

压缩载荷作用下碳纤维增强环氧复合材料管 高低温力学性能的试验研究

李奇畅, 杜冰*, 任宇航

重庆科技大学材料与新能源学院, 重庆

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年2月25日; 发布日期: 2025年3月14日

摘 要

本研究探讨了温度对碳纤维增强环氧复合材料(CFRP)管吸能结构耐撞性能的影响, 通过准静态轴向压缩和侧向压缩试验, 分析了CFRP管在不同温度条件下(-30°C, 20°C, 70°C, 140°C, 180°C)的力学性能与失效模式, 揭示了其耐撞性随温度变化的规律。研究结果表明, 在轴向压缩载荷作用下, 当温度低于玻璃转变温度(T_g)时, CFRP管以纤维断裂为主要能量吸收机制, 表现出较高的比吸能(SEA); 而当温度高于T_g时, 破坏模式由花瓣状破坏转变为渐进折叠, SEA显著下降, 表明材料在高温环境下的吸能性能减弱。在侧向压缩载荷下, CFRP管的能量吸收特性表现出不稳定性, 但在接近T_g的温度范围内试样具有较优的承载能力。随着温度进一步升高, SEA呈现大幅下降的趋势。本研究探讨了温度对CFRP管力学性能和失效机制的影响, 为CFRP管的耐撞性设计与高低温环境中的应用提供了实验依据。

关键词

CFRP管, 轴向压缩, 侧向压缩, 耐撞性

Experimental Study on High and Low Temperature Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite Tubes under Compression Loading

Qichang Li, Bing Du*, Yuhang Ren

College of Materials and New Energy, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Mar. 14th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 李奇畅, 杜冰, 任宇航. 压缩载荷作用下碳纤维增强环氧复合材料管高低温力学性能的试验研究[J]. 力学研究, 2025, 14(1): 11-20. DOI: 10.12677/ijm.2025.141002

Abstract

This study investigates the effect of temperature on the crashworthiness of carbon fiber reinforced epoxy composite (CFRP) tube energy-absorbing structures. Using quasi-static axial compression and lateral compression tests, the mechanical properties and failure modes of CFRP tubes were systematically examined at various temperatures (-30°C , 20°C , 70°C , 140°C , 180°C), providing a comprehensive analysis of their crashworthiness. The results indicate that when the temperature is below the glass transition temperature (T_g), CFRP tubes primarily absorb energy through fiber breakage under axial compression. Conversely, when the temperature exceeds T_g , the predominant deformation mode transitions from petal-shaped failure to progressive folding, accompanied by a significant reduction in specific energy absorption (SEA). Under lateral compression, the energy absorption behavior is unstable; however, specimens exhibit enhanced load-bearing capacity near T_g . With increasing temperature, the SEA declines sharply, reflecting diminished energy absorption capability. This study highlights the critical influence of temperature on the mechanical performance and failure mechanisms of CFRP tubes.

Keywords

CFRP Tube, Axial Compression, Lateral Compression, Crashworthiness

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

复合材料具有优异的比强度、比刚度[1]和能量吸收能力[2],在交通运输和航空航天工业中应用广泛。管柱结构能够有效吸收碰撞产生的能量,具有变形方式稳定等优势,常用作汽车防撞盒[3]、轨道车辆吸能装置[4]等。采用复合材料结构作为吸能部件,相比于部分常用的金属材料结构具有更高的能量吸收能力和更均匀的压溃载荷[5][6]。然而,随着极端服役环境对结构与材料性能要求不断提高,复合材料及其管结构在高低温环境下的力学性能成为研究热点。

在薄壁结构轴向压缩行为研究方面,Alexander [7]通过理论计算研究了轴向压缩条件下薄壁管的压溃行为,结果表明薄壁圆柱壳具有相对稳定的吸能能力,其理论方法与试验结果具有较高匹配度。Wlodzimierz [8]采用钢制圆柱壳进行轴向压缩试验,通过预测平均压溃力来评价钢管的能量吸收性能,预测结果与试验结果吻合较好。Gupta [9]系统研究了不同 D/t 和 H/t 参数对复合材料管压溃方式和吸能能力的影响,并通过轴向压缩试验验证了理论预测的每一循环平均压溃应力和压溃长度。Gui 等人[10]根据试验结果,将轴向压缩下编织复合材料管的失效分为拉伸、碎裂、渐进折叠和完全压溃失效,发现拉伸失效时比能量吸收最高。Kim 等人[11]对复合材料管进行轴向压缩试验,发现当复合材料管拉伸失效时比能量吸收最高。Hussein [12]等人进一步建立了理论分析模型来预测轴向压缩条件下 CFRP 方管的平均压溃力。在数值模拟方面,Siromani 等人[13]采用有限元法研究了 CFRP 管的压溃行为和能量吸收特性。Zuo 等人[14]通过设计不同温度条件模拟了 CFRP 管在极端环境下的力学性能,发现其耐撞特性随温度和吸湿率的升高呈非线性下降趋势,且 CFRP 的耐撞性与基体的玻璃转变温度密切相关。

纤维增强复合材料的力学性能具有显著的温度依赖性,这主要源于基体材料性能随温度变化而产生的非线性响应。因此,深入研究温度对 CFRP 管力学性能的影响机制,不仅能够为极端环境下的结构安

全性评估提供理论依据，还可为 CFRP 管的结构优化设计提供重要指导。基于此，本文通过开展不同温度环境下的轴向压缩和侧向压缩准静态试验，研究温度对 CFRP 管力学性能的影响规律，重点关注其失效模式、能量吸收特性及载荷-位移响应的温度依赖性。

2. 材料及方法

2.1. 圆管试样参数信息

试验所用 CFRP 管购自德州卡本梵博有限公司，经切割加工为长度 120 mm 试样，未进行其他处理。用于本研究的 CFRP 管试样参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of CFRP tube specimen
表 1. CFRP 管的试样参数

厚度(mm)	长度(mm)	重量(g)	直径(mm)	密度(kg·m ⁻³)
2.0	120.0	56.0	59.8	1.8 × 10 ³

2.2. 实验测试方法

为了研究温度对 CFRP 管耐撞性的影响，基于材料的热力学特性并参考了李等人[15]的研究，选取了 5 个特征温度条件：-30℃(低温)、20℃(室温)、70℃(接近 T_g)、140℃(明显高于 T_g)和 180℃(超高温)，最终确定 5 个温度条件为-30℃、20℃、70℃、140℃、180℃。如图 1 所示，实验使用深圳三思纵横 WGDY-4350L 环境温度箱进行温度控制，温度均匀性为±1.5℃，控制精度为±0.5℃。试样在各测试温度下保温 30 分钟以确保温度均匀。准静态压缩试验在深圳三思纵横 UTM5305STXL 万能试验机上进行，采用位移控制模式，加载速率为 4 mm/min，见图 1。

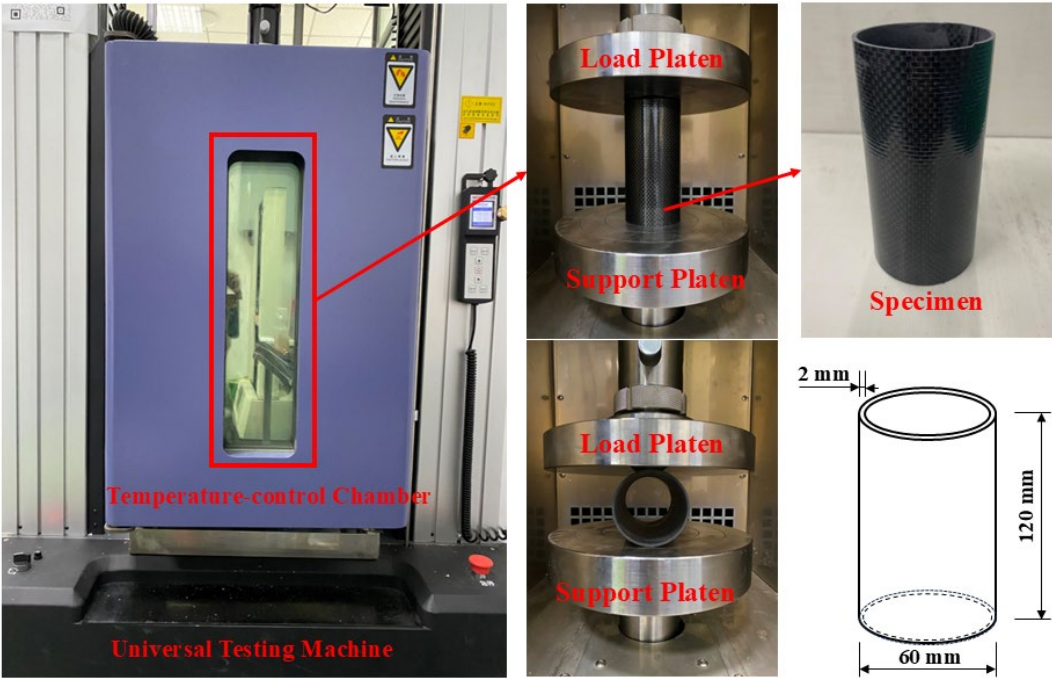


Figure 1. Ambient temperature chamber and quasi-static compression test method
图 1. 环境温度箱及准静态压缩试验方法

2.3. 耐撞性参数计算方法

本研究采用耐撞性评价指标对 CFRP 管的耐撞性能进行评估。主要评价指标包括能量吸收率(Energy Absorption, EA)、平均压溃力(Mean Crushing Force, F_m)、峰值压溃力(PCF)、压溃力效率(Crushing Force Efficiency, CFE)、比吸能(Specific Energy Absorption, SEA)。

各评价指标的定义和计算方法如下：

峰值压溃力(PCF)是试样在准静态压缩过程中承受的最大载荷：

$$PCF = \max(F(x)) \quad (1)$$

其中, $F(x)$ 为瞬时压缩力(kN), x 为压缩位移。

平均压溃力(MCF)反映吸能部件在压溃过程中吸收的平均载荷：

$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (2)$$

其中, d 为总压缩位移, $F(x)$ 为瞬时压缩力。

压溃力效率(CFE)是平均压溃力与峰值压溃力的比值：

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (3)$$

能量吸收(EA)是试样在准静态压缩过程中吸收的总能量：

$$EA = \int_0^d F(x) dx \quad (4)$$

比吸能(SEA)是单位质量材料吸收的能量, 反映材料的能量吸收效率：

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (5)$$

其中, m 为试样质量。

3. 实验结果分析

3.1. 轴向压缩实验

图 2 展示了 CFRP 管在不同温度下轴向压缩实验的典型载荷-位移曲线。实验结果表明, 温度对 CFRP 管的压缩行为具有显著影响, 主要体现在峰值载荷、能量吸收特性和失效模式三个方面。在 -30°C 、 20°C 和 70°C 条件下, 树脂基体保持刚性状态, 表现出典型的脆性断裂特征。在弹性阶段出现较高的峰值载荷, 其中, -30°C 时的峰值载荷达到最高值 72.91 kN, 比室温条件(20°C)提高了约 9.7%。这是由于低温环境下树脂基体的分子链段运动受限, 材料脆性增强所致。在 140°C 和 180°C 条件下, 树脂基体发生显著软化, 导致峰值载荷相比室温条件(20°C)分别下降了 79.1%和 89.0%。这种软化现象源于树脂分子链段运动能力的增强, 使得材料表现出明显的塑性变形特征。不同温度下试样的典型失效形貌以及与温度的对应关系分别如图 3 和图 4 所示。在低于 T_g 的温度条件下, 试样呈现出典型的花瓣形卷曲失效模式。而在高于 T_g 的温度条件下, 试样未能形成完整的花瓣形结构, 主要表现为整体屈曲和基体的塑性流动。失效模式的转变与树脂基体的力学性能随温度的变化密切相关。

3.2. 侧向压缩实验

图 5 展示了不同温度下 CFRP 管侧向压缩实验的典型载荷 - 位移曲线。实验结果表明, 试样在 -30°C 、

20℃、70℃环境下，侧向压缩过程可分为三个特征阶段：弹性阶段、渐进压溃阶段和致密化阶段。在弹性阶段，试样刚度基本保持一致。进入压溃阶段后，载荷出现周期性波动，波动幅度随温度升高而减小。进入密实阶段后，试件内表面的挤压堆积，载荷急剧增加。

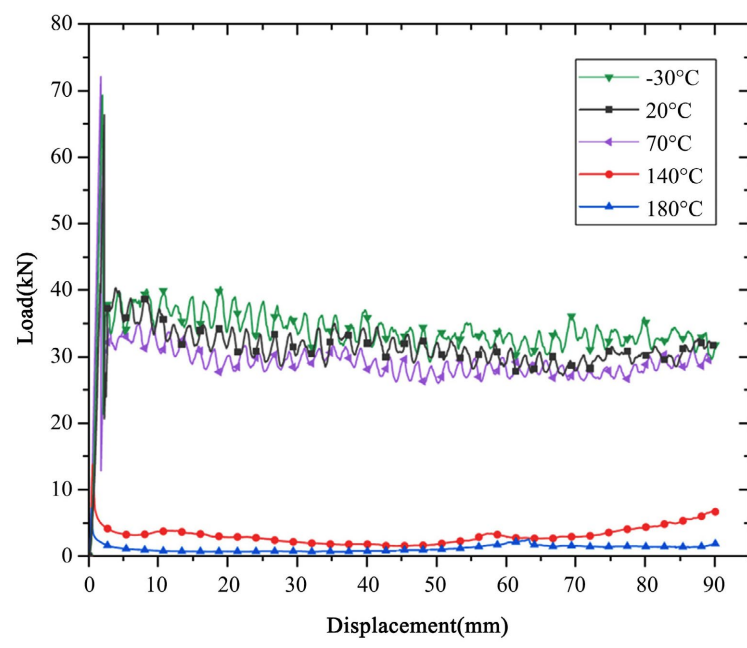


Figure 2. Load-displacement curves of CFRP tube axial compression test at different temperatures
图 2. 不同温度下 CFRP 管轴向压缩实验载荷 - 位移曲线

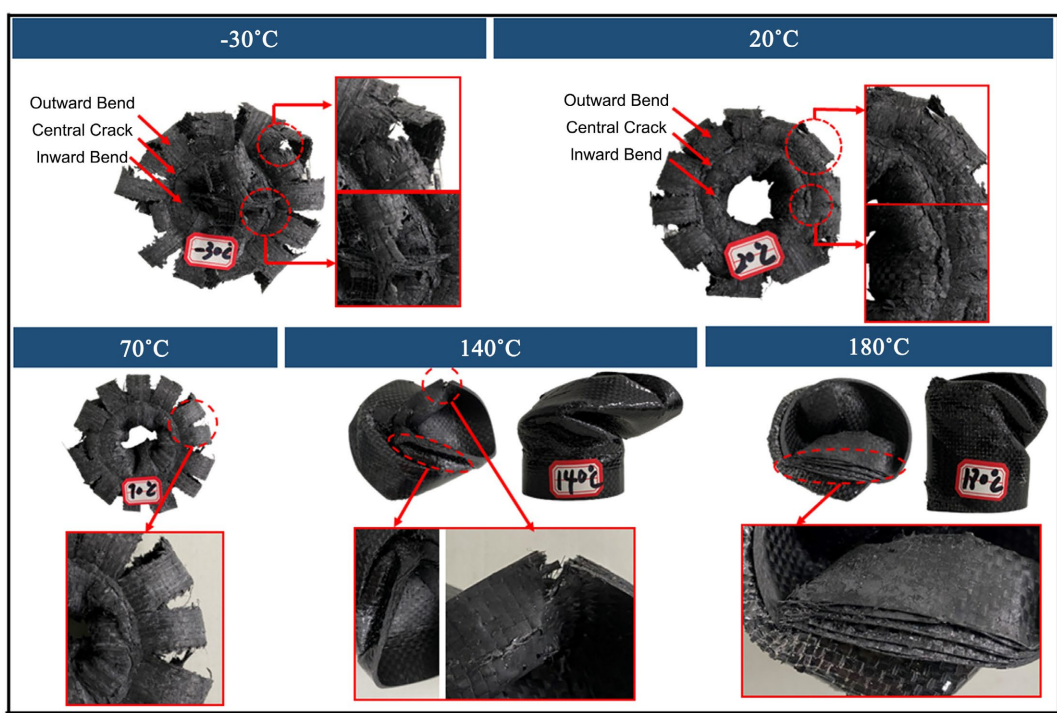


Figure 3. Failure of the specimen under axial compression
图 3. 试样轴向压缩条件下的失效

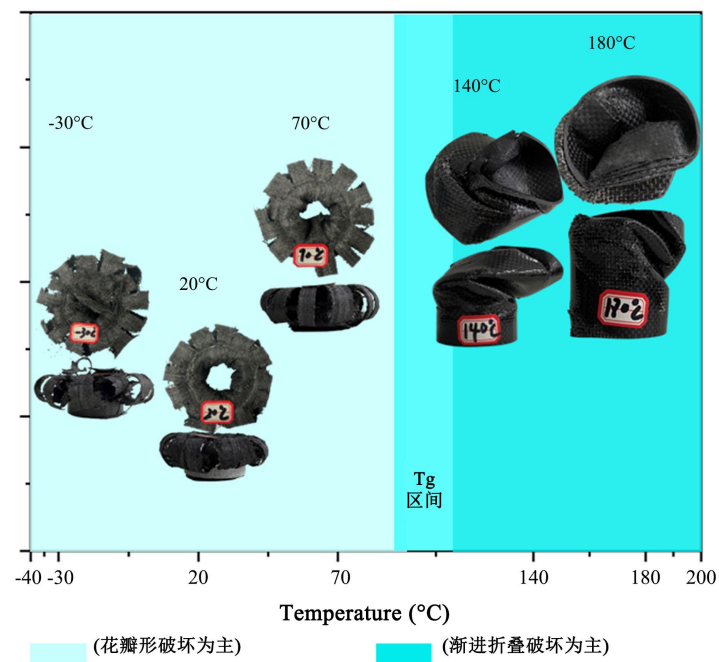


Figure 4. Relationship between failure mode and temperature in axial compression test of CFRP tubes at different temperatures
图 4. 不同温度下 CFRP 管轴向压缩实验破坏模式与温度的关系

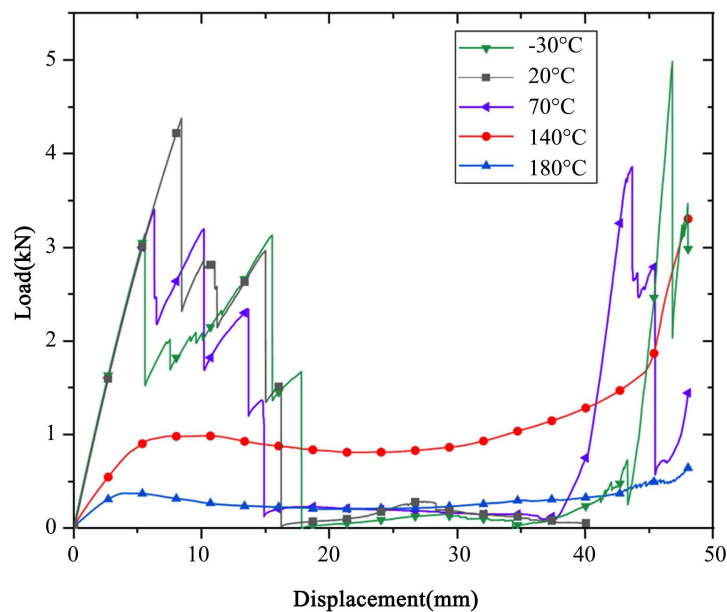


Figure 5. Load-displacement curves of CFRP tube flatwise compression test at different temperatures
图 5. 不同温度下 CFRP 管侧向压缩实验载荷 - 位移曲线

图 6 和图 7 展示了不同温度条件下 CFRP 管的失效特征。在 20°C 和 70°C 条件下, CFRP 管的主要损伤形式表现为纤维断裂和基体脆性开裂的混合失效模式。当试样处于 -30°C 低温环境下, 材料脆性明显增加, 纤维增强体断裂和树脂基体脆性断裂, 是吸收能量的主要方式。在 140°C 和 180°C 条件下, 温度高于 T_g , 树脂基体发生软化, 纤维与基体界面粘结强度显著下降, 导致分层现象加剧, CFRP 管的力学性能显著下降。

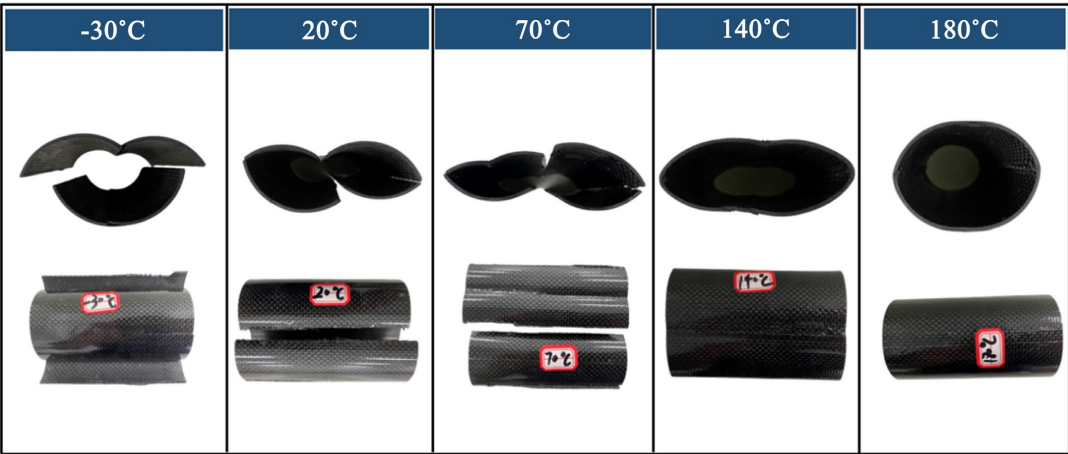


Figure 6. Morphology of the specimen after flatwise compression test
图 6. 试样在侧向压缩实验后形貌

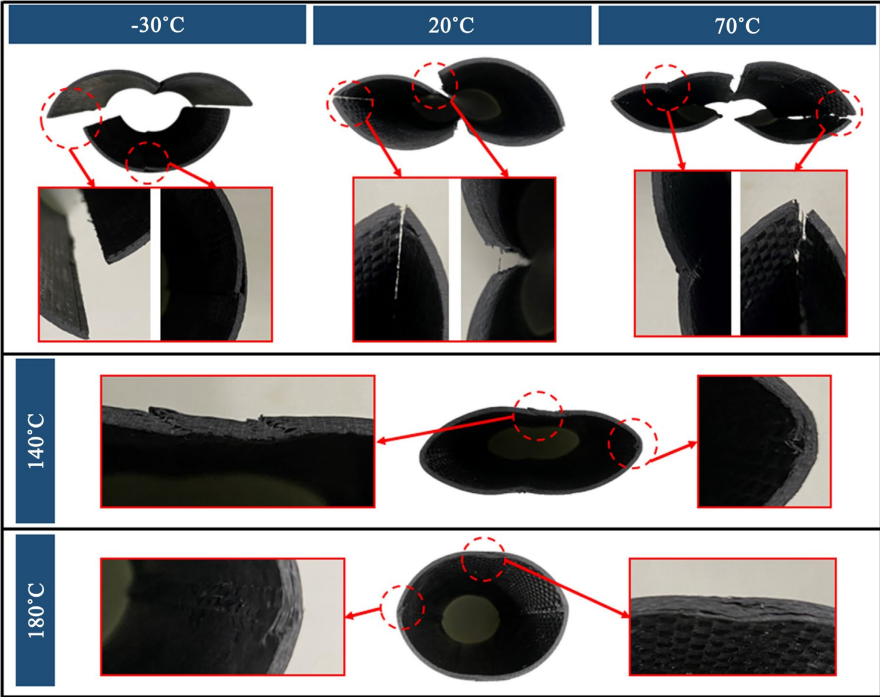


Figure 7. Failure of specimen under lateral compression
图 7. 试样在侧向压缩条件下的失效

4. CFRP 管的耐撞性评估

图 8 展示了不同温度下 CFRP 管的能量-位移曲线，揭示了温度对材料能量吸收特性的显著影响。在低于 T_g 的温度条件下，纤维在树脂保护下作为主要承重结构，结构表现出优异的能量吸收能力。然而，当温度超过 T_g ，树脂基体软化导致能量吸收能力急剧下降。表 2 总结了 CFRP 管轴向压缩的耐撞性能指标。值得注意的是，在 -30°C 时，比能量吸收(SEA)达到最大值 54.64 kJ/kg ，比室温条件提高了约 8.9% 。然而，当温度升高至 180°C 时，SEA 急剧下降至 1.96 kJ/kg ，降幅达到 96.1% ，主要归因于高温下基体刚度、强度和界面粘结性能急剧下降，压缩载荷下纤维和基体无法有效协同承载[16]。

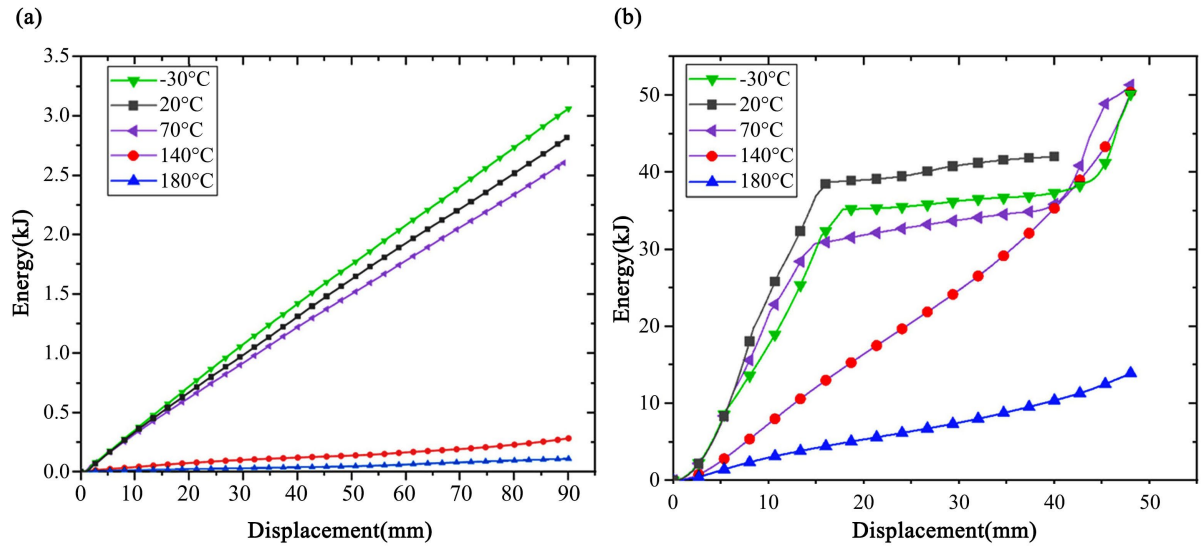


Figure 8. Energy-displacement curves (a) axial compression, (b) flatwise compression

图 8. 能量 - 位移曲线 (a) 轴向压缩, (b) 侧向压缩

Table 2. CFRP tube axial compression crash resistance index

表 2. CFRP 管轴向压缩耐撞性能指标

温度	EA (kJ)	PCF (kN)	F_m (kN)	CFE	SEA (kJ/kg)
-30°C	3.06	72.91	34.03	0.46	54.64
20°C	2.81	66.44	31.31	0.47	50.17
70°C	2.60	69.14	28.91	0.41	46.42
140°C	0.28	13.88	3.16	0.22	5.00
180°C	0.11	7.29	1.23	0.16	1.96

表 3 和图 9 展示了 CFRP 管侧向压缩的耐撞性能指标。与轴向压缩相比,侧向压缩的 SEA 值显著降低,差异主要源于加载方式的不同:轴向压缩主要依靠纤维的断裂吸收能量,而侧向压缩则受限于界面强度和基体性能。在-30°C环境下,SEA 较 20°C 时下降约 0.2%;180°C 环境下,SEA 下降约 73.2%。为 CFRP 管准静态扁平压缩耐撞性能指标雷达图。当温度低于或接近 T_g 时,CFRP 管不会软化,或软化程度较低,其耐撞性能指标相对较好。但当温度远高于 T_g 时,CFRP 管完全软化,其耐撞性能指标除 CFE 外均远低于 20°C 时的数据。

Table 3. CFRP tube flatwise compression crash resistance index

表 3. CFRP 管侧向压缩耐撞性能指标

温度	EA (J)	PCF (kN)	F_m (kN)	CFE	SEA (kJ/kg)
-30°C	51.72	4.99	1.07	0.21	0.923
20°C	51.83	4.38	1.07	0.24	0.925
70°C	51.34	4.00	1.07	0.26	0.916
140°C	50.38	3.08	1.04	0.33	0.899
180°C	13.94	0.64	0.29	0.45	0.248

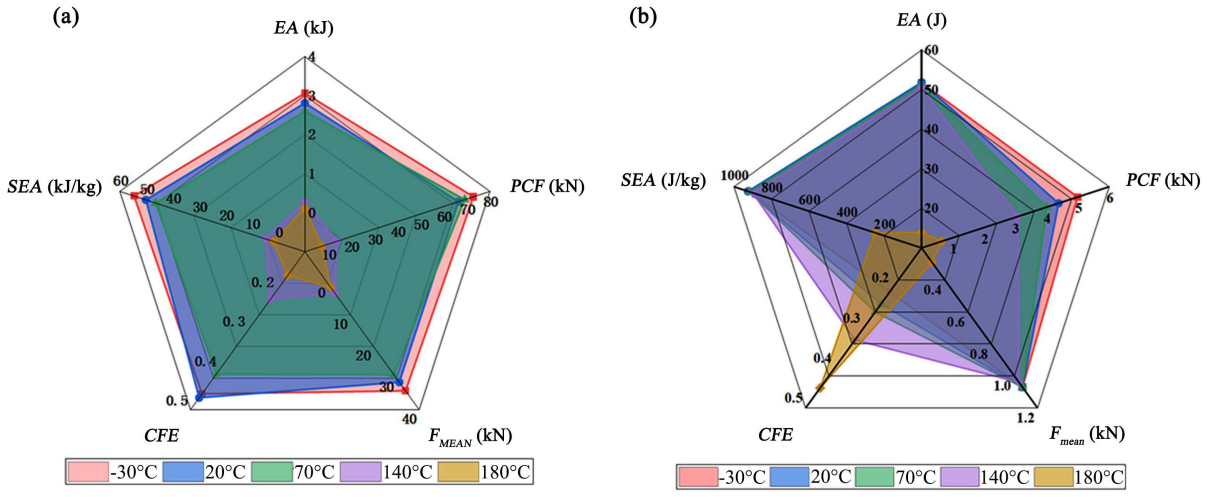


Figure 9. Crashworthiness radar diagram (a) axial compression, (b) flatwise compression
图 9. 耐撞性雷达图 (a) 轴向压缩, (b) 侧向压缩

5. 结论

本文通过不同温度环境下的轴向和侧向压缩试验,研究了温度对 CFRP 管力学性能的影响,重点分析了失效模式、能量吸收特性和载荷 - 位移响应的温度依赖性。研究发现,温度对 CFRP 管的力学性能影响显著,尤其在树脂基体的玻璃转变温度(T_g)附近,材料的力学行为和失效模式发生了明显变化。

(1) 轴向压缩实验结果表明,在低于树脂玻璃化转变温度(T_g)的温度条件下(-30°C , 20°C , 70°C), CFRP 管表现出较高的能量吸收能力,失效模式以花瓣形卷曲为主。超过 T_g (140°C , 180°C)后,树脂基体显著软化,导致峰值载荷和能量吸收能力急剧下降,失效模式转变为整体屈曲。

(2) 侧向压缩实验结果表明,在低温环境(-30°C)下, CFRP 管的脆性增强,能量吸收主要依赖于纤维断裂和基体脆性开裂。高于 T_g 时,基体软化削弱了界面粘结强度,导致分层加剧,进而使力学性能显著劣化。

(3) 耐撞性评估表明, CFRP 管的比能量吸收(SEA)在低温下达到峰值,而在高温下急剧下降。特别是在 180°C 时, SEA 比室温条件下降了 96.1%,说明树脂基体的软化和界面性能退化是耐撞性下降的主要原因。

CFRP 管的力学性能和耐撞性对温度变化敏感,特别是在树脂基体的玻璃转变温度附近。实际应用中需充分考虑温度对其性能的影响,以确保结构安全性和可靠性。未来研究可探索不同纤维、基体材料及界面改性对 CFRP 管温度依赖性的影响,提升其在极端环境下的应用性能。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新训练计划项目(YKJCX2320226)

参考文献

- [1] Ashby, M.F. (2011) *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier.
- [2] Mamalis, A.G., Robinson, M., Manolakos, D.E., Demosthenous, G.A., Ioannidis, M.B. and Carruthers, J. (1997) Crash-worthy Capability of Composite Material Structures. *Composite Structures*, **37**, 109-134.
[https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(97\)80005-0](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(97)80005-0)
- [3] Yusof, N.S.B., Sapuan, S.M., Sultan, M.T.H., Jawaid, M. and Maleque, M.A. (2017) Design and Materials Development of Automotive Crash Box: A Review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, **29**, 129-144.

- <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2017.09.003>
- [4] Guan, W., Gao, G., Li, J. and Yu, Y. (2018) Crushing Analysis and Multi-Objective Optimization of a Cutting Aluminium Tube Absorber for Railway Vehicles under Quasi-Static Loading. *Thin-Walled Structures*, **123**, 395-408. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.031>
- [5] Aktaş, M., Karakuzu, R. and Arman, Y. (2009) Compression-after Impact Behavior of Laminated Composite Plates Subjected to Low Velocity Impact in High Temperatures. *Composite Structures*, **89**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.07.002>
- [6] Li, S., Guo, X., Liao, J., Li, Q. and Sun, G. (2020) Crushing Analysis and Design Optimization for Foam-Filled Aluminium/CFRP Hybrid Tube against Transverse Impact. *Composites Part B: Engineering*, **196**, Article ID: 108029. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108029>
- [7] Alexander, J.M. (1960) An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, **13**, 10-15. <https://doi.org/10.1093/qjmam/13.1.10>
- [8] Abramowicz, W. and Jones, N. (1984) Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes. *International Journal of Impact Engineering*, **2**, 263-281. [https://doi.org/10.1016/0734-743x\(84\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0734-743x(84)90010-1)
- [9] Gupta, N.K., Velmurugan, R. and Gupta, S.K. (1997) An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes. *Journal of Composite Materials*, **31**, 1262-1286. <https://doi.org/10.1177/002199839703101301>
- [10] Gui, L.J., Zhang, P. and Fan, Z.J. (2009) Energy Absorption Properties of Braided Glass/epoxy Tubes Subjected to Quasi-Static Axial Crushing. *International Journal of Crashworthiness*, **14**, 17-23. <https://doi.org/10.1080/13588260802411416>
- [11] Kim, H.C., Shin, D.K., Lee, J.J. and Kwon, J.B. (2014) Crashworthiness of Aluminum/CFRP Square Hollow Section Beam under Axial Impact Loading for Crash Box Application. *Composite Structures*, **112**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.042>
- [12] Hussein, R.D., Ruan, D. and Lu, G. (2018) An Analytical Model of Square CFRP Tubes Subjected to Axial Compression. *Composites Science and Technology*, **168**, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.09.019>
- [13] Siromani, D., Awerbuch, J. and Tan, T. (2014) Finite Element Modeling of the Crushing Behavior of Thin-Walled CFRP Tubes under Axial Compression. *Composites Part B: Engineering*, **64**, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.008>
- [14] Zuo, W., Luo, Q., Li, Q. and Sun, G. (2023) Effect of Thermal and Hydrothermal Aging on the Crashworthiness of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Tubes. *Composite Structures*, **303**, Article ID: 116136. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116136>
- [15] 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.
- [16] 曹东风, 陈奕君, 蔡伟, 等. 高温热解损伤对碳纤维/环氧树脂基复合材料层合板冲击后剩余压缩强度的影响[J/OL]. 复合材料学报: 1-18. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250217.001>, 2025-02-20.