

预针刺密度与叠层针刺密度对碳纤维针刺 预制体力学性能的影响

李广明¹ 朱海翔² 乔晓东² 陈 双² 郁 超² 刘 力¹

1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;

2. 浙江星辉新材料科技股份有限公司, 浙江 嘉兴 314100

摘 要:为提高碳纤维针刺预制体的力学性能,以拉伸强度和层间剥离强度为研究对象,系统性地探究了预针刺密度与叠层针刺密度对碳纤维针刺预制体结构性能的协同调控机制。以 T700/12K 碳纤维为原料,采用全组合设计方法,调控预针刺密度(6、8、10 针/cm²)与叠层针刺密度(20、24、28、32、36、40 针/cm²)组合参数,制备碳纤维针刺预制体,并对其进行拉伸强度与层间剥离强度测试。结果表明,预针刺密度升高可增强预制体结构稳定性,从而提升拉伸强度;叠层针刺密度为主导因素,其增大可显著改善层间缠结与层间剥离强度,但叠层针刺密度过高会导致纤维断裂和平面内性能下降。两者之间呈现“此消彼长”的耦合关系,叠层针刺密度的提高对层间剥离强度有促进作用,而对拉伸强度产生削弱效应。当预针刺密度为 10 针/cm²,叠层针刺密度为 28、32 针/cm² 时,预制体拉伸强度分别为 6.85、6.74 MPa,层间剥离强度分别为 575.97、645.03 N/m,综合性能表现优异。该研究揭示了针刺密度参数间的协同优化机制,为碳/碳复合材料预制体工艺设计提供了理论支撑和试验依据。

关键词: 针刺工艺;预针刺密度;叠层针刺密度;拉伸性能;层间剥离强度;碳/碳复合材料;整体针刺毡

中图分类号:TS174.6

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)04-0027-08

Influence of pre-needling density and layerwise needling density on mechanical properties of carbon fiber needle-punched preforms

Li Guangming¹, Zhu Haixiang², Qiao Xiaodong², Chen Shuang², Yu Chao², Liu Li¹

1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Zhejiang Xinghui New Material Technology Co., Ltd., Jiaxing 314100, Zhejiang, China

Abstract: To enhance the mechanical properties of carbon fiber needle-punched preforms, the synergistic regulation mechanism of pre-needling density and layerwise needling density on the structural performance of the carbon fiber needle-punched preforms was investigated, with a focus on tensile strength and interlaminar peel strength. Using T700/12K carbon fibers as raw materials, a fully factorial design method was employed, and the combination of pre-needling density (6, 8, 10 needles/cm²) and layerwise needling density (20, 24, 28, 32, 36, 40 needles/cm²) were regulated, carbon fiber needle-punched preforms were prepared. And tensile strength and interlaminar peel strength tests were conducted on it. The results showed that increasing the pre-

收稿日期:2025-10-13

作者简介:李广明,男,2003 年生,在读硕士研究生,主要研究方向为碳/碳复合材料的制备,1657697655@qq.com

通信作者:刘力,副教授,主要研究方向为高分子和非织造材料成型,liliull@dhu.edu.cn

needling density enhanced the structural stability of the preforms and further improved their tensile strength. As the dominant factor, the increase of layerwise needling density significantly optimized interlaminar entanglement and interlaminar peel strength, while excessive layerwise needling density would cause fiber breakage and deterioration of in-plane performance. A typical trade-off coupling relationship existed between the two parameters. The increase of layerwise needling density facilitated the improvement of interlaminar peel strength but exerted a weakening effect on tensile strength. When the pre-needling density was 10 needles/cm² and the layerwise needling density was 28、32 needles/cm², the preform exhibited excellent comprehensive performance, the tensile strength were 5.7 and 6.8 MPa, respectively, and the interlaminar peel strength were 575.97 and 645.03 N/m, respectively. The study reveals the synergistic optimization mechanism between needling density parameters and provides theoretical support and experimental basis for process design of carbon/carbon composite preforms.

Keywords: needle-punching process; pre-needling density; layerwise needling density; tensile property; interlaminar peel strength; carbon/carbon composites; integral needle-punched felt

碳/碳(C/C)复合材料因其具有优异的耐高温性能,以及高比强度^[1]、低热膨胀系数等特点,被广泛应用于航空航天、轨道交通、热防护系统等高端装备领域^[2-4],是当前高性能结构材料的重要研究方向之一。C/C复合材料通常由增强体(亦称为预制体)与基体两部分组成,其中预制体作为主要承载结构,起决定复合材料整体力学性能的关键作用^[5]。在多种预制体制备工艺中,针刺法因兼具厚度方向(Z向)增强与二维铺层工艺简便性的优点,逐渐成为碳纤维预制体的主流制备技术之一^[6-8]。针刺过程中,机械针刺使纤维相互缠结,从而构建起初步的三维骨架结构,为后续致密化和性能提升奠定基础。

碳纤维及其复合材料对我国国防建设和国民经济发展具有重要的战略意义^[9]。然而,碳纤维针刺预制体普遍存在层间剥离强度不足的问题,已成为制约C/C复合材料综合性能充分发挥的主要瓶颈。为改善此缺陷,通常采取提高叠层针刺密度等措施,以增强Z向纤维缠结和界面锚固效应,从而提升层间剥离强度。但过高的针刺密度往往会引发纤维断裂、纤维束迁移及平面内取向紊乱等现象,致使预制体的平面内(XOY面内)拉伸性能显著降低,呈现出典型的层间剥离强度与平面内拉伸强度此消彼长的矛盾态势。这种现象不仅会限制预制体结构的整体稳定性,还可能在后续碳化、致密化及热处理工艺中进一步加剧,产生难以修复的局部损伤,最终影响

C/C复合材料的服役寿命与可靠性。因此,如何在提升层间结合力的同时,最大程度地降低对平面力学性能的不利影响,已成为整体针刺预制体工艺优化的核心难题,也是高性能C/C复合材料制备中亟待解决的重要科学与工程问题。

近年来,学者们围绕碳纤维整体针刺预制体力学性能的提升开展了大量研究工作,研究重点主要在针刺密度、针刺深度以及工艺参数等方面的调控。嵇阿琳等^[10]对不同针刺方式下纤维性能与成型性的差异展开了分析,揭示了针刺参数对预制体结构均匀性和成型质量的影响规律。张晓虎等^[11]研究了针刺密度对炭布网胎增强C/C复合材料力学性能的影响,阐明了控制针刺密度对实现平面内与层间性能平衡的重要意义。刘延友等^[12]深入探讨了叠层针刺工艺参数与碳纤维复合材料性能之间的内在联系,提出了适宜的针刺密度范围与优化组合策略。杨国勇等^[13]应用响应面法分析了多工艺参数对C/C复合材料弯曲性能的耦合效应,并建立了多因素综合优化模型。张小龙等^[14]提出“低预针刺+纱线缝合”的复合成型方法,有效改善了预制体的Z向纤维分布与层间剥离强度。Yao等^[15]通过试验揭示了平面内性能与层间剥离强度之间的相互制约机制。陈小明等^[16]采用预/主刺协同针刺新工艺,通过分步针刺同一位置的方式,将碳纤维带入Z向,从而减少针刺孔数量并提升预制体性能。董洪年等^[17]通过仿真研究揭示了针刺密度与C/C复

合材料力学性能之间的联系,即过高的针刺密度会因引入更多初始损伤而降低材料的最终承载能力。程海霞等^[18]基于理论分析进一步阐明了三维针刺工艺参数与碳纤维复合材料力学性能之间的内在关系。Xie 等^[19]建立了针刺密度、针刺深度与针束分布对 3D 针刺 C/C-SiC 复合材料有效弹性性能影响的耦合模型,指出高针刺密度和针刺深度有助于增强 Z 向性能,但会使纤维断裂,平面内性能下降。Li 等^[20]揭示了在 3D 针刺体系中,纤维摆动、断裂与层间偏移现象普遍存在,因此需在针刺密度与结构损伤之间取得平衡。Chen 等^[21]通过试验表明,在短纤维毡结构中适度针刺可使 Mode II 层间剪切性能提升 1.5~2.5 倍,而过高的针刺密度则会引起平面内结构破坏,导致整体性能下降。

尽管已有研究在针刺工艺参数优化方面取得了显著进展,但关于预针刺密度与叠层针刺密度之间的协同作用机制,目前仍缺乏系统性研究。预针刺作为预制体成型的初始定型阶段,会直接影响纤维堆积状态和结构稳定性,其与叠层针刺密度的匹配关系对预制体的最终综合性能起着决定性作用。因此,深入探讨两者的耦合效应,对于突破层间性能与平面内性能的矛盾、提升 C/C 复合材料的整体结构与性能,具有重要的理论意义和实际应用价值。基于此,本研究系统设计了预针刺密度与叠层针刺密度组合试验,定量研究两阶段针刺工艺参数对碳纤维针刺预制体平面内拉伸强度和层间剥离强度的影响规律,揭示其协同调控机制以期针刺预制体工艺参数的优化设计提供科学依据,实现平面内拉伸强度与层间剥离强度的平衡,提升 C/C 复合材料结构完整性和服

役可靠性。

1 试验

1.1 试验设计

1.1.1 试验原料选取

本研究以中复神鹰碳纤维股份有限公司生产的 T700 级 12K 碳纤维长丝为原料制备网胎和无纬布。网胎制备阶段,先将碳纤维长丝长度短切为 30~120 mm,然后采用台纺机械(常州)有限公司生产的 TF051 型梳理机对短切后的纤维进行梳理、铺层,最后利用浙江星辉新材料科技股份有限公司生产的 XHS0003 型预针刺机对铺层后的碳纤维网进行针刺加固,形成结构稳定的碳纤维网胎。无纬布由网胎与碳纤维长丝经浙江星辉新材料科技股份有限公司生产的 XHS0012 型无纬布机制备而成。其中,碳纤维网胎面密度为 100 g/m²,无纬布面密度为 350 g/m²。

1.1.2 预制体制备

试验用的预制体试样是由浙江星辉新材料科技股份有限公司自主研发的针刺设备生产的。预制体由 10 个单元层叠合而成,每个单元层包含 1 层网胎与 1 层无纬布。10 个单元层进行叠合时,相邻单元层中的无纬布碳纤维长丝排列方向呈 0°或 90°交叉铺叠。针刺成型工艺示意如图 1 所示。制作碳纤维网胎时设定预针刺密度分别为 6、8、10 针/cm²,共三水平;碳纤维预制体制备时,设定的叠层针刺密度分别为 20、24、28、32、36、40 针/cm²,共六水平。为全面考察预针刺密度与叠层针刺密度之间的交互作用,本文采用三水平×六水平的全组合设计试验,共

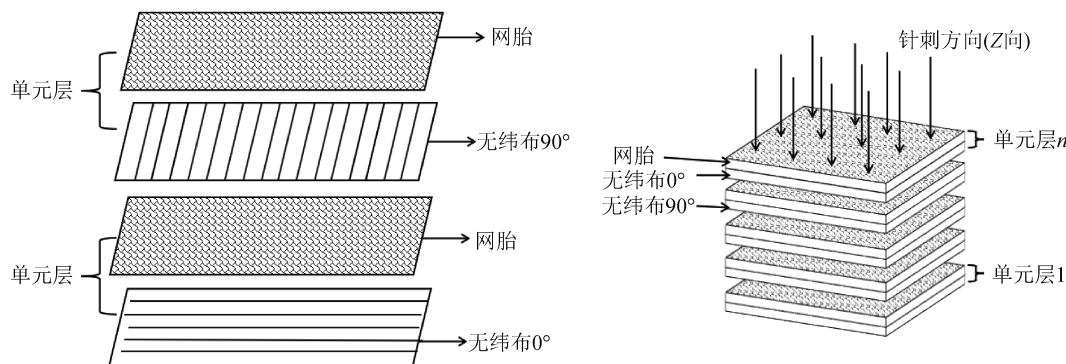


图 1 针刺成型工艺示意

Fig. 1 Schematic of needle-punching forming process

得到 18 种参数组合,相应的试验参数如表 1 所示。每组无纬布/网胎整体针刺毡试样的尺寸均为 380 mm×380 mm×10 mm 的,共计 18 组。另外,对照试样为传统针刺工艺所制备的无纬布/网胎整体针刺毡,即预针刺密度为 14 针/cm²、叠层针刺密度为 20 针/cm²。

表 1 针刺试验参数

Tab. 1 Process parameters of needling experiment

试验序号	预针刺密度/(针·cm ⁻²)	叠层针刺密度/(针·cm ⁻²)
1	6	20
2	6	24
3	6	28
4	6	32
5	6	36
6	6	40
7	8	20
8	8	24
9	8	28
10	8	32
11	8	36
12	8	40
13	10	20
14	10	24
15	10	28
16	10	32
17	10	36
18	10	40

1.2 测试方法

在针刺 C/C 复合材料实际生产中,通常以平面内拉伸性能和层间剥离性能为指标表征碳纤维针刺预制体的力学性能,故本研究采用这 2 项性能进行评价。平面内拉伸性能测试中,测试设备为 Instron1196 型电子万能试验机,控制方式为位移加载,设定加载速度为 10 mm/min,拉伸试验参照 GB/T 1447—2005《纤维增强塑料拉伸性能试验方法》标准;层间剥离性能表征试验中,测试设备为迈科仪器设备有限公司生产的 MK-BL-X 型 90°剥离强度试验机,控制方式为位移加载,设定加载速度为 200 mm/min,剥离试验参考 GJB 1867—1994《整体炭毡试验方法》标准。所有测试均在常温条件下进行,每组样品有效试样均不少于 5 个,并根据不同试样的平均值进行拟合分析。

1.3 计算式

试样的拉伸强度按照式(1)进行计算。

$$\sigma_t = \frac{F}{b \times d} \quad (1)$$

式中: σ_t 为拉伸强度,MPa; F 为最大破坏载荷,N; b 为试样宽度,mm; d 为试样厚度,mm。

试样的层间剥离强度按照式(2)进行计算。

$$\sigma_p = \frac{F_p}{b_p} \quad (2)$$

式中: σ_p 为层间剥离强度,N/m; F_p 为层间剥离载荷最大值,N; b_p 为层间剥离试样宽度,m。

2 试验结果分析与讨论

2.1 平面内拉伸性能

由图 2a)可知,在不同预针刺密度(6、8、10 针/cm²)条件下,随着叠层针刺密度由 20 针/cm² 逐渐上升至 40 针/cm²,预制体拉伸强度总体呈下降趋势。从物理机制来看,平面内拉伸强度依赖于 XOY 面内纤维的数量和连续性。在预针刺阶段,已构建起一定的初始网状纤维骨架,纤维体积分数增加,结构趋于稳定;而后续叠层针刺阶段 XOY 面内纤维将不断拉入 Z 向通道,原有的平面内纤维取向遭破坏,孔隙率和纤维损伤增加,进而导致承载能力下降。曲线中的波动表明:在低叠层针刺密度阶段,纤维体积分数较高,预针刺密度对拉伸强度的促进作用占主导地位;而当叠层针刺密度增大后,纤维损伤占据主导地位,拉伸强度开始显著下降。高预针刺密度(10 针/cm²)试样总体表现出比低预针刺密度(6 或 8 针/cm²)更高的拉伸强度,说明坚实的初始结构有助于保持 XOY 面内纤维的完整性。当叠层针刺密度小于 32 针/cm² 时,试验组各组数据的均值优于对照组。就拉伸性能而言,在实际生产工艺中应控制叠层针刺密度小于 32 针/cm²。

图 2b)表明,在一定范围内,固定叠层针刺密度的前提下,随着预针刺密度的增加,预制体的拉伸强度普遍呈现出先降低后升高的“V”形演变特征。这一现象可归因于针刺过程中纤维损伤效应与结构加固效应的耦合作用。具体而言,在低预针刺密度阶段,碳纤维因脆性较强,易发生断裂和粉化现象。此时,纤维间的有效缠结不足以抵消损伤带来的影响,从而导致预制体拉伸强度下降。而当预针刺密度进一步提高时,纤维逐渐形成更加充分的三维缠结和

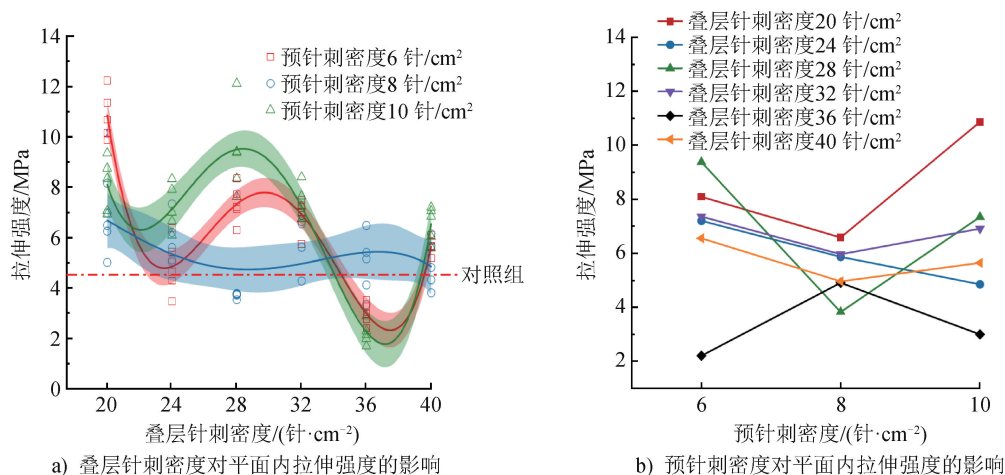


图 2 针刺密度对预制体拉伸强度的影响
Fig. 2 Effect of needling density on the tensile strength of the preforms

取向调整,孔隙率降低,载荷传递路径得以优化,最终使得预制体的拉伸强度回升。且“V”形演变特征在无机纤维针刺非织造材料的加工过程中也较为常见^[22-23]。与针刺常规有机柔性纤维如聚酯纤维和聚丙烯纤维的情况有所不同,因它们的韧性较好,在初始预针刺阶段的损伤较小,所以其拉伸强度随预针刺密度增加通常表现为“先升后降”的单峰形规律,即在适当的预针刺密度下拉伸强度达到峰值,而预针刺密度过大时,则会因纤维被切断和结构被破坏而导致拉伸强度下降。值得注意的是,叠层针刺密度为 24 针/cm² 时,随着预针刺密度从 8 针/cm² 变化到 10 针/cm²,拉伸强度却在减小,这可能是因为在该针刺区间内,针刺量达到了某种针刺阈值时,拉伸强度随预针刺密度的增加而减小。而当叠层针刺密度达到 36 针/cm² 时,拉伸强度却呈现出倒“V”形的变化趋势,这可能是因为此条件下叠层针刺已引入较多初始损伤和纤维扰动,碎纤维不断增多,取向紊乱及局部应力集中效应显著增强,损伤效应超过结构加固效应,导致拉伸强度下降,呈现出“先升后降”的倒“V”型变化特征,此时预制体已被过度针刺,预制体内碎纤维、纤维取向、应力等变量逐渐增加,预制体性能随针刺量的增加而变得敏感。

2.2 层间剥离性能

层间剥离强度反映了预制体的 Z 向缠结程度及层间界面结合性能,其变化趋势揭示了纤维在 Z 向的交联与锚固状态,其变化规律与针刺密度参

数密切相关。图 3a) 显示,层间剥离强度随叠层针刺密度增加总体呈现上升趋势,而预针刺密度的变化则对其形成调节阈值的作用。且多数试验组的层间剥离强度均大于对照组。这是因为更高的穿刺频率使更多纤维跨层连接,形成致密的三维交联网络,有效增强了层间界面的“桥联效应”,提高了界面间的机械咬合和摩擦阻力,提升了层间剥离强度。

图 3b) 进一步显示,在不同叠层针刺密度条件下,预针刺密度与层间剥离强度之间存在复杂的协同效应。叠层针刺密度较低时,层间剥离强度随预针刺密度增加呈现先下降后上升的趋势,这种非单调变化主要源于预针刺对纤维网络结构状态的调节作用,以及其与叠层针刺的协同效应。在低预针刺密度下,纤维层间结合松散,Z 向穿透纤维较少,界面摩擦力与机械锁合作用较弱,层间剥离强度较低。随着预针刺密度适度提高,纤维网络初步形成,叠层针刺作用得以充分发挥,层间剥离强度得到提升。但在纤维网络逐渐形成的过程中,可能存在纤维缠结不充分或其他因素使得层间剥离强度出现下降的情况,即出现预针刺密度 8 针/cm² 时的层间剥离强度弱于 6 针/cm² 时的现象。随着预针刺密度的继续增加,碳纤维网胎的状态由“缠结松散”状态逐渐转化为“缠结紧实”的状态。而叠层针刺密度较高时,趋势有所不同。当叠层针刺密度达到 32 或 36 针/cm² 时,层间剥离强度先上升后下降,这可能是因为此时 Z 向纤维充分贯穿,对前期预针刺工艺起到补充作用,即随着预针刺密度的增大层间剥离

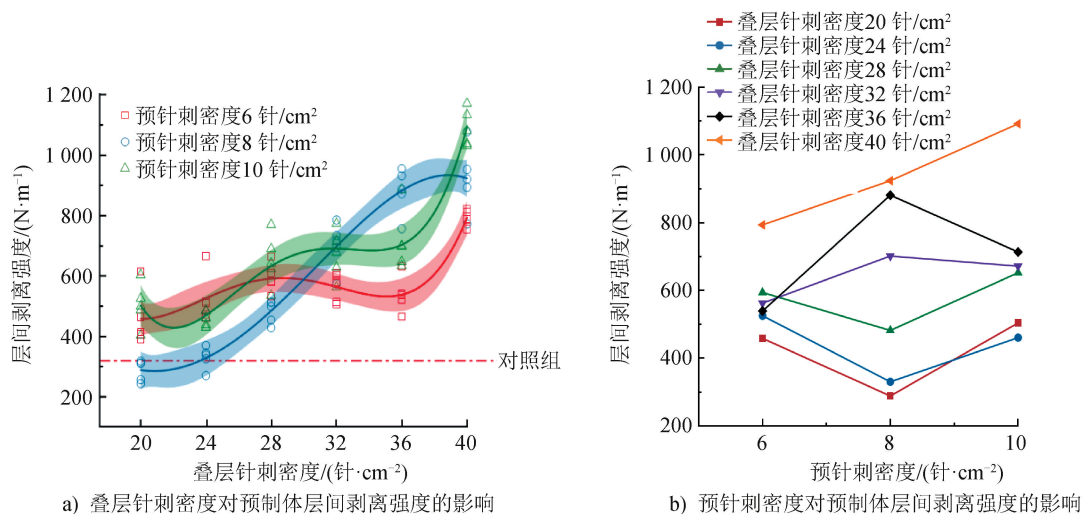


图3 针刺密度对预制体层间剥离强度的影响

Fig. 3 Effect of needling density on the peel strength of the preforms

强度也增大。当预针刺密度达到 10 针/ cm^2 时, 预制体呈现过度针刺的情况, 使局部纤维层间产生挤压与断裂, 形成“致密阻塞区”, 界面应力集中, 导致层间剥离强度下降。Li 等^[20]指出, 在 3D 针刺 C/C 复合体系中, Z 向过度增强会导致界面损伤与应力集聚, 反而削弱宏观结合性能。同样, Chen 等^[21]在短纤维毡体系试验中发现, 当针刺密度超过合理范围后, 纤维间的摩擦与拉应力不再均衡, 界面微裂纹扩展加剧, 层间剥离强度明显降低。当叠层针刺密度达到 40 针/ cm^2 时, 层间剥离强度随预针刺密度的上升而同步上升, 其原因可能是高叠层针刺密度有效分散了过度预针刺引发的局部应力, 或形成了更均匀的三维纤维网络结构。

综上, 预针刺与叠层针刺在层间结合增强过程中存在明显的耦合关系, 两者的密度匹配直接决定界面结合的均匀性与稳定性。

2.3 基于极差分析的参数影响量化研究

为量化预针刺密度与叠层针刺密度对预制体力学性能影响的主次顺序以及作用规律, 本研究针对全组合试验结果开展了极差分析。极差分析法可直观评估各因素在不同水平下对性能指标影响的波动程度, 其极差 R 值越大, 表明该因素对性能指标的影响越显著。基于表 1 的试验参数与测试结果, 分别计算预针刺密度与叠层针刺密度对拉伸强度及层间剥离强度的极差, 结果如表 2 所示。其中表 2 中水平 1~6 为 2 项工艺参数在全组合试验设计中设

定的梯度水平值, 其中: 预针刺密度设 3 个梯度水平 (水平 1~3), 即水平 1 为预针刺密度 6 针/ cm^2 、水平 2 为 8 针/ cm^2 、水平 3 为 10 针/ cm^2 ; 叠层针刺密度设 6 个梯度水平 (水平 1~6), 水平 1 至水平 6 依次为 20、24、28、32、36、40 针/ cm^2 。

由表 2 可知, 叠层针刺密度对拉伸强度和层间剥离强度的极差均显著大于预针刺密度的极差, 表明叠层针刺密度是影响预制体力学性能的主导因素。进一步分析发现, 叠层针刺密度对层间剥离强度影响的极差是其对拉伸强度影响极差的百倍以上, 这从数据层面定量印证了“叠层针刺密度提升可显著增强层间结合性能, 但会削弱平面内拉伸性能”这一耦合关系。在工艺优化层面, 叠层针刺密度为 40 针/ cm^2 时, 预制体层间剥离强度可达试验最高值 (936.30 N/m), 叠层针刺密度为 36 针/ cm^2 时, 拉伸强度为试验最低水平 (3.37 MPa), 可见高叠层针刺密度会严重损害平面内拉伸性能。以综合性能为优化导向, 当预针刺密度为 10 针/ cm^2 , 叠层针刺密度为 28 或 32 针/ cm^2 时, 拉伸强度与层间剥离强度可实现较优的平衡 (拉伸强度分别为 6.74、6.85 MPa, 层间剥离强度分别为 575.97、645.03 N/m)。此外, 当预针刺密度为 10 针/ cm^2 时, 层间剥离强度和拉伸强度均维持在较高水平, 说明适度的预针刺密度有助于构建稳定的初始纤维骨架, 为后续叠层针刺提供良好基础, 进而协同提升预制体的最终力学性能。

表 2 针刺工艺参数对力学性能影响的极差分析结果

Tab. 2 Range analysis results of the influence of needling parameters on mechanical properties

性能指标	因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	水平 6	R
拉伸强度/MPa	预针刺密度	6.8	5.35	6.44	—	—	—	1.45
	叠层针刺密度	8.51	5.97	6.85	6.74	3.37	5.72	5.14
层间剥离强度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	预针刺密度	578.65	601.07	682.15	—	—	—	103.50
	叠层针刺密度	416.87	438.46	575.97	645.03	711.09	936.30	519.43

3 综合耦合效应分析

综合分析表明,预针刺密度与叠层针刺密度在调控预制体平面内拉伸强度与层间剥离强度过程中存在耦合效应。预针刺主要影响纤维堆积形态以及初始网络结构的稳定性,是后续叠层针刺实现均匀缠结的基础;叠层针刺则借助 Z 向纤维的穿透与锚固作用,增强层间剥离强度,从而优化界面载荷传递路径。二者的密度匹配直接决定了预制体在平面内拉伸强度与层间剥离强度之间的平衡状态。

预针刺与叠层针刺协同调控的核心作用机制体现在:预针刺通过穿刺作用促使纤维形成局部缠结,构建起初始三维纤维骨架。该骨架可提高纤维堆积密度,减少叠层针刺过程中 XOY 面内纤维向 Z 向的过度迁移,为叠层针刺的 Z 向均匀缠结提供结构支撑,避免因纤维无序移动导致局部缠结过密或过疏的情况发生。而叠层针刺则在初始骨架基础上,进一步增加 Z 向穿透纤维数量,形成更致密的跨层交联网络,实现层间致密化。同时,初始骨架的约束作用可有效降低叠层针刺对 XOY 面内纤维连续性的破坏程度。在低预针刺密度下,初始纤维骨架松散,纤维支撑不足。此时,叠层针刺虽能增强 Z 向缠结,但 Z 向纤维易发生偏移与错位现象,导致局部结合不均。相较于对照组中 $14 \text{ 针}/\text{cm}^2$ 的预针刺密度,本研究中 $10 \text{ 针}/\text{cm}^2$ 的预针刺密度属于适度降低后的优化水平。在该条件下,纤维分布趋于均匀、孔隙结构稳定,叠层针刺的贯穿与缠结作用得以充分发挥,平面内与层间性能实现协同提升。预针刺与叠层针刺共同构成了控制预制体三维结构均匀性与力学性能的关键耦合体系。综合力学性能分析结构可知,相比于传统工艺,通过适度降低预针刺密度可以提升预制体的力学性能,并且合理的参数匹配

有助于实现 Z 向增强与 XOY 面内连续性的平衡,提升整体结构的稳定性与可靠性。

4 结语

本研究围绕 10 单元层叠层、面密度约为 $4500 \text{ g}/\text{m}^2$ 的碳纤维针刺预制体成型参数优化问题,系统探讨了预针刺密度与叠层针刺密度对平面内拉伸性能与层间剥离性能的协同影响机制,得出如下结论。

(1) 预针刺密度主要对纤维取向与结构稳定性起到调控作用。预针刺密度过低时,纤维松散,承载效率欠佳;预针刺密度过高时,易引发纤维损伤,导致后续叠层针刺阶段的有效受刺纤维量减少,层间补强效果削弱。

(2) 叠层针刺密度决定了 Z 向缠结程度与界面致密化程度,在 28 或 $32 \text{ 针}/\text{cm}^2$ 时,层间结合与平面内强度实现最优平衡。

(3) 预针刺与叠层针刺间存在显著的协同关系,合理匹配二者参数能够同步提升平面内拉伸强度与层间剥离强度。

(4) 综合考量,推荐采用的工艺参数为预针刺密度 $10 \text{ 针}/\text{cm}^2$ 、叠层针刺密度 28 或 $32 \text{ 针}/\text{cm}^2$,可兼顾预制体的结构均匀性、致密化水平以及多向力学性能。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 彭永超,张慧萍,崔建伟,等.浅谈纤维增强复合材料在航空工业中的应用[J].产业用纺织品,2006,(10):1-5.
- [2] CHEN X M, CHEN L, ZHANG C Y, et al. Three-

- dimensional needle-punching for composites; a review [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 85: 12-30.
- [3] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势[J]. 化学工业, 2019, 37(4): 12-16.
- [4] 许深, 吕佳滨, 文美莲, 等. PAN 基碳纤维的国内外发展现状及趋势[J]. 纺织导报, 2017(10): 44-47.
- [5] 孙乐, 王成, 李晓飞, 等. C/C 复合材料预制体的研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 86-95.
- [6] 王毅, 崔红, 郑金煌. 碳纤维针刺预制体的发展与应用[J]. 炭素, 2014(4): 26-29.
- [7] 魏宇博, 贺辛亥, 程攀, 等. 碳纤维复合材料预制体针刺技术研究现状与思考[J]. 化工新型材料, 2024, 52(7): 14-19.
- [8] 刘昱君, 刘希艳, 党艺旋. 针刺技术在复合材料预成型体中的研究进展[J]. 山东纺织科技, 2021, 62(6): 4-7.
- [9] 高硕, 周邦泽, 何梦瑶, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料拉挤成型工艺[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(12): 6-19.
- [10] 嵇阿琳, 崔红, 李贺军, 等. 两种针刺纤维性能与成型性分析[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(2): 222-224.
- [11] 张晓虎, 李贺军, 郝志彪, 等. 针刺工艺参数对炭布网胎增强 C/C 材料力学性能的影响[J]. 无机材料学报, 2007, 22(5): 963-967.
- [12] 刘延友, 程海霞, 乔志炜, 等. 叠层针刺工艺参数对碳纤维复合材料力学性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2019, 47(11): 46-48.
- [13] 杨国勇, 刘振宇, 张楠, 等. 碳/碳复合材料针刺制品性能分析及工艺参数优化[J]. 复合材料科学与工程, 2025, (11): 79-85.
- [14] 张小龙, 郭若含, 李钊. 针刺+缝合预制体 C/C 复合材料的制备及性能研究[J]. 炭素, 2022(3): 10-14.
- [15] YAO T L, CHEN X M, LI J, et al. Experimental and numerical study of interlaminar shear property and failure mechanism of none-felt needled composites[J]. Composite Structures, 2022, 290: 115507.
- [16] 陈小明, 任志鹏, 郑宏伟, 等. 基于预/主刺协同的针刺织物力学性能提升方法[J]. 纺织学报, 2023, 44(4): 100-107.
- [17] 董洪年, 杨明, 林天一, 等. 针刺密度对碳/碳复合材料力学行为影响的仿真分析[J]. 材料导报, 2025, 39(9): 56-61.
- [18] 程海霞, 刘延友, 乔志炜, 等. 三维针刺工艺参数对碳纤维复合材料力学性能的影响[J]. 玻璃纤维, 2020(4): 13-17.
- [19] XIE J B, LIANG J, FANG G D, et al. Effect of needling parameters on the effective properties of 3D needled C/C-SiC composites[J]. Composites Science and Technology, 2015, 117: 69-77.
- [20] LI J, CHEN L, ZHENG H W, et al. Mode II interlaminar shear behavior of needled/tufted interlocking composites [J]. Journal of Industrial Textiles, 2023, 53: 15280837231190114.
- [21] CHEN X M, ZHENG Q, LIU W G, et al. Significantly improve the mode II interlaminar and in-plane tensile properties of needled composites by novel short fiber felt peeling method [J]. Composite Structures, 2025, 372: 119561.
- [22] YU B, ZHAO X M, ZENG Y N, et al. The influence of process parameters on needle punched nonwovens investigated using image analysis[J]. RSC Advances, 2017, 7(9): 5183-5188.
- [23] GIRI DEV V R, DHANAKODI A K P. Studies on mechanical properties of thermoplastic composites prepared from flax-polypropylene needle punched nonwovens[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, 25(3): 489-499.

弘扬中华体育精神

弘扬体育道德风尚