可延展柔性无机电子器件的转印力学研究综述

罗鸿羽, 令狐昌鸿, 宋吉舟*

浙江大学工程力学系, 软物质科学研究中心, 浙江省软体机器人与智能器件研究重点实验室, 杭州 310027

*联系人, E-mail: jzsong@zju.edu.cn

收稿日期: 2018-04-22; 接受日期: 2018-06-21; 网络出版日期: 2018-08-03

浙江省自然科学基金(编号: LR15A020001)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB351901)、国家自然科学基金(编号: 11372272, 11622221, 11621062)、深圳市科技计划(编号: JCY20170816172454095)和中央高校基本科研业务费资助项目

摘要 可延展柔性无机电子器件将无机电子材料与柔性基体巧妙结合, 既保持了无机电子材料优越的电学性能, 又具备良好的延展性, 在显示、能源、医疗健康、人机交互等领域具有广泛的应用前景. 但是无机电子材料无法在柔性基体上直接生长和加工. 为解决这一难题, 研究者发展了转印技术, 将无机薄膜从其生长基体上剥离并印制到柔性基体上, 成功实现可延展柔性无机电子器件的制备. 本文简要综述了近年来转印技术的发展, 阐述了各种转印技术的力学调控黏附机理, 突出了力学在转印技术发展过程中的重要作用, 并对未来转印技术的发展进行了展望.

关键词 转印, 黏附调控, 断裂, 柔性电子器件

PACS: 42.82.Cr, 61.82.Fk, 68.35.Np, 73.61.Ph

1 引言

可延展柔性电子技术是将薄膜电子器件制作在柔性基体上的新兴电子技术. 与传统的电子技术相比, 可延展柔性电子技术以柔性基体代替传统的刚性基体, 从而克服了传统电子器件固有的硬、脆的特点, 能够承受拉伸、弯曲、扭转等各种复杂变形, 从而满足各种复杂屈曲面的使用要求, 在显示、能源、医疗健康、人机交互等领域具有广泛的应用前景, 已成为学术界和电子产业界关注的焦点.

为实现电子器件的可延展柔性化并充分利用当前的半导体加工工艺, 美国西北大学的Rogers教授和黄

永刚教授课题组^[1]合作, 于2006年率先提出了可延展柔性无机电子器件的概念. 他们创造性地采用巧妙的力学结构设计^[2-4], 通过转印技术将传统无机电子材料与柔性基体结合, 成功实现了可任意变形的硅基电子器件. 例如, 采用波纹结构设计, 将硅带转印到预拉伸的柔性基体上, 通过释放预应变使硅带发生屈曲生成周期性的波纹结构, 从而在不改变硅的电学性能的情况下, 依靠调整波纹结构的波长和幅值来适应外部变形^[1]. 除了波纹结构设计, 研究者先后提出了岛桥结构设计^[3-5]、折纸结构设计^[6]和剪纸结构设计^[7]等实现了具有更大延展性的无机电子器件. 岛桥结构依靠离散的岛承担功能和岛间互联导线(直互联导线、蛇形互

引用格式: 罗鸿羽, 令狐昌鸿, 宋吉舟. 可延展柔性无机电子器件的转印力学研究综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 094610
Luo H Y, Linghu C H, Song J Z. Recent advances on mechanics of transfer printing for flexible and stretchable electronics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 094610, doi: 10.1360/SSPMA2018-00136

联导线或分形互联导线)抵抗超大外部变形. 折纸结构依靠相邻面之间的折痕发生弯曲而变形, 其他平面主要发生刚性转动, 从而在受到外载时, 可保证器件不会发生破坏. 与折纸结构相比, 剪纸结构中存在镂空的条带, 使得整体在展开状态下可以实现进一步的变形, 如屈曲、扭转和剪切等, 从而具有更大的延展性. 利用这些结构设计并结合柔性基体, 在保证无机电子器件高性能的同时, 可大幅提升无机电子器件的柔韧性和延展性, 相关结构设计力学可见综述文章[8–12].

需要特别指出的是, 由于柔性基体往往不能承受无机薄膜的生长和加工环境(如高温条件、高精度的光刻对准、物理化学腐蚀等), 因此无机薄膜无法在柔性基体上直接生长和加工^[13–15]. 为实现无机薄膜与柔性基体的集成, 研究者发展了转印技术(Transfer Printing): 将无机薄膜(Ink)从其施主基体(或生长基体, Donor)上剥离并印制到受主基体(或柔性基体, Receiver)上, 来完成可延展柔性无机电子器件的制备. 图1展示了一些通过转印技术制备的可延展柔性电子器件, 如柔性CMOS电路^[16]、可延展CMOS反相器^[3]、类人眼相机^[17]、多功能柔性医用导管^[18]、电子皮肤^[19]、转印在塑料薄膜上的蓝光发光二极管点阵^[20]等. 另外, 柔性电子器件在健康监测领域也有很广的应用前景^[21].

转印技术主要通过高聚物印章(Stamp)实现, 其流程可分为拾取和印制两个过程(图2(a)): 拾取过程, 即利用印章将功能器件(或无机薄膜)从其施主基体上剥离; 印制过程, 即利用印章将功能器件(或无机薄膜)印

制到受主基体上. 在转印过程中, 印章/器件/基体之间的分离和黏附过程, 可看作界面竞争断裂的过程, 如图2(b)所示^[22]. 在拾取过程中, 印章/器件界面的黏附要“强”, 也就是印章/器件界面的黏附力要大于器件/基体界面的黏附力才能实现拾取, 而在印刷过程中, 印章/器件界面黏附要“弱”, 也就是印章/器件界面黏附力要小于器件/基体界面的黏附力才能实现拾取. 由于器件/基体的界面黏附通常是不易或不宜改变的, 要实现高效的转印, 最大的挑战是如何调控印章/器件界面黏附的强弱转化.

本文简要综述了基于不同力学机理调控界面黏附的各种转印技术, 重点阐述了每一种转印技术的力学机理及其优缺点, 彰显力学在转印技术发展过程中的重要作用, 并展望了未来转印技术的研究方向.

2 转印技术及其力学

转印的过程实际上是界面“竞争断裂”的过程, 因此界面的黏附性能与断裂性能的调控(尤其是印章/器件界面)对转印效率有着重要影响. 以下根据不同的调控原理对各类转印技术及其力学原理做出介绍.

2.1 动态可控转印技术

由于高聚物印章的黏弹性, 印章/器件界面的黏附力具有率相关特性, 动态可控转印技术利用该特性, 通过改变印章的剥离速度来调控印章/器件界面的黏附

图1 (网络版彩图)基于转印技术制备的可延展柔性电子器件. (a) 柔性CMOS电路^[16]; (b) 可延展CMOS反相器^[3]; (c) 类人眼相机^[17]; (d) 多功能柔性医用导管^[18]; (e) 电子皮肤^[19]; (f) 转印在塑料薄膜上的蓝光发光二极管点阵^[20]

Figure 1 (Color online) Representative examples of flexible and stretchable electronics enabled by transfer printing techniques. (a) Stretchable CMOS circuits [16]; (b) stretchable CMOS inverters [3]; (c) electronic eye camera [17]; (d) multifunctional balloon catheter [18]; (e) ultrathin, compliant, skin-like arrays of precision temperature sensors [19]; (f) a mechanically flexible array of ultrathin, microscale, blue LEDs on a thin strip of plastic [20].

图 2 (网络版彩图)转印流程及其力学机理. (a) 转印流程示意图; (b) 竞争断裂机理示意图^[22]

Figure 2 (Color online) Transfer printing process and its underlying mechanics mechanism. (a) Schematic diagram of the transfer printing process; (b) schematic diagram of competing fracture mechanism^[22].

力: 以较高的速度(10 cm/s或更高)将印章从施主基体上剥离以实现拾取器件; 以较低的速度(1 mm/s或更低)将印章从受主基体上取回以实现印制器件^[23], 如图3(a)所示. 冯雪等人^[24]利用动态可控转印技术, 把印章剥离过程近似为裂纹扩展过程, 将器件看作薄膜, 建立了转印过程的力学模型, 如图3(b)和(c)所示. 在印章上作用竖直向上的力 F , 并以速度 v 剥离印章. 在力 F 作用下, 界面会产生裂纹发生分离, 根据Griffith断裂准则, 当界面间的能量释放率 G 达到临界能量释放率 G_{crit} 时, 裂纹会发生扩展, 其扩展速度与印章剥离速度相同. 基体和薄膜是弹性的, 所以其界面间的能量释放率与印章剥离速度无关^[25-29], 其表达式为

$$G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}} = \frac{F_{\text{crit}}}{w}, \quad (1)$$

其中 $G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}$ 为薄膜与基体界面的临界能量释放率, F_{crit} 为剥离力, w 为印章的宽度. 由于印章是黏弹性的, 所以印章与薄膜界面的临界能量释放率具有率相关性, 依赖印章的剥离速度^[30-33], 其表达式为

$$G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}} = G_0 \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^n \right], \quad (2)$$

其中 $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}}$ 为印章与薄膜界面的临界能量释放率, v 为印章的剥离速度, G_0 为 v 趋于零时的临界能量释放率, v_0 为参考剥离速度(即 $G=2G_0$ 时的剥离速度), n 是通过实验数据拟合的参数. 一般情况下, $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}}$ 随着 v 的增大而增大. 当 $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}} > G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}$ 时, 薄膜将被印章拾取; 当 $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}} < G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}$ 时, 薄膜将被印制在基体上; $G_{\text{crit}}^{\text{stamp/film}} = G_{\text{crit}}^{\text{film/substrate}}$ 对应的印章剥离速度称为临界剥离速度 v_c , 如图3(d)所示, 因此以较大的剥离速度可实现拾取, 以较小的剥离速度实现印制.

动态可控转印虽然操作简单, 但其速度可控调控黏附的范围有限, 拾取和印制的实现受到印章剥离速度极大的限制. 如图3(d)所示, 对于较强黏附的器件/基体界面, 由于其临界能量释放率较高, 即使采用很高的剥离速度也无法实现拾取; 而对于较弱黏附的器件/基体界面, 由于其临界能量释放率较低, 即使采用很低的剥离速度也不能实现印制. 另外, 为精确控制剥离速度, 进而控制界面黏附, 该方法需要连接一个速度控制设备, 以便提高转印的效率, 但这大大增加了转印的成本.

2.2 载荷增强转印技术

载荷增强转印技术使用表面具有矩形柱(Post)的印章, 通过对印章施加剪切载荷来降低印制时印章与器件间的黏附力, 从而成功实现印制过程, 其流程如图4(a)所示^[34]. Carlson等人^[35]发现, 由于剪切载荷可以在界面处产生混合加载模式而改变其断裂行为^[29,36], 因此对印章施加剪切位移可以降低印章与器件界面间的黏附力, 提高印制的效率, 如图4(b)所示. Cheng等人^[34]针对载荷增强印制过程, 建立了印章/器件界面的断裂力学模型. 假设在界面上有一长度为 a 的初始裂纹, 矩形柱受到剥离力 F 和剪切应变 γ 的共同作用, 可近似受到均布拉力 F/L 和均布力偶 M/L 的共同作用, 其中 $M=\gamma L$, 如图4(c)所示. 界面断裂模式可看作是I型和II型裂纹的混合, 由此可导出界面能量释放率 G 为

$$G = \pi EL \left[0.0417 \left(\frac{F}{EL^2} \right)^2 + 0.0701 \left(\frac{\gamma h}{L} \right)^2 + 0.108 \frac{F \gamma h}{EL^2 L} \right], \quad (3)$$

其中, E 为印章的弹性模量, L 为矩形柱的宽度, h 为矩

图 3 (网络版彩图)动态可控转印技术. (a) 动态可控转印技术流程图^[23]; (b) 拾取过程的力学模型^[24]; (c) 印制过程的力学模型^[24]; (d) 率相关转印原理图^[24]

Figure 3 (Color online) Kinetically controlled transfer printing technique. (a) Schematic illustration of the kinetically controlled transfer printing process [23]; (b) mechanics model of the retrieval of a thin film [24]; (c) mechanics model of the printing of a thin film [24]; (d) schematic diagram of critical energy release rates for the film/substrate and stamp/film interfaces [24].

形柱的高度. 当界面能量释放率 G 达到界面的断裂韧性 Γ_0 时, 可以给出无量纲化的剥离力与剪切应变的关系

$$\frac{F}{EL^2} = \sqrt{24.0 \frac{\Gamma_0}{\pi EL} - 1.72 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\gamma h}{L} \right)^2} - 1.30 \frac{\gamma h}{L}. \quad (4)$$

通常情况下, 式(4)中根号下第二项远小于第一项, 因此无量纲化的剥离力与剪切应变关系可近似为

$$\frac{F}{EL^2} + \frac{13\gamma h}{10L} \approx 2\sqrt{\frac{6\Gamma_0}{\pi EL}}. \quad (5)$$

如图4(d)所示, 无量纲剥离力与剪切应变成线性关系, 理论预测与实验测量非常吻合, 结果表明, 剪切应变可降低界面的剥离力, 进而可有效地调控印章/器件界面的黏附, 实现高效印制. 为进一步改进具有矩形柱的印章, Yang等人^[37]利用斜柱设计的印章, 通过对印

章剥离方向的调控来调控黏附力的大小, 实现了连续滚式转印.

载荷增强转印技术虽然是一种较为有效的转印手段, 但由于需要对印章的剪应变进行调控, 增加了转印过程的复杂性, 且要达到较好的转印效果需要对印章施加较大的剪应变, 可能会对印章造成损伤或影响位置的精确对准.

2.3 支承印章转印技术

基于对甲虫科的一些雄性甲虫蘑菇状附着垫的研究^[38,39], 发现蘑菇状的微结构可改变界面断裂模式, 从而可增大黏附力. 支承印章转印技术就是利用这种蘑菇状的微结构增加界面的黏附力, 扩展了可转印材料的种类, 其具体流程如图5(a)所示^[40]. Carbone等人^[41]通过力学分析发现, 对于一般的柱状结构/器件界面,

图 4 载荷增强转印技术. (a) 载荷增强转印技术流程图^[34]; (b) 转印效率与剪切位移的关系图^[35]; (c) 研究剥离力与剪切应变关系的断裂力学模型示意图^[34]; (d) 无量纲化剥离力与剪切应变的关系图^[34]

Figure 4 Shear-enhanced transfer printing technique. (a) Illustration of the process of shear-enhanced transfer printing technique [34]; (b) yields for transfer printing onto a bare silicon substrate as a function of shear strain [35]; (c) schematic illustration of the fracture mechanics model used to study the relationship between the vertical pull-off force and the applied shear strain [34]; (d) the normalized pull-off force as a function of the shear strain [34].

图 5 (网络版彩图) 支承印章转印技术. (a) 支承印章转印技术流程图^[40]; (b) 支承印章结构示意图^[40]; (c) 不同矩形支撑柱宽度对应的界面裂纹尖端能量释放率^[40]; (d) 不同矩形支撑柱宽度下印章拉伸时的正应力分布图^[40]

Figure 5 (Color online) Pedestal-shaped elastomeric stamps for transfer printing technique. (a) Schematic illustration of the procedure for transfer printing using a pedestal stamp [40]; (b) illustration of a pedestal stamp [40]; (c) interfacial crack tip energy release rates versus the post width [40]; (d) distribution of the normal stress (along the pull-off direction) at the interface between the contact pad and a silicon surface for post widths of 50 and 60 μm [40].

其断裂模式有3种, 分别为裂纹从边缘萌生(I)、裂纹从内部萌生(II)和达到理论接触强度而脱黏(III), 对应的临界断裂应力分别为 σ_I 、 σ_{II} 和 σ_{III} , 通常情况下 $\sigma_I < \sigma_{II} < \sigma_{III}$. 采用蘑菇状微结构并通过优化设计可消除边界处的应力集中, 抑制边界裂纹的萌生, 从而提高界面的黏附力. 图5(b)为支承印章示意图, 在其他尺寸不变的情况下, 蘑菇状支撑柱宽度 W_{po} 对界面的断裂模式和黏附具有很大的影响. 有限元结果表明(图5(c)), 当 $W_{po} < 58 \mu\text{m}$ 时, 裂纹从内部萌生, 而当 $W_{po} > 58 \mu\text{m}$ 时, 裂纹从边缘萌生. 图5(d)为发生内部起裂和边缘起裂时界面正应力分布图, 分别对应50和60 μm 的支撑柱宽度, 不难看出界面发生内部起裂时的平均正应力更大, 黏附力也将更大. 因此, 通过对蘑菇状微结构的设计, 可以有效增强印章/器件界面的黏附, 最高可达15倍^[40].

支承印章的蘑菇状结构增大了印章与器件之间的黏附力, 所以在一定程度上扩展了可转印材料的种类, 尤其是可以拾取材料的种类, 但是该方法只提供了拾取时增大黏附力的途径, 而没有提供印制时降低黏附力的方法, 从而无法保证转印的高效, 极大地限制了支撑印章转印技术的应用.

2.4 壁虎仿生转印技术

壁虎具有很强的黏附能力, 研究者发现它们的黏附能力主要依赖于脚底纤维状的刚毛. Autumn等人^[42,43]证实了壁虎的强黏附主要来自刚毛与其接触物间产生的范德华力, 并对单根刚毛产生的范德华力进行了测量, 结果表明单根刚毛产生的范德华力约为 10^{-7} N . 由于范德华力没有方向性和饱和性, 尽管它的绝对值很小, 只要数量足够多就能产生足以支持壁虎全身重量的力(1 cm^2 的接触面积上能产生10 N的黏附力). 壁虎通过对刚毛方向的改变可实现范德华力的形成和消失, 从而实现对黏附力的调控. Jeong等人^[44]从壁虎脚趾上获取了天然的壁虎刚毛阵列, 将其黏在光学透明的玻璃板上, 制备了壁虎刚毛印章, 通过沿不同方向施加载荷成功实现拾取和印制, 如图6(a)所示.

受到这些研究的启发, 研究者制备出了具有相似力学机理的纤维状结构并探讨了在这些结构的力学性能^[45-49]. 图6(b)为表面具有圆柱状微结构阵列的黏弹性印章. Chen等人^[49]通过能量分析, 系统地研究了具有圆柱微结构阵列的黏弹性印章界面的黏附, 推导了界面的能量释放率为

图 6 (网络版彩图)壁虎仿生转印技术. (a) 利用天然壁虎刚毛阵列的印章进行转印流程图^[44]; (b) 具有柱状结构的印章结构, h_{pillar} 为微柱的高度, R 为微柱的半径, $a_{\parallel}$ 和 $a_{\perp}$ 分别为微柱间的水平和垂直间距^[49]; (c) 无量纲化的能量释放率与柱状结构间距的关系^[49]

Figure 6 (Color online) Gecko inspired transfer printing technique. (a) Schematic illustration of the transfer printing process using the natural setal stamp [44]; (b) schematic illustration of an elastomeric stamp with patterned pillars [49] with h_{pillar} as the pillar height, R as the pillar radius, $a_{\parallel}$ and $a_{\perp}$ as the parallel and vertical distances, respectively; (c) the normalized effective energy release rate versus the normalized pattern spacing [49].

$$G_{\text{pattern}} = \begin{cases} G \frac{9.42h_{\text{pillar}} + 15.1R}{a_{\parallel}a_{\perp}} R, & \lambda < 0.864, \\ G \frac{9.42h_{\text{pillar}} + 15.1R}{a_{\parallel}a_{\perp}} R + \frac{a - 2R}{a} \left[G\bar{\epsilon}(\lambda) - \frac{\gamma U(\lambda)}{\lambda} \right], & \lambda > 0.864, \end{cases} \quad (6)$$

其中, G 为平坦光滑印章界面的能量释放率, a 为 $a_{\parallel}$ 和 $a_{\perp}$ 之间的最大值, 即相邻圆柱的最大距离, λ 是系统材料属性和几何尺寸的一个无量纲组合参数, $\bar{\epsilon}(\lambda)$ 和 $U(\lambda)$ 是关于 λ 的无量纲函数. 图6(c)为无量纲能量释放率与无量纲微柱间距之间的关系, 结果表明, 相对于平坦光滑的无微柱结构印章, 微柱的存在增加了界面能量释放率, 但随着微柱间距的增加, 界面能量释放率也会降低. 当微柱间距增加到一定距离时, 由于微柱结构变形引起的附加变形能或发生塌陷, 在一定程度上会增加界面的黏附. 通过微柱结构的优化设计, 可按

需求增加或降低界面强度, 实现转印对界面黏附的定量调控.

壁虎仿生转印技术虽然具有强黏附并可实现可逆黏附, 但由于仿刚毛的微柱结构阵列制备, 通常需要较为昂贵的设备支持和经过较为复杂的过程, 这限制了转印技术的低成本应用.

2.5 面积调控转印技术

2.5.1 表面浮饰转印技术

由于界面间的黏附力主要是范德华力, 所以界面黏附正比于接触面积, 通过增大接触面积可以显著增强界面黏附. 基于面积调控黏附的原理, Kim等人^[50]提出了表面浮饰转印技术, 其转印流程如图7(a)所示: 首先制备表面具有金字塔微锥结构的印章, 在拾取时, 施加一定的载荷, 将微锥压塌, 增大印章与器件的接触面积, 保证印章/器件界面间的黏附足够大, 可以从施主

图7 (网络版彩图)表面浮饰转印技术. (a) 基于金字塔微锥的印章转印流程图^[50]; (b) 具有金字塔微锥印章转印的二维力学模型^[51]; (c) 无量纲化的微锥高度与微锥尖端接触半径的关系^[51]; (d) 无量纲化的微锥高度与预载荷的关系^[51]; (e) SMP表面和基体之间的黏合/剥离示意图^[52]; (f) 利用SMP印章实现激光驱动的可编程转印^[54]

Figure 7 (Color online) Surface-relief-assisted transfer printing technique. (a) Schematic process of the surface-relief-assisted transfer printing technique^[50]; (b) a schematic diagram for the mechanics model^[51]; (c) the normalized minimum height of microtip versus the normalized microtip radius^[51]; (d) the normalized maximum height of microtip versus the normalized preload^[51]; (e) schematic illustration of the bonding/debonding between the SMP surface and a substrate^[52]; (f) laser-driven programmable transfer using SMP^[54].

基体上拾取器件; 快速将带有器件的印章转移至受主基体上, 微锥会发生回弹, 减小印章与器件的接触面积, 印章与器件间的黏附力随之减小, 保证器件可从印章上剥离并印制到受主基体上. 微锥回弹与否取决于弹性恢复力与界面黏附力的相对大小, 而微锥高度是影响其弹性恢复力的关键因素, 过高的微锥由于回弹过快不利于拾取, 过低的微锥由于发生塌陷(图7(b))无法回弹不利于印制. 吴坚等人^[51]建立了微锥回弹过程的二维和三维力学模型, 分别导出了微锥的最大和最小高度. 例如, 基于三维力学模型, 微锥的最大和最小高度分别为

$$h_{\max} = \sqrt{5.14 \ln \left(\frac{w_{\text{stamp}}}{w_{\text{microtip}}} - 1.75 \right) \frac{\gamma w_{\text{stamp}}}{E}} \times \exp \left\{ 0.371 \sqrt{\frac{\gamma}{E w_{\text{stamp}}}} \left(\frac{w_{\text{stamp}}}{w_{\text{microtip}}} \right)^2 \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{2.08 + \ln \left(\frac{P}{\sqrt{\gamma E} w_{\text{stamp}}^3} \right)}{\sqrt{2.14 \ln \left(\frac{w_{\text{stamp}}}{w_{\text{microtip}}} \right) - 0.73}} \right] \right\}, \quad (7)$$

和

$$h_{\min} = \sqrt{\left[3.04 \ln \left(\frac{w_{\text{stamp}}}{R_{\text{microtip}}} \right) - 4.44 \right] \frac{\gamma w_{\text{stamp}}}{E}}, \quad (8)$$

其中, w_{stamp} 是印章的宽度, R_{microtip} 是微锥尖端的接触半径, γ 是表面能(形成单位面积的裂纹需要的能量), $E = 4E/3$ 是印章的平面应变模量, E 是印章的弹性模量, P 是施加的预压力. 理论预测的微锥最大高度和最小高度与实验观察完全吻合, 如图7(c)和(d)所示. 这些结果为印章的优化设计提供了理论基础.

由于微锥回弹的时间很难控制, 有可能时间过快, 导致器件无法拾取或在从施主基体转移至受主基体的过程中提前发生脱黏, 或时间过慢, 需要等待较长时间才能完成印制从而降低转印效率. 为解决这一问题, Eisenhaure 等人^[52]使用形状记忆聚合物(Shape Memory Polymer, SMP)制备印章, 成功实现了微锥回弹对时间的无关性, 大大提高了转印的效率. SMP 是一类能够记忆临时形状, 并能在特定外部刺激下回复到原来初始

形状的聚合物^[53]. 具体的转印流程如图7(e)所示, 首先升温至SMP玻璃化温度(T_g)以上使SMP变软, 然后施加载荷压塌印章表面的微锥从而增大印章与器件的接触面积, 下降至SMP玻璃化温度以下并去掉施加载荷, SMP锁定当前的临时形状, 并保持与器件的大面积接触, 可实现拾取器件. 将印章/器件转移至受主基体上后, 再升温至SMP玻璃化温度以上, 印章将回复到原来的形状, 微锥回弹减小了印章与器件的接触面积, 可实现器件的印制. 在此基础上, 黄银等人^[54]通过激光局部控制加热区域, 成功实现了可编程的转印(图7(f)). 虽然基于SMP的表面浮转印技术可提供高达3个数量级的界面黏附调控, 但是由于SMP在其玻璃化温度以上时, 表面黏附会变大, 进而抑制微锥的回弹, 影响转印的效率.

2.5.2 充气印章转印技术

Carlson 等人^[55]利用可充气的印章成功实现了可编程的转印, 其具体流程为(图8(a)): 印章在拾取器件时处于未充气状态, 印章表面为平表面, 与器件有较大的面积接触, 印章/器件界面黏附较强, 可实现器件的拾取; 印章在印制器件时处于充气状态, 随着内部气压的增大, 印章表面发生凸起, 与器件接触面积减小, 黏附力也随之下降, 可实现器件的印制. Carlson 等人^[55]针对充气转印过程, 建立了简化力学模型, 将空腔(Reservoir)壁和底膜(Membrane)都看做为梁, 在内部气压 p 和外加位移 V 的共同作用下, 发生变形导致印章/器件界面发生脱黏, 如图8(b)所示. 通过能量法, 分别计算了底膜脱黏时的系统总势能 $U_{\text{delamination}}$ 和底膜未脱黏时的系统总势能 U_{stretch} , 并基于最小势能原理得到了印章脱黏需要的临界位移 V_{crit} . 图8(c)为系统能量与外加位移之间的关系. 当 $V < V_{\text{crit}}$ 时, U_{stretch} 能量较低, 底膜与器件保持接触, 不会发生脱黏; 当 $V > V_{\text{crit}}$ 时, $U_{\text{delamination}}$ 能量较低, 底膜发生脱黏. 当 $V = V_{\text{crit}}$ 时, 印章底膜刚好发生脱黏, 黏附力最大, 可得到界面的剥离力为

$$P_{\text{pull-off}} = \frac{4E_R A V_{\text{crit}} (L + A)}{H} - p \pi L^2, \quad (9)$$

其中, H 为空腔的高度, A 为空腔的宽度, L 为底膜的半径, E_R 为空腔的弹性模量. 式(9)预测的剥离力与空腔的气压呈线性关系, 与实验测量吻合(图8(d)). 结果表明, 空腔的气压越大, 剥离力越小, 因此可通过控制气

图 8 (网络版彩图)充气印章转印技术. (a) 充气印章转印技术流程图^[55]; (b) 充气印章转印的二维力学模型示意图^[55]; (c) 不同变形模式的系统总势能与施加位移的关系^[55]; (d) 印章/硅界面黏附力与充气压力的关系^[55]

Figure 8 (Color online) Transfer printing with an inflatable stamp. (a) Procedure for transfer printing with an active programmable inflatable stamp [55]; (b) schematic cross-sectional illustration of the inflatable stamp [55]; (c) the potential energies for different deformation modes versus the applied displacement [55]; (d) experimentally and theoretically predicted decrease for stamp/silicon interfacial adhesion (maximum pull-off force) with increasing inflation pressure [55].

压有效地调控界面黏附, 从而实现转印.

充气印章虽然可编程且对器件无损坏, 但是印章的制备较为复杂、成本较高, 并且不能应用于低气压(如真空)环境下, 这限制了其在半导体工艺中的应用. Linghu 等人^[1]通过在空腔中添加铁颗粒, 并结合外加磁场, 发展了磁控转印技术, 成功地克服了充气印章转印的缺陷, 不仅具有制备简单、成本低的特点, 而且响应快、效率高.

2.6 激光驱动转印技术

高聚物印章与器件的热力学性质(如弹性模量、热传导系数、热膨胀系数等)有很大的差异, Saeidpourazar 等人^[56]利用此特点, 发展了激光驱动转印技术(图9(a)): 具有柱形微结构的印章选择性地使器件从施主基体上拾取, 然后将印章移动至受主基体上方并靠近受主基体(但不接触), 用激光束照射目标转印区域, 器件会吸热导致界面温升, 由于印章与器件的热

膨胀系数相差100倍和模量相差 10^5 倍, 在印章/器件界面形成极大的失配应变从而使器件从印章上脱落并印制到受主基体上. 由于在印制过程中, 印章与受主基本并不接触, 因此这是一种非接触印制模式, 这一模式可消除基体对印制的影响, 大大拓宽转印的应用范围. 图9(b)为有限元计算得到的界面能量释放率与激光照射时间之间的关系. 随着时间的增加, 界面能量释放率也会增加, 当达到界面强度时, 界面发生脱黏. Li 等人^[57]针对激光驱动转印技术, 建立了热力学耦合理论模型, 将印章看作半无限大固体, 器件作为热源, 得到了界面的能量释放率, 并获得了界面的临界脱黏时间(即剥离的尺度率)为

$$\frac{t_{\text{delamination}}}{t_0} = f\left(\frac{q_{\text{total}}}{q_0}, \frac{L_{\text{silicon}}}{L_0}\right), \quad (10)$$

其中

$$t_0 = \frac{c_{\text{silicon}}^2 \rho_{\text{silicon}}^2 h_{\text{silicon}}^2}{c_{\text{PDMS}} \rho_{\text{PDMS}}^2 L_{\text{PDMS}}}, \quad (11)$$

1) Linghu C, Wang C, Cen N, et al. Rapidly tunable and highly reversible bio-inspired dry adhesion for transfer printing in air and vacuum. 2018 (Submitted)

图 9 (网络版彩图)激光驱动转印技术. (a) 激光驱动转印技术流程图^[56]; (b) 界面能量释放率与激光照射时间关系图^[56]; (c) 改进的激光驱动转印力学模型^[58]; (d) 激光驱动转印的剥离时间尺度律^[58]

Figure 9 (Color online) Laser-driven transfer printing technique. (a) Schematic process of the laser-driven transfer printing technique^[56]; (b) the energy release rate versus the laser working time^[56]; (c) an accurate thermomechanical model for laser-driven transfer printing technique^[58]; (d) the scaling law for the critical delamination time of the stamp and silicon interface^[58].

$$q_0 = \frac{\lambda_{PDMS}}{\alpha_{PDMS}} \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_{PDMS}} \left(\frac{c_{PDMS} \rho_{PDMS}}{c_{silicon} \rho_{silicon} h_{silicon}} \right)^3}, \quad (12)$$

$$L_0 = \frac{c_{silicon} \rho_{silicon} h_{silicon}}{c_{PDMS} \rho_{PDMS}}, \quad (13)$$

其中, $t_{delamination}$ 为器件从印章脱落的临界时间, q_{total} 为器件吸收的激光总热流, $L_{silicon}$ 为器件(硅片)的宽度, $h_{silicon}$ 为器件的厚度, γ 为界面黏附强度, μ_{PDMS} 为印章的剪切模量, c , ρ , λ 和 α 分别为比热、密度、热传导系数和热膨胀系数, 下标 silicon 和 PDMS 分别代表器件和印章. 式(10)表明, 无量纲化临界脱黏时间仅依赖于两个无量纲参数: 一个是无量纲总热流, 另一个是无量纲器件长度.

Li 等人^[57] 的模型在导出界面能量释放率时忽略了硅片的尺度效应, 对小尺寸的硅片不适用. Gao 等人^[58] 考虑了硅片的尺寸效应, 利用叠加原理推导了基体内任一微小体积热膨胀导致的裂纹尖端应力强度因子(图9(c)), 通过基体域的积分进而获得了界面的能量释放率和界面的临界脱黏时间. 该模型预测的结果适用于小尺寸硅片, 与有限元计算吻合较好, 如图9(d)所示. 另外, Ala'a 等人^[59] 针对激光驱动转印技术, 建立了光-热-力多物理场的有限元模型, 分析了热梯度应变

的影响, 结果表明, 热失配与热梯度应变在激光驱动转印中起着同样重要的作用.

激光驱动的转印技术虽然实现了非接触式转印, 消除了受主基体对转印的限制, 可将器件转印至三维表面、液体表面等, 但由于激光加热导致界面温升较高, 对印章界面或器件都可能造成损坏.

2.7 曲率控制转印技术

Cho 等人^[60] 发展了曲率控制转印技术, 通过对扁平的光滑印章曲率的控制成功实现了转印, 如图10(a)所示. 通过PDMS制备的圆柱滚动实验发现(图10(b)), 随着PDMS曲率半径的增大, 界面的临界能量释放率也随之增大, 因此控制曲率半径可有效地调控界面黏附实现转印: 在拾取器件时, 可使用大曲率半径, 保证印章/器件界面黏附较强, 实现拾取; 在印制器件时, 可使用小曲率半径, 保证印章/器件界面黏附较弱, 实现印制. 研究者发现, 界面黏附的曲率相关性主要是因为印章在剥离时, 界面在裂尖附件是黏附区, 在裂尖远处是压力区(压力幅值远小于黏附力幅值), 黏附区的大小有很强的曲率依赖性, 曲率大黏附区的黏附力也大, 如图10(c)所示, 印章/器件的黏附力也随之增强. 图10(d)明确表明, 随着曲率半径的增加, 压力区的压力减小,

图 10 (网络版彩图) 曲率控制转印技术. (a) 曲率控制转印技术流程图^[60]; (b) 不同曲率半径的PDMS界面能量释放率^[60]; (c) 不同曲率半径的印章对应的剥离区示意图^[60]; (d) 1 mm厚的印章在不同曲率半径下的压力分布图^[60]

Figure 10 (Color online) Bending radius controlled transfer printing technique. (a) Schematic illustration of the procedure for the bending radius controlled transfer printing technique^[60]; (b) measured energy release rates for PDMS with different radii^[60]; (c) schematic illustrations of pressure and adhesion induced by the elastomeric stamp with different radii^[60]; (d) pressure distribution depending upon the bending radius ($r=3-7$ mm) of a stamp (thickness of 1 mm)^[60].

从而更有利于拾取过程的成功进行。

曲率控制转印技术是一种操作十分简单的方法, 印章的制备也较为便捷, 但曲率调控黏附的范围非常有限, 对较强黏附的器件/基体界面, 即使采用很大的曲率半径也无法实现拾取; 而对于较弱黏附的器件/基体界面, 即使采用很小的曲率半径也不能实现印制。另外, 为精确控制曲率半径, 该方法需要连接曲率控制设备, 以便提高转印的效率, 这大大增加了转印的成本。

2.8 胶带转印技术

前面几节的转印技术都是基于力学调控的黏附, 界面并未发生化学反应。与力学调控黏附相比, 化学调控黏附的调控范围更大、可靠性更好。目前使用最广泛的化学调控黏附的转印技术是通过水溶性或热释放胶带实现转印的胶带转印技术。图11(a)为基于水溶性胶带的转印技术流程^[61]。由于胶带有很强的黏附, 可很容易地将器件从施主基体上剥离下来, 然后通过水或其他溶剂对胶带界面或整个胶带进行处理, 使胶带界面或胶带本身发生化学反应失去黏附力, 从而实现印制。基于热释放胶带的转印技术, 则是通过加热处理, 使胶带界面或胶带本身发生化学反应失去黏附力, 具体的流程如图11(b)所示^[62]。图11(c)和(d)为热释放胶

带(Thermal Releasable Tape, TRT)与PI薄膜的界面黏附与温度和剥离速度之间的关系, 其表达式为

$$\begin{cases} G_{\text{TRT/membrane}} = \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^n \right] \\ \times \left\{ G_0 - \exp[r(T - T_r) + \ln(G_0 - G_r)] \right\}, & T \leq T_r, \\ G_{\text{TRT/membrane}} = G_r \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^n \right], & T > T_r, \end{cases} \quad (14)$$

其中, T 是TRT的温度, G_0 是初始临界能量释放率, G_r 是TRT失效时界面的临界能量释放率, T_r 是TRT失效时的温度, 即当温度升至 T_r 时, 界面黏附几乎降为零。研究者通过水溶性胶带成功制备了光电探测器^[61]、柔性电池^[63]、电子皮肤^[64]等, 通过热释放胶带成功转印了硅纳米线^[65]、石墨烯^[66,67]、金属氧化物^[68]等。

胶带转印技术可以大面积、高保真地转印薄器件, 但由于需要对器件进行额外的化学处理或加热操作, 可能在器件表面留下残留物, 影响器件的性能。

3 结论与展望

转印技术为无机电子材料与柔性基体集成提供了解决方案, 是制备可延展柔性无机电子器件的关键。本

图 11 (网络版彩图) 胶带转印技术. (a) 水溶性胶带转印流程图^[61]; (b) 热释放性胶带转印流程图^[62]; (c) TPT/PI 和 PI/PDMS 界面的临界能量释放率与温度的关系^[62]; (d) TPT/PI 界面的临界能量释放率与温度和速度的关系图^[62]

Figure 11 (Color online) Tape transfer printing technique. (a) Transfer printing through a water releasable tape [61]; (b) schematic illustration of the thermal release tape transfer printing technique [62]; (c) the energy release rates of TRT/PI and PI/PDMS interfaces [62]; (d) the contour map showing the energy release rate versus the velocity and temperature for the TRT/PI interface [62].

文综述了近年来基于不同力学机理调控界面黏附的各种转印技术, 包括动态可控转印技术、载荷增强转印技术、支承印章转印技术、壁虎仿生转印技术、面积调控转印技术、激光驱动转印技术、曲率控制转印技术和胶带转印技术, 重点阐述了每一种转印技术的力

学机理及其优缺点, 彰显了力学在转印技术发展过程中的重要作用. 目前的转印技术自身还存在一定的缺点, 只能用于实验室制备, 无法用于大规模工业生产, 并且在纳米器件的转印、三维复杂曲面的转印和大规模高效转印方面仍存在巨大的挑战.

参考文献

1. Khang D Y, Jiang H, Huang Y, et al. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates. *Science*, 2006, 311: 208–212
2. Kim D H, Ahn J H, Choi W M, et al. Stretchable and foldable silicon integrated circuits. *Science*, 2008, 320: 507–511
3. Kim D H, Song J, Mook Choi W, et al. Materials and noncoplanar mesh designs for integrated circuits with linear elastic responses to extreme mechanical deformations. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 18675–18680
4. Song J, Jiang H, Choi W M, et al. An analytical study of two-dimensional buckling of thin films on compliant substrates. *J Appl Phys*, 2008, 103:

014303

- 5 Ma Q, Zhang Y. Mechanics of fractal-inspired horseshoe microstructures for applications in stretchable electronics. *J Appl Mech*, 2016, 83: 111008
- 6 Song Z, Ma T, Tang R, et al. Origami lithium-ion batteries. *Nat Commun*, 2014, 5: 3140
- 7 Lamoureux A, Lee K, Shlian M, et al. Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking. *Nat Commun*, 2015, 6: 8092
- 8 Song J, Feng X, Huang Y. Mechanics and thermal management of stretchable inorganic electronics. *Nat Sci Rev*, 2016, 3: 128–143
- 9 Zhang Y, Huang Y, Rogers J A. Mechanics of stretchable batteries and supercapacitors. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2015, 19: 190–199
- 10 Song J. Mechanics of stretchable electronics. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2015, 19: 160–170
- 11 Chang R F, Feng X, Chen W Q, et al. Mechanics designs for stretchable inorganic electronics (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2015, 60: 2079–2090 [常若菲, 冯雪, 陈伟球, 等. 可延展柔性无机电子器件的结构设计力学. 科学通报, 2015, 60: 2079–2090]
- 12 Chang R F, Zhang Y H, Song J C. Recent advances in mechanics of stretchable designs (in Chinese). *Chin J Solid Mech*, 2016, 37: 95–106 [常若菲, 张一慧, 宋吉舟. 可延展结构的设计及力学研究新进展. 固体力学学报, 2016, 37: 95–106]
- 13 Carlson A, Bowen A M, Huang Y, et al. Transfer printing techniques for materials assembly and micro/nanodevice fabrication. *Adv Mater*, 2012, 24: 5284–5318
- 14 Ahn J, Meitl M A, Baca A J, et al. Transfer Printing Techniques and Inorganic Single-Crystalline Materials for Flexible and Stretchable Electronics. *Solution Processing of Inorganic Materials*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 407–447
- 15 Feng X, Lu B W, Wu J, et al. Review on stretchable and flexible inorganic electronics (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 014201 [冯雪, 陆炳卫, 吴坚, 等. 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展. 物理学报, 2014, 63: 014201]
- 16 Rogers J A, Someya T, Huang Y. Materials and mechanics for stretchable electronics. *Science*, 2010, 327: 1603–1607
- 17 Song Y M, Xie Y, Malyarchuk V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*, 2013, 497: 95–99
- 18 Kim D H, Lu N, Ghaffari R, et al. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy. *Nat Mater*, 2016, 10: 316–323
- 19 Webb R C, Bonifas A P, Behnaz A, et al. Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nat Mater*, 2013, 12: 938–944
- 20 Kim H, Brueckner E, Song J, et al. Unusual strategies for using indium gallium nitride grown on silicon (111) for solid-state lighting. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 10072–10077
- 21 Hu J Q, Li R, Liu Y, et al. An overview of healthcare monitoring by flexible electronics. *Sci China Phys, Mech Astron*, 2018, 61: 094601
- 22 Kim-Lee H J, Carlson A, Grierson D S, et al. Interface mechanics of adhesiveless microtransfer printing processes. *J Appl Phys*, 2014, 115: 143513
- 23 Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp. *Nat Mater*, 2005, 5: 33–38
- 24 Feng X, Meitl M A, Bowen A M, et al. Competing fracture in kinetically controlled transfer printing. *Langmuir*, 2007, 23: 12555–12560
- 25 Kim K S, Aravas N. Elastoplastic analysis of the peel test. *Int J Solids Struct*, 1988, 24: 417–435
- 26 Brown H R. Adhesion between polymers. *IBM J Res Dev*, 1994, 38: 379–389
- 27 Gent A N, Lai S M. Interfacial bonding, energy dissipation, and adhesion. *J Polym Sci B Polym Phys*, 1994, 32: 1543–1555
- 28 Kendall K. Adhesion: Molecules and mechanics. *Science*, 1994, 263: 1720–1725
- 29 Gent A N. Adhesion and strength of viscoelastic solids. Is there a relationship between adhesion and bulk properties? *Langmuir*, 1996, 12: 4492–4496
- 30 Barthel E, Roux S. Velocity-dependent adherence: An analytical approach for the JKR and DMT models. *Langmuir*, 2000, 16: 8134–8138
- 31 Barquins M, Ciccotti M. On the kinetics of peeling of an adhesive tape under a constant imposed load. *Int J Adhes Adhes*, 1997, 17: 65–68
- 32 Gent A N, Schultz J. Effect of wetting liquids on the strength of adhesion of viscoelastic material. *J Adhes*, 1972, 3: 281–294
- 33 Tsai K H, Kim K S. Stick-slip in the thin film peel test—I. the 90° peel test. *Int J Solids Struct*, 1993, 30: 1789–1806
- 34 Cheng H, Wu J, Yu Q, et al. An analytical model for shear-enhanced adhesiveless transfer printing. *Mech Res Commun*, 2012, 43: 46–49
- 35 Carlson A, Kim-Lee H J, Wu J, et al. Shear-enhanced adhesiveless transfer printing for use in deterministic materials assembly. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 264104
- 36 Hutchinson J W, Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials. *Adv Appl Mech*, 1992, 29: 63–191
- 37 Yang S Y, Carlson A, Cheng H, et al. Elastomer surfaces with directionally dependent adhesion strength and their use in transfer printing with

- continuous roll-to-roll applications. *Adv Mater*, 2012, 24: 2117–2122
- 38 Gorb S N, Varenberg M. Mushroom-shaped geometry of contact elements in biological adhesive systems. *J Adhes Sci Tech*, 2007, 21: 1175–1183
- 39 Gorb S, Varenberg M, Peressadko A, et al. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. *J R Soc Interface*, 2007, 4: 271–275
- 40 Kim S, Carlson A, Cheng H, et al. Enhanced adhesion with pedestal-shaped elastomeric stamps for transfer printing. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 171909
- 41 Carbone G, Pierro E, Gorb S N. Origin of the superior adhesive performance of mushroom-shaped microstructured surfaces. *Soft Matter*, 2011, 7: 5545–5552
- 42 Autumn K, Sitti M, Liang Y A, et al. Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 12252–12256
- 43 Autumn K, Liang Y A, Hsieh S T, et al. Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature*, 2000, 405: 681–685
- 44 Jeong J, Kim J, Song K, et al. Geckoprinting: Assembly of microelectronic devices on unconventional surfaces by transfer printing with isolated gecko setal arrays. *J R Soc Interface*, 2014, 11: 20140627
- 45 Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V, et al. Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair. *Nat Mater*, 2003, 2: 461–463
- 46 Mengüç Y, Yang S Y, Kim S, et al. Gecko-Inspired controllable adhesive structures applied to micromanipulation. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 1246–1254
- 47 Yao H, Gao H. Mechanics of robust and releasable adhesion in biology: Bottom-up designed hierarchical structures of gecko. *J Mech Phys Solids*, 2006, 54: 1120–1146
- 48 Gao H, Yao H. Shape insensitive optimal adhesion of nanoscale fibrillar structures. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 7851–7856
- 49 Chen H, Feng X, Huang Y, et al. Experiments and viscoelastic analysis of peel test with patterned strips for applications to transfer printing. *J Mech Phys Solids*, 2013, 61: 1737–1752
- 50 Kim S, Wu J, Carlson A, et al. Microstructured elastomeric surfaces with reversible adhesion and examples of their use in deterministic assembly by transfer printing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 17095–17100
- 51 Wu J, Kim S, Chen W, et al. Mechanics of reversible adhesion. *Soft Matter*, 2011, 7: 8657
- 52 Eisenhaure J D, Xie T, Varghese S, et al. Microstructured shape memory polymer surfaces with reversible dry adhesion. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5: 7714–7717
- 53 Zheng N, Huang Y, Zhao Q, et al. Shape memory polymers for flexible electronics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 044602 [郑宁, 黄银, 赵赛, 等. 面向柔性电子的形状记忆聚合物. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 044602]
- 54 Huang Y, Zheng N, Cheng Z, et al. Direct laser writing-based programmable transfer printing via bioinspired shape memory reversible adhesive. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 35628–35633
- 55 Carlson A, Wang S, Elvikis P, et al. Active, programmable elastomeric surfaces with tunable adhesion for deterministic assembly by transfer printing. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 4476–4484
- 56 Saeidpourazar R, Li R, Li Y, et al. Laser-driven micro transfer placement of prefabricated microstructures. *J Microelectromech Syst*, 2012, 21: 1049–1058
- 57 Li R, Li Y, Lü C, et al. Thermo-mechanical modeling of laser-driven non-contact transfer printing: Two-dimensional analysis. *Soft Matter*, 2012, 8: 7122
- 58 Gao Y, Li Y, Li R, et al. An accurate thermomechanical model for laser-driven microtransfer printing. *J Appl Mech*, 2017, 84: 064501
- 59 Ala'a M, Ferreira P M. Multi-physics modeling for laser micro-transfer printing delamination. *J Manufacturing Processes*, 2015, 20: 414–424
- 60 Cho S, Kim N, Song K, et al. Adhesiveless transfer printing of ultrathin microscale semiconductor materials by controlling the bending radius of an elastomeric stamp. *Langmuir*, 2016, 32: 7951–7957
- 61 Sim K, Chen S, Li Y, et al. High fidelity tape transfer printing based on chemically induced adhesive strength modulation. *Sci Rep*, 2015, 5: 16133
- 62 Yan Z, Pan T, Xue M, et al. Thermal release transfer printing for stretchable conformal bioelectronics. *Adv Sci*, 2017, 4: 1700251
- 63 Xu S, Zhang Y, Cho J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems. *Nat Commun*, 2012, 4: 1543
- 64 Yeo W H, Kim Y S, Lee J, et al. Multifunctional epidermal electronics printed directly onto the skin. *Adv Mater*, 2013, 25: 2773–2778
- 65 Lee C H, Rip K D, Zheng X. Fabricating nanowire devices on diverse substrates by simple transfer-printing methods. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 9950–9955

- 66 Lee Y, Bae S, Jang H, et al. Wafer-scale synthesis and transfer of graphene films. *Nano Lett*, 2010, 10: 490–493, arXiv: [0910.4783](#)
- 67 Caldwell J D, Anderson T J, Culbertson J C, et al. Technique for the dry transfer of epitaxial graphene onto arbitrary substrates. *ACS Nano*, 2010, 4: 1108–1114
- 68 Desai S B, Madhvapathy S R, Amani M, et al. Gold-mediated exfoliation of ultralarge optoelectronically-perfect monolayers. *Adv Mater*, 2016, 28: 4053–4058

Recent advances on mechanics of transfer printing for flexible and stretchable electronics

LUO HongYu, LINGHU ChangHong & SONG JiZhou^{*}

Key Laboratory of Soft Machines and Smart Devices of Zhejiang Province, Soft Matter Research Center, Department of Engineering Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Flexible and stretchable inorganic electronics, offering the high performance of conventional electronics with the ability to be deformed like a rubber, integrate inorganic electronic materials with flexible substrates and has enabled many novel applications ranging from curvilinear electronics, epidermal electronics to bio-integrated electronics. However, inorganic electronic materials (e.g., silicon) cannot be fabricated directly on a flexible substrate due to the extreme processing conditions (e.g., high temperature). To overcome this challenge, transfer printing techniques have been developed to pick up inorganic thin films from the grown substrate and transfer them onto the receiver substrate for the heterogeneous integration. This approach separates the fabrication substrate with the application substrate and provides a most promising solution for the integration of inorganic electronic materials with flexible substrates to develop flexible and stretchable electronics. This paper provides a brief review of recent advances on mechanics of transfer printing techniques for flexible and stretchable inorganic electronics including kinetically controlled transfer printing technique, shear-enhanced transfer printing technique, gecko inspired transfer printing technique, surface-relief-assisted transfer printing technique, laser-driven transfer printing technique, bending curvature controlled transfer printing technique and tape transfer printing technique. The basic concepts for each transfer printing technique are overviewed to illustrate the key roles of mechanics in the development of transfer printing techniques. Despite the successful developments of various transfer printing techniques, several challenges still exist for future transfer printing techniques with the capabilities of transfer printing of nano-devices and direct three-dimensional transfer printing in a large-scale and high-efficiency manner.

transfer printing, adhesion regulation, fracture, flexible electronic devices

PACS: 42.82.Cr, 61.82.Fk, 68.35.Np, 73.61.Ph

doi: [10.1360/SSPMA2018-00136](#)