

微间隙受限液体行为与昆虫爪垫在光滑壁面的粘着机理*

张晓昊¹⁾ 张向军^{1,2)†} 刘永和²⁾ J. A. Schaefer²⁾ 温诗铸¹⁾

1) 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

2) Department of Technical Physics, Centre for Micro and Nanotechnologies,
Technical University of Ilmenau, Ilmenau 98693, Germany)
(2006 年 11 月 13 日收到, 2007 年 1 月 31 日收到修改稿)

自然界中许多昆虫通过分泌一层油性液体薄膜实现其爪垫表皮和光滑壁面之间粘附和解粘附, 从而实现在光滑壁面上的快速爬行. 为了揭示昆虫爪垫与光滑壁面间微量液体薄膜对生物粘着的意义, 基于自行研制的粘着接触实验仪, 采用微量的 [emim][Tf2N] 离子液体和聚 α 烯烃油, 观测其受限在纳米级光滑钢球表面与玻璃表面之间的接触行为以及法向粘着力. 实验发现, 临界体积 (10^{-12} — 10^{-9} L) 范围内的受限液滴达到临界厚度 (小于 $2 \mu\text{m}$) 后会出现自动铺展和瞬时收缩行为, 并同时提供幅值稳定且数值相当大的法向粘着力. 这一现象与液桥弯月面的毛细作用有本质区别, 受限液体薄膜表现出一定的类固化特征. 基于这一现象, 昆虫通过控制爪垫与壁面间受限液体的膜厚或液体量, 就可以控制爪垫与光滑壁面粘着应力的大小 (由 0.45 mPa 减小到 0 mPa 左右), 从而实现稳固的粘附和快速的解粘附. 微间隙受限液体的粘着行为研究可以为昆虫爪垫粘着机理及相关的仿生技术提供物理基础.

关键词: 受限液体, 粘着力, 昆虫爪垫, 类固化

PACC: 4630P, 6810C

1. 引 言

长久以来, 昆虫 (如甲虫、蟑螂) 及其他小动物 (如壁虎) 在光滑壁面上自由爬行的能力一直吸引并引起研究人员的广泛兴趣. 其爪垫和光滑壁面间粘着力产生和控制机理是研究的焦点之一. 通常认为, 昆虫与小动物在光滑壁面的爬行运动是利用其具毛爪垫或光滑爪垫^[1,2]. 具毛爪垫的动物, 以壁虎为例^[3], 其爪垫可以分为微毛、层片、刚毛、括片四级. 最末级的括片厚度在 5 — 10 nm 左右, 如图 1 所示. 这种分级结构可以有效提高实际接触面积, 因而可以实现较大的粘着力. 目前的模拟计算认为, 几十万根纳米尺度的微毛与光滑表面之间的范德华力足以产生支撑壁虎运动的粘着力. 但最近的一些研究也显示^[4-8], 壁面材料的亲疏水性及环境湿度对粘着力有很大影响, 即液体毛细效应的影响不容忽视. 另一方面, 生物学家发现^[9], 具有光滑爪垫的昆

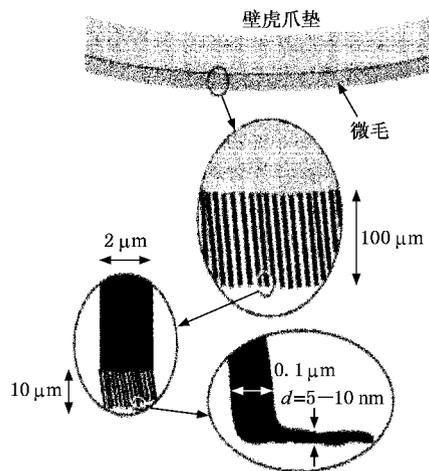


图 1 壁虎爪垫的微结构

虫 (如蟑螂、蜜蜂、蝗虫、臭虫等) 通过分泌一层油性液体薄膜实现其爪垫表皮和光滑壁面之间的粘附. Federle 等^[5] 利用扫描电子显微镜 (SEM) 观测了苍蝇爬过后的玻璃表面 (图 2), 其足迹由微量圆形小液

* 国家自然科学基金 (批准号 50305014, 50575123) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xjzhang@mail. tsinghua. edu. cn

滴组成,这些小液滴直径在 $1\text{--}2\ \mu\text{m}$ 之间.这是一种油性液体,含有非挥发性的脂状物质,且不溶于水.通常认为,这层受限液体膜由于液体表面张力和黏度的作用,提供昆虫爪垫和光滑壁面之间的粘附力.

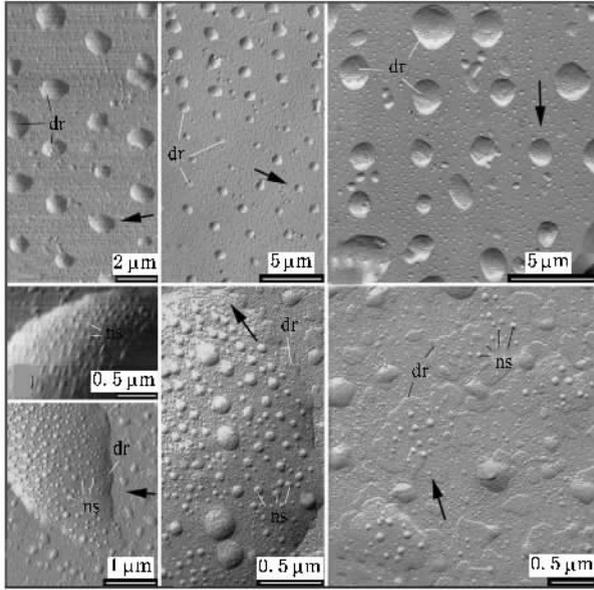


图2 苍蝇爬过后玻璃表面的 SEM 照片

为了探究微量受限液体在微间隙下的行为以及昆虫爪垫粘着机理,本文在自行研制的粘着实验仪上测试和研究了微纳米间隙下光滑固体表面间受限液体薄层的动态接触变化过程与相应的粘着力.

2. 测试仪器与实验方法

实验采用自行研制的粘着接触实验仪,结构如图3所示.为了模拟昆虫爪垫和光滑壁面通过液体薄膜的接触状态,本文采用纳米级光滑的不锈钢球作为上试样,下试样采用光滑玻璃盘(亲水)或者镀全氟聚乙醚(PFPE)膜的玻璃盘(疏水).我们选用聚 α 烯烃(PAO)油和挥发性更低(蒸汽压几乎为零)的由1-乙醛基-3-甲基咪唑阳离子和三氟甲基磺酰胺阴离子组成的 $[\text{emim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 离子液体作为实验液体.PAO油的运动黏度约为 $95\ \text{mm}^2/\text{s}$; $[\text{emim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 离子液体的运动黏度约为 $500\ \text{mm}^2/\text{s}$.在下试样下方装有一个放大倍数为100倍的显微镜,可以直观地观测接触区动态变化.试验中,我们采用极细的金属丝针尖在光滑玻璃盘上沾上微量液滴,液滴的半径在微米量级,估算体积在 $10^{-12}\text{--}10^{-9}\ \text{L}$ 量级.这样,在上试样的运动过程中小球和光滑玻璃之间就

形成了受限的微量液体薄膜,如图3(c)所示,接触过程中的法向力由光纤位移传感器获得.上试样(光滑小球)装在悬臂梁力传感器上,利用压电陶瓷驱动其上下运动,与下试样上的光滑玻璃表面往复趋近—接触—分离.光纤位移传感器通过检测悬臂梁端部的变形挠度测量出接触—分离过程中法向作用力的大小.

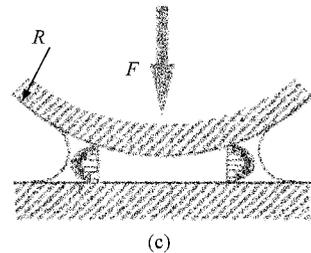
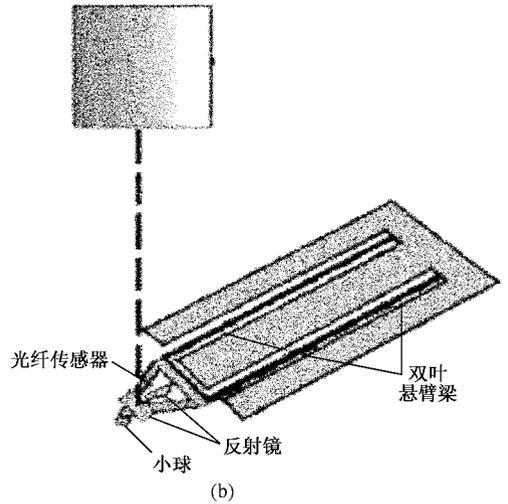
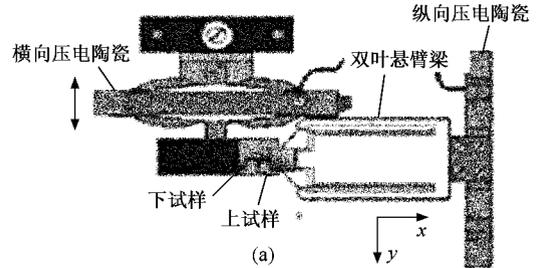


图3 粘着接触实验仪的结构及原理示意图 (a)仪器结构示意图,(b)测量原理示意图,(c)接触区示意图

3. 实验现象与结果

3.1. 微间隙下受限液体的铺展与收缩现象

图4是透过下试样透明玻璃盘的显微镜录制的上下试样的趋近—接触—分离过程中受限液体的接

触行为.

按照传统观点,受限液滴在小球与平面的接触分离过程中,其状态分为趋近时液桥形成和分离时液桥断裂两个阶段.前者对应图 4 中的过程 A,图 4 (a)是玻璃盘上自由状态的微液滴,图 4 (b)是小球趋近时形成的液桥弯月面.液桥断裂过程对应图 4 中的过程 D,图 4 (e)是上下试件分离过程中液桥半径逐渐缩小的状态,图 4 (f)是液桥断裂后自由状态的微液滴.在我们的实验中,当受限液体体积量较大时,上试样的每一个冲程中液滴状态的确定在图 4 (a)(b)(e)(f)之间变化,与传统的弯月面变化规

律一致.

通过进一步的实验发现,当逐渐减小受限液体的体积量至大约 10^{-12} L 量级时,接触区的受限液体会出现两个十分明显的过程(图 4 中的过程 B 和过程 C).当小球逐渐下压到达一定间隙(液体膜厚为 $2 \mu\text{m}$ 甚至更小)时,受限液体会快速铺展开,铺展后的液膜直径可扩大数倍到 10 倍以上,我们称其为受限液滴的铺展过程(图 4 中的过程 B).相应地,当小球逐渐向上运动脱离下试样,铺展的受限液膜又在极短的时间内突然收缩成液桥,我们称其为收缩过程(图 4 中的过程 C).

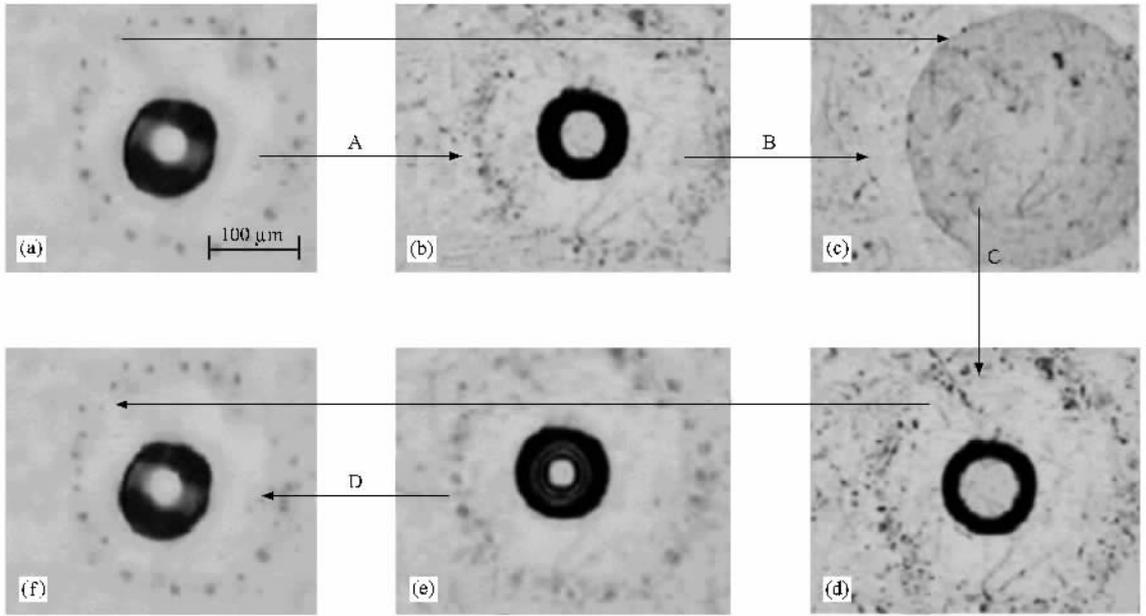


图 4 一个完整的趋近—接触—分离过程中受限液体的显微镜照片 (a)自由状态下的微液滴 (b)液桥形成的状态 (c)充分铺展后的状态 (d)收缩后的状态 (e)液桥缩小后的状态 (f)液桥断裂后的状态

值得注意的是,伴随相应的铺展过程和收缩过程,上试样都会受到幅值相当大的法向吸引力(粘附力).图 5 给出了不同体积量的受限液滴在一个“趋近—接触—分离”周期内测到的法向力.必须提及的是,由于液桥形成和断裂过程(图 4 中的过程 A 和过程 D)产生的法向作用力相对铺展、收缩过程(图 4 中的过程 B 和过程 C)的力而言非常微弱,几乎难以用一个悬臂梁(刚度为 1900 N/m)同时分辨检测到,所以在后续的实验中上试样的运动冲程被控制在很小的范围内,以保证液桥不发生断裂.

图 5 中的铺展力是指液体铺展时产生的粘着力,收缩力是指液膜收缩时的法向粘着力.由图 5 可以清楚地看到,当液体量较多时铺展力和收缩力很小,相应地也没有明显的铺展现象和收缩现象.随着

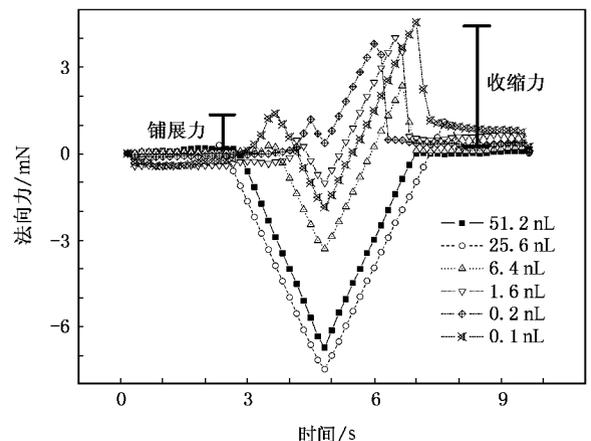


图 5 受限液体薄膜的铺展力和收缩力

受限液体的体积量逐渐减小到某一临界值,就可以观测到明显的铺展、收缩现象,伴随着相当幅值的法向粘着力.只要受限液滴体积量位于该临界体积内,这种现象及粘着力非常稳定,而且完全可重复.经过测试,图 4 中过程 A—过程 D 的法向粘着力一般为收缩力最大,其次为铺展力,而液桥断裂力远小于铺展力,液桥形成力又小于液桥断裂力.

3.2. 受限液体的铺展粘着力及收缩粘着力

实验分别测量了 [emim][Tf2N] 离子液体在不同液体量以及不同接触、分离速率下的铺展力和收缩力,结果如图 6 所示.

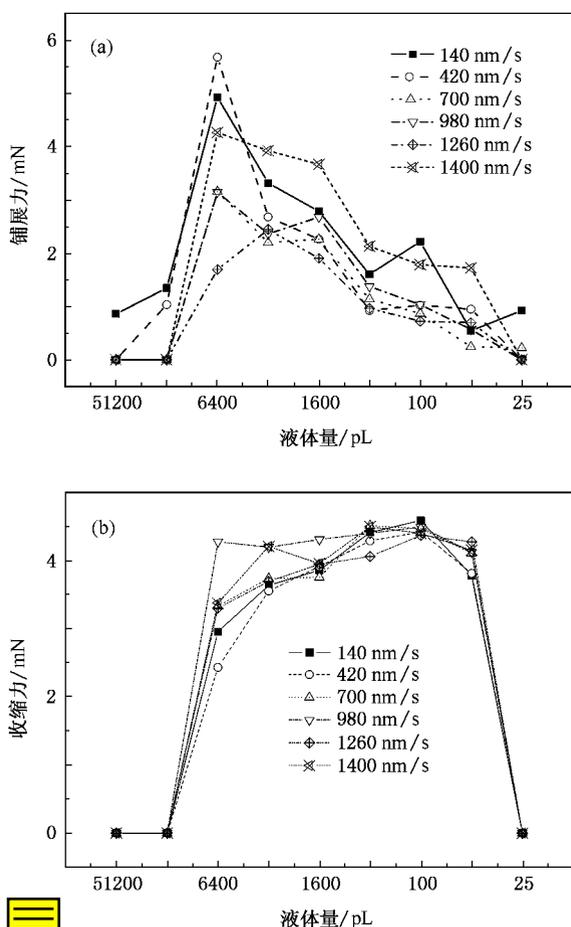


图 6 受限离子液体在不同接触、分离速度下的铺展力和收缩力 (a) 铺展力随受限液体体积量的变化 (b) 收缩力随受限液体体积量的变化

从图 6 可以看出,受限液体量在一个较大的范围内(50—25600 pL)都会有明显的铺展粘着力和收缩力,约为 10^{-3} N 量级.在已铺展液膜的收缩阶段,在 50—6400 pL 的体积范围内均存在 4—5 mN 稳定的粘着力,如图 6 (b) 所示.而受限液体体积量一旦

超出这个范围(过大或过小),收缩粘着力将由 4—5 mN 降为零,经过换算后可知,界面粘着应力由 0.45 MPa 左右降为零.这一现象对揭示昆虫粘着爪垫的机理非常有意义.例如,受限液体量仅有 50 pL 时界面粘着力可以达到 4 mN,当光滑壁面间分布着 250 滴这样的受限液体时,就足以支撑住一个鸡蛋的重量.而昆虫只要有几十个含有受限液体的微爪垫与光滑壁面接触,就足以支撑其体重.利用 PAO 油进行的实验,也得到了类似的结果(临界速度、临界间隙与界面粘着力的幅值都相近).这表明该现象与受限液体的黏度相关性不大.

4. 实验现象的分析和讨论

由上述实验现象可以看出,极微量的受限液体通过其在光滑的固体界面之间的铺展和收缩(不仅仅是弯月面力),可以提供足够承担昆虫体重的粘附力.为达到这种幅值稳定的界面粘附力存在一定范围的临界体积 (10^{-12} — 10^{-9} L) 和一定的受限液体间隙(小于 $2 \mu\text{m}$).昆虫可能巧妙地利用了这一现象.首先,它们在爪垫和光滑壁面之间控制分泌适量的液体体积就可以获得足够粘附力以实现牢固粘附;同时,它们只需要小幅度改变所分泌液体的体积量,或者通过爪垫变形小幅度增大与平面之间的间隙,就可以在极短的时间内“关闭”幅值相当大的粘附力,快速实现解粘附过程.这就合理地解释了生物实验中观测到的微量油性液滴^[5],同时也解释了为什么生物能够在实现稳固粘附的同时又可以快速地解粘附.

我们的进一步分析认为,这种受限液体薄膜的铺展、收缩粘附力可能来自于受限液体的类固化行为.受限液体是指被限制在两个固体界面组成的狭缝(一般是微米、纳米量级)之间的超薄液体膜.目前的研究普遍认为^[10,11],当固体界面的间隙减小到一定程度时,受限液体会发生分子有序化排列,并表现出一定的类固体性质.受限液体的类固化过程在微观方面表现为间隙减小到分子直径量级时法向力出现振荡.在宏观方面表现为随间隙减小液体有效黏度的显著增加.表面力仪的实验结果显示,受限液体在膜厚减小到 50 nm 之下时会有明显的黏度增加^[10,11].但 Chan 等^[12]指出,受限的极性液体在微米量级膜厚也会出现黏度增加现象.而 Askwith 等^[13]的实验表明,受限液体当膜厚下降到 $2 \mu\text{m}$ 以后表现

出弹性固体的性质.

我们的实验中采用的两种液体都是极性液体. 铺展后的膜厚在 50 nm 到几百纳米之间, 与上述观测到的液体类固化膜厚范围一致. 另一方面, 实验发现受限液体薄膜的收缩力(如图 6(b))非常稳定, 且与接触分离速率无关, 这也是液体类固化行为的一个重要标志和证明. 铺展粘着力(如图 6(a))没有表现出与速率无关的特性, 原因可能是由于铺展时受限液滴并未完全达到类固化的临界膜厚, 因而更多地表现出液体的性质. 这种铺展、收缩现象以及伴随的稳定且幅值相当大的界面粘着力, 可以认为是受限液体薄膜类固化过程的动态效应. 进一步的研究尚在进行中.

5. 结 论

利用自行研制的粘着接触实验仪, 模拟了光滑

固体界面间受限液体的接触行为与界面受力特征. 实验发现, 在临界体积和临界间隙下, 10^{-12} — 10^{-9} L 量级的微量离子液体和 PAO 油会产生由弯月面液桥到薄膜的铺展效应和收缩效应, 伴随幅值相当大的界面粘着力, 而且表现出类固化过程的特征. 昆虫可能巧妙地利用了受限液体薄膜的这一现象, 一方面在光滑壁面上实现幅值稳定的粘着力, 另一方面通过小幅度改变分泌的液体体积量或者增大爪垫与平面间的间隙实现快速的解粘附.

本文实验中观测到的受限液体薄膜的铺展、收缩现象及其界面粘着行为, 为揭示昆虫爪垫的粘附和粘附机理提供了原理性基础.

感谢 Mikhail Kosinsking 和 Stefan Kruschok 博士对本文工作给予的帮助和支持, 感谢德国联合研究会(DFG)和中国国家留学基金管理委员会的支持.

-
- [1] Scherge M, Gorb S 2000 *Biological Micro and Nanotribology* (Berlin: Springer Publisher)
- [2] Persson B N J, Gorb S J 2003 *Chem. Phys.* **119** 11438
- [3] Beuteland R G, Gorb S J 2001 *Zool. Sys. Evol. Res.* **39** 177
- [4] Huber G, Mantz H, Spolenak R, Mecke K, Jacobs K, Gorb S N, Arzt E 2005 *PANS* **102** 16293
- [5] Federle W, Riehle M, Curtis A S G 2002 *Inter. Comp. Biol.* **42** 1100
- [6] Cao X P, Jiang Y M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2202 (in Chinese)
[曹晓平、蒋亦民 2005 物理学报 **54** 2202]
- [7] Qian L M, Luo J B, Wen S Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2240 (in Chinese)[钱林茂、雒建斌、温诗铸 2000 物理学报 **49** 2240]
- [8] Li K, Liu H, Zhang Q C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4111 (in Chinese)[李凯、刘红、张青川 2006 物理学报 **55** 4111]
- [9] Hasenfuss I 1999 *Zoomorphology* **119** 143
- [10] Gao J P, Luedtke W D, Landman U 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 705
- [11] Israelachvili J, Gourdon D 2001 *Con. Sci.* **292** 867
- [12] Chan D Y C, Horn R G 1985 *J. Chem. Phys.* **83** 5311
- [13] Askwith T C, Cameron A, Crouch R F 1966 *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **291** 500

Impact of confined liquid thin film upon bioadhesive force between insect pads and smooth solid surface *

Zhang Xiao-Hao¹⁾ Zhang Xiang-Jun^{1,2)†} Liu Yong-He²⁾ J. A. Schaefer²⁾ Wen Shi-Zhu¹⁾

¹⁾ *State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

²⁾ *Department of Technical Physics, Centre for Micro and Nanotechnologies, Technical University of Ilmenau, Ilmenau 98693, Germany*

(Received 13 November 2006; revised manuscript received 31 January 2007)

Abstract

The outstanding climbing skills on smooth solid surface of some insects like beetle, bee and cockroach or some small reptiles like gecko have been under investigation for a long time. When some kinds of insects crawl on a smooth glass surface, the micro-pads leave traces of self-secreted organic liquid, which suggests that, the thin layer of confined liquid may contribute to the bioadhesive force between the micro-pad and the smooth surface. To investigate the properties of the confined liquid thin film, a series of experiments were carried out on a home-made microtribometer with a trace amount of ionic liquid ([emim][Tf2N]) or PAO (poly- α -olefin) oil confined between a nano-scale smooth steel sphere and a glass plate. For a critical confined volume of picoliters to nanoliters, and a critical clearance of tens to hundreds of nanometers, confinement-induced spontaneous spreading and abrupt shrinking were observed, accompanied by the presence of a stable interfacial adhesive force of remarkable magnitude. This spreading/shrinking-induced adhesive force was proved to be fundamentally different from the common meniscus capillary force and was considered to stem from confinement-induced solidification, according to our further investigations. The confinement-induced adhesive force of organic liquid may shed significant light on the physical principle "employed" by insects to crawl quickly on smooth vertical surfaces. By subtly adjusting the volume of confined liquid or the clearance between the pads and the surface, insects can control (i. e., switch on or off) the interfacial force at will. The interfacial bonding force of confined liquid thin film discovered in this paper may provide a basis for the principle of biomimetic attachment systems.

Keywords: confined liquid, adhesive force, bioadhesive pad, solidification

PACC: 4630P, 6810C

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50305014, 50575123).

† Corresponding author. E-mail: xjzhang@mail.tsinghua.edu.cn