

El、Scopus 收录 中文核心期刊

## 拉扭耦合作用下柱形纤维与基底的界面黏附性能研究

徐荣强, 彭志龙, 陈少华

INVESTIGATION ON THE INTERFACIAL ADHESION OF A CYLINDRICAL FIBRILLAR ON A SUBSTRATE UNDER THE COUPLING EFFECT OF TENSION AND TORQUE

Xu Rongqiang, Peng Zhilong, and Chen Shaohua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-050

您可能感兴趣的其他文章

## Articles you may be interested in

## 基于内聚力模型的高速水流聚脲基涂层剥离破坏模型研究

STUDY ON DEBONDING FAILURE MODEL OF POLYUREA–BASED COATING WITH HIGH VELOCITY WATER FLOW BASED ON COHESIVE ZONE MODEL

力学学报. 2020, 52(5): 1538-1546

## 磁场力及膜曲率对磁敏感薄膜-基底界面 黏附性能的影响与调控

INFLUENCE AND REGULATION OF INTERFACIAL ADHESION PROPERTIES OF A MAGNETIC SENSITIVE FILM/SUBSTRATE BY MAGNETIC FORCE AND FILM'S CURVATURE

力学学报. 2021, 53(6): 1609-1621

## 考虑界面力学性能的组件及结构的协同优化

INTEGRATED OPTIMIZATION OF EMBEDDED COMPONENTS AND STRUCTURE CONSIDERING MECHANICAL PROPERTIES OF CONNECTING INTERFACE 力学 报. 2021, 53(6): 1758-1768

固体结构损伤破坏统一相场理论、算法和应用

ON THE UNIFIED PHASE-FIELD THEORY FOR DAMAGE AND FAILURE IN SOLIDS AND STRUCTURES: THEORETICAL AND NUMERICAL ASPECTS 力学学报. 2021, 53(2): 301-329

易拉罐在轴-侧-扭-内压联合作用下的屈曲地貌

BUCKLING LANDSCAPE OF CAN UNDER THE COMBINDE ACTION OF AXIAL COMPRESSION-TORSION-LATERAL POKING-INTERNAL PRESSURE

力学学报. 2021, 53(2): 448-466

## 考虑热流固耦合作用的多孔介质孔隙尺度两相流动模拟

PORE–SCALE SIMULATION OF MULTIPHASE FLOW CONSIDERING THERMO–HYDRO–MECHANICAL COUPLING EFFECT IN POROUS MEDIA

力学学报. 2021, 53(8): 2225-2234



关注微信公众号,获得更多资讯信息

 2023 年 4 月

 固体力学

## 拉扭耦合作用下柱形纤维与基底的界面黏附 性能研究<sup>1)</sup>

徐荣强 彭志龙2) 陈少华3)

(北京理工大学先进结构技术研究院,北京 100081) (北京理工大学轻量化多功能复合材料与结构北京市重点实验室,北京 100081)

**摘要** 受壁虎刚毛可逆黏附性能的启发,本文建立了单根弹性圆柱纤维与刚性基底黏附接触的理论和数值模型,同时考虑了拉伸和扭转载荷的耦合作用及纤维半径对界面黏附性能的影响.研究发现耦合载荷作用下柱形纤维同样存在一个临界半径,当纤维半径小于该临界尺寸时,界面应力达到均匀的理论强度分布,接触边界应力集中消失,出现缺陷不敏感现象;当纤维半径大于该临界尺寸时,界面以裂纹扩展而失效.在耦合载荷作用下纤维的临界半径小于纯拉伸而大于纯扭转时的临界尺寸,且该临界半径随着施加扭转载荷的增大而减小.表明在纯拉伸载荷下使界面黏附强度达到最优的柱形纤维,在拉伸和扭转载荷耦合作用下,由于界面失效形式的转变使界面易发生脱黏,并且界面脱黏时的拉脱力随着扭转载荷的增大而减小,理论和数值结果一致.本文结果进一步应用揭示了壁虎可以通过调控施加在其最小黏附单元上的载荷形式实现纯拉伸载荷下强黏附及耦合载荷下易脱黏的力学机制.

关键词 柱形纤维, 拉伸和扭转, 可逆黏附, 缺陷不敏感, 内聚力模型

中图分类号: O341 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-050

## INVESTIGATION ON THE INTERFACIAL ADHESION OF A CYLINDRICAL FIBRILLAR ON A SUBSTRATE UNDER THE COUPLING EFFECT OF TENSION AND TORQUE<sup>1)</sup>

Xu Rongqiang Peng Zhilong<sup>2)</sup> Chen Shaohua<sup>3)</sup>

(Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China) (Beijing Key Laboratory of Lightweight Multi-Functional Composite Materials and Structures, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Inspired by the reversible adhesion of gecko seta, theoretical and numerical models of an elastic cylindrical fibrillar on a rigid substrate are established in the present paper, in which the coupling effect of tension and torque as well as the radius of the fibrillar on the interfacial adhesion is considered. It is found that when the fibrillar is subjected to the coupling effect of tension and torque, there also exists a critical radius of the fibrillar, below which the interfacial stress

1) 国家自然科学基金 (12272042, 12022211, 12032004) 和北京市自然科学基金资助项目 (3212011).

2) 通讯作者: 彭志龙, 教授, 主要研究方向为仿生材料力学、表面/界面力学. E-mail: pengzhilong@bit.edu.cn

3) 通讯作者: 陈少华, 教授, 主要研究方向为仿生材料与结构力学、表面/界面力学、微纳米力学. E-mail: shchen@bit.edu.cn

引用格式: 徐荣强, 彭志龙, 陈少华. 拉扭耦合作用下柱形纤维与基底的界面黏附性能研究. 力学学报, 2023, 55(4): 885-894 Xu Rongqiang, Peng Zhilong, Chen Shaohua. Investigation on the interfacial adhesion of a cylindrical fibrillar on a substrate under the coupling effect of tension and torque. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(4): 885-894

<sup>2023-02-19</sup> 收稿, 2023-03-07 录用, 2023-03-08 网络版发表.

can reach the theoretical strength uniformly and the stress concentration at the contact edge vanishes, leading to the phenomenon of flaw insensitivity. When the radius of the fibrillar is larger than the critical value, the detachment of the interface between the fibrillar and substrate occurs in the form of crack propagation. The critical radius of the fibrillar under the coupling effect of tension and torque decreases with increasing the applied torque, but it is smaller than the case of pure tension and is larger than the case of pure torque. It can be concluded that if a fibrillar can reach the optimal theoretical adhesion strength under the pure tensile load, it could be easily detached under the coupling effect of tension and torque due to the different interface failure modes under different loading forms. The pull-off force decreases with the increase of the applied torsion load. The theoretical results are well consistent with the numerical ones. The obtained results in the present paper can be further applied to disclose the mechanical mechanism of the reversible adhesion of gecko seta through applying pure tension to achieve strong attachment and applying coupling effect of tension and torque to achieve easy detachment.

Key words cylindrical fibrillar, tension and torque, reversible adhesion, flaw insensitivity, cohesive zone model

## 引 言

自然界生物经过亿万年的进化,形成各种复杂 的生命系统,获得众多特异的功能以适应它们的生 存环境<sup>[1-3]</sup>.从自然界汲取经验和灵感,是现代科技 创新和工程难题解决的重要方法<sup>[4-5]</sup>,目前军民领域 应用的很多科技均是通过仿生获得.在众多的仿生 研究中,壁虎等一类生物超强的黏附爬行能力吸引 了研究人员的广泛兴趣.壁虎不仅具有超强的黏附 能力,而且能从表面随意脱黏,且其黏附性能几乎不 受任何环境和材料性质的影响.对壁虎脚掌的强黏 附和易脱黏性能进行仿生研究,不仅对设计新型攀 爬装备及发展新型黏附材料具有重要意义,而且在 生物医学、可穿戴柔性器件、太空碎片抓捕等领域 具有重要的应用价值,同时能发展表/界面黏附接触 力学.

壁虎脚掌优异的黏附性能很早就受到了研究人员的关注,直到最近 20 年,随着观测和测量设备及实验技术的发展,壁虎黏附系统的宏微观结构及黏附机理才得以揭示. 2000 年,美国科学家 Autumn等<sup>[6-8]</sup>利用双悬臂微机电系统首次实验测量了壁虎单根刚毛的切向和法向黏附力,并否定了之前人们假想的吸盘、机械啮合、黏液等为壁虎黏附机制的假说,侧面验证了壁虎黏附能力主要来源为范德华力<sup>[6]</sup>.随后,他们进一步开展了壁虎脚掌和单根刚毛在不同材料表面黏附力的测量实验,给出了壁虎黏附机理为范德华力的直接实验证据. 范德华力是普遍存在于任何接触物体界面间非常微弱的中性分子力,它如何能支撑壁虎体重? 这主要得益于壁虎脚

掌精细的微观黏附组织. 壁虎脚掌的黏附系统是一 种多分级、多纤维状结构,每个脚趾生有数百万根 倾斜排列微米尺度的刚毛,每根刚毛末端进一步分 叉为成千上百根纳米尺度的绒毛[8]. 壁虎脚掌共数 十亿根纳米绒毛足以积累大量范德华力产生惊人的 黏附力. Arzt 等<sup>[9]</sup> 实验观察比较了一系列具有强黏 附性能昆虫和动物黏附系统的微观结构,发现不同 生物最小黏附纤维尺寸从微米到纳米不等,并且生 物体重越大,其黏附系统结构越精细.壁虎由于体重 最大, 黏附系统结构最为精细, 黏附能力最强, 因而 成为人们主要的仿生研究对象. Stewart 等[10] 实验比 较了死壁虎和活体壁虎的黏附力,发现二者基本一 致,更进一步证实了壁虎黏附力主要源自与生物生 命特征无关的范德华力.另有实验发现,环境湿度产 生的毛细力[11-12] 及接触界面产生的静电力[13-14] 对 壁虎黏附亦有重要影响.为了澄清壁虎如何适应其 复杂多变的生存环境,研究人员分别实验研究了基 底粗糙度[15-16]、环境相对湿度[12,17]、环境温度[18-19]、 表面灰尘[20-21] 等因素对壁虎黏附行为的影响.

基于壁虎黏附组织的宏微观特征,目前在微结 构阵列黏附表面的仿生制备方面同样取得了显著进 展.Geim等<sup>[22]</sup>仿壁虎黏附组织的刚毛结构,首次利 用电子光束刻蚀和氧离子处理制备了微米尺度的高 弹聚酰亚胺柱状阵列表面,每平方厘米面积可负重 3 N,远高于相同材料的光滑表面黏附强度.del Campo等<sup>[23]</sup>利用不同实验技术制备出末端形状不 同的 PDMS 柱状纤维阵列,研究了接触纤维末端形 状对界面黏附的影响.Murphy等<sup>[24]</sup>仿生制备了多 级柱状纤维阵列表面,发现多级结构能显著提高界 面黏附性能. Hassan 等<sup>[25]</sup> 发现将一个大尺寸柱状阵 列表面分成多个阵列表面同时与基底黏附, 总黏附 力得到提高, 并且考虑了细分数目对界面黏附性能 的影响. 还有学者制备了微柱阵列仿生黏附表面, 开 展了该表面的摩擦和黏附性能<sup>[26]</sup>、自清洁性能<sup>[27]</sup> 等方面的研究<sup>[28]</sup>. 研究人员注意到将柱状纤维末端 修饰为蘑菇形能显著提高界面黏附性能<sup>[29-31]</sup>, 并基 于蘑菇形纤维阵列表面设计了多种黏附抓手<sup>[30-31]</sup>. 为了实现界面黏附性能的调控, 目前主要通过制备 非对称纤维阵列<sup>[32-33]</sup>或引入外场 (例如温度场<sup>[34]</sup>、 磁场<sup>[35]</sup>、电场<sup>[36]</sup>、光场<sup>[37]</sup>等) 通过改变实际接触面 积实现界面黏附性能的调控.

以黏附接触力学和表/界面力学为基础,目前已 发展了不同尺度的理论模型来揭示壁虎等生物的黏 附机制及主要影响因素. 宏观方面, 研究人员注意到 壁虎脚掌的黏附组织整体表现出材料各向异性及梯 度变化特征,建立了各向异性和梯度材料的黏附接 触力学模型,理论揭示了壁虎利用材料各向异性实 现宏观可逆黏附的力学机制[38],给出了材料梯度特 征对界面黏附的影响机制[39]. 微观方面, 研究人员首 先从壁虎单根黏附纤维出发分析其界面黏附行为, Gao 等<sup>[40]</sup> 建立了拉伸载荷下单根弹性圆柱与刚性 基底接触的界面黏附模型,得到了界面缺陷不敏感 的临界圆柱半径,解释了壁虎单根黏附纤维的尺寸 优化特性. Chen 等[41] 理论分析了扭转载荷下单根圆 柱纤维界面缺陷不敏感问题, Spolenak 等<sup>[42]</sup> 研究了 柱状纤维末端形状对界面黏附性能的影响. Arzt 等[8] 提出了接触细化模型,发现将一个大尺度纤维末端 细化为多个小尺度纤维与基底接触,能显著提高界 面黏附力. Yao 等<sup>[43]</sup> 建立了自相似多分级纤维结构 的界面黏附模型,发现总黏附力随纤维级数增加成 指数增长. Hui 等[44-45] 对多纤维柱状阵列表面的黏 附行为开展了相关研究,揭示了纤维尺寸对界面黏 附的影响. Chen 等[46] 理论分析柱形纤维阵列表面黏 附性能的优化问题. Balijepalli等<sup>[47]</sup>和 Luo 等<sup>[48]</sup>数 值研究了由软硬性质不同的双材料组成的柱状复合 材料纤维(靠近界面材料较软,远离界面材料较 硬)的界面黏附性能,发现复合材料纤维界面黏附强 度高于单一材料纤维. He 等[49] 分析了倾斜柱状纤维 与基底间的黏附行为,主要考虑了界面黏附性能的 方向依赖性.考虑到壁虎最小黏附单元的真实形状 类似于有限尺寸纳米薄膜, Chen 等[50-51] 基于经典 Kendall 撕脱模型, 理论研究了多级薄膜结构及预应 力对壁虎黏附性能的影响. Tian 等<sup>[8]</sup> 提出了一种摩 擦黏附模型, 得到了仿生薄膜界面黏附力与撕脱角 的定量关系. Peng 等<sup>[52-55]</sup> 以壁虎最小黏附纤维为仿 生对象, 建立了一系列有限尺寸仿生纳米薄膜与基 底黏附接触的理论模型, 揭示了壁虎可逆黏附的微 观力学机理及主要影响因素.

由以上研究可以看出,目前对壁虎脚掌黏附系 统的微观结构、黏附的宏微观力学机理方面已开展 系统的实验和理论研究.在仿壁虎黏附功能表面制 备方面,多采用柱状纤维阵列表面仿生壁虎黏附系 统结构[56]. 纤维阵列表面的黏附行为与单根纤维的 黏附性能密切相关.目前,对单根柱形纤维黏附性能 研究相对较少,且仅考虑了柱形纤维在单一拉伸或 扭转载荷下界面黏附的尺寸效应[40-41]. 实验观察到 壁虎在脱黏过程中脚掌伴随着扭转动作,表明壁虎 刚毛同时受到拉伸和扭转载荷的作用. Kang 等<sup>[57]</sup> 实 验制备了末端为蘑菇型的仿生纤维阵列表面,发现 扭转载荷有利于界面脱黏. 然而, 目前对仿生黏附纤 维在拉伸和扭转载荷耦合作用下的界面黏附机理仍 不清楚.在耦合载荷作用下,柱形纤维是否仍存在使 界面达到缺陷不敏感的临界尺寸? 扭转载荷如何影 响界面脱黏时的拉脱力?

针对以上存在的关键问题,本文首先建立了单 根圆柱形弹性纤维与刚性基底黏附接触的理论模 型,同时考虑拉伸和扭转载荷的耦合作用及纤维尺 寸对界面黏附性能的影响.进一步建立了与理论对 应的数值模型,并将理论结果和数值结果进行了对 比.最后,应用本文结果揭示了壁虎脚掌最小黏附单 元实现可逆黏附的力学机理.

# 弹性圆柱纤维与刚性基底黏附接触的理 论模型

弹性圆柱纤维与半无限大刚性基底黏附接触的 力学模型如图 1 所示, 柱形纤维同时受拉伸载荷 *P*和扭转载荷 *T*的作用, 纤维半径为 *R*. 考虑到实际 接触过程中, 表面灰尘和表面粗糙度将引起界面缺 陷, 假设真实界面接触半径为 *a* = *αR*, 0 < *α* < 1. *αR* < *r* < *R* 表示界面缺陷区. 因此, 该接触问题可以 看作为圆柱纤维在拉伸和扭转载荷共同作用下接触 区存在边界裂纹的界面断裂力学问题. Gao 等<sup>[40]</sup> 和 Chen 等<sup>[41]</sup>分别研究了圆柱纤维在单一拉伸和扭转



图 1 弹性圆柱纤维与半无限大刚性基底黏附接触示意图.纤维同时 受到拉伸载荷 P 和扭转载荷 T

Fig. 1 Schematic diagram of an elastic cylindrical fibrillar in contact with a rigid half-space substrate. The fibrillar is subjected to both tension P and torque T

载荷作用下界面黏附问题,并分别用到了拉伸和扭转载荷作用下对应的 I 型裂纹和 III 型裂纹尖端应力强度因子

$$K_{\rm I} = \frac{P}{\sqrt{\pi a^3}} F_1(\alpha) \tag{1}$$

$$K_{\rm III} = \frac{2T}{\sqrt{\pi a^5}} F_3(\alpha) \tag{2}$$

其中

$$F_1(\alpha) = \sqrt{1 - \alpha} G_1(\alpha) \tag{3}$$

$$F_3(\alpha) = \sqrt{1 - \alpha} G_3(\alpha) \tag{4}$$

$$G_1(\alpha) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{2}\alpha + \frac{3}{8}\alpha^2 - 0.363\alpha^3 + 0.731\alpha^4 \right)$$
(5)

$$G_{3}(\alpha) = \frac{3}{8} \left( 1 + \frac{1}{2}\alpha + \frac{3}{8}\alpha^{2} + \frac{5}{16}\alpha^{3} + \frac{35}{128}\alpha^{4} + 0.208\alpha^{5} \right)$$
(6)

当圆柱纤维同时受到拉伸和扭转载荷时,该界面裂 纹属于 I 型和 III 型混合裂纹.将式(1)和式(2)带 入 Griffith 能量准则,可得

$$\frac{K_{\rm I}^2}{2E^*} + \frac{K_{\rm III}^2}{4\mu^*} = \Delta\gamma \tag{7}$$

$$\frac{P^2 F_1^2(\alpha)}{2\pi\alpha^3 R^3 E^*} + \frac{T^2 F_3^2(\alpha)}{\pi\alpha^5 R^5 \mu^*} = \Delta\gamma$$
(8)

其中,系数2和4是由刚性基底引入,  $\Delta \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$ 为界面黏附能,  $\gamma_1 和 \gamma_2 分别为纤维和基底的表面能,$  $\gamma_{12}$  为界面能,  $E^* = E/(1-v^2)$ ,  $\mu^* = E/[2(1+v)]$ , E和 v分别是弹性圆柱纤维的弹性模量和泊松比.

由式(8)可得界面失效时的拉脱力为

$$P = \sqrt{\frac{2\pi\alpha^3 R^3 E^* \Delta \gamma}{F_1^2(\alpha)} - \frac{2E^* T^2 F_3^2(\alpha)}{\mu^* \alpha^2 R^2 F_1^2(\alpha)}}$$
(9)

根据断裂力学知识,圆柱纤维在拉伸和扭转载荷作 用下,界面正应力和切应力在裂纹尖端处均存在应 力奇异性<sup>[58]</sup>.实际上,界面失效时裂纹尖端应力并不 会无穷大,而是由其理论强度控制.假设在耦合载荷 作用下界面应力达到理论强度时正应力σ和切应力 τ满足

$$\lambda = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2 = 1 \tag{10}$$

其中, σ0 和τ0 分别为正应力和切应力的理论强度.

类似于圆柱纤维受单一拉伸或扭转载荷情况, 当纤维半径小于某一临界尺寸时,界面各点应力均 匀达到其理论强度分布<sup>[40-41]</sup>.假设在耦合载荷作用 下,同样存在一个临界纤维半径*R*cr,当纤维半径小 于该临界值时,界面脱黏时刻各点应力能达到均匀 理论强度分布,即满足式(10).此时可以分成以下两 种情况讨论.

(1) 当扭转载荷较小时, 界面各点的切应力与到圆心的距离成正比, 并可表示为

$$\tau = \frac{r}{\alpha R} \tau|_{r=\alpha R} \tag{11}$$

其中,  $\tau|_{r=\alpha R} = 2T/(\pi \alpha^3 R^3) \leq \tau_0$ 为接触界面边缘的切应力. 由式 (10) 可得此时界面正应力的分布为

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r\tau|_{r=\alpha R}}{\alpha R \tau_0}\right)^2}$$
(12)

界面切应力和正应力的分布规律如图 2(a) 所示.

由式(12)可得界面各点均以理论强度失效时的 拉脱力为

$$P_{c} = \int_{0}^{\alpha R} 2\pi r \sigma_{0} \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{\tau_{0}}\right)^{2}} dr = \frac{\pi^{3} \alpha^{8} R^{8} \sigma_{0}}{6T^{2} \tau_{0}} \left[\tau_{0}^{3} - \left(\tau_{0}^{2} - \frac{4T^{2}}{\pi^{2} \alpha^{6} R^{6}}\right)^{\frac{3}{2}}\right], \quad \tau|_{r=\alpha R} \leq \tau_{0}$$
(13)



(b)  $\tau|_{a_1 \leqslant r \leqslant aR} = \tau_0$ 

图 2 当扭转载荷不同时,接触界面各点应力达到理论强度时切应力 和正应力的分布规律,其中αR为接触界面半径,R为纤维半径

Fig. 2 The distribution of shear and normal stress at contact interface under different torsion loads when the interfacial stress reaches the theoretical strength uniformly,  $\alpha R$  is the radius of the contact interface and *R* is the radius of the fiber

根据式 (9) 和式 (13), 当扭转载荷较小时, 界面各点 应力达到均匀理论强度分布时的临界纤维半径可由 下式得到

$$\frac{\pi^{3}\alpha^{8}R^{8}\sigma_{0}}{6T^{2}\tau_{0}}\left[\tau_{0}^{3}-\left(\tau_{0}^{2}-\frac{4T^{2}}{\pi^{2}\alpha^{6}R^{6}}\right)^{\frac{3}{2}}\right] = \sqrt{\frac{2\pi\alpha^{3}R^{3}E^{*}\Delta\gamma}{F_{1}^{2}(\alpha)}-\frac{2E^{*}T^{2}F_{3}^{2}(\alpha)}{\mu^{*}\alpha^{2}R^{2}F_{1}^{2}(\alpha)}} \qquad (14)$$

(2) 当施加的扭转载荷增大到 $T = \pi \alpha^3 R^3 \tau_0 / 2$ 时,  $\tau|_{r=\alpha R} = \tau_0$ .随着扭转载荷的进一步增大,接触界面 边缘附近的切应力均达到其理论强度,正应力为零, 如图 2(b) 所示. 假设在 $a_1 \le r \le \alpha R$ 范围内,  $\tau = \tau_0$ , 在  $0 < r < a_1$ 范围内,  $\tau = r\tau_0/a_1$ . 根据力矩平衡有

$$T = \int_0^{a_1} 2\pi r \left(\frac{r}{a_1}\tau_0\right) r \mathrm{d}r + \int_{a_1}^{\alpha R} 2\pi r \tau_0 r \mathrm{d}r \qquad (15)$$

由上式可得

$$a_1 = \sqrt[3]{4\alpha^3 R^3 - \frac{6T}{\pi\sigma_0}}$$
(16)

根据式 (12) 可得此时界面以理论强度脱黏时的拉脱 力为

$$P_{c} = \int_{0}^{a_{1}} 2\pi r \sigma_{0} \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{\tau_{0}}\right)^{2}} dr = \frac{2\pi \sigma_{0}}{3} \left(4\alpha^{3} R^{3} - \frac{6T}{\pi \tau_{0}}\right)^{\frac{2}{3}},$$
  
$$\tau|_{a_{1} \leq r \leq \alpha R} = \tau_{0}$$
(17)

根据式 (9) 和式 (17), 当扭转载荷较大时, 界面各点应力达到均匀理论强度分布时的临界纤维半径可由下式得到

$$\frac{2\pi\sigma_0}{3} \left( 4\alpha^3 R^3 - \frac{6T}{\pi\tau_0} \right)^{\frac{2}{3}} = \sqrt{\frac{2\pi\alpha^3 R^3 E^* \Delta\gamma}{F_1^2(\alpha)} - \frac{2E^* T^2 F_3^2(\alpha)}{\mu^* \alpha^2 R^2 F_1^2(\alpha)}}$$
(18)

根据公式 (9)、式 (13) 和式 (17) 可得随着圆柱纤维 半径的变化界面脱黏时的拉脱力为

$$P = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\pi\alpha^{3}R^{3}E^{*}\Delta\gamma}{F_{1}^{2}(\alpha)} - \frac{2E^{*}T^{2}F_{3}^{2}(\alpha)}{\mu^{*}\alpha^{2}R^{2}F_{1}^{2}(\alpha)}}, R > R_{cr} \\ \frac{\pi^{3}\alpha^{8}R^{8}\sigma_{0}}{6T^{2}\tau_{0}} \left[\tau_{0}^{3} - \left(\tau_{0}^{2} - \frac{4T^{2}}{\pi^{2}\alpha^{6}R^{6}}\right)^{\frac{3}{2}}\right], \\ R \leqslant R_{cr} \text{ and } \tau|_{r=\alpha R} \leqslant \tau_{0} \\ \frac{2\pi\sigma_{0}}{3} \left(4\alpha^{3}R^{3} - \frac{6T}{\pi\tau_{0}}\right)^{\frac{2}{3}}, R \leqslant R_{cr} \text{ and } \tau|_{a_{1}\leqslant r\leqslant \alpha R} = \tau_{0} \end{cases}$$
(19)

对上式进一步进行无量纲化可得

$$\frac{P}{\pi R^{2} \sigma_{0}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\alpha^{3}}{\pi F_{1}^{2}(\alpha)} \cdot \frac{E^{*} \Delta \gamma}{R \sigma_{0}^{2}} - \frac{8F_{3}^{2}(\alpha)}{9\alpha^{2} F_{1}^{2}(\alpha)} \cdot \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{2} \cdot \frac{E^{*}}{\mu^{*}} \cdot \left(\frac{\tau_{0}}{\sigma_{0}}\right)^{2}}, R > R_{cr} \\ \frac{3\alpha^{8}}{8} \cdot \left(\frac{T_{0}}{T}\right)^{2} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{16}{9\alpha^{6}} \cdot \left(\frac{T}{T_{0}}\right)^{2}\right]^{\frac{3}{2}} \right\}, R \leqslant R_{cr} \text{ and } \tau|_{r=\alpha R} \leqslant \tau_{0} \\ \frac{2}{3} \left(4\alpha^{3} - 4\frac{T}{T_{0}}\right)^{\frac{2}{3}}, R \leqslant R_{cr} \text{ and } \tau|_{a_{1}\leqslant r\leqslant \alpha R} = \tau_{0} \end{cases}$$
(20)

其中,  $T_0 = \frac{2\pi R^3}{3}\tau_0$ .

## 2 结果与讨论

图 3 表示在不同 $\alpha$ 和不同扭矩 $T/T_0$ 时无量纲拉 脱力随无量纲纤维半径的变化规律,其他参数取值 为 $\tau_0/\sigma_0 = 1$ ,  $E^*/\mu^* = 2.67$ .由图 3 可知,当纤维半径 减小到某临界尺寸 $R_{cr}$ 时,无量纲拉脱力保持不变且 与纤维半径无关,表明当圆柱纤维半径小于该临界 尺寸时,接触界面各点应力均达到其理论强度分布, 即出现缺陷不敏感现象.当纤维半径大于该临界尺 寸时,界面脱黏以 I 型和 III 型混合裂纹扩展而逐渐 失效,无量纲拉脱力随着纤维半径的增大而减小.在 一定的扭转载荷 $T/T_0$ 或 $\alpha$ 下,当纤维半径增大到另 一临界半径 $R'_{cr}$ 时,无量纲拉脱力减小为零,说明此 时扭转载荷已经使界面失效,界面脱黏时无需拉伸 载荷的作用.当纤维半径不变时,界面脱黏时的拉脱



图 3 (a) 不同 α 和 (b) 不同扭矩 T/T<sub>0</sub> 时无量纲拉脱力随无量纲纤维 半径的变化规律



力随着扭转载荷的增大而减小,当扭转载荷增大到 某临界值 ( $T/T_0 = 0.34$ )时,无论纤维半径多大,界面 脱黏时的拉脱力基本为零,如图 3(b).由图 3 可知扭 转载荷有利于界面脱黏,当柱形纤维同时受到拉伸 和扭转载荷时,界面脱黏时的拉脱力总是小于单一 拉伸载荷 ( $T/T_0 = 0$ )下的拉脱力,本文理论结果与 Kang 等<sup>[57]</sup>的实验结果一致.在一定的扭转载荷下, 当纤维半径 $R \ge R'_{cr}$ 时,界面脱黏以 III 型裂纹扩展而 失效,说明此时无需拉伸载荷,扭转载荷已经使界面 脱黏; 当 $R_{cr} < R < R'_{cr}$ 时,界面脱黏以 I 型和 III 型混 合裂纹扩展而失效; 当 $R < R_{cr}$ 时,裂纹尖端应力集中 消失,界面各点应力均达到其理论强度,此时界面黏 附性能最优.

柱形纤维在耦合载荷作用下产生缺陷不敏感的 临界半径随施加扭矩大小的变化规律如图 4 所示. 可以发现,扭转载荷对柱形纤维缺陷不敏感的临界 半径具有重要影响.在耦合载荷作用下,柱形纤维的 临界半径随施加扭矩的增大而减小,该临界半径小 于纤维受单一拉伸载荷的临界尺寸而大于受单一扭 转载荷下的临界尺寸.由图4可知,对于某一特定尺 寸的柱形纤维,如果纤维半径刚好满足在纯拉伸载 荷下缺陷不敏感尺寸,在单一拉伸载荷下,界面各点 应力达到均匀的理论强度分布,界面黏附性能最优; 当同时施加拉伸和扭转载荷时,由于柱形纤维在耦 合载荷下的缺陷不敏感临界半径小于单一拉伸载荷 下临界尺寸,在耦合载荷作用下,界面脱黏转变为以 裂纹扩展而失效,此时界面脱黏时的拉脱力小于在 单一拉伸载荷下拉脱力,并且该拉脱力随着扭转载 荷的增大而减小.因此,我们可以通过改变施加在柱 形纤维上的载荷形式,实现单一拉伸载荷下强黏附



图 4 耦合载荷下柱形纤维缺陷不敏感的临界半径随扭矩的变化规律 Fig. 4 Variation of the critical radius of the fiber at flaw insensitivity with the torque under the coupling load

第4期

891

和耦合载荷下易脱黏的界面黏附性能的调控.

为了验证上述理论,我们进一步采用商业有限 元软件 (ABAOUS 2020) 建立了与理论模型对应的 数值模型.圆柱纤维采用线弹性材料,弹性模量 E = 2 GPa, 泊松比 $\nu = 0.25$ . 弹性纤维与刚性基底间 的相互作用通过内聚力模型表征.界面内聚力模型 的牵引力-分离位移关系采用如图 5 所示的梯形形 式表示,其中, $\lambda = (\sigma/\sigma_0)^2 + (\tau/\tau_0)^2$ 表示界面混合应 力, $\sigma$ 和 $\tau$ 分别为界面正应力和切应力, $\sigma_0$ 和 $\tau_0$ 分别 为正应力和切应力的理论强度. 当λ=1时界面应力 达到其理论强度. 假设界面相互作用为分子间的范 德华力,因此内聚力模型的主要参数取值为:  $\sigma_0 = \tau_0 =$ 20 MPa, 界面黏附能 $\Delta \gamma = 0.009 9 \text{ J/m}^2$ (梯形区域的面 积),  $\delta_1 = 0.005 \text{ nm}$ ,  $\delta_2 = 0.495 \text{ nm}$ , 最大分离位移 $\delta_c =$ 0.5 nm. 柱形纤维的顶端同时受到拉伸和扭转载荷, 弹性纤维采用 C3D8R 单元, 界面层选用 COH3D8 内聚力单元. 假设界面实际接触面积约为纤维横截 面的 50%, 即α=0.7.

图 6 表示当扭转载荷 *T*/*T*<sub>0</sub> = 0.15 时,半径分别 为 20 nm, 140 nm 和 200 nm 的柱形纤维在拉伸和扭 转载荷共同作用下界面脱黏时的应力分布云图.可 以看出,随着纤维半径的减小,接触区的界面应力逐 渐趋于均匀分布.当纤维半径 *R* = 200 nm 时,界面失 效时接触区边界处应力最大,存在明显的应力集中; 当纤维半径减小到 *R* = 140 nm 时,界面应力达到理 论强度的区域增大,接触区中心的应力提高,整个接 触区各点界面应力差异减小;当纤维半径 *R* = 20 nm 时,界面各点应力达到均匀的理论强度分布, 应力集中消失,产生缺陷不敏感现象.

图 7 为拉脱力仿真值与理论值的对比结果,其 中图 7(a)表示柱形纤维在纯拉伸载荷(*T*/*T*<sub>0</sub>=0) 及拉伸和扭转耦合载荷(*T*/*T*<sub>0</sub>=0.15)作用下的无量 纲拉脱力与无量纲纤维半径关系的数值和理论结果







图 6 半径分别为 20 nm, 140 nm 和 200 nm 的柱形纤维在耦合载荷 下拉脱时刻的界面应力λ分布云图,此时施加的扭转载荷 不变T/T<sub>0</sub> = 0.15

Fig. 6 The distribution of interfacial stress  $\lambda$  at the moment of interface detachment under the coupling load with the radius of 20 nm, 140 nm and 200 nm, respectively, where the applied torque is constant  $T/T_0 = 0.15$ 

对比.可以看出,无论是理论分析还是数值模拟均发 现柱形纤维存在一个临界半径,当纤维半径小于该 临界尺寸时,界面各点应力均能达到理论强度分布, 此时无量纲拉脱力保持不变且与纤维半径无关;当 纤维半径大于该临界尺寸时,裂纹尖端存在显著的 应力集中,界面脱黏以裂纹扩展而失效,理论和数值 结果均表明当纤维受到拉伸和扭转耦合载荷时,界 面脱黏时的拉脱力明显小于纯拉伸时的界面拉脱 力,表明扭转有利于界面脱黏.当纤维半径一定时, 耦合载荷下界面脱黏时的拉脱力随施加扭矩的变化 关系如图 7(b) 所示, 数值结果和理论结果一致. 由 图 7(a) 可以看出, 理论和有限元模型预测的临界纤 维半径在数值上存在一定的差异,这主要因为在理 论分析中采用宏观条件下的格里菲斯断裂准则,而 数值模拟采用的界面内聚力模型,两者采取界面失 效准则不同. 另外, 有限尺寸的柱形纤维与宏观裂纹 也存在一定的差别.

上述分析结果可以进一步应用揭示壁虎脚掌最 小黏附单元实现可逆黏附的力学机制.将壁虎的最 小黏附单元看成弹性圆柱形纤维<sup>[40]</sup>,取壁虎刚毛及 界面范德华力相互作用的参数: $\sigma_0 = \tau_0 = 20$  MPa,  $\Delta \gamma = 0.01 \text{ J/m}^2$ ,  $\delta_c = 0.5 \text{ nm}$ , E = 2 GPa, v = 0.25.由 式(13)可得当圆柱纤维受纯拉伸载荷(T = 0)时出 现界面缺陷不敏感的临界半径为 $R_{cr} \approx 257$  nm,该尺 寸与壁虎最小黏附单元的真实尺寸( $200 \sim 300 \text{ nm}$ )<sup>[6]</sup> 非常接近,说明在纯拉伸载荷下壁虎最小黏附单元 脱黏时界面各点应力均能达到理论强度分布,产生 界面缺陷不敏感现象,此时界面黏附强度最优.由于 柱形纤维在耦合载荷下缺陷不敏感临界半径明显小 于单一拉伸载荷下的临界尺寸(图 4),当壁虎最小黏 附单元同时受到拉伸和扭转载荷时,不再满足界面 力



图 7 数值结果与理论结果的对比. (a) 纯拉伸和耦合载荷下界面拉 脱力与纤维半径关系; (b) 纤维半径一定时, 界面拉脱力随扭矩的变 化关系

Fig. 7 Comparison of the numerical and theoretical results.(a) Variation of the pull-off force with the fiber radius under pure tension and coupling load of tension and torque; (b) Variation of the pull-off force with the torque as the fiber radius fixed

缺陷不敏感条件,界面裂纹尖端处存在应力集中,界 面脱黏将以裂纹扩展而失效,并且界面拉脱力随着 扭转载荷的增大而减小(图7),说明扭转载荷有利于 壁虎脱黏.因此,壁虎可以通过调节施加在其最小黏 附单元上的载荷形式实现单一拉伸载荷下强黏附及 耦合载荷下易脱黏的可逆黏附行为.

## 3 结论

本文首先建立了弹性圆柱纤维与刚性基底黏附 接触的理论模型,同时考虑了拉伸和扭转载荷的耦 合作用及纤维尺寸对界面黏附性能的影响.结果表 明,在耦合载荷作用下,柱形纤维同样存在一临界半 径,当纤维半径小于该临界尺寸时,界面应力达到均 匀的理论强度分布,出现界面缺陷不敏感现象;当纤 维半径大于该临界尺寸时,界面脱黏以裂纹扩展而 失效.耦合载荷下纤维的临界半径小于单一拉伸载 荷下的临界尺寸而大于单一扭转载荷下的临界尺 寸,并且纤维在耦合载荷下缺陷不敏感的临界半径 随着扭矩的增大而减小.当纤维半径不变时,界面脱 黏时的拉脱力随扭矩的增大而减小,表明扭转有利 于界面脱黏.进一步建立了与理论对应的数值模型, 理论结果与数值结果一致.通过对比不同载荷形式 下的纤维临界半径,揭示了壁虎可以通过调控施加 在最小黏附单元上的载荷形式,实现单一拉伸载荷 下强黏附和耦合载荷下易脱黏的力学机制.本文结 果不仅能加深理解壁虎可逆黏附性能的微观力学机 理,揭示了壁虎最小黏附单元的尺寸优化特性,而且 能对设计新型黏附功能表面提供理论依据.

### 参考文献

- 1 Douglas T. A bright bio-inspired future. *Science*, 2003, 299(5610): 1192-1193
- 2 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): 9-17 (Chen Shaohua, Soh Aijia. Development of mechanics of bio-adhesion and biomimetic adhesion. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(2): 9-17 (in Chinese))
- 3 邢运,杨嘉陵. 动物进化的抗冲击策略及其仿生机理研究. 力学进展, 2021, 51(2): 295-341 (Xing Yun, Yang Jialing. Research progress of impact-resistance strategies and biomimetic mechanism in animal evolution. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(2): 295-341 (in Chinese))
- 4 宋吉舟. 仿生风传种子三维微电子飞行器. 力学进展, 2022, 52(1): 196-200 (Song Jizhou. Passively driven three-dimensional microfliers inspired by wind-dispersed seeds. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 196-200 (in Chinese))
- 5 吴文旺, 夏热. 轻质点阵超结构设计及多功能力学性能调控方法. 力学进展, 2022, 52(3): 673-718 (Wu Wenwang, Xia Re. Design of lightweight lattice meta-structures and approaches to manipulate their multi-functional mechanical properties. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(3): 673-718 (in Chinese))
- 6 Autumn K, Liang YA, Hsieh ST, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405(6787): 681-685
- 7 Autumn K, Sitti M, Liang YA, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(19): 12252-12256
- 8 Tian Y, Pesika N, Zeng H, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(51): 19320-19325
- 9 Arzt E, Gorb S, Spolenak R. From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(19): 10603-10606
- 10 Stewart WJ, Higham TE. Passively stuck: death does not affect gecko adhesion strength. *Biology Letters*, 2014, 10(12): 20140701

#### 徐荣强等: 拉扭耦合作用下柱形纤维与基底的界面黏附性能研究

- 11 Sun W, Neuzil P, Kustandi TS, et al. The nature of the gecko lizard adhesive force. *Biophysical Journal*, 2005, 89(2): L14-L17
- 12 Huber G, Mantz H, Spolenak R, et al. Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(45): 16293-16296
- 13 Izadi H, Stewart KME, Penlidis A. Role of contact electrification and electrostatic interactions in gecko adhesion. *Journal of the Roy*al Society Interface, 2014, 11(98): 20140371
- 14 Kovalev AE, Gorb S. Charge contribution to the adhesion performance of polymeric microstructures. *Tribology Letters*, 2012, 48(1): 103-109
- 15 Huber G, Gorb SN, Hosoda N, et al. Influence of surface roughness on gecko adhesion. *Acta Biomaterialia*, 2007, 3(4): 607-610
- 16 Gillies AG, Henry A, Lin H, et al. Gecko toe and lamellar shear adhesion on macroscopic, engineered rough surfaces. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217: 283-289
- Prowse MS, Wilkinson M, Puthoff JB, et al. Effects of humidity on the mechanical properties of gecko setae. *Acta Biomaterialia*, 2011, 7(2): 733-738
- 18 Losos JB. Thermal sensitivity of sprinting and clinging performance in the Tokay gecko (Gekko gecko). *Asiatic Herpetological Research*, 1990, 3: 54-59
- 19 Bergmann PJ, Irschick DJ. Effects of temperature on maximum clinging ability in a diurnal gecko: Evidence for a passive clinging mechanism? *Journal of Experimental Zoology Part A-Ecological* and Integrative Physiology, 2005, 303(9): 785-791
- 20 Hansen WR, Autumn K. Evidence for self-cleaning in gecko setae. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(2): 385-389
- 21 Hu S, Lopez S, Niewiarowski PH, et al. Dynamic self-cleaning in gecko setae via digital hyperextension. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012, 9(76): 2781-2790
- 22 Geim AK, Dubonos SV, Grigorieva IV, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nature Materials*, 2003, 2(7): 461-463
- 23 del Campo A, Greiner C, Arzt E. Contact shape controls adhesion of bioinspired fibrillar surfaces. *Langmuir*, 2007, 23(20): 10235-10243
- 24 Murphy MP, Kim S, Sitti M. Enhanced Adhesion by Gecko-Inspired Hierarchical Fibrillar Adhesives. ACS Applied Materials & Interfaces, 2009, 1(4): 849-855
- 25 Hassan A, Kim Y, Ryu S, et al. Divisions in a Fibrillar Adhesive Increase the Adhesive Strength. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(49): 59478-59486
- 26 Chen SH, Mi CH. Friction Properties of Bio-mimetic Nano-fibrillar Arrays. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(10): 108103
- 27 An H, Wang S, Li D. Self-cleaning performance of the micropillararrayed surface and its micro-scale mechanical mechanism. *Langmuir*, 2021, 37(33): 10079-10088
- 28 Chai Z, Liu M, Chen L, et al. Controllable directional deformation of micro-pillars actuated by a magnetic field. *Soft Matter*, 2019, 15(43):

8879-8885

- 29 Gorb S, Varenberg M, Peressadko A, et al. Biomimetic mushroomshaped fibrillar adhesive microstructure. *Journal of the Royal Society Interface*, 2007, 4(13): 271-275
- 30 Song S, Drotlef DM, Majidi C, et al. Controllable load sharing for soft adhesive interfaces on three-dimensional surfaces. *Proceedings* of the National Academy of Sciences, 2017, 114(22): E4344-E4353
- 31 Tian HM, Li XM, Shao JY, et al. Gecko-effect inspired soft gripper with high and switchable adhesion for rough surfaces. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(18): 1900875
- 32 Jeong HE, Lee JK, Kwak MK, et al. Effect of leaning angle of gecko-inspired slanted polymer nanohairs on dry adhesion. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(4): 043704
- 33 Tao DS, Gao X, Lu HY, et al. Controllable anisotropic dry adhesion in vacuum: gecko inspired wedged surface fabricated with ultraprecision diamond cutting. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(22): 1606576
- 34 Reddy S, Arzt E, del Campo A. Bioinspired surfaces with switchable adhesion. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 3833-3837
- 35 韩明杰, 彭志龙, 姚寅等. 磁场力及膜曲率对磁敏感薄膜-基底界 面黏附性能的影响与调控. 力学学报, 2021, 53(6): 1609-1621 (Han Mingjie, Peng Zhilong, Yao Yin, et al. Influence and regulation of interfacial adhesion properties of a magnetic sensitive film/substrate by magnetic force and film 's curvature. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(6): 1609-1621 (in Chinese))
- 36 Guo DJ, Liu R, Cheng Y, et al. Reverse adhesion of a gecko-inspired synthetic adhesive switched by an ion-exchange polymer-metal composite actuator. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(9): 5480-5487
- 37 Wang XQ, Tan D, Hu SQ, et al. Reversible adhesion via light-regulated conformations of rubber chains. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(49): 46337-46343
- 38 Chen SH, Gao HJ. 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): 1001-1015
- 39 Chen S, Yan C, Zhang P, et al. Mechanics of adhesive contact on a power-law graded elastic half-space. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(9): 1437-1448
- 40 Gao HJ, Wang X, Yao HM, et al. Mechanics of hierarchical adhesion structures of geckos. *Mechanics of Materials*, 2005, 37(2-3): 275-285
- 41 Chen SH, Xu G, Soh AK. Robust nanoadhesion under torque. *Tri-bology Letters*, 2008, 29(3): 235-239
- 42 Spolenak R, Gorb S, Gao HJ, et al. Effects of contact shape on the scaling of biological attachments. *Proceedings of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 461(2054): 305-319
- 43 Yao H, Gao H. Mechanics of robust and releasable adhesion in biology: Bottom-up designed hierarchical structures of gecko. *Journal*

力

of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54(6): 1120-1146

- 44 Glassmaker NJ, Jagota A, Hui CY, et al. Design of biomimetic fibrillar interfaces: 1. Making contact. *Journal of the Royal Society Interface*, 2004, 1(1): 23-33
- 45 Hui CY, Glassmaker NJ, Tang T, et al. Design of biomimetic fibrillar interfaces: 2. Mechanics of enhanced adhesion. *Journal of the Royal Society Interface*, 2004, 1(1): 35-48
- 46 Chen SH, Soh AK. Tuning the geometrical parameters of biomimetic fibrillar structures to enhance adhesion. *Journal of the Royal Soci*ety Interface, 2008, 5(20): 373-382
- 47 Balijepalli RG, Fischer S, Hensel R, et al. Numerical study of adhesion enhancement by composite fibrils with soft tip layers. *Journal* of the Mechanics and Physics of Solids, 2017, 99: 357-378
- 48 Luo AY, Nasab AM, Tatari M, et al. Adhesion of flat-ended pillars with non-circular contacts. *Soft Matter*, 2020, 16(41): 9534-9542
- 49 He LW, Yan SP, Li BQ, et al. Directional adhesion behavior of a single elastic fiber. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(1): 013516
- 50 Chen B, Wu PD, Gao H. Hierarchical modelling of attachment and detachment mechanisms of gecko toe adhesion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2008, 464(2094): 1639-1652
- 51 Chen B, Wu PD, Gao HJ. Pre-tension generates strongly reversible adhesion of a spatula pad on substrate. *Journal of the Royal Society*

Interface, 2009, 6(35): 529-537

报

- 52 Peng ZL, Chen SH, Soh AK. Peeling behavior of a bio-inspired nano-film on a substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(14): 1952-1960
- 53 Peng ZL, Chen SH. Effects of surface roughness and film thickness on the adhesion of a bioinspired nanofilm. *Physical Review E*, 2011, 83(5): 051915
- 54 Peng ZL, Chen SH. Effect of pre-tension on the peeling behavior of a bio-inspired nano-film and a hierarchical adhesive structure. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 163702
- 55 Peng ZL, Chen SH. The effect of geometry on the adhesive behavior of bio-inspired fibrils. *Soft Matter*, 2012, 8(38): 9864-9869
- 56 汪鑫, 李倩, 薛龙建. 仿生柱状黏附材料. 中国材料进展, 2017, 36(1): 48-57, 74 (Wang Xin, Li Qian, Xue Longjian. Biomimetic micro-and nanopillar adhesives. *Materials China*, 2017, 36(1): 48-57, 74 (in Chinese))
- 57 Kang OH, Lee SH, Yun JH, et al. Adhesion tunable bio-inspired dry adhesives by twisting. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(10): 1433-1437
- 58 吴学仁, 徐武. 裂纹体分析的权函数理论与应用: 回顾和展望. 力 学进展, 2022, 52(3): 415-507 (Wu Xueren, Xu Wu. Weight function theory and applications for crack analysis: A review and outlook. Advances in Mechanics, 2022, 52(3): 415-507 (in Chinese))