DOI: 10.3901/JME.2020.15.039

基于 4D 打印技术的水陆两栖机器人 运动功能转换及控制

黄忠意^{1,2,3} 杨浴光^{1,2,3} 吕鹏宇^{1,2,3} 段慧玲^{1,2,3}

(1. 北京大学工学院 北京 100871;

2. 北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室 北京 100871;

3. 北京大学工程科学与新兴技术高精尖创新中心 100871)

摘要: 传统水陆两栖机器人的推进结构通常是将陆上推进结构与水上推进结构进行叠加, 导致了现有水陆两栖机器人的机械结构较为复杂, 增大了控制的难度。基于 4D 打印技术设计并制备了一种由轮毂和具有热变形响应性质桨叶结构单元组成的轮桨复合推进结构。该结构可通过热刺激变形响应实现水陆运动功能转换, 有效地降低了水陆两栖机器人推进结构的复杂度。此外, 还分析了几何参数和输入功率对桨叶结构变形响应速率的影响, 实现了桨叶结构的可控变形, 从而降低了水陆两栖机器人运动控制的难度。原型机试验结果表明, 利用 4D 打印技术制备的水陆两栖机器人在降低了结构复杂度与控制难度的同时, 可以实现水陆运动功能转换及控制。

关键词: 4D 打印; 水陆两栖机器人; 可控变形; 功能转换; 运动控制

中图分类号: TP242

Motion Function Transformation and Control of Amphibious Robot Based on 4D Printing

HUANG Zhongyi^{1,2,3} YANG Yuguang^{1,2,3} LÜ Pengyu^{1,2,3} DUAN Huiling^{1,2,3}

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871;

2. State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems, Peking University, Beijing 100871;

3. Beijing Innovation Center for Engineering Science and Advanced Technology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: The propulsion structure of traditional amphibious robot usually superimposes the land motion structure and the water motion structure, which leads to the complicated mechanical structure of the whole robot and increases the difficulty of control. A wheel-propeller compound propulsion structure consisting of a hub and blades with thermal deformation responsiveness is designed and fabricated based on 4D printing technology. The structure realizes the motion transformation from land to water by the thermal stimulation deformation response, which substantially reduces the complexity of the propulsion structure of the amphibious structure. In addition, the influence of geometric parameters and input power on the deformation rate of the blade structure are analyzed to realize the controllable deformation, which reduces the difficulty of motion control of the robot. Prototype tests show that the amphibious robot prepared by 4D printing technology possesses the capability of motion transformation and control from land to water while reducing the structural complexity and control difficulty.

Key words: 4D printing; amphibious robots; controlled deformation; functional transformation; motion control

0 前言

随着机械工程、信息技术等学科突飞猛进的发

展, 机器人在工业生产、航空航天、抗震救灾以及生活服务等领域得到了日益广泛的应用。就机器人的设计而言, 研究人员通常会根据机器人工作环境的不同而对机器人的运动方式以及结构部件做出不同的设计, 由此得到的机器人往往只能在单一环境中工作^[1]。然而, 现实生活中复杂多变的应用场景要求机器人需要具有对多种环境的适应能力。因此,

* 国家自然科学基金(91848201, 11872004, 11802004)和中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001)资助项目。20190808 收到初稿, 20191126 收到修改稿

可在两种或两种以上的环境中工作的多功能机器人应运而生,如水陆两栖机器人、水空两栖机器人、陆空两栖机器人等^[2-7]。由于水源及土地是人类赖以生存的基础,大多数民生、经济以及军事活动都集中在水陆交界区域,水陆两栖机器人的应用最为广泛。

传统的水陆两栖机器人通常同时集成了水上与陆地两套运动机构,在不同环境下切换运动装置获得水陆通行能力,这就导致了此类机器人具有复杂的机械结构,增大了控制的难度,进而限制了水陆两栖机器人的发展^[3,5,8]。另外,现有的水陆两栖机器人有多种推进形式,不同的推进形式决定其推进结构的设计。常见的水陆两栖机器人根据其推进形式的不同可分为:足式两栖机器人^[3]、轮式两栖机器人^[4-5]、仿生式两栖机器人^[8-9]等。其中,轮式两栖机器人设计思路简单、性能可靠、具有优良的运动效率,因此获得了众多学者的关注。已有的轮式两栖机器人推进装置大多由桨叶、车轮以及法兰盘组成,在陆地前进时,桨叶收缩在车轮轮廓内,而当机器人进入水中时,控制桨叶展开,当车轮转动时桨叶起到划水作用。然而,由于水陆两栖运动功能的转换是通过控制机械结构完成,导致其机械结构和控制系统的复杂程度高。因此,如何使水陆两栖机器人在具备两栖运动能力的同时保有较低的结构复杂度是亟待解决的问题。

4D 打印技术的出现为水陆两栖机器人推进结构的简化提供了新的思路。4D 打印技术是指基于 3D 打印技术制造出的物体在特定的环境和激励下发生物理特性(结构、形态、尺寸等)及功能的可控变化^[10-13]。通过 4D 打印技术可以制备在不同外加刺激下具有不同模态的结构^[14-15]。因此本文基于传统轮式水陆两栖机器人推进结构的设计,利用 4D 打印技术设计了一种轮桨复合推进结构,该结构具备热刺激变形响应性质。通过热刺激控制桨叶结构单元变形,从而改变水陆两栖机器人推进方式,实现机器人水陆两栖运动功能转换及控制。

1 推进结构设计

基于传统轮式两栖机器人推进结构的设计,本文设计了一种具备热刺激变形响应性质的轮桨复合推进结构,如图 1 所示。该推进结构由桨叶结构单元、车轮两个部分组成。利用高精度 3D 打印机一体化制备具有外界刺激变形响应的 4D 桨叶结构单元。在陆地运动时,桨叶结构单元预折叠在轮毂内部,机器人通过车轮形式实现推进作用;在水上运动时,施加外界刺激使桨叶结构单元展开,在车轮

转动过程中产生划桨效果,从而实现水上推进作用。

图 1 基于 4D 打印的水陆两栖机器人轮桨复合结构设计

对于轮式水陆两栖机器人,通过 4D 打印技术实现两栖运动功能转换的关键在于桨叶结构单元对外界刺激的变形响应。为此,本文设计了一种三段式桨叶结构单元,如图 2 所示。该结构单元的中间部分为铰链段,当施加外界刺激时,铰链段通过变形响应从弯曲状态转变成平直状态。结构单元的两端为桨叶段,当铰链段发生变形响应时,桨叶段会随之展开。因此,可以控制桨叶结构单元的展开,实现水陆两栖运动功能转换。

图 2 桨叶结构单元设计

2 4D 打印结构可控变形

利用 4D 打印技术设计具备刺激变形响应的桨叶结构单元,打印材料的选择至关重要。目前常用的 4D 打印材料主要对温度^[13,15]、磁性^[14,16]、pH^[17]、光^[18]等刺激具有较大的变形响应。其中,具有热刺激响应的形状记忆聚合物能够在实现快速响应及较

大变形的同时, 还保有良好的材料刚度, 因而是一种较为理想的 4D 打印材料^[19-20]。因此, 本文利用形状记忆聚合物作为打印材料, 打印了具备热刺激变形响应的桨叶结构单元。并通过电阻丝加热的方式施加热刺激, 从而实现 4D 打印结构的热刺激变形响应以及可控变形。

2.1 材料性能表征及选择

目前常用的 3D 打印材料分为类橡胶材料和树脂材料两大类。归功于多材料 3D 打印技术的发展, 现有的商业多材料 3D 喷墨打印机可以将多种材料按一定比例混合形成定制化 3D 打印材料, 实现对材料性能的调控。本文选用 Stratasys 公司提供的两类常见的商用打印材料—类橡胶材料(Tango+)和树脂材料(VeroClear)。使用动态热机械分析仪(NETZSCH, DMA242E)分析了这两种材料以及二者相互掺杂形成的定制化打印材料 RGD8630 的动态热机械性能。试样尺寸为: 12 mm(长)×5 mm(宽)×1 mm(厚)。对于 Tango+材料, 测试加载温度范围是 -20~40 °C; 对于 VeroClear, RGD8630 两种材料, 测试加载温度范围是 0~78 °C。温度加载精度为 ±0.2 °C。试验过程中, 升温速率控制: 2 °C/min。测试形式采用拉伸模式, 位移振幅: 2 μm, 加载频率: 1 Hz。

本文分别测试了 3 种材料的储能模量 G 及损耗因子 $\tan \delta$ 随温度 T 的变化, 测试结果如图 3 所示。从图 3a 可以看出, 三种打印材料的储能模量随着温度的升高而呈现出逐渐下降的趋势。对于类橡胶材料 Tango+, 加载温度从 -20 °C 升高到 40 °C, 其储能模量从 280 MPa 下降到 0.6 MPa。而对于其余两种材料, 当加载温度从 0 °C 升高到 78 °C, 储能模量随之从 2 GPa 左右下降到 1 MPa 的量级。相比而言, 在 VeroClear 材料中掺杂少量 Tango+材料形成的 RGD8630 材料, 其储能模量在 0~40 °C 范围内都要低于 VeroClear 材料。当加载温度保持在室温 26 °C 时, VeroClear 材料表现出 1 135.3 MPa 的储能模量, 而 RGD8630 表现出 667.6 MPa, 降低了 41.2%。而选用刚度较小的材料有利于其在热刺激下发生更快的变形响应。

测量损耗因子 $\tan \delta$ 随温度的变化, 通过识别损耗因子峰值对应的温度, 可找到材料的玻璃化转变温度 T_g 。玻璃化转变温度具有重要意义: 通过控制热刺激的输入, 即可控制材料从玻璃态到高弹态的转变, 从而实现打印材料的可控变形响应。图 3b 所示为三种材料的损耗因子 $\tan \delta$ 随温度变化趋势。从图中可以看出, 类橡胶材料 Tango+ 的玻璃化转变温度在 -5 °C 左右, 而其余两种材料的玻璃化转变温

度在 50 °C 左右, 高于室温, 因此这两种材料具备形状记忆性质。进一步对比发现, VeroClear 材料的玻璃化转变温度最高, 为 54.3 °C。对于 RGD8630 材料, 其玻璃化转变温度降低为 50.2 °C。因此, 掺杂适量类橡胶材料可以适当降低其玻璃化转变温度。

图3 不同打印材料动态热机械性能

基于对以上三种材料的热机械性能分析可知, VeroClear 材料以及在 VeroClear 材料中掺杂少量 Tango+材料形成的 RGD8630 材料均具备形状记忆性质。相比而言, 由于 RGD8630 材料具有较低的玻璃化转变温度和储能模量, 更有利于结构在热刺激状态下发生快速变形响应, 因此本文选用 RGD8630 作为 4D 打印材料, 用于制备具备热刺激变形响应的桨叶结构单元铰链段。

2.2 4D 打印桨叶结构单元

桨叶结构单元由两种材料组成, 如图 2 所示, 几何尺寸在表 1 中给出。其中, 两端的桨叶段使用 VeroClear 树脂材料, 不作用热刺激。中间铰链段使用 RGD8630 材料并预先折叠。铰链段部分在热刺激下, 可发生恢复变形, 使整个桨叶结构单元展开

至平直状态。为了实现该结构单元的可控变形,本文采用电阻丝加热的方式施加热刺激。并为铰链段设计了用于穿插电阻丝的通孔,通孔直径为 0.5 mm,间距为 1 mm。

表 1 桨叶结构单元几何尺寸

尺寸/mm	试样编号			
	1	2	3	4
l_1	20	20	20	20
l_2	11	11	11	11
h	2	2.5	3	3.5
w	6	6	6	6
r	0.5	0.5	0.5	0.5
Δd	1	1	1	1

采用商业多材料喷墨 3D 打印机(Objet 350 Connex, Stratasys)可以一体化打印具备多材料的结构单元。打印时通孔部分由支撑材料填充,打印完成后可使用高压水枪去除。使用铜镍材质电阻丝(直径: 0.2 mm, 电阻值: 34.7 Ω /m)穿插在铰链段通孔内部,用以提供热刺激。利用直流稳压电源(DP305, MESTEK)为电阻丝供电,并控制输入功率大小。

桨叶结构单元的变形响应与铰链段的预折叠以及恢复变形密切相关。铰链段的预折叠可通过电阻丝发热以及施加外载实现:当电阻丝通电后产生焦耳热并加热铰链段材料,使铰链段材料的温度 T 超过玻璃化转变温度 T_g ;保持在玻璃化转变温度之上,向试样两端施加弯矩 M ,使铰链段发生弯曲变形,而两段桨叶段不发生变形;当温度下降至室温时,解除弯矩,试样保持在弯曲状态,这样便实现了结构单元的预折叠。在无外载的情况下再次输入热刺激,当材料温度再次超过玻璃化转变温度时,结构单元发生恢复变形展开至平直状态,原理过程如图 2 所示。

为了实现快速的可控变形,本文首先探究了桨叶结构单元在热刺激条件下恢复变形规律。使用 RGD8630 作为铰链段材料并根据上述过程制备了初始夹角为 70° 的桨叶结构单元。分析了在热刺激状态下发生恢复变形过程时结构单元的夹角 θ 随时间 t 的变化规律,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,一开始施加热刺激后,由于结构单元升温需要一定时间,因此结构单元的夹角基本保持不变。随着输入热能不断增大,试样温度不断升高。当试样温度超过玻璃化转变温度 T_g 后,结构单元的夹角逐渐变大,变形速度也随之加大,结构单元从变形状态恢复至初始状态。最终夹角趋于不变的状态。

图 4 结构单元夹角 θ 随时间 t 的变化

2.3 变形响应速率影响因素

基于对结构热传导的考虑,本小节主要分析了结构单元厚度 h 和直流电源输入功率 P 对变形响应速率的影响。需要强调的是,当结构单元厚度小于 2 mm 时,其结构强度明显下降,在水上推进时不足以充当桨叶功能,因此分别选用厚度为 2 mm、2.5 mm、3 mm、3.5 mm 的试样,研究几何尺寸对变形响应速率的影响。

所有厚度的试样均保持 60° 的初始夹角,输入功率设定为 2 W,结构单元夹角变化率 $\dot{\theta}$ 随时间的变化如图 5a 所示。所有试样的夹角变化率都呈现出先增大后减小的趋势,即结构单元在热刺激作用下,角度变化速度逐渐加速,当达到最大值后,角度变化速率逐渐放缓,直到最后结构单元角度基本不再发生变化,对应结构单元展开恢复到初始状态。对比发现,随着试样的厚度增加,夹角变化率峰值逐渐减小,达到峰值的时间也随之变长,即结构单元变形响应速率越慢。因此,在满足结构强度需求的前提下,结构单元厚度适当减小有利于实现 4D 打印结构单元的快速变形响应,达到水陆两栖机器人功能转换的目的。

本文进一步研究了直流电源输入功率对变形响应速度的影响。使用 2 mm 厚度的结构单元作为研究对象,所有试样保持 60° 初始夹角,输入不同的额定功率。当施加热刺激后,结构单元发生变形响应,记录其变化到 2 倍初始夹角所需时间 t_r ,结果如图 5b 所示。可以看出,输入功率从 0.5 W 增加到 2 W 后,结构单元变形到 2 倍初始角度所需时间显著减小,从 83 s 降低到 21 s。但当进一步增大额定输入功率后,所需时间不再发生明显变化。因此,合理选择热刺激输入功率既可以使 4D 打印结构单元发生快速变形响应,实现水陆两栖机器人运动功能转换,同时也能减小能耗。

(a) 不同结构单元厚度 h 对夹角变化率 $\dot{\theta}$ 的影响 (b) 不同输入功率 P 对变形响应时间 t_r 的影响

图5 结构单元厚度及输入功率对变形速率的影响

2.4 桨叶结构单元可控变形

本文采用电阻丝作为热刺激源，区别于已有的文献通过改变环境温度作为热刺激源^[13, 15]，该方法具备很好的可控性，即可在固定输入功率下通过控制通电时间实现结构的可控变形。通过调控电源的开关状态，可以控制铰链段局部温度 T 大于或小于玻璃化转变温度 T_g ，当 $T > T_g$ 时，结构发生持续的恢复变形；当 $T < T_g$ 时，结构的恢复变形停止。选用厚度为2 mm的试样作为研究对象，输入功率设定为2 W，试验结果如图6所示。图中三条黑色虚线表示切断电源的时刻。可以看出，当停止施加热刺激后，由于热耗散，试样的变形速率明显下降，直至停止并维持在某一夹角状态下。插图所示为停止热刺激后试样的状态。因此，对于该4D打印结构单元，可以通过控制热刺激的输入时长，实现对结构单元的可控变形，使得结构呈现出多个状态，有利于水陆两栖机器人的运动控制。

图6 结构单元可控变形

3 试验与测试

3.1 水陆两栖机器人功能转换

根据上一节设计的结构单元，利用4D打印技术制备了一种具有热刺激变形响应的推进结构，结构设计和实物图分别如图1和图7所示，推进结构由一个车轮和六个桨叶结构单元组成。利用多材料高精度3D打印机，可以一体化打印成型。其中，轮毂用VeroYellow材料打印，桨叶结构单元的桨叶段和铰链段分别用VeroClear和RGD8630材料打印。每个结构单元的铰链段预留通孔用于穿插电阻丝，将电阻丝接直流电源。基于4D打印技术制备的推进结构功能转换如图7所示。

图7 水陆两栖机器人功能转换

在不施加热刺激的状态下，桨叶结构单元折叠在轮毂内部，推进结构呈车轮形式，可完成陆地运动，如图7a所示。当施加热刺激时，桨叶结构单元发生变形响应，从轮毂内部展开，使推进结构转换成明轮形式，可实现水面推进功能，如图7b所示。进一步，当机器人从水面运动状态转变回陆地运动状态时，该结构设计可以为桨叶结构单元的再次折叠提供弯矩。此时，再次施加热刺激使铰链段局部温度 T 超过玻璃态转变温度。车轮顺时针旋转产生一个力矩作用于结构单元。在该力矩的作用下结构

单元再次折叠,当铰链段温度降低至室温后,结构单元保持折叠状态,如图7c所示。当结构单元全部完成折叠后,推进结构从明桨形式再次转变成图7a所示的车轮形式。因此,利用桨叶结构单元铰链段的4D变形响应特性,通过施加热刺激可实现水陆两栖机器人功能双向转换。

3.2 水陆两栖机器人运动控制

桨叶结构单元的可控变形为水陆两栖机器人的控制提供了新思路。当桨叶结构单元展开到不同角度时,在水上转动产生的推进力有所不同,因此可以通过控制桨叶结构单元的展开角度,控制水陆两栖机器人的运动方向。本文基于图7的设计制备了一个简单的水陆两栖机器人原型机。利用多材料3D打印机打印各个部件并组装成 $155\text{ mm}\times 95\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的水陆两栖机器人。原型机内部使用Arduino UNO R3作为控制器,通过UNO-40A功能转接板以扩充其接口,使用两个双轴直流减速电机驱动推进装置。原型机试验在 $1500\text{ mm}\times 1200\text{ mm}\times 1200\text{ mm}$ 的水槽中完成。通过控制左右两侧推进装置中桨叶结构单元的展开角度,可以调控机器人的运动方向,结果如图8所示。图8a~8d分别展示了机器人在水面的不同运动路线。当左右两侧的桨叶结构单元都完全展开时,该机器人沿直线运动,如图8a所示;当左侧或右侧桨叶结构单元完全展开,而另一侧的桨叶结构单元完全折叠时,机器人实现往右或往左转向,分别如图8b和图8c所示。

图8 水陆两栖机器人的运动控制

进一步,基于桨叶结构单元的可控变形,当调控桨叶结构单元的展开角度时,可以控制机器人的转弯半径,如图8d所示。因此,基于对桨叶结构单元的可控变形,可以实现对水陆两栖机器人的运动控制。

4 结论

(1) 利用热刺激变形响应形状记忆聚合物作为4D打印材料,设计并打印了一种具备热刺激变形响应的4D打印结构单元。结果表明,该结构单元可以实现快速响应及可控变形。

(2) 基于4D打印结构单元,提出了一种水陆两栖机器人轮桨复合推进结构,能够在热刺激作用下实现水陆两栖功能转换。

(3) 利用结构单元的可控变形,通过调控结构单元展开角度,实现了对水陆两栖机器人水上运动的控制。

本文的工作为利用4D打印技术设计水陆两栖机器人,研究其运动功能转换和控制提供了可行的新思路,具有科学研究意义和实际应用价值。

参考文献

- [1] 杨清海,喻俊志,谭民,等. 两栖仿生机器人研究综述[J]. 机器人, 2007, 29(6): 601-608.

- YANG Qinghai, YU Junzhi, TAN Min, et al. Amphibious biomimetic robots: A review[J]. Robot, 2007, 29(6): 601-608.
- [2] ZHANG S W, LIANG X, XU L C, et al. Initial development of a novel amphibious robot with transformable fin-leg composite propulsion mechanisms[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 434-445.
- [3] PARK H S, SITTI M. Compliant footpad design analysis for a bio-inspired quadruped amphibious robot[C]// 2009 IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, 645-651.
- [4] 程龙. 轮桨一体式两栖机器人的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- CHENG Long. Developing of a wheel-propeller integrated amphibious robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [5] XIE X L, GAO F, HUANG C, et al. Design and development of a new transformable wheel used in amphibious all-terrain vehicles (A-ATV)[J]. Journal of Terramechanics, 2017, 69: 45-61.
- [6] CHEN Y F, DOSHI N, GOLDBERG B, et al. Controllable water surface to underwater transition through electrowetting in a hybrid terrestrial-aquatic microrobot[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2495.
- [7] CHEN Y F, WANG H Q, HELBLING E F, et al. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot[J]. Science Robotics, 2017, 2(11): 5619.
- [8] YIN X Y, WANG C W, XIE G M. A salamander-like amphibious robot system and control design[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2012, 956-961.
- [9] CRESPI A, BADERTSCHER A, GUIGNARD A, et al. Amphibot I: An amphibious snake-like robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 50(4): 163-175.
- [10] GLADMAN A S, MATSUMOTO E A, NUZZO R G, et al. Biomimetic 4D printing[J]. Nature Materials, 2016, 15(4): 413-418.
- [11] WEI H Q, WAN X, LIU Y J, et al. 4D printing of shape memory polymers: Research status and application prospects[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 48(1): 2-16.
- [12] TEOH J E M, AN J, CHUA C K, et al. Hierarchically self-morphing structure through 4D printing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 12(1): 61-68.
- [13] JEONG H Y, LEE E, HA S, et al. Multistable thermal actuators via multimaterial 4D printing[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(3): 1800495.
- [14] KIM Y, YUK H, ZHAO R H, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials[J]. Nature, 2018, 558(7709): 274-279.
- [15] CHEN T, BILAL OR, SHEA K, et al. Harnessing bistability for directional propulsion of soft, untethered robots[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(22): 5698-5702.
- [16] REN Z Y, HU W Q, DONG X G, et al. Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2703.
- [17] JIN D D, CHEN Q Y, HUANG T Y, et al. Four-dimensional direct laser writing of reconfigurable compound micromachines[J]. Materials Today, 2020, 32: 19-25.
- [18] PALAGI S, MARK A G, REIGH S Y, et al. Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photoresponsive soft microrobots[J]. Nature Materials, 2016, 15(6): 647-653.
- [19] 赵伟, 刘立武, 兰鑫, 等. 形状记忆聚合物复合材料在空间可展结构中的应用研究[J]. 载人航天, 2016, 22(5): 594-601.
- ZHAO Wei, LIU Liwu, LAN Xin, et al. Study on application of shape-memory polymer composites in space deployable structures[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(5): 594-601.
- [20] FELTON S M, TOLLEY M T, SHIN B, et al. Self-folding with shape memory composites[J]. Soft Matter, 2013, 9(32): 7688-7694.

作者简介: 黄忠意, 男, 1994 年出生。主要研究方向为 4D 打印、流固耦合。

E-mail: zhongyihuang@pku.edu.cn

吕鹏宇(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为流固界面力学、先进制造技术。

E-mail: lvy@pku.edu.cn