

碳纤维复合材料与极地环境因素交互关系研究

孙伟¹, 赵玮¹, 于舒涵¹, 牟昱¹, 胡始弘², 俞佳妮², 张大勇¹

(1. 大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221;

2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200021)

摘要: **目的** 揭示低温环境对碳纤维复合材料静态力学性能的影响, 探讨极地环境因素的交互关系及其性能敏感性。**方法** 采用正交试验设计, 并通过极值与方差分析法探究各因素对材料性能影响的显著性与主次顺序。基于响应面法, 建立力学性能指标与各环境因素间的二次回归模型, 分析各因素之间的交互作用。**结果** 碳纤维复合材料的硬度、抗拉强度和弹性模量对环境因素的敏感性存在差异。材料硬度和抗拉强度主要受辐照影响, 其次为温度和覆冰厚度; 弹性模量则受温度影响显著。响应面分析结果表明, 温度、覆冰厚度与辐照之间存在明显的交互效应, 尤其是对抗拉强度和弹性模量的影响更为显著, 而对硬度的交互影响较弱。**结论** 碳纤维复合材料在极地环境下表现出良好的稳定性与环境适应性, 该研究将为碳纤维复合材料的极地应用提供一定的数据支持与理论基础。

关键词: 碳纤维复合材料; 正交试验; 极地环境; 可靠性试验; 响应面分析; 交互关系; 静态力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0133-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.014

Interaction between Carbon Fiber Composites and Polar Environmental Factors

SUN Wei¹, ZHAO Wei¹, YU Shuhan¹, MU Yu¹, HU Shihong², YU Jiani², ZHANG Dayong¹

(1. School of Chemical Engineering Ocean and Life Science, Dalian University of Technology, Liaoning Panjin 124221, China;

2. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200021, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the effects of low-temperature environments on the static mechanical properties of carbon fiber composites and to explore the interplay of polar environmental factors and their sensitivity to material performance. Using an orthogonal experimental design, extreme value and variance analyses were employed to determine the significance and hierarchy of each factor's impact on material properties. A quadratic regression model was developed through response surface methodology to capture the relationships between mechanical performance indicators and environmental variables, so as to have an in-depth analysis of factor interactions. The hardness, tensile strength, and elastic modulus of carbon fiber composites exhibited varying sensitivities to environmental factors. Hardness and tensile strength were primarily affected by radiation, followed by temperature and ice thickness; while elastic modulus was particularly sensitive to temperature. The response surface analysis revealed significant interaction effects among temperature, ice thickness, and radiation, notably influencing tensile strength and elastic modulus, with a weak effect on hardness. Overall, carbon fiber composites demonstrate strong stability and environ-

收稿日期: 2024-11-07; 修订日期: 2024-12-06

Received: 2024-11-07; Revised: 2024-12-06

基金项目: 高技术船舶科研项目 (CNG2N21-2-2)

Fund: High-tech Marine Scientific Research Projects (CBG2N21-2-2)

引文格式: 孙伟, 赵玮, 于舒涵, 等. 碳纤维复合材料与极地环境因素交互关系研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 133-143.

SUN Wei, ZHAO Wei, YU Shuhan, et al. Interaction between Carbon Fiber Composites and Polar Environmental Factors[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 133-143.

mental adaptability in polar conditions, providing essential data and theoretical support for their application in these extreme environments.

KEY WORDS: carbon fiber composite material;orthogonal test;polar environment; reliability test;response surface analysis;interactive relationship; static mechanical properties

近些年来,随着科技的发展,碳纤维复合材料(CFRP)逐渐应用于各类工程装备中,碳纤维复合材料具有比强度高、比刚度高、加工成形方便等特点^[1]。与传统金属材料相比,复合材料更具轻量化和更好环境适应性,在航空、航天、高寒、海工等恶劣工况下服役已显示其优异性,同时也积累了大量的环境试验数据^[2-3]。随着北极地区的战略地位和商业价值的不断凸显,为了开发利用极地资源,各类极地装备的研发必不可少。以极地船舶为例,碳纤维复合板广泛应用于救生装备、隔热层以及小型艇的壳体等^[4-5]。碳纤维复合材料的极地环境适应性数据的不足限制了其进一步应用,在役碳纤维装备的极地环境可靠性需要验证。相比内陆与常规海域,极地具有温度极低、极昼、覆冰严重等极端气候条件^[6-7]。当装备所用材料暴露于极端环境中时,可能出现材料的力学性能下降、耐热性减弱、耐腐蚀性降低等问题,这将严重降低其在极地地区的服役寿命。本研究重点关注碳纤维复合材料与不同极地环境因素之间的交互关系,研究材料在极地环境下的敏感性,为碳纤维复合材料极地环境应用奠定理论基础和数据支持。

已有研究对CFRP在单一环境因素下的力学行为进行了较为广泛的探索。Hartwig等^[8]研究了环氧树脂在-269~25℃的力学性能,发现温度降低会显著提升树脂模量,但降低其伸长率。Reed等^[9]进一步分析了多种环氧树脂在低温至室温条件下的力学特性,并指出低温环境会引起材料模量增加和拉伸强度降低。此外,Yan等^[10]从分子间作用力角度阐释了CFRP低温力学性能的演化机制,指出低温下分子堆积密度和分子间作用力增强,使材料的抗拉强度和弹性模量有所提升。针对冰载荷的研究,刘凯^[11]和Wang等^[12]系统探讨了CFRP层合板在冲击荷载下的损伤演化机制,为模拟复杂极地环境中的服役条件提供了参考依据。在环境老化方面,研究者也取得了一系列进展,Awaja等^[13]和蒋诗才等^[14]分别从紫外线辐照角度分析了CFRP老化机理,并发现其长时间暴露后力学性能虽下降,但仍能保持较高的稳定性。

尽管现有研究成果丰富,但多集中于单一环境因素的影响,较少涉及极地环境中多种因素交互作用对CFRP性能的综合影响。为此,本文通过实验室环境模拟,针对低温、紫外辐照和覆冰3种典型极地工况,设计了三因素三水平的正交试验,并以硬度、抗拉强度、弹性模量为评价指标,全面评估CFRP的静态力学性能变化。结合极差分析和方差分析,研究各环境

因素对材料静态力学性能的影响程度,并通过响应面分析揭示环境因素间的交互作用规律。本研究旨在系统揭示碳纤维复合材料在极地环境中的适应性,为极地装备的研发提供理论指导和数据支持,进而推动极地科学研究和工程应用的发展。

1 材料与试验

1.1 研究方法

研究方案如图1所示,以船用碳纤维复合板为研究对象,关注其强度、硬度、弹性模量参数与极地低温、辐照、覆冰环境要素的交互关系,为其极地环境可靠性试验提供数据支持。

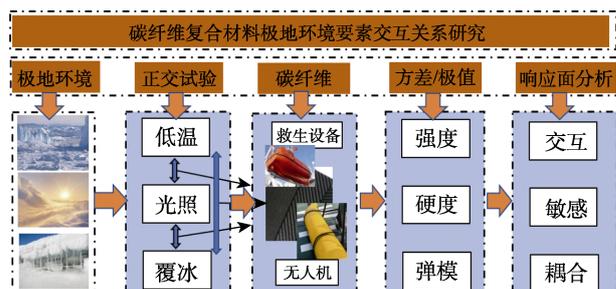


图1 碳纤维复合材料极地环境要素交互关系研究分析过程

Fig.1 Research and analysis process of interaction of carbon fiber composite polar environmental elements

1.2 试件

本研究所用材料为T300/环氧树脂复合材料,增强纤维采取正交铺层[0/90],厚度约为4mm,试样尺寸遵照GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》^[15]中的规定。其具体尺寸如图2a所示,试件实物如图2b所示。

1.3 试验设备

微机控制电子万能试验机:WDW-50F(用于开展材料的定轴拉伸、蠕变、应力腐蚀等的力学性能试验),中国济南,量程为50kN,精度为0.5级。

低温环境试验箱:EC-86LHP,日本日立;工作温度最低可至-70℃。

紫外老化试验箱:LRHS-NZY,上海林频。

1.4 试验方案

在复杂的极地环境中,碳纤维复合材料的力学性

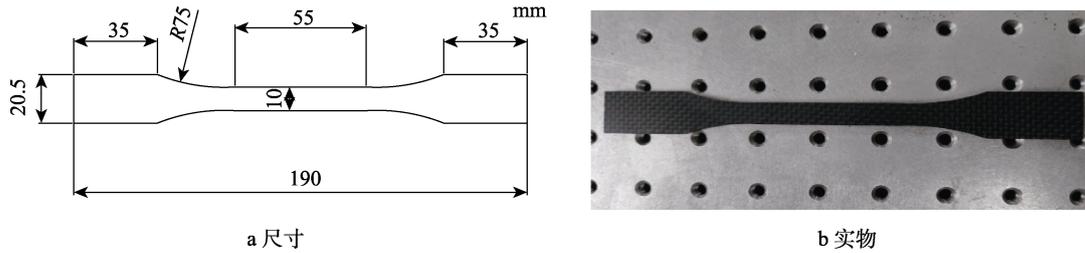


图 2 试件尺寸和复合板实物

Fig.2 Specimen size and composite specimen:a) size; b) specimen

能受多因素影响,全因素完全试验方案适用于两因素类型的研究。正交试验法是一种在所有组合中选取有代表性的试验点进行试验^[16],能够探究何种因素对材料性能影响最为显著,并减少试验成本。以低温、结冰、紫外辐照这 3 类极地典型工况为试验三因素,取水平数为 3 进行正交试验。整个北极地区温度在 $-10\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[17],本研究采用试验温度取 $-20\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。太阳 UVA 光谱范围大,辐照度较大,且受大气影响较小,因此本文主要研究 UVA 波段对 CFRP 的影响。郑向东等^[18]学者的研究报告中所指出,极地地区的紫外辐照强度约为 $10\sim 80\text{ W/m}^2$,本文采取 10、40、 70 W/m^2 ,并依次放置 3、7、10 d。目前与覆冰相关研究较少,根据工程经验,极地地区结冰厚度为厘米级,因此本研究中覆冰梯度依次取 1.5、3、4.5 cm。本文正交试验方案见表 1。

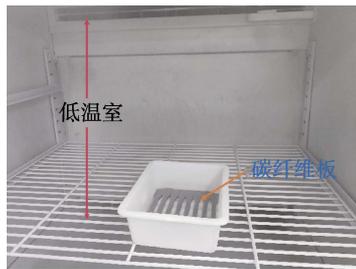
以因素 A、因素 B、因素 C 依次代表温度、覆冰、辐照。温度取值为 $-20、-35、-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,处理时间为 48 h;覆冰水平按冰层厚度取 1.5、3、4.5 cm,处理时间为 48 h;辐照取值为 $10\text{ W/m}^2、3\text{ d}$, $40\text{ W/m}^2、7\text{ d}$, $70\text{ W/m}^2、10\text{ d}$ 。辐照试验在试验次序中一般不侷

表 1 正交试验方案

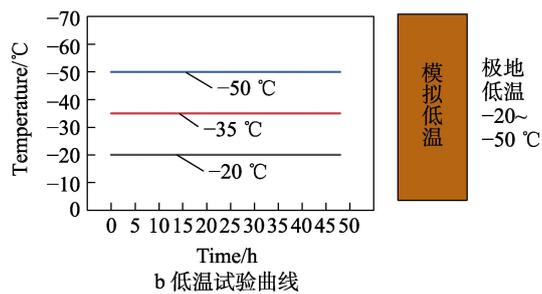
Tab.1 Orthogonal test scheme

试验编号	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	覆冰厚度/cm	辐照条件/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2},\text{d})$
1	-20	1.5	10, 3
2	-20	3	40, 7
3	-20	4.5	70, 10
4	-35	1.5	40, 7
5	-35	3	70, 10
6	-35	4.5	10, 3
7	-50	1.5	70, 10
8	-50	3	10, 5
9	-50	4.5	40, 5

制,其次施加对复合材料损伤较小的环境应力,为使施加的环境能最大限度地体现叠加效应,因此最终实验次序为辐照-覆冰-低温。环境试验进行完毕后,测量其硬度、拉伸强度等物理性能。低温、辐照环境试验如图 3 所示。不同覆冰厚度与不同辐照条件所对应的试件如图 4 所示。



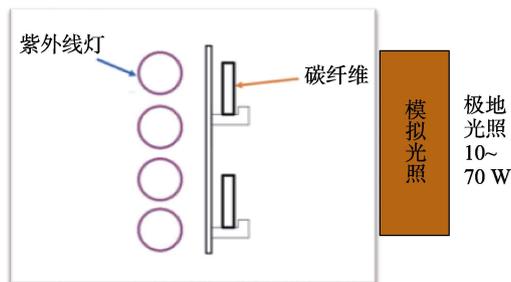
a 低温环境试验



b 低温试验曲线



c 紫外辐照试验



d 辐照试验

图 3 低温、辐照试验

Fig.3 Low temperature and radiation tests: a) low temperature environmental test; b) low temperature test curve; c) ultraviolet radiation test; d) radiation test

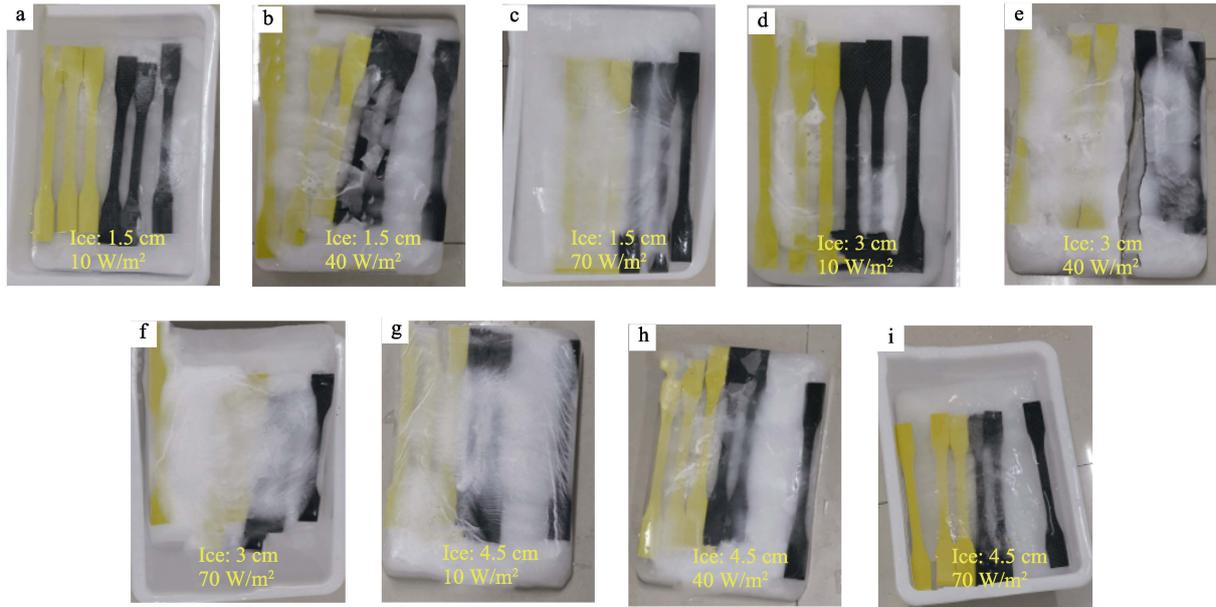


图4 覆冰试验
Fig.4 Icing test

硬度试验：依据 GB/T 2411—2008^[19]进行测试。试样分别在对应温度下中保持 2 h 后取出,并于 3 min 内完成硬度测试。记录硬度计表盘上测试的数值,每次至少测试样品表面 3 次,取其平均值,即为该种材料的邵氏硬度。

拉伸试验：依据 GB/T 1447—2005 进行测试。试样拉伸加载速率为 2 mm/min, 为避免偶然性, 每组至少 3 个试样, 试验进行完毕后, 记录其拉伸强度与

弹性模量。

2 结果与分析

2.1 碳纤维复合材料力学性能测试结果分析

碳纤维复合材料经正交试验后其力学性能见表 2, 表中不同试验序列号下所对应的性能值为测试结果取平均所得。

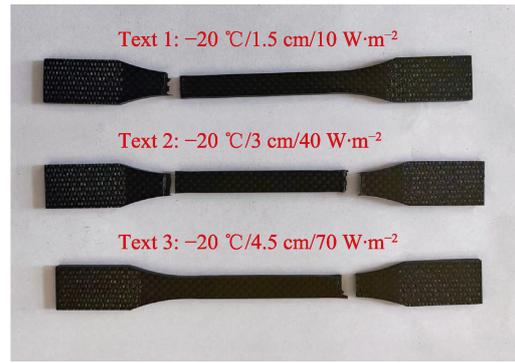
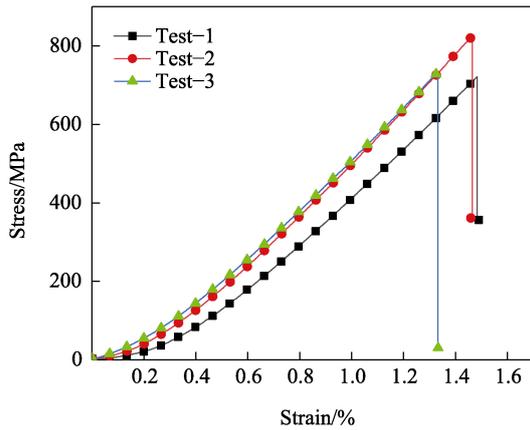
表 2 力学性能试验结果
Tab.2 Mechanical properties test results

试验号	A 温度/℃	B 覆冰厚度/cm	C 辐照强度/(W·m ⁻² ,d)	硬度(HD)	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa
1	-20	1.5	10, 3	91	719	58.32
2	-20	3	40, 7	91.75	819	63.81
3	-20	4.5	70, 10	91.5	734	58.24
4	-35	1.5	40, 7	91.5	815	64.4
5	-35	3	70, 10	91.25	789	65.83
6	-35	4.5	10, 3	91	795	66.1
7	-50	1.5	70, 10	91.75	818	55.86
8	-50	3	10, 3	90.5	763	55.38
9	-50	4.5	40, 7	91	795	56.15

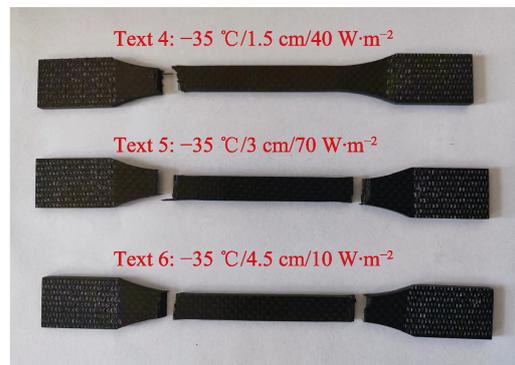
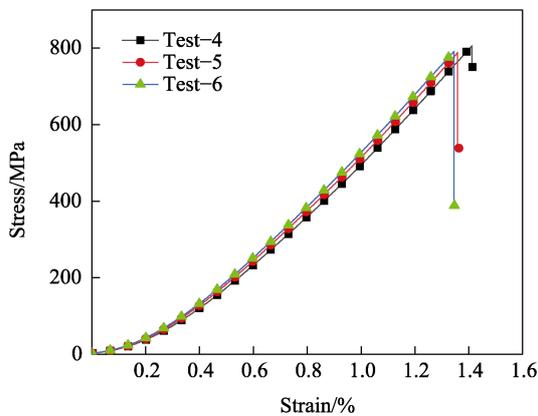
试件经拉伸后,应力-应变曲线与失效形貌如图 5 所示,断裂时的应变值反映其脆性。由图 5 可知,随着温度的降低,碳纤维复合材料的脆性表现出先提升、后下降的特性。试件的断裂形貌有 2 类:断口较为平整,无明显碎屑;分层断裂,可见其层间形貌。随试验温度的降低,层间破坏效果越严重。

3 类环境因素对硬度、抗拉强度、弹性模量影响程度的顺序见表 3~5。根据表 3 内容,通过极值大小可知,3 类条件对硬度性能影响程度为 C>A>B,但由

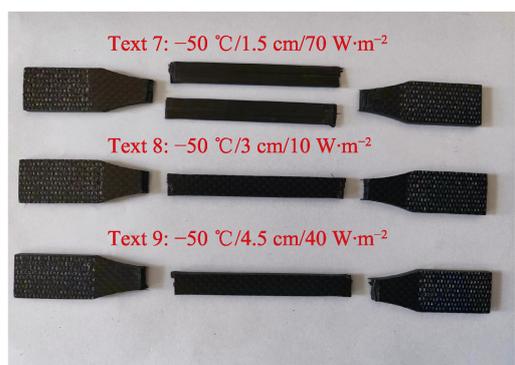
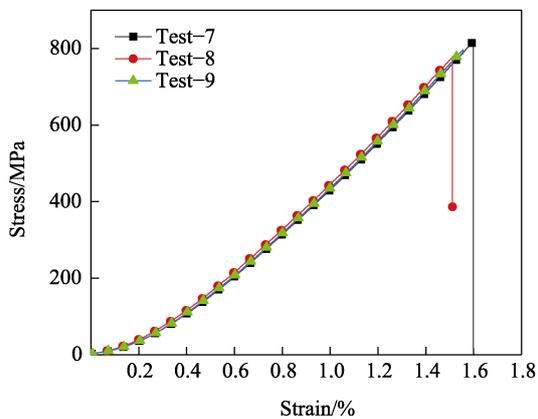
于极值较小,因此硬度在极端环境下性能变化不明显。同理,3 类环境因素对抗拉强度影响程度为 C>A>B。由表 5 可知,弹性模量受 3 类不同环境因素影响程度为 A>B>C。该顺序与前者表现有所差异,这可能是因为基体材料与纤维的热膨胀系数不同,使得内部产生预应力,预应力的产生会影响材料内部的微观结构,从而改变了应力-应变关系,最终导致弹性模量发生变化。覆冰厚度的变化同样会导致预应力发生变化,从而使得其弹性模量发生变化。



a 第1~3 组



b 第4~6 组



c 第7~9 组

图 5 应力-应变曲线与失效形貌

Fig.5 Stress-strain curve and failure morphologies:a) groups 1 to 3; b) groups 4 to 6; c) groups 7 to 9

表 3 硬度极值分析

Tab.3 Extreme value analysis of hardness

	A(温度)	B(覆冰厚度)	C(辐照)
k_1	91.417	91.417	90.833
k_2	91.250	91.167	91.417
k_3	91.083	91.167	91.167
R	0.344	0.250	0.417
因素主次	C>A>B		

表 4 抗拉强度极值分析

Tab.4 Extreme value analysis of tensile strength

	A(温度)	B(覆冰厚度)	C(辐照)
k_1	757.333	784.000	759.000
k_2	799.667	790.333	809.667
k_3	792.000	774.667	780.333
R	42.334	15.666	50.667
因素主次	C>A>B		

表5 弹性模量极值分析
Tab.5 Extreme value analysis of elastic modulus

	A(温度)	B(覆冰厚度)	C(辐照)
k_1	60.123	59.527	59.933
k_2	65.443	61.673	61.453
k_3	55.797	60.163	59.977
R	9.646	2.146	1.520
因素主次	A>B>C		

为进一步分析不同环境因素对复合材料影响程度的显著性,对数据采用方差分析,其结果见表6~8。通过对比表6~8各性能测试结果的偏差平方和可知,3类环境因素对复合材料性能影响程度的大小与极值分析结果相一致。表8中指标A所对应F比大于其临界值,说明温度的变化对材料的弹性模量具有显著性影响。

表6 硬度方差分析
Tab.6 Variance analysis of hardness

指标	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	0.167	2	0.485	3.110	
B	0.125	2	0.363	3.110	
C	0.792	2	2.302	3.110	
误差	0.292	2			
总和	1.38	8			

表7 抗拉强度方差分析
Tab.7 Variance analysis of tensile strength

指标	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	3052.67	2	1.134	3.110	
B	372.67	2	0.138	3.110	
C	3882.67	2	1.443	3.110	
误差	3458	2			
总和	10766	8			

表8 弹性模量方差分析
Tab.8 Variance analysis of elastic modulus

指标	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	140.081	2	3.449	3.110	*
B	7.294	2	0.180	3.110	
C	4.493	2	0.111	3.110	
误差	10.57	2			
总和	162.44	8			

2.2 整体效果分析

经正交环境试验后,碳纤维复合材料硬度、拉伸强度、弹性模量的均值响应图像如图6所示。

由图6a可见,温度对硬度的影响较小,硬度随着温度降低略有下降。这是由于碳纤维属于具有高稳定性的材料,而树脂基体在常见的温度范围内不会发生显著的物理变化,因此温度对复合材料硬度的影响可忽略不计。当冰厚增加时,硬度呈现先下降、后上升的趋势,这可能与冰层引起的表面应力重分布有关。总体来看,硬度在不同环境因素下波动较小,表明碳纤维环氧复合材料对极地条件具有较强的硬度稳定性。随着辐照量的增加,复合材料的硬度变化没有明显的趋势,但其硬度变化量小于原始样本的1%,因此可认为CFRP在极地环境中的硬度性能较为稳定。

由图6b可见,CFRP的抗拉强度受温度变化与辐照变化的影响较大,均呈现出先升高、后下降的趋势。这是因为碳纤维本身分子结构较为稳定,受温度影响较小,而树脂基体的膨胀系数较大,从而增强了与纤维界面的黏结,使复合材料层合板力学性能得到增强,因此抗拉强度会上升。当温度继续下降至一定临界值时,过低的温度会使基体与纤维的黏结力下降,而碳纤维本身强度则随着温度降低而降低^[20],因此出现下降情况。在低辐照强度的情况下,辐照会导致基体材料的后固化,从而增强界面间的黏结力。辐照强度进一步增加时,晶格缺陷可能会达到一定饱和程度,从而引发缺陷聚集并形成孔隙,而树脂基体对于

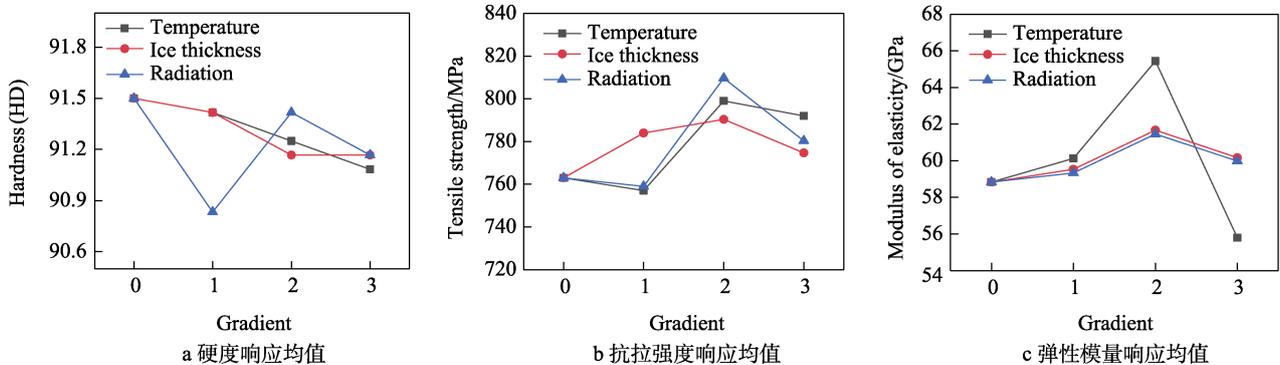


图6 整体效应分析

Fig.6 Overall effect analysis: a) mean value of hardness response; b) mean value of tensile strength; c) mean value of elastic modulus

孔隙缺陷极为敏感^[21], 因此降低了材料的拉伸强度。覆冰处理对拉伸强度的影响较小, 可忽略不计。但无论以哪一环境因素为研究对象, CFRP 的抗拉强度的变化量与原始样本对比未超过 10%, 对此可认为在极地环境中 CFRP 性能较为稳定。

由图 6c 可见, 紫外辐照与覆冰处理对 CFRP 的弹性模量的影响较小, 而 CFRP 对温度变化的敏感性最为显著, 随着温度从 -20 °C 降低至 -35 °C, 弹性模量逐渐升高。这主要是由于环氧基体的收缩作用增强了碳纤维与基体界面的黏结力。然而, 当温度进一步降低至 -50 °C 时, 基体脆化以及界面微裂纹的产生导致弹性模量下降。

3 响应面分析

响应面法 (Response surface Methodology, RSM)^[22] 是将数学方法与统计法融合而来的产物, 其基本思想是运用合理的试验设计方法并通过试验得到一定的试验数据, 然后运用多元回归方程将设计变量与响应值来拟合为某种函数关系, 进而构建模型的方法。输入变量 x 与响应值 y 之间的关系为:

$$Y = y(x) + \varepsilon = f(x) + \delta \tag{1}$$

$$X = [x_1 + x_2, \dots, x_n] \tag{2}$$

式中: $y(x)$ 为确定函数; ε 为试验随机误差; $f(x)$ 为 $y(x)$ 拟合近似函数, 即响应面; x_n 为 n 维设计变量; δ 为总误差。

本研究以碳纤维复合材料的硬度、抗拉强度、弹性模量作为指标衡量其性能, 为反映响应值与输入变量之间的非线性关系, 拟合函数 $f(x)$ 采用二次多项式。其具体表达式如下:

$$f(x) = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \tag{3}$$

式中: β_0 为常数系数; β_i 为线性系数; β_{ii} 为二次系数; β_{ij} 为交互系数。

使用 Design-expert 软件对试验实测值进行多元回归拟合分析, 分别建立硬度 (Y_1)、抗拉强度 (Y_2)、弹性模量 (Y_3) 和自变量因素 A (温度)、 B (覆冰厚度)、 C (辐照) 的二次多项式响应面回归方程, 并从 ANOVA 中获取硬度、抗拉强度、弹性模量相关的残差图。残差表示观测值与模型预测值之间的差异, 用以衡量模型对数据的拟合程度。经数据清洗后, 硬度、抗拉强度、弹性模量的残差如图 7~9 所示。

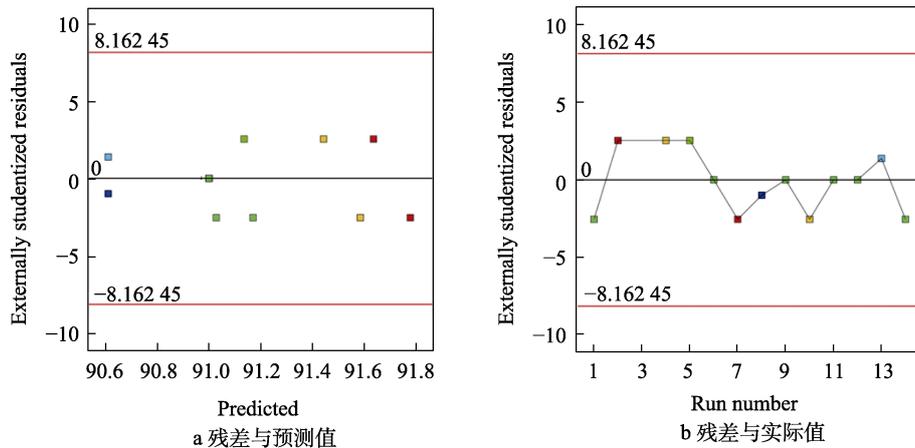


图 7 硬度残差正态图

Fig.7 Hardness residual normal diagram: a) residual and predicted; b) residual and actual value

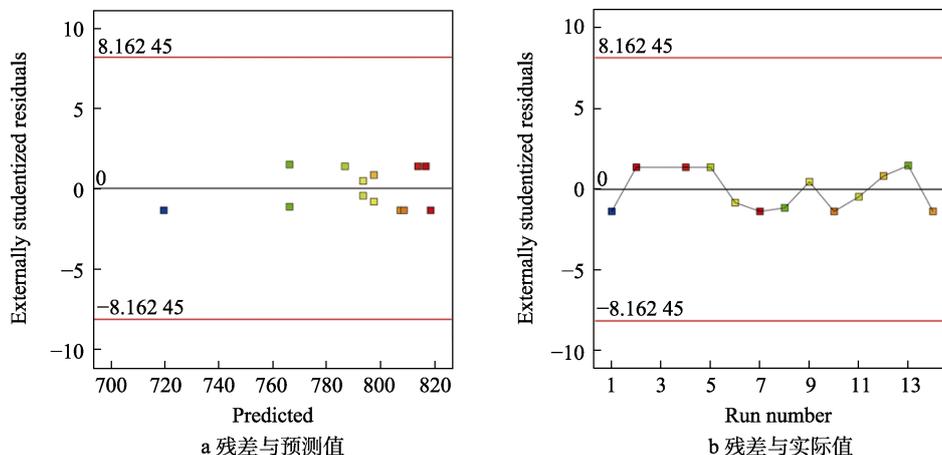


图 8 抗拉强度残差正态图

Fig.8 Normal graph of residual tensile strength: a) residual and predicted; b) residual and actual value

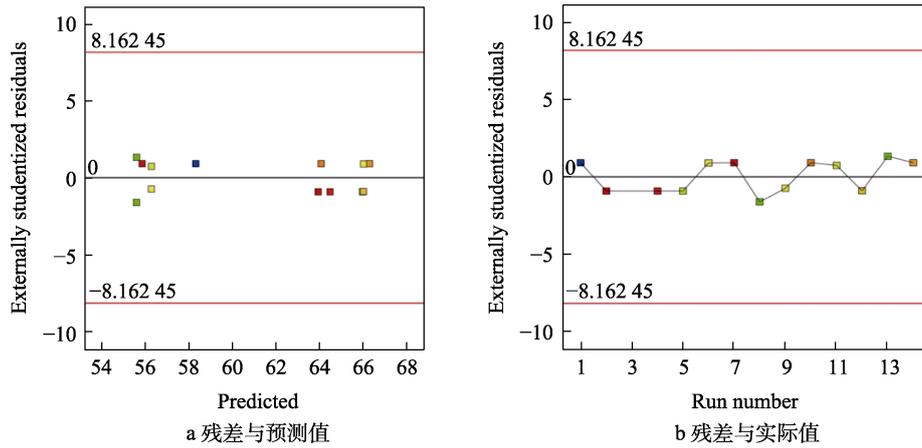


图9 弹性模量残差正态图

Fig.9 Residual normal diagram of elastic modulus: a) residual and predicted; b) residual and actual value

检验残差的目的是确定响应曲面模型的精度，由残差与预测值的图像中可看出，3类性能指标的最大残差不超过 2.5，且大多分布在零尺度线上下，这说明模型没有系统性地高估或低估实际值。从残差与实际值的图像可知，残差随机均匀地分布在零尺度线附近，并且上下浮动，这意味着对应于相邻观测序列所得的残差值彼此独立。根据上述分析，本研究中用于拟合硬度、抗拉强度、弹性模量相关的二次响应曲面模型具有较高精度。经残差分析后，用于预测的二次响应曲面方程表达式如下：

$$Y_1 = 91.10317 + 0.047185 \times A + 0.398597 \times B + 0.02778 \times C + 0.01227 \times A \times B - 0.000348 \times A \times C - 0.003126 \times B \times C + 0.0008 \times A^2 + 0.023 \times B^2 - 0.000310 \times C^2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 526.725 - 1.7276 \times A + 112.36 \times B + 4.51236 \times C + 0.666 \times A \times B - 0.0267 \times A \times C - 0.6522 \times B \times C - 0.011 \times A^2 - 9.92 \times B^2 - 0.41759 \times C^2 \quad (5)$$

$$Y_3 = 22.95 - 1.622 \times A + 10.22 \times B + 0.119 \times C + 0.0122 \times A \times B - 0.00251 \times A \times C - 0.0326 \times B \times C - 0.028 \times A^2 - 1.291 \times B^2 - 0.001341 \times C^2 \quad (6)$$

图 10a 中，当试验温度为-20℃时，复合材料的硬度随覆冰厚度的增大而提升。当试验温度为-50℃时，硬度随覆冰厚度的增大而降低。结合其投影等高线的形状可知，温度与覆冰对材料的厚度具有一定的交互作用。由图 10b、c 中等高线的密集程度可知，3类环境因素中辐照对复合材料硬度影响程度最高，这与第 2 节中极值与方差分析所得结论相吻合。图 10 中的等高线形状在一定程度上反映出温度与辐照、辐照与覆冰对材料硬度影响的交互作用较为微弱。

从图 11a 可以看出，覆冰厚度为 1.5 cm，材料的抗拉强度随温度的降低而升高；覆冰厚度为 4.5 cm

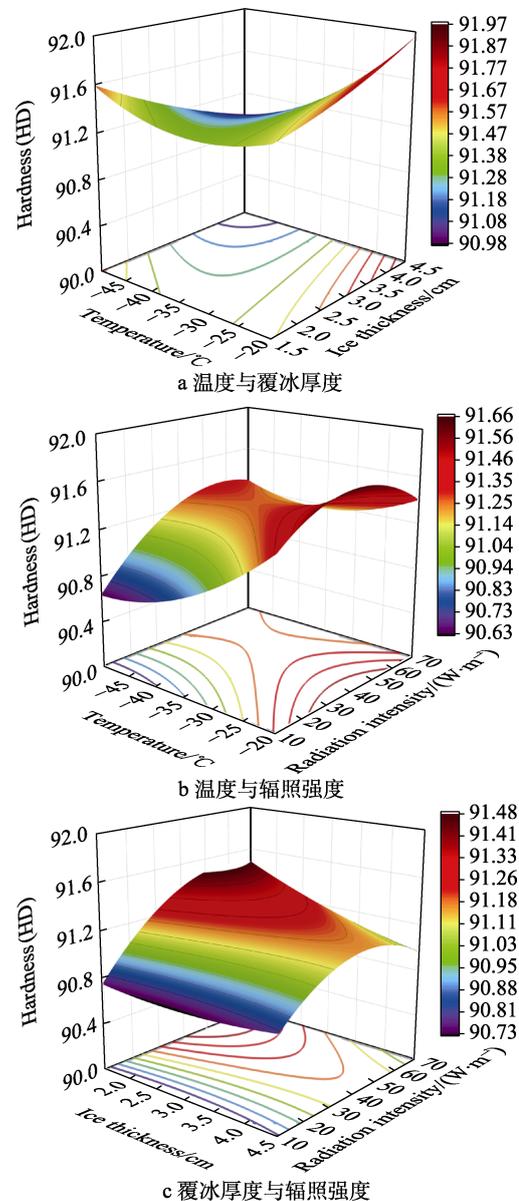


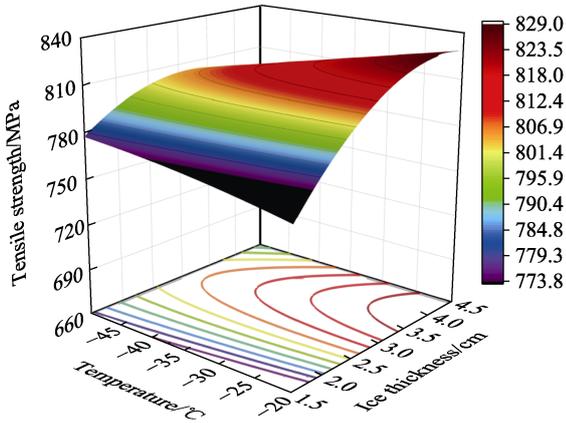
图 10 各环境因素对硬度影响的交互关系

Fig.10 Interaction of effects of various environmental factors on hardness: a) temperature and ice thickness; b) temperature and radiation intensity; c) ice thickness and radiation intensity

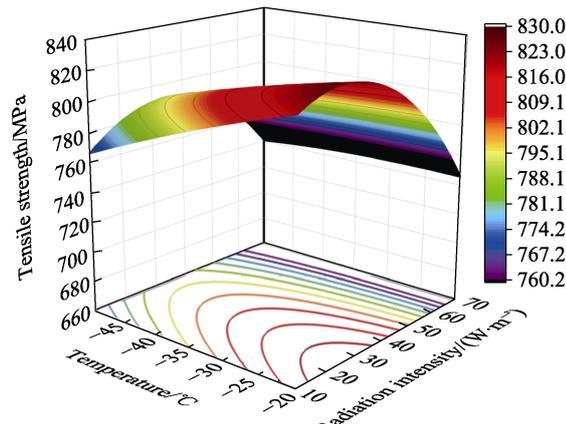
时, 抗拉强度随温度降低而下降。由图 11b 可知, 辐照因素不变的情况下, 随着温度的降低, 材料的抗拉强度逐渐下降, 但随着辐照因素的增强, 下降幅度变得不再明显。图 11c 中, 覆冰厚度为 1.5 cm 时, 随着辐照量的增加, 抗拉强度呈上升趋势; 改变覆冰厚度至 4.5 cm, 抗拉强度随辐照量的增加先增强后降低。从图 11 中等高线的分布来看, 3 类因素两两之间对

复合材料的抗拉强度具有明显的交互作用。

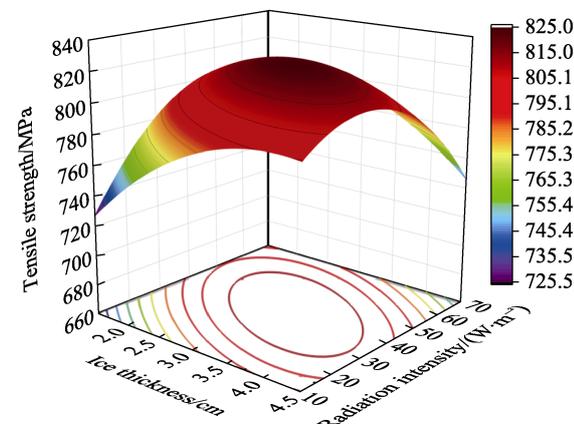
轴上等高线的密集程度反映该因素对材料性能影响程度。由图 12 可知, 对材料弹性模量影响程度大小依次为温度、覆冰厚度、辐照。图 12 中响应曲面所投影等高线均为椭圆形或近椭圆形, 因此可认为 3 类因素两两之间对材料的弹性模量的影响具有明显的交互作用。



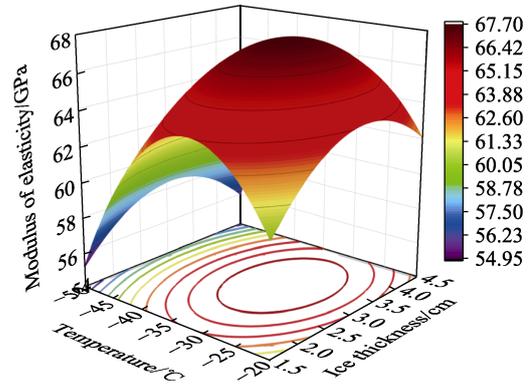
a 温度与覆冰厚度



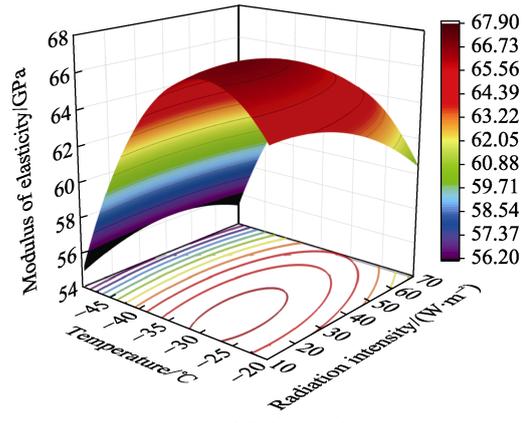
b 温度与辐照强度



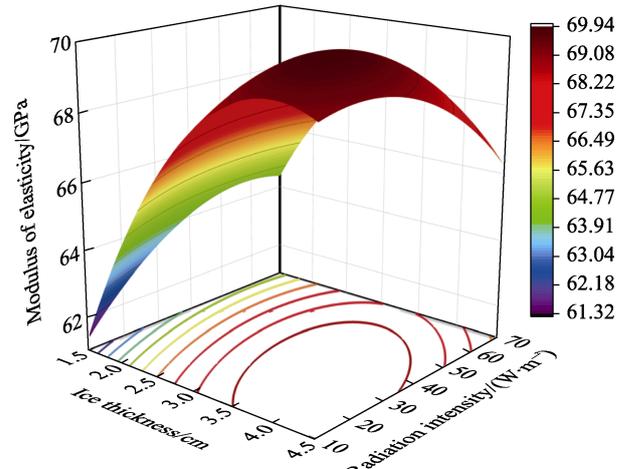
c 覆冰厚度与辐照强度



a 温度与覆冰厚度



b 温度与辐照强度



c 覆冰厚度与辐照强度

图 11 各环境因素对抗拉强度影响的交互关系

Fig.11 Interaction of effects of various environmental factors on tensile strength: a) temperature and ice thickness; b) temperature and radiation intensity; c) ice thickness and radiation intensity

图 12 各环境因素对弹性模量影响的交互关系

Fig.12 Interaction of effects of various environmental factors on elastic modulus: a) temperature and ice thickness; b) temperature and radiation intensity; c) ice thickness and radiation intensity

4 结论

本文系统研究了 T300/环氧树脂复合材料在模拟极地环境下的力学性能变化,包括硬度、拉伸强度和弹性模量。对测试结果进行极值分析与方差分析,探究了因素对力学性能的显著性影响,并通过响应面分析了其力学性能与各环境因素间的交互关系。通过以上研究,得出如下结论:

1) 通过极值分析可知,辐照是影响材料硬度和抗拉强度的主要因素,而温度对弹性模量的影响最为显著。方差分析所得环境因素对材料性能影响程度的结果与极值分析相一致,且仅有温度对弹性模量的表现具有显著性影响。这说明碳纤维复合材料在本研究中所指定的 3 类环境条件下性能较为稳定,敏感性较低。

2) 将经环境试验后的试样与原始样本的力学性能进行对比可知,CFRP 在各环境因素下力学性能改变量最大不超 10%,因此可认为在极地环境下 CFRP 具有良好的稳定性与环境适应性。

3) 使用响应面法建立了各力学性能与环境因素之间的回归模型,分析了各因素两两之间对材料性能的交互作用影响。3 类因素中,任意 2 类因素对材料的抗拉强度与弹性模量的影响存在明显的交互作用,而对硬度性能影响的交互作用较弱。这些交互作用对于理解和预测材料在复杂极地环境中的行为至关重要,对后续工程装备的设计与制造提供一定的指导意义。

4) 本文的局限性在于,未深入探讨其他试验顺序对材料性能的影响,缺乏对复合材料损伤后微观形貌的系统研究,以及未涉及动态力学性能的测试。这些方面将在后续研究中作为重点加以开展。

参考文献:

- [1] CHUNG D D L. Comparison of Submicron-Diameter Carbon Filaments and Conventional Carbon Fibers as Fillers in Composite Materials[J]. Carbon, 2001, 39(8): 1119-1125.
- [2] 陶积柏, 陈维强, 朱大雷, 等. 国产高模量碳纤维复合材料空间环境适应性[C]// 第三届中国国际复合材料科技大会摘要集. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
TAO J B, CHEN W Q, ZHU D L, et al. Space Environment Adaptability of Domestic high modulus Carbon Fiber Composites[C]// Proceedings of Abstracts of the 3rd China International Composite Technology Conference. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [3] 陈建琼, 杨万均, 彭京川, 等. 碳纤维增强尼龙复合材料低温环境适应性试验设计与分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 35-39.
CHEN J Q, YANG W J, PENG J C, et al. Design and Analysis of Environmental Worthiness Experiments for Carbon Fiber Reinforced Nylon Composites at Low Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(12): 35-39.
- [4] 周志宏, 吴娜. 玻璃纤维布及碳纤维布增强酚醛环氧树脂复合材料性能研究[J]. 中国高新技术企业, 2017 (10): 39-40.
ZHOU Z H, WU N. Study on Properties of Phenolic Epoxy Resin Composites Reinforced by Glass Fiber Cloth and Carbon Fiber Cloth[J]. China High-Tech Enterprises, 2017(10): 39-40.
- [5] 朱昊. 复合材料在船舶上的应用及发展趋势探讨[J]. 信息记录材料, 2023, 24(9): 27-29.
ZHU H. Discussion on the Application and Development Trends of Composite Materials in Ships[J]. Information Recording Materials, 2023, 24(9): 27-29.
- [6] AGGARWAL R, D'SOUZA R. Deepwater Arctic - Technical Challenges and Solutions[C]// Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2011.
- [7] KENNEDY J L. Despite Offshore Delays Arctic Projects Advance and New Areas are Opened[J]. World Oil, 2011, 232(8): 46-53.
- [8] HARTWIG G. Advances in Cryogenic Engineering[M]. Boston: Springer US, 1978: 17-36.
- [9] REED R P, GOLDA M. Cryogenic Composite Supports: A Review of Strap and Strut Properties[J]. Cryogenics, 1997, 37(5): 233-250.
- [10] YAN M L, LIU Y C, JIANG W G, et al. Mechanism of Matrix Influencing the Cryogenic Mechanical Property of Carbon Fibre Reinforced Epoxy Resin Composite[J]. Composites Communications, 2022, 33: 101220.
- [11] 刘凯. 冰冲击载荷作用下碳纤维复合材料层合板响应机理[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
LIU K. Response Mechanism of Carbon Fiber Composite Laminates under Ice Impact Load[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [12] WANG Z G, ZHAO M Q, LIU K, et al. Experimental Analysis and Prediction of CFRP Delamination Caused by Ice Impact[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108757.
- [13] AWAJA F, PIGRAM P J. Surface Molecular Characterisation of Different Epoxy Resin Composites Subjected to UV Accelerated Degradation Using XPS and ToF-SIMS[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(4): 651-658.
- [14] 蒋诗才, 闫鸿琛, 石峰晖, 等. 紫外老化对快速固化碳纤维增强环氧树脂基复合材料性能影响[J]. 复合材料科学与工程, 2022(1): 98-103.
JIANG S C, YAN H C, SHI F H, et al. Research on the Effects of Ultraviolet Aging on the Properties of Carbon Fiber Reinforced Fast Curing Epoxy Composites[J]. Composites Science and Engineering, 2022(1): 98-103.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber-Reinforced Plastics Composites—Deter-

- mination of Tensile Properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [16] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [17] XIU Y R, WANG Q K, LI Z J, et al. Estimating Spatial Distributions of Design Air Temperatures for Ships and Offshore Structures in the Arctic Ocean[J]. Polar Science, 2022, 34: 100875.
- [18] 郑向东, 程海轩. 南极中山站太阳紫外辐射测值比较[J]. 应用气象学报, 2020, 31(4): 482-493.
ZHENG X D, CHENG H X. Comparison of Solar Ultraviolet Irradiance Measurements at Zhongshan Station, Antarctica[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(4): 482-493.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 塑料和硬橡胶 使用硬度计测定压痕硬度(邵氏硬度): GB/T 2411—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Plastics and Ebonite-Determination of Indentation Hardness by Means of A Durometer (Shore Hardness): GB/T 2411—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] SÁPI Z, BUTLER R. Properties of Cryogenic and Low Temperature Composite Materials—a Review[J]. Cryogenics, 2020, 111: 103190.
- [21] 史俊伟, 杨柳, 王文贵, 等. 孔隙对碳纤维/环氧树脂复合材料剪切性能和破坏模式的影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 5039-5052.
SHI J W, YANG L, WANG W G, et al. Effects of Voids on Shear Properties and Failure Mode of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 5039-5052.
- [22] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236-240.
WANG Y F, WANG C G. The Application of Response Surface Methodology[J]. Journal of the Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2005, 14(3): 236-240.