

DOI: 10.3901/JME.2020.15.072

面向4D打印双层结构自弯曲的变形激励源布局设计*

王 闯 刘振宇 段桂芳 谭建荣

(浙江大学CAD&CG国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 自弯曲作为4D打印的主要变形形式,近年来受到广大研究者的关注。目前针对4D打印结构自弯曲变形的研究主要以试验为主,即通过大量试验指导4D打印产品设计。针对这一问题,提出了面向4D打印双层结构自弯曲的变形激励源布局设计方法。将简单双层结构作为复杂结构变形的激励源,仅需对激励源进行试验测试,即可通过理论模拟多激励源驱动下的4D打印结构变形结果,实现4D打印结构自弯曲的模拟仿真。同时,通过激励源布局参数反求思路,可以指导4D打印自弯曲结构产品设计,为4D打印结构设计提供了新的思路。最后,通过试验测试验证了该方法的有效性,并发现相较于激励源间距,激励源数量对结构弯曲有更大影响。通过合理设计激励源数量和间距,能够实现对4D打印双层结构自弯曲变形的控制。

关键词: 激励源; 4D打印; 自弯曲; Mindlin板理论

中图分类号: TG122

Incentive Source Layout Design for Self-bending of 4D Printing Double-layer Structure

WANG Chuang LIU Zhenyu DUAN Guifang TAN Jianrong

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Self-bending, as the main form of deformation of 4D printing, has attracted the attention of researchers in recent years. The research on self-bending deformation of 4D printing structure is mainly based on experiments, and the 4D printing product design is guided by a large number of experiments. In order to solve this problem, a layout design method of incentive source for self-bending of 4D printing double-layer structure is proposed. Simple double-layer structure is used as the incentive source of complex structure deformation. The deformation results of 4D printing structure driven by multiple incentive sources can be simulated theoretically and the self-bending simulation of 4D printing structure can be realized only by testing the excitation source. At the same time, the idea of inverse calculation of layout parameters of incentive source are also put forward, which effectively solves the design problem of 4D printing self-bending structure product, and provides a new idea for the design of 4D printing structure. Finally, the effectiveness of the method is verified by experiments. It is found that the number of excitation sources has a greater impact on the bending of the structure than the spacing of excitation sources. The self-bending deformation of 4D printing double-layer structure can be controlled by reasonable design of the number and interval of excitation sources.

Key words: incentive source; 4D printing; self-bending; mindlin theory

0 前言

4D打印^[1-2]是指采用智能材料通过3D打印技术制造异质材料结构,该结构在外部激励下,会随着时间的改变其形状。由于4D打印结构具有自主变形的特点,可以按时变形为目标结构,已在装配设

备、机器人执行器、药物运输设备和生物制造设备等领域^[3-6]显示出巨大的应用潜力。4D打印结构的变形方式包括自弯曲、自扭曲、自折叠等种类,其中自弯曲是4D打印常用的变形方式^[7-8]。为实现结构自弯曲行为,研究人员开发了多种弯曲变形机制,包括基于形状记忆聚合物^[9-11]的弯曲变形、基于水凝胶^[12-13]的弯曲变形、基于双层结构^[14-15]的弯曲变形以及基于主动铰链结构^[16-17]的弯曲变形等。这些方法采用不同的材料和设计,制造复杂性差异很大。

* 国家自然科学基金(51475417, 51475418, 51490663)和浙江省自然科学基金(Y19E050078)资助项目。20190926收到初稿,20191211收到修改稿

其中, 双层结构制造工艺简单、易于控制, 使得其广泛应用于 4D 打印形变结构设计中。利用双层结构中两种材料在受到激励时, 膨胀/收缩系数不同而产生的应力差, 驱动打印结构发生自弯曲行为。然而由于双层结构内部应力释放的复杂性和不确定性, 导致这种变形模型难以构建, 变形行为无法模拟仿真, 变形结果难以预测, 可控变形挑战性大。

为实现 4D 打印双层结构自弯曲变形, WANG 等^[18]将活性材料打印到柔性基体上, 并通过多组试验获取结构弯曲曲率与活性材料之间的交叉角度的关系, 从而指导 4D 打印产品设计。WANG 等^[19]在柔性基体上打印各种具有预编程变形的图案, 通过试验测试柔性基体和预编程材料之间的相互作用关系, 实现打印结构的变换。ZHANG 等^[20]基于形状记忆聚合物和聚乳酸(Polylactic acid, PLA)双层结构, 研究了 PLA 编织角、管壁厚度和形状恢复温度对 4D 打印结构形状记忆效应的影响。KWOK 等^[21]提出了几何驱动有限元法, 将整体打印结构拆分为各个单元, 通过物理试验诱导变形行为获取每个单元的变形结果, 并将其整合实现整体结构变形的预测。

目前的方法虽然实现了特定场景中 4D 打印双层结构弯曲变形, 但是由于 4D 打印结构变形涉及大量复杂因素, 包括制造工艺、热效应、材料特性等, 其中一些甚至难以获取。为了构建 4D 打印双层结构弯曲变形模型, 不仅需要构建描述制造过程的数学模型, 还需要建立材料表征及其在不同刺激条件下的相互作用机制, 这对 4D 打印结构变形模拟带来了极大的挑战。为了简化 4D 打印双层结构布局方式, 减少试验量, 研究人员采用更为标准化的打印结构, 本文称之为变形激励源双层结构, 即其中一层为离散的标准结构单元依附于另一层, 通过改变标准结构单元的数量与位置, 可以实现不同的自弯曲变形行为。DENG 等^[22]在活性材料基底上打印固化树脂, 并通过试验获取固化树脂的排布模式与整体结构弯曲的关系从而指导复杂产品设计。YUAN 等^[23]通过试验获取双层结构弯曲角度, 活性材料取向和外载之间的关系, 以确定复杂折叠图案的最佳活性材料排列和加载方向。

通过标准化的排布模式, 降低了复杂 4D 打印双层结构设计难度, 但目前的方法大多是通过试验手段寻找变形激励源的布局方式, 缺少基于变形激励源的 4D 打印双层结构弯曲变形模型。因此, 本文提出了基于等效外力驱动的激励源等效变形模拟方法, 实现了面向 4D 打印双层结构自弯曲的变形激励源布局设计方法。通过试验获取单个变形激励作用下双层结构弯曲变形参数, 基于 Mindlin 板理

论^[24]构建等效变形模型, 获取单个变形激励作用下双层结构弯曲变形的等效载荷, 以此为基础, 构建多个变形激励作用下双层结构弯曲变形模型, 实现复杂结构弯曲变形的模拟, 通过设计激励源的排布模式, 实现复杂双层结构的弯曲变形控制。图 1 所示为 4D 打印双层结构激励源布局设计流程。

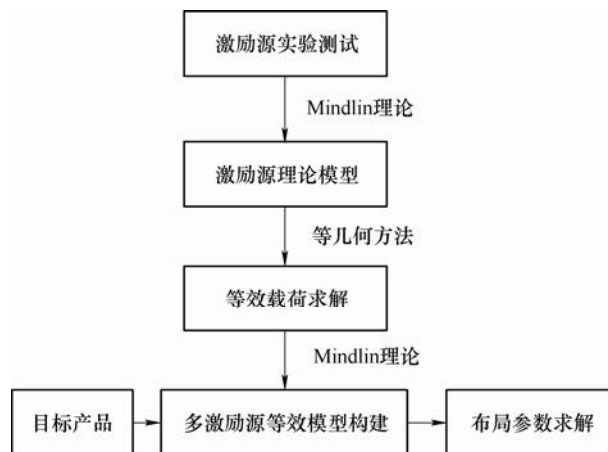


图 1 4D 打印双层结构激励源布局设计流程

1 单激励元等效载荷的获取

基于 Mindlin 板理论建立等效外力驱动的激励源变形模型, 通过单个变形激励作用下双层结构弯曲变形试验获取激励源静态弯曲平衡方程中的板的位移矢量参数, 从而建立单激励元等效载荷。

1.1 Mindlin 板理论

Mindlin 板理论又被称为板的一阶剪切变形理论, 是 Kirchhoff-Love 板理论的一种扩展, 考虑了板厚度方向的剪切变形, 适用于解决板结构弯曲问题^[24]。Mindlin 板理论遵循以下两个假设: ① 忽略厚度方向的正应力, 假定薄板的厚度没有变化; ② 薄板中面上的各点没有平行于中面的位移。如图 2 所示的板结构, 其节点位移函数可定义为

$$\begin{cases} u = z\beta_x \\ v = -z\beta_y \\ w = w_0 \end{cases} \quad z \in \left[-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}\right] \quad (1)$$

式中, u 、 v 和 w 是板变形前后的节点位移; β_x 和 β_y 是围绕 x 和 y 轴的旋转矢量; w_0 是板中面的位移矢量。

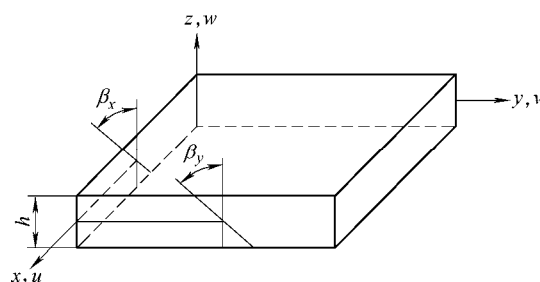


图 2 Mindlin 板理论参数模型

设板的中面为 xoy 平面, z 轴垂直于中面, 基于假定①, 板厚度方向的应变

$$\varepsilon_z = \partial w / \partial z = 0 \quad (2)$$

即板中面每一法线上的所有各点都有相同的位移 w 。基于假定②, 中面上各点在 z 方向的位移为零, 则变形前后, 板的中面相对位置没有变化。

1.2 激励源变形等效外力驱动变形模型

将惰性材料打印在活性材料上, 可以实现热激励作用下的结构自弯曲变形行为, 这种变形可以作为复杂结构变形的激励源, 从而控制多激励源结构的变形。由于结构弯曲变形主要受力的驱动, 将激励源在热激励作用下产生的变形等效为在外力作用下发生的同等变形, 如图 3 所示, 其中小箭头表示外力载荷, 驱动激励源产生与在热激励作用下的同等变形。由于激励源在热激励作用下弯曲为近似弧形, 因而变形等效外力载荷是非均匀的。

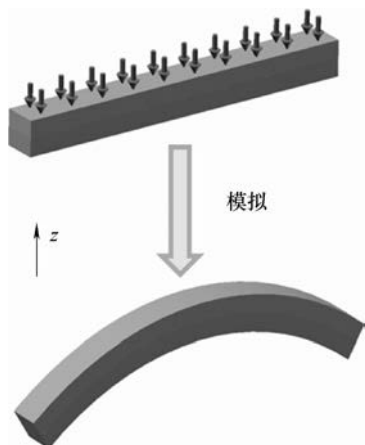


图 3 激励源结构弯曲等效外力驱动变形模型

在激励源弯曲变形过程中, 其厚度变化基本为零, 同时激励源的中面相对位置没有变化, 因此, 可以采用 Mindlin 板理论, 构建激励源结构弯曲等效外力驱动变形模型, 然后, 通过试验获取激励源在热激励作用下产生的变形, 从而, 在等效外力驱动变形模型的基础上, 求解等效外力载荷。激励源的材料参数可定义如下

$$P_e = \begin{cases} P_1 & z \in [0, h/2] \\ P_2 & z \in [-h/2, 0] \end{cases} \quad (3)$$

式中, h 表示激励源双层板结构厚度; z 为纵向坐标; 有效材料属性 P_e 代表材料的弹性模量 E_e 和泊松比 ν_e 。板的应变可表示为节点位移对其对应局部坐标的偏导

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial w / \partial y + \partial v / \partial z \\ \partial w / \partial x + \partial u / \partial z \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, ε_{xx} 和 ε_{yy} 分别为板中面在 x 和 y 方向的应变, γ_{xy} 、 γ_{xz} 和 γ_{yz} 分别为对应方向的剪切应变。根据 Mindlin 板理论中节点位移方程可得

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = z \begin{pmatrix} \partial \beta_x / \partial x \\ -\partial \beta_y / \partial y \\ \partial \beta_x / \partial y - \partial \beta_y / \partial x \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial w / \partial y - \beta_y \\ \partial w / \partial x + \beta_x \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据平面应力理论, 激励源的本构关系为

$$\sigma_b = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} =$$

$$\frac{E_e}{1-\nu_e^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu_e & 0 \\ \nu_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_e)/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\sigma_s = \begin{pmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \frac{E_e}{2(1+\nu_e)} \begin{pmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, σ_b 和 σ_s 为激励源板的弯曲应力和剪切应力, 板的有效弹性模量 E_e 和泊松比 ν_e 由式(3)计算。

1.3 激励源等效载荷求解

基于虚功原理, 激励源板在载荷作用下的静态模型的弱形式可以表示为

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_A \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{xy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} dz dA + \\ & \frac{k}{2} \int_A \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \gamma_{yz} & \gamma_{xz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} dz dA - \int_A w p dA \end{aligned} \quad (10)$$

式中, A 是激励源板的中平面; k 为剪切修正系数; w 为板 z 方向上的节点位移; p 是单位面积载荷。按照剪切应变能原则, 取 $k=6/5$ 。将式(6)~(9)代入式(10), 可得

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_A \kappa_b^T E_b \kappa_b d\Omega + \frac{1}{2} \int_A \gamma_s^T E_s \gamma_s d\Omega - \\ & \int_A w p dA \end{aligned} \quad (11)$$

式中, κ_b 为激励源板弯曲后中平面曲面各方向曲率; γ_s 为剪切应变; E_b 为弯曲弹性系数矩阵; E_s 为剪切弹性系数矩阵, 分别按照如下计算

$$\kappa_b = \begin{pmatrix} \partial \beta_x / \partial x \\ -\partial \beta_y / \partial y \\ \partial \beta_x / \partial y - \partial \beta_y / \partial x \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\gamma_s = \begin{pmatrix} \partial w / \partial y - \beta_y \\ \partial w / \partial x + \beta_x \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$E_b = \frac{E_e h^3}{12(1-\nu_e^2)} \begin{pmatrix} 1 & \nu_e & 0 \\ \nu_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_e)/2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$E_s = \frac{E_e h k}{2(1+\nu_e)} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

基于等几何方法^[25], 应用 NURBS 基函数作为激励源板的形函数, 板的位移定义如下

$$u(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^{m \times n} R_i(\xi, \eta) q_i \quad (16)$$

式中, ξ 和 η 为节点矢量, m 和 n 分别表示 x 和 y 方向的基函数。在 Mindlin 板理论中, 每个控制点有三个自由度, 表示为 $\mathbf{q}_i^e = [w_{0i} \ \beta_{xi} \ \beta_{yi}]^T$ 。将式(16)代入式(12)和(13)可得 κ_b 和 γ_s 。

$$\kappa_b = \begin{pmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R}{\partial x} \beta_x \\ \frac{\partial R}{\partial y} \beta_y \\ \frac{\partial R}{\partial y} \beta_x + \frac{\partial R}{\partial x} \beta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial R}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial R}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial R}{\partial y} & \frac{\partial R}{\partial x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ \beta_x \\ \beta_y \end{pmatrix} = \mathbf{B}_b \mathbf{u} \quad (17)$$

$$\gamma_s = \begin{pmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R}{\partial x} \omega - R \beta_x \\ \frac{\partial R}{\partial y} \omega - R \beta_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{,x} & -R & 0 \\ R_{,y} & 0 & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ \beta_x \\ \beta_y \end{pmatrix} = \mathbf{B}_s \mathbf{u} \quad (18)$$

式中, \mathbf{B}_b 和 \mathbf{B}_s 分别为弯曲几何矩阵和剪切几何矩阵。将式(17)、(18)代入式(11), 可得激励源静态弯曲平衡方程

$$\mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (19)$$

式中, \mathbf{q} 为节点位移, \mathbf{F} 为外力载荷。激励源刚度矩阵 \mathbf{K} 定义如下

$$\mathbf{K} = \int_A \left((\mathbf{B}_b)^T E_b \mathbf{B}_b + (\mathbf{B}_s)^T E_s \mathbf{B}_s \right) dA \quad (20)$$

式中, 弯曲弹性系数矩阵 E_b 和剪切弹性系数矩阵

E_s 可从式(14)和(15)获得, 通过式(3), 可获取板的有效弹性模量 E_e 和泊松比 ν_e 。 \mathbf{K} 表示为双层材料合成刚度。

图 4 所示为双层材料结构在受热时的自弯曲变形试验。

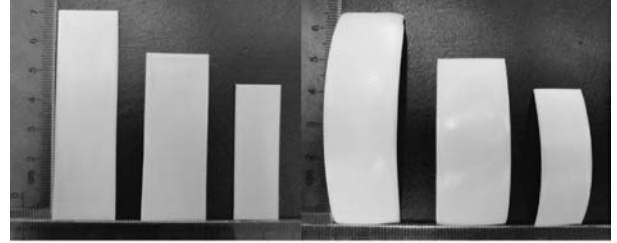


图 4 双层材料结构在受热时的自弯曲变形试验

通过试验, 可获取由于板的位移矢量 \mathbf{q} , 结合式(19), 可求解激励源的等效载荷

$$\mathbf{F}_{ele} = \mathbf{K}_{ele} \mathbf{q}_{ele} \quad (21)$$

2 多激励源变形模型构建与布局设计

将简单双层结构作为复杂结构变形的激励源, 可以通过控制激励源数量和间距, 从而控制多激励源结构的变形。

2.1 多激励源驱动模型等效变形

通过多激励源均匀布置、联合驱动的板弯曲变形的形式, 基于多激励源外力等效载荷分解, 构建了多激励源驱动的板弯曲力学分析理论模型, 实现了板弯曲变形参数的求解。图 5 所示为多激励源驱动模型。

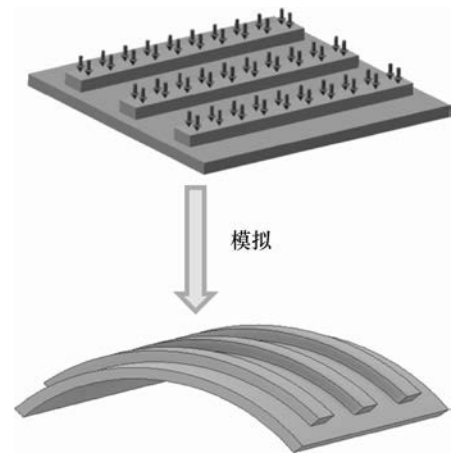


图 5 多激励源驱动模型

在存在激励源位置, 材料相互作用使结构产生内部应力驱动板变形, 而无激励源位置, 不存在这种相互作用。将每一激励源处的内部应力均等效为相应的外力载荷, 则多激励源驱动的结构变形可视为由这些相应的等效外力载荷共同作用产生变形。

由于这些外力载荷相互平行, 因此可以采用线性叠加模式, 获取多激励源驱动的变形模型。假设存在激励源的位置, 其内部应力等效为激励源等效外力载荷 F_{ele} , 则多激励源激励模型的等效外力载荷可表示为单激励源等效载荷的叠加

$$F = \sum F_{ele} \quad (22)$$

由于多激励源板结构刚度只与其材料属性和结构有关, 因而, 可根据单激励源板结构刚度矩阵计算过程, 获取多激励源激励模型的整体刚度矩阵

$$K = \sum K_{ele} \quad (23)$$

则基于式(19), 可以定义多激励源板的变形

$$q = K^{-1}F \quad (24)$$

通过改变激励源的数量和布局模式, 可以改变多激励源等效载荷的大小及分布, 同时由于激励源位置的改变, 对多激励源模型整体刚度矩阵产生影响, 这种相互作用下, 可以通过调整激励源布局参数, 从而调整多激励源模型弯曲变形。图 6 所示为不同数量激励源驱动模拟仿真结果。

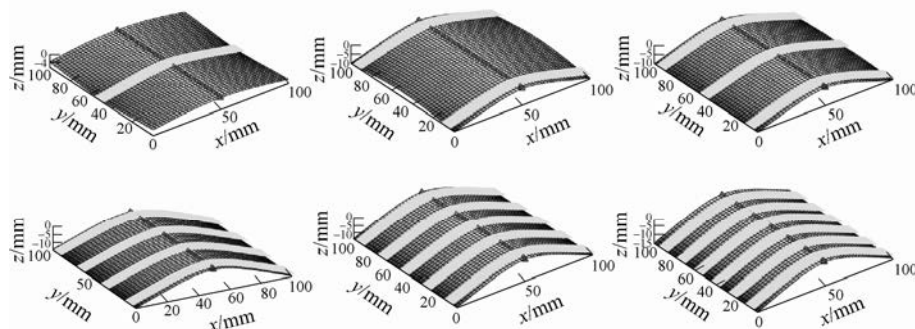


图 6 多激励源驱动模拟仿真结果

2.2 多激励源布局设计

通过调整激励源布局参数, 可以控制多激励源模型的变形。关于多激励源布局设计, 本文主要讨论两类问题: ① 给定目标结构及其变形后的结构曲率, 如何确定及激励源数量; ② 给定目标结构变形后的结构曲率以及激励源数量, 如何确定激励源间距。

对于如何确定激励源数量的问题, 首先通过改变多激励源变形模型中激励源数量参数, 进行多激励源驱动变形仿真, 获取一系列变形后的曲率, 然后根据励源数量与变形后曲率的对应性, 建立变形曲率与激励源数量关系曲线, 从而, 根据不同的目标结构变形后的结构曲率, 获取各自目标变形所需的激励源数量。

同理, 对于如何确定激励源间距的问题, 通过改变多激励源变形模型中激励源间距参数, 进行多激励源驱动变形仿真, 建立变形曲率与激励源间距关系曲线, 从而, 根据不同的目标结构变形后的结构曲率, 获取各自目标变形所需的激励源间距。

3 试验验证

3.1 单激励源试验弯曲结果

单激励源的等效载荷的计算, 见式(21), 需要板的位移矢量作为输入参数, 由于难以通过理论方法获取此参数, 因而本文采用物理试验的方式, 确定板的位移矢量。

试验采用的聚氯乙烯和固化树脂的弹性模量分别为 $E_1=1 \times 10^8$ Pa, $E_2=1 \times 10^9$ Pa, 两者泊松比均为 $\nu_e=0.3$ 。试验设计激励源大小为 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 其中聚氯乙烯和固化树脂厚度均为 0.3 mm 。在加热至 121°C 时, 结构弯曲如图 7 所示。



图 7 激励源试验弯曲结果

基于激励源变形等效外力驱动变形模型, 获取激励源等效变形模型和其等效载荷 F_{ele} 曲线, 如图 8 所示。

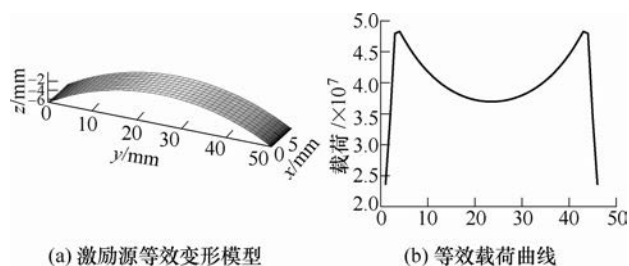


图 8 激励源等效变形模型及其等效载荷曲线

基于单激励源等效载荷, 结合式(22), 即可获取多激励源驱动模型等效载荷, 模拟多激励源变形结果。

3.2 多激励源试验弯曲结果

本文试验设计在 50 mm×50 mm 的聚氯乙烯上, 打印不同数量和不同间距的固化树脂, 获取结构在激励下的变形参数。其中聚氯乙烯和固化树脂厚度均为 0.3 mm, 设计固化树脂的大小为 50 mm×10 mm。图 9 所示为试验结果。

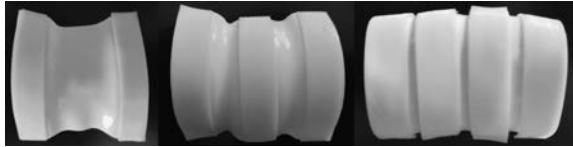


图 9 整体结构弯曲变形与激励数量的关系试验结果

DENG 等^[26]的研究发现双层材料结构弯曲角度与固化树脂的排布模式有关, 且弯曲近似弧形。为

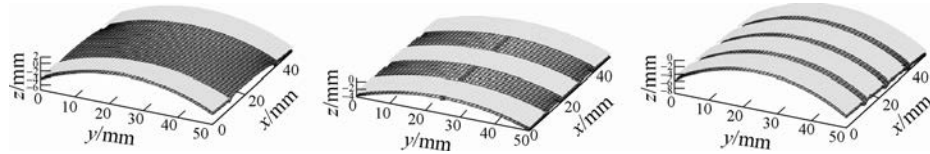


图 10 整体结构弯曲变形与激励数量的关系模拟仿真结果

为验证激励源间距对整体弯曲变形的影响, 试验设计激励源数量为 3, 设置间距为 4 mm、6 mm、8 mm 和 10 mm。图 11 所示为试验结果, 表 2 所示为不同间距激励源对应的整体结构弯曲变形结果。

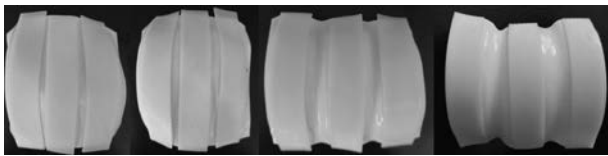


图 11 整体结构弯曲变形与激励间距的关系试验结果

表 2 整体结构弯曲变形与激励间距的关系

激励源间距/mm	试验曲率	仿真曲率
3	0.022 5	0.022 0
5	0.021 6	0.020 7
7	0.022 7	0.021 4
9	0.023 8	0.022 2

可以看出, 模拟结果曲率与试验结果曲率匹配良好, 且相较于激励源数量, 激励源间距对整体结构曲率变化的影响较小。图 12 所示为基于本文方法对应的模拟结果。

由于打印基底材料聚氯乙烯的热收缩性较大, 以及温控条件没有达到理想状态, 试验出现了一定

了使研究目标更为统一, 仅考虑多激励源驱动结构对整体曲率变化的影响。由于弯曲结果近似弧形, 我们通过下式获取结构弯曲曲率的大小

$$\rho = 4 \arctan(2d/l) \quad (25)$$

式中, l 为变形后结构的跨度, d 为拱高。表 1 所示为不同数量激励源对应的整体结构弯曲变形结果。

表 1 整体结构弯曲变形与激励数量的关系

激励源数量	试验曲率	仿真曲率
2	0.021 4	0.020 1
3	0.023 8	0.022 2
4	0.027 3	0.026 9

可以看出, 模拟结果曲率与试验结果曲率匹配良好, 且随着激励源数量的增加, 整体结构曲率变大。图 10 所示为基于本文方法对应的模拟结果。

的偏差, 但激励源的变形结果基本一致, 同时弯曲也近似弧形。后续将优化试验方法, 改善试验器材, 提高试验效果。

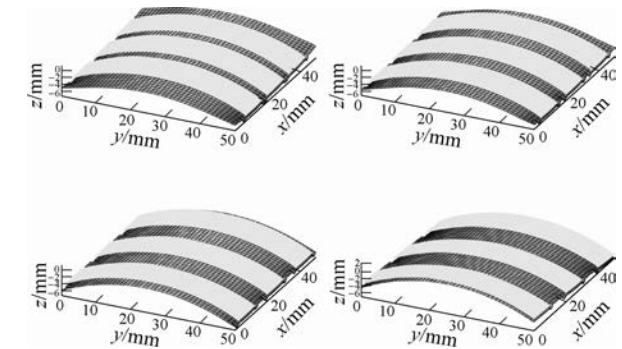


图 12 整体结构弯曲变形与激励间距的关系模拟仿真结果

3.3 激励源数量与间距对变形结果的影响分析

分别通过改变多激励源变形模型中激励源数量与间距参数, 进行多激励源驱动的变形仿真, 分析激励源数量与间距对变形结果的影响。激励源模型基底尺寸参数为 100 mm×100 mm×0.3 mm, 激励源大小为 100 mm×8 mm×0.3 mm。图 13 和图 14 分别为仿真试验所得变形曲率与激励源数量关系曲线和变形曲率与激励源间距关系曲线。

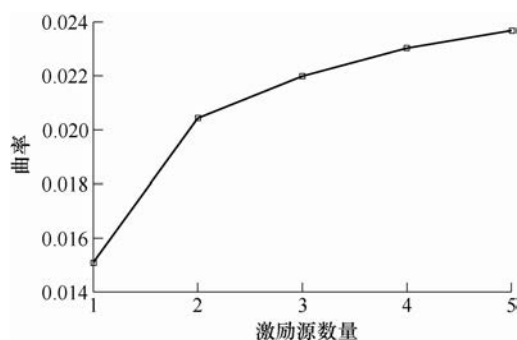


图 13 变形曲率与激励源数量关系曲线(激励源等距分布)

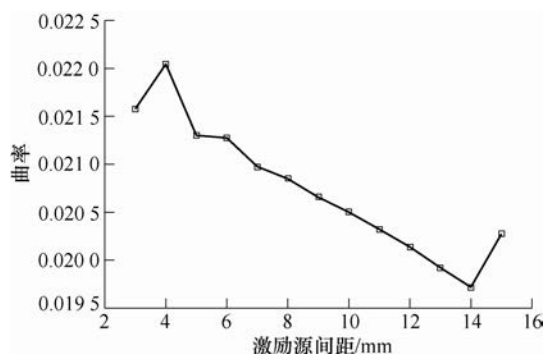


图 14 变形曲率与激励源间距关系曲线(激励源数量为 3)

可以看出,激励源数量对结构弯曲有着积极的影响,随着激励源数量增多,弯曲曲率呈现增大的趋势;而激励源间距对结构弯曲具有消极影响,随着激励源间距增大,弯曲曲率呈现变小的趋势,相对而言,激励源数量对变形结果的影响更大。

4 结论

(1) 针对 4D 打印双层结构弯曲内部应力释放过程的复杂性和不确定性,提出了基于等效外力驱动变形的模拟方法,构建了激励源变形模型,通过等几何分析,获取了激励源变形等效载荷

(2) 应用 Mindlin 板理论构建了多激励源驱动 4D 打印结构弯曲变形的等效模型,通过模拟测试了激励源数量与间距对 4D 打印结构弯曲变形的影响,获取了变形曲率与激励源布局参数的关系曲线。

(3) 通过试验和理论结合,验证了该方法的有效性,并发现相较于激励源间距,激励源数量对结构弯曲有更大影响。可通过合理的设计激励源数量和间距,实现对 4D 打印双层结构自弯曲变形的控制。

参 考 文 献

[1] GE Q, QI H J, DUNN M L. Active materials by four-dimension printing[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103: 13190113.
[2] TIBBITS S. 4D printing: Multi-material shape change[J].

Architectural Design, 2014, 84(1S1): 116-121.

- [3] FELTON S, TOLLEY M, DEMAINE E, et al. A method for building self-folding machines[J]. Science, 2014, 345(6197): 644-646.
[4] NA J, EVANS A A, BAE J, et al. Programming reversibly self-folding origami with micropatterned photo-crosslinkable polymer trilayers[J]. Advanced Materials, 2015, 27(1): 79-85.
[5] BREGER J C, YOON C, XIAO R, et al. Self-Folding thermo-magnetically responsive soft microgrippers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(5): 3398-3405.
[6] GERYAK R, TSUKRUK V V. Reconfigurable and actuating structures from soft materials[J]. Soft Matter, 2014, 10(9): 1246-1263.
[7] WANG W, YU C Y, SERRANO P A A, et al. Soft grasping mechanisms composed of shape memory polymer based self-bending units[J]. Composites Part B-Engineering, 2019, 164: 198-204.
[8] FAN Z, ZHANG F, ZHANG Y. Folding and assembly methods for forming three-dimensional mesostructures[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63: 2335-2347.
[9] JEONG H Y, LEE E, HA S, et al. Multistable thermal actuators via multimaterial 4D printing[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4: 18004953.
[10] INVERNIZZI M, TURRI S, LEVI M, et al. Processability of 4D printable modified polycaprolactone with self-healing abilities[J]. Materials Today-Proceedings, 2019, 7(1): 508-515.
[11] CAPUTO M P, BERKOWITZ A E, ARMSTRONG A, et al. 4D printing of net shape parts made from Ni-Mn-Ga magnetic shape-memory alloys[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21: 579-588.
[12] BAKARICH S E, GORKIN R I, PANHUIS M I H, et al. 4D Printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2015, 36(12): 1211-1217.
[13] CHEN Z, ZHAO D, LIU B, et al. 3D printing of multifunctional hydrogels[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 190097120.
[14] WEINGARTEN S, SCHEITHAUER U, JOHNE R, et al. Multi-material ceramic-based components - additive manufacturing of black-and-white zirconia components by thermoplastic 3D-printing (CerAM-T3DP)[J]. Journal of Visualized Experiments, 2019: e57538143.
[15] SCHWARTZ J J, BOYDSTON A J. Multimaterial actinic spatial control 3D and 4D printing[J]. Nature Communications, 2019, 10: 791.
[16] PICKETT G T. Self-folding origami membranes[J].

- Europhysics Letters, 2007, 78: 480034.
- [17] GUO W, LI M, ZHOU J. Modeling programmable deformation of self-folding all-polymer structures with temperature-sensitive hydrogels[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22: 11502811.
- [18] WANG Q, TIAN X, HUANG L, et al. Programmable morphing composites with embedded continuous fibers by 4D printing[J]. Materials & Design, 2018, 155: 404-413.
- [19] WANG W, LI C, CHO M, et al. Soft tendril-inspired grippers: Shape morphing of programmable polymer-paper bilayer composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(12): 10419-10427.
- [20] ZHANG W, ZHANG F, LAN X, et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed textile functional composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 160: 224-230.
- [21] KWOK T, CHEN Y. GDPE: Geometry-driven finite element for four-dimensional printing[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering- Transactions of the ASME, 2017, 139: 11100611.
- [22] DENG D, CHEN Y. 4D Printing: Design and fabrication of 3d shell structures with curved surfaces using controlled self-folding[C]// ASME International Manufacturing Science & Engineering Conference, 2015.
- [23] YUAN C, WANG T, DUNN M L, et al. 3D printed active origami with complicated folding patterns[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(3): 281-289.
- [24] MINDLIN R D. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1951, 18(1): 31-38.
- [25] HUGHES T, COTTRELL J A, BAZILEVS Y. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(39-41): 4135-4195.
- [26] DENG D, KWOK T, CHEN Y. Four-dimensional printing: Design and fabrication of smooth curved surface using controlled self-folding[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139: 0817028.

作者简介: 王闯, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能制造。
E-mail: 11625063@zju.edu.cn

刘振宇, 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化设计、数字样机仿真与虚拟现实。

E-mail: liuzy@zju.edu.cn

段桂芳(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为数字化设计、机器学习理论及其在智能产品设计中的应用。

E-mail: gfduan@zju.edu.cn

谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 中国工程院院士。主要研究方向为数字化设计、机械设计及理论。

E-mail: egi@zju.edu.cn