

高温环境下三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能

李慧 武鲜艳 吴美琴 谭云洲

Impact compression properties of three-dimensional five directional carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes at elevated temperatures

LI Hui, WU Xianyan, WU Meiqin, TAN Yunzhou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241202.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维编织玻璃纤维/环氧树脂复合材料薄壁管轴向压缩性能的温度效应

Temperature effect on axial compressive properties of three-dimensional glass fiber/epoxy resin braided composite thin-walled tubes

复合材料学报. 2023, 40(10): 5588–5600 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230105.002>

碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂三维编织复合材料薄壁圆管压溃吸能特性与损伤机制

Crushing energy absorption characteristics and damage mechanism of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D braided composite thin-walled circular tube

复合材料学报. 2021, 38(9): 2821–2828 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201210.001>

三维五向编织复合材料低速冲击损伤区域的量化表征

Quantitative characterization of low-velocity impact damage in three dimensional five-directional braided composites

复合材料学报. 2023, 40(9): 5411–5422 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221223.002>

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

Experimental investigation on the tensile and compressive properties of 3D 4-directional braided carbon fiber/epoxy resin composites in thermal environment

复合材料学报. 2020, 37(2): 309–317 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190310.001>

碳纤维增强环氧树脂基复合材料轴管的低速冲击失效机制及剩余压缩性能

Failure mechanisms and residual compression performance of carbon fiber reinforced epoxy composite shaft tubes subjected to low velocity impact

复合材料学报. 2021, 38(11): 3640–3651 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210129.004>

碳纤维三维编织-铺层混合结构复合材料管的轴向压缩性能

Axial compressive property of carbon fiber 3D braided-unidirectional hybrid tubes

复合材料学报. 2024, 41(8): 4084–4093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240228.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

高温环境下三维五向碳纤维/环氧树脂 编织复合材料圆管冲击压缩性能



分享本文

李慧^{1,2}, 武鲜艳^{*2}, 吴美琴¹, 谭云洲²

(1. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院 (国际丝绸学院), 杭州 310018; 2. 嘉兴大学 材料与纺织工程学院, 嘉兴 314001)

摘要: 采用 1×1 四步法圆形编织技术和树脂传递模塑 (RTM) 工艺制备了三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管, 并在室温 (20℃) 和高温场 (80℃、110℃、140℃、170℃) 环境下使用搭载高温装置的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管进行轴向冲击压缩测试。根据实验结果揭示温度和应变率对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩性能和失效行为的耦合影响, 并结合体式显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 对冲击压缩破坏后的试样进行宏观观察和微观形貌观察分析。研究表明: 温度变化和应变率的不同对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的力学性能有显著影响。室温时, 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能稳定, 应变率增加能提高材料压缩强度、压缩模量等力学性能。破坏模式主要是纤维断裂。高温场中, 材料力学性能整体下降。抗冲击压缩能力随温度升高而减弱, 破坏模式有树脂软化、纤维与树脂界面脱粘现象。应变率对力学性能的影响因高温干扰会发生变化。

关键词: 三维五向编织复合材料圆管; 高温场; 应变率; 冲击压缩; 破坏模式

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)11-6289-13

Impact compression properties of three-dimensional five directional carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes at elevated temperatures

LI Hui^{1,2}, WU Xianyan^{*2}, WU Meiqin¹, TAN Yunzhou²

(1. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. College of Materials and Textile Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

Abstract: Three-dimensional five-directional (3D5D) carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes were prepared by using 1×1 four-step circular braiding technology and resin transfer molding (RTM) process. Axial impact compression tests of the 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes were carried out using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) equipped with a high-temperature device in environments of ambient temperature (20℃) and elevated temperature fields (80℃, 110℃, 140℃, 170℃). According to the experimental results, the coupled effects of temperature and strain rate on the impact compression performance and failure behavior of the 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes were revealed. Macroscopic and microscopic morphology observations and analyses of the specimens after impact compression failure were performed by combining a stereo microscope and a scanning electron microscope (SEM). The research results show that the mechanical properties of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes are

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2024-11-19; 录用日期: 2024-11-24; 网络首发时间: 2024-12-03 08:47:21

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241202.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51805210); 中国博士后科学基金 (2022M712731); 嘉兴市公益性研究计划项目 (2022AY10022); 嘉兴大学 SRT 创新训练项目 (8517231008)

National Natural Science Foundation of China (51805210); China Postdoctoral Science Foundation (2022M712731); Jiaxing Public Welfare Research Program (2022AY10022); SRT Innovative Training Program of Jiaxing University (8517231008)

通信作者: 武鲜艳, 博士, 副教授, 研究方向为纺织复合材料力学 E-mail: xywu@zjxu.edu.cn

引用格式: 李慧, 武鲜艳, 吴美琴, 等. 高温环境下三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(11): 6289-6301.
LI Hui, WU Xianyan, WU Meiqin, et al. Impact compression properties of three-dimensional five directional carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes at elevated temperatures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(11): 6289-6301(in Chinese).

significantly affected by the temperature and strain rate. At ambient temperature, the impact compression performance of the 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes is stable, and the increase of strain rate can improve the mechanical properties such as compressive strength and compressive modulus of the material. The failure mode is mainly fiber breakage. In elevated temperature field, the mechanical properties of the material decrease. The impact compression resistance decreases with increasing temperature. The failure modes include resin softening and fiber-resin interface debonding. The influence of the strain rate on the mechanical properties will change due to high temperature interference.

Keywords: three-dimensional five-directional (3D5D) braided composite circular tube; elevated temperature field; strain rates; impact compression; failure mode

随着航空航天、国防军工等领域对于轻质高强度材料需求的增长，基于碳纤维增强树脂基体的复合材料因其优异的比强度和比刚度而受到广泛关注^[1-3]。复合材料圆管被广泛应用于空间结构件或承力结构件，如火箭连接级间断结构、汽车纵梁能量吸收装置、直升机传动轴等^[4-5]。而采用三维五向编织技术制备的碳纤维增强复合材料不仅保持了传统层合板良好的面内性能，还显著提高了Z方向上的机械性能及抗分层能力^[6]。然而，在实际服役过程中，复合材料构件不可避免会受到不同温度场环境的影响且时常承载各种冲击载荷^[7-9]。因此有必要全面了解编织复合材料圆管在不同温度场下的冲击压缩行为。

目前，许多学者对三维编织复合材料圆管在室温下的力学性能进行了研究，包括压缩^[10-12]、拉伸、疲劳^[13]、扭转^[14-15]和冲击^[16-18]。然而，温度和应变率对三维编织复合材料力学性能的影响大多集中在矩形编织复合材料^[19-28]。只有少数学者研究了温度和应变率对三维编织复合材料圆管轴压性能的影响。Wu等^[29]研究了三维四向编织碳纤维/环氧树脂复合材料圆管在23℃、-50℃和-100℃ 3个不同温度条件下，应变率范围在340 s⁻¹至760 s⁻¹之间的轴向冲击压缩性能。结果表明，随着温度的降低及应变率的提高，该复合材料的抗压强度、刚度及其比能量吸收能力均呈现显著提升的趋势。这一发现为低温环境下高性能复合材料的设计提供了重要参考。李紫伦等^[30]对3种不同编织角(15°、25°、35°)的三维四向编织玻璃纤维/环氧树脂复合材料薄壁管，在包括低温(-100℃、-50℃)、室温(20℃)及高温(80℃、110℃、140℃、170℃)在内的多种温度条件下，进行了轴向准静态压缩性能测试。研究结果显示，该类复合材料薄壁管的准静态压缩性能呈现出明显的温度依赖性。这一发现为进一步优化复合材料在不同环境条件下的应用提供了重要的实验依

据。徐玥等^[31]对三维五向玻璃纤维/环氧树脂编织复合材料圆管在低温(-100℃、-50℃)和室温(20℃)条件下进行了轴向冲击压缩性能测试。研究表明，温度和应变率对该类复合材料圆管的轴向冲击压缩性能产生了显著影响。这一发现为复合材料在极端温度条件下的应用提供了新的见解。

本文以碳纤维作为增强体，采用1×1四步法圆形编织技术和树脂传递模塑(RTM)工艺制备了三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管，并在室温(20℃)和高温场(80℃、110℃、140℃、170℃)环境下使用搭载高温装置的分离式霍普金森压杆(SHPB)对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管进行轴向冲击压缩测试，根据实验结果揭示温度和应变率对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩性能和失效行为的耦合影响，并结合体式显微镜和扫描电子显微镜(SEM)对冲击压缩破坏后的试样进行宏观观察和微观形貌观察分析。研究内容可揭示复合材料的力学响应机制，对于预测复合材料在各种工况下的力学行为至关重要，能为航空航天、汽车等领域的结构设计提供依据，从而确保相关设计的安全性和可靠性。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

三维五向编织复合材料圆管预成型体使用的碳纤维长丝是韩国晓星公司生产的型号为T700-12K的碳纤维束；环氧树脂基体是由杭摩佳发新材料有限公司生产的JC-02A型环氧树脂和JC-02B型改性酸酐固化剂混合制成，混合质量比为环氧树脂：固化剂=100：85。表1和表2分别列出了碳纤维和环氧树脂体系的性能参数。

1.2 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的制备

三维五向编织碳纤维管状预成型体由1×1四

表 1 碳纤维性能参数
Table 1 Properties of carbon fiber

Specification	Fiber diameter/ μm	Bundle density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Fiber bundle density/tex	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
12 K	7	1.80	800	4 900	240

表 2 环氧树脂体系性能参数
Table 2 Properties of epoxy resin system

Label	Ingredient	Viscosity/ $(\text{MPa}\cdot\text{s})$	Epoxy value/ $(\text{mol}\cdot(100\text{ g})^{-1})$	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
JC-02A	Epoxy resin	1 000—3 000	0.50—0.53	1.12—1.14
JC-02B	Curing agent	30—50	—	1.20—1.25

步法圆形编织技术制成，排纱列数为 32 列，排纱层数为 2 层，编织角度为 25°。图 1 为三维四步法编织工艺图及制备完成的三维五向编织碳纤维管状预成型体。

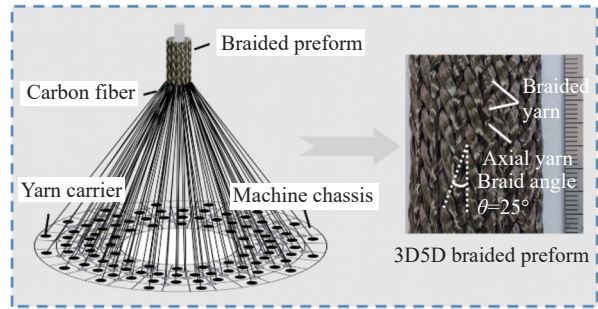


图 1 三维四步法编织工艺图及三维编织管状预成型体
Fig. 1 3D four-step braiding process diagram and photograph of 3D braided tubular preform

采用树脂传递模塑 (RTM) 工艺制备三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管，首先将调配好的环氧树脂体系放入 40℃ 的真空干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司，DZF-6050) 中脱泡 2 h，其目的是完全脱除树脂中的气泡。接着将三维五向编织碳纤维管状预成型体铺放在准备好并涂有脱模剂的模具内，合模密封并预抽真空 1 h，待模具中的空气排出后将脱泡后的树脂体系注入模具内，使其充分浸润碳纤维。最后加热固化，固化温度和时间分别为 90℃-2 h、110℃-1 h、130℃-4 h。停止加热后，待自然降温至室温，放置 24 h 后进行开模处理。参照标准《纤维增强塑料压缩性能试验方法》(GB/T 1448—2005)^[32]，使用美国 Buehler 公司生产的 ISomet High Speed Pro 精密锯将固化成型后的三维五向编织复合材料圆管按长径比 1 : 1 进行切割备用。图 2 为 RTM 工艺原理图及切割后的三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆

管试样。使用游标卡尺对制备完成的三维五向编织复合材料圆管试样的外径和壁厚分别进行多次测量后取平均值，确保数据的准确性和可靠性。表 3 为三维五向编织碳纤维/环氧树脂复合材料圆管试样规格。

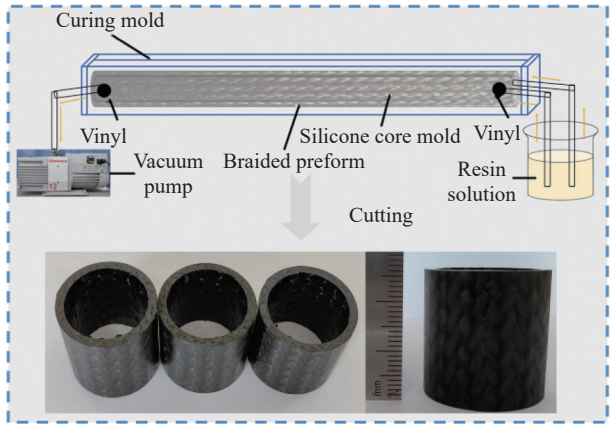


图 2 树脂传递模塑 (RTM) 工艺原理图及切割后的复合材料试样
Fig. 2 Schematic diagram of the resin transfer molding (RTM) process and composite specimen after cutting

表 3 三维五向编织复合材料圆管试样规格
Table 3 Sample specification of 3D5D braided composite circular tubes

Braiding angle/(°)	Outside diameter/mm	Wall thickness/mm	Fiber volume fraction/%
25	25.90	2.49	54.20

1.3 性能测试

三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管室温和高温场冲击压缩测试在搭载有高温装置的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置上进行。测试装置、试样夹持及高温装置如图 3 所示。该装置由冲击杆、入射杆、传输杆、吸收杆和数据采集系统组成。冲击杆和吸收杆的长度分别为 250 mm 和 500 mm。试样夹在入射杆和传输杆之间，两杆

长度均为 1 500 mm。SHPB 装置中杆的直径均为 30 mm。SHPB 装置配备了一个由压缩氮气操作的炮管来发射冲击杆，实验通过调节冲击气压控制冲击杆的速度，实验冲击气压为 0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa。冲击杆撞入射杆时，会在入射杆中产生应力脉冲，该应力脉冲沿着入射杆传播，并在与试样接触时对试样施加高速冲击载荷。试件受到冲击后会发生变形和损坏，其力学响应是通过粘贴在入射杆和传动杆上的应变片测量的。数据采集系统可以实时记录应力脉冲在入射杆和透射杆中的传播过程及试件的力学响应。通过对采集数据的分析，可以得到不同应变率下三维五向编织复合材料圆管的应力-应变曲线、压缩强度和压缩模量等力学性能参数。SHPB 装置的详细原理可参考文献^[33-34]。假定试样两侧的动力相等，即下式成立：

$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$ (1)

通过一维弹性波动方程得到试样的平均应力、应变和应变率：

$\sigma_S = \frac{E_b A_b}{A_S} \varepsilon_T$ (2)

$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0}{l_S} \varepsilon_R$ (3)

$\varepsilon = -\frac{2C_0}{l_S} \int \varepsilon_R dt$ (4)

其中： σ_S 、 $\dot{\varepsilon}$ 和 ε 分别为试样的应力、应变率和应变参数； ε_I 、 ε_R 和 ε_T 分别是入射、反射和透射波应变； l_S 、 A_S 和 A_b 分别是试样的长度、试样的截面积和杆的截面积； $C_0 = \sqrt{E_b/\rho_b}$ ， C_0 、 E_b 和 ρ_b 分别是杆的弹性波速、弹性模量和密度； t 为时间。

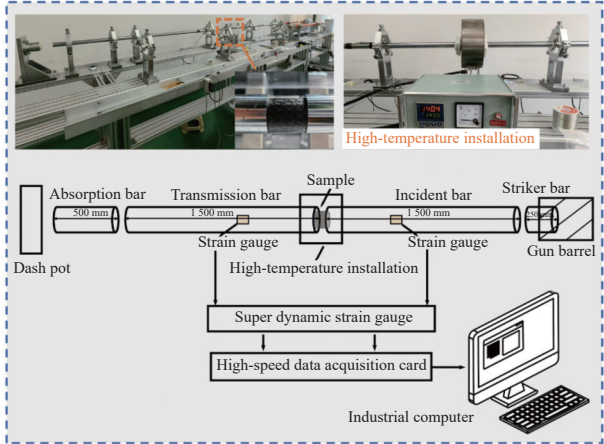


图 3 冲击压缩测试装置

Fig. 3 Impact compression test device

温度可以通过高温装置的温控单元设置，实验温度为 20℃(室温)、80℃、110℃、140℃、170℃，温度平衡时间为 20 min，重复实验次数为 3 次。

使用由德国 Leica Microsystems 公司生产的型号为 M125 C 的体式显微镜对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的轴向受冲击面和外表面进行观察，分析其压缩破坏失效形态。使用台式扫描电子显微镜 (SEM, Phenom Pure 型, 复纳科学仪器 (上海) 有限公司) 对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管室温和高温场下冲击压缩破坏后的微观形貌进行观察。

2 结果与讨论

2.1 冲击压缩实验信号特征

图 4 列出了同一冲击气压 (0.1 MPa) 下不同温度及同一温度 (20℃) 下不同冲击气压的三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管 SHPB 测试波形信号。可以看出，试验所得信号差异主要体现在波幅和波形形状方面。在同一冲击气压下，随着温度的升高，入射波的波幅有一定程度的减小。这是由于在高温下，环氧树脂基体会发生软化，碳纤维与环氧树脂之间的界面结合力也会下降，使材料整体的刚度降低，应力波在材料中传播时受到的阻力减小，导致入射波的波幅可能会有一定程度的减小。在波形形状上的差异更加明显，随着温度的升高，材料在高温下更容易发生塑性变形和损伤，这会影响力波在材料中的传播和反射。高温下材料的黏性会增加，应力波在材料中的传播和反射过程会受到更大的阻尼作用，导致波形的上升沿和下降沿变得更加平缓。虽然不同温度下的透射波都呈三角缓坡状，但温度升高后的透射波信号峰值都比 20℃ 时有所降低，20℃ 下，透射波信号峰值为 54.33 mV，当温度升高至 80℃、110℃、140℃、170℃ 时，透射波信号峰值分别降至 44.75 mV、36.29 mV、40.54 mV、22.28 mV。说明高温场下材料强度减弱。初始段斜率也随着温度升高与 20℃ 相比有所降低，20℃ 下，透射波信号斜率为 1.38，当温度升高至 80℃、110℃、140℃、170℃ 时，透射波信号斜率分别降至 1.30、0.72、0.73、0.32。说明高温场下材料波阻抗减小，材料发生了软化。在同一温度下，更大的冲击气压会使透射波信号的峰值和斜率增大，0.1 MPa 下，透射波信号峰值和斜率分别为 54.33 mV 和 1.38，当冲击气压升高至 0.3 MPa 和

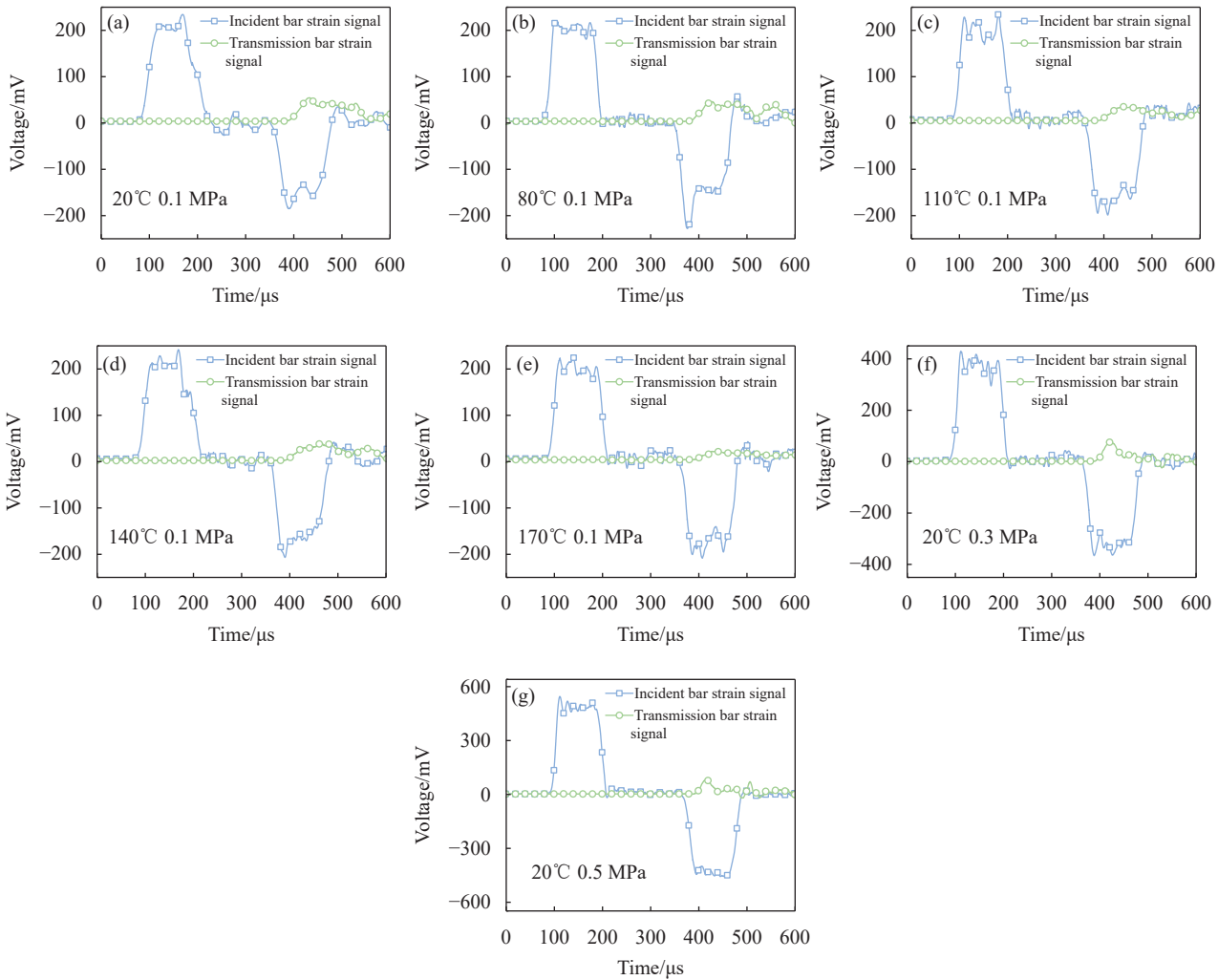


图 4 不同温度和冲击压力下分离式霍普金森压杆 (SHPB) 测试信号的差异

Fig. 4 The difference of split hopkinson pressure bar (SHPB) test signal at different temperatures and impact pressures

0.5 MPa 时，透射波信号峰值和斜率分别升至 76.51 mV、83.04 mV 和 3.09、3.31。由于冲击气压越大，撞击杆撞击入射杆的能量就越大，产生的应力波强度越大，在材料中传播时可能会使材料更快地达到塑性变形阶段。

2.2 典型的应变率-时间曲线

图 5 为三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管在 5 个温度 3 个冲击气压下测得的典型的应变率-时间曲线。取曲线中较平缓的区域作为平均应变率选取区间，即 25~100 μs 时间区间，可以得出，当冲击气压为 0.1 MPa 时，20℃、80℃、110℃、140℃、170℃ 下的平均应变率分别为 288 s⁻¹、295 s⁻¹、296 s⁻¹、297 s⁻¹、304 s⁻¹；当冲击气压为 0.3 MPa 时，20℃、80℃、110℃、140℃、170℃ 下的平均应变率分别为 554 s⁻¹、559 s⁻¹、560 s⁻¹、562 s⁻¹、562 s⁻¹；当冲击气压为 0.5 MPa 时，

20℃、80℃、110℃、140℃、170℃ 下的平均应变率分别为 724 s⁻¹、727 s⁻¹、750 s⁻¹、753 s⁻¹、754 s⁻¹。这说明随着冲击气压的增大，应变率有增大的趋势。这是由于冲击气压越高，撞击杆撞击入射杆时产生的应力波强度就越大，传递到复合材料圆管上的能量也就越多。更多的能量输入使材料内部的分子、纤维等结构更容易被激活，加速了材料的变形过程，从而提高了应变率。在相同冲击气压下，随着温度的升高，应变率也有增大的趋势，是由于在较低温度范围内，材料的模量较高，抵抗变形的能力较强，应变率相对较低。随着温度的升高，环氧树脂基体逐渐软化，碳纤维与环氧树脂之间的界面结合力下降，材料整体变软，抵抗变形的能力减弱，在相同的应力作用下更容易发生变形，导致应变率增加。但由于温度的影响相较于冲击气压的影响较小，故在下文分析中

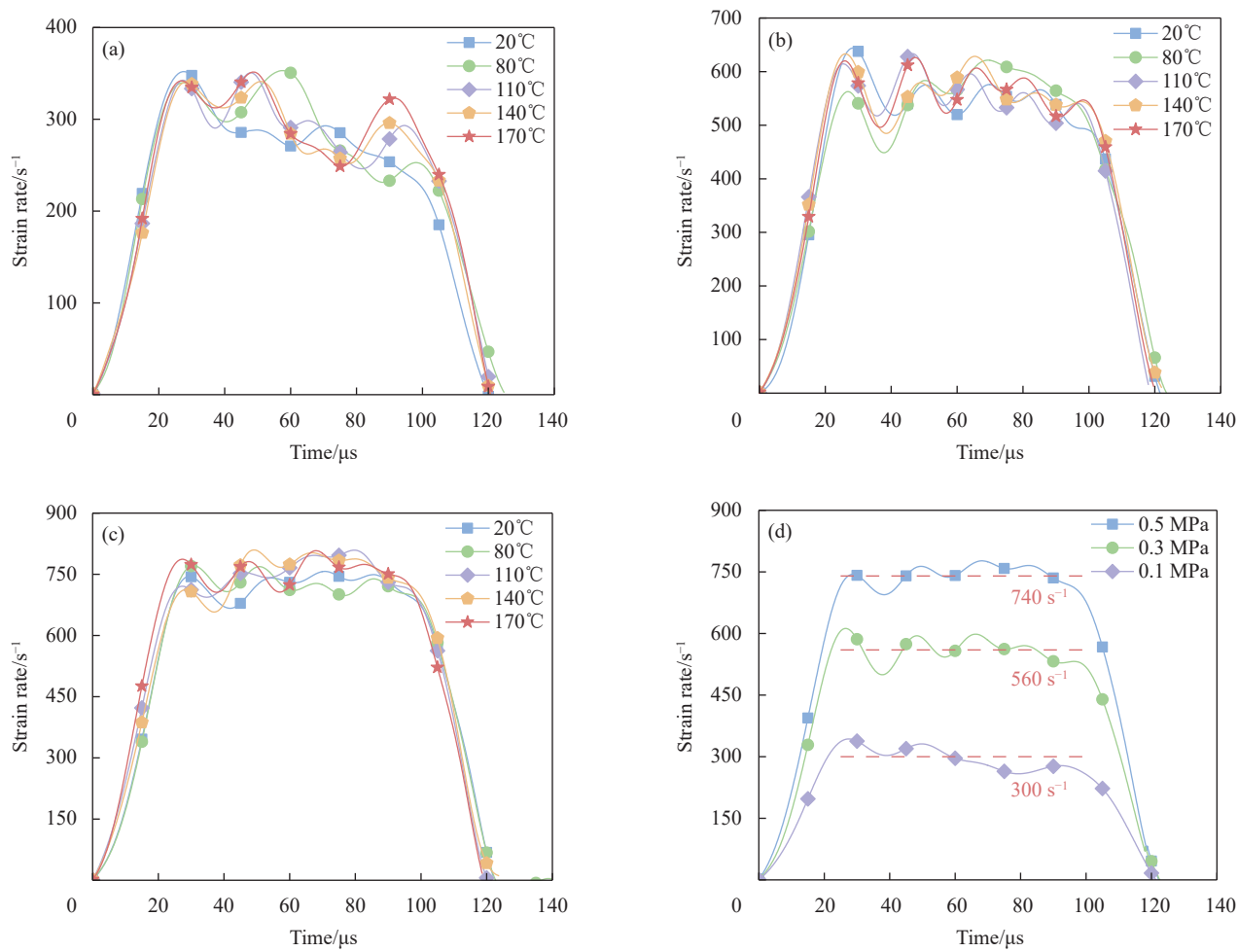


图5 三维五向编织复合材料圆管典型的应变率-时间曲线: (a) 0.1 MPa; (b) 0.3 MPa; (c) 0.5 MPa; (d) 平均应变率

Fig. 5 Typical strain rate-time curves of 3D5D braided composite circular tubes: (a) 0.1 MPa; (b) 0.3 MPa; (c) 0.5 MPa; (d) Average strain rate

取同一应变率分析，即采用不同温度下平均应变率的均值作为不同冲击气压对应的应变率。从图中可以看出 0.1 MPa 冲击气压对应的应变率为 300 s^{-1} ；0.3 MPa 冲击气压对应的应变率为 560 s^{-1} ；0.5 MPa 冲击气压对应的应变率为 740 s^{-1} 。

2.3 典型的应力-应变曲线

图6 为三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管在不同温度、不同应变率下典型的应力-应变曲线。可以看出，温度和应变率均会使三维五向编织复合材料圆管的应力-应变曲线在弹性阶段、屈服阶段及断裂阶段发生明显的变化。

在室温条件下，加载初期的应力-应变曲线呈现近似线性关系。这是由于在室温且较低应力作用下，编织复合材料圆管中的碳纤维和环氧树脂基体共同承担载荷，环氧树脂基体能够将载荷有效地传递给碳纤维，此时复合材料整体表现出较好的弹性性能，变形程度较小。随着应力的继续

增加，当达到一定应力水平后，曲线会进入屈服阶段，环氧树脂基体开始发生塑性变形，部分应力逐渐由碳纤维承担。当应力达到复合材料的极限强度后，复合材料圆管发生断裂。由于碳纤维/环氧树脂复合材料具有脆性特征，断裂过程会比较突然，没有明显的塑性变形阶段，应力-应变曲线会迅速下降。但在高温度场下，随着温度的升高，环氧树脂基体的分子运动加剧，其刚度和强度都会下降。因此，在高温度场下的弹性阶段，应力-应变曲线的斜率会比室温时小，即弹性模量降低。这意味着在相同的应力作用下，材料在高温时会产生更大的变形。同时，高温会使环氧树脂基体的塑性变形能力增强，复合材料圆管会在较低的应力水平下就进入屈服阶段，并且屈服阶段的持续范围会更长^[35]。在高温环境下，复合材料圆管的断裂行为也会发生改变。一方面，高温可能导致材料内部产生更多的缺陷和微裂纹，降

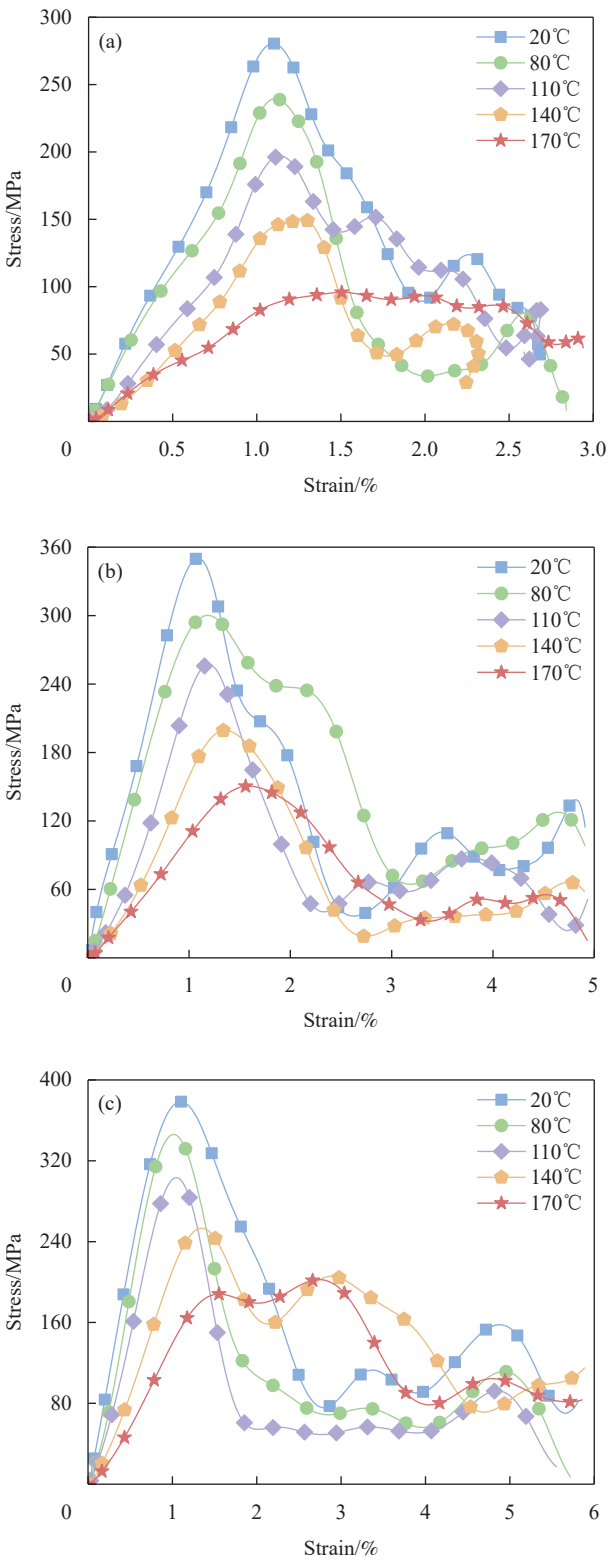


图6 三维五向编织复合材料圆管典型的应力-应变曲线:
(a) 300 s⁻¹; (b) 560 s⁻¹; (c) 740 s⁻¹

Fig.6 Typical stress-strain curves of 3D5D braided composite circular tubes: (a) 300 s⁻¹; (b) 560 s⁻¹; (c) 740 s⁻¹

低材料的强度和韧性; 另一方面, 由于环氧树脂基体的软化和黏性增加, 材料在断裂前可能会出

现更多的塑性变形, 断裂过程可能相对室温下更加缓慢, 应力-应变曲线的下降会比较平缓。

在应变率较低时, 应力-应变曲线的初始阶段呈现近似线性关系。这是由于在低应变率下, 复合材料中的碳纤维和环氧树脂基体有足够的时间相互作用和协调变形。环氧树脂基体能够将外部载荷有效地传递给碳纤维, 碳纤维起到增强作用, 使材料整体表现出较好的弹性性能。在这个阶段, 材料的变形主要是弹性变形。随着应变的增加, 曲线会进入屈服阶段。此时环氧树脂基体开始发生塑性变形, 部分应力逐渐从基体转移到碳纤维上。由于应变率较低, 基体的塑性变形相对较缓慢, 材料的应力增长速度逐渐减缓。在屈服阶段, 材料的刚度会有所下降, 变形程度逐渐增大。当应力达到材料的极限强度后, 复合材料圆管发生断裂。在低应变率下, 材料的断裂通常是由于基体的破坏和碳纤维的断裂共同导致的。由于环氧树脂基体的强度相对较低, 在承受较大应力时会首先发生破坏, 随后碳纤维也会由于过载而断裂。材料的断裂过程相对较缓慢, 应力-应变曲线的下降相对较平缓。与低应变率相比, 高应变率下应力-应变曲线的弹性阶段斜率会更大, 即弹性模量更高。这是由于在高应变率下, 材料的变形速度非常快, 碳纤维和环氧树脂基体之间的相互作用时间很短, 基体来不及发生明显的塑性变形, 因此材料整体的刚度增加。高应变率会使材料更快地进入屈服阶段, 并且屈服阶段的持续时间会缩短。由于变形速度快, 环氧树脂基体的塑性变形来不及充分发展, 材料在较短的时间内就会达到屈服点。在屈服阶段, 应力的增长速度可能会比低应变率下更快, 由于材料需要更快地适应高应变率的加载条件。在高应变率下, 材料的断裂过程非常迅速, 应力-应变曲线的下降段非常陡峭。高应变率会导致材料内部产生更多的微裂纹和缺陷, 这些缺陷的快速扩展会加速材料的破坏。

2.4 室温和高温场三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩性能

由三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩应力-应变曲线可以得到三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管在不同温度、不同应变率下的压缩强度和压缩模量, 分别如图7和图8所示。可以看出, 随着温度升高, 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩

强度通常会降低。在 300 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩强度较室温分别下降了 14.59%、29.77%、46.56%、65.85%；在 560 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩强度较室温分别下降了 14.29%、26.55%、43.07%、57.02%；在 740 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩强度较室温分别下降了 8.58%、19.88%、33.07%、46.54%。这是由于环氧树脂基体在高温下会软化，其对碳纤维的支撑和约束作用减弱。当受到冲击压缩载荷时，基体无法有效地传递应力，导致材料整体的承载能力下降。同时温度升高也会使压缩模量降低。在 300 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩模量较室温分别下降了 16.45%、40.30%、60.56%、70.62%；在 560 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩模量较室温分别下降了 11.75%、36.84%、59.89%、70.96%；在 740 s^{-1} 应变率下，复合材料圆管在 80°C 、 110°C 、 140°C 、 170°C 下的压缩模量较室温分别下降了 11.31%、28.79%、54.82%、71.08%。这是由于在高温环境下，材料内部的分子热运动加剧^[19]，环氧树脂基体的刚度下降，使材料在承受压缩载荷时更容易发生变形。而且，温度升高还可能导致碳纤维与环氧树脂之间的界面结合强度降低，进一步影响应力的传递，使材

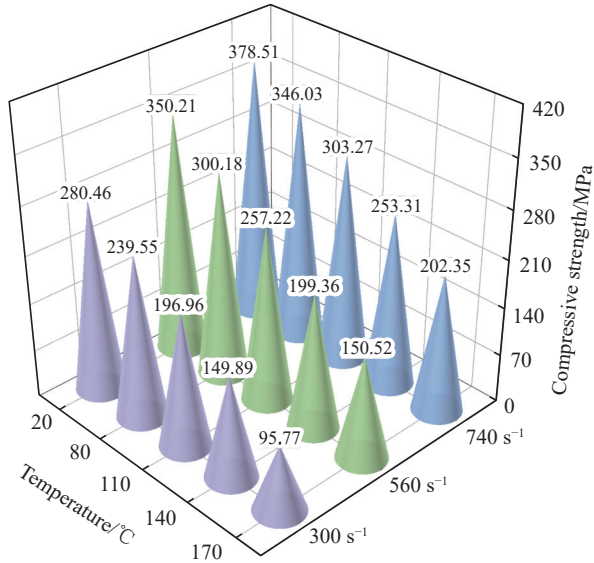


图7 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管压缩强度
Fig. 7 Compressive strength of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes

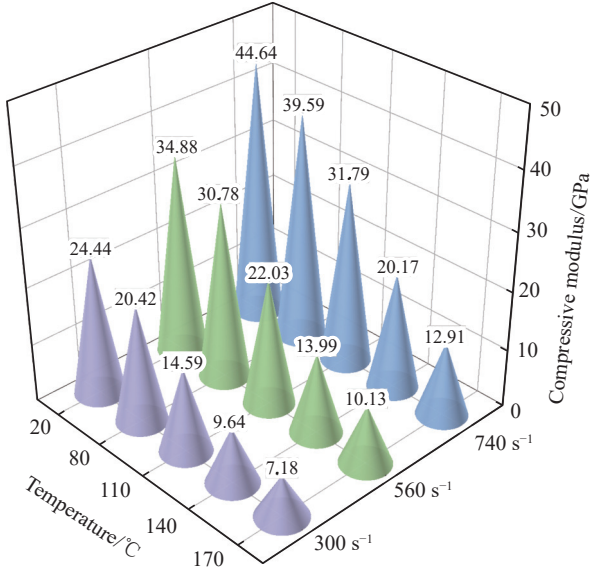


图8 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管压缩模量
Fig. 8 Compressive modulus of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes

料在较低的应力下就产生较大的应变，从而降低了压缩模量。

从图中还可以看出，应变率增加，三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的冲击压缩强度会提高。在 20°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩强度较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 24.87%、34.96%；在 80°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩强度较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 25.31%、44.45%；在 110°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩强度较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 30.60%、53.98%；在 140°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩强度较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 33.00%、69.00%；在 170°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩强度较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 57.17%、111.29%。这是由于在高应变率下，材料在极短时间内受到巨大的冲击载荷，由于环氧树脂基体和碳纤维的粘弹性特性，材料没有足够的时间产生塑性变形，碳纤维能够更有效地承担载荷，从而提高了材料的强度。同时，应变率增加也会使压缩模量增大。在 20°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩模量较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 42.72%、82.65%；在 80°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩模量较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 50.73%、93.88%；在 110°C 下， 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应

变率下的复合材料圆管的压缩模量较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 50.99%、117.89%; 在 140°C 下, 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩模量较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 45.12%、109.23%; 在 170°C 下, 560 s^{-1} 、 740 s^{-1} 应变率下的复合材料圆管的压缩模量较 300 s^{-1} 应变率分别提高了 41.09%、79.81%。这是由于高应变率下, 材料的变形来不及充分发展, 表现出更高的刚度。材料内部的微观结构在短时间内无法调整, 使材料在承受压缩载荷时更难发生变形, 相当于提高了材料的压缩模量。此外, 应变率的增加可能会使碳纤维与环氧树脂之间的界面结合在短时间内更加紧密, 有助于提高应力传递效率, 进而增加压缩模量。

图 9 和图 10 分别列出了三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管在不同温度 and 不同应变率下冲击压缩后的强度保持比和模量保持比。可以看出, 在高温环境下, 复合材料的强度保持比会明显下降。高温会使基体软化、降解, 纤维与基体之间的界面结合强度降低, 导致材料在冲击时更容易发生破坏。随着温度的升高, 这种破坏程度会加剧, 强度保持比也会进一步降低。对于不同的应变率, 在高温下的规律与室温时有所不同。在较低应变率下, 由于高温对材料性能的削弱作用更显著, 强度保持比下降得更快。而在较高应变率下, 虽然应变率的增加会在一定程度上提高材料的强度, 但高温的负面影响仍然占主导地位, 因此强度保持比仍然会降低。高温会使复合材料的模量降低, 因此模量保持比也会下降。基体的软化会导致材料的整体刚度下降, 纤维的增强作用受到抑制。但在较高温下, 即使应变率增加, 模量保持比的提升也非常有限, 甚至可能由于高温引起的材料内部结构变化, 导致模量保持比随着应变率的增加而下降。

2.5 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩宏观失效破坏形态

图 11 为 Leica 体式显微镜下不同温度不同应变率三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管压缩破坏后轴向受压面和外表面失效形态对比图。可以看出, 在室温和低应变率条件下, 材料的失效模式较单一, 主要表现为局部的纤维断裂或基体开裂等。但随着温度升高和应变率增加, 破坏会变得更加明显和复杂。在高温环境下, 基体的软化会导致纤维-基体界面的结合力下降, 更容易

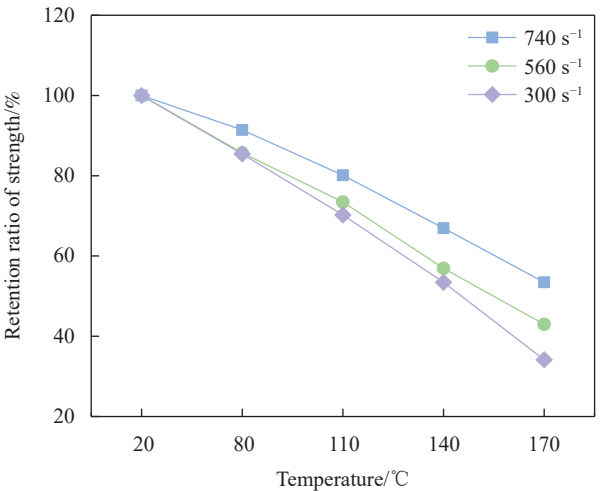


图 9 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管强度保持比
Fig. 9 Strength retention ratio of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes

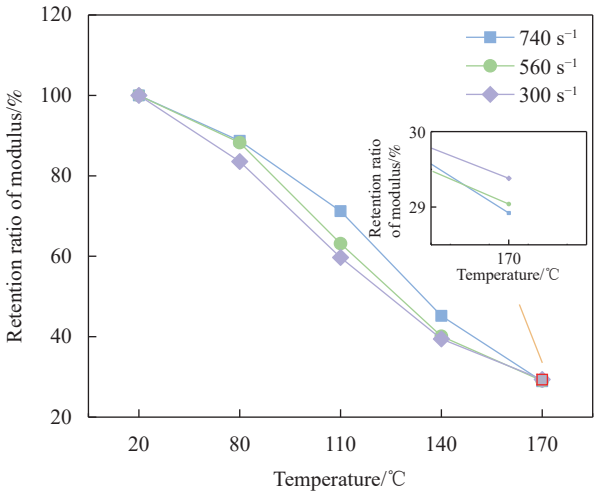


图 10 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管模量保持比
Fig. 10 Modulus retention ratio of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes

发生界面脱粘现象。同时, 高应变率的冲击会使材料内部的应力分布不均匀, 引发更多的剪切裂纹和分层现象。在高温高应变率耦合作用下, 三维五向碳纤维编织复合材料圆管可能会出现大面积的基体破裂、纤维束的断裂及纤维-基体界面的大面积脱粘等多种破坏形式同时存在的情况。

2.6 三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩微观形貌

图 12 为 740 s^{-1} 应变率下室温和高温下三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩典型损伤形态的 SEM 图像。可以看出, 复合材料圆管的失效形态主要有基体开裂、纤维/基体界面

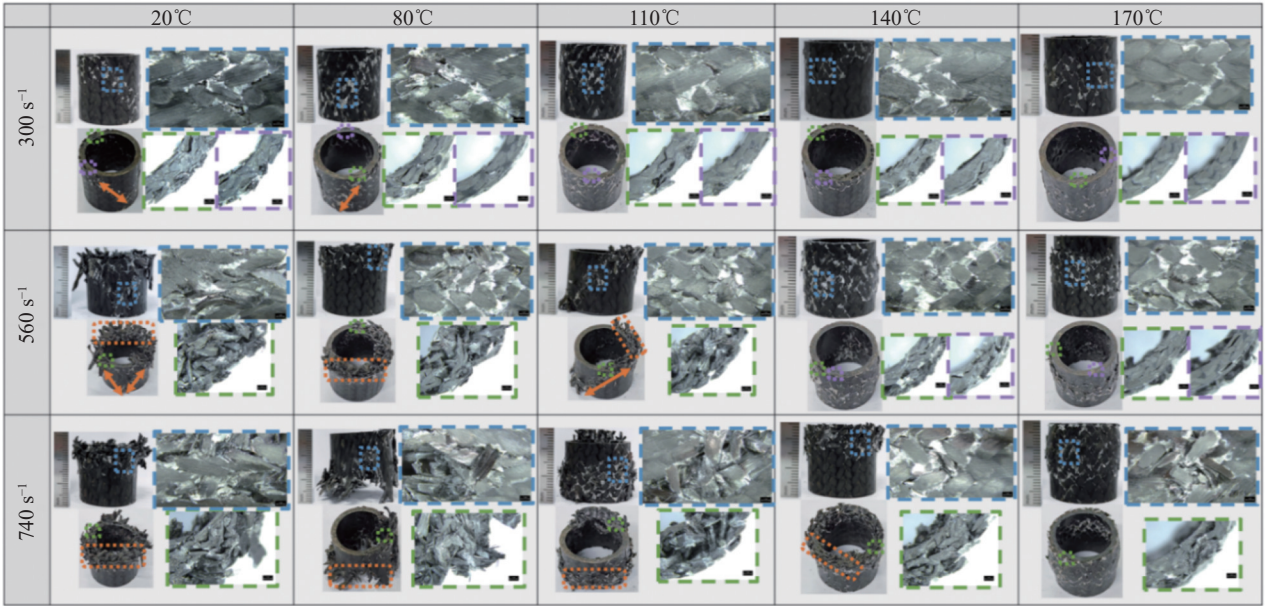


图 11 不同温度下不同应变率三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩破坏后失效形态对比

Fig. 11 Comparison of failure patterns of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes after impact compressive failure at different temperatures and different strain rates

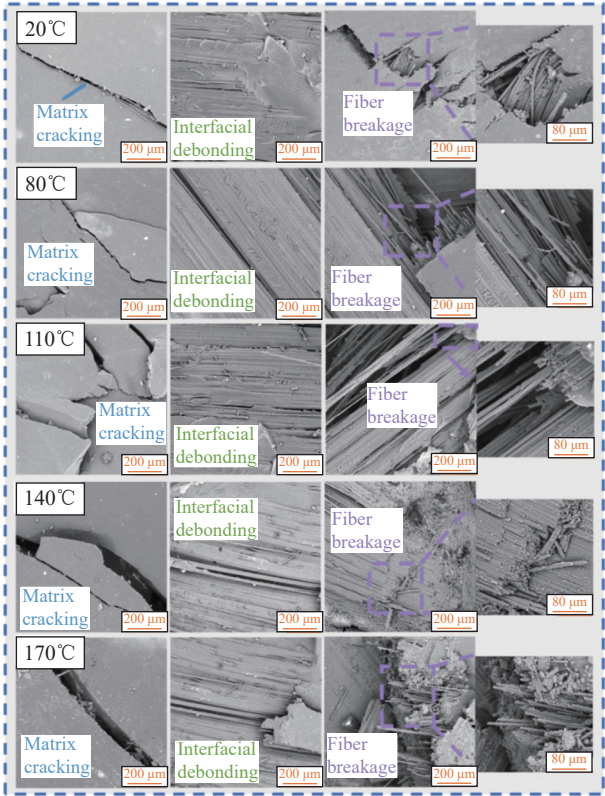


图 12 740 s⁻¹ 应变率下室温和高温度场三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩典型损伤形态的 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of typical damage morphology of 3D5D carbon fiber/epoxy resin braided composite circular tubes after impact compression at ambient temperature and elevated temperatures field at 740 s⁻¹ strain rate

脱粘和纤维断裂。20℃ 时，可以观察到纤维表面有少量树脂剥落，界面处有微小缝隙。纤维-基体界面存在一定程度的脱粘现象。这是由于在冲击压缩过程中，由于纤维和基体的模量不同，二者变形不协调，在界面处产生应力集中，使部分纤维与基体间的结合被破坏。有部分纤维断裂，但整体没有大面积的破碎。这是由于在室温下，材料的性能相对稳定，但在冲击压缩这种动态载荷作用下，应力波在材料内部传播，纤维和基体因力学性能差异而产生应变不协调，从而导致界面脱粘、纤维断裂和基体开裂等损伤。80℃ 时，基体裂纹数量增加，宽度变大，裂纹扩展更加复杂，出现更多分支裂纹。这是由于温度升高到 80℃，基体材料的韧性进一步降低，抵抗裂纹扩展的能力减弱。纤维-基体界面的脱粘现象比室温下更明显。这是由于随着温度升高，基体材料的模量有所降低，与纤维变形的差异进一步增大，导致界面处应力集中加剧。纤维断裂数量增多，且纤维拔出长度增加。这是由于高温使纤维与基体间的摩擦力减小，同时纤维自身强度也有一定程度降低，更容易在冲击下被拔出和断裂，断口的不规则程度增加。110℃ 时，基体中裂纹进一步扩展，形成较大面积的裂纹网络，部分裂纹区域有基体材料局部破碎的迹象，表明基体的完整性受到严重破坏。这是由于在 110℃ 时，基体材料的软化

更显著,对纤维的支撑和约束作用进一步减弱,使材料在冲击压缩时,纤维与基体间的协同承载能力降低,导致损伤加剧。纤维-基体界面脱粘严重,部分区域纤维几乎完全与基体分离。基体的软化程度进一步增加,无法有效约束纤维,导致界面结合强度大幅下降。纤维断裂情况更加严重,出现大量纤维拔出,纤维断口更加粗糙,且有较多纤维呈现出弯曲和扭曲的变形形态^[36]。140℃时,基体呈现出严重的破碎和熔融迹象,裂纹相互交织且宽度很大,整个基体结构变得非常脆弱,几乎失去了承载能力。这是由于140℃的高温使基体材料接近其软化或分解温度,其力学性能严重劣化,无法与纤维共同承受冲击压缩载荷,导致材料的整体结构遭到严重破坏。纤维-基体界面严重破坏,纤维在基体中呈现松散状态。纤维大量断裂且分布无序,纤维拔出现象普遍,纤维表面损伤严重。170℃时,纤维-基体界面完全失去了有效的界面结合,纤维在基体中自由分布,基体与纤维之间形成了大量的空隙和缝隙。这是由于170℃远远超出了基体材料正常的使用温度范围,基体材料发生了严重的热降解、熔融等现象,纤维也受到高温的严重影响,导致材料在冲击压缩时出现极度严重的损伤形态。纤维断裂严重且长度不一,由于高温长时间作用和冲击的叠加,纤维可能出现了一定程度的热损伤和化学变化,导致其强度大幅降低,在冲击下极易断裂。

3 结论

(1) 在室温(20℃)条件下,随着应变率的提高,三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的压缩强度和压缩模量等力学性能呈现出明显的上升趋势。这是由于较高的应变率使碳纤维能够更有效地承担载荷,材料内部的应力传递更加高效。此时材料的破坏模式主要表现为纤维断裂,纤维在承受较大应力时达到其极限强度而断裂。这种破坏模式相对较单一和直接,并且在整个冲击压缩过程中,材料的结构完整性在一定程度上能够保持。

(2) 当处于高温场时,随着温度的升高,三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的力学性能出现明显下降。在80℃、110℃、140℃和170℃不同高温条件下,材料的抗冲击压缩能力逐渐减弱。高温使环氧树脂基体软化,其对碳纤维的粘结和支撑作用降低。同时,高温会导致碳纤维与

环氧树脂之间的界面结合强度下降,使在冲击压缩过程中应力无法有效地在纤维和基体之间传递。这种力学性能的下降表现为压缩强度、压缩模量随着温度升高而降低,材料整体的承载能力和抵抗变形的能力都受到了严重影响。在高温场下,三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管的破坏模式与室温情况不同,宏观上圆管冲击后有大面积变形,微观上纤维与树脂界面脱粘严重,纤维拔出痕迹多,基体大范围开裂,材料结构完整性严重受损。

(3) 在高温场中,应变率对三维五向碳纤维/环氧树脂编织复合材料圆管力学性能的影响因高温干扰而发生变化。在较高温度下,即使应变率增加,材料力学性能的提升幅度也不如室温下明显。这是由于高温已经对材料的基体和界面性能造成了损害,限制了应变率对材料性能提升的作用。在较高温度下,即使应变率增加,模量保持比的提升也非常有限,甚至可能由于高温引起的材料内部结构变化,导致模量保持比随着应变率的增加而下降。并且温度升高使不同应变率下材料的破坏模式差异减小,在高温高应变率时,材料同时出现纤维断裂、基体软化和界面脱粘等多种破坏形式,使材料的力学性能和破坏行为变得复杂。

参考文献:

[1] ZHANG Y, WANG P, GUO C B. Energy absorption behaviors of 3D braided composites under impact loadings with frequency domain analysis[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37(5): 1620-1627.

[2] GUO F L, YAN Y, HONG Y, et al. Prediction and optimization design for thermal expansion coefficients of three-dimensional n-directional-braided composites[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(6): 2495-2509.

[3] LUO H B, WANG Q, YANG Y C, et al. Experimental study on the mechanical properties of three-dimensional braided composite circular tubes with preembedded licker-in[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(9): 5433-5449.

[4] WANG H L, SUN B Z, GU B H. Finite element analyses on longitudinal compressive behaviors of 3D braided carbon/epoxy composite with different braided angles at low temperatures[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2019, 110(1): 37-49.

[5] 谷元慧, 刘晓东, 钱坤, 等. 三维编织复合材料圆管力学性能研究进展[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(2): 258-262.

GU Yuanhui, LIU Xiaodong, QIAN Kun, et al. Research pro-

- gress on mechanical properties of three-dimensional braided composite circular tubes[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(2): 258-262(in Chinese).
- [6] SHI B H, MAN Z, KAI L S, et al. Multi-scale ageing mechanisms of 3D four directional and five directional braided composites' impact fracture behaviors under thermo-oxidative environment[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 50-65.
- [7] VU D Q, GIGLIOTTI M, LAFARIE-FRENOT M C. The effect of thermo-oxidation on matrix cracking of cross-ply [0/90]_s composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 44(1): 114-121.
- [8] BULLIONS T A, MCGRATH J E, LOOS A C. Thermal-oxidative aging effects on the properties of a carbon fiber-reinforced phenylethynyl-terminated poly(etherimide)[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(12): 1737-1748.
- [9] LAFARIE-FRENOT M C, GRANDIDIER J C, GIGLIOTTI M, et al. Thermo-oxidation behaviour of composite materials at high temperatures: A review of research activities carried out within the COMEDI program[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(6): 965-974.
- [10] ZHOU H L, ZHANG W, LIU T, et al. Finite element analyses on transverse impact behaviors of 3D circular braided composite tubes with different braiding angles[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 79: 52-62.
- [11] WANG X X, WANG Z Q, ZHANG D T, et al. Damage evolution and failure mechanism of 3D6D braided composite tubes under quasi-static lateral compression[J]. *Composites Communications*, 2024, 46: 101825.
- [12] 何红梅, 高兴忠, 项赫, 等. 三维编织管件复合材料压缩与弯曲性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(8): 4419-4427.
HE Hongmei, GAO Xingzhong, XIANG He, et al. Compression and bending properties of 3D braided tubular composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(8): 4419-4427(in Chinese).
- [13] GIDEON R K, ZHOU H L, LI Y Y, et al. Quasi-static compression and compression-compression fatigue characteristics of 3D braided carbon/epoxy tube[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2016, 107(7): 938-948.
- [14] XUN L M, WU Y Y, HUANG S W, et al. Degradation of torsional behaviors of 3D braided thin-walled tubes after atmospheric thermal ageing[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108555.
- [15] XUN L M, HUANG S W, SUN B Z, et al. Torsional cracks development in carbon-fiber 3D braided composite tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184: 110477.
- [16] ZHOU H L, HU D M, GU B H, et al. Transverse impact performance and finite element analysis of three dimensional braided composite tubes with different braiding layers[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 345-359.
- [17] WU X Y, ZHANG Q, ZHANG W, et al. Axial compressive deformation and damage of four-step 3D circular braided composite tubes under various strain rates[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2016, 107(12): 1584-1600.
- [18] WU X Y, SUN B Z, WANG B C, et al. X-ray microtomography analysis of the damage mechanisms in 3D circular braided carbon fiber/epoxy resin composite tubes under axial impact compression[J]. *Composites Communications*, 2023, 41: 101650.
- [19] HAN W F, LI D S, JIANG L. High-temperature properties and failure mechanism of 3D six-directional braided composites under out-of-plane compression[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(6): 2233-2244.
- [20] 王海楼, 曹森, 孙宝忠, 等. 三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料横向压缩性质的温度效应 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(3): 607-615.
WANG Hailou, CAO Miao, SUN Baozhong, et al. Temperature effect of transverse compression properties of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(3): 607-615(in Chinese).
- [21] LI P, JIA N, PEI X Y, et al. Effects of temperature on bending properties of three-dimensional and five-directional braided composite[J]. *Molecules*, 2019, 24(21): 3977.
- [22] HAN W F, LI D S, JIANG L. Mechanical properties and failure mechanisms of 3D six-directional braided composites at elevated and liquid nitrogen temperatures[J]. *Materials Letters-X*, 2020, 6: 100035.
- [23] HE C W, GE J R, ZHANG B B, et al. A hierarchical multiscale model for the elastic-plastic damage behavior of 3D braided composites at high temperature[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 196: 108230.
- [24] HU M Q, LIU S K, ZHANG J J, et al. Multiple transverse impact damage behaviors of 3D-braided composite beams under room and high temperatures[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, 29(5): 715-747.
- [25] 胡美琪, 孙宝忠, 顾伯洪. 三维编织复合材料冲击损伤分布的温度和结构效应 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(1): 108-118.
HU Meiqi, SUN Baozhong, GU Bohong. Temperature and structural effects on impact damage distribution of three-dimensional braided composites[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2019, 51(1): 108-118(in Chinese).
- [26] XU K L, CHEN W, LIU L L, et al. Longitudinal compressive property of three-dimensional four-step braided composites after cyclic hygrothermal aging under high strain rates[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2061.

[27] LI D S, HAN W F, JIANG L. High strain rate impact effect and failure behavior of 3D six-directional braided composites[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 45: 101291.

[28] XU F, LONG J, SUN B Z, et al. Compressive behaviors of thermo-oxidative aged three-dimensional angle-interlock woven composites under different strain rates[J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(9-10): 2158-2174.

[29] WU X Y, ZHANG Q, GU B H, et al. Influence of temperature and strain rate on the longitudinal compressive crashworthiness of 3D braided composite tubes and finite element analysis[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2017, 26(7): 1003-1027.

[30] 李紫伦, 杨安坤, 覃小红, 等. 三维编织玻璃纤维/环氧树脂复合材料薄壁管轴向压缩性能的温度效应 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10): 5588-5600.

LI Zilun, YANG Ankun, QIN Xiaohong, et al. Temperature effect on axial compressive properties of three-dimensional glass fiber/epoxy resin braided composite thin-walled tubes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10): 5588-5600(in Chinese).

[31] 徐玥, 武鲜艳, 洪兴华. 低温环境下三维五向玻璃纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(7): 3722-3732.

XU Yue, WU Xianyan, HONG Xinghua. Impact compression performance of three-dimensional five directional glass fiber/epoxy resin braided composite circular tubes in low-temperature environment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(7): 3722-3732(in Chinese).

[32] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料压缩性能试验方法: GB/T 1448—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—Determination of compressive properties: GB/T 1448—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005(in Chinese).

[33] HOSUR M V, ALEXANDER J, VAIDYA U K, et al. High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites[J]. *Composite Structures*, 2001, 52(3/4): 405-417.

[34] SUN B Z, FANG L, GU B H. Influence of the strain rate on the uniaxial tensile behavior of 4-step 3D braided composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(11): 1477-1485.

[35] ZUO H M, LI D S, JIANG L. High temperature mechanical response and failure analysis of 3D five-directional braided composites with different braiding angles[J]. *Materials*, 2019, 12(21): 3506.

[36] LI D S, JIANG N, JIANG L, et al. Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D MWK composites at elevated temperatures[J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(9): 2034-2045.