

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.014

基于灰色关联分析的CF/PEEK复合材料成型工艺优化

杨欢¹, 彭育林², 郎建志¹, 田源灏¹, 向芮萱¹

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 江南工业集团有限公司, 湖南湘潭 411100)

摘要: 针对某大尺寸构件成型过程中碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料变形行为对成型温度、压力、时间等工艺参数依赖性较高, 成型工艺参数选取不当易引发材料变形不协调、褶皱等缺陷从而导致材料力学性能降低的问题, 对CF/PEEK复合材料的压缩、剪切失效模式进行研究; 同时采用正交试验法、极差分析法研究模压温度、模压时间、模压压力对材料压缩强度、层间剪切性能的影响规律; 并基于灰色关联分析法的成型工艺多目标参数优化, 结合试验验证获得最佳工艺参数。研究发现, 成型工艺参数对技术指标影响的主次顺序为温度、压力、时间; 灰色关联度最高组(370 °C/3.5 MPa/50 min)的纵向压缩强度为1 106 MPa、横向压缩强度为208 MPa、层间剪切强度为125 MPa; 多目标优化组(370 °C/2.5 MPa/50 min)不在正交试验组中, 其纵向压缩强度为1 121 MPa、横向压缩强度为235 MPa、层间剪切强度为133 MPa, 相比关联度最高组性能提高1.3%~13%。故采用灰色关联分析法可实现多目标性能需求的CF/PEEK成型工艺参数优化, 一定程度提高复合材料性能。

关键词: 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料; 力学性能; 正交试验; 灰色关联; 多目标

中图分类号: TQ324.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0106-09

Molding process optimization of CF/PEEK composites based on grey correlation analysis

YANG Huan¹, PENG Yulin², LANG Jianzhi¹, TIAN Yuanhao¹, XIANG Ruixuan¹

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Jiangnan Industrial Group Co., Ltd., Xiangtan 411100, China)

Abstract : During the forming process of a certain large-sized component, the deformation behavior of carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone (CF/PEEK) composites was highly depended on process parameters such as forming temperature, pressure and time. Improper selection of forming process parameters could easily cause inconsistent deformation and wrinkling defects in the material, thereby reducing the material performance. The failure modes of CF/PEEK composites under compression and shear have been studied. Meanwhile, the orthogonal experiment method and range analysis method were adopted to study the influence laws of molding temperature, molding time and molding pressure on the compressive strength and shear properties between chambers of the material. And based on the forming process of the grey relational analysis method, the optimal process parameters were obtained through the optimization of multiple objective parameters combined with experimental verification. The research finds that the primary order of influence of forming process parameters on technical indicators is temperature, pressure and time. The longitudinal compressive strength of the group with the highest gray correlation degree (370 °C, 3.5 MPa, 50 min) is 1 106 MPa, the transverse compressive strength is 208 MPa, and the former shear strength is 125 MPa. The multi-objective optimization group (370 °C, 2.5 MPa, 50 min) is not in the orthogonal experimental group, and its longitudinal compressive strength is 1 121 MPa, the transverse compressive strength is 235 MPa, and the shear strength is 133 MPa, its performance improves by 1.3% to 13% compared with the group with the highest correlation. The grey correlation analysis method can optimize the CF/PEEK molding process parameters for multiple performance requirements, thereby enhancing the performance of the composite material.

Keywords : carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone composite ; mechanical property ; orthogonal experiment ; gray relational analysis method ; multi-objective optimization

通信作者: 杨欢, 硕士, 工程师, 主要研究方向为功能材料

收稿日期: 2025-11-16

引用格式: 杨欢, 彭育林, 郎建志, 等. 基于灰色关联分析的CF/PEEK复合材料成型工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 106-114.

YANG Huan, PENG Yulin, LANG Jianzhi, et al. Molding process optimization of CF/PEEK composites based on grey correlation analysis [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 106-114.

碳纤维增强聚合物基复合材料因具有高比强、高比模、可设计性强等优点而广泛应用于航空航天、新能源、交通运输等领域。与传统的碳纤维增强树脂基复合材料相比,碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料在强度、耐热、轻量化、化学稳定性等方面取得最佳平衡,且可回收性、可维护,已用于航空航天、生物医药等领域中。本文基于某大尺寸构件的轻量化需求,引入CF/PEEK,同时考虑到CF/PEEK预浸料具有常温下无黏性、硬挺度高、蓬松度高、成型温度高等特点选择模具热压成型该构件,而在模压工艺中,稳定可靠的工艺参数控制与选取对结构质量有着重要影响。多个工艺参数会对产品的性能产生耦合作用,故不能仅研究单一变量^[1-2]。

国内外关于CF/PEEK的工艺优化基本集中在短切纤维增强聚醚醚酮的注塑工艺单因素/多因素优化、连续纤维增强聚醚醚酮增材制造单因素/多因素优化上以及连续碳纤维增强聚醚醚酮单因素成型工艺研究上,关于连续纤维增强聚醚醚酮多因素成型工艺研究较少。陈意伟等^[3]针对连续碳纤维增强聚醚醚酮增材制造中界面结合差等问题,基于正交试验方法研究了喷头温度、打印速度和分层厚度对打印制件表面粗糙度和弯曲性能影响。Dimitrios等^[4]发现快速的高温处理(100 °C/min以上)可有效提高复合材料的界面性能。Wang等^[5]通过正交试验研究了底板温度、喷头温度、打印速度、打印层厚对短切碳纤维增强聚醚醚酮复合材料拉伸、弯曲性能的影响。赵子岳^[6]分别采用单因素试验参数设计、正交试验设计法探究了成型工艺(模具温度、熔体温度、注射速度、保压压力、预热温度等)对短切纤维增强树脂基二次成型复合材料性能的影响。Fuji-hara等^[7]分别研究了热压温度、热压时间(380 °C/410 °C/440 °C和20 min/40 min/60 min)对复合材料断裂性能的影响,研究发现热压温度和热压时间处在一个较低的水平是较为合适的成型工艺。

因此,本文基于某大尺寸构件(主要承受压溃)成型需求,采用正交试验的方法,以模压温度、模压时间、模压压力为变量,以样件压缩强度、层间剪切性能为评价指标,基于极差分析法,揭示成型工艺对压缩强度、层间剪切强度的影响规律,以灰色关联分析法(GRA)进行参数优化,对比分析得到最优值,对优化结果进行试验验证与比较,获得最佳工艺参数。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF/PEEK预浸料:树脂质量分数为66%±3%, T700 UD,江苏亨博复合材料有限公司;

脱模剂:717,沃克森东莞新材料有限公司;

脱模布:PI,深圳市润海电子有限公司;

胶膜:J-47A,黑龙江省科学院石油化学研究院;

强力瞬间胶:502,得力集团有限公司;

加强片:304 不锈钢,安阳市天恒金属制品公司。

1.2 主要仪器及设备

热压机:HBSCR,青岛华博机械科技有限公司;

电子万能试验机:UTM5000,深圳三思纵横科技股份有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU8020,日本日立公司。

1.3 正交试验设计

试验选取模压温度(T)、模压压力(P)、模压时间(M)为因子水平,压缩强度、层间剪切强度为衡量因子。设计了表1、表2的三因素三水平的 L_9 型正交表^[8]。

表1 正交试验因素水平表

Tab. 1 Orthogonal factor level table

Levels	Factors		
	$T/^{\circ}\text{C}$	P/MPa	M/min
1	370	1.5	20
2	380	2.5	30
3	390	3.5	50

表2 正交试验设计表

Tab. 2 Orthogonal experimental design table

Lab	Technological parameter		
	$T/^{\circ}\text{C}$	P/MPa	M/min
1	370	1.5	20
2	370	2.5	30
3	370	3.5	50
4	380	1.5	30
5	380	2.5	50
6	380	3.5	20
7	390	1.5	50
8	390	2.5	20
9	390	3.5	30

1.4 试样制备

CF/PEEK测试样件制备主要分为两步,一是制备复合材料样板,二是制备测试样件。

复合材料板制备过程如图1所示,具体如下。
(1)模具准备。材料准备首先对模具进行清理并喷涂脱模剂静置晾干,然后按照297 mm×297 mm尺寸

裁剪17张预浸料(理论厚度为2 mm,压缩样件)或51张预浸料(理论厚度为6 mm,层间剪切样件),接着按照450 mm×600 mm和297 mm×297 mm尺寸分别裁剪脱模布,最后对脱模布喷涂脱模剂静置晾干。(2)铺叠并闭模,按照脱模布、预浸料、脱模布的顺序将材料铺叠到模具下模之中,再装配上模。(3)热压。将闭合好的模具搬抬至热压机中,按照正交试验设计表设置温度、压力和时间参数。(4)脱模。最后待模具冷却至室温顶出脱模得到样板(297 mm×297 mm×2 mm和297 mm×297 mm×6 mm分别为1件)。

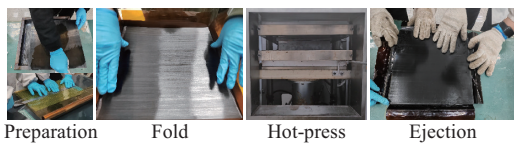


图1 CF/PEEK复合材料板的制备过程

Fig. 1 Preparation process of CF/PEEK composite board

CF/PEEK测试样件制备过程如图2所示,具体如下。(1)样件加工。按照图3的纤维方向、尺寸加工复合材料样件,压缩样件和层间剪切样件由不同厚度样件加工而成。(2)样件表面处理。一是按图4、图5中50 mm×10 mm的尺寸采用激光对样件表面进行处理,激光功率、扫描线间距、角度分别为50 kHz,60 mm,45°,并清洁;二是采用喷砂工艺对加强片表面进行处理,功率为压力为0.5 MPa,并清洁。(3)粘接。一是采用胶膜粘接加强片和复合材料样件三者之间采用金手指固定,固化温度为110 °C/2

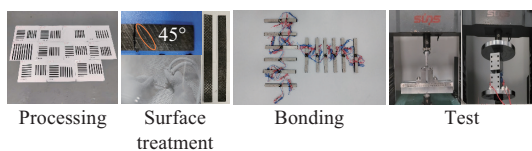


图2 CF/PEEK复合材料样件制备过程

Fig. 2 Preparation process of CF/PEEK composites

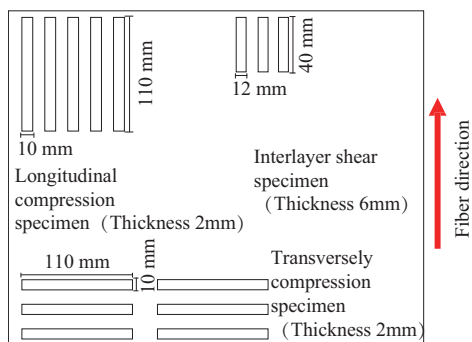


图3 样件加工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimen process

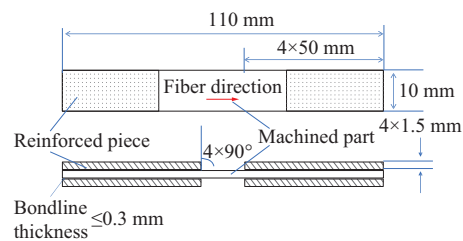


图4 纵向压缩样件尺寸示意图

Fig. 4 Schematic diagram of longitudinal compression specimen size

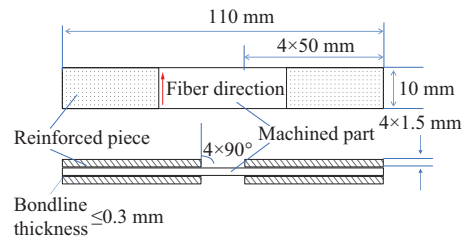


图5 横向压缩样件尺寸示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transverse compression specimen size

h;二是用502胶水将应变片粘贴到样机之上静置待固化。

1.5 测试与表征

样件的压缩测试参考 GB/T 5258-2008。

样件的层间剪切性能测试参考 GB/T 30969-2014。

测试样件断面喷金后利用 SEM 观察样件断面形貌。

2 结果及讨论

2.1 失效模式研究

2.1.1 纵向压缩

不同工艺参数制备单向复合材料样件的纵向压缩强度在836~1 106 MPa范围内,应力-应变曲线如图6所示。由图6可见,前段应力-应变曲线呈线性变化,末端应力骤降,结果表明复合材料整体呈刚性,脆性破坏引发了失效^[9]。

图7为CF/PEEK复合材料样件纵向压缩后断口照片。由图7可以看出CF/PEEK复合材料纵向压缩后样件断口与载荷方向呈一定角度,断口不平整有纤维碎屑。其破坏过程为:首先由于泊松效应,局部发生界面破坏;接着界面破坏处纤维发生失稳产生微屈曲呈弯折状;接着弯折处产生裂纹;最终基体断裂纤维折断。由于聚醚醚酮基体强度较高因此发生图7中的剪切压缩失效^[10-12]。为了解纵向压缩后样件断面形貌,以性能最佳Lab3的样件作为样品开展SEM断面检测,其结果如图8所示,样件断口处有许多纤维和基体碎屑,呈现纤维束纵

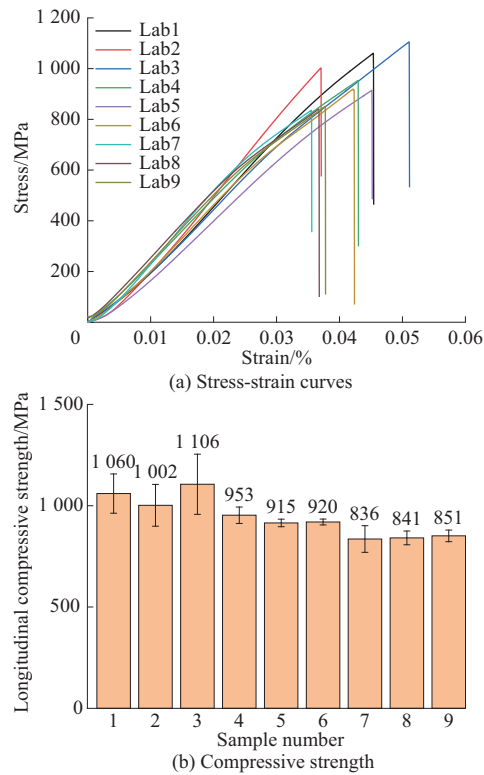


图6 单向复合材料纵向压缩性能

Fig. 6 Unidirectional composites longitudinal compressive performance

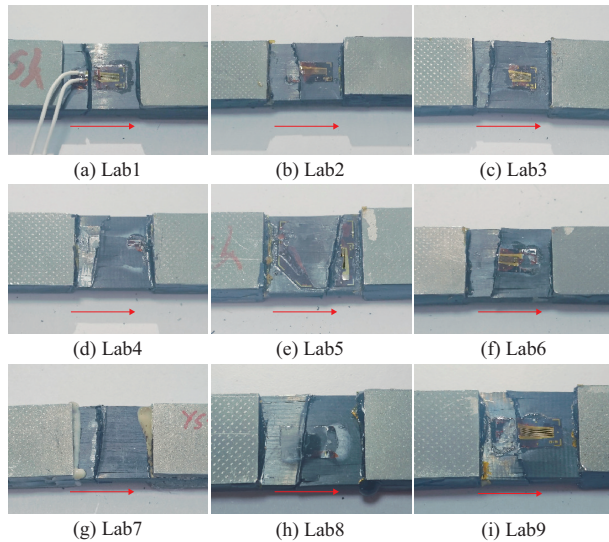


图7 CF/PEEK复合材料样品纵向压缩后断口照片

Fig. 7 Fracture surface photos of CF/PEEK composites after longitudinal compression

向分裂、局部有纤维断裂、基体中呈现微裂纹。

2.1.2 横向压缩

不同工艺参数制备样品的横向压缩强度在200~222 MPa范围内,其应力-应变曲线如图9所示。由图9可见,前段应力-应变曲线呈线性变化,末端应力缓慢下降,结果表明前期复合材料整体呈刚

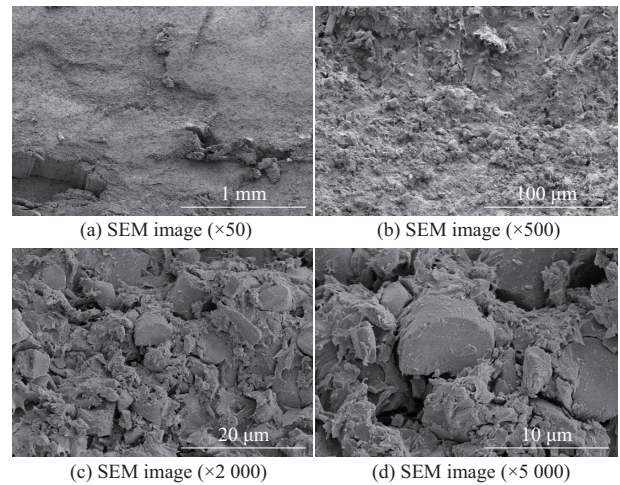


图8 CF/PEEK复合材料样品纵向压缩后不同倍数下断口形貌SEM照片

Fig. 8 Fracture SEM photos of CF/PEEK composites after longitudinal compression at different magnifications

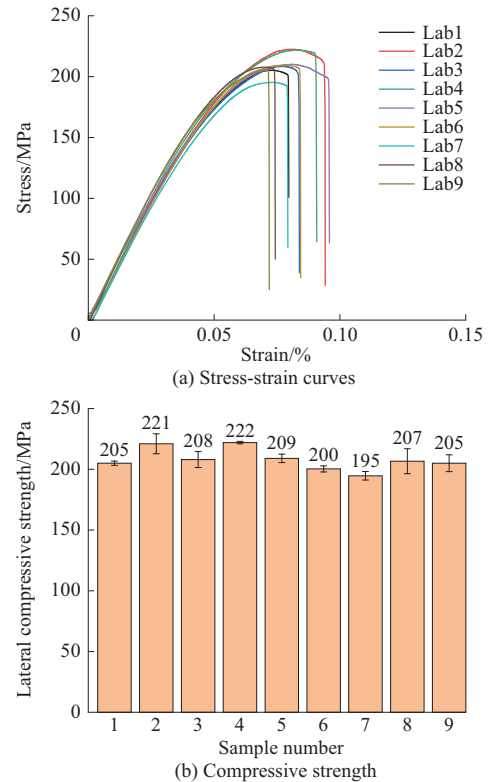


图9 单向复合材料的横向压缩性能

性,后期主要是由塑性破坏引发的基体承载失效。与纵向相比,横向压缩强度较低,这主要是由于纤维在该方向上的承载能力较弱^[13-14]。

图10、图11分别为复合材料横向压缩后断口及断口微观形貌SEM照片(Lab4),可以看出,断口基本与加载方向垂直,断口面平整光滑,层与层之间有明显界限,基体包裹纤维,基体中存在断裂时的

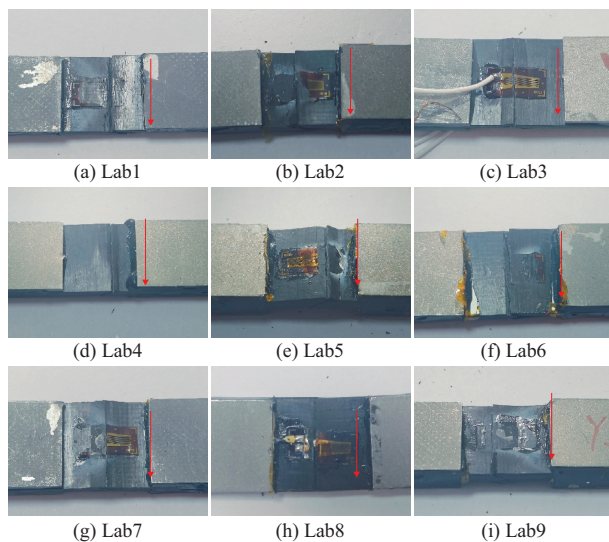


图10 CF/PEEK复合材料样件横向压缩后断口照片

Fig. 10 Fracture surface photos of CF/PEEK composites after horizontally compression

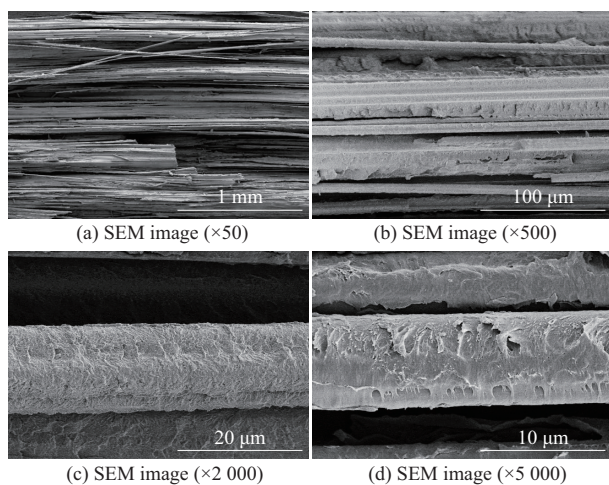


图11 CF/PEEK复合材料样件横向压缩后不同倍数下断口形貌SEM照片

Fig. 11 Fracture SEM photos of CF/PEEK composites after horizontally compression at different magnifications

微裂纹,基本以基体破坏为主,说明样件失效模式均为基体开裂,均未发生纤维损伤^[15-16]。

2.1.3 层间剪切

CF/PEEK的层间剪切试验的载荷-位移曲线及剪切强度如图12所示。由图12可见,在位移低于0.3 mm时,载荷-位移曲线呈线性变化,呈现出碳纤维的刚性特征。随着载荷继续增加至峰值,位移持续增大,载荷-位移曲线呈非线性变化,表明树脂层和纤维层共同承载,这有效提升了材料的层间剪切性能,是树脂在层间有效传递载荷的结果。末端多次出现的小幅度波动是因为裂纹在扩展过程中会遇到纤维、孔隙或韧性不同区域,导致路径发生偏

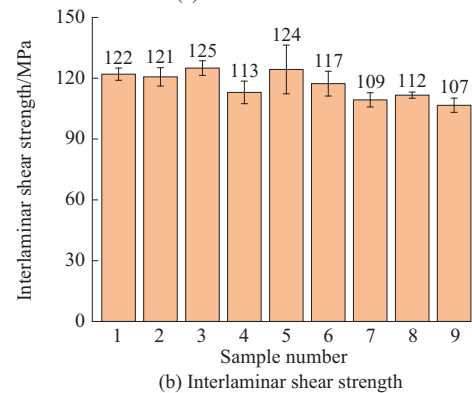
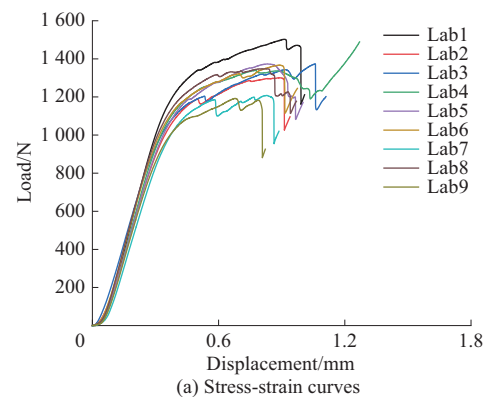


图12 CF/PEEK复合材料的层间性能

Fig. 12 Interlayer properties of CF/PEEK composites

转,这个过程表现为载荷的多次起伏。而曲线末端载荷大幅降低意味着材料发生宏观失效导致承载能力下降。之后如Lab4中大幅增大则是因为破坏模式由层间剪切破坏模式转变为承受剪切、弯曲等混合破坏模式。

在端载压缩条件下复材的破坏形貌取决于基体韧性,基体抵抗载荷的能力越弱,试样破坏就越快,复材的破坏就更偏向于脆性。而复材的层间力学性能远小于纤维方向的力学性能,故复材的层间性能主要取决于基体性能,其层间剪切破坏的主要模式为分层破坏。图13显示了层间剪切试验后CF/PEEK样件层间破坏模式,在靠近应力加载端(左右两端)发生了最大形变,直至破坏,故大部分样件层间明显分层扩展的位置均在左右端部。这也表明材料承受层间剪切后最终为分层破坏模式,而分层破坏是正应力和剪切应力共同作用结果。即复材层间破坏包括层间纤维屈曲和分层扩展,在压缩载荷作用下,首先引发层合板内应力集中在基体或界面上产生微裂纹,然后在剪切作用下,裂纹在层间扩展直至一定尺寸形成宏观的分层,最后性能急剧下降失效^[18-19]。

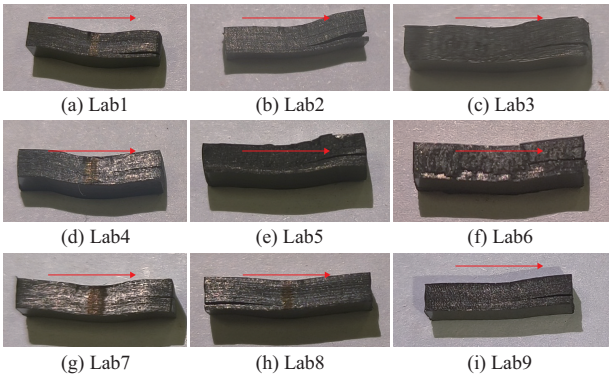


图13 层间剪切试验后CF/PEEK样件侧面照片

Fig. 13 Side photos of CF/PEEK samples after interlayer shear test

2.2 正交试验分析

表3、表4、表5分别为复合材料力学性能试验结果汇总表、极差分析表及方差分析表。由表4可知,影响纵向压缩强度的因素大小依次为模压温度、模压压力、模压时间,最佳组合为T1P3M3。模压温度从370℃升高到380℃,纵向压缩强度降低了12.00%;模压温度从370℃升高到390℃,纵向压缩强度降低了20.20%,说明温度的升高会影响纵向压缩强度,温度不宜过高。模压压力从1.5 MPa升高到2.5 MPa,纵向压缩强度降低了3.20%;模压压力从

表3 CF/PEEK 复合材料力学性能正交试验结果

Tab. 3 Orthogonal test results of mechanical properties of CF/PEEK composites

Lab	Longitudinal compressive strength/MPa	Lateral compressive strength/MPa	Interlaminar shear strength/MPa
1	1 060	205	122
2	1 002	221	121
3	1 106	208	125
4	953	222	113
5	915	209	124
6	920	200	117
7	836	195	109
8	841	207	112
9	851	205	107

表5 CF/PEEK 复合材料力学性能方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results of mechanical properties of CF/PEEK composites

Indicators	Influence factors	Sum of square	DOF	Mean sum of square	F	P	Significance level
Longitudinal compressive strength	T	69 067	2	34 533	20.54	0.046 43	Significance
	P	458.0	2	229.0	0.136 2	0.880 1	Indifference
	M	2 581	2	1 290	0.767 4	0.565 8	Indifference
Lateral compressive strength	T	146.0	2	73.00	1.698 0	0.370 7	Indifference
	P	288.0	2	144.0	3.349 0	0.230 0	Indifference
	M	98.00	2	49.00	1.140 0	0.467 4	Indifference
Interlaminar shear strength	T	274.7	2	137.3	45.780 0	0.0213 8	Significance
	P	48.67	2	24.33	8.111 0	0.109 8	Indifference
	M	28.67	2	14.33	4.778 0	0.173 1	Indifference

Notes:DOF is degree of freedom;F is F-statistics;P is significance probability value.

表4 CF/PEEK 复合材料力学性能极差分析结果

Tab. 4 Range analysis results of mechanical properties of CF/PEEK composites

Indicators	Influence factor	k1	k2	k3	R
Longitudinal compressive strength	T	1 056	929.3	842.7	213.3
	P	949.7	919.3	959.0	39.67
	M	940.3	935.3	952.3	17.00
Lateral compressive strength	T	211.3	210.3	202.3	9.000
	P	207.3	212.3	204.3	8.000
	M	204.0	216.0	204.0	12.00
Interlaminar shear strength	T	122.7	118.0	109.3	13.33
	P	114.7	119.0	116.3	4.333
	M	117.0	113.7	119.3	5.667

Note:R is range.

1.5 MPa升高到3.5 MPa,纵向压缩强度增加0.98%。

模压时间从20 min升高到30 min,纵向压缩强度降低了0.5%;模压时间从20 min升高到50 min,纵向压缩强度增加了1.3%。随模压温度水平提升,纵向压缩强度变化明显,说明温度是影响纵向压缩强度的主要因素。由表5可知,模压温度的显著性水平小于0.05,因此温度是CF/PEEK的纵向压缩强度的显著性影响因素,结果与极差分析一致。

从表4极差分析结果可知,横向压缩强度影响因素的主次顺序依次为模压时间、模压温度、模压压力,最佳组合为M2T1P2。模压时间从20 min升高到30 min,横向压缩强度增加了5.89%;模压时间从20 min升高到50 min,横向压缩强度增加了0.00%,说明不能仅从提高模压时间来提升横向压缩强度。模压温度从370℃升高到380℃,横向压缩强度降低了0.47%;模压温度从370℃升高到390℃,横向压缩强度降低了4.26%,说明温度的升高会影响横向压缩强度,温度不宜过高。模压压力从1.5 MPa升高到2.5 MPa,横向压缩强度增加了2.41%;模压压力从1.5 MPa升高到3.5 MPa,横向压

缩强度降低了1.45%,说明不能仅从提高模压压力来提升横向压缩强度。

从表4极差分析结果可知,层间剪切强度影响因素的主次顺序依次为模压温度、模压时间、模压压力,最佳组合为T1M3P2。模压温度从370℃升高到380℃,层间剪切强度降低了3.83%;模压温度从370℃升高到390℃,层间剪切强度降低了10.9%,模压温度的升高会对层间剪切强度有影响,不宜过高,与纵向压缩强度、横向压缩强度影响类似。模压时间从20 min升高到30 min,层间剪切强度降低了2.82%;模压时间从20 min升高到50 min,层间剪切强度增加了1.97%。模压压力从1.5 MPa升高到2.5 MPa,层间剪切强度增加了2.01%;模压压力从1.5 MPa升高到3.5 MPa,层间剪切强度增加了1.39%。由表5可知,模压温度的显著性水平小于0.05,因此模压温度是CF/PEEK的层间剪切强度的显著性影响因素。

由表3结果可看出,随着温度升高纵向/横向压缩强度、层间剪切强度整体呈减小趋势,这可能是因为成型温度越高、温差越大,复合材料残余应力也越大,这种应力会“预加载”在材料内部,当外部施加压缩载荷时,材料会更快地达到其强度极限而发生破坏。模压压力、模压时间对复合材料力学性能影响规律从表3中尚未找出,这主要是因为温度是复合材料力学性能显著影响因素并未对试验误差、交互作用所混淆。而另外两个非显著因素规律被交互作用所混淆,例如比较Lab1,Lab2,Lab3的变化规律时,模压压力和模压时间存在交互作用,当忽略模压时间仅探究模压压力对压缩强度、剪切强度影响规律时就时高时低。

2.3 基于正交试验的灰色关联配合比优化设计

以纵向压缩强度、横向压缩强度、层间剪切强

度作为优化指标,通过灰色关联法对正交试验的结果进行处理,获得最佳的配合比设计参数。为简化分析过程,需对数据进行无量纲化处理,对CF/PEEK复合材料而言,三项优化指标越大越好,为正方向指标(效用指标),因此采用公式(1)–公式(5)进行无量纲处理^[20–21]。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (1)$$

式中: $\max x_i$ 为第*i*个指标最大值; $\min x_i$ 为第*i*个指标最小值; x_{ij} 为第*i*个评价对象的第*j*个指标值; y_{ij} 为 x_{ij} 的无量纲化数值。

灰色关联系数 γ_{ij} 是指理想数据和无量纲化数据之间关系,具体表达式见式(2)。

$$\gamma_{ij} = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - y_{0j}| + \zeta \max_i \max_j |y_{ij} - y_{0j}|}{|y_{ij} - y_{0j}| + \zeta \max_i \max_j |y_{ij} - y_{0j}|} \quad (2)$$

式中: ζ 为分辨系数, $\zeta \in [0, 1]$,取 $\zeta = 0.5$; y_{0j} 为第*j*个试验数据的最优值,取 $y_{0j} = 1$ 。

熵权法计算指标信息熵 e_i ,见式(3)和式(4)。

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \ln \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (4)$$

式中: ω_i 为优化指标权重, $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_i = 1$ 。

计算灰色关联度 d_i ,见式(5)。

$$d_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \times \gamma_{ij} \quad (5)$$

将表3的数据带入式(1)–式(5)可得表6的无量纲数值、灰色关联系数和灰色关联度,其中关联度最大的工艺参数组合为T1P3M3。

表6 灰色关联度分析结果

Tab. 6 Results of grey correlation analysis

Lab	<i>T</i>		<i>P</i>		<i>M</i>		Grey relational degree
	Nondimensionalize	Grey relational coefficient	Nondimensionalize	Grey relational coefficient	Nondimensionalize	Grey relational coefficient	
1	0.829 6	0.547 0	0.370 4	0.733 3	0.833 3	0.552 2	0.714 5
2	0.614 8	0.619 7	0.963 0	0.514 0	0.777 8	0.569 2	0.750 1
3	1.000 0	0.500 5	0.481 5	0.679 0	1.000 0	0.506 8	0.868 8
4	0.433 3	0.698 1	1.000 0	0.504 6	0.333 3	0.755 1	0.547 9
5	0.292 6	0.774 0	0.518 5	0.662 7	0.944 4	0.521 1	0.538 3
6	0.311 1	0.763 0	0.185 2	0.846 2	0.555 6	0.649 1	0.349 9
7	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.111 1	0.902 4	0.032 1
8	0.018 5	0.981 9	0.444 4	0.696 2	0.277 8	0.787 2	0.201 3
9	0.055 6	0.947 5	0.370 4	0.733 3	0.000 0	1.000 0	0.119 2

各水平因子关联度的极差分析结果见表7,平均关联度越大,各技术指标与参考序列的关联程度越大,对应的水平即为最佳工艺参数,故T1P2M3为CF/PEEK成型最优工艺参数,设为多目标优化组。极差R的值反映了因子选取水平的变动对衡量因子

表7 水平因子灰色关联度极差分析结果

Tab. 7 Results of difference analysis of grey correlation degree of horizontal factors

Influence factors	Levels			R
	1	2	3	
T	0.777 8	0.478 7	0.117 5	0.660 2
P	0.431 5	0.496 5	0.446 0	0.065 1
M	0.421 9	0.472 4	0.479 7	0.578 3

表8 各因子灰色关联度方差分析结果

Tab. 8 Results of variance analysis of grey correlation degree of horizontal factors

Influence factors	Sum of square	DOF	Mean sum of square	F	P
T	0.655 8	2.000 0	0.327 9	16.671 3	0.056 6
P	0.007 0	2.000 0	0.003 5	0.178 0	0.848 9
M	0.005 9	2.000 0	0.003 0	0.151 2	0.868 7

表9 灰色关联度最高组和多目标优化组的力学性能对比

Tab. 9 Comparison of mechanical properties between group with the highest grey correlation degree and multi-objective optimization group

Samples	Longitudinal compressive strength/MPa	Lateral compressive strength/MPa	Interlaminar shear strength/MPa
Group with the highest degree of grey correlation(T1P3M3)	1 106	208	125
Multi-objective optimization group(T1P2M3)	1 121	235	133

3 结论

(1)纵向压缩后样件断口与承载方向呈一定角度,为剪切压缩失效模式;横向压缩后样件断口与加载方向垂直,断口面平整光滑,为基体开裂损伤模式;层间剪切破坏后样件可见层间明显分层扩展,包括层间纤维屈曲和分层扩展,为层间破坏模式。

(2)基于正交试验结果通过极差、方差分析发现,影响纵向压缩强度的因素大小依次为温度、压力、时间,横向压缩强度影响因素的主次顺序依次为时间、温度、压力,层间剪切强度影响因素的主次顺序依次为温度、时间、压力,总的来说影响复合材料力学性能主次顺序依次为温度、时间、压力。

(3)基于灰色关联分析发现,影响复合材料力学性能主次顺序依次为温度、压力、时间;相比灰色关联度最高组(T1P3M3),多目标优化组(T1P2M3)的力学性能提高1.3%~13%,故采用多目标优化,一定程度提高复合材料性能。

参考文献

[1] 杨翔飞. 聚醚醚酮热塑性复合材料承力构件材料-结构-制造一体化设计方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
YANG Xiangfei. Study on material-structure-manufacture inte-

grated design strategy for PEEK-based thermoplastic composite load-bearing components[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2020.

的影响程度,由R值大小可知,CF/PEEK成型工艺参数影响技术指标的主次顺序为:温度、压力、时间。

各因子灰色关联度方差数据见表8,从表8的显著性水平因子P可以看出,P值越小显著性水平越好,成型工艺参数对技术指标影响的主次顺序为温度、压力、时间,结果与极差分析一致。

表9分别为灰色关联度最高组(T1P3M3)和多目标优化组(T1P2M3)的力学性能,多目标优化组较关联度最高组在保证纵向压缩强度不降的基础上,横向压缩强度、层间剪切强度有一定程度增加。

grated design strategy for PEEK-based thermoplastic composite load-bearing components[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2020.

[2] 陆意. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的结晶结构调控及强韧化[D]. 上海:东华大学,2022.
LU Yi. Regulation of crystalline structure and strengthening and toughening behaviours and mechanisms of CF/PEEK[D]. Shanghai: Donghua University,2022.
[3] 陈意伟,单忠德,杨旭静,等. 连续纤维增强PEEK增材制造力学性能与成型质量优化[J]. 工程塑料应用,2022,50(5):61-67.
CHEN Yiwei, SHAN Zhongde, YANG Xujing, et al. Parameter optimization of mechanical properties and forming accuracy for continuous fiber reinforced PEEK additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application,2022,50(5):61-67.
[4] GAITANELIS D, WORRALL C, KAZILAS M. Influence of rapid high-temperature processing on the interface of CF/PEEK, a quick and effective method for enhancing the IFSS[J]. Composites Science and Technology, 2024, 251. DOI: 10.1016/j. compscitech.2024.110564.
[5] WANG P, ZOU B, DING S L, et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(9):236-246.

- [6] 赵子岳. 碳纤维增强聚芳醚酮/聚醚醚酮热塑性复合材料二次成型工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- ZHAO Ziyue. Overmolding process of carbon fiber reinforced poly aryl ether ketone/poly ether ether ketone thermoplastic composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [7] FUJIHARA K, HUANG Z M, RAMAKRISHNA S, et al. Influence of processing conditions on bending property of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(16): 2 525–2 534.
- [8] 王承志, 周海安, 和利伟, 等. SiC_p/Al 等离子体电解氧化工艺的正交优化与膜层性能分析[J/OL]. 电镀与涂饰, 2025: 1–9. (2025–07–21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1237.TS.20250721.1011.004.html>.
- WANG Chengzhi, ZHOU Haian, HE Liwei, et al. Orthogonal optimization of plasma electrolytic oxidation process on SiC_p/Al composite and film characterization[J/OL]. Electroplating & Finishing, 2025: 1–9. (2025–07–21). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1237.TS.20250721.1011.004.html>.
- [9] 周悦. 碳纤维织物增强聚醚醚酮复合板材制备及热压成型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- ZHOU Yue. Preparation and thermoforming of carbon fiber fabric reinforced polyether-ether-ketone sheets[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [10] 王岩, 吴震宇, 卢坚. 成型压力对碳纤维增强聚醚醚酮复合材料性能的影响[J]. 轻工机械, 2025, 43(3): 17–22.
- WANG Yan, WU Zhenyu, LU Jian. Effect of molding pressure on properties of carbon fiber/polyether-ether-ketone composites[J]. Light Industry Machinery, 2025, 43(3): 17–22.
- [11] 孙洪霖. 连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- SUN Honglin. Study on preparation and properties of continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone composite[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [12] 鞠宏奎. 单向复合材料的压缩力学行为研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- JU Hongkui. Research on compression mechanical behavior of unidirectional composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [13] 高勇. 纤维增强环氧/氰酸酯树脂基复合材料成型残余应力多尺度分析及工艺优化[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- GAO Yong. Multi-scale analysis and process optimization of residual stress in fiber-reinforced epoxy/cyanate resin matrix composites molding[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [14] 刘雁鹏, 韩宇泽, 任中杰, 等. 超薄单层碳纤维增强复合材料板拉伸和压缩失效行为研究[J]. 复合材料科学与工程, 2024(12): 19–25.
- LIU Yanpeng, HAN Yuze, REN Zhongjie, et al. Study on tensile and compression failure behavior of ultra-thin-ply carbon fiber reinforced composite panel[J]. Composites Science and Engineering, 2024(12): 19–25.
- [15] 李逸轩, 任宏亮, 刘卫生, 等. 拉挤碳纤维增强复合材料力学性能测试及其失效机理分析[J/OL]. 复合材料科学与工程, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.202507031.1017.002>.
- Li Yixuan, Ren Hongliang, Liu Weisheng, et al. Mechanical properties test and failure mechanism analysis of pultruded carbon fiber reinforced composite[J/OL]. Composites Science and Engineering, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.202507031.1017.002>.
- [16] 吴莎, 刘建超, 廖英强. 碳纤维复合材料层合板压缩性能的相关影响因素[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(3): 63–68.
- WU Sha, LIU Jianchao, LIAO Yingqiang. The influencing factors of compressive strength in carbon fiber reinforced composite laminates[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(3): 63–68.
- [17] DAI J N, KOU S Q, YANG H Y, et al. High-content continuous carbon fibers reinforced PEEK matrix composite with ultra-high mechanical and wear performance at elevated temperature[J]. Composite Structures, 2022, 295. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115837.
- [18] 杨晓波. 碳纤维增强树脂基复合材料构件振动低压固化成型工艺及实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- YANG Xiaobo. Process and experimental study on vibration-assisted low pressure processing of carbon fiber reinforced plastic composite components[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [19] 张照. 碳纤维织物增强聚醚醚酮基(CFF/PEEK)航空复合材料的制备及其界面改性[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- ZHANG Zhao. Preparations and interface modifications for carbon fiber fabrics reinforced polyether ether ketone (CFF/PEEK) aeronautical composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [20] 高英力, 裴甘鹏, 徐艺坤, 等. 基于正交设计和灰色关联理论的混杂纤维ECC优化设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 262–269.
- GAO Yingli, PEI Ganpeng, XU Yishen, et al. Optimization design of hybrid fiber reinforced ECC based on orthogonal and grey relational theory[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(2): 262–269.
- [21] 林杰, 刘少光, 李广斌, 等. 基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 6–10.
- LIN Jie, LIU Shaoguang, LI Guangbin, et al. Influencing factors analysis and parameter optimization for rock fragmentation by deep-hole cut blasting based on grey correlation analysis[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5): 6–10.