

空间碎片粘附捕获技术

空间碎片清理技术研究团队

(钱学森空间技术实验室 空间技术与应用基础研究部, 北京 100094)

1 概述

空间碎片问题已经成为人类不可回避的一个环境问题。自 1957 年人类发射第一颗人造地球卫星, 空间碎片就已经存在, 随着人类空间活动的不断增加, 空间碎片问题变得日益突出。截至 2016 年, 已编目的在轨空间碎片达 2.3 万个, 而无法编目的碎片(一般尺寸为 0.1mm~1cm)质量已达几千吨, 数量超过 200 亿。据美国空间碎片计划办公室预测, 在未来 50 年空间碎片的数量将以每年 10% 的速度增长。

由于空间碎片的危害性巨大, 许多国家采取了相应的解决措施, 提出了多种清理手段, 如机械臂以及飞爪、飞网等接触式抓捕清除, 激光推离、高速气流推离以及微粒粉尘推离等非接触式主动清除, 以及利用气动力、太阳光压以及地磁力的被动离轨技术。其中接触式抓捕清除是目前为止技术成熟度比较高的一种清除手段, 但由于空间碎片一般为非合作目标, 外形尺寸不规则且不存在合作接口, 姿态可能处于翻滚状态, 因此机械臂、飞爪等捕获机构的通用性受到限制。

受仿壁虎爬行机器人启发而提出的粘附捕获技术是一种新型的空间碎片捕获方法, 其捕获载荷表面带有仿生材料——仿壁虎刚毛阵列, 该刚毛直径纤细, 在较小的接触压力下就能和接触面紧密贴合, 达到分子间力作用距离, 在两接触面间产生范德华力, 实现可靠连接。该捕获方式具有连接可靠简单、载荷设计灵活以及对捕获目标适应能力强等优点。将该捕获载荷应用于微小型飞行器, 能够以较低的代价清理剥离太阳能电池片等小型空间碎片, 也能够通过多个小飞行器的协同, 实现对火箭上面级以及失效卫星等大型空间碎片的捕获与操作, 因此在未来空间碎片清理方向具有很高的潜在应用价值。

2 国内外研究进展

(1) 干吸附技术

国外很早就认识到吸附式连接在空间应用中的重要性, 对显示出空间应用潜力的新技术手段积极予以孵化转化。目前, 其重点发展的吸附连接技术主要包括电磁力吸附、棘盘吸附、静电吸附、范德华力吸附(干式吸附)等。其中静电吸附技术和干式吸附技术是空间非合作目标连接任务中最具潜力的技术途径。二者比较而言, 静电吸附技术在耐尘性、目标表面适应范围、吸附机构复杂度、吸/

脱附控制和移动灵活性方面具有一定优势，但存在电击穿和电磁干扰风险、吸附力维持依赖电能等不足。干式吸附技术虽然需要相对复杂的机构和吸/脱附控制，但是在吸附强度、持续吸附和能耗等方面具备明显优势。

干式吸附技术源自对壁虎等生物高超吸附能力的机理研究。本世纪初，试验生物学家首次明确了壁虎脚掌吸附的范德华力本质。2003 年国际上首次研制成功仿壁虎吸附材料。随后，伴随着对壁虎吸附机理的不断深化认识，仿生干式吸附微结构材料技术也得到迅速发展。

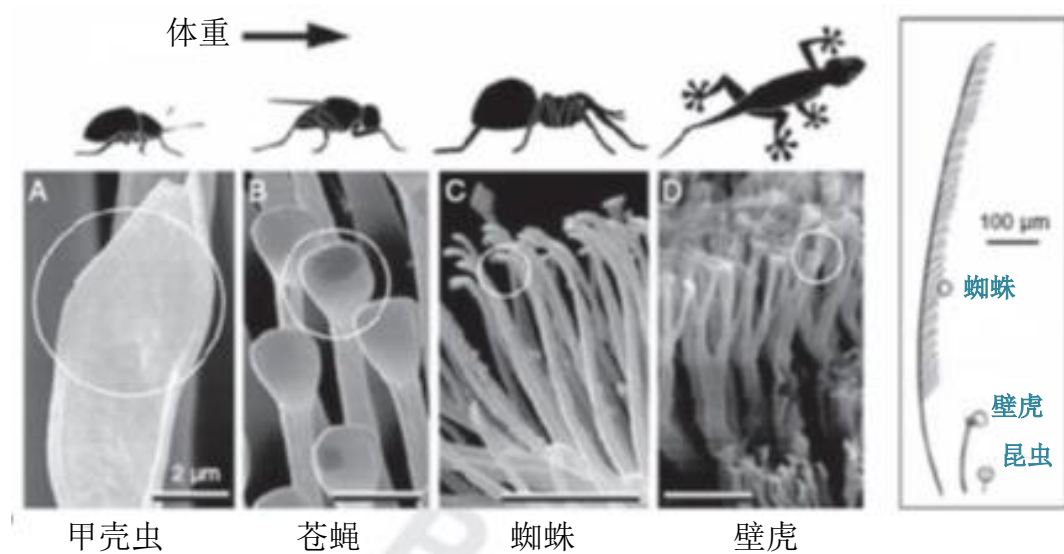


图 1 基于范德华力的生物吸附机理图

早期用于干式吸附的粘附结构多采用聚氨酯丙烯酸酯(PUA)、聚乙烯、聚酰亚胺、聚氨酯、硅橡胶等高分子聚合物制成。近年来，人们发现化学气相沉积(CVD)法制备的碳纳米管阵列(CNTA)具有优良的力学性能、长细比大等特点，预测有很好的粘附性能。美国阿克伦(Akron)大学 Ge 等人用化学气相沉积的方法得到了宽度 $50\sim 500\mu\text{m}$ ，长度 $200\sim 500\mu\text{m}$ 的壁虎胶带，该胶带由高密度碳纳米管阵列组成， 1cm^2 的柔性壁虎胶带能够承受 36N 切向粘附力，4 倍于壁虎生物体脚掌刚毛的粘附能力。Dayton 的 Dai 等人利用化学气相沉积方法得到高密度的碳纳米管粘附阵列。相对于 Ge 等人的碳纳米管阵列，Dai 等人的创新之处在于：在粘附阵列顶部采用弯曲的碳纳米管代替直立的碳纳米管，从而增加了刚毛的有效接触面积，得到了更为强大的粘附性能。在 20N 的法向预载力下， $4\text{mm}\times 4\text{mm}$ 的粘附阵列片可产生 14.8N 的切向粘附力，切向粘附强度高达 $92.5\text{N}/\text{cm}^2$ ，远远超过壁虎生物体脚掌的粘附强度。

利用 CNTA 材料，美国斯坦福大学的一个研究小组早在 2006 年开发出的一种仿壁虎机器人，称为 Stickybot，该机器人具有 4 只粘性脚足，每个脚足有 4 个脚趾，脚趾底部长着数百万个极其微小的用于粘附的人造刚毛。卡耐基梅隆大

学微小型机器人实验室开发了履带式壁虎机器人，其履带是由特殊的粘性材料制作的，可以粘在墙面上，使得机器人在墙面上的行走有如履带机器人在地面上的行走。

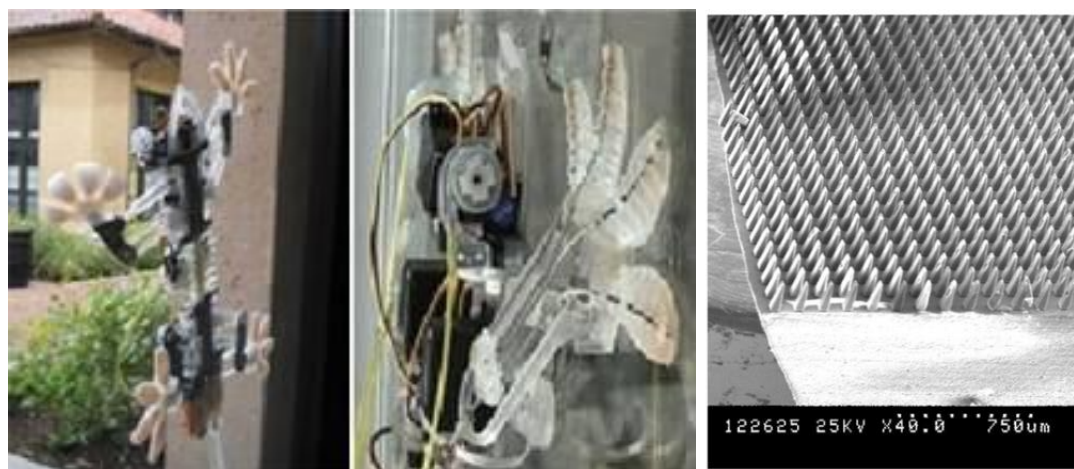


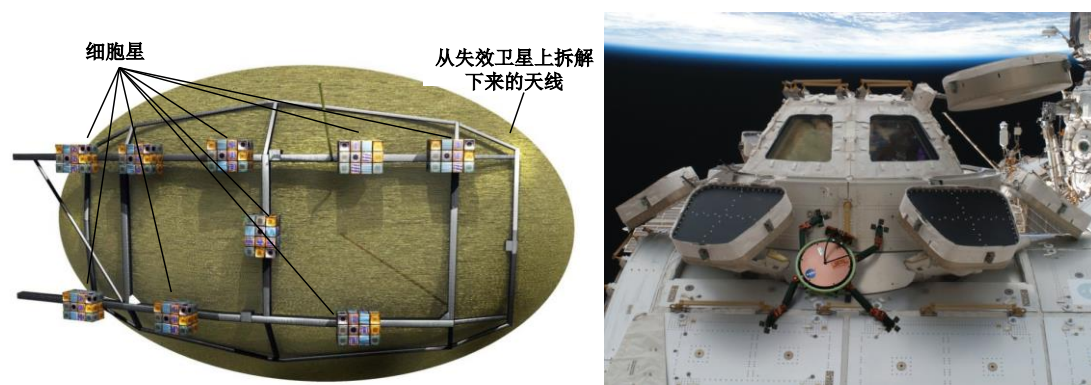
图 2 斯坦福大学的 Stickybot 壁虎机器人及其脚掌微观结构

(2) 干粘附在空间中的应用

干式吸附的天基应用以“凤凰”计划研究的“壁虎粘附器”粘合垫以及欧洲攀爬机器人为代表，目前还处于技术攻关阶段。

1) “壁虎粘附器” (Gecko-Gripper)

美国以 JPL 实验室、斯坦福大学等研究团队为核心，很早就开展了面向空间应用的仿壁虎吸附材料与机构研制，2009 年已完成关键功能材料的制备和基本力学性能测试，2011 年完成了耐辐照测试。随后，仿壁虎吸附捕获连接技术被纳入“凤凰”计划，由 JPL 实验室牵头，开发“接触即连接”技术，其目标是空间机械臂对非合作目标卫星的捕获以及模块在轨组装提供技术解决方案。



(a) “凤凰”计划非合作目标吸附捕获 (b) 国际空间站表面巡检

图 3 范德华力干式吸附捕获连接机构应用设想 (JPL 实验室)

“凤凰”项目的后续相关报道显示，JPL 和斯坦福大学设计研制了一种称为“壁虎粘附器”（Gecko-Gripper）的粘附头，该粘附头是由 32 个（16 对）粘附垫构成，每个粘附垫的面积为 6.5cm^2 ，粘附垫材料即为仿生壁虎微纳米粘附阵列。

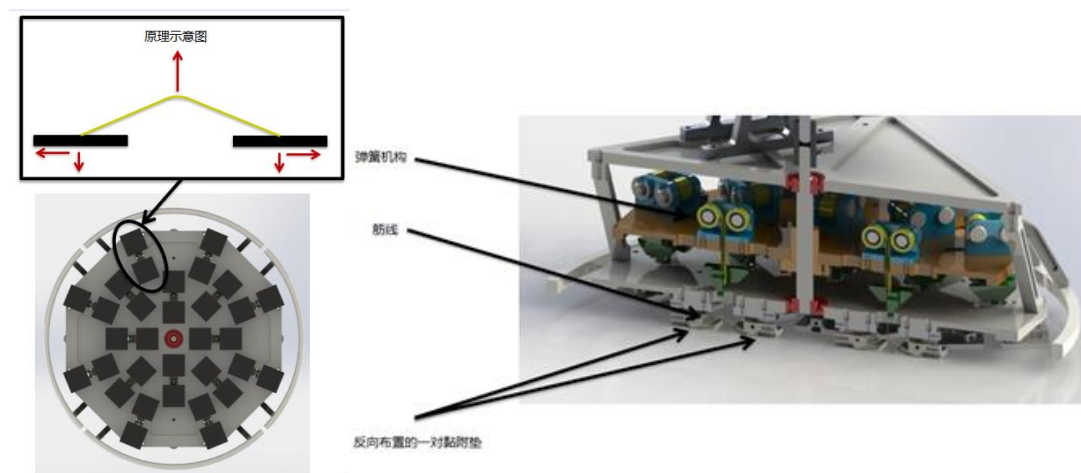


图 4 粘附垫的排布方式及剖面图

2015 年 8 月 12 日，NASA 宣称：地面试验证明，在绝热、真空以及零下 60°C 的环境下，最新一代的粘附机构可以承受超过 150N 的载荷。并称这些粘附垫已经在超过 30 种飞行器表面上成功测试，30000 多次的吸附-脱附的循环后，粘附垫仍然保持着很强的粘附性。

2016 年 3 月到 2017 年 9 月，NASA 研究员在国际空间站上进行了一对“壁虎粘附器”的实验。实验显示，在小于 2lbs 的预压力作用后，这对黏附垫可以承受 20lbs 的任意方向的力以及力矩；脱附时，挤压黏附垫之间的弹簧，脱附力可小至 2lbs 。

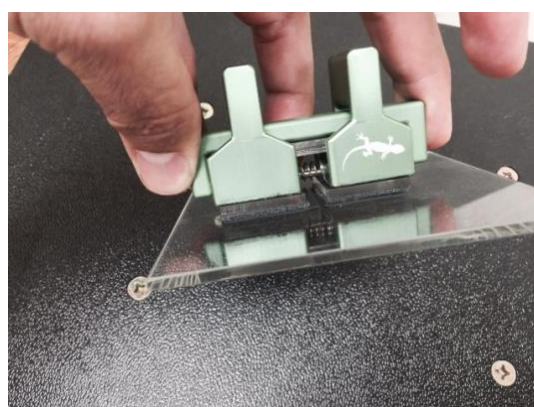


图 5 空间站试验壁虎粘附垫实物图

2) 欧洲攀爬机器人(Abigaille)

2014 年欧洲航天局设计了一种有腿的小型机器人原型，名为“阿比盖尔”，可用于宇宙飞船船体攀爬、飞船清理及维修。“阿比盖尔”足底效仿壁虎的刚毛

覆盖了干粘附材料。“阿比盖尔”有六条腿，每条腿具有四个自由度，在攀爬时能够从水平环境转化为垂直环境。欧空局物质测试实验室对其干粘附性能进行了相关测试，测试中考虑了太空真空环境和温度的影响。

3 研究目标

针对多尺寸空间碎片清理需求，开展基于微纳型飞行器的粘附捕获方案研究，在仿生吸附材料空间环境适应性技术、空间非合作目标微小型粘附捕获机构设计技术以及对非合作目标近距离自主导航制导控制技术等关键技术方面取得突破性进展，完成粘附捕获总体方案可行性仿真验证及粘附捕获效果的地面试验验证，为后续粘附捕获技术的工程化应用奠定技术基础。

4 研究内容

（1）仿生粘附材料空间环境适应性技术

对空间碎片的粘附捕获技术中，空间两体连接采用基于范德华力的仿生粘附材料实现，其空间应用条件对粘附材料功能性能提出了更为苛刻的要求。因此，需要针对性开展高真空极端温度环境和高频粘脱附实施条件下的粘附材料性能研究。通过材料改性，提高制备工艺等措施，解决材料低温真空环境变硬变脆问题，减弱粘附力各向异性、增大法向粘附力，降低粘附过程预压力，增强阵列与基底之间的结合力。

（2）粘附捕获机构设计技术

对目标的粘附寄生过程是一个很复杂的过程，在目标姿态不确定性、飞行器平台指向精度偏差等不利因素下，能否实现可靠捕获，粘附机构的结构机构设计至关重要。实际设计中，要求粘附机构必须具备一定的自适应性，能够通过多腿配合以及球铰等实现协同随形吸附能力。此外，还需要粘附机构具有足够的阻尼缓冲能力，能够实现“接触即连接”，避免捕获过程接触反弹现象发生，确保粘附连接的可靠性。

（3）对非合作目标近距离自主导航制导控制技术

对空间碎片等非合作目标的接近、操作过程具有一定的复杂性和不可预见性，为保证寄生飞行器能够安全可靠对预定表面着陆，需要对飞行器和目标间的相对位姿进行精确测量与控制，涉及基于视觉相机的三维重构技术、考虑目标形状及相机视场约束的避障及轨道规划技术以及对翻滚目标的精确跟飞停靠技术等关键技术。

5 结束语

基于仿壁虎刚毛干粘附材料的粘附捕获是一种新型的空间碎片清理手段，该捕获方式对于目标外形尺寸、翻滚速度等不确定性因素具有相对较强的适应性，捕获载荷控制方式简单，在轨可操作性强，是未来空间碎片清理，尤其是对具有一定翻滚速度的大型空间碎片清理的一种可行途径。该粘附捕获方式的研究涉及到材料、力学、控制等多个学科的交叉融合，是一项十分具有挑战性的工作，空间碎片清理团队近几年来一直从事该方向的研究，并取得了多项研究成果，目前正在进行关键技术的攻关，期望未来能够实现在轨实际应用。

团队简介

目前，空间碎片清理技术研究团队由四名博士，四名硕士组成，核心成员简介如下：

陈新龙：男，哈尔滨工业大学博士，研究员，钱学森空间技术实验室空间碎片清理技术研究方向负责人。五院科学技术委员会空间安全与维护专业组专家，装发在轨服务重大专项“技术应用试验及支持专家组”副组长，SCI 刊物《Acta Mechanica Sinica》审稿专家。主要从事空间安全与在轨服务领域的新概念航天器总体设计与关键技术等研究工作，发表论文十余篇，获 6 项发明专利授权。

陈维春：男，大连理工大学硕士，高级工程师，主要从事新概念航天器总体设计及热控系统设计、先进星载设备核心技术开发等工作，发表论文十余篇，获国防科学技术进步奖二等奖 1 项，所级技术创新奖三等奖 2 项、所级技术创新奖二等奖 1 项。

朱孟萍：女，北京航空航天大学博士，高工，主要从事航天器动力学与控制方向的相关研究工作，发表论文十余篇，其中 SCI 两篇，任《Journal of the Franklin Institute》、《PartG, Journal of Aerospace Engineering》等期刊审稿专家。

陈大可：男，吉林大学博士，工程师，主要从事航天器电子学系统、信息处理系统设计与研究，发表 EI 检索论文 5 篇。

宋琦：男，北京理工大学博士，高工，主要从事新概念航天器轨道动力学研究，发表论文十余篇，任《航空学报》等期刊审稿专家。

通信地址

朱孟萍，北京海淀区友谊路 104 号院；电话：010-68745835，15210469736；E-mail：
zhumengping@qxslab.cn