

基于响应曲面法的木塑复合材料强度分析及挤出工艺优化



分享本文

孙宏雨¹, 吕兴聪¹, 袁纳新¹, 王清文^{1,3}, 郝笑龙^{*1,3}, 孙理超^{*1,2,3}

(1. 华南农业大学 材料与能源学院 生物基材料与能源教育部重点实验室, 广州 510642; 2. 东北林业大学 生物质材料科学与技术教育部重点实验室, 哈尔滨 154500; 3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642)

摘要: 以杨木纤维(WF)为增强材料, 以高密度聚乙烯(HDPE)为基体, 马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)为偶联剂, 采用熔融挤出法制备了 WF/HDPE 复合材料。选取 WF 含量、偶联剂添加量、挤出温度为自变量, 试件的抗冲击强度、弯曲强度、拉伸强度为响应值, 采用 Box-Behnken Design 方法设计实验并利用响应曲面法建立 WF/HDPE 复合材料力学强度的二次多项数学模型, 对 WF/HDPE 复合材料的挤出工艺进行优化设计。结果表明, WF 添加量、MAPE 添加量和挤出温度的最佳水平为: 47.37wt%、4.23wt%、173.69℃, 此时 WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度为 4.06 kJ·m⁻², 弯曲强度为 43.79 MPa, 拉伸强度为 28.59 MPa。模型预测值与实测值误差小于 5%, 较好地反映了 WF/HDPE 复合材料力学性能与挤出工艺因素间的关系。

关键词: 木塑; 拉伸性能; 弯曲性能; 抗冲击性能; 响应曲面法

中图分类号: TU532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2021)06-1838-09

Strength analysis and extrusion process optimization of wood-plastic composite by response surface method

SUN Hongyu¹, LV Xingcong¹, YUAN Naxin¹, WANG Qingwen^{1,3}, HAO Xiaolong^{*1,3}, SUN Lichao^{*1,2,3}

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education, College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Bio-based Material Science and Technology (Ministry of Education), Northeast Forestry University, Harbin 154500, China; 3. Guangdong Laboratory of Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: WF/HDPE composites were prepared by melt extrusion with poplar fiber (WF) as reinforcing material, high density polyethylene (HDPE) as matrix and maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) as coupling agent. The addition amount of WF, the addition amount of coupling agent and the extrusion temperature were selected as independent variables, and the impact strength, bending strength and tensile strength of the specimen were selected as the response value. The experiment was designed by Box-Behnken Design method and the secondary mathematical model of mechanical strength of WF/HDPE composites was established by the response surface method to optimize the extrusion process of the composites. The results show that the optimum levels of WF addition, MAPE addition and extrusion temperature are 47.37wt%, 4.23wt% and 173.69℃, respectively. The corresponding impact strength, bending strength and tensile strength of WF/HDPE composite are 4.06 kJ·m⁻², 43.79 MPa and 28.59 MPa. The error between the predicted value of the model and the measured value is less than 5%, which well reflects the relationship between the mechanical properties and the factors of extrusion process of the WF/HDPE

收稿日期: 2020-06-08; 录用日期: 2020-07-30; 网络首发时间: 2020-08-10 15:58:13

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200810.001>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFD1101203); 生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学)开放基金项目(SWZ-ZD201905); 国家自然科学基金(31700494; 31870547); 广州市教育局林业工程重点学科

通信作者: 郝笑龙, 博士, 讲师, 研究方向为生物质复合材料等 E-mail: haoxiaolong@scau.edu.cn;

孙理超, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为生物质复合材料等 E-mail: sunlichao@scau.edu.cn

引用格式: 孙宏雨, 吕兴聪, 袁纳新, 等. 基于响应曲面法的木塑复合材料强度分析及挤出工艺优化 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(6): 1838-1846.

SUN Hongyu, LV Xingcong, YUAN Naxin, et al. Strength analysis and extrusion process optimization of wood-plastic composite by response surface method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(6): 1838-1846(in Chinese).

composites.

Keywords: wood plastic; tensile property; bending property; impact resistance; response surface method

木塑复合材料是一种新型环境友好材料，兼具木材和塑料的双重性能，相比于木材有更好的耐水、耐腐蚀性和可塑性，相比于塑料则有更好的刚性、热稳定性和尺寸稳定性^[1-3]。因其独特的优势，木塑产品已被广泛应用于建筑、家具、装饰、市政设施、包装运输和汽车内衬等领域，工业发展前景十分广阔^[4-5]。

木纤维含量、偶联剂添加量、挤出温度、熔体压力等是影响木塑复合材料力学强度的重要因素，但实际生产中挤出加工工艺多依靠经验，缺乏定量的理论依据。而利用响应曲面法，可以归纳分析出各因素对复合材料性能的个体和交互作用，进而优化工艺。

响应曲面法在诸多领域都有广泛的应用，大量学者经过长期研究检验，已经形成科学可靠的试验设计、数据分析方法。Zhang 等^[6]采用响应曲面法评价了反应时间、温度、硫酸浓度对提高甲烷产量的个体和交互作用。结果表明通过响应曲面分析得到的模型适合于预测最佳预处理条件。Saeb 等^[7]利用响应曲面法研究了含有不同量的纳米碳酸钙、木粉和纳米粘土填料的聚合氯乙烯杂化纳米复合材料的熔融特性，并得到了具有增强融合性能的优化配方。张淑洁等^[8]根据 Box-Behnken 试验设计原理，选取混杂比、纤网定量、针刺密度 3 个因素，以涤纶-苎麻混杂非织造物的厚度和强度为响应值作响应面和等高线图，得出涤纶-苎麻非织造物制备的最优工艺条件。王春红等^[9]采用响应曲面法，建立数学模型，对稻壳纤维/水泥基复合材料的成型工艺进行优化设计，发现稻壳粒径和掺入质量比对材料的密度、抗折强度、含水率等均有较高影响。

因此，本文以杨木纤维(WF)含量、偶联剂添加量、挤出温度为自变量，抗冲击强度、弯曲强度、拉伸强度为响应值，采用响应曲面法建立杨木纤维/高密度聚乙烯(WF/HDPE)复合材料力学强度的二次多项数学模型，对 WF/HDPE 复合材料的挤出工艺进行优化设计，并进行实验验证。

1 材料与方法

1.1 原材料

杨木纤维(WF, *Populus euramevicana* cv. ‘I-214’), 购置于东莞鱼珠木材市场，经孔径为 270~

380 μm 的筛网筛分备用；高密度聚乙烯(HDPE): 牌号 5000S，密度为 0.95 g/cm³，熔融指数为 0.9 g/10 min (190℃，2.16 kg)，中国石油天然气股份有限公司生产；马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)，接枝率约 1%，熔融指数为 1.7 g/10 min (190℃，2.16 kg)，润滑剂，牌号 530D，主要成分为硬脂酸钠，均购置于广州市合诚化学有限公司。

1.2 WF/HDPE 复合材料的制备

取适量 WF 于 105℃ 烘箱中干燥 24 h，以去除水分。干燥后将 WF、HDPE、MAPE 置于高速混料机内混料 10 min，用反向旋转啮合锥形双螺杆挤出机将混合均匀的物料挤出成直径为 3 mm 的线材，使用切粒机切碎成颗粒后再用同一双螺杆挤出机挤出为 25 mm×4 mm 规格的片材。

1.3 性能测试

使用 DSC 214 Polyma 型热流式差式扫描量热仪在氮气氛围中对样品的熔融结晶情况进行测试。N₂ 保护流速为 60 mL/min，N₂ 吹扫速度为 40 mL/min，降温过程采用液氮冷却。测试程序为：将样品从 25℃ 升温至 200℃，恒温 10 min，以排除水分，消除热历史，然后以 10℃/min 降温至 30℃，最后以 10℃/min 升温至 180℃。

使用 TG 209 F1 LibraTM 型热重分析仪在 N₂ 氛围下对 WF/HDPE 复合材料试样的热分解情况进行测试。测试温度为 30~800℃，升温速率为 10℃/min，N₂ 流速为 20 mL/min，保护气流速为 20 mL/min。

使用 D-HR-2 型旋转流变仪在测试频率为 0.1~100 s⁻¹、应变为 0.02%，测试温度分别为 160℃、170℃、180℃ 的条件下对 WF/HDPE 复合材料进行黏度测试。

按照 ASTM D638 标准^[10]进行拉伸性能测试。按照 ASTM D790 标准^[11]进行弯曲性能测试。按照 ASTM D256 标准^[12]进行缺口冲击性能测试。每组实验重复不少于 5 次，所有样品测试前均在室温和相对空气湿度 65% 的条件下平衡 7 天。

1.4 优化试验方案

以 Box-Behnken 方法设计三因素三水平实验方案，使用 Design-Export 8.6 软件设计具体的实验方案并对试验数据进行分析 and 处理，寻求最佳挤出工艺方案。实验方案设计共 17 组。每组制备 7 个试件，测试其力学性能，取同一组 7 个试件的测试平均值作为数据结果。

2 结果与讨论

2.1 确定各因素的取值范围

采用差示扫描量热法及热重法可精确描述实验原料的热性能，确定挤出温度的取值范围。图1和图2分别为WF/HDPE复合材料的DSC曲线及热重曲线。可知，WF/HDPE复合材料的熔融终止点在142℃左右，约在200℃左右发生降解。但在实际的挤出过程中，为了使物料快速熔融并以一定速度连续挤出，142℃无法满足挤出加工的黏度要求。旋转流变测试结果显示，WF/HDPE复合材料的黏度在160℃时仍然较高(图3)，更低的温度将不利于挤出加工。在200℃以上温度WF/HDPE复合材料开始降解，质量减少(图2)，因此将挤出温度的范围设置在165~180℃。根据前期预实验结果，将WF含量设定在40wt%~60wt%，MAPE添加量设定在2wt%~6wt%。

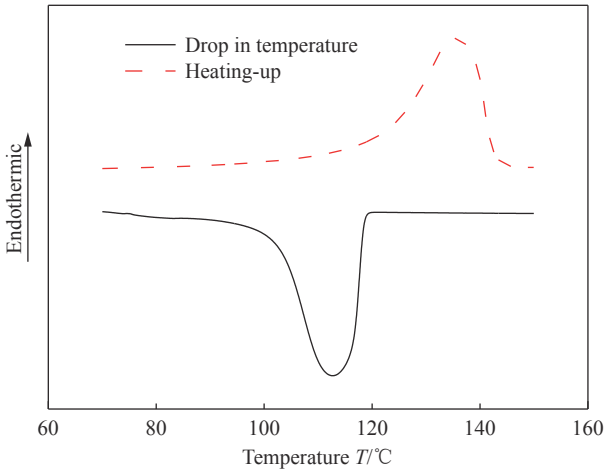


图1 杨木纤维/高密度聚乙烯(WF/HDPE)复合材料的DSC曲线
Fig. 1 DSC curves of poplar fiber/high density polyethylene (WF/HDPE) composites

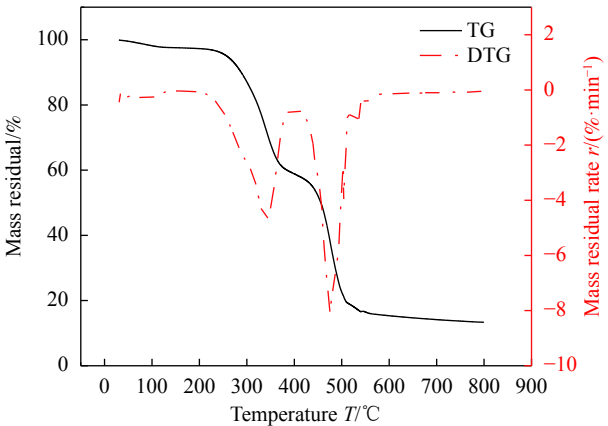


图2 WF/HDPE复合材料的热重曲线
Fig. 2 Thermo gravimetric curves of WF/HDPE composites

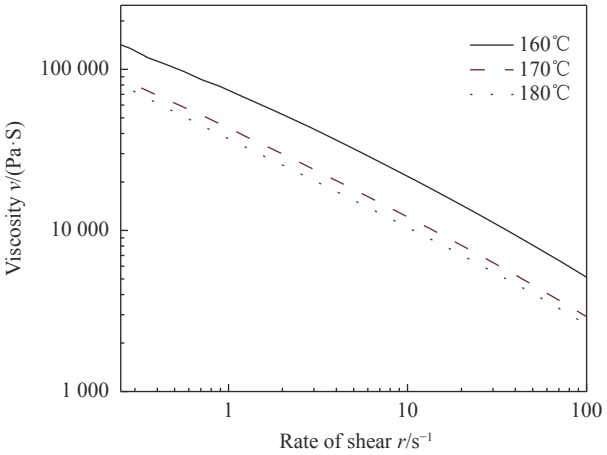


图3 WF/HDPE复合材料的黏度曲线
Fig. 3 Viscosity curves of WF/HDPE composites

2.2 WF/HDPE 复合材料强度测试结果

以 Box-Behnken 方法设计实验方案如表1所示。

表1 响应曲面因素水平设计

Table 1 Response surface factor horizontal design			
Level	Mass fraction of WF/wt%	Temperature/℃	Mass fraction of MAPE/wt%
-1	40	165	2
0	50	172.5	4
1	60	180	6

Note: MAPE—Maleic anhydride grafted polyethylene.

2.3 WF/HDPE 复合材料响应曲面模型建立

2.3.1 抗冲击强度

表2为各因素设计方案及测试结果。可知，抗冲击强度与各自变量并非简单的线性关系，可采用逐步回归分析方法，建立目标响应值和自变量之间的数学拟合表达式，剔除非显著项，获得WF/HDPE复合材料抗冲击强度的二次多项式回归方程。即

$$K_1 = 3.84 - 0.74A + 0.045C - 0.07AB + 0.11BC + 0.2A^2 - 0.14B^2 - 0.43C^2 \tag{1}$$

式中，A、B、C分别表示WF含量、挤出温度、偶联剂含量的实验设计水平。为检验回归模型是否有效，对模型各系数进行方差分析，结果如表3所示。模型的决定系数(R^2)为0.9702，接近于1，说明拟合程度较好，且与调整决定系数(R_{adj}^2)0.9319接近，说明模型对试验理论数据做出了良好的调整，同时模型的P值(显著性检验)为0.0002<0.001(极显著)，表明该回归模型具有显著性。最后，失拟项P值为0.546，说明失拟误差并不显著大于纯误差，可接受该模型[13-15]。由F值

表 2 各因素设计方案及测试结果
Table 2 Design and test results of each factor

Number	Mass fraction of WF/wt%	Temperature/℃	Mass fraction of MAPE/wt%	Mass fraction of HDPE/wt%	Impact strength / (kJ·m ⁻²)	Bending strength/MPa	Tensile strength/MPa
1	50	172.5	4	46	3.95(0.20)*	44.13(0.41)	28.63(0.28)
2	50	172.5	4	46	3.64(0.34)	43.12(0.28)	28.32(0.35)
3	60	172.5	2	38	2.89(0.19)	41.26(1.07)	24.83(0.34)
4	60	180	4	36	3.11(0.16)	42.03(0.79)	25.32(0.41)
5	40	165	4	56	4.56(0.10)	38.67(1.39)	26.32(0.77)
6	50	165	2	48	3.36(0.37)	41.75(0.31)	28.13(0.49)
7	40	172.5	6	54	4.33(0.14)	37.97(0.55)	26.59(0.47)
8	50	172.5	4	46	3.87(0.34)	42.98(0.58)	28.42(0.26)
9	50	180	2	48	3.12(0.17)	40.84(0.67)	27.93(0.30)
10	50	180	6	44	3.40(0.28)	42.39(1.34)	28.21(0.32)
11	50	165	6	44	3.21(0.13)	41.77(0.31)	28.3(0.39)
12	40	172.5	2	58	4.22(0.17)	37.42(1.25)	26.51(0.74)
13	60	165	4	36	3.08(0.35)	40.91(0.48)	25.36(0.73)
14	60	172.5	6	34	3.01(0.24)	41.39(0.41)	25.67(0.73)
15	50	172.5	4	46	4.03(0.14)	44.36(0.87)	29.03(0.90)
16	40	180	4	56	4.87(0.36)	38.69(1.29)	26.89(0.47)
17	50	172.5	4	46	3.72(0.24)	43.27(1.14)	28.47(0.62)

Note: *—Standard deviation.

表 3 WF/HDPE 复合材料抗冲击强度的线性回归分析结果
Table 3 Regression analysis results for impact strength of WF/HDPE composites

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
Model	5.44	9	0.6	25.31	0.0002
A-WF	4.34	1	4.34	181.49	<0.0001
B-Temperature	0.011	1	0.011	0.44	0.5284
C-MAPE	0.016	1	0.016	0.68	0.4374
AB	0.02	1	0.02	0.82	0.3952
AC	0.000025	1	0.000025	0.00105	0.9751
BC	0.046	1	0.046	1.93	0.2069
A ²	0.17	1	0.17	7.15	0.0318
B ²	0.081	1	0.081	3.38	0.1086
C ²	0.78	1	0.78	32.73	0.0007
Residual	0.17	7	0.024	—	—
Lack of fit	0.064	3	0.021	0.82	0.546
Pure error	0.1	4	0.026	—	—
Total	5.61	16	R ² =0.9702	R _{adj} ² =0.9319	R _{pre} ² =0.7893

Notes: F—Variance test; P—Significance test; R²—Coefficient of determination; R_{adj}²—Adjusted determination coefficient; R_{pre}²—Predictive determination coefficient.

(方差检验)可得到各因子的贡献率为 A>C>B，即 WF 含量>偶联剂含量>挤出温度。

此外，利用软件自带的检测工具也可以进一步诊断试验数据是否存在异常点，进而验证该试验方案的可行性(图 4)。

由图 4(a)可知，绝大多数实际测量值均匀且接近地分布在预测直线两侧，说明没有异常数据点，且回归方程拟合性较好。在图 4(b)中，散点均匀分布在直线附近，证明残差具有正态分布规律，进一步说明回归模型较好地拟合了试验数据的变化趋势。图 4(c)中残差散点分布分散、无规

律且均在误差线之内，证明试验数据真实可靠，无异常点^[16]。

响应曲面法不但能减少实验次数，提高实验效率，而且可以综合考虑各因素相互作用下对响应值的影响，同时还可以借助图形直观观察各因素相互作用对响应值的影响程度^[17]。根据回归方程做出各因素交互作用的三维响应曲面图，可以直观地找出最优范围，分析响应值随自变量变化的趋势。图 5 为各因素对 WF/HDPE 复合材料抗冲击强度的交互作用。如图 5(a)和图 5(b)所示，随着 WF 含量的增加，WF/HDPE 复合材料的抗冲

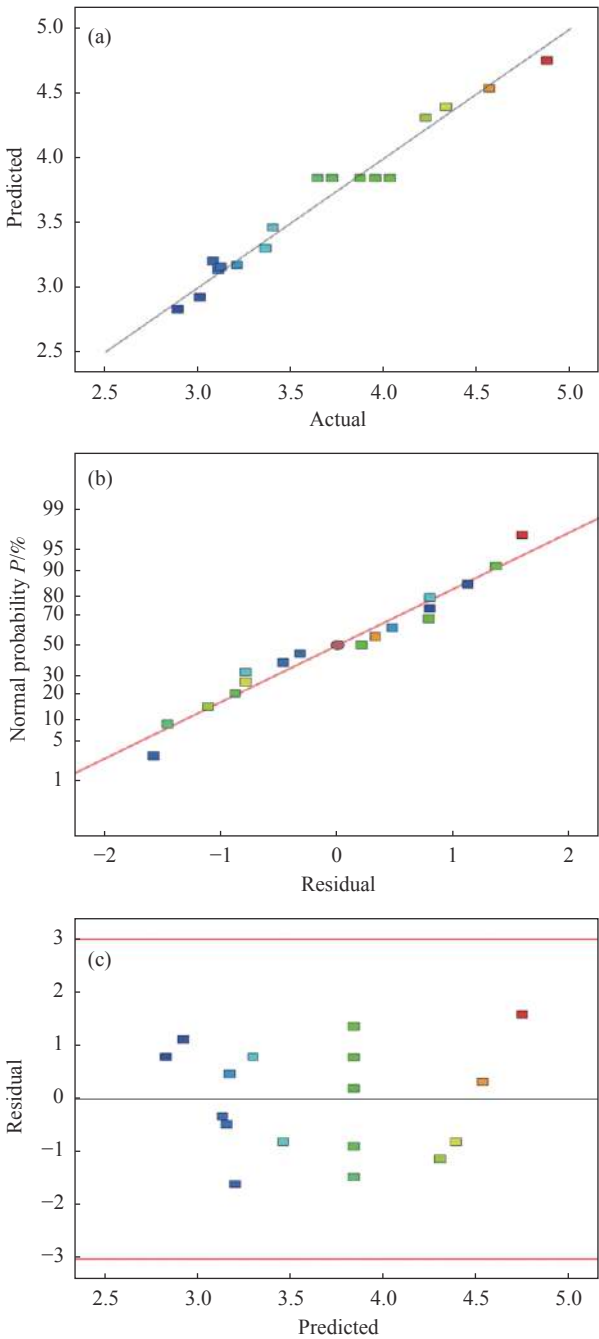


图4 WF/HDPE 复合材料抗冲击强度实测值与方程预测值对应关系 (a)、残差的正态概率分布曲线 (b)、残差与方程预测值对应关系 (c)

Fig. 4 Relationship between measured and predicted values of impact strength of WF/HDPE composites (a), normal probability distribution curve of residuals (b), correlation diagram of residual error and equation prediction value (c)

击强度下降明显，这是由于 WF 作为应力破坏引发点，随着 WF 含量的增加，木塑复合材料在冲击力的瞬间作用下，因 WF 引发的应力集中点瞬间扩展而断裂，导致冲击强度下降^[18-20]。另一方面，WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度受温度和

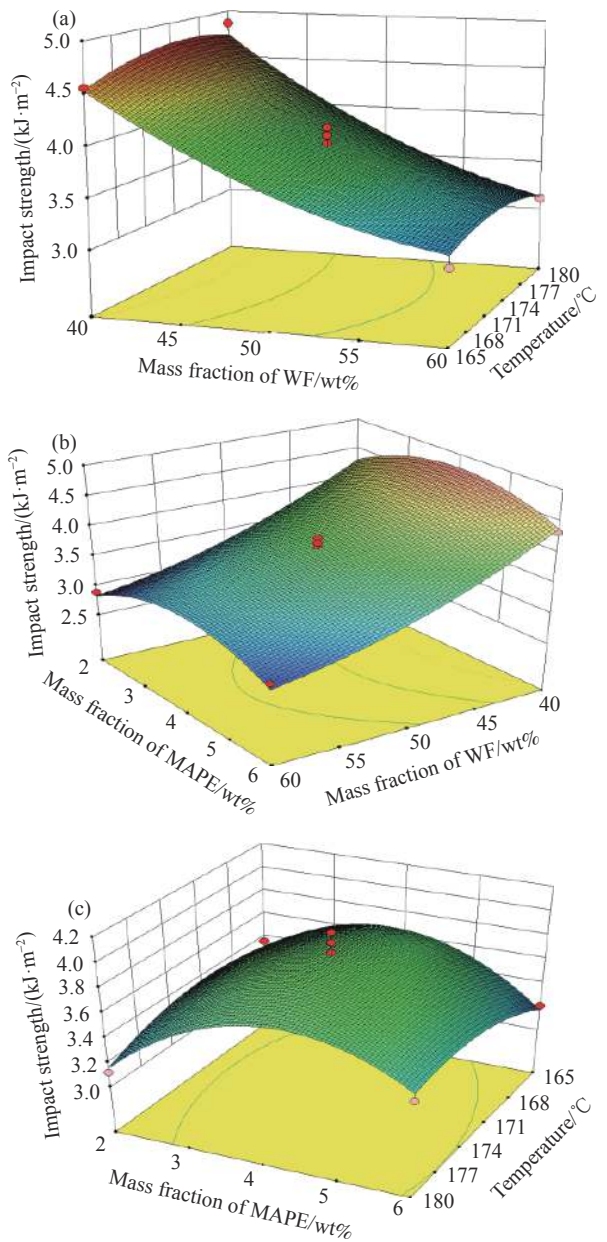


图5 各因素对 WF/HDPE 复合材料抗冲击强度的交互作用

Fig. 5 Interaction of various factors on impact strength of WF/HDPE composites

偶联剂含量变化的影响响度较小(图 5(c))，可能是由于选取的自变量范围已经比较合适，在适合的范围内小幅调整自变量，响应值的大小变化有限。响应曲面在底面的投影形成等高线图，等高线呈椭圆形说明因素间交互作用明显，呈圆形或其他形状说明交互作用不明显^[21-23]。由此可看出偶联剂含量与温度之间的交互作用是最明显的。说明相比于单一因素的变化，偶联剂含量和挤出温度处于恰当的配合时更能影响 WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度。

响应曲面寻优分析方法对回归模型进行分析, 最优响应结果为 WF 含量为 40wt%, 挤出温度为 175.68℃, MAPE 含量为 4.20wt%, WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度为 4.80 kJ·m⁻²。

2.3.2 弯曲强度

根据表 2, 采用逐步回归分析方法, 建立目标响应值和自变量之间的数学拟合表达式, 剔除非显著项, 获得木塑复合材料弯曲强度的二次多项式回归方程。即

$$K_2=43.57+1.61A+0.11B+0.28C+0.28AB-0.1AC+0.38BC-2.84A^2-0.66B^2-1.22C^2 \quad (2)$$

为检验回归模型是否有效, 对模型各系数进行方差分析, 结果如表 4 所示。模型的 R^2 为 0.9726, 接近于 1, 说明拟合程度较好, 且与 R_{adj}^2 值 0.9251 接近, 说明模型对试验理论数据做出了良好的调整, 同时模型的 P 值为 $0.0002<0.001$ (极显著), 表明该回归模型具有显著性。最后, 失拟项 P 值为 0.6495, 说明失拟误差并不显著大于纯误差, 可接受该模型。由 F 检验可得到各因子的贡献率为: $A>C>B$, 即 WF 含量>偶联剂含量>挤出温度。

利用软件自带的检测工具诊断试验数据是否存在异常点, 过程与上一小节类似, 不再赘述。结果证明试验数据真实可靠, 无异常点。

图 6 为各因素对 WF/HDPE 复合材料弯曲强度的交互作用。从图 6(a) 和图 6(b) 可知, 随着 WF 含量的增加, WF/HDPE 复合材料的弯曲强度先提高后降低, 这是由于增强相的 WF 不断增多, 树脂不足以完全包覆, 试件界面缺陷明显增多, 导致强度降低。从图 6(c) 可知温度和偶联剂含量对弯曲强度的影响较小, 但仍存在最优解。观察等高线形状可知, 温度和偶联剂含量的交互作用对 WF/HDPE 复合材料的弯曲强度影响较大。

最优响应结果为 WF 含量为 52.9wt%, 挤出温度为 173.84℃, MAPE 含量为 4.26wt%, WF/HDPE 复合材料的弯曲强度为 43.83 MPa。

2.3.3 拉伸强度

根据表 2, 采用逐步回归分析方法, 建立目标响应值和自变量之间的数学拟合表达式, 剔除非显著项, 获得 WF/HDPE 复合材料拉伸强度的二次多项式回归方程。即

$$K_3=28.57+0.64A+0.03B+0.17C-0.15AB+0.19AC+0.028BC-2.42A^2-0.18B^2-0.25C^2 \quad (3)$$

对模型各系数进行方差分析, 结果如表 5 所

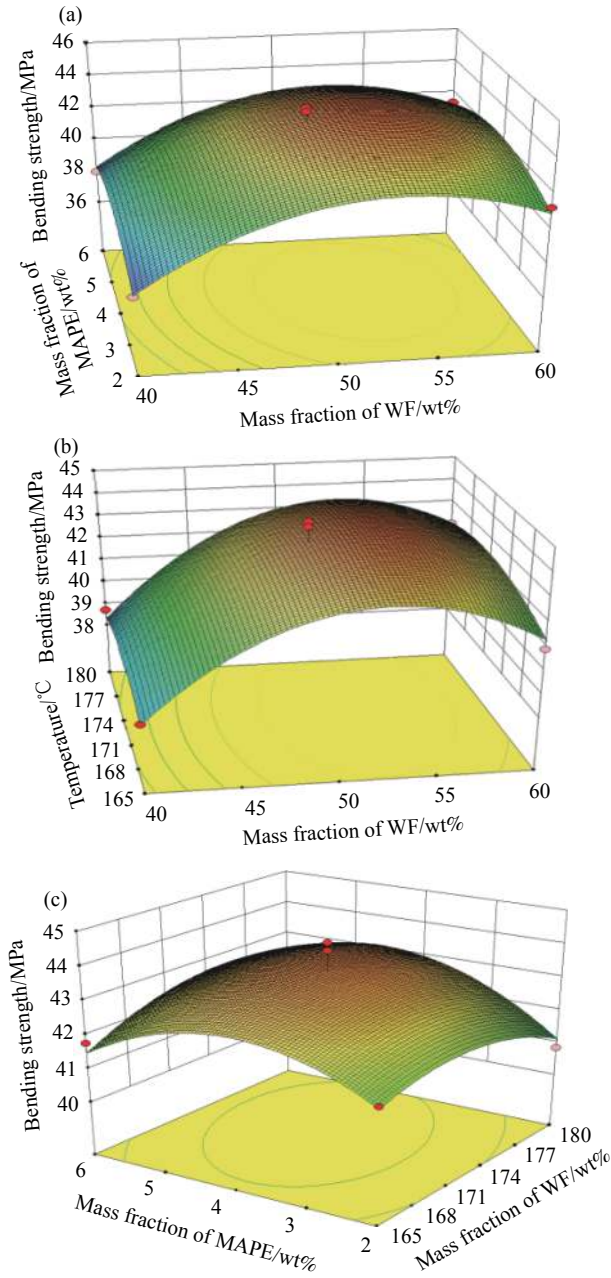


图 6 各因素对 WF/HDPE 复合材料弯曲强度的交互作用
Fig. 6 Interaction of various factors on bending strength of WF/HDPE composites

示。模型的 R^2 为 0.9859, 接近于 1, 说明拟合程度较好, 且与 R_{adj}^2 值 0.9678 接近, 说明模型对试验理论数据做出了良好的调整, 同时模型的 P 值 <0.0001 (极显著), 表明该回归模型具有显著性。失拟项 P 值为 0.712, 说明失拟误差并不显著大于纯误差, 可接受该模型。由 F 检验可得到各因子的贡献率为 $A>C>B$, 即 WF 含量>偶联剂含量>挤出温度。

通过数据检测工具分析证明试验数据真实可

表 4 WF/HDPE 复合材料弯曲强度的线性回归分析结果

Table 4 Regression analysis results for bending strength of WF/HDPE composites

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
Model	67.45	9	7.49	22.95	0.0002
A-WF	20.61	1	20.61	63.11	<0.0001
B-Temperature	0.09	1	0.09	0.28	0.6152
C-MAPE	0.63	1	0.63	1.94	0.2065
AB	0.3	1	0.3	0.93	0.3679
AC	0.044	1	0.044	0.14	0.7241
BC	0.59	1	0.59	1.79	0.2225
A ²	33.89	1	33.89	103.8	<0.0001
B ²	1.83	1	1.83	5.61	0.0497
C ²	6.32	1	6.32	19.34	0.0032
Residual	2.29	7	0.33	—	—
Lack of fit	0.71	3	0.24	0.6	0.6495
Pure error	1.58	4	0.39	—	—
Total	69.74	16	R ² =0.9726	R _{adj} ² =0.9251	R _{pre} ² =0.8023

表 5 WF/HDPE 复合材料拉伸强度的线性回归分析结果

Table 5 Regression analysis results for tensile strength of WF/HDPE composites

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F value	P value
Model	29.53	9	3.28	54.38	<0.0001
A-WF	3.29	1	3.29	54.52	0.0002
B-Temperature	0.0072	1	0.0072	0.12	0.7399
C-MAPE	0.23	1	0.23	3.89	0.0893
AB	0.093	1	0.093	1.54	0.2544
AC	0.14	1	0.14	2.39	0.1658
BC	0.003025	1	0.003025	0.05	0.8292
A ²	24.7	1	24.7	409.32	<0.0001
B ²	0.14	1	0.14	2.25	0.1774
C ²	0.27	1	0.27	4.43	0.0733
Residual	0.42	7	0.06	—	—
Lack of fit	0.11	3	0.037	0.48	0.712
Pure error	0.31	4	0.078	—	—
Total	29.96	16	R ² =0.9859	R _{adj} ² =0.9678	R _{pre} ² =0.9239

靠，无异常点。

通过对响应曲面及等高线图进行分析，随着 WF 含量的增加，WF/HDPE 复合材料的拉伸强度先提高后降低 (图 7(a) 和 图 7(b))，说明在该 WF 含量范围内复合材料增强是有限的，存在极大值。由 图 7(c) 可以发现，温度和偶联剂含量对拉伸强度的影响较小，但仍存在最优解。观察等高线形状可知，任意两个因素的交互作用均较小。

响应曲面寻优分析方法对回归模型进行分析，得到最优响应结果为 WF 含量为 48.75wt%，挤出温度为 173.71℃，MAPE 含量为 4.60wt%，WF/HDPE 复合材料的拉伸强度为 28.64 MPa。

2.3.4 联合求解

在实际应用中，各项性能均比较优良的 WF/HDPE 复合材料更受青睐。因此，对以上数据进

行联合求解，设置 WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度、弯曲强度、拉伸强度权重比为 1 : 1 : 1，得到最优响应结果为 WF 含量为 47.37wt%，挤出温度为 173.69℃，MAPE 含量为 4.23wt%，WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度为 4.06 kJ·m⁻²，弯曲强度为 43.79 MPa，拉伸强度为 28.59 MPa。

使用上述工艺参数挤出制得木塑复合样品，经测试，WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度为 3.87 kJ·m⁻²，弯曲强度为 43.04 MPa，拉伸强度为 27.89 MPa，实验数据与预测值误差小于 5%。说明通过本回归模型优化 WF/HDPE 复合材料的制备工艺及力学性能预测具有可行性。

3 结论

(1) 杨木纤维 (WF) 含量是影响杨木纤维/高密

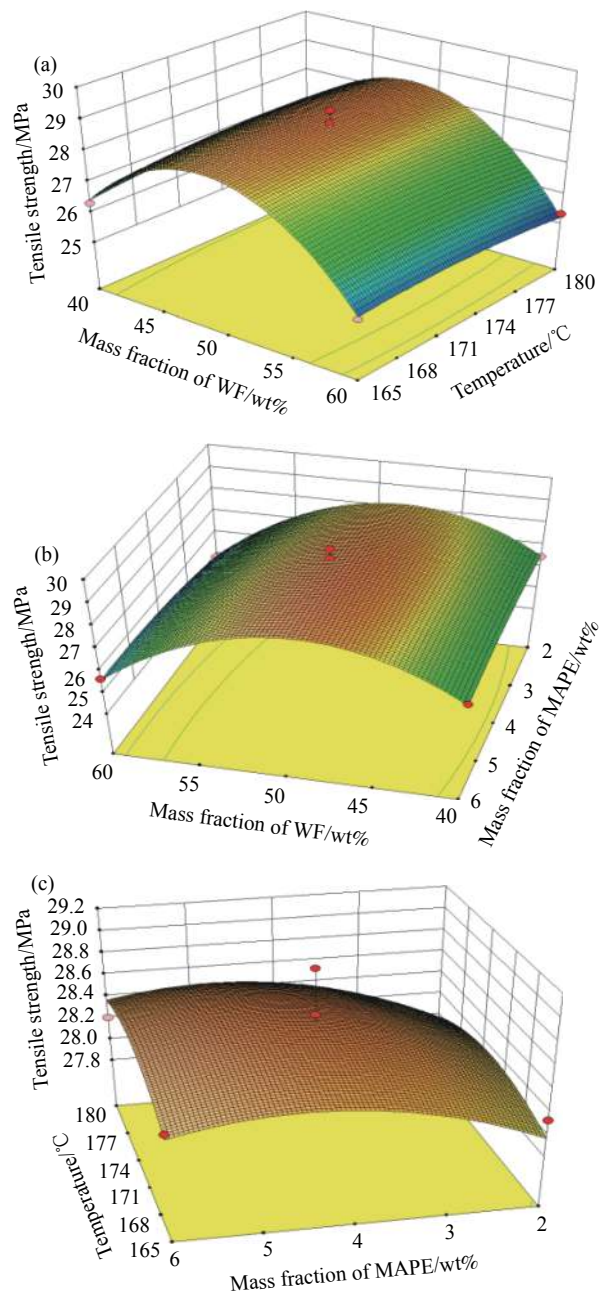


图7 各因素对 WF/HDPE 复合材料拉伸强度的交互作用

Fig.7 Interaction of various factors on tensile strength of WF/HDPE composites

度聚乙烯 (WF/HDPE) 复合材料力学强度最显著的因素, 抗冲击强度随 WF 含量增加而减小, 弯曲和拉伸强度则是先增大后减小, 存在最大值。

(2) 响应曲面法可用于 WF/HDPE 复合材料挤出工艺的优化和力学性能的预测。最优响应结果为: WF 含量为 47.37wt%, 挤出温度为 173.69℃, 马来酸酐接枝聚乙烯 (MAPE) 含量为 4.23wt%, 响应值 WF/HDPE 复合材料的抗冲击强度为 4.06 kJ·m⁻², 弯曲强度为 43.79 MPa, 拉伸强度最优值为 28.59 MPa。

参考文献:

[1] 张扬. 竹塑复合材料结构设计及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
ZHANG Yang. Research on the structure design and properties of bamboo plastic composite[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015(in Chinese).

[2] 宋永明, 王清文. 木塑复合材料流变行为研究进展[J]. 林业科学, 2012, 48(8): 143-149.
SONG Yongming, WANG Qingwen. Research progress on rheological behavior of wood-plastic composites[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(8): 143-149(in Chinese).

[3] 张泽华, 李雪菲, 张双保. 国内外木塑复合材料的研究进展[J]. 木材加工机械, 2018, 29(6): 36-38.
ZHANG Zehua, LI Xuefei, ZHANG Shuangbao. Research progress of wood-plastic composite[J]. Wood Processing Machinery, 2018, 29(6): 36-38(in Chinese).

[4] 唐健峰, 路琴, 袁杰, 等. 白炭黑和mPE增韧PP竹塑复合材料的性能及其机理[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(1): 86-90.
TANG Jianfeng, LU Qin, YUAN Jie, et al. Study on the properties of PP bamboo plastic composites toughened by white carbon black and mPE[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(1): 86-90(in Chinese).

[5] 王清文, 王伟宏. 木塑复合材料与制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
WANG Qingwen, WANG Weihong. Wood-plastic composites and products[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007(in Chinese).

[6] ZHANG Qinghua, TANG Lei, ZHANG Jianhua, et al. Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(4): 3958-3965.

[7] SAEB M. R., MOGHRI M. Application of response surface methodology in describing fusion characteristics of rigid poly(vinyl chloride)/nanoclay/wood flour/calcium carbonate hybrid nanocomposites[J]. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2015, 21(3): 183-190.

[8] 张淑洁, 伏立松, 王瑞, 等. 管道修复用涤纶-苧麻非织造物/环氧树脂复合材料厚度设计[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2805-2814.
ZHANG Shujie, FU Lisong, WANG Rui, et al. Thickness design of polyester-ramie/epoxy nonwoven composite applied on pipeline rehabilitation[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2805-2814(in Chinese).

[9] 王春红, 支中祥, 任子龙, 等. 稻壳纤维粒径和掺量分数对水泥复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1582-1589.
WANG Chunhong, ZHI Zhongxiang, REN Zilong, et al. Effect of rice husk fiber particle size and content on the prop-

- erties of cement composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1582-1589(in Chinese).
- [10] ASTM International. Standard test method for tensile properties of plastics: ASTM D638—03[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2003.
- [11] ASTM International. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM D790[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [12] ASTM International. Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics: ASTM D256[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [13] FANG Hao, ZHAO Chen, SONG Xiangyang. Optimization of enzymatic hydrolysis of steam-exploded corn stover by two approaches: Response surface methodology or using cellulase from mixed cultures of *Trichoderma reesei* RUT-C30 and *Aspergillus niger* NL02[J]. *Bioresource Technology*. 2010, 101(11): 4111-4119.
- [14] LI Xin, OUYANG Jia, XU Yong, et al. Optimization of culture conditions for production of yeast biomass using bamboo wastewater by response surface methodology[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(14): 3613-3617.
- [15] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(12): 2822-2832.
- HONG Qi, SHI Yaoyao, LU Danni, et al. Multi-response parameter optimization for the composite tape winding process based on grey relationa[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(12): 2822-2832(in Chinese).
- [16] 解光强, 陈啟原, 林文树. 基于响应曲面法的木塑复合3D打印线材挤出参数优化[J]. *塑料科技*, 2018, 46(4): 103-108.
- XIE Guangqiang, CHEN Qiyuan, LIN Wenshu. Optimization of extrusion parameters of wood-plastic composite 3D printing[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(4): 103-108(in Chinese).
- [17] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化实验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- HE Wei, TANG Bin, XUE Weidong. Optimization of experimental design method and data analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012(in Chinese).
- [18] 宋丽贤, 张平, 姚妮娜, 等. 木粉粒径和填量对木塑复合材料力学性能影响研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(17): 2451-2454.
- SONG Lixian, ZHANG Ping, YAN Nina, et al. Study on effect of particle diameter and filling quantity of wood flour on mechanical properties of wood-plastics composite[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(17): 2451-2454(in Chinese).
- [19] 冯莉, 颜军. 木粉含量对木塑复合材料可靠性的影响[J]. *林业科技*, 2012, 37(6): 44-45.
- FENG Li, YAN Jun. The reliability influence of wood powder content on wood-plastic composite material[J]. *Forestry Science Technology*, 2012, 37(6): 44-45(in Chinese).
- [20] 康浩, 郝妙琴. 不同变量因子对木塑复合材料的力学性能研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2018, 44(14): 49-54.
- KANG Hao, HAO Miaoqin. Study on mechanical properties of wood plastic composites with different variables[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2018, 44(14): 49-54(in Chinese).
- [21] 张泽志, 韩春亮, 李成未. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. *河南教育学院学报(自然科学版)*, 2011, 20(4): 34-37.
- ZHANG Zezhi, HAN Chunliang, LI Chengwei. Application of response surface method in experimental design and optimization[J]. *Journal of Henan Institute of Education*, 2011, 20(4): 34-37(in Chinese).
- [22] 戚朝阳, 王雅琪, 郭浩然, 等. 响应面法在化工生产工艺优化中的应用[J]. *辽宁化工*, 2017, 46(10): 1013-1014.
- QI Chaoyang, WANG Yaqi, GUO Haoran, et al. Application of response surface method in optimization of chemical production processes[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2017, 46(10): 1013-1014(in Chinese).
- [23] 周鑫, 孙海龙, 张泽乾. 响应面法在污水处理工艺优化中的应用[J]. *化学研究与应用*, 2017, 29(6): 753-760.
- ZHOU Xin, SUN Hailong, ZHANG Zeqian. Application of process optimization of wastewater treatment using response surface methodology[J]. *Chemical Research and Application*, 2017, 29(6): 753-760(in Chinese).