

基于鲫鱼吸附原理的仿生吸盘设计与性能分析

陈 龙 云 忠* 蒋 毅

(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 针对现有仿生吸盘主要应用于干燥环境的现状,对鲫鱼吸盘吸附机理进行探究,运用仿生学原理和负压吸附原理,设计出一种椭圆状外形的仿生吸盘,并分别从吸附能力、摩擦抗阻能力和抗倾覆力矩能力三方面阐述各影响因素对吸盘吸附性能的影响。最后建立有限元仿真模型,利用 ANSYS 软件对仿生吸盘实体模型进行有限元分析,分析结果表明对鲫鱼吸盘的吸附性能起主要影响作用的是吸盘密封边的密封效果,而该密封效果与材料特性和接触面所受压应力直接相关。

关键词: 鲫鱼吸盘; 仿生学; 负压吸附; 有限元分析

中图分类号: TH128 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.06.016

引 言

随着仿生技术的发展,自然界许多具有优良吸附特性的物种成为仿生吸盘领域的研究对象,例如壁虎、章鱼、水蛭、龙虱、树蛙等^[1-2]。对这些生物吸盘进行仿生研究的侧重点各有不同,有的仅在吸盘样式上进行仿生研究,有的则在吸盘布局方面进行仿生研究,也有的在吸附力产生机理上进行仿生研究^[3]。在研究过程中已经发现许多生物吸盘特性能够提高吸附能力,例如龙虱吸盘的多吸盘吸附方式可以提高吸盘的抗倾覆能力^[4],章鱼吸盘内部的褶皱有利于提高吸盘的密封性能^[3]等。人们早已注意到鲫鱼在水下优越的吸附性能,鲫鱼吸盘内部隔板将整个吸盘分隔成多个腔室,有利于提高吸盘的抗倾覆力矩,而内部隔板的褶皱有利于提高吸盘的密封性能^[5]。为充分发挥仿生优势,研究出能与鲫鱼吸盘相媲美的仿生吸盘,需要对鲫鱼吸盘的吸附机理进行深入研究。本文利用负压吸附原理对鲫鱼吸盘进行仿生设计,从吸盘骨架、皮肉及结构方面入手,设计了一种椭圆状外形的仿生吸盘;并对吸盘的吸附性能进行理论分析,最后通过有限元仿真验证设计方案的合理性。

1 仿鲫鱼吸附系统设计

本文利用负压吸附原理对仿生鲫鱼吸盘进行初步设计,负压产生方式为贴合式,基本设计思路如下。

(1)驱动方式选择。在传统吸盘吸附过程中,贴合力的形成主要依靠真空发生器或者磁力作用两种方式^[5]。真空发生器体积庞大,而较小的电磁力就可以使吸盘达到贴合要求,并且结构简单、占用空间小,因此选用电磁力作为吸盘贴合驱动。采用电机与丝杆螺母机构驱动骨架分离的方式使吸盘形成负压型腔。

(2)吸盘骨架形式设计。根据鲫鱼吸附过程,与鲫鱼吸盘型腔形成有关的吸附运动主要依靠嵌于作为密封边的隔板内的鳍棘运动。然而鲫鱼骨架复杂,依靠鳍棘运动方式难以实现,因此对鲫鱼吸盘的吸附运动进行简化。根据负压形成原理可知,鲫鱼吸附的条件都是在隔板的严格密封下形成负压型腔,因此假定鲫鱼吸盘隔板内骨架固定,使吸盘型腔内骨架运动,拉出负压型腔。若想使吸盘脱离宿主,通过电机反转,让驱动骨架反向运动,使其与固定骨架贴合,从而消除负压型腔,使得吸盘灵活脱离宿主。

(3)吸盘皮肉形式设计。吸盘结构以每对隔板为单位。隔板与宿主接触面作为吸盘密封边,采用密封性能好的橡胶材料制作。型腔内填充材料选用弹性较好的橡胶材料。密封边表皮需制作出大量的微小突起以抵抗摩擦^[6]。

收稿日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(31670999)

第一作者: 男,1994年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: yunzhong@csu.edu.cn

(4) 吸盘结构形式设计。根据鲫鱼吸盘的结构形式, 将仿生吸盘结构形式设计为: 整体俯视呈椭圆形, 更有利于空间布置, 前端比后端稍尖; 内部左右均衡布置 20 对左右隔板; 盘边向外倾斜, 盘内隔板向前端倾斜, 隔板间隔型腔内填充肌肉^[7]。型腔形成后的吸盘效果图如图 1 所示。

根据以上原则设计出的仿生吸盘总体原理图如图 2 所示。

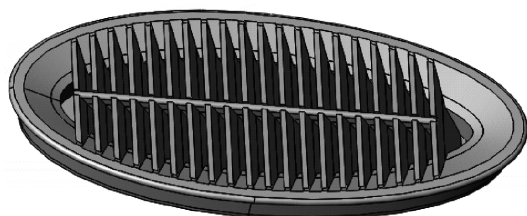


图 1 吸盘效果图

Fig. 1 Suction cup 3D model

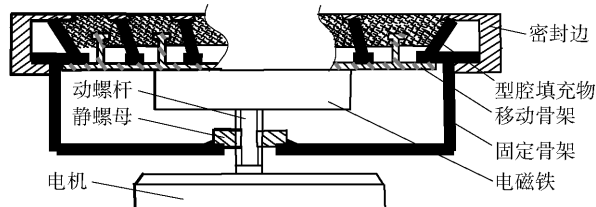


图 2 吸盘总体原理图

Fig. 2 Diagram of the suction cup

2 仿生吸附吸盘性能分析

2.1 吸附力影响因素

根据真空吸盘吸附力计算原理 $F = \Delta p S$ (Δp 为压强差, S 为吸盘接触面积), 具体分析吸盘吸附力在吸附面积和真空度共同作用下的吸附能力, 先不考虑吸盘纵向隔板作用, 并作如下假设: ①吸盘吸附密封性能良好; ②吸盘吸附于宿主底部, 且宿主底部为一平面; ③航行器质心和浮心位于同一竖直线上, 可将航行器看作与吸盘紧密相连的一个质点; ④吸盘纵向排列型腔有 n 个, 即共有 $n+1$ 条密封边。

吸盘吸附受力图如图 3 所示。

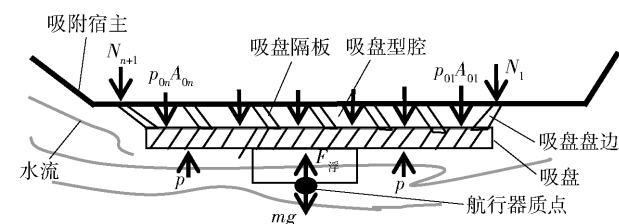


图 3 吸盘受力分析

Fig. 3 Force analysis of the suction cup

因此吸盘吸附力可以按式(1)计算

$$F_{\text{吸}} = \sum_{k=1}^n N_k = pA + F_{\text{浮}} - mg - \sum_{k=1}^n p_{0k} A_{0k} \quad (1)$$

式中 A 为吸盘与宿主接触时, 型腔与宿主接触面积及各密封边与宿主接触面积的总和; A_{0k} ($k=1, 2, \dots, n$) 为各型腔与宿主接触面积; p_{0k} 为各型腔表面压强。易知当 p 和 p_{0k} 一定时, A 越大, 吸附力越大。假设各密封边与宿主接触面积分别为 A_k ($k=1, 2, \dots, n+1$), 因此有

$$A = \sum_{k=1}^n A_{0k} + \sum_{k=1}^{n+1} A_k \quad (2)$$

由于各型腔内的真空度 $\Delta p_k = p - p_{0k}$, 吸盘吸附力可改为与真空度有关的公式

$$F_{\text{吸}} = p \sum_{k=1}^{n+1} A_k + \sum_{k=1}^n \Delta p_k A_{0k} + F_{\text{浮}} \quad (3)$$

由于始终都有 $p > \Delta p_k$, 因此当 A 一定时, $\sum_{k=1}^{n+1} A_k$ 越大吸附力越大。在各个密封边的接触面上的平均压强为

$$\bar{p} = F_{\text{吸}} / \sum_{k=1}^{n+1} A_k \quad (4)$$

当 $\sum_{k=1}^{n+1} A_k$ 过大时, 在密封边接触面上产生的压强就越小, 因此密封效果差, 各接触面接触不紧密, 将会存在内压过大即真空度过小的许多小型腔, 以致吸附力小。

除了平均压强外, 影响阻流通道的变形分布均匀性的其他一些因素也直接关系到密封性能的好坏, 如材料物理特性、接触表面状态、外界环境等。

2.2 抵抗水阻能力

由于刚毛制作困难, 本文选用不光滑表面代替刚毛产生抵抗水阻的静摩擦力。不光滑表面在微观表面存在一定量的波峰波谷, 吸盘表面制造出的突起物与接触表面的波峰波谷相互嵌入, 将会形成一种机械互锁。在吸附力作用下, 小凸起在柔性材料的变形作用下卡入接触表面波谷, 从而吸盘被锁死。所以要使在接触表面上的吸盘移动, 需要抵消吸盘表面凸起脱离吸附表面波谷所需要的应变力^[8]。因此吸盘抵抗水阻的能力与材料、突起大小和吸附表面状态息息相关。想要在突起情况下达到抵抗水阻的目的, 那么在吸盘大小和压应力一定的情况下, 吸盘的数量越多则抵抗水阻的性能越好, 即大的吸盘接触面有利于抵抗大的水阻力。

2.3 抵抗倾覆力矩能力

为研究抵抗倾覆力矩能力,先假设吸盘没有内部隔板,吸盘内外压差为 Δp 。建立如图 4 所示的受力图,图中建立坐标系,其中 Y 轴垂直于纸面。

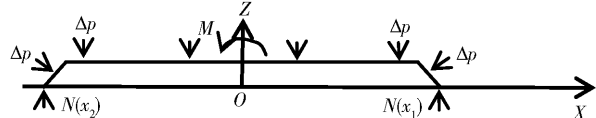


图 4 吸盘受倾覆力矩简图

Fig. 4 Moment diagram of the suction cup

由于吸盘俯视平面为一椭圆面,假设吸盘的椭圆密封边为一条符合 $y = D(x)$ 方程的椭圆线,椭圆边线所受接触力沿 X 轴符合 $N(x)$ 分布,图 4 中所示 $N(x_1)$ 和 $N(x_2)$ 分别为吸盘前后两端点所受的接触力,而其他任意 $N(x_k)$ 表示 $x = x_k$ 的所有接触点所受接触力的总和。根据力矩 M 平衡公式有

$$M = \iint \Delta p x \cos \theta dS - \int N(x) x dx \quad (5)$$

式中 θ 为吸盘上表面单元与 XOY 面所成角度,因此有

$$\cos \theta dS = dx dy \quad (6)$$

所以有

$$M = \iint \Delta p x dx dy - \int N(x) x dx = \int \Delta p S(x) x dx - \int N(x) x dx \quad (7)$$

式中 $S(x) = \int dy = y_{1x} - y_{2x}$, $S(x_k)$ 的物理意义为 $x = x_k$ 直线被吸盘边线包围部分的线段长。由此可知,吸盘抵抗倾覆力矩的能力不但与接触应力 $N(x)$ 有关,还与真空度以及边线 $y = D(x)$ 的形状有关。当吸盘形状一定时,所受倾覆力矩越大,对接触应力 $N(x)$ 分布的影响越严重。在吸盘受到倾覆力矩时,合适的形状有利于改善接触应力 $N(x)$ 的分布。仿生吸盘内有许多隔板将整个吸盘分成很多个型腔块,而且每一个型腔内负压并不一致。因此式(7)可写为

$$M = \sum_{k=1}^n \int \Delta p_k S_k(x) x dx - \int N(x) x dx \quad (8)$$

由式(8)可知,吸盘受到倾覆力矩时,可以通过改变各腔室的负压分布保持良好的密封效果。

3 仿生吸盘有限元仿真分析

3.1 有限元模型建立

本文仿真软件选用 ANSYS,在 ANSYS Workbench 平台的 Static Structure 模块中进行仿真。建

立仿真模型并进行有限元分析步骤如下。

(1) 仿真几何模型。可以将吸盘简化为一部分为受接触变形的密封边部分,另一部分为支撑部分。因此仿真几何模型包括密封边部分、支撑部分和宿主板 3 个部分,宿主板用于模仿吸附对象。3 个部分在三维软件中经装配后输出为 Parasolid 格式,然后导入 Static Structure 模块。图 5 为导入 ANSYS 后吸盘的有限元几何模型。

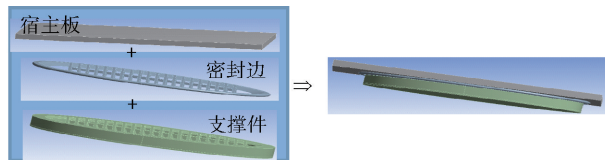


图 5 吸盘仿真几何模型

Fig. 5 Finite element model of the suction cup

(2) 材料设置和网格划分。吸盘整体材料选用通用的超弹性材料,即橡胶类的 Mooney-Rivlin 模型,这个模型可以模仿的材质有聚氨酯橡胶、硅橡胶和丁腈橡胶等。在网格划分中,由于本文主要观察吸盘底面的状态,因此需要对吸盘内表面网格进行细化处理。吸盘网格类型选用四面体网格,网格大小设置为 0.5 mm。宿主板和压力板都是辅助分析模型,网格设置可以大一些,选用 5 mm 的六面体网格。图 6 所示为吸盘的网格划分模型。

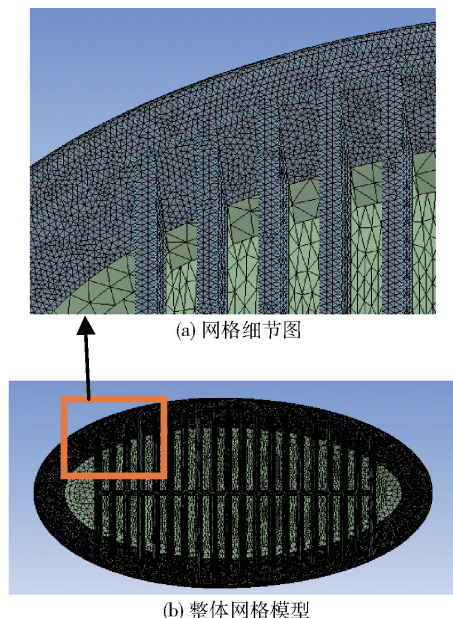


图 6 吸盘网格模型

Fig. 6 Grid model of the suction cup

(3) 载荷与约束设置。对仿生吸盘进行贴附分析和稳固吸附分析。贴附分析通过对压力板施加预加载荷力,观察分析吸盘的压力分布。稳固

吸附分析是对吸盘稳固吸附后,分析吸盘抵抗外加载荷的能力。

3.2 贴附分析

加载载荷共分为 3 步,每步时间为 1 s,加载载荷为 20 N。设加载载荷均匀分布于吸盘支撑件上表面^[9]。

3.2.1 几种不同密封边形状对贴附性能的影响

本文设计 3 种不同的密封边截面形状,分别称为 a 型、b 型和 c 型,如图 7 所示。



图 7 3 种不同密封边截面图

Fig. 7 Sectional drawings of three different sealing edges

图 8(a)、(b)、(c) 分别为 a 型密封边型吸盘、b 型密封边型吸盘和 c 型密封边型吸盘贴合受压垂向压应力云图,正值表示受拉,负值表示受压。如图所示,a 型密封边压应力集中分布于密封边上,并构成了多个完整回路,说明 a 型密封边能达到很好的密封效果;b 型边沿没有连续受压区,两端型腔密封开口很大,密封性很差,中间隔板区域的压力分布均匀,不存在压力集中的线性密封闭环,隔板形成的型腔周边密封性能不理想;c 型吸盘不但边沿密封性能不好,而且内部型腔无一能形成压应力封闭环路,即各个型腔没有一个能够密封。由此可见,直角边的 a 型密封边有着更好的密封性能。因此,改变密封边截面形状对改进吸盘性能具有重要的意义。

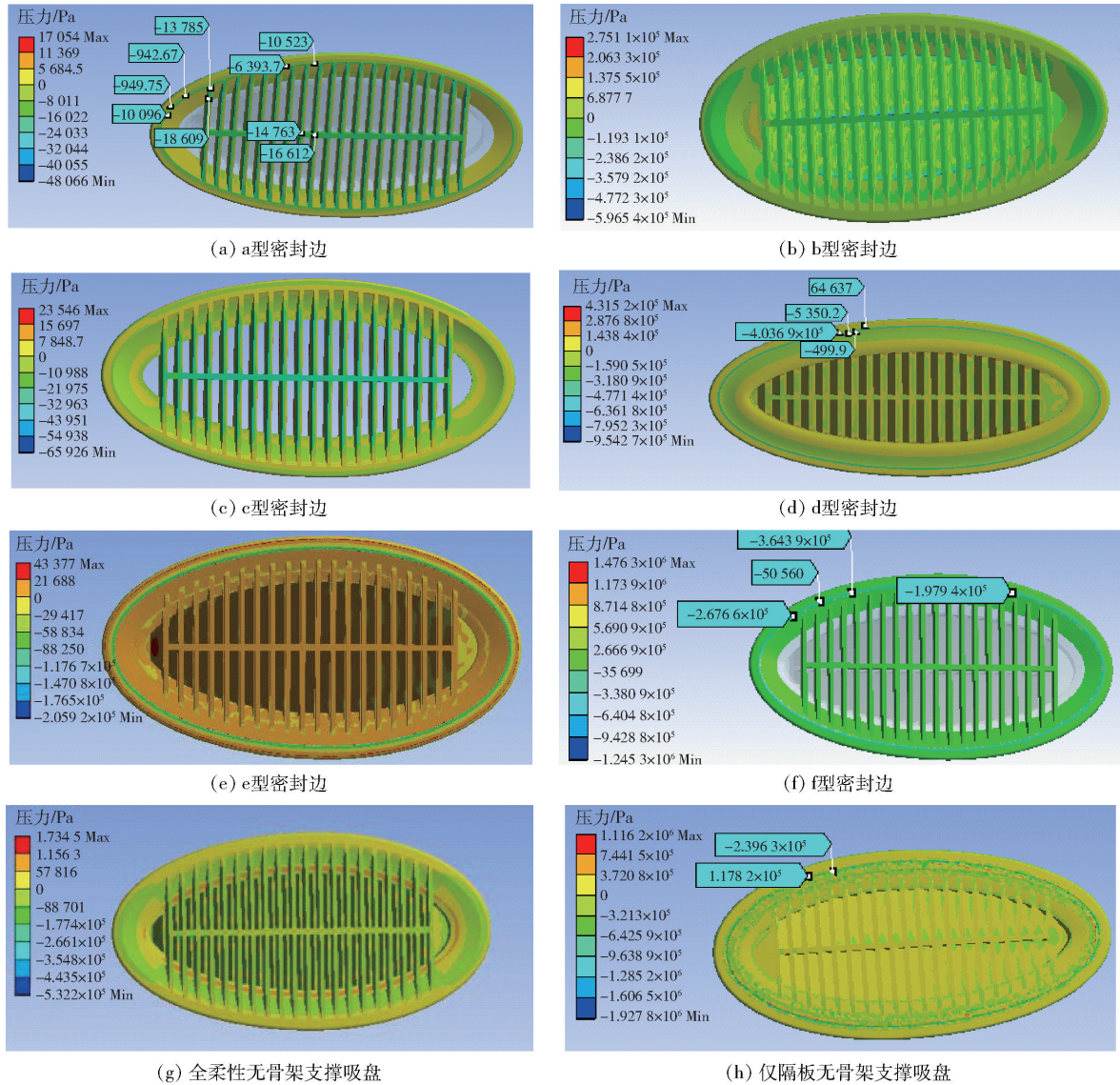


图 8 贴附性能分析压力云图

Fig. 8 Stress nephograms of attachment performance analysis

3.2.2 吸盘隔板对吸盘边沿贴附性能的影响

本次仿真选用 a 型密封边型吸盘作为研究对象,此外还包括内无隔板密封边(d 型密封边),内有隔板密封边且隔板顶面和边沿顶面有 1 mm 距离密封边(e 型密封边),以及内有隔板密封边且隔板顶面和边沿顶面有 0.5 mm 距离密封边(f 型密封边)。当吸盘表面受到贴合作用力后,压力云图分别如图 8(d)、(e)、(f) 所示。由 d 型密封边的压力云图(图 8(d))可见,吸盘边沿由于内部没有隔板限制,整个边沿向外扩展,同时受压区域的宽度也得到扩展,但在整个受压区的外部集中。对吸盘边缘受压圈附近取点,从显示的压力值可以发现压力下降很快,而且受压圈上的压力值很高,因此吸盘边沿在无隔板作用时受压区更宽,压力集中更明显。由 e 型吸盘和 f 型吸盘的压力云图(图 8(e)、(f))可以看到吸盘边沿的受压区宽度变窄,对 f 型吸盘压力云图中受压最大的压力圈区域取点观察,发现压力下降很慢,峰值压力变小。因此可以说明隔板的向内拉紧作用使吸盘边沿压力环路区域收拢,但同时压应力在区域内有均布趋势。本次仿真对仿生吸盘设计的启示是:当边沿未达到很好的贴附效果时,可以考虑使吸盘隔板保持一定的展向扩展能力,比如在隔板上设计沿展向的褶皱。

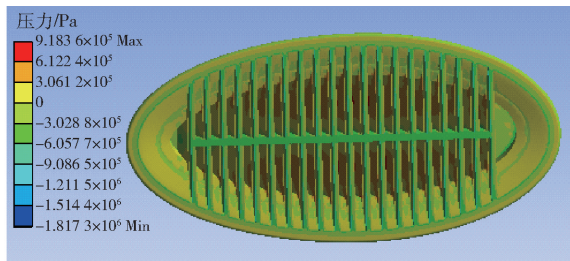
3.2.3 刚性骨架对吸盘贴附性能的影响

为探究鲫鱼吸盘刚性骨架对吸盘贴附性能的影响,设计了全柔性无骨架支撑吸盘和仅隔板无骨架的支撑吸盘,其压力云图分别如图 8(g)、(h) 所示,由图可见骨架有助于吸盘的密封。通过隔板骨架运动使隔板内无骨架支撑,可以改变吸盘的密封性,使之不完全密封,以便达到灵活脱离宿主的效果。

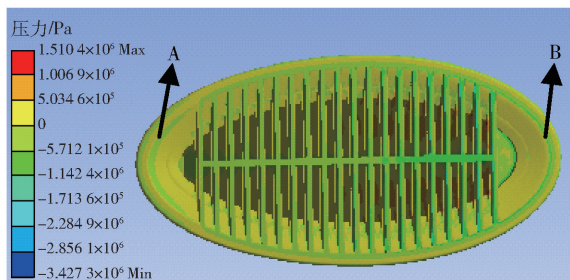
3.3 稳固吸附分析

稳固吸附时内部型腔形成负压,此时吸盘受到的载荷有吸盘外表面的环境压力和吸盘内表面的型腔压力。由于吸盘在水下工作,因此外部环境压力大于 101.325 kPa。由于本文稳固吸附仿真旨在对吸盘的吸附性能进行定性研究,因此对吸盘内外具体压力不作要求。假设吸盘外部压强为 10^5 Pa,而型腔可以通过调节型腔腔室体积来控制腔内压力,因此假设腔内压力可以在 $0 \sim 5 \times 10^4$ Pa 之间变动。除内外压力外,在不受其他外部载荷作用时,调节各型腔内压使之相等,统一为 2×10^4 Pa^[10]。以 a 型吸盘为研究对象,如图 9(a) 所示为吸盘稳固吸附时的

压力云图。由图可见在水压和平均分布的内压作用下,吸盘能保持良好的密封回路;由于各个腔室被密封回路阻隔分开,各个型腔能够单独改变内压,使吸盘内的整体内压分布不再均匀。



(a) 吸盘稳固吸附



(b) 加倾覆力矩后的吸盘

图 9 吸盘稳固吸附分析压力云图

Fig. 9 Stress nephograms of the steady adsorption analysis of the suction cup

稳固吸附后,在吸盘顶面外加 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的倾覆力矩以模拟水阻的倾覆作用,得到吸盘的压力云图如图 9(b) 所示。从图中可以看到吸盘内部受压应力值不再均布于各密封隔板和边沿密封圈上,而是向一侧偏移,如图中左侧以 A 作为密封回路,而右侧以 B 作为密封回路。同时在吸盘最左侧型腔处的密封回路已经出现开口,表明即此时最左侧型腔密封已经遭到破坏,但其他型腔仍然保持良好的密封。

4 结论

(1) 通过改变吸盘密封边形状及其分布可以改善吸盘的吸附效果。

(2) 吸盘内部隔板结构有助于吸盘边沿吸附。隔板对边沿的密封效果影响不容忽视,改变隔板形状可以改良吸盘边沿密封。

(3) 仿生鲫鱼吸盘可以通过调节骨架运动达到灵活脱离宿主的效果。

(4) 多腔室仿生鲫鱼吸盘自身便具有良好的抵抗倾覆的能力,并且可以通过改变型腔压强分布更好达到抵抗倾覆作用的目的。

参考文献:

- [1] SHEN W, GU J, SHEN Y. Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot[J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2006, 3(3): 151–159.
- [2] 袁夫彩, 王立柱. 两栖仿生变磁力脚吸盘力学模型建立及分析[J]. *机械传动*, 2012(7): 24–26.
YUAN F C, WANG L Z. Establishment and analysis of mechanical model for biomimetic amphibian variable magnetic device[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012(7): 24–26. (in Chinese)
- [3] 邱昆. 章鱼吸盘高吸附性能研究及仿生吸盘设计[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
QIU K. Research on high adsorption performance of octopus sucker and design of bionic sucker[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [4] 赵维福. 鲸虱吸盘的仿生学特性及其真空吸盘组的仿真模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
ZHAO W F. Bionic characteristic of distycus' sucking discs and the analog simulation study on vacuum multi-sucking discs[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [5] 湘泓. 鲫鱼与鲨鱼[J]. *百科知识*, 2012(5): 48.
XIANG H. Remoras and sharks [J]. *Encyclopedic Knowledge*, 2012(5): 48. (in Chinese)
- [6] DE WOLFF T. The design and fabrication of a biomimetic lifting aid [D]. Enschede: University of Twente, 2017.
- [7] 董智. 基于 SMA 驱动的仿生多腔吸盘及爬壁机构的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
DONG Z. Study on bionic adhering mechanism and the climbing mechanism of wall-climbing robots based on SMA [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)
- [8] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *Nature*, 2015, 521: 467–475.
- [9] 周利坤, 王洪伟. 仿章鱼吸盘式轮胎花纹设计与有限元分析[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(2): 228–232.
ZHOU L K, WANG H W. Imitation octopus sucker-type tire tread pattern design and finite element analysis[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(2): 228–232. (in Chinese)
- [10] 王蒙元. 扁平无人深潜器操纵性和快速性及能源系统优化设计方法[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.
WANG M Y. Multidisciplinary design optimization method of maneuverability, rapidity and energy system for flat UUV[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

Design and adsorption performance analysis of a bio-inspired suction cup based on the adsorption principle employed by remoras (suckerfish)

CHEN Long YUN Zhong* JIANG Yi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In view of the defects of existing bio-inspired suction cups which can generally only be used in dry environments, we decided to explore the adsorption principle employed by remoras (suckerfish). Based on this principle and the negative pressure adsorption principle, we have designed an oval-shaped bio-inspired suction cup. The effects of various factors on the adsorption performance were in terms of the adsorption capacity, frictional resistance capacity and anti-overturning torque capacity. Finally, a finite element simulation model was established. Finite element analysis of a solid model of the bio-inspired suction cup was carried out by using ANSYS software. The results showed that the main effect of the suction cup on the adsorption performance is the sealing of the cup's sealing edge, and the sealing is directly related to the material properties and the compressive stress on the contact surface.

Key words: remora sucker; bionics; negative pressure adsorption; finite element analysis

(责任编辑: 吴万玲)