

DOI: 10.3901/JME.2023.05.011

爬壁机器人研究现状及发展趋势^{*}

马吉良 彭 军 郭艳婕 陈雪峰
(西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 爬壁机器人是指能够依附在物体的表面进行多自由度移动并完成作业的机电系统,特别适用于执行特殊任务,因而具有良好的应用前景和广泛的市场需求。根据黏附机理的不同,爬壁机器人可分为负压吸附、静电黏附、仿壁虎干黏附、仿生湿黏附等类型。从黏附机理、应用范围以及黏附特点三个方面概述了爬壁机器人领域的国内外研究现状,为统一分析比较不同种类爬壁机器人的负载性能,提出基于比黏附能密度的机器人整体黏附性能分析方法,并为解决其大负载和小体积之间的矛盾提出新的材料和结构设计思路,分析微型爬壁机器人在航空发动机故障检测领域的应用前景,总结出其在材料智能化、驱动新型化、体积小型化和黏附机理协同化等方向的发展趋势。

关键词: 爬壁机器人; 黏附机理; 仿壁虎; 航空发动机检测机器人; 静电黏附

中图分类号: TH17; TP242

Research Status and Development Trend of Wall Climbing Robot

MA Jiliang PENG Jun GUO Yanjie CHEN Xuefeng

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Wall climbing robot is an electromechanical system that can move on the surface of objects and complete operations with multiple degrees of freedom. It is especially suitable for performing special tasks, so it has a good application prospect and broad market demand. According to different adhesion mechanisms, wall climbing robots can be divided into negative pressure adsorption, electrostatic adhesion, gecko-like dry adhesion, bionic wet adhesion and so on. The research status of wall climbing robots at home and abroad is summarized from three aspects: adhesion mechanism, application scope and adhesion characteristics. In order to analyze and compare the load performance of different types of wall climbing robots, an analysis method of robot overall adhesion performance based on specific adhesion energy density is proposed, and a new material and structure design idea is proposed to solve the contradiction between large load and small volume. The application prospect of micro wall climbing robot in aero-engine fault detection is analyzed, and its development trends in the fields of intelligent materials, new driving, miniaturization and collaboration of adhesion mechanism are summarized.

Key words: wall-climbing robot; adhesion principle; gecko-like; aero-engine inspection robot; electrostatic adhesion

0 前言

爬壁机器人在诸多领域都有着较为广泛的应用,如建筑外墙的清洁、飞机外壳的维修、大型油气罐的检测等。随着生产自动化的发展,人们对机器人的需求量越来越高,也对爬壁机器人的设计提出了越来越高的要求。为满足在受限空间和复杂的

工作环境完成更多种类的工作,小体积、高负载成为了爬壁机器人的迫切需求,但这也成为该领域的研究挑战,主要体现在以下三个方面。

黏附性有瓶颈。作为爬壁机器人的运动和作业的基础,黏附性不仅决定着其负载能力与运动稳定性,也影响着其对多种表面的适应能力。自然界中具有爬壁能力的动物如壁虎、树蛙等不仅可以灵活地完成黏附与脱附过程,而且可以在多种表面之间自由爬行,其强大的攀爬能力与自身结构和黏附功能是分不开的。但这些动物的黏附足结构复杂且材料多为生物蛋白,因此想要直接

^{*} 国家自然科学基金重大项目(92060302)和国家自然科学基金(52175248)资助项目。20220614收到初稿,20221224收到修改稿

仿制十分困难。目前除了仿生黏附^[1-8]手段以外,应用较为广泛的黏附方式还包括真空负压吸附^[9-10]、永磁吸附^[11]、静电黏附^[12-13]等,但每种方式都存在各自的优点与不足。

轻量化有困难。为了适应陡峭的壁面环境以及携带更多功能模块,爬壁机器人需要更低的重心设计与更轻的总体质量。但为了满足机构强度与运动灵活性,机器人的机械结构部分往往有较多的金属零件,如何减轻机器人质量也成为了爬壁机器人研究的难点。在目前的研究中,主要采用简化运动机构以及使用高强度低密度材料(如碳纤维、钛合金、高强度树脂等)的方法减轻机器人的质量^[14-17]。

小型化有难度。爬壁机器人在复杂环境中执行任务时往往需要穿过狭小的孔缝,因此小体积是前提。机器人的小型化一直以来都是研究的难点之一,爬壁机器人复杂的黏附足与运动机构设计则进一步加大了机器人小型化设计的难度。目前主要的解决思路是简化运动机构以及探索新驱动方式^[18-25]。

针对以上爬壁机器人在设计和研究中存在的主要问题,本文依据黏附力的产生有无外部供能的不同,从不同黏附机理出发对近年来爬壁机器人研究的相关成果进行归纳整理,对比分析不同种类爬壁机器人的黏附原理、制备工艺以及相关应用。

现有的综述文献对于不同原理的爬壁机器人的研究现状已经有了较为详尽的分析和总结,但仍缺少对多种爬壁机器人负载性能的统一分析,因此本文综合考虑黏附材料密度和机器人体积,提出以比黏附能密度 γ 作为评价参数,实现对比分析不同黏附机理机器人的黏附性能,并在此基础上结合航空发动机检测领域的研究现状,分析微型爬壁机器人在该领域的应用前景。最后总结了爬壁机器人在材料智能化、驱动新型化、体积小型化和黏附机理协同化四个方向的发展趋势。

1 爬壁机器人的相关研究

随着黏附机理相关研究的深入,近年出现了基于多种黏附机理的爬壁机器人设计。本文根据黏附力的产生是否需要外场持续供能的不同,总体将黏附分为有供能黏附和无供能黏附两类。有供能黏附又包括真空负压吸附与有缆静电黏附,无供能黏附又包括仿壁虎干黏附与仿生湿黏附。本文将逐一介绍基于以上四种原理爬壁机器人的黏附原理、加工工艺以及黏附特点,并选取近年来代表性的工作予以综述。

1.1 负压吸附

1.1.1 负压吸附原理

真空负压吸附是通过吸盘内外负压差的作用在壁面产生黏附力从而实现的黏附作用,按照负压发生装置的不同可分为真空泵、文丘里管和离心风扇等。

真空泵是最常见也是最早用于爬壁机器人的负压发生装置,其一般为往复式真空泵。如图 1a 所示,往复式真空泵主要由气缸、气阀、活塞以及连杆机构组成,在工作过程中曲柄连杆机构在电机的驱动下推动活塞进行周期往复运动,从而将气体从下端运送到上端。

离心风扇是通过风扇旋转将气体甩出,从而在中心处形成负压区的一种负压发生装置。其一般由电机驱动,并通过径向和轴向的气道与外部连接。如图 1b 所示的是一种径流式离心风扇的原理示意图,在工作时风扇转动,气体会在离心力的作用下不断由中心向外排出,因此利用离心风扇配合密封装置可以制成负压吸盘,为爬壁机器人提供吸附力。

文丘里管(Venturi tube)是由意大利物理学家文丘里发明的一种负压发生装置。如图 1c 所示,其内部结构主要包括喷嘴、扩张室和真空气室。在工作时,由压缩机产生的高速气流会由 A 端进入文丘里管,并最终由 C 端排出。采用这种原理可以利用较低的流量产生较高的负压差,工作效率较高。

1.1.2 应用

在真空吸附原理爬壁机器人的早期设计中,由于真空泵存在难以小型化的问题,只能采用负压源外置的方法减轻机器人的质量,即将真空泵外置并通过细长气管与机器人爬行足末端的吸盘相连接,并大多采用多足式运动机构。1992 年日本东京工业大学学广濑茂男领导的研究小组开发了 NINJA 四足爬壁机器人^[26],如图 1d 所示,其利用绳传动机构进行驱动,可以实现壁面、天花板以及各平坦表面之间的过渡运动。在 1999 年该小组又推出了 NINJA-II 爬壁机器人^[27],在原有的基础上增加了腿部的转动关节,提高了腿部运动的灵活性。

随着制造工艺的不断进步,真空泵的微型化得以实现,随之产生了内置真空泵的爬壁机器人^[28-29]。该类机器人以小型化和运动灵活性为设计目标,同时内置电源的设计让其摆脱缆线的限制。2004 年由密歇根州立大学研发了一款尺蠖式爬壁机器人 FLIPPER^[30-32],如图 1d 所示,其双足末端真空吸盘能有效吸附地板、墙壁及天花板,具有很

强的适应能力。欠驱动机构形式可以减轻机器人的重量, 减少能耗, 但只能以空翻的方式运动。2010 年华南理工大学的 ZHU 等采用模块化的方法开发了一种新型的双足爬壁机器人 W-Climbot^[33], 如图 1d 所示, 其由一个机械臂作为主体, 两端有两个真空吸盘, 具有优秀的跨表面运动以及跨越障碍的

能力。通过在尺蠖步态、转身步态和翻转步态这三种运动模式之间切换, W-Climbot 可以跨越长达 400 mm 的空隙或障碍, 越过 415 mm 高的障碍物, 并能够在夹角为 $0 \sim 289^\circ$ 的两个壁面之间进行切换。内置真空泵的爬壁机器人由于真空泵的小型化, 具有低噪声、低能耗的优点。

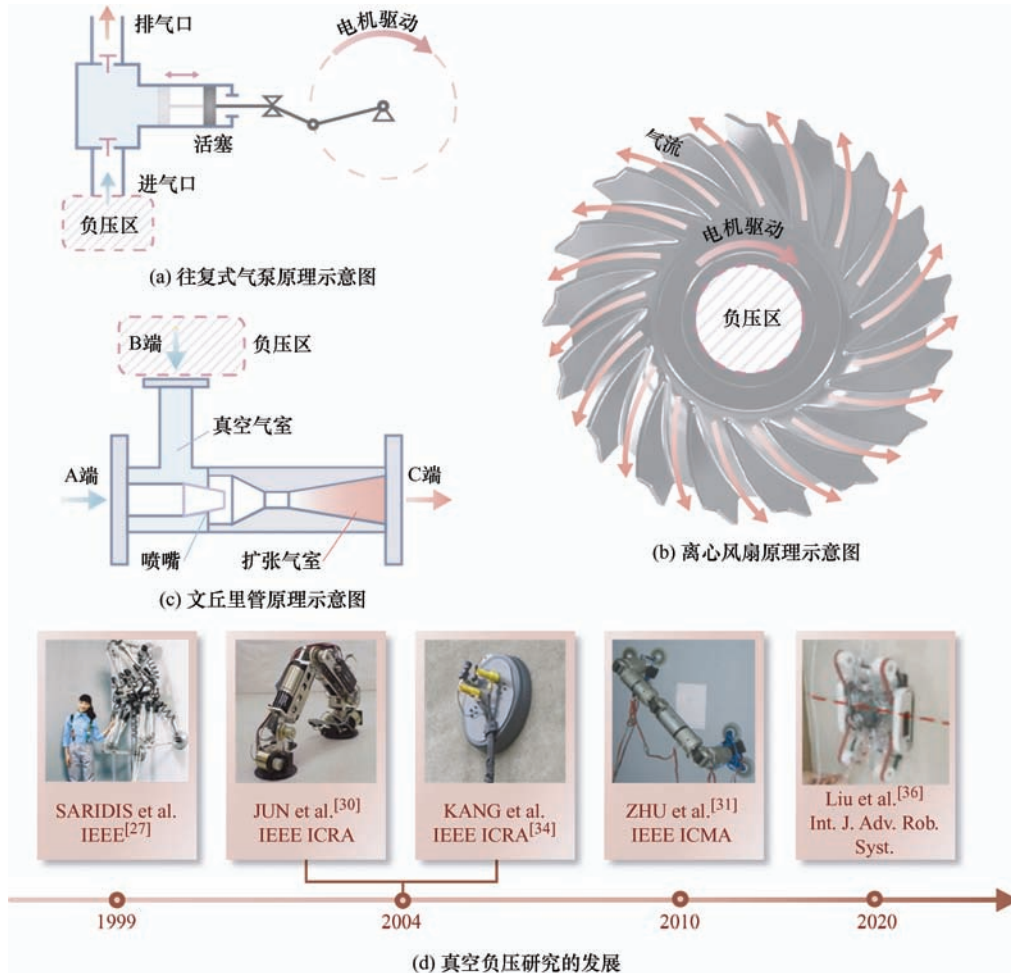


图 1 真空负压原理及相关研究

不满足于真空泵与吸盘组成的单一机构设计, 学者们将新的负压发生原理也引入到爬壁机器人的设计当中。2004 年, 由德国 Karlsruhe 大学、英国 Portsmouth 大学及德国联邦材料研究测试中心联合研发的大脚机器人系列便是利用文丘里管作为负压发生装置的爬壁机器人^[34-35]。如图 1d 所示, 其中第二代原型样机 BigFootII 质量 20 kg, 可产生负压 50 kPa, 其内部使用轮胎驱动, 可以越过 2 cm 高度的障碍, 可以适应略微弯曲的表面。文丘里管作为负压发生装置体积小、发热量低, 并具有结构简单、维护方便的优势。

高速旋转的离心风扇可以持续产生较大的负压差, 因此被越来越多地用作爬壁机器人的吸盘结构当中。2020 年中国科学技术大学 LIU 等提出了一种新

型的光滑壁面检测爬壁机器人^[36], 如图 1d 所示, 其由真空吸附系统和黏附履带组成, 具有在平整表面上灵活运动的能力。在混凝土表面上, 该机器人的最大移动速度可达 7.11 cm/s 并负载 0.8 kg。采用离心风扇作为负压发生装置的爬壁机器人具有吸附力强, 抗干扰能力强的优点。

1.1.3 吸附特点

负载能力强。通过提高负压源的工作功率, 吸附结构可以获得更大的负压差, 吸附力也随之增强。因此机器人可以获得更强大的负载能力和运动稳定性, 并携带多种设备以完成更复杂的工作。

噪声较大。无论是基于往复式真空泵、文丘里管还是离心风扇原理为吸附结构产生负压, 机器人

在工作时内部高速气流和高转速的电机都会产生较大的噪音。

漏气问题影响较大。真空吸附产生的吸附力与吸附结构内外的压力差密切相关,因此漏气问题对吸附力的影响尤为明显。真空吸附结构的尺寸一般较大,采用离心风扇原理的爬壁机器人其负压腔体更是占据了机器人的绝大部分空间,较大的吸附面积会带来较多的密封性问题,在吸附表面存在凸起、裂纹或粗糙度较高时,由真空负压产生的吸附力往往不稳定。

1.2 静电黏附

1.2.1 黏附机理及制备工艺

静电黏附是一种基于静电感应原理,通过控制电流的通断来控制黏附力有无的可控黏附技术。1910 年两位丹麦科学家 JOHNSEN 和 RAHBK 发现两种相互接触的材料存在电位差时会因为静电作用而相互吸引^[37],并以 J-R 效应来描述导体与半导体接触并施加电压时的黏附力^[38],由此产生了静电黏附技术。

静电黏附系统的主要由控制电路、高压转换模块、静电黏附板和黏附表面组成,静电黏附板的内部结构如图 2a 所示,正负电极交替排列在绝缘柔性聚合物中,在施加电压时由于正负电极间绝缘材料的作用,正负电荷会在电极处聚集而无法中和,而交错排列的结构则让电荷的密度大大增加,最终让薄片状的黏附材料内部集聚大量正负电荷^[39]。而静电黏附板与黏附表面之间由于静电感应的作用,黏附表面也会产生大量相反极性的感应电荷,由于异性电荷的相互吸引,黏附材料与黏附表面之间就产生了黏附力。

静电黏附材料制备工艺主要有增材制造、减材制造和增减结合三类,其中增材制造主要应用的工艺有喷墨打印^[40-41]、丝网印刷^[42-43]、模塑成型^[44-46]等,减材制造主要使用的工艺包括人工切割^[47-48]、机床加工^[49]等,增减结合主要指 PCB 或 FPCB^[50-52]等工艺,图 2b 中示意了一种增减结合的制备工艺。

1.2.2 应用

静电黏附在爬壁机器人领域的应用较为广泛,根据其运动机构可分为履带式、尺蠖式和多足式。履带式爬壁机器人伴随着柔性静电黏附材料而产生,是对静电黏附材料较为直接的应用。2008 年 SRI 国际公司 PRAHLAD 等首次将柔性静电黏附材料应用于履带式爬壁机器人^[53]。其利用柔性静电黏附片制成履带进行黏附,最大黏附力可达 2 N/cm^2 ,总质量 220 g,可在光滑表面爬行,可攀爬垂直表面并

进行跨表面运动。2013 年北京航空航天大学 LIU 等基于静电黏附技术设计出了一款双履带爬壁机器人^[54],总长 360 mm,负载能力 20 N,可在垂直壁面以 0.2 mm/s 速度爬行。

2014 年东京大学 WANG 等利用丝网印刷技术制成的薄膜电极作为履带制作出了履带式爬壁机器人^[55],其重 94 g,高度 15 mm,可在垂直壁面以 35.3 mm/s 的速度爬行。2016 年莫纳什大学 KOH 等提出了一种利用静电、弹性体黏附力和尾部支撑力运动的履带机器人 ELAD^[42],其可以在 80° 光滑表面上以 4 cm/s 的速度爬行,可在粗糙度 300 nm 以内的表面工作。

尺蠖式爬壁机器人一般采用成对的电极板作为黏附足,由于其运动机构更为简单,往往更适合小型化机器人的设计。2007 年东京大学 YAMAMOTO 等利用塑料薄膜和梳状导电箔片制成了柔性电极板,并利用四块柔性电极板和矩形框架制成了尺蠖步态的爬壁机器人^[56],如图 2c 所示,其可在垂直表面爬行,最大速度 6.6 mm/s。2018 年上海交通大学 GU 等同样利用介电弹性体与静电黏附垫制作了一款尺蠖式软体机器人^[57]。如图 2c 所示,该机器人将电源外置,可在木材、纸张、玻璃等表面自由爬行,并能完成垂直攀爬、转弯等动作,每秒最多可前进 0.75 体长。2018 年多伦多大学的 WU 等设计出了一款纸基爬壁机器人^[58],其可在垂直壁面进行二维运动,最大可提供 1.65 N 摩擦力,运动速度 1 mm/s。2018 年新加坡国立大学 CAO 等制作出了一种内置电源的无约束软体机器人^[59],如图 2c 所示,其在工作时由微型控制器依次将变压器放大后的电信号传递给两个黏附足与介电弹性体,进而完成两个黏附足交替前进的尺蠖步态。2019 年新加坡国立大学 QIN 等设计了一款可以快速高效运动的软体爬壁机器人^[60],如图 2c 所示,其利用真空驱动弹簧作为驱动装置,结合静电黏附技术实现了平面上的前进和转弯运动。

多足式是爬壁机器人的另一种常见的运动机构设计,具有更高的运动稳定性与更灵活的运动能力。如图 2c 所示,2013 年北京航空航天大学 CHEN 等基于壁虎对角步态运动的启发,结合静电黏附原理,设计出了一款可以实现垂直光滑表面的直线攀爬与转向运动的四足爬壁机器人^[61]。2018 年哈佛大学 RIVAZ 等基于初代 HAMR 样机改进并设计出了一款仅重 1.48 g,长 4.5 cm 的四足微型爬壁机器人 HAMR-E^[62]。如图 2c 所示,其利用集成化的腿部结构实现了精确的腿部运动和静电黏附,可以在水平

面 140 mm/s 的速度爬行，也能以 1.2 mm/s 的速度

攀爬垂直墙壁。

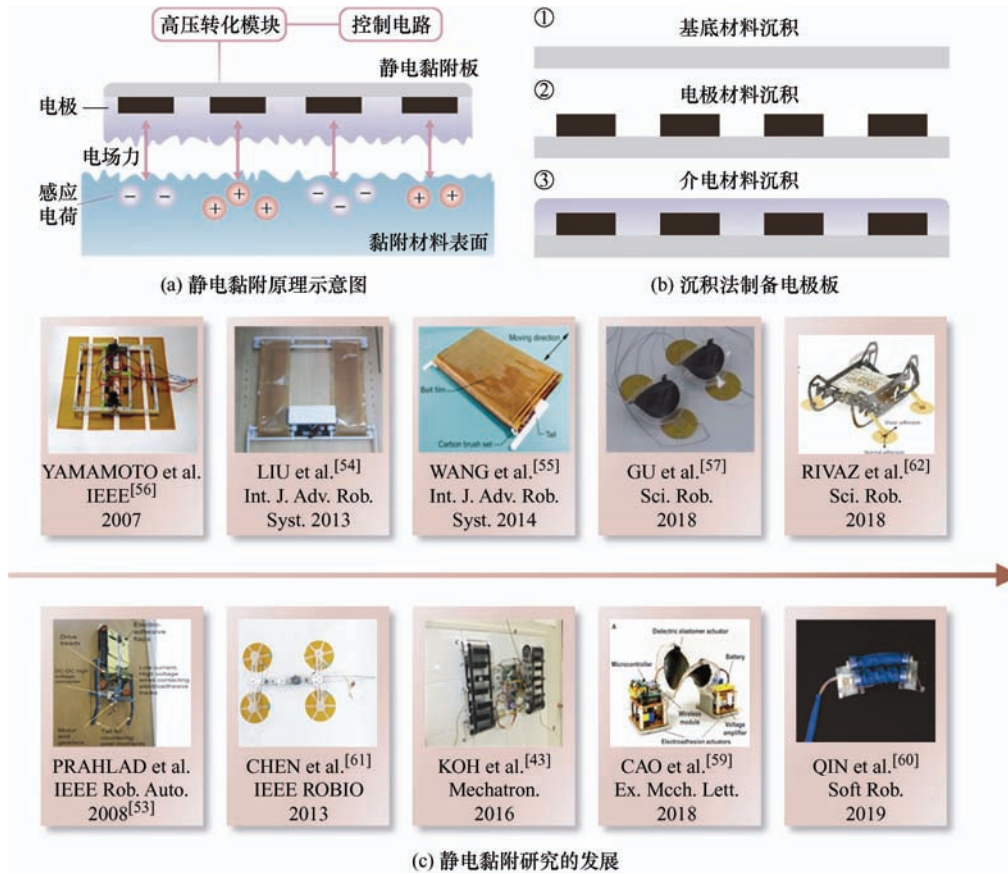


图2 静电黏附原理及相关研究

1.2.3 黏附特点

黏附材料体积小。为了获得较大的黏附力，静电黏附材料需要尽可能减少介电层厚度，因此制备出的黏附材料整体体积一般较小，有利于机器人的小型化设计。

维持黏附力所需功耗低。由于供电电路具有高电压、小电流的特点，整体功耗一般很低^[49,63]，所以使用静电黏附材料的爬壁机器人一般不需要携带大容量的供能元件。

需要较高电压。2019 年 XIE 等发现静电黏附材料的工作电压普遍大于 1.5 kV^[64]。较高的工作电压使得机器人需要配备相关的变压电路，甚至只能采用连接缆线的方式进行供电，大大限制了机器人运动的灵活性。

黏附力不稳定。静电黏附材料产生的黏附力 F_{adh} 可以简化表示为

$$F_{adh} = A\epsilon_0\epsilon_d \frac{V^2}{2d^2} \quad (1)$$

式中， A 为电极面积， ϵ_0 为真空介电常数， ϵ_d 为材料的相对介电常数， V 为施加电压， d 为介电层厚度。在机器人正常工作时，电极面积、工作电压、

介电层厚度均不会发生明显变化，但介电常数却与黏附表面的材料特性相关，并容易受到如湿度等外界环境变化的影响。

1.3 仿壁虎干黏附

1.3.1 黏附机理与制备工艺

黏附材料一般需要持续供能以维持黏附，这不仅需要相应的储能、供能模块，而且增大了机器人的整体功耗，此时仿生学的引入为黏附材料的研究提供了新的思路。在众多具有爬壁能力的动物中，大壁虎的爬行能力显然是最为突出的：自然界中的大壁虎体重可达 100 g，体长超过 30 cm，其最快爬行速度可达 1 m/s^[65-68]。2000 年，美国加州大学伯克利分校 AUTUMN 等利用 MEMS 传感器首次测量了壁虎脚趾表面单根刚毛所能提供的黏附力和摩擦力^[69]，并证明了其主要来源是刚毛末端绒毛与壁面间的分子间力^[70]。如图 3a 所示，研究发现壁虎通过多级纤维结构与表面相接触，并通过刚毛与接触表面之间的范德华力、毛细力^[71]、静电力^[72-73]以及酸碱相互作用^[74]等实现干黏附，并通过对脚趾刚毛施加切向力来控制刚毛的法向黏附力^[75-77]，因此若要实现各向

异性的干黏附, 关键在于仿制出壁虎脚趾刚毛的微观结构。

多级纤维结构在尺度上跨越了多个数量级且结构复杂, 因此其制备工艺一直是学术研究的热点。目前主流的制备方法主要有两种, 一是模塑成型法, 通过光刻等工艺加工高精度模具^[78-82], 再通过翻模成型的方式制备出所需结构; 二是直接成型法, 通过 3D 打印^[83-85]、化学气相沉积^[86-88]等工艺直接制备出微米或纳米尺度下的微观结构。

模塑成型法是在仿壁虎黏附材料研究中应用最早且最广泛的制备方法, 其优点在于较高的加工精度以及较多的材料选择。如图 3b 所示, 模塑成型工艺一般采用掩膜光刻的方法对硅片进行加工, 选取多种橡胶、树脂等材料以满足性能需求, 并通过控制模具与液态聚合物之间的气泡^[89]、控制脱模时聚合物的固化程度^[90-94]、电子束蚀刻^[95]、施加外力^[96-98]、倾斜曝光^[99-101]等后处理方法制备出多种多样的微观结构。

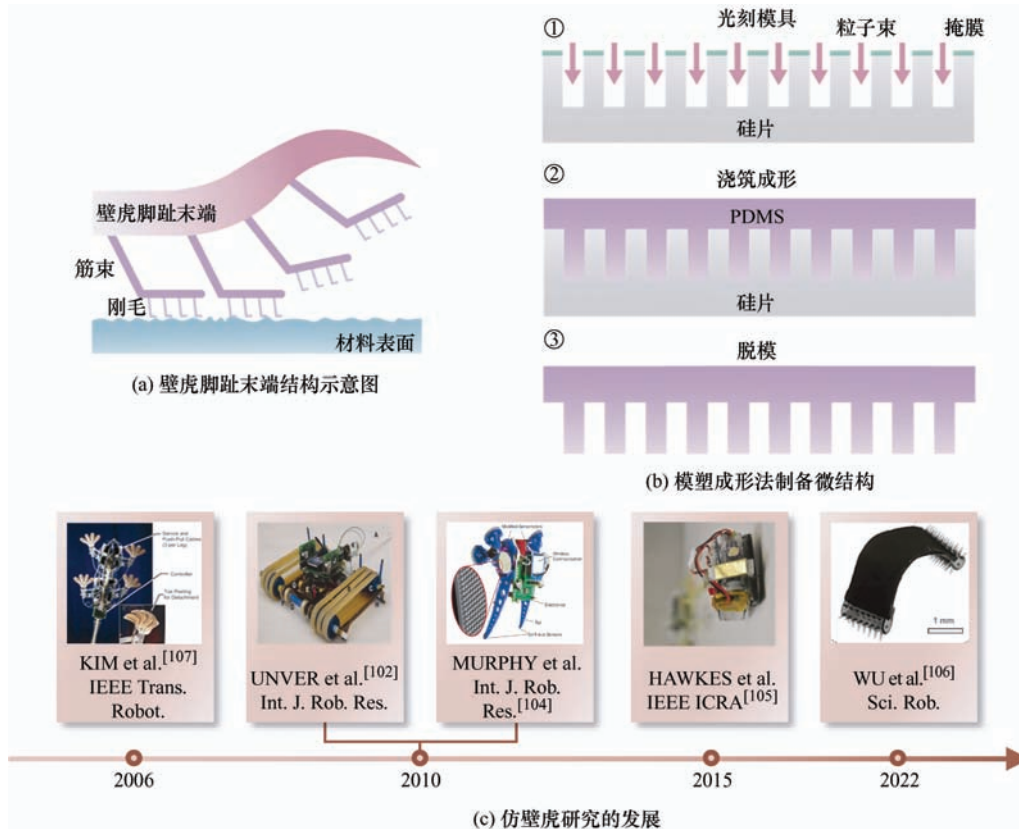


图 3 仿壁虎黏附原理及相关研究

直接成型法是随着近年来增材制造技术迅猛发展而诞生的一种方法, 其优点在于工艺流程简单、可实现三维设计加工。它是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或树脂等可粘合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术。近年来随着 3D 打印技术的不断发展, 其成型原理也多种多样, 如双光子聚合激光直写(TPP)、激光逐点扫描固化(SLA)、面投影立体光刻(DLP)等。除此之外化学气相沉积法(CVD)也属于直接成型法的范畴。

1.3.2 应用

履带式爬壁机器人通过将黏附材料附着在柔性基底上作为履带实现黏附与爬壁运动, 是对黏附材料较为直接的应用。2004 年美国卡耐基梅龙大学(CMU)的 SITT 等制作出了 Tankbot 第一代样机,

其可以实现在 110° 的壁面上稳定运动, 但由于机构设计的局限, 只能进行直线前进运动。2010 年此小组研发了新一代 Tankbot 样机^[102], 其采用无表面结构的聚氨酯为黏附带, 具备了良好的三维空间表面运动能力, 可以在 $0\sim 360^\circ$ 光滑表面上以 5 cm/s 的速度前进, 也可以在垂直的粗糙表面上运动。履带式爬壁机器人具有机构设计与运动控制简单、运动速度快、负载能力强的优势。

轮腿式爬壁机器人将黏附材料附着在多个腿上, 再将腿均匀装配在转轮上组成轮腿, 这样在转轮转动时其上的腿会依次与表面接触和分离, 通过调整两侧转轮的步态即可实现机器人的前进与转向等动作。2004 年 CMU 公布了第一款轮腿式爬壁机器人 Waalbot^[103]。2010 年 CMU 在此基础上改进设

计出了 WaalbotII^[104], 与上一代相比提高了整体爬壁能力, 能够适应粗糙表面并能在倒置的光滑表面上全方位爬行, 也能实现多种普通角度壁面之间的过渡。轮腿式爬壁机器人具有运动控制简单、负载能力强的特点, 同时对非平整表面也有一定的适应能力。

尺蠖式爬壁机器人将黏附材料附着在两个黏附垫上, 通过两个黏附垫交替运动实现黏附和爬行。2015 年斯坦福仿生及灵巧机械臂实验室(Stanford BDML)HAWKES 等设计出了一款质量仅有 9 g 负重可达 1 kg 的微型爬壁机器人^[105], 其工作时仅需要驱动电机将连接两个黏附垫的线收紧和放松便能实现机器人的单向直线运动, 可在垂直表面爬行, 运动速度 3 mm/s。2022 年范德堡大学 WU 等设计了一种毫米级无线控制的软体机器人^[106], 如图 3c 所示, 其由外部磁场驱动, 通过仿壁虎材料实现可控黏附, 可在三维生物组织表面爬行。尺蠖式爬壁机器人利用了倾斜纤维阵列的各向异性黏附特点, 仅凭单个驱动便完成了仿尺蠖步态的单向直线运动, 运动机构和运动控制得到进一步简化。由于其微型化的设计, 机器人整体的黏附面积占比更大, 因而负载能力优秀, 同时也能在一定程度上减轻因黏附失效对运动过程的影响。

多足式爬壁机器人是模仿自然界中的爬行动物以及昆虫的步态, 通过多个黏附足交替运动实现黏附和运动的一种机器人。2006 年斯坦福大学 KIM 等发明了一种四足爬壁机器人 Stickybot^[107], 它在运动机构和黏附机构上都参考自然界中的大壁虎进行仿生设计, 可以适应光滑平面并以 4 cm/s 的速度攀爬垂直表面。Stickybot 2012 年该小组在此基础上改进并推出了 Stickybot III, 使用了光刻工艺的各向异性材料代替脚趾结构, 并用五杆机构代替四杆机构以提供额外的自由度。2008 年加拿大西蒙弗雷泽大学 MENON 等公布了一种仿蜘蛛六足爬壁机器人 Abbigail^[108], 该机器人质量 131 g 具有六条对称分布的足, 可以实现 50°斜面上的黏附爬行。2011 年该小组在此基础上改进并推出了 Abbigail-II^[109], 采用 PDMS 和 PMMA 双层材料的蘑菇状纤维阵列为黏附材料, 并可在垂直表面以 0.1 cm/s 的速度爬行。多足式爬壁机器人具有运动方式灵活, 对非平整表面适应性强, 对黏附失效抵抗力强的优点。

1.3.3 黏附特点

负载能力强。仿壁虎黏附材料主要依靠多级纤维结构与黏附表面之间的分子间作用力完成黏附,

相比于自然界中的壁虎有着相似甚至更为强大的黏附力, 因此设计出的爬壁机器人普遍具有较强的负载能力。

黏附可控, 自然界中的壁虎通过脚趾的收紧和外翻实现与表面之间的黏附和分离, 仿壁虎材料也可以通过倾斜结构^[100]、切割花纹^[105]、弯折基底^[98]等方法实现黏附可控。

加工工艺较为复杂。仿壁虎黏附主要利用范德华力进行黏附, 因此需要黏附材料与黏附表面之间的距离达到纳米级, 这就需要仿壁虎黏附材料本身具有微米乃至纳米尺度的结构, 对制备工艺提出了较高的要求, 并可能存在工艺流程复杂和制备出的材料性能不稳定的问题。

需要垂直方向的预载力。仿壁虎黏附材料往往具有较大的切向负载能力, 但由于范德华力的作用距离较小, 黏附材料只有在与黏附表面充分接触以后才能发挥出强大的黏附效果, 因此仿壁虎黏附材料在黏附前一般需要施加法向的预载荷。

1.4 仿生湿黏附

1.4.1 黏附机理与制备工艺

为适应潮湿表面和复杂表面环境, 自然界中的许多生物如章鱼、鲫鱼、树蛙等进化出了特殊的微米/纳米结构。如图 4 所示, 章鱼利用触手上的吸盘在海底爬行和捕捉猎物, 吸盘上密集的毛发状结构有助于增强对基底的吸附作用^[110-111]。树蛙利用脚趾垫在潮湿的树枝上灵活地爬行, 脚趾垫上凸起的多变形状上皮细胞可以与树皮上的不规则表面结合, 而细胞之间的明显缝隙有助于排出界面的水分和输送粘液^[112-114]。而鲫鱼背部的圆盘能让自己附着在鲨鱼或鳐鱼身上, 圆盘由一系列带小刺的平行薄片组成, 这些小刺增加了与吸附表面之间的摩擦力^[115-118]。虽然表面结构各不相同, 但它们都有着类似的吸附机理, 对于面积为 A , 压差为 ΔP 的吸盘, 吸附力 F 可表示为^[119]

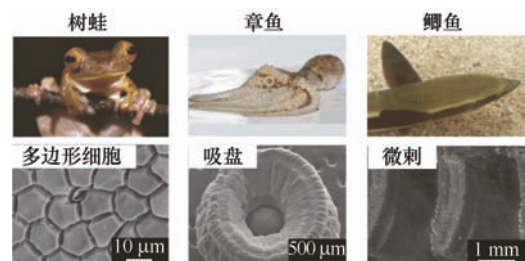


图 4 自然界中的湿黏附结构^[116]

$$F = \Delta P \cdot A \quad (2)$$

仿生湿黏附由于黏附过程需要产生一定的形变和负压, 其结构相比于仿壁虎黏附一般更为复

杂。仿生湿黏附材料一般包括用于维持几何形状、增大摩擦力的刚性部分,用于加强密封性、适应多种表面的柔性部分,以及用于提供负压气体通道。其中柔性部分一般采用有机聚合物材

料^[120-124],采用模具浇筑的方法成型(图 5a);刚性部分一般采用无机材料(如合金、碳纤维),采用激光切割等方法进行加工,也可以使用高硬度聚合物材料代替。

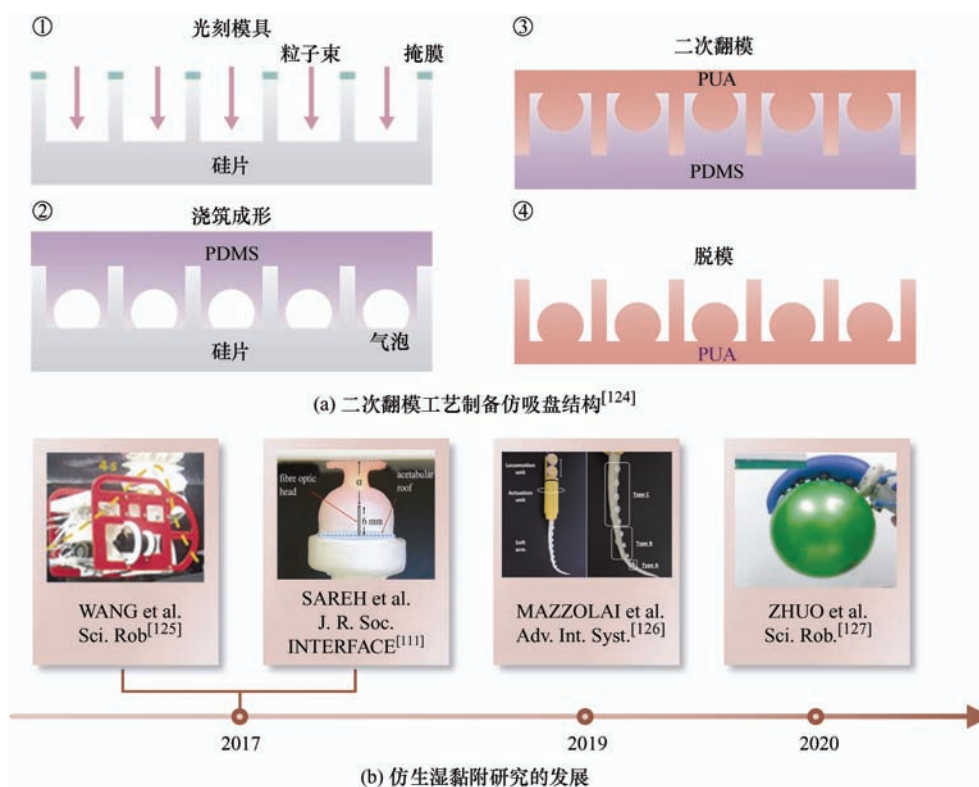


图 5 仿生湿黏附相关研究与加工工艺

1.4.2 应用

2017 年北京航空航天大学 WANG 等通过对鲫鱼的形态与运动研究设计出了一款仿鲫鱼水下机器人^[125]。如图 5b 所示,其利用 3D 打印技术加工出了片层结构和碳纤维小刺,并将其附着在软体驱动器制成了仿鲫鱼吸盘结构,可以适应多种粗糙度的表面并提供自重 340 倍的吸附力。2019 年意大利技术学院微型生物机器人中心(IIT)MAZZOLAI 等结合了柔性与刚性硅基材料制备出了一种带有吸盘的圆锥形软体机械臂^[126],如图 5b 所示,其通过线驱动和气压驱动,可以在空气、水和油中抓取各种复杂形状的物体,最高抓取力可达 3.3 N。2020 年北京航空航天大学 ZHUO 等通过在微有机包裹体中添加非共晶相变组分合成出了精确可控的多相有机水凝胶,并设计出了仿章鱼触手的软体机器人^[127]。如图 5b 所示,其通过气压和温度混合控制,可以实现三维空间内的自由运动,并能抓取球形、立方体等多种形状的物体,表面的吸盘可以适应 0~200 μm 粗糙度的表面,单个直径 15 mm 的仿生吸盘最大可

提供 4 N 的吸附力。

1.4.3 吸附特点

不受液体环境干扰。对于仿壁虎黏附材料和静电黏附材料而言,水、油等液体如果渗入黏附材料与黏附表面之间,会对摩擦系数、介电系数等造成显著影响,并可能对黏附材料本身造成破坏和污染,因而会影响黏附力的大小。但仿生湿黏附是模仿自然界中潮湿环境下的吸附进行设计,其一般利用弹性吸盘产生的压力差提供吸附力,吸盘与吸附表面之间形成的液膜反而有利于吸盘结构的密封^[128],减少其受到液体环境的干扰。

容易发生侧向滑动。吸盘吸附结构的吸附力由内外压力差产生,其方向与吸附表面垂直,因此在光滑表面上单一的吸盘结构难以避免其侧向滑动。自然界中鲫鱼的吸盘内部带有密集排列的微刺,章鱼的吸盘内部有粗糙的髓白状结构,这些结构可以有效增大摩擦、适应多种表面,研究和仿制此类结构可能会成为解决吸盘吸附侧向滑动问题的思路。

2 爬壁机器人的小型化设计参数——比黏附能密度

依据不同的黏附原理,近年来学者们设计出了多种多样的爬壁机器人,由于它们具有不同的设计目标,其性能参数也各不相同:一些用于维护核电站、焊接船体的机器人(如 Brincadeira、REST 等)需要在开阔空间内完成检测和维护工作,因而被设计成大体积、高负载以携带检修设备;一些用于侦查工作的机器人(如 City Climber、tankbot^[102]等)需要在楼房墙壁上作业,因而被设计成在平整表面上具有灵活的运动能力已完成在陡峭壁面之间的运动;而一些用于高端装备维护或灾难现场救援的机器人(如 MicroTug^[105]、HAMR-E^[62]等)需要进入狭小空间完成搬运或勘察工作,因而被设计成尽可能小的体型以适应工作环境。显然目前对爬壁机器人的性能指标缺乏明确的标准,评价每种黏附机理的好坏,需要对相关机器人的体积、质量、黏附能力等参数进行综合考量。

黏附能密度(单位为 $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)指将黏附在某一表面上单位体积的物体脱黏附所需要的能量,该物理量综合考量了爬壁机器人黏附强度与自身体积的影响,可以用于比较大型爬壁机器人与小型爬壁机器人黏附性能的优劣。如果考虑有效的黏附接触面积,黏附能密度的单位可以进一步化简为 $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$,即 Pa,其物理意义表示在有效黏附面积上的总体负载(机器人自重加负载)。从机器人的设计需求角度出发,爬壁机器人需要携带多种功能性设备以完成多种任务,其质量越小,可负载的其他设备也就越多。由此,机器人的自身质量也成为了重要的影响因素。

比黏附能(单位为 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)是指将黏附在某一表面上单位质量的物体脱黏附所需要的能量。这一物理量综合了机器人质量和黏附力的影响,让质量小、负载能力强的机器人在比较中具有更大的优势。但在狭小工作环境下执行任务时,爬壁机器人对设计尺寸具有较高的要求,显然此参数无法对机器人的尺寸进行考量,依旧存在局限性。

2016 年,LABONTE 等^[129]通过对昆虫、爬行动物、两栖动物、蛛形纲以及哺乳类动物中具有爬壁能力的 225 个物种的黏附特性进行统计分析,探究了基于黏附原理爬壁所受到的尺寸限制。通过对 225 种具有爬壁能力的动物的相关数据进行对数线性回归计算以及最小二乘法求解,LABONTE 等得

出了黏附面积与自身质量、黏附强度与自身质量均存在幂数关系(前者幂数为 1.02,后者为 0.3)。基于以上结论可以发现,自然界中具有爬壁能力的生物,其黏附强度与自身质量的比值趋向于一个常量。这里黏附强度,与黏附能密度具有相同物理意义,单位相同为 $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

综上分析,在仿生黏附的启发下,考虑到黏附强度受自重、体积的影响,本文定义了一种适用于比较不同爬壁机器人黏附性能的评价参数:比黏附能密度 γ (单位 $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

$$\gamma = \frac{F}{S} \cdot \frac{1}{m} \quad (3)$$

式中, F 为机器人的垂直负载能力(包括自重与最大负重),单位为 N; S 为机器人不同黏附机理的有效接触面积,单位为 m^2 ; m 为机器人自身质量,单位为 kg。比黏附能密度不仅可以实现对比分析基于不同黏附原理机器人的黏附性能,还可以用于指导爬壁机器人小型化设计的材料和结构优化。

综合考虑机器人的负载能力、黏附面积和自身质量,将几种不同黏附原理的爬壁机器人参数进行分析与整理,得到点阵图如图 6 所示。图中横坐标代表机器人自身的质量,横坐标值越小,则机器人质量越小;纵坐标为机器人最大负载与黏附面积的比值,纵坐标值越大,则机器人的黏附能力越强;纵坐标与横坐标的比值即为比黏附能密度,比黏附能密度越大,代表机器人的小型化程度越高,即该种黏附原理越适合设计小型化爬壁机器人。

图 6 中有五簇不同形状的点以及相应的椭圆形区域,代表了现阶段研究中不同黏附原理机器人的性能参数分布。磁吸附原理的机器人最早被应用于维护核电站,现在一般执行检查和维护大型船体、罐体等工作^[130],由于需要在开阔空间携带多种设备并完成响应任务,此类机器人一般采用大体积、高负载的设计,因此其主要分布于图 6 的右上方。仿生湿黏附的机器人主要依靠仿章鱼或仿鲫鱼的吸盘完成吸附,由于吸盘结构的复杂性,现阶段设计出的机器人体型较大、黏附力相对较低,因此其主要分布于图 6 的右下方。真空负压吸附原理的爬壁机器人是最常见的爬壁机器人种类之一,通过提高负压源的工作功率,机器人可以获得强大的负载能力,但较大的能量消耗与大尺寸的吸附结构也让机器人的设计尺寸一般较大,因此其主要分布于图 6 的上方。静电黏附材料具有体积小、功耗低的特点,因此静电黏附原理的爬壁机器人往往具有较小的自身

质量和尺寸,但因为静电黏附力受到多种环境因素的影响,其黏附能力较弱,因此此类机器人分布于图 6 的左下方。仿壁虎黏附材料具有较强的黏附强

度与较高的黏附可控性,且黏附过程不需要额外供能,因此有利于机器人的小型化设计,在图 6 中分布于左上方。

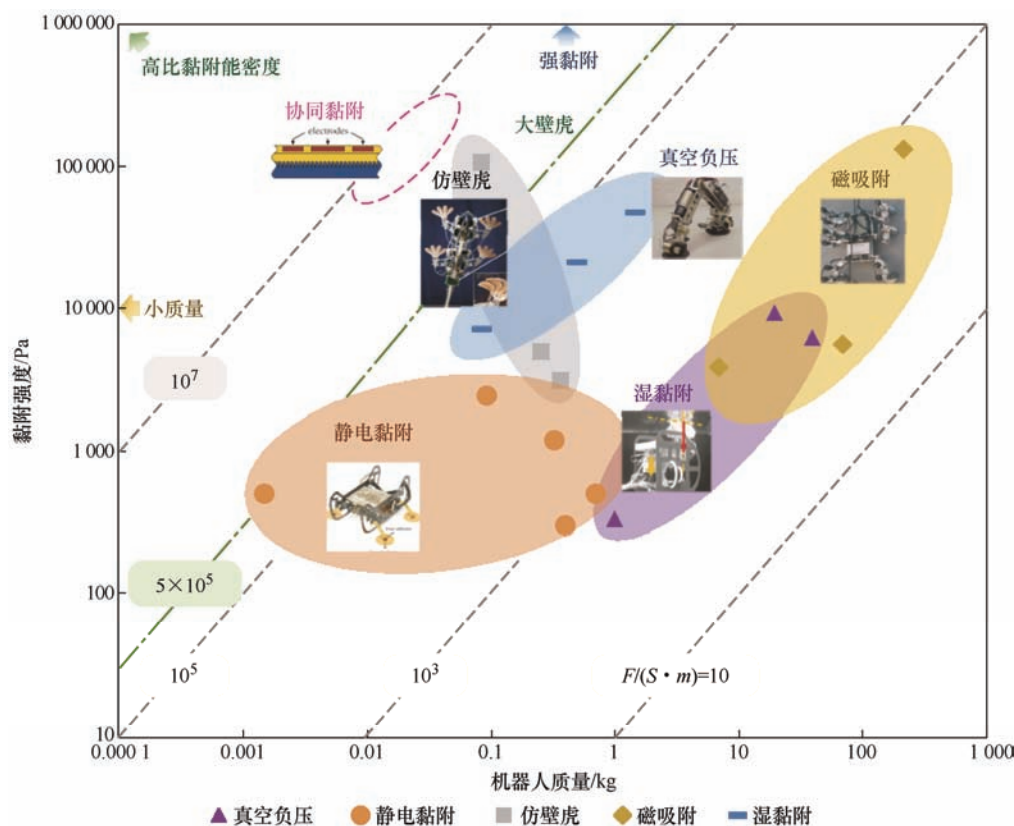


图 6 基于不同黏附机理的爬壁机器人黏附性能对比图

对自然的学习、模仿乃至超越一直是科学研究的重要方向,自然界中的大壁虎是目前已知最大的具有爬壁能力的动物,也是爬壁机器人的设计灵感来源之一,其平均质量约 0.3 kg,脚掌黏附强度约 100 kPa^[71]。图 6 中加粗的点划线代表自然界中的大壁虎,其他灰色虚线为比黏附能密度的等值分布线,其将图表分割成比黏附能密度由低到高的几块区域。从图 6 中可以看出,不同黏附原理的爬壁机器人具有不同的比黏附能密度分布区间,统计得到的结果如表 1 所示。分析表 1 中数据可知,由仿壁虎黏附、仿生湿黏附和静电黏附三种黏附原理设计的爬壁机器人具有较高的黏附能量密度,因此这三种黏附原理更适用于机器人的小型化设计。

表 1 不同黏附原理爬壁机器人的比黏附能密度

黏附原理	比黏附能密度 $\gamma/(J \cdot m^{-3} \cdot kg^{-1})$
仿壁虎干黏附	$8.5 \times 10^4 \sim 7.8 \times 10^6$
静电黏附	$7.3 \times 10^2 \sim 3.5 \times 10^5$
仿生湿黏附	$3.3 \times 10^4 \sim 8.6 \times 10^4$
真空负压	$1.6 \times 10^2 \sim 4.8 \times 10^2$
磁吸附	$81 \sim 6 \times 10^2$

3 爬壁机器人的发展趋势

3.1 材料智能化: 由传统结构材料向具有感知功能的智能材料发展

由于金属材料加工工艺较为成熟且具有优秀的力学特性,在早期的爬壁机器人设计中,机器人主要由金属材料制成,但同时金属材料密度高、柔韧性较差的缺点也让机器人在小型化设计时受到诸多局限。随着近年来新材料与新工艺不断发展,人们对高分子材料和复合材料的研究也越来越深入。高分子材料(如硅橡胶、聚氨酯、亚克力、树脂等)由于具有塑性良好、密度低、韧性高以及耐腐蚀等优点,在爬壁机器人中可以作为黏附材料、自适应柔性机构等功能性材料,让机器人具有更好的黏附能力与更小的体型。智能材料由于具有优异的组性能,有利于机器人的结构简化与小型化设计。目前越来越多的研究人员正从事智能材料的研究,它们的作用不再局限于结构性支撑,而是能感知外部刺激(热、光、电等)并做出响应,未来在机器人领域会有更广泛的应用。

3.2 驱动多样化: 由电机驱动向多物理场驱动发展

电机驱动由于可控性强、输出功率大等优点, 在早期的爬壁机器人领域有着较为广泛的应用。但随着爬壁机器人向着小体积、高灵活性发展, 采用电机驱动的方式越来越难以满足机器人的设计要求。而近年来随着活性材料研究的不断深入, 各种由电^[131-132]、光^[133-134]、热^[135]、磁^[136]、湿度^[137]、化学驱动^[138]以及气压^[139-140]作为驱动的人工肌肉材料不断被设计出来, 它们不仅有着较低的密度和较快的响应速度, 其高能量密度的优点也非常有利于机器人的小型化设计。

3.3 体积小型化: 由大体积高负载向小体积高负载比发展

爬壁机器人早期被应用于核电站、废墟等环境的探测与维护工作, 由于需要携带多种设备且对机器人的体型没有限制, 其往往采用大体积高负载的设计。随着科学技术的发展, 人们对工作条件和生活质量的要求也越来越高, 越来越多的领域需要机器人代替人工实现自动化。为了适应越来越复杂的工作环境, 爬壁机器人需要小巧的体型和灵活的运动能力, 因此小体积高负载比的爬壁机器人成为了目前研究的方向之一。

3.4 黏附机理协同化: 由单一黏附原理向多种原理相协同发展

实现黏附的方式多种多样, 但每种黏附材料都受限于其黏附机理, 存在各自的问题。如仿壁虎黏附需要一定的预压力才能完成黏附过程, 吸盘结构需要吸附表面平整, 磁铁只能在铁磁性材料表面发挥作用等。单一的黏附方式难以应对多孔、粗糙、弯曲等多种较为复杂的表面且容易受到外界因素的影响, 此时协同黏附则为黏附材料的研究提供了新的思路。目前的研究已经证实仿壁虎干黏附与静电黏附^[141]、吸盘吸附与干黏附微结构^[142-143]存在协同作用, 通过结合多种黏附原理, 协同黏附材料具有更强大的表面适应能力和黏附稳定性。

4 爬壁机器人在航空发动机检测领域的应用前景

航空发动机是一种高度复杂和精密的热力机械, 也是飞机飞行的动力来源。它经常因高温、高压和高转速的工作环境而出现故障、危及飞行安全^[144]。航空发动机常见的故障有: 裂纹、压痕、撕裂、凹陷、烧伤和腐蚀等^[145]。目前, 针对飞机的检测工作由于开展频繁且不能大范围拆装机体, 致使

检查效率较低, 需要消耗大量人力。如果能够让微型爬壁机器人进入航空发动机内部完成检测工作, 则可以显著降低成本、提高效率。

在 2018 年的范德堡罗航展上, 英国航空发动机制造商罗罗公司(Rolls-Royce Plc)展示了一种通过小型“蟑螂”机器人在发动机内部爬行采集图片信息, 实现快速检测的概念。如图 7 所示, 爬壁机器人由连续体机器人送入发动机内部, 穿过叶片间狭小的缝隙, 在垂直和倒置的表面上移动并收集图像信息。

虽然目前微型爬壁机器人载荷能力较低、运动稳定性较差, 但相关的研究和分析已经表明了其在航空发动机检测领域应用的可能性。通过改进机器人的机构设计、优化其运动规划, 微型爬壁机器人将会适应越来越复杂的工作环境, 从而拥有更为广阔的应用前景。



图 7 微型集群机器人检测方案^[146]

5 结论

爬壁机器人作为机器人研究的一个分支, 可以在陡峭的壁面执行检测、维护等任务, 特别是针对受限空间的特种检测领域展现出重要作用。随着对爬壁机器人研究的不断深入, 学者们发现了如真空负压吸附、静电黏附、仿壁虎黏附、吸盘吸附等多种高效可控的黏附方式, 其中大部分研究成果已经应用于爬壁机器人上并取得了良好效果。各种黏附方式都有着其独特的黏附特性, 在机器人领域展现出广阔的应用前景。

然而, 现有的爬壁机器人设计难以同时满足小体型、高负载、运动灵活的需求, 在对黏附能力越来越高的需求下, 目前的黏附方式也存在出其制备工艺复杂、小型化困难、黏附力不稳定等挑战, 这些都限制了可控黏附与爬壁机器人研究的发展。针对爬壁机器人设计中小体积与高负载之间的矛盾, 为解决多种爬壁机器人难以统一进行比较的问题, 本文提出了比黏附能密度作为衡量爬壁机器人黏附能力的性能参数, 明确了黏附性能评价准则与增强黏附的材料结构设计准则, 为机器人的小型化设计提供了新的参考。

在未来的研究中,爬壁机器人的黏附材料设计不仅需要引入新材料、新工艺,更需要多种黏附机理的协同作用,充分发挥每种黏附机理各自的优势,使其具有更大的黏附强度、更高的黏附稳定性、以及更强的黏附可控性。

参 考 文 献

- [1] LI Y, KRAHN J, MENON C. Bioinspired dry adhesive materials and their application in robotics: A review[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13(2): 181-199.
- [2] SAMEOTO D, MENON C. Recent advances in the fabrication and adhesion testing of biomimetic dry adhesives[J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19(10): 103001.
- [3] ZHANG C, MCADORNIS D, GRUNION J C. Nano/micro-manufacturing of bioinspired materials: A review of methods to mimic natural structures[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(30): 6292-6321.
- [4] LI X, TAO D, LU H, et al. Recent developments in gecko-inspired dry adhesive surfaces from fabrication to application[J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2019, 7(2): 023001.
- [5] 张奇峰, 张运修, 张艾群. 深海小型爬行机器人研究现状[J]. *机器人*, 2019, 41(2): 250-264.
ZHANG Qifeng, ZHANG Yunxiu, ZHANG Aiqun. Research status of small deep-sea crawling robot [J]. *Robot*, 2019, 41(2): 250-264.
- [6] 胡冰山, 王立文, 付庄, 等. 带仿生吸盘的微型爬壁机器人设计及其吸附特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009(9): 1012-1017.
HU Bingshan, WANG Liwen, FU Zhuang, et al. Design and adsorption characteristics of micro wall-climbing robot with bionic sucker [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009(9): 1012-1017.
- [7] 任鸟飞, 汪小华, 王辉静, 等. 仿壁虎微米纳米粘附阵列研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2006, 43(8): 386-392.
REN Niaofei, WANG Xiaohua, WANG Huijing, et al. Research progress of gecko-like micro-nano adhesive array [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, 43(8): 386-392.
- [8] BAIK S, LEE H J, KIM D W, et al. Bioinspired adhesive architectures: From skin patch to integrated bioelectronics[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(34): 1803309.
- [9] 孙锦山, 杨庆华, 阮健. 气动多吸盘爬壁机器人[J]. *液压与气动*, 2005(8): 56-59.
SUN Jinshan, YANG Qinghua, RUAN Jian. Pneumatic multi-sucker wall climbing robot[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2005(8): 56-59.
- [10] 刘淑霞, 王炎, 徐殿国, 等. 爬壁机器人技术的应用[J]. *机器人*, 1999, 21(2): 148-155.
LIU Shuxia, WANG Yan, XU Dianguo, et al. Application of wall-climbing robot technology[J]. *Robot*, 1999, 21(2): 148-155.
- [11] 薛胜雄, 任启乐, 陈正文, 等. 磁隙式爬壁机器人的研制[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(21): 37-42.
XUE Shengxiong, REN Qile, CHEN Zhengwen, et al. Development of magnetic wall climbing robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(21): 37-42.
- [12] GUO J, LENG J, ROSSITER J. Electrode adhesion technologies for robotics: A comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 36(2): 313-327.
- [13] 王黎明, 胡青春. 基于静电吸附原理的双履带爬壁机器人设计[J]. *机械设计*, 2012, 29(4): 22-25.
WANG Liming, HU Qingchun. Design of double-tracked wall-climbing robot based on electrostatic adsorption principle[J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(4): 22-25.
- [14] RICH S I, WOOD R J, MAJIDI C. Untethered soft robotics[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(2): 102-112.
- [15] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 27-44.
WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. Research status and development trend of bionic robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 27-44.
- [16] 黄龙, 张卫华, 陈今茂, 等. 爬壁机器人的研究现状与发展趋势[J]. *机械工程与技术*, 2021, 10: 345-363.
HUANG Long, ZHANG Weihua, CHEN Jinmao, et al. Research status and development trend of wall-climbing robot[J]. *Mechanical Engineering and Technology*, 2021, 10: 345-363.
- [17] 朱志宏, 李济泽, 彭晋民, 等. 微小型壁面检测爬壁机器人移动平台研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 49-54.
ZHU Zhihong, LI Jize, PENG Jinmin, et al. Research on mobile platform of small wall-climbing robot for micro-wall inspection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(3): 49-54.
- [18] 吴善强, 黄佩佩, 武丽君. 形状记忆合金驱动的小型双足爬壁机器人[J]. *机械设计与研究*, 2011, 27(4): 28-30.
WU Shanqiang, HUANG Peipei, WU Lijun. Small biped wall climbing robot driven by shape memory alloy[J].

- Machine Design & Research, 2011, 27(4): 28-30.
- [19] 谈士力, 郭成. 微型爬壁机器人研究的关键技术[J]. 机床与液压, 2005(11): 21-24.
TAN Shili, GUO Cheng. Key technologies of research on micro wall-climbing robot [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(11): 21-24.
- [20] 向红标, 李岩, 巴简程, 等. 磁控微型软体爬行机器人运动特性[J]. 机械工程学报, 2020, 56(17): 39-47.
XIANG Hongbiao, LI Yan, BA Jiancheng, et al. Motion characteristics of magnetic micro-soft crawling robot motion characteristics of magnetic micro-soft crawling robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(17): 39-47.
- [21] 张大伟. 电磁微马达驱动永磁吸附全方位微型轮式爬壁机器人[J]. 机器人, 2011, 33(6): 712-718.
ZHANG Dawei. Electromagnetic motor driven permanent magnet adsorption omni-directional miniature wheeled wall climbing robot [J]. Robot, 2011, 33(6): 712-718.
- [22] 张大伟, 李振波, 陈佳品. 基于 MEMS 微型爬壁机器人自主控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2015, 37(2): 5-8.
ZHANG Dawei, LI Zhenbo, CHEN Jiapin. Design of autonomous control system for micro wall climbing robot based on MEMS [J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(2): 5-8.
- [23] 巴简程. 基于磁-弹复合材料的磁控微型软体爬行机器人的研究[D]. 天津理工大学.
BA Jiancheng. Research on magnetically controlled micro-soft crawling robot based on magnetic-elastic composite material [D]. Tianjin University of Technology.
- [24] 陈畅. 基于压电驱动的微型六足爬行机器人的设计与制造[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
CHEN Chang. Design and manufacture of miniature hexapod crawling robot based on piezoelectric drive [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [25] 胡冰山, 吴明晖, 付庄, 等. 差动式形状记忆合金驱动器驱动的仿生吸盘[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(7): 16-19.
HU Bingshan, WU Minghui, FU Zhuang, et al. Bionic sucker driven by differential shape memory alloy driver[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(7): 16-19.
- [26] KERLEY J J, MAY E, EKLUND W. The climbing crawling robot (a unique cable robot for space and Earth)[C]// Technology 2001: The Second National Technology Transfer Conference and Exposition. Washington: NASA, 1991: 43-50.
- [27] BOHME T, SCHMUCKER U, ELKMANN N, et al. Service robots for facade cleaning[C]//IECON'98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 98CH36200). Aachen: ASME, 1998: 1204-1207.
- [28] KANG T, KIM H, CHOI H. Realtime perception with infrared scanner for navigation of quadruped walking and climbing robot[C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566). Sendai: RSJ, 2004: 2550-2555.
- [29] YANG W, YANG C, ZHANG R, et al. A novel worm-inspired wall climbing robot with sucker-microspine composite structure[C]// 2018 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). Singapore: IEEE, 2018: 744-749.
- [30] XIAO J, XIAO J, XI N, et al. Fuzzy system approach for task planning and control of micro wall climbing robots[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. Orleans: IEEE, 2004: 5033-5038.
- [31] XIAO J, SADEGH A, ELLIOT M, et al. Design of mobile robots with wall climbing capability[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey: IEEE, 2005: 438-443.
- [32] XIAO J, XIAO J Z, XI N, et al. Fuzzy controller for wall-climbing microrobots[J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2004, 12(4): 466-480.
- [33] ZHU H, GUAN Y, CAI C, et al. W-Climbot: A modular biped wall-climbing robot[C]// 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an: IEEE, 2010: 1399-1404.
- [34] BERNES K, HILLENBRAND C, LUKSCH T. Climbing robots for commercial applications—a survey[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR, Catania: SAGE, 2003: 17-19.
- [35] BERNES K, HILLENBRAND C. A climbing robot based on under pressure adhesion for the inspection of concrete walls[C]// Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics. Paris: IFR, 2004: 23-26.
- [36] LIU J, XU L, XU J, et al. Analysis and optimization of the wall-climbing robot with an adsorption system and adhesive belts[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3): 1-14.
- [37] RAHBEEK K. Electroadhesion apparatus[P]. U.S.: Patent

- 2025123, 1935-12-24.
- [38] JOHNSEN A, RAHBK K. A physical phenomenon and its applications to telegraphy, telephony, etc[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 2010, 61(320): 713-725.
- [39] GUO Y, LIU L, LIU Y, et al. Review of dielectric elastomer actuators and their applications in soft robots[J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 3(10): 2000282.
- [40] KUMAR S, SANTHANAM V. Inkjet printed electroadhesive pads on paper[J]. International Journal of Nanotechnology, 2017, 14(9-11): 859-866.
- [41] LESSING J, GLAVAN A C, WALKER S B, et al. Inkjet printing of conductive inks with high lateral resolution on omniphobic 'r~f paper' for paper-based electronics and MEMS[J]. Advanced Materials, 2014, 26(27): 4677-4682.
- [42] KOH K H, SREEKUMAR M, PONNAMBALAM S G. Hybrid electrostatic and elastomer adhesion mechanism for wall climbing robot[J]. Mechatronics, 2016, 35: 122-135.
- [43] WANG H, YAMAMOTO A. Analyses and solutions for the buckling of thin and flexible electrostatic inchworm climbing robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(4): 889-900.
- [44] GUO J, XIANG C, ROSSITER J. A soft and shape-adaptive electroadhesive composite gripper with proprioceptive and exteroceptive capabilities[J]. Materials & Design, 2018, 156: 586-587.
- [45] GERMANN J, SCHUBERT B, FLOREANO D. Stretchable electroadhesion for soft robots [C]// 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago: IEEE, 2014: 3933-3938.
- [46] DIGUMARTI K M, CAO C, GUO J, et al. Multi-directional crawling robot with soft actuators and electroadhesive grippers[C]// 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Livorno: IEEE, 2018: 303-308.
- [47] T LLEZ J D, KRAHN J, MENON C. Characterization of electro-adhesives for robotic applications[C]// 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Karon Beach: IEEE, 2011: 1867-1872.
- [48] KOH K, SREEKUMAR M, PONNAMBALAM S. Experimental investigation of the effect of the driving voltage of an electroadhesion actuator[J]. Materials, 2014, 7(7): 4963-4981.
- [49] SINGH J, BINGHAM P A, PENDERS J, et al. Effects of residual charge on the performance of electro-adhesive grippers[C]// Annual Conference Towards Autonomous Robotic Systems. Cham: Springer, 2016: 327-338.
- [50] DONALD, RUFFATTO, III, et al. Increasing the adhesion force of electrostatic adhesives using optimized electrode geometry and a novel manufacturing process[J]. Journal of Electrostatics, 2014, 72(2): 147-155.
- [51] GUO, TAILOR, BAMBER, et al. Investigation of relationship between interfacial electroadhesive force and surface texture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 49(3): 035303.
- [52] GUO J, BAMBER T, CHAMBERLAIN M, et al. Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(41): 415304.
- [53] PRAHLAD H, PELRINE R, STANFORD S, et al. Electroadhesive robots-Wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. Pasadena: IEEE, 2008.
- [54] LIU R, CHEN R, SHEN H, et al. Wall climbing robot using electrostatic adhesion force generated by flexible interdigital electrodes[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(36): 1-9.
- [55] WANG H, YAMAMOTO A, HIGUCHI T. A crawler climbing robot integrating electroadhesion and electrostatic actuation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(191): 1-11.
- [56] YAMAMOTO A, NAKASHIMA T, HIGUCHI T. Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes[C]// 2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science. Nagoya: IEEE, 2007: 389-394.
- [57] GU G, JIANG Z, ZHAO R, et al. Soft wall-climbing robots[J]. Science Robotics, 2018, 3(25): eaat2874.
- [58] WU Q, PRADEEP V, LIU X. A paper-based wall-climbing robot enabled by electrostatic adhesion[C]// 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), Livorno: IEEE, 2018: 315-320.
- [59] CAO J, QIN L, LIU J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators[J]. Extreme Mechanics Letters, 2018, 21: 9-16.
- [60] QIN L, LIANG X, HUANG H, et al. A versatile soft crawling robot with rapid locomotion[J]. Soft robotics, 2019, 6(4): 455-467.
- [61] RUI C, RONG L, CHEN J, et al. A gecko inspired wall-climbing robot based on electrostatic adhesion

- mechanism[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. Shenzhen: IEEE, 2013: 396-401.
- [62] DE RIVAZ S D, GOLDBERG B, DOSHI N, et al. Inverted and vertical climbing of a quadrupedal microrobot using electroadhesion[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(25): eaau3038.
- [63] CAO C, SUN X, FANG Y, et al. Theoretical model and design of electroadhesive pad with interdigitated electrodes[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 485-491.
- [64] XIE G, WANG W, ZHAO X, et al. Low-voltage electroadhesive pad with thin insulation layer fabricated by parylene deposition[C]// 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Suzhou: IEEE, 2019: 197-202.
- [65] ZAAF A, DAMME R V, HERREL A, et al. Spatio-temporal gait characteristics of level and vertical locomotion in a ground-dwelling and a climbing gecko[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(7): 1233-1246.
- [66] DAVID, LABONTE, CHRISTOFER, et al. Extreme positive allometry of animal adhesive pads and the size limits of adhesion-based climbing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(5): 1297-1302.
- [67] ARZT E, GORB S, SPOLENAK R. From micro to nano contacts in biological attachment devices[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(19): 10603-10606.
- [68] TONY G, ELI G, JACKMAN T R, et al. Repeated origin and loss of adhesive toepads in geckos[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(6): e39429-.
- [69] 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.
- [70] AUTUMN K, SITTI M, LIANG Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(19): 12252-12256.
- [71] HUBER G, MANTZ H, SPOLENAK R, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(45): 16293-16296.
- [72] IZADI H, STEWART K M, PENLIDIS A. Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014, 11(98): 20140371.
- [73] SONG Y, WANG Z, LI Y, et al. Electrostatic attraction caused by triboelectrification in climbing geckos[J]. *Friction*, 2022, 10(1): 44-53.
- [74] SINGLA S, JAIN D, ZOLTOWSKI C M, et al. Direct evidence of acid-base interactions in gecko adhesion[J]. *Science Advances*, 2021, 7(21): eabd9410.
- [75] TIAN Y, PESIKA N, ZENG H, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(51): 19320-19325.
- [76] ZHAO B, 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.
- [77] ZENG H, PESIKA N, TIAN Y, et al. Frictional adhesion of patterned surfaces and implications for gecko and biomimetic systems[J]. *Langmuir*, 2009, 25(13): 7486-7495.
- [78] PARNES 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.
- [79] SANTOS D, SPENKO M, PARNES A, et al. Directional adhesion for climbing: Theoretical and practical considerations[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007, 21(12-13): 1317-1341.
- [80] DAVIES J, HAQ S, HAWKE T, et al. A practical approach to the development of a synthetic gecko tape[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29(4): 380-390.
- [81] ZHOU M, TIAN Y, SAMEOTO D, et al. Controllable interfacial adhesion applied to transfer light and fragile objects by using gecko inspired mushroom-shaped pillar surface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(20): 10137-10144.
- [82] YI H, HWANG I, LEE J H, et al. Continuous and scalable fabrication of bioinspired dry adhesives via a roll-to-roll process with modulated ultraviolet-curable resin[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(16): 14590.
- [83] DAYAN C B, CHUN S, KRISHNA - SUBBAIAH N, et al. 3D printing of elastomeric bioinspired complex adhesive microstructures[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(40): 2103826.

- [84] LIIMATAINEN V, DROTLEF D M, SON D, et al. Liquid-superrepellent bioinspired fibrillar adhesives[J]. *advanced materials*, 2020, 32(19): 2000497.
- [85] MURPHY M P, KIM S, SITTI M. Enhanced adhesion by gecko-inspired hierarchical fibrillar adhesives[J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2009, 1(4): 849-855.
- [86] 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.
- [87] WIRTH C T, HOFMANN S, ROBERTSON J. Surface properties of vertically aligned carbon nanotube arrays[J]. *Diamond and Related Materials*, 2008, 17(7-10): 1518-1524.
- [88] QU L, DAI L, STONE M, et al. Carbon nanotube arrays with strong shear binding-on and easy normal lifting-off[J]. *Science*, 2008, 322(5899): 238-242.
- [89] CAMPO A D, GREINER C, ALVAREZ I, et al. Patterned surfaces with pillars with controlled 3d tip geometry mimicking bioattachment devices[J]. *Advanced Materials*, 2010, 19(15): 1973-1977.
- [90] JEONG H E, LEE S H, KIM P, et al. High aspect-ratio polymer nanostructures by tailored capillarity and adhesive force[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2008, 313: 359-364.
- [91] JEONG H E, LEE S H, KIM P, et al. Stretched polymer nanohairs by nanodrawing[J]. *Nano Letters*, 2006, 6(7): 1508-1513.
- [92] 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.
- [93] WANG D, ZHAO A, RUI J, et al. Surface properties of bionic micro-pillar arrays with various shapes of tips[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 259: 93-98.
- [94] GLASS P, CHUNG H, WASHBURN N R, et al. Enhanced wet adhesion and shear of elastomeric micro-fiber arrays with mushroom tip geometry and a photopolymerized p(DMA-co-MEA) tip coating[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2010, 26(22): 17357.
- [95] KIM T I, JEONG H E, SUH K Y, et al. Stopped nanohairs: Geometry-controllable, unidirectional, reversible, and robust gecko-like dry adhesive[J]. *Advanced Materials*, 2010, 21(22): 2276-2281.
- [96] JIN K, TIAN Y, ERICKSON J S, et al. Design and fabrication of gecko-inspired adhesives[J]. *Langmuir*, 2012, 28(13): 5737-5742.
- [97] LEE J, FEARING R S, KOMVOPOULOS K. Directional adhesion of gecko-inspired angled microfiber arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 191910.
- [98] CHAN E P, SMITH E J, HAYWARD R C, et al. Surface wrinkles for smart adhesion[J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(4): 711-716.
- [99] YU J, CHARY S, DAS S, et al. Gecko - inspired dry adhesive for robotic applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(16): 3010-3018.
- [100] JEONG H E, LEE J K, HONG N K, et al. A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(14): 5639-5644.
- [101] YANG S Y, CARLSON A, CHENG H, et al. Elastomer surfaces with directionally dependent adhesion strength and their use in transfer printing with continuous roll-to-roll applications[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(16): 2117-2122.
- [102] UNVER O, SITTI M. Tankbot: A palm-size, tank-like climbing robot using soft elastomer adhesive treads[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(14): 1761-1777.
- [103] MURPHY M P, SITTI M. Waalbot: An agile small-scale wall-climbing robot utilizing dry elastomer adhesives[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(3): 330-338.
- [104] MURPHY M P, KUTE C, MENGUEC Y, et al. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(1): 118-133.
- [105] HAWKES E W, CHRISTENSEN D L, CUTKOSKY M R. Vertical dry adhesive climbing with a 100x bodyweight payload[C]// *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seattle: IEEE, 2015: 3762-3769.
- [106] WU Y, DONG X, KIM J K, et al. Wireless soft millirobots for climbing three-dimensional surfaces in confined spaces[J]. *Science Advances*, 2022, 8(21): eabn3431.
- [107] KIM S, SPENKO M. Smooth vertical surface climbing with directional adhesion[J]. *IEEE Transactions on robotics*, 2008, 24(1): 65-74.
- [108] MENON C, LI Y, SAMEOTO D, et al. Abigail-I: Towards the development of a spider-inspired climbing

- robot for space use[C]// 2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Scottsdale: IEEE, 2008: 384-389.
- [109] LI Y, AHMED A, DAN S, et al. Abigail II: Toward the development of a spider-inspired climbing robot[J]. *Robotica*, 2012, 30(1): 79-89.
- [110] TRAMACERE F, BECCAI L, KUBA M, et al. The morphology and adhesion mechanism of octopus vulgaris suckers[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65074.
- [111] SAREH S, ALTHOEFER K, LI M, et al. Anchoring like octopus: Biologically inspired soft artificial sucker[J]. *Journal of the royal society interface*, 2017, 14(135): 20170395.
- [112] ZHANG L, CHEN H, GUO Y, et al. Micro-nano hierarchical structure enhanced strong wet friction surface inspired by tree frogs[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(20): 2001125.
- [113] HANNA G, JON W, BARNES W J. Adhesion and detachment of the toe pads of tree frogs[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1991, 155(1): 103-125.
- [114] BARNES W J P. Functional morphology and design constraints of smooth adhesive pads[J]. *MRS bulletin*, 2007, 32(6): 479-485.
- [115] CHEN Y, MENG J, GU Z, et al. Bioinspired multiscale wet adhesive surfaces: Structures and controlled adhesion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(5): 1905287.
- [116] LEE S H, SONG H W, KANG B S, et al. Remora-inspired reversible adhesive for underwater applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 47571-47576.
- [117] DITSCH P, WAINWRIGHT D K, SUMMERS A P. Attachment to challenging substrates—fouling, roughness and limits of adhesion in the northern clingfish (*Gobiesox maeandricus*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(14): 2548-2554.
- [118] WAINWRIGHT D K, KLEINTEICH T, KLEINTEICH A, et al. Stick tight: Suction adhesion on irregular surfaces in the northern clingfish[J]. *Biology letters*, 2013, 9(3): 20130234.
- [119] SANGYUL, BAIK, DA, et al. A wet-tolerant adhesive patch inspired by protuberances in suction cups of octopi[J]. *Nature*, 2017, 546(7658): 396-400.
- [120] ZHAO Y, WU Y, WANG L, et al. Bio-inspired reversible underwater adhesive[J]. *Nature communications*, 2017, 8(1): 1-8.
- [121] OH, JU, HYUN, et al. Fabrication of high-sensitivity skin-attachable temperature sensors with bioinspired microstructured adhesive[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(8): 7263-7270.
- [122] MIN H, JANG S, DA W K, et al. Highly air/water-permeable hierarchical mesh architectures for stretchable underwater electronic skin patches[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2020, 12(12): 14425-14432.
- [123] BAIK S, HWANG G W, JANG S, et al. Bioinspired microsphere-embedded adhesive architectures for an electrothermally actuating transport device of dry/wet pliable surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(5): 6930-6940.
- [124] BAIK S, LEE H J, DA W K, et al. Capillarity-enhanced organ-attachable adhesive with highly drainable wrinkled octopus-inspired architectures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(29): 25674-25681.
- [125] WANG Y, YANG X, CHEN Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(10): eaan8072.
- [126] MAZZOLAI B, MONDINI A, TRAMACERE F, et al. Octopus-inspired soft arm with suction cups for enhanced grasping tasks in confined environments[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2019, 1(6): 1900041.
- [127] ZHUO S, ZHAO Z, XIE Z, et al. Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines[J]. *Science advances*, 2020, 6(5): eaax1464.
- [128] DITSCH P, SUMMERS A P. Aquatic versus terrestrial attachment: Water makes a difference[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2014, 5(1): 2424-2439.
- [129] LABONTE D, FEDERLE W. Rate-dependence of 'wet' biological adhesives and the function of the pad secretion in insects[J]. *Soft Matter*, 2015, 11(44): 8661-8673.
- [130] ARMADA M, DE SANTOS P G. Climbing, walking and intervention robots[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 1997, 24(2): 158-163.
- [131] JAFFERIS N T, SMITH M J, WOOD R J. Design and manufacturing rules for maximizing the performance of polycrystalline piezoelectric bending actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(6): 065023.
- [132] WU Y, YIM J K, LIANG J, et al. Insect-scale fast moving and ultrarobust soft robot[J]. *Science Robotics*,

- 2019, 4(32): eaax1594.
- [133] LV J A, LIU Y, WEI J, et al. Photocontrol of fluid slugs in liquid crystal polymer microactuators[J]. *Nature*, 2016, 537(7619): 179-184.
- [134] MISKIN M Z, CORTESE A J, DORSEY K, et al. Electronically integrated, mass-manufactured, microscopic robots[J]. *Nature*, 2020, 584(7822): 557-561.
- [135] SEOK S, ONAL C D, CHO K-J, et al. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 18(5): 1485-1497.
- [136] LU H, ZHANG M, YANG Y, et al. A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in both dry and wet conditions[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-7.
- [137] JIA T, WANG Y, DOU Y, et al. Moisture sensitive smart yarns and textiles from self-balanced silk fiber muscles[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(18): 1808241.
- [138] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. *Nature*, 2016, 536(7617): 451-455.
- [139] TRUBY R L, WEHNER M, GROSSKOPF A K, et al. Soft somatosensitive actuators via embedded 3D printing[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(15): 1706383.
- [140] LI S, VOGT D M, RUS D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(50): 13132-13137.
- [141] RUFFATTO III D, PARNES A, SPENKO M. Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic/gecko-like adhesive[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2014, 11(93): 20131089.
- [142] GRECO G, BOSIA F, TRAMACERE F, et al. The role of hairs in the adhesion of octopus suckers: A hierarchical peeling approach[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(3): 035006.
- [143] TRAMACERE F, APPEL E, MAZZOLAI B, et al. Hairy suckers: the surface microstructure and its possible functional significance in the *Octopus vulgaris* sucker[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2014, 5(1): 561-565.
- [144] ZOU F. Review of aero-engine defect detection technology[C]// 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chongqing: IEEE, 2020: 1524-1527.
- [145] YU H. Borescope and its application in the maintenance of aeroengine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005, 35(6): 94-97.
- [146] BOETTNER B, BROWNELL L. Rolls-royce and swarm Robots[EB/OL].(2018-07-18)[2022-06-07]. <https://wyss.harvard.edu/media-post/rolls-royce-and-swarm-robots/>.
-
- 作者简介: 马吉良, 男, 1998 年出生, 博士研究生。主要研究方向为仿生爬壁机器人黏附机理研究及应用。
E-mail: xiaoma0233@stu.xjtu.edu.cn
- 彭军, 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为特种检测机器人和智能柔性传感。
E-mail: pengjun@xjtu.edu.cn
- 郭艳婕, 女, 1988 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为机械装备故障诊断理论、磨损图像识别技术和摩擦起电应用。
E-mail: guoyanjie@xjtu.edu.cn
- 陈雪峰(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为主动控制与检测机器人、机械设备健康监测与智能维护。
E-mail: chenxf@xjtu.edu.cn