

基于图像识别仿生木纹的三维打印路径规划方法

于颖¹, 白捷仁¹, 李帅帅¹, 李思齐¹, 王玉²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对传统三维打印采用的诸如网格、三角等均匀同构介观结构填充存在结构效率低、与承载零件应力场不协调等问题, 受自然生长的木纹可提高木材整体性能启发, 提出基于图像识别仿生木纹的三维打印路径规划方法, 旨在借鉴木材的纤维排布以改善零件的机械性能。通过木材铣削分层, 依次提取各层图像木纹并生成对应打印路径, 并逐层打印出仿生木纹试件。拉伸试验结果表明: 相比同质量的网格填充、三角填充、直线填充三种传统均匀同构填充试件, 基于仿生木纹的非均匀异构打印试件最大拉伸载荷分别提高了 115.03%、72.89%、64.39%, 证明了基于仿生木纹的非均匀介观填充结构能够显著提高打印件拉伸强度。

关键词: 仿生木纹; 介观结构; 图像识别; 路径规划; 三维打印

中图分类号: TH122

文献标志码: A

of parts. Through wood milling layering, the woodgrain image of each layer is extracted in turn and the corresponding printing path is generated. Then, the biomimetic woodgrain specimen is printed layer by layer. The tensile test results show that the maximum tensile load of the printed specimen based on woodgrain is increased by 115.03%, 72.89% and 64.39% respectively compared with the three traditional uniform isomorphic filling specimens, i. e., grid filling, triangular filling, and rectilinear filling. It is proved that the non-uniform heterogeneous filling structure based on biomimetic woodgrain can significantly improve the tensile strength of the printed specimen.

Keywords: biomimetic woodgrain; mesoscopic structure; image recognition; toolpath planning; 3D printing

Woodgrain Inspired 3D Printing Toolpath Planning Method Based on Image Recognition

YU Ying¹, BAI Jieren¹, LI Shuaishuai¹, LI Siqi¹,
WANG Yu²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aimed at the problems of low structural efficiency and incongruity with the stress field of bearing parts in the filling of uniform isomorphic mesoscopic structures such as grid and triangle used in traditional 3D printing, and inspired by the fact that naturally growing woodgrain can improve the overall performance of wood, a woodgrain inspired 3D printing toolpath planning method based on image recognition is proposed aiming to learn from the fiber arrangement of wood to improve the mechanical properties

以熔融沉积制造 (fused deposition modeling, FDM) 为代表的增材制造技术因具有架构材料^[1]、格状结构^[2]等复杂形状的制造能力, 打破了传统减材制造仅关注宏观 (几何外形) 和微观 (材料及组织) 的零件设计思路, 解锁了零件在微-介观结构上的设计空间^[3]。以介观结构代替实体的全新设计思路使得零件在保证几何外形的前提下兼具重量轻、比强度高、吸能降噪等诸多优秀性能^[4-5]。传统 FDM 介观结构大多以均匀同构为主, 如网格填充、三角填充等, 这种结构虽然能够完成所需几何外形并减轻零件质量, 但由于大多数零件使用中其内部应力呈非线性分布, 极易在零件的特定位置形成应力集中, 很显然均匀同构的介观结构不能够与这种应力分布很好协调, 应力集中部位极易造成破坏从而限制了零件整体机械性能^[6]。与之相反, 非均匀异构的介观结构则可以充分发挥 FDM 在微-介观结构层面的巨大潜力^[7], 通过非线性排布零件内部材料及其走向

收稿日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175244, 51675383)

第一作者: 于颖, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为增材制造、故障的预测性维护及远程诊断等。
E-mail: cdhawyy@tongji.edu.cn

通信作者: 王玉, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为增材制造、数字化设计与制造、有限元分析等。
E-mail: yuwang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

使其与零件内部非线性应力相协调,选择性加强零件应力集中环节,从而提高零件结构效率,即相同填充质量下打印件能够表现出更高的强度。例如,Wulle等^[8]将零件分割成子块并单独切片,使不同层上的打印路径与该层主应力轨迹相适应从而提高零件在多轴应力条件下负载能力;Steuben等^[9]同样认为应当按照应力分析结果进行打印零件异构填充而非采用同构的标准样式;Zouaoui等^[10]改进了传统FDM打印路径使其拟合应力方向并发现断裂韧性提高20%。已有诸多试验结果表明:打印件机械性能与打印路径及由此生成的介观结构紧密相关,并且与均匀同构介观结构相比,协调于应力分布的非均匀异构介观结构性能更优。

相比于频繁的计算与仿真获得非均匀异构介观结构,自然界中天然存在着一种能够与所承载荷完美适应的非均匀异构材料——木材^[11]。除了“逐层叠加”的成型规律和各向异性的性能表征与FDM相似之外,木材自然形成的节等生理结构也与打印零件中常见的孔等物理结构相吻合。并且木材在自然生长中可以通过其内部独特的纤维排布方式强化特殊生理部位,使其适应于自然载荷而不被破坏^[12-13]。因此遵循仿生思想,不妨将这种自然进化的优秀非均匀异构结构应用于三维打印,根据木材纤维排布方式规划FDM打印填充路径,提高零件性能。本文提出了一种基于图像识别仿生木纹的三维打印路径规划方法,并以打印件拉伸强度为研究对象,将该非均匀异构的木纹填充试件与传统均匀同构填充试件对比,进行拉伸试验验证。

1 仿生原理及方法

1.1 木纹形成及其力学性能表征

树木在生长过程中,形成层细胞的向内分裂活动受温度、气候等环境因素影响造成了夏季快、冬季慢的季节差异,从而在宏观上表现出深浅相间的颜色分布^[14]。这种颜色分布在木材横切面上以环形呈现为年轮而在径切面及弦切面上以条形呈现为木纹,故木纹的走向即指示出该处木质纤维的排布方向。

由于树木内部木质纤维之间的结合强度远低于单束纤维强度,木材在宏观上能够明显表现出与木纹方向相耦合的正交各向异性,即在轴向、径向、切向三个相互垂直的方向上,木材表现出的强度、刚度等力学性质也相互独立。三个方向相对位置如图1a所示,轴向平行于木纹;径向垂直于木纹及年轮;切向垂直于木纹并切于年轮。由于通常木材径向与切向之间性能差异远小于其与轴向之间性能差异,故在工程应用中仅关注木材顺纹(平行于木纹)与横纹(垂直于木纹)方向的性能表现。美国木材手册^[15]中提供了美洲常见经济树种的各项力学指标,数据显示木材在顺纹方向的抗压强度及弹性模量可达横纹方向的十至数十倍,并且根据其收录的Hankinson公式可以得出:与木纹方向夹角越小,木材的强度越高。Dong等^[16]在探究各向异性对木材摩擦表现时也指出,木材顺纹方向抗拉强度远高于横纹方向而表现出更好的耐磨性。木材耦合于木纹的正交各向异性表现与FDM定向增强零件性能需求完全相符,为木纹仿生的路径规划思路提供了理论支撑。

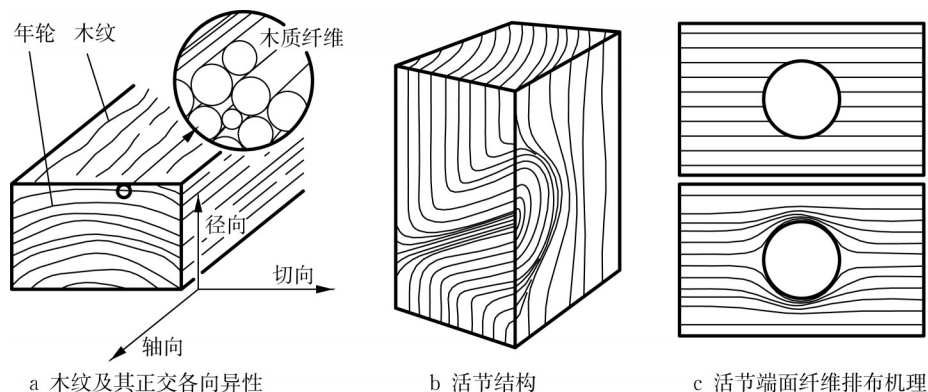


图1 木纹、活节结构及其纤维排布

Fig. 1 Woodgrain, knot structure, and fiber arrangement

树木生长过程中,由于枝芽的径向生长导致树干原本木质发生改变从而形成的特殊生理结构被称

为节,通常位于枝条根部或树干内部。根据其成因及周围木质情况,可将节分为死节与活节。死节是

枝芽枯朽后逐渐被周围组织包裹所形成,通常已经部分或完全脱离于周围组织并且不再承载。而活节则位于正常发育的树枝根部,由树干及枝条形成层交替环生所形成,将树枝紧密连接于树干。因死节不受外载更无与之相适应的结构,故本文研究均围绕活节展开。活节结构示意图如图1b所示,其在持续外载作用下逐渐形成的特殊致密结构被认为是树干与枝条对抗风雨等自然力的最佳连接方式^[17]。通过观察活节端面可以发现其克服外载的机理在于:不同于钻孔,其纤维束并未因树枝生长而被打断,而是保持其数目不变向两侧堆积,通过将纤维排布合

理加密使其适应于孔周的应力集中,如图1c所示。Muller等^[18]将挪威云杉木节与相同形状聚酯模型对比进行力学试验并测量其应变场,结果显示木节中的应变分布明显比聚酯模型更均匀,证明了木节处的高强度来源于其纤维分布与内部应力的协调性。

1.2 木纹仿生方法

为进一步验证“通过木纹仿生的路径规划可以增强零件孔结构强度”,选择一块带有活节并木纹明显的长方形板状木材进行仿生打印。仿生思路如图2所示。

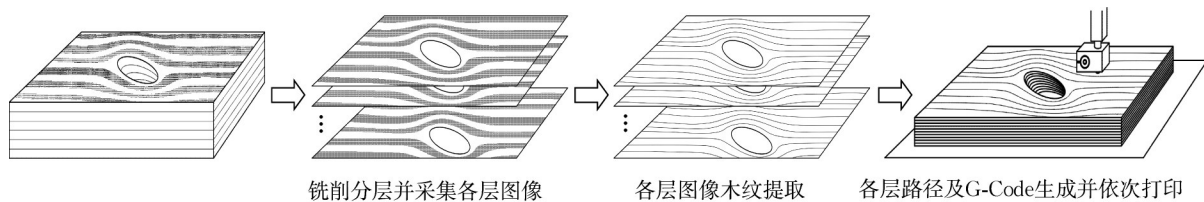


图2 木纹仿生3D打印方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of biomimetic woodgrain 3D printing

将木板进行逐层铣削,每铣削一层后通过摄像设备采集该层的表面纹理图像,并进给刀具进行下一层铣削及图像采集。在获取了每一层木纹图像后,对各个图像依次进行图像木纹提取与打印路径及G-Code生成,最终将各层G-Code文件按照层间排列顺序拼接形成整体G-Code文件进而打印。铣削过程中的各层刀具进给量(即相邻切片层间厚度)决定了打印件与实物在厚度方向上的拟合精度:层进给越小,拟合精度越高,但总层数及处理负担也随之增加。原理上讲,各层打印轨迹均需要通过“铣削

—拍摄—识别与提取”的流程逐层生成,而在本试验中因考虑到所选木板厚度较小,其在各层上呈现处的木纹差异不大,故简化试验方案:将表层木纹图像处理所得打印轨迹依据木节的倾斜角度逐层偏置,从而获得各层打印轨迹。

1.2.1 图像木纹提取

图像木纹的提取过程主要基于Python-OpenCV软件平台实现,具体包括图像形状变换、灰度及降噪、图像边缘检测、边缘坐标提取等步骤,如图3所示。

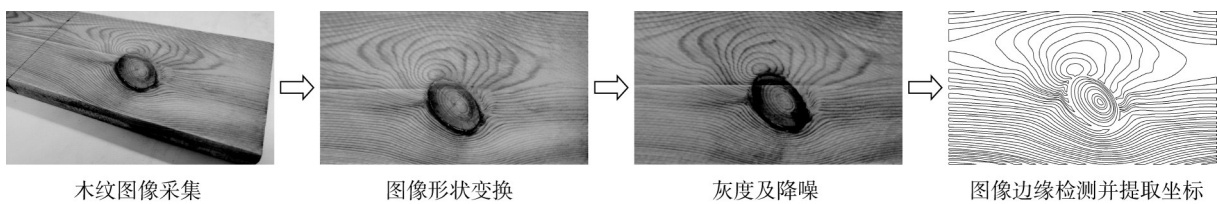


图3 图像木纹提取过程

Fig. 3 Extraction of woodgrain image

图像形状变换依据确定各层图像4个角点位置求得透视变换矩阵,进而采用选定插值算法插值变换获得变换后图像,最终将各层木纹图像标准化为相同尺寸(像素大小)、相同角度(正对木材铣削面),从而降低拍摄角度引起的视角误差以保证各层轨迹相互衔接。灰度处理使图像丢失颜色信息,将RGB(红绿蓝)三通道整合为单一灰度通道以便后续图像

处理。降噪处理用于去除因拍摄设备及环境等因素在图像上形成的噪点等妨碍后续边缘检测的噪声信号,其原理为:将原图像与卷积核进行二维离散卷积,即遍历原图像各点并用其周围像素值按照卷积核内参数进行加权平均后所得值代替改点像素值。针对目前常见的噪声类型已均有较为成熟的降噪方式如去除高斯噪声的高斯滤波、去除椒盐噪声的中

值滤波等,本质区别在于其卷积核的不同:均值滤波卷积核内参数均为1,即用各点周围像素平均值代替该点像素,此算法原理简单但其针对性不强,并且会导致图像更加模糊不利于边缘检测;中值滤波采用各点周围像素的中值代替该点像素,针对椒盐噪声(信号受到强烈干扰产生随机散布的黑点或白点)效果明显;高斯滤波卷积核内参数呈中心大,边缘小的高斯分布,针对高斯噪声效果明显。由于在木纹图像采集中所受干扰主要以环境带来的高斯噪声为主,故在本试验中采用高斯滤波进行图像降噪。

图像边缘检测为图像木纹提取过程的核心,根据木纹深浅交替排布的性质提取其色彩边缘作为木纹走向,并作为后续打印路径生成的依据。基于Canny算法^[19]的边缘提取包括:计算像素梯度及方向、非极大抑制、双阈值检测等步骤。图像各点像素梯度及方向由Sobel算子^[20]计算得出,计算公式如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot A \quad (1a)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \cdot A \quad (1b)$$

式中: A 为原始图像; G_x 与 G_y 分别为各点处横向及纵向像素梯度。依此计算得出各点梯度 G 及方向 θ 为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (3)$$

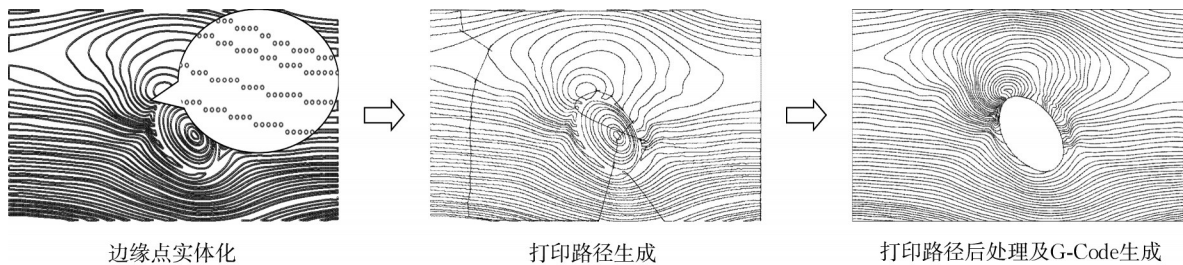


图4 打印路径及G-Code生成过程

Fig. 4 Generation of path and G-Code

G-Code生成由本课题组所开发的基于Grasshopper的FDM工艺平台所实现^[21],该平台利用软件的树形结构数据存储模式,将各线条分支划分为数个点并将其坐标按照分支数、点数依次存储于树形结当中,通过其内嵌的Python环境编程按照

至此,通过筛选梯度较大的像素点初步提取出模糊图像边界。非极大抑制通过仅保留各点沿梯度方向的梯度极大值过滤出清晰的单像素边界并保证其各点与梯度方向垂直。双阈值检测通过判断像素梯度与设定高低阈值之间关系进一步筛选边界,过滤因光线、噪声等引起的小范围像素变化,其方法为:仅保留梯度高于高阈值的像素点及与这些像素点相连并且其梯度介于高低阈值之间的像素点,通过改变阈值范围调整边缘检测细节程度。最终利用边缘坐标提取将边缘检测识别到的边缘点坐标信息存为数据文件。

1.2.2 打印路径及G-Code生成

打印路径及G-Code的生成如图4所示,包括边缘点实体化、打印路径生成、打印路径后处理、G-Code生成等步骤,Rhino软件强大的参数化建模能力使图像中边缘线转化为可编辑实体线条成为可能。边缘点实体化通过Grasshopper插件读取边缘坐标数据文件生成实体边缘点并将其烘焙至建模平台,利用曲线工具将上述实体边缘点自动连接最相邻点从而初步形成打印路径。打印路径后处理包括去除杂线等多余线条、相邻线条插值加密等。由于自动连接最相邻点的轨迹生成算法导致当某点附近没有可连接点时会扩大检索半径直至寻到一孤立点并与其相连,故路径上呈现出若干条杂线,需将其截断并去除。除此之外,由于路径上半部分过于稀疏将导致打印时丝材之间无法连接形成孤立,故采用插值法在相邻两条曲线间插入线条对其加密,使相邻两条路径之间最小距离小于丝材打印宽度从而避免孤立。至此获得最终打印路径。

给定工艺参数将同一分支上各点坐标顺序输出形成G-Code。由于该工艺平台仅适用于各层截面相同的打印模型,故在本试验中的变截面木纹打印中需要将各层图像轨迹分别生成G-Code,并将其整合为一体。

2 试验

2.1 试验设计

本次试验设计了基于木纹仿生的路径填充 (woodgrain)、网格填充 (grid)、三角填充 (triangular)、直线填充 (rectilinear) 4 种填充方式的打印试件: 其中基于木纹仿生的路径填充由 1.2 节流程所获得的 G-Code 文件实现, 其余传统填充方式 G-Code 由传统切片软件 Simplify3D 所生成。为保证拉伸试验数据可靠, 需保证试样包括几何形状、质量、材料等在内的参数一致。试件外形及几何尺寸如图 5 所示, 均统一为一带斜孔长方体形状从而与木板保持一致。试件质量的控制主要在于包括填充密度在内的工艺参数控制, 由于基于木纹仿生的打印填充路径的特殊性, 并且其 G-Code 已经生成, 其质量不可通过调整打印参数控制, 故在打印其他填充方式试件时需要反复尝试、精准调控其填充密度, 控制其最终打印件质量与 woodgrain 打印试样保持一致。

2.2 拉伸试验

本次试样打印采用框架式 FDM 打印机, 并选择同批次生产、直径 1.75 mm 热塑性高分子材料聚乳酸 PLA 丝材作为打印耗材。打印喷嘴直径 0.4 mm、温度控制 200 °C, 热床温度控制 50 °C, 打印层高 0.2 mm。为保证拉伸试验的科学性, 每种填充方式试样均打印 3 个, 表 1 为各试样填充方式及质量。4 种填充方式打印试样如图 6 所示。拉伸试验采用东莞东日仪器有限公司 5 KN 拉伸试验机配合选择楔

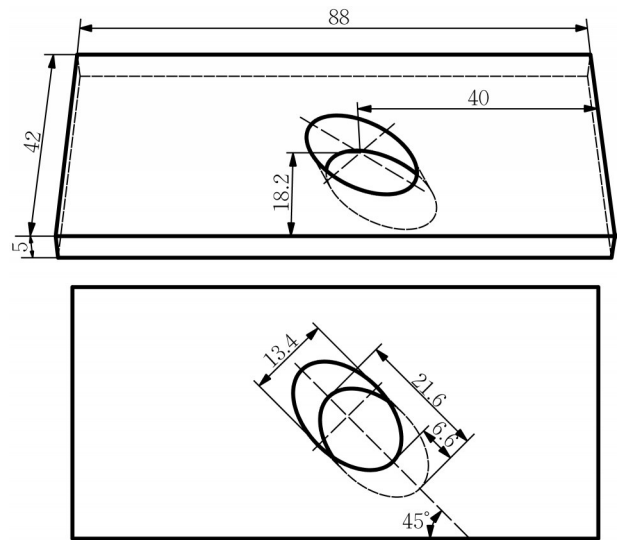


图5 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 5 Geometric dimension of test specimen (unit: mm)

形夹头在室温下进行。对于本试验带斜孔长方体试样, 斜孔处存在明显缺陷, 故尤其需要对其周围强度进行检验: 分别选择底面斜孔左切线左侧 10 mm 及顶面斜孔右切线右侧 10 mm 处作为夹头夹紧位置, 如图 6e 所示。设定拉伸机拉伸试验速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 试件出现断裂或载荷存在明显下降趋势时停止拉伸试验。试验同时采集拉伸时间、拉伸载荷以及拉伸位移等信息。对于脆性断裂破坏件, 选择其断裂位置载荷作为最大载荷, 对于韧性断裂破坏件, 选择其破坏或停止试验前所记录载荷最大处作为其最大载荷。

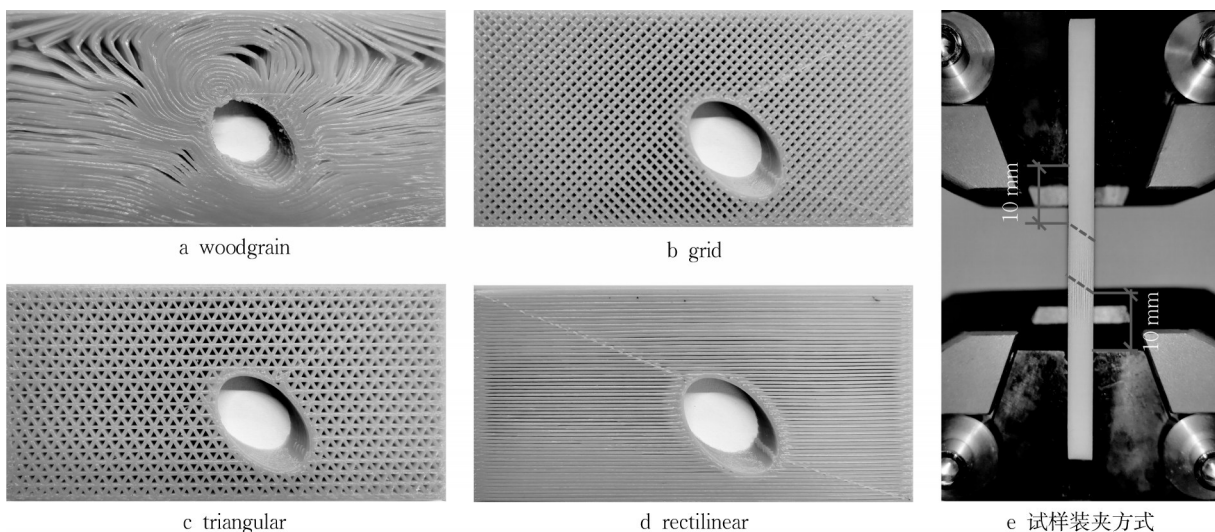


图6 4种填充方式打印试样及装夹方式

Fig. 6 Test specimens of four filling modes and their clamping method

表1 各试样填充方式及其质量

Tab.1 Filling mode and mass of each sample

质量 / g			
木纹填充 (woodgrain)	网格填充 (grid)	三角填充 (triangular)	直线填充 (rectilinear)
15.6	15.9	15.7	16.2
15.7	15.7	15.7	16.0
16.0	15.7	15.7	16.0

3 结语与讨论

3.1 拉伸结果讨论

根据试验过程中所采集信息对各种填充方式下三个试样的试验数据取平均值并进行处理,得到各种填充方式下试样的拉伸载荷-拉伸位移曲线如图7a所示,各填充方式平均最大载荷及其标准误差如图7b所示。对比试验数据可以得出,相同填充质量

下,grid、triangular、rectilinear、woodgrain试样最大载荷逐级递增。并且相比于另外三种传统打印试样,woodgrain试样最大载荷分别提高115.03%、72.89%、64.39%,试件的最大载荷及结构效率得到明显提升。由于FDM的层内各向异性表现,即丝材走向与零件受力方向夹角越小其能够提供的抗拉强度越高,而grid、triangular、rectilinear三种填充方式丝材走向与整体受力方向夹角依次为 45° 、 30° 、 0° 逐渐减小,故其试件最大载荷也随之提高。而woodgrain试件在rectilinear试件基础上进一步优化,木材天然的非线性纤维排布方式使其路径处处与内部应力方向相吻合,并且仿生木纹的路径规划通过合理的丝材疏密分布形成的非均匀异构的介观结构将同等质量的填充耗材更大比重地分布在零件应力集中环节,从而提高了零件拉伸强度。

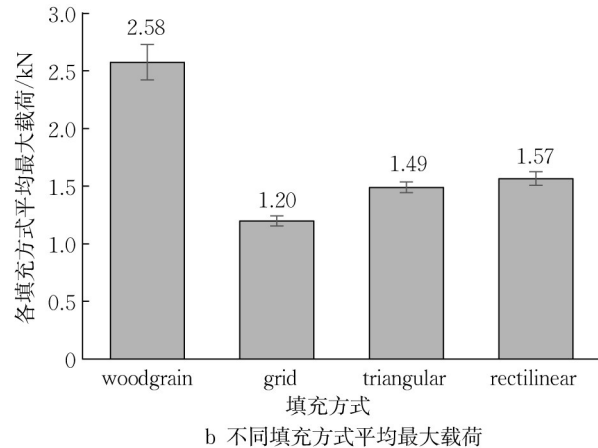
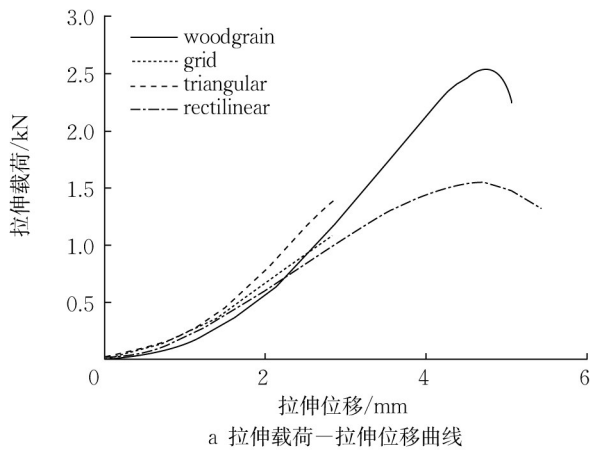


图7 拉伸试验结果

Fig. 7 Result of tensile test

3.2 断裂样式分析

4种填充试件的拉伸断裂样式如图8所示,观察得出:4种填充方式的断裂位置、形貌及其失效模式均有所不同。图8左列展示出,grid试件与triangular试件的断裂形貌均表现为从孔周向轮廓延伸的直线裂纹,其中grid试件其裂纹与拉力方向夹角 45° ,而triangular试件其裂纹与拉力方向夹角 60° ,这与两种试件的填充路径角度不谋而合。通过介观层面力学分析,由于各路径交点之间构成的柱形受力单元与零件整体承载方向存在夹角,故宏观拉力在各单元上分解为沿材料轴向分布的拉应力和与之垂直的剪切应力。因材料的剪切强度低于抗拉强度,在宏观载荷作用下剪切应力率先达到极限强度并破坏。一旦某处发生剪切破坏,沿受剪方向的其余单元所受应力进一步增加并达到极限强度,进而裂纹逐渐扩

展并在宏观上表现为直线裂纹。而woodgrain试件与rectilinear试件由于材料分布方向与试件承载方向基本一致,材料所受应力大部分为轴向拉应力,故试件孔周至边缘距离最短位置处因截面积最小而产生最大拉应力,最终因达到材料极限抗拉强度而被破坏。

图8右列展示出,相比于grid试件及triangular试件的脆性断裂形式,woodgrain试件及rectilinear试件呈现出先塑性变形后逐渐破坏的韧性断裂形式,其断口尺寸明显缩小并变白,这是由于PLA材料在室温下(约 25°C)脆性较大从而表现出脆性断裂,随着温度升高其韧性逐渐增加并表现出具有蠕变能力的玻璃化状态直至转变为橡胶状粘性流体。而此实验中从拉伸载荷-拉伸位移曲线图中可以看出grid及triangular试件很快达到其最大载荷并脆性断裂,

而 woodgrain 及 rectilinear 试件相比之下其拉伸位移更大,其变形能量累积更多进而使其局部温度升高从而形成韧性断裂。试验结论表明,相较于传统

FDM 路径填充方式,基于木纹仿生的 FDM 路径规划方式可以使零件拉伸性能得到显著提高。

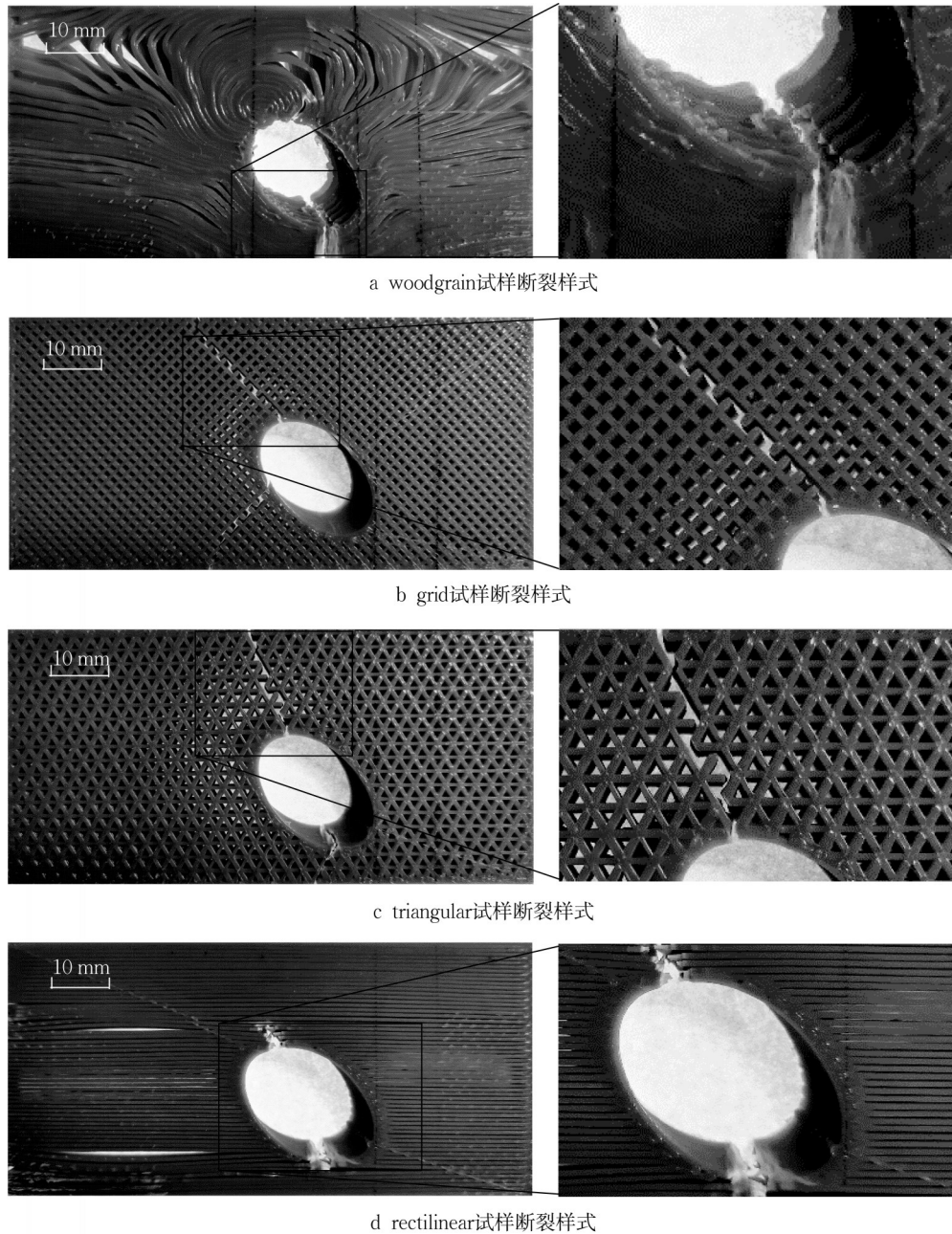


图8 4种填充试样断裂样式

Fig. 8 Fracture patterns of samples of four filling modes

4 结语

本文提出了基于仿生木纹的三维打印路径规划方法,并试验验证得出该方法能够显著提高打印件拉伸强度。将木材物理切片分层后采集每层木纹图像,依次对各层图像进行木纹提取、路径及 G-Code

生成并将其合成,进而打印获得与原木材几何外形及内部纤维排布一致的 PLA 打印试件。将该试件与材料、几何外形、质量均相同的网格填充、三角填充、直线型填充试件进行了对比拉伸试验,试验结果显示:相比于网格填充、三角填充、直线填充试样,基于仿生木纹的三维打印路径规划打印试样其最大拉

伸载荷分别提高了115.03%、72.89%、64.39%。本文所提出的基于仿生思想的路径规划方法打破了传统的均匀同构介观结构填充,充分利用了FDM优越性,按照木材内部纤维生长方式非线性地规划填充路径,从而针对性地使打印件薄弱处得到增强,进而使FDM打印件拉伸强度和结构效率进一步提高。除此之外,该仿生方法同样适于骨骼、蜻蜓翅膀等具有几何纹理的自然非均匀异构材料,面向不同应用场合提升打印件性能及结构效率。

作者贡献声明:

于颖:研究方法指导。

白捷仁:试验设计及论文撰写。

李帅帅:数据整理分析。

李思齐:图像处理。

王玉:创新点及技术路线指导。

参考文献:

- [1] ZHENG Xiaoyu, LEE H, WEISGRABER T H, *et al.* Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials [J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1373.
- [2] YAN Chunze, HAO Liang, HUSSEIN A, *et al.* Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 62: 32.
- [3] FLORES I, KRETZSCHMAR N, AZMAN A H, *et al.* Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31:100947.
- [4] AZMAN A H, VIGNAT F, VILLENEUVE F. CAD tools and file format performance evaluation in designing lattice structures for additive manufacturing [J]. *Jurnal Teknologi*, 2018, 80(4): 87.
- [5] SEHARING A, AZMAN A H, ABDULLAH S. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(6): 1687814020916951.
- [6] KHOSRAVANI M R, ZOLFAGHARIAN A. Fracture and load-carrying capacity of 3D-printed cracked components [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 37: 100692.
- [7] LI Shuaishuai, XIN Yanmei, YU Ying, *et al.* Design for additive manufacturing from a force-flow perspective [J]. *Materials & Design*, 2021, 204: 109664.
- [8] WULLE F, WOLF M, RIEDEL O, *et al.* Method for load-capable path planning in multi-axis fused deposition modeling [C]// Póvoa de Varzim, Portugal, 29th CIRP Design Conference (CIRP Design). [S.l.]:CIRP,2019: 335-340.
- [9] STEUBEN J C, ILIOPOULOS A P, MICHOPoulos J G. Implicit slicing for functionally tailored additive manufacturing [J]. *Computer-Aided Design*, 2016, 77: 107.
- [10] ZOUAOUI M, LABERGERE C, GARDAN J, *et al.* Numerical prediction of 3d printed specimens based on a strengthening method of fracture toughness [C]//Ljubljana, Slovenia, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS). [S.l.]:CIRP, 2019: 40-44.
- [11] DOBBERTIN M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: A review [J]. *European Journal of Forest Research*, 2005, 124(4): 319.
- [12] AS N, GOKER Y, DUNDAR T. Effect of knots on the physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. *Wood Research*, 2006, 51(3): 51.
- [13] TAVANKAR F, LO MONACO A, PICCHIO R, *et al.* Healing ability and diameter growth of lime-trees (*Tilia begonifolia* Stev.) following logging wounds [J]. *European Journal of Forest Research*, 2018, 137(1): 45.
- [14] BUNTGEN U, TEGEL W, NICOLUSSI K, *et al.* 2500 Years of European climate variability and human susceptibility [J]. *Science*, 2011, 331(6017): 578.
- [15] Forest Products Laboratory. Wood handbook; wood as an engineering material [M]. Washington D C: University Press of the Pacific, 2010.
- [16] DONG Conglin, YANG Yanyan, YUAN Chengqing, *et al.* Effects of anisotropy of lignum vitae wood on its tribological performances [J]. *Composites Part B-Engineering*, 2022, 228: 109426.
- [17] LI Mingyue, CHEN Dongsheng, WANG Xueyu, *et al.* Nature of the knot and its impact on wood properties [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 197.
- [18] MULLER U, GINDL W, JERONIMIDIS G. Biomechanics of a branch-stem junction in softwood [J]. *Trees-Structure and Function*, 2006, 20(5): 643.
- [19] CANNY J. A computational approach to edge-detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679.
- [20] KANOPOULOS N, VASANTHAVADA N, BAKER R L. Design of an image edge-detection filter using the sobel operator [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1988, 23(2): 358.
- [21] 李帅帅,徐惠良,陈子谦,等.基于主应力轨迹线的熔融沉积成型填充路径优化[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2021,49(4):526.
- LI Shuaishuai, XU Huiliang, CHEN Ziqian, *et al.* Infill toolpath optimization for fused deposition modeling based on principal stress lines [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(4): 526.