta H(x,y) = \frac{3N_{\rm a}D^2 p^2(x,y)v(x,y)}{4\pi^2 b^2 H_{\rm w}^2}$$
 (21)

对材料去除深度函数进行积分,就得到磨抛区域的材料去除率 MRR_r :

$$MRR_{\rm r} = \iint \Delta H(x, y) dx dy$$
 (22)

由式(21)可知,弹性基体软固结磨料磨具材料去除的影响因素主要有弹性基体的弹性模量、磨粒的大小和硬度、工件硬度、主轴转速、磨具偏角、磨抛压力等。由于弹性基体的材料属性、磨具尺寸大小及磨粒和工件的硬度在磨抛开始前就已确定,因此本文将磨抛压力、主轴转速、磨具偏角、磨料粒径作为影响弹性基体软固结磨料磨具材料去除的关键工艺参数,研究其对材料去除的影响规律。

3 弹性基体磨具磨抛试验

3.1 试验条件

试验过程在小型数控加工平台上完成,如图 16 所示。机器重复定位精度为 0.01~0.02 mm, 主轴最高转速可达 24 000 r•min⁻¹。磨抛试验加工工件选用石英玻璃圆片,如图 17 所示,工件尺寸规格为直径 40 mm,厚 2 mm,材料性能参数如表 2 所示。磨抛试验前,采用表面粗糙度测量仪在工件表面随机选取 3 个点进行粗糙度测量,取平均值作为初始

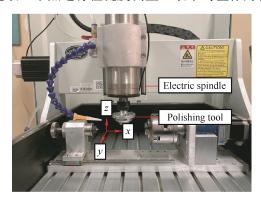


图 16 试验平台

Fig. 16 Experiment platform

表面粗糙度,得工件初始表面粗糙度 Ra 为 $1.069 \, \mu m$ 。弹性磨具选用半径 R_p 为 $15 \, mm$ 的半球形磨头,如图 $18 \, mm$,其结合剂基体材料为 Smooth-On Ecoflex 0050 硅橡胶,磨粒选用粒径 D 为 $100 \, \mu m$ 的金刚石磨粒,磨具中的金刚石磨料浓度 c 为 75%,这里指磨具超硬磨料层中单位体积内超硬磨料的含量,此时金刚石磨料在硅橡胶基体中的含量为 $0.66 \, g/\, cm^3$ 。试验采用冷却液来进行冷却,以及时清洗工件表面细小切屑,减少对试验结果的影响。



图 17 石英玻璃圆片

Fig. 17 Quartz glass workpiece

表 2 石英玻璃性能参数

Table 2 Performance parameters of quartz glass

Parameter	Value
Density / (g • cm ⁻³)	2.2
Poisson' s ratio	0.14
Elastic modulus / GPa	72.5
Hardness / GPa	9.48
Fracture toughness / (MPa • m ^{1/2})	0.633
Coefficient of thermal expansion / $10^{-7} \text{K}^{-1} (100 ^{\circ}\text{C})$	5.1



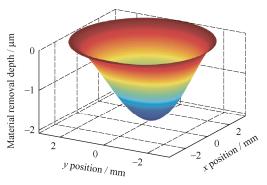
图 18 弹性基体软固结磨料磨具

Fig. 18 Elastic soft-bonded abrasive tool

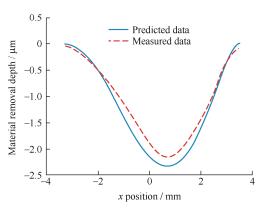
3.2 多因素材料去除模型的验证

选取工艺参数组合: F=6 N, $\omega=1$ 000 r/min, $\theta=20^\circ$,D=100 μ m,进行单点磨抛试验和 Matlab 数值模拟,30 min 加工结束后采用三维形貌测量仪测量磨抛后的材料去除轮廓。图 19a 所示为材料去除轮廓的 Matlab 数值模拟结果,材料去除深度呈非均匀分布,磨抛区域中心处最大,边缘处最小。利用

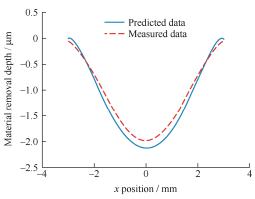
实测试验数据通过最深点的 x-z 剖面和 y-z 剖面的截面曲线验证理论模型,分别如图 19b 和 19c 所示,虽然理论模拟与试验测量的材料去除轮廓不完全重合,但二者具有较高的相似度,最大材料去除深度的偏差为 13.1%,验证了材料去除模型的可靠性。材料去除轮廓截面曲线在 y-z 剖面上呈轴对称分布,而在 x-z 剖面上最大材料去除的位置沿 x 轴方向有轻微偏移,这是因为弹性磨具以一定倾斜角进行加工时,接触区域中的相对速度不是对称分布的。由此可见,本文建立的材料去除模型能够解释弹性磨具磨抛过程中材料去除轮廓 x-z 剖面的不对称性,并对材料去除轮廓进行预测。



(a) Material removal profile predicted by theoretical model



(b) x-z profile of material removal



(c) y-z profile of material removal

图 19 材料去除轮廓的试验结果与模拟结果 Fig. 19 Experimental and simulation results of material removal profile.

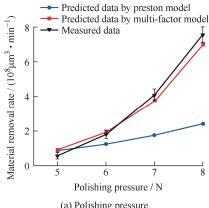
工艺参数对材料去除的影响规律

选取不同工艺参数组合,研究各工艺参数对材 料去除的影响,并利用材料去除模型进行不同工艺 参数组合下的材料去除率预测,对比 Preston 模型和 多因素模型的预测结果,工艺参数的设置如表3所 示,对比结果如图 20 所示。

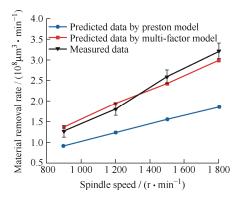
表 3 工艺参数的设置 Table 3 Process parameters

•					
Sampl e No.	Polishing pressure / N	Spindle speed / (r • min ⁻¹)	Deflection angle / (°)	Abrasive particle size / μm	
A1	5	1 200	10	100	
A2	6	1 200	10	100	
A3	7	1 200	10	100	
A4	8	1 200	10	100	
B1	6	900	10	100	
B2	6	1 200	10	100	
В3	6	1 500	10	100	
B4	6	1 800	10	100	
C1	6	1 200	10	100	
C2	6	1 200	15	100	
C3	6	1 200	20	100	
C4	6	1 200	25	100	
D1	6	1 200	10	50	
D2	6	1 200	10	75	
D3	6	1 200	10	100	
D4	6	1 200	10	125	
D5	6	1 200	10	150	

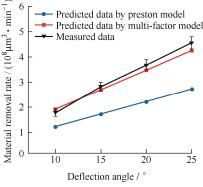
从图 20a 可以看出,材料去除率随着磨抛压力 的增大而增大。这是因为磨抛压力的增大,会直接 增大磨粒切深, 并且弹性磨具变形程度也会增大, 从而增加弹性磨具与工件之间的接触区域面积和参 与磨抛的磨料颗粒数量,提高材料去除率。从图 20b 和 20c 可以看出,材料去除率随着主轴转速和磨具 偏角的增大而增大。这是因为主轴转速和磨具偏角 的增大会使接触区域内磨料颗粒的速度增大,单位 时间内参与磨抛的磨粒数量增多,从而获得较高的 材料去除率。从图 20d 可以看出, 磨料粒径的增加 对材料去除率的影响不大,这可能是因为尽管单颗 磨粒切入工件的深度随着粒径的增大而变大,但在 磨具与工件接触区域恒定的情况下,参与材料去除 的有效磨粒总数也减少。



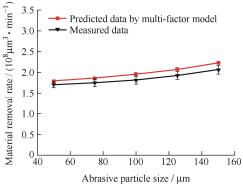




(b) Spindle speed



(c) Deflection angle



(d) Abrasive particle size

图 20 不同工艺参数对材料去除率的影响

Fig. 20 Effect of different parameters on material removal

不同工艺参数下 Preston 模型预测、多因素模型 预测、试验测量得到的材料去除率分别为 MRRp、 $MRR_{\rm m}$ 、 $MRR_{\rm r}$, $\Delta_{\rm p}$ 、 $\Delta_{\rm m}$ 分别为 Preston 模型预测值、

多因素模型预测值与试验测量值之间的相对误差,则 模型预测值与试验值之间的相对误差可以计算为:

$$\Delta_{\rm p} = \frac{MRR_{\rm p} - MRR_{\rm r}}{MRR_{\rm r}} \times 100\% \tag{23}$$

$$\Delta_{\rm m} = \frac{MRR_{\rm m} - MRR_{\rm r}}{MRR_{\rm r}} \times 100\% \tag{24}$$

由式(23)、(24)计算不同参数组合下的相对误差,并取平均值,最终得到 Preston模型和多因素模型预测的平均相对误差分别为-28.9%和7.8%。因此,多因素材料去除模型预测值比 Preston模型更接近试验测得的结果,预测准确度提升了36.7%,这表明多因素材料去除模型的正确性和有效性。

工艺参数组合为:磨料粒径为100 μm,磨抛压力为7N,主轴转速为1500 r/min,磨具偏角为20°。磨抛60 min 后,采用三维形貌轮廓仪测量工件表面同一位置处磨抛前后的微观形貌变化,取样区域尺寸为0.625 mm×0.468 mm,取样区域内的微观形貌变化如图21 所示,区域中心点 x 轴截面与 y 轴截面的粗糙度轮廓线变化情况如图22 所示。磨抛前,工件表面有明显的沟槽;磨抛后,工件表面的均匀性得到改善,工件表面粗糙度由原来的1.069 μm 降至0.089 μm,此时的材料去除率为8.893×10⁸ μm³/min,能够在保证材料去除率的同时兼顾表面质量,验证了采用弹性基体软固结磨料磨具磨抛硬脆材料的工艺可行性。

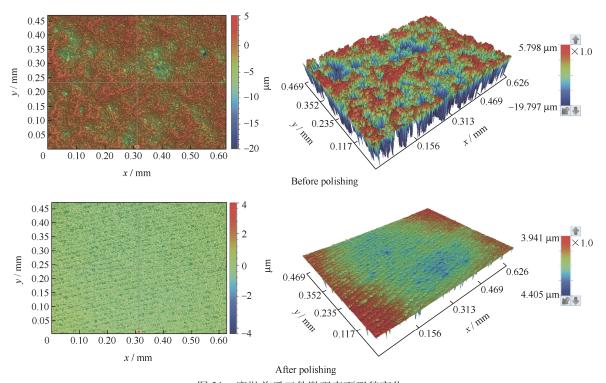


图 21 磨抛前后工件微观表面形貌变化

Fig. 21 Comparison of micro morphology of workpiece surface before and after polishing

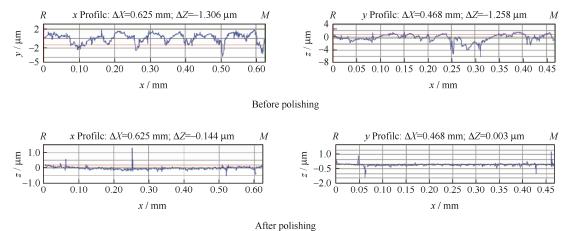


图 22 磨抛前后工件表面粗糙度轮廓线变化

Fig. 22 Comparison of roughness profile of workpiece surface before and after polishing

4 结论

- (1)弹性基体软固结磨料磨具磨抛加工过程中, 磨具受力变形与工件表面弹性接触形成加工区域, 相比刚性磨抛增大了加工区域面积及有效磨粒参与 数量,同时基体材料的变形退让行为改善了磨具的 磨粒等高性,减小了单颗磨粒分担载荷,能够在硬 脆材料超精密加工过程中兼顾材料去除效率与表面 加工质量。
- (2)结合接触力学与运动学分析建立了考虑单 颗磨粒磨损行为与有效磨粒数量的材料去除模型,磨抛压力、主轴转速、磨具偏角、磨料粒径等不同工艺参数组合下的石英玻璃弹性磨抛加工试验验证了本研究所提预测模型的准确度,相比 Preston 经典模型提高 36.7%。
- (3) 弹性磨抛过程中的游离磨粒的有效参与、 材料脆-塑转变阈值条件对磨抛加工效率与表面加 工质量的影响、磨具磨损形式与磨损量对磨具寿命 及磨抛加工效果的影响等问题有待进一步研究。

参考文献

- [1] ZHU Wule, BEAUCAMP Anthony. Compliant grinding and polishing: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 158: 103634.
- [2] 卢守相,郭塞,张建秋,等. 高性能难加工材料可磨削性研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 12-42. LU Shouxiang, GUO Sai, ZHANG Jianqiu, et al. Grindability of high performance difficult-to-machine materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 12-42. (in Chinese)
- [3] 马廉洁, 李红双. 脆性材料机械加工表面粗糙度模型的研究进展[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 757-768. MA Lianjie, LI Hongshuang. Research progress on surface roughness model of brittle material machining[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 757-768. (in Chinese)
- [4] 李琛,张飞虎,张宣,等. 硬脆单晶材料塑性域去除机理研究进展[J]. 机械工程学报,2019,55(3): 181-190. LI Chen, ZHANG Feihu, 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. (in Chinese)
- [5] 王晓博,李璐璐,赵波,等.陶瓷基复合材料加工技术 及其表面亚表面损伤机制研究进展[J].表面技术,

2021, 50(12): 17-34.

- WANG Xiaobo, LI Lulu, ZHAO Bo, et al. Research progress on processing technology and surface and subsurface damage mechanism of ceramic matrix composites[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 17-34. (in Chinese)
- [6] MD Amir, VINOD Mishra, ROHIT Sharma, et al. Development of magnetic nanoparticle based nanoabrasives for magnetorheological finishing process and all their variants[J]. Ceramics International, 2023, 49(4): 6254-6261.
- [7] LIU Xiaohan, WANG Jingsi, TENG Dezhi, et al. Electrorheological fluid-assisted ultrasonic polishing for IN625 additively manufactured surfaces[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1-2): 891-905.
- [8] ZHANG Zili, WANG Chunjin, ZHU Wule, et al. Surface generation modelling and form maintenance strategy in maskless fluid jet polishing of structured array surface[J]. Applied Surface Science, 2023, 622: 156855.
- [9] ZHU Wule, BEAUCAMP Anthony. Ultra-precision finishing of low expansion ceramics by compliant abrasive technologies: a comparative study[J]. Ceramics International, 2019, 45(9): 11527-11538.
- [10] 任莹晖,周家恒,李伟,等. 化学机械磨削技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2021, 32(18): 2143-2152. REN Yinghui, ZHOU Jiaheng, LI Wei, et al. Research status and prospect of CMG technology[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(18): 2143-2152. (in Chinese)
- [11] 王振忠,施晨淳,张鹏飞,等. 先进光学制造技术最新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 23-56. WANG Zhenzhong, SHI Chenchun, ZHANG Pengfei, et al. Recent progress of advanced optical manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(8): 23-56. (in Chinese)
- [12] BEAUCAMP Anthony, NAMBA Yoshiharu, COMBRINCK Herman, et al. Shape adaptive grinding of cvd silicon carbide[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 317-320.
- [13] 徐西鹏,刘娟,于怡青,等. 凝胶结合剂磨粒工具制备及其磨抛性能研究[J]. 机械工程学报,2013,49(19):156-162.
 - XU Xipeng, LIU Juan, YU Yiqing, et al. Fabrication and application of gel-bonded abrasive tools for grinding and polishing tools[J]. Journal of Mechanical Engineering,

- 2013, 49(19): 156-162. (in Chinese)
- [14] LI N, DING J F, XUAN Z Y, et al. Contact deformation behavior of an elastic Silicone/SiC abrasive in grinding and polishing[J]. Strength of Materials, 2018, 50(3): 419-424.
- [15] NIE Qianqian, ZHANG Jiong, HONG Ruochen, et al. Development of morphable polishing tools with labyrinth and dimple textures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 303: 117539.
- [16] 王洁,赵萍,吕冰海,等.用于功能陶瓷材料超精密平面加工的固结磨具的研究进展[J]. 材料导报,2019,33(17):2873-2881.
 - WANG Jie, ZHAO Ping, LYU Binghai, et al. Research progress of the fixed abrasive tools for ultra-precision planar machining of functional ceramics[J]. Materials Reports, 2019, 33(17): 2873-2881. (in Chinese)
- [17] 杨建兴,张江涛,乔炎亮,等. 硅橡胶动态压缩性能 SHPB 测试方法及其本构模型研究[J]. 高分子通报, 2021, 264(4): 27-34.
 - YANG Jianxing, ZHANG Jiangtao, QIAO Yanliang, et al. SHPB test method for the dynamic compressive properties and dynamic constitutive model of silicon rubber[J]. Polymer Bulletin, 2021, 264(4): 27-34. (in Chinese)
- [18] REN Lijuan, ZHANG Guangpeng, ZHANG Lu, et al. Modelling and investigation of material removal profile for computer controlled ultra-precision polishing[J].

- Precision Engineering, 2019, 55: 144-153.
- [19] 黄智,周涛,吴湘,等. 机器人气囊抛光 SiC 光学元件加工特性研究[J]. 西安交通大学学报,2020,54(12): 22-29. HANG Zhi, LIU Tao, WU Xiang, et al. Research of SIC optical element processing properties based on robot bonnet polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 54(12): 22-29. (in Chinese)
- [20] 林彬,李凯隆,曹中臣,等. 固结磨料确定性研磨表面生成建模与实验分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(9):917-931.
 - LIN Bin, LI Kailong, CAO Zhongchen, et al. Surface generation modeling and experimental analysis of the fixed abrasive deterministic lapping process[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2019, 52(9): 917-931. (in Chinese)
- [21] LIU Delin, LIU Zhanqiang, ZHAO Jinfu, et al. Tool wear monitoring through online measured cutting force and cutting temperature during face milling Inconel 718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(2): 729-740.

作者简介: 王家庆,男,1995 年出生,硕士研究生。主要研究方向为 硬脆材料超精密加工技术。

E-mail: 576157760@qq.com

郭磊(通信作者),男,1986年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。 主要研究方向为精密与智能制造技术。

E-mail: lguo@chd.edu.cn