

自然弯曲体的动态黏附行为

周罗慧¹, 魏泽峰¹, 宋恒旭², 郭早阳¹, 梁旭东^{1*}

1. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 深圳 518055;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: liangxudong@hit.edu.cn

2024-01-28 收稿, 2024-06-12 修回, 2024-06-18 接受, 2024-06-19 网络版发表

国家自然科学基金(12322207)、中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.OCEF.2022037)和非线性力学国家重点实验室开放基金资助

摘要 自然界中大量结构在卷曲变形时与外界环境产生动态黏附的相互作用, 展现出与静态黏附不同的力学响应与现象. 本研究以一种速度可调的自然弯曲体为基础, 通过高速摄影实验深入分析了不同自然曲率的自然弯曲体在薄层黏附基底上高速运动的力学特性. 结果表明, 随着运动速度增加(>1 m/s), 黏附表面剥离强度减小. 基于上述实验现象, 本研究建立了自然弯曲体在黏附基底上定向高速运动的理论模型, 采用匹配渐近展开法, 并结合打靶法建立了基底动态黏附性能、自然弯曲体运动前沿速度以及自然曲率的联系, 成功实现了对自然弯曲体高速运动的调控, 揭示了软材料动态黏附性能与界面脱黏速度的关系. 受汽车减速带的设计启发, 制备了黏附-非黏附模式的基底, 发现该模式基底存在黏附基底占比的临界特征尺寸, 使得其与全黏附基底表现出相近的减速效果. 这一研究为深入理解软材料动态黏附性能与开发新型黏附结构提供了力学基础.

关键词 动态黏附, 自相似解, 匹配渐近展开法, 卷曲运动, 黏附强度

自然界中有许多不同的结构在生长过程中获得自然曲率后会自发卷曲变形, 如受疟疾感染的红细胞^[1]、绿藻的成熟^[2]以及蝴蝶触角的回卷^[3]等. 这些结构在主动力或者外界约束的影响下发生大变形, 可以被拉伸至近似无弯曲状态, 同时存储大量弹性能; 在主动力或者外界约束撤除后, 可以迅速回到自然弯曲状态, 从而实现高速弯曲变形. 类似形式的高速弯曲变形在不同尺度均被观察到, 并且其变形具有传播稳定、结构自相似等特点. Callan-Jones等人^[4,5]对这种自相似的自然弯曲体的高速弯曲变形及其传播规律开展了研究, 提出了一种无黏附、无重力的自然弯曲体动力学的理论模型, 预测了长时间尺度下自然弯曲体的自相似螺旋状态和渐近恒定的变形传播速度. Arriagada等人^[6]分别在空气和水中进行自然弯曲体的高速卷曲变形实验, 并通过动能、弹性能和重力势能之间的平衡

以及耗散功率计算长时间尺度下自然弯曲体运动的速度. 根据前人研究的模型, 在无黏附、无重力的条件下, 高速弯曲的自然弯曲体可以通过自然曲率实现运动速度调节.

随着弯曲变形在结构中的传递, 自然弯曲体与外界环境(如流体、固体等)发生相互作用, 在固体表面上将呈现出动态的黏附行为, 如疟疾引起的血红细胞的孔洞形成与细胞膜弯曲^[1]、绿色鞭毛藻发育过程中胚胎囊泡细胞层的往外翻转^[2,7]等过程. 这种动态弯曲行为一般发生在高黏度的细胞环境, 界面的动态黏附行为可以调控弯曲变形, 降低其传播速度, 甚至导致弯曲变形无法发生. 然而传统的动态弯曲变形的理论分析模型主要关注动态变形随时间变化的规律, 较少考虑外界环境的黏附作用力, 无法反映外界环境对动态变形的影响规律. 因此, 有必要考虑在黏附条件下, 高速

引用格式: 周罗慧, 魏泽峰, 宋恒旭, 等. 自然弯曲体的动态黏附行为. 科学通报, 2024, 69: 3443–3453

Zhou L H, Wei Z F, Song H X, et al. Dynamic adhesion behavior of natural benders (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3443–3453, doi: 10.1360/TB-2024-0112

弯曲的自然弯曲体如何实现运动速度的调节。

此外,自然界中大量生物通过动态黏附方式实现不同的行为,如变色龙通过舌头黏附进行捕食^[8]。在动态黏附过程中,存在惯性力与黏附力的竞争现象,产生与传统静态黏附不同的现象。传统的黏附测量主要采用剥离测试以及探针测试^[9]。剥离测试主要包括90°剥离测试、180°剥离测试、T型剥离测试等,通常用于测定单位宽度材料的剥离力,以表征材料的黏附能,但缺乏软材料剥离时界面特性与剥离速度的分析,并且测试结果与黏合剂的厚度和剥离角度密切相关^[10-13];探针测试主要有半球形探头^[14]和平面探头^[15,16]两种,可以获得可变形黏合剂脱黏时的峰值应力和最大变形量等信息^[17],但实验结果难以推广到高速运动(>1 m/s)的动态黏附场景。

近年来,基于剥离测试改进的动态黏附测量实验也逐渐被提出。Gardon^[18,19]通过理论和实验的方法研究了通过玻璃纸和丙烯酸乳胶聚合物的界面剥离力,并分析了剥离速率和黏结层厚度对剥离力的影响。Barquins和Ciccotti^[20]通过实验研究了恒定载荷下胶带的剥离状态,并观察到剥离时的“黏滑”现象,即当剥离力达到临界值时,会产生速度的跳跃,从而导致剥离状态不稳定。Ciccotti等人^[21]从理论的角度通过两种剥离实验对胶带的剥离演变展开研究,表明Barquins和Maugis等人^[22,23]所提出的动力学模型不足以完全描述胶带在黏滑状态下的剥离。Villey等人^[10]通过剥离实验测定了不同压敏胶的能量释放率,结果表明,黏附能剥离角度与剥离速度依赖性是可分离的,当剥离速度在0.1~10 m/s时,能量释放率随速度的增加而减小。Dalbe等人^[11,13]设计了可以保持恒定剥离角度、速度的实验装置,研究了剥离角度对胶带黏滑剥离前沿不稳定的影响。结果表明,随着剥离速度或角度的增加,剥离前沿速度的波动逐渐从典型的黏滑松弛振荡转变为近似正弦振荡。上述的研究成果表明,材料的动态黏附行为与静态相比有较大的差异。然而,基于剥离测试所需的实验设备设计复杂,难以在高速条件下保持相同的测试条件,也无法研究动态黏附力和结构高速运动之间的相互作用。

本文以一种速度可调的自然弯曲体为研究对象,通过高速摄影实验对不同自然曲率的自然弯曲体在黏附基底上高速运动的前沿曲率和速度进行研究,揭示了随着运动速度增加,黏附表面剥离强度减小的趋势。本文基于匹配渐近展开法建立理论模型,深入分析了

在黏附基底上的自然弯曲体定向高速运动的力学机制。结合实验数据与理论模型,成功建立了基底动态黏附性能、自然弯曲体运动前沿速度以及自然曲率之间的关系,实现了对自然弯曲体高速运动的有效调控。在进一步的实验中,通过模仿减速带的概念,设计了黏附-非黏附模式的基底。引人注目的是,黏附-非黏附基底表现出与全黏附基底相近的减速效果。本文的研究为深入理解软材料动态黏附性能与开发新型黏附结构提供了力学基础。

1 卷曲运动的高速摄影实验

将自然卷曲的自然弯曲体加载至平直状态后自然释放,自然弯曲体会发生定向高速运动。为更好理解动态黏附作用机制,建立自然弯曲体卷曲运动行为与黏附基底的关系,本文采用高速摄像机(Fastcam Nova S9,帧率为20000 f/s)对整个卷曲过程进行了分析。实验所采用的自然弯曲体材料为不锈钢SUS301,密度为7930 kg/m³,泊松比 $\nu=0.3$,抗弯刚度 $B=Eb^3/[12(1-\nu^2)]$,其中 E 为杨氏模量, b 和 h 分别为自然弯曲体的宽度和厚度。

本文研究了自然弯曲体在无黏附基底和有黏附基底上的运动。图1所示的自然弯曲体的宽度 $b=5$ mm,厚度 $h=0.1$ mm,基底黏附软材料为3MTM VHBTM 4910,无黏附基底为未撕掉胶带背衬的同型号VHB。自然弯曲体在外力作用下拉伸至平直状态,随后在无黏附的基底上保持定向高速运动,在运动过程中呈现出自相似的螺旋结构。进入黏附基底后,自然弯曲体仍然保持自相似的螺旋结构。通过对比自然弯曲体运动前沿处的曲率,我们发现基底的黏附作用使梁增加一个弯矩作用,对应运动前沿处曲率增大。此外,我们发现自然弯曲体释放的弹性能驱动结构发生动态变形,在无黏附基底上能量主要转化为动能,然而与黏附基底的相互作用引起了额外的能量损耗,导致自然弯曲体的定向运动速度发生变化。通过分析高速摄影实验结果,自然弯曲体在无黏附基底上的前沿速度记为 v_0 ,在黏附基底上运动的前沿速度稳定为 v_a ,并且速度发生下降, $v_a < v_0$ 。

2 卷曲运动理论研究

本文基于Callan-Jones等人^[4,5]提出的无黏附、无重力的自然弯曲体动力学理论模型,考虑基底的黏附效应对弯曲体运动前沿曲率和速度的影响,从而建立剥离强度和自然弯曲体运动的联系。本文将自然弯曲

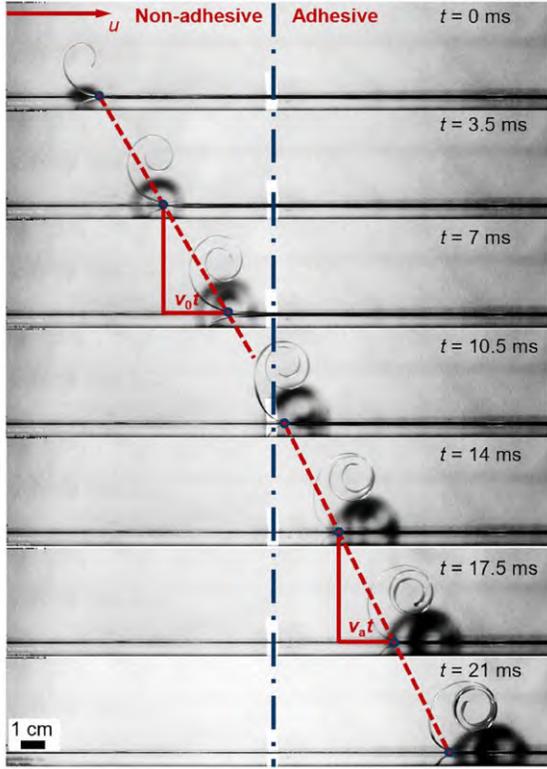


图1 (网络版彩色)自然弯曲体在无黏附基底和有黏附基底上的运动. 以蓝色点划线为界, 左边为无黏附基底, 右边为黏附基底, 和基底接触的临界点为运动前沿. 每张图片的时间间隔为3.5 ms

Figure 1 (Color online) Motion of a natural bender on a non-adhesive substrate and an adhesive substrate. Separated by blue dotted lines, the non-adhesive substrate is on the left, the adhesive substrate is on the right, and the critical point of contact with the substrate is the motion front. The time interval between each image was 3.5 ms

体简化为 x - y 平面内的一维细长的弹性结构, 且不考虑结构运动过程中的拉伸变形. 采用Frenet-Serret框架描述其运动特性, 用弧长 s 表示自然弯曲体的中心线长度变化, $s=s_a$ 为自然弯曲体和基底接触的运动前沿. 如图2所示, 以自然弯曲体的释放端为坐标轴的原点 O , $\mathbf{r}(s,t)$ 表示自然弯曲体中心线的位置矢量, 切向单位向量 \mathbf{T} 和法向向量 \mathbf{N} 与 s 相关, 且 $\partial\mathbf{T}/\partial s=k(s,t)\mathbf{N}$, $\partial\mathbf{N}/\partial s=-k(s,t)\mathbf{T}$. 其中, $\kappa(s,t)$ 为自然弯曲体的曲率. 将 \mathbf{T} 与 x 轴的夹角记为 $\theta(s,t)$, 则 $\kappa(s,t)=\partial\theta/\partial s$.

由于自然弯曲体的弹性-重力长度 $(B/mg)^{1/3} \gg \kappa_0^{-1}$ (κ_0 为自然弯曲体的自然曲率, m 为单位长度质量), 在高速摄影分析的尺度内, 重力对弯曲运动的传播影响很小, 因此本模型不考虑重力效应, 同时忽略转动惯量的影响. 根据非线性基尔霍夫方程, 可以得到自然弯曲体动态卷曲的线动量平衡方程和弯矩平衡方程^[4,24]:

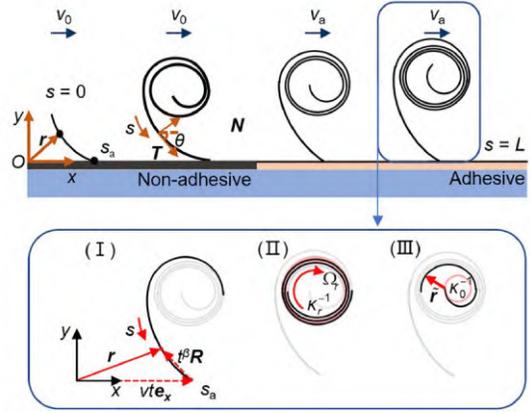


图2 (网络版彩色)自然弯曲体运动模型示意图(左端为无黏附层, 右端为黏附层). (I) 与基底接触的自相似区域; (II) 旋转滚动区域; (III) 自由端区域

Figure 2 (Color online) Schematics of the natural bender motion model. The left end is the non-adhesive layer, and the right end is the adhesive layer. (I) Self-similar contact region with the substrate; (II) circular rolling region; (III) free end region

$$\frac{\partial \mathbf{F}(s,t)}{\partial s} = m \frac{\partial^2 \mathbf{r}(s,t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial M(s,t)}{\partial s} + \mathbf{F}(s,t) \cdot \mathbf{N}(s,t) = 0, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{F}(s,t)$ 为自然弯曲体截面上内应力的合力, 并可以被分解为沿弧长的切向和法向两个方向, 表示为 $\mathbf{F}(s,t) = F_T(s,t)\mathbf{T} + F_N(s,t)\mathbf{N}$; $M(s,t)$ 为自然弯曲体截面的弯矩, 满足 $M = B(\kappa(s,t) - \kappa_0)$.

将式(1)和(2)投影到切向和法向两个方向, 可以得到

$$\frac{\partial F_T}{\partial s} + \kappa \frac{\partial M}{\partial s} = m \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} \cdot \mathbf{T}, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial s^2} + \kappa F_T = m \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} \cdot \mathbf{N}. \quad (4)$$

在长时间的卷曲运动过程中, 自然弯曲的自然弯曲体经过多次旋转, 呈现出较为复杂的滚动结构. 如图2所示, 可以将自然弯曲体的形状划分为三个区域, 分别是与基底的接触自相似区域 I、多次旋转滚动区域 II 以及自由端区域 III. 区域 I 和区域 II 为自相似区域, 自相似位置矢量的一般形式可以用移动的前沿边界和卷曲的形状的矢量表示:

$$\mathbf{r}(s,t) = v t \mathbf{e}_x + t^\beta \mathbf{R}(u), \quad (5)$$

其中, v 是自然弯曲体的运动前沿的传播速度, $u = (vt-s)/t^\beta$ 为自相似变量; β 是与卷曲的自相似行为有关的指数

参数, $t^\beta \mathbf{R}(u)$ 是自然弯曲体的中心曲线矢量. 指数 β 根据式(3)和(4)中的边界条件和平衡条件确定. 自然弯曲体的加速度可以表示为 $\partial^2 \mathbf{r} / \partial t^2 = \gamma_T \mathbf{T} + \gamma_N \mathbf{N}$, 其中 $\gamma_T = -\omega v_N + \partial v_T / \partial t$, $\gamma_N = \omega v_T + \partial v_N / \partial t$, 角速度 $\omega = \partial \theta / \partial t$; v_T 和 v_N 是自然弯曲体局部卷动过程中的切向和法向速度, 其满足 $\partial \mathbf{r} / \partial t - v \mathbf{e}_x = v_T \mathbf{T} + v_N \mathbf{N}$. 代入式(3)和(4)可得

$$B \frac{d}{ds} \left(\frac{\kappa''}{\kappa} + \frac{1}{2} \kappa^2 \right) = m \left(\gamma_T - \frac{d}{ds} \left(\frac{\gamma_N}{\kappa} \right) \right). \quad (6)$$

进一步, 可以求出基于自相似变量 u 表示的运动方程(附录一):

$$\frac{B}{t^{3\beta}} \frac{d}{du} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{d^2 \kappa}{du^2} + \frac{1}{2} \kappa^2 \right) = \frac{mv\beta}{t} (2 + (1 - 3\beta)\xi), \quad (7)$$

其中, 无量纲弧长 $\xi = 1 - s / (vt) = u / (vt^{1-\beta})$. 由于自相似自然弯曲体的曲率与时间无关, 由式(7)可以得到 $\beta = 1/3$ 或 $\beta = 0$. 通过对 u 进行积分并用 (s, t) 表示曲率, 可以得到

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial^2 \kappa}{\partial s^2} + \frac{1}{2} \kappa^2 = \begin{cases} \frac{2mv^2}{3B} \xi + C_1 t^{-\frac{2}{3}}, & \beta = \frac{1}{3}, \\ C_2, & \beta = 0, \end{cases} \quad (8)$$

其中, C_1 和 C_2 由边界条件决定.

实验结果表明, 区域 I 的曲率随弧长变化而变化, 区域 II 的曲率基本保持不变, 分别对应式(8)中 $\beta = 1/3$ 或 $\beta = 0$. 特别地, 当 $\beta = 0$ 时, 式(8)变为 $\mathbf{r}(s, t) = vt \mathbf{e}_x + \mathbf{R}(u)$, 此时自然弯曲体中区域 I 切线方向的加速度 $\gamma_T = 0$, 同时该区域的中心高度不随时间改变, 竖直方向的动量为零, 而实际运动前沿存在垂直向上的支持力, 两者是相互矛盾的. 因此, 基于 $\beta = 0$ 得到的运动方程不能完全描述自然弯曲体的运动, 必须考虑两个不同区域的运动特点选择自相似参数 β 的取值.

当自然弯曲体在黏附基底上进行动态卷曲运动时, 随着运动前沿从其黏附基底上剥离, 会在平面内产生较大的偏转, 这和梁从黏附平面的剥离过程是相似的^[25-31]. 设 γ 为破坏单位长度黏附基底表面所需的能量, $s = s_a(t)$ 为剥离前沿, 即自然弯曲体的间断面. 假定基底对自然弯曲体施加的力为恒定的力, 并且在剥离过程中基底不发生变形, 运动前沿 $s = s_a$ 处的边界条件为(附录二)

$$\kappa(s_a, t) = \left(\frac{2\gamma}{B} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)的一式, 即 $\beta = 1/3$, 并忽略 $\xi = 0$ 处的曲率振荡, 即可求得 $C_1 = t^{2/3} \gamma / B$. 因此, 区域 I ($0 < \xi < \xi_r$) 的运动方程为

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial^2 \kappa}{\partial s^2} + \frac{1}{2} \kappa^2 = \frac{2mv^2}{3B} \xi + \frac{\gamma}{B}. \quad (10)$$

区域 I 的运动前沿处曲率定义为 $\kappa = \kappa_a(\xi = 0)$, 取另一端点 $\xi = \xi_r$ 处曲率为 $\kappa = \kappa_r$, 此时曲率的快速振荡被限制在曲率恒定的区域 II ($\xi_r < \xi < 1$), 因此区域 II 处的曲率为 κ_r , 如图2所示. 基于式(10), $\xi = \xi_r$ 处的运动方程简化为

$$\frac{\kappa_r^2}{2} = \frac{2mv^2}{3B} \xi_r + \frac{\gamma}{B}, \quad (11)$$

其中, ξ_r 和 κ_r 是由区域 I 剥离前沿的边界条件和卷曲动力学决定的常数. 卷曲速度 v 由式(11)的自相似条件与区域 III 中自由端的旋转动力学共同匹配决定.

此外, 区域 II 的自然弯曲体以均匀角速度 Ω_r 滚动, 该角速度由 $\xi < \xi_r$ 时的自相似解决定:

$$\Omega_r = -\kappa_r v \left(1 - \frac{\xi_r}{3} \right). \quad (12)$$

区域 II 和 III ($\xi_r < \xi < 1$) 中, 自由端区域的自然曲率为 $\kappa = \kappa_0(\xi = 1)$, 另一端曲率 $\kappa = \kappa_r(\xi = \xi_r)$. 在区域 II 和 III 中, 自然弯曲体的运动表现为以恒定角速度 Ω_r 进行刚体转动, 并以滚动中心为原点、以速度 v 匀速平动, 自相似解不再适用于区域 III. 因此, 我们通过区域 II 中的式(11)和(12), 并基于打靶法对区域 III 进行匹配求解. 根据基尔霍夫方程(式(1)和(2)), 可以得到恒定角速度的运动方程:

$$\frac{\partial \mathbf{F}(s, t)}{\partial s} = -m \Omega_r^2 \tilde{\mathbf{r}}(s, t), \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathbf{M}(s, t)}{\partial s} = -\mathbf{F}(s, t) \cdot \mathbf{N}(s, t), \quad (14)$$

其中, $\tilde{\mathbf{r}}(s, t)$ 为从自然弯曲体中心测量的位置矢量, $\tilde{\mathbf{r}} = 0$ 为自然弯曲体的滚动中心.

旋转自然弯曲体的边界条件满足: 在自由端 $s = 0$ 处, $\mathbf{M}(0, t) = 0$, $\mathbf{F}(0, t) = \mathbf{0}$, 且当 $s \rightarrow 2\pi \kappa_0^{-1}$ 时有 $\kappa(s, t) \rightarrow \kappa_r$. 基于打靶法的结果, 可以得到自然弯曲体旋转区域的解为 $\kappa_r = 0.6031 \kappa_0$ 和 $\Omega_r = -0.2951 (B/m)^{1/2} \kappa_0^2$ (附录三). 将这些解代入式(11)和(12), 进而求出黏附基底上自然弯曲体运动的前沿速度 v_a 和剥离强度 γ 、自然曲率 κ_0 之间的关系, 即

$$v_a = \left(0.239 + \sqrt{0.156 - \frac{\gamma}{2B\kappa_0^2}} \right) \sqrt{\frac{B}{m}} \kappa_0. \quad (15)$$

3 结果与讨论

3.1 全黏附基底实验分析

为了研究自然弯曲体卷曲速度对动态黏附性能的影响规律, 我们制备了8个不同初始曲率(曲率为 $0.09\sim 0.2\text{ mm}^{-1}$)自然弯曲体试样开展高速摄影实验. 所用试样的尺寸参数和测量数据如表1所示. 不同试样在无黏附基底和全黏附基底上的位移-时间曲线如图3(a)所示, 可以发现, 与在无黏附基底上的运动相比, 自然弯曲体在进入黏附基底后, 位移-时间曲线的斜率均呈现不同程度的下降, 同时运动前沿在黏附基底均保持了稳定的传播(补充材料视频1).

对于无黏附基底的运动, 令式(15)中 $\gamma=0$, 可以得到自然弯曲体在无黏附基底上的运动速度为 $v_0=$

$0.633\sqrt{\frac{5B}{m}}\kappa_0$. 上述结论与Callan-Jones等人^[4,5]工作类似, 只是无量纲系数有细微差异, 原因是我们在自由端的边界条件采用了旋转一圈后曲率达到 κ_r . 图3(b)展示的是黏附与非黏附基底上无量纲化的速度和曲率的关系. 可以发现, 无黏附基底上的自然弯曲体的运动速度和理论解一致, 并且式(15)退化到无黏附条件 $\gamma=0$, 所得系数0.6335较好地描述了实验结果. 与无黏附基底上的运动相比, 自然弯曲体在剥离黏附层进行定向运动时, 速度会发生不同程度的降低. 所测试样在无黏附基底上的平均运动速度范围为6~17 m/s. 自然弯曲体在黏附基底上的平均速度最小为0.964 m/s, 最大平均速度为14.5 m/s.

通过式(15)可以得到无量纲速度比值 v_a/v_0 与剥离

表 1 自然弯曲体的尺寸参数和实验数据

Table 1 Dimensional parameters and experimental data for natural benders

编号	$h(\text{mm})$	$b(\text{mm})$	$\kappa_0(1/\text{mm})$	$E(\text{GPa})$	$v_0(\text{m/s})$	$v_a(\text{m/s})$	$\gamma(\text{J/m})$
1	0.08	8	0.094	135	6.0	1.0	0.23
2	0.15	8	0.097	124.8	10.7	7.4	0.59
3	0.09	6.3	0.178	137.5	12.2	10.2	0.27
4	0.09	10	0.147	135	10.9	6.5	0.54
5	0.12	10	0.153	136.1	15.4	11.5	1.23
6	0.1	6.3	0.200	151.4	15.4	13.5	0.42
7	0.15	8	0.135	151.4	16.8	14.5	0.77
8	0.1	5	0.202	148.7	17.0	13.1	0.59

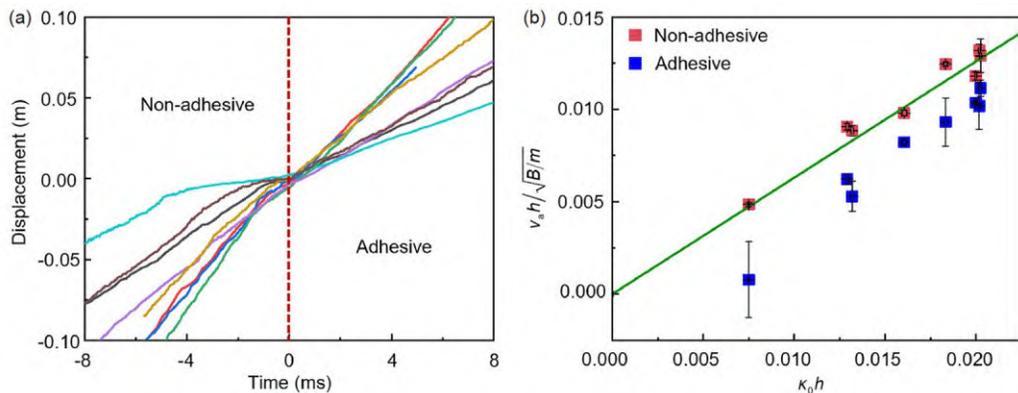


图 3 自然弯曲体在有无黏附基底上的运动位移和速度. (a) 不同试样在无黏附基底和有黏附基底上定向运动的位移时间曲线. (b) 不同试样在无黏附基底和有黏附基底上的无量纲化速度结果对比. 绿色实线为无黏附基底上自然弯曲体运动速度的解析解

Figure 3 Displacement and velocity of natural benders on non-adhesive substrates and adhesive substrates. (a) Displacement-time curves for the directional motion of different specimens on non-adhesive substrates and adhesive substrates. (b) Comparison of the results of the dimensionless velocity of different specimens on non-adhesive substrates and adhesive substrates. The green solid line is the analytical solution of the velocity of the bender's motion on a non-adhesive substrate

黏附基底的临界曲率和初始曲率的比值 κ_a/κ_0 之间的关系:

$$\frac{v_a}{v_0} = \left(0.239 + \sqrt{0.156 - \frac{\kappa_a^2}{\kappa_0^2}} \right) \times 1.579. \quad (16)$$

通过高速摄影实验分别测量非黏附与全黏附基底上的速度与运动前沿曲率, 实验结果如图4(a)所示, 理论结果能较好地吻合实验结果. 当基底黏附强度降低时, 自然弯曲体与基底接触的运动前沿的曲率不断下降; 当运动前沿在无黏附基底上传播时, $\kappa_a/\kappa_0 \rightarrow 0$ (如图5(a)中的(i)所示), 此时自然弯曲体运动速度满足 $v_a \rightarrow v_0$. 当基底黏附强度逐渐增强时, 运动前沿的曲率不断增大(式(9)), 同时其传播速度不断减小. 当自然弯曲体在全黏附基底上的运动速度小于无黏附基底上运动速度的0.42倍时, 式(16)中根号部分值为负, 此时与基底接触部分不再满足自相似解条件, 匹配渐近展开的理论模型不能描述自然弯曲体在黏附性能较强基底上的运动速度和曲率的关系.

由式(15)可以进一步得到破坏单位长度黏附界面所需能量 γ , 即黏附界面的动态剥离强度, 与运动前沿速度 v_a 之间的关系:

$$\gamma = 2B\kappa_0^2 \left[0.156 - \left(\frac{v_a}{\kappa_0} \sqrt{\frac{m}{B}} - 0.239 \right)^2 \right]. \quad (17)$$

图4(b)表示了无量纲化的黏附界面动态剥离强度 γ 与自然弯曲体前沿速度 v_a 的关系, 其中 γ 通过式(9)由运动前沿的曲率与自然弯曲体的抗弯刚度计算得到. 由

图4(b)可知, 自然弯曲体定向运动速度越大, 则剥离单位长度黏附基底时所需的力越小. 这意味着随着剥离黏附基底速度的增大, VHB的动态黏附强度会降低, 其中规律由式(17)给出.

本文进一步利用高速摄影记录了在全黏附基底上运动速度不同的3个自然弯曲体的剥离路径. 如图5(a)所示, 通过高速相机拍摄自然弯曲体在黏附基底上的剥离过程, 而后采用固定长度和宽度的矩形框, 以时间间隔0.03 ms依次截取自然弯曲体的运动视频, 将每一张截图按照时间顺序依次拼接, 即可得到不同时刻剥离前沿的位移. 图5(b)展示的是3个不同自然弯曲体的运动前沿剥离轨迹, 可以发现自然弯曲体剥离黏附基底时的瞬时运动速度是不均匀的. 当自然弯曲体($\kappa_0=0.094 \text{ mm}^{-1}$, $v_0=6.0 \text{ m/s}$)的自然曲率较小, 其运动前沿移动的平均速度较低时, 由于基底的黏附作用, 运动前沿的剥离速度迅速降低, 约为 10^{-3} m/s . 随着自然弯曲体($\kappa_0=0.147 \text{ mm}^{-1}$, $v_0=10.9 \text{ m/s}$)运动前沿的平均速度增大, 其剥离轨迹表现为明显的“台阶式”移动: 进入黏附基底后, 自然弯曲体展现出平均速度较低的“储能阶段”, 此时轨迹较为平坦, 运动前沿移动的距离较小, 速度低于3 m/s, 运动形态如图5(a)中的(ii)所示. 由于基底接触部分提供位移约束, 自然弯曲体发生绕固定的运动前沿旋转运动, 同时存储一部分的机械能; 随后, 自然弯曲体的剥离轨迹呈现台阶式下降, 运动前沿在短时间内发生较大位移, 自然弯曲体迅速释放存储的机械能, 足够克服黏附基底剥离所需能量, 从而产生速度较快的运动, 运动形态如图5(a)中的(iii)所示. 此时

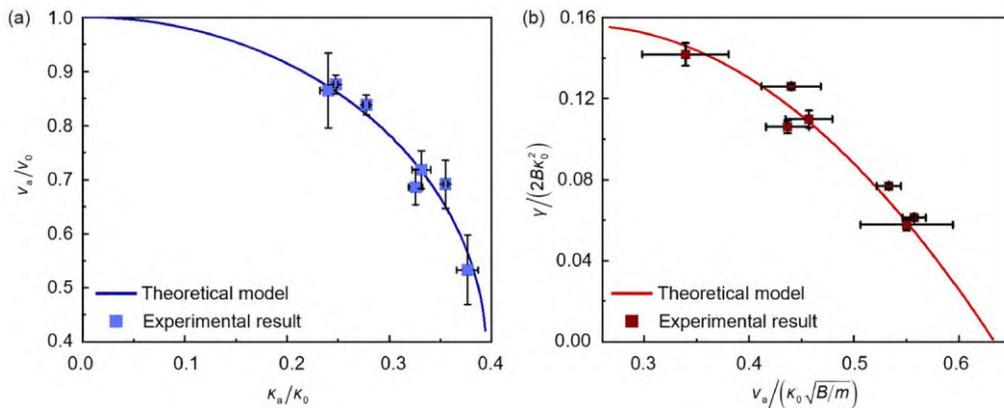


图4 (网络版彩色)自然弯曲体运动速度、曲率和剥离强度的关系。(a)不同试样在有黏附性能基底上的速度比和曲率比的关系; (b)无量纲化的剥离强度 γ 与黏附基底上运动的自然弯曲体前沿速度 v_a 的关系

Figure 4 (Color online) Relationship between speed of motion, curvature and peel strength of natural benders. (a) Relationship between the velocity ratio and curvature ratio of the substrate for different specimens with and without adhesion properties; (b) dimensionless peel strength γ versus frontier velocity v_a for motion on an adhesive substrate

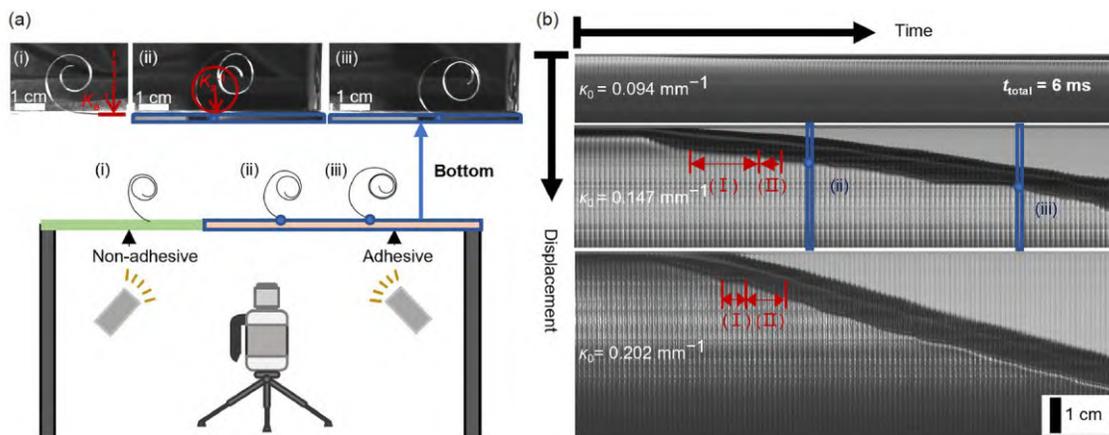


图5 不同自然曲率和初始速度的自然弯曲体在黏附基底上的运动。(a) 拍摄过程和图像处理示意图, (i)代表自然弯曲体在无黏附基底上的运动形态, (ii)和(iii)分别代表“储能阶段”和“瞬发运动”的运动形态。(b) 不同试样在黏附基底上的剥离轨迹, (I)和(II)分别代表两个阶段的剥离轨迹

Figure 5 Motion of natural benders with different natural curvatures and initial velocities on an adhesive substrate. (a) Schematic of the shooting process and image processing, where (i) represents the motion pattern of the bending body on the non-adhesive substrate, and (ii) and (iii) represent the motion modes of “energy storage phase” and “transient motion”. (b) Trajectories of different specimens on the adhesive substrate, where (I) and (II) represent two stages of stripping trajectories

剥离速度高达10.1 m/s, 是平台阶段运动速度的3.5倍, 整体平均速度的2倍。图5(b)中的(I)和(II)分明代表自然弯曲体在黏附基底上运动的“储能阶段”和“瞬发运动”。自然弯曲体的自然曲率越低, 其运动前沿的移动速度越低, 克服基底黏附能所需的储能时间越长, 其剥离轨迹上平台阶段的储能时间越长, 台阶式的运动轨迹愈发明显。而当自然弯曲体的自然曲率变大时, 其运动速度变高, 剥离黏附基底所需的储能时间变短, 剥离轨迹较为连续, 不再具有台阶式剥离过程, 其瞬时运动速度也较为均匀。

3.2 不同面积比例的黏附基底实验分析

自然弯曲体的动态黏附行为受到黏附基底的动态剥离强度与自然弯曲体的运动影响。Gao等人^[32]提出了一种软/硬(水凝胶/弹性体)的复合材料, 其附着力是全软水凝胶的5倍。Li等人^[33]采用90°剥离实验研究了嵌入刚性段的可拉伸黏合剂的黏附性能, 结果表明, 与全软黏合剂相比, 基于力学结构设计的桥接式黏性基底的抗脱黏性能最高提高了13倍。受到汽车减速带设计的启发, 本文设计了不同长度比例的黏附-非黏附结构, 开展自然弯曲体的高速卷曲实验, 并与全黏附基底的实验结果进行对比, 分析黏附面积比例不同对自然弯曲体运动的降速效果。

高速实验中所分析的部分黏附基底的范围长约30 cm。实验以10 cm为黏附模式基底长度, 通过调整基

底的黏附段和非黏附段的长度比例调控黏附面积比例。实验中分析的基底的黏附模式共10种, 黏附基底占比范围为1%~80%(补充材料视频2)。为了保证实验的有效性和一致性, 每种黏附模式下各采用3个自然曲率相近($k_0 \approx 0.138 \pm 0.003 \text{ mm}^{-1}$)的试样展开重复实验, 并测量其在无黏附基底和全黏附基底上的运动速度。定义 S_A 为黏附基底的面积, S_{NA} 为无黏附基底的面积, 则黏附基底面积占比为 $\bar{S}_A = S_A / (S_A + S_{NA})$ 。试样在无黏附基底上运动的速度记为 v_{NA} , 即 $\bar{S}_A = 0$ 时自然弯曲体运动的平均速度; 在全黏附基底上运动的速度记为 v_A , 此时有 $\bar{S}_A = 1$ 。

图6(a)为自然弯曲体的运动前沿位移随时间的变化, 其中部分黏附基底的黏附模式为1 cm(黏附基底)~9 cm(无黏附基底), 以虚线为界, 纵轴的负数区域代表试样在无黏附基底上的运动, 正数区域代表试样在黏附基底上的运动。可以发现, 与全黏附基底上的运动相比, 试样在部分黏附基底上的位移时间曲线有多个振荡阶段, 使得自然弯曲体存在多个能量储存-耗散的过程。当试样在无黏附基底上运动时, 自然弯曲体的区域I满足自相似条件, 且运动前沿处的曲率趋于0, 如图6(a)的(i)所示。当自然弯曲体离开无黏附基底进入黏附基底时, 区域I的运动前沿相对旋转滚动部分(区域II和III)率先到达剥离位置, 随后由于惯性作用旋转滚动部分继续向前运动, 使得自相似区域(区域I)的运

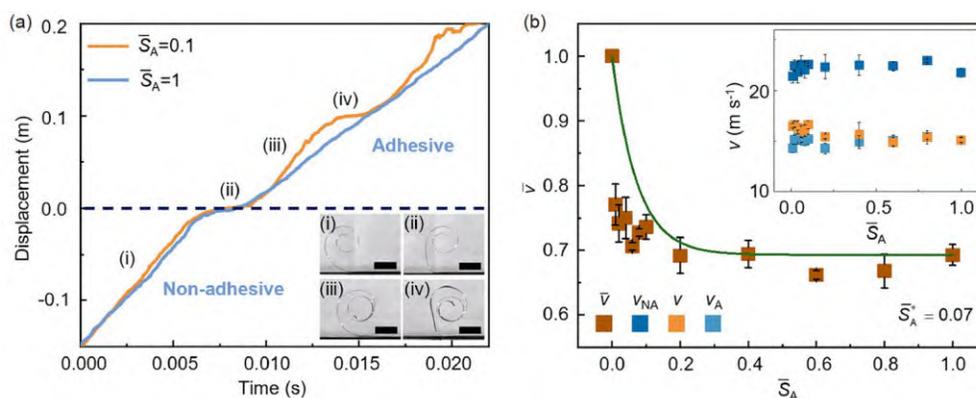


图6 自然弯曲体在部分黏附基底上的运动. (a) 试样的运动前沿在全黏附基底和部分黏附基底(1~9 cm)的位移随时间的变化, 内嵌图为试样的运动形态, 比例尺为2 cm. (b) 试样在黏附-非黏附基底上的归一化速度 \bar{v} 随黏附面积占比 \bar{S}_A 的变化, 内嵌图为试样的速度 v 随 \bar{S}_A 的变化
Figure 6 Movement of natural benders on partially adhesive substrates. (a) Displacement of the motion front of the specimen over the fully adherent substrate and the partially adherent substrate (1–9 cm) as a function of time. The insets show the motion patterns of the specimen with a scale bar of 2 cm. (b) The normalized velocity (\bar{v}) on the adhesive and non-adhesive substrate varies with the percentage of the area of the adhesive substrate (\bar{S}_A). The inset shows the variation of the velocity (v) of the specimen as a function of \bar{S}_A .

动前沿处曲率增大, 中间部分的曲率减小(图6(a)的(ii)). 此时曲率减小的部分不再提供弹性能维持自然弯曲体的运动, 反而储存了一部分区域 II 和 III 的动能及其释放出的弹性能, 导致自然弯曲体的弹性能释放效率降低, 运动速度与全黏附基底接近. 自然弯曲体通过黏附基底后, 自相似区域的运动前沿曲率在无黏附基底下降为0, 其运动切换回无黏附基底状态, 如图6(a)的(iii)所示. 由于自然弯曲体在黏附基底和无黏附基底上进行切换时存在运动惯性, 旋转滚动区域的接触会增加, 并且区域 I 的曲率会随运动前沿在黏附与非黏附区域移动振荡, 无法保持稳定的螺旋结构进行运动, 储存的弹性能迅速被耗散掉, 如图6(a)的(iv)所示.

图6(b)为自然弯曲体在10种黏附模式基底上运动的归一化速度 $\bar{v} = v / v_{NA}$ 随黏附基底面积占比 \bar{S}_A 的变化, 而内嵌图为实验测量的不同试样在不同基底上的运动速度. 可以发现, 随着 \bar{S}_A 的增加, 自然弯曲体的运动速度先迅速降低, 而后逐渐趋近在全黏附基底上的运动速度. 通过对实验数据进行分析, 发现自然弯曲体在部分黏附基底上的速度 \bar{v} 和 \bar{S}_A 满足 $\bar{v} \propto \exp(-\bar{S}_A / \bar{S}_A^*)$, \bar{S}_A^* 为黏附基底占比的临界特征尺寸. 通过函数 $v = \alpha v_{NA} \exp\left(-\frac{\bar{S}_A}{\bar{S}_A^*}\right) + \beta$ 拟合实验数据可得 $\bar{S}_A^* = 0.07$, α 和 β 与自然弯曲体和基底剥离强度有关. 因此, 当 $\bar{S}_A > 0.07$ 时, 部分黏附基底可以取得和全黏附基底相似的减速

效果. 结合高速摄影实验与理论模型, 我们提出部分黏附基底减速的力学机制: 一是黏附基底和无黏附基底的转换中存在能量的储存-耗散. 在观测自然弯曲体从无黏附基底转入有黏附基底的过程时发现: 自然弯曲体在部分黏附基底进行不同基底转换时伴随着剧烈的结构振荡, 引起材料耗散的同时加剧多层结构之间的接触摩擦, 从而实现动能的转换与耗散. 二是在黏附-非黏附基底的转换过程中, 自然弯曲体自相似区域的边界条件发生了变化, 导致自相似解的切换, 破坏了自然弯曲体结构高速运动的自相似性与连续性. 与全黏附基底相比, 部分黏附基底存在多次自相似解切换的过程. 因此, 黏附-非黏附基底可以实现和全黏附基底上相近的减速效果, 为新型动态黏附吸能界面的设计提供了思路.

4 结论

本研究基于一种可调速的自然弯曲体, 采用匹配渐近展开法对其在长时间尺度下的动态黏附行为进行了理论分析, 揭示了软材料的动态黏附性能与运动前沿处界面脱黏速度之间的关联. 运用打靶法对运动方程进行数值求解, 建立了弯曲体自然曲率、界面脱黏速度与软材料的剥离强度之间的定量关系, 实现了对有黏附基底上自然弯曲体运动的调控. 此外, 通过高速摄影技术, 本文还对不同自然曲率的试样在黏附基底上的运动特性进行了实验研究. 实验结果显示, 自然弯

曲体在全黏附基底上的运动速度普遍低于在非黏附基底上的速度,并且随着运动前沿速度的增加,黏附表面的剥离强度降低。对自然弯曲体运动前沿的进一步分析发现,不同速度下的弯曲体展现了“台阶式”的剥离轨迹。

此外,受汽车减速带设计的启发,本文设计了黏附与非黏附模式相结合的基底,发现存在黏附基底占比的临界特征尺寸,使得部分黏附基底可以取得与全黏

附基底相似的减速效果。这是因为与全黏附基底相比,黏附-非黏附基底间的多次转换产生多个能量储存-耗散的过程,并加剧了多层结构的内部摩擦,进一步实现了动能耗散。此外,黏附-非黏附基底的多次切换也导致自相似区域的边界条件发生变化,破坏了自然弯曲体结构高速运动的自相似性与连续性。这项研究有助于深入了解软材料的动态黏附特性,为新型动态黏附吸能结构的设计提供思路。

参考文献

- Callan-Jones A, Albarran Arriagada O E, Massiera G, et al. Red blood cell membrane dynamics during Malaria Parasite Egress. *Biophys J*, 2012, 103: 2475–2483
- Viamontes G I, Kirk D L. Cell shape changes and the mechanism of inversion in *Volvax*. *J Cell Biol*, 1977, 75: 719–730
- Krenn H W. Feeding mechanisms of adult Lepidoptera: Structure, function, and evolution of the mouthparts. *Annual Rev Entomol*, 2009, 55: 307–327
- Callan-Jones A C, Brun P T, Audoly B. Self-similar curling of a naturally curved elastica. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 174302
- Audoly B, Callan-Jones A, Brun P T. Dynamic curling of an elastica: A nonlinear problem in elastodynamics solved by matched asymptotic expansions. In: Bigoni D, ed. *Extremely Deformable Structures*. Vienna: Springer, 2015. 137–155
- Arriagada O A, Massiera G, Abkarian M. Curling and rolling dynamics of naturally curved ribbons. *Soft Matter*, 2014, 10: 3055–3065
- Höhn S, Honerkamp-Smith A R, Haas P A, et al. Dynamics of a *Volvax* embryo turning itself inside out. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 178101
- Anderson C V. Off like a shot: Scaling of ballistic tongue projection reveals extremely high performance in small chameleons. *Sci Rep*, 2016, 6: 18625
- Creton C, Ciccotti M. Fracture and adhesion of soft materials: A review. *Rep Prog Phys*, 2016, 79: 046601
- Villey R, Creton C, Cortet P P, et al. Rate-dependent elastic hysteresis during the peeling of pressure sensitive adhesives. *Soft Matter*, 2015, 11: 3480–3491
- Dalbe M J, Santucci S, Vanel L, et al. Peeling-angle dependence of the stick-slip instability during adhesive tape peeling. *Soft Matter*, 2014, 10: 9637–9643
- Gent A N, Kaang S Y. Effect of peel angle upon peel force. *J Adh*, 1987, 24: 173–181
- Dalbe M J, Villey R, Ciccotti M, et al. Inertial and stick-slip regimes of unstable adhesive tape peeling. *Soft Matter*, 2016, 12: 4537–4548
- Crosby A J, Shull K R. Adhesive failure analysis of pressure-sensitive adhesives. *J Polym Sci B Polym Phys*, 1999, 37: 3455–3472
- Shull K R, Creton C. Deformation behavior of thin, compliant layers under tensile loading conditions. *J Polym Sci B Polym Phys*, 2004, 42: 4023–4043
- Teisseire J, Nallet F, Fabre P, et al. Understanding cracking versus cavitation in pressure-sensitive adhesives: The role of kinetics. *J Adh*, 2006, 83: 613–677
- Tanguy F, Nicoli M, Lindner A, et al. Quantitative analysis of the debonding structure of soft adhesives. *Eur Phys J E*, 2014, 37: 3
- Gardon J L. Peel adhesion. I. Some phenomenological aspects of the test. *J Appl Polym Sci*, 1963, 7: 625–641
- Gardon J L. Peel adhesion. II. A theoretical analysis. *J Appl Polym Sci*, 1963, 7: 643–665
- Barquins M, Ciccotti M. On the kinetics of peeling of an adhesive tape under a constant imposed load. *Int J Adh Adhes*, 1997, 17: 65–68
- Ciccotti M, Giorgini B, Vallet D, et al. Complex dynamics in the peeling of an adhesive tape. *Int J Adh Adhes*, 2004, 24: 143–151
- Barquins M, Khandani B, Maugis D. Propagation saccadée de fissure dans le pelage d'un solide viscoélastique. Stick-slip motion during peeling of a viscoelastic solid. *Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 1986, 303: 1517–1519
- Maugis D, Barquins M. Stick-slip and peeling of adhesive tapes. In: Allen K W, eds. *Adhesion 12*. Dordrecht: Springer, 1988. 205–222
- Coleman B D, Dill E H, Lembo M, et al. On the dynamics of rods in the theory of Kirchhoff and Clebsch. *Arch Rational Mech Anal*, 1993, 121: 339–359
- Burridge R, Keller J B. Peeling, slipping and cracking—Some one-dimensional free-boundary problems in mechanics. *SIAM Rev*, 1978, 20: 31–61
- Cricri G. A general approach for modelling the peeling of a flexible tape from an elastic substrate. *Int J Solids Struct*, 2023, 273: 112277
- Heide-Jørgensen S, Budzik M K, Buhl K B, et al. Mode I debonding under large deformation conditions including notes on cleavage-peeling

- transition. [Eng Fract Mech](#), 2021, 241: 107413
- 28 He L, Lou J, Chen J, et al. An adhesion model for plane-strain shearable hyperelastic beams. [Mech Res Commun](#), 2018, 90: 42–46
- 29 Gialamas P, Völker B, Collino R R, et al. Peeling of an elastic membrane tape adhered to a substrate by a uniform cohesive traction. [Int J Solids Struct](#), 2014, 51: 3003–3011
- 30 Peng Z, Chen S. Effect of bending stiffness on the peeling behavior of an elastic thin film on a rigid substrate. [Phys Rev E](#), 2015, 91: 042401
- 31 Zhou Z, Jia Y, Lu W, et al. Enhancing the crack initiation resistance of hydrogels through crosswise cutting. [J Mech Phys Solids](#), 2024, 183: 105516
- 32 Gao Y, Jiang X, Wang P, et al. Toughening of hydrogel adhering interface based on soft/hard heterogeneous structures. [Extreme Mech Lett](#), 2023, 61: 102016
- 33 Li Q, Wan X, Xu Z, et al. Stretchable heterogeneous adhesion with high debonding resistance by large-scale bridging. [Extreme Mech Lett](#), 2024, 67: 102128
-

补充材料

附录一 基于自相似解表示的运动方程

附录二 运动前沿处边界条件的推导

附录三 旋转弹性体动力学问题

视频1 无黏附基底和全黏附基底

视频2 部分黏附基底

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “自然弯曲体的动态黏附行为”

Dynamic adhesion behavior of natural benders

Luohui Zhou¹, Zefeng Wei¹, Hengxu Song², Zaoyang Guo¹ & Xudong Liang^{1*}

¹ School of Science, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

² Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding author, E-mail: liangxudong@hit.edu.cn

Many structures in nature that undergo curling deformation engage in dynamic adhesive interactions with the external environment. These dynamic behaviors typically occur in high-viscosity environments, where the dynamic adhesive behavior at interfaces can modulate the bending deformation, reducing its propagation speed and, in some cases, preventing bending deformation. For instance, red blood cells undergo pore formation and exhibit membrane bending during malaria infection. Dynamic adhesion in motion manifests mechanical responses and phenomena that differ from static adhesion. However, traditional adhesion measurements, including peel tests and probe tests, are performed under near-static conditions, and it is challenging to extrapolate them to high-speed scenarios (exceeding 1 m/s). In addition, most models for dynamic bending deformations neglect the influence of adhesive boundaries, failing to describe how adhesive forces from the external environment affect the curling motion. Therefore, studying how a natural bender, under adhesive conditions, can regulate its speed during high-velocity bending is of great interest.

To gain a deeper understanding of the mechanics of dynamic adhesion, this paper examines the behavior of a naturally bending body with adjustable speed rolling on a thin-film adhesive substrate. Our research uncovers the correlation between the dynamic adhesive properties of soft materials and the debonding velocity at the leading edge of motion. Firstly, high-speed photography is utilized to experimentally investigate the motion characteristics of samples with varying natural curvatures on the adhesive substrate. Our results demonstrate that a stable and self-similar structure is observed during motion, and the velocity of natural benders on the adhesive substrate is consistently lower than on a non-adhesive substrate. Additionally, we have developed a theoretical analysis using matched asymptotic expansions and self-similar solutions to describe the long-term motion of natural benders. We have established a quantitative relationship between the debonding velocity, the natural curvature of the natural bender, and the adhesive strength of soft materials, enabling control over the motion of natural benders on the adhesive substrate. Combining our model and experiments, we have discovered that the adhesive strength of the substrate decreases with the increase in velocity at the leading edge of motion within the range of our measurements. Further analysis of the leading edge of motion reveals a “stepped” peeling trajectory with reduced velocities, featuring an “energy storage phase” during which the adhesive front remains nearly static, and an “energy release phase” during which fast propagation occurs.

Inspired by the design of speed bumps, this paper studies a patterned substrate that combines adhesive and non-adhesive areas. In this study, we developed substrates with a combination of adhesive and non-adhesive characteristics, identifying a critical size for the adhesive portion. We observed that substrates with only partial adhesion can slow down objects as effectively as those completely covered in adhesive. This effectiveness is attributed to the alternating adhesive and non-adhesive areas, which not only multiply the energy storage and dissipation cycles but also increase internal friction within the layers, thereby enhancing kinetic energy dissipation. Furthermore, the frequent transitions between these two substrate types modify the boundary conditions in the self-similar region, resulting in various modifications to the self-similar solution. Our research provides a deeper understanding of the dynamic adhesion properties of soft materials and offers insights for the design of energy-absorbing structures.

dynamic adhesion, self-similar solution, matched asymptotic expansion method, curling motion, adhesion strength

doi: [10.1360/TB-2024-0112](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0112)