

# 壁虎最小黏附单元撕脱行为的仿生模拟

彭志龙 陈少华\*

(中国科学院力学研究所 LNM, 100190, 北京)

**摘要** 本文根据壁虎最小黏附单元的真实铲状结构,建立了相应的力学模型,从数值模拟角度开展了研究。考虑了单个铲状单元的黏附长度、杨氏模量、厚度以及表面粗糙度对黏附行为的影响,并重点考虑了撕脱角对撕脱力的作用。研究表明,铲状单元的黏附类似于有限尺寸薄膜黏附,铲状单元尺寸满足黏附力达到最大值,亦克服了粗糙度对黏附的影响;杨氏模量与厚度对黏附行为的影响规律相似,并与宏观薄膜撕脱的理论及实验结果一致;撕脱力随撕脱角( $0^\circ \sim 90^\circ$ )的增大而减小,当撕脱角较小时,切向力占主导,当撕脱角较大时,法向力占主导。该研究为进一步揭示壁虎微观可逆黏附机制提供了理论依据。

**关键词** 仿生黏附, 铲状单元, 薄膜撕脱, 撕脱角, 撕脱力

## 引言

壁虎、蜘蛛、苍蝇等生物超强的黏附能力引起了科技界的广泛兴趣,壁虎由于体重较大成为主要的研究对象。21 世纪初期,美国科学家 Autumn 等人研究发现,壁虎超强的黏附能力来源于脚部大量刚毛与物体表面间的范德华力[1, 2]。壁虎的黏附系统是一种多分级且具有纤维状表面的结构,每个脚趾生有数百万根细小刚毛,每根刚毛的尺寸约为  $30 \sim 130 \mu\text{m}$ ,每根刚毛的顶端又分叉出数百根更细小的铲状绒毛,每根绒毛长度及宽度方向的尺寸约为  $200\text{nm}$ [3],单根刚毛的黏附力能达到几十微牛[2]。

Gao 等人[4]将壁虎最小黏附单元看作柱状纤维与基底接触,研究发现当柱状纤维的半径达到一定的临界尺寸时,界面的分离不是因为裂纹扩展,而是接触区的应力均匀达到理论强度发生破坏,该现象称为缺陷不敏感(Flaw tolerance),并解释了壁虎超强的黏附能力;Gao 和 Chen[5]进一步分析了缺陷不敏感尺寸的广义表达;Tian 等人[6]和 Autumn 等人[7]提出一种摩擦黏附模型分别研究了壁虎单根绒毛和刚毛的黏附行为;Yao 等人[8]分析了多级结构对黏附行为的影响;Chen 和 Gao[9]从宏观黏附接触力学的角度成功解释了各向异性对黏附强度的影响;Lee 等人[10]分析了倾斜柱状纤维的黏附行为,发现倾斜纤维非对称结构的黏附力具有方向性;此外,Sitti 和 Fearing[11],Spolenak 等人[12]也分别对壁虎黏附行为进行了相关的理论研究。实验方面亦取得了很大的进展,Autumn 等人[1]应用 MEMS 技术实验测得壁虎单根刚毛的黏附力;Huber 等人[13]应用原子力显微镜(AFM)测量得到了单根绒毛的黏附力;Geim 等人[14],Lee 和 Messersmith[15]利用多聚物材料仿生制备多纤维柱状结构,并研究其黏附行为,关于黏附机制的详细进展,可以参考文献[16]。

然而,壁虎的微观可逆黏附机理到目前为止还未达成共识。本文仿生壁虎最小黏附单元真实的铲状结构,建立相应的力学模型,将壁虎铲状绒毛看作有限尺寸的纳米弹性薄膜,从数值计算的角度详细分析了弹性薄膜黏附长度的尺寸效应,杨氏模量,厚度,撕脱角,以及表面粗糙度对黏附行为的影响。

## 1 计算模型

壁虎黏附系统最末端纤维(最小黏附单元)类似于铲状结构(spatula),铲状纤维长度及宽度尺寸约为  $200\text{nm}$ ,厚度约为  $5\text{nm}$ 。绒毛纤维成分主要是 $\beta$ 蛋白质,杨氏模量约为  $2\text{GPa}$ ,表现出较强的弹性性质,因此,铲状绒毛与物体表面的接触可看成有限尺寸的纳米弹性薄膜与刚性基底的黏附。本文从单根铲状纤维出发,建立了相应的薄膜撕脱力学模型,如图 1 所示,其中  $L$  与  $t$  分别为铲状绒毛

\* Email address: [shchen@lnm.imech.ac.cn](mailto:shchen@lnm.imech.ac.cn); Tel: 010-82543960

的黏附长度和厚度， $P$  与  $\theta$  分别为撕脱力和撕脱角。由于铲状单元宽度（约  $200nm$ ）远大于厚度（约  $5nm$ ），可简化为平面应变问题。弹性薄膜采用 Simo, Taylor 等人修正后的四节点平面应变单元，这类单元提高了分析不可压缩材料以及材料弯曲行为的精度，接触区利用一层黏附单元(cohesive surface element)模拟表面间范德华力。本文除了 2.1 节考虑了黏附长度的变化外，其他情况的黏附长度(图 1 示  $L_1$ )均假设为  $50nm$ ，其他参数取值相同。

界面黏附单元采用了 Tvergaard-Huchinson 本构模型(T-H 模型)[17]描述表面间力-位移关系(如图 2)，该模型保留了不同加载方向下表面间的分子势。

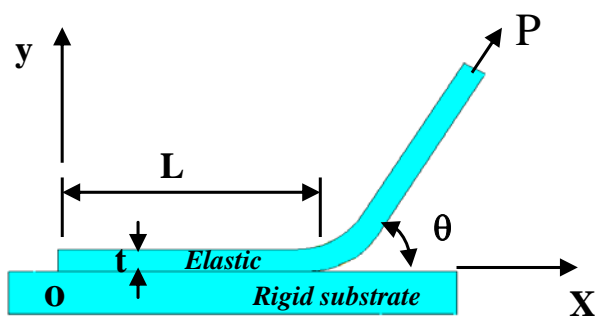


图 1 壁虎最小黏附单元撕脱模型

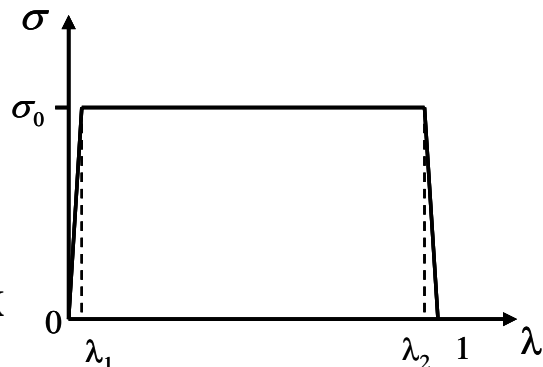


图 2 黏附单元本构关系

T-H 模型中表征表面分离的无量纲量位移  $\lambda$  为：

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{\delta_n}{\delta_n^c}\right)^2 + \left(\frac{\delta_t}{\delta_t^c}\right)^2} \quad (1)$$

其中， $\delta_n$ ， $\delta_t$  分别为法向和切向位移分量， $\delta_n^c$ ， $\delta_t^c$  为法向和切向最大允许位移分量。当  $\lambda=1$  时，表面分离，作用力为零。应力-位移关系可由下面势函数描述：

$$\Pi(\delta_n, \delta_t) = \delta_n^c \int_0^\lambda \sigma(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$\text{其中 } \sigma(\lambda) = \begin{cases} \sigma_0 \lambda / \lambda_1, & (\lambda < \lambda_1) \\ \sigma_0, & (\lambda_1 < \lambda < \lambda_2) \\ \sigma_0 (1-\lambda) / (1-\lambda_2), & (\lambda_2 < \lambda < 1) \end{cases}$$

黏附面上法向及切向应力分量分别为：

$$T_n = \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_n} = \frac{\sigma(\lambda) \delta_n}{\lambda \delta_n^c}, \quad T_t = \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_t} = \frac{\sigma(\lambda) \delta_t}{\lambda \delta_t^c} \quad (3)$$

单位面积的黏附能  $\Gamma_0$  为：

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 \delta_n^c [1 - \lambda_1 + \lambda_2] \quad (4)$$

由文献[18]知,  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的取值对结果影响很小, 本文参数取值如下[4]:

$$\sigma_0 = 20MPa, \Gamma_0 = 0.01J/m^2, \lambda_1 = 0.001, \lambda_2 = 0.999, \delta_n^c = \delta_t^c = 0.5nm, E = 2GPa \quad (5)$$

## 2 结果分析

### 2.1 黏附长度对黏附行为的影响

当撕脱角分别为  $0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$  时, 撕脱力与黏附长度的关系如图 3 示。由图 3 曲线可见, 当黏附长度较小时, 撕脱力随黏附长度的增加而增大, 当黏附长度达到一定的临界值时, 撕脱力趋于一稳定值, 黏附长度的临界值随撕脱角的增大而减小。当撕脱角为  $0^\circ$  时, 撕脱力达到最大时黏附长度的临界值为  $25nm$  左右, 该值远小于壁虎铲状绒毛的真实尺寸 (约  $200nm$ )。可见, 薄膜撕脱模型不同于已有柱状单元的接触模型[4], 壁虎最小黏附单元约  $200nm$  的尺寸, 并非形成缺陷不敏感的需要, 可以推断, 该长度恰是为了保证粗糙度的影响下撕脱力不变 (见 2.3 分析)。

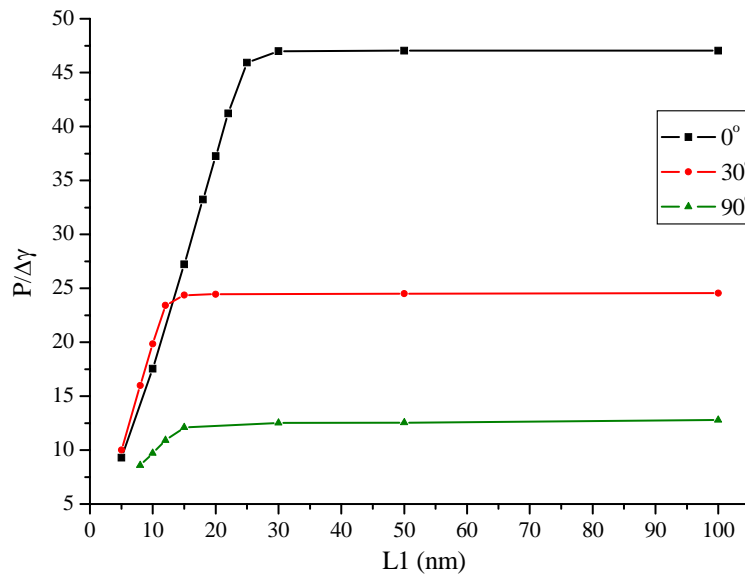


图 3 撕脱力与黏附长度的关系

### 2.2 撕脱角对撕脱力的影响

撕脱角对撕脱力的影响如图 4 所示, 随着撕脱角的增大, 撕脱力逐渐减小, 切向力由最大值逐渐减小到零, 法向力由零逐渐趋于一临界值, 并且当撕脱角较小时撕脱力主要由切向力贡献, 当撕脱角较大时撕脱力主要由法向力贡献, 与 Tian 等人[6]理论分析一致。这两种极限情况分别对应于壁虎停留在垂直墙壁 ( $0^\circ$ ) 和天花板 ( $90^\circ$ ) 的情况, 并可以解释为什么壁虎平时更多的时间停留倾斜墙壁而非天花板上[6]。

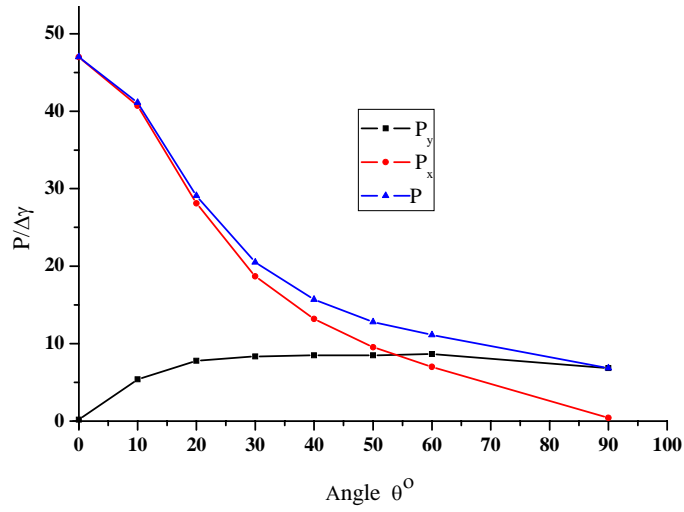


图4 撕脱力与撕脱角的关系

### 2.3 表面粗糙度的影响

自然界的表面都具有不同程度的表面粗糙度，为了研究壁虎如何克服表面粗糙度对其黏附的影响，本文建立了如图 5 示的模型，粗糙度或弱黏附区利用一个有限长裂纹模拟，其尺寸分别为  $5nm, 10nm, 15nm, 20nm$ 。图 6 显示，随着表面粗糙度尺寸的增加，黏附力基本保持不变。本文虽然考虑的情况较为理想，但在一定程度上揭示了壁虎在粗糙表面上的黏附机理。由 2.1 可知，黏附力最大时的临界黏附长度约为  $20nm$ ，而铲状绒毛真实尺寸约为  $200nm$ ，可以推断，目的是为了适应不同粗糙表面的黏附。

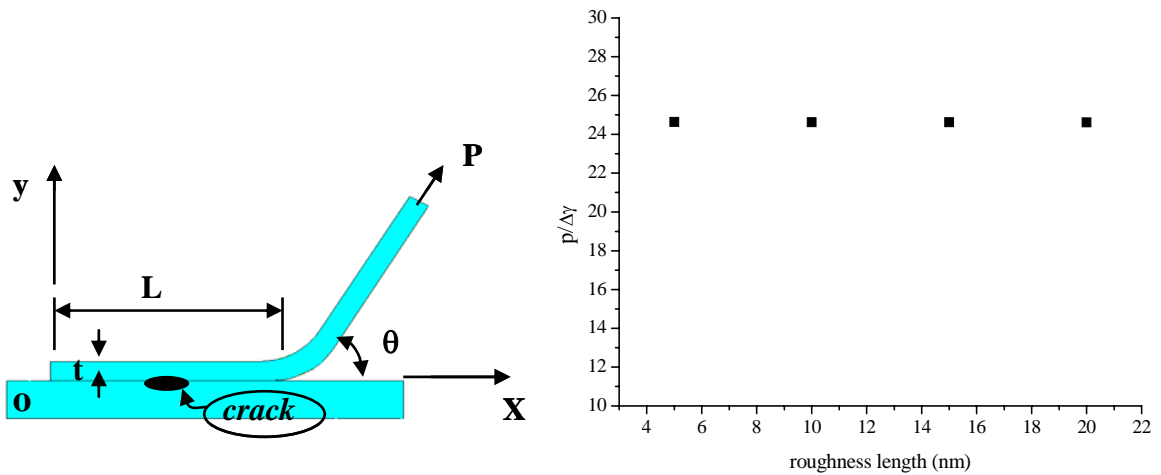


图5 接触区表面粗糙度示意图

图6 表面粗糙度对黏附行为的影响

### 2.4 纳米薄膜厚度及杨氏模量的影响

近年来，薄膜撕脱实验由于其简单和易操作性在分析涂层材料的力学行为，材料保护和密封等方面应用非常广泛，分析薄膜的厚度和杨氏模量对黏附行为的影响有利于理解纳米尺度下薄膜撕脱的力学行为。图 7 为薄膜厚度对黏附面上应力分布的影响；图 8 为杨氏模量对黏附面上应力分布的影响，从中可得薄膜厚度及杨氏模量对黏附面上应力分布的影响规律相似，即随着薄膜厚度和杨氏

模量的增加, 接触区内应力达到理论强度分布的范围增大, 撕脱力也随之增大, 这与宏观薄膜撕脱实验结论吻合。为什么壁虎绒毛的厚度为  $5\text{nm}$  左右, 杨氏模量为  $2\text{GPa}$  是值得以后进一步研究的问题。

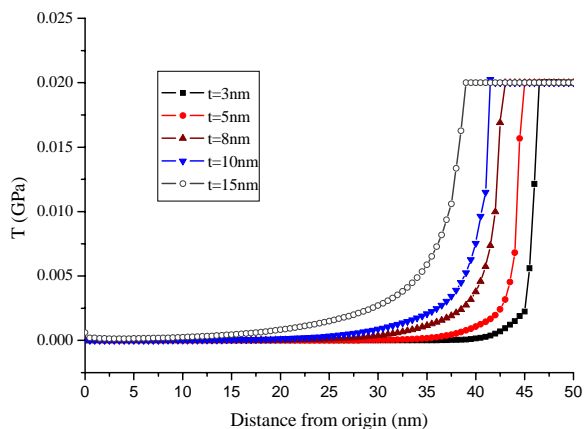


图7 黏附面上应力分布与薄膜厚度的关系

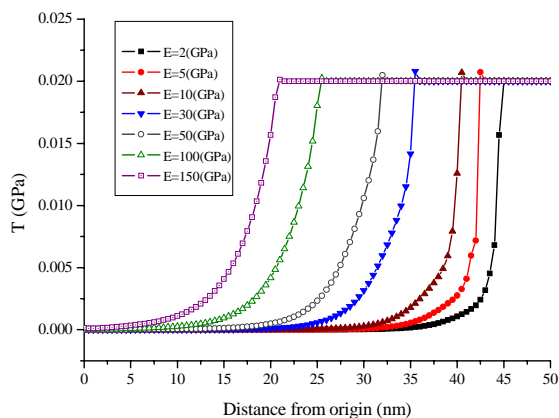


图8 黏附面上应力分布与薄膜杨氏模量的关系

### 3 讨论

本文从数值计算的角度分析了壁虎最小黏附单元的黏附行为, 考虑了铲状绒毛的长度、厚度、杨氏模量、表面粗糙度及撕脱角对黏附行为的影响。数值结果与已有实验及理论结果有很好的一致性。实验测得壁虎单根绒毛在  $90^\circ$  撕脱角时的黏附力约为  $10\text{nN}$ , 本文数值结果显示在  $90^\circ$  撕脱角时, 撕脱力约为  $13\text{nN}$ ; Tian 等人[6]利用摩擦黏附模型理论分析了壁虎单根绒毛的黏附行为, 同样发现在不同的撕脱角下, 切向力与法向力分别占主导的现象, 进一步说明了本文数值方法的可靠性, 亦证明了本文发现的撕脱力存在尺寸效应的合理性。本文的分析为进一步揭示壁虎微观可逆黏附机制提供了理论依据, 对超强黏附材料的微结构设计有一定的指导作用。

### 致谢

感谢国家自然科学基金(No. 10672165, 10732050, 10721202), KJCX2-YW-M04, 中科院创新项目及海外留学回国人员启动基金的资助。

### 参考文献

1. Autumn, K., et al., Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000. **405**(6787): p. 681-685.
2. Autumn, K., et al., Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002. **99**(19): p. 12252-12256.
3. Ruibal, R. and V. Ernst, Structure of digital setae of lizards. *Journal of Morphology*, 1965. **117**(3): p. 271-293.
4. Gao, H.J., et al., Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(2-3): p. 275-285.
5. Gao, H.J. and S.H. Chen, Flaw tolerance in a thin strip under tension. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 2005. **72**(5): p. 732-737.
6. Tian, Y., et al., Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006. **103**(51): p. 19320-19325.
7. Autumn, K., et al., Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment. *Journal of Experimental Biology*, 2006. **209**(18): p. 3569-3579.
8. Yao, H. and H. Gao, Mechanics of robust and releasable adhesion in biology: Bottom-up designed hierarchical structures of gecko. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2006. **54**(6): p. 1120-1146.

9. Chen, S.H. and H.J. Gao, Bio-inspired mechanics of reversible adhesion: Orientation-dependent adhesion strength for non-slipping adhesive contact with transversely isotropic elastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007. **55**(5): p. 1001-1015.
10. Lee, J.H., R.S. Fearing, and K. Komvopoulos, Directional adhesion of gecko-inspired angled microfiber arrays. *Applied Physics Letters*, 2008. **93**(19):191910.
11. Sitti, M. and R.S. Fearing, Synthetic gecko foot-hair micro/nano-structures as dry adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(8): p. 1055-1073.
12. Spolenak, R., S. Gorb, and E. Arzt, Adhesion design maps for bio-inspired attachment systems. *Acta Biomaterialia*, 2005. **1**(1): p. 5-13.
13. Huber, G., et al., Resolving the nanoscale adhesion of individual gecko spatulae by atomic force microscopy. *Biology Letters*, 2005. **1**(1): p. 2-4.
14. Geim, A.K., et al., Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Materials*, 2003. **2**(7): p. 461-463.
15. Lee, H., B.P. Lee, and P.B. Messersmith, A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos. *Nature*, 2007. **448**(7151): p. 338-342.
16. 陈少华, 苏爱嘉, 生物黏附与仿生黏附力学的进展. *力学与实践*, 2007. **29**(2): p. 7-17.
17. Tvergaard, V. and J.W. Hutchinson, The relation between crack-growth resistance and fracture process parameters in elastic plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1992. **40**(6): p. 1377-1397.
18. Wei, Y.G., Modeling nonlinear peeling of ductile thin films-critical assessment of analytical bending models using FE simulations. *International Journal of Solids and Structures*, 2004. **41**(18-19): p. 5087-5104.

## **Simulation of peeling behavior of gecko's smallest adhesive element**

Zhilong Peng    Shaohua Chen

(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of sciences, 100190, Beijing)

**Abstract** In the present paper, we analyze the adhesion behavior of a single spatula with finite element method by a peeling mechanical model. The effects of the length, Yong's modulus, thickness of a single spatula and roughness of substrate surface, especially peeling angle, on adhesion behavior are considered. Results illustrate that adhesion of spatula is similar to that of a finite dimensional thin film adhering on substrate. The adhesion length of spatula can make adhesion force maximum, and overcome effect of roughness on adhesion; the influence of thickness and Yong's modulus of spatula on adhesion are alike, which agree with macro-film peeling test results. Peeling force decreases with the peeling angle increases; shear force dominates the peeling force when peeling angle is small, while normal force dominates that as peeling angle approaches 90 degree. Our analysis provide theoretical basis for revealing the micro principle of reversible adhesion of gecko.

**Keywords** biomimetic adhesion, spatula, film peeling, peeling angle, peeling force