

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514446

仿壁虎跨尺度粘附结构状态感知方法研究^{*}

刘彦伟¹, 李博文¹, 胡重阳², 王 浩¹, 李淑娟¹

(1. 西安理工大学教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室 西安 710048;
2. 陕西科技大学电气与控制工程学院 西安 710021)

摘要:针对现有仿壁虎粘附结构在实时状态感知与主动调控能力方面的不足,受壁虎脚趾皮瓣-刚毛多级结构粘附调控方法及感知机制启发,提出了一种具有感知能力的仿生跨尺度粘附结构。该结构由毫米尺度靴形弹性基体与微米尺度蘑菇状粘附阵列复合构成,通过剪切运动实现接触面积的可控调节,正向剪切增大接触面积实现强黏附,反向剪切则通过界面剥离实现易脱附。通过建立跨尺度结构的倾斜棱柱简化模型,理论分析了预压、剪切与剥离这3个阶段中靴形结构底面法向应力的演化规律,发现底面内侧边缘法向应力对预压力与剪切力载荷响应敏感,且其应力状态的突变可作为识别剥离阶段的有效特征。基于双线性牵引-分离理论,建立了跨尺度粘附结构有限元模型,仿真分析了完整粘附过程,验证了结构的可控粘附机制与底面应力演化的阶段特性。依据理论与仿真分析,在仿生跨尺度粘附结构背衬内侧区域集成了薄膜压力传感器,并对其粘附与感知性能进行了实验测试。实验表明,剪切运动能够显著提升跨尺度结构的粘附性能,当剪切位移达到1.4 mm时,粘附力达到最大值1.98 N。同时,感知信号与法向预压力及剪切位移存在明确的对应关系,可有效识别粘附、滑移与脱附状态。研制的对抓式仿生粘附手爪样机成功实现了对玻璃、硅片等多种光滑表面的稳定抓取、可控释放与状态感知,最大负载能力达1 kg,验证了其在机器人操作中的应用潜力。

关键词:仿壁虎跨尺度粘附结构;可控粘附;粘附状态感知;粘附手爪

中图分类号: TP242 TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.40

Adhesion state sensing method for a gecko-inspired multiscale gripper

Liu Yanwei¹, Li Bowen¹, Hu Chongyang², Wang Hao¹, Li Shujuan¹

(1. Key Lab. of NC Machine Tools and Integrated Manufacturing Equipment of the Education Ministry, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: To address the shortcomings of existing gecko-inspired adhesive structures in real-time state sensing and active control capabilities, this paper proposes a bio-inspired multiscale adhesive structure with sensing capability, based on the adhesion regulation method and sensing mechanism of the gecko's lamella-setae hierarchical structure. The structure consists of a millimeter-scale boot-shaped elastic substrate integrated with a micrometer-scale mushroom-shaped adhesive array. By utilizing shear motion to achieve controllable adjustment of the contact area, the structure uses forward shear to increase the contact area for strong adhesion, while reverse shear enables easy detachment through interface peeling. A simplified inclined prism model of the multiscale structure was established to theoretically analyze the evolution of normal stress at the bottom surface of the boot-shaped structure during the preloading, shearing, and peeling stages. It was found that the normal stress at the inner edge of the bottom surface is sensitive to preload and shear forces, and its abrupt change can serve as an effective feature for identifying the peeling stage. Based on the bilinear traction-separation theory, a finite element model of the multiscale adhesive structure was developed to simulate the complete adhesion process, validating the controllable adhesion mechanism and the phased characteristics of stress evolution at the bottom surface. Guided by theoretical and simulation

analyses, a thin-film pressure sensor was integrated into the inner backing layer of the bio-inspired multiscale adhesive structure, and experimental tests were conducted on its adhesion and sensing performance. The results demonstrate that shear motion significantly enhances the adhesion performance of the multiscale structure, with the adhesion force reaching a maximum value of 1.98 N at a displacement of 1.4 mm. Moreover, the sensing signals exhibit a clear correlation with the normal preload and shear displacement, enabling effective identification of adhesion, slip, and detachment states. The developed opposing-grip bio-inspired adhesive gripper prototype has successfully achieved stable grasping, controllable release, and state sensing on various smooth surfaces, such as glass and silicon wafers, with a maximum load capacity of 1 kg, verifying its potential for robotic manipulation applications.

Keywords: gecko-inspired multiscale adhesive structure; controllable adhesion; adhesion state sensing; adhesive gripper

0 引言

机器人手爪作为机器人与环境交互的末端执行器,其应用前景日益广泛^[1-2],其中接触感知是机器人实现稳健抓取与精密操作的核心,对于其在复杂环境中进行精细交互至关重要^[3-4]。然而,现有触觉系统在接触界面的粘附状态感知与主动调控方面尚存明显局限,难以满足机器人手爪可靠抓取或爬壁机器人稳定攀爬等应用中对实时感知与动态控制的迫切需求。

自然界中,壁虎展现出卓越的攀爬能力,这不仅得益于其微观粘附结构,更依赖于与脚趾紧密耦合的神经-肌肉协同调控机制。壁虎可通过神经反馈实时感知界面接触状态,动态调节足端载荷分布与肌肉刚度,实现保形接触的自适应粘附和可控脱离。相比之下,现有仿壁虎粘附结构主要模仿了壁虎的层级粘附结构,缺乏对界面接触状态的实时感知与主动调控能力,这严重限制了其在爬壁机器人^[5-6]、辅助航天员训练等领域中^[7]的广泛应用。例如,爬壁机器人运动过程中动态载荷的波动易导致粘附力不足,从而造成机器人倾覆或滑移^[8]。

研究表明,壁虎脚掌具有从毫米级皮瓣、微米级刚毛到纳米级刮刀的多尺度分级结构,极大增加了真实接触面积,是实现高粘附力的基础^[9-11]。其粘附力主要来源于范德华力^[12],Autumn 等^[13-14]通过精确测量单根刚毛的粘附行为,从实验上验证了该机制。更为重要的是,壁虎能通过调节脚趾姿态主动控制粘附状态-通过内弯和剪切运动增强粘附,通过外翻运动实现快速脱附,展现出“强粘附、易脱附”的智能特性^[15-17]。

受壁虎脚趾刚毛微纳结构启发,仿生微纳粘附结构的研究取得了显著进展。高长径比微柱^[18-20]、蘑菇状微结构等仿生粘附阵列^[21-25]表现出优异的粘附性能,但普遍缺乏有效的粘附力调控能力。为实现可控粘附,研究人员设计了多种不对称结构,如倾斜微柱、楔形阵列等^[26-37],通过结构各向异性实现了微纳尺度上的可控粘附。然而,这些研究主要集中在微观尺度,尚未充分实现类似壁虎脚趾皮瓣的宏观结构对微观刚毛粘附状态的主动调控功能。

在粘附状态感知方面,现有研究通常通过在微纳粘附结构背层集成炭黑/聚合物复合材料^[38]、嵌入多壁碳纳米管^[39]或构建电容传感单元^[40]等感知材料或单元,实现了微纳结构界面法向粘附状态的感知功能。也有研究者提出利用压阻式触觉传感器覆于机器人手指表面检测压力分布^[41],并通过结构设计^[42]来优化压阻响应。然而,仿生跨尺度粘附结构通过切向剪切运动实现对粘附界面的动态调控,其粘附界面法向与切向状态的协同感知方法仍有待深入研究。

针对现有仿生粘附结构在跨尺度调控与多维度状态感知方面的不足,模仿壁虎脚趾皮瓣-刚毛多级结构,设计了仿生跨尺度粘附结构,在毫米尺度靴形结构表面复合了微米尺度蘑菇状粘附阵列结构,实现了“强粘附-易脱附”的可控粘附功能,研究了基于薄膜压力传感器的粘附状态感知方法,实现了预压、剪切、脱附全过程感知,并开展了手爪应用实验,为面向动态复杂环境的机器人抓取操作提供了新技术方案。

1 跨尺度粘附结构仿生设计及其调控机制

1.1 跨尺度粘附结构仿生设计

壁虎脚趾的皮瓣-刚毛结构及其协同调控机理为仿生粘附结构的设计提供了重要基础。如图 1(a)所示,壁虎脚趾表面分布着数排规则排列的皮瓣结构,每个皮瓣上覆盖着数千根刚毛。壁虎通过控制脚趾沿壁面进行剪切运动,使皮瓣贴近壁面,显著增大刚毛与壁面的接触面积,从而产生有效且稳定的粘附力^[13]。

受此启发,设计了一种跨尺度可控粘附结构,由毫米级靴形结构和微米级蘑菇状粘附结构组成,如图 1(b)所示。靴形结构具有弹性变形能力,增强对表面的适应性,并通过剪切运动控制接触面积和粘附行为,实现宏观可控性。蘑菇状粘附结构与表面形成“分子间”接触,提供高强度粘附力。靴形结构所用材料为聚二甲基硅氧烷 (polydimethyl siloxane, PDMS) 硅胶,蘑菇状粘附单元由聚乙烯基硅氧烷 (polyvinyl siloxane, PVS) 材料制备。靴形结构与蘑菇状结构的尺寸参数如图 1(c)所示,靴形结构的几何参数主要包括:顶端倾角 β 、顶端表面长度 L 、根部

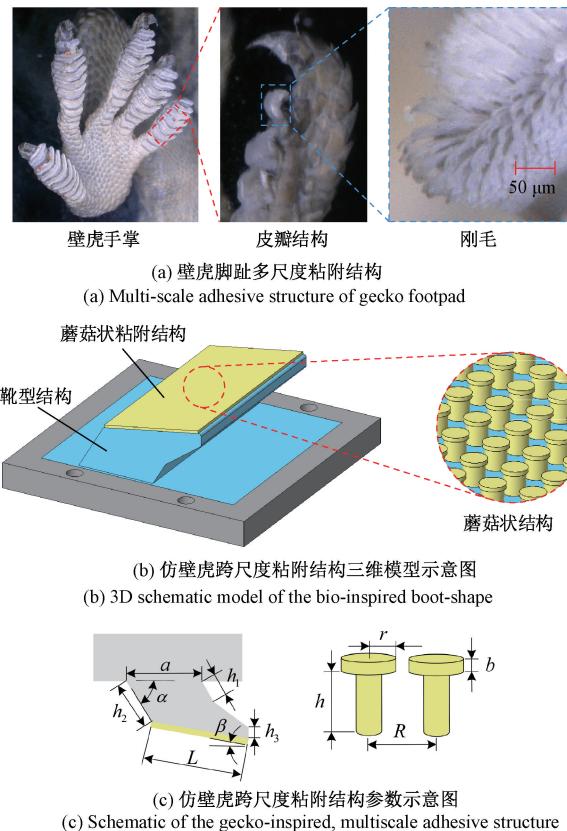


图 1 跨尺度粘附结构仿生设计

Fig. 1 Design of gecko-inspired multiscale controllable adhesive structure

宽度 B 、粘附结构整体厚度 a 、倾角 α 、根部内侧高度 h_1 、外侧高度 h_2 以及尖端高度 h_3 ，蘑菇状粘附结构的几何参数主要包括：头部厚度 b 、头部半径 r 、间距 R 以及高度 h 。其具体尺寸如表 1 所示。

表 1 仿壁虎跨尺度粘附结构参数

Table 1 Parameters of the gecko-inspired multiscale adhesive structure

靴形结构参数	数值	蘑菇状结构参数	数值/ μm
β	10°	h	50
L	8 mm	R	60
a	6 mm	b	2
B	15 mm	r	20
α	60°		
h_1	2 mm		
h_2	4 mm		
h_3	1 mm		

结合靴形结构的适应能力、可控性与蘑菇状结构的高强度粘附力，通过跨尺度结构的有机结合，该粘附结构可实现稳定且可控的粘附性能。

1.2 仿生跨尺度粘附结构调控机制

仿生跨尺度粘附结构通过施加剪切运动，可有效调控其与目标表面之间的接触状态与粘附强度。如图 2 所示，将靴形结构简化为悬臂梁模型，根据式(1)可得到在剪切力 F 作用下悬臂梁端面产生的转角 θ 。随着剪切力 F 的增大，悬臂梁端面转角 θ 相应增大，导致粘附表面与目标表面间的夹角逐渐减小。当转角 θ 等于粘附表面初始倾角 β 时，粘附表面与目标表面达到完全贴合状态，进而实现强粘附。反之，在反向剪切力的作用下，粘附表面与目标表面之间的夹角逐渐增大，接触面积相应减小，实现易脱附。

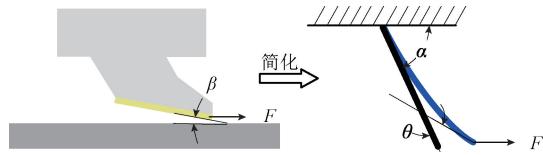


图 2 靴形结构悬臂梁简化模型

Fig. 2 Simplified cantilever beam model of a boot-shaped structure

$$\theta = \frac{Fl^2 \sin \alpha}{2EI} \quad (1)$$

式中： l 为悬臂梁长度； E 为弹性模量； I 为截面的惯性距。

仿生跨尺度结构的可控粘附过程可分为 3 个阶段，如图 3 所示。在法向预压载荷作用下，粘附结构与基底表面形成初步接触，并产生基础粘附力；随后，沿界面剪切运动，促使粘附结构发生变形，进一步贴合表面，从而显著增大接触面积直至完全接触，激活高强度粘附状态；最终，在需要脱附时，施加反向剪切位移驱动粘附结构逐步剥离，使接触面积逐步减小，使其进入易脱附状态。

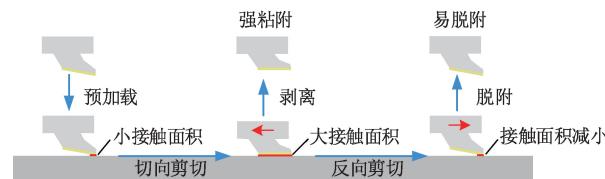


图 3 跨尺度结构可控粘附机理

Fig. 3 Controllable adhesion mechanism of the multiscale structure

1.3 靴形结构底面法向应力演化机理分析

为有效感知跨尺度结构的粘附状态，系统分析了粘附过程中靴形结构底面的法向应力演化机理。如图 4 所示，将靴形结构简化为倾斜棱柱模型，其粘附过程可分为 3 个阶段：1) 在预压阶段，靴形结构顶面尖端受到逐渐增大的法向预压力 P ，随着靴形结构的变形其对底面中心的力臂 e_1 呈递减趋势；2) 进入剪切阶段后，靴形结构受到逐渐增大的剪切力 F ，粘附面积随之增大，剪切力 F 对底面中心的力臂 h_1 及法向预压力 P 对底面中心的力臂 e_2 均随变形逐渐减小，作用位置逐渐趋近顶面中心；3) 在

剥离阶段, 法向作用力逐渐由预压力变成拉力 Q , 且由于顶面粘附力非对称分布, 力的作用位置便直至顶面中心左侧, 形成对底面中心的力臂为 e_3 , 剪切力 F 对底面中心的力臂为 h_2 。

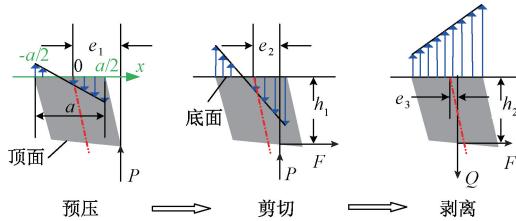


图 4 靴形结构底面法向应力演化简化模型

Fig. 4 Simplified model of normal stress evolution at the bottom of the boot-shaped structure

在粘附过程的 3 个阶段中, 靴形结构底面距离中心位置 x 处的法向应力分别可由式(2)~(4)得到, 底面外侧边缘($x=-a/2$)、中点($x=0$)、内侧边缘($x=a/2$)的法向应力可由式(5)~(7)得到。在预压和剪切阶段, 法向应力沿 x 方向呈递减分布, 而剥离阶段法向应力呈递增分布。预压阶段的底面法向应力与预压力 P 呈线性关系, 其中外侧边缘为拉应力, 中点及内侧边缘为压应力, 且内侧边缘法向应力变化速率最为显著。在剪切阶段, 底面法向应力与剪切力 F 呈线性关系, 外侧边缘仍为拉应力, 内侧边缘为压应力, 两者变化速率相同, 中点则为恒定的压应力状态。当进入剥离阶段时, 底面法向应力与拉力 Q 呈线性关系, 外侧边缘仍为拉应力, 中点区域为压应力, 而内侧边缘法向应力变化速率最大, 并在此阶段迅速由压应力转变为拉应力, 即:

$$\sigma_1(x) = -\frac{P}{A} - \frac{Pe_1x}{I} \quad (2)$$

$$\sigma_2(x) = -\frac{P}{A} - \frac{Pe_2x}{I} - \frac{Fh_1x}{I} \quad (3)$$

$$\sigma_3(x) = \frac{Q}{A} + \frac{Qe_3x}{I} - \frac{Fh_2x}{I} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_1\left(-\frac{a}{2}\right) = \left(\frac{e_1a}{2I} - \frac{1}{A}\right)P \\ \sigma_1(0) = \frac{P}{A} \\ \sigma_1\left(\frac{a}{2}\right) = -\left(\frac{e_1a}{2I} + \frac{1}{A}\right)P \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_2\left(-\frac{a}{2}\right) = \left(\frac{e_1a}{2I} - \frac{1}{A}\right)P + \frac{Fh_1a}{2I} \\ \sigma_2(0) = -\frac{P}{A} \\ \sigma_2\left(\frac{a}{2}\right) = -\left(\frac{e_1a}{2I} + \frac{1}{A}\right)P - \frac{Fh_1a}{2I} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma_3\left(-\frac{a}{2}\right) = \left(\frac{1}{A} - \frac{e_3a}{2I}\right)Q + \frac{Fh_2a}{2I} \\ \sigma_3(0) = \frac{Q}{A} \\ \sigma_3\left(\frac{a}{2}\right) = \left(\frac{1}{A} + \frac{e_3a}{2I}\right)Q - \frac{Fh_2a}{2I} \end{cases} \quad (7)$$

式中: I 为截面的惯性距, A 为底面面积。

综合分析可知, 内侧边缘法向应力对预压力与剪切力的响应最为敏感, 且其应力状态的突变现象可作为识别剥离阶段的明确特征, 可作为粘附状态实时感知与判断的有效信号。

2 粘附过程仿真与感知策略分析

2.1 仿生跨尺度粘附结构有限元模型

基于对跨尺度可控粘附结构的粘附-剥离过程的理论分析, 建立粘附结构粘附和剥离的有限元仿真模型。在粘附结构与表面的接触行为中, 采用双线性牵引-分离定律(cohesive zone model)模拟粘附结构与刚性面之间的粘附行为。如图 5(a)所示, 其中 T^* 为界面内聚强度, δ^e 为损伤开始时的位移, δ^f 为损伤完全结束时的位移。由于仿真所设置的网格大小相比范德华相互作用中 δ^e 和 δ^f 很大, 将会使得仿真出现不收敛现象, 故选择 δ^e 和 δ^f 分别为 30 和 100 nm^[43]。

跨尺度可控粘附结构在粘附和剥离过程中会发生显著的弹性形变, 属于大应变情况, 故采用对大应变模拟能力较强的超弹性模型。同时考虑到制备跨尺度可控粘附结构时所用硅胶材料特性, 最终采用 Ogden 模型来描述硅胶材料的应力-应变行为^[31]。

有限元仿真模型在 Abaqus 软件中的具体设置如图 5(b)所示, 在接触分析中, 由于粘附结构相对于刚性面的刚度较小, 故选择刚性面为主面, 粘附结构的上表面为从面。粘附结构的网格类型为四节点双线性平面应力缩减积分网格单元(4-node bilinear plane stress element with reduced integration, CPS4R)。刚性面与粘附结构之间的粘附作用通过接触属性中的 Cohesive Behavior 和 Damage 模块来定义。同时, 由于两接触面之间相对滑动或旋转较小, 故在定义接触时选择小滑动接触。

2.2 仿生跨尺结构粘附过程仿真分析

对粘附结构在有限元仿真模型中先预压、剪切然后剥离的过程进行分析, 如图 6 所示, 在预接触阶段, 随着法向位移载荷的施加, 刚性面开始与粘附结构接触, 粘附结构发生微小的弹性形变并与刚性面形成点接触。在法向预压阶段, 随着法向压力的施加, 粘附结构逐渐发生弯曲变形, 刚性面与粘附结构之间的接触面显著增大。在

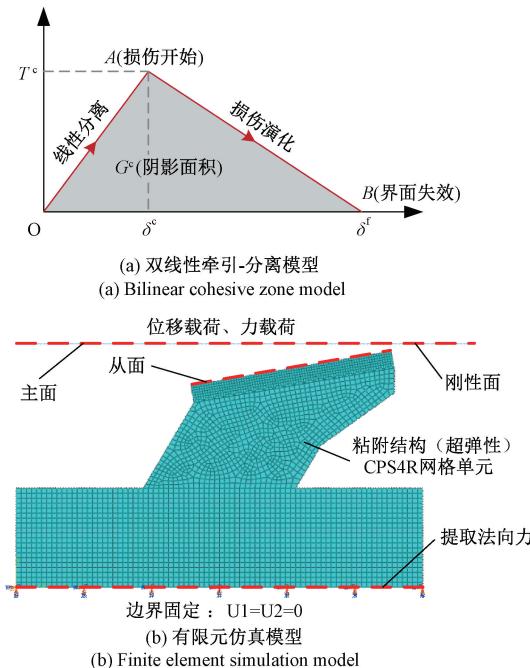


图5 有限元仿真模型及设置

Fig. 5 Finite element simulation model and settings

剪切阶段,随着剪切位移的增加,接触面积不断增大。在剥离阶段,随着法向剥离位移的增大,粘附结构逐渐由压缩状态转变为拉伸状态,刚性面与粘附结构之间则产生明显的粘附现象。随着法向剥离位移的继续增大,刚性面与粘附结构完全分离。

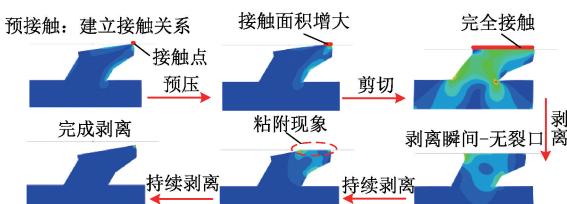


图6 粘附结构的粘附和剥离过程

Fig. 6 Simulated adhesion and peeling processes of the adhesive structure

粘附结构在粘附和剥离过程中的法向力变化曲线图,如图7所示,预压力为0.02 N时,在预压阶段,刚性面与粘附结构之间的接触面积逐渐增大,粘附结构发生相应的弯曲变形,因此其法向预压力逐渐增加。由于剪切位移的不断增加,使得接触面积不断增大。当刚性面开始与粘附结构分离时,粘附结构逐渐由压缩状态转变为拉伸状态,因此其法向力先逐渐减小至0 N,然后转变为粘附力。当粘附力达到极限值时,粘附界面的牵引应力满足双线性-牵引分离模型的最大应力准则,粘附界面开始损伤,粘附力开始逐渐减小,最终实现完全分离。

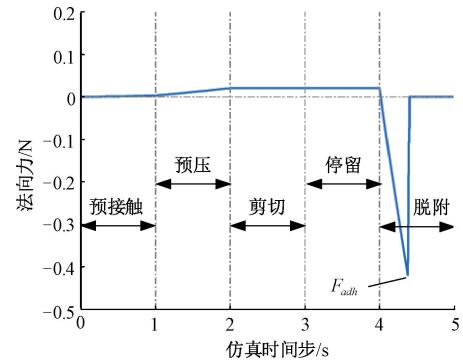
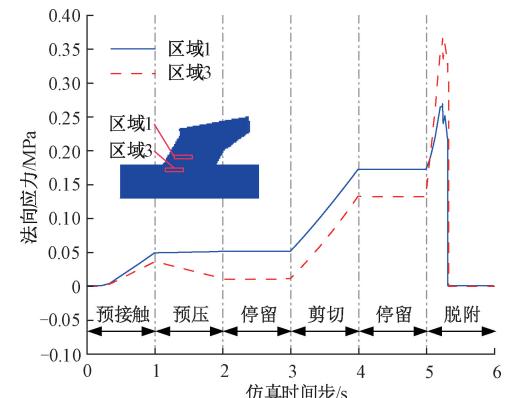


图7 粘附结构粘附-剥离过程中的法向力变化趋势

Fig. 7 Simulated variation of normal force in the adhesive structure during the adhesion-detachment process

2.3 粘附状态感知区域优选与感知策略

基于靴形结构底面法向应力演化理论分析结果,仿真分析了靴形结构底面附近6个区域法向应力响应特性。6个区域在粘附过程中的法向应力演化仿真结果如图8所示。如图8(a)所示,位于底面外侧附近的区域1和区域3主要承受拉应力,其值在预压、剪切过程中逐渐增大,剥离阶段继续增加至峰值后下降至0 N,预压阶段响应不明显。如图8(b)所示,区域5和6位于底面中心附近,在预压阶段表现为压应力并随载荷增大,剪切阶段压应力略有减小,对剪切力的响应不明显。如图8(c)所示,位于底面内侧附近的区域2和区域4,主要承受压应力,预压、剪切过程中压应力持续增加,剥离阶段逐渐减小至0并转变为拉应力,能更清晰反映粘附状态变化。上述仿真结果与理论分析结果一致,位于底面内侧附近的区域2和区域4对预压力、剪切力响应敏感,且能够显著识别剥离阶段。尽管区域2相比区域4对预压和剪切力响应更显著,但其位于靴形结构本体的边缘位置,嵌入薄膜压力传感器会影响结构强度,在剥离过程易过载损坏。相比之下,区域4位于背衬层内侧,为传感器嵌入提供了足够的空间,对粘附结构主体功能的影响较低,优选为传感器的嵌入位置。

(a) 区域1、3法向应力随时间变化趋势
(a) Temporal evolution of normal stress in zones 1 and 3

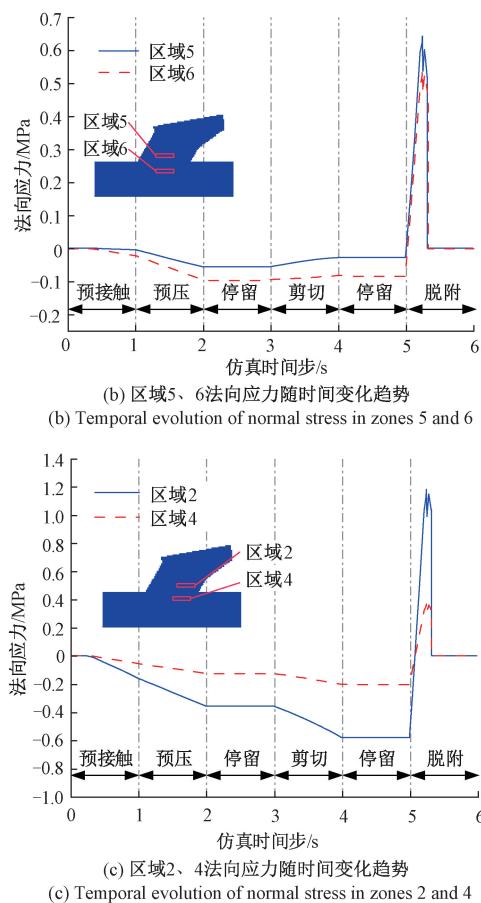


图 8 粘附结构各区域的法向应力曲线

Fig. 8 Normal stress curves across different regions of the adhesive structure

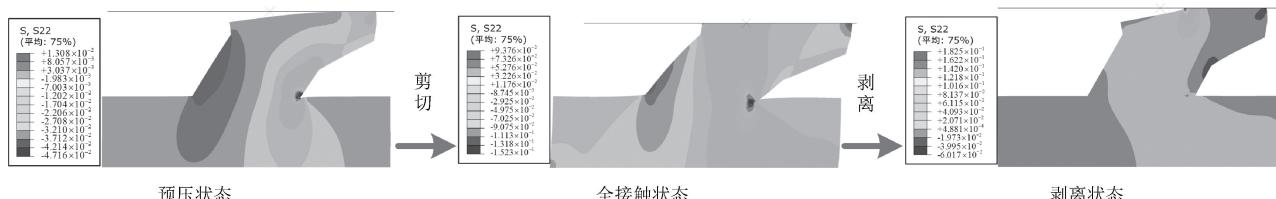


图 9 粘附结构粘附-剥离过程中法向应力变化过程

Fig. 9 Variation of normal stress during the adhesion-detachment process of the adhesive structure

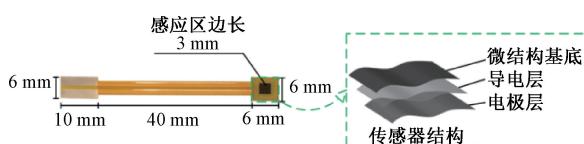


图 10 薄膜压力传感器尺寸及结构

Fig. 10 Dimensional layout and structural schematic of the thin-film pressure sensor

电压为 5 V。当粘附结构受力时,薄膜压力传感器的电阻变化会直接转化为其两端的电压变化,从而实现电阻信号到电压信号的转换。

粘附结构在粘附-剥离过程中法向应力变化过程,如图 9 所示。区域 4 在预压阶段和剪切过程中持续承受压应力,且应力值随载荷增加而显著上升;而在剥离过程中,该区域由压应力向拉应力的转变趋势明显,并最终呈现拉伸状态。此动态变化过程较好的反映了粘附结构从接触、承载至分离全过程的法向力响应特征,具有清晰的阶段性与可识别性。

3 仿生跨尺度粘附结构感知实验研究

3.1 仿生跨尺度结构感知系统设计

感知元件作为粘附结构的感知核心,可反映出粘附结构的粘附状态。使用微结构柔性触觉传感器作为感知元件。如图 10 所示,该传感器主要由 3 部分组成,聚二甲基硅氧烷微结构基底、沉积在其表面的还原氧化石墨烯导电层以及柔性叉指电极。其工作原理基于压阻响应机制,在无压力时,具有表面微结构的导电层与底层电极之间的接触面积较小,导致二者之间的电阻值较高;当外部压力加载时,微结构被压缩,导电层与电极之间的接触面积显著增大,从而降低二者之间的电阻值,实现压力的感知功能。

薄膜压力传感器的输出信号为电阻值,为直观反映粘附结构的粘附状态,需将其电阻变化转化为电压信号,并通过信号采集卡进行记录。图 11 为感知信号采集电路的示意图。在该电路中,薄膜压力传感器被视为一个可变电阻,与一个常值电阻串联(阻值为 10 kΩ),电源

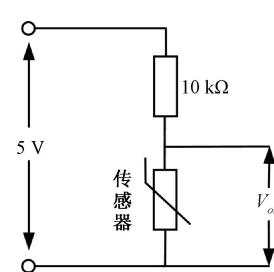
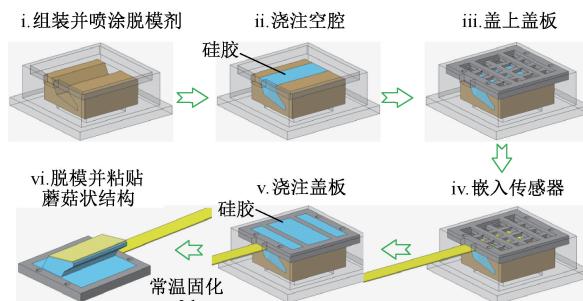


图 11 感知信号采集电路示意图

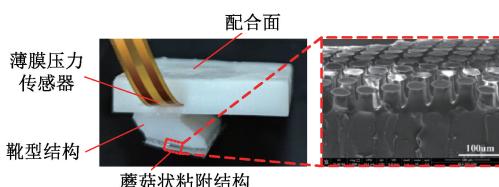
Fig. 11 Schematic of the sensing signal acquisition circuit

3.2 具备感知功能的仿生跨尺度结构制备

图12(a)为嵌入薄膜压力传感器的仿生跨尺度粘附结构制备流程示意图。具体步骤为:1)将靴形结构模具与基座组装,并在模腔内均匀喷涂脱模剂;2)浇注硅胶填充模具空腔,并盖上盖板完成初步封装;3)通过基座侧孔将薄膜压力传感器插入盖板预定位置,并二次浇注硅胶填充盖板空隙,确保传感器与结构体之间紧密粘结;4)常温下固化3 h,脱模得到具有感知功能的靴形结构;5)将裁剪好的蘑菇状粘附表面粘贴在靴形结构顶端表面,得到具有感知功能的跨尺度粘附结构,如图12(b)所示。为有效感知剥离过程中区域4的拉应力,制备过程中对薄膜压力传感器施加了初始压应力。感知过程中传感器保持受压状态,当结构受到拉应力作用时,传感器所在区域的压力相应释放,形成感知信号。



(a) 具有感知功能的粘附结构制备示意图
(a) Fabrication schematic of the adhesive structure with integrated sensing functionality



(b) Photograph of the adhesive structure with sensing functionality

图12 具有感知功能的粘附结构制备过程及实物图

Fig. 12 Fabrication process and photograph of the adhesive structure with integrated sensing functionality

3.3 粘附状态感知性能测试与分析

为验证粘附结构感知功能,搭建实验测试平台如图13所示。该平台通过线性模组控制粘附结构相对目标表面进行预压与剪切及剥离运动。所设计仿壁虎跨尺度粘附结构主要面向对刚性光滑表面的粘附状态感知,故选取测试表面为玻璃表面,与测试表面相连的力传感器用于测量粘附结构在粘附过程中的法向力。同时,薄膜压力传感器感知所在区域局部压力,并转化为电压信号。通过对比分析粘附过程中的法向力信号和薄膜压力

传感器感知信号,可有效验证传感器对粘附结构的粘附状态的感知能力。

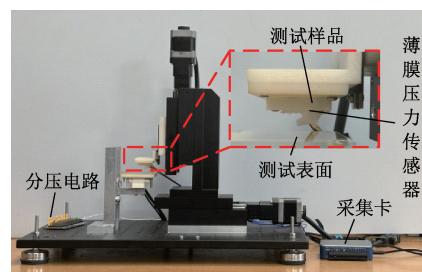
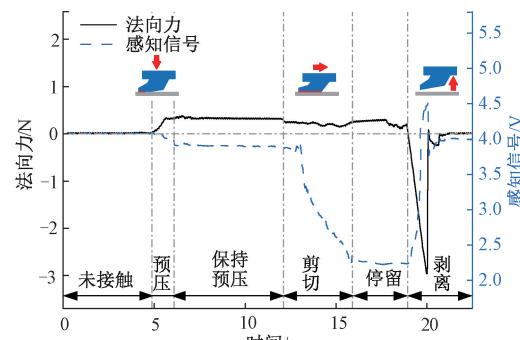


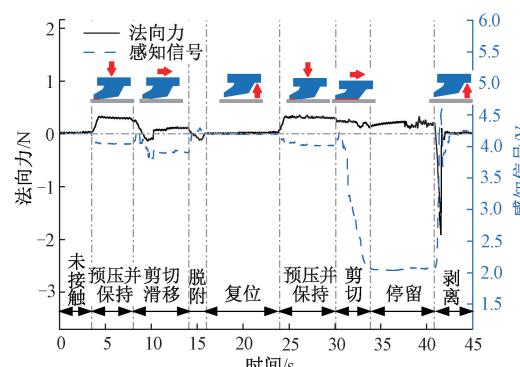
图13 测试粘附结构感知功能的实验平台示意图

Fig. 13 Schematic of the experimental platform for adhesive structure sensing functionality testing

图14(a)为粘附过程中法向力与感知信号实验测试结果。实验过程中,法向预压0.34 N,剪切位移1.8 mm,剥离速度0.5 mm/s。实验结果显示:在预压阶段,感知信号随着预压力的增大而减小;在剪切阶段,随着剪切位移的增大,感知信号显著减小;在剥离阶段,法向力迅速增大至最大粘附力,随后陡然降为0 N,表示粘附结构与表面完全分离,对应感知信号迅速增大后陡然降至初始



(a) 粘附过程中法向力与感知信号曲线
(a) Normal force and sensing signal curves during adhesion process



(b) 粘附状态异常情况下法向力与感知信号曲线
(b) Normal force and sensing signal curves under anomalous adhesion conditions

图14 粘附过程中法向力和感知信号实验结果

Fig. 14 Experimental results of normal force and sensing signal during adhesion process

水平。理想实验条件下,粘附结构在剪切阶段应保持法向自由度及稳定的预压力。实验中偶然出现一次剪切阶段粘附结构未能实现法向跟随的情况,导致法向力出现非预期衰减,并引发界面滑移,感知信号可以有效反馈异常现象。实验结果如图 14(b)所示,剪切阶段法向力未能保持,骤减后保持较小的预压力,感知信号对应出现增大后减小的异常波动,脱附阶段产生的粘附力很小,经重新调整后,粘附结构恢复正常剪切行为,法向力与感知信号亦恢复正常状态。该偶发情况的成功监测验证了感知方案对异常状态具备有效的识别能力。

预压力是判断粘附结构是否目标表面有效接触并形成初始粘附力的关键参数。为实现对预压状态的定量感知,实验测试了不同预压力作用下的感知信号。图 15 为不同预压力作用下的感知信号相对无预压状态的绝对增量变化结果。结果表明,感知信号绝对增量随着预压力的增大而增大,且在 0.34 N 范围内表现出较高的响应灵敏度,感知信号变化速率显著,与预压力基本保持线性关系,与理论分析结果一致,当预压力超过 0.34 N 后,感知信号的增长趋势逐渐平缓。值得注意的是,如图 14 所示,实验结果表明,0.34 N 的预压力足以提供充分的初始粘附力,且在此范围内的预压力均可实现有效定量感知。

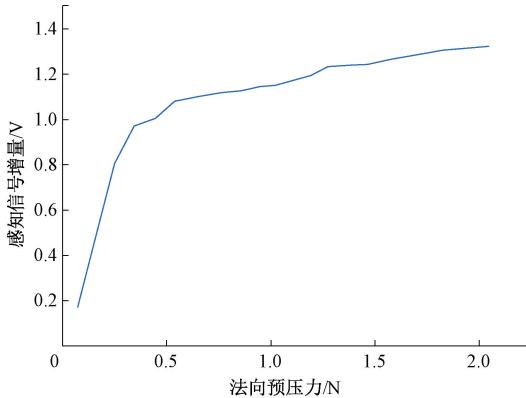
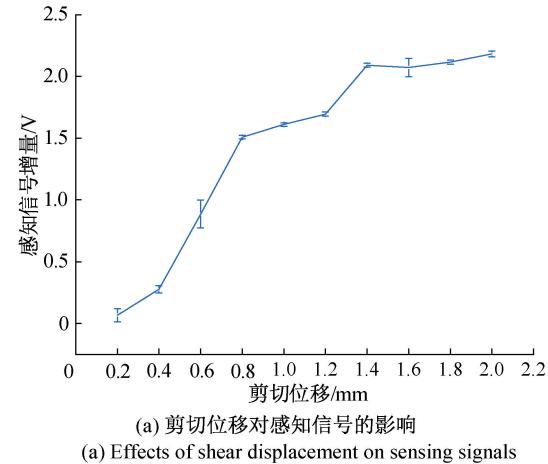


图 15 预压力感知性能实验结果

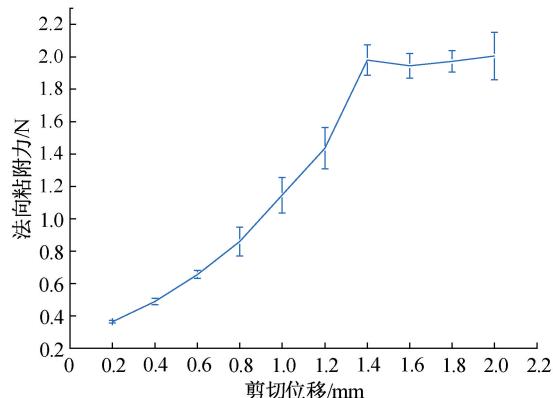
Fig. 15 Experimental results of preload sensing performance

剪切位移作为调控粘附界面接触状态的核心参数,直接影响粘附结构所能达到的极限粘附力。为实现对剪切位移及其对应粘附性能的定量感知,实验测试了不同剪切位移下的感知信号及剥离过程中产生的极限粘附力。实验中,在 0.2~2.0 mm 的剪切位移范围,均匀选取了 10 个位移水平进行测试,系统地表征了不同剪切位移所对应的感知信号响应及其在剥离过程中所能产生的极限粘附力。为确保数据的统计可靠性,在每个位移水平下均进行了 4 次重复实验。图 16(a)所示剪切位移感知实验结果表明,剪切后感知信号相对剪切前的绝对增量随剪切位移增加呈增长趋势,且在 1.4 mm 剪切位移范围内表现出较高的灵敏度,信号变化速率显著,与剪切位移

基本呈线性关系,与理论预期结果一致,当剪切位移>1.4 mm 后,感知信号基本保持不变。与之对应,图 16(b)所示不同剪切位移下的极限法向粘附力实验结果表明,在 1.4 mm 剪切位移范围内,法向粘附力随着剪切位移的增大而显著增大,且与剪切位移基本呈线性关系,当剪切位移超过 1.4 mm 后,法向粘附力基本保持不变,平均法向粘附力为 1.98 N。实验结果验证了仿生跨尺度粘附结构通过剪切运动调控粘附性能的有效性,随着剪切位移的增大,粘附表面与目标表面间的接触面积逐渐增大,性能逐渐增大,剪切位移>1.4 mm 后,实现了完全接触,能够提供的极限粘附力基本不变。



(a) 剪切位移对感知信号的影响
(a) Effects of shear displacement on sensing signals



(b) 不同剪切位移下对应的法向粘附力
(b) Normal adhesion force under different shear displacements

图 16 剪切位移对感知信号及粘附性能的影响关系

Fig. 16 Effect of shear displacement on sensing signal and adhesion performance

预压力与剪切位移感知实验结果表明,仿生跨尺度粘附结构的有效感知范围完全覆盖了实现完全粘附需要的预压力与剪切位移区间,且能有效预测不同剪切位移对应的粘附性能。因此,具有感知功能的仿生跨尺度粘附结构可以实现以下功能:在预压过程中,通过感知信号与预压力的对应关系实现接触状态与预压力的控制;在剪切过程中,通过感知信号与剪切位移及粘附性能的对

应关系,可以实时监测界面粘附状态并评估该状态下的粘附性能,进而提升粘附可靠性。

4 仿生粘附手爪样机可控抓取与状态感知实验

4.1 对抓式仿生粘附手爪设计

受壁虎脚趾对抓增强粘附机制的启发,设计了对抓式仿生粘附手爪,如图17所示。该手爪采用十字形堆成构型,4个仿生跨尺度粘附模块沿支架周向均匀分布。中心舵机通过曲柄滑块机构驱动4个模块同步相向或背向运动。仿生跨尺度粘附模块采用一体化设计,在安装座上整体浇注4个仿生跨尺度可控粘附结构实现一体化制造,确保了结构的整体性和功能一致性。

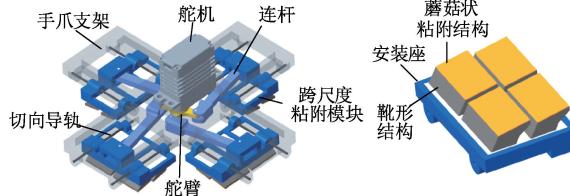


图17 对抓式仿生粘附手爪三维模型

Fig. 17 3D model of the opposing-grip bio-inspired adhesive gripper

4.2 仿生粘附手爪可控粘附与感知性能

为验证仿生跨尺度粘附手爪的可控粘附与感知性能,实验对比分析了其在有/无反向剪切条件下的法向力变化与感知信号响应。实验过程中,线性运动平台控制仿生粘附手爪预压与承载及脱附动作,力传感器安装在光滑玻璃背面,用于测试单个模块在抓附过程中的法向力。图18(a)为单个模块粘附与感知性能实验结果。预压阶段,粘附模块接触目标表面后施加0.45 N的预压力,感知信号对应减小,实现对预压状态的感知。剪切阶段,仿生粘附手爪法向自由,法向力无明显变化,而感知电压信号随剪切位移显著下降,实现剪切位移的感知。脱附阶段,法向力由预压力迅速变为粘附力后骤降为0,感知信号迅速增大后恢复初始状态,实现粘附状态的感知。此外,由实验结果可知,粘附结构正向剪切1.8 mm后能够提供的最大粘附 F_A 为8.14 N。为验证仿生粘附手爪的“易脱附”性,在剪切后进行反向剪切脱附。实验结果如图18(b)所示,反向剪切促使粘附结构与目标表面发生剥离现象,接触面积减小,进而降低脱附阻力。由实验结果可知,反向剪切3.5 mm后,法向脱附力 F_d 为2.35 N,仅为粘附力的28.9%,表明反向剪切可使仿生粘附手爪具有“易脱附”特性。实验结果表明,主动控制粘附的剪切运动可有效实现“强粘附-易脱附”的可控转

换,验证了设计的仿生跨尺度粘附结构在粘附力调控方面的有效性。

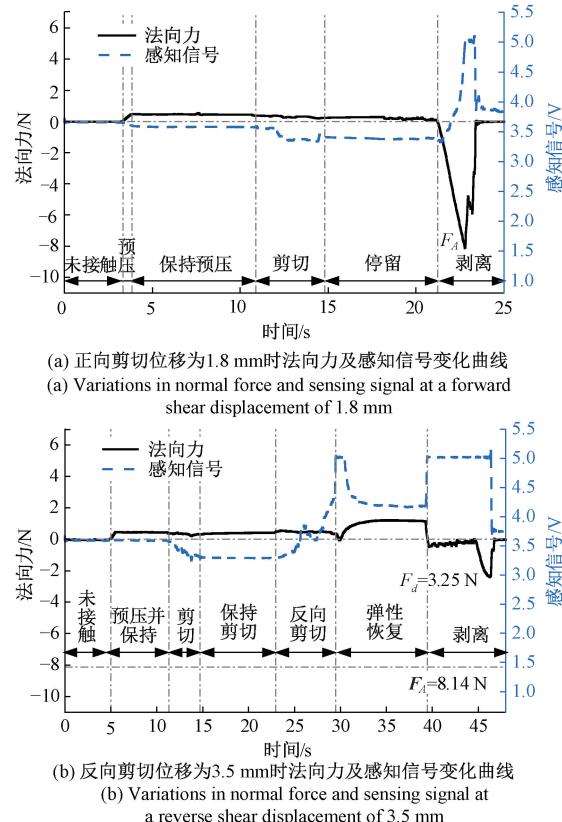


图18 手爪可控粘附特性分析

Fig. 18 Analysis of controllable adhesion characteristics of the gripper

4.3 仿生粘附手爪抓取过程状态感知性能

基于上述粘附状态感知性能分析,进一步测试了仿生粘附手爪抓取光滑玻璃试样过程中的状态感知性能。图19为3种典型抓取工况下的状态感知实验结果。为便于对比分析,感知信号已进行归一化处理,以消除初始状态差异对结果的影响。图19(a)为完整“拾取-放置”过程的感知信号曲线。感知信号中可以明显识别出预压阶段(A~B)、剪切阶段(B~C)、拾取承载阶段(C~D)、放下阶段(D~E)、脱附阶段(E~F)。预压和剪切阶段,感知信号显著下降,拾取承载阶段,感知信号出现明显上升后保持不变,这是由于玻璃表面的重量与手爪粘附力相互平衡造成的,放下阶段,手爪法向力逐渐减小,感知信号重新下降,脱附后,粘附手爪恢复到初始状态,感知信号迅速归零。图19(b)展示了拾取后试件意外跌落的信号响应,在跌落阶段(D~E)感知信号瞬间归零。图19(c)为拾取失败过程的信号曲线,其感知信号同样迅速归零。

实验表明,该手爪能够实时感知自身粘附状态,稳定完成光滑玻璃表面的抓取任务,为其在精密操作等实际场景中的应用奠定了基础。

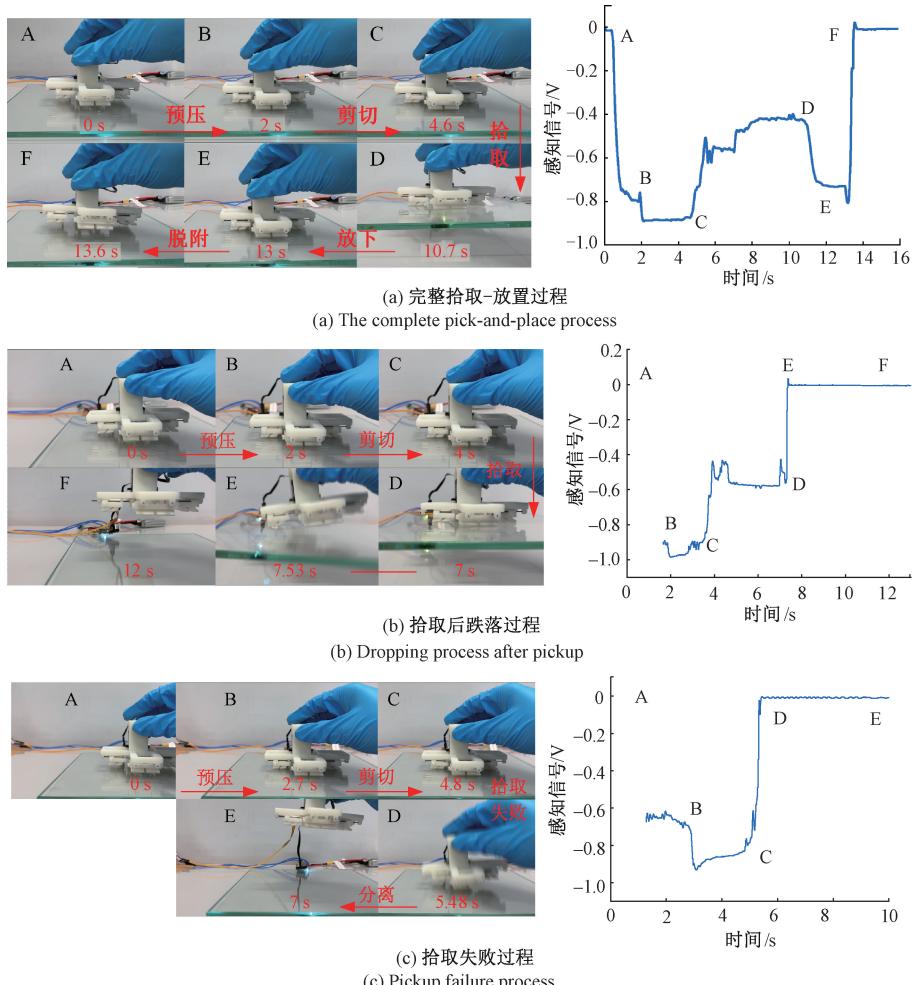
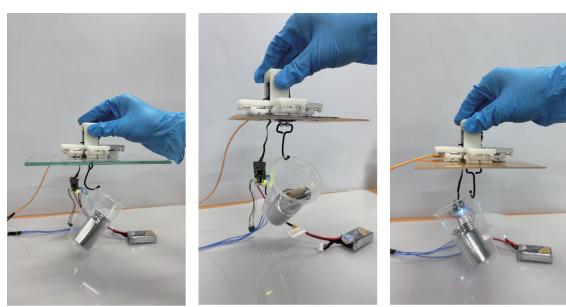


图 19 手爪在抓取过程中的感知信号
Fig. 19 Force curves of the gripper during testing

4.4 典型材料光滑表面上仿生手爪承载能力测试

仿生粘附手爪对多种光滑表面的抓取性能如图 20 所示。



(a) 玻璃表面 (b) 硅片表面 (c) 亚克力板表面
(a) Glass surface (b) Silicon wafer surface (c) Acrylic plate surface

图 20 仿生粘附手爪典型材料表面承载能力实验

Fig. 20 Load-bearing capacity tests of the bio-inspired adhesive gripper on typical material surfaces

实验结果表明,该手爪能够稳定抓取玻璃、亚克力板与硅片等典型光滑材料,并展现出良好的承载能力。具体而言,手爪抓取玻璃表面的最大承载重量达 1 kg,而对硅片和亚克力板的抓取极限分别为 660 与 560 g。承载能力的差异主要源于不同材料表面粗糙度的区别:相较于玻璃,硅片与亚克力板表面具有更大粗糙度,导致有效接触面积减小,因而产生的粘附力相对较低。该实验结果验证了仿生粘附手爪在工业生产中对多种光滑表面实现可靠拾取与搬运的适用性。

5 结 论

受壁虎脚趾多级结构与神经调控机制启发,系统开展了仿生跨尺度粘附结构的设计、感知与调控研究。通过融合毫米尺度靴形弹性基体与微米尺度蘑菇状粘附阵列,成功实现了具有“强粘附-易脱附”特性的可控粘附功能。基于倾斜棱柱理论模型,分析了粘附过程中底面

法向应力的演化机理,发现内侧边缘应力对预压力与剪切力的响应最为敏感,可作为粘附状态识别的有效特征。进一步通过有限元仿真与实验验证,确定在背衬层内侧嵌入薄膜压力传感器的感知方法,实现了对预压、剪切、脱附全过程的实时状态感知。研制的具有感知功能的粘附手爪样机实现了对玻璃、硅片等多种光滑表面的稳定抓取与可控释放。

未来工作将聚焦于提升结构对粗糙表面的适应性、增强感知系统的抗干扰能力,并探索在仿生爬壁机器人等领域的应用。

参考文献

- [1] WIJETHUNGA P W S I, CHANDRAWANSA I A, RATHNAYAKE B M D T, et al. Control of a 6DOF mobile manipulator with object detection and tracking using stereo vision [J]. *Instrumentation*, 2021, 8(1): 1-13.
- [2] AI SH, CHEN Y T. Multifunctional Gripper Design at the End of the Robot[J]. *Instrumentation*, 2022, 9(4): 17-25.
- [3] 孙世政,何江,秦鸿宇,等. 基于FBG的机器手指尖触觉感知研究[J]. *仪器仪表学报*,2024,45(5):72-81.
SUN SH ZH, HE J, QIN H Y, et al. Research on tactile perception of machine fingertip based on FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5): 72-81.
- [4] 商珂,祝佳航,陈大鹏,等. 面向遥操作机械臂的三维柔性触觉传感器[J]. *仪器仪表学报*,2025,46(8):311-320.
SHANG K, ZHU J H, CEHN D P, et al. Three-dimensional flexible tactile sensor for teleoperated robotic arms [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(8):311-320.
- [5] 周国华,张斌斌,涂开武,等. 面向深空探测的仿生机器人研究综述[J]. *航天器工程*,2024,33(4):94-107.
ZHOU G H, ZHANG B B, TU K W, et al. Review on biomimetic robots for deep space exploration [J]. *Spacecraft Engineering*, 2024, 33(4):94-107.
- [6] 姚森纯,孙俊,张晓龙,等. 空间黏附爬行机器人足端预压力优化与控制[J]. *飞控与探测*,2024,7(2):14-27.
YAO S CH, SUN J, ZHANG X L, et al. Preload force optimization and control for space bio-inspired adhesive climbing legged robot [J]. *Flight Control& Detection*, 2024, 7(2): 14-27.
- [7] 姬科举,李志利,李英泽,等. 用于失重条件下下肢骨肌锻炼的仿生黏附鞋及在轨验证[J]. *中国科学:技术科学*, 2024, 54(12):2337-2346.
JI K J, LI ZH L, LI Y Z, et al. Bionic adhesive shoes and in-orbit test for lower limb bone muscle exercise under weightless conditions[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2024, 54(12):2337-2346.
- [8] 马吉良,彭军,郭艳婕,等. 爬壁机器人研究现状及发展趋势[J]. *机械工程学报*,2023,59(5):11-28.
MA J L, PENG J, GUO Y J, et al. Research status and development trend of wall climbing robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(5): 11-28.
- [9] ZHAN H ZH, WU J M, ZHANG J CH, et al. Biomimetic microstructure with anti-slip and anti-adhesion for efficient handling of brittle material surfaces in high-temperature environments [J]. *Small*, 2025, 21(8): 2408236.
- [10] ZHAO B X, PESIKA N, ROSENBERG K, et al. Adhesion and friction force coupling of gecko setal arrays: Implications for structured adhesive surfaces[J]. *Langmuir*, 2008, 24(4): 1517-1524.
- [11] RUIBAL R, ERNST V. The structure of the digital setae of lizards[J]. *Journal of Morphology*, 1965, 117(3): 271-293.
- [12] ISRAELACHVILI J N. Intermolecular and surface forces[M]. Waltham, MA: Academic Press, 2011.
- [13] AUTUMN K, PEATTIE A M. Mechanisms of adhesion in geckos[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(6): 1081-1090.
- [14] AUTUMN K, LIANG Y A, HSIEH S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair [J]. *Nature*, 2000, 405(6787): 681-685.
- [15] AUTUMN K, NIEWIAROWSKI P H, PUTHOFF J B, et al. Gecko adhesion as a model system for integrative biology, interdisciplinary science, and bioinspired engineering[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45(1): 445-470.
- [16] TIAN Y, TAO D SH, PESIKA N, et al. Flexible control and coupling of adhesion and friction of gecko setal array during sliding [J]. *Tribology Online*, 2015, 10(2): 106-114.
- [17] TIAN Y, PESIKA N, ZENG H B, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(51): 19320-19325.
- [18] GEIM A K, DUBONOS S V, GRIGORIEVA I V, et al.

- Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(7): 461-463.
- [19] LI M, ZHAO A W, JIANG R, et al. Regulation of the elastic modulus of polyurethane microarrays and its influence on gecko-inspired dry adhesion [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(8): 3336-3340.
- [20] YURDUMAKAN B, RARAVIKAR N R, AJAYAN P M, et al. Synthetic gecko foot-hairs from multiwalled carbon nanotubes [J]. *Chemical Communications*, 2005 (30): 3799-3801.
- [21] XUE L J, KOVALEV A, THÖLE F, et al. Tailoring normal adhesion of arrays of thermoplastic, spring-like polymer nanorods by shaping nanorod tips [J]. *Langmuir*, 2012, 28(29): 10781-10788.
- [22] GORB S, VARENBERG M, PERESSADKO A, et al. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2007, 4(13): 271-275.
- [23] KANG O H, LEE S H, YUN J H, et al. Adhesion tunable bio-inspired dry adhesives by twisting [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(10): 1433-1437.
- [24] RAUT H K, BAJI A, HARIRI H H, et al. Gecko-inspired dry adhesive based on micro-nanoscale hierarchical arrays for application in climbing devices [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(1): 1288-1296.
- [25] HU H, TIAN H M, SHAO J Y, et al. Discretely supported dry adhesive film inspired by biological bending behavior for enhanced performance on a rough surface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(8): 7752-7760.
- [26] AKSAK B, MURPHY M P, SITTI M. Adhesion of biologically inspired vertical and angled polymer microfiber arrays [J]. *Langmuir*, 2007, 23(6): 3322-3332.
- [27] SANTOS D, SPENKO M, PARNESS A, et al. Directional adhesion for climbing: Theoretical and practical considerations [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007, 21(12): 1317-1341.
- [28] PARNESS A, SOTO D, ESPARZA N, et al. A microfabricated wedge-shaped adhesive array displaying gecko-like dynamic adhesion, directionality and long lifetime [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, 6(41): 1223-1232.
- [29] 刘彦伟,周强,潘豪,等. 仿生楔形阵列制备方法与方向性黏附特性研究[J]. *中国机械工程*,2023,34(1): 95-101.
- LIU Y W, ZHOU Q, PAN H, et al. Preparation method and directional adhesion properties of bio-inspired wedge arrays [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(1): 95-101.
- [30] 苏奕粼. 面向航天器表面爬行的仿壁虎机器人足粘附特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- SU Y L. Research on foot adhesion properties of gecko-like robot for climbing on the surface of spacecraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [31] 王伟. 仿壁虎微结构表面的力学建模及其粘附性能实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- WANG W. Mechanical modeling of gecko-like microstructural surface and its experimental study of adhesive performance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [32] MURPHY M P, AKSAK B, SITTI M. Gecko-inspired directional and controllable adhesion [J]. *Small*, 2009, 5(2): 170-175.
- [33] WANG Y, HU H, SHAO J Y, et al. Fabrication of well-defined mushroom-shaped structures for biomimetic dry adhesive by conventional photolithography and molding [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(4): 2213-2218.
- [34] WANG Y, LI X M, TIAN H M, et al. Rectangle-capped and tilted micropillar array for enhanced anisotropic antishearing in biomimetic adhesion [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2015, 12(106): 20150090.
- [35] WANG Y, TIAN H M, SHAO J Y, et al. Switchable dry adhesion with step-like micropillars and controllable interfacial contact [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(15): 10029-10037.
- [36] PANG C, KIM J K, WU Y D, et al. Bioinspired microstructured adhesives with facile and fast switchability for part manipulation in dry and wet conditions [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(38): 2303116.
- [37] 唐义强,姬科举,戴振东. 脚状各向异性黏附材料制备及力学行为研究[C]. 中国力学大会, 2019: 2699-2705.
- TANG Y Q, JI K J, DAI ZH D. Preparation and mechanical behavior of foot-like anisotropic adhesive materials [C]. Proceedings of the Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2019: 2699-2705.

- [38] KRAHN J, MENON C. Dry adhesives with sensing features [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 085010.
- [39] WANG D R, HU H, LI S, et al. Sensing-triggered stiffness-tunable smart adhesives[J]. Science Advances, 2023, 9(11): adf4051.
- [40] HU H, WANG D R, TIAN H M, et al. Bioinspired hierarchical structures for contact-sensible adhesives[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(8): 2109076.
- [41] TANG J Y, LI Y H, YU Y R, et al. Recent progress in flexible piezoelectric tactile sensors: Materials, structures, fabrication, and application [J]. Sensors, 2025, 25(3): 964.
- [42] CHEN K Y, XU Y T, ZHAO Y, et al. Recent progress in graphene-based wearable piezoresistive sensors: From 1D to 3D device geometries[J]. Nano Materials Science, 2023, 5(3): 247-264.
- [43] KIM J K, VARENBERG M. Amplification factor in shear-activated adhesives: Effect of elasticity [J]. Soft Matter, 2021, 17(40): 9087-9093.

作者简介



刘彦伟(通信作者),2010 年于中国科学技术大学获得学士学位,2015 年于中国科学技术大学获得博士学位,现为西安理工大学副教授,主要研究方向为仿生机器人与微小型无人系统。

E-mail:liuyw@xaut.edu.cn

Liu Yanwei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 2010, his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2015. Now he is an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include bionic robotics and micro-small unmanned systems.



李博文,2022 年于陕西理工大学获得学士学位,现为西安理工大学硕士研究生,主要研究方向为仿生粘附与仿生机器人。

E-mail:libowen9923@163.com

Li Bowen received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science and Technology in 2022. He is currently a master student at Xi'an University of

Technology. His main research interests include bionic adhesive and bionic robotics.



胡重阳,2010 年于东北大学(秦皇岛)获得学士学位,2013 年于中国科学技术大学获得硕士学位,2021 年于西北工业大学获得博士学位,现为陕西科技大学讲师,主要研究方向为约束滤波、目标跟踪和机器人控制技术。

E-mail:heyang@sust.edu.cn

Hu Chongyang received her B. Sc. degree from Northeastern University (Qinhuangdao) in 2010, her M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 2013, her Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2021. Now she is a lecturer at Shaanxi University of Science and Technology. Her main research interests include constrained filtering, target tracking, and robotics control technology.



王浩,2022 年于西安理工大学获得学士学位,现为西安理工大学硕士研究生,主要研究方向为仿生粘附与仿生机器人。

E-mail:wang46577@gmail.com

Wang Hao received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2022. He is currently a master student at Xi'an University of Technology. His main research interests include bionic adhesive and bionic robotics.



李淑娟,1990 年于陕西机械学院获得学士学位,2000 年于西安理工大学获得硕士学位,2006 年于西安理工大学获得博士学位,现为西安理工大学教授,主要研究方向为脆性材料精密加工技术、直接数字制造技术和制造系统建模。

E-mail:shujuanli@xaut.edu.cn

Li Shujuan received her B. Sc. degree from Shaanxi Institute of Mechanical Engineering in 1990, her M. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an University of Technology in 2000 and 2006, respectively. Now she is a professor at Shaanxi University of Science and Technology. Her main research interests include precision machining technology of brittle materials, direct digital manufacturing technology, and manufacturing system modeling.