

一种高表面适应性仿生吸盘的设计

丁建宁^{1,2}, 殷子健¹, 胡宏伟¹, 程广贵¹, 张忠强¹

(1. 江苏大学 智能柔性机械电子研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 扬州大学 机械学院, 江苏 扬州 225127)

摘要: 针对现有吸盘在粗糙表面以及小结构物体难附着、易脱落问题, 仿生水蛭吸盘的凹坑结构, 设计一种多褶皱且底部带有小孔阵列的新型吸盘 RSS, 通过建模和模拟仿真研究吸盘附着机理, 实验探究了不同褶皱数量和阵列孔尺寸对吸盘在粗糙表面的垂直吸附性能以及水平抗剪切力性能的影响规律。结果表明: 在 -40 kPa 真空度下, 多褶皱结构可显著提升 RSS 吸盘的垂直吸附性能, 最大提升约为 87.9%, 孔径大小对垂直吸附性能影响不大。在接触 150 目和 800 目砂纸时, 孔径 0.5 mm 和 1 mm 对双褶皱和三褶皱吸盘水平抗剪切力影响较小, 当孔径增加到 1.5 mm 时, 水平抗剪切力值出现最大 40.5% 的增幅。当砂纸目数达到 1 600 目时, 水平抗剪切力值随着孔径的增大而增大。对于单褶皱吸盘, 小孔孔径对水平抗剪切性能无明显影响。

关键词: 仿生吸盘; 多褶皱; 小孔阵列; 建模和模拟仿真

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3774-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240171

A bionic sucker design with high surface adaptability

DING Jian-ning^{1,2}, YIN Zi-jian¹, HU Hong-wei¹, CHENG Guang-gui¹, ZHANG Zhong-qiang¹

(1. Institute of Intelligent Flexible Mechatronics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Aims to address the challenge of poor adhesion and easy detachment of existing suction cups on rough surfaces and small structural objects. Inspired by the structure of leech suckers, we designed a novel type of sucker, RSS (rough-small-sucker), which has multiple folds and a bottom array of small pits. Modeling and simulation are employed to investigate the adhesion mechanism, while experiments explore the impact of fold quantity and pit size on vertical adhesion and horizontal shear resistance of the sucker on rough surfaces. We study the attachment mechanism of the sucker by modeling and simulation, and experimentally investigate the effects of different fold numbers and hole sizes on the vertical adhesion performance and horizontal shear resistance of the sucker on rough surfaces. Results show that the multi-folded structure significantly improves RSS's vertical adhesion (up to 87.9% improvement under -40 kPa vacuum). Pit size has minimal effect on vertical adhesion. For various sandpaper grits, small pit sizes (0.5

收稿日期: 2024-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(92248301); 国家自然科学基金项目(52275191); 江苏省 333 工程项目(2021 年).

作者简介: 丁建宁(1966-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 柔性机械电子设计与制造. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn

通信作者: 程广贵(1979-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 软体机器人设计. E-mail: ggcheng@ujs.edu.cn

mm and 1 mm) have minimal impact on horizontal shear resistance of double-folded and triple-folded suckers. However, with a hole size of 1.5 mm, there is a 40.5% increase in horizontal shear resistance. The horizontal shear resistance increases with pit size for 1 600-grit sandpaper. Pit size has no significant effect on horizontal shear resistance for single-folded suction cups.

Key words: bionic sucker; multi-folded; array of small pit; modeling and simulation

0 引言

自从 1654 年葛利克用“马德堡半球实验”向人们验证了大气压强的存在,人们对真空技术的探索研究便一直延续至今,其中真空吸盘结构凭借其结构简单,吸附力可靠,适应性强等优点在工业以及民用领域得到了广泛的应用^[1-4]。基于吸盘出色的机械性能,装载了吸盘的机械臂末端执行器可在转运^[5]、码垛^[6,7]、分拣^[8]等领域高效完成自动化作业,并最大限度保护易破损物体的完整性。目前,吸盘的种类从结构上可以分为波纹吸盘、平型吸盘、深型吸盘^[9]、椭圆型吸盘^[10]、海绵型吸盘^[11]等,这些吸盘因为其不同的结构具有不同的适用场景,如波纹吸盘由于不同的高度补偿,因此,对于不平表面具有良好的适应性;平型吸盘尤其适合平整的吸附表面,可凭借强吸附力实现稳定抓取;椭圆型吸盘可以搬送其他吸盘不能吸附的狭长物体,等等。不过,尽管吸盘种类繁多,但对于粗糙表面却吸附效果不理想。并且对结构小巧的物体,当物体最小尺寸小于吸盘直径时,吸盘无法形成密闭的内腔,造成吸附失败。

为了探究吸盘的吸附机理,提升吸盘的吸附性能,国内外研究学者从吸盘的物理特性和流场分布等方面出发,通过模仿自然界中广泛存在的生物吸盘结构等方式,对真空吸附展开了广泛而深入的研究。李鑫等^[8]通过喷嘴以吸盘切向方向吹入空气形成旋转气流,形成杯状负压分布并产生吸附力,有效吸附表面粗糙的物体;Sandoval 等^[12]通过研究观察喉盘鱼的吸盘结构,发现其吸盘表面具有密集的圆柱形纤维且吸盘边缘有狭缝,进而研发出在空气和水中都能保持良好吸附力的仿生吸盘;北京航空航天大学 and 哈佛大学^[13]合作研发的仿生鲫鱼吸盘可以通过吸盘内部碳纤维小刺产生相当大的抗剪切力,实现类似鲫鱼的“搭便车”能力;韩国成均馆大学研究团队^[14]通过进一步观察章鱼吸盘结构,使用柔性薄膜将吸盘之间的真空腔体分离,使得吸盘阵列单个吸盘漏

气只影响到漏气的该吸盘,提高了吸盘吸附的稳定性^[14]。

为实现自适应吸附的能力,吸盘与被接触物体之间必须形成封闭的空腔,两者之间的间隙必须很小,以减少泄漏^[15],而具有柔软材料特性和自适应性的硅胶可以在受到挤压压力时很容易地适应凹凸不平的表面。为此本文设计出一种多褶皱吸盘,同时与仿生学相结合,以水蛭后吸盘为原型,通过仿生水蛭后吸盘的孔腔结构^[16],在多褶皱吸盘的底部增加了小孔阵列,进一步增大了吸附力。根据所设计的吸盘可吸附粗糙表面和微小结构的特性,本文将这种组合仿生吸盘取名为 RSS 吸盘(Rough-small-sucker),并对此进行了仿真分析以及吸盘垂直和水平拉伸实验,探究不同结构对吸盘力学性能的影响。

1 RSS 吸盘的设计与仿真

1.1 RSS 吸盘的结构设计

相对于吸附平整的表面,在面对粗糙表面的时候,吸盘需要更大的压应力将自身压在粗糙表面,从而减小彼此之间的空隙,更加贴合接触表面形状,形成密闭空腔。面对结构小巧的物体,现有的吸盘只能减小吸盘的工作表面尺寸,使其可以完全与物体表面接触,但这同时会造成吸附力急剧下降,同样的吸盘在吸附较大物体时显得力不从心,因此,现有吸盘的普遍适用性较差。

为此,本文以加大吸盘工作表面应力,在不减小吸盘吸附力的前提下仍然可以吸附小巧物体为目的,设计出一种独特的多褶皱吸盘结构,该结构在吸附时褶皱间彼此挤压,形成更大的压应力。同时每层褶皱都可认为是一个吸盘,实现了吸盘的层层叠加效应。内层直径较小的吸盘可以吸附结构微小的物体,外层直径在吸附较大物体时能够提供可靠的吸附力。

此外,水蛭后吸盘的表面存在大量的凹坑结构,且这些凹坑结构被证实吸附时将产生许多次级吸盘的效果^[16],本文将多褶皱结构和水蛭的

后吸盘结构相结合,设计出 RSS 吸盘。虽然水蛭吸盘结构都属于微纳米层次,但是微观尺寸的结构加工成本昂贵,制造困难,容易受到环境影响造成结构损坏,且目前关于宏观尺寸上褶皱数量和小孔结构对于吸盘的力学性能并没有学者研究过,因此,本文设计了 9 种不同褶皱数量和小孔直径的吸盘,分别为一个褶皱、两个褶皱、三个褶皱,相邻褶皱彼此长度差为 1.6 mm。为避免小孔结构对褶皱结构的干涉,本文设计 3 种不同尺寸的圆形凹坑,直径分别为 0.5、1.0、1.5 mm,小孔沿着吸盘极轴方向均匀排布两层,第一层 18 个,第二层 20 个,深度均为 0.4 mm。吸盘未变形前底部外圈直径为 23 mm,所有的吸盘均由 Ecoflex-30 制作而成。具体的吸盘构造尺寸如表 1 所示,图 1 为吸盘三维模型图。

1.2 吸盘吸附变形过程仿真分析

为更好地设计吸附性能良好的 RSS 吸盘结构,探究吸盘的吸附机理,本文采用 Ansys Workbench 有限元分析软件对吸盘的力学性能进行分析。由于吸盘为对称结构,为提高计算效率,仅对吸盘的四分之一部分进行仿真,在吸盘的两个切

表 1 不同 RSS 吸盘尺寸参数

Table 1 Different RSS suckers size parameters

吸盘编号	褶皱数量/个	小孔直径/mm
①	1	0.5
②	1	1.0
③	1	1.5
④	2	0.5
⑤	2	1.0
⑥	2	1.5
⑦	3	0.5
⑧	3	1.0
⑨	3	1.5

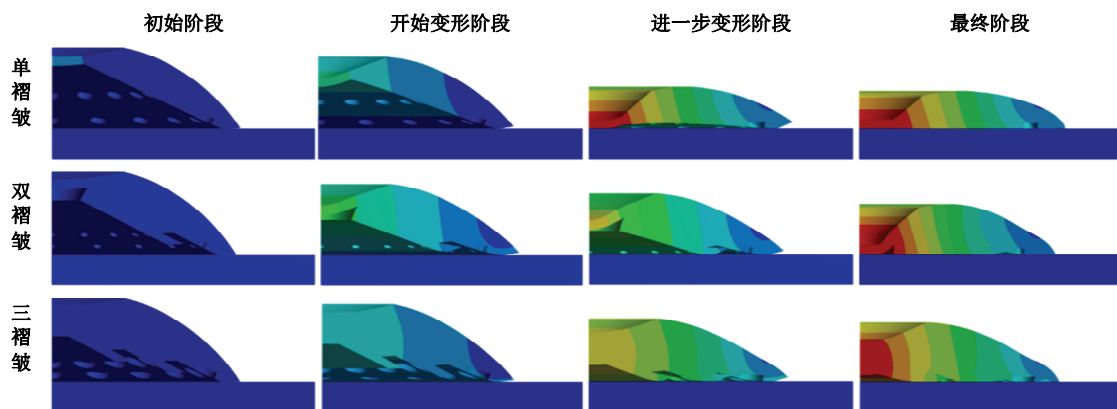


图 2 3 种 RSS 吸盘吸附变形过程仿真图

Fig. 2 Simulation of the adsorption deformation process of three RSS suckers

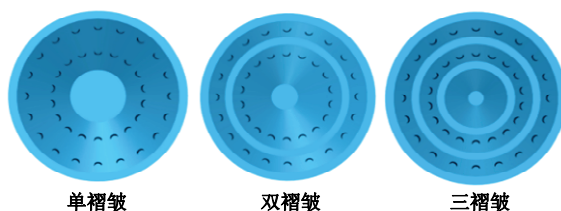


图 1 不同结构参数的 RSS 吸盘三维模型

Fig. 1 3D models of RSS suckers with different structural parameters

除面设置对称约束。吸盘的材料为 Ecoflex 30, 选取超弹性体中的 Yeoh 3 作为其本构模型^[12, 17], 其中材料参数^[18] $C_{10} \approx 1.00 \times 10^{-1}$ MPa, $C_{20} \approx 1.20 \times 10^{-2}$ MPa, $C_{30} \approx 4.96 \times 10^{-5}$ MPa; 接触平面设计为边长 25 mm、高度 2 mm 的正方形, 用刚性材料制作。在吸盘的上表面施加 40 kPa 向下的法向压力。

真空吸盘吸附过程为吸盘边缘先与被接触物体表面形成密封空腔, 通过真空发生器抽出空腔内的气体分子使空腔内气体压强小于空腔外压强, 依靠压力差将物体吸附^[19], 因此, 吸盘内部残存气体压强值将直接影响吸盘吸附力大小。在不考虑接触物体变化的情况下, 吸盘内部密封空腔的形成情况完全依靠吸盘边缘唇边是否与接触表面形成良好的密封^[20], 本文对比了单褶皱吸盘和多褶皱吸盘的吸附变形过程, 结果如图 2 所示。可将吸盘的变形过程划分为 4 个阶段, 分别为初始阶段、开始变形阶段、进一步变形阶段和最终阶段。

本文发现随着空腔内气体压强的逐渐减小, 3 种 RSS 吸盘受到大气压强的压力后均迅速向下变形, 直到完全贴附在接触平面上。不同的是双褶皱吸盘和三褶皱吸盘在最外层唇边初始阶段与

接触平面接触后,内层褶皱随着真空度的逐渐增大也逐渐与接触平面相接触,形成了多层密封,密封的次数取决于褶皱的数量,并且在吸盘下表面大部分与接触平面贴附后,褶皱与褶皱间形成的空腔也逐渐被变形压缩,进一步排出了吸盘内控空腔残存的气体。

1.3 吸盘 Mises 应力仿真分析

在仿真分析中,最大 Mises 应力的发生区域并不在吸盘与接触平面相接触的工作平面上,而工作平面的应力大小会对吸盘吸附力和抗剪切力产生较大的影响,因此,本文将 Mises 应力的探究设置于吸盘的工作表面而不是吸盘整体。从图 3

可以看出,在褶皱数量为一时,小孔直径的变化不会对工作表面最大 Mises 应力产生太大影响;褶皱数量为二或者三时,孔径为 0.5 mm 和 1 mm 产生的最大 Mises 应力变化不大,但是当孔径为 1.5 mm 时,最大 Mises 应力发生了较为明显的增加,最大增幅约为 188.1%,且最大 Mises 应力发生的区域位于内侧小孔偏向于吸盘外侧部分。在孔径大小不变的情况下,本文发现褶皱数量的变化在孔径为 0.5 mm 和 1 mm 时最大 Mises 应力相似,在孔径为 1.5 mm 的时候,双褶皱和三褶皱比单褶皱吸盘最大 Mises 应力大幅度增加,最大增幅约为 189.6%。

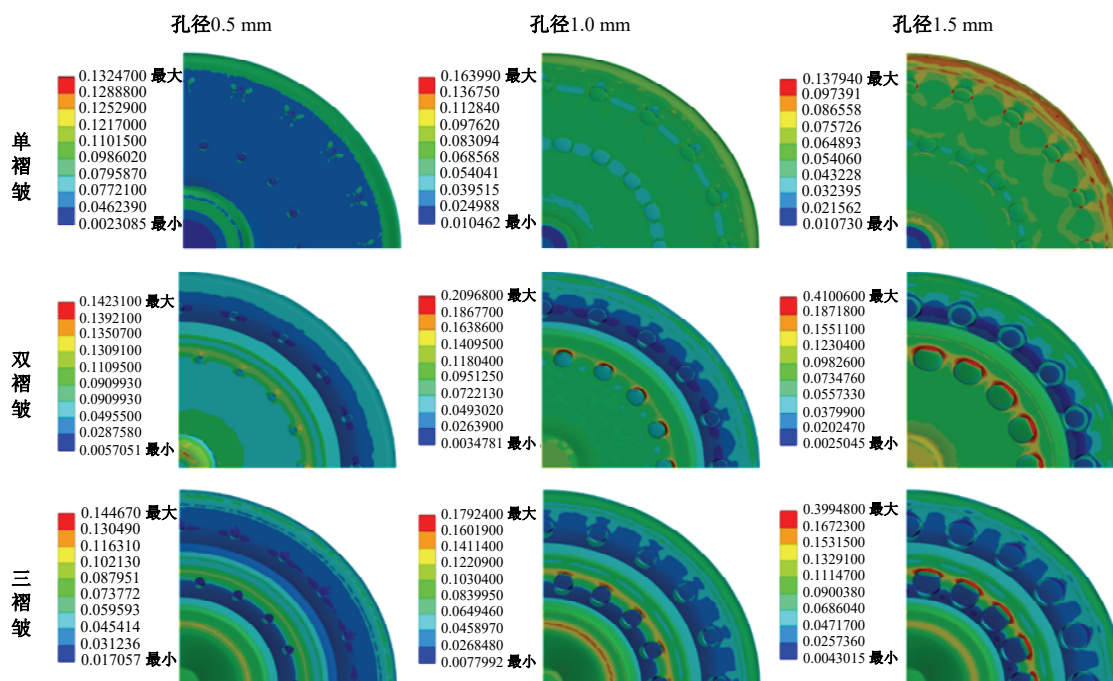


图 3 9 种不同仿生吸盘 Mises 应力仿真图

Fig. 3 Mises stress simulation of nine different bionic suckers

2 吸盘制备及性能测试

2.1 吸盘的制备

为进一步观察 RSS 吸盘在实际中的垂直拉伸力以及水平抗剪切力的性能,本文采用硅胶浇注的方式来制备吸盘(见图 4)。为了避免脱模时造成吸盘的结构损伤,本文将其模具设计为上中下 3 层,用铜棒将 3 层模具组合起来,脱模时逐层脱模。将 Ecoflex 30 的 AB 硅胶经电子天平称量后以 1:1 等比例混合搅拌均匀,放入真空箱 (DZF-6030A) 后 3~5 min 脱出内部气泡,取出脱气后的硅胶通过针筒小心将其注入 3D 打印机 (CR-2020) 打印的模具内,常温静置 3~4 h 后取

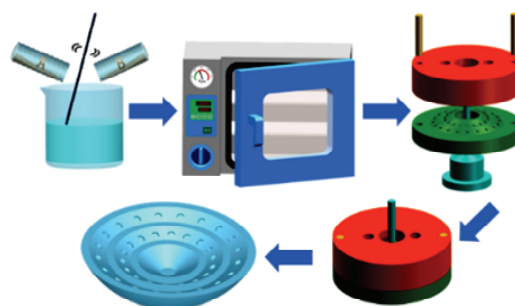


图 4 RSS 吸盘制造流程

Fig. 4 Manufacturing process of RSS suckers

出凝固完成的吸盘。

2.2 吸盘垂直吸附性能实验

吸盘的垂直方向吸附性能实验在万能拉伸测

试机 OT-6203S 上进行(见图 5(a)),拉伸测试之前首先调节升降器开关将吸盘轻轻贴附在拉伸机的底部不锈钢圆盘平台上,接着通过真空发生器(CV-20)对吸盘内部形成的空腔抽取真空,吸盘瞬间吸附在平台上。等待真空减压阀(IRV10-C01G)压力表示数稳定在 (-40 ± 0.5) kPa 时,微调拉伸机高度使得拉伸机力传感器示数稳定于 (0 ± 0.01) N。将拉伸机以 200 mm/min 的速率匀速向上拉升吸盘,同时将“力-时间”数据传输至电脑端,记录下最高点处拉伸力作为最大吸附力,每组吸盘重复上述实验 4 次,取平均值作为该结构 RSS 吸盘的吸附力值,实验测得的数据如表 2 所示。

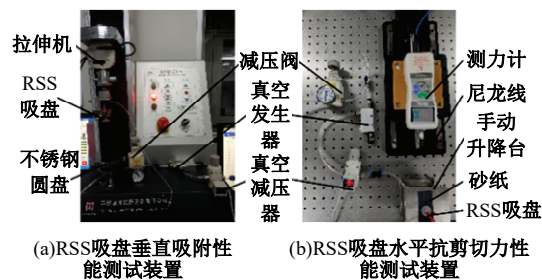


图 5 RSS 吸盘性能测试装置

Fig. 5 RSS suckers performance test device

表 2 真空度-40 kPa RSS 吸盘垂直吸附力值

孔径大小/0.5 mm	褶皱结构		
	单褶皱	双褶皱	三褶皱
0.5	2.447 800	3.593 775	3.568 600
1.0	2.345 475	3.986 526	4.051 725
1.5	2.324 800	4.226 000	4.370 275

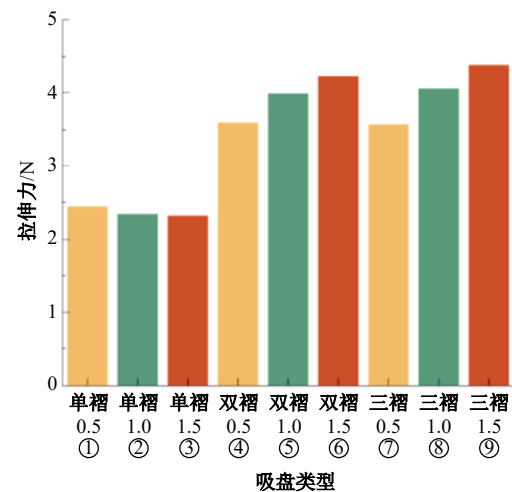
2.3 吸盘水平抗剪切力性能实验

吸盘的水平抗剪切力性能实验在水平位移测力装置上进行,如图 5(b)所示。实验开始前在升降台上平台表面用双面胶粘贴相应目数的砂纸,将吸盘轻附在砂纸上,打开真空发生器,吸盘即吸附在砂纸表面。随着吸盘内部空腔的气体压强逐渐减小,真空减压阀数显表的示数随之逐渐变大,待示数稳定后,调节真空减压阀上部旋钮,使示数位于 (-40 ± 0.5) kPa。将安装在丝杠滑块上的测力计(DS2-50N)末端使用尼龙线与吸盘根部相连,通过 PC 端控制测力计以 3 mm/s 的速率匀速远离吸盘,记录下每次吸盘脱附时测力计显示的最大值,每组实验重复 4 次并取平均值作为该组 RSS 吸盘的水平抗剪切力。实验结果如表 3 以及图 6(b)所示。

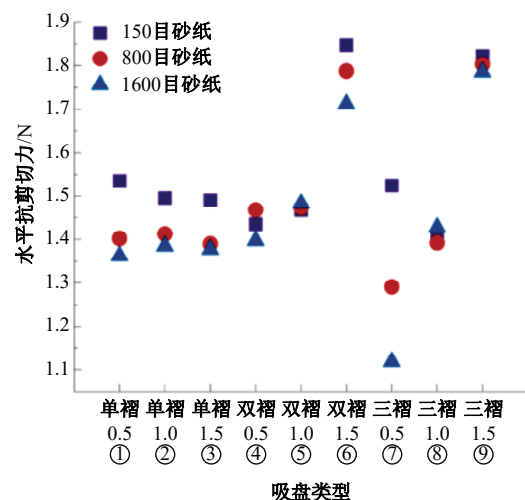
表 3 真空度-40 kPa RSS 吸盘水平抗剪切力值

Table 3 Horizontal shear resistance of RSS suckers under -40 kPa

吸盘编号	砂纸数目		
	150 目	800 目	1 600 目
①	1.535 0	1.402 5	1.362 5
②	1.495 0	1.412 5	1.385 0
③	1.490 0	1.390 0	1.377 5
④	1.435 0	1.467 5	1.397 5
⑤	1.467 5	1.472 5	1.482 5
⑥	1.847 5	1.787 5	1.712 5
⑦	1.525 0	1.290 0	1.117 5
⑧	1.407 5	1.392 5	1.427 5
⑨	1.822 5	1.802 5	1.785 0



(a)RSS 吸盘结构与垂直吸附力关系



(b)RSS 吸盘结构与水平抗剪切力关系

图 6 RSS 吸盘结构与垂直吸附力以及水平抗剪切力关系

Fig. 6 RSS suckers structure in relation to vertical suction force and horizontal shear resistance

3 结果与讨论

3.1 吸盘垂直吸附性能测试结果分析

为更加清晰地表示不同结构对 RSS 吸盘吸附力的影响,将所获得的数据绘制成图 6(a)所示的柱状图,且为便于描述,将吸盘从①~⑨依次编号:单褶皱吸盘孔径由 0.5~1.5 mm 依次编号为①②③,双褶皱和三褶皱吸盘按照此规则依次进行顺序编号。

横向分析表 2 中的实验结果数据可得,在-40 kPa 真空度情况下,多褶皱吸盘相对于单褶皱吸盘垂直方向的吸附力有明显增大:在 0.5 mm 的孔径下,对比吸盘①和吸盘④,吸附力增大约 46.8%;在 1 mm 的孔径下,对比吸盘②和吸盘⑥,吸附力增大约 72.7%;在 1.5 mm 的孔径下,对比吸盘③和吸盘⑨,吸附力增大约 87.9%。不过随着褶皱数量的继续增加,吸附力并没有出现明显变化,双褶皱吸盘和三褶皱吸盘在同样孔径大小的情况下吸附力差值最小仅为 0.7%,最大为 3.4%,且这种差异随着孔径的变大而变大。

纵向分析表 2 数据可得,在褶皱数量为一时,孔径的大小不会对吸附力产生较大影响,3 种孔径大小的 RSS 吸盘吸附力基本相等。在褶皱数量为二或三时,吸附力随着孔径的增大而增大,但似乎增长的趋势逐渐放缓,⑤号吸盘相比④号吸盘吸附力同比增大约 10.9%,⑥号相对⑤号同比增大约 6.0%;⑧号相对⑦号同比增大约 13.5%,⑨号相对⑧号同比增大约 7.8%。

3.2 吸盘垂直吸附性能结果原因讨论

首先,横向分析表 2 所得的实验结论:多褶皱吸盘相对于单褶皱吸盘吸附力有明显增大,因为多褶皱吸盘相对于单褶皱吸盘会进行额外的多次吸附,每层褶皱是在上一层褶皱的吸附下进一步完成吸附,每层褶皱都可认为形成了比上一层褶皱尺寸更小的一个吸盘,达到吸盘的“套娃”效果。不仅如此,下一层褶皱会在吸附时进一步排出上层褶皱吸附时空腔内残存的空气,使得吸盘内部的真空度更加贴近于-40 kPa。由图 3 可以看出,尽管在孔径为 1 mm 时,单褶皱相比双褶皱或者三褶皱吸盘的最大 Mises 应力相似,但是多褶皱吸盘的“套娃”效果远远拉开了这种差距,应力的叠加使得吸盘更加紧密地贴合在被吸附表面,根据吸盘脱附机理分析^[21],这些褶皱在吸盘剥离时同样起到了阻碍吸盘向内收缩滑动以及内

腔与外界大气相通的作用。对于褶皱数量增加但是吸附力却没有明显变化的现象,出现的原因因为三褶皱吸盘最内层褶皱的底部直径仅为约 8 mm,产生的附加吸附力比较微小,因此,双褶皱吸盘和三褶皱的吸盘总体吸附力并没有明显差距。

接着,纵向分析表格所得的实验结论:随着真空度的增大,RSS 吸盘逐渐贴附在接触平面上,吸盘底部阵列的小孔随之发生变形,形成许多次级微小吸盘。受多褶皱吸盘的特殊结构影响,内部褶皱在吸盘贴附时会由于上层褶皱变形从而向吸盘法线方向施加更大的压力,内部小孔会更加紧密地贴附在接触平面上,因此,多褶皱吸盘吸附力的大小将随着孔径的增大而增大,而单层褶皱吸盘由于只有一层褶皱,小孔的存在不会过多增加吸附力大小。

3.3 吸盘水平抗剪切力性能测试结果分析

首先,横向分析表 3,大部分吸盘水平抗剪切力值大小会随着砂纸目数的增加而变小,其中降幅最大的是⑦号吸盘(三褶皱孔径 0.5 mm),约为 36.5%。少部分 RSS 吸盘,如④⑤⑧号(双褶皱孔径 0.5 mm,双褶皱孔径 1 mm,三褶皱孔径 1 mm)水平抗剪切力值波动不明显。

通过纵向比较发现,在目数不变的情况下,单褶皱吸盘水平抗剪切力值不会随着小孔孔径的变化有明显变化,差值最大约为 8.07%;在 150 目和 800 目的砂纸上,双褶皱吸盘小孔直径在 0.5 mm 和 1 mm 时测得水平抗剪切力值相似,不过当孔径增加到 1.5 mm 时,水平抗剪切力值有了较为明显的提升,最大增幅约为 40.5%;当砂纸目数上升到 1 600 目时,水平抗剪切力值随着孔径的增大而增大。三褶皱吸盘呈现出的水平抗剪切力值与孔径大小和砂纸目数的关系和双褶皱吸盘近似,这里不再赘述。

3.4 水平抗剪切力性能结果原因讨论

在工作真空度和接触平面不变的情况下,RSS 吸盘水平抗剪切力主要由吸盘工作表面 Mises 应力决定,Mises 应力可以为吸盘提供更大的摩擦力来抵抗绳拉带来的水平切向力。横向分析得到的实验结论基本和仿真得到的结论相符,大的 Mises 应力可以带来更大的水平抗剪切力。对于纵向分析得出的实验结论,砂纸的目数增加会导致吸盘与砂纸的摩擦因数下降,因此,大部分

吸盘水平抗剪切力随之下降。不过对于少数吸盘没有太多受到砂纸目数影响的情况,这是由于虽然砂纸变得光滑,但吸盘的垂直吸附力也逐渐增加,且由于吸盘存在一定高度,因此,水平抗剪切力必然会对吸盘产生一个翻转力矩,这是不可避免的,在力臂(吸盘变形后的高度)一定的情况下,吸附力的增加会导致翻转力矩变大,而翻转力矩过大同样会导致吸盘脱附。翻转力矩的增加和砂纸目数的增加两者效果互相间形成了抵消,从而导致部分吸盘水平抗剪切力值波动并不明显。

4 RSS吸盘吸附力对比与测试

4.1 RSS吸盘与普通吸盘对比吸附实验

如图7所示,普通标准吸盘在吸附表面粗糙度足够大的物体时,由于吸盘与接触表面的Mises应力不足以将变形后的吸盘与接触表面形成一个密闭的吸盘内部空腔,所以会造成吸附失败。而⑨号RSS吸盘凭借其工作表面较大的Mises应力和多褶皱多层密封,可以很好地与粗糙表面接触,大幅减少了空腔内气体的泄漏,并且仿生水蛭后吸盘带来的多孔腔结构也提供了额外的吸附力,综合因素让RSS吸盘可以成功地提起粗糙或者表面不平整的物体。此外,⑨号RSS吸盘除有Mises应力大的优势外,“套娃”式结构在应对即使比吸盘直径小的物体时也可以轻松吸附。内层褶皱可以在不减小整体吸附力的情况下与微小结构物体表面形成密封的内腔,而普通吸盘由于没有褶皱结构,当物体尺寸小于吸盘工作表面直径时,密封的内腔无法形成从而吸附失败。

通过上述实验可知,⑨号吸盘(三褶皱,孔径1.5 mm)具有最佳吸附力学性能,为了验证⑨号

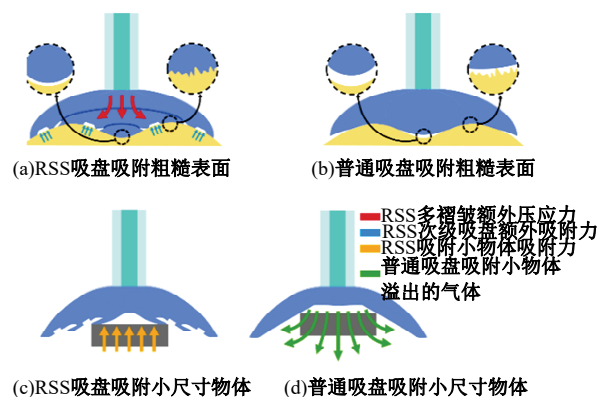
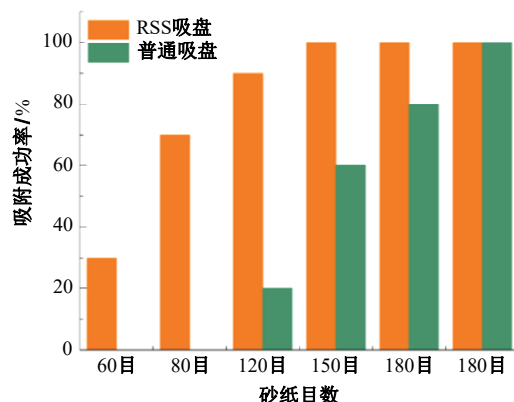


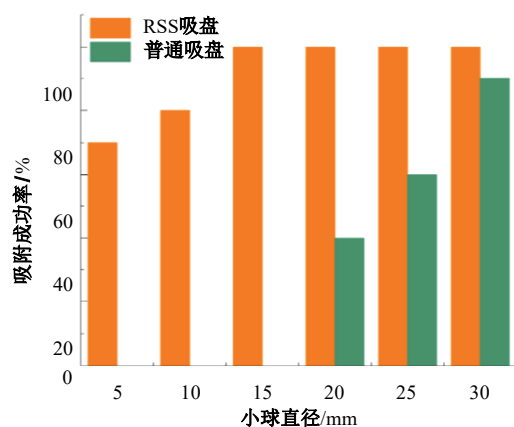
图7 RSS吸盘与普通吸盘吸附粗糙表面和小尺寸物体
Fig. 7 RSS suckers and normal suckers for rough surfaces and small sized objects

吸盘相比普通吸盘(单褶皱,无小孔)具有出色的吸附性,本文进行了吸附对比实验。分别选取了6张不同目数砂纸以及6种不同直径小球作为被吸附物体,吸附对比实验通过 Universal Robot 机械臂来进行,实验开始前将吸盘通过机械臂末端夹持器抓紧其软管处固定的夹具,随后打开真空发生器,机械臂带着吸盘向被接触物体接近,在吸附物体4 s后提升机械臂末端夹持器高度,接触物体随之提起或失败。为了减少偶然性,使结果更贴近真实吸附情况,只有当吸盘吸附起物体后,保持10 s且左右摆动吸盘而未掉落,才算吸附成功。每组吸附10次,计算出吸附成功率,并将吸附结果绘制成图8。

从图8(a)可以看出,普通吸盘无法吸附80目砂纸,而RSS吸盘在吸附80目砂纸时仍然有70%的成功率。当目数逐渐增加时,普通吸盘吸附成功率均低于RSS吸盘,直到目数增加至320目时两者成功率才均达到100%。从图8(b)可以看出,RSS吸盘在吸附小尺寸物体时性能明显优



(a) RSS吸盘和普通吸盘吸附粗糙表面成功率柱状对比图



(b) RSS吸盘和普通吸盘吸附小球成功率柱状对比图

图8 RSS吸盘与普通吸盘吸附对比实验

Fig. 8 Comparison of RSS suckers and normal suckers adsorption experiment

于普通吸盘。普通吸盘和 RSS 吸盘的底部工作表面直径均为 23 mm,当物体尺寸开始小于这个数值时,RSS 吸盘凭借“套娃”效果仍然可以保持高吸附成功率,而普通吸盘则开始出现明显的下降趋势,在吸附直径 15 mm 及其以下尺寸的小球时已经完全失去吸附效果。

4.2 RSS 吸盘吸附力测试

为预测不同粗糙度下吸盘吸附力和施加真空度之间的关系,分别将 80、200、1 000、3 000 目砂纸以及光滑玻璃表面依次放置于垂直吸附性能测试装置的不锈钢圆盘上表面,从 -10 kPa 开始每隔 -10 kPa 施加真空度,直至 -80 kPa。依次测量每组气压下,该粗糙表面的吸附力值,为了避免偶然性,减小实验误差,每组数据反复测试 5 次,取平均值作为该组吸附力值。将测试所得结果绘制成图 9 所示的曲线。

从图 9 可以看出,吸附力与接触表面间的粗糙度成反比,与施加的真空度成正比,且随着粗糙度的逐渐变小,吸附力关于真空度的增长速率随之增加。当施加真空度为 -80 kPa 时,⑨号 RSS 吸盘不同接触表面最大吸附力依次为:玻璃表面 7.456 5 N,3 000 目砂纸 6.200 0 N,1 000 目砂纸 4.633 2 N,200 目砂纸 2.554 4 N,80 目砂纸 1.336 5 N。

为进一步展示 RSS 吸盘在实际生产和生活中的作用,选取了如下实验吸附对象进行测试:80 目砂纸,Arduino Uno 控制板,SN74LS74N 小芯片,EDZP1-6 马达泵,如图 10 所示,这些物体具有表面粗糙,小结构,小曲率等特点。结果证明,

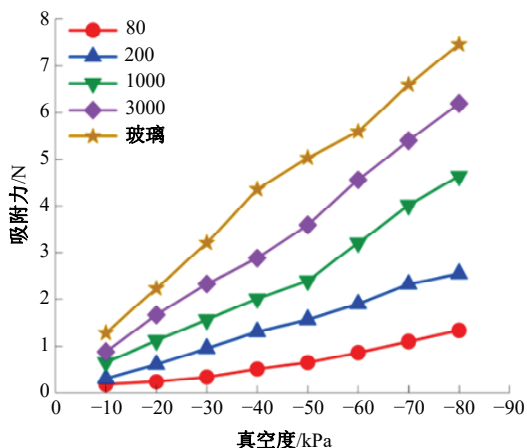


图 9 不同粗糙度下最佳吸盘结构吸附力与真空度的关系图

Fig. 9 Plot of adsorption force of best sucker structure versus vacuum level at different roughness levels

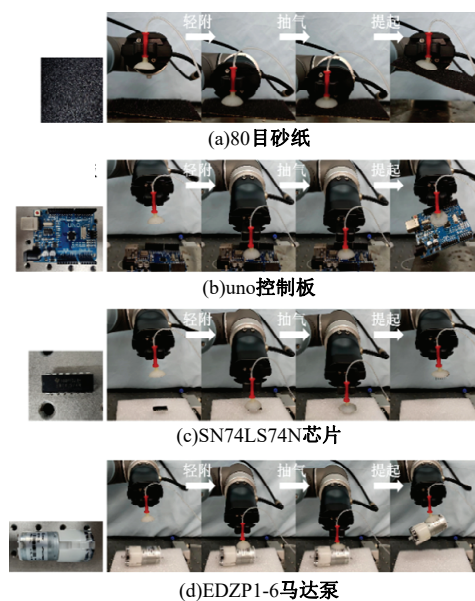


图 10 RSS 吸盘吸附性能测试实验

Fig. 10 RSS suckers adsorption performance test experiment

RSS 吸盘可以轻松面对绝大多数普通吸盘难吸附易脱落的物体,具有广阔的应用前景。

5 结束语

本文设计了一种多褶皱结构和模仿水蛭后吸盘结构的仿生组合吸盘(RSS 吸盘),多褶皱结构增大了吸盘工作表面的 Mises 应力且实现了吸盘的层层叠加效应,即使被吸附物体小于吸盘整体尺寸,RSS 吸盘依然可以成功吸附。对于单褶皱吸盘,小孔的孔径变化对其垂直吸附性能和水平抗剪切性能影响很小。对于双褶皱和三褶皱吸盘,垂直吸附力值随着孔径的增大而增大;水平抗剪切性能同时受到接触表面粗糙度和孔径大小影响,在 150 目和 800 目砂纸上,0.5 mm 和 1 mm 孔径两者水平抗剪切性能相似,1.5 mm 孔径下水平抗剪切性能最大提高约 40.5%。在 1 600 目砂纸上,水平抗剪切力值随着孔径的增大而增大。综上所述得出以下实验结论:RSS 吸盘具有工作表面 Mises 应力大,密封性好,吸附力强,抗剪切性优良等优点,使吸盘具有更好的吸附性能。

参考文献:

- [1] Su M, Xie R, Qiu Y, et al. Design, mobility analysis and gait planning of a leech-like soft crawling robot with stretching and bending deformation[J]. Journal of Bionic Engineering, 2022, 20(1): 69-80.

- [2] Ito K, Yoshizawa K. URARAKA VI: multi-legged robot with suckers to climb walls and pipes[J]. *Artificial Life and Robotics*, 2022, 27(4): 834-841.
- [3] Zhang H, Tokhi O, Zhang J, et al. A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2007, 34(2): 150-160.
- [4] Huang R, Zhang X, Li W, et al. Suction cups-inspired adhesive patch with tailorable patterns for versatile wound healing[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2021, 8(17): e2100201.
- [5] Xie Z, Domel A G, An N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping[J]. *Soft Robot*, 2020, 7(5): 639-648.
- [6] Gao R, Zhang W, Wang G, et al. Experimental research on motion analysis model and trajectory planning of GLT palletizing robot[J]. *Buildings*, 2023, 13(4): 966-984.
- [7] 毕玉超, 高勇, 丛鑫, 等. ABB 拆垛机器人辅助吸盘装置的设计[J]. *烟草科技*, 2019, 52(5): 105-108.
Bi Yu-chao, Gao Yong, Cong Xin, et al. Design of auxiliary sucker device for ABB unstacking robot[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2019, 52(5): 105-108.
- [8] Li X, Zhong W, Kagawa T, et al. Development of a pneumatic sucker for gripping workpieces with rough surface[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 639-646.
- [9] 聂俊峰, 王涛, 许英南, 等. 柔性吸盘真空吸附性能试验[J]. *液压与气动*, 2020(5): 131-137.
Nie Jun-feng, Wang Tao, Xu Ying-nan, et al. Vacuum adsorption test of flexible suction cup[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2020 (5): 131-137.
- [10] Wang W, Xu J Y, Wang Y, et al. The finite element analysis of concrete pipe pile vacuum sucker[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1820(1): 012123.
- [11] Chen Y C, Yang H. Octopus-inspired assembly of nanosucker arrays for dry/wet adhesion[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(6): 5332-5338.
- [12] Sandoval J A, Jadhav S, Quan H, et al. Reversible adhesion to rough surfaces both in and out of water, inspired by the clingfish suction disc[J]. *Bioinspir Biomim*, 2019, 14(6): 066016.
- [13] Wang Y, Yang X, Chen Y, et al. A biorobotic adhesive disc for underwater hitchhiking inspired by the remora suckerfish[J]. *Sci Robot*, 2017, 2(10): eaan8072.
- [14] Kim J M, Coutinho A, Park Y J, et al. Octopus-inspired suction cup array for versatile grasping operations[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(5): 2962-2969.
- [15] Yue T Q, Bloomfield G H, Rossiter J. Shape-conformable suction cups with controllable adaptive suction on complex surfaces[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(11): 7735-7742.
- [16] 丛茜, 徐金, 史孝杰, 等. 仿生凹坑型吸盘设计与试验[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2024, 54(4): 1144-1152.
Cong Qian, Xu Jin, Shi Xiao-jie, et al. Bionic pit design and experiment of the sucker[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(4): 1144-1152.
- [17] Zhang Y, Liu Y, Sui X, et al. A mechatronics-embedded pneumatic soft modular robot powered via single air tube[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2260.
- [18] Marechal L, Balland P, Lindenroth L, et al. Toward a common framework and database of materials for soft robotics[J]. *Soft Robot*, 2021, 8(3): 284-297.
- [19] Tiwari A, Persson B N J. Physics of suction cups[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(46): 9482-9499.
- [20] Hudoklin J, Seo S, Kang M, et al. Vacuum suction cup modeling for evaluation of sealing and real-time simulation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 3616-3623.
- [21] 熙鹏, 丛茜, 叶绍波, 等. 真空吸盘的仿生设计与吸附性能分析[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2025, 55(1): 382-391.
Xi Peng, Cong Qian, Ye Shao-Bo, et al. Bionic design and adsorption performance analysis of vacuum sucker[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2025, 55(1): 382-391.