# 生物黏附与仿生黏附力学的进展[1)]

陈少华 *,2)　苏爱嘉 †,3)

*(中国科学院力学研究所，非线性力学国家重点实验室，北京 100080)

†(香港大学机械工程系，香港)

陈少华，男，1972 年出生．1999 年博士毕业于北京交通大学固体力学专业，2001 年中国科学院力学研究所博士后出站并留力学所工作至今，2003 年至 2005 年于德国马普金属研究所访问学者．现任中科院力学所副研究员，中科院力学所学位委员会委员，中国力学学会理性力学和力学中数学方法专业委员会委员．近年来主要侧重于仿生力学及微纳米尺度力学的研究．

**摘要**　介绍了动物及昆虫黏附能力及黏附系统的实验研究，重点介绍了力学仿生动物及昆虫的黏附能力及黏附系统的研究工作．还简单介绍实验室仿生制备及仿生黏附潜在的用途，并对仿生黏附力学新的研究方向提出建议．

**关键词**　黏附力学，仿生力学，壁虎及昆虫，微型机器人

# DEVELOPMENT OF MECHANICS OF BIO-ADHESION AND BIOMIMETIC ADHESION[1)]

CHEN Shaohua*,2)　SOH Aijia†,3)

*(The State Key Laboratory of Non-linear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

†(Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong)

**Abstract**　In the present paper, the authors first introduce some experiments on adhesion abilities and related mechanisms for animals and insects. Then we focus on some theoretical studies on bio-adhesion. The biomimetic manufacturing method and its promising applications are discussed in the last section, together with some suggestions on the study of biomimetic adhesion mechanics.

**Key words**　adhesion mechanics, biomimetic mechanics, gecko and insect, micro-robot

## 引　言

很多动物及昆虫在自然界“适者生存”及长时间演化中练就了一身特殊的本领，例如：壁虎、蜘蛛、苍蝇、蚂蚁、蚱蜢等动物及昆虫，它们不仅能够在垂直的物体表面停留及爬行，而且能够倒挂在天花板上运动自如．多少年来，人们对它们飞檐走壁的秘诀一直众说纷纭，尤其是体重较大的壁虎，是什么

本文于 2007–03–13 收到．

1) 国家自然科学基金 (10672165) 及中国科学院方向性项目基金 (KJCX2-YW-M04SC) 资助．

2) E-mail: chenshaohua72@hotmail.com

3) E-mail: aksoh@hkucc.hku.hk

样的黏着力使得它们具有人类所不及的能力呢？起先人们认为壁虎能够在很滑的天花板上，靠的是脚掌上神奇的吸盘，其实情况并非如此. 另一方面，这些动物及昆虫在捕食、逃跑等行为中，必须快速地运动，它们又是如何能够实现黏附及脱黏的快速交替呢？研究动物及昆虫这种特殊的能力，对我们研究爬壁机器人、超强的黏附材料及黏附胶带等，都将具有很重要的意义.

长期以来，很多国内外科学工作者一直致力于研究和仿生动物及昆虫这种“飞檐走壁”的能力，并试图从各个方面，利用各种手段，揭示它们的黏附机理，而为人类所利用. 由于近年来实验设备和实验观察的进步，此类的研究也取得了非常大的进展. 本文将主要介绍最近几年来有关生物黏附及仿生黏附力学方面的工作，包括实验发现、仿生力学理论分析及一些初步的应用，并对仿生黏附力学的进一步研究提出建议.

## 1 实验研究

对动物及昆虫黏附能力的研究发现，黏附系统按照与物体表面接触的情况可划分为两类：一类是毛发状的，如壁虎、苍蝇等脚部最小黏附结构为多个绒毛；一类是表面光滑的，如蚱蜢、蝉等脚部为多个具有光滑表面的结构. 黏附机理可以分为两类：一类为干黏附，即依靠分子之间的范德华力，如壁虎、蜘蛛等；一类是湿黏附，即依靠毛细力的作用，如蚂蚁、苍蝇、树蛙等.

21 世纪初期，美国加利福尼亚大学伯克利分校的科学家 Autumn 等 [1,2] 研究发现，壁虎能够头朝下停滞在垂直的表面，甚至倒挂在天花板上的黏附能力，来源于壁虎脚部大量的刚毛与物体表面产生的分子之间的吸附力，即范德华力. 范德华力是中性分子彼此距离非常近时，产生的一种微弱电磁引力，大量范德华力的累积就可以支撑壁虎的体重. 范德华力的机理意味着超强黏附与壁虎脚部最小末端的尺寸及形状相关，而与表面化学性质基本无关. 事实上，壁虎脚趾生有数以百万计的细小刚毛，每个刚毛长 30 ~130$\mu$m，直径大约为头发丝的 1/10. 刚毛的顶部又分叉出几百个更小的铲状分支的绒毛，大约 0.2~0.5 $\mu$m 粗，如图 1 所示. Autumn 等人通过实验进一步发现，单根刚毛的黏附力能够达到几十微牛，而壁虎的体重典型的为几十到一百多克，如果足够多的刚毛与物体密切接触，则足够支撑壁虎的体重. 范德华力在间隙大于原子距离时，就变得非常弱，所以要求黏附系统与物体表面密切接触，如果黏附系统足够软并能产生很大的变形，就能够保证相对较大的接触面积. 壁虎具有很多铲状绒毛，完全能够产生足够大的接触面积，而获得足够的黏附力.

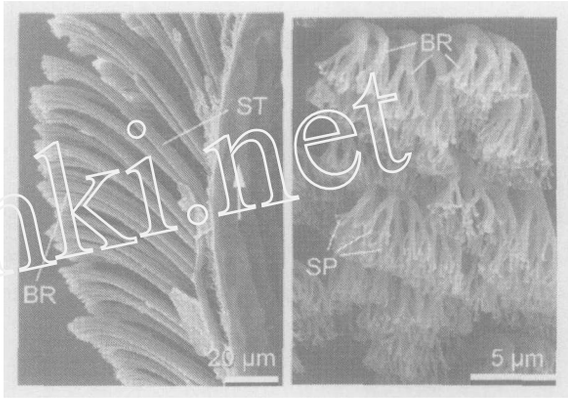



图 1 壁虎脚部的刚毛 (ST) 及铲状分枝 (SP)

另一种利用干黏附生存的动物是跳跃蜘蛛. 2003 年德国科学家 Kesel 等 [3] 利用原子力显微镜 (AFM)、扫描电镜 (SEM) 对跳跃蜘蛛的脚部进行了观察，他们发现蜘蛛的脚部生长有适合于粗糙表面行走的趾骨爪，分布在脚趾的边缘，但在光滑的表面，它们则利用脚部刚毛来实现黏附，刚毛生长在脚趾的中间部位，每个刚毛刷子的末端又长有很多个细小的绒毛，在 $1.7\times10^5\,\mathrm{nm}^2$ 的平均面积上，长有约 624 000 个绒毛. 通过原子力显微镜进行实验发现，单个绒毛垂直于物体表面的黏附力能够达到 38.12 nN，所有的黏附力累积达到 $2.38\times10^{-2}$ N，而跳跃蜘蛛的平均体重为 15.1 mg，安全系数达到 160 倍左右.

另一类动物及昆虫，它们则通过分泌神秘的黏附液体来达到在任意表面行走的能力，即湿黏附，例如苍蝇、树蛙、蚂蚁等.

2002 年德国科学家 Niederegger 等 [4] 对大苍蝇刚毛的接触行为进行了原子力显微镜的研究，目的是观察大苍蝇刚毛与光滑表面的接触方式. 结果发现脚垫上只需要 1/3 的刚毛与光滑的玻璃面接触就足以支撑苍蝇的体重. 图 2 给出了扫面电镜观察到的大苍蝇脚垫与玻璃面接触情况，其中 A 图显示了整个脚垫与玻璃表面黏附的情况，内插图表示的是脚垫的剖面图，$\alpha$ 表示单个刚毛的斜率. B 图表示右边脚垫的情况；C 图为脚垫的刚毛. 他们进一步讨论了苍蝇黏附系统末端刚毛的排列方向，发现作用在脚垫上的力的方向与刚毛的排列方向最接近，

目的是使得铲状的末端与表面达到最优接触，另外在接触面上释放神秘的液体. 通过滑移运动，使得液体从末端方向流出，并在刚毛与基底之间优化液体膜厚度. 他们认为释放的液体不仅仅是黏附的需要，另一方面也润湿刚毛而保持柔性.

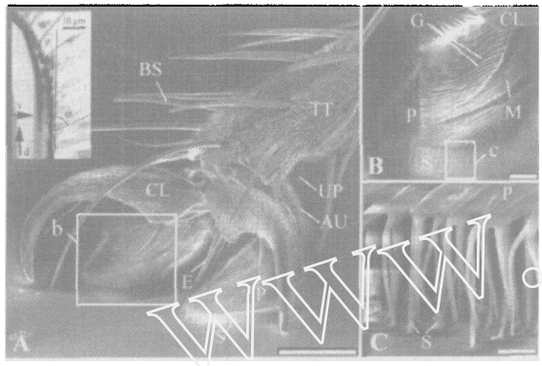



图 2　苍蝇脚垫与玻璃接触

壁虎、跳跃蜘蛛、大苍蝇脚部微结构的 SEM 图显示，无论是利用干黏附还是湿黏附的原理进行黏附，最末端的黏附系统都属于毛发状表面；另一类黏附系统则具有光滑的表面，覆盖在高度易变形的材料上，同样这种设计能够与不同的表面形成非常强的黏附，例如蚱蜢就属于此类. 2000 年德国科学家 Gorb 等 [5] 对蚱蜢黏附系统的摩擦性能进行了研究，他们发现蚱蜢的脚部黏附系统是很多个六边形的光滑表皮覆盖在多个成一定角度排列的杆状结构的复合材料上，杆状纤维之间充满了液体. 如图 3 所示.

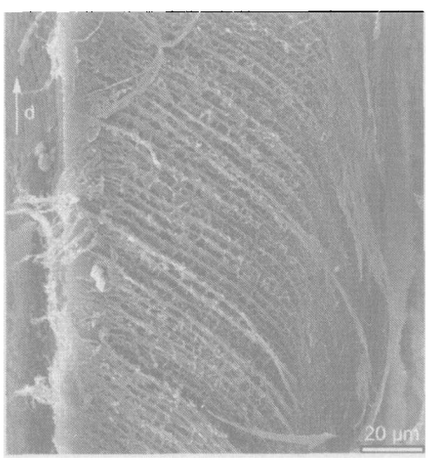



图 3　蚱蜢脚部微结构

英国科学家 Smith 等 [6] 对树蛙的黏附系统进行了一系列的研究，他们利用不同体重、不同种类的树蛙作为研究对象，分析了不同体重及种类的树蛙，它们脚部黏附系统的不同特征及黏附强度，发现黏附系统形状基本相似，但也有一些不同的地方，如黏附垫的沟槽大小等. 对于较大的树蛙，它们在光滑的旋转平台上的坚持力度明显减小，但单位面积的黏附力增大，说明了大树蛙的脚垫黏附更大.

无论末端黏附系统属于毛发状表面，还是光滑表面，从它们的排列或内部微结构看，都可以认为是一种各向异性组织或结构.

## 2　力学模型

实验发现动物及昆虫这种超强的黏附能力，一方面与它们黏附系统的结构、尺寸相关，另一方面与微纳米尺度下不容忽视的范德华力、毛细力、表面能等相关，从而引起了很多力学家及生物学家的关注，仿生黏附力学因此成为一个日益受到关注的重要领域，具有很强的应用前景.

### 2.1　单根刚毛的力学分析

#### 2.1.1　不同尖端形状的刚毛

实验显示不同动物及昆虫的最小黏附单元的末端形状各异，这可能与它们的体重、生存环境及黏附机理等密切相关. 黏附能力与形状的关系成为力学家们首先考虑的问题，形状如何影响黏附力的大小？动物及昆虫是如何利用不同的形状获得必需的黏附力？

2005 年德国科学家 Arzt 等 [7] 对单个黏附刚毛的形状对拉脱力 (接触物体突然分开时的外界拉力) 的影响进行了分析，他们研究了球形、环形、平压头、吸杯及弹性带等形状的刚毛与基底的黏附接触拉脱力，如图 4 所示. 对于具有半径为 $R$ 球体末端形状的弹性刚毛与一个半无限大弹性空间接触模型，见图 4(a)，拉脱力表示为

$$P_c = -\frac{3}{2}\pi\gamma R \tag{1}$$

其中 $\gamma$ 为黏附能，可以表示为 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$，$\gamma_1$，$\gamma_2$，$\gamma_{12}$ 分别为上下两个弹性体的表面能及它们之间的界面能，方程 (1) 中的负号表示拉力.

对于平压头刚毛与弹性半空间接触情况，见图 4(b) 所示，拉脱力可以近似表示为

$$P_c = -\sqrt{8\pi E^* R^3 \gamma}$$

其中 $E^* = [(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2]^{-1}$，$E_1$，$\nu_1$，$E_2$，$\nu_2$ 分别为上下两种材料的杨氏模量及泊松比.

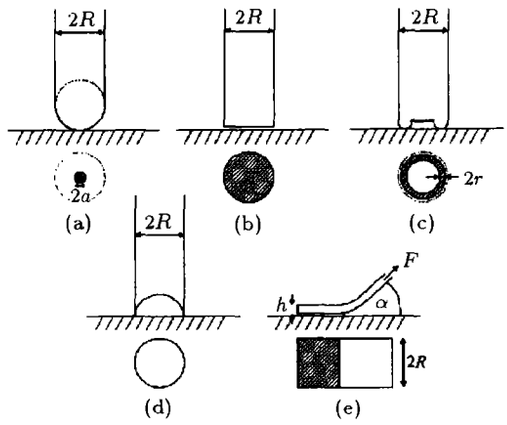



图 4 不同形状的刚毛与表面接触

对于水平柱状的刚毛与半无限空间线性接触的解 (平面应变问题)，单位长度拉脱力为

$$P_{cl} = -\frac{3}{2}(\pi\gamma^2 E^* R/2)^{1/3}$$

利用上述解, 可以近似地求得环形尖端的刚毛与弹性半空间接触模型的拉脱力. 假设上述圆柱的半径为 $r$，且 $r << R$, 如图 4(c) 所示，那么接触长度可以近似认为是 $2\pi R$, 对应环形尖端刚毛的拉脱力可以表示为

$$P_c = -3(\pi E^* \gamma^2 r/2)^{1/3}\pi R$$

对于如图 4(d) 所示的吸杯状末端的刚毛与基底之间的拉脱力与范德华力无关, 而与吸杯外部及内部的压力差 $\Delta P$ 相关, 相应的拉脱力为 $P_c = -\pi R^2 \Delta P$.

图 4(e) 所示的弹性条带与基底接触问题的拉脱力为 $P_c = -2\gamma R g(\alpha, \lambda)$. 其中

$$g(\alpha, \lambda) = \frac{2\sin\alpha}{\sqrt{(1-\cos\alpha)^2 + 2\lambda + (1-\cos\alpha)}}$$

$\alpha$ 表示撕裂角度，$\lambda$ 定义为 $\gamma/Eh$, 参数的定义参见图 4(e).

### 2.1.2 单根刚毛或绒毛的尺寸及形状优化对黏附力影响

我们知道，动物及昆虫脚部最小黏附系统的尺寸一般在几百个纳米量级，之所以需要这么小的尺寸来实现黏附，力学工作者通过力学建模解释了此微小尺寸的奥秘. 首先德国科学家 Persson[8] 对纳米黏附进行了研究，他采用一个简单的力学模型，即一个半径为 $R$ 的刚性圆盘与一个弹性基底接触，如图 5 所示，发现黏附接触区内的应力分布将随着圆盘半径的减小而增大，当半径减小到一个临界值 $R_c$ 时，黏附接触区内的应力均匀达到界面黏附的理论强度 $\sigma_0$, 其中 $\sigma_0 = \gamma/a$, $a$ 为表面之间分子有效作用距离，$\gamma$ 为黏附能. 当圆盘的半径小于这一临界尺寸时，接触区内的应力为均匀分布的理论强度 $\sigma_0$, 与圆盘半径无关.

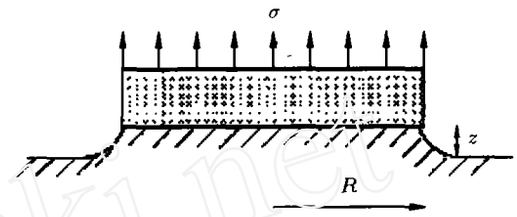



图 5 半径为 $R$ 的刚性圆盘与弹性基底接触

美国布朗大学的高华健等 [9] 进一步利用经典 JKR, MD 及 DMT 理论，分析了单根刚毛与基底接触，当刚毛尺寸减小时最大黏附强度的极限问题. 他们发现当刚毛的尺寸减小，所预测的黏附强度提高，但没有极限，而是趋于无穷，这与界面强度为有限值相矛盾. 进一步研究发现，主要是由于经典理论对球形表面利用了抛物线假设，即具有直径为 $2R$ 球形表面，确切的表面轮廓线方程为 $z = R - \sqrt{R^2 - r^2}$. 而经典理论，为了求解的方便，利用了抛物线假设，即 $z = r^2/2R$. 当利用确切的球形轮廓线方程时，可以预测，当 $R$ 减小到一定值时，最大的黏附强度为黏附界面的理论强度 $\sigma_0$.

为什么壁虎脚部最小黏附系统 (绒毛) 尺寸仅为几百个纳米？文献 [9] 利用一个半径为 $R$ 弹性圆柱与一个刚性基底的接触模型，考虑接触的非完美性，即黏附接触区存在非黏附缺陷，假设黏附半径为 $a = \alpha R$, $0 < \alpha < 1$, 如图 6 所示，最终发现黏附接触区内应力均匀达到理论强度 $\sigma_0$ 时的临界圆柱半径为 $R_{cr} = \beta^2 \dfrac{\Delta\gamma E^*}{\sigma_0^2}$. 此时的拉脱力为 $P_c = \sigma_0 \pi a^2$.

假设真实的接触面积为总横截面积的 50%, 也就是 $\alpha \cong 0.7$, 利用壁虎脚部黏附参数 $\sigma_0 = 20\,\mathrm{MPa}$, $\Delta\gamma = 0.01\mathrm{J/m^2}$, $E^* = 2\,\mathrm{GPa}$, 那么接触界面处的应力均匀达到理论强度的临界绒毛尺寸为 $R_{cr} \cong 225\,\mathrm{nm}$. 这个尺寸与实验发现的壁虎脚部最小单元的绒毛尺寸 (100~250 nm) 非常接近. 此分析说明了，长时间的进化，壁虎脚部绒毛结构可能采用了黏附强度最优化设计.

显然，刚毛末端的形状对黏附强度有一定的影响. 高华健等 [10] 对单根纤维与基底黏附接触问题进行了研究，着重考虑纤维尖端形状的优化，最终发现可以设计一种最优化的形状使得拉脱力达到理论值，我们称该形状为非奇异性形状，即具有该形

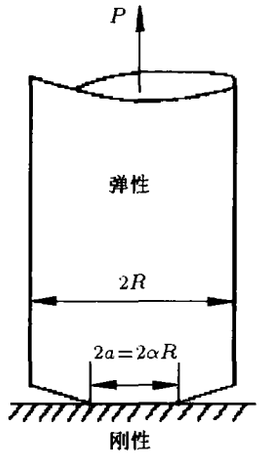
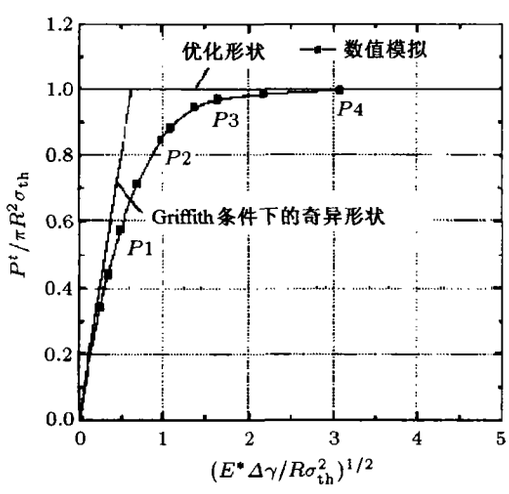


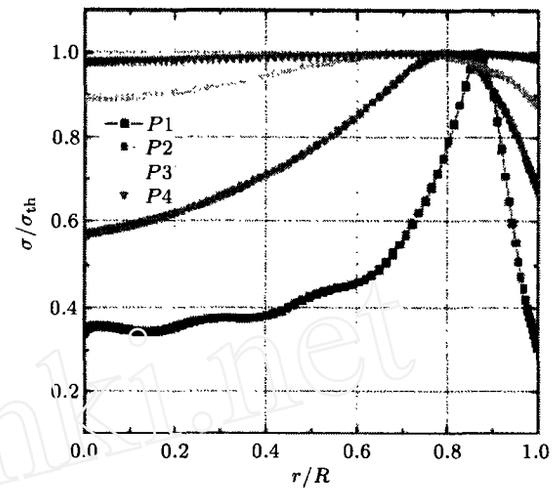

图 6　弹性圆柱与刚性基底的非完美接触

状的纤维与基底脱黏时，界面均匀达到理论强度，而不是黏附界面处裂纹向前扩展破坏. 该形状在宏观尺度很不稳定，因为设计上稍不完美，就会变为奇异形状，且对拉脱力影响非常大. 他们发现当纤维的尺寸逐渐减小时，形状对拉脱强度的影响越来越小. 总的来说，要设计最优化的黏附，可以通过形状的优化及尺寸的减小两个手段来实现，也可以同时考虑两个方面. 对于接触尺度比较大的情况，我们可以通过形状优化来实现黏附优化；对于尺度小的情况，可以通过尺寸的减小来实现优化黏附设计，后一点对应于生物黏附系统的设计.

图 7 表示具有奇异形状的单根纤维与基底之间的黏附强度如何达到饱和的几种情况，即达到理论强度. 图 7(a) 表示归一化的拉脱力与无量纲化的参数 $(E^*\Delta\gamma/R\sigma_{th}^2)^{1/2}$ 的关系，由图中可以看出，随着纤维半径 $R$ 的减小，拉脱力越来越趋近于理论拉脱力，$P1, P2, P3, P4$ 分别表示不同半径的情况，对应




(a)




(b)

图 7　不同半径的单根纤维与基底之间的黏附强度大小及接触面应力分布

于不同半径情况的界面应力分布由图 7(b) 表示，可以看出，当半径越来越小时，界面上的应力分布趋近于均匀分布，且趋近于理论黏附强度 $\sigma_{th}$.

## 2.2　接触细化

很多学者认为，壁虎、苍蝇、蜘蛛等动物及昆虫之所以具有很强的吸附能力，能够吸附在垂直的墙壁，甚至倒挂在天花板上，原因在于它们脚部多个刚毛共同作用的结果，生物学家及力学家们根据这些动物脚部多密集刚毛的特征，建立了接触细化的力学模型，认为将一个大尺度的接触分成多个小尺度的接触，能够有效地提高黏附力. 最具代表性的工作是德国科学家 Arzt 等 [11] 的研究，他们分析了如图 8 所示的两种接触细化方法：尖端具有半球形状的刚毛自相似细化及等曲率细化，利用接触力学

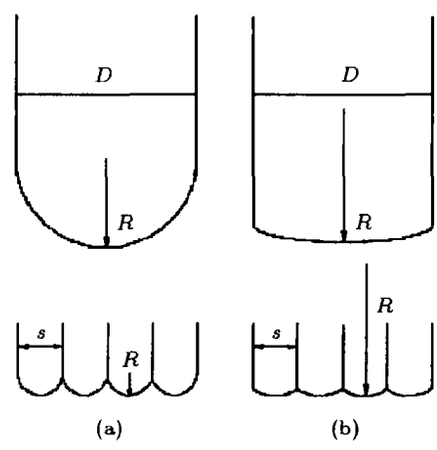



图 8　自相似及等曲率接触细化

的理论知识，给出了不同动物及昆虫的体重与脚部刚毛密度的关系，并与实验结果比较，发现自相似接触细化得到动物或昆虫的体重与刚毛密度的对数关系具有 2/3 的斜率，与实验结果吻合，而等曲率接触细化则不能很好地描述实验结果. 当然在 Arzt 等 [11] 的工作中有很多因素没有考虑，如某些昆虫或动物脚部能分泌黏附液体，生物材料的黏弹性效应等. 另外对于 Arzt 等人理论分析中某些假设是否合理，还有待于进一步研究.

### 2.3 多分级结构

生物材料的种类繁多，但具有一些普遍性的特点：(1) 它们往往具有从纳观、微观到宏观的多层次、分级结构，某一尺度上的性质往往由更微小层次上的结构所决定，而这一微小尺度上的结构形成是由更小尺度上的组分和性质所主导. (2) 生物材料的基本组成单元一般在 1 nm~1$\mu$m 的尺度上. 动物及昆虫的脚部黏附系统亦属于多分级结构，例如壁虎的脚部结构 (如图 1 所示). 这些多分级结构对动物及昆虫黏附能力的提高具有什么样的作用？对此问题的研究，可揭示动物及昆虫利用由下而上设计材料结构的机理及用途，对人类制造具有高强度的仿生材料具有非常重要的指导意义. 高华健教授等 [12] 对生物黏附系统的多分级结构，建立了如图 9 所示的模型，引进了生物材料的缺陷非敏感及相邻纤维非黏附失稳的概念，通过多分级分析，可以设计更高层次的缺陷非敏感材料，并与壁虎脚部黏附系统每一层次的特征尺度进行比较，证实了生物黏附系统经过长时间的演化实现了这种由下而上的材料设计，很好地提高了拉脱力，且每一层次都具有缺陷非敏感的特点. 图 9 表示的是由下而上的多分级纤维结构，对于某个层次纤维结构的性质依赖于低一个层次纤维结构的性质，其中 $n$ 表示分级层数，考虑了三角形、正方形及六边形三种离散黏附分布. 图 10 给出了分级层数与拉脱力的关系，可见随着分

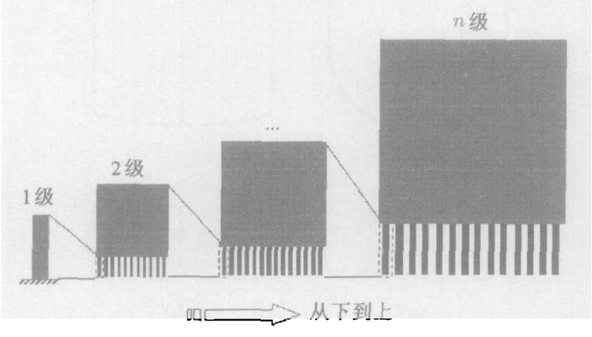



图 9 由下而上多分级纤维结构设计示意图

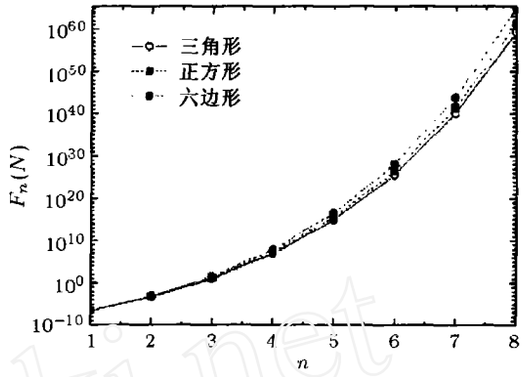



图 10 多分级层数与拉脱力之间的关系

级层数的增大，拉脱力得到了有效增长. 考虑到纤维本身的断裂强度对分级层数 $n$ 的约束，即要求第 $n$ 层次的黏附强度不能大于纤维本身的断裂强度，否则纤维断裂占主导作用，文献 [12] 也给出了分级层数 $n$ 与纤维断裂强度及黏附强度之间的关系.

### 2.4 粗糙度对黏附的影响

自然界没有绝对完美光滑的表面，任何物体表面都具有一定的粗糙度，但程度各不相同. 为什么苍蝇或蟋蟀能够在窗户玻璃上行走，壁虎、蜥蜴能够在石头或混凝土墙壁上爬行？粗糙度对它们黏附能力有什么样的影响？这些基本问题多年来成为科学家们感兴趣的课题. Persson[13] 对蜥蜴的干黏附进行了研究，建立了简单的模型，研究了脚部刚毛长度、表面能、刚毛束有效弹性模量及粗糙度大小等对蜥蜴脚与光滑或粗糙硬基底之间黏附的影响. 粗糙度对生物黏附的详细理论研究还有待于进一步深入，以指导人造黏附材料的进一步发展.

### 2.5 各向异性材料与可逆黏附

实验发现壁虎及昆虫的脚部黏附系统不仅属于多分级结构，也属于一种各向异性材料或组织 (如图 1 及图 3 所示). 壁虎脚部的多个刚毛与物体表面斜向接触，可以认为是一种各向异性组织；蚱蜢脚部的微结构为光滑的表皮下具有很多纤维状的杆结构，中间充满其他软物质. 这种各向异性结构或组织使得这些动物及昆虫能够很好地黏附于物体的表面，也能确保它们能够在日常运动，捕食或被捕食时，迅速脱黏并快速行走，即实现黏附与脱黏的交替 (可逆黏附). 最近实验研究测量了单个刚毛的黏附力 [1,2] 对系统研究生物黏附机制的理论及实验非常必要，不仅对理解生物系统有帮助，而且对指导人类设计工程应用的新颖黏附材料或器件有很大的指导意义.

Autumn 等 [1,2] 及高华健等 [9] 已经研究了单个刚毛的可逆黏附. Autumn 等 [1,2] 实验发现在壁虎的刚毛与接触界面成 30° 的方向拉伸时能达到最大的黏附力. 高华健等 [9] 对单个刚毛的数值计算研究发现, 刚毛的非对称性使得拉脱力能够在不同的拉脱方向变化很大. 在组织层次, 可逆黏附的研究 [12] 相对较少. 文献 [12] 利用界面裂纹模型讨论了两个三维各向异性体之间的黏附失效与外力方向的关系, 发现即使没有微结构的参与, 两个各向异性体间的黏附强度也将随外力拉伸方向剧烈变化.

本文作者与布朗大学的高华健合作从黏附接触力学角度建立了一种可逆黏附模型 [14], 考虑了平面应变情况, 即一个刚性圆柱与一个各向异性体之间黏附接触, 此各向异性体仿生了动物或昆虫脚部结构, 即横观各向同性体转动一定角度后形成的一种各向异性体, 该角度与接触界面法向成 $\theta$ 角度. 接触区假设为完美黏附, 即剪切应力及法向应力能够通过界面传递. 假设外界拉力施加适当, 在接触界面处不产生弯矩, 拉力方向可以任意变化, 与接触界面法向成 $\phi$ 角度, 如图 11 所示. 最终发现, 两个物体之间的黏附强度及拉脱力随外力拉伸方向急剧变化. 图 12 给出了无量纲化的拉脱力与外力拉伸方向的变化关系, 其中 $F_0$ 表示 $\phi = 0°$ 时的拉脱力, 参数 $R/(D_{11}^{*}\Delta\gamma)$ 对无量纲化拉脱力与外力方向的关系没有影响. 图中给出了几种不同各向异性程度的例子, 即 $L_{22}/L_{11}$, 该值越大表示各向异性程度越大. $\eta$ 表示上下两个接触体的不匹配程度, 与各向同性体的 Dundurs 参数相似. 结果显示当 $\theta = 30°$ 时, 即横观各向同性体转动 30° 形成一种各向异性体, 外力拉伸方向 $\phi = 30°$ 时拉脱力最大, 当 $\phi$ 一旦偏离 30° 时, 拉脱力急剧的下降. 对于各向异性程度比较大的情况, 最大的拉脱力可以超过最小拉脱力的一个数量级. 文献 [14] 定义黏附强度为拉脱时刻的拉脱力除以拉脱时刻的接触面积, 图 13 给出了无量纲化的黏附强度与外力方向的关系, 其中 $\sigma_0$ 表示 $\phi = 0°$ 时的黏附强度, 同样可以发现当外力沿 $\phi = 30°$ 方向拉伸时, 黏附强度最大, 当 $\phi$ 偏离 30° 时, 黏附强度急剧下降. 对于各向异性程度比较大的情况, 最大的黏附强度可以超过最小黏附强度的一个数量级. 最终发现: 当 $\phi \approx \theta$ 时, 拉脱力及黏附强度达到最大; 当 $\phi \approx \theta - \pi/2 (0 \le \theta \le \pi/2)$ 或 $\phi \approx \theta + \pi/2 (-\pi/2 \le \theta \le 0)$ 时, 拉脱力及黏附强度达到最小值; 当各向异性程度参数 $L_{22}/L_{11} > 100$ 时, 最大的拉脱力及黏附强度将超过相应最小值的一个数量级.

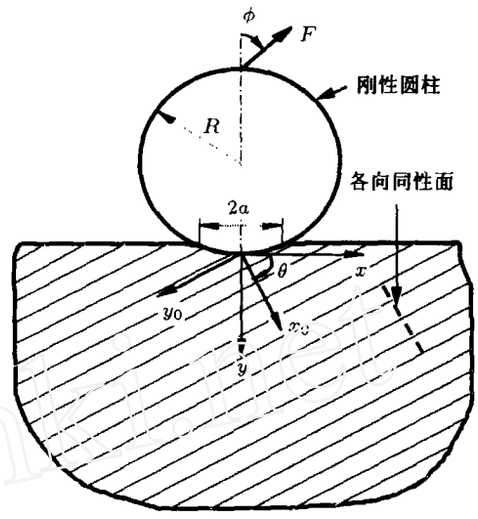



图 11 刚性圆柱与各向异性半空间黏附接触模型

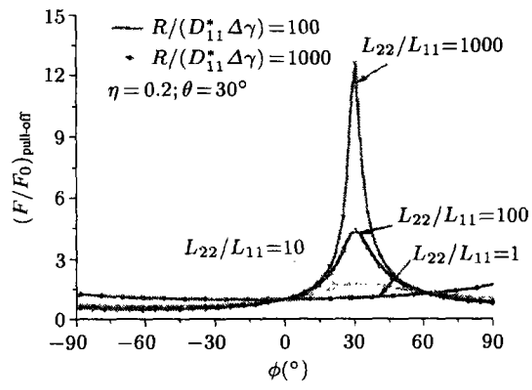



图 12 不同各向异性程度情况下拉脱力随拉伸角度的变化

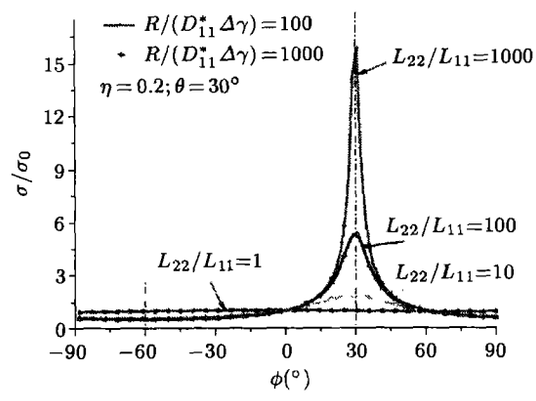



图 13 不同各向异性程度情况下黏附强度随拉伸角度的变化

在上述模型的理论分析中 [14], 各向异性体间的黏附强度会随着外力方向变化而发生超过一个数量级的变化, 相比较而言, 各向同性体间的黏附强度对外力方向的变化并不很敏感. 这样我们就可以设计一种黏附控制开关, 只要简单改变力的方向, 就

可以实现开关的控制. 这种方向控制的黏附为理解生物实现黏附与脱黏交替的机制提供了一定的理论依据, 也解释了动物及昆虫脚部黏附系统呈现各向异性的原因.

### 2.6 湿黏附力学模型

对生物黏附机制的研究已经经历了很长时间, 生物黏附机制的假设和猜想曾经包括微吸盘、钩子、静电力等等. 近年来, 由于实验设备的迅猛发展, 人们已经能够进行微纳米尺度的观察和研究, 最终发现生物黏附系统的两个主要机制, 即依靠范德华力 (干黏附) 及毛细力 (湿黏附) 作用.

前面我们讨论了有关干黏附的力学建模研究, 对于湿黏附, 目前也是很多学者关心的问题, 例如对苍蝇、蚂蚁、树蛙等黏附的研究. 当此类动物及昆虫黏附于物体表面时, 会产生某种特殊的液体, 传递到黏附垫的底部, 最近的实验证实了苍蝇脚部黏附垫分泌特殊液体的现象, 这种液体对于此类动物及昆虫的黏附非常重要, 实验发现, 当利用某种手段从这些动物及昆虫脚部除去此液体后, 它们几乎失去了黏附的能力 [15].

已经存在许多关于液桥产生毛细力黏附的理论研究. Orr 等 [16] 研究了液桥在球体与平板之间引起的毛细黏附, 并得到了液桥轮廓线的解析表达式. 高华健等 [17] 建立了单根圆柱形纤维与固体表面由于液桥的存在而产生纯毛细力黏附的模型, 如图 14 所示. 纤维的横截面为圆形, 半径为 $R$, 液体与纤维表面的接触角为 $\theta_1$, 与基底表面的接触角为 $\theta_2$. 并利用了几个假设: (1) 忽略液体自身的重力; (2) 液体的体积守恒; (3) 纤维与基底都是刚性体, 且基底为半无限大体. 考虑液滴的体积 (拉伸过程中液体的体积守恒)、形状、接触角等对拉脱力的影响, 他们发现了一个尺度规律, 即通过液滴接触区的减小, 黏附强度得到提高, 但也不是越小越好, 还需要考虑粗糙度的影响. 由于液桥最大负压力的限制, 存在一个临界纤维尺度, 当纤维尺度小于该临界尺度后, 界面能够达到最优的黏附强度.

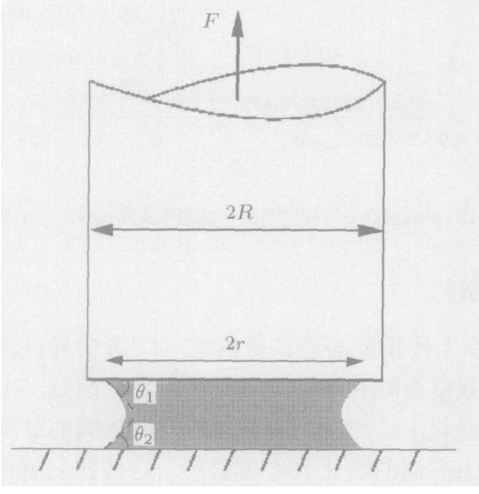



图 14 刚性圆柱形纤维与刚性基底之间的湿黏附

## 3 仿生制备及其应用

几十亿年的进化和"适者生存"成就了许多动物在各种各样的表面上运动的能力, 如壁虎、蜘蛛、苍蝇、蝗虫等. 它们的这些能力超越了人们的想象, 目前, 人类还不能达到这样的水平, 但对这些动物及昆虫黏附能力的研究, 将对人类有着很重要的意义, 我们可以仿生设计科学家称之为"壁虎带"的黏合剂, 用于外科手术用的夹子和缝线、登山者使用的安全装置、容易脱下来的绷带、甚至还有足球守门员使用的黏性超强手套等; 可以仿生设计适合任意表面行走的微型机器人或爬壁机器人, 这类机器人在特殊的环境中代替人类完成一些特殊的工作. 虽然现在已经有很多仿生黏附的制备和仿生设计, 但其技术和应用上还不完美, 远不及生物黏附水平, 有很多问题还需要进一步解决.

在这类具有超强黏附能力的生物中, 壁虎的体重相对较大, 所以仿壁虎的研究相对较多. Geim 等 [18] 仿照壁虎脚毛发的几何排列构造, 以电子光束微影与氧离子干蚀刻法在 5$\mu$m 厚的聚酰亚胺薄膜上制成约 2$\mu$m 长、 500 nm 直径、 1.6$\mu$m 间距排列的高弹性聚酰亚胺纤维. 当预压力不小于 50N·cm$^{-2}$ 时, 单根纤维能够提供约 70 nN 的黏附力, 每平方厘米面积上可负重 3 N. 他们利用这样的仿壁虎带能够支撑一个体重适当的玩具, 如图 15 所示, 该玩具重

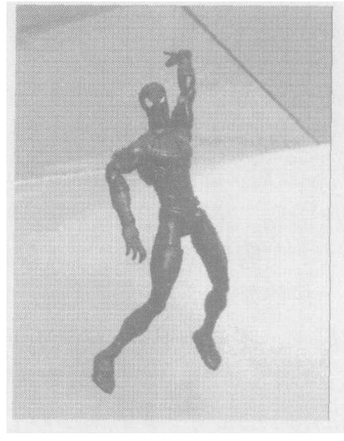


图 15 掌部具有仿壁虎刚毛的机器人玩具吸附在天花板上

40 g, 掌部覆盖有仿生制造的壁虎带，与玻璃表面能够达到 0.5 $cm^2$ 的接触面积，可以支撑大于 100 g 的体重. 但是，目前已经研制出的这些纳米阵列，不能主动控制黏附和脱黏状态，一旦通过压力黏附后，很难脱离，需要相当大的剥离力，使实际应用非常困难. 国内已经有很多单位开展仿壁虎的研究工作，并取得一定的进展，例如中国科学院合肥智能机械研究所的梅涛研究组及南京航空航天大学的戴振东研究组也进行了相关的研究.

## 4 结束语

在长期的生命演化与协同进化过程中，自然界形成了许多卓有成效的导航、识别、运动、合成与分解，能量转换的完美体系，其精巧性、灵敏性、快速性、高效性、可靠性和抗干扰性等令人惊叹不已. 人类越来越多地意识到，在发展现代科技过程中，大自然为我们提供了大量绝妙的范例，人们可以从中得到各种启示，通过对大自然本身的学习、研究和模仿，找到解决我们面临的能源、交通、材料、信息等领域的诸多问题的答案和求解思路. 正因如此，生物力学及仿生力学不仅在国内日渐受到重视，在国际上发展亦非常迅速，吸引诸多力学家、材料学家、物理学家、化学家、生物学家的关注.

对生物黏附的研究不仅牵涉到动物及昆虫本身黏附系统的微尺度及跨尺度设计 (如每一层次的尺寸范围及生物材料缺陷非敏感的允许尺度等)、生物材料的特性 (如弹性、黏弹性)、具体生物材料类型 (如各向异性材料、梯度材料等) 及不同类型的材料对黏附与脱黏的影响、生物与物体表面的黏附力类型 (例如壁虎、蜘蛛利用范德华力来实现干黏附，而蚂蚁、苍蝇等主要依靠神秘液滴，毛细力主导的湿黏附等等)，还必须考虑自然界物体表面的特点 (如粗糙度的影响)、自然环境的影响等等.

生物黏附结构是一个非常复杂的系统，关于生物黏附的理论工作，现有大多数局限于将生物材料当作弹性材料进行研究，另一方面，相应的生物黏附实验在真实环境中进行活体测试相对较少. 在已有的工作基础上，逐渐考虑生物黏附系统的具体特性及较全面地仿生生物黏附系统的真实环境，分析生物是如何利用这些材料性质、微尺度及多尺度设计来增强黏附，又是如何利用它们来实现脱黏与黏附的交替，如何克服粗糙度的影响及粗糙度如何影响生物黏附等问题，是很有必要的. 这些问题可能针对不同的生物，机理并不完全一致. 对生物黏附问题的研究将涉及到诸如弹性力学、黏弹性力学、断裂力学、接触力学、界面力学、表面化学、表面物理等多学科知识.

## 参 考 文 献


1 Autumn K, Liang YC, Hsieh ST, et al. Adhesion forces of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405: 681~685

2 Autumn K, Sitti M, Liang YC, et al. Evidence for van der Walls adhesion in gecko setae. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 12252~12256

3 Kesel AB, Martin A, Seidl T. Adhesion measurements on the attachment devices of the jumping spider Evarcha arcuata. *J Exp Biol*, 2003, 206: 2733~2738

4 Niederegger S, Gorb S, Jiao Y. Contact behavior of tenent setae in attachment pads of the blowfly Calliphota vivina (Diptera, Calliphoridae). *J Comp Physiol A*, 2002, 187: 961~970

5 Gorb S, Scherge M. Biological microtribology: anisotropy in frictional forces of orthopteran attachment pads reflects the ultrastrucutre of a highly deformable material. *Proc R Soc Lond B*, 2000, 267: 1239~1244

6 Smith JM, Barnes WJP, Downie JR, et al. Structural correlates of increased adhesive efficiency with adult size in the toe pads of hylid tree frogs. *J Comp Physiol A*, 2006, 192: 1193~1204

7 Spolenak R, Gorb S, Gao H, et al. Effects of contact shape on the scaling of biological attachments. *Proc R Soc A*, 2005, 461: 305~319

8 Persson BNJ. Nanoadhesion. *Wear*, 2003, 254: 832~834

9 Gao H, Wang X, Yao H, et al. Mechanics of hierarchical adhesion structures of gecko. *Mech Mater*, 2005, 37: 275~285

10 Gao H, Yao H. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures. *Proc Nat Acad Sci*, USA, 2004, 101: 7851~7856

11 Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 10603~10606

12 Yao H, Gao H. Bio-inspired mechanics of robust and releasable adhesion on rough surface. *J Mech Phys Solids*, 2006, 54: 1120~1146

13 Persson BNJ. On the mechanism of adhesion in biological systems. *J Chem Phys*, 2003, 118(16): 7614~7621

14 Chen S, Gao H. Bio-inspired mechanics of reversible adhesion: orientation-dependent adhesion strength for non-slipping adhesive contact with transversely isotropic elastic materials. *J Mech Phys Solids*, 2006, (in press)

15 Dixon AFG, Croghan PC, Gowing RP. The mechanism by which aphids adhere to smooth surfaces. *J Exp Biol*, 1990, 152: 243~253

16 Orr FM, Scriven LE, Rivas AP. Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary force. *J Fliud Mech*, 1975, 67: 723~742

17 Qian J, Gao H. Scaling effects of wet adhesion in biological attachment systems. *Acta Biomaterialia*, 2006, 2: 51~58

18 Geim AK, Dubonos SV, Grigorieva IV, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Mater*, 2003, 2: 461~463