

## 磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具研制<sup>①</sup>

郑棋超<sup>②</sup> 诸铁宇 金明磊 金明生<sup>③</sup>

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310023)

**摘要** 针对光学玻璃等硬脆性材料的非均匀去除问题,提出并研制了一种磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具。以 Preston 方程为宏观理论基础,设计并建立了双层弹性体结构。为保证研抛工具沿径向方向杨氏模量连续变化,将不同体积比的羰基铁粉、碳化硅、硅橡胶混合,利用磁场产生径向放射状磁链作用于磁性颗粒,得到连续梯度层。通过光学显微镜和拉伸试验机,获得了不同体积比下复合材料的内部微观结构及其性能表征。仿真分析了双层弹性体与工件之间的接触应力,利用力传感器测试仪进行了实验验证。结果表明,通过优化体积比和磁场调节,磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具能形成从内环到外环的连续弹性模量分布,接触应力更接近于理论曲线,PR 标准差小于 0.23。

**关键词** 复合材料; 磁场; 杨氏模量; 羰基铁粉; 研抛

随着光学元件、硅片、蓝宝石等材料在航空航天、光电通讯等领域越来越广泛的应用,对该类硬脆性材料的表面粗糙度及平坦化要求也相应提高。为实现工件表面材料的均匀去除,Xiao 等人<sup>[1]</sup>研究了圆盘抛光过程中,软盘以小倾角接触刚性自由曲面工件时的刀具-工件接触机理,提出了一种工艺参数规划新方法,以实现工件曲率变化的材料均匀去除。Tsai 等人<sup>[2]</sup>提出了一种材料均匀去除模型,根据有效接触面积控制抛光力,以保持机器人恒定的速度和接触应力。Zhang 等人<sup>[3]</sup>开发了一种新型磁性抛光工具,可确定性地抛光工件内部表面。Liao 等人<sup>[4]</sup>研究了全口径抛光过程中表面形貌的收敛机理和确定性控制,提出了一种新的材料去除平衡方程,将抛光条件的主要方面与表面形状关联了起来。Ben 等人<sup>[5]</sup>提出了一种利用微型工具实现近确定性微细抛光的方法。

为实现加工接触面内应力的梯度分布,设计和制备沿径向方向弹性模量梯度分布的研抛工具是一

种有效的方法。Carvalho 等人<sup>[6]</sup>开发了能制造连续变化梯度功能材料的新型设备,并对其加工原理和制备效果进行了全面阐述。Li 等人<sup>[7]</sup>采用均匀磁场制备了具有梯度和各向异性的镍-环氧树脂功能梯度材料。Safaei 等人<sup>[8]</sup>通过增材制造工艺制造了功能梯度材料,可以在控制梯度结构的同时制造具有复杂几何形状的零件。Huang 等人<sup>[9]</sup>通过低磁场将四氧化三铁( $Fe_3O_4$ )/多壁碳纳米管排列在环氧树脂中,研制了具有高力学性能的新型纳米复合材料。Xu 等人<sup>[10-11]</sup>设计了热-磁-力耦合装置,利用磁场辅助压缩成型技术制备了硅橡胶基磁流变弹性抛光复合材料。Schumann 等人<sup>[12]</sup>发现粒子运动与材料的机械和磁性特性相关,为宏观和微观性质间提供了一个尺度桥梁。Mahinzare 等人<sup>[13]</sup>研究了温度变化、粘弹性系数等条件对由磁粘弹性功能梯度材料制成的旋转圆柱形纳米壳固有频率的影响。

本文基于 Preston 方程,提出了以碳化硅(SiC)磨粒为颗粒增强相、氯丁橡胶为基体的梯度功能材

① 浙江省自然科学基金(LY21E050012)资助项目。

② 男,1996年生,硕士生,研究方向:精密与超精密加工技术;E-mail: 1216816567@qq.com。

③ 通信作者,E-mail: jinmingsheng@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2022-12-02)

料设计与制备方法<sup>[14-18]</sup>,以求实现加工接触面内应力的理想梯度分布。本文在已有研究基础上,通过控制磁场与力场的耦合形成磁性颗粒链,提出并研制一种磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具;通过光学显微镜和拉伸试验机,探索不同体积比下复合材料内部微观结构及其性能表征;通过仿真,分析双层弹性体与工件间的接触应力,并采用力传感器测试仪进行实验验证。

## 1 材料和方法

### 1.1 原理分析

磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具(简称新型工具)的结构如图1所示,由刚性层、连续梯度层和均质层组成。与工件接触的均质层含有用于研磨和抛光的固结研磨颗粒;连续梯度层中含有不同体积比的羰基铁粉,通过磁场作用使磁性颗粒在圆环内产生径向磁链,改变分布状态,从而获得理想的弹性模量;连续梯度层附着在均质层上,泥浆则从中心孔流入,有助于带走加工过程中产生的碎屑。根据 Preston 方程,材料去除率  $\Delta MRR$  主要受接触区域的法向应力  $P$  和工件与磨粒之间的相对线速度  $V$  的影响。因此,通过合理设计弹性模量分布,使各点处的接触应力分布与线性变化的相对线速度乘积一

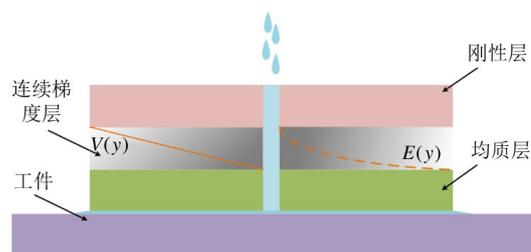


图1 新型工具结构示意图

致,提高材料去除的均匀性,从而达到理想的材料去除效果。

宏观去除物理模型如式(1)所示。

$$\Delta MRR = KP V = KE \varepsilon \omega r \quad (1)$$

式中,  $K$  是 Preston 系数,  $E$  为杨氏模量,  $\varepsilon$  为应变,  $\omega$  为角速度,  $r$  为半径。在材料加工环境确定的情况下,认定  $K$  为一个恒定值,另外加工条件不变,则  $\varepsilon$  和  $\omega$  为常数。如果  $E$  和  $r$  成反比,接触面处的材料去除量  $\Delta MRR$  将会保持理论恒定。

### 1.2 材料和准备

新型工具的具体制备步骤如图2所示,其制备材料包括作为基体材料的室温硫化硅橡胶(RTV)、作为连续梯度层颗粒增强相的羰基铁粉(carbonyl iron powder, CIP)、以及作为均质研磨层颗粒增强相的 SiC 磨粒,催化剂是二丁基锡,交联剂是原硅酸四乙酯,生胶是羟基封端的聚二甲基硅氧烷。

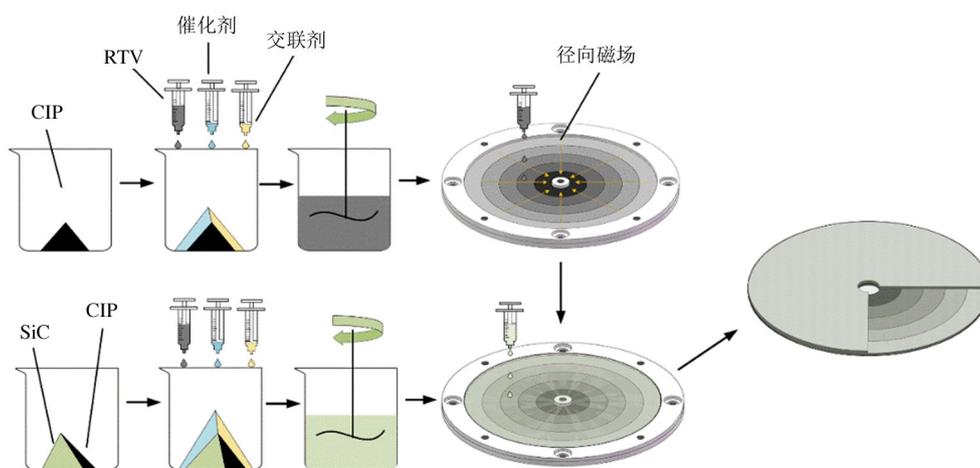


图2 新型工具体制备过程

首先,根据所需应力分布,通过接触应力预测模型求得连续梯度层各环以及均质研磨层的弹性模量,再通过拉伸试验实测得到所需弹性体的基体与

磨粒配比。然后,称取相应质量的羰基铁粉用于制备连续梯度层,加入适量二丁基锡、原硅酸四乙酯以及羟基封端的聚二甲基硅氧烷,混合后置于混料器

进行充分搅拌得到弹性体的生胶。待搅拌均匀后,将生胶分别倒入对应的模具容腔中,随后将模具置于径向梯度磁场中。若为匀强磁场,即  $\text{grad } H = 0$ , 则磁性颗粒所受的磁场力为 0, 即没有形成梯度变化的驱动力,浆料在成型过程中也就不会发生成分的变化;而在梯度磁场中,铁磁性颗粒由于受到磁场力的作用发生定向迁移,在磁场梯度方向上形成成分的梯度变化。

### 1.3 实验方法

利用 Keyence 公司的 VHX600 超景深三维显微镜对不同复合材料的表面形貌进行观察。依据国家标准 GB/T 528-2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》,使用 Instron2345 型拉力试验机以  $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  速率测定材料的拉伸性能。使用霍尔效应高斯计 (Lakeshore450) 测量样品附近 (即距样品边界  $0.1 \text{ mm}$ ) 的外加磁场。

制备连续梯度层前,用高斯计在模具表面  $0.1 \text{ mm}$  处测量外加的磁感应强度。梯度磁场由置于模具中心的磁铁提供,通过改变磁铁的数量来改变磁场,分别是 1、2、3 个磁铁 (表示为 H1、H2、H3)。如图 3 磁感应强度曲线所示,越靠近圆心,磁感应强度越大;同时,从内环到外环,磁感应强度下降速度越来越慢,直至趋于平缓。

采用金诺传感器仪器厂生产的力传感器测试仪进行应力测试。该系统由分辨率为  $0.03\%$  的压力传感器、数字显示控制器和上位机软件组成。采用宇博智能科技有限公司的 RFP601  $0.50\%$  分辨率薄膜测压元件,意法半导体的 stm32F103ZET6 芯片,

外围电路、串行通信和自编程软件构成完整的测压系统。

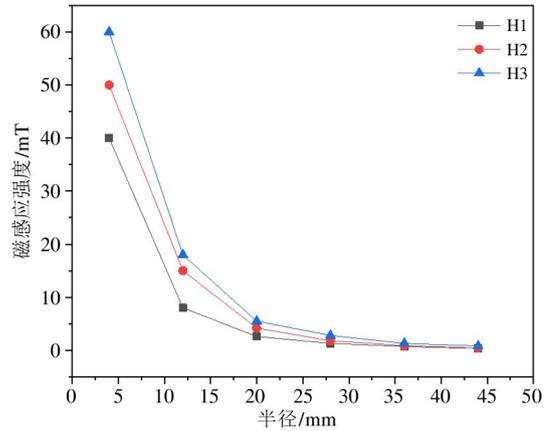
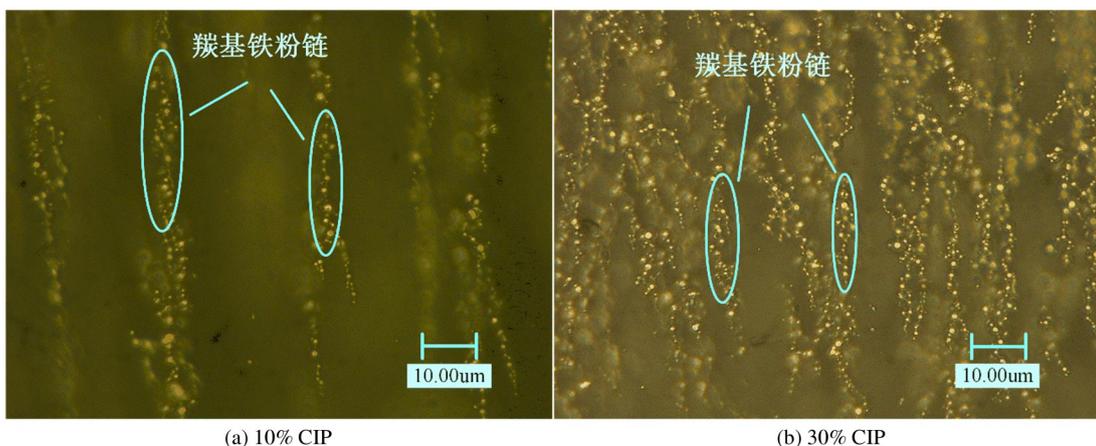


图 3 制备连续梯度层时模具表面的磁感应强度

## 2 结果和讨论

### 2.1 材料表征结果

由于粘结剂在固化后为透明无色固体,因此通过超景深显微镜 VHX600 可对不同体积分数羰基铁粉弹性体表面进行观测,并得到其表面细观状态,如图 4 所示。从图中可以发现,当体积比较低时,粘结剂为弹性体主要组成部分,填补了颗粒间大面积的孔隙。因此,在拉伸试验中,外部载荷主要由基体承载,力学性能表现偏向于基体特性。随着颗粒体积比的增加,间隙部分逐渐被颗粒填充,颗粒逐渐承载大部分载荷,造成弹性模量变大。添加磁场后,在磁性粒子与粒子的相互作用下,磁性粒子总是倾向于沿磁场方向形成链或团簇,从而得到整体横向的各向同性复合材料。



(a) 10% CIP

(b) 30% CIP

图 4 连续梯度层表面形貌

与工件接触的是均质层,如图5(a)所示,碳化硅磨粒在硅橡胶表面以相对均匀的方式分布,但仅有碳化硅磨粒易形成磨粒团聚现象,且要达到所需弹性模量,磨粒的体积分数较大,难以制作。用碳化

硅与羰基铁粉同时作为增强相,如图5(b)所示,减少了磨粒的团聚现象,使磨粒分布更均匀,可提高加工时的磨粒有效利用率与材料的均匀去除。

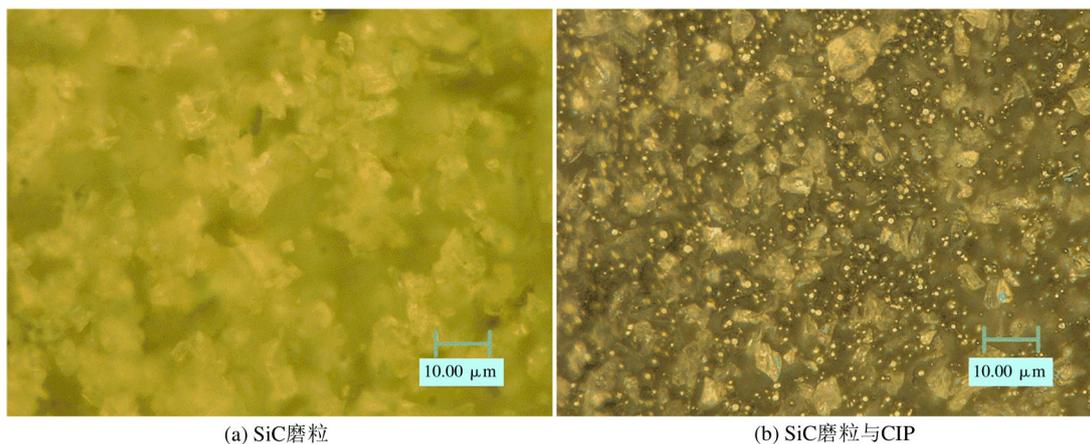


图5 均质层表面形貌

图6为连续梯度功能复合结构研抛工具X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)衍射图与扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)电镜图。从图6可以看出,连续梯度层和均质层共存在3个

特征峰:12.0°有强度不高的尖峰为硅橡胶;44.9°与65.0°处强度较高的尖峰代表铁(Fe)元素,均质层特有的尖峰则为碳(C)元素。

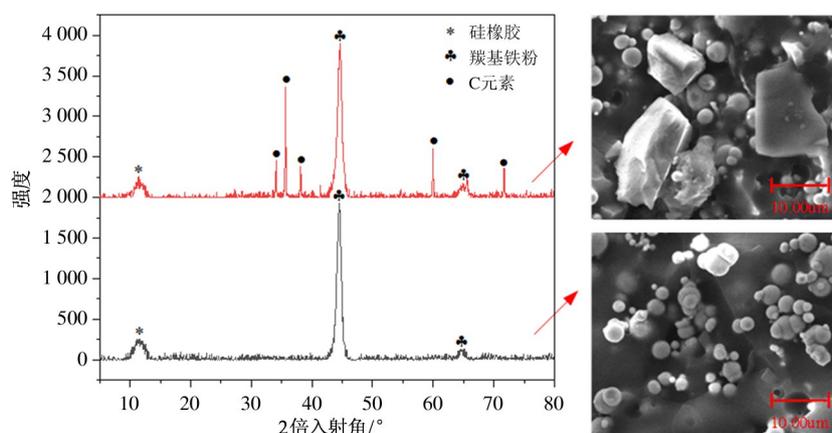


图6 新型工具XRD衍射图与SEM电镜图

## 2.2 杨氏模量分析

复合材料的组成材料和微观组织分布决定了其有效性能。通过拉伸试验得到了不同体积比下CIP和SiC的弹性模量参数,结果如图7所示。基质混合物颗粒含量越多,试样的杨氏模量越大,其比例高于60%时,力学性能大幅提高。

## 2.3 仿真和测试结果

课题组原有的研抛工具结合Preston方程力与

速度的函数,是从最初的单层弹性体结构升级为双层弹性体结构,实现了材料去除系数和接触应力的解耦,解决了环间应力突变和径向磨粒效率不均匀的问题。然而,原有的抛光工具为盘型,加工区域为盘的外环,杨氏模量变化要求不高。而新型工具加工区域为整个平面,内圈接近圆心处,杨氏模量变化较大,所以新工具的设计和生产面临新的挑战。在磁场作用下,可以通过羰基铁粉与碳化硅的混合制

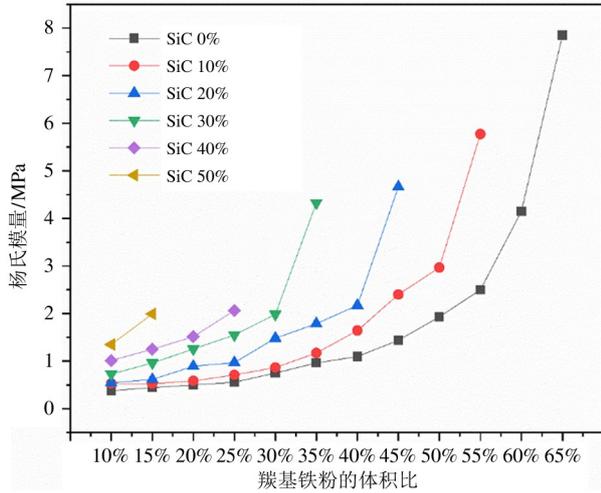


图 7 不同比例 CIP 和 SiC 组合下复合材料杨氏模量测量值

备杨氏模量连续变化的梯度层,通过与均质层相接形成新型双层弹性体结构,如图 8 所示,可使杨氏模量变化更加符合实际加工所需。

$$E(y) = \frac{E^*}{y} \quad (2)$$

式中,  $E^*$  表示理论弹性模量系数,  $E(y)$  为研抛工具中心沿  $y$  轴方向各点弹性模量的理论数值。在  $z = h_2$  的均质层与连续梯度层的固结交界面上,存在:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad (3)$$

同时,与模型相关的基本物理方程如式(4)所示。

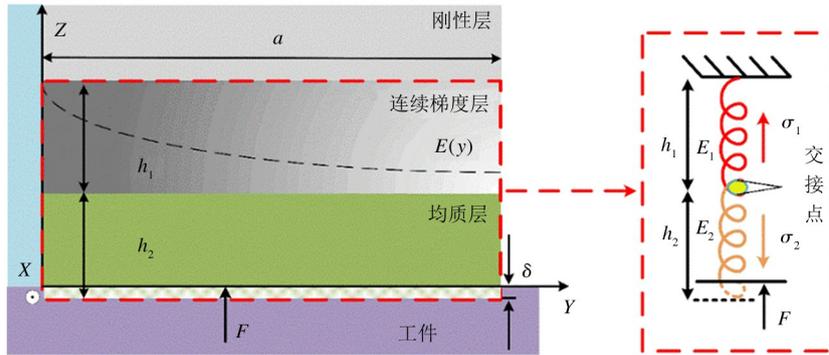


图 8 双层弹性体力学模型

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 = E_1 \frac{\Delta h_1}{h_1} \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \frac{\Delta h_2}{h_2} \\ \sigma = E_0 \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{h_1 + h_2} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得等效杨氏模量  $E_0$  计算公式为

$$E_0 = \frac{h_0 E_1 E_2}{h_1 E_2 + h_2 E_1} \quad (5)$$

其中  $h_0$  为下层与上层厚度之和。连续梯度层的杨氏模量  $E_2$  可由式(6)求得:

$$E_2 = \frac{h_2 E_0 E_1}{h_0 E_1 - h_1 E_0} \quad (6)$$

其余参数如表 1 所示。  $h_0$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $E_1$  都是固定值,所以连续梯度层的杨氏模量  $E_2$  为

$$E_2 = \frac{4.4 \times \frac{E^*}{y}}{8.8 - \frac{E^*}{y}} \quad (7)$$

表 1 材料参数和几何尺寸

类型	杨氏模量/MPa	直径 /mm	厚度 /mm
工件	$8.8 \times 10^4$	120	4
刚性层	$2 \times 10^5$	88	4
原有层	4.4	88	4
工具梯度层	2.5-0.7-0.42-0.31-0.24	88	4
均质层	4.4	88	4
新型连续梯度层	$4.4 \times (E^*/y) / [8.8 - (E^*/y)]$	88	4

如图9(a)所示,原有工具的应力分布在内环处发生了明显突变,越靠近内环,接触应力越大,从内环到外环接触应力减小。而且,越靠近内环,落差越大,越靠近外环则相对平滑。一定程度上符合弹性模量与半径成反比的规律。图9(b)为接触应力与半径的乘积结果。由式(1)可知,在工具与工件的接触区

域内,为了保证工具接触面各点材料去除的均匀性,理论去除水平接触应力(P)与接触点离工具中心距离(R)的乘积(PR)应是恒定的。为方便对比,将左边划为原有工具接触区域,右边为新型工具接触区域,可以看出,原有工具的PR曲线相对不均匀,越靠近圆心波动越大,新型工具的PR曲线更平稳。

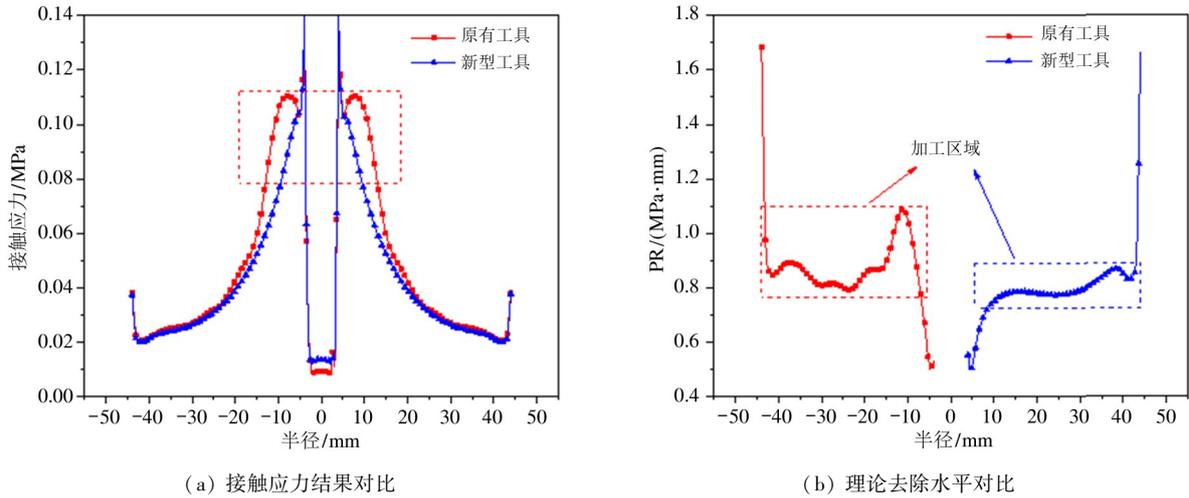


图9 新型工具与原有工具

图10(a)是通过力传感器测试仪进行应力测试与理论数值的对比,可以看出,由于橡胶制备的复合材料是颗粒增强材料,制备的复合材料具有不均匀

特性,测量的接触应力数值与理论求解数值有一定偏差,但在可接受的范围内。图10(b)为新型工具理论去除水平与实际测量去除水平对比,实际测

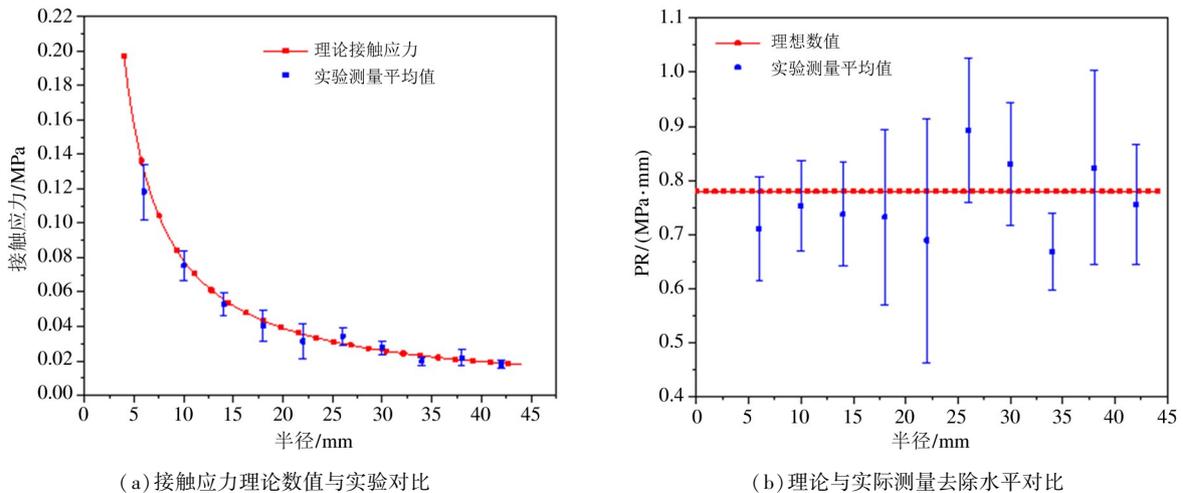


图10 新型工具

量去除水平围绕理论去除水平上下波动,最大的百分比偏差为 15.38%,PR 的标准差小于 0.23。因此,可以说,在所考虑的变量范围内,该新型工具可以达到对硬脆性材料均匀去除的目的。

### 3 结论

本文针对硬脆材料有效均匀去除的目标,提出了一种磁场辅助连续梯度功能复合结构研抛工具,

通过增加羟基铁粉和磁场作用,使原有工具的梯度层在结构和性能上沿径向连续变化。制作了拉伸试验的标准试样,通过光学显微镜和拉伸试验机,获得了不同体积比下复合材料的内部微观结构及其性能表征,验证了微观颗粒影响宏观模量变化的有效性。通过对新型工具径向各点的应力测试,PR的标准差小于0.23,相比原有工具更加贴合理论去除水平。

#### 参考文献

- [ 1 ] XIAO M B, DING Y, FANG Z, et al. Contact force modeling and analysis for robotic tilted-disc polishing of free-form workpieces [J]. Precision Engineering, 2020, 66: 188-200.
- [ 2 ] TSAI M J, HUANG J F, KAO W L. Robotic polishing of precision molds with uniform material removal control[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49( 11 ):885-895.
- [ 3 ] ZHANG J, WANG H, SENTHIL KUMAR A, et al. Experimental and theoretical study of internal finishing by a novel magnetically driven polishing tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 153:1-15.
- [ 4 ] LIAO D, ZHANG F, XIE R, et al. Deterministic control of material removal distribution to converge surface figure in full-aperture polishing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53:144-152.
- [ 5 ] BEN ACHOUR S, BISSACCO G, BEAUCAMP A, et al. Deterministic polishing of micro geometries [J]. CIRP Annals, 2020, 69(1) :305-308.
- [ 6 ] CARVALHO O, BUCIUMEANU M, MIRANDA G, et al. Development of a method to produce FGMs by controlling the reinforcement distribution[J]. Materials and Design, 2016, 92:233-239.
- [ 7 ] LI J, WEI Z, WANG T, et al. A theoretical model incorporating both the nano-scale material removal and wafer global uniformity during planarization process [J]. Thin Solid Films, 2017, 636:240-246.
- [ 8 ] SAFAEE S, CHEN R K. Development of a design and characterization framework for fabrication of functionally graded materials using magnetic field-assisted digital light processing stereolithography[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67:314-324.
- [ 9 ] HUANG Y, JIAO W, NIU Y, et al. Improving the mechanical properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/carbon nanotube reinforced nanocomposites by a low-magnetic-field induced alignment [J]. Journal of Polymer Engineering, 2018, 38(8) :731-738.
- [ 10 ] XU Z, WANG J, WU H, et al. Effect of abrasive particles on mechanical properties of magnetorheological elastomer [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(2) :630-640.
- [ 11 ] XU Z, WANG Q, ZHU K, et al. Preparation and characterization of magnetorheological elastic polishing composites [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(10) :1481-1492.
- [ 12 ] SCHÜMANN M, BORIN D Y, MORICH J, et al. Reversible and non-reversible motion of NdFeB-particles in magnetorheological elastomers [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32(1) :3-15.
- [ 13 ] MAHINZARE M, AKHAVAN H, GHADIRI M. A nonlocal strain gradient theory for rotating thermo-mechanical characteristics on magnetically actuated viscoelastic functionally graded nanoshell [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2020, 31(12) :1511-1523.
- [ 14 ] JIN M, DONG X, WANG L, et al. Design and mechanical properties of particle-reinforced polymer-matrix functionally graded materials applied on elastic polishing pad [J]. Ceramics International, 2020, 46(2) :1680-1689.
- [ 15 ] DONG X, LU C, JIN M, et al. Design of FG/CS-LPP and material removal uniformity experiment on ZrO<sub>2</sub> ceramic [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 138:1-11.
- [ 16 ] JIN M, DONG X, ZHU D, et al. Structure and properties of particles/rubber composites applied on functionally graded lapping and polishing plate [J]. Journal of Polymer Engineering, 2020, 40(4) :307-313.
- [ 17 ] JIN M, WANG L, YE S, et al. A novel functionally graded lapping and polishing method for the improvement of material removal uniformity [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50:102-110.
- [ 18 ] WANG L, ZHAO Z, ZHU D, et al. Novel functionally graded and composite-structured lapping and polishing plate for better uniformity of material removal [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5-6) :1887-1898.

## Development of continuous functionally graded and composite structured lapping and polishing tool based on magnetic field

ZHENG Qichao, ZHU Tieyu, JIN Minglei, JIN Mingsheng

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

### Abstract

Aiming at the problem of non-uniform material removal of hard and brittle materials such as optical glass, a continuous functionally graded and composite structured lapping and polishing tool based on magnetic field is proposed. Based on the Preston removal model, a double-layer elastomer structure is designed and established. In order to ensure the continuous change of Young's modulus of the lapping and polishing tool in the radial direction, different volume ratios of carbonyl iron powder, silicon carbide and silicon rubber are mixed, then the magnetic field with a radially radial flux acting on the magnetic particles is used to get the continuous gradient layer. Moreover, by optical microscope and tensile testing machine, the internal microstructure and characteristics of the composites under different volume ratios are obtained. The contact stress between the tool and the workpiece is studied by simulation analysis, and then is tested and verified by a force sensor tester. The results show that through optimization of volume ratios and adjustment of magnetic field, the continuous functionally graded and composite structured lapping and polishing tool can form a continuous elastic modulus distribution from the inner ring to the outer ring. Also, the contact stress is closer to the theoretical curve, and the standard deviation of PR is less than 0.23.

**Key words:** composites, magnetic field, Young's modulus, carbonyl iron powder, lapping and polishing