

足垫表面微结构对蚂蚁黏附的影响*

王琮 彭志龙 陈少华**

(中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要 本文对几种蚂蚁的中垫表面进行了显微观察, 发现中垫表面规则分布有微米尺度的微结构。黏附能力不同的蚂蚁, 中垫微结构存在明显差异。根据实验结果建立理论模型进行分析, 考虑毛细力与范德华力的共同作用, 理论结果与实验结果一致。黏附力与中垫表面微结构的真实接触面积成正比, 并与微结构形状尺寸相关。

关键词: 蚂蚁; 黏附机制; 中垫; 微结构; 黏附力

一、引言

在自然界长期的演化和生命进化的过程中, 壁虎、蚂蚁、蜘蛛、苍蝇、蚱蜢等一类动物及昆虫形成了特殊的微纳米尺度的黏附结构, 不仅能够各种物体表面停留, 而且能够快速实现黏附及脱黏。对这类生物的黏附系统进行研究, 并揭示其黏附机制, 对与仿生可逆黏附界面的设计, 以及解决微/纳系统中的表面/界面黏附问题^[1, 2], 具有重要的意义。

不同动物的黏附原理不尽相同。一般认为, 壁虎、蜘蛛、以及一些甲虫等一类动物采用多纤维毛发状的多分级结构作为黏附系统表面^[3], 另一类则采用柔软的光滑足垫作为黏附系统表面, 比如蝗虫、蚂蚁等^[4, 5]。进一步研究发现, 树蛙、蝗虫等一些动物的光滑足垫表面并非完全光滑, 而是规则分布有微米尺度的正六边形岛状突起结构^[6, 7], 这种微结构的存在可以显著提升足垫表面的黏附能力^[8]。蚂蚁作为一种常见的黏附动物, 其黏附机制受到了许多科学家的关注。W. Federle 等人通过对一种蚂蚁 (*Oecophylla smaragdina*) 的脚部结构进行显微观察, 发现蚂蚁采用一种可收放的囊状中垫作为黏附的主要器官^[9]。一般认为蚂蚁中垫表面光滑, 通过黏附系统分泌液体, 利用毛细力提供蚂蚁所需的法向黏附力。然而进一步实验发现, 蚂蚁脚在光滑表面不但可以产生数十倍体重的法向黏附力, 还可以产生很强的切向黏附力, 切向黏附力可以达到法向黏附力的两倍以上^[10]。光滑表面的毛细黏附模型无法对该实验现象给出合理的解释。此外, Federle 等人实验发现, 对于生存在不同环境中的不同种类蚂蚁, 其黏附能力也存在较大差异^[11]。

为进一步揭示蚂蚁黏附机制, 本文选取几种生存环境显著不同的蚂蚁, 对其中垫黏附区以及表面微结构进行显微观察, 并对其在光滑表面的黏附力进行测量。基于实验观察结果, 建立具有微结构表面的干、湿黏附理论模型, 考虑毛细力与范德华力的共同作用, 对实验结果给出合理解释, 并进一步分析了微结构尺寸、面积分数等因素对黏附的影响。

*国家自然科学基金: (11302228、11125211、11372317)及国家重大科学研究计划 (2012CB937500)

**通讯作者: 电话: +86-10-82543960; 传真: +86-10-82543977;

E-mail: chenshaohua72@hotmail.com.

二、实验结果及理论分析

3.1 中垫微结构显微观察及黏附力测量

选取黄猷蚁、拟黑多刺蚁、日本弓背蚁、聚纹双刺猛蚁四种蚂蚁，利用光学显微镜对活体蚂蚁中垫与玻璃表面的接触区进行观察，并利用扫描电镜对中垫表面微结构进行观察。实验发现，蚂蚁中垫表面并非光滑，表面存在微米尺度的规则分布结构。通过对微结构尺寸以及微结构在中垫表面所占的面积分数进行测量发现，四种蚂蚁的中垫表面微结构存在明显的差异。

利用离心原理，设计搭建了针对活体蚂蚁的黏附力测量仪，对四种蚂蚁在光滑有机玻璃表面的最大法向黏附力进行测量。

显微观察结构及黏附力测量结果如表 1 所示。

表 1 蚂蚁中垫微结构及黏附力

蚂蚁种类	中垫接触面积(μm^2)	微结构形状	微结构尺寸(μm)	面积分数	法向黏附力(mN)
黄猷蚁	24900	离散六边形岛状平台	2-7	0.8	6.9
拟黑多刺蚁	4300	离散扁锥台	2	0.3	0.97
日本弓背蚁	3500	离散圆柱状突起	1	0.1	0.54
聚纹双刺猛蚁	2200	平行分布的褶皱	2-4	0.8	0.44

3.2 干湿黏附理论模型

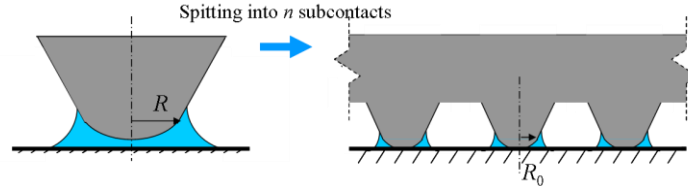


图 1 微结构干湿黏附理论模型

如图 1 所示，考虑单个锥台突起与光滑基底湿接触，突起顶端为球冠，接触区存在一定体积的液体。突起与基底之间的黏附力由毛细力与范德华力两部分提供

$$F = F_c + F_{vdw} \quad (1)$$

其中毛细力由液桥的表面张力及内外压强差产生

$$F_c = 2\pi\gamma b \cos\theta + \pi b^2 \cdot \Delta p \quad (2)$$

范德华力由两物体间的 Lennard-Jones 势

$$w(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (3)$$

积分得到。对于微结构表面多个突起的黏附力，由单个突起黏附力叠加得到

$$F_{total} = nF_0 = n(F_{c0} + F_{vdw0}) \quad (4)$$

结合实验观察得到的蚂蚁中垫微结构尺寸参数，得到四种蚂蚁的黏附力理论结果。

三、结论

本文通过显微观察,发现蚂蚁中垫表面存在规则分布的微米尺度结构,不同种类蚂蚁的中垫微结构存在明显的差异。根据显微观察结果建立理论模型进行分析,理论结果与黏附力测量结果一致。蚂蚁黏附力与微结构在基底表面的真实接触面积成正比,微结构的形状、尺寸对黏附力大小有明显的影响。

参 考 文 献

- 1 Lin W. H., Zhao Y. P. Casimir effect on the pull-in parameters of nanometer switches. *Microsyst. Technol.*, 2005; 11: 80-85
- 2 Hu Y. Q., Zhao Y. P., Yu T. X. Tensile tests of micro anchors anodically bonded between Pyrex glass and aluminum thin film coated on silicon wafer. *Microelectron. Reliab.*, 2008; 48: 1720-1723
- 3 Autumn K., Sitti M., Liang Y. C. A., Peattie A. M., Hansen W. R., Sponberg S., Kenny T. W., Fearing R., Israelachvili J. N., Full R. J. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2002; 99: 12252-12256
- 4 Gorb S., Scherge M. Biological microtribology: anisotropy in frictional forces of orthopteran attachment pads reflects the ultrastructure of a highly deformable material. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B-Biol. Sci.*, 2000; 267: 1239-1244
- 5 Federle W., Brainerd E. L., McMahon T. A., Holldobler B. Biomechanics of the movable pretarsal adhesive organ in ants and bees. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2001; 98: 6215-6220
- 6 Drechsler P., Federle W. Biomechanics of smooth adhesive pads in insects: influence of tarsal secretion on attachment performance. *J. Comp. Physiol. A -Neuroethol. Sens. Neural Behav. Physiol.*, 2006; 192: 1213-1222
- 7 Chung J. Y., Chaudhury M. K. Roles of discontinuities in bio-inspired adhesive pads. *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 2005; 2: 55-61
- 8 Arzt E., Gorb S., Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2003; 100: 10603-10606
- 9 Federle W., Riehle M., Curtis A. S. G., Full R. J. An Integrative Study of Insect Adhesion: Mechanics and Wet Adhesion of Pretarsal Pads in Ants. *Integr. Comp. Biol.*, 2002; 42: 1100-1106
- 10 Federle W., Baumgartner W., Holldobler B. Biomechanics of ant adhesive pads: frictional forces are rate- and temperature-dependent. *J Exp Biol*, 2004; 207: 67-74
- 11 Federle W., Rohrseitz K., Holldobler B. Attachment forces of ants measured with a centrifuge: Better 'wax-runners' have a poorer attachment to a smooth surface. *J. Exp. Biol.*, 2000; 203: 505-512