

复合材料拉挤型材及其结构在工程应用中的关键问题

刘天桥

Key issues in engineering applications of pultruded fiber reinforced polymer composite profiles and their structures

LIU Tianqiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241212.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合材料负泊松比格栅结构设计及力学性能评价

Structural design and mechanical characterization of an auxetic advanced grid structure composite
复合材料学报. 2021, 38(4): 1107–1114 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200623.002>

高温下多轴向拉挤复合材料面内抗剪性能

In-plane shear properties of multi-axial pultruded composites at elevated temperatures
复合材料学报. 2022, 39(12): 6168–6176 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211213.002>

连续玻璃纤维/聚丙烯热塑性复合材料拉挤成型中的工艺参数

Parameters in process of pultrusion of continuous glass fiber/polypropylene thermoplastic composites
复合材料学报. 2020, 37(11): 2782–2788 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200302.003>

疏水改性玄武岩纤维增强树脂复合材料筋的力学性能及耐久性

Mechanical properties and durability of hydrophobically modified basalt fiber reinforced polymer bars
复合材料学报. 2022, 39(11): 5228–5238 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220419.003>

提升超疏水材料力学耐久性的研究进展

Progress in improving the mechanical durability of superhydrophobic materials
复合材料学报. 2023, 40(4): 2004–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220923.001>

聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构设计及性能研究进展

Research progress of structure design and performance of polymer-based electromagnetic shielding composites
复合材料学报. 2021, 38(5): 1358–1370 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241212.002

复合材料拉挤型材及其结构在工程应用中的关键问题



分享本文

刘天桥*^{1,2,3}

(1.北京工业大学重庆研究院 复合材料与结构创新研发中心, 重庆 401135; 2.北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
3.中铁第一勘察设计院集团有限公司 交通与市政工程设计研究院, 西安 710043)

摘要: 讨论了影响复合材料拉挤型材及其结构工程应用的关键问题, 包括材料力学性能、结构性能与设计、环境耐久性能和经济性评价 4 个方面。首先, 拉挤型材力学性能直接影响拉挤型材结构的核心竞争力; 第二, 拉挤型材结构件稳定性设计偏于保守, 结构变形受低等级材料影响, 且节点连接方法受材料剪切强度影响较大, 高强度材料或可纳入标准体系; 第三, 拉挤型材环境耐久性能与力学性能存在一定关联, 现行耐久性设计方法缺少对纤维和树脂成分变化的考虑; 最后, 拉挤型材结构经济性评价的关键在于结构自重, 而在刚度控制下材料纵向弹性模量是控制结构自重的关键。基于以上问题, 对拉挤型材及其结构未来发展提出 4 点建议, 包括完善标准体系、提高材料性能、更新设计方法、拓展应用领域。

关键词: 复合材料拉挤型材; 材料力学性能; 结构设计方法; 环境耐久性能; 经济性评价

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)08-4339-17

Key issues in engineering applications of pultruded fiber reinforced polymer composite profiles and their structures

LIU Tianqiao*^{1,2,3}

(1. Research Center for Composite Materials and Structures, Chongqing Research Institute of Beijing University of Technology, Chongqing 401135, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Traffic and Municipal Engineering Design and Research Institute, China Railway First Survey and Design Institute Group Corporation, Xi'an 710043, China)

Abstract: This work aims to address the key issues greatly affecting the engineering applications of pultruded fiber reinforced polymer (PFRP or PGFRP for glass fiber) composite profiles and their structures, including mechanical property of material, structural performance and design, environmental durability, and economic performance evaluation. First, mechanical property of PFRPs has great impact on the core competitiveness of PFRP structures. Second, PFRP structural members are designed to be conservative in terms of the load-carrying capacity, and structural deformation is greatly affected by the low mechanical property of material, thus leading to reduced material efficiency. Additionally, connection method is substantially affected by shear strength of material, and thus, high strength material is recommended to be included in the standard. Third, environmental durability of PFRPs is correlated with their mechanical property, while current design method does not sufficiently address the influence of different fiber and resin systems. Last but not least, structural weight is the key to the evaluation of economic performance of PFRP structures, and longitudinal elastic modulus is the key to the control of structural

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2024-11-25; 录用日期: 2024-11-29; 网络首发时间: 2024-12-13 08:58:48

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241212.002>

基金项目: 重庆市自然科学基金 (CSTB2023NSCQ-MSX0158); 陕西省重点研发计划 (2024SF2-GJHX-55); 重庆市科研机构绩效激励引导专项 (CSTB2023JXL-YFX0079)

Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2023NSCQ-MSX0158); Key R&D Program of Shaanxi Province (2024SF2-GJHX-55); Incentive and Guidance Program of Chongqing Research Institution (CSTB2023JXL-YFX0079)

通信作者: 刘天桥, 博士, 校聘教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料拉挤型材与结构 E-mail: liu_tianqiao@bjut.edu.cn

引用格式: 刘天桥. 复合材料拉挤型材及其结构在工程应用中的关键问题 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(8): 4339-4355.

LIU Tianqiao. Key issues in engineering applications of pultruded fiber reinforced polymer composite profiles and their structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(8): 4339-4355(in Chinese).

weight. Based on above issues, four suggestions are proposed for the future development of PFRP composite profiles and their structures, including improving the standard system, increasing the material property, updating the design method, and expanding the application field.

Keywords: PFRP composite profile; mechanical property; structural design method; environmental durability; economic performance evaluation

复合材料拉挤型材(以下简称“拉挤型材”)得益于轻质、高强、耐腐、低碳等优点^[1],在我国建筑、交通、电力、水利、装备和汽车等领域展现出了较强的应用潜力^[2-7],拉挤工艺和拉挤型材如图1所示。过去40年,工业界和学术界共同见证了拉挤型材及其结构从无到有、从少到多、由点到面的发展历程^[8-10],然而迄今为止拉挤型材尚未形成类似钢材的标准化、体系化和规模化应用。本文以此为背景,讨论拉挤型材及其结构在工程应用中存在的关键问题,并提出未来亟待攻克的技术瓶颈和高价值的研发方向。

材料生产大国发布了《复合材料拉挤型材结构技术规程》T/CECS 692^[13],该标准基于拉挤型材力学性能规定了3种材料等级(即M30、M23和M17级),为我国拉挤型材结构应用提供了技术支持,如表2所示。2022年,欧洲发布了《Design of fibre-polymer composite structures》CEN/TS 19101^[14],该标准以建议形式给出了具有不同纤维体积含量、不同纤维-树脂配方的拉挤型材的弹性模量和强度,如表3和表4所示。

表1 拉挤型材最低力学性能(ASCE Pre-Standard)^[12]

Table 1 Minimum required characteristic mechanical properties for FRP composite shapes (ASCE Pre-Standard)^[12]

#	Mechanical property	Minimum requirement
1	Longitudinal tensile strength/MPa	207
2	Transverse tensile strength/MPa	48
3	Longitudinal tensile modulus/MPa	20 684
4	Transverse tensile modulus/MPa	5 515
5	Longitudinal compressive strength/MPa	207
6	Longitudinal compressive modulus/MPa	20 684
7	Transverse compressive modulus/MPa	6 895
8	In-plane shear strength/MPa	55
9	In-plane shear modulus/MPa	2 758
10	Interlaminar shear strength/MPa	24
11	Longitudinal pin-bearing strength/MPa	145
12	Transverse pin-bearing strength/MPa	124
Pull-through strength per fastener/kN		
13	Plate thickness = 3/8 in	2.89
	Plate thickness = 1/2 in	4.00
	Plate thickness = 3/4 in	5.56

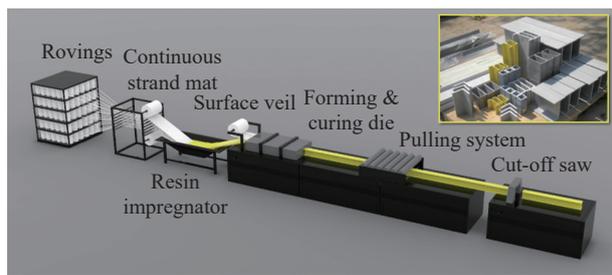


图1 拉挤工艺和纤维增强聚合物拉挤(PFRP)型材^[10]

Fig. 1 Pultrusion process and pultruded fiber reinforced polymer (PFRP) composite profiles^[10]

1 材料力学性能

纤维增强复合材料作为一种材料大类,普遍具有超过钢材的强度和小于铝合金的密度^[11],正是这一性能优势成就了此类材料的核心竞争力和应用驱动力,拉挤型材也不例外。在众多力学性能指标中,纵向弹性模量和强度对拉挤型材结构性能具有较大影响,当结构强度冗余量较大时,弹性模量和结构刚度成为了结构设计的关键因素,因此拉挤型材的纵向弹性模量是其结构设计的关键力学指标(此处纵向弹性模量指拉伸和压缩弹性模量中的较小值)。

世界第一部关于拉挤型材结构的专门标准来自美国土木工程师协会(ASCE),即2010年发布的预标准《Pre-standard for load & resistance factor design (LRFD) of pultruded fiber reinforced polymer (FRP) structures》^[12],该标准规定了拉挤型材最低力学性能,如表1所示。2020年,我国作为复合

由上表可知,美国预标准仅对拉挤型材最低力学性能进行了规定,最低纵向强度和弹性模量仅为207 MPa和20 684 MPa,该强度甚至低于Q235钢的屈服强度;若强度优势无法保证,则拉挤型材结构的竞争力将严重受损。另一方面,我国标准规定了3个材料等级,该等级体系为我国复合材料企业提供了一种生产指南,也为结构工程师提供了一套标准化的材料技术指标。值得指出的是,T/CECS 692给出的材料性能仅为各等级的最低值,当实测值较高时可使用实测值开展结构设计,然而在工程应用中,标准规定的最低力学性能常作为结构工程师的实际设计依据,此时

表 2 拉挤型材力学性能标准值 (T/CECS 692)^[13]Table 2 Standard values of mechanical properties of PFRP composite profiles (T/CECS 692)^[13]

#	Mechanical property	M30	M23	M17
1	Longitudinal tensile strength/MPa	400	300	200
2	Transverse tensile strength/MPa	45	55	45
3	Longitudinal tensile modulus/MPa	30 000	23 000	17 000
4	Transverse tensile modulus/MPa	7 000	7 000	5 000
5	Longitudinal compressive strength/MPa	300	250	200
6	Transverse compressive strength/MPa	70	70	70
7	Longitudinal compressive modulus/MPa	25 000	20 000	15 000
8	Transverse compressive modulus/MPa	7 000	7 000	5 000
9	Interlaminar shear strength/MPa	28	25	20
10	In-plane shear strength/MPa	45	45	45
11	In-plane shear modulus/MPa	2 750	2 750	2 750
12	Longitudinal pin-bearing strength/MPa	180	150	100
13	Transverse pin-bearing strength/MPa	120	100	70
14	Pull-through strength per fastener/kN	$kt/3$	$kt/3$	$kt/3$

Notes: t —Thickness of specimen; k —Coefficient, $k=1$ kN/mm; M30, M23, M17—Material grade.

表 3 由无碱玻纤和不饱和聚酯树脂组成的单向复合材料的弹性模量建议值 (CEN/TS 19101)^[14]Table 3 Indicative values for the elastic moduli of unidirectional plies made of E-glass fibres and polyester resin (CEN/TS 19101)^[14]

#	Fiber volume fraction (V_f)/vol%	Longitudinal modulus/MPa	Transverse modulus/MPa	In-plane shear modulus/MPa	Major Poisson's ratio
1	40	32 000	9 000	3 000	0.34
2	45	35 000	10 000	3 300	0.33
3	50	39 000	12 000	3 700	0.33
4	55	42 000	13 000	4 200	0.32
5	60	46 000	15 000	4 800	0.31
6	65	49 000	17 000	5 500	0.30
7	70	53 000	20 000	6 300	0.30

表 4 单向复合材料的强度建议值 (CEN/TS 19101)^[14]Table 4 Indicative values for the strength properties of unidirectional plies for combinations of reinforcing fibres and resins (CEN/TS 19101)^[14]

#	Mechanical property	E-glass & epoxy ($V_f=60$ vol%)	S-glass & epoxy ($V_f=60$ vol%)	E-glass & isophthalic polyester ($V_f=60$ vol%)	Carbon & epoxy ($V_f=60$ vol%)
1	Longitudinal tensile strength/MPa	1 020	1 620	900	1 830
2	Transverse tensile strength/MPa	40	40	40	57
3	Longitudinal compressive strength/MPa	620	690	360	1 100
4	Transverse compressive strength/MPa	140	140	68	230
5	In-plane shear strength/MPa	60	60	40	71
6	Interlaminar shear strength/MPa	60	80	76	—

由玻璃纤维组成的 M23 和 M17 级材料的纵向强度设计值仅为 192 MPa 和 128 MPa (考虑 T/CECS 692 规定的拉挤型材分项系数 1.25 和环境影响系数 1.25), 该强度均小于 Q235 钢的屈服强度, 或将面临与美国预标准相同的困境。最后, 欧洲标准并未直接规定拉挤型材的力学性能, 而以开放形式给出了各个力学性能的计算方法, 允许结构工程师根据纤维和树脂的种类和含量进行定制化设计, 该方法可充分发挥复合材料“可定制”的优势, 例如 CEN/TS 19101 建议的高强玻璃纤维拉挤

型材的纵向强度可达 1 620 MPa, 碳纤维拉挤型材的纵向强度可达 1 830 MPa; 然而必须指出该方法可能为本就复杂的拉挤型材结构设计增加一道新的“门槛”, 即复合材料力学分析和计算能力。

综上, 在与钢材和铝合金等金属材料竞争中, 拉挤型材在力学性能方面的优势对于其工程应用具有至关重要的作用。鉴于此, 在适应我国标准体系且不提高设计门槛的前提下, 进一步提高拉挤型材的力学性能等级或可为拉挤型材及其结构的广泛应用提供材料基础, 新等级拉挤型材可采

用高性能玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维或其他类型合成纤维^[15-18]及由上述纤维组成的混杂纤维等^[19-20]。

2 结构性能与设计

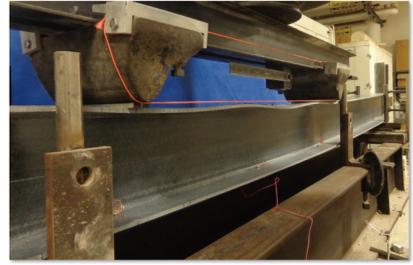
拉挤型材是一种典型的正交各向异性材料, 尽管纵向性能远高于横向, 但纵向弹性模量最高仅为钢材的 1/4 到 1/3 左右, 加之拉挤型材在诞生之初便模仿了型钢截面, 因此拉挤型材构件常为薄壁构件, 较低的弹性模量和薄壁构件形式导致拉挤型材结构件常以稳定性和变形为关键控制因素^[21-24], 其中屈曲失稳破坏如图 2 所示。另一方面, 拉挤型材不可焊接, 且剪切强度较低, 在集中力作用下易发生纵向劈裂, 导致其在节点连接方面存在一定困难^[25-27]。

2.1 稳定性

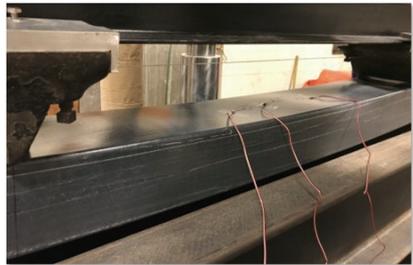
国内外现行标准^[12-14]规定的拉挤型材梁、柱构件的稳定性设计方法均基于 Rayleigh 或 Rayleigh-Ritz 能量法推导而得(两种方法的区别仅限于形函数项数的不同)。对于翼缘板或腹板局部屈曲而言, 能量法的控制方程建立在一个具有特定边界条件的正交各向异性板上, 此时形函数的选择与板的边界条件直接相关, 且形函数需同时考虑板的纵向和横向性能^[28]; 对于整体屈曲而言, 整体屈曲控制的拉挤型材结构件通常具有较高的长细比, 因此能量法控制方程仅考虑材料纵向弹性模量, 此时拉挤型材结构件稳定性分析方法与钢结构相似^[29]。

对于工字形或槽形截面梁构件, 受压翼缘板可假设为一个承受纵向压应力的正交各向异性板, 在纵向上板的两端为简支, 在横向上板的一端为自由边、另一端受腹板约束^[30]; 对于箱形截面梁构件, 受压翼缘板在纵向上的边界条件与工字形截面一致, 但在横向上板的两端则均受腹板约束^[28]。上述梁构件受压翼缘板在横向上的边界约束作用与腹板的抗弯刚度和翼缘板-腹板节点的抗扭刚度有关^[31], 当存在较强的边界约束作用时, 翼缘板屈曲形态类似二次或高次曲线。

对于拉挤型材柱构件, 全截面各翼缘板和腹板均处在受压状态, 因此现行标准^[12-13]保守地假设腹板不能为相邻翼缘提供约束作用, 此时柱构件的翼缘板可假设为在纵向上承受均匀压应力且两端简支, 在横向上一端自由、另一端铰支(工字形或槽形截面)或两端铰支(箱形截面), 此时工



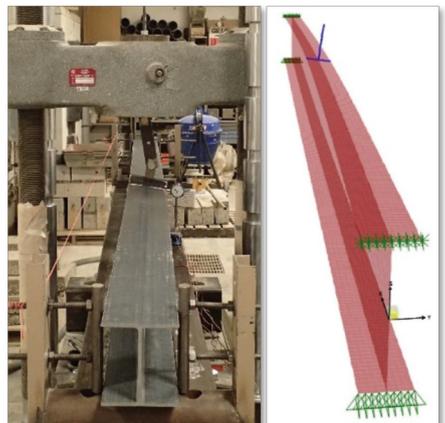
(a) Flange local buckling of pultruded glass fiber-reinforced polymer (PGFRP) I-beam^[22]



(b) Flange local buckling of PGFRP Box-beam^[31]



(c) Flange local buckling of PGFRP I- and Box-columns^[32]



(d) Lateral torsional buckling of PGFRP I-beam^[52]

图 2 拉挤型材结构件屈曲失稳破坏

Fig. 2 Buckling failure of PGFRP structural members

字形或槽形截面的外伸翼缘板屈曲形态类似直线形，而箱形截面的翼缘板或腹板的屈曲形态类似二次曲线。以上描述的屈曲形态即为选择形函数的主要依据。

目前美国预标准和我国标准均依据构件类型(受压或受弯为主)和截面形式(工字形或箱形等)对拉挤型材结构件的稳定性设计方法进行分类,例如美国预标准规定的工字形截面柱构件的翼缘板和腹板局部屈曲强度计算方法如式(1)和(2)所示,我国标准规定的工字形截面柱构件的翼缘板和腹板局部屈曲强度计算方法如式(1)和式(3)所示,其中式(1)考虑的屈曲形态即为直线形,式(2)和(3)考虑的是高次曲线形。中、美两部标准的翼缘板局部屈曲计算方法一致,均考虑了横向上一端铰支、一端自由的边界条件;而我国标准的腹板局部屈曲计算方法更保守(系数为0.22,如式(3)所示),仅为美国预标准的1/6(系数为1.31=0.8×π²/6,如式(2)所示)。

$$f_{cr} = 0.8 \frac{G_{LT}}{(b_f/2t_f)^2} \quad (1)$$

$$f_{cr} = 0.8 \frac{(\pi^2/6) [\sqrt{E_{Lc}E_{Tc}} + \nu_{LT}E_{Tc} + 2G_{LT}]}{(h/t_w)^2} \quad (2)$$

$$f_{cr} = 0.22 \frac{\sqrt{E_{Lc}E_{Tc}} + \nu_{LT}E_{Tc} + 2G_{LT}}{(h/t_w)^2} \quad (3)$$

其中： f_{cr} 为翼缘板或腹板局部屈曲强度； G_{LT} 为面内剪切弹性模量； b_f 为翼缘板宽度； t_f 为翼缘板厚度； E_{Lc} 为纵向压缩弹性模量； E_{Tc} 为横向压缩弹性模量； ν_{LT} 为主泊松比； h 为截面高度； t_w 为腹板厚度。

另一方面，欧洲标准依据正交各向异性板的边界条件规定了相应的计算方法，如图3和式(4)和(5)所示(其中： $f_{i,cr}$ 指翼缘板承受的临界屈曲压应力； b 为翼缘板宽度；SS为简支边界条件；Free为自由端)。其中式(4)可用于计算箱形截面梁构件翼缘板局部屈曲强度或工字形截面柱构件腹板局部屈曲强度；式(5)可用于计算工字形截面梁构件或柱构件翼缘板局部屈曲强度。值得指出的是，欧洲标准和美国预标准在局部屈曲方面均采用了Kollar^[28]提出的计算方法并进行了适当改进(例如公式简化和保守取值)，尽管两者计算结果存在一定差异，但设计原理和计算方法基本一致。

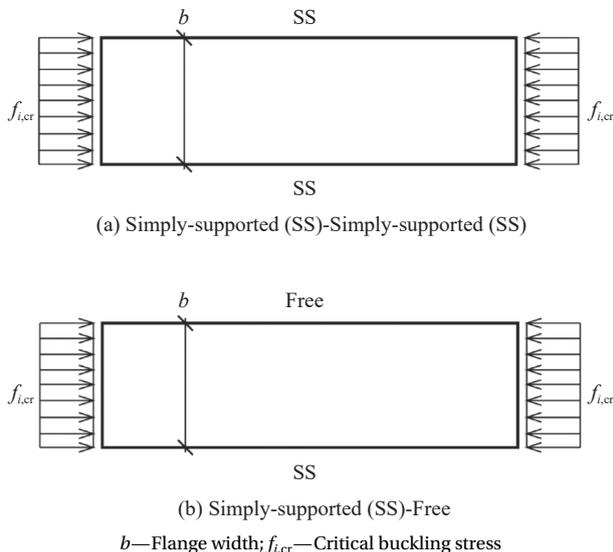


图3 不同边界条件的正交各向异性板^[13]

Fig. 3 Orthotropic plates with different boundary conditions^[13]

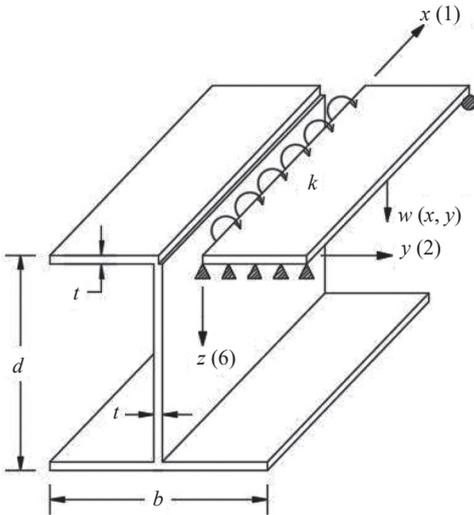
$$SS - SS : f_{cr} = \frac{\pi^2}{tb^2} \left[2\sqrt{D_{11}D_{22}} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \right] \quad (4)$$

$$SS - Free : f_{cr} = \frac{12D_{66}}{tb^2} \quad (5)$$

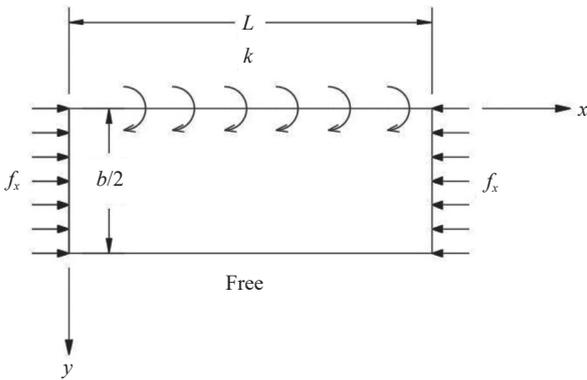
其中： D_{11} 为正交各向异性板纵向抗弯刚度系数； D_{22} 为横向抗弯刚度系数； D_{12} 为纵-横向耦合抗弯刚度系数； D_{66} 为抗扭刚度系数； b 为翼缘板或腹板宽度； t 为翼缘板或腹板厚度。

上述中、美、欧标准对拉挤型材梁、柱构件稳定性计算方法对比试验结果均偏于保守^[30]，造成这一现象的原因主要分为两个方面。首先，对于局部屈曲而言，现行标准对翼缘板和腹板边界位置的约束作用的计算过于保守，例如图3中展示的正交各向异性板在横向上均为简支(或称作铰支)，即发生局部屈曲的翼缘板或腹板在边界处可自由转动，这一假设与事实不符。即使翼缘板-腹板节点存在“纤维-毡”细观构造非均匀分布现象或存在“富树脂”区域，节点处仍具有相当的抗扭刚度，从而约束翼缘板或腹板的扭转。Liu等^[31]通过试验的方法定量测量了壁厚为6.25 mm的箱形截面翼缘板-腹板节点的抗扭刚度，即2.47~3.21 kN/rad，并提出了考虑节点抗扭刚度的局部屈曲计算方法。由此可见，翼缘板和腹板在横向上的边界约束作用介于简支和固支之间，属于一种弹性约束，可使用具有一定抗扭刚度的弹簧表示，如图4所示(其中： x 、 y 和 z 轴分别指翼缘板的纵向、横向和厚度方向， x 轴也称作1-轴， y 轴也称作2-轴， z 轴也称作6-轴)。图4展示了

工字形截面梁构件在受弯作用下发生翼缘板局部屈曲时翼缘板的边界条件, 其中 k 为翼缘板边界处的抗扭刚度, 这一弹性约束可阻止翼缘板的自由扭转; f_x 为翼缘板承受的压应力; L 为翼缘板长度; $w(x,y)$ 为翼缘板的竖向挠度。由图 4 可知, k 的取值直接影响了该翼缘板的屈曲强度, 尽管目前 k 的计算方法并未统一, 但研究证明该值大于 0^[31], 即大于目前标准中规定的简支条件(见图 3 中的 SS)。而对于柱构件, 研究发现即使全截面受压, 柱构件的外伸翼缘板在与腹板交接的节点处仍可受到一定的约束作用, 而非式 (1) 中描述的完全铰接条件^[32]。



(a) Boundary condition of outstanding flange plate



(b) Assumed boundary condition of orthotropic plate

k —Rotational stiffness; t —Plate thickness; d —Section depth; b —Flange width; L —Flange length; f_x —Compressive stress; $w(x,y)$ —Deflection

图 4 工字形截面拉挤型材梁构件翼缘板的边界条件^[29]

Fig. 4 Boundary condition of flange plate of PGFRP I-beam^[29]

稳定性分析与设计是拉挤型材结构设计的关键环节, 美国和中国标准与现行标准体系的编写逻辑更接近, 例如与美国 AISC 《Steel Construction

Manual》^[33] 和中国《钢结构设计规范》GB 50017—2003^[34] 编写方式一致, 因此易于推广与应用; 而欧洲标准要求结构工程师具有一定的复合材料力学分析能力。另一方面, 稳定性设计直接决定拉挤型材结构件的翼缘板最大宽厚比、梁或柱构件最大长细比等几何参数, 对截面尺寸设计具有重要影响, 而现行标准对屈曲强度计算的准确性较保守, 例如式 (1) 这种完全忽略翼缘板-腹板节点抗扭刚度的计算方法^[31]。

综上, 相比偏于保守的美国预标准和欧洲标准, 我国标准在拉挤型材结构件屈曲强度计算方面则更保守, 其中方形截面、双槽截面、槽形截面、工字形截面柱构件的腹板局部屈曲强度设计值仅为美国预标准的 1/6(见 T/CECS 692 中式 5.2.4-2、5.2.6-3、5.2.7-5 和 5.2.9-3^[13])。鉴于此, 拉挤型材结构件稳定性设计方法的准确性亟待提高。

2.2 变形

在满足稳定性的基础上, 仍需保证拉挤型材结构件具有足够的刚度, 以满足标准规定的变形限值。各国标准对于变形的规定并不一致, 且不同领域对同一类型结构件变形的要求也不尽相同。例如, T/CECS 692 规定跨度 5 m 以上梁构件的挠度限值为 $L/250$ (其中 L 为梁构件跨度), 而我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》CJJ69-95^[35] 规定主梁挠度限值为 $L/600$; 另一方面, T/CECS 692 规定结构件层间位移角不宜超过 $H/250$ (其中 H 为柱构件高度), 而《声屏障结构技术标准》GB/T 51335—2018^[36] 规定声屏障结构层间位移角不应大于 $H/200$ 。由此可见, 我国标准 T/CECS 692 对变形限值的规定应作为一种设计参考, 最终变形限值需结合实际工程应用确定。

我国现行标准规定的最高等级拉挤型材(即 M30 级)的纵向弹性模量仅为钢材的 1/7 左右、仅为铝合金的 1/2 左右, 导致在工程应用中常需大幅提高结构件的截面尺寸以达到变形限值对刚度的要求。基于此, 具有更高弹性模量的高性能拉挤型材对于降低材料用量具有重要作用。经计算, 拉挤型材纵向弹性模量每提高 10% (例如从 30 GPa 提升至 33 GPa), 截面惯性矩可降低 9% 左右, 若弹性模量提升至 50 GPa (即提高 67%), 截面惯性矩将减小 60% 左右, 直接降低了所需截面的尺寸。对于复合材料生产企业而言, 提升弹性模量的实际价值远高于理论计算得到的效果, 这

是由于各企业拥有的模具类型和尺寸是有限的,因此在满足用户灵活需求的目标下,通过既有模具实现更高的力学性能通常是更经济的技术手段。

对比各类型截面,包括工字形、矩形(包括长方形和正方形)、槽形、角形和圆形等截面,在材料用量一定的前提下截面惯性矩较高(即抗弯刚度较高)的是工字形和矩形。值得指出的是,在考虑抗弯刚度的同时还需考虑其他影响结构设计因素,首先工字形截面的翼缘板具有自由端,因此其翼缘板局部屈曲强度较同尺寸矩形截面更低,实际材料用量或高于矩形截面;其次,工字形截面的尺寸稳定性常高于矩形截面,这是由于矩形截面的芯模易在拉挤过程中发生偏移,导致各壁板厚度不一致;最后,工字形截面较矩形截面更易于连接,而矩形截面需使用较长的螺杆实现贯通连接^[37],为避免长螺栓的使用,矩形截面还常使用定制化的内插式钢连接件。在实际工程应用中,工字形截面更适用于梁构件,矩形截面更适用于柱构件。

对于梁构件,近年兴起的弯曲拉挤工艺和弯曲拉挤型材可从结构形式上提升构件的抗弯刚度^[38]。研究表明,对比同截面、同跨度的简支梁,弯曲拉挤拱梁的抗弯刚度可以提升1倍以上,这是成拱作用带来的结构性能提升^[39]。弯曲拉挤拱梁在众多领域拥有应用前景,包括大跨空间结构、人行天桥、汽车结构件、工业和农业设施等。

综上,在实际工程应用中变形常成为控制拉挤型材结构设计的决定性因素,变形与稳定性共同决定了拉挤型材的截面尺寸。尽管我国现行标准给出了拉挤型材梁构件挠度限值的参考值,但结构工程师需针对具体应用场景确定最终设计挠度。为保证结构件的变形满足设计要求,制备更大尺寸的模具(可能需要同步更新配套设备)和提升材料的弹性模量是常用技术手段,然而前者相比于后者的经济性较低。

2.3 节点

拉挤型材结构的节点连接方法是复合材料领域的热点问题之一。对于拉挤型材结构而言,“不可焊接”是其不同于钢结构的主要特点之一,目前中、美、欧设计规范共同推荐的连接方法为螺栓连接^[12-14],其设计方法类似于钢结构,但不同于各向同性的钢材,拉挤型材为正交各向异性材

料,纵向强度和弹性模量远大于横向(约为3~4倍),且剪切强度和螺栓孔承压强度较小,约为纵向抗拉强度的10%左右,螺栓连接带来的受力模式易造成应力集中现象,导致拉挤型材易在螺栓孔处劈裂破坏^[40],如图5所示。值得指出的是,尽管螺栓孔承压破坏常先于材料剪切破坏发生,但在实际应用中前者对应的承载力并非节点的极限承载力,即螺孔破坏不代表节点失去承载能力,而材料剪切破坏常导致节点发生最终破坏。

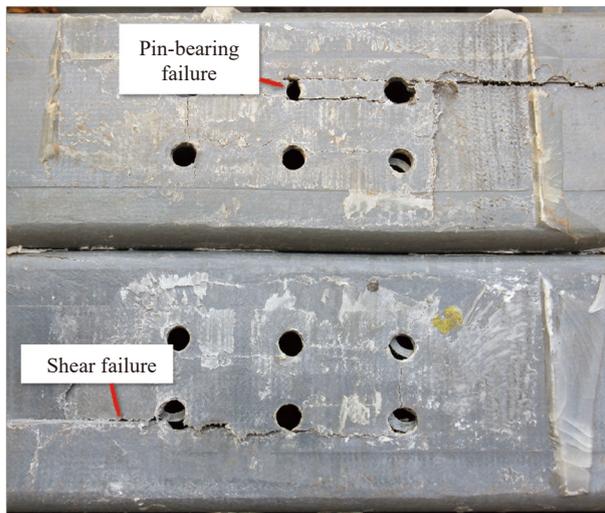


图5 螺栓连接典型破坏模式^[40]

Fig. 5 Typical failure modes of bolted connection^[40]

我国和欧洲规范还推荐了胶粘连接^[13-14],胶粘连接虽可消除螺栓孔带来的应力集中现象,但粘接材料承载力较差,且在普通固化工艺下形成的耐久性能较差,因此胶粘连接须与螺栓连接同时使用,此时胶层仅起到提高节点初始刚度的作用,而节点的极限承载力则完全由螺栓保证^[41]。以上螺栓连接和胶粘连接的特点即为拉挤型材“连接难”的成因。

对于设计使用年限较长的结构,胶粘连接的可靠度不足,因此螺栓连接成为标准规定的唯一选择。尽管存在以上的问题,螺栓连接仍是设计和施工中效率和可靠度最高的连接方法,且近年出现的各类型新型节点连接方式均未能取代传统的螺栓连接方式。对于使用钢螺栓的节点,拉挤型材的剪切性能较大程度上决定该节点的极限承载力。我国标准 T/CECS 692 规定拉挤型材面内剪切强度仅为 45 MPa,该值低于美国预标准规定的最低面内剪切强度 55 MPa(低约 18%),较低的材料剪切强度会导致较低的螺栓连接承载力。我国

标准中面内剪切强度低的原因或可归因于拉挤型材中纤维毡或树脂基体的力学性能不足。尽管各国标准对纤维毡的使用并未做出具体规定,但使用经过设计的连续纤维毡可保证材料的剪切性能及横向力学性能,而短切纤维毡的剪切性能远低于连续纤维毡,尤其低于具有±45°铺层的连续纤维毡。同时,我国企业采用环氧树脂和高模量玻璃纤维制备的拉挤型材的剪切强度可达60~80 MPa,而我国《钢结构设计规范》GB 50017—2003^[34]规定的Q235钢剪切强度设计值为125 MPa,可见拉挤型材剪切强度可达Q235钢的48%~64%。对于螺栓连接节点而言,剪切强度每提高10%(例如从45 MPa提升至50 MPa),节点承载力将同时提高10%左右。

3 环境耐久性能

3.1 标准化设计方法

环氧树脂能够抵抗多种化学物质的侵蚀,包括酸、碱、盐等腐蚀性物质,这使环氧树脂涂层成为钢结构在腐蚀性环境中长期服役的理想选择^[42-43]。因此,由环氧树脂或其他类型高分子树脂基体与增强纤维组成的拉挤型材便具有与生俱来的优秀环境耐久性能^[44-46]。我国标准针对不同环境条件和不同纤维类型规定了不同的强度影响系数,如表5所示。美国预标准和欧洲标准分别规定了潮湿环境对材料性能的影响系数,如表6和表7所示。

表5 环境影响系数(T/CECS 692)^[13]

Table 5 Coefficients for environmental effects (T/CECS 692)^[13]

Environmental condition	Fiber type	Environmental coefficient
Indoor environment	Carbon	1.00
	Glass	1.25
	Basalt	1.25
Normal outdoor environment	Carbon	1.10
	Glass	1.40
	Basalt	1.40
Wet-dry cycles, water immersion, seawater, corrosive environment	Carbon	1.20
	Glass	1.60 (High alkalinity, 2.00)
	Basalt	1.60 (High alkalinity, 2.00)

由上表可见,我国和欧洲标准仅考虑环境作用对材料强度的折减作用,美国预标准同时考虑了对材料强度和模量的折减作用。更重要的是,各国标准针对由同一种纤维或树脂体系制备而成的拉挤型材均使用了统一的折减系数;然而,研

究发现对于具有不同力学性能的拉挤型材而言,其环境耐久性能并不一致^[46]。例如,对于纵向弹性模量达到60 GPa的玻璃纤维拉挤型材而言,其成型工艺水平较高,且原材料组成包括高模量玻璃纤维和环氧树脂,其耐久性能远高于弹性模量17 GPa的普通拉挤型材(例如由普通无碱玻纤和不饱和聚酯树脂组成的低成本材料)。鉴于此,现行标准规定17 GPa的拉挤型材与60 GPa的拉挤型材具有相同的耐久性能,该方法与事实存在差异。

表6 潮湿环境影响系数(ASCE Pre-Standard)^[12]

Table 6 Adjustment factors for moisture condition (ASCE Pre-Standard)^[12]

Reference property	Moisture condition
Vinyl ester material	
Strength	0.85
Elastic modulus	0.95
Polyester material	
Strength	0.80
Elastic modulus	0.90

表7 潮湿环境影响系数(CEN/TS 19101)^[14]

Table 7 Conversion factor for influence of moisture (CEN/TS 19101)^[14]

Exposure class	Conversion factor	Influence of moisture
I	1.00	Indoor exposure with service temperature
		Outdoors exposure with service temperature without: (i) Continuous exposure to water; (ii) Permanent immersion in water;
II	0.85	(iii) Permanent exposure to a relative humidity higher than 80%; (iv) Combined UV-radiation and frequent freeze-thaw cycles
		Continuous exposure to water (or seawater), or permanent immersion in water (or seawater), or permanent exposure to a relative humidity higher than 80% (material temperature up to 25°C)
III	0.60	

3.2 耐久性能与力学性能的关联

拉挤型材的耐久性能不仅与树脂体系有关,还与纤维含量、树脂固化水平、纤维-树脂界面性能等因素有关,这些因素共同作用的结果即表现为材料的力学性能,因此拉挤型材的耐久性能与力学性能之间具有一定的关联,这种关联在国内外老化试验中得到了验证。Liu等^[10]编制了一部包含1 900个数据点的拉挤型材耐久性能数据库,

本文依据该数据库开展了文献调研，以下数据均来自该数据库。

表 8 展示了拉挤型材在 23℃ 和 70℃ 浸水环境加速老化试验中测得的纵向拉伸强度。Shao 等^[47]同时测试了 2 种不同纤维体积分数的拉挤型材，高纤维含量拉挤型材（纤维体积分数 $V_f=58\text{vol}\%$ ）的纵向拉伸强度初始值为 433 MPa，而低纤维含量拉挤型材（ $V_f=37\text{vol}\%$ ）的纵向拉伸强度初始值仅为 187 MPa。当环境温度为 23℃ 和 70℃ 时，试验数据表明在不同老化龄期内，高强度拉挤型材的纵向拉伸强度的折减率基本小于低强度拉挤型材，仅在 23℃ 和老化 107 d 时出现一组异常数据。此外，Chu 等^[48]的老化试验采用了与 Shao 等^[47]相同的老化条件和龄期，Chu 等^[48]采用的拉挤型材

的纵向拉伸强度初始值为 927 MPa，据此可以判断该材料组成中包含更高的纤维含量或更高强度的玻璃纤维，试验数据表明在 28 d、107 d 和 192 d 老化龄期内，该材料纵向拉伸强度的折减率分别为 6.63%、8.96% 和 12.64%，均小于纵向拉伸强度为 433 MPa 的拉挤型材（同类型折减率分别为 9.93%、15.70% 和 17.09%）。以上两组来自不同学者的数据证明了力学性能与耐久性能之间的关联关系。

表 9 展示了另外两组学者在 80℃ 浸水环境中测得的拉挤型材纵向弯曲强度折减率。其中 Xin 等^[49]研究的材料具有高达 1 202 MPa 的初始弯曲强度，而 Gentry 等^[50]采用的材料弯曲强度仅为 775 MPa。试验数据表明，除 28 d 老化龄期时的一

表 8 拉挤型材浸水加速老化试验数据 (纵向拉伸强度)

Table 8 Accelerated aging test data of PGFRP composites subjected to water immersion (Longitudinal tensile strength)

Authors	Materials	Aging temperature/°C	Aging time/d	Longitudinal tensile strength	
				Test data/MPa	Reduction rate/%
Shao et al ^[47]	PGFRP-1 ($V_f=58\text{vol}\%$)	23	Unaged	433	-
			28	390	-9.93
			107	365	-15.70
			192	359	-17.09
			Unaged	187	-
			28	161	-13.90
	PGFRP-2 ($V_f=37\text{vol}\%$)	23	107	164	-12.30
			192	151	-19.25
			Unaged	433	-
			28	278	-35.80
			107	204	-52.89
			192	213	-50.81
PGFRP-1 ($V_f=58\text{vol}\%$)	70	Unaged	187	-	
		28	91	-51.34	
		107	86	-54.01	
		192	69	-63.10	
		Unaged	927	-	
		35	866	-6.63	
Chu et al ^[48]	PGFRP	23	105	844	-8.96
			210	810	-12.64

表 9 拉挤型材浸水加速老化试验数据 (纵向弯曲强度)

Table 9 Accelerated aging test data of PGFRP composites subjected to water immersion (Longitudinal flexural strength)

Authors	Materials	Aging temperature/°C	Aging time/d	Longitudinal flexural strength	
				Test data/MPa	Reduction rate/%
Xin et al ^[49]	PGFRP	80	Unaged	1 202	-
			28	828	-31.11
			107	942	-21.67
			192	760	-36.76
			Unaged	775	-
Gentry et al ^[50]	PGFRP	80	28	623	-19.69
			107	480	-38.05
			192	336	-56.64

组异样数据以外, 在 107 d 和 192 d 老化龄期内高强度拉挤型材的纵向弯曲强度折减率为 21.67% 和 36.76%, 均小于低强度拉挤型材的 38.05% 和 56.64%。同时, 在 28 d、107 d 和 192 d 老化龄期内, Xin 等^[49]的 1 202 MPa 材料在 80℃ 环境下的纵向弯曲强度折减率(即 31.11%、21.67% 和 36.76%)还小于 Shao 等^[47]的 433 MPa 材料在 70℃ 环境下的纵向拉伸强度折减率(即 35.80%、52.89% 和 50.81%), 考虑弯曲强度常为拉伸强度和压缩强度中的较小值。以上试验数据进一步证明了拉挤型材力学性能与耐久性能之间存在的关联关系。

表 10 展示了 20℃、40℃ 和 80℃ 浸水环境中测得的拉挤型材面内剪切强度。Cabral-Fonseca 等^[51]研究了 2 种不同纤维体积含量和初始强度的拉挤型材, 其中纤维体积含量为 68vol% 的材料剪切强度为 38.50 MPa, 而纤维体积含量为 69vol% 的材料剪切强度为 39.20 MPa。在 3 种不同环境温度下及 3 个不同老化龄期内, 测得的 9 组数据均证明高强度拉挤型材的面内剪切强度的折减率小于低强度拉挤型材。因此, 本试验再次证明拉挤型材力学性能与耐久性能之间存在一定的关联关系。

表 10 拉挤型材浸水加速老化试验数据 (面内剪切强度)^[51]

Table 10 Accelerated aging test data of PGFRP composites subjected to water immersion (In-plane shear strength)^[51]

Materials	Aging temperature/℃	Aging time/d	Longitudinal tensile strength	
			Test data/MPa	Reduction rate/%
PGFRP-1 ($V_f = 68\text{vol}\%$)	20	Unaged	38.50	-
		7	30.92	-19.68
		14	30.07	-21.89
		28	33.65	-12.60
PGFRP-2 ($V_f = 69\text{vol}\%$)	20	Unaged	39.20	-
		7	37.77	-3.64
		14	32.49	-17.12
		28	39.49	0.75
PGFRP-1 ($V_f = 68\text{vol}\%$)	40	Unaged	38.50	-
		7	32.23	-16.28
		14	23.65	-38.58
		28	27.60	-28.30
PGFRP-2 ($V_f = 69\text{vol}\%$)	40	Unaged	39.20	-
		7	35.36	-9.80
		14	26.24	-33.07
		28	30.27	-22.79
PGFRP-1 ($V_f = 68\text{vol}\%$)	60	Unaged	38.50	-
		7	22.98	-40.32
		14	19.96	-48.16
		28	22.22	-42.29
PGFRP-2 ($V_f = 69\text{vol}\%$)	60	Unaged	39.20	-
		7	26.71	-31.87
		14	20.85	-46.81
		28	23.25	-40.70

综上, 在已知拉挤型材环境耐久性性能优于传统金属材料的前提下, 如何在现行标准体系下充分发挥其耐久性优势便成为了拉挤型材结构耐久性设计的关键。然而, 现行标准规定的折减系数法在实际应用中表现出了一定不足, 即折减系数法忽视了材料配方和固化工艺的影响, 即忽视了高性能玻璃纤维和高性能树脂基体对拉挤型材耐久性的提升作用, 例如对普通无碱玻纤和高模量玻纤使用同样的折减系数及对不饱和聚酯树脂和乙烯基树脂使用同样的折减系数等。同时, 我国

标准未规定拉挤型材弹性模量的老化规律与折减方法。

鉴于此, 应进一步优化拉挤型材耐久性设计方法, 细化不同纤维类型和含量、不同树脂基体和固化水平及不同耐腐涂层对材料性能的影响。同时, 可借鉴美国预标准和欧洲标准中对加速老化试验的使用, 当开展加速老化试验并获得设计使用寿命时的材料剩余性能时, 标准应允许使用实测得到的剩余性能作为强度和弹性模量的设计值。另一方面, 国内外研究证明拉挤型材的环境

耐久性能与力学性能之间存在一定的关联，考虑实际工程应用常需开展力学性能测试，因此可基于两者之间的关联建立耐久性能预测方法，该方法或可避免耗时更长的材料老化试验。

4 经济性评价

经济性是推动拉挤型材结构应用的关键因素。在实际工程应用中，拉挤型材结构常与钢结构对比分析，本文以工字形截面拉挤型材梁构件和钢梁构件为例，通过设计案例对比评价两种材料的经济性。

本文考虑了从 1 至 20 m 跨度的 20 根简支梁构件，并选择人行天桥为应用场景。梁间距假设为 1 m，设计荷载包括梁的自重 (DL)、桥面铺

装 2 kN/m^2 (DL) 及人群荷载 4 kN/m^2 (LL)，拉挤型材的密度为 $2.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，钢的密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，挠度计算考虑的荷载组合系数为 1.0 DL+1.0 LL。两种梁构件跨中挠度限值均为 $L/250$ 。拉挤型材纵向弹性模量为 50 GPa，钢材弹性模量为 210 GPa。在等刚度设计原则下，拉挤型材工字梁和钢工字梁的设计如表 11 和表 12 所示，两种梁构件的自重如图 6 所示。在实际应用中，梁的整体屈曲可以通过安装侧向约束的方法予以避免^[52]，因此本文暂不考虑整体屈曲；而局部屈曲则需通过控制翼缘板的宽厚比予以限制，因此本文依据现有研究结论将拉挤型材工字梁翼缘板的宽厚比限制在 8 以下^[53]。

表 11 工字形截面拉挤型材梁设计 (50 GPa)

Table 11 PGFRP I-beam design (50 GPa)

Span/m	Section depth/mm	Flange width/mm	Plate thickness/mm	Deflection limit/mm	Mid-span deflection/mm	Beam mass/kg
1	58	50	5	4	3.94	1
2	94	80	10	8	7.96	9
3	140	110	10	12	11.94	20
4	186	140	10	16	15.97	36
5	226	170	11	20	19.62	60
6	272	180	12	24	23.64	88
7	316	190	13	28	27.81	122
8	360	200	14	32	31.74	164
9	396	220	15	36	35.82	218
10	432	240	16	40	39.64	282
11	482	250	16	44	43.80	334
12	506	270	17	48	49.81	413
13	554	280	18	52	51.79	505
14	592	290	19	56	55.80	603
15	642	300	19	60	59.63	686
16	678	310	20	64	63.84	805
17	714	320	21	68	67.95	937
18	764	330	21	72	71.63	1 045
19	798	340	22	76	75.99	1 199
20	828	360	23	80	79.63	1 382

上述案例分析表明，在 1 至 20 m 跨度范围内，拉挤型材工字梁的自重是钢工字梁的 50.65% (该值为 20 个案例的平均值，变异系数为 0.04)。若将拉挤型材的纵向弹性模量降低为 30 GPa (即我国现行标准规定的最高等级)，此时拉挤型材工字梁的设计如表 13 所示，经计算可知拉挤型材工字梁的自重是钢工字梁的 57.34% (变异系数为 0.04)。然而，30 GPa 拉挤型材的截面高度最高 1 034 mm，对比 50 GPa 拉挤型材的最高截面 828 mm 提升了 25%。考虑国内目前拉挤型材工程使用的最大截面仅为 800 mm 高左右^[54]，因此在考虑设备生产

能力相同的情况下将拉挤型材截面高度限制在 850 mm 以下，重新对跨度 17 至 20 m 的 4 根梁进行限高度设计 (表 13)，此时这 4 根梁的自重分别为钢梁的 64.75%、68.54%、77.76% 和 84.20%。

钢结构成本包括钢材成本及钢结构加工成本，总计约为钢材成本的 1 倍，约为 1 万元/吨 (不考虑钢材防腐成本)。拉挤型材出厂价包括加工成本，其材料成本约为钢结构成本的 1 倍以上，环氧树脂基拉挤型材的成本约为 2 万至 2 万 5 千元/吨 (不饱和聚酯树脂基拉挤型材的成本则更低)。若拉挤型材结构的自重达到钢结构的 50%，则两种

表 12 工字形截面钢梁设计 (210 GPa)
Table 12 Steel I-beam design (210 GPa)

Span/m	Section depth/mm	Flange width/mm	Plate thickness/mm	Deflection limit/mm	Mid-span deflection/mm	Beam mass/kg
1	46	20	5	4	3.60	3
2	76	30	10	8	7.54	18
3	104	50	10	12	11.46	43
4	138	55	11	16	15.69	78
5	176	60	11	20	19.78	118
6	210	65	12	24	23.58	179
7	248	70	12	28	27.65	240
8	280	75	13	32	31.55	330
9	318	80	13	36	35.55	415
10	348	85	14	40	39.62	539
11	386	90	14	44	43.56	650
12	414	95	15	48	47.87	811
13	452	100	15	52	51.76	952
14	480	105	16	56	55.85	1 157
15	518	110	16	60	59.70	1 330
16	546	115	17	64	63.62	1 584
17	584	120	17	68	67.46	1 792
18	610	125	18	72	71.83	2 096
19	648	130	18	76	75.67	2 341
20	674	135	19	80	79.99	2 703

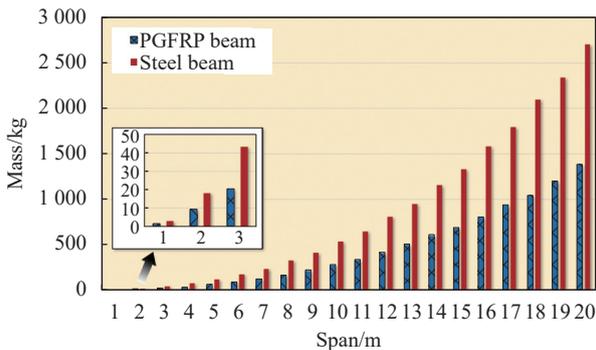


图 6 工字形筒支拉挤型材梁与钢梁质量对比

Fig. 6 Mass comparison of simply-supported PGFRP and steel I-beams

结构的材料成本较接近，或拉挤型材结构高出 25% 左右；若拉挤型材结构自重为钢结构的 60%，则其成本将比钢结构高 20% 至 50%；若拉挤型材结构自重为钢结构的 70%，则其成本将超过钢结构 40% 至 75%；若拉挤型材结构自重为钢结构的 80%，则其成本将比钢结构高 60% 至 100%。表 11 中 50 GPa 的拉挤型材工字梁成本与钢梁较接近，或高出 20% 左右；然而表 13 中 30 GPa 的拉挤型材工字梁普遍比钢梁成本高 20% 至 50% 左右。

综上，拉挤型材结构经济性的关键在于结构自重，而实现结构减重的最有效方法是提高材料纵向弹性模量（考虑刚度控制的情况），若从 30 GPa 提高至 50 GPa，则拉挤型材结构质量将从

钢结构的 60% 降低为 50% 左右，此时拉挤型材结构成本将从钢结构的 120%~150% 降低为 100%~125%，降低的成本将大幅提升拉挤型材结构的市场竞争力。若拉挤型材纵向弹性模量提升至 55 GPa，则其材料成本或可与钢结构达到同一水平，加之拉挤型材的运输、施工、维护成本远低于同类型钢结构，则拉挤型材结构经济性或将超越同类型钢结构。

5 发展现状及发展方向

5.1 发展历程和现状

中国复合材料工业协会前任秘书长陈博先生将我国拉挤技术的发展历程分为了 3 个阶段^[55]，包括：(1) 初试阶段，即 20 世纪 60 至 70 年代，生产了 25 mm×40 mm 的槽形拉挤型材与直径为 8~20 mm 的圆形管材；(2) 探索阶段，即 20 世纪 80 年代，使用自主研发的拉挤设备生产了小直径圆形、槽形和椭圆形拉挤型材；(3) 向深度和广度进军阶段，即 21 世纪以来，在经典拉挤技术基础上衍生出拉挤-缠绕、在线编织-拉挤、拉挤非金属模具微波加热等技术，面向国内和国外两个市场拓宽了应用领域。

正如陈老先生所述，我国拉挤技术目前已达到“有深度、有广度”的新阶段，开发了一系列具有高力学性能和特殊服役功能的拉挤型材产品，

表 13 工字形截面拉挤型材梁设计 (30 GPa)

Table 13 PGFRP I-beam design (30 GPa)

Span/m	Section depth/mm	Flange width/mm	Plate thickness/mm	Deflection limit/mm	Mid-span deflection/mm	Beam mass/kg
1	72	50	5	4	3.95	2
2	108	100	10	8	7.83	12
3	170	120	10	12	11.79	23
4	228	150	10	16	15.78	41
5	282	170	11	20	19.73	66
6	338	180	12	24	23.95	97
7	394	190	13	28	27.90	136
8	448	200	14	32	31.94	184
9	494	220	15	36	35.88	244
10	540	240	16	40	39.58	316
11	602	250	16	44	43.80	377
12	644	270	17	48	47.78	469
13	692	280	18	52	51.83	569
14	740	290	19	56	55.75	682
15	800	300	19	60	59.99	776
16	848	310	20	64	63.68	914
17	892	320	21	68	67.99	1 064
18	954	330	21	72	71.75	1 188
19	998	340	22	76	75.88	1 366
20	1 034	360	23	80	79.95	1 571
17*	850	340	23	68	67.84	1 160
18*	850	398	25	72	71.78	1 436
19*	850	430	29	76	75.56	1 821
20*	850	470	33	80	79.54	2 276

Note: * indicates re-designed I-beams, considering the largest section that is available in the market.

例如具有高力学性能的风电叶片大梁板、具有高阻燃性的地铁疏散平台及兼顾耐久性和力学性能的复合材料冷却塔等，如图 7 所示^[56]。

另一方面，我国拉挤型材产业表现出两点现象。首先，拉挤型材的发展历程相比于混凝土和钢材而言较“年轻”，尤其相比于覆盖面广、执行力强、可信度高的钢结构标准体系而言，拉挤型材相关标准体系尚未完善。据不完全统计，钢结构领域包含国家标准、行业标准、省级地方标准、团体标准共约 250~300 部，而拉挤型材相关标准数量远小于钢结构标准。为支持拉挤型材的广泛应用，各个细分领域仍需专业性强、针对性强的产品测试和应用标准。第二，国外领先的拉挤企业大多具备完整的产品研发能力，例如美国 Strongwell、Creative 和 Bedford，丹麦 Fiberline，德国 Thomas-Technik 及芬兰 Exel Composites 等，以上企业各自编制了企业级的拉挤型材结构应用技术指南，可为应用端提供成套解决方案。相比之下，我国企业尚未具备如此完整的研发能力，在缺少研发基础的情况下生产部门常通过试验的方法弥补研发的工作。

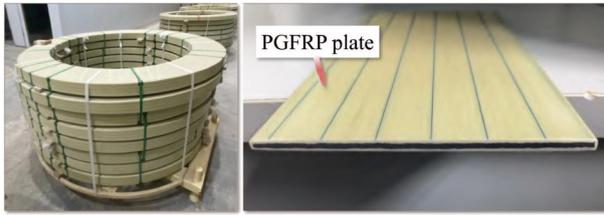
5.2 未来探索方向

本文在材料力学性能、结构性能与设计、环境耐久性能和经济性评价这 4 个方面讨论了拉挤型材及其结构应用中存在的关键问题。基于此，本文对未来工作提出 4 点建议：

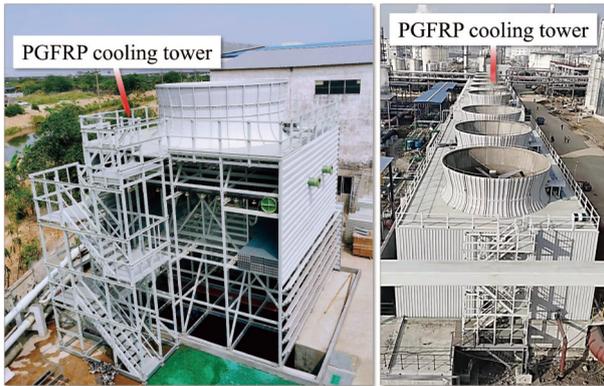
(1) 完善标准体系。现行拉挤型材相关标准在细分领域常表现出专业性不足、针对性不足等问题，导致众多新应用无标准可依，尽管高校等科研机构具备一定的结构研发和工程示范能力，但不足以支撑全国范围内的拉挤型材生产和应用，因此亟需企业在标准制订环节中发挥更大力量；

(2) 提高材料性能。拉挤型材结构的核心竞争力在于以更轻的质量满足设计要求，其中材料纵向弹性模量扮演着至关重要的角色，直接决定了结构件的稳定性、变形和经济性。因此，突破现行标准、提升材料性能是未来拉挤型材结构广泛应用的前提；

(3) 更新设计方法。国内外拉挤型材结构设计标准仍存在“过于保守”的现象，尽管拉挤型材产品质量和性能存在一定离散性，但过于保守的设计方法实际限制了拉挤型材结构向更高、更大、



(a) PGFRP plate for spar cap of wind turbine blade

(b) PGFRP evacuation platform^[56]

(c) PGFRP cooling tower

图7 代表性拉挤型材产品

Fig. 7 Representative PGFRP products

更强发展的可能,允许高性能材料发挥更好的作用,应成为新设计方法的目标;

(4) 拓展应用领域。随着我国产业升级的深入进行,拉挤型材这种高性能复合材料应进一步拓展应用领域,包括新能源汽车制造、船舶和航天器制造、军事装备制造和基础设施升级等,未来新应用需充分发挥拉挤型材的超高强度、超轻质量、超高耐腐蚀性能和电磁绝缘等优势性能。

6 结论

本文以复合材料拉挤型材的工程应用为立足点,讨论了影响拉挤型材及其结构应用的关键问题,涉及材料力学性能、结构性能与设计、环境耐久性能和经济性评价4个方面。基于以上问题,本文对拉挤型材及其结构的未来发展提出了4点建议。本文主要结论如下:

(1) 拉挤型材众多力学性能中纵向弹性模量具有突出作用,直接影响拉挤型材结构件的稳定性、变形和经济性,因此提升拉挤型材纵向弹性模量是未来材料研发的重点;

(2) 拉挤型材是正交各向异性材料,其结构设计重点关注屈曲失稳、变形和节点连接问题,在现有设计方法的基础上应进一步研发准确性高、实用性高的设计 and 应用方法;

(3) 拉挤型材的环境耐久性能与力学性能具有较强的关联关系,建议未来标准充分考虑材料配方等因素对拉挤型材环境耐久性能的影响,充分发挥高性能材料的高耐久性能;

(4) 经济性是影响拉挤型材及其结构广泛应用的关键,而结构轻量化是经济性的关键,提升材料的力学性能和设计方法的准确性可进一步发挥轻量化优势。

拉挤型材及其结构自本世纪起进入了快速发展阶段,现今将进入一个全新的发展阶段。在新的阶段里,技术革新、应用拓展、行业整合预期将成为主旋律,这对产业链上的各个环节提出了更高的要求,以进一步完善标准体系、提高材料性能、更新设计方法、拓展应用领域。

参考文献:

- [1] LIU T Q, TANG J T, ZHANG S, et al. Carbon emissions of durable FRP composite structures in civil engineering[J]. *Engineering Structures*, 2024, 315: 118482.
- [2] HOLLAWAY L C. A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(12): 2419-2445.
- [3] CAPRANI C C, NGAN J W, AHMADI E, et al. Design, construction and performance of the Monash pultruded glass fibre-reinforced polymer footbridge[J]. *Structures*, 2023, 51: 970-984.
- [4] 齐俊伟,李勇,肖军.先进拉挤成形技术及其在大飞机复合材料结构中的应用[J].*航空制造技术*,2011(15):58-60.
QI Junwei, LI Yong, XIAO Jun. Advanced pultrusion technology used on large aircraft composite structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(15): 58-60(in Chinese).
- [5] 黄克均,张建伟.拉挤成型工艺及应用[J].*工程塑料应用*,1997(3):54-57.
HUANG Kejun, ZHANG Jianwei. Pultrusion technology and its application[J]. *Engineering Plastics Application*, 1997(3): 54-57(in Chinese).

- [6] 张磊, 孙清, 赵雪灵, 等. 纤维增强树脂基复合材料输电杆塔材料选型 [J]. 电力建设, 2011, 32(2): 1-5.
ZHANG Lei, SUN Qing, ZHAO Xueling, et al. Material selection for transmission tower made of fiber reinforced plastics[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(2): 1-5(in Chinese).
- [7] 万水, 胡红, 周荣星. FRP 桥面板结构特点与实例 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005(1): 17-21.
WAN Shui, HU Hong, ZHOU Rongxing. Structural characteristics of FRP bridge decks and its application instance in bridge engineering[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005(1): 17-21(in Chinese).
- [8] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展 [J]. 土木工程学报, 2006(3): 24-36.
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006(3): 24-36(in Chinese).
- [9] 刘伟庆, 方海, 方园. 纤维增强复合材料及其结构研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 1-16.
LIU Weiqing, FANG Hai, FANG Yuan. Research progress of fiber-reinforced composites and structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 1-16(in Chinese).
- [10] LIU T Q, LIU X, FENG P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107958.
- [11] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007(1): 1-12(in Chinese).
- [12] American Society of Civil Engineers (ASCE). Pre-standard for load & resistance factor design (LRFD) of pultruded fiber reinforced polymer (FRP) structures[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [13] 清华大学, 中冶建筑研究总院有限公司. 复合材料拉挤型材结构技术规程: T/CECS 692—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Tsinghua University, Central Research Institute of Building and Construction. Composite pultrusion profile structure technical specification: T/CECS 692—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020(in Chinese).
- [14] European Committee for Standardization (CEN). Design of fibre-polymer composite structures: CEN/TS 19101[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2022.
- [15] 邹汉涛, 孟家光. 高性能纤维的性能及其应用 [J]. 纺织科学研究, 2001(4): 23-31.
ZOU Hantao, MENG Jiaguang. Properties and applications of high performance fibers[J]. Textile Science Research, 2001(4): 23-31(in Chinese).
- [16] 祖群. 高性能玻璃纤维研究 [J]. 玻璃纤维, 2012(5): 16-23.
ZU Qun. Research on high performance glass fibers[J]. Fiber Glass, 2012(5): 16-23(in Chinese).
- [17] 雷瑞, 郑化安, 付东升. 高性能纤维增强复合材料应用的研究进展 [J]. 合成纤维, 2014, 43(7): 37-40.
LEI Rui, ZHENG Hua'an, FU Dongsheng. Application of high performance fiber reinforced composite materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2014, 43(7): 37-40(in Chinese).
- [18] 杨勇新, 岳清瑞. 玄武岩纤维及其应用中的几个问题 [J]. 工业建筑, 2007(6): 1-4.
YANG Yongxin, YUE Qingrui. Application and study of basaltic fiber reinforced polymer[J]. Industrial Construction, 2007(6): 1-4(in Chinese).
- [19] 杨建中, 熊光晶, 严州, 等. 高强玻璃纤维/碳纤维混杂复合材料加固混凝土梁的抗弯试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004(7): 18-22, 34.
YANG Jianzhong, XIONG Guangjing, YAN Zhou, et al. Experimental study on flexural strength of hybrid CF/SGF composite strengthening concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(7): 18-22, 34(in Chinese).
- [20] 张博明, 李嘉, 李煦. 混杂纤维复合材料最优纤维混杂比例及其应用研究进展 [J]. 材料工程, 2014(7): 107-112.
ZHANG Boming, LI Jia, LI Xu. Optimum mix ratio of hybrid fiber reinforced polymer composites and their re-searching progress[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(7): 107-112(in Chinese).
- [21] ASCIONE F, FEO L, LAMBERTI M, et al. A closed-form equation for the local buckling moment of pultruded FRP I-beams in major-axis bending[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 97: 292-299.
- [22] TURVEY G J, ZHANG Y. A computational and experimental analysis of the buckling, postbuckling and initial failure of pultruded GRP columns[J]. Computers & Structures, 2006, 84(22-23): 1527-1537.
- [23] LIU T. Stability behavior of pultruded glass-fiber reinforced polymer I-sections subject to flexure[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2017.
- [24] BANK L C, YIN J, NADIPPELLI M. Local buckling of pultruded beams—Nonlinearity, anisotropy and inhomogeneity[J]. *Construction and Building Materials*, 1995, 9(6): 325-331.
- [25] 相敏, 唐丽娜, 章一萍, 等. FRP 拉挤型材及其节点连接技术研究进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2024, 49(4): 13-19.
XIANG Min, TANG Lina, ZHANG Yiping, et al. Research progress of FRP pultrusion profiles and their joint connection techniques[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2024,

- 49(4): 13-19(in Chinese).
- [26] 刘玉擎, 都骛, 辛灏辉, 等. 拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 223-229.
LIU Yuqing, DU Ao, XIN Haohui, et al. Experiment on bolted joints of pultruded GFRP laminates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 223-229(in Chinese).
- [27] 方海, 徐超, 孙慧明, 等. 复合材料拉挤方管型材螺栓节点承载力试验 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 809-817.
FANG Hai, XU Chao, SUN Huiming, et al. Experiment on bearing capacity of bolted joints for pultruded composite square profile[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 809-817(in Chinese).
- [28] KOLLAR L P. Local buckling of fiber reinforced plastic composite structural members with open and closed cross sections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(11): 1503-1513.
- [29] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of elastic stability[M]. Tokyo: McGraw Hill Kogakusha, 1961: 348-429.
- [30] LIU T Q, VIEIRA J D, HARRIES K A. Predicting flange local buckling capacity of pultruded GFRP I-sections subject to flexure[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(4): 04020025.
- [31] LIU T Q, HARRIES K A. Flange local buckling of pultruded GFRP box beams[J]. *Composite Structures*, 2018, 189: 463-472.
- [32] CARDOSO D, HARRIES K A, BATISTA E M. Compressive strength equation for GFRP square tube columns[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 59: 1-11.
- [33] American Institute of Steel Construction (AISC). Steel construction manual, 14th Edition[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2011.
- [34] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB 50017—2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003[S]. Beijing: China Planning Press, 2003(in Chinese).
- [35] 北京市市政工程研究院. 城市人行天桥与人行地道技术规范: CJJ69-95[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
Beijing Municipal Engineering Research Institute. Technical specifications of urban pedestrian overcrossing and underpass: CJJ69-95[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996(in Chinese).
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 声屏障结构技术标准: GB/T 51335—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for noise barrier structure: GB/T 51335—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018(in Chinese).
- [37] 冯鹏, 田野, 覃兆平. 纤维增强复合材料拉挤型材架桥静动力性能研究 [J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 36-41.
FENG Peng, TIAN Ye, QIN Zhaoping. Static and dynamic behavior of a truss bridge made of FRP pultruded profiles[J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(6): 36-41(in Chinese).
- [38] LIU T Q, FENG P, WU Y, et al. Developing an innovative curved-pultruded large-scale GFRP arch beam[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113111.
- [39] LIU T Q, FENG P, BAI Y, et al. Flexural performance of curved-pultruded GFRP arch beams subjected to varying boundary conditions[J]. *Engineering Structures*, 2024, 308: 117962.
- [40] FENG P, WU Y, DING Y, et al. Quasi-plastic flexural behavior of adhesive-bolt hybrid connection for large scale pultruded GFRP frame[J]. *Engineering Structures*, 2021, 238: 112200.
- [41] 赵馨怡, 黄盛楠, 冯鹏, 等. 复合材料胶栓混合连接机理的试验研究 [J]. 工程力学, 2015, 32(S1): 314-321.
ZHAO Xinyi, HUANG Shengnan, FENG Peng, et al. Experimental research on hybrid connecting method for FRP constructional elements[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(S1): 314-321(in Chinese).
- [42] 陈岗军, 陈彤. 海洋平台腐蚀特点分析及涂料涂装工艺应用 [J]. 船海工程, 2010, 39(3): 122-124.
CHEN Gangjun, CHEN Tong. On the features of the offshore platform corrosion and paint coating[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2010, 39(3): 122-124(in Chinese).
- [43] 张伯权, 李勇, 付红. 钢结构桥梁的防腐蚀方法 [J]. 世界桥梁, 2006(3): 67-70.
ZHANG Boquan, LI Yong, FU Hong. Methods of corrosion protection for steel structure bridges[J]. *World Bridges*, 2006(3): 67-70(in Chinese).
- [44] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2005(5): 520-526.
REN Huitao, YAO Qianfeng, HU Anni. Experimental study on durability of fiber reinforced polymer[J]. *Journal of Building Materials*, 2005(5): 520-526(in Chinese).
- [45] 岳清瑞, 杨勇新. 纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 8-15.
YUE Qingrui, YANG Yongxin. Introduction to durability of concrete strengthened with fiber reinforced polymers[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(6): 8-15(in Chinese).
- [46] 于峰, 牛荻涛. FRP 材料耐久性试验研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(6): 22-23, 36.
YU Feng, NIU Ditao. Experimental study on durability of fiber reinforced polymer[J]. *Fiber Reinforced Plastics/*

- Composites, 2008(6): 22-23, 36(in Chinese).
- [47] SHAO Y, KOUADIO S. Durability of fiberglass composite sheet piles in water[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(4): 280-287.
- [48] CHU W, WU L, KARBHARI V M. Durability evaluation of moderate temperature cured E-glass/vinylester systems[J]. *Composite Structures*, 2004, 66(1-4): 367-376.
- [49] XIN H, LIU Y, MOSALLAM A, et al. Hygrothermal aging effects on flexural behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer laminates in bridge applications[J]. *Construct and Building Materials*, 2016, 127: 237-247.
- [50] GENTRY T R, BANK L C, BARKATT A, et al. Accelerated test methods to determine the long-term behavior of composite highway structures subject to environmental loading[J]. *Journal of Composites Technology and Research*, 1998, 20(1): 38-50.
- [51] CABRAL-FONSECA S, CORREIA J R, RODRIGUES M P, et al. Artificial accelerated ageing of GFRP pultruded profiles made of polyester and vinylester resins: Characterisation of physical-chemical and mechanical damage[J]. *Strain*, 2011, 48(2): 162-173.
- [52] LIU T Q, VIEIRA J D, HARRIES K A. Lateral torsional buckling and section distortion of pultruded GFRP I-sections subject to flexure[J]. *Composite Structures*, 2019, 225: 111151.
- [53] VIEIRA J, LIU T Q, HARRIES K A. Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 2017, 171(11): 855-866.
- [54] 秦珩, 刘天桥, 于涛峰, 等. 超轻大尺寸复合材料拉挤型材在高层建筑外挂构架梁中的应用研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2023(1): 100-106.
- QIN Heng, LIU Tianqiao, YU Taofeng, et al. Application of ultra-lightweight and large-scale pultruded GFRP profile for external frame beam in high-rise buildings[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(1): 100-106(in Chinese).
- [55] 陈博. 我国复合材料拉挤成型技术及应用发展情况分析 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014 (9): 34-41.
- CHEN Bo. Development of the composites pultrusion processes & applications in China[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(9): 34-41(in Chinese).
- [56] LIU T Q, WANG R, ZHEN S, et al. A binary resin system of epoxy and phenol-formaldehyde for improving the thermo-mechanical behavior of FRP composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 389: 131790.