

仿壁虎粘附阵列与粗糙表面间粘附仿真分析

王辉静^{1,2}, 梅涛²

(1. 中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027; 2. 中科院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘要:根据线性梁理论, 针对仿壁虎粘附阵列与服从高斯分布的粗糙表面, 分别建立了在动态粘附接触与动态脱离过程中二者相互作用力模型. 基于合理的参数选择, 讨论了该作用力与二者间的间距、预压力及夹角等因素的关系, 并得到仿真结果. 这一研究为仿壁虎纳米粘附阵列的设计提供理论参考.

关键词:仿壁虎粘附阵列; 动态粘附及脱离; 粗糙表面; 高斯分布

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Adhesion simulation analysis between biomimetic gecko adhesion array and rough surface

WANG Hui-jing^{1,2}, MEI Tao²

(1. Department of Automation, USTC, Hefei 230027, China; 2. Institute of Intelligent Machines, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on the linear cantilever beam theory and the Gaussian height distribution of rough surface, theoretical contact models of interaction force during dynamic attachment and detachment on rough surface were constructed. Meanwhile, by making a reasonable choice of the parameters, the relationships between the interaction force and the separation, preload and angle of the attachment and detachment were discussed in detail. It may provide a theoretical reference for designing a better mimicking gecko adhesion array.

Key words: biomimetic gecko adhesion array; dynamic attachment and detachment; rough surface; Gaussian distribution

0 引言

研究发现, 壁虎是通过几何外形而非表面化学物质使其能够靠一个脚趾来支撑身体^[1,2]. 壁虎的脚趾生有约两百万根细小的刚毛, 刚毛直径约为 5 μm , 长度为 30~130 μm . 每根刚毛的顶端都有 100~1 000 个更细小的分支——绒毛, 这些绒毛的直径为 200~500 nm^[1]. 这种精细结构使得绒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^[1,2]. 壁虎脚趾的粘附结构具有粘附力大、对任意形貌的未知材料表面的适应性, 对物体表面不会造成损伤、自洁、可反复使用等优点, 非常适合应用于微机器人的粘附爬行机构, 其粘附机理对航天机器人、爬壁机器人及管道机器人脚掌的研制具有重要启发意义.

粘附阵列设计的主要原理是通过利用壁虎皮肤结构(角蛋白)的优点, 选择制造仿壁虎脚掌材料, 把它细分成能明显粘附的微结构——绒毛, 以产生有

收稿日期: 2005-05-20; 修回日期: 2006-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(90407018)资助.

作者简介: 王辉静, 女, 1976年生, 博士. 研究方向: 仿生机器人. E-mail: hjwang@iim. ac. cn

通讯作者: 梅涛, 博士/研究员. E-mail: tmei@iim. ac. cn

效的附着。目前,国外一些学者仿照壁虎脚上毛发的几何排列结构,研制出了均匀排列的具有一定粘附功能的聚合物纤维阵列。Geim 等仿照壁虎脚上毛发的几何排列结构,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、 $500\ \text{nm}$ 直径、以 $1.6\ \mu\text{m}$ 间隙排列的高弹性聚酰亚胺纤维^[3]。Sitti 等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^[4],但是加工出的粘附阵列大多粘附性能较差,而且不能主动控制粘附和脱离状态,一旦通过加压粘附后,很难脱离。因此,在研究仿壁虎脚掌设计中,了解壁虎脚掌结构、讨论仿生纳米纤维阵列在运动过程中与接触表面间的相互作用情况以及分析接触表面粗糙度等因素对相互作用力的影响是相当必要的,也是正确进行仿壁虎粘附阵列设计的基础。

在研究壁虎绒毛与接触表面的粘附作用问题中,大多认为壁虎绒毛是端部为半球的圆柱体,将壁虎绒毛与其表面的粘附作用表述为半球与平面间的弹性接触问题,采用 JKR (Johnson-Kendall-Roberts) 模型来进行分析^[5,6]。或是直接用范德瓦尔斯力公式得到粘附力^[1,2]。这样得到的是比较简化的模型,没有考虑其他力的作用,与绒毛实际受力情况有差别。文献[7]从弹性能着手,基于粘附能来分析整个阵列的能量分布,研究了绒毛阵列与接触表面间的总能量,得到橡胶制绒毛与接触基底粘附的相互作用。文献[8]利用扭矩和几何约束条件,得到单根壁虎绒毛的扭矩方程。同时,基于样本表面的离散高度分布,得到绒毛阵列的整体受力。以上两种模型对研究壁虎绒毛与粗糙表面相互作用均有一定的参考价值。

本文结合线性梁理论与粗糙表面的高斯分布,分别建立了在动态粘附接触与动态脱离过程中,纳米纤维阵列与服从高斯分布的粗糙表面间的相互作用力模型。并分析了该作用力与二者的间距、预压力及夹角等因素间的关系。基于合理的参数选择,得到仿真结果,从而为仿生纳米纤维阵列的设计提供理论参考。

1 单根仿壁虎绒毛与接触表面间的相互作用模型

1.1 单根绒毛的受力模型

首先分析单根纳米绒毛与接触表面间的相互作

用。图 1 所示的纤维阵列包含很多根相同的纳米绒毛,假设纳米绒毛基底面与接触表面的基准面平行,每根纳米绒毛长为 L ,且相互平行^[5](假定绒毛间相互平行,在工艺上比较容易实现;或在误差很小的情况下,可以认为是相互平行的)。它们与阵列基底面间呈夹角 θ ,固结在基底上。图中虚线为实际接触表面的基准面。单根绒毛可看作是一悬臂梁,其在受到轴向张力/压力时是非常硬的,侧向(横向)受力很容易弯曲,因此可忽略轴向变形及轴向失稳。单根纳米绒毛端部与接触表面间的粘附力(主要是范德瓦尔斯力^[1])为 F_0 ,绒毛由于挤压变形而产生的弹力为 F 。由于绒毛的变形在微米尺度^[2],而粘附力 F_0 的改变在纳米的尺度范围内(范德瓦尔斯力的作用极限距离大约为 $0.165\ \text{nm}$ ^[9]),因此不妨假定 F_0 是常数,并且一旦脱离,该粘附力就消失。同时,若不考虑水平摩擦力,则可以认为弹力 F 是垂直于接触表面的轮廓面方向。因此,单根纳米绒毛受力为 $P = F - F_0$ 。

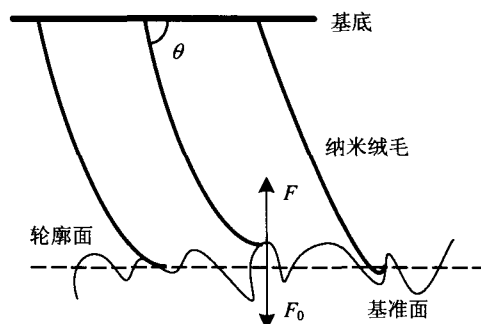


图 1 单根仿壁虎绒毛受力示意图

Fig. 1 Force diagram of a single spatula

设纳米绒毛自由端的挠度为 w ,假设绒毛的变形满足小变形、线弹性,则有

$$w = \frac{PL^3 \cos \theta}{3EI} \quad (1)$$

其中, E 为纳米绒毛材料的弹性模量, I 为惯性模量。由于绒毛的变形会引起基底面与接触表面间间距的变化,设间距改变量为 δ ,则有 $\delta = -w \cos \theta$,代入式(1)可以得到单根仿壁虎绒毛受力,即

$$P = \frac{3EI}{L^3 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

1.2 单根绒毛动态粘附接触及脱离过程分析

由于在动态粘附接触和脱离状态下,绒毛与表面间的相互作用力表现为不同的形式,因此需要对动态粘附接触与脱离状态分别进行考虑。

1.2.1 单根绒毛与接触表面的动态粘附接触过程

由于范德瓦尔斯力作用距离相当短(0.165 nm)^[9],可近似认为,当 $\delta=0$ 时,纳米纤维绒毛与表面恰好接触无变形,此时 $P=0$ 。当绒毛与表面产生挤压而使得 $\delta<0$ 时,绒毛与接触表面间作用力表现为排斥力,此时, $P>0$ 。

1.2.2 单根绒毛与表面动态脱离过程

当 $\delta<0$ 时,由于粘附力的作用,绒毛会发生弯曲,并与表面间一直保持接触状态,直至粘附力不足以克服变形引起的弹力时, $\delta\geq\delta_0$,绒毛与表面脱离。

脱离条件: $F=0$,即 $P=-F_0$;同时得到:当 $\delta=\delta_0$ 时,纳米纤维绒毛与接触表面脱离

$$\delta_0 = \frac{L^3 \cos^2 \theta}{3EI} F_0 \quad (3)$$

简化式(3)得到单根绒毛与接触表面动态粘附过程

$$\left. \begin{aligned} \delta > 0, P = 0, \text{没有接触} \\ \delta = 0, P = 0, \text{恰好接触} \\ \delta < 0, P > 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

单根绒毛与接触表面动态脱离过程为

$$\left. \begin{aligned} \delta < 0, P > 0 \\ 0 < \delta < \delta_0, P < 0 \\ \delta > \delta_0, P = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由此得到(在接触及脱离过程中)单根绒毛与表面间作用力 P 与变形 δ 之间的关系如图 2 所示。

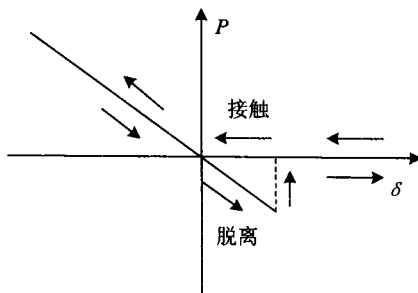


图 2 单根绒毛与表面间作用力 P 与变形 δ 间关系示意图

Fig.2 Diagram of relation between the interaction force P with the deformation δ

2 仿壁虎纳米纤维阵列模型分析

2.1 纳米纤维阵列与粗糙表面间相互作用模型分析

在分析纳米纤维阵列与接触表面的相互作用时,因实际接触表面难免存在一定的粗糙度,所以需要考虑接触表面粗糙度的影响.建立如图 3 所示的模型,假设纳米绒毛基底面与接触表面的基准面平行,间距为 Z ,每根纳米绒毛长 L ,且相互平行,绒毛

与基底面间的夹角为 θ 。

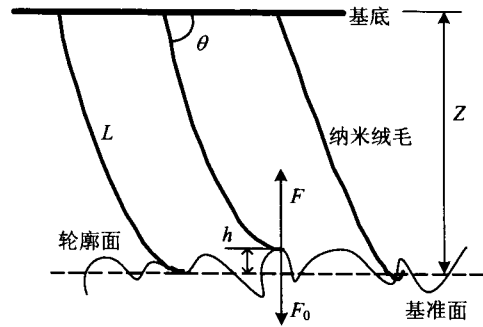


图 3 仿壁虎粘附阵列与粗糙表面接触示意图
Fig.3 Sketch map of the fiber array in contact with a rough surface

设接触表面粗糙度的分布满足正态分布,粗糙表面的基准面为平面, h 是接触表面轮廓面与基准面之间的距离,即高度满足如下的高斯分布

$$g(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{h^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

单根绒毛的变形 δ 与受力 P 表示为

$$\left. \begin{aligned} \delta = Z - h - L \sin \theta \\ P = -\frac{3EI}{L^3 \cos^2 \theta} (Z - h - L \sin \theta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

这样,可以得到粘附阵列与接触表面间的相互作用力为

$$\bar{P} = N_0 \int_{-\infty}^{+\infty} P g(h) \Phi(Z - h - L \sin \theta) dh \quad (8)$$

其中, N_0 是绒毛的总数目, $\Phi(Z - h - L \sin \theta)$ 表示每根绒毛与表面的接触情况。

2.2 阵列与粗糙表面间的动态粘附接触与脱离情况

根据单根绒毛与接触表面间动态粘附过程的条件,见式(4),且不考虑横向滑动,得到阵列与接触表面的分布情况如下

$$\Phi(Z - h - L \sin \theta) = \begin{cases} 0, & h < Z - L \sin \theta \\ 1, & h \geq Z - L \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

为简便起见,认为 0 代表没有绒毛与表面粘附,1 代表绒毛与表面全部粘附.代入式(8),得到在动态粘附过程中,纳米纤维阵列与粗糙表面间的相互作用力为

$$\bar{P} = N_0 \frac{3EI}{L^3 \cos^2 \theta} \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Z-L \sin \theta)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{2} (Z - L \sin \theta) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{Z - L \sin \theta}{\sqrt{2}\sigma} \right) - 1 \right] \right\} \quad (10)$$

下面分析脱离过程中的作用力变化.假设在脱离前,为了使绒毛与表面之间紧密接触,先对绒毛施

加一定的预压力 \bar{P}^* , 使得基底面与表面间的间距达到 Z^* , 然后再使粘附阵列与粗糙表面脱离。

由单根绒毛与接触表面动态脱离过程条件, 见式(5), 可以得到相应的绒毛与表面间的接触情况为

$$\Phi(Z-h-L\sin\theta) = \begin{cases} 0, & h < Z^* - L\sin\theta \\ 0, & h < Z - L\sin\theta - \delta_0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(8), 得到在动态脱离过程中, 纳米纤维阵列与粗糙表面间的相互作用力方程如下:

当 $Z < Z^* + \delta_0$ 时, 绒毛还没有产生最大变形量, 阵列与粗糙表面间的相互作用力为

$$\bar{P} = N_0 \frac{3EI}{L^3 \cos^2\theta} \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Z^* - L\sin\theta)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{2}(Z - L\sin\theta) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{Z^* - L\sin\theta}{\sqrt{2}\sigma}\right) - 1 \right] \right\} \quad (12)$$

当 $Z \geq Z^* + \delta_0$ 时, 绒毛已经产生了最大变形量, 阵列与粗糙表面间相互作用力为

$$\bar{P} = N_0 \frac{3EI}{L^3 \cos^2\theta} \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Z - \delta_0 - L\sin\theta)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{2}(Z - L\sin\theta) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{Z - \delta_0 - L\sin\theta}{\sigma}\right) - 1 \right] \right\} \quad (13)$$

2.3 仿壁虎纳米纤维阵列参数设计

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好的粘附性能。为了防止纳米绒毛间由于引力而造成纠结, 应使纳米绒毛材料具有较大刚度并尽量分散; 而为获得足够大的粘附力又要求纳米阵列具有较高密度。所以, 纳米阵列的参数设计应满足三个条件^[5,10]: (I) 纳米绒毛应具有较高的高宽比以具有较好的柔顺性; (II) 纳米阵列应尽量具有较高的密度以获得较好性能的粘附; (III) 纳米阵列材料应具有较高刚度。

绒毛相当于一悬臂梁, 绒毛间相互作用如图 4 所示。其中, 绒毛长为 L 、半径为 r , Δ 为相邻两根绒毛的间距; 梁的转动惯量为 $I = \pi r^4/4$; 绒毛材料的杨氏模量为 E ; 纵向位移 Δ_y , 纵向刚度 k_y ^[6]。这样得到

$$\Delta_y = \frac{F_y L^3}{3EI}, \quad k_y = \frac{F_y}{\Delta_y} = \frac{3\pi r^4 E}{4L^3} \quad (14)$$

为使绒毛与接触表面粘附, 而不相互纠结。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

$$\Delta \geq \frac{8F_0 L^3}{8\pi r^4 E} \quad (15)$$

结合粘附阵列的参数设计标准及式(15), 给出粘附阵列的设计参数为: 纳米绒毛选用硅橡胶, 纳米级绒毛的高宽比 1 : 10, 纳米绒毛的直径 400 nm, 长度 4 μm , 纳米绒毛间的间距 0.6 μm 。这样阵列上纳米绒毛的密度 10^8 根/ cm^2 。

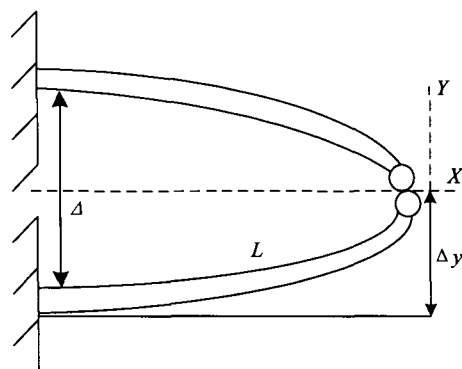


图 4 绒毛间相互作用示意图

Fig. 4 Sketch map of the interaction between spatulas

3 仿真结果

根据上述参数选择, 利用 MATLAB 对所设计的阵列与粗糙表面间相互作用模型进行仿真。在基于式(10)仿真得到在动态粘附接触状态中, 不同粗糙度下的粘附阵列与接触表面间相互作用力、间距的关系如图 5 所示。

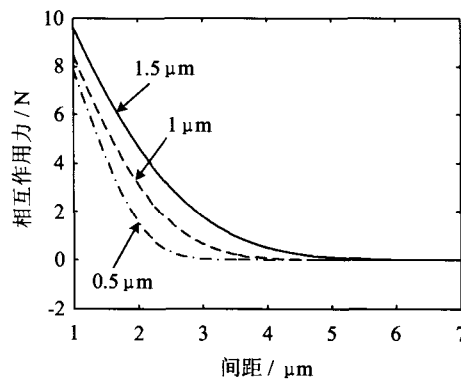


图 5 动态粘附接触状态中不同粗糙度下粘附阵列与接触表面间相互作用力与间距的仿真图

Fig. 5 Diagram of relation between the interaction force and the separation distance in dynamic contact process for various roughnesses

从图中可以看出, 在动态粘附接触过程中, 随着阵列基底与接触表面间距的减小, 纳米纤维阵列与

接触表面间相互作用力由零逐渐增大,表现为斥力.同时可以看出,粗糙度大小对阵列与表面间的相互作用力有较大影响,接触表面越光滑,阵列与接触表面越容易达到紧密接触状态.这与文献[11]中提到的试验结果相符.试验发现:壁虎在粗糙表面上的粘附效果大大降低,也即在比较脏的表面或是剥落的墙面上粘附效果较差.

基于式(12)、(13),得到动态脱离状态中不同粗糙度下纳米纤维阵列与接触表面间的相互作用力与间距间的关系如图 6 所示.

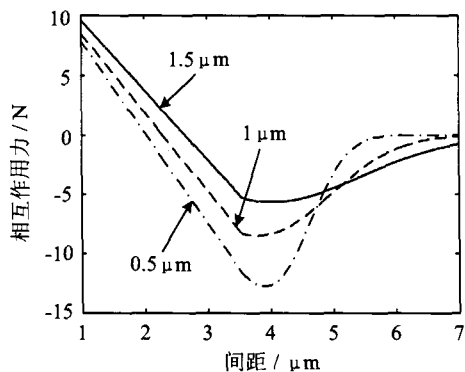


图 6 动态脱离过程中不同粗糙度下粘附阵列与接触表面间相互作用力与间距间的仿真图

Fig. 6 Diagram of relation between the interaction force and the separation distance in dynamic peeling off process for various roughnesses

从仿真图 6 中可以看出,在动态脱离过程中,随着阵列基底与接触表面间距的增大,纳米纤维阵列与接触表面间的相互作用力逐渐减小,表现形式由斥力转为吸引力;随着间距的继续增大,相互作用的吸引力也随之增大,并且存在一极值点;间距进一步增大,相互作用的吸引力开始减小直到趋近于零.接触表面越光滑,阵列与表面间所产生的最大粘附吸引力越大.

由于预压力越大,会使得基底面与表面间能达到的间距 Z^* 越小,即预压力决定了阵列与接触表面间的粘附分布.不同的粘附分布在脱离过程中就会产生不同的相互作用力关系曲线,如图 6 所示,且每条曲线存在一个粘附吸引力极值点,因此可以得到预压力与最大粘附吸引力之间的关系.不同粗糙度下阵列与表面间的相互作用力随对阵列所施加的预压力变化关系如图 7 所示.从图中可以看出,预压力越大,纳米纤维阵列在与接触表面动态脱离过程中所产生的最大粘附吸引力越大,预压力进一步增

大,最大粘附吸引力趋于一个稳定值.该结论与文献[2]中的实验结果基本吻合.

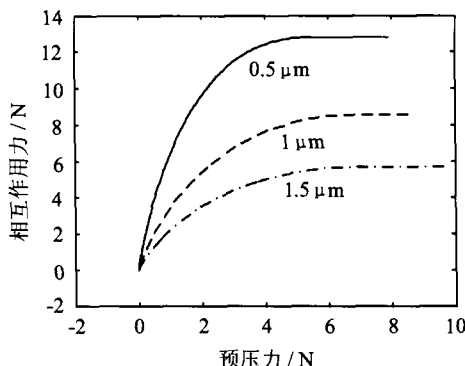


图 7 不同粗糙度下相互作用力与预压力关系仿真图

Fig. 7 Diagram of relation between the interaction force and preload for various roughnesses

在将纳米纤维阵列从粗糙表面上剥离过程中,绒毛群与接触表面间的夹角将发生相应变化,而角度变化也会引起相互作用力发生变化.根据前面推导的动态脱离过程中的相互作用力公式,可以得出阵列与接触表面间作用力与角度的关系曲线.从仿真图 8 中可以看出,大约在 30° 时,阵列与表面间相互作用力最大.随着角度增大,相互作用力减小.当角度大于 30° 时,阵列开始与接触表面脱离.可认为 30° 是绒毛群开始产生脱离的临界角.这与文献[5]中使用有限元法的分析结果相吻合,与文献[1]中的试验结果也基本一致.试验还发现,绒毛在一个特定的角度 ($30.6 \pm 1.8^\circ$) 与接触表面脱离.由此可以得出,绒毛的定位对脱离十分重要,选择合适的角度可以使得绒毛群更易从粗糙表面脱离,即将绒毛置于一特殊定位(特定临界角),可使得绒毛与接触表面脱离.

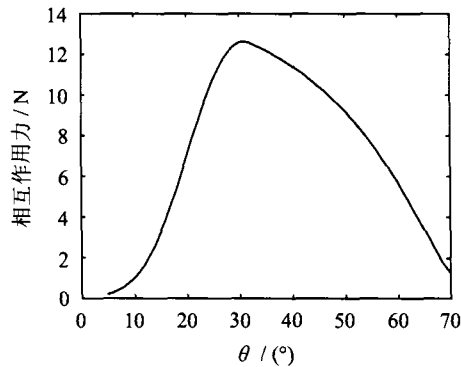


图 8 相互作用力与夹角之间的关系仿真图

Fig. 8 Diagram of relation between the interaction force and the separation angle

4 结论

本文基于线弹性、小变形的假设条件,分析了单根绒毛的受力情况,给出了动态粘附与脱离过程中的各段情况;基于粗糙表面的高斯高度分布,讨论了仿壁虎纳米纤维阵列在各个过程中与粗糙接触表面间的作用力变化情况. 根据合理的参数选择,利用 MATLAB 仿真了在动态接触与脱离过程中,仿壁虎纳米纤维阵列与不同粗糙表面间产生的作用力随间距变化的情况、作用力随预压力的变化情况以及相互作用力与夹角之间的关系. 并将仿真结果与一些相关试验结论进行对比,证明了本文模型的有效性.

在对本文模型进行分析时,为了处理方便,引用了一些假设. 例如,认为单根纳米绒毛端部与接触表面间的粘附力(主要是范德瓦尔斯力^[1])是常数,并且一旦脱离,该粘附力就消失;单根纳米绒毛的变形满足线弹性、小变形的假设;没有考虑轴向失稳问题;弹力和粘附吸引力的方向认为是垂直与被接触粗糙表面的水平基准面;以及接触分布在不同条件下为 0 或 1 等. 这些假设条件在文中也进行了相应解释. 下一步工作可将一些假设条件进行适当放松,对模型做进一步改进,进一步调整参数选择,以期得到更切合实际的结果,为仿壁虎纳米阵列的设计提供更好的理论基础.

参考文献 (References)

- [1] Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair [J]. *Nature*, 2000, 405(8):681-685.
- [2] Liang Y, Autumn K, Hsia S T, et al. Adhesion force measurements on single gecko setae [C] // Technical Digest of the 2000 Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, 2000:33-38.
- [3] Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(7):461-463.
- [4] Sitti M, Fearing R S. Nanomolding based fabrication of synthetic gecko foot-hairs [C] // 2nd IEEE Conference on Nanotechnology. Washington D C, 2002:137-140.
- [5] GAO H J, WANG X, YAO H M, et al. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos [J]. *Mechanics of Material*, 2005, 37(2-3): 275-285.
- [6] Sitti M, Fearing R S. Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures for future wall-climbing robots [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003, 17(8):1 055-1 061.
- [7] Persson B N J. On the mechanism of adhesion in biological systems [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2003, 118(16):7 614-7 621.
- [8] Campolo D, Jones S, Fearing R S. Fabrication of Gecko foot-hair like nano structures and adhesion to random rough surfaces [C] // IEEE Nano, San Francisco: IEEE Press, 2003: 12-14.
- [9] Israelachvili J N. *Intermolecular and Surface Forces* [M]. London: Academic Press, 1992.
- [10] Sitti M. High aspect ratio polymer micro/nano-structure manufacturing using nanoembossing, nanomolding and directed self-assembly [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe: IEEE Press, 2003: 886-890.
- [11] Autumn K, Peattie A M. Mechanisms of adhesion in geckos [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(6):1 081-1 090.