

碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述

王安妮 刘晓刚 岳清瑞

Low-velocity impact resistance of carbon fiber reinforced polymer composite and its cables: A review

WANG Anni, LIU Xiaogang, YUE Qingrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220615.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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-玻璃纤维混杂增强环氧树脂复合材料低速冲击性能及其模拟

Low-velocity impact behavior and numerical simulation of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites

复合材料学报. 2021, 38(1): 165–176 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200922.003>

中等应变率下单向玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料的剪切本构关系

Shear constitutive relationship of unidirectional glass fiber reinforced epoxy composites under intermediate strain rate

复合材料学报. 2018, 35(2): 304–310 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170601.001>

形状记忆合金-玻璃纤维/环氧树脂复合材料在振动边界条件下的低速冲击数值模拟

Numerical analysis of the low-velocity impact resistance of shape memory alloy-glass fiber/epoxy resin composites under vibrating boundary condition

复合材料学报. 2019, 36(10): 2316–2329 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181119.006>

E玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料轴向拉伸力学性能的应变率效应

Influence of strain rate on tensile mechanical behavior of E glass fiber reinforced epoxy resin composites

复合材料学报. 2018, 35(10): 2715–2722 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180209.007>

玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料的层间增韧及其低温下低速冲击性能

Interlaminar toughening of glass fiber/epoxy vinyl ester resin composite and its low-velocity impact properties at low temperature

复合材料学报. 2021, 38(1): 145–154 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.003>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220615.001

碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索
抗低速冲击性能综述



分享本文

王安妮, 刘晓刚*, 岳清瑞*

(北京科技大学 土木与资源工程学院 城镇化与城市安全研究院, 北京 100083)

摘 要: 碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer composite, CFRP) 拉索具有轻质高强特性和优异的耐腐蚀疲劳性能, 可替代钢拉索应用于桥梁结构中以应对桥梁更大跨度、更恶劣服役环境的需求。然而, CFRP 拉索较差的抗低速冲击性能导致其在服役期间面临车辆、落石等撞击的威胁。为全面了解 CFRP 的抗冲击性能, 促进 CFRP 拉索在工程结构中的应用, 本文对 CFRP 及其拉索的基础动力学性能、冲击响应及损伤失效研究现状进行了总结。现有研究表明: CFRP 具有应变率敏感性, 但 CFRP 的应变率效应尚不明确, 需建立包含全应变率范围的力学性能数据库; CFRP 层合板抗冲击性能研究较为全面, 然而截面形式差异、较大的长细比、轴向应力耦合等因素导致 CFRP 层合板的研究结论不能完全适用于 CFRP 拉索; 现有研究停留在冲击能量、锚固长度及温度对小吨位 CFRP 拉索抗冲击性能的影响, 缺乏对大吨位 CFRP 拉索抗冲击性能及损伤失效机制的研究; CFRP 拉索在车辆撞击下破断时的峰值索力远低于其轴向拉伸破断力, 应对拉索进行严格的防撞设计。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料; 冲击性能; 拉索; 应变率效应; 动态本构; 损伤失效

中图分类号: U444; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)11-5049-13

Low-velocity impact resistance of carbon fiber reinforced polymer
composite and its cables: A review

WANG Anni, LIU Xiaogang*, YUE Qingrui*

(Research Institute of Urbanization and Urban Safety, School of Civil and Resource Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer composite (CFRP) cables can replace steel cables due to their light-weight, high strength, and excellent corrosion and fatigue resistance to meet the needs of larger spans and harsher service environments for bridges. However, the poor resistance of the low-speed impact of CFRP cable makes it threatened by the impact from vehicles and falling rocks during its service life. In order to fully understand the impact performance of CFRP and promote the application of CFRP cables in engineering structures, this paper summarized the impact research status of CFRP and its cables, including the basic dynamic mechanical properties, impact response, and damage failure mechanism. The results show that CFRP has strain rate sensitivity, but the strain rate effect of CFRP is still unclear, and a mechanical property database covering the full strain rate range needs to be established. The research on the impact resistance of CFRP laminates is relatively comprehensive. However, the differences in cross-section form, large slenderness ratio, axial stress coupling, and other factors make the research conclusion of CFRP laminates not fully applicable to CFRP cables. Furthermore, current research mainly discusses the influence of impact energy, anchorage length, and temperature on the impact resistance of

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-05-15; 录用日期: 2022-06-04; 网络首发时间: 2022-06-16 10:25:22

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220615.001>

基金项目: 国家重点研发计划 (2021 YFB3704403); 国家自然科学基金 (52192663)

通信作者: 刘晓刚, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为钢结构与组合结构研究 E-mail: liuxiaogang@ustb.edu.cn;

岳清瑞, 工学硕士, 教授, 中国工程院院士, 博士生导师, 研究方向为土木工程纤维增强复合材料结构 E-mail: yueqr@vip.163.com

引用格式: 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5049-5061.

WANG Anni, LIU Xiaogang, YUE Qingrui. Low-velocity impact resistance of carbon fiber reinforced polymer composite and its cables: A review[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5049-5061(in Chinese).

small tonnage CFRP cables, but the research on the impact resistance and damage failure mechanism of large tonnage CFRP cables is rarely reported. When the CFRP cable breaks under the impact of the vehicle, the peak force is much lower than its axial tensile braking force, and a strict anti-collision design should be carried out for the CFRP cable.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer composites; impact properties; cables; strain rate effect; dynamic constitutive; damage failure

具有突出跨越能力的索支撑桥梁是大跨度桥梁的主要结构形式，千米级以上桥梁均为索桥^[1]。在严酷的服役环境与复杂受力条件下，钢索的疲劳与腐蚀问题严重，影响桥梁的服役安全；钢缆索维护与换索成本高昂，甚至超过桥梁造价^[2]；同时，钢缆索自重大，垂度效应显著，钢缆索桥梁的跨度有限。以轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀的碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer composite, CFRP) 拉索替代传统的钢拉索，可以实现桥梁拉索结构的更大跨度、更长服役寿命与低维护成本^[3]。现有土木工程用 CFRP 拉索索体的主要形式有：平行棒索、平行板索、绞线索及拉杆索^[4]。

纤维增强树脂基复合材料在土木工程领域应用时，其使用寿命期间易受到低速荷载冲击或碰撞^[5]。国内外索支桥梁运营维护经验表明，车辆撞击是造成拉索损坏的重要原因之一^[6]。如图 1 所示，2013 年美国 Mackinac 大桥与 2017 年中国府河大桥桥梁拉索、吊杆遭遇车辆撞击^[7]。此外，桥梁拉索在服役过程中还面临落石、山体滑坡等冲击灾变的威胁。

图 2 所示为土木工程用常见纤维与结构钢材的性能对比，虽然 CFRP 具有较高的强度和模量，但 CFRP 的断裂伸长率低，表现出脆性，因此 CFRP 的能量吸收能力并不突出^[8-9]。CFRP 具有线弹性和各向受力异性特点，横向剪切强度仅为纵向拉伸强度的 10%，其抗剪承载能力低、断裂伸长率小、断裂韧性较差，因此抗低速冲击 (车辆撞击、落石冲击等) 性能较差^[10]；特别地，CFRP 拉索在桥梁自重作用下的纵向应力与横向冲击荷载存在显著的耦合效应^[11]，CFRP 拉索在低速冲击荷载作用下易发生脆断或内部损伤导致承载能力大幅降低，使其在服役中面临巨大威胁。

土木工程中，纤维增强树脂基复合材料拉索面临的冲击通常是速度较小、质量较大的低速冲击；当冲击能量较大时 (如重型车辆撞击)，拉索可能发生显著的可见损伤甚至冲击断裂；当冲击能量相对较小时 (如轻型车辆撞击)，复合材料内部也会产生大量不可见的损伤，并在拉索后期服

役过程中逐渐发展，显著降低拉索的承载能力。与金属材料相比，CFRP 冲击损伤机制复杂，冲击性能与损伤失效模式受多因素影响。同时，CFRP 在低速冲击荷载作用下产生的隐藏损伤在较小的应力作用下即可发生扩展，尤其是在疲劳荷载作用下，低速冲击产生的裂纹快速扩展，导致其力学性能的退化而最终引发失效^[12]。因此，在 CFRP 拉索应用到桥梁结构前，有必要了解 CFRP 拉索的抗冲击性能。



(a) Mackinac bridge of the United States in 2013



(b) Fuhe bridge of China in 2017

图 1 拉索及吊杆遭受车辆撞击^[7]

Fig. 1 Cable hit by vehicle^[7]

本文首先回顾了材料层次的 CFRP 动态力学性能与抗冲击性能，随后对构件层次的 CFRP 拉索抗冲击性能研究现状进行了总结。回顾现有 CFRP 及其拉索的抗冲击性能研究进展，有助于发现现有研究的不足，并提出针对性的抗冲击性能控制方法，防范其在桥梁运维过程中面临的冲击灾变威胁。

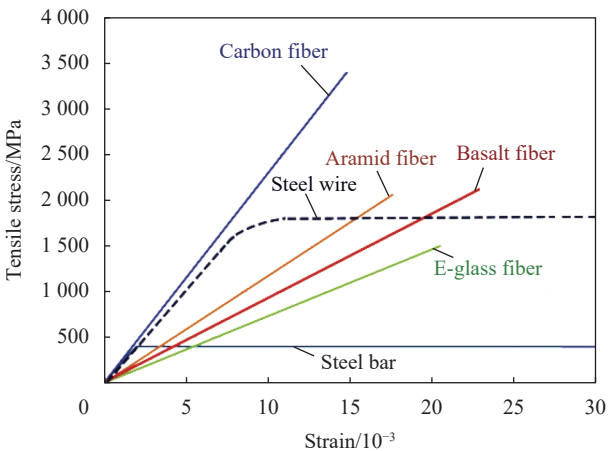


图2 土木工程用各类纤维增强树脂基复合材料及钢材性能对比^[8-9]
Fig. 2 Comparison from properties of various fibers reinforced polymer composites and steel for civil engineering^[8-9]

1 CFRP 的动态力学性能

一般来说，材料的动态力学性能与准静态下的力学性能具有一定的差异，随着荷载加载速率的变化而改变^[13]。动态荷载作用下，CFRP 的变形是瞬间发生的，此时材料内部应力的传递方式与静态条件相比有很大的不同，力学性能与破坏失效模式也有较大的差异。研究 CFRP 在动态荷载作用下的力学性能及损伤失效模式有助于理解 CFRP 在冲击荷载作用下的受力、变形及损伤发展^[14]，建立考虑应变率效应的动态本构模型是 CFRP 抗冲击有限元分析的基础。

1.1 CFRP 的应变率效应

材料的应变率是材料应变相对于时间的导数。建筑材料对应变率表现出不同程度的敏感性，加载条件决定了材料的变形和失效模式，并影响结构整体的力学行为^[15]。因此，必须了解材料在不同应变率(图 3)下的力学性能，以精确预测整体结构响应^[13]。

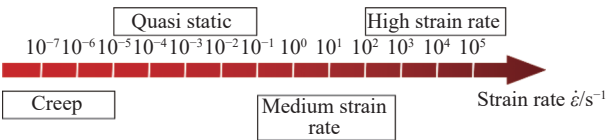


图3 应变率范围定义
Fig. 3 Definition of the strain rate range

CFRP 中碳纤维的应变率效应不明显，但粘弹性的树脂基体对应变率敏感，导致 CFRP 的力学性能与破坏模式均表现出应变率相关性^[14]。

应变率影响 CFRP 的拉伸、压缩和剪切性能。

然而，各力学性能对应变率的敏感性程度尚未达成共识。以 CFRP 的拉伸性能为例，Ou 等^[16]研究发现当应变率在 25~200 s⁻¹ 之间时，CFRP 的抗拉强度随着应变率的提高而提高，并将这种现象解释为在更高的应变率下，加载时间太短而无法引发 CFRP 内部缺陷的发展，因此，在更高的应变率下，使得 CFRP 表现出更高的抗拉强度，部分研究者也获得了相似的结论^[17]。然而，也有研究表明，CFRP 的拉伸强度和模量对应变率的敏感性并不明显，Hou 等^[18]通过对 T300 碳/环氧树脂层压板的动态测试观察到其拉伸强度和模量并未表现出应变率效应；Taniguchi 等^[19]通过对 T700 碳纤维/环氧树脂层压板的动态测试也得出了类似的结论。

CFRP 拉伸强度与模量对应变率的敏感程度与多种因素有关，从而导致结论的差异性。(1) 树脂基体的影响：Al-Zubaidy 等^[20]发现 CFRP 抗拉强度随着应变率的提高而提高，抗拉强度对应变率的敏感性程度与树脂基体的种类有关，也与材料内部的缺陷有关。Zhang 等^[21]发现碳纤维增强热塑性复合材料具有应变率强化效应，而碳纤维增强热固性材料的应变强化效应不明显；(2) CFRP 层合板的纤维方向：Zhang 等^[22]发现 CFRP 拉伸强度的应变率效应与 CFRP 板的纤维方向有关，双向 CFRP 层合板较单向 CFRP 层合板的强度与模量对应变率具有更高的敏感性，应变率为 130.10 s⁻¹ 时，单向 CFRP 的强度与模量较准静态时提高 28% 与 10.6%，而当应变率为 144.07 s⁻¹ 时，双向 CFRP 的强度与模量提高 137.8% 与 64%；(3) 应变率范围的影响：Al-Mosawe 等^[23]研究表明在高应变率下，CFRP 的拉伸强度具有更明显的应变率敏感性，这是由于在高应变率下，没有足够的时间引发 CFRP 的内部缺陷发展，同时高应变率会造成更多的损伤。

CFRP 的损伤失效模式与应变率的关系也尚无定论。有研究表明，高应变率下的损伤模式为纤维断裂，而准静态荷载下可能发生的界面脱粘与层间脱层损伤模式在高应变率下并不存在^[24]。这是由于界面性能也具有应变率敏感性，原子力在更高的应变率下没有足够的时间松弛，导致界面强度随着应变率的增加而增强，因此高应变率下没有足够的时间将纤维拉出^[25]。但也有研究者的研究结果表明，CFRP 的失效模式与应变率无关^[16]。

现有对 CFRP 应变率效应的研究尚无明确的

结论，这与 CFRP 应变率效应影响因素较多有关。研究者们往往针对特定的树脂基体、界面形式及应变率范围展开研究，而缺乏考虑多因素影响的统一的应变率效应研究。因此，为全面了解 CFRP 的动态力学性能，需建立 CFRP 全应变率下的力学性能数据库，以获得明确的应变率效应影响规律。

1.2 CFRP 的动态本构

材料的动态本构模型用于描述材料在动态荷载作用下的基础力学性能。CFRP 具有应变率敏感性，因此在 CFRP 本构模型中引入应变率相关项才可更好地描述和预测复合材料的动态力学性能^[26]。复合材料动态本构模型的研究方法主要分为宏观唯象法和细观力学法。细观力学法是在组分材料的力学性能基础上，从细观角度建立具体的细观结构来描述材料的宏观性能。细观力学法需要同时考虑各组分材料(纤维与树脂)及其界面

属性，将纤维和基体两种组分作为材料的基本单元，因此较复杂。宏观唯象法忽略复合材料内部细观结构，采用宏观应力、应变来描述复合材料结构的力学响应，其形式简单，便于工程应用^[27]。

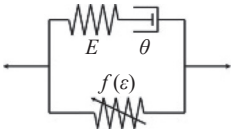
宏观唯象本构模型形式较多，通常模型中的参数没有含义，只是简单的拟合。研究者们考虑不同的影响因素或根据不同的研究角度提出了相应的动态本构模型，表 1 中列出了现有的部分动态本构模型。

CFRP 的结构较复杂，服役环境多样，在工程结构中应用时受到多种因素耦合作用的影响。CFRP 的动态力学性能受应变率效应、各向异性、纤维与树脂界面相、温度效应、损伤等因素的影响，现有的本构模型并未完全考虑所有因素，因此在未来的研究中还需将 CFRP 动态力学性能的影响因素考虑进动态本构模型中，从理论的角度

表 1 纤维增强树脂基复合材料宏观唯象动态本构模型

Table 1 Macroscopic phenomenological dynamic constitutive model of fiber reinforced polymer composites

Number	Dynamic constitutive model	Instructions	Reference
1	$\sigma = \sigma_s + \sigma_d$ $\sigma_d = q_0 \varepsilon + q_1 \varepsilon^n (\dot{\varepsilon})^p$	σ —Stress; σ_s —Static stress; σ_d —Dynamic stress; q_0 —Stiffness modulus; n, p and q_1 are chosen to adequately describe the shape of the experimentally obtained stress-strain curves.	Tay et al ^[28] , Shokrieh et al ^[29]
2	$\sigma = E \varepsilon (1 - D) (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)^m$ $D = 1 - \exp \left[- \frac{1}{nc} \left(\frac{E \varepsilon}{Y} \right)^n \right]$	D —Damage variable; m —Strain rate coefficient; E —Modulus; n —Shape parameter; Y —Yield strength.	Xu et al ^[30]
3	$\sigma = (A + B \varepsilon^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m})$ $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, T^* = \frac{T - T_r}{T_{\text{melt}} - T_r}$	m —Temperature softening index; T_{melt} —Melting temperature of the material; T_r —Reference temperature; A, B, C, n —Constants; T —Test temperature.	Han et al ^[31]
4	$\sigma_i^{\text{st}} = \sigma_i \text{DIF}$ $\text{DIF} = \left\{ \left[\tanh((\lg(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0) - A)B) \right] \left[\frac{C}{(C+1)/2} - 1 \right] + 1 \right\} \frac{C+1}{2}$	Considering the dynamic enhancement effect.	Zhang ^[27]
5	$\sigma_d = \sigma_s (\varphi_\sigma \lg \dot{\varepsilon} + \beta_\sigma)$	The dynamic enhancement factor is directly introduced.	Al-Zubaidy et al ^[20]
6	$\eta_{\text{DIF}} = \begin{cases} 1 + A \lg(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0) \\ 1 \end{cases}$		Fang ^[32]
7	$\sigma = E_1 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E \theta \dot{\varepsilon} \left[1 - \exp \left(- \frac{\varepsilon}{\theta \dot{\varepsilon}} \right) \right]$	Viscoelastic constitutive model (consisting of nonlinear spring elements connected in parallel with Maxwell originals). E, α, β —Elastic parameters for the spring; θ, E —Elastic parameter and relaxation time for the Maxwell element.	Zhao et al ^[33]
8	$\sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + \dot{\varepsilon} \sum_{k=1}^N \eta_k \left[1 - \exp \left(- \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon \dot{\tau}_k^*} \right) \right]$	A linear elastic element in parallel with multiple Maxwell bodies; η_k —Viscous coefficients.	Karim et al ^[34]
9	$\sigma(\varepsilon) = E_e + E_1 \theta_1 \dot{\varepsilon}_0 \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}_0 \theta_1}} \right) + E_2 \theta_2 \dot{\varepsilon}_0 \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\dot{\varepsilon}_0 \theta_2}} \right)$	Bridging model of fiber and matrix; E_1 and E_2 —Viscoelastic spring constant modulus; E_e —Equilibrium elastic modulus; θ_1, θ_2 —Characteristic relaxation times.	Liu ^[35]



Notes: ε —Strain; $\dot{\varepsilon}$ —Strain rate; $\dot{\varepsilon}_0$ —Reference strain rate; η_{DIF} —Dynamic increase factor; $\dot{\tau}_k^*$ —Shear strength; $\varphi_\sigma, \beta_\sigma$ —Constant.

对 CFRP 的动态力学行为进行研究, 建立更准确的 CFRP 动态力学性能预测模型。

2 CFRP 层合板的抗低速冲击性能

目前, CFRP 低速冲击研究主要集中在低速冲击过程中的力学响应、损伤机制、冲击能量的转化和吸收及冲击后残余性能。现有的 CFRP 抗低速冲击的研究主要针对 CFRP 层合板, 因此本节

对 CFRP 层合板抗低速冲击性能影响因素及冲击损伤失效模式与表征方法进行了总结。

2.1 CFRP 低速冲击下的力学响应与影响因素

CFRP 在低速冲击荷载作用下的力学响应主要包括力-位移曲线与能量-时间曲线。同时, 在低速冲击荷载作用下, CFRP 损伤分为穿透与未穿透, CFRP 未穿透时对应的力-位移曲线为闭合包络正弦状(图 4), 而穿透时力-位移曲线不闭合(图 5)。

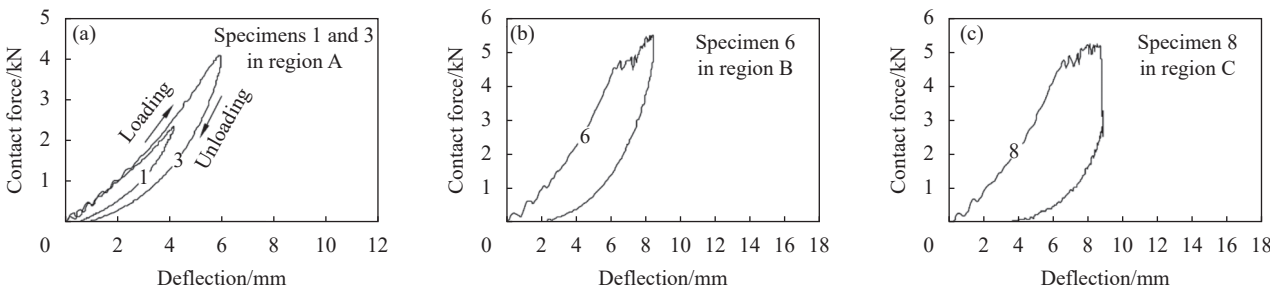


图 4 不同能量下未穿透的碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 力-位移曲线^[36]

Fig. 4 Force-displacement curves of unpenetrated carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) under different energies^[36]

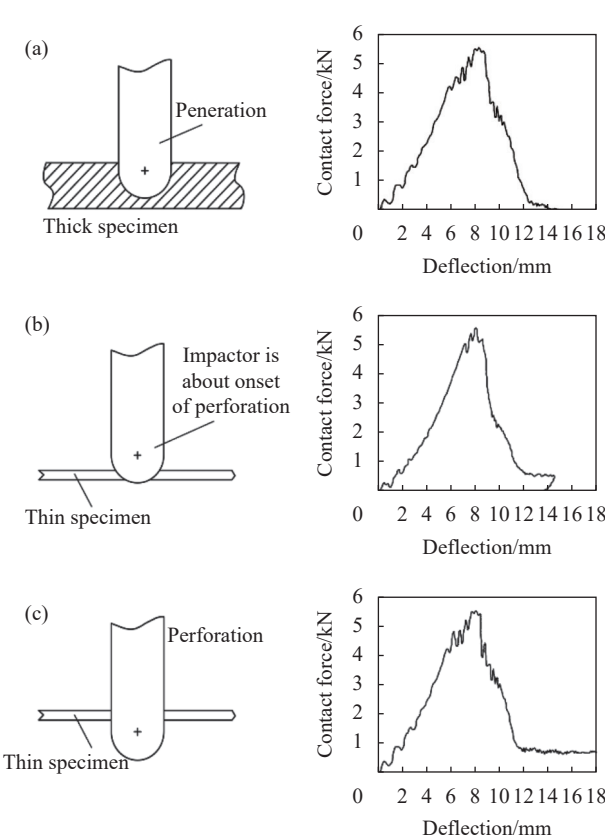


图 5 穿透 CFRP 的力-位移曲线: (a) 厚板中穿透; (b) 薄板开始穿孔; (c) 薄板完全穿孔^[36]

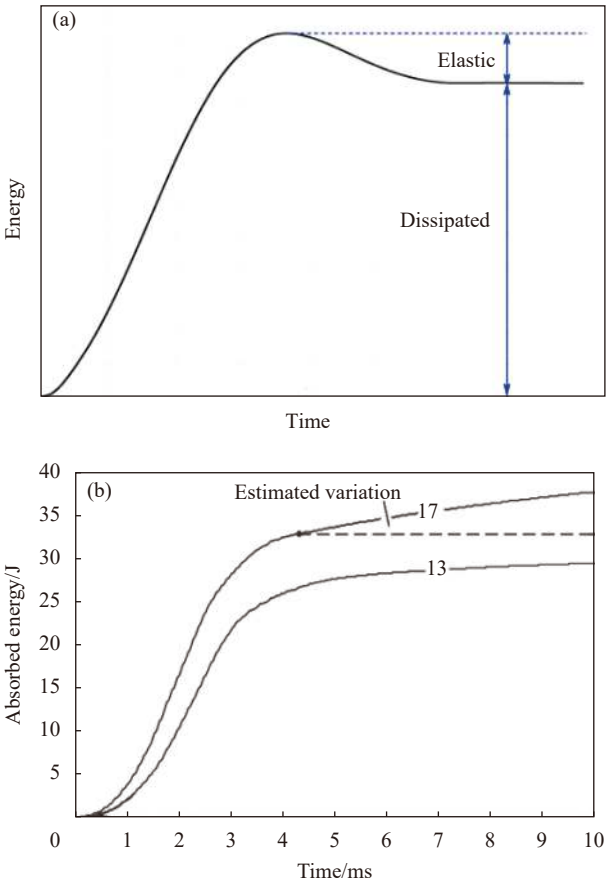
Fig. 5 Force-displacement curves of penetrated CFRP: (a) Penetration in a thick CFRP plate; (b) Initiation of perforation in a thin CFRP plate; (c) Complete perforation in a thin CFRP plate^[36]

如图 4 所示, 尽管 CFRP 未穿透时的曲线均为闭合曲线, 但能量不同, 曲线形状也有差异。图 4(a)~4(c) 分别表示了能量逐渐增加情况下的力-位移曲线。当能量较低时, 冲击反力达到最大时, 锤头速度降为 0, 锤头立即反弹, 试样发生弹性变形恢复, 直至与锤头分离。能量较高时, 当冲击力达到最大时, 速度并未降为 0, 继续下降一定距离后, 锤头回弹, 直至与试样分离。

如图 5 所示, 在更高的能量下, 层合板发生穿孔, 力-位移曲线不闭合, 锤头不回弹, 冲击能量的不同导致试样穿透程度的差异, 因此相对应的力-位移曲线也有差别。图 5(a) 为厚板部分穿孔, 层合板未被完全穿透, 部分穿透后锤头速度降为 0, 冲击反力也降为 0。图 5(b) 为薄板开始穿孔, 速度降为 0 时, 冲击能量未被完全耗散, 锤头略微回弹。图 5(c) 为薄板完全穿透, 穿透后由于锤头和试样之间的摩擦力作用导致接触荷载保持不变, 曲线末端与 x 轴平行。

图 6 所示为 CFRP 在低速冲击荷载作用下的典型能量-时间曲线。如图 6(a) 所示, 试样未被穿透时发生了回弹, 能量由弹性吸能与损伤耗能构成, 根据能量-时间曲线可以区别弹性能量和耗散能量。同时, 弹性能量也可根据力-位移曲线中卸载曲线部分包围的面积计算, 耗散能量则对应于加载和卸载曲线之间包围的面积。图 6(b) 为试样穿透时

的能量-时间曲线，图中编号 13 的曲线与图 5(a) 和图 5(b) 中的力-位移曲线相对应，由于试样被穿透未发生回弹，因此曲线上不包含弹性吸能部分。图中编号 17 的曲线与图 5(c) 中的力-位移曲线相对应，薄板完全穿透后由于摩擦力而导致能量-时间曲线末端曲线上扬。



Cases 13 and 17—Specimens undergoing partial perforation and complete perforation, respectively

图 6 冲击荷载作用下纤维增强树脂基复合材料吸收能量-时间曲线: (a) 试样未穿孔; (b) 试样穿孔^[36]

Fig. 6 Energy absorption-time curves of fiber reinforced polymer composites under impact load: (a) Unpenetrated specimens; (b) Penetrated specimens^[36]

CFRP 的抗冲击性能影响因素较多，主要影响因素包括：基体类型 (如热固性树脂、热塑性树脂)、织物结构 (如 2D、3D)、环境条件 (如湿热环境、高温环境)、材料的断裂韧性、冲击次数、冲击物形状、纤维混杂、基体混杂、铺层次序 (如铺层角度与厚度)，其中基体类型和织物结构是影响纤维增强树脂基复合材料的主要影响因素，其他为次要影响因素^[37]。

(1) 树脂种类与性能：热塑性树脂基体在冲击下表现出较强的韧性，力值呈现非线性且无急剧

变化，主要损伤机制为纤维滑动、分层及纤维断裂^[38]，通过大变形与纤维断裂来抵抗冲击荷载、吸收能量^[39]。在相同冲击条件下，碳纤维增强热塑性基体复合材料的分层损伤程度比碳纤维增强热固性基体复合材料小，这是由于分层损伤由层内大量裂纹扩展产生，而裂纹尖端的扩展主要取决于基体的延展性，热塑性树脂更优异的延展性可延缓裂纹扩展，使其分层损伤程度更低。同时，纤维增强热塑性树脂复合材料的 I 型断裂韧性较纤维增强热固性树脂复合材料高，减少了复合材料中的损伤扩展与分层^[37]。然而，热塑性树脂在工程应用中仍然面临与纤维的浸润性难以控制、价格高昂及刚度较低等问题^[40-41]。

此外，断裂韧性与冲击性能、复合材料的残余强度之间存在正相关关系 (图 7)，因此提高 CFRP 抗冲击性能的另一种方法是通过将微米或纳米尺寸的填料添加到基体中或通过复合层之间插入薄膜、纤维或颗粒来进行基体增韧^[42]。纳米粒子的桥接机制有利于阻碍裂纹扩展、减少损伤区域并增加能量吸收，如将多壁碳纳米管引入树脂基体中，可提高树脂基体的断裂韧性，从而提高 CFRP 的抗冲击性能。添加质量比 0.2% 氧化石墨烯的碳纤维/环氧树脂复合材料的冲击强度可提高 100%^[43]。

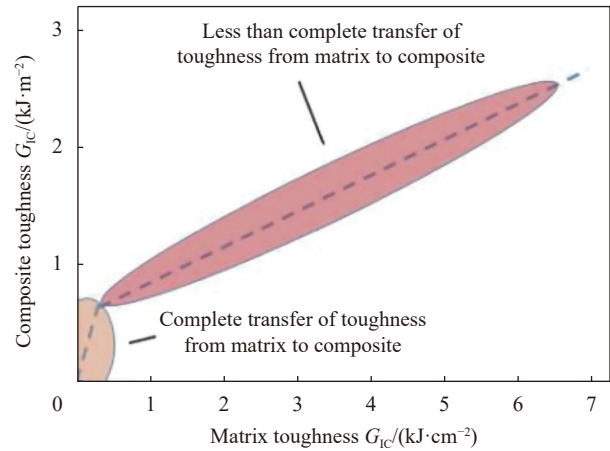


图 7 纤维增强树脂基复合材料的 I 型层间断裂韧性与基体韧性的关系^[42]

Fig. 7 Mode I interlaminar fracture toughness of fiber reinforced polymer composites and matrix toughness^[42]

(2) 纤维与树脂基体体积比：Delfosse 等^[44] 对 CFRP 层合板低速冲击过程中各个部分能量吸收比例进行了量化，结果表明，基体与纤维损伤吸收的能量分别占冲击能量的 30% 和 70%。纤维与树脂基体的体积比影响 CFRP 层合板的强度与刚

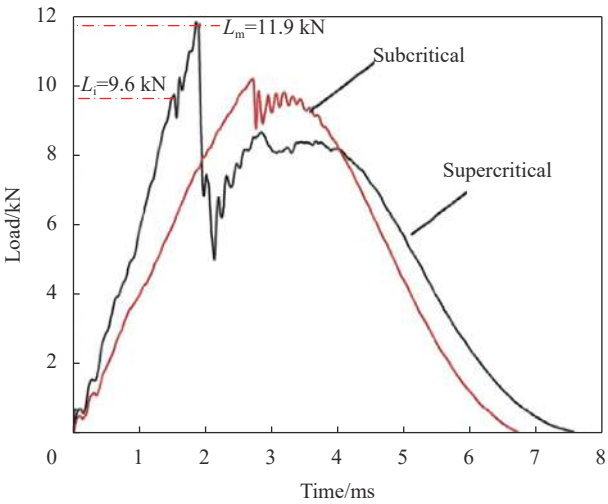
度,在冲击荷载作用下,冲击峰值力随着纤维含量的增加而增大。

(3) 纤维铺层方向与结构: 对于 CFRP 层合板,调整纤维铺层方向有助于提高 CFRP 的抗冲击性能,在低速冲击荷载作用下,CFRP 内部应力的传递与纤维取向相关,近似各向同性的铺层使应力分布更均匀,抗冲击性能更优异。此外,近年来,三维编织的 CFRP 被证明可有效提高 CFRP 的抗冲击性能。三维编织的 CFRP 层压板较单向 CFRP 层压板显示出冲击峰值力减小、损伤区域减小、延展性及残余强度更高等特性。其主要原因在于: 编织的 CFRP 层合板具有更高的 II 型层间断裂韧性,编织结构限制了分层损伤,裂纹沿纱线的起伏方向扩展,产生了较大的断裂表面积,有助于对冲击能量的消耗^[45]。

(4) 冲击物尺寸与冲击角度: 当冲击锤头形状相同时,冲击锤头直径越大,层合板位移越小,损伤范围越大。同时,平底锤头对应的峰值力较半球形、椭球形及锥形锤头大,其次是半球形冲头产生的冲击峰值力最大,接触时间最小^[46]。最大接触力和接触时间等冲击参数随冲击角的变化而线性变化,能量吸收与冲击角呈非线性关系^[47]。相比其他冲击角度,冲击行为垂直发生时,能够观测到更大的冲击力和产生更严重的纤维损伤。

(5) 环境因素: CFRP 实际应用时,受温度场、湿度场及应力场的耦合作用影响。Almudaihesh 等^[48]研究表明,单向碳纤维增强环氧树脂复合材料受树脂基体吸湿水解的影响,吸湿后纤维与树脂基体发生脱粘,层间断裂韧性显著降低,意味着 CFRP 的抗冲击损伤能力也降低。温度能够改变冲击引起的损伤性质和程度,随着温度的增加,CFRP 的初始损伤荷载阈值逐渐降低,抗冲击性能降低^[49]。此外,较低温度下树脂基体韧性降低导致冲击的试样比在较高温度下冲击的试样会产生更多的冲击损伤。单独的紫外线辐射增加内部损伤、导致复合材料性能降低,层压梁冲击后的剩余承载能力显著降低^[50]。

(6) 冲击能量: 图 8 为 CFRP 在不同能量冲击下的荷载-时间曲线,冲击能量在复合材料层合板破坏阈值以下的冲击事件称为亚临界冲击;冲击能量超过复合材料层合板破坏阈值的冲击事件被称为超临界冲击^[51]。两种不同冲击能量作用下,CFRP 的冲击响应不同。研究表明冲击能量较低



L_1 —Point in the load-time curve where the first noticeable load drop;
 L_m —Point corresponding to maximum load

图 8 不同冲击能量下 CFRP 的荷载-时间曲线^[51]

Fig. 8 Load-time curves of CFRP under various impact energy^[51]

时(亚临界冲击),CFRP 初始损伤荷载与峰值力随着冲击能量的增加而增加,当冲击能量达到一定程度时(超临界冲击),峰值力不再随着冲击能量的提高而增加。

(7) 纤维混杂: 通常将高模量纤维的承载能力与低模量纤维的韧性结合起来,混杂提高了损伤容限、抗冲击性并降低了材料成本^[52]。现有研究中研究者将碳纤维与玻璃纤维、玄武岩纤维、芳纶及植物纤维等混杂,可提高 CFRP 的抗冲击性能^[53],但提升效果与两种纤维的体积分数及混杂方式均相关。Wang 等^[54]研究表明,与突然失效的层内混杂相比,由于复合层压板的逐层失效机制,层间混杂纤维增强树脂基复合材料表现出更高的延展性和比能量吸收。

CFRP 层合板的冲击响应和损伤与多种因素有关,现有研究对 CFRP 层合板抗冲击性能影响因素进行了详细的探讨。尽管有研究者考察了环境对 CFRP 抗冲击性能的影响,但仍然缺乏复杂环境对 CFRP 层合板抗冲击性能影响规律及复杂环境作用下 CFRP 层合板抗冲击性能演化机制研究。

2.2 CFRP 的冲击损伤与表征方法

由于 CFRP 是各向异性材料,其内部冲击损伤模式与损伤失效机制较复杂。CFRP 的损伤模式与树脂种类(热塑性性与热固性)、纤维与树脂体积分数、冲击速度等因素有关。沈真等^[55]按照冲击能量和损伤程度的变化,将损伤形貌分为以下几种状态: (1) 无损伤状态: 当冲击能量较低时,

未超过引起损伤的门槛值, 层合板未出现损伤; (2) 冲击表面目视不可检损伤状态, 层合板内部出现了分层损伤: 但肉眼无法观察到, 需要专门设备进行检测; (3) 冲击表面目视可检损伤状态: 层合板出现肉眼可明显观察到的损伤; (4) 穿透损伤状态: 冲击能量超过层合板的损伤阻抗极限后, 结构被击穿。

对于 CFRP 层合板, 在多种冲击损伤载荷的相互作用下, 复合材料的层板内部会产生多种形式的内冲击损伤和层间损伤。内损伤的主要破坏形式包括纤维丝的拉断和压屈、基体的开裂, 层间损伤的主要破坏形式之一就是分层冲击损伤。如图 9 所示, 相应的损伤机制可以分为 5 个关键阶段, 依次发生: (1) 由于高横向剪切应力导致顶层的基体开裂和纤维/基体界面剥离; (2) 弯曲应力引起的底层横向弯曲裂纹; (3) 裂纹扩展导致的层间分层; (4) 拉伸下的纤维失效损伤和压缩载荷下的纤维屈曲; (5) 穿透^[56]。不同冲击能量作用下, CFRP 的损伤模式也不同, 图 9(a)~9(c) 分别代表

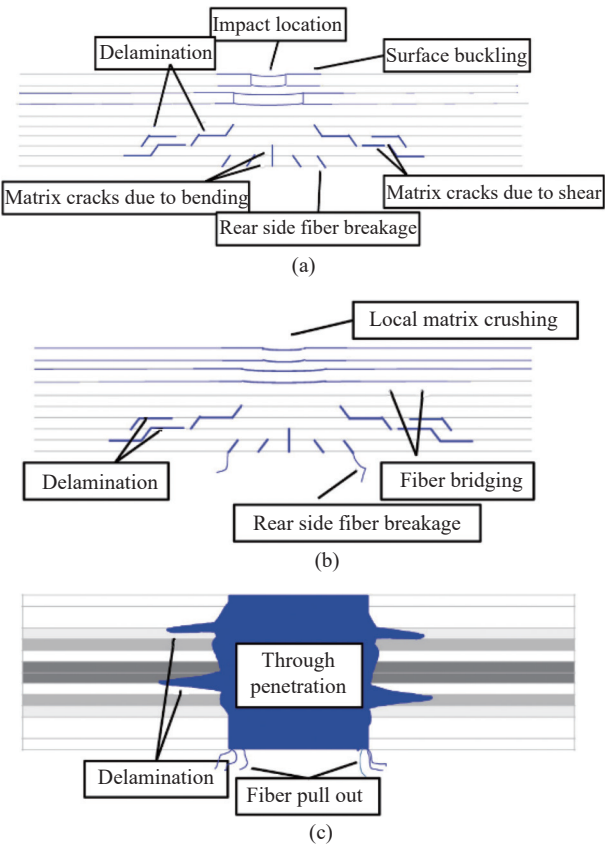


图 9 冲击荷载作用下 CFRP 内部损伤: (a) 低冲击能量; (b) 中冲击能量; (c) 高冲击能量^[56]

Fig. 9 Schematic drawing of internal damages of CFRP under impact: (a) Low energy; (b) Medium energy; (c) High energy^[56]

了低能量、中能量及高能量冲击作用下的复杂损伤模式。内部损伤 (如树脂开裂和纤维/基体界面损伤) 和层间损伤 (如两层之间的层间分层) 是低能量冲击下两种不同的主要损伤模式, 高能量冲击下, 纤维断裂是主要的失效模式^[57]。

由于在低速冲击下的 CFRP 损伤大部分为内部损伤且破坏模式复杂多样, 无损检测是识别内部损伤的常用手段, 主要包括超声波扫描、X 射线及计算机断层扫描技术^[58]。但是这些检测技术均用于冲击后的损伤及失效模式的检测, 并不能获得冲击过程中 CFRP 内部的损伤发展。Suresh 等^[59]使用准静态压痕实验还原低速冲击过程, 并采用声发射技术监测准静态压痕实验过程, 发现声发射信号能够准确地反应试样内部损伤类型与渐进损伤过程。

CFRP 层合板在冲击荷载作用下的损伤类别与发生顺序较复杂, 无损检测的测试方法可以识别 CFRP 层合板冲击后产生的损伤模式, 但不能确定冲击过程中 CFRP 层合板中的渐进损伤发展, 影响 CFRP 冲击损伤机制的研究, 因此对 CFRP 抗冲击性能研究需要解决的关键问题是如何获得 CFRP 在冲击荷载作用下的动态损伤发展。

3 CFRP 拉索的冲击性能

CFRP 拉索抗冲击性能研究尚处于起步阶段, 与 CFRP 层合板抗冲击性能相似的是, CFRP 拉索的抗冲击性能受树脂基体、纤维与树脂体积比、冲击锤头尺寸与角度及外部环境的影响。但是, CFRP 拉索与现有研究的 CFRP 层合板抗冲击性能也具有较大差异: (1) 试样的形状和尺寸对复合材料抗冲击性能的影响较明显^[60], 构成 CFRP 拉索的 CFRP 杆与 CFRP 板等截面较小、长径比大, 导致其冲击响应及冲击荷载作用下的受力模式、损伤模式均与层合板不同; (2) CFRP 拉索使用的 CFRP 均为单向纤维, 冲击能量在其内部更易传播, 导致损伤面积较层合板大; (3) 桥梁用 CFRP 拉索在遭受横向冲击作用时, 已存在的预张力使 CFRP 拉索遭受冲击时处于复合受力状态, 其抗冲击性能和冲击损伤模式均与未受张力状态不同, 施加预应力后, CFRP 的抗冲击性能较无预应力时有所下降; (4) 常见的 CFRP 拉索, 如棒索, 由多根 CFRP 杆构成, 在冲击荷载作用下, 也存在各杆协同受力的问题; (5) CFRP 拉索的抗冲击性能还受锚固体系的影响。

目前,对CFRP拉索的抗冲击性能开展的研究主要包括以下几个方面:

向宇^[61]研究了CFRP绞线及平行棒索的抗冲击性能,研究表明CFRP绞线索与CFRP棒索的破坏形态及抗冲击性能具有较大差异,CFRP绞线索的主要损伤模式为构成绞线索的CFRP断裂,而CFRP棒索的主要损伤模式为锚具滑移与CFRP筋断裂。

王常林^[62]研究了冲击能量、预张力和锚固长度对CFRP筋材的抗冲击性能及损伤失效模式的影响(图10),相应物质命名见表2。CFRP筋材在冲击荷载作用下,初始损伤点对应的冲击力随着冲击能量的变化没有较明显的变化规律,峰值反力随着冲击能量的提高而提高。冲击能量越大,筋材横向剪断角越大。初张力越大,CFRP筋材的中部横向剪断角越小,极限横向力、纵向极限索力及索力增量越大,极限横向位移则越小。锚固长度对CFRP的冲击响应影响较小^[63]。

黄道斌^[64]也研究了初张力对CFRP筋横向抗冲击性能的影响,并通过有限元模拟了CFRP拉索抗车辆撞击性能。研究结果表明:横向冲击荷载作用下,CFRP筋均在冲击锤头作用处发生完全破断,破坏断面较横向静力试验中试件破坏断面平整。随着初张比由0增至0.34,CFRP筋的最大索力增量及横向极限变形均逐渐减小,但破坏时的极限索力则逐渐增大。CFRP拉索在车辆撞击下破断时的峰值索力远低于其轴向拉伸破断力。因此,设计CFRP拉索车行桥时,应对拉索进行严格的防撞设计。

方亚威^[7,65]在研究预张力对CFRP筋材抗冲击性能影响的基础上,研究了温度效应对CFRP筋材抗冲击性能的影响(图11),同时研究了几种防护措施对CFRP筋抗冲击性能的提升作用。当温度为-40℃和20℃,冲击作用引起的筋材损伤主要为纵向基体裂纹,80℃下进行冲击的试件则未检测到明显的纵向基体裂纹,温度由-40℃升高至80℃时,CFRP筋最大冲击反力、纵向极限反力和横向断裂位移分别提高41.6%、10.1%和45.6%。多次的冲击作用会导致CFRP冲击行为的退化^[66]。CFRP筋外部设置聚乙烯柔性防护体系,可显著改善CFRP筋的吸能能力。

综上,当前的研究表明随着预张力的增加CFRP拉索冲击破坏时极限索力增加,锚固长度

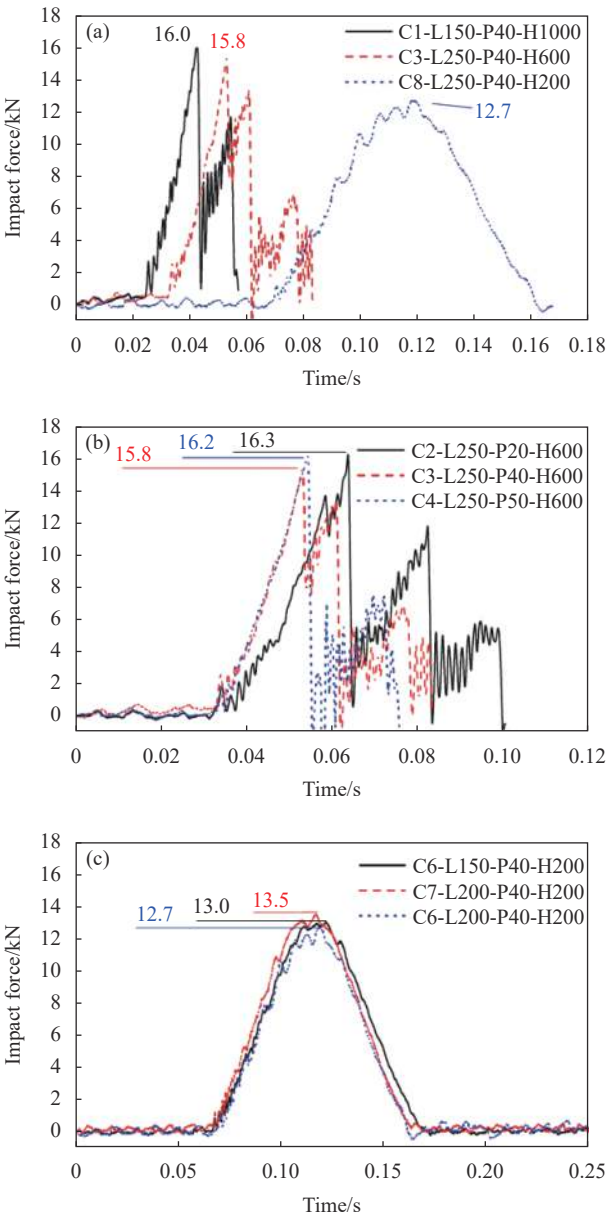


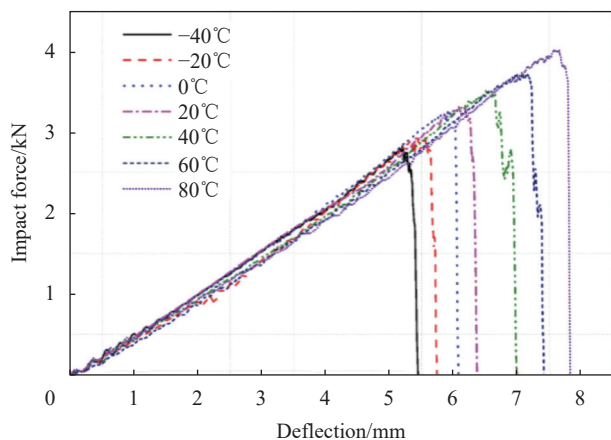
图10 CFRP绞线的冲击力-时间曲线: (a)不同冲击能量; (b)不同预张力; (c)不同锚固长度^[62]

Fig. 10 Impact force-time curves of CFRP strands: (a) Different impact energies; (b) Different pretensions; (c) Different bond lengths^[62]

表2 相应物质命名

Table 2 Naming of the corresponding substance

Sample	Anchor length/ mm	Pretension/ kN	Drop height/ mm
C1-L150-P40-H1000	150	40	1 000
C3-L250-P40-H600	250	40	600
C8-L250-P40-H200	250	40	200
C2-L250-P20-H600	250	20	600
C4-L250-P50-H600	250	50	600
C6-L150-P40-H200	150	40	200
C7-L200-P40-H200	200	40	200

图 11 不同温度下 CFRP 绞线的冲击响应^[9]Fig. 11 Impact force histories of CFRP wires for the specimens at different temperatures^[9]

对 CFRP 拉索抗冲击性能影响较小。同时, CFRP 拉索在车辆撞击下断裂时的峰值索力远低于轴向拉伸破坏力, 因此应对 CFRP 拉索进行防撞设计。但由于当前对 CFRP 拉索抗低速冲击性能的研究尚处于起步阶段, 缺乏对 CFRP 拉索抗冲击性能影响因素的系统研究, 冲击作用下的损伤发展与冲击失效机制尚不明确, 因此还需对 CFRP 拉索的冲击损伤机制、抗冲击性能评价方法与防护技术进行深入研究。此外, 现有研究集中在对小吨位 CFRP 拉索抗冲击性能的探索, 而大吨位 CFRP 拉索的冲击性能受到尺寸、截面形式及锚固体体系的影响, 冲击损伤机制与小吨位 CFRP 拉索的冲击损伤机制具有以下差别: (1) 大吨位 CFRP 拉索受尺寸效应及构造形式的影响, 在低速冲击作用下, CFRP 拉索各部位受力状态不同, 如冲击侧 CFRP 杆抗压、中间局部抗剪、远离冲击侧抗拉, 导致大吨位 CFRP 拉索各部位损伤类别的不同, 而小吨位 CFRP 拉索各部位区别较小; (2) 大吨位 CFRP 拉索的锚具构造相对小吨位杆体锚具更加复杂, 因此在锚固端附近的受力将更加复杂, 存在拉力、横向压力、冲击剪切力等多种复杂应力作用, 其失效机制更加复杂。因此, 需开展针对大吨位 CFRP 拉索的抗冲击性能与防护方法研究。

4 结论与展望

碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 具有轻质高强、优异的耐腐蚀疲劳性能等特点, 被认为可以替代钢材用于桥梁拉索, 以应对桥梁更大跨度和更恶劣的服役环境的需求。然而, CFRP 拉索抗冲击性能较差, 在桥梁服役期间面临着车辆、

落石等撞击等威胁。为促进 CFRP 拉索在桥梁中的应用, 本文对 CFRP 材料及其组合拉索的基础动态力学与抗冲击性能研究现状进行了总结, 并获得如下结论:

(1) CFRP 具有应变率敏感性, 但受基体种类、试样结构形式及测试应变率范围等因素的影响, 其基础力学性能与失效模式受应变率影响规律尚不明确。需开展更全面的应变率效应研究, 建立全应变率范围的动态力学性能数据库, 以全面了解 CFRP 的应变率效应;

(2) 现有的复合材料动态本构模型大多为宏观唯象本构模型, 其结构形式简单、便于工程应用, 但模型中均只考虑了单一的动态力学影响因素, 理论可解释性和模型适用性存在局限, 因此, 需将影响 CFRP 动态力学性能的相关参数考虑进动态本构模型中, 建立更准确的 CFRP 动态力学性能预测模型;

(3) 目前, 对 CFRP 冲击性能的研究集中于层合板, 其冲击响应和抗冲击性能影响因素的研究较全面; 尽管有部分研究者考虑了环境因素的影响, 但是更多类型的环境及多种环境耦合作用下的抗冲击性能发展规律尚不清楚, 缺乏环境对 CFRP 抗冲击性能作用机制的探讨;

(4) 现有的无损检测技术仅能够获得 CFRP 冲击后的内部损伤和失效模式, 还缺乏冲击荷载作用过程中内部损伤的高效检测技术, 难以获得损伤的渐进发展过程, 从而导致 CFRP 的抗冲击失效机制不明确;

(5) CFRP 拉索的抗冲击性能研究尚处于起步阶段, 研究了预张力、温度及锚固体体系对 CFRP 拉索抗冲击性能的影响, 但现有研究局限于小吨位的绞线索和棒索, 缺乏对 CFRP 拉索抗冲击性能系统的研究 (如服役环境的影响、大吨位索等), 冲击损伤机制尚不明确, 尚未建立 CFRP 拉索抗冲击承载力设计方法;

(6) CFRP 拉索在车辆撞击下断裂时的峰值索力远低于轴向拉伸破坏力, 因此应对 CFRP 拉索进行防撞设计。CFRP 拉索表面喷涂聚乙烯柔性防撞涂料被证明可提高 CFRP 拉索的抗冲击性能。在未来的研究中, 可从 CFRP 拉索索体材料出发提出改善其抗冲击性能的方法, 如树脂基体的增韧、提升纤维与树脂基体界面断裂韧性、与韧性纤维混杂等方法, 并提出方便工程施工的 CFRP

拉索抗冲击防护方案。

参考文献:

[1] YANG Y, FAHMY M F, GUAN S, et al. Properties and applications of FRP cable on long-span cable-supported bridges: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 190: 107934.

[2] FENG B, WANG X, WU Z S. Fatigue life assessment of FRP cable for long-span cable-stayed bridge[J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 159-166.

[3] ZHAO J F, MEI K H, WU J, et al. Long-term mechanical properties of FRP tendon-anchor systems—A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 117017.

[4] LIU Y, ZWINGMANN B, SCHLAICH M. Carbon fiber reinforced polymer for cable structures—A review[J]. *Polymers*, 2015, 7(10): 2078-2099.

[5] WU Q, ZHI X, LI Q, et al. Experimental and numerical studies of GFRP-reinforced steel tube under low-velocity transverse impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 127: 135-153.

[6] 舒林, 许红胜, 曾毅杰, 等. 影响斜拉索运营寿命的各种因素分析[J]. *中外公路*, 2017, 37(1): 84-88.

SHU Lin, XU Hongsheng, ZENG Yijie, et al. Analysis of various factors affecting operation life of stay cable[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(1): 84-88(in Chinese).

[7] 方亚威. 不同温度作用下碳纤维复合材料筋的静力和抗冲击性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.

FANG Yawei. Investigation on static and impact behavior of carbon fiber reinforced polymer bar with considering temperature effect[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).

[8] MUGAHED A Y H, ALYOUSEF R, RASHID R S M, et al. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review[J]. *Structures*, 2018, 16: 208-238.

[9] WANG X, WU Z, WU G, et al. Enhancement of basalt FRP by hybridization for long-span cable-stayed bridge[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 184-192.

[10] CHOCRON S, CARPENTER A J, SCOTT N L, et al. Impact on carbon fiber composite: Ballistic tests, material tests, and computer simulations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 39-56.

[11] FANG Y, FANG Z, JIANG R, et al. Effect of temperature on the transverse impact performance of preloaded CFRP wire[J]. *Composite Structures*, 2020, 231: 111464.

[12] 肖琳. CFRP层合板低速冲击行为与损伤机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

XIAO Lin. Research on low velocity impact behavior and damage mechanism of CFRP laminates[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019(in Chinese).

[13] ZHANG S, CAPRANI C C, HEIDARPOUR A. Strain rate studies of pultruded glass fibre reinforced polymer material properties: A literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 171: 984-1004.

[14] AHMED A, ZILLUR R M, OU Y, et al. A review on the tensile behavior of fiber-reinforced polymer composites under varying strain rates and temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123565.

[15] PERRY J I, WALLEY S M. Measuring the effect of strain rate on deformation and damage in fibre-reinforced composites: A review[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2022, 8: 178-213.

[16] OU Y, ZHU D, ZHANG H, 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.

[17] CHEN X, LI Y, ZHI Z, et al. The compressive and tensile behavior of a 0/90 C fiber woven composite at high strain rates[J]. *Carbon*, 2013, 61: 97-104.

[18] HOU J P, RUIZ C. Measurement of the properties of woven CFRP T300/914 at different strain rates[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(15): 2829-2834.

[19] TANIGUCHI N, NISHIWAKI T, KAWADA H. Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate[J]. *Advanced Composite Materials*, 2007, 16(2): 167-180.

[20] AL-ZUBAIDY H, ZHAO X L, AL-MAHAIDI R. Mechanical characterisation of the dynamic tensile properties of CFRP sheet and adhesive at medium strain rates[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 153-164.

[21] ZHANG Y, SUN L, LI L, et al. Effects of strain rate and high temperature environment on the mechanical performance of carbon fiber reinforced thermoplastic composites fabricated by hot press molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 134: 105905.

[22] ZHANG X, SHI Y, LI Z X. 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] AL-MOSAWE A, AL-MAHAIDI R, ZHAO X L. Engineering properties of CFRP laminate under high strain rates[J]. *Composite Structures*, 2017, 180: 9-15.

[24] GOMEZ-DEL R T, BARBERO E, ZAERA R, et al. Dynamic tensile behaviour at low temperature of CFRP using a split Hopkinson pressure bar[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(1): 61-71.

[25] ZHANG X, HAO H, SHI Y, et al. Static and dynamic materi-

- al properties of CFRP/epoxy laminates[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 638-649.
- [26] THOMSON D, QUINO G, CUI H, et al. Strain-rate and off-axis loading effects on the fibre compression strength of CFRP laminates: Experiments and constitutive modelling[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 195: 108210.
- [27] 张哲绎. 复合材料的动态能量吸收性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHANG Zheyi. Research on the dynamic energy absorption property of composite materials[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).
- [28] TAY T, ANG H, SHIM V J C S. An empirical strain rate-dependent constitutive relationship for glass-fibre reinforced epoxy and pure epoxy[J]. *Composite Structures*, 1995, 33(4): 201-210.
- [29] SHOKRIEH M M, OMIDI M J. Investigation of strain rate effects on in-plane shear properties of glass/epoxy composites[J]. *Composite Structures*, 2009, 91(1): 95-102.
- [30] 许沐华, 王肖钧, 张刚明, 等. Kevlar纤维增强复合材料动态压缩力学性能实验研究[J]. *实验力学*, 2001(1): 26-33.
- XU Muhua, WANG Xiaojun, ZHANG Gangming, et al. Experimental study on dynamic compressive mechanical properties of Kevlar fiber reinforced composites[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2001(1): 26-33(in Chinese).
- [31] 韩小平, 韩省亮, 李华, 等. 复合材料率相关本构模型的研究[J]. *机械科学与技术*, 1999(1): 125.
- HAN Xiaoping, HAN Xingliang, LI Hua, et al. Research on the rate-dependent constitutive model of composite materials[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 1999(1): 125(in Chinese).
- [32] 方盈盈. 高应变率下碳纤维复合材料动态力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- FANG Yingying. Study on dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced composite materials under high strain rate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018(in Chinese).
- [33] ZHAO J, GUO L, ZHANG L, et al. Experimental investigations on the in-plane dynamic compressive behavior and upper limit of constant strain rate for 2D twill weave carbon fiber reinforced composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 220: 108993.
- [34] KARIM M R. Constitutive modeling and failure criteria of carbon-fiber reinforced polymers under high strain rates[D]. Ohio: University of Akron, 2005.
- [35] 刘柳. 抗高冲击载荷CFRP层合结构力学性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- LIU Liu. Mechanical property study of CFRP laminates subjected to high impact compressive loads[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [36] ATAS C, SAYMAN O. An overall view on impact response of woven fabric composite plates[J]. *Composite Structures*, 2008, 82(3): 336-345.
- [37] SHAH S Z H, KARUPPANAN S, MEGAT-YUSOFF P S M, et al. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review[J]. *Composite Structures*, 2019, 217: 100-121.
- [38] BORJA S, SCATTINA A, BELINGARDI G. Impact behavior of a fully thermoplastic composite[J]. *Composite Structures*, 2017, 167: 63-75.
- [39] SIMEOLI G, ACIERNO D, MEOLA C, et al. The role of interface strength on the low velocity impact behaviour of PP/glass fibre laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 62: 88-96.
- [40] KISS P, GLINZ J, STADLBAUER W, et al. The effect of thermally desized carbon fibre reinforcement on the flexural and impact properties of PA6, PPS and PEEK composite laminates: A comparative study[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215: 108844.
- [41] SORRENTINO L, DE VASCONCELLOS D S, D'AURIA M, et al. Effect of temperature on static and low velocity impact properties of thermoplastic composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 113: 100-110.
- [42] SAGHAFI H, FOTOUHI M, MINAK G. Improvement of the impact properties of composite laminates by means of nano-modification of the matrix—A review[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2406.
- [43] ADAK N C, CHHETRI S, KUILA T, et al. Effects of hydrazine reduced graphene oxide on the inter-laminar fracture toughness of woven carbon fiber/epoxy composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 149: 22-30.
- [44] DELFOSSE D, POURSAITIP A. Energy-based approach to impact damage in CFRP laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(7): 647-655.
- [45] VIEILLE B, CASADO V M, BOUVET C. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study[J]. *Composite Structures*, 2013, 101: 9-21.
- [46] MITREVSKI T, MARSHALL I H, THOMSON R. The influence of impactor shape on the damage to composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2006, 76(1): 116-122.
- [47] ZHANG J, LI Z, ZHANG Q, et al. Study of fiber modulus effect on impact energy absorption characteristics of composite laminates at normal and oblique impacts[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 085610.
- [48] ALMUDAIHESH F, HOLFORD K, PULLIN R, et al. The influ-

- ence of water absorption on unidirectional and 2D woven CFRP composites and their mechanical performance[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 182: 107626.
- [49] 马名旭. 碳纤维增强树脂基复合材料湿热环境下冲击损伤的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- MA Mingxu. Study of the impact injury of carbon fiber-reinforced polymer composites in moist heat environment[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016(in Chinese).
- [50] AGRAWAL S, SINGH K K, SARKAR P K. Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite—A review[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 48(3): 317-332.
- [51] BHUDOLIA S K, JOSHI S C. Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid methylmethacrylate thermoplastic matrix[J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 696-708.
- [52] SAFRI S N A, SULTAN M T H, JAWAID M, et al. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 133: 112-121.
- [53] PAPA I, BOCCARUSSO L, LANGELLA A, et al. Carbon/glass hybrid composite laminates in vinylester resin: Bending and low velocity impact tests[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111571.
- [54] WANG X, HU B, FENG Y, et al. Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(2): 444-450.
- [55] 沈真, 张子龙, 王进, 等. 复合材料损伤阻抗和损伤容限的性能表征[J]. *复合材料学报*, 2004(5):140-145.
- SHEN Zhen, ZHANG Zilong, WANG Jin, et al. Characterization of damage resistance and damage tolerance behaviour of composite laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004(5):140-145(in Chinese).
- [56] ANDREW J J, SRINIVASAN S M, AROCKIARAJAN A, et al. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review[J]. *Composite Structures*, 2019, 224: 111007.
- [57] TIBERKAK R, BACHENE M, RECHAK S, et al. Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2008, 83(1): 73-82.
- [58] 张辰. 碳/玻单向经混杂复合材料抗冲击性能及损伤机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- ZHANG Chen. Study on impact resistance properties and damage mechanism of carbon/glass unidirectional warp knitted hybrid composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2021(in Chinese).
- [59] SURESH K C, ARUMUGAM V, SANTULLI C. Characterization of indentation damage resistance of hybrid composite laminates using acoustic emission monitoring[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 111: 165-178.
- [60] 向宇, 方志, 王常林. 碳纤维拉索及其锚固系统抗冲击性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(12): 82-90.
- XIANG Yu, FANG Zhi, WANG Changlin. Experimental study on impact behaviors of CFRP cable and its anchoring system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(12): 82-90(in Chinese).
- [61] 向宇. RPC的抗疲劳性能与CFRP索的抗冲击性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- XIANG Yu. Investigation on fatigue behavior of RPC and impact behavior of CFRP cables[D]. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).
- [62] 王常林. 碳纤维拉索及其锚固系统横向受力性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- WANG Changlin. Experimental research on behavior of CFRP cable and anchorage subjected to lateral force[D]. Changsha: Hunan University, 2015(in Chinese).
- [63] XIANG Y, FANG Z, WANG C, et al. Experimental investigations on impact behavior of CFRP cables under pretension[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(2): 04016087.
- [64] 黄道斌. 碳纤维拉索的温度效应及车撞响应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- HUANG Daobin. Investigation on temperature effect and vehicle impact response of CFRP cables[D]. Changsha: Hunan University, 2019(in Chinese).
- [65] FANG Y, FANG Z, JIANG R, et al. Transverse static and low-velocity impact behavior of CFRP wires under pretension[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(5): 04019041.
- [66] XIANG Y, FANG Z, FANG Y. Single and multiple impact behavior of CFRP cables under pretension[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 521-533.