

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.019

基于 3D 打印的三维短纤维增强复合材料强度预测分析

李凌岩¹, 周金宇², 马馨远³

(1. 江苏理工学院机械工程学院, 江苏常州 213001; 2. 金陵科技学院机电工程学院, 南京 211100; 3. 同济大学汽车学院, 上海 201800)

摘要: 针对目前短纤维增强树脂基复合材料强度仍以实验和二维平面预测为主, 提出一种能真实反映纤维空间结构的三维短纤维增强复合材料强度预测模型。基于概率方法修正“混合律模型”对临界区域内纤维的作用进行详细的理论公式推导, 建立基于纤维取向、长度和体积分数等因素的三维短纤维增强复合材料强度预测模型。以短碳纤维增强尼龙复合材料为例进行强度理论预测、Abaqus 有限元仿真分析和拉伸试验。结果表明, 理论预测值比仿真值更接近试验值, 且与试验值误差在 10% 之内, 误差较小, 吻合较好。说明建立的三维短纤维增强复合材料强度预测模型精确合理。科学准确地预测三维短纤维增强复合材料的强度, 可为短纤维增强复合材料 3D 打印件的设计与制造提供理论依据。

关键词: 短纤维增强复合材料; 强度; 预测; 3D 打印

中图分类号: TH145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0109-07

Strength Prediction and Analysis of Short Fiber Reinforced Composites based on 3D Printing

Li Lingyan¹, Zhou Jinyu², Ma Xinyuan³

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211100, China; 3. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract : Aiming at the fact that the strength of short fiber reinforced resin matrix composites is still mainly based on experiment and two-dimensional plane prediction, a strength prediction model of three-dimensional short fiber reinforced composites which can truly reflect the fiber spatial structure was proposed. Based on the probability method, the modified “mixing law model” was used to deduce the detailed theoretical formula of the effect of fibers in the critical region, and the strength prediction model of three-dimensional short fiber reinforced composites based on fiber orientation, length and volume fraction was established. Taking short carbon fiber reinforced nylon composites as example, strength theoretical prediction, Abaqus finite element simulation analysis and tensile experiment were carried out. The results show that the theoretical prediction value is closer to the experimental value than the simulation value, and the error with the experimental value is within 10%, the error is small and the results are in good agreement. It shows that the strength prediction model of three-dimensional short fiber reinforced composites is accurate and reasonable. Scientific and accurate strength prediction of three-dimensional short fiber reinforced composites can provide a theoretical basis for the design and manufacture of three-dimensional prints of short fiber reinforced composites.

Keywords : short fiber reinforced composite ; strength ; prediction ; 3D printing

短纤维增强树脂基复合材料由短纤维和树脂基体按照一定的配比混合而成, 随机分布的短纤维是复合材料的主要成分, 是承受载荷的重要部分, 树脂基体则保持复合材料的完整性。短纤维增强复合材料具有比强度高、比刚度高、抗疲劳性能好、耐

腐蚀、可设计性高等众多优点, 被广泛用于航天航空、汽车、船舶、风电等领域。短纤维增强复合材料微观结构错综复杂, 科学准确地预测出短纤维增强复合材料的力学性能对短纤维增强复合材料的广泛应用、改善设计和减少材料浪费具有里程碑的意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52075232), 江苏省自然科学基金项目 (BK20201112), 江苏省研究生实践创新项目 (SJCX20_1042)

通信作者: 周金宇, 博士, 教授, 从事结构可靠性、机械疲劳、现代设计方法研究工作

收稿日期: 2021-11-01

引用格式: 李凌岩, 周金宇, 马馨远. 基于 3D 打印的三维短纤维增强复合材料强度预测分析 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(1):109-115.

Li Lingyan, Zhou Jinyu, Ma Xinyuan. Strength prediction and analysis of short fiber reinforced composites based on 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):109-115.

目前,绝大多数情况下都是采用实验方法测试短纤维增强复合材料的力学性能,需要大量的时间和成本,且缺乏物理内涵,因此建立三维随机分布短纤维增强复合材料强度理论预测模型尤为重要。

短纤维增强复合材料的强度预测是复合材料领域研究的重点之一。Kelly等^[1]和Bowye等^[2]提出的修正混合律模型是预测非连续纤维增强复合材料强度的两个常用模型。Fukuda等^[3]采用概率的方法研究纤维长度和取向分布对短纤维增强复合材料强度的影响。Zhu等^[4]考虑纤维和基体位移变形的不均匀性、残余应力、纤维弥散强化和基体中错位密度等因素,提出了一种分析随机取向短纤维增强复合材料强度的模型,用于预测复合材料强度。张立群等^[5]首次基于Cox剪滞法和复合材料结构特点研究了橡胶/短纤维复合材料在较宽纤维体积和长度范围内的拉伸强度规律,提出了新的混合规律来预测橡胶/短纤维复合材料的纵向拉伸强度^[6-10]。

至今为止,对短纤维增强复合材料的强度理论预测仍然处于探索阶段,绝大多数的预测仍以实验和二维平面预测为主,但随着3D打印技术的快速发展,纤维取向在三维空间内的制造成形已成为可能,故笔者考虑临界区域内短纤维取向、长度和体积分数等因素建立三维短纤维增强复合材料强度预测模型,可以节省大量的时间和成本,更好地应用于航空航天、军工等领域^[11-15]。

1 短纤维增强复合材料强度预测模型

1.1 混合律模型

混合律模型通常用来预测单向连续纤维增强复合材料的强度,认为纤维和树脂基体为等应变,混合律模型计算公式如式(1)所示。

$$\sigma_{cu} = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (1)$$

式中: σ_{cu} ——复合材料强度;

σ_f ——纤维强度;

σ_m ——树脂基体强度;

V_f ——纤维的体积分数。

若材料为单向不连续的短纤维增强复合材料,式(1)可以修正为式(2)和式(3)。

$$\sigma_{cu} = \sigma_f V_f F(l_c/L) + \sigma_m (1 - V_f) \quad (2)$$

式中: l_c ——纤维的临界长度,是指纤维增强复合材料中刚能使材料具有原纤维拉伸强度时的纤维长度;

L ——纤维的平均长度。

$$F(l_c/L) = \begin{cases} 1 - \frac{l_c}{2L}, L \geq l_c \\ \frac{L}{2l_c}, L < l_c \end{cases} \quad (3)$$

l_c 可根据文献[16]求得,如式(4)所示。

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_y} \quad (4)$$

式中: d ——纤维直径;

τ_y ——树脂基体的剪切强度。

可根据文献[17]求得树脂基体的剪切强度,如式(5)所示。

$$\tau_y = \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

1.2 临界区域及概率理论

Fukuda等^[3]在预测单向短纤维增强复合材料的强度时提出了“临界区域”的概念。临界区域由一对垂直于加载方向相距 βL 的平面确定, β 为临界区域系数, $0 \leq \beta \leq 1$ 。如果纤维贯穿临界区域宽度则称为桥接纤维,如果纤维的末端位于临界区域内,则称为终止纤维。终止纤维对该区域不能起到增强作用,其强度相当于树脂基体强度。图1为短纤维的分类及表示。如图1a所示,1,2,3为终止纤维,4为桥接纤维;如图1b所示,长度为 l 的短纤维在空间各轴上的长度如式(6)所示。

$$\begin{cases} l_x = l \sin \theta \cos \varphi \\ l_y = l \sin \theta \sin \varphi \\ l_z = l \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: l_x ——长度为 l 的纤维 x 轴的长度;

l_y ——长度为 l 的纤维 y 轴的长度;

l_z ——长度为 l 的纤维 z 轴的长度;

θ ——纤维与 z 轴夹角;

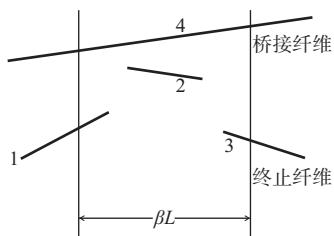
φ ——纤维与 x 轴夹角。

如图1c所示,长度为 l 的短纤维的临界角 θ_c 满足式(7)。

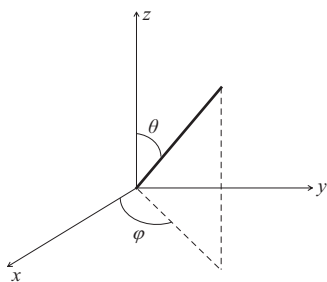
$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{\beta L}{l} \quad (7)$$

若 $\beta > 1$, θ_c 无法定义,纤维为终止纤维;若纤维的欧拉角 θ 为大于临界角度的锐角,纤维为终止纤维。若 $0 \leq \beta \leq 1$ 且纤维取向角小于临界角度时,纤维为终止纤维的概率为临界区域宽度与纤维在临界宽度方向上长度值之比。那么长度为 l ,欧拉角为 θ 的单根纤维为终止纤维的概率 P_c 由式(8)计算。

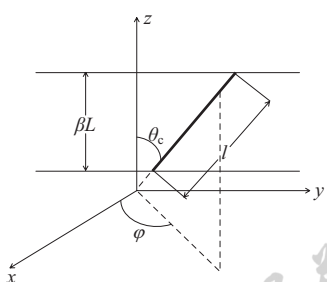
$$P_c = \begin{cases} \frac{\beta l}{l_z} = \frac{\beta}{\cos \theta}, 0 \leq \theta \leq \theta_c \cap 0 < \beta \leq 1 \\ 1, \theta_c < \theta \leq \frac{\pi}{2} \cup \beta > 1 \end{cases} \quad (8)$$



(a)



(b)



(c)

a—短纤维的分类; b—短纤维的空间表示; c—临界角度

图1 短纤维的分类及表示

单根桥接纤维概率 P_b 由式 (9) 计算。

$$P_b = 1 - P_c \quad (9)$$

由式 (8)、式 (9) 可知桥接纤维和终止纤维的概率可用 β 来表征。考虑纤维取向分布的不确定性, 引入短纤维取向的概率密度函数 $g(\theta)$, $f(\varphi)$ 满足式 (10) 和式 (11)。

$$\int_0^{\pi/2} g(\theta) d\theta = 1 \quad (10)$$

$$\int_0^{\pi} f(\varphi) d\varphi = 1 \quad (11)$$

1.3 短纤维的应力分布

图2为短纤维应力分布图。根据图2, 由式 (12) 得纤维的平均拉伸应力 σ_{f0} 。

$$\sigma_{f0} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_f(z) dz = \begin{cases} \sigma_f (1 - \frac{l_c}{2l}), l \geq l_c \\ \sigma_f \frac{l}{2l_c}, l < l_c \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\sigma_f(z)$ ——平行于拉伸应力方向上的纤维应力分布函数。

图3位欧拉角为 θ , φ 的纤维施加应力情况。如图3所示, 当短纤维与 z 轴成夹角 θ , 与 x 轴成夹

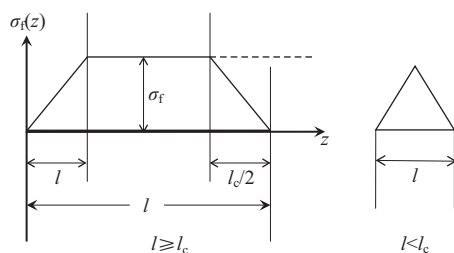


图2 纤维应力分布简化图

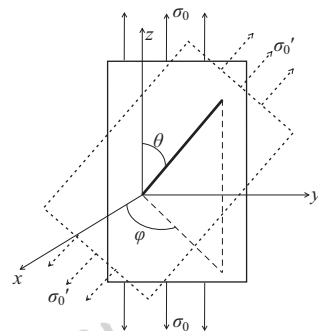


图3 欧拉角为 θ , φ 的纤维施加应力情况
角 φ 时, 沿 z 轴施加拉力 σ_0 , 根据三维应力转轴公式得沿短纤维方向上正应力 σ'_0 , 如式 (13) 所示。

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \cos^2 \theta \cos^2 \varphi \quad (13)$$

忽略剪应力和横截面积变化的影响, 则纤维在拉伸方向上的载荷 F_z 如式 (14) 所示。

$$F_z = A_f \sigma_{f0} \cos^3 \theta \cos^2 \varphi \quad (14)$$

式中: A_f ——纤维的横截面积。

1.4 随机取向短纤维增强复合材料的强度预测

假设短纤维增强复合材料试件为长方体, 长方体的边长分别为 a , b , c , 且 c 与 x 轴平行, 那么纤维体积分数 V_f 可表示为式 (15)。

$$V_f = \frac{NA_f l}{abc} \quad (15)$$

式中: N ——纤维的总数。

纤维在 z 轴的平均长度 L_z 由式 (16) 计算。

$$L_z = \int_0^{\pi/2} l \cos \theta g(\theta) d\theta = l \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cos \theta d\theta \quad (16)$$

若 NL_z 为所有纤维在 z 轴上的总长度, 那么用总长度除以试件的长度 c , 得试件中垂直于 x 轴截面的纤维平均数 N_c 如式 (17) 所示。

$$N_c = \frac{NL_z}{c} = \frac{abV_f}{A_f} \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cos \theta d\theta \quad (17)$$

假设临界区域内纤维体积分数不变, 求得截面内任意纤维为终止纤维和桥接纤维的概率 q_c 和 q_b , 如式 (18) 和式 (19) 所示。

$$q_c = \int_0^{\theta_0} \frac{\beta}{\cos \theta} g(\theta) d\theta + \int_{\theta_0}^{\pi/2} g(\theta) d\theta \quad (18)$$

$$q_b = \int_0^{\theta_0} (1 - \frac{\beta}{\cos \theta}) g(\theta) d\theta \quad (19)$$

那么截面内终止纤维数 N_e 和桥接纤维数 N_b 表示为式 (20) 和式 (21)。

$$N_e = N_e q_e \quad (20)$$

$$N_b = N_e q_b \quad (21)$$

由于 N_e 只是根据一个截面求得并不精确,鉴于以下计算仅用到桥接纤维的数量,故在后续计算中不考虑 N_e 的影响。由式 (14) 可求临界区域内桥接纤维所受 z 方向的载荷 F_b ,如式 (22) 所示。

$$\begin{aligned} F_b &= \int_0^{\theta_0} \int_0^{\pi} F_z g(\theta) f(\varphi) d\theta d\varphi \\ &= \int_0^{\theta_0} \int_0^{\pi} A_f \sigma_{f0} \cos^3 \theta \cos^2 \varphi g(\theta) f(\varphi) d\theta d\varphi \end{aligned} \quad (22)$$

由式 (23) 求得所有桥接纤维在 z 方向的载荷 F_T 。

$$F_T = N_b F_b \quad (23)$$

由于终止纤维对材料不能起到增强作用,故其强度相当于基体强度,由式 (1) 可知短纤维增强复合材料的强度 σ_{cu} 包括桥接纤维强度、终止纤维强度和树脂基体的强度,故可得式 (24)。

$$\begin{aligned} \sigma_{cu} &= \frac{F_T}{ab} + \sigma_m(1 - V_f) + \sigma_m V_e = \\ &= \frac{F_T}{ab} + \sigma_m(1 - V_f + V_e) \end{aligned} \quad (24)$$

当 $l \geq l_c$ 时,可得式 (25)。

$$\begin{aligned} \sigma_{cu} &= \frac{F_T}{ab} + \sigma_m(1 - V_f + V_e) = \\ &= \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cos \theta d\theta \times \\ &\quad \int_0^{\theta_0} g(\theta) \cos^3 \theta d\theta \int_0^{\theta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\cos \theta}\right) g(\theta) d\theta \times \\ &\quad \int_0^{\pi} \cos^2 \varphi f(\varphi) d\varphi + \sigma_m(1 - V_f + V_e) \end{aligned} \quad (25)$$

当 $l < l_c$ 时,可得式 (26)

$$\begin{aligned} \sigma_{cu} &= \frac{F_T}{ab} + \sigma_m(1 - V_f + V_e) = \\ &= \sigma_f V_f \left(\frac{l}{2l_c}\right) \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cos \theta d\theta \times \\ &\quad \int_0^{\theta_0} g(\theta) \cos^3 \theta d\theta \int_0^{\theta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\cos \theta}\right) g(\theta) d\theta \times \\ &\quad \int_0^{\pi} \cos^2 \varphi f(\varphi) d\varphi + \sigma_m(1 - V_f + V_e) \end{aligned} \quad (26)$$

2 算例分析

为验证建立的理论模型,以短碳纤维增强尼龙复合材料进行理论预测、仿真分析和拉伸试验。短碳纤维、尼龙材料各自性质参数列于表 1、表 2。

表 1 碳纤维性质参数

参 数	数 值
纤维直径 /mm	7.5
长度 /mm	100
拉伸强度 /MPa	4300
拉伸弹性模量 /GPa	250
泊松比	0.1

表 2 尼龙性质参数

参 数	数 值
拉伸强度 /MPa	50
拉伸弹性模量 /GPa	1.42
泊松比	0.4

短纤维的欧拉角 θ , φ 概率密度函数公式分别如式 (27) 和式 (28) 所示。

$$g(\theta) = 0.06e^{-0.06\theta}, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

$$f(\varphi) = \frac{1}{\pi}, 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (28)$$

2.1 短纤维增强复合材料细观建模

采用随机序列吸附法 (RSA) 来数值生成随机分布的短纤维增强复合材料的几何结构。采用 RSA 时,逐个将位置和取向都随机的短纤维添加到树脂基体中。在三维空间内将短纤维设为圆柱体。首先根据指定函数随机生成纤维中心点 $C(x_0, y_0, z_0)$,其次根据式 (27)、式 (28) 生成取向角 θ, φ ,最后由纤维半径 r 和纤维长度 l 生成三维短纤维,将生成的纤维逐渐加入到树脂基体中,保证新加入的纤维不能与之前树脂基体已接受的纤维相交,直到满足纤维体积分数条件,流程图如图 4 所示。

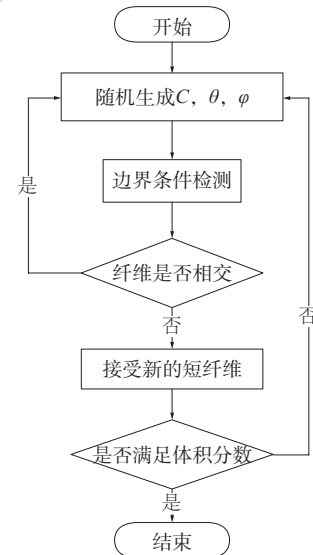


图 4 短纤维增强复合材料建模流程图

2.2 短纤维增强复合材料的数值仿真

利用 RSA 分别生成尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, 纤维体积分数为 5%, 10%, 15%, 20% 的短纤维增强复合材料模型,其中纤维直径为 $7.5 \mu\text{m}$, 纤维长度为 $100 \mu\text{m}$ 。短纤维增强复合材料的短纤维增强相和树脂基体相的几何数据通过 Matlab 程序生成,利用 Python 脚本文件导入有限元软件 Abaqus 中。纤维体积分数为 5% 的短纤维增强复合材料模型如图 5 所示。

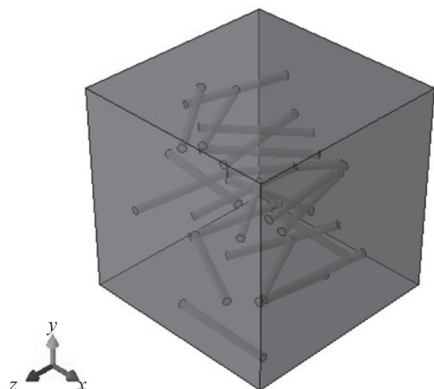


图5 有限元模型图

在Abaqus中对短纤维增强复合材料模型进行网格划分,如图6所示。

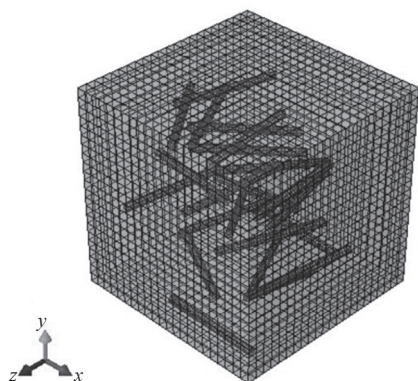


图6 划分的网格图

利用有限元软件Abaqus仿真,通过对短纤维增强复合材料模型的 z 轴一端施加应变 $\varepsilon=0.01$,另一端进行6个自由度全约束,并创建参考点(与模型建立相应的耦合关系)进行仿真分析。在后处理中,输出参考点的力-位移曲线转化为参考点的应力-应变曲线,即短纤维增强复合材料 z 轴的等效应力-应变曲线。短纤维增强复合材料应力云图如图7所示。

从应力云图中可以看出短纤维是复合材料中

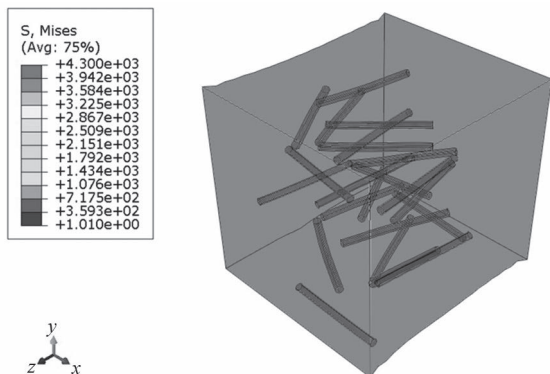


图7 模型应力云图

主要承载组分,基体只是起到传递力的作用。图8是短纤维增强复合材料 z 轴等效应力-应变曲线,从图8可以看出曲线呈双线段特征,应力达到一定值时,曲线开始转折,折点即短纤维增强复合材料失效的起始点,故此点的应力值为短纤维增强复合材料的初始失效强度,即52.1626 MPa为纤维体积分数为5%的短纤维增强复合材料强度值。

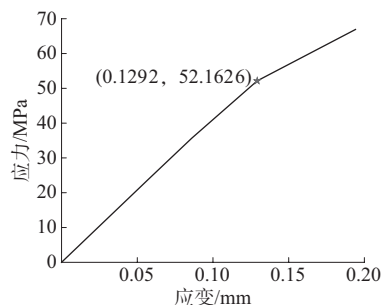


图8 短纤维增强复合材料模型等效应力-应变图

2.3 短纤维增强复合材料3D打印件拉伸测试

利用熔融沉积成型3D打印技术,打印出不同体积分数的短纤维增强尼龙复合材料试样,试样尺寸如图9所示。

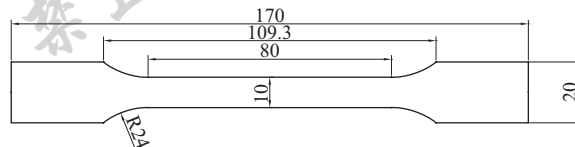


图9 试样的形状和尺寸

对试样进行测试前,需使用AB胶在试样两端粘贴加强片,如图10所示,加强片的材质一般选为铝片,厚度为2 mm,粘贴加强片前,需使用砂纸对粘贴表面进行打磨,粘贴加强片后,要立即对试样粘结表面加压力(一般为12 h左右)。

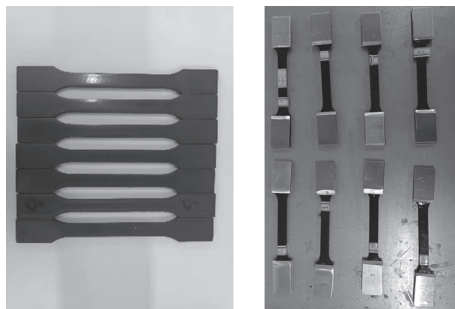
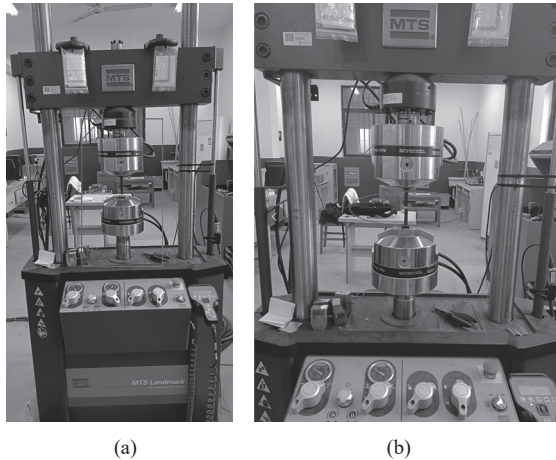


图10 试验试样示意图

通过美特斯工业系统(中国)有限公司的MTS810型万能试验机完成试样力学性能测试。打印件拉伸测试前,装夹固定在万能试验机两端,如图11a所示。以1.5 mm/min的速度进行拉伸,直到成型件断裂,如图11b所示。



a—试件的装夹; b—试件断裂

图 11 试件的装夹和断裂

2.4 结果分析

根据理论建立的三维短纤维增强复合材料强度预测模型、有限元软件和拉伸试验对不同纤维体积分数的短纤维增强复合材料的 z 轴强度进行分析,结果如图 12 所示,相应误差分析见表 3。

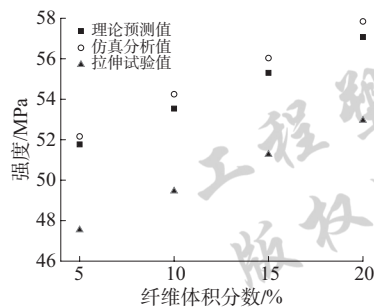


图 12 不同纤维体积分数的短纤维增强复合材料强度分析

表 3 不同纤维体积分数的短纤维增强复合材料强度分析的误差 %

纤维体积分数	理论预测与拉伸 试验值误差	仿真分析与拉伸 试验值误差
5	8.887	9.72
10	8.235	9.67
15	7.860	9.28
20	7.773	9.23

从图 12 及表 3 可以看出,理论预测值与有限元 Abaqus 仿真分析值相差不大,由于个体制造差异、试验操作方面的误差以及试验环境的变化,理论预测值与拉伸试验值存在一定的差异,但不同体积分数的纤维随机分布的三维短纤维增强复合材料强度理论预测值与拉伸试验值的误差均小于 10%,在允许范围内,且理论预测值比有限元仿真值更接近试验值,验证了三维短纤维增强复合材料强度预测模型准确性。

3 结论

(1) 通过修正混合律模型以及结合三维短纤维

空间几何特性,基于概率方法综合考虑纤维取向、长度和体积分数提出了基于 3D 打印的三维短纤维增强复合材料的强度预测模型。

(2) 对建立的模型进行验证。利用 Matlab 生成随机短纤维和基体的几何数据通过 Python 脚本导入有限元分析软件 Abaqus 中进行仿真分析,发现理论预测值与仿真分析值误差小于 10%。通过 3D 打印技术打印试件进行拉伸测试,理论预测值与拉伸试验值误差小于 10%,且比仿真结果更加接近试验值,表明建立的三维短纤维增强复合材料强度预测模型科学合理。

(3) 对三维短纤维增强复合材料强度进行预测,能为短纤维增强复合材料 3D 打印件的设计与制造提供理论指导。按需控制纤维取向、长度和体积分数使复合材料的力学性能满足实际工程需要,更好地实现短纤维增强复合材料在航天航空、汽车、船舶、风电等领域的轻量化设计和应用。

参考文献

- [1] Kelly A, Tyson W R. Tensile properties of fibre-reinforced metals:copper/tungsten and copper/molybdenum[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1965, 13(6):329–350.
- [2] Bowyer W H, Bader M G. On the re-inforcement of thermoplastics by imperfectly aligned discontinuous fibres[J]. Journal of Materials Science, 1972, 7(11):1 315–1 321.
- [3] Fukuda H, Chou T W. A probabilistic theory of the strength of short-fibre composites with variable fibre length and orientation[J]. Journal of Materials Science, 1982, 17(4):1 003–1 011.
- [4] Zhu Y T, Zong G, Manthiram A, et al. Strength analysis of random short-fibre-reinforced metal matrix composite materials[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(23):6 281–6 286.
- [5] 张立群,金日光,耿海萍,等.短纤维橡胶复合材料强度的理论研究 I 纵向拉伸强度的理论预测 [J]. 复合材料学报, 1998, 15(4):89–96.
Zhang Liqun, Jin Riguang, Geng Haiping, et al. Study on the theory of strength of short fiber/rubber composites I Prediction of longitudinal tensile strength[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(4):89–96.
- [6] 王金山,顾伯勤,周剑锋,等.短纤维增强弹性体复合材料的强度预测 [J]. 材料导报, 2011, 25(12):134–137.
Wang Jinshan, Gu Boqin, Zhou Jianfeng, et al. Prediction of tensile strength of short fiber reinforced elastomer composites[J]. Materials Review, 2011, 25(12):134–137.
- [7] 孙爱芳,刘敏珊,董其伍.短切纤维增强复合材料拉伸强度的预测 [J]. 材料研究学报, 2008, 22(3):333–336.
Sun Aifang, Liu Minshan, Dong Qiwu. Prediction of tensile strength for short-fiber-reinforced composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(3):333–336.

- [8] Zhang S F, Wang H, Zhang L, et al. Statistical correlation between elastic properties of plain-weave composite and its influence on structure reliability[J]. *Composite Structures*, 2018, 200:939–945.
- [9] Li Y, Li W G, Deng Y, et al. Temperature-dependent longitudinal tensile strength model for short-fiber-reinforced polymer composites considering fiber orientation and fiber length distribution[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(17):12 190–12 202.
- [10] Mortazavian S, Fatemi A. Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2015, 72:116–129.
- [11] Bergek A, Berggren C, KITE Research Group. The impact of environmental policy instruments on innovation:A review of energy and automotive industry studies[J]. *Ecological Economics*, 2014, 106:112–123.
- [12] Ioannis I, Alma H, Inna G, et al. Micro-mechanical parameters in short fibre composite[J]. *Applied Composite Materials*, 2014, 21(1):197–211.
- [13] Chang Baoning, Gu Junfeng, Long Zhiqiang, et al. Effects of temperature and fiber orientation on the tensile behavior of short carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. *Polymer Composites*, 2020, 42(2):597–607.
- [14] 秦计生. 考虑纤维方向的玻纤增强仪表板结构及碰撞分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- Qin Jisheng. Research on structure and collision analysis of glass fiber reinforced instrument panel considering fiber direction[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [15] 雷卫华,陈可平. 短切芳纶纤维/聚硅氧烷-甲基丙烯酸酯复合材料的结构与性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5):1 398–1 406.
- Lei Weihua, Chen Keping. Structure and properties of short-cutted aramid fiber/polysiloxane-zinc dimethylate composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5):1 398–1 406.
- [16] Agarwal B D, Broutman L J, Chandrashekara K. Analysis and performance of fiber composites[M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [17] 方圆,马其华,胡润超,等. 钢/碳纤维复合材料混合管式全地形车架设计[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(8):73–77, 81.
- Fang Yuan, Ma Qihua, Hu Runchao, et al. Design of steel/CFRP hybrid tubular all-terrain vehicle frame[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(8):73–77, 81.

(上接第 102 页)

- [9] 杨少增,李国富,刘剑,等. 多段位圆弧状导流管抽芯机构设计[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(1):85–87.
- Yang Shaozeng, Li Guofu, Liu Jian, et al. Design of pulling mechanism for multi-arc-shaped guide tube[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(1):85–87.
- [10] 刘建雄,吴正宇,余贵华,等. 带弯芯塑料三通管成型工艺及抽芯机构优化设计[J]. *工程塑料应用*, 2006, 34(10):28–31.
- Liu Jianxiong, Wu Zhengyu, Yu Guihua, et al. Molding technology of three-way plastic tube with flexural core and optimum of its core-pulling mechanism[J]. *Engineering Plastics Application*, 2006, 34(10):28–31.
- [11] 聂艳平,许孔联,贺柳操. 头直中弯塑管油齿驱动三向抽芯机构注塑模具[J]. *塑料*, 2019, 48(6):71–75.
- Nie Yanping, Xu Konglian, He Liucuo. Injection mould design with three-directional core pulling mechanism driven by cylinder rack for a straight-headed and medium-bend plastic pipe[J]. *Plastics*, 2019, 48(6):71–75.
- [12] 李春玲. 离心泵双弯合流管圆弧隧道抽芯机构注塑模设计[J]. *塑料工业*, 2020, 48(9):66–70.
- Li Chunling. Design of the injection mould with the circular arc and the tunnel core pulling mechanisms of the double bend combined pipe of the centrifugal pump[J]. *China Plastics Industry*, 2020, 48(9):66–70.
- [13] 芦亚萍. 塑料成型工艺与模具设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
- Lu Yaping. Plastic molding process and die design[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.
- [14] 任长春,窦宝林. 浇口偏置笔记本电脑外壳注塑模设计[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(8):64–67.
- Ren Changchun, Dou Baolin. Design of injection mold with offset gate for notebook computer cover[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(8):64–67.
- [15] 高汉华,何冰强. 塑料成型工艺与模具设计[M]. 2版. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
- GaoHanhua, He Bingqiang. Plastic molding process and die design [M]. 2nd ed. Dalian:Dalian University of Technology Press, 2009.
- [16] 罗惠. 汽车热风歧管大角度圆弧管脱模机构与注射模设计[J]. *模具工业*, 2016, 42(11):44–47.
- Luo Hui. Design of demoulding mechanism and injection mould for automobile hot air manifold with large angle circular arc pipe[J]. *Die & Mould Industry*, 2016, 42(11):44–47.