

磨料颗粒增强磁流变弹性体的磨抛应用研究

郭磊¹, 姬云霄¹, 马臻², 郭万金¹, 李哲熙³, 张新荣¹

(1. 长安大学工程机械学院, 710064, 西安; 2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 710119, 西安; 3. 仁荷大学机械工程系, 22212, 韩国仁川)

摘要: 针对常规刚性磨具对复杂面型、硬脆难加工材料工件进行磨抛加工时,难以兼顾加工效率、表面质量以及完整性的问题,提出了一种基于磨料颗粒增强磁流变弹性体材料(A-MRE)的磨抛加工方法。首先,基于磁性颗粒与磨料颗粒在硅橡胶基体中的链网组装与夹持行为,设计了 A-MRE 材料制备工艺流程;然后,基于微观组织结构观测,建立了 A-MRE 材料代表体积单元(RVE)模型,结合理论分析与有限元仿真研究了磁场条件对基体软固结磨粒把持行为的影响;最后,采用 A-MRE 磨具对 SiC 材料开展磨抛加工实验,分析了不同磁场条件下的表面加工质量与材料去除效率。研究表明:磁场方向与 A-MRE 基体磁性颗粒链方向夹角为 0°时磨粒把持应力最大,且随磁场强度的增加而增大,对 A-MRE 基体施加 1.5 μm 压缩量时,磨粒最大把持应力可达 396.63 kPa;磁场强度为 0.35 T 时,采用 A-MRE 磨具加工的 SiC 材料表面粗糙度比无磁场条件下的降低了 80.3%,材料去除效率提高了 28.6%,磨具损耗量降低了 56.1%,验证了 A-MRE 作为弹性磨具基体材料的可行性。

关键词: 磁流变弹性体;磨料颗粒;磨抛加工;表面质量;材料去除率

中图分类号: TG58 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202310014 **文章编号:** 0253-987X(2023)10-0143-11

Study on the Grinding and Polishing Application of Abrasive Particle-Reinforced Magnetorheological Elastomer

GUO Lei¹, JI Yunxiao¹, MA Zhen², GUO Wanjin¹, LEE Chulhee³, ZHANG Xinrong¹

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea)

Abstract: As conventional rigid abrasive tools struggle to balance machining efficiency, surface quality and integrity when used to deal with hard and brittle materials with complex surface features, a novel abrasive machining method, which used abrasive particle-reinforced magnetorheological elastomer (A-MRE), was proposed in this study. Firstly, a preparation process of A-MRE was designed, considering the chain network assembly behavior of magnetic particles and abrasive grains in the silicone rubber matrix. Then, a representative volume element (RVE) model was established through the observation of microscopic structure. The effect of a magnetic field on the holding behavior of softness consolidation abrasive grains was investigated through

收稿日期: 2022-11-01。 作者简介: 郭磊(1986—),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805044);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JM-254)。

网络出版时间: 2023-05-06

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230505.1550.004.html>

theoretical analysis and fem simulation. Finally, an experimental SiC material abrasive machining was carried out using A-MRE tools, and the surface quality and material removal rate were analyzed under different magnetic field conditions. The research results show that the maximum abrasive grain holding stress occurs when the magnetic field direction and the chain direction of the magnetic particles form a 0° angle, and the stress increases with higher magnetic field intensities. When applying a compressive strain of $1.5\ \mu\text{m}$ to the A-MRE tool, the maximum holding stress reaches 396.63 kPa. Comparing the A-MRE tool's machining performance to the case without a magnetic field, it is observed that employing a magnetic field intensity of 0.35 T leads to an 80.3% reduction in SiC material's surface roughness, a 28.6% increase in material removal, and a 56.1% reduction in tool wear. These findings confirm the feasibility of A-MRE as the material of elastic abrasive tools.

Keywords: magnetorheological elastomer; abrasive grain; grinding and polishing; surface quality; material removal rate

近年来,随着先进制造业的发展,超精密加工技术也得到了飞速发展,加工精度由微米级逐步向纳米级甚至原子级迈进^[1]。光学镜片、航发叶片、人工关节等高端装备核心零部件多由物理化学性质稳定、材料性能优异的难加工材料加工而成^[2-3],而磨抛加工作为超精密加工的主要技术手段之一,能够在保证加工表面质量的同时保持较好的加工效率^[4-5]。传统磨具主要由磨料与结合剂组成,通过热压、烧结等方式制备的磨盘、砂带、磨头等磨具,能够满足不同的加工场景^[6]。磨料以氧化铝、碳化硅、金刚石、立方氮化硼为主,结合剂材料则多用金属、陶瓷、树脂等材料^[7]。由上述材料制备而成的大多为刚性磨具,因其应用场景受限于平面、球面、规则回转面零件的精加工以及复杂面型零件的粗加工,会不可避免地加工表面留下随机分布的表面划痕、凹坑以及亚表面缺陷、微裂纹等,且在硬脆材料磨抛加工过程中表现得尤为明显^[8-9]。

磁流变弹性体材料性能稳定、制备工艺简单,能够满足弹性磨具对基体材料的需求。在外加磁场作用下,磁流变弹性体材料中的磁性颗粒由于磁化产生相互作用,材料的弹性模量和阻尼等力学性能发生改变,且这种变化具有可控、可逆、响应迅速等优点^[10]。Qiao等^[11]基于磁化模型、磁偶极子理论以及磁致动态剪切模量频率依赖性定量分析,建立了宏观磁黏弹性体本构模型,并通过实验验证了其合理性。李旭^[12]考虑材料内部磁性颗粒及链结构间的相互作用,采用最小势能原理建立了各向异性磁流变弹性体本构模型。孙书蕾^[13]通过建立代表体积单元(representative volume element, RVE)模型,对磁流变弹性体在磁场作用下的力学性能变化

规律进行了深入研究。Lian等^[14]研究了不同工作条件下硅基磁流变弹性体的摩擦磨损性能。在磁流变弹性体材料磨具应用研究方面,Xu等^[15]提出了磁流变弹性复合材料磨具及抛光方法,分析了磁流变弹性体磨具的材料特性,并验证了其作为磨具材料的可行性。Bedi等^[16]设计了不同结构的磁流变弹性体磨具,对比了磁场装置结构对加工表面粗糙度的影响。Deng等^[17]通过开展基于芬顿催化反应的磁流变弹性体磨具抛光 SiC 实验,探讨了转速等工艺参数对材料去除率和表面质量的影响。

上述研究均表明,具有磁控流变性能特征的磁流变弹性体作为磨具基体材料实现弹性磨抛加工,在工艺上具备一定的可行性。然而,目前针对磨料颗粒增强磁流变弹性体的研究工作报道还相对较少。本文使用硅胶、羟基铁粉、金刚石磨料以及添加剂等材料制备磨料颗粒增强磁流变弹性体,并根据其微观组织结构建立了理论分析与数值仿真模型,研究了工作磁场对磨料颗粒增强磁流变弹性体材料(abrasive reinforced magnetorheological elastomer, A-MRE)基体软固结磨粒把持行为的影响,开展了 A-MRE磨具磨抛碳化硅陶瓷工件的加工实验,结合材料去除效率与表面粗糙度等指标讨论了不同磁场条件下 A-MRE 磨具的磨抛加工性能。

1 材料制备与理论分析

A-MRE 材料是将微米级磨料颗粒、磁性颗粒添加到高分子聚合物基体中均匀混合,并通过固化反应制备而成的一种复合材料。制备过程中,无预置磁场作用的磨料颗粒与磁性颗粒无序分布,此类无明显规律的排布形式称为各向同性;预置磁场作

用下的磁性颗粒会呈现不同类型的链状分布^[18],形成磁性颗粒链-网组装夹持磨料颗粒的微观结构,此类具有方向且规律性的排布方式称为各向异性^[19]。本文中 A-MRE 材料的制备流程如图 1 所示,首先将羟基铁粉、金刚石磨料及添加剂混入 A、B 双组份液态硅胶,材料组分配比如表 1 所示;然后使用恒速电动搅拌机搅拌 30 min 使其均匀混合;接着将混合物注入成型模具并在真空环境中静置 10 min 以排出气泡;最后将装有液态混合物的成型模具置于永磁体产生的 100 mT 类均匀预置磁场中静置 3 小时,待硫化反应进行完全后脱模修整成型。

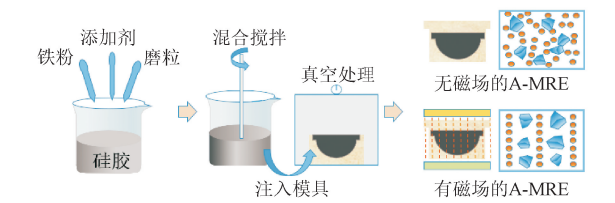


图 1 A-MRE 材料制备流程
Fig. 1 Fabrication process of A-MRE material

表 1 A-MRE 材料组分配比

Table 1 Composition of A-MRE material

组分	粒度/ μm	质量分数/%
硅胶 A		18
硅胶 B		18
金刚石磨粒	5	20
羟基铁粉	2	40
硅油		2
增塑剂		2

制备的 A-MRE 试件的微观组织结构如图 2 所示,可见羟基铁粉成链组网规律性分布,金刚石磨粒较为均匀地分散在铁粉链间,铁粉链夹持磨粒的组织结构特征在观测范围内显现重复排列规律。

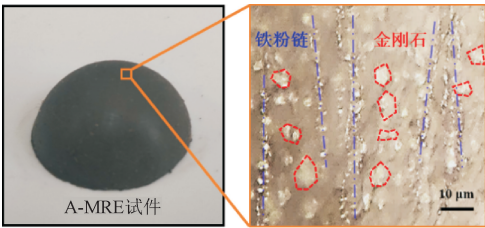


图 2 A-MRE 试件微观结构
Fig. 2 Microstructure of A-MRE specimen

A-MRE 是以硅胶为基体的复合材料,而硅胶

通常被定义为超弹性材料^[20],其超弹性多用应变能函数表达,常用的材料本构模型包括 N-H (Neo-Hookean) 模型和 M-R (Mooney-Rivlin) 模型。现有研究表明,当材料拉、压应变均小于 40 % 且剪切应变小于 90 % 时,N-H 模型与实验结果吻合较好。由于本文基于小应变开展模拟,因此选用 N-H 模型描述 A-MRE 材料的超弹性性能。假设硅胶体积不可压缩^[21],则 N-H 模型应变能函数表达式为

$$w_{N-H} = C_{10} (I_1 - 3) \tag{1}$$

式中: C_{10} 为材料常数,取值为 0.5G,G 为基体材料的剪切模量; I_1 为应变不变量,可表示为 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$,其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 3 个方向的主伸长率。

通常采用磁偶极子模型对磁流变材料磁化颗粒间的相互作用开展研究,即认为磁性颗粒磁化方向与磁感线同向,此时可将每个磁化的磁性颗粒视为一个磁偶极,通过分析得到磁偶极子模型的微观磁致模量。磁性颗粒被磁化后的磁偶极矩可表示为

$$\boldsymbol{j} = \frac{1}{6} \pi \mu_0 \mu_1 k \boldsymbol{H} d^3 \tag{2}$$

式中: μ_0 为硅胶磁导率; μ_1 为空气磁导率; k 为磁性颗粒磁化率; $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度矢量; d 为磁性颗粒直径。相邻磁性颗粒间磁致弹性能量密度函数可写为

$$W = \frac{\mu_0 \boldsymbol{j}^2}{4 \pi r_1^3} (1 - 3 \cos^2 \theta) \tag{3}$$

式中: θ 为图 3 所示相邻磁性颗粒质心连线与磁场方向的夹角; r_1 为磁性颗粒的质心间距。

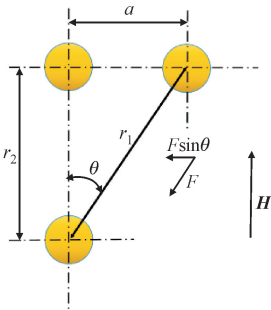


图 3 磁偶极子理论分析模型
Fig. 3 Theoretical analysis model of magnetic dipole

当 $\theta = 0^\circ$ 时,定义压缩应变为 ϵ ,磁性颗粒质心间距 $r_1 = r_2 (1 - \epsilon)$,则单轴压缩时应变能密度函数为

$$W = \frac{\mu_0 \boldsymbol{j}^2}{2 \pi r_1^3} = \frac{\mu_0 \boldsymbol{j}^2}{2 \pi r_2^3 (1 - \epsilon)^3} \tag{4}$$

将式(4)对压缩应变求二阶偏导,得到压缩弹性模量为

$$E = \left. \frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon^2} \right|_{\epsilon=0} = \frac{6 \mu_0 \boldsymbol{j}^2}{\pi r_2^3} \tag{5}$$

由式(5)可知,压缩弹性模量为正且随着磁场的增大而增大。同样地,当 $\theta = 0^\circ$ 时,小剪切变形下的剪切应变 γ 可近似表示为 $\gamma = a/r_2$, a 为图3所示磁性颗粒切向位移,则应变能密度函数可改写为

$$W = \frac{\mu_0(\gamma^2 - 2)j^2}{4\pi r_2^3(\gamma^2 + 1)^{5/2}} \tag{6}$$

将式(6)对剪切应变 γ 求二阶偏导,得到磁致剪切模量为

$$G = \left. \frac{\partial^2 W}{\partial \gamma^2} \right|_{\gamma=0} = \frac{3\mu_0 j^2}{\pi r_2^3} \tag{7}$$

由式(7)可知,剪切模量与磁性颗粒间距负相关,而磁性颗粒间距由磁流变弹性体中磁性颗粒的质量分数决定,其质量占比越大,颗粒间距越小,材料的剪切模量就越大。如图4所示,A-MRE基体中羟基铁粉颗粒呈短链状排列,设颗粒初始间距为 L_1 ,铁粉链初始间距为 L_2 ,在工作磁场 H 的作用下,颗粒磁化并相互吸引,当 $L'_1 < L_1$ 且 $L'_2 < L_2$ 时,A-MRE基体收缩变形,挤压铁粉链间金刚石磨粒并在其表面产生压缩应力。因此,磨粒把持强度主要受A-MRE基体磁致模量变化的影响。

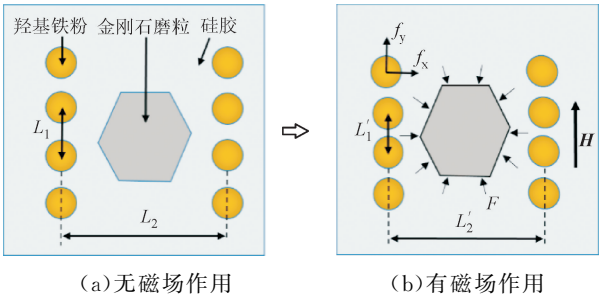


图4 A-MRE基体磁致收缩与磨粒把持受力分析
Fig. 4 Magnetic field-induced contraction and force holding of the abrasive grain in A-MRE matrix

2 A-MRE基体建模与仿真分析

2.1 模型参数

利用COMSOL Multiphysics多物理场耦合软件对A-MRE基体模型开展有限元分析,如图5所示,模型由无限圆域、空气区域与A-MRE基体RVE等部分组成。在A-MRE基体微观结构观测结果的基础上,对材料内部颗粒排布进行了均匀化处理,参考Asadi Khanouki等^[22]将磁性颗粒间距、粒径及质量分数等因素相关联的磁流变弹性体建模方法,选取3条羟基铁粉链与6颗金刚石磨粒建立RVE模型,根据图2的实际测量结果,设置模型尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m} \times 25\text{ }\mu\text{m}$,羟基铁粉颗粒及铁粉链的间距分别为1和 $10\text{ }\mu\text{m}$,用来模拟羟基铁粉和金刚石磨

料质量分数分别为40%和20%的A-MRE基体微观组织结构,具体参数设置如表2所示。

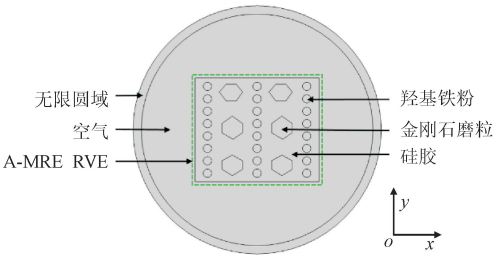


图5 A-MRE基体RVE仿真模型
Fig. 5 RVE simulation model of A-MRE matrix

表2 A-MRE基体RVE模型材料性能
Table 2 Material properties of A-MRE RVE model

组分	相对磁导率	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
羟基铁粉	4 000	225	0.30	7 845
金刚石	1	1 100	0.07	3 500
硅胶	1	7.3×10^{-7}	0.48	910

2.2 磁致仿真

采用在RVE模型上边界添加位移的加载方式,分别在磨粒与硅胶、铁粉颗粒与硅胶间设置接触对,选取摩擦系数 f 为0.15,对底面添加固定约束。在RVE模型上施加大小为0.4 T,与铁粉链夹角分别为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 的均匀磁场。

仿真结果如图6所示,可以看出,铁粉链磁通密度随磁场方向与铁粉链夹角 θ 的增大而减小,而金刚石磨粒把持应力随着夹角 θ 的增加呈现出先减小后增大趋势。为进一步量化磨粒把持应力,对每个金刚石磨粒上的最大应力进行平均,得到不同磁场条件下的磨粒把持应力拟合曲线,如图7所示。当夹角 θ 为 0° 时,把持应力最大; $0^\circ \sim 45^\circ$ 时应力呈线性递减; $45^\circ \sim 54.20^\circ$ 时下降幅度逐渐减小,并在此区间达到最小值;当磁场方向与铁粉链方向夹角大于 54.20° 时,链中颗粒之间的排斥力大于吸引力,开始沿链方向产生拉伸;在 $54.20^\circ \sim 90^\circ$ 时,基体拉伸变形开始抵消压缩变形;当磁场方向与铁粉链方向夹角等于 90° 时,把持金刚石的应力完全来自于基体材料的拉伸变形。 $\theta = 0^\circ$ 时金刚石磨粒的把持应力约为 $\theta = 90^\circ$ 时的2.1倍,与Yao等^[23]对相邻磁性颗粒径向分力的研究结论相一致,即颗粒间作用力随夹角 θ 的增大表现为先吸引后排斥,且在特定角度时出现引力与斥力转换的临界阈值。

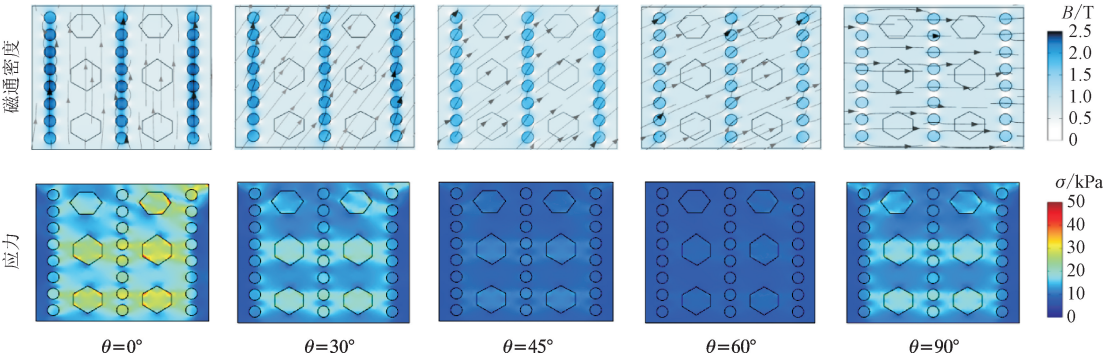


图 6 RVE 模型的磁通密度及应力云图

Fig. 6 Magnetic field density and stress distribution of RVE models

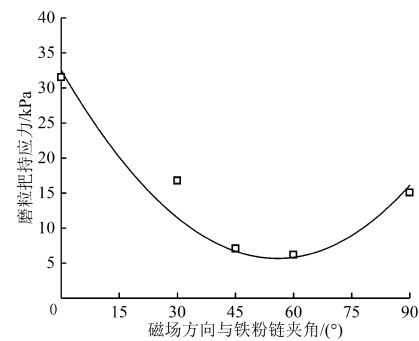


图 7 磨粒把持应力随磁场方向与铁粉链夹角的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of abrasive grain holding stress with the angle between magnetic field direction and iron powder chain

磨抛加工时,A-MRE 磨具在磁场环境下受力与工件表面接触并相互作用,导致磨具被动变形,贴合工件表面形状形成弹性磨抛区域,是一个较为复杂的磁-力耦合过程。将 RVE 模型置于 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 T 的匀强磁场中,分别施加 0.5、1.0 和 1.5 μm 的基体压缩量,结果如图 8 所示。无磁场作用时,基体压缩量在金刚石磨粒上产生的最大应力分别为 97.07、202.86 和 321.40 kPa,且随磁场强度的增加而增大,并在 $H=1\text{ T}$ 时达到最大值,不同压缩量对应的应力增量分别为 80.88、77.79 和 75.23 kPa。相较于无压缩量情况,基体压缩状态下磁场强度导致磨粒把持应力增量呈现递减趋势,是由于基体压缩时体积不变而内应力增加,弹性模量与屈服强度增大,由磁性颗粒间引力导致的基体收缩变形相比于无压缩时更难完成,因此应力增量呈现递减趋势。

A-MRE 基体中,金刚石磨粒的把持强度会在一定程度上影响其作为软固结磨粒实现工件材料微切削等二体磨削加工行为的有效寿命。为了验证磁

场条件对 A-MRE 磨具中磨粒把持强度的影响,本文在不同强度的均匀磁场下,对出刃高度为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石磨粒施加 $F=0.3\text{ }\mu\text{N}$ 的切向载荷,开展脱落失效仿真分析的结果如图 9 所示。由图可见,随着磁场强度的增加,基体磁致模量得到提升,因此切向载荷相同时基体更不易发生变形,磨粒脱落趋势减弱。提取磨粒偏转位移数据如图 10 所示,与无磁场作用相比,在 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 T 的磁场条件下,金刚石磨粒受切向力发生偏转的最大位移分别减小了 6 %、9 %、14 %、26 % 和 44 %。由此可见相同载荷条件下,金刚石磨粒受基体磁致收缩影响的偏转位移随磁场强度的增大而减小,即磨粒在 A-MRE 基体中的把持强度随磁场强度的增加而增大。

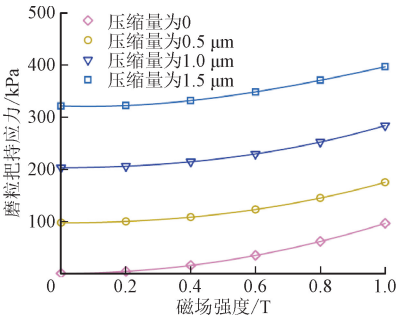
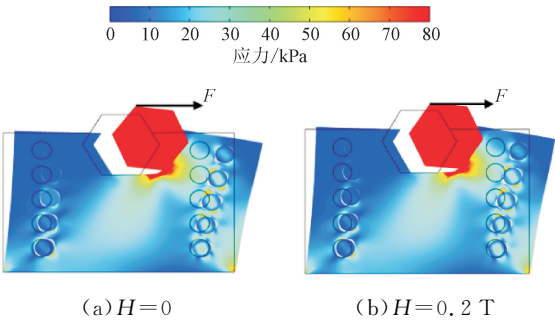


图 8 磨粒把持应力随压缩量的变化曲线

Fig. 8 Variation of abrasive grain holding stress with the compression volume



(a) $H=0$ (b) $H=0.2\text{ T}$

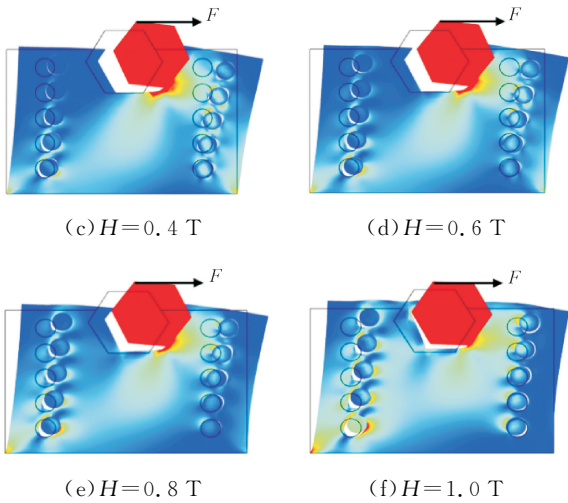


图 9 不同磁场强度作用下基体把持磨粒脱落失效仿真

Fig. 9 Different magnetic field-induced failure simulation of the abrasive grain debonding

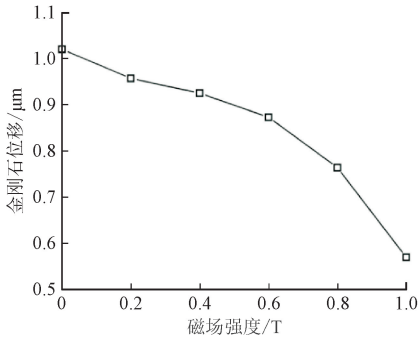


图 10 不同磁场强度下基体金刚石磨粒位移的变化曲线

Fig. 10 Different magnetic field-induced displacement curve of the matrix-held abrasive grain

3 磨抛加工实验

采用 A-MRE 磨具的磨抛加工方法,在工艺上属于弹性接触式的柔性加工^[24],其过程如图 11 所示。相比于传统刚性加工,弹性磨抛不仅能够避免因刚性接触导致磨具面型误差复制到加工对象,还能通过变形适应工件表面曲率的变化^[25],减少表面与亚表面损伤。相比于非直接接触的流体介质磨抛方法,弹性磨抛能够显著提高材料的去除效率。对于微观结构呈现各向异性的 A-MRE 基体,当外部磁场条件发生变化时基体模量也随之改变,由于受到磁力作用,铁粉颗粒间及铁粉链间会产生基体内应力,从而导致收缩变形,影响了磨料颗粒的基体把持强度。因此在磨抛过程中,不仅可以通过工作磁场条件改变磨具弹性模量,进而调控磨具与工件间

的接触与贴合行为,还可以通过磁场条件改变磨料颗粒在基体内的把持强度,从而减缓软固结磨料颗粒向游离磨料的转换趋势,延长软固结磨料颗粒二体磨削加工的有效寿命,提高加工效率。为验证以上分析结果,本文开展了采用 A-MRE 磨具的 SiC 磨抛加工实验。

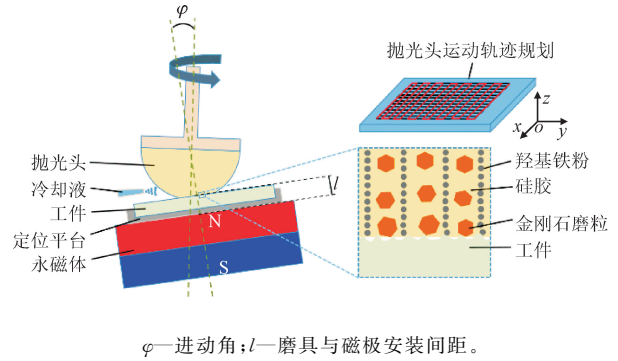


图 11 A-MRE 磨具磨抛加工过程示意图

Fig. 11 The illustration diagram of grinding and polishing process with A-MRE abrasive tool

3.1 实验设置

如图 12 所示,基于 4 轴台式数控平台开展磨抛实验,通过夹持机构将 A-MRE 基体半球形磨具安装于主轴,采用工作台上安装的“几”字形非导磁装置对工件进行定位装夹,将永磁体磁场发生装置固定在弧形导轨上,通过导轨调整加工区域的磁场条件。工件选用尺寸为 50 mm×25 mm×5 mm 的无压烧结 SiC,材料性能参数如表 3 所示。实验中,通过粗磨预处理使工件表面粗糙度 $R_a=1\pm0.05\text{ }\mu\text{m}$,选取进动角 $\varphi=10^\circ$,磨抛路径为等距栅格,使用磨削液浇注磨抛加工区域,以便对加工过程进行冷却润滑,从而保证加工质量。

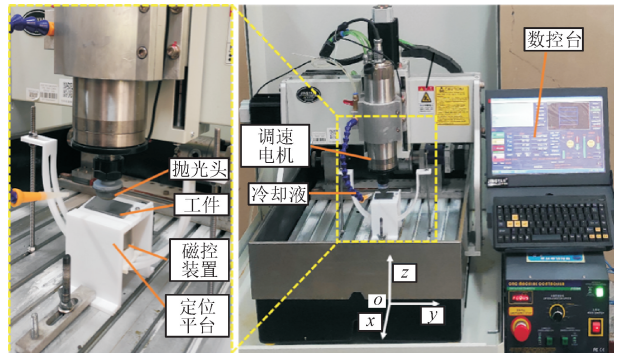


图 12 A-MRE 磨具磨抛加工实验平台

Fig. 12 A-MRE tool grinding and polishing experiment setup

表 3 SiC 工件材料性能参数
Table 3 Material properties of SiC workpiece

物理属性	数值
密度/(g · cm ⁻³)	3.12
洛氏硬度 HRC	100
抗弯强度/MPa	400
弹性模量/GPa	415
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	4.20
导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	148

实验中,采用 N-S-N-S 叠加式圆柱型 N42 钕铁硼永磁体布置工作外加磁场,所选永磁体尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,剩磁 $B_r=1.2\text{ T}$ 。通过仿真计算得到安装间距 l 分别为 6、13 和 29 mm 处的磁场强度,如图 13 和 14 所示。由磁场分布强度云图及其随间距的变化曲线可知,在距离中心轴线 $l'\leq 10\text{ mm}$ 的区间内,磁场分布较平稳,对应于上述安装间距的磁场强度平均值分别为 0.35、0.23 和 0.10 T,表明能够通过调整磨具与磁极间距,达到调节外部磁场强度的实验需求。

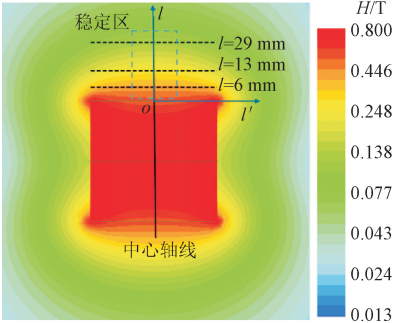


图 13 不同安装间距下叠加式永磁体磁场强度分布
Fig. 13 Magnetic field intensity distribution of stack-magnets setup at different installation spacing

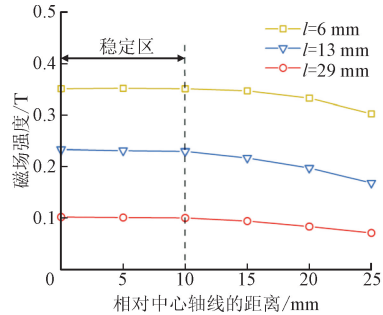


图14 不同安装间距下相对中心轴线距离的磁场强度分布
Fig. 14 Magnetic field distribution referred to the center axis at different installation spacing

本文分别开展了不同磁场条件以及同一磁场不同加工时间下 SiC 工件的平面磨抛实验,实验参数如表 4 所示。分别从以下 3 个方面对磨抛加工质量进行评价:采用 Mitutoyo SJ-310 粗糙度测量仪,在已加工表面随机选取测量长度为 4.2 mm 的 3 个测点,取 3 个测点的平均粗糙度 R_a 作为工件已加工表面的粗糙度;采用 4XC 金相显微镜及 KC-1000 激光共聚焦显微镜,对已加工表面的形貌特征进行微观表征;采用 FA1204B 电子天平,测量 3 个相同工艺参数下的加工工件,对其磨抛前后质量变化进行平均,得到材料去除率的计算公式如下

$$R_{MR} = \Delta m / \rho t \tag{8}$$

式中: R_{MR} 为材料去除率; Δm 为工件加工前后质量差; ρ 为碳化硅工件的密度; t 为磨抛时间。

表 4 磨抛加工实验参数

参数	组 1	组 2
磁场强度/T	0, 0.10, 0.23, 0.35	0, 0.35
时间/min	80	20, 40, 60, 80, 100
转速/(r · min ⁻¹)	1 000	1 000
进给速度/ (mm · min ⁻¹)	20	20
压缩量/mm	2	2

磨抛过程中,磨具在磨除加工材料的同时也存在自身磨损,磨具磨损不仅影响磨具寿命,与磨具工作过程中的材料去除率也密切相关。弹性基体磨具磨损及其体积缺失,将会导致加工区域磨具与工件间接接触面积、应力分布及磨削液流动性等参数发生变化,进而影响加工区域的有效磨粒分布。因此,选取相同工艺参数条件下的 3 个磨具,测量磨抛前后的质量变化并对结果进行平均,计为磨具磨损量 $\Delta m'$,用于 A-MRE 磨具的磨损评价。

3.2 实验结果及讨论

结合图 15 和 16 给出的显微观测与形貌扫描结果,以及图 17 给出的粗糙度测量结果可见,无外加磁场作用下 A-MRE 磨具完成对碳化硅工件的平面磨抛后,微观观测到的工件表面仍残留有较为明显的凸起、缺陷及划痕,但磨抛后表面粗糙度达到 $R_a=0.304\text{ }\mu\text{m}$,相比磨抛前预处理工件粗糙度 $R_a=1.00\text{ }\mu\text{m}$,降低了 69.6%;外加磁场强度 $H=0.10\text{ T}$ 时,工件表面形貌预处理残留凸起及缺陷区域减小,磨削划痕虽然仍较为明显却已变得稀疏,且磨抛后表面粗糙度 $R_a=0.248\text{ }\mu\text{m}$,相比预处理工件降低了 75.2%;当磁场强度 $H=0.23\text{ T}$ 时,工件已

加工表面凸凹缺陷明显改善且磨削划痕大幅度减少,磨抛后表面粗糙度 $R_a=0.204\text{ }\mu\text{m}$,相比预处理工件降低了 79.6%;当磁场强度 $H=0.35\text{ T}$ 时,已加工表面凸凹缺陷及磨削划痕基本消除,表面较为平整光滑,且粗糙度达到最小值 $R_a=0.170\text{ }\mu\text{m}$,相比预处理工件下降了 80.3%。根据图 17,对比不同磁场下工件磨抛前后的质量可知,当 $H=0.10$ 、 0.23 和 0.35 T 时,材料去除率分别为 8.81×10^6 、 9.62×10^6 和 $10.82\times 10^6\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,相较于无磁场下的 $8.41\times 10^6\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,分别提高了 4.8%、14.3% 和 28.6%。

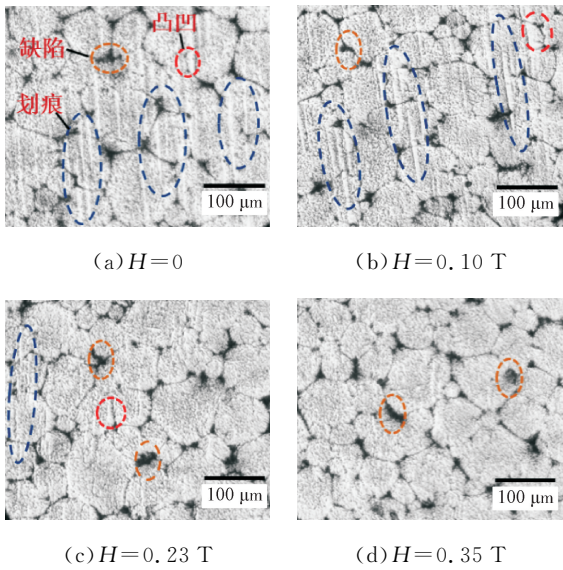


图 15 不同磁场强度下 SiC 已加工表面光学显微观测
Fig. 15 Optical micro-observation of machined SiC surfaces for different magnetic fields

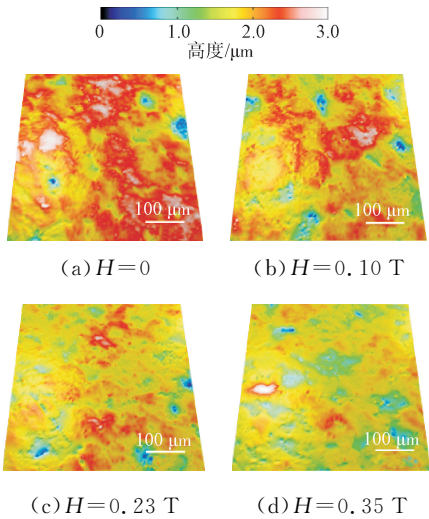


图 16 不同磁场强度下 SiC 已加工表面共聚焦扫描形貌
Fig. 16 Confocal scanning topology of machined SiC surfaces for different magnetic fields

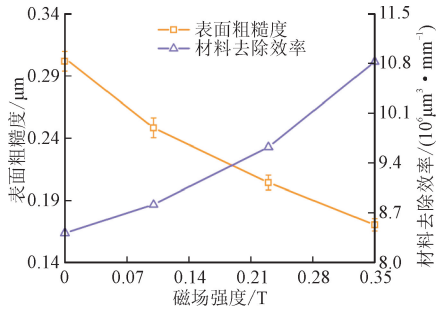


图 17 表面粗糙度与材料去除效率随磁场强度变化曲线
Fig. 17 Variation curve of surface roughness and material removal rate with magnetic field strength

由于实验中 A-MRE 磨具基体铁粉链与外加工作磁场方向的夹角约为 10° ,根据前文 RVE 模型的磁致仿真结果,该角度下羟基铁粉颗粒磁化后颗粒间的引力大于斥力,因而基体收缩挤压作用占据主导地位。随着工作磁场强度的增加,位于铁粉之间的金刚石磨粒把持强度逐渐增大,减小了磨料颗粒失效脱落到游离状态转化的趋势,使磨抛区域内材料表面材料去除行为以软固结磨料二体加工为主,不仅减少了游离磨料颗粒带来的无序划痕与损伤,还在降低表面粗糙度的同时提高了材料去除效率。此外,根据 A-MRE 磨具压缩量的 RVE 仿真结果,同等压缩量下增大外加磁场强度会压缩磁性颗粒间距,并大幅度提高基体收缩应力,提高基体材料的剪切强度,不但使得基体内固着颗粒的把持强度更高,而且进一步提升了基体材料的弹性模量、硬度及耐磨性等性能,从而在同等压缩量条件下获得了更大的磨抛压力。比较后发现,实验中磨具在同等压缩量下材料去除效率的变化趋势,与 Preston 材料去除函数中磨抛压力与材料去除效率正相关的结论相一致。

为进一步验证不同磁场条件下,A-MRE 磨具基体材料磁致性能变化对磨具强度及耐磨性的影响,对不同磁场条件下工件材料的去除量和磨具磨损量进行统计分析,结果如图 18 所示。根据表 4 中实验组 1 的参数设定,随着磁场强度从 0 增大到 0.35 T ,SiC 材料的去除量由 2.1 增至 2.7 mg。理论上来讲,更高的材料去除量必然会导致更高的磨具磨损消耗,然而从图中可以看出,在磁场强度为 0.35 T 时,A-MRE 磨具的损耗量仅为 22.3 mg,远远小于无外加磁场时的 39.8 mg,进一步验证了上文理论分析与仿真模型的合理性。

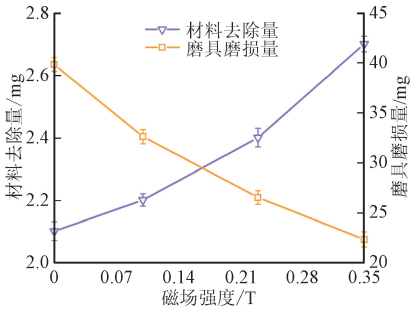


图 18 材料去除量与磨具磨损量随磁场强度变化曲线
Fig. 18 Variation curve of material removal volume and abrasive tool wear with magnetic field strength

为进一步探究磨抛时间对 A-MRE 磨具磨抛性能的影响,在外加磁场 H 为 0 和 0.35 T 时,对磨抛时长分别为 20、40、60、80 和 100 min 工件的材料去除量及去除率进行统计,结果如图 19 所示。可以看出,随着磨抛时间的增加,无外加磁场时的材料去除量由 0.6 增加到 2.2 mg,材料去除率从 9.62×10^6 下降到 $7.05\times 10^6\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,下降率为 26.7%;当外加磁场为 0.35 T 时,材料去除量由 0.8 增加到 2.9 mg,材料去除率从 12.82×10^6 下降到 $9.29\times 10^6\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$,下降率为 27.6%。由此可见无论施加磁场与否,磨抛时间的增加均一定程度上降低了材料去除率,这是因为磨抛时间越长,工件表面凹凸缺陷越少,工件磨损增量也越少,从而表现出材料去除率随时间下降的趋势。

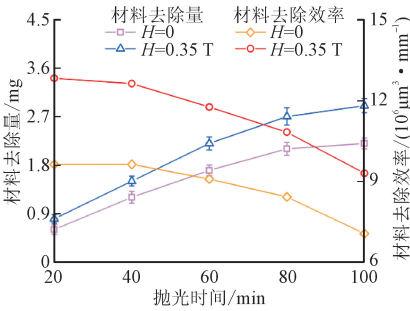


图 19 材料去除量与去除效率随磨抛时间变化曲线
Fig. 19 Curve of material removal volume and rate with polishing time

4 结 论

(1)验证了双组分硅胶、羟基铁粉、金刚石磨料及添加物在预置磁场下制备各向异性 A-MRE 材料的工艺可行性,观测了磁性颗粒把持金刚石磨粒的组织结构特征,并采用理想均匀化处理方法建立了用于表征 A-MRE 基体性能的 RVE 模型。

(2)分析了磁场强度、磁场方向、压缩量等参数

对金刚石磨粒把持强度的影响规律,发现当磁场方向与磁性颗粒链方向一致或因受力变形时,基体磁致收缩行为导致磨粒上产生的应力增大,并进一步通过单颗粒脱落失效分析验证了基体软固结磨粒在切向载荷作用下的偏转位移随磁场强度增加而递减的趋势。

(3)通过碳化硅工件磨抛加工实验,验证了磨具磁致性能变化能够有效提升材料去除效率,并降低已加工表面的粗糙度。与无磁场作用时相比,当磁场强度为 0.35 T 时,表面粗糙度最低可至 $0.170\text{ }\mu\text{m}$,降低了 80.3%;材料去除率最高提升量为 28.6%,达到 $10.82\times 10^6\text{ }\mu\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$;磨具磨损量减少 17.5 mg,降低了 56.1%。实验结果表明:磁场条件不仅能有效调控 A-MRE 基体对软固结磨粒的把持能力,同时也能明显改善基体的弹性模量、硬度和耐磨性等材料属性。

参考文献:

[1] 袁巨龙,王金虎,吕冰海,等. 力流变抛光技术 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 21-30.
YUAN Julong, WANG Jinhu, LÜ Binghai, et al. Force rheological polishing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 21-30.

[2] 刘锋伟,吴永前,陈强,等. 大口径光学非球面镜先进制造技术概述 [J]. 光电工程, 2020, 47(10): 63-85.
LIU Fengwei, WU Yongqian, CHEN Qiang, et al. Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 63-85.

[3] SHARMA A, KALSIA M, UPPAL A S, et al. Machining of hard and brittle materials: a comprehensive review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50, Part 5: 1048-1052.

[4] 李华,任坤,殷振,等. 超声振动辅助磨料流抛光技术研究综述 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 233-253.
LI Hua, REN Kun, YIN Zhen, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted abrasive flow polishing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 233-253.

[5] GHOSH G, SIDPARA A, BANDYOPADHYAY P P. Review of several precision finishing processes for optics manufacturing [J]. Journal of Micromanufacturing, 2018, 1(2): 170-188.

[6] 李敏,胡玲. CBN 多孔砂轮制备方法与修整技术的研究

- 究进展 [J]. 金属材料与冶金工程, 2016, 44(3): 8-14.
- LI Min, HU Ling. Progress of fabrication and dressing methods for CBN porous grinding wheel [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2016, 44(3): 8-14.
- [7] 徐西鹏, 黄辉, 胡中伟, 等. 磨粒工具的研究现状及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(15): 2-20.
- XU Xipeng, HUANG Hui, HU Zhongwei, et al. Development of abrasive tools: state-of-the-art and perspectives [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 2-20.
- [8] ZHANG Shaojian, ZHOU Yuanping, ZHANG Haijun, et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 16-41.
- [9] 邓家云, 潘继生, 张棋翔, 等. 单晶 SiC 基片的化学机械抛光技术研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(1): 79-91.
- DENG Jiayun, PAN Jisheng, ZHANG Qixiang, et al. Research progress in chemical mechanical polishing of single crystal SiC substrates [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(1): 79-91.
- [10] BASTOLA A K, HOSSAIN M. A review on magneto-mechanical characterizations of magnetorheological elastomers [J]. Composites: Part B Engineering, 2020, 200: 108348.
- [11] QIAO Yanliang, ZHANG Jiangtao, ZHANG Mei, et al. A magnetic field-and frequency-dependent dynamic shear modulus model for isotropic silicone rubber-based magnetorheological elastomers [J]. Composites Science and Technology, 2021, 204: 108637.
- [12] 李旭. 磁流变弹性体的力-磁耦合本构模型 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2017.
- [13] 孙书蕾. 磁流变体有限变形数值模拟及本构建模研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [14] LIAN Chenglong, LEE K H, LEE C H. Friction and wear characteristics of magneto-rheological elastomers based on silicone/polyurethane hybrid [J]. Journal of Tribology, 2015, 137(3): 031607.
- [15] XU Zhiqiang, WANG Jun, WANG Qiuliang, et al. Investigation of the polishing mechanism of magnetorheological elastic polishing composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1): 377-389.
- [16] BEDI T S, KANT R. Comparative performance of magnetorheological external finishing tools using different magnetic structures [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 41(Part 4): 908-914.
- [17] DENG Jiayun, LU Jiabin, ZENG Shuai, et al. Preparation and processing properties of magnetically controlled abrasive solidification orientation-solid-phase Fenton reaction lapping-polishing plate for single-crystal 4H-SiC [J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 29: 101646.
- [18] YARALI E, ALI FARAJZADEH M, NOROOZI R, et al. Magnetorheological elastomer composites: modeling and dynamic finite element analysis [J]. Composite Structures, 2020, 254: 112881.
- [19] TSAI S W, WU E M. A general theory of strength for anisotropic materials. Journal of Composite Materials [J]. 1971, 5(1): 58-80.
- [20] 陈家照, 黄闽翔, 王学仁, 等. 几种典型的橡胶材料本构模型及其适用性 [J]. 材料导报, 2015, 29: 118-120, 124.
- CHEN Jiazha, HUANG Minxiang, WANG Xueren, et al. Typical constitutive models of rubber materials and their ranges of application [J]. Materials Review, 2015, 29: 118-120, 124.
- [21] 柳彬, 游世辉, 赵树勋, 等. 基于 Digimat 中 RVE 模型的磁流变弹性体的磁致压缩力学性能的数值模拟 [J]. 功能材料, 2018, 49(2): 2086-2092.
- LIU Bin, YOU Shihui, ZHAO Shuxun, et al. Simulation of magnetic field induced compressive mechanical properties of magnetorheological elastomers based on RVE model in Digimat [J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(2): 2086-2092.
- [22] ASADI KHANOUKI M, SEDAGHATI R, HEMMATIAN M. Experimental characterization and microscale modeling of isotropic and anisotropic magnetorheological elastomers [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107311.
- [23] YAO Jianfei, YANG Wei, GAO Yu, et al. Magnetorheological elastomers with particle chain orientation: modelling and experiments [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(9): 095008.
- [24] 徐志强, 王秋良, 张高峰, 等. 可控柔性表面抛光研究综述 [J]. 表面技术, 2017, 46(10): 99-107.
- XU Zhiqiang, WANG Qiuliang, ZHANG Gaofeng, et al. Controllable flexible surface polishing [J]. Surface Technology, 2017, 46(10): 99-107.
- [25] ZHU Wule, BEAUCAMP A. Compliant grinding and polishing: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 158: 103634.

(编辑 李慧敏 刘杨)