

引文格式: 张坤, 许晓慧, 李昕然, 等. 仿跳虫表皮柔性微结构阵列复型转移制备[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23/24): 72-80.

ZHANG Kun, XU Xiaohui, LI Xinran, et al. Replication, transfer and fabrication of flexible microstructural arrays inspired from springtail cuticle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(23/24): 72-80.

仿跳虫表皮柔性微结构阵列复型转移制备*

张坤^{1,2}, 许晓慧^{1,2}, 李昕然^{1,2}, 郭泽琦³, 吕湘连^{1,2}, 何洋^{1,2}, 苑伟政^{1,2}

(1. 西北工业大学空天微纳系统教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室, 西安 710072;

3. 西安电子科技大学, 西安 710126)

[摘要] 跳虫表皮独特的疏水耐压凹角微结构, 为开展飞机表面防/除冰研究提供了新的思路。以跳虫表皮为仿生对象, 制备了柔性疏水微结构。提出了“复型转移”的制备方法, 针对复型和转移过程中出现的结构变形、结构破裂问题, 分别通过“软刀硬模”和“界面黏附控制”工艺进行改进。基于“软硬结合”的思想采取“软刀硬模”的刮平方式以避免残余聚二甲基硅氧烷(PDMS)层导致的结构变形, 以聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜替代PDMS转移层并进行表面改性, 以避免结构层和转移层同质材料之间产生过度黏附。PET薄膜经氧等离子体改性处理, 表面接触角由70°减小为15°; 表面轮廓算术平均偏差 R_a 由112.15 nm增加到199.74 nm, 提升了78.1%; 氧/碳(O/C)含量比由0.35增加到0.45。微结构表面接触角为125.2°, 弹跳行为中液滴回缩明显。“复型转移”的方法成功实现了柔性微结构的制备, “软刀硬模”的方式明显减小了微结构变形, 结构成功复型且变形得到有效控制。PET薄膜在表面改性后表面活性增加, 结构成功转移且破裂减少。经测试, 制备的仿跳虫柔性微结构具有良好的疏水性能。

关键词: 跳虫; 仿生; 柔性微结构; 聚二甲基硅氧烷(PDMS); 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET); 黏附控制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.23/24.072



张坤

博士研究生, 研究方向为仿生柔性微纳结构制造。

飞机结冰会对飞行安全造成严重危害, 当飞机表面附着冰、雪、霜等物体时, 会影响飞机动力和操纵性能, 引发严重的安全事故。因此, 飞机防/除冰对于提升飞行器的飞行性能十分必要。传统的电加热、机械振动和热气等除冰方法存在能耗大、效率低和对环境不友好等问题, 因此可利用跳虫表皮因自然进化出耐压性能稳定的凹角微结构疏水效果显著的特点, 在表面微观形貌和低表面能化学材料共同作用下, 使飞机能有效延迟结冰、减少结冰面积和降低冰黏附强度, 为飞机表面防/除冰研究提供新的思路。研究发现, 跳虫表皮在

水中或者低表面能的液体中均可呈现出优异的疏水性能^[1]。Helbig等^[2]发现跳虫表皮有着独特的梳状呈菱形网状排列结构, 可以抵抗住多种有机液体腐蚀和高压下的润湿, 保持良好的疏水性。Hensel等^[3]研究发现, 跳虫表皮结构剖面为独特的悬垂结构及纳米级角质层结构, 在低表面张力液体中呈现稳定的疏水状态。清华大学Wang等^[4]在超快激光制备的特殊微纳结构超疏水表面上首次发现液滴可以在结冰与融冰循环中实现“Wenzel”状态到“Cassie”状态的自发转变, 这一发现对于超疏水表面的自清洁、抗结冰等广泛应用具

* 基金项目: GF 科技重点实验室基金(6142201200403); 国家自然科学基金面上项目(51875478)。

有重要的研究价值。香港科技大学 Ma 等^[5]通过化学刻蚀法及溶液旋涂法,将氮化钛(TiN)光热纳米颗粒镶嵌在具有微纳结构的铝表面上,开发出了一种光热防冰融冰超疏水表面,成功实现了极端低温条件下的防冰性能。

针对仿跳虫表皮微结构的制备,国内外学者开展了相关的研究与探索,但仍有不足。Dong 等^[6]通过将纳米球光刻技术和模板保护选择性反应离子刻蚀技术相结合,在硅片表面制备出百纳米级的双凹角微柱阵列,该微结构表面表现出良好的疏水性能。Yin 等^[7]通过基于投影微立体光刻的 3D 打印技术来制造具有连续可控润湿性和黏附力的仿跳虫表皮微结构。Romano 等^[8]通过分析近红外飞秒激光脉冲产生的激光诱导的周期性表面结构,研究脉冲数量和脉冲光通量的影响,在不锈钢和钛合金表面制造出了类似于跳虫表皮的三角结构,可在激光纹理的金属表面表现出疏水特性和光散射效应。等离子体刻蚀、3D 打印、激光脉冲加工等微纳加工方法并不能直接制备出适应飞机上各种复杂曲面的柔性薄膜。Kang 等^[9]通过硅基光刻和干法刻蚀工艺制备出仿跳虫表皮蘑菇状微结构模板,使用 PDMS 软复制工艺成功制备出柔性表面,但由于模板的倒 T 型内凹结构使得脱模较为困难,微结构冠状部分易受损伤。因此,需要有新的工艺方法来完成仿跳虫表皮柔性微结构制备。

1 仿跳虫表皮微结构制备工艺方法及流程

针对跳虫表皮独特的内凹型结构特征与排列方式,提出“复型转移”的制备方法,如图 1 所示。设计了与传统内凹型模板不同的凸模版以保证复型后顺利脱模,避免结构损伤。通过调控转移层与结构层之间的界面黏附,将微结构顺利转移至基底。

首先采用湿法腐蚀工艺预埋金属铝掩膜,将双层掩膜套刻技术与干法刻蚀技术相结合,在 4 inch (1 inch=2.54 cm)单抛硅片上加工出仿跳虫表皮微结构的反结构,作为柔性微结构复型的硅模板;再将配比好的柔性材料 PDMS 浇注至硅模板中。由于微结构层与硅模板无缝贴合导致结构脱模缺少有力的夹持面,结构抗拉能力较弱,因此需要转移层在结构层固化成型后帮助其完成脱模;结构脱模后将微结构转移到一层事先制备好的柔性基底上,结构层与基底产生胶连后移除转移层,完成仿跳虫表皮柔性微结构的制备。

1.1 三维模型建立及简化

通过分析跳虫表皮的扫描电镜图,提取出跳虫表皮结构的主要形貌特点、结构几何特征及结构分布方式,建立起跳虫表皮微结构三维模

型。将跳虫表皮微结构进行适当的结构简化,得到简化后三维模型。跳虫表皮微结构简化流程如图 2 所示。

1.2 模板制备

将双层套刻技术和电感耦合等离子刻蚀技术(ICP)相结合,制备出仿跳虫表皮微结构硅模板,分别以光刻胶和金属铝作为掩膜进行两次 ICP 刻蚀,最终得到具有仿跳虫表皮微结构阵列的反结构——双层方形微柱结构的硅模板,其工艺流程如图 3 所示。采用捷克 Tescan 公司生产的型号为 VEGA 3 LMU 的扫描电镜对加工的微结构硅模板表面形貌进行检测,观测结果如图 4 所示。

1.3 柔性微结构制备

加工得到硅模板后,采用模塑成型的方法得到成型的仿跳虫表皮微结构,利用转移层将结构层脱模并转移至柔性基底上,完成仿跳虫表皮柔

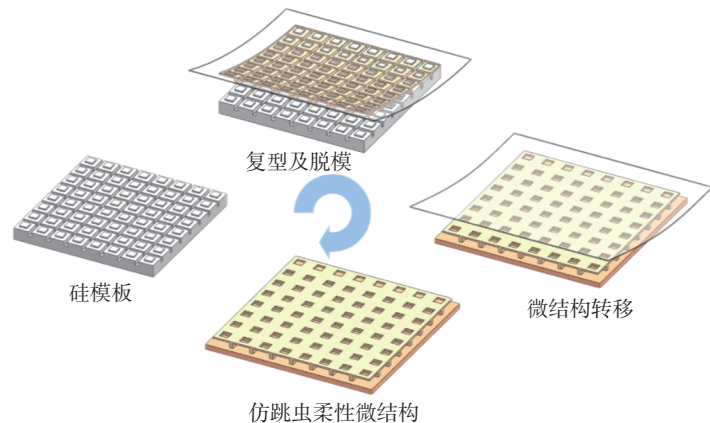


图 1 仿跳虫表皮柔性微结构制备方法

Fig.1 Preparation method of imitating springtail epidermis microstructure fabrication

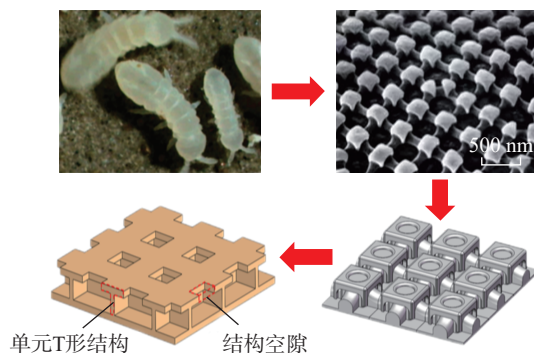


图 2 跳虫表皮微结构简化流程图

Fig.2 Flowchart of springtail epidermis microstructure simplification

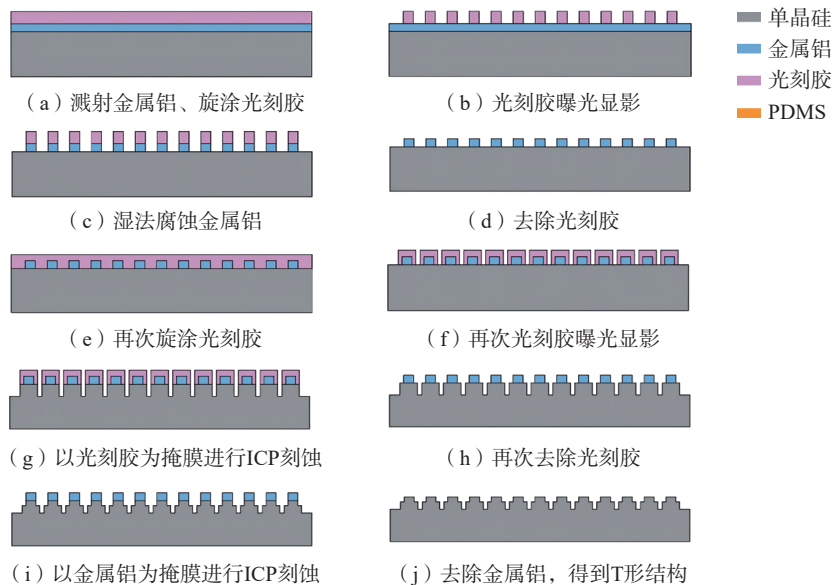


图3 微结构硅模板制备工艺流程

Fig.3 Process flow of microstructure silicon template fabrication

性微结构的制备。将微结构成功转移至柔性基底上的重点在于控制转移层、结构层与基底三者之间的黏附关系。因此,在加工过程中对转移层进行氟化处理以适当减小转移层与结构层之间的黏附力但不影响结构脱模^[10],同时在结构成功脱模后对PDMS微结构层与PDMS基底的接触面进行改性处理以增强二者表面活性及粘接强度。图5所示为微结构复型转移工艺流程。

2 柔性微结构保型控制

2.1 基于软刀硬模的柔性微结构变形控制

由于直接转移后的仿跳虫表皮微结构未能成型,结构表面存在严重变形。本文认为影响PDMS微结构变形的原因可能为:(1)PDMS转移层配比不同导致的转移层刚度不同^[11]。转移层配比是指硅氧烷预聚体与固化剂的配比,配比直接关系着最终PDMS转移层的弹性模量。PDMS转移层的刚度越大,其弹性模量值也会越大,PDMS转移层受压时的变形程度越小。(2)PDMS转移层与硅片模板之间残余的液

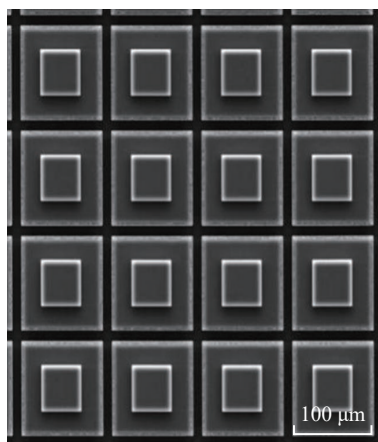


图4 微结构硅模板扫描电镜图

Fig.4 SEM of microstructure silicon template

PDMS导致单元阵列微结构在固化过程中产生粘连。

利用显微镜对由不同配比的PDMS转移层制备得到的微结构进行对比观测,发现其表面形貌无太大差异。因此对转移层与微结构层之间残余的PDMS层产生原因进行分析。传统硬质平口刀在刮平操作时采用受压向下并向前平移的方法,但使用此方式时刀刃容易嵌入硅片模板的沟槽中并与某一系列硅片微柱发生碰撞,造成硅片模板微结构破损。为避免平口刀对硅片微结构的损伤

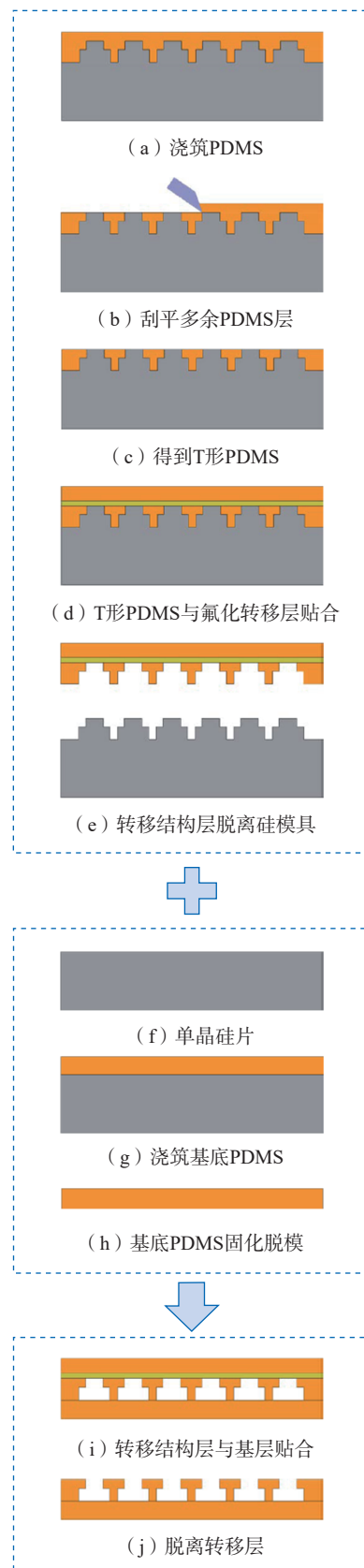


图5 微结构复型转移工艺流程

Fig.5 Process flow of microstructure replication and transfer

而将平口刀适当上移或减小向下的施压力度,硅片模板与平口刀刀刃之间则无法保证无缝隙贴合,会导致硅片模板表面始终残留较厚的 PDMS 多余层。

本文基于“软硬结合”的思想对刮平工艺进行改进,即将硬质刮刀与软质模具相结合或将软质可变形刮平工具与硬质模具相结合。当硬质平口刀刮过可变形或具有弹性的软质模具,即“硬刀软模”时,平口刀外部施加压力会使模具在平口刀前移过程中产生轻微变形,并在平口刀经过后由于自身弹性的作用恢复形态,液态 PDMS 也会在表面张力的作用下缓慢流动形成平面;“软刀硬模”同理,可变形的刮平工具在触碰到方形微柱时会产生弯曲或变形,并在外部施力及自身弹力的作用下,在平缓前移的过程中刀刃与硅片模板紧密相贴,极大地减小了刮平工具与硅模板之间的缝隙。可变形刮平工具保证了多余 PDMS 层的刮平效率,且由于刮平工具质地相对硅片微结构较软,不会对硅片模板的微结构造成损伤及破坏,如图 6 所示。

2.2 基于异质材料改性的柔性微结构破裂控制

采用“软刀硬模”的方式对刮平工艺进行改进后,微结构的变形虽然得到有效控制,但结构表面仍存在不同程度的缺失和裂纹。本文中柔性微结构的制备需要实现两个部分的

黏附力控制:(1)控制转移媒介与仿跳虫表皮微结构之间的黏附力大于仿跳虫表皮微结构与硅片模板之间的黏附力,使得仿跳虫表皮微结构层能够成功脱模;(2)控制仿跳虫表皮微结构与 PDMS 基底之间的黏附力大于转移媒介与仿跳虫表皮微结构层之间的黏附力,使得仿跳虫表皮微结构层能够成功转移至 PDMS 基底上。

转移层与结构层之间足够大的黏附强度虽然能够保证微结构层的顺利脱模,但当该黏附强度高于结构层与柔性基底之间的黏附强度甚至结构层的自身拉伸强度时,剥离转移层会对结构层造成一定的破坏。因此,转移媒介与微结构层之间过大的黏附力是造成微结构破裂的原因^[12-14]。

转移层与微结构层二者之间形成黏附界面的过程一般可分为两个阶段:第 1 阶段是液态 PDMS 结构层在转移层表面铺展的过程;第 2 阶段是液态 PDMS 在转移层表面的固化成型过程,在这一过程中液态 PDMS 与转移层之间会形成一层黏合界面^[15-16]。而这一界面的黏合效果和产生的黏附力大小均受到转移层及结构层的材料特性影响。因此,影响 PDMS 转移层与 PDMS 微结构层二者同质材料之间黏附强度的主要因素为分子扩散。由于微结构层受热固化,扩散运动加剧,二者间形

成交织过渡层,从而产生良好的黏合效果及较高的黏合强度^[17]。黏附界面生成的交织过渡转移层虽然为二者之间提供了足够大的黏附力使得微结构层成功脱模,但也是微结构层在转移工艺后结构大面积受损的主要原因。微结构层与转移层之间交织过渡层的形成源于二者属同质材料,扩散效应较为明显,因此,避免微结构破裂的关键在于削弱微转移层与结构层之间的分子扩散,进而减小交织过渡层的厚度。在工艺改进中,选择有一定的柔性、弹性及硬度,且与微结构层材料不同、相容性较差的 PET 涤纶聚酯薄膜(底材为 PET)作为转移层。

经过对多片仿跳虫表皮微结构硅片模板进行微结构复型操作后, PET 薄膜的结构脱模成功率不足 10%。因此需要对 PET 转移层进行黏附控制,从而增强 PET 转移层与 PDMS 结构层之间的黏附力。影响 PET 转移层与 PDMS 微结构层之间黏附强度的主要因素为分子吸附和机械互锁^[18-20],这也是增强 PET 转移层与 PDMS 结构层之间的黏附力的关键所在。

因此,本研究在将 PET 薄膜与液态 PDMS 结构层贴合前进行了表面改性,增大 PET 薄膜的表面极性,改善其表面润湿状态,实现 PET 转移层的黏附控制,最终成功完成仿跳虫表皮柔性微结构层的复型、脱模及转

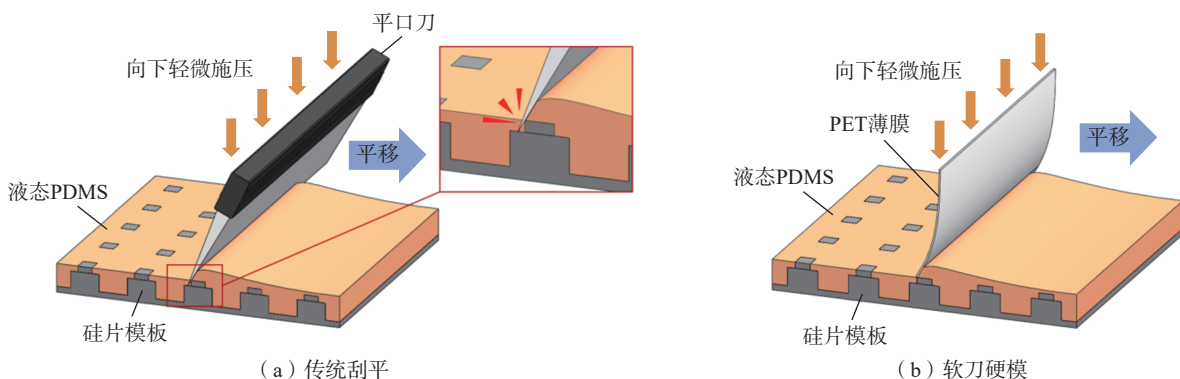


图 6 传统硬质平口刀刮平方式与“软刀硬模”刮平方式

Fig.6 Traditional hard flat knife scraping method and the “soft knife and hard template” scraping method

移。本研究使用赛奥特 YZD08-5C Plasma cleaner 等离子体清洗机进行表面改性。具体步骤为：(1) 将待处理 PET 薄膜裁剪为 3 cm × 3 cm 大小并放置于玻璃培养皿中；(2) 先后取体积约 30 mL 的 C₃H₆O 溶液和 C₂H₆O 溶液，调整超声清洗机的温度 25 ℃、功率 50 W，清洗约 5 min 后用去离子水(DI 水)淋洗约 1 min 以除去表面杂质与污染物，低温干燥后备用；(3) 打开等离子体清洗机电源，对真空腔进行通气后打开腔室盖，取下金属置物板后用无尘布擦拭，将待处理的 PET 薄膜放置在金属板上；(4) 将金属板放回腔室并调整金属板至水平，旋转封闭腔室盖；(5) 对清洗机腔室进行抽真空处理后通入氧气，调节工作压力，开启电源进行放电，样品的处理时间为 120 s；(6) 复原清洗机设置后对真空腔通气，打开腔室盖后取下金属板并取下 PET 薄膜，放回金属板，关闭腔室盖后关闭清洗机电源。至此，完成对 PET 薄膜的表面改性处理。

为证实氧等离子体表面改性是否能够增强 PET 薄膜表面黏附性能^[21]，本研究对表面改性前后的 PET 薄膜进行了一系列的优化验证。

(1) 接触角测量验证。采用德国 DataPhysics 公司 OCA15EC 型接触角测量仪进行观测。PET 薄膜经氧等离子体改性处理，表面接触角由原来的 70° 减小为 15°，表面活性及

亲水性得到大幅度提升，测量结果如图 7 所示。

(2) 机械互锁优化验证。本研究利用表面轮廓仪对改性前后的 PET 薄膜的表面粗糙度进行测量。与表面改性前相比，改性后的 PET 薄膜表面粗糙度大幅提升。由此可知，PET 薄膜经表面改性后，亲水性增强，表面粗糙度变大，其黏合界面的机械合力增大^[22]，测量结果如图 8 所示。

(3) 分子吸附优化验证。本研究利用能谱仪及傅里叶变换红外光谱仪(赛默飞 Nicolet-iS10)分别对改性前后的 PET 薄膜进行碳氧元素能谱分析及红外光谱分析^[23]，改性前后 PET 薄膜所选取的能谱观测点如图 9 所示。氧/碳(O/C)含量比的增加，表明 PET 薄膜经氧等离子体表面改性后在其表面形成了新的含氧基团，PET 膜表面极性基团如

碳氧单键 C-O、碳氧双键 C=O 等含量增加，是使薄膜表面活性及亲水性增加的主要原因，分析结果如表 1 所示。

傅立叶变换红外光谱仪一般用于红外吸收曲线测定，同时通过红外吸收峰特征对 PET 薄膜表面官能团进行解析。测试结果中的透射率越低表示吸收强度越高，说明该吸收峰对应的基团数量越多，针对改性前后的 PET 薄膜进行红外光谱分析后所得到的对比光谱图如图 10 所示，可以看出，PET 薄膜经表面改性后，1712 cm⁻¹ 处的吸收峰和 1232 cm⁻¹ 处的吸收峰明显增强，说明 1712 cm⁻¹ 波数对应的 C=O、1232 cm⁻¹ 波数对应的 C-O 数量经改性后明显增加。PET 薄膜经氧等离子体表面改性后，表面生成了大量新的极性基团，因此处理后的 PET 表面亲水性效果愈加显著。

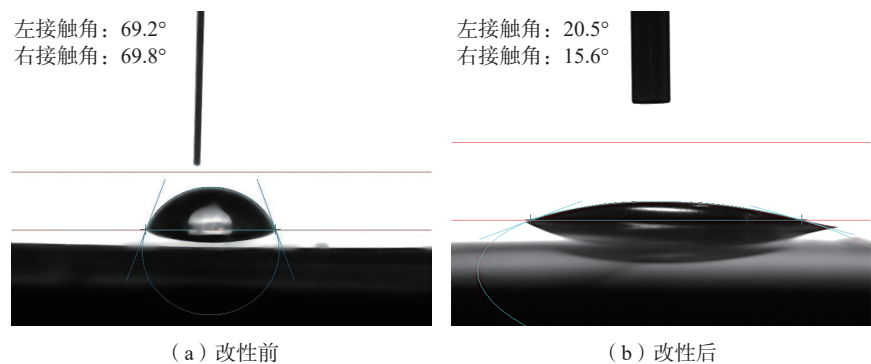


图 7 表面改性前后的 PET 薄膜表面接触角
Fig.7 Surface contact angle of PET film before and after modification

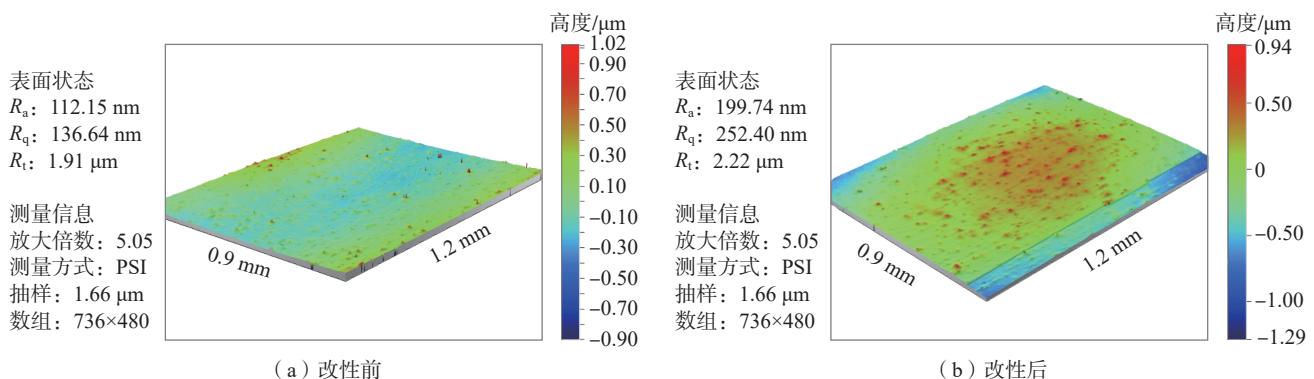
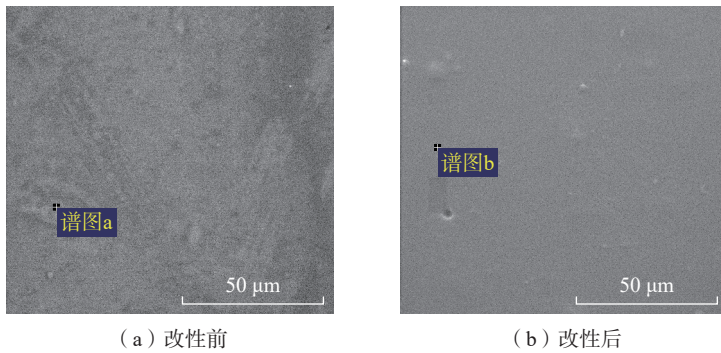


图 8 改性前后 PET 薄膜表面粗糙度
Fig.8 Surface roughness of PET film before and after modification



(a) 改性前

(b) 改性后

图9 改性前的PET薄膜能谱分析点

Fig.9 Energy spectrum analysis point of PET film before modification

表1 改性前后PET薄膜能谱分析

Table 1 Energy spectrum analysis of PET film before and after modification

| 元素 | 重量百分比/% | | 原子百分比/% | |
|-----|---------|-------|---------|-------|
| | 改性前 | 改性后 | 改性前 | 改性后 |
| C K | 68.20 | 62.84 | 74.07 | 69.25 |
| O K | 31.80 | 37.16 | 25.93 | 30.75 |

注: K表示能谱分析用线系。

以上测试结果均表明, PET薄膜在经氧等离子体表面改性后表面活性增加, 与PDMS结构层贴合后产生的较大黏附力足以克服结构层与硅片模板之间的黏附力, 由此, 本文实现以PET作为转移层进行结构脱模及转移时的黏附力控制。

3 仿跳虫表皮柔性微结构观测与性能测试

3.1 微结构观测

通过光学显微镜对仿跳虫表皮柔性微结构进行观测, 图11(a)是直接复型转移后制备得到的柔性微结构, 可以看出微结构之间发生较大程度的交织扩散, 基本结构单元未成型。图11(b)是通过“软刀硬模”的方法改进后得到的柔性微结构, 结构变形明显减少, 结构单元变形得到有效控制。图11(c)是将PET转移层表面改性后得到的柔性微结构, 已成功制备出结构完整的仿跳虫表皮柔性微结构。扫描电子显微镜观测图如图12所示。

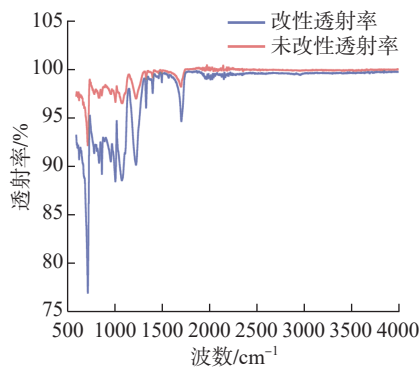
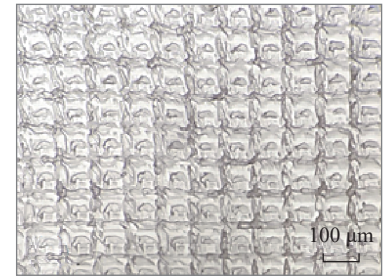


图10 改性前后的PET薄膜红外吸收峰对比

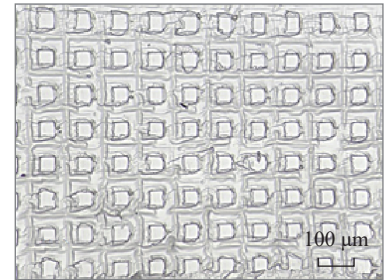
Fig.10 Comparison of infrared absorption peaks of PET films before and after modification

3.2 润湿性能测试

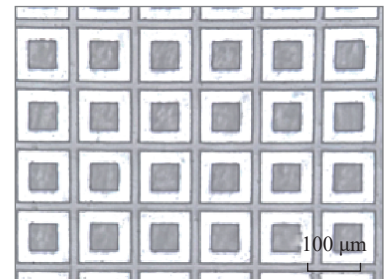
测量样品表面的静态接触角时, 选择DI水进行滴定, 设定液滴大小为5 μL。为了避免单次测量出现较大误差, 在每个样品表面选择多个位置进行测量, 以确保测量数据具有可靠性。仿跳虫表皮柔性微结构薄膜与非结构区PDMS表面接触角测量图如图13所示; 测量结果如表2所示, 仿跳虫表皮柔性微结构薄膜表



(a) 变形



(b) 破裂



(c) 完整

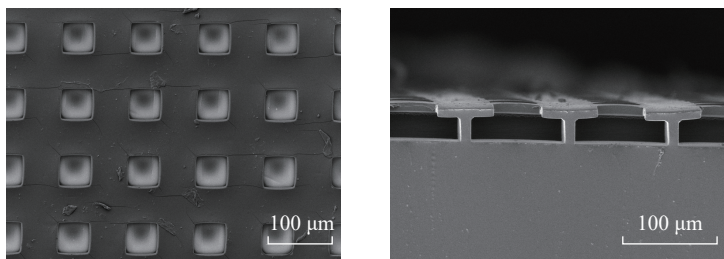
图11 仿跳虫表皮柔性微结构显微镜观测图

Fig.11 Microscopic view of flexible microstructure of imitating springtail epidermis

面静态接触角的均值为125.2°, 柔性薄膜非结构区PDMS表面接触角为94.4°, 说明仿跳虫表皮柔性微结构薄膜具备良好的疏水性。

3.3 液滴弹跳行为观测

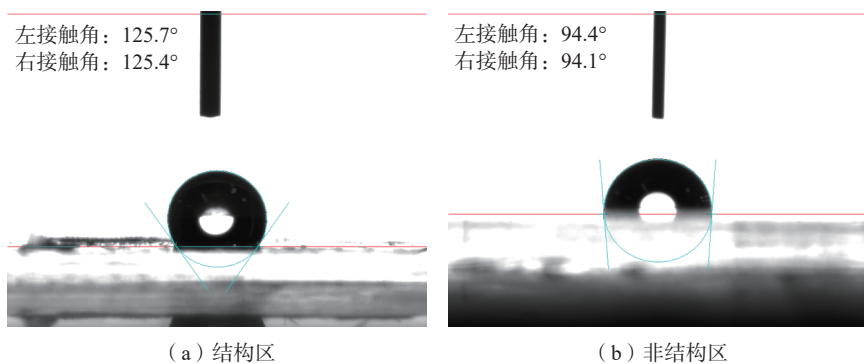
为准确观测仿跳虫表皮柔性微结构薄膜表面的液滴弹跳行为, 本文利用高速相机对液滴弹跳行为进行观测。试验液滴为10 μL, 其理论水滴直径为2.67 mm, 液滴的下落高度为15 cm。仿跳虫柔性薄膜微结构区液滴弹跳行为观测结果如图14所示。当液滴从给定高度落下并接触到微结构表面时, 首先会由于惯性力的作用在样品表面发生铺展;



(a) 俯视图 (b) 侧视图

图 12 仿跳虫表皮柔性微结构扫描电子显微镜观测图

Fig.12 SEM of flexible microstructure of imitating springtail epidermis



(a) 结构区 (b) 非结构区

图 13 静态接触角测量图

Fig.13 Measurement diagram of static contact angle

扩张到最大形状后受表面张力的反作用产生回缩；当液滴与微结构表面的接触面积达到最小（即回缩极限时），液滴开始恢复，直到恢复球冠状，停留并黏附于样品表面。图 15 为仿跳虫柔性薄膜非结构区 PDMS 表面液滴弹跳行为观测结果，当水滴以一定速度撞击到 PDMS 薄膜表面时，同样因惯性力的作用开始铺展，铺展到最大程度后开始回缩，表 3 为液滴弹跳过程中各个状态点的直径测量值，液滴回缩行为与结构区相比差异较大，液滴恢复后 PDMS 非结构区表现出比结构区差的疏水性能。

4 结论

本文设计凸模板并对微结构进行“复型转移”。针对在复型和转移过程中分别存在的结构变形、结构破裂两个关键难题进行柔性微结构保型调控。

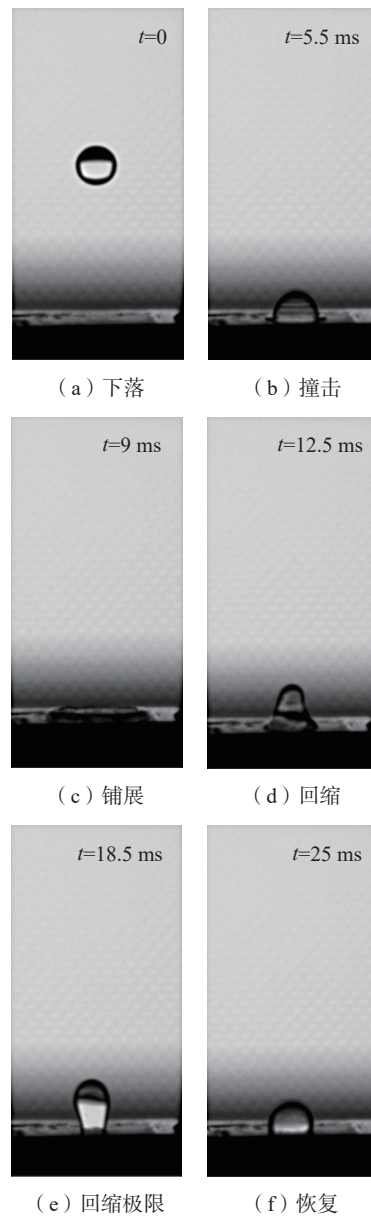
(1) 基于“软刀硬模”完成柔性

表 2 结构区与非结构区静态接触角测量值
Table 2 Measurement of static contact angle of structural zone and unstructural zone

| 采样点 | 结构区接触角/(°) | 非结构区接触角/(°) |
|-----|------------|-------------|
| 1 | 126.7 | 94.5 |
| 2 | 124.9 | 93.2 |
| 3 | 124.5 | 97.5 |
| 4 | 124.4 | 94.4 |
| 5 | 125.4 | 92.4 |
| 平均值 | 125.2 | 94.4 |

微结构的变形控制，在保证硅片表面多余 PDMS 层的移除效率、减小硅片模板微结构受损的前提下，微结构成功复型，极大减少了结构变形。

(2) 基于异质材料改性完成柔性微结构的破裂控制，通过分析转移层与结构层同质材料之间的界面黏附，得出结构破裂原因，采用异于 PDMS 的 PET 薄膜材料进行表面改



(a) 下落 (b) 撞击

(c) 铺展 (d) 回缩

(e) 回缩极限 (f) 恢复

图 14 仿跳虫柔性薄膜微结构区液滴弹跳行为观测结果

Fig.14 Observation of droplet bounce behavior in microstructure area of imitating springtail epidermis

性以控制转移层与结构层之间的黏附，微结构成功转移，实现了仿跳虫表皮柔性微结构的破裂控制。

(3) 试验证明，本文所设计的复型和转移工艺方法成功解决了结构变形和结构破裂的难题，能够制备出符合设计要求的仿跳虫表皮柔性微结构薄膜，最终制备出的仿跳虫表皮柔性微结构薄膜具有良好的疏水性

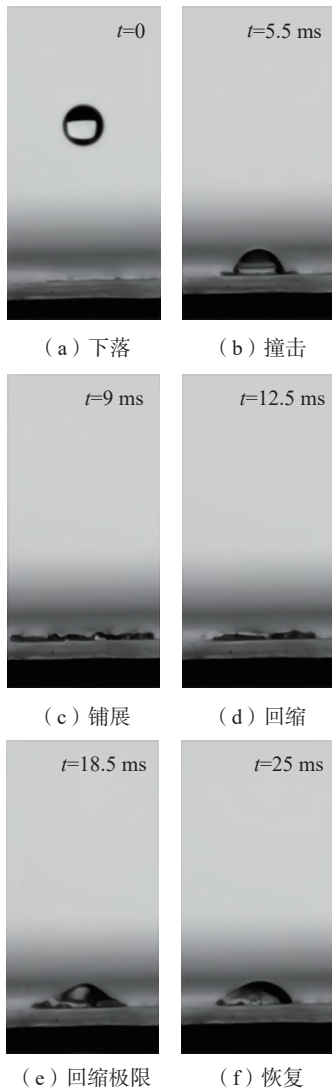


图 15 仿跳虫柔性薄膜非结构区 PDMS 表面液滴弹跳行为观测结果

Fig.15 Observation of droplet bounce behavior in unstructured area of imitating springtail epidermis

表 3 液滴弹跳过程中各状态点直径测量值
Table 3 Diameter measurements of each state point in the process of droplet bouncing
mm

| 状态 | 结构区水滴直径 | 非结构区水滴直径 |
|------|---------|----------|
| 下落 | 2.67 | 2.67 |
| 撞击 | 2.87 | 3.26 |
| 铺展 | 6.44 | 9.07 |
| 回缩 | 3.31 | 6.71 |
| 回缩极限 | 1.72 | 5.92 |
| 恢复 | 2.76 | 4.84 |

能,其结构完整性及工艺适用性得到大幅度提升,期望为后续复杂凹形结构的制备提供技术支撑。

参考文献

- [1] HENSEL R, NEINHUIS C, WERNER C. The springtail cuticle as a blueprint for omniphobic surfaces[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(2): 323–341.
- [2] HELBIG R, NICKERL J, NEINHUIS C, et al. Smart skin patterns protect springtails[J]. *PLoS One*, 2011, 6(9): e25105.
- [3] HENSEL R, HELBIG R, ALAND S, et al. Wetting resistance at its topographical limit: The benefit of mushroom and serif T structures[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2013, 29(4): 1100–1112.
- [4] WANG L Z, TIAN Z, JIANG G C, et al. Spontaneous dewetting transitions of droplets during icing & melting cycle[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 378.
- [5] MA W, LI Y, CHAO C Y H, et al. Solar-assisted icephobicity down to $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ with superhydrophobic selective surfaces[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(3): 100384.
- [6] DONG S L, ZHANG X L, LI Q, et al. Springtail-inspired superamphiphobic ordered nanohoodoo arrays with quasi-doubly reentrant structures[J]. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 2020, 16(19): 2000779.
- [7] YIN Q, GUO Q, WANG Z L, et al. 3D-printed bioinspired cassie-Baxter wettability for controllable micro-droplet manipulation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(1): 1979–1987.
- [8] ROMANO J M, HELBIG R, FRAGGELAKIS F, et al. Springtail-inspired triangular laser-induced surface textures on metals using MHz ultrashort pulses[J]. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2019, 7(2): 024504.
- [9] KANG S M, CHOI J S. Selective liquid sliding surfaces with springtail-inspired concave mushroom-like micropillar arrays[J]. *Small*, 2020, 16(3): 1904612.
- [10] YANG X L, CUI M M, ZHOU J S, et al. Surface fluorination modification and anti-biofouling study of a pHEMA hydrogel[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2021, 4(1): 523–532.
- [11] ARMANI D, LIU C, ALURU N. Reconfigurable fluid circuits by PDMS elastomer micromachining[C]//Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems

(Cat. No.99CH36291). Orlando: IEEE, 1999: 222–227.

[12] AKISANYAAR, FLECK N A. Brittle fracture of adhesive joints[J]. *International Journal of Fracture*, 1992, 58(2): 93–114.

[13] GHAFFAR S H, FAN M Z, MCVICAR B. Interfacial properties with bonding and failure mechanisms of wheat straw node and internode[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 99: 102–112.

[14] ZHANG X, WANG J L. Controllable interfacial adhesion behaviors of polymer-on-polymer surfaces during fused deposition modeling 3D printing process[J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 739: 136959.

[15] MA J C, ZHENG Z Y, HOQUE M J, et al. A lipid-inspired highly adhesive interface for durable superhydrophobicity in wet environments and stable jumping droplet condensation[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(3): 4251–4262.

[16] 王磊, 孙全吉, 赵文博, 等. 高性能纤维的表面改性及其与橡胶基体的界面粘合性能研究进展[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(7): 545–550.

WANG Lei, SUN Quanji, ZHAO Wenbo, et al. Research progress of surface modification of high-performance fiber and its interfacial adhesion property with rubber matrix[J]. *China Rubber Industry*, 2020, 67(7): 545–550.

[17] HASSAN A, KIM Y, RYU S, et al. Divisions in a fibrillar adhesive increase the adhesive strength[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(49): 59478–59486.

[18] 王晓倩, 李洋, 胡晓亮, 等. BDNPF/A 增塑 PET 推进剂界面组分迁移及影响[J]. *固体火箭技术*, 2022, 45(3): 392–398.

WANG Xiaoqian, LI Yang, HU Xiaoliang, et al. Interfacial component migration and influence factors of PET propellant plasticized with BDNPF/A[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(3): 392–398.

[19] WANG D, BAI T, CHENG W L, et al. Surface modification of bamboo fibers to enhance the interfacial adhesion of epoxy resin-based composites prepared by resin transfer molding[J]. *Polymers*, 2019, 11(12): 2107.

[20] OVLAQUE P, BAYART M, ELKOUN S, et al. Milkweed floss-reinforced thermoplastics: Interfacial adhesion and related mechanical properties[J]. *Composite Interfaces*, 2022, 29(2): 215–235.

[21] 解林坤, 杜官本, 代沁伶, 等. 低温氧等离子体对 PET 薄膜的表面改性研究[J].

塑料工业, 2011, 39(10): 44-47.

XIE Linkun, DU Guanben, DAI Qinling, et al. Study on surface modification of PET film by low temperature oxygen plasma treatment[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(10): 44-47.

[22] SLUYSMANS D, STODDART J

F. The burgeoning of mechanically interlocked molecules in chemistry[J]. Trends in Chemistry, 2019, 1(2): 185-197.

[23] NI Z Y, LU Q F, XU Y S, et al. Intensity simulation of a Fourier transform infrared spectrometer[J]. Sensors (Basel, Switzerland),

2020, 20(7): 1833.

通讯作者: 何洋, 教授, 博士, 研究方向为仿生微纳结构、飞机防除冰技术。
苑伟政, 教授, 博士, 研究方向为微机电系统及微纳制造。

Replication, Transfer and Fabrication of Flexible Microstructural Arrays Inspired From Springtail Cuticle

ZHANG Kun^{1,2}, XU Xiaohui^{1,2}, LI Xinran^{1,2}, GUO Zeqi³, LÜ Xianglian^{1,2}, HE Yang^{1,2},
YUAN Weizheng^{1,2}

(1. Key Lab of Micro/Nano Systems for Aerospace, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Key Lab of MEMS/NEMS, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Xidian University, Xi'an 710126, China)

[ABSTRACT] The unique hydrophobic and pressure-resistant concave angle microstructure of the springtail cuticle provides a new research idea for aircraft anti-icing and drag reduction with super hydrophobic air film of underwater vehicles. In this paper, a flexible hydrophobic microstructure was prepared by taking the springtail cuticle as the biomimetic object. The preparation method of “duplicating transfer” was put forward. In order to solve the structural deformation and structural rupture problems in the process of duplicating and transferring, the technology of “soft knife and hard mold” and “interface adhesion control” were respectively improved. Based on the idea of “combination of soft and hard”, the scraping method of “soft knife and hard mold” was adopted to avoid the structural deformation caused by residual PDMS layer. The PDMS transfer layer was replaced by PET film and surface modification was carried out to avoid excessive adhesion between the structure layer and the homogeneous material of the transfer layer. The surface contact angle of PET film was reduced from 70° to 15° by oxygen plasma modification. The arithmetic mean deviation R_a of surface contour increased from 112.15 nm to 199.74 nm, which increased by 78.1%. Oxygen/carbon (O/C) ratio increased from 0.35 to 0.45. The contact angle of the microstructure surface is 125.2°, and the droplet retraction is obvious in the bouncing behavior. The method of “duplicating transfer” successfully realized the fabrication of flexible microstructure, and the method of “soft knife and hard mold” significantly reduced the microstructure deformation, and the structure was successfully duplicating and the deformation was effectively controlled. After surface modification, the surface activity of PET film is increased, the structure is successfully transferred and the rupture is reduced. The results show that the flexible microstructures have good hydrophobic properties.

Keywords: Springtail; Bionics; Flexible microstructure; Polydimethylsiloxane (PDMS); Polyethylene terephthalate (PET); Adhesion control

(责编 晓月)