碳纤维复合材料力学性能研究进展

段裕熙，张凯*，徐伟芳，陈军红，龚芹
（中国工程物理研究院总体工程研究所，四川 绵阳 621999）

摘要：目的 综述碳纤维复合材料这一热结构材料的力学性能研究进展，推进碳纤维复合材料的研制和应用。**方法** 采用文献调研法，梳理和汇总国内外有关碳纤维复合材料力学性能的研究内容，对二维复合材料、针刺复合材料及三维编织复合材料 3 种结构进行性能影响因素分析。**结论** 影响碳纤维复合材料静态和动态力学性能的因素主要有温度、应变率、密度等，提出应进一步开展碳纤维复合材料在多因素耦合及高温动态性能方面的研究。

关键词：碳纤维复合材料；静态力学性能；动态力学性能；三维编织复合材料
中图分类号：TB332　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3563(2023)21-0036-10
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.005

Mechanical Property of Carbon Fiber Composites

DUAN Yu-xi, ZHANG Kai, XU Wei-fang, CHEN Jun-hong, GONG Qin*
(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to explore recent advancements in the mechanical properties of carbon fiber composites for thermal structural applications, with the objective of promoting the development and utilization of carbon fiber composites. Through a comprehensive literature review, the current research status on the mechanical properties of carbon fiber composites was summarized, and the factors affecting the static and dynamic mechanical properties of 2D composites, needled composites, and 3D woven composites were analyzed. The results indicate that factors affecting the static and dynamic mechanical properties of carbon fiber composites include temperature, strain rate, density, et al. And further investigations are necessary in multi-factor coupling and high temperature dynamic properties of carbon fiber composites.

KEY WORDS: carbon fiber composite; static mechanical properties; dynamic mechanical properties; three-dimensional weaving composite

碳纤维由有机纤维经过一系列热处理转化而成，它是含碳量高于 90%的无机高性能纤维，既具有碳材料的固有本征，又兼具纺织纤维的柔软可加工性。相较于单独使用，碳纤维更多以复合材料的形式出现，即与树脂、陶瓷、金属等基体复合形成碳纤维复合材料，如碳纤维增强塑料（Carbon Fiber Reinforced Plastics，CFRP）、碳纤维增强橡胶（Carbon Fiber Reinforced Rubber，CFRR）、碳纤维增强碳基复合材料（C/C）、碳纤维增强金属复合材料（Carbon Fiber Reinforced Metal，CFRM）、碳纤维增强陶瓷（Carbon Fiber Reinforced Ceramics，CFRC）等[1-2]。碳纤维复合材料还可按照结构分为二维复合材料、针刺复合材料、三维编织复合材料等，不同的材料结构对材料性质的影响也不同[3]。结构的内部缺陷（如孔隙、微裂缝、界面脱层等）也会造成应力集中等现象，从而对材料的性能产生影响[4-6]。碳纤维复合材料作为常用的热结构复合材料，具有密度小、耐高温、抗氧化和抗烧蚀等优良性能，被广泛用于经济、科学技术等领域[7]。

收稿日期：2023-05-30
基金项目：国家自然科学基金（12172344）
*通信作者

随着碳纤维复合材料制备技术的提升，以及对该材料物理、化学性能，特别是力学性能的大量研究，进一步推进了碳纤维复合材料的规模化和产业化，促进了碳纤维复合材料在工程结构中的应用[8]。随着碳纤维复合材料应用领域的拓展，将它应用在工程结构中需要获得更翔实、更准确的力学性能，例如不同载荷作用下的变形特征、失效模式和破坏机制等。为此，文中根据碳纤维复合材料的结构分类，从二维材料、针刺复合材料和三维材料 3 个方面，详细研究了碳纤维复合材料力学性能及其试验研究方法的现状。

1　二维材料力学性能

大多数二维复合材料以层合的形式出现，是由不同铺层角度的单层板粘连而成的多层结构。其中，单层板由经纱和纬纱交错编织而成，两者相互垂直，且因编织结构的不同，使得形成的材料具有不同的截面和性能。

1.1　二维碳/碳复合材料

陈霏[9]利用含基体层合板结构模型和有限元软件，建立了含孔隙的碳纤维层合板三点弯曲模型，讨论了孔隙率、孔隙形状、孔隙分布对层合板弯曲刚度的影响规律。研究表明，孔隙形状对分层和弯曲刚度的影响不大；弯曲刚度随着孔隙率的上升呈下降趋势；孔隙的分布对层合板分层的影响较大，出现了不同的分层扩展抗性。徐凯[10]对二维碳/碳复合材料进行了微观结构观测，同时利用单轴和双轴力学试验得到了材料的强度和破坏形貌。结果表明，材料内部缺陷加剧了应力集中，孔隙率的上升造成材料的弹性模量显著下降。孙万昌等[11]利用扫描电镜（Scanning Electron Microscope，SEM）对二维碳/碳复合材料的基体微结构和断口形貌进行了观测与分析，讨论了微观结构对材料宏观力学性能的影响。研究发现，在不同沉积温度下得到的基体热解碳会因结构（包括粗糙层和光滑层）的不同对材料的弯曲强度和韧性造成影响，其中粗糙层结构有利于提高材料的弯曲强度，而光滑层结构有利于提高材料的韧性。

由此可知，二维碳/碳复合材料的静态力学性能受到材料微观结构的影响：孔隙率与材料的强度呈负相关，基体热解碳光滑层的形成对于材料的韧性有提升作用。

1.2　二维碳/碳化硅复合材料

在材料微观结构的影响方面，郭辉[12]对二维编织碳/碳化硅复合材料进行了拉伸力学性能测试，并对试件断口进行了观察，发现材料的拉伸失效由碳纤维的断裂主导，内部孔洞和缺陷会造成材料性能的下降。张伟等[13]对二维编织碳/碳化硅复合材料在高温环境的拉伸性能进行了试验，通过断口的微观断裂图分析了材料的损伤和断裂机制，发现纤维的断裂和收缩是材料拉伸破坏的主导因素。两者的结论具有相似性，说明在不同环境温度下，碳纤维的断裂都是材料拉伸破坏的主要形式。董士博[14]也验证了上述结论，即材料的拉伸性能主要由纤维束的性能决定。

温度对材料的影响也受到广泛关注。牛学宝等[15]通过压缩试验机对二维碳/碳化硅复合材料在空气中的高温面外压缩强度进行了研究，并观察了其断口。经分析后发现，在温度低于 700 ℃时，材料的压缩强度随着温度的上升逐渐升高；在温度高于 700 ℃后，材料的压缩强度随着温度的上升呈缓慢降低趋势。经研究认为，强度拐点在 700 ℃处的原因是，纤维与基体的热膨胀系数的不同造成残余应力随着温度的升高而逐渐降低，在高温下氧化损伤程度随着温度的升高逐渐增强，两者共同导致材料压缩强度发生变化。Yoon 等[16]也得出了材料压缩强度随着温度的增加呈先增后减趋势的结论。董士博[14]对碳/碳化硅复合材料进行了高温拉伸、压缩和层间剪切试验，观察了试样内部和断面的微观结构，研究了孔隙率和密度对材料力学性能的影响。研究表明，材料的高温强度与基体内部的孔洞，以及基体与纤维束的结合能力相关，即在高温下材料的压缩性能和层间剪切性能与孔隙率和密度存在较大相关性。陈伟华等[17]除测试碳/碳化硅复合材料在不同温度下（室温、500 ℃、1 000 ℃）的压缩、拉伸力学性能，还进行了弯曲力学性能试验，并用扫描电镜对材料的断口进行了观测分析。研究发现，在室温下材料的结构完整（图 1a），随着温度的升高，基体内的微裂缝扩展，压力承载由基体逐渐转为碳纤维，而碳纤维被氧化变细（图 1b），甚至消失（见图 1c）；材料基体受到损伤，纤维增韧机制逐渐消失，材料的性能下降（压缩强度降低了 68%，弯曲强度降低了 42%，拉伸强度降低了 38%）。通过总结二维碳/碳化硅复合材料的静态力学性能研究结果发现，材料的强度随着温度的升高呈先增后减的趋势，且受到材料的孔隙率和密度的影响；高温导致基体受到损伤，碳纤维氧化，材料的性能下降。

在静态力学性能研究的基础上，研究人员对材料的动态力学性能进行了补充。索涛等[18]使用分离式霍普金森杆对高温和高应变率下碳/碳化硅复合材料的动态压缩性能进行了研究。研究表明，材料在高温下的动态压缩性能由残余应力释放和应力作用下的氧化损伤共同决定，且受到温度和应变率的影响，随着温度的升高，残余应力释放所造成的影响逐步小于氧化损伤的影响，材料的压缩强度呈先增后减的趋势；随着应变率的上升，加载时间缩短，氧化损伤造成的相对影响逐步减小。Zhang 等[19]针对碳/碳化硅复合

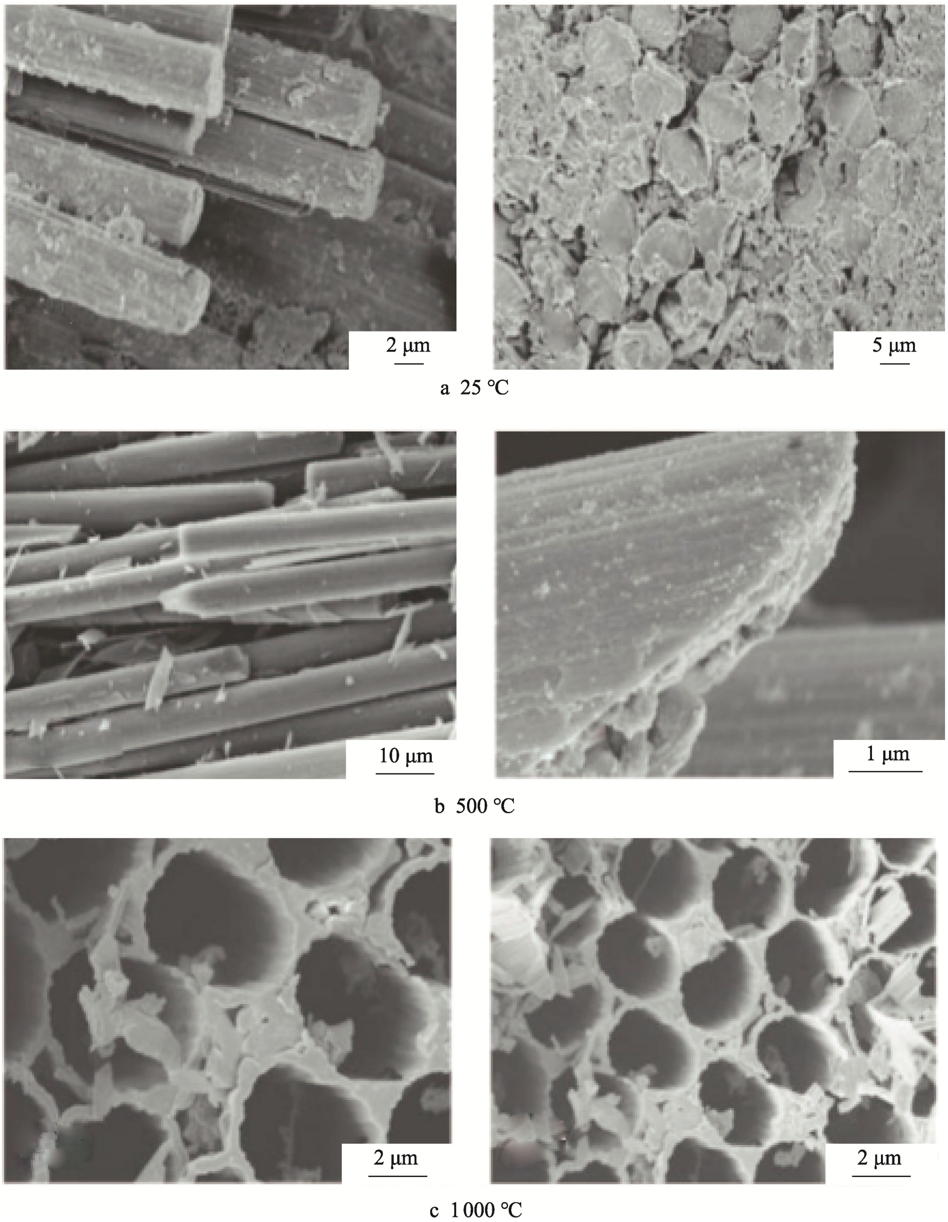


图 1　碳/碳化硅复合材料弯曲试验断口形貌[17]
Fig.1 Fracture appearance of C/SiC composite in bending test[17]

材料动态压缩的相关研究内容进行了补充，结果表明，在空气中压缩强度的应变率敏感度相较于在氩气环境中得到明显提升；应变率增大，局部应力集中的影响增大。陈煊等[20]利用分离式霍普金森拉杆和 SEM 等装置研究了二维碳/碳化硅复合材料的拉伸力学性能和失效机制。结果表明，高应变率导致的加载时间缩短，使得材料内部裂纹不足以成核和扩展，这就需要更高的能量和应力，最终表现为材料的动态拉伸强度强于静态。综合上述研究发现，二维碳/碳化硅复合材料是一种应变率相关材料，存在应变率强化效应，且材料的强度受到温度的影响。

1.3　二维碳/环氧树脂复合材料

Naik 等[21]利用 SHPB 装置在 680~2 890 s^{-1} 的应变率范围内对平织碳/环氧树脂复合材料进行了压缩性能研究，结果表明，在高应变率加载下材料的力学性能比在准静态时有所提升，但在高应变率范围内应变率对压缩性能无显著影响。Zhang 等[22]在不同应变率（4×10^{-5}~160 s^{-1}）下对碳/环氧树脂层合板进行了静态和动态拉伸试验。结果表明，材料的拉伸性能具有应变率相关性，拉伸强度、弹性模量和破坏应变均随着应变速率的增加而显著增加，且层合板的应变率敏感性使其在高应变速率下的失效模式明显不同于准静态载荷和低应变率下的失效模式。Rouf 等[23]通过横向准静态和动态加载试验对碳/环氧树脂复合材料强度的增加进行了更细致的研究。结果表明，在不同应变率下材料的力学响应存在差异，应变率为 16 s^{-1} 时的拉伸强度相较于准静态时增加了 16%，在应变率

160 s^{-1} 下的压缩屈服应力和强度相较于准静态时分别增加了 94%、96%。

除应变率外，材料性能还受到温度的影响。Ou 等[24]研究了碳/环氧复合材料在 6 种温度（−25、0、25、50、75、100 ℃）条件下的拉伸性能和破坏行为。结果表明，当温度从 75 ℃升至 100 ℃时，材料的拉伸强度下降了 21%；当温度从−25 ℃升至 75 ℃时，材料的拉伸强度基本未发生变化；在 25 ℃下，材料的韧性比在低温和高温下的韧性分别提高了 30.2%、32.1%；破坏形态也与温度有关，当测试温度升高时，由于纤维与基体的结合强度降低，失效后纤维脱黏更明显。刘新等[25]在室温和超低温（−183 ℃）下对碳纤维增强树脂基复合材料层合板进行了拉伸和弯曲试验，研究了材料在超低温环境下的力学性能。结果表明，与室温相比，在超低温下材料的拉伸强度下降了 9.5%，这主要是因树脂的收缩使得碳纤维与树脂之间形成了强界面；材料的拉伸模量上升了 6.2%，原因是树脂大分子链的运动受限；材料的弯曲强度和模量分别上升了 54.75%、11.64%，主要是因强界面的形成，提高了材料抗剪切分层的能力。与刘新等[25]采用的方法相比，骆雪芹等[26]在室温和超低温间增添了温度组（25、−55、−120、−183 ℃）来研究 CFRP 的弯曲性能。结果表明，当温度由 25 ℃降至−183℃时，材料的弯曲强度和模量分别上升了 66.7%、10.3%，两者的结果具有相似性且相互印证。

根据上述研究成果发现，二维碳/环氧树脂复合材料受到应变率和温度的影响。材料的拉伸力学性能随着应变率的上升而增加，当应变率过高时，该影响因素对压缩强度的影响并不明显；在−183~100 ℃范围内，材料的拉伸强度呈先增后减的趋势，材料的弯曲强度随着温度的降低而上升。

2　针刺复合材料力学性能

在预制体制备过程中，通过在每一铺层或单向纤维层片及正交纤维织物层片上使用带有倒钩的针进行针刺以引入 z 向纤维的方法，制备出针刺 z 向纤维连接层间复合材料，即针刺复合材料[27]。

2.1　静态力学性能

微观结构和制备参数影响着材料的性能。李伟等[28]对经石墨化处理的针刺碳/碳复合材料进行了微观扫描和三点弯曲试验，发现处理后高织构热解碳层间的作用力减弱，而纤维−低织构热解碳基体界面被弱化，两者都对材料的韧性起着提升作用。为了研究针刺工艺参数对碳纤维复合材料的影响，程海霞等[29]以针刺密度和深度为变量进行了面内拉伸和层间剪切试验，结果表明，碳纤维针刺复合材料的面内拉伸性能随着针刺密度和深度的增加呈下降趋势，层间剪切性能随着针刺密度、深度的增加呈先增后减趋势，且针刺深度对材料力学性能的影响比针刺密度大。解惠贞等[30]在不同体积密度（1.70、1.82、1.89 g/cm^3）下对材料性能的影响进行了补充。通过对比试验发现，碳/碳复合材料的拉伸强度随着密度的升高而降低，且高密度材料的纤维与基体间的结合强度更高，更容易脆断；材料的压缩强度和剪切强度随着密度的增加呈先升高后下降的趋势。综合上述研究可知，针刺碳/碳复合材料的拉伸强度主要受到纤维性能的影响，材料的体积密度、针刺密度、针刺深度越大，对纤维韧性、强度的负向作用越强；层间剪切强度与压缩强度相似，适当增加材料的体积密度、针刺密度、针刺深度，能增强纤维−基体界面的强度，但参数值过大对材料韧性的负向作用超过了对材料界面结合强度的正向作用，两者共同作用导致材料的强度有所下降。

张波等[31]使用通电加热技术对针刺碳/碳复合材料进行了不同温度条件下的剪切试验，研究发现，在常温至 1 800 ℃范围内，随着温度的升高，基体的残余热应力逐渐释放，材料的剪切强度和纤维强度增大。分析对比试样断裂面的 SEM 图发现，试样的断裂模式也随着温度的变化而变化，在室温下材料呈假塑性断裂，在 700~1 800 ℃条件下，表现为脆性断裂，温度越高，断口烧蚀得越严重，且无纤维拔出。李明旭[32]对针刺碳/碳复合材料在超高温条件下的拉伸力学性能进行了试验，结果表明，当温度低于 1 600 ℃时，材料的拉伸强度与温度升高的关系不大；当温度大于 1 600 ℃后，材料的拉伸强度随着温度的升高快速降低，且温度越高，拉伸强度衰减得越迅速。吴迪[33]从单一应力状态试验出发，结合双轴力学试验，探究了材料的力学性能。通过分析最终结果发现，层间剪切破坏模式主要为纤维剪断破坏，面外压缩的破坏模式为层间分裂破坏，面外拉伸的破坏模式主要为纤维断裂和纤维拔出；在层间剪切试验中，材料的应力−应变关系呈明显的非线性关系，在面外压缩试验中，材料的应力−应变曲线基本以准线性变化为主，在面外拉伸试验中拉伸弹性模量在加载过程中基本不变。针刺碳/碳复合材料的静态力学性能受到温度和应变率的影响，材料的强度在 700 ℃以下时随着温度的上升呈增大趋势，且在超过 700 ℃后随温度的升高急剧下降；材料剪切破坏具有明显的非线性关系，且随着温度的升高由假塑性转为脆性，压缩破坏呈准线性且具有应变率效应，拉伸破坏由纤维破坏主导。

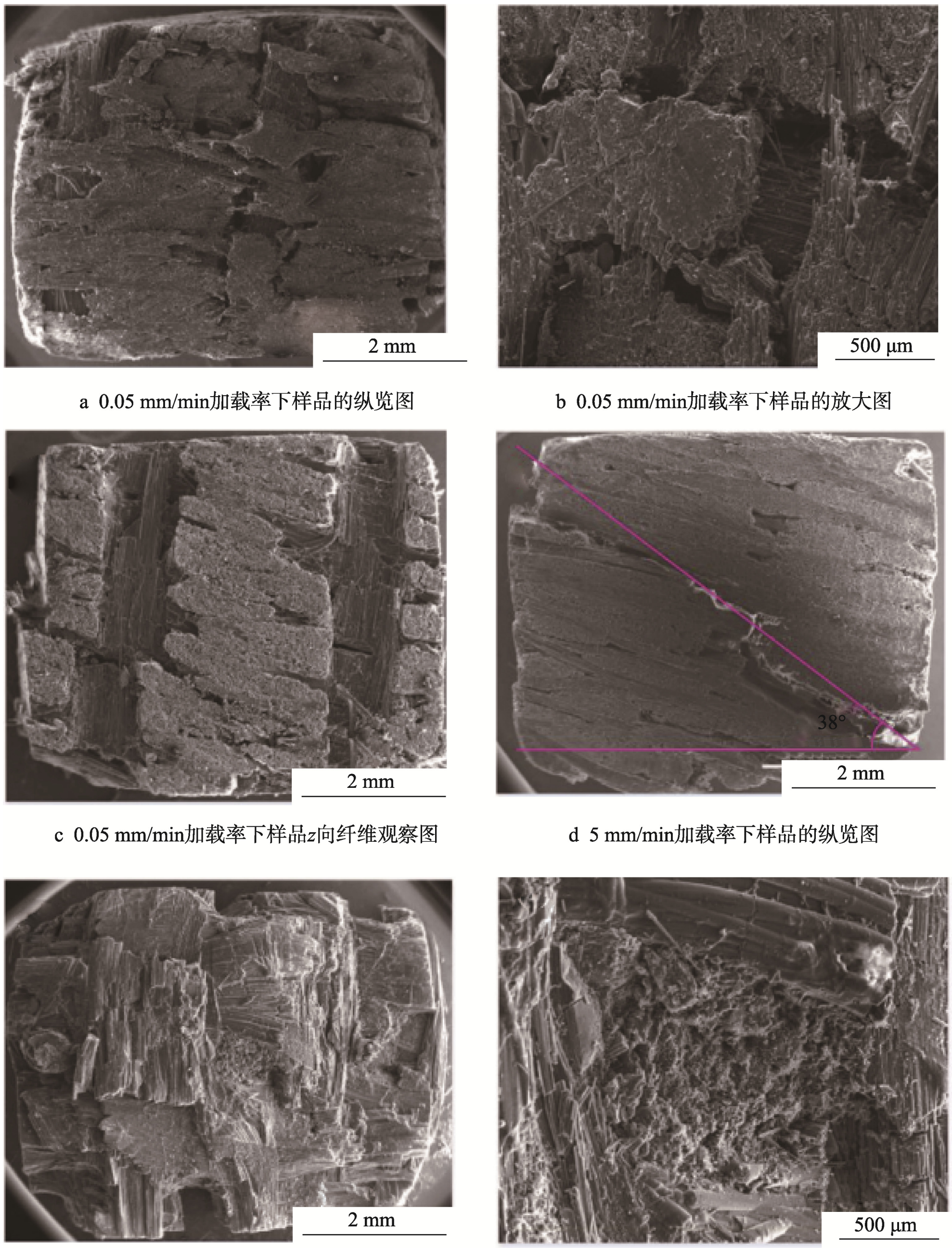
2.2　动态力学性能

索涛等[34]使用分离式霍普金森压杆对针刺碳/碳化硅复合材料进行了室温下的动态压缩试验，研究发现材料呈明显的伪塑性，且具有应变率效应，即随着应变率的升高其压缩强度增大。Li 等[35]利用霍普金

森杆研究了应变率为 10^{-4}~$6.5\times10^{3}\ \mathrm{s}^{-1}$、温度为室温至 300 ℃时对材料压缩力学性能和破坏模式的影响，所得结论与索涛等[34]相同，即针刺复合材料的径向和轴向压缩都具有应变率敏感性，且通过试验发现，在高应变率下材料表现出温度敏感性。Jin 等[36]利用 SHPB（Split Hopkinson Pressure Bar）在室温和 300 ℃下测试了不同应变率（2.08×10^{-4}~1 862.9 s^{-1}）对针刺碳/碳复合材料压缩破坏模式和强度的影响。结果表明，材料的压缩强度随着应变率和温度的增加而增加，与材料静态力学性能相似；在准静态条件下，破坏模式主要为低应变率的纤维束拔出和破坏，高应变率的纤维束破坏（图 2）；在动态试验中，材料应力在初期表现为线性增加，但在裂缝积累到极限后急速下降，试样呈现爆发式损伤，碎成细小碎片。

此外，还有研究对材料强度等的经验公式进行了总结。如 Jin 等[36]总结了针刺碳/碳复合材料的动态压缩试验数据，提出基于线性匹配算法的方程，可以预测工程应用中复合材料的压缩强度，在常温条件下的计算见式（1），在 300 ℃条件下见式（2）。

$$\sigma_{\mathrm{cr}}/\sigma_{\mathrm{sr}}=\begin{cases}0.034\lg\dot{\varepsilon}+1.127 & \dot{\varepsilon}\leqslant 385.12\ \mathrm{s}^{-1}\\ 0.659\lg\dot{\varepsilon}-0.489 & \dot{\varepsilon}>385.12\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases} \tag{1}$$



a 0.05 mm/min加载率下样品的纵览图　b 0.05 mm/min加载率下样品的放大图

c 0.05 mm/min加载率下样品z向纤维观察图　d 5 mm/min加载率下样品的纵览图

e 5 mm/min加载率下样品的损坏表面　f 5 mm/min加载率下样品的损坏表面放大图

图 2 在 300 ℃下针刺碳/碳复合物的破坏模式[36]

Fig.2 Failure modes of needle-punched C/C composites at 300 ℃[36]

$$\sigma_{ch}/\sigma_{sh}=\begin{cases}0.042\lg\dot{\varepsilon}+1.155 & \dot{\varepsilon}\leqslant 431.22\ \mathrm{s}^{-1}\\ 1.116\lg\dot{\varepsilon}-1.759 & \dot{\varepsilon}>431.22\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{2}$$

式中：σ_{sr}、σ_{sh} 为准静态下的压缩强度；σ_{cr}、σ_{ch} 为预测压缩强度；$\dot{\varepsilon}$ 为应变率。

3　三维编织复合材料力学性能

三维编织复合材料指由不同方向的纤维束构成的、具有空间网状结构的复合材料。相较于二维层合复合材料和针刺复合材料，三维编织复合材料具有更好的整体性、层间剪切强度和断裂韧性。

3.1　静态力学性能

高雄[37]从经纱、纬纱和厚度 3 个方向入手，对不同编织结构（浅交弯联结构、浅交直联结构、三向正交结构）的三维碳纤维机织物进行了拉伸、压缩、弯曲、短梁剪切测试，并对比分析了整体的力学性能。研究发现，与浅交弯联结构和浅交直联结构相比，三向正交结构的经向性能更好，但其纬向性能有待提高，z 向的三点弯曲性能和短梁剪切性能更好，但压缩性能较差。在对特定方向性能要求较高的条件下，三向正交为优选。张艳红[38]研究了材料纤维体积含量（复合材料中纤维体积与复合材料体积的比值）和经纱屈曲率对经向拉伸性能的影响，试验以直交浅联、弯交浅联、深角联和贯穿正交 4 种织物为试样。结果表明，直交浅联与弯交浅联相比，由于直交浅联在纤维体积含量相似的前提下经纱屈曲率较低，因此其拉伸性能明显高于弯交浅联；直交浅联与深角联结构相比，两者的屈曲率相当，但前者的纤维体积含量大于后者，经向拉伸性能更优异；弯交浅联与深角联结构相比，前者的纤维体积含量略大于后者，但其经纱屈曲程度明显高于后者，导致其经向拉伸性能低于后者；贯穿正交织物的经向拉伸性能相较于其他 3 种结构具有明显优势。李珊珊等[39]采用像框法对角联锁机织物和三维正交机织物的剪切性能进行了比较，结果表明，在相同参数下两者并无太大差别。由于试验只采用了 2 组各 1 件的试样，因此其试验结果的准确性有待论证。焦亚男等[40]研究了经纬向纤维体积比对机织复合材料力学性能的影响，结果表明，某方向的力学性能随着其体积比的增加而增大，该结果与张艳红[38]的结果相同。对于三维编织复合材料，其编织结构、纤维体积含量和经纱屈曲率等都会影响材料的静态力学性能。对于编织结构，采用正交结构的材料的经向性能更优秀，采用浅交直联结构的材料的纬向性能更好；纤维体积含量的增加对材料的拉伸性能具有正向作用，而经纱屈曲率的增加会起反向作用。

温度会影响三维编织复合材料的性能。刘军等[41]研究了三维编织复合材料 T 形梁在低温（−80 ℃）下的弯曲行为，结果表明，低温环境对于材料的弯曲性能有一定改善作用；随着温度的降低，试样的失效模式由较高温度下不同程度的屈服断裂失效模式转变为低温下的脆性断裂模式。姜黎黎等[42]分别在室温、100 ℃、150 ℃、180 ℃下对三维四向碳纤维/环氧树脂复合材料进行了拉压试验，结果表明，随着温度的升高，材料的纵向拉伸强度变化不大，而材料的纵向压缩强度显著下降。陈波等[43]分别在室温、800 ℃、900 ℃下对三维四向碳/碳复合材料进行了拉伸试验，研究了材料的高温力学性能。结果表明，在室温至 900 ℃范围内，材料的拉伸性能随着温度的升高而增大。

此外,研究人员对不同结构复合材料的力学性能进行了比较。Siddique 等[44]对二维平纹和三维角互锁碳纤维复合材料的层间断裂韧性和断裂机理进行了研究，并测试了材料在不同加载率（0.5~100 mm/min）下的断裂韧性行为。结果表明，三维角互锁结构相较于二维平纹结构具有更高的断裂韧性，能有效抑制裂纹的发展，增大了断裂所需的能量，且裂纹萌生临界载荷随着加载速率的增加而减小。王玲玲等[45]对轴棒法编织、轴向穿刺、无纬布/网胎针刺 3 种结构的碳/碳复合材料进行了力学性能比较，结果表明，试样的轴向拉伸强度与轴向纤维的含量和纤维连续状态有关，对于轴向拉伸强度，采用轴向穿刺结构时最高，采用无纬布/网胎针刺结构时最低；对于径向弯曲强度和轴向压缩强度，3 种结构相当；对于径向压缩强度，无纬布/网胎针刺材料的最高，而采用轴棒法编织结构的最低。

3.2　动态力学性能

陈美林[46]采用改良的霍普金森杆测得了不同应变率下三维编织复合材料的应力、应变与应变率的相关曲线，探索了三维编织复合材料的动态拉伸性能。通过分析试验所得数据后发现，材料的拉伸性能具有应变率效应，且拉伸刚度和最大应力随着应变率的增加而增大，但材料的失效应变随着应变率的增加而减小。Pankow 等[47]对三维正交机织复合材料进行了面内（经向、纬向）、面外（法向）动态压缩试验，研究发现，随着应变率的增加，材料各方向的弹性模量未明显变化，其失效模式有所改变。在面内压缩时，以基体开裂和分层为主要失效模式，在准静态加载下纤维纽结破坏失效模式被基体强度的增加所抑制。在面外压缩时，失效模式由准静态时的分层转变为形成剪切带。叶晓盛[48]使用 SHPB 试验系统完成了三维机织复合材料的动态压缩和剪切试验，并通过二维 DIC（Digital Image Correlation）技术获得了试样的表面应变场。研究发现，碳纤维沿纤维方向的动态压缩强度远大于垂直纤维方向；碳纤维在 2 个方向的力学性能均具有应变率效应。其中，沿纤维方向的动态压缩强度随着应变率的增加呈先增加后减小的趋势，沿垂

直纤维方向的动态压缩强度随着应变率的增加呈单调增加趋势。Nakai 等[49]利用霍普金斯杆对正交铺设的碳纤维复合材料进行了动态压缩试验，研究发现，材料的极限抗压强度随着温度的升高（20~80 ℃）而急剧下降。其中，面内横向和纤维方向的压缩强度在低应变率和高温条件下迅速下降；随着应变率的上升，3 个主要材料方向的极限压缩强度（破坏应力）轻微上升，而极限压缩应变急剧下降；破坏表面受到温度和加载方向的影响较大。Li 等[50]使用霍普金森杆对三维多轴经编针织碳/环氧复合材料进行了动态压缩试验，研究了材料在高应变率下的动态性能。结果表明，在一定范围内（25~100 ℃），随着温度的升高，材料的强度明显降低，断裂减少，软化和塑性增强，但基质屈服、基质脱落、纤维基质间界面脱黏和纤维扭曲损伤现象明显增加，材料的动态性能急剧下降；随着应变率的上升（600~1 900 s^{-1}），材料的动态压缩性能显著提升，且在高应变率下材料表现出温度敏感性。

4 结语

碳纤维复合材料的力学性能受到多方面因素的影响，深入研究它在相关前沿领域的发展具有重要作用。

1）对于二维碳纤维复合材料，其静态力学性能受到其微观结构的影响，如孔隙率、密度等，且拉伸性能主要由纤维束性能决定。同时也受到温度的影响，如强度随着温度的升高呈先增后减的趋势。材料的动态力学性能主要受到温度和应变率的影响，材料的强度随着温度的升高同样呈先增后减的趋势。随着应变率的上升，材料的强度增大，但压缩强度在高应变率下的增强效果不明显。进一步研究该类材料的方向主要集中在增强层间韧性和抗剪切能力上。

2）对于针刺碳纤维复合材料，其静态力学性能受到温度、工艺参数和密度等的影响。随着温度的升高，材料的强度呈先增后减的趋势，且温度越高其衰减得越迅速。随着针刺密度、针刺深度和材料密度的增加，材料的拉伸强度下降，而其层间剪切强度呈先增后减的趋势。材料的动态力学性能主要受到温度和应变率的影响，随着温度和应变率的上升，材料的压缩强度增大，具有应变率敏感性。针对该类材料在压缩性能和层间剪切性能方面的研究较多，而在拉伸性能方面的研究较少，可进一步研究动态拉伸试验方面。

3）对于三维编织碳纤维复合材料，其静态力学性能与材料的结构、温度等因素相关，编织结构的不同导致材料经纬向性能的不同，材料纤维体积含量的增加对其拉伸性能有着正向作用，低温对材料的弯曲性能具有一定的增强作用，高温对材料的拉伸性能起到促进作用。材料的动态力学性能受到温度、应变率等的影响，随着温度的升高，材料的压缩性能呈下降趋势，随着应变率的升高，材料的压缩性能呈上升趋势，且不同受力方向的性能有所差异。针对该类材料动态力学性能方面的研究主要集中在压缩上，还需进一步深入研究其拉伸和剪切方面。

4）对比了 3 种结构碳纤维复合材料的性能，二维层合结构的织物增强方向强度较好，但其层间剪切性能较差，易发生分层；针刺结构相较于二维层合结构，其层间性能得到增强，但纤维铺层方向性能受到针刺的影响；采用三维编织结构其总体性能较好，但结构较复杂，且在不同编织方式下材料的性能有所不同。

为了推进碳纤维复合材料的研制和应用，通过总结调研内容后发现，还可在以下方面深入研究。当前研究多就单个或几个独立的影响因素对材料力学性能的影响进行了分析，可以综合分析不同因素影响材料性能的权重，进而在实际应用中综合各方面因素选择最合适的参数；碳纤维复合材料常用于高温环境，但是目前的研究主要集中在静态载荷作用下的高温力学性能，针对冲击载荷作用下的力学性能还研究得不足，而且静态和动态试验的温度偏低，难以适用极端环境下碳纤维复合材料的工程应用及其分析评估。由此可见，有必要进行适用于碳纤维复合材料的高温动态力学性能试验，进一步开展高温条件下碳纤维复合材料的动态力学性能研究。

参考文献：

[1] 唐亮，汪登，屈建，等. 温度对碳纤维增强复合材料力学行为影响的研究进展[J]. 冶金与材料，2022, 42(4): 56-58.
TANG Liang, WANG Deng, QU Jian, et al. Research Progress on the Effect of Temperature on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Composites[J]. Metallurgy and Materials, 2022, 42(4): 56-58.

[2] 郝振娜. 基于多巴胺自聚修饰碳纤维及其复合材料力学性能的研究[D]. 青岛：山东科技大学, 2019: 1-4.
HAO Zhen-na. Study on Mechanical Properties of Dopamine-Based Self-Polymerization Modified Carbon Fiber and Its Composites[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019: 1-4.

[3] 翟军军，王露晨，孔祥霞. 三维多向编织复合材料温度效应综述：热传导、热膨胀性质和力学响应[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2459-2478.
ZHAI Jun-jun, WANG Lu-chen, KONG Xiang-xia. A Review on Temperature Effect of 3D Multi-Directional Braided composites: Heat Conduction, Thermal Expan-

sion Properties and Mechanical Response[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(8): 2459-2478.

[4] LEE K J, CHEN Z Y. Microstructure Study of PAN-Pitch-Based Carbon-Carbon Composite[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 82(2): 428-434.

[5] DEL PUGLIA P, SHEIKH M A, HAYHURST D R. Classification and Quantification of Initial Porosity in a CMC Laminate[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(2): 223-230.

[6] 徐颖, 邵彬彬, 许维伟, 等. PIP 法制备 C/SiC 复合材料及其微观结构分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 55-60.
XU Ying, SHAO Bin-bin, XU Wei-wei, et al. Study on Dynamic Mechanical Properties of Short Carbon Fiber C/SiC Ceramic Matrix Composites[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 36(6): 55-60.

[7] 李贺军, 史小红, 沈庆凉, 等. 国内 C/C 复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2142-2154.
LI He-jun, SHI Xiao-hong, SHEN Qing-liang, et al. Research and Development of C/C Composites in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2142-2154.

[8] 宋绪丁, 庞利沙. 碳纤维树脂基复合材料及成型工艺与应用研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 81-91.
SONG Xu-ding, PANG Li-sha. Research Advances in Molding Technology and Application of Carbon Fiber and Its Resin Matrix Composites[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(14): 81-91.

[9] 陈霏. 孔隙影响碳纤维复合材料层合板力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 27-36.
CHEN Fei. Study on the Effect of Porosity on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Composite Laminates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 27-36.

[10] 徐凯. 2DC/C 复合材料的力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 39-58.
XU Kai. Study on Mechanical Properties of 2DC/C/C Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 39-58.

[11] 孙万昌, 李贺军, 白瑞成, 等. 微观组织结构对 C/C 复合材料力学行为的影响[J]. 无机材料学报, 2005, 20(3): 671-676.
SUN Wan-chang, LI He-jun, BAI Rui-cheng, et al. Influence of Matrix Microstructures on Mechanical Behavior of C/C Composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2005, 20(3): 671-676.

[12] 郭辉. 二维编织 C/SiC 复合材料的力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003: 33-40.
GUO Hui. Study on Mechanical Properties of Two-Dimensional Braided C/SiC Composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003: 33-40.

[13] 张伟, 吕胜利, 吕毅, 等. 二维编织 C/SiC 复合材料高温拉伸性能研究[J]. 强度与环境, 2009, 36(1): 22-26.
ZHANG Wei, LYU Sheng-li, LYU Yi, et al. Research of Tensile Performance of 2D Weave C/SiC Compositesat High Temperature[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(1): 22-26.

[14] 董士博. 碳/碳化硅复合材料的高温力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 22-25.
DONG Shi-bo. Study on Mechanical Properties of Carbon/Silicon Carbide Composites at High Temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 22-25.

[15] 牛学宝, 张程煜, 乔生儒, 等. 2D-C/SiC 复合材料在空气中的高温压缩强度研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(6): 92-95.
NIU Xue-bao, ZHANG Cheng-yu, QIAO Sheng-ru, et al. Compressive Strength of 2D-C/SiC Composite at High Temperature in Air[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(6): 92-95.

[16] YOON D H, LEE J W, KIM J H, et al. Fracture Behavior of C/SiC Composites at Elevated Temperature[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(8): 3647-3651.

[17] 陈伟华, 王丽燕, 张晗翌, 等. 高温空气下 C/SiC 复合材料力学性能测试[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(6): 26-32.
CHEN Wei-hua, WANG Li-yan, ZHANG Han-yi, et al. Mechanical Properties Test of C/SiC Composites in High Temperature Air[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(6): 26-32.

[18] 索涛, 张部声, 汤忠斌, 等. 极端环境下连续碳纤维增韧的陶瓷基复合材料的力学行为[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 273-278.
SUO Tao, ZHANG Bu-sheng, TANG Zhong-bin, et al. Compressive Behaviors of Continuous Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide Composites at High Temperature and High Strain Rate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(3): 273-278.

[19] ZHANG Chao, REN T, ZHANG Xin-yue, et al. Study of Dynamic Compressive Behaviors of 2D C/SiC Composites at Elevated Temperatures Based on In-Situ Observation[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40: 5103-5119.

[20] 陈煊, 程礼, 陈卫, 等. 二维C/SiC复合材料准静态和动态拉伸力学性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(12): 2846-2853.
CHEN Xuan, CHENG Li, CHEN Wei, et al. Quasi-Static and Dynamic Tensile Mechanical Properties of Two Dimensional C/SiC Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(12): 2846-2853.
[21] NAIK N K, KAVALA V R. High Strain Rate Behavior of Woven Fabric Composites under Compressive Loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 474(1/2): 301-311.
[22] ZHANG Xue-jie, SHI Yan-chao, LI Zhong-xian. Experimental Study on the Tensile Behavior of Unidirectional and Plain Weave CFRP Laminates under Different Strain Rates[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 164: 524-536.
[23] ROUF K, SURATKAR A, IMBERT-BOYD J, et al. Effect of Strain Rate on the Transverse Tension and Compression Behavior of a Unidirectional Non-Crimp Fabric Carbon Fiber/Snap-Cure Epoxy Composite[J]. Materials, 2021, 14(23): 7314.
[24] OU Yun-fu, ZHU De-ju, ZHANG Huai-an, et al. Mechanical Properties and Failure Characteristics of CFRP under Intermediate Strain Rates and Varying Temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: 123-136.
[25] 刘新, 武湛君, 何辉永, 等. 单向碳纤维增强树脂基复合材料的超低温力学性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2437-2445.
LIU Xin, WU Zhan-jun, HE Hui-yong, et al. Cryogenic Mechanical Properties of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11): 2437-2445.
[26] 骆雪芹, 唐蓝天, 李娟子, 等. 低温对碳纤维复合材料弯曲性能影响试验研究[J]. 力学季刊, 2022, 43(3): 537-546.
LUO Xue-qin, TANG Lan-tian, LI Juan-zi, et al. Experimental Study on the Influence of Low Temperature on Bending Properties of Carbon Fiber Composites[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(3): 537-546.
[27] 魏博鑫, 崔红, 张晓虎. 针刺 C/C 复合材料拉伸性能和韧性的研究进展[J]. 炭素, 2013(2): 19-23.
WEI Bo-xin, CUI Hong, ZHANG Xiao-hu. Development on Tensile Properties and Toughness of Needing C/C Composites[J]. Carbon, 2013(2): 19-23.
[28] 李伟, 李贺军, 张守阳, 等. 石墨化处理对双层热解炭基 2D C/C 复合材料微观结构的影响[J]. 新型炭材料, 2011, 26(5): 328-334.
LI Wei, LI He-jun, ZHANG Shou-yang, et al. Effect of High Temperature Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Binary Layer Textured 2D C/C Composites[J]. New Carbon Materials, 2011, 26(5): 328-334.
[29] 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.
CHENG Hai-xia, LIU Yan-you, QIAO Zhi-wei, et al. Effect of Three-Dimensional Needling Process Parameters on Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites[J]. Fiber Glass, 2020(4): 13-17.
[30] 解惠贞, 孙建涛, 何轩宇, 等. 密度对 C/C 复合材料热力学性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 268-271.
XIE Hui-zhen, SUN Jian-tao, HE Xuan-yu, et al. Influence of Density on Mechanical and Thermal Performance of C/C Composite[J]. Materials Review, 2018, 32(2): 268-271.
[31] 张波, 贺平照, 梁建伟, 等. 针刺 C/C 复合材料高温剪切强度研究[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 270-272.
ZHANG Bo, HE Ping-zhao, LIANG Jian-wei, et al. Shear Strength of Needled Felt C/C Composites in Elevated Temperature[J]. Materials Review, 2018, 32(S2): 270-272.
[32] 李明旭. 针刺碳/碳复合材料超高温拉伸力学性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 56-60.
LI Ming-xu. Experimental Study on Tensile Mechanical Properties of Needle-Punched Carbon/Carbon Composites at Ultra-High Temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 56-60.
[33] 吴迪. 针刺 C/C 复合材料双轴载荷力学性能试验研究与失效分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 35-40.
WU Di. Experimental Study and Failure Analysis of Mechanical Properties of Needle-Punched C/C Composites under Biaxial Loading[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 35-40.
[34] 索涛, 石春森, 李玉龙, 等. 准三维针刺 C_f/SiC 复合材料室温层向动态压缩力学行为的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(1): 37-44.
SUO Tao, SHI Chun-sen, LI Yu-long, et al. Experimental Investigation on Laminar Dynamic Compression Behavior of Quasi-3D Needle-Punched C_f/SiC Composite at Room Temperature[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(1): 37-44.
[35] LI Dian-sen, DUAN Hong-wei, WANG Wei, et al. Strain Rate and Temperature Effect on Mechanical Properties

and Failure of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites under Dynamic Loading[J]. Composite Structures, 2017, 172: 229-241.

[36] JIN Xiao-chao, HOU Cheng, LI Chun-ling, et al. Strain Rate Effect on Mechanical Properties of 3D Needle-Punched C/C Composites at Different Temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 160: 140-146.

[37] 高雄. 基于不同三维机织结构的碳纤复合材料整体力学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017: 42-52.
GAO Xiong. Study on the Overall Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites Based on Different Three-Dimensional Woven Structures[D].Shanghai: Donghua University, 2017: 42-52.

[38] 张艳红. 2.5 维机织增强材料结构参数对经向拉伸性能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 34-36.
ZHANG Yan-hong. Effect of Structural Parameters of 2.5-Dimensional Woven Reinforcement on Warp Tensile Properties[D].Wuxi: Jiangnan University, 2008: 34-36.

[39] 李姗姗, 陈利, 焦亚男. 2.5 维机织物剪切性能实验研究[J]. 材料工程, 2009(S2): 56-59.
LI San-san, CHEN Li, JIAO Ya-nan. Experimental Research on Shear Characteristics of 2.5D Woven Fabrics[J]. Journal of Materials Engineering，2009(S2): 56-59.

[40] 焦亚男，仇普霞，纪高宁，等. 经纬向纤维体积比例对 2.5D 机织复合材料力学性能的影响[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(3): 1-5.
JIAO Ya-nan, QIU Pu-xia, JI Gao-ning, et al. Mechanical Properties of 2.5D Woven Composites with Different Volume Rates in Warp and Weft Directions[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(3): 1-5.

[41] 刘军，刘奎，宁博，等. 三维编织复合材料 T 型梁的低温场弯曲性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(12): 57-62.
LIU Jun, LIU Kui, NING Bo, et al. Bending Properties of Three-Dimensional Braided Composite T-Beam at Low Temperature[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(12): 57-62.

[42] 姜黎黎，吴日娜，徐美玲，等. 三维四向编织碳纤维/环氧树脂复合材料在热环境中的拉压力学性能实验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 309-317.
JIANG Li-li, WU Ri-na, XU Mei-ling, et al. Experimental Investigation on the Tensile and Compressive Properties of 3D 4-Directional Braided Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites in Thermal Environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 309-317.

[43] 陈波，温卫东，孙煦泽，等. 三维编织碳/碳复合材料高温力学及疲劳试验研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 8-16.
CHEN Bo, WEN Wei-dong, SUN Xu-ze, et al. Experimental Investigation on Fatigue of 3D Braided C/C Composites at High Temperatures[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2018, 40(1): 8-16.

[44] SIDDIQUE A, SUN Bao-zhong, GU Bo-hong. Structural Influences of Two-Dimensional and Three-Dimensional Carbon/Epoxy Composites on Mode I Fracture Toughness Behaviors with Rate Effects on Damage Evolution[J]. Journal of Industrial Textiles, 2020, 50(1): 23-45.

[45] 王玲玲，师鼎，张小会，等. 不同增强结构炭/炭复合材料力学及抗烧蚀性能[J]. 炭素技术，2017，36(4): 16-20.
WANG Ling-ling, SHI Ding, ZHANG Xiao-hui, et al. Mechanical and Ablative Properties of Different Reinforced Structure C/C Composites[J]. Carbon Techniques, 2017, 36(4): 16-20.

[46] 陈美林. 三维编织复合材料的动态拉伸性能[D]. 上海: 东华大学, 2005: 25-32.
CHEN Mei-lin. Dynamic Tensile Properties of Three-Dimensional Braided Composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2005: 25-32 .

[47] PANKOW M, SALVI A, WAAS A M, et al. Split Hopkinson Pressure Bar Testing of 3D Woven Composites[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(9): 1196-1208.

[48] 叶晓盛. 碳纤维机织复合材料动态力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 28-34.
YE Xiao-sheng. Study on Dynamic Mechanical Properties of Carbon Fiber Woven Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 28-34.

[49] NAKAI Ken-ji, FUKUSHIMA T, YOKOYAMA T, et al. High Strain-Rate Compressive Properties of Carbon/Epoxy Laminated Composites–Effects of Loading Direction and Temperature[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 183: 02011.

[50] LI Dian-sen, CHEN Hao-ran, GE Dong-yun, et al. Split Hopkinson Pressure Bar Testing of 3D Multi-Axial Warp Knitted Carbon/Epoxy Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79: 692-705.

责任编辑：彭颋