

文章编号: 1002-0446(2006)02-0191-04

一种新型仿壁虎爬行机器人的粘附阵列设计

王辉静^{1,2}, 梅涛¹, 汪小华¹

(1. 中科院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学自动化系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 分析了壁虎与表面间的微尺度粘附接触作用模型, 在此基础上设计了一种具有主动控制能力的仿壁虎微纳米粘附阵列, 给出了粘附阵列各设计参数, 并介绍了微纳米阵列的加工工艺方法。

关键词: 范德瓦尔斯力; 粘附阵列; 粘附作用模型; 微纳米加工工艺

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Adhesion Array Design of a Novel Biomimetic Gecko Crawling Robot

WANG Hui-jing^{1,2}, MEI Tao¹, WANG Xiao-hua¹

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the analysis of the micro-scale adhesion model between gecko and surface, a novel adhesion array of biomimetic gecko crawling mechanism with active control ability is proposed. The design parameters of the adhesion array are presented in detail, and the processing technology of the array is also introduced.

Keywords: van der Waals force; adhesion array; adhesion model; micro/nano processing technology

1 引言 (Introduction)

美国加州大学的 Full 等人发现壁虎能在不同表面行走自如的粘着力取决于壁虎自身的物理尺寸。此粘着力是由壁虎脚底大量的细毛与物体表面分子之间产生的范德瓦尔斯力 (van der Waals force) 累积而成的^[1]。范德瓦尔斯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。壁虎的脚趾生有约两百万根细小的刚毛, 刚毛直径约 $5\mu\text{m}$, 长度约 $30 \sim 130\mu\text{m}$ 。每根刚毛的顶端都有约 $100 \sim 1000$ 个更细小的分支——绒毛, 这些绒毛大约 $0.2 \sim 0.5\mu\text{m}$ 粗。这种精细结构使得刚毛与物体表面分子间的距离非常近, 从而产生范德瓦尔斯力。根据计算, 一只大壁虎的四只脚产生的总作用力压强相当于 10 个大气压, 可以吊起 125kg 的物体。壁虎脚趾的这种粘附结构具有粘附力大、具有对任意形貌的未知材料表面的适应性、不会对物体表面造成损伤、自洁、可反复使用等优点, 是最为适合微机器人的粘附爬行机构。受这种粘附机理启发, 人们开始研究仿壁虎粘附阵列。

Geim 等人仿照壁虎脚上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 $5\mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺薄膜上制成约 $2\mu\text{m}$ 长、 500nm 直径、以 $1.6\mu\text{m}$ 间隙排列的高弹性聚酰亚胺纤维^[2]。当预压力不小于 50Ncm^{-2} 时, 单根纤维能够提供约 70nN 的粘附力, 每平方厘米面积上可负重 3N。

Sitti 等人通过自组织微纳米孔膜加工出直径分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $0.6\mu\text{m}$, 高宽比分别为 1:2 和 1:9 的仿壁虎粘附机理的人工微纳米阵列^[3]。

但是, 国外目前已经研制出来的这些纳米阵列均由单一材料制作, 不能主动控制粘附和脱离状态, 一旦通过加压粘附之后, 很难脱离, 需要相当大的剥离力, 使实际应用产生困难。针对这个问题, 本文分析了壁虎与表面间的微尺度粘附接触作用模型, 在此基础上设计了一种具有主动控制能力的仿壁虎微纳米粘附阵列, 给出了粘附阵列的各设计参数, 并介绍了微纳米阵列的加工工艺方法。目的是解决目前微纳米粘附阵列不能自动脱离的难题, 使这种器件

能够真正运用到机器人爬行机构中。

2 微尺度粘附接触理论^[4,5]及壁虎绒毛与接触表面间相互作用模型分析 (Micro-scale adhesion theory and the analysis of interaction model between spatulae and surface)

在物体间的微/纳米级接触中,起主要作用的是表面力,它是决定固体表面间粘附、接触、变形等行为的关键因素。由表面力所引起的粘附与经典接触力学相结合,构成了微尺度粘附接触理论。

简化假设绒毛为一圆柱体,端部为直径 $2R$ 的半球,与一个光滑平面垂直接触。它们之间的接触问题可以采用粘附接触模型(如JKR模型、DMT模型、M-D模型等^[4,5])来分析。Johnson和Greenwood依据Dugdale力分离法则,指出选择合适的粘附模型的主要依据是无量纲参数Tabor数 μ 和预载荷参数 \bar{P} 。这里:

$$\mu = \left(\frac{R\Delta\gamma^2(1-\nu^2)}{E^2\varepsilon^3} \right)^{1/3} \quad \bar{P} = P/(\pi\Delta\gamma R) \quad (1)$$

当Tabor数 $\mu < 0.1$ 时,接触机理可由DMT模型解释。该模型适用于小曲率半径的物体,描述接触区域附近的长程表面力作用情况。当 $\mu > 5$ 时,JKR模型适用,该模型适用于大曲率半径的柔顺性物体,描述接触区域内的短程表面力作用情况。M-D模型描述接触区域边界附近环状带的表面力作用情况。

壁虎绒毛可认为是一个柔顺性物体,有较大曲率半径,与表面间的接触力——范德瓦尔斯力为短程引力,结合模型间的分析,壁虎绒毛与接触表面间的相互作用模型采用JKR模型。采用JKR模型得到单根合成硅制绒毛与 SiO_2 平面接触中的分离力(pull-off force) $P_{c(\text{JKR})} = 1.5\pi\Delta\gamma R$ 。其中 $\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx 2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}$ 。对于两个确定的材料及其表面, $\Delta\gamma$ 是确定的,分离力只与等效半径有关。因此,对于给定的材料和表面,特征尺度即等效半径 R 决定了表面粘附性能。 R 越小,无预载荷情况下由粘附力所产生的接触区域的半径越大,接触面积越大,微尺度表面粘附效应就越强。对于硅制绒毛与 SiO_2 表面接触,根据已知材料的表面能及壁虎绒毛的半径(约为200nm),所计算得到的分离力 P_c 约为110nN。再利用范德瓦尔斯力方程 $F_{vdw} = HR/6d^2$ 得出单根硅制绒毛与表面间的范德瓦尔斯力为83.8nN。(SiO_2 的 Hamaker 常数 H 为 $68.4 \times 10^{-21} \text{ J}$, d 为接触表面间的间

隙,取 $0.165 \text{ nm}^{[6]}$)。

3 仿壁虎微纳米粘附阵列 (Micro/nano adhesion array of the biomimetic gecko)

该仿壁虎微纳米粘附阵列依据壁虎指面粘附机理,利用微纳米加工工艺,由机械、电子元件和智能材料来构成粘附运动装置,通过压电驱动实现微纳米阵列与固体表面间直接粘附与脱离。

3.1 结构设计及控制原理分析

仿壁虎微纳米粘附阵列由柔性悬臂梁与驱动器集成部分、微米级刚毛和纳米级绒毛三层结构组成。柔性梁的主要功能是作为刚毛的支撑结构,柔性梁间集成的驱动器能够产生控制刚毛运动的信号,使微米级刚毛形成与接触粗糙表面形状相适应的阵列外形。纳米级绒毛的作用是使粘附阵列与接触表面实现高密度的分子、原子接触。图1为微纳米阵列的结构设计示意图。

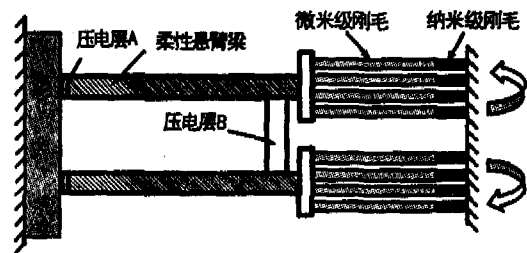


图1 仿壁虎微纳米粘附阵列结构设计示意图

Fig. 1 Configuration of biomimetic gecko micro/nano adhesion array

试验发现,壁虎在使其脚爪与接触表面脱离过程中剥离力只同时作用于一小部分粘附刚毛上^[1,7]。将此发现应用于仿壁虎微纳米粘附阵列的设计中,采用毫米尺寸的驱动单元,对微米刚毛阵列进行分组控制,使得一部分的绒毛阵列与固体表面接触即可。

驱动阵列由若干组驱动单元构成,考虑到微米阵列的密度较高,难以实现对每个微米刚毛单独进行控制,将压电驱动器集成在毫米尺寸的柔性悬臂梁间,对微米级刚毛阵列进行分组控制。柔性悬臂梁左侧集成了压电层A,加电时压电层的伸长变形带动悬臂梁伸长,使刚毛阵列与接触表面产生挤压,从而使纳米级绒毛与表面高度贴近而产生较大的范德瓦尔斯力,整个微纳米阵列与接触表面实现粘附。同时柔性悬臂梁间集成了压电层B,压电层B加电后由于逆压电效应产生应变,带动柔性悬臂梁产生弯曲,使

悬臂梁上的微米级刚毛产生偏转运动,这样纳米级绒毛与被接触表面形成一定的夹角和位移,从而使整个粘附阵列与表面脱离成为可能。

假设整个驱动阵列上共有 n_0 根柔性悬臂梁,单根梁长 L ,有 n_1 根刚毛,每根刚毛上有 n_2 根绒毛,绒毛均匀分布,间距为 Δ ,单根绒毛与接触表面间粘附力为 F_0 。

因为壁虎脚趾绒毛的密度大小直接影响壁虎与接触表面间的粘附力。根据此原理,在仿壁虎粘附阵列设计中,为使得粘附阵列与接触表面间的粘附力 $n_0 n_1 n_2 F_0$ 足够大,应选取合适的参数 n_0 、 n_1 和 n_2 ,以达到通过粘附力来支撑微纳米阵列以及整个爬行机器人机构的目的。

为使粘附阵列与表面脱离,柔性梁采用压电式驱动。当控制单个微驱动单元(单根梁)时,单根梁上的 $n_1 n_2$ 根绒毛由于偏转产生的转矩为 M 。

$$M = 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_1 n_2}{2}} (i\Delta) F_0 = \frac{n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_1 n_2}{2} + 1 \right) \Delta F_0 \quad (2)$$

为了抵抗这个转矩,当单根梁上扭转力 F_1 产生的转矩等于 M 时,可实现单根梁上的 $n_1 n_2$ 根绒毛与接触表面脱离。此时有:

$$F_1 L = M = \frac{n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_1 n_2}{2} + 1 \right) \Delta F_0 \quad (3)$$

由式(3)得:

$$F_1 = \frac{n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_1 n_2}{2} + 1 \right) \frac{\Delta F_0}{L} \quad (4)$$

若不采用分组控制,压电驱动器作用于整个阵列上时,整个粘附阵列上的 $n_0 n_1 n_2$ 根绒毛由于偏转产生的总转矩为 M' :

$$M' = 2 \sum_{i=1}^{\frac{n_0 n_1 n_2}{2}} (i\Delta) F_0 = \frac{n_0 n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_0 n_1 n_2}{2} + 1 \right) \Delta F_0 \quad (5)$$

忽略外界作用力及阵列的自身重力,压电驱动器作用于单根梁的扭转力 F'_1 产生的总转矩等于 M' 时,阵列上的绒毛可与被接触表面实现脱离。此时有:

$$n_0 F'_1 L = M' = \frac{n_0 n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_0 n_1 n_2}{2} + 1 \right) \Delta F_0 \quad (6)$$

由式(6)得:

$$F'_1 = \frac{n_1 n_2}{2} \left(\frac{n_0 n_1 n_2}{2} + 1 \right) \frac{\Delta F_0}{L} \quad (7)$$

可以看出: F'_1 约为 F_1 的 n_0 倍。即在产生同样脱

离效果的前提下,由于分组控制产生的分布力效果,使得分组控制微米刚毛单元比控制整个粘附阵列需要的力要小很多。因此,将单根梁上的绒毛与接触表面剥离比剥离整个粘附阵列容易得多。同时,考虑到粘附阵列在实际工作中还有一些较大的附加力和力矩作用于其上,因此对粘附阵列进行分组控制大幅降低了压电体需产生的扭转力,使阵列与接触表面间更容易脱离,更有利于实现对粘附阵列与表面间接触状态的主动控制。

3.2 仿壁虎微纳米粘附阵列参数设计

选择合适的绒毛直径、长度以及绒毛阵列密度,可以使绒毛与粗糙表面间具有更好的粘附效果。为了得到更大的粘附力,可增大阵列的绒毛密度使尽可能多的绒毛与表面接触。绒毛应足够柔顺而能与不平的表面接触。但在阵列参数设计中还应该考虑一些问题,比如防止纳米绒毛间由于吸引力而造成的纠结,应使纳米丝材料具有较大刚度并尽量分散。所以微纳米阵列的参数设计应满足以下条件^[3,8,9]: 1)微米丝和纳米丝都应具有较高的宽宽比,以具有较好的柔顺性;2)微米阵列及纳米阵列应尽量具有较高的密度以实现较好性能的粘附;3)纳米阵列材料应具有较高刚度。

绒毛相当于悬臂梁,长 l 、半径为 r ,梁的转动惯量为 $I = \pi r^4/4$ 。绒毛材料的杨氏模量为 E 。有:

$$\Delta_y = \frac{F_y l^3}{3EI}, k_y = \frac{F_y}{\Delta_y} = \frac{3\pi E r^4}{4l^3} \quad (8)$$

为使绒毛与接触表面粘附,而不相互纠结在一起,应有: $F_0 \leq k_y \Delta/2$ (认为绒毛间吸引力等于绒毛与接触表面间的粘附力 F_0)。即:

$$\Delta \geq \frac{8F_0 l^3}{3\pi E r^4} \quad (9)$$

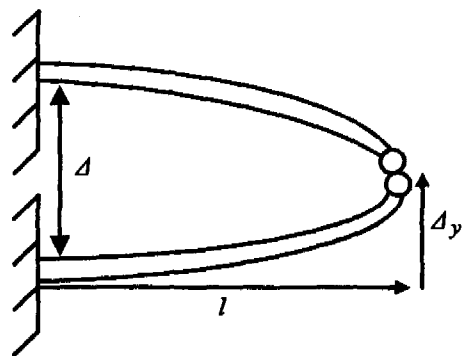


图2 绒毛间相互作用图

Fig. 2 The interaction between spatulae

根据粘附阵列的参数设计标准及结合式(9),给

出粘附阵列的设计参数如下. 纳米丝可选用聚合物、硅橡胶等材料. 选择微米级刚毛的高宽比为1:15, 微米丝的直径为 $10\mu\text{m}$, 长为 $150\mu\text{m}$. 纳米级绒毛的高宽比为1:5, 纳米丝的直径为 400nm , 长度为 $2\mu\text{m}$. 同时, 纳米丝间的间距为 $0.6\mu\text{m}$. 这样, 阵列上纳米丝的密度为 10^8 根/ cm^2 , 纳米阵列约可负重 $0.855\text{kg}/\text{cm}^2$.

3.3 仿壁虎微纳米粘附阵列加工工艺原理及方法

为了加工出具有以上功能及参数的仿壁虎毛的人工微纳米阵列, 采用微米与纳米级的加工工艺. 用刻蚀等加工工艺在硅上刻蚀出半径为 $5\mu\text{m}$ 的刚毛, 然后在刚毛上用纳米工艺加工出直径为 400nm 左右的绒毛. 绒毛加工的方法^[8,9]是用铝薄膜作为主模板, 铝薄膜含有 200nm 半径的垂直纳米孔, 注入硅橡胶, 铸模后通过腐蚀方法把铝膜刻蚀掉, 得到仿壁虎毛的人工微纳米阵列. 图3为仿壁虎微纳米粘附阵列的结构制作加工示意图.



图3 微纳米阵列制作加工示意图

Fig.3 Processing of the micro/nano adhesion array

4 结论 (Conclusion)

仿壁虎粘附机构是最为适合微机器人的粘附爬行机构, 并在很多领域有很好的应用前景. 本文设计了一种新型的具有主动控制能力的仿壁虎微纳米粘附阵列. 同时, 针对粘附阵列设计中涉及的主要具体问题进行了分析讨论.

参考文献 (References)

- [1] Autumn K, Liang Y A, Hsieh T. Adhesive force of a single gecko foot-hair[J]. *Nature*, 2000, 405(6787): 681-685.
- [2] Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair[J]. *Nature Materials*, 2003, 2(7): 461-463.
- [3] Sitti M. High aspect ratio polymer micro/nano-structure manufacturing using nanoembossing, nanomolding and directed self-assembly [A]. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Mechatronics Conference* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2003. 886-890.
- [4] Gao H J, Wang X, Yao H M. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos[J]. *Mechanics of Material*, 2005, 37(2-3): 275-285.
- [5] Deladi S, Krijnen G, Tas N. Three dimensional adhesion model for arbitrary rough surfaces[A]. *Proceedings of the International Conference on Computational Nanoscience and Nanotechnology* [C]. Cambridge, MA, USA: Computational Publications, 2002. 326-329.
- [6] Israelachvili J. *Intermolecular and Surface Forces*[M]. London: Academic Press, 1992.
- [7] Autumn K, Sitti M, Liang Y A. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae[A]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [C]. Ithaca, NY, USA: Cornell University, 2002. 12252-12256.
- [8] Campolo D, Jones S, Fearing R S. Fabrication of gecko foot-hair like nano structures and adhesion to random rough surfaces[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Nanotechnology* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2003. 856-859.
- [9] Sitti M, Fearing R S. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs[A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Nanotechnology* [C]. Piscataway, USA: IEEE, 2002. 137-140.

作者简介:

王辉静 (1977-), 女, 博士生. 研究领域: 微机器人, 仿生机器人.

梅涛 (1962-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 先进制造与自动化技术, 微传感器, 微机器人, 空间机器人.