http://pmse.scu.edu.cn

基于响应曲面法的连续竹纤维/聚乙烯复合丝材成形工艺参数优化

祖梦幻, 李 倩, 陈雅妮, 贾子文, 章 煌, 王传洋, 乔海玉
(苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215021)

摘要:针对天然植物纤维与热塑性材料成形过程中纤维长度受限的难点,文中采用 3D 打印的方法实现了连续竹纤维(CBF)与聚乙烯(PE)的快速高质量成形。针对亲水 CBF 与疏水 PE 之间的界面结合较差问题,采用碱处理对 CBF 进行表面改性以增强 CBF 与 PE 之间的相容性,其次采用熔融沉积技术(FDM)打印一步成型 CBF/PE 复合材料。为了探究成形工艺参数对复合丝材力学性能的影响,利用响应曲面法构建了拉伸强度随挤出工艺参数变化的数学模型,探究了 CBF 碱处理时间、CBF 直径及挤出温度对复合丝材拉伸强度的影响及 3 个因素间的交互影响。结果表明,增加碱处理时间,T-CBF 直径和挤出温度,拉伸强度先增大后减小。通过实验验证了所得模型的可靠性,并获得 CBF/PE 复合丝材成型过程中的最佳工艺窗口,即碱处理时间为 3.18 h,T-CBF 直径为 0.19 mm 以及挤出温度为 190.34 ℃,预测的拉伸强度为 16.74 MPa。

关键词:复合材料;连续竹纤维;熔融沉积技术;响应曲面法;工艺参数优化
中图分类号:TB332 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7555(2025)10-0087-11

纤维增强材料是应用最广泛、用量最大的高性能复合材料,因其独特的结构和优异的特性在航空航天[1]、汽车制造[2,3]、海洋工程[4]、化工设备、特殊形状和复杂结构制造[5]领域中得到广泛应用。传统纤维增强材料通常以玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等不可再生来源的纤维为增强材料。与传统复合材料相比,植物纤维复合材料在生物降解性、生态友好性、成本、实用性、低密度等方面具有显著优势。在食品包装[6]、汽车/飞机内饰[7]、建筑景观[8]、一次性用品[9]等领域的应用得到了公众的接受和认可。竹材是一种重要的天然纤维资源,我国作为世界上竹资源最丰富的国家,竹制品产量及出口量均居世界首位[10]。竹纤维的比强度和比模量分别为 600 MPa·cm^3/g 和 48~89 GPa·cm^3/g,比钢材高 3~4 倍,接近玻璃纤维,而价格只有玻璃纤维的 1/10[11]。同等细度条件下,纤维长度越长,其长径比越大,更有利于其在复合材料中发挥天然纤维的连续增强效应。本文将能最大限度传递应力的纤维称为连续纤维(Continuous bamboo fiber,CBF)。

3D 打印是一种通过计算机辅助手段设计虚拟模型,然后将其数字化切片,最后转化为物理实体的新兴成型技术[12,13],适用于热塑性聚合物的成形,具有污染小、成本低、制造简单等优点。相比于传统的注塑、热压成型工艺,熔融沉积成型工艺材料利用率高,不依赖模具,制造成本低,为植物纤维增强复合材料提供了更多的可能性[14~18]。

综上,本文以 CBF 为增强材料,选取目前世界上产量最大的热塑性树脂之一的聚乙烯(Polyethylene,PE)作为基体材料,采用熔融沉积技术(Fused deposition modeling,FDM)打印一步成型 CBF/PE 复

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0189
收稿日期: 2024-11-14
基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金资助项目(23KJB460028); 中国博士后科学基金(2023M730350)
通讯联系人: 乔海玉, 主要从事植物纤维及复合材料成型技术、成形过程的模拟仿真与缺陷检测研究, E-mail: hyqiao@suda.edu.cn

合材料。由于亲水 CBF 与疏水聚合物 PE 之间的界面结合较差,本文首先对 CBF 进行表面改性以增强 CBF 与 PE 之间的相容性,然后采用 FDM 打印一步成型 CBF/PE 复合材料,并对挤出和打印成型过程中各种工艺参数进行研究以获得较高性能的 CBF/PE 复合材料。本课题研究有利于促进竹材高效率、全组分、多领域的利用,同时降低塑料的白色污染。

1 实验部分

1.1 原料和设备

PE 微管:外径为 2 mm,内径为 1 mm,泰州市宝利来塑胶制品厂;CBF:直径为 0.15~0.3 mm,长度为 90 cm,市售;氢氧化钠(NaOH):浓度为 2.5 mol/L,南京化学试剂股份有限公司;亚硫酸钠(Na_2SO_3):浓度为 0.4 mol/L,国药集团化学试剂公司。

3D 打印机:T3040 型,深圳市大昆三维科技有限公司;钨灯丝扫描电镜:VEGA3 XMH 型,捷克 TESCAN 公司;电子万能试验机:TY8000-A 型,江苏天源试验设备有限公司。

1.2 CBF/PE 复合样条的 3D 打印成形

CBF/PE 复合丝材的制备流程主要包括 CBF 碱处理、CBF/PE 复合丝材的制备和 CBF/PE 复合样条打印。

1.2.1 碱处理 CBF 的制备:首先,将竹纤维放入 1 L NaOH 和 Na_2SO_3 混合溶液中,温度为 80 ℃,在磁力搅拌器下搅拌 0~6 h 后取出,用蒸馏水多次冲洗 CBF 后,将其放入烘干箱中,烘箱温度为 75 ℃,干燥时间为 12 h,得到碱处理后的 CBF(T-CBF),未处理的 CBF 记作 U-CBF。碱处理的作用是溶解掉半纤维素、木质素等物质,以达到增大 CBF 与 PE 基质接触面积和增加 CBF 表面粗糙程度的目的,从而提高 CBF 与 PE 的黏附能力。

1.2.2 CBF/PE 复合丝材的制备:将 U-CBF 和 T-CBF 分别放入 PE 空心管中作为 FDM 打印原料,采用打印机挤出复合丝材。CBF 加入 PE 空心管一起被送入打印机送料口后,如 Fig.1(b)所示,由传动齿轮将其送入加热块熔融,后由喷嘴挤出得到复合丝材。

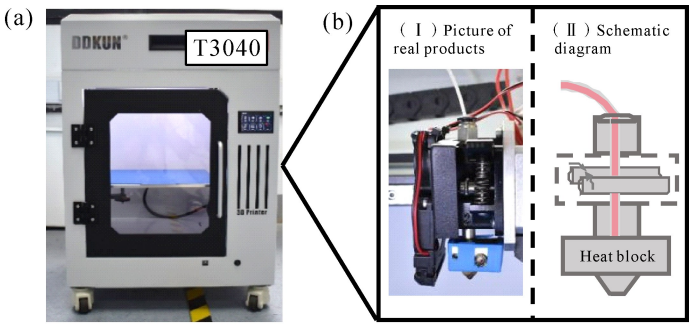


Fig. 1 3D printer: (a) overall appearance drawing; (b) main printing parts and schematic

1.2.3 CBF/PE 复合样条的打印:FDM 打印基本流程包括数字建模、制造准备、打印样件及后处理。首先采用计算机辅助设计软件 Solidworks 2019 建立模型,其尺寸为 80 mm ×10 mm ×3 mm,如 Fig.2(a)所示,然后将其导入 Simplify 3D 4.0.1 切片软件进行切片,切片后的路径如 Fig.2(b)所示,生成的代码用于控制 FDM 打印。

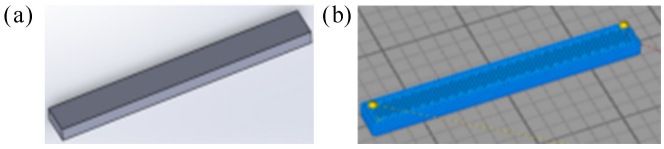


Fig. 2 Composite spline printing process: (a) model building; (b) slicing process

1.3　测试与表征

利用响应曲面法(Response surface methodology,RSM)构建了拉伸强度随挤出工艺参数,即 CBF 碱处理时间、CBF 直径及挤出温度,变化的数学模型,并采用三因素五水平的中心组合设计方法对复合丝材的挤出进行实验方案设计,探究 3 个因素对复合丝材拉伸强度的影响及其之间的交互影响。利用响应曲面法预测模型预测的复合丝材拉伸强度与实验结果的实际值相比,误差较小,最终基于可靠、准确的实验模型,以最大拉伸强度为目标,获得 CBF/PE 复合丝材成型过程中最优的工艺参数组合。

2　响应曲面法设计

2.1　设计原理

RSM 是一种工艺参数的优化与建模分析方法,其原理是在合理的实验设计方法的基础上进行实验,根据实验结果建立因素与响应值之间的函数关系,最终获得最优参数水平[19]。RSM 考虑了因素间的相互影响,同时对实验点所在区域进行连续性分析,弥补了正交实验中无法给出区域内因素和响应值间回归方程的不足,并成功在整体范围内获得因素和响应值的最优参数。因此,运用曲面响应法探究复合丝材成型过程中最佳工艺参数及其交互影响能够有效减小实验量,降低随机误差,从而进一步降低实验的时间成本和失败率。

本文采用 RSM 对复合丝材成型过程中多因素水平进行分析,选取中心组合设计方法进行响应曲面拟合,实验点示意图如 Fig.3 所示。

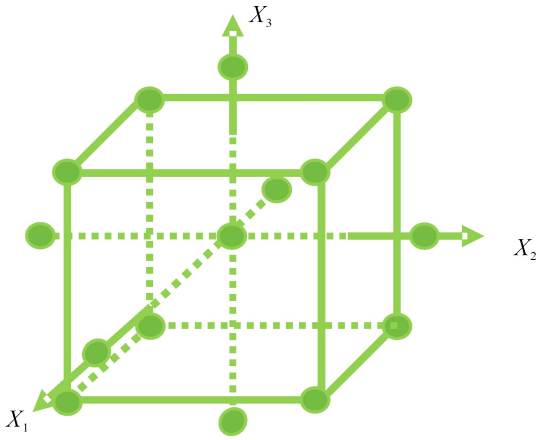


Fig. 3　Response surface method center combination design experiment point diagram

首先构建因素与响应之间的数学分析模型,并建立多元二次回归方程进行拟合。假设影响因素为 x_1, x_2, x_3,…, x_n,响应量为 y_1, y_2, y_3,…, y_n,得到影响因素与响应值直径的一阶响应模型为

$$y=\partial_0+\partial_1\beta_1+\partial_2\beta_2+\cdots+\partial_m\beta_m+\varepsilon \tag{1}$$

式中:$\beta_i=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$,　$i=1,2,\cdots,m$,m——实验的次数;∂_i——模型系数;ε——系统的观测误差。如果实验过程中存在多个自变量,实验点数为 k 时,则多重响应值可表示为

$$y=x\bar{\partial}+\bar{\varepsilon} \tag{2}$$

其中,

$$y=\begin{pmatrix}y_1\\y_2\\\vdots\\y_k\end{pmatrix},x=\begin{pmatrix}1&\beta_{11}&\cdots&\beta_{1m}\\1&\beta_{21}&\cdots&\beta_{2m}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\1&\beta_{k1}&\cdots&\beta_{km}\end{pmatrix},\bar{\partial}=\begin{pmatrix}\alpha_1\\\alpha_2\\\vdots\\\alpha_k\end{pmatrix},\bar{\varepsilon}=\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\\varepsilon_2\\\vdots\\\varepsilon_k\end{pmatrix} \tag{3}$$

因而得到矩阵形式的方程为

$$\begin{pmatrix}y_1\\y_2\\\vdots\\y_k\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&\beta_{11}&\cdots&\beta_{1m}\\1&\beta_{21}&\cdots&\beta_{2m}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\1&\beta_{k1}&\cdots&\beta_{km}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\alpha_1\\\alpha_2\\\vdots\\\alpha_k\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\\varepsilon_2\\\vdots\\\varepsilon_k\end{pmatrix} \tag{4}$$

式中:β_{ij}——第 j 个组在第 i 个变量上的值。而实际运用中通常需要考虑各个影响因素间的相互影响,所以需要采用二阶数学模型进行非线性拟合,这个时候的拟合相关系数高,模型能进行有效地预测,所采用的响应数学关系式为

$$y=\partial_0+\sum_{i=1}^{m}\partial_i x_i+\sum_{i=1}^{m}\partial_{ii}x_i^2+\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{i=2}^{m}\partial_{ij}x_i x_j+\varepsilon \tag{5}$$

2.2　实验设计表

采用三因素五水平的中心组合设计方法对 T-CBF/PE 复合丝材挤出进行实验方案设计,三因素选取碱处理时间、T-CBF 直径和挤出温度,五水平如 Tab.1 所示。使用 Design-expert12.0 软件生成实验组合,每个组合进行 3 次实验,取平均值作为组合的实验结果。

Tab. 1 Three-factor and five-level RSM coding table

Factor	Symbol	Unit	Level				
			−2	−1	0	1	2
Alkali treatment time	A	h	1	2	3	4	5
T-CBF diameter	B	mm	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24
Extrusion temperature	C	℃	180	185	190	195	200

3 结果和讨论

3.1 3D 打印结果

采用钨灯丝扫描电镜观察材料的表面形貌，Fig.4(a，b)为 CBF 碱处理前后的宏观形貌图。可以看出，经碱处理后，竹纤维颜色加深。Fig.4(c)表明，引入 CBF 不影响丝材的挤出性能，同时 CBF 被 PE 均匀包裹。Fig.4(d)为 T-CBF/PE 复合样条的图片，可以看出，T-CBF/PE 复合丝材能够采用 3D 打印制备复合样条。

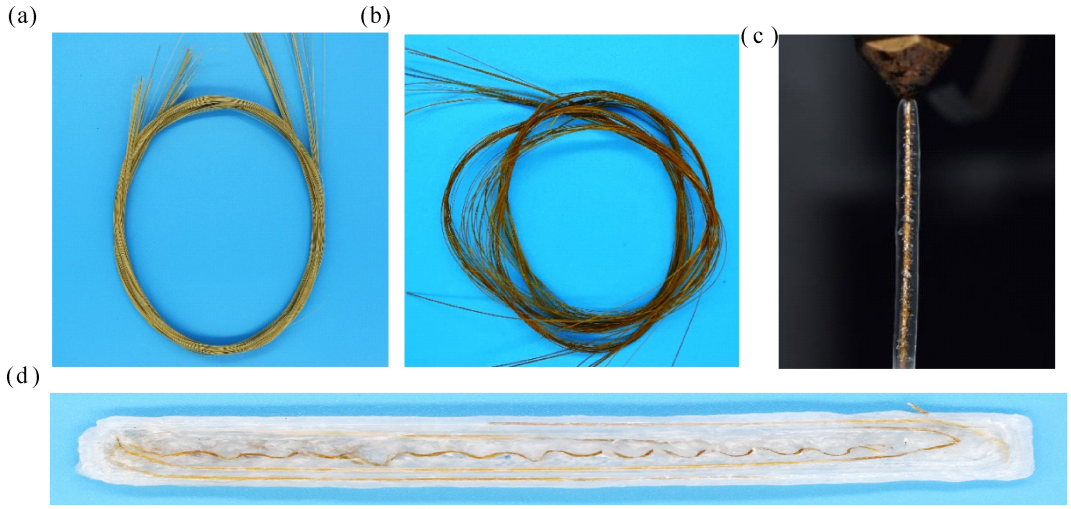


Fig. 4 (a) U-CBF photo graph; (b) T-CBF photo graph; (c) T-CBF/PE composite wire extrusion diagram; (d) T-CBF/PE composite spline

3.2 响应曲面实验结果分析

根据软件生成的参数组合进行实验，并由拉伸强度方程得出材料的实际拉伸强度，Tab.2 是基于上述实验骤得到的实验组合及实际拉伸试验结果。

Tab. 2　Experimental scheme design and experimental results of response surface method

No.	A:Alkali treatment time/h	B:T-CBF diameter/mm	C:Extrusion temperature/℃	Tensile strength/MPa
1	3	0.18	200	14.82
2	1	0.18	190	9.28
3	3	0.18	180	13.27
4	4	0.21	195	13.17
5	3	0.18	190	17.81
6	3	0.24	190	14.01
7	3	0.18	200	13.51
8	2	0.21	185	12.93
9	3	0.12	190	11.94
10	1	0.18	190	7.31
11	3	0.18	190	15.54
12	3	0.18	190	16.91
13	4	0.21	185	13.69
14	5	0.18	190	10.58
15	3	0.18	190	16.72
16	2	0.15	185	11.02
17	3	0.12	190	11.53
18	3	0.24	190	13.89
19	3	0.18	180	13.09
20	5	0.18	190	10.94
21	3	0.18	190	14.97
22	2	0.21	195	12.68
23	3	0.18	190	18.19
24	4	0.15	185	14.61
25	2	0.15	195	10.86
26	4	0.15	195	14.39

利用软件对 Tab.2 中数据进行分析,得到拉伸强度与各个因素的二次多元回归模型,得到拉伸强度模型的编码方程和实际方程如式(6)和(7)所示,对回归模型进行方差分析,结果见 Tab.3。

拉伸强度的编码方程为:

$$\begin{aligned}\text{Tensile strength} = {} & 16.63+0.7592*A+0.4354*B+\\ & 0.1162*C-0.7337*AB-0.0412*AC-\\ & 0.0487*BC-1.80*A^2-0.9694*B^2-0.7619*C^2\end{aligned} \tag{6}$$

拉伸强度的实际方程为:

$$\begin{aligned}\text{Tensile strength} = {} & -1173.02138+17.51642*A+\\ & 537.41389*B+11.68795*C-\\ & 24.45833*AB-0.008250*AC-\\ & 0.325000*BC-1.79788*A^2-\\ & 1077.15278*B^2-0.030478*C^2\end{aligned} \tag{7}$$

Tab. 3 Results of variance analysis of tensile strength

Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	*F*-number	*P*-number	Significance
Model	150.93	9	16.77	19.65	< 0.0001	Highly significant
A(Alkali treatment time)	13.83	1	13.83	16.20	0.0010	
B(T-CBF diameter)	4.55	1	4.55	5.33	0.0346	
C(Extrusion temperature)	0.3243	1	0.3243	0.3800	0.5463	
AB	4.31	1	4.31	5.05	0.0392	
AC	0.0136	1	0.0136	0.0159	0.9011	
BC	0.0190	1	0.0190	0.0223	0.8832	
A^2	124.84	1	124.84	146.25	< 0.0001	
B^2	36.30	1	36.30	42.52	< 0.0001	
C^2	22.42	1	22.42	26.27	0.0001	
Residual error	13.66	16	0.8536			
Misfit error	2.86	5	0.5724	0.5833	0.7129	Non-significant
Pure error	10.80	11	0.9814			
Total error	164.58	25				
Fitting coefficient	0.9170					
Predicted fitting coefficient	0.8134					
Adjust the fitting coefficient	0.8703					
Signal-to-noise ratio	15. 2009					

Tab.3 是拉伸强度的方差分析,可以看出回归方程的拟合程度较好,模型 *P* 值小于 0.0001,模型可靠具有统计显著性,且失拟项的 *P* 值为 0.7129,满足大于 0.05 的条件,即失拟项不显著,则表示模型在实验过程中干扰因素较少,实验误差在可接受范围内。同时,预测拟合系数 Pre. R^2 = 0.8134,与调整的拟合系数 Adj. R^2 = 0.8703 较为接近,两者差值小于 0.2,变异系数较低(C.V = 6.91%),且模型的信噪比为 15.2009,大于 4,说明该模型预测效果较好,整个模型具有很高的可靠性和准确性,能够有效地预测和评价碱处理时间、T-CBF 直径和挤出温度对复合丝材拉伸强度的影响。

3.3 数学模型验证

Fig.5(a)为复合丝材拉伸强度的内部残差概率分布图,从图中可以看出,拉伸强度模型服从正态分布,数据点能很好地被拟合成一条直线,表明复合丝材拉伸强度实际值与模型匹配度较高,模型误差小。Fig.5(b)为复合丝材拉伸强度的实验值与模型预测值之间的拟合曲线。从图中可以看到,实验值与预测值能较好地保持一致,从方差分析表中能看出模型对应的拟合系数 R^2 = 0.9170,与调整的拟合系数 Adj. R^2 = 0.8703 都接近 1,表示建立的二次多项式模型能很好地预测实验数据,拉伸强度模型的可靠性和准确性较高。

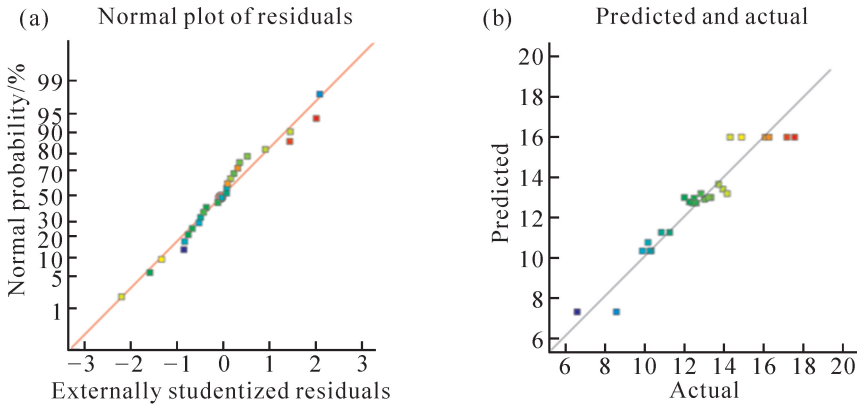


Fig. 5　Tensile strength model validation: (a) residual normal probability distribution diagram; (b) graph comparing actual and predicted values

为进一步验证模型的可靠性和准确性,在模型影响因素取值范围内随机选取 3 组参数进行挤出实验,并对复合丝材进行拉伸测试,每组参数进行 3 次实验,对最后的拉伸强度数据取平均值,将获得的实验结果与响应曲面法预测模型所得预测值进行对比并计算误差率,结果如 Tab.4 所示。从表中数据可知,实际值与模型预测值之间的误差较小,模型的准确率和可靠度较高,表明该模型可以为获得复合丝材成型最优工艺参数组合提供指导。

Tab. 4　Reliability and error analysis of tensile strength model

No.	Alkali treatment time/h	T-CBF diameter/mm	Extrusion temperature/℃		Tensile strength/ MPa
1	1.5	0.17	180	Experimental value	7. 71
				Predicted value	7.373092
				Error %	4.37
2	2.5	0.20	190	Experimental value	15.24
				Predicted value	15.88637
				Error %	4.24
3	3.5	0.23	200	Experimental value	11.36
				Predicted value	10.94192
				Error %	3.68

3.4　因素分析

根据拉伸强度的回归模型,利用软件生成影响因素与响应值之间的等高线图和响应曲面图。等高线图和响应曲面可以直观地显示出各因素水平,同时能更加明显地反映影响因素之间的交互作用及其与响应值之间的关系。响应曲面的坡度可反映该因素对响应值影响的强弱程度,坡度越大则表示因素对复合丝材拉伸强度的影响越显著。等高线的形状则能反映因素之间的交互影响的强弱,越接近椭圆形则表明两影响因素之间的交互作用越显著[20, 21]。

Fig.6 是 T-CBF 直径为 0.18 mm 时,碱处理时间和挤出温度对复合丝材拉伸强度的影响趋势图。观

察等高线 Fig.6(a)可得,沿着碱处理时间的等高线密度变化明显高于挤出温度方向的等高线密度变化,这表明碱处理时间对拉伸强度的影响大于挤出温度的影响。响应曲面 Fig.6(b)表明,碱处理时间与挤出温度的交互作用对复合丝材的拉伸强度影响显著。当 T-CBF 直径一定时,T-CBF/PE 复合丝材在碱处理时间在 2.6~3.8 h 和挤出温度在 186~195 ℃区间内拉伸强度较大。复合丝材挤出温度或碱处理时间保持一致时,随着另一影响因素的增加,复合丝材的力学性能呈现先增大后减小的趋势。当挤出温度增大到使 PE 完全熔融后,对复合丝材的影响主要是过高的温度会使得丝材表面和结合处产生气泡,从而降低丝材拉伸性能,而碱处理的作用主要是去除 T-CBF 表面杂质的同时增大 T-CBF 表面粗糙度,使得 T-CBF 与 PE 熔体结合面积增大,因此碱处理时间对 T-CBF 与 PE 结合界面处的影响更大,T-CBF 与 PE 基体主要是通过结合界面传递应力,所以碱处理时间对 T-CBF/PE 复合丝材拉伸强度的影响大于挤出温度的影响。

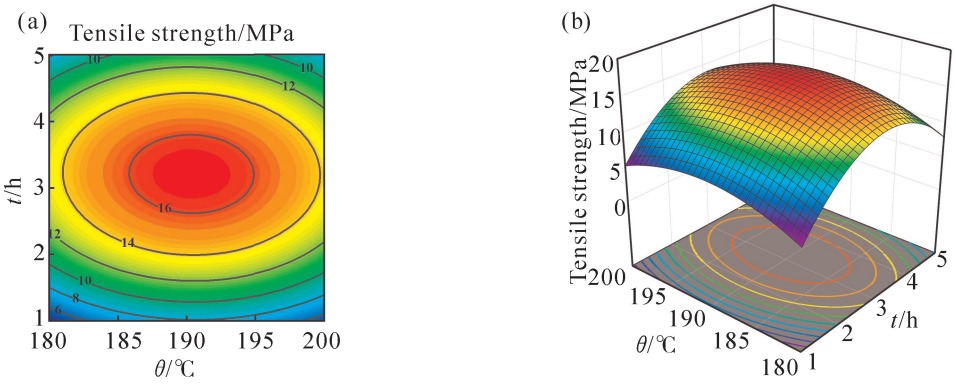


Fig. 6 Interaction of alkali treatment time and extrusion temperature on tensile strength: (a) contour diagram; (b) response surface diagram

Fig.7 为挤出温度为 190 ℃时,碱处理时间和 T-CBF 直径对复合丝材拉伸强度的影响趋势图。观察等高线 Fig.7(a)可得,沿着碱处理时间的等高线密度变化明显高于 T-CBF 直径方向的等高线密度变化,这表明碱处理时间对拉伸强度的影响大于 T-CBF 直径的影响。响应曲面 Fig.7(b)表明,当设置挤出温度一定时,T-CBF/PE 复合丝材在碱处理时间在 2.5~3.9 h 和 T-CBF 直径在 0.16~0.21 mm 区间内拉伸强度较大。复合丝材 T-CBF 直径或碱处理时间保持一致时,随着另一影响因素的增加,复合丝材的力学性能呈现先增大后减小的趋势。T-CBF 直径的变化影响着其在熔融 PE 中的分布情况,随着 T-CBF 直径减小,其自身力学性能有一定的提升,且相同碱处理时间下直径稍小的 T-CBF 更易被碱液渗透处理,处理更完全的 T-CBF 被 PE 包裹更均匀充分,但随着直径的进一步减小,过于柔软的 T-CBF 在 PE 空心管内易弯曲,导致其分布不均的同时容易产生气泡,进而造成空隙,影响复合丝材拉伸强度。

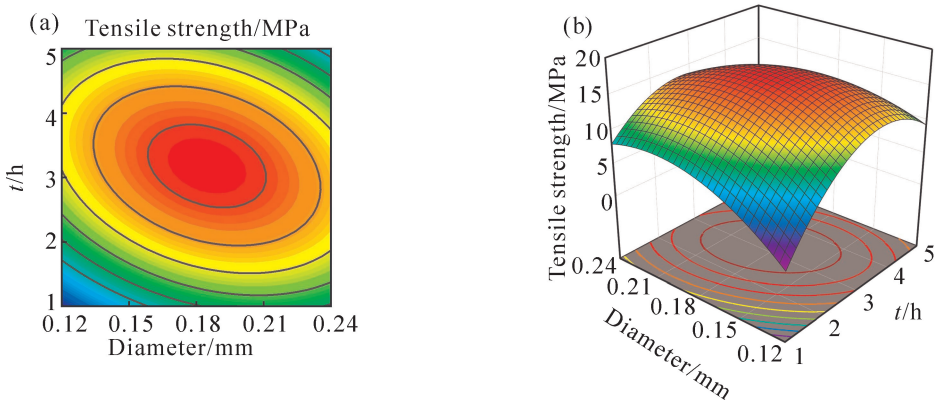


Fig. 7 Interaction of alkali treatment time and T-CBF diameter on tensile strength: (a) contour diagram; (b) response surface diagram

Fig.8 为碱处理时间为 3 h 时,挤出温度和 T-CBF 直径对复合丝材拉伸强度的影响趋势图。观察等高线 Fig.8(a)可得,挤出温度与 T-CBF 直径的交互作用对复合丝材的拉伸强度影响显著。响应曲面 Fig.8(b)表明,当碱处理时间一定时,T-CBF/PE 复合丝材在挤出温度为 186~195 ℃和 T-CBF 直径在 0.16~0.21 mm 区间内拉伸强度较大。

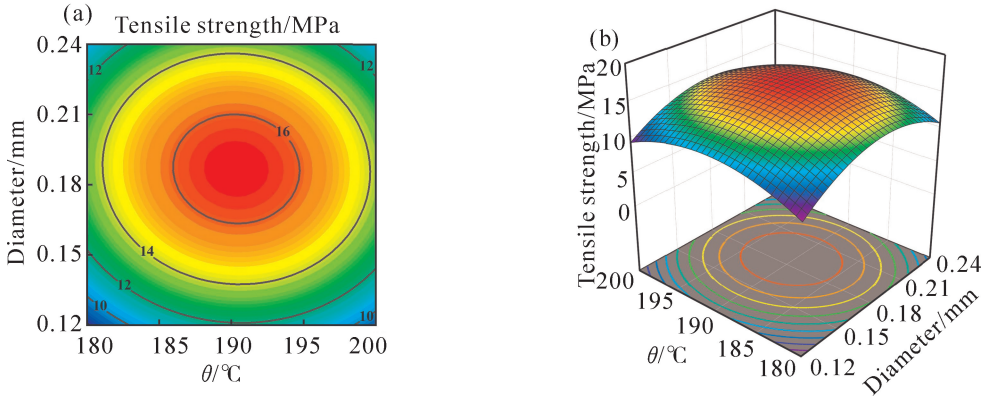


Fig. 8　Interaction of T-CBF diameter and extrusion temperature on tensile strength: (a) contour diagram; (b) response surface diagram

复合丝材 T-CBF 直径或挤出温度保持一致时,随着另一影响因素的增加,复合丝材的力学性能呈现先增大后减小的趋势。由等高线图观察到,沿着 T-CBF 直径的等高线密度变化高于挤出温度方向的等高线密度变化,这表明 T-CBF 直径对拉伸强度的影响大于挤出温度的影响,但是总体对比观察发现,T-CBF 直径与挤出温度的交互影响相比起其余两组因素之间的交互影响要小很多。T-CBF 直径对复合丝材的影响,一是直径的变化影响 T-CBF 自身的性能,进而影响复合丝材的性能,其次是影响其在 PE 中的分布情况,进而影响结合程度,所以,T-CBF 的直径比挤出温度对复合丝材拉伸强度的影响大。与此同时,对比 Fig.6~Fig.8 的响应曲面图也能发现,影响因素的显著性大小排序为:碱处理时间 > T-CBF 直径 > 挤出温度。

3.5　丝材成型工艺参数优化

基于模型的可靠性和准确性分析后,可以在软件中得到最优的工艺参数组合。以最大拉伸强度为目标,获得相应参数组合如 Tab.5 所示。

Tab. 5　Optimization results of tensile strength model of composite wires

Alkali treatment time/h	T-CBF diameter/mm	Extrusion temperature/℃	Tensile strength/MPa	Credibility
3.18	0.19	190.34	16.74	0.87

4　结论

本文提出了 3D 打印制备连续竹纤维增强 PE 复合丝材的成形方法,并应用响应曲面法建立数学模型探究了成型工艺参数与复合丝材拉伸强度的关系,为解决 CBF 和 PE 的相容性难题、实现高质量复合材料制备奠定了基础,最终获得的 CBF/PE 复合丝材成型过程中最佳工艺窗口,为后续研究提供参考。本文主要结论如下。

(1)利用响应曲面法构建了成形工艺参数和复合丝材拉伸强度的数学模型。结果表明,增加碱处理时间、T-CBF 直径或是挤出温度,拉伸强度先增大后减小。其对复合丝材拉伸强度的影响大小排序为:碱处理时间 > T-CBF 直径 > 挤出温度。

(2)将模型的预测值与实际值对比,验证了该模型的可靠性与准确性。基于该模型,以复合丝材的拉伸强度最大化为目标,得到最优工艺参数组合:碱处理时间为 3.18 h、T-CBF 直径为 0.19 mm 以及挤出温度为 190.34 ℃,此时可信度为 0.87,预测的拉伸强度为 16.74 MPa。

参考文献：

[1] 邢悦, 何鹏飞, 李竞龙, 等. 连续纤维增强聚合物复合材料增材制造工艺研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3703-3721.
Xing Y, He P F, Li J L, *et al*. Additive manufacturing for continuous fiber-reinforced polymer composites: a review on processing technique[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3703-3721.

[2] Das T K, Ghosh P, Das N C. Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: a review[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019, 2: 214-233.

[3] Tian X Y, Todoroki A, Liu T F, *et al*. 3D printing of continuous fiber reinforced polymer composites: development, application, and prospective[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1: 100016.

[4] Rubino F, Nisticò A, Tucci F, *et al*. Marine application of fiber reinforced composites: a review[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8: 26.

[5] Cheng P, Peng Y, Li S X, *et al*. 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: a review and outlook [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 250: 110450.

[6] Dixit S, Yadav V L. Comparative study of polystyrene/chemically modified wheat straw composite for green packaging application [J]. Polymer Bulletin, 2020, 77: 1307-1326.

[7] Syduzzaman M, Faruque M A A, Bilisik K, *et al*. Plant-based natural fibre reinforced composites: a review on fabrication, properties and applications[J]. Coatings, 2020, 10: 973.

[8] Li M, Pu Y Q, Thomas V M, *et al*. Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 200: 108254.

[9] Akintayo O S, Olajide J L, Betiku O T, *et al*. Poly(lactic acid)-silkworm silk fibre/fibroin bio-composites: a review of their processing, properties, and nascent applications[J]. Express Polymer Letters, 2020, 14: 924-951.

[10] 李延军, 许斌, 张齐生, 等. 我国竹材加工产业现状与对策分析[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 2-7.
Li Y J, Xu B, Zhang Q S, *et al*. Present situation and the countermeasure analysis of bamboo timber processing industry in China[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(1): 2-7.

[11] 温晓芸. 改性竹纤维/不饱和聚酯复合材料的制备及界面表征[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
Wen X Y. Preparation and interface characterization of modified bamboo fiber/unsaturated polyester composites[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.

[12] Lin L, Kollipara P S, Zheng Y B. Digital manufacturing of advanced materials: challenges and perspective [J]. Materials Today, 2019, 28: 49-62.

[13] Mehrpouya M, Dehghanghadikolaei A, Fotovvati B, *et al*. The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 3865.

[14] Ajayi N E, Rusnakova S, Ajayi A E, *et al*. A comprehensive review of natural fiber reinforced polymer composites as emerging materials for sustainable applications[J]. Applied Materials Today, 2025, 43: 102666.

[15] Rajak D, Pagar D, Menezes P, *et al*. Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications[J]. Polymers, 2019, 11: 1667.

[16] 龚友坤, 宋增瑞, 宁慧铭, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(2): 1-26.
Gong Y K, Song Z R, Ning H M, *et al*. Research progress on forming process of continuous fiber-reinforced thermoplastic composite materials: a review[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2020, 49(2): 1-26.

[17] 陈宏达, 曹东风, 胡海晓, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料热压成型工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(15): 24-37.
Chen H D, Cao D F, Hu H X, *et al*. A review on thermo-forming process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(15): 24-37.

[18] 宋晨曦, 林海涛, 赖恩平, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(4): 86-93.
Song C X, Lin H T, Lai E P, *et al*. Research progress of the forming process of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(4): 86-93.

[19] 张成军. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

[20] 吴琴, 陈珣. 单因素实验结合响应面法优化朱砂根总皂苷的提取工艺[J]. 医药导报, 2014, 33(8): 1080-1082.
Wu Q, Chen X. Optimization of extraction technology for total saponins of ardisia crenata by singlefactor experiment combined with response surface methodology[J]. Herald of Medicine, 2014, 33(8): 1080-1082.

[21] 程晶, 雷建都, 刘静, 等. 响应面法优化人参叶总皂苷提取工艺的研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2): 142-147.
Cheng J, Lei J D, Liu J, *et al*. Optimization of extraction technology of ginsenosides from ginseng leaves by response surface method[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(2): 142-147.

Optimization of Continuous Bamboo Fiber/Polyethylene Composite Wires Forming Process Parameters Based on Response Surface Methodology

Menghuan Zu, Qian Li, Yani Chen, Ziwen Jia, Huang Zhang, Chuanyang Wang, Haiyu Qiao
(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China*)

ABSTRACT: To solve the difficulty of limited fiber length in forming process of natural plant fibers and thermoplastic materials, this paper proposed a rapid and high-quality 3D printing forming method for fabricating continuous bamboo fiber (CBF) reinforced polyethylene (PE) composites. In view of the poor compatibility between the interface of hydrophilic CBF and hydrophobic PE, alkali treatment was firstly applied to CBF, which enhanced the compatibility between CBF and PE. Then, the one-step CBF/PE composites were printed by fused deposition modeling (FDM). In order to explore the influence of forming process parameters on mechanical properties of composite wires, this paper used the response surface method to construct a mathematical model of tensile strength with extrusion process parameters, and explored the effects of CBF alkali treatment time, CBF diameter and extrusion temperature on tensile strength of composite wires and the interaction between the three factors. The results show that tensile strength increases firstly and then decreases with alkali treatment time, T-CBF diameter or extrusion temperature. Finally, the reliability of the model was verified by experiments, and the predicted tensile strength of CBF/PE composite wire is 16.74 MPa during forming process, that is, the alkali treatment time is 3.18 h, the T-CBF diameter is 0.19 mm, and the extrusion temperature is 190.34 ℃.

Keywords: composites; continuous bamboo fiber; fused deposition modeling; response surface method; optimization of process parameters