

仿壁虎微纳米粘附阵列研究进展

任鸟飞, 汪小华, 王辉静, 单建华

(中国科学院智能机械研究所 仿生感知与控制研究中心, 合肥 230031)

摘要: 壁虎由于脚部精细结构而具有令人惊异的爬行能力, 促使人们开展制造具有相似功能的微纳米粘附阵列的仿生研究。综述了当前国内外学者在该领域内的研究进展, 包括壁虎脚部的结构分析、绒毛的粘附和脱离机理以及仿壁虎粘附阵列的设计准则和制造工艺, 并就该领域发展的方向提出看法。

关键词: 壁虎粘附; 仿生粘着剂; 微纳米绒毛阵列

中图分类号: TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2006) 08-0386-07

Progress on the Micro/Nano-Structures Adhesive Array Mimicking Gecko Foot-Hair

REN Niao-fei, WANG Xiao-hua, WANG Hui-jing, SHAN Jian-hua

(Center for Biomimetic Sensing and Control Research, Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Gecko has amazing climbing ability as a result of elaborate micro- and nano-hairs covering their feet and it has motivated researchers to carry out the fabrication of micro/nano-structures adhesive array with similar abilities. The progress of domestic and foreign scholars made in this domain was summarized, including the structure analysis of the gecko foot, attachment and detachment mechanism of gecko foot-hair, the design details of synthetic gecko foot-hair array and the fabrication methods. The directions of this research domain is concluded.

Key words: gecko adhesive; biomimetic adhesive; micro/nano-hair array

1 引言

自然界有很多擅长爬行的动物, 如甲壳虫、苍蝇、蜘蛛、壁虎等, 它们可以轻松地在很多光滑表面上攀爬。公元前 4 世纪, 亚里士多德就观察到壁虎能够“任意地在树上爬上爬下, 甚至头部朝下”^[1], 而且无论接触表面是潮湿的还是干燥的、光滑的还是粗糙的, 壁虎都能穿梭自如, 这种特异的粘附能力吸引了众多学者的注意。一个

多世纪以来, 探求壁虎粘附奥秘的研究始终是一个热点, 然而直到最近才揭开了这背后的机理——壁虎脚部复杂的分层绒毛结构。通过制造仿壁虎绒毛结构, 就有可能获得高性能的干性粘附剂, 可制造登山鞋、手套、能重复粘贴的绷带等, 进一步可将其应用于爬行机器人^[2-3], 深入未知太空进行考察, 或者代替人类进行日常生活中需要攀爬的危险工作如大楼外清洁、高层急救、水下作业^[2,4]等。

收稿日期: 2005-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90407018)



2 生理特性研究

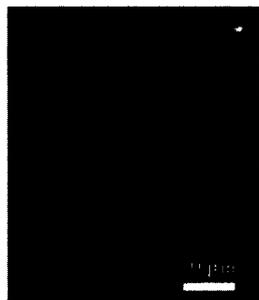
显微镜下(图1^[4])可看到大壁虎脚部约有650万根角蛋白绒毛或者叫刚毛(seta),它们长约30~130 μm,直径约5 μm。每根刚毛在顶端又细分为100~1000根绒毛(spatulae),其末端呈现直径约0.2~0.5 μm的抹刀形状^[5],犹如一个倒立的钝角三角形连接在茎的最末端。刚毛和绒毛由β角蛋白(β-keratin)构成,弹性模量约为4 GPa^[6]。



(a) 大壁虎



(b) 壁虎脚部刚毛阵列



(c) 单根刚毛



(d) 刚毛末端细分的绒毛

图1 壁虎脚趾分层结构

壁虎对各种粗糙度的表面都有很好的适应性,可能就是由这种宏观-μm级、-nm级的分层结构导致的。柔软脚部组织可以适应宏观尺度的粗糙度,μm级绒毛适应μm尺度的粗糙度并给予nm级绒毛一定的弹性支撑,nm级绒毛则去适应nm尺度的粗糙度,保证与基底实现紧密的接触^[6]。卡内基梅隆大学的Gaurav Shah等人采用有限元法^[7]分析了单根纳米绒毛、微米刚毛及微纳米双层结构接触粗糙表面时的变形,结果双层结构偏转位移比单根微米刚毛、纳米绒毛的位移总和还要大,从理论

上验证了双层结构能够促进对粗糙表面的适应性。

我们很自然把壁虎脚部近似看作具有粘性的条带,推测在布满灰尘的地方行走时一定会粘上很多颗粒妨碍再次粘附。但路易斯 & 克拉克学院的W R Hansen等人的观察结果并非如此,虽然将壁虎脚部沾满颗粒,但爬行几步后就可恢复粘附能力^[8],他们把从壁虎脚部分离出的刚毛阵列污染后作粘附效果分析,认为刚毛阵列的确具有自清洁能力,且是阵列结构的本质属性^[8]。实验中将壁虎的刚毛从机体上剥离,只要保持其潮湿就能维持粘附能力一个多月^[9]。

3 粘附与脱离

2000年,路易斯 & 克拉克学院的Kellar Autumn等人利用MEMS技术制造的高精度二维压阻悬臂梁测量了壁虎单根刚毛的粘附力,最大值为 $194 \pm 25 \mu\text{N}$ ^[5]。所有刚毛同时粘附并达到最大值时,壁虎的脚掌可产生约1300 N的粘附力。

3.1 粘附机理

壁虎的脚部怎样能形成如此强大的粘附力呢?人们对粘附机理先后作了多种假定。(1)气压造成的吸力:对单根绒毛粘附力测量的结果为10个大气压^[10],远大于一个大气压,且在真空中刚毛也能实现粘附。(2)摩擦力:壁虎绒毛是由角蛋白构成的,这种材料和硅之间的摩擦系数很小,能够提供的摩擦力无法与测量结果相比;摩擦力也无法解释壁虎在天花板上的爬行;假设微锁对其粘附有一定贡献,但是绒毛却可以粘附在抛光的玻璃上。(3)静电引力:使用X射线轰击靶材消除静电引力后,在离子化的条件下刚毛仍然能够实现粘附。(4)粘胶作用:壁虎的脚底根本不存在腺体^[5]。(5)毛细作用力:壁虎刚毛对亲水表面和疏水表面间的粘附力相差仅为2%^[1],而疏水表面与亲水表面间、疏水表面与疏水表面间的毛细作用力相差则是非常大的。

假设为范德华力:壁虎脚部的粘附力随着所接触基底的表面能的增加而增加^[9],Kellar Autumn等人利用单根刚毛的粘附力,使用JKR模型对抹刀形顶端的半径进行了近似估计,结果为0.13~0.16 μm^[1],与实验测量值很接近。他们使用两种



不同的疏水性聚合物（硅树脂橡胶和聚酯树脂）制造了仿壁虎的绒毛结构，并测量其与 AFM 探针间的粘附力，发现 47%~63% 的粘附力都是由范德华力提供的^[1]。在这几种主要证据的支持下，范德华力被普遍认为是壁虎实现粘附的主要机理。

Kellar Autumn 发现壁虎在爬行时会充分伸展脚趾，说明壁虎的粘附需要一定的预压力^[5]。它们对单根刚毛施加垂直方向的预紧力，使其粘附在基底（即力传感器表面）上，再沿平行基底的方向拖拉刚毛直至脱离基底，其间粘附力的变化见图 2^[5]。刚毛被向下拖动过程中，平行于基底方向的粘附力线性增加，在向下滑动约 5 μm 处粘附力达最大，约为初始粘附力的 10 倍^[5]。究其原因可能是当刚毛被向下拖动的过程中，增加了与基底间真正接触的绒毛数量，造成粘附力的大幅度提高。壁虎活体粘附的时候可能也是如此，斯坦福大学机械工程系的 Y A Liang 等人推测^[9]：刚接触时抹刀形前端仅有一部分接触到表面，如果此时的粘附力不足以支撑壁虎的重量则开始向后拖动脚部，就像试验中在平行拉力作用下的滑动，已粘附的绒毛促使邻近的绒毛也接触表面，直到粘附力能够支撑其身体。所需向后滑动的距离很小，宏观状态下是不可见的。

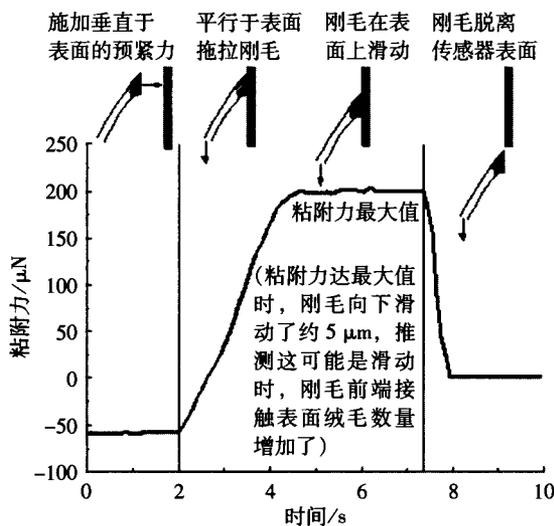


图 2 刚毛沿基底下拉过程中粘附力变化曲线

3.2 脱离机理

壁虎在竖直的墙壁上能以 77 cm/s 的速度快速

爬行^[11]，在没有任何测量到的外拉力下刚毛 15 ms 内能轻松脱离基底^[10]。那么爬行中迅速的脱离是怎样实现的呢？Kellar Autumn 等人发现^[5]，当刚毛与基底成 30°角时会突然发生脱离，说明可能存在脱离的临界角。整个脱离过程就像是在剥离条带，这可能是随着角度的增加，刚毛边缘的应力增加，导致绒毛与基底间的连接出现裂纹，裂纹逐渐增大造成脱离^[10]。据此他们猜测壁虎先将预备脱离的刚毛放置到临界角度，再将粘着的刚毛分批脱离，即某一时刻只剥离很小部分粘着的刚毛^[5]。这种剥离行为如何使得刚毛正好达到脱离的临界角，目前还是个谜。

2003 年，德国马克思普朗克金属研究所的高华健等人采用有限元模型分析了单根绒毛与基底间作用力随拖拉角度变化的情况^[12]，得到在 30°时粘着力最大的结论，与上面的观察现象吻合；同时在 90°时粘着力最小，据此他们认为壁虎控制肌肉在粘附基底时是以与基底成 30°的力下拉实现更牢固的粘着，脱离时则采用竖直剥离的动作，由于此时的粘着力相对于最大粘着力要小得多，再加上扭转力矩的作用易于实现脱离，这与他们观察壁虎脚部脱离时的情况一致。

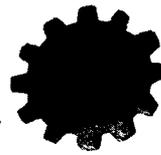
2003 年卡内基梅隆大学的 Metin Sitti 等人基于简化的单根有倾角绒毛的悬臂梁模型进行力学分析，提出一种可能的脱离机理^[13-14]：对粘着的绒毛施加平行于基底方向的推力或者拉力时，由于摩擦力的方向发生变化，绒毛受到的垂直方向的作用力存在明显的差别，推测如果正确施加了推力或者拉力，则无需竖直方向上显著的拉拽绒毛就可能实现脱离。目前关于脱离机理还是众说纷纭，有待进一步的研究。

4 阵列设计与制造

壁虎的粘附阵列是一种性能优异的干性粘着剂，由于是范德华力起主要作用，粘附力主要受绒毛材料和几何形状的影响，这为人们仿制粘附阵列提供了很大的可能性。

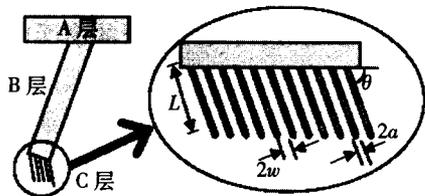
4.1 粘附阵列设计

仿壁虎粘附阵列的设计应使其具有较强的粘附力、可控制脱离、能适应不同粗糙度的表面、自洁

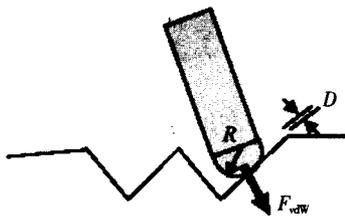


性和耐久性。

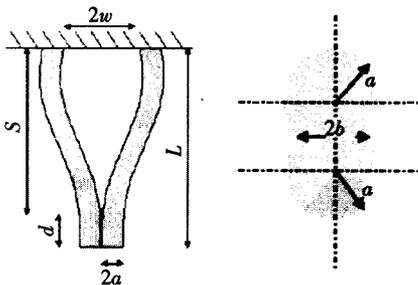
Gaurav J Shah 等人将壁虎的层状阵列简化为图 3 (a) 所示的模型^[6], 其中 L 为 nm 级绒毛的长度; a 为绒毛半径; w 为绒毛间距; θ 为绒毛倾角。nm 级绒毛建模为有倾角的圆柱状悬臂梁, 顶端是个半球体, 如图 3 (b) 所示, 这样更符合人工制造绒毛的实际形状。



(a) 壁虎脚部分层模型



(b) 单根绒毛模型



(c) 绒毛纠结模型

图 3 刚毛和绒毛模型

(1) 采用 MD (Maugis-Dugdale) 模型计算得到, 阵列单位面积的粘附力正比于绒毛密度, 为了得到较大的粘附力当然是采用尽可能大的密度, 但当绒毛过于密集时, 相近的绒毛会彼此吸引而纠结在一起, 所以必须将其隔开一定的距离 w

$$w > \frac{L^2}{a^2} \sqrt{\frac{32\gamma b}{9\pi E}}$$

当绒毛表面能 γ 固定时, 弹性模量 E 越大, 满足

不纠结条件的绒毛间距就越小, 这就在阵列密度和弹性模量之间建立了约束。参数见图 3 (c), b 为绒毛纠结形成接触面的半径。

(2) 运用大挠度理论, 分析不同倾角绒毛在预紧力和粘附力下的偏转, 推断出绒毛的倾角 θ 越小, 达到同样接触效果所需预紧力就越小, 对粗糙表面适应性越好, 而提高材料弹性模量则会减弱其适应性。

(3) 要使绒毛具备自洁性必须提高材料疏水性, 分析得到若要达到同样的水接触角, 弹性模量小的材料可以容许更大的绒毛直径。

(4) 大高宽比的绒毛对粗糙表面适应性强, 但会导致绒毛易纠结并易于磨损。

(5) 分析了阵列单位面积上最大粘附力与绒毛半径和弹性模量的关系, 发现不同弹性模量的材料均是在半径约 $0.1 \mu\text{m}$ 时粘附力达最大。可以看到各参数对粘附效果的影响存在制约关系, 需综合考虑。

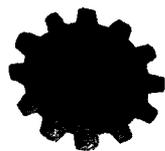
高华健等人^[12]认为, 分析粘附力时使用的经典模型如 JKR (Johnson-Kandall-Roberts) 模型 (1971 年), 采用的是圆柱状绒毛, 其顶端为半球形。半径为 r 的接触面到半球顶点的高度为

$$z = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

为了简化计算采用近似值

$$z = r^2 / 2R$$

计算显示随着绒毛尺寸的减小, 粘附力随之增加, 没有上限值, 这是不合理的。若采用精确的 z 值, 则粘附力会以相应的范德华力大小为上限, 但是当达到最大值时, 绒毛顶端直径需减小到原子间隔的量级, 这说明顶端采用半球形并不理想。他们提出采用平顶形状^[12], 因为平顶接触光滑的刚性基底时不存在应力集中, 无论接触区域多大, 粘附力都能达到范德华力限定的上限。但是平顶设计会导致粘附力对接触区域存在的瑕疵非常敏感, 表面形状的轻微变化、灰尘、残留空气等都会对其有很大的影响。他们计算得到平顶模型不完全接触时的粘附力随半径和接触面积比变化的曲线, 同半球顶端模型相比较, 当绒毛半径相同时, 平顶得到的粘附力远远大于半球顶端, 同时看到当接触面积比不同时, 却几乎是在取相同的绒毛半径时粘附力达最大



值,这就说明可能存在一个临界的绒毛半径能够优化粘附力。采用壁虎的角蛋白材料参数作为绒毛参数时,这个临界值约为 225 nm,正好落在壁虎抹刀形绒毛的半径之内(100~250 nm)。

此外, Metin Sitti 等人采用悬臂梁来模拟绒毛,分析了绒毛防自纠结的条件,绒毛倾角和阵列密度的关系^[13-14]。其他学者也提出不同的模型并进行了分析,包括防止绒毛纠结的阵列间隔结构设计^[15]、接触面粗糙度对粘附力的影响^[16-17]、绒毛顶端形状设计^[18-20]、制造材料参数设计^[20]等。

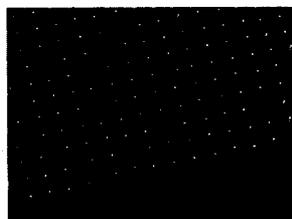
通过以上分析,可以看到仿壁虎绒毛阵列的性能主要依赖于绒毛有较大的高宽比、合适的阵列密度、适宜的绒毛刚度及绒毛有一定的倾角。

4.2 粘附阵列的制造方法

在实验室里已经得到一些绒毛阵列。图 4 (a) 是 2003 年曼彻斯特大学的 A K Geim 等人利用电子束光刻和干法刻蚀得到的聚酰亚胺绒毛阵列^[21],绒毛直径为 0.2~0.4 μm,高度为 0.15~2 μm,当预紧力不小于 50 N·cm⁻² 时,单根能够提供约 70 nN 的粘附力;图 4 (b) 是 2003 年 Carlo Menon 等人使用硅模板得到的直径为 4 μm 的刚毛阵列^[2]。



(a) 纳米绒毛



(b) 微米刚毛

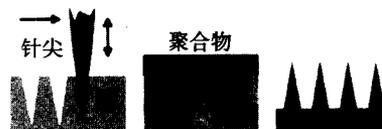
图 4 人造仿壁虎粘附阵列

2003 年 Metin Sitti 在实验的基础上提出了三种制造方法^[22],前两种方法要首先生产主模板,

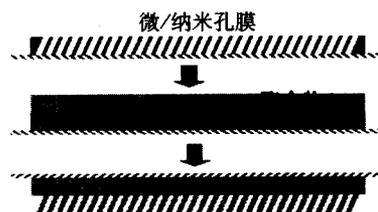
上面有 μm 或者 nm 级尺度的大深宽比的孔阵列,作为生产绒毛阵列的负版,然后用聚合物来灌注成型、烘培,通过剥离或刻蚀与主模板分离。

4.2.1 纳米雕刻法 (图 5 (a))

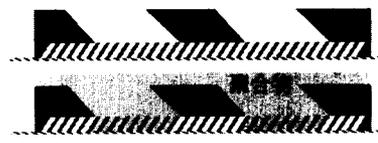
用一种纳米尖端,如原子力显微镜或者隧道扫描显微镜的针尖,纳米尖端阵列或者任何具有大深宽比的微纳米结构阵列,将其在柔软的蜡平面上压槽,即得到主模板。这种方法在制造具有不同倾角和非对称的纳米阵列时具有很强的灵活性,可以在任何表面或者某指定区域内进行,但是它只能生产几种特定高宽比率的绒毛阵列,可得到的阵列面积小,生产速度也较慢。



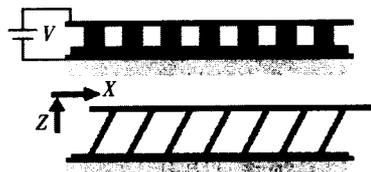
(a) 纳米雕刻法



(b) 纳米膜铸造法



(c) 合成纳米膜铸造法



(d) 基于微纳米绒毛生长的定向自装配法

图 5 阵列制造方法



4.2.2 自组织微纳米孔膜铸造法

以具有大高宽比孔阵列的膜为主模板 (图 5 (b)), 如氧化铝膜和聚碳酸酯膜: 铝膜上的孔径是 nm 级, 具有很高的深宽比, 得到的阵列绒毛易于纠结; 聚碳酸酯膜上的孔径较大, 深宽比较小, 但是这些孔的倾角及间隔都是随机的, 很难得到间隔均匀、方向一致的绒毛阵列。为得到类壁虎的分层绒毛阵列, 可将具有纳米孔和微米孔的膜键合在一起作为模板 (图 5 (c)), 如果能实现的话, 将是很有前途的大批量生产方法。

4.2.3 基于微纳米绒毛生长的定向自装配法 (图 5 (d))

在金属极板上喷涂一薄层液态聚合物膜, 另一极板相距很近, 然后加上直流电场, 微纳米绒毛就开始生长直到碰到上层极板, 精确控制时间就能得到理想的结果。把方法二制造的微纳米绒毛在软烘培之后, 放置于两极板间, 通过精确控制上层金属极板的移动, 分别在 Z 向和 X 向拉伸绒毛, 产生需要的拉力和剪切力, 最后通过硬烘培即可成型。拉伸的长度受到纳米绒毛数量、聚合物表面能量及拉伸速度的影响。该方法还处于研究阶段, 然而一旦实现, 将能控制绒毛的高宽比、得到精确一致的倾角和间距。

5 讨论

人们已经弄清楚粘附力的来源, 但是它受到壁虎绒毛参数怎样的影响呢? 爬行中快速的脱离究竟基于什么机理呢? 相对而言, 脱离机理显得更为重要, 毕竟一些常用的粘胶就具有远大于壁虎的粘附能力。人们渴望掌握这种低耗能的粘附和脱离, 并将其用于仿生机器人。进行绒毛阵列设计时, 多数模型都是对单根或单层绒毛分析, 在两层连接处却乏人问津, 而正是这种分层结构保证了壁虎对各种粗糙表面的适应性, 这将是后续研究中的重点。绒毛阵列已处于 nm 尺度下, 但人们还是采用连续介质力学分析其受力, 这样的处理是否合理、所得到的结果可靠与否, 都有待理论和实验的检验。实验室得到的绒毛阵列, 高宽比偏小造成粘附力较小, 对粗糙表面适应性也不好。图 4 (a) 中的阵列在预紧力作用下粘附到基底上, 显微镜下发现绒毛易

于倒伏和彼此纠结^[21], 这对再次粘附有巨大的影响。要制作可重复、耐用的阵列, 需要对工艺技术进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 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 of the USA*, 2002, 99 (19): 12252-12256.
- [2] MENON C, MURPHY M, SITTI M. Gecko inspired surface climbing robots [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Shenyang, China, 2004: 431-436.
- [3] DALTORIO K A, HORCHLER A D, GORB S, *et al.* A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet [C] // *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'05)*. Edmonton, Canada, 2005: 3648-3653.
- [4] BILLINGS T L, MCGOWN, YORK C L, *et al.* Gecko-tech in planetary exploration and base operations [C] // *Space 2002 and robotics 2002*. Albuquerque, 2002: 64-70.
- [5] AUTUMN K, LIANG Y A, HSIEH T. Adhesive force of a single gecko foot-hair [J]. *Nature*, 2000 (405): 681-685.
- [6] SHAH G J, SITTI M. Modeling and design of biomimetic adhesives inspired by gecko foot-hairs [C] // *Proceedings of the IEEE conference on robotics and biomimetics*. Shenyang, China, 2004: 873-878.
- [7] SHAH G, LEE I. Finite element analysis of gecko foot hairs for dry adhesive design and fabrication [EB/OL]. <http://www.andrew.cmu.edu/user/gshah/>, 2004-10-15.
- [8] HANSEN W R, AUTUMN K. Evidence for self-cleaning in gecko setae [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2005, 102 (2): 385-389.
- [9] LIANG Y A, AUTUMN K, HSIEH S T, *et al.* Adhesion force measurements on single gecko setae [C] // *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head Island, South Carolina, 2000: 33-38.
- [10] AUTUMN K, PEATTIE A M. Mechanisms of adhesion in geckos [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002 (42): 1081-1090.
- [11] AUTUMN K, HSIEH S T, DUDEK D M, *et al.* Dynamics of geckos running vertically [J]. *American Zoologist*, 1999, 38 (5): 84.
- [12] GAO H J, WANG X, YAO H M. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos [J]. *Mechanics of Materials*, 2005 (37): 275-285.
- [13] SITTI M, FEARING R S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003, 17 (8): 1055-1074.
- [14] SITTI M, Fearing R S. Synthetic gecko foot-hair micro/



- nano-structures for future wall-climbing robots [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan, 2003: 1164-1170.
- [15] MAJIDI C, GROFF R, FEARING R. Clumping and packing of hair arrays manufactured by nanocasting [C] //Proceedings of 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Expositio. Anaheim, California, USA, 2004: 1-6.
- [16] PERSSON B N J. On the mechanism of adhesion in biological systems [J]. Journal of Chemical Physics, 2003, 118 (16): 7614-7621.
- [17] CAMPOLO D, JONES S, FEARING R S. Fabrication of gecko foot-hair like nano structures and adhesion to random rough surfaces [C] //IEEE Nanotechnology. 2003: 856-859.
- [18] GAO H J, YAO H M. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2004, 101 (21): 7851-7856.
- [19] HUI C Y, GLASSMAKER N J, TANG T, *et al.* Design of biomimetic fibrillar interfaces: 2. Mechanics of enhanced adhesion [J]. J R Soc Interface, 2004 (49): 35-48.
- [20] GLASSMAKER N J, JAGOTA A, HUI C Y, *et al.* Design of biomimetic fibrillar interfaces: 1. Making contact [J]. J R Soc Interface, 2004 (48): 22-33.
- [21] GEIM A K, DUBONOS S V, GRIGORIEVA I V, *et al.* Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair [J]. Nature materials, 2003 (2): 461-463.
- [22] SITI M. High aspect ratio polymer micro/nano-structure manufacturing using nanoembossing, nano-molding and directed self-assembly [C] //IEEE/ASME Advanced Mechatronics Conference. Kobe, Japan, 2003: 886-890.

作者简介:

任鸟飞 (1980—), 女, 河南南阳人, 现在合肥智能机械研究所攻读硕士, 研究方向为微机械系统, E-mail: nrfren@iim.ac.cn, Tel: 0551-5591163。

(上接第 365 页)

- [5] 郭维廉, 梁惠来, 张世林, 等. 共振隧穿二极管 [J]. 微纳电子技术, 2002, 39 (5): 11-36.
- [6] SMET J H, BROEKAERT T P E, FONSTAD C G. Peak-to-valley current ratios as high as 50:1 at room temperature in pseudomorphic $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}/\text{AlAs}/\text{InAs}$ resonant tunneling diodes [J]. J Appl Phys, 1992, 71 (5): 2475-2477.
- [7] SU Y K, CHANG J R, LU Y T, *et al.* Novel $\text{AlInAsSb}/\text{In}$

GaAs double-barrier resonant tunneling diode with high peak-to-valley current ratio at room temperature [J]. IEEE Electron Device Letters, 2000, 21 (4): 146-148.

作者简介:

郭维廉 (1929—), 男, 天津人, 教授, 天津大学信息工程学院教授, 天津工业大学信息与通讯工程学院客座教授, 中国电子科技集团公司第 13 研究所客座研究员, 研究方向为化合物高速器件、RTD 及其集成技术。

(上接第 371 页)

了阐述。

参考文献:

- [1] LIPPENS D, BARBIER E, MOUNAIX P. Fabrication of high-performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ resonant tunneling diode using a microwave-compatible technology [J]. IEEE Electron Device Letters, 1991, 12 (3): 114-116.
- [2] CHEN C L, MATHEWS R H, MAHONEY L J, *et al.* New self-aligned planar resonant-tunneling diodes for monolithic circuits [J]. IEEE Electron Device Letters, 1997, 18 (10): 489-491.
- [3] CHEN C L, MAHONEY L J, CALAWA, *et al.* Planer integration of a resonant tunneling diode with pHEMT using a novel proton implantation technique [J]. IEEE Electron Device Letters, 1998, 19 (12): 478-480.
- [4] SMITH R P, ALLEN S T, REDDY M, *et al.* 0.1 μm Schottky-collector AlAs/GaAs resonant tunneling diodes [J]. IEEE Electron Device Letters, 1994, 15 (8): 295-297.
- [5] REDDY M, MONDRY M J, RODWELL M J W, *et al.* Fabrication and DC microwave characteristics of submicron Schottky-collector $\text{AlAs}/\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}/\text{InP}$ resonant tunneling diodes [J]. Appl Physics, 1995, 77 (9): 4819-4821.
- [6] 雷培明, SUBRAMANIAM S, BERNSTEIN G H, *et al.* $\text{In-GaAs}/\text{AlAs}$ 双势垒 RTD 单片高速逻辑 IC 的研制 [J]. 微电子学与计算机, 1996 (2): 1-5.
- [7] BERGMAN J I, CHANG J, JOO Y, *et al.* RTD/CMOS nano-electronic circuits: Thin-film InP -based resonant tunneling diodes integrated with CMOS circuits [J]. IEEE Electron Device Letters, 1999, 20 (3): 119-121.

作者简介:

郭维廉 (1929—), 男, 天津人, 教授, 天津大学信息工程学院教授, 天津工业大学信息与通讯工程学院客座教授, 中国电子科技集团公司第 13 研究所客座研究员, 研究方向为化合物高速器件、RTD 及其集成技术。