

混杂纤维复合材料最优纤维混杂比例及其应用研究进展

Optimum Mix Ratio of Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites and Their Researching Progress

张博明, 李 嘉, 李 煦
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)
ZHANG Bo-ming, LI Jia, LI Xu
(Materials Science and Engineering School,
Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要: 混杂纤维复合材料以其性能和低成本等优势近期取得了快速发展和应用。纤维混杂比例不仅影响构件的性能, 同时关乎成本。本文介绍了混杂纤维复合材料的性能优势, 分别对复合材料最佳性能和最佳成本时的纤维混杂比例的研究进展进行了综述, 并介绍了混杂纤维复合材料的应用近况, 提出了混杂纤维复合材料目前在发展中的不足, 对其发展方向进行了展望。

关键词: 混杂纤维复合材料; 最优混杂比; 性能与成本

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.07.019

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)07-0107-06

Abstract: Hybrid composites had been developed rapidly and used widely due to their low cost and good performance. The proportion of fibers not only affects the properties, but also the costs. This article described the advantages of performance of the hybrid composites. The suitable proportion led to the best performance and the best proportion led to the suitable costs from reports were also been described. The latest application and the disadvantage of the hybrid composites were introduced. This paper presents a review of the future of hybrid composites.

Key words: hybrid composites; the best proportion; property and cost

纤维增强树脂基复合材料(FRP)因其比强度和比模量高、耐腐蚀、抗疲劳性、减震性能好等优点,已经在航天航空、汽车、船舶、化工、电子和建筑等行业中得到广泛的应用^[1,2]。混杂纤维复合材料的概念最早起源于日本,1972年由日本的 Hayashi^[3]提出并展开研究,旨在弥补单一纤维增强存在的缺点和不足。混杂纤维的组合形式不仅可以弥补单一纤维的缺点,还能够在满足使用载荷的前提下,大幅降低材料的成本,研究表明,碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料不仅具有高的断裂延伸率(相对 CFRP),且其中碳纤维发挥的拉伸强度要比在 CFRP 中高出 40% 以上^[4]。所谓最优纤维混杂比例,是指通过调节混杂纤维中两种或多种纤维的比例,得到最优化的结果,此结果一是兼顾材料的强度、刚度和韧性等,使其性能最优,同时还要兼顾材料的成本、使用寿命等,使其在全寿命周期内成本最优。

1 混杂纤维复合材料性能优势及其存在的问题

1.1 混杂纤维复合材料的性能优势

混杂纤维复合材料相较传统单一纤维增强的复合材料具有其明显的优势,尤其是在力学性能方面尤为突出,国内外学者对混杂纤维复合材料的力学性能进行研究时发现:不同纤维之间混杂后产生的混杂效应可让纤维之间扬长补短。以玻璃纤维和碳纤维混杂为例:玻纤与碳纤体积比为 2 的混杂纤维复合材料(HFRP)的断裂应变比 CFRP 高 30%~50%;玻璃纤维复合材料的模量一般较低,但如引入 50% 的碳纤维作为表层,复合成夹芯形式,其模量可达到碳纤维复合材料的 90%;玻璃纤维复合材料疲劳寿命为非线性递减,如引入 50% 的碳纤维,其疲劳寿命将转变为线性

递减,其循环应力也有较大的提高^[5-7]。

此外,HFRP 还会改善构件的抗冲击性能、蠕变性能、疲劳性能等。Park 等^[8]在研究 4 层芳纶纤维/玻璃纤维混杂复合材料的冲击性能时,发现当芳纶纤维在底层时,表现出较单一玻璃纤维增强复合材料更高的冲击能。Maksimov 等^[9]研究了不同体积含量的芳纶/玻璃纤维混杂复合材料的蠕变性能,在保持 700MPa 连续的力蠕变 5.7 年后,复合材料中玻璃纤维的应力增加了 1.85 倍,芳纶纤维的应力下降了 10%,表明在芳纶纤维中混入玻璃纤维,可以有效地抑制蠕变。Cavatorta^[10]对玻璃纤维/碳纤维混杂复合材料疲劳性能进行研究表明,混杂纤维复合材料的抗疲劳性能较单一纤维增强复合材料更优。

混杂纤维不仅可以混杂传统意义中的有机无机合成纤维,同时可以混杂植物纤维,既可以弥补植物纤维强度低、吸湿率高的劣势,还可以使复合材料获得意想不到优异特性,如 Rout 等^[11]用 7% 的玻纤与 13% 的椰子壳纤维增强聚酯树脂,不仅提高了构件的弯曲强度,而且使构件的吸湿性降低。

1.2 混杂纤维复合材料存在的不足

混杂纤维复合材料能够有效地弥补单一纤维增强复合材料所存在的缺点,是复合材料将来的发展趋势之一。但是混杂纤维增强复合材料同时也存在相应的问题,如混杂区域、混杂均匀性等,不均匀的混杂区域或者局部的单一纤维堆积,往往会导致复合材料整体性能不一,容易出现局部的层间破坏或局部微裂纹;混杂纤维比例的不恰当也会导致构件在增加某一项性能时,过多地降低了其他的性能,导致构件顾此失彼;混杂比例的不当还会导致过高的成本而使构件在实际使用过程中受到限制。因此控制混杂纤维复合材料的工艺和合适的混杂比例是混杂纤维复合材料保持优异性能的前提,其中尤为突出的便是混杂比例,如何确定一个最优的纤维混杂比例,不仅关系到构件的力学性能,同时关乎成本,在实际工程应用中,往往是兼顾两者之间的关系,择优选择,即最优纤维混杂比例的确定。

2 最佳混杂比例研究

2.1 最佳性能混合比例研究

混杂纤维复合材料的研究早期主要集中于玻璃纤维与碳纤维的混杂,以提供复合材料更强的力学性能,并弥补碳纤维断裂延伸率低和价格昂贵的缺点。性能研究的基础是混杂纤维的混杂效应,Manders^[12,13]对 CFRP/GRP 混杂复合材料试样进行拉伸试验研究,

概括出如图 1 所示的强度与混杂比的关系。图 1(a)中 AD 线对应相关混杂比例下的 HFRP 理论拉伸强度,A 点、D 点分别代表纯 GFRP 和纯 CFRP 的拉伸强度。CFRP 体积含量在 C 点以前时,由于碳纤维的延伸率低,其先断裂,碳纤维断裂后载荷传给玻璃纤维,由玻璃纤维承载直到整体失效。即在 C 点以前,材料呈多级破坏模式,典型拉伸应力-应变曲线会出现线性段和曲线段;CFRP 体积含量在 C 点以后,碳纤维首先断裂后,玻璃纤维的体积分数相对较少,承载能力较低,混杂纤维复合材料呈现单级破坏模式,典型拉伸应力-应变曲线只包含线性段,如图 1(b)所示。即混杂纤维复合材料存在“混杂效应”。

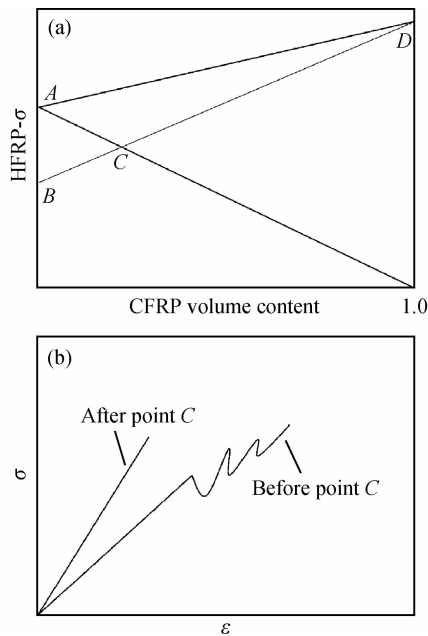


图 1 混杂纤维复合材料的混杂效应 (a)混杂纤维复合材料理论强度;(b)C 点前后的典型应力-应变曲线
Fig. 1 Hybrid effect of hybrid composites (a)theoretical strength of HFRP;(b)typical stress-strain curves before and after point C

Marom 等^[14]对 CFRP/GFRP 混杂复合材料进行了研究表明,混杂效应发生的前提条件是两种纤维不仅在力学性能上要有差异,而且它们各自与基体形成的界面性能也要不同。在此基础之上,混杂纤维复合材料的性能延伸出了很多理论模型来预测混杂纤维复合材料的力学性能。最典型的就是断裂力学模型^[12,13]、微观力学模型^[15]、断裂能模型^[16]和随即临界核模型^[17]。基于这一系列的理论,学者们展开了最优混杂比例的理论研究和实验研究。

在理论研究方面,Nordin 等^[18]研究了混凝土板和混杂纤维工字梁组合结构的强度理论,其中工字梁为拉挤工艺成型,增强体为碳纤/玻纤混杂纤维,碳纤维

主要分布在梁的上下面板区域。针对碳纤维和玻璃纤维混杂区域,定义了一个转化因数 α :

$$\alpha_C = \frac{E_C}{E_{GFRP}} \quad (1)$$

$$\alpha_{CFRP} = \frac{E_{CFRP}}{E_{GFRP}} \quad (2)$$

其中, E_C 表示混凝土的弯曲模量; E_{GFRP} 和 E_{CFRP} 分别表示玻璃纤维复合材料和碳纤维复合材料的弯曲模量。

使用平行轴定理和转化因数可得到惯性矩 I :

$$I_{trans} = \alpha_C I_C + \alpha_{CFRP} I_{CFRP} + I_{GFRP} \quad (3)$$

$$EI_{flex} = E_{GFRP} I_{trans} \quad (4)$$

其中 EI_{flex} 表示混合结构刚度,推导可得到理论刚度:

$$EI_{theory} = \frac{PL^2 a}{48\delta_{theory}} \left(3 - \frac{4a^2}{L^2} \right) \quad (5)$$

其中:

$$\delta_{theory} = \delta_{shear} + \delta_{flexure} \quad (6)$$

$$\delta_{flexure} = \frac{PL^2 a}{48EI_{flex}} \left(3 - \frac{4a^2}{L^2} \right) \quad (7)$$

$$\delta_{shear} = \frac{k_{\delta V} PL}{G_{GFRP} A_{web}} \quad (8)$$

其中, δ 代表位移; p 为加载在梁上的总载荷; L 为两支点之间的距离; a 为加载点到支点之间的距离, A_{web} 代表横截面积; $k_{\delta V}$ 为制造商提供的常数。通过碳纤维与玻璃纤维混杂构件的理论刚度值以及对刚度值和构件尺寸的设定,可以推导出碳纤维的最佳含量。

陈汝训^[19]研究了碳纤维与玻璃纤维层间混杂复合材料拉伸性能,得到了纤维临界体积分数的计算公式,当存在刚度要求时:

$$V_1 \geq \frac{E_0 - V_f E_2 - (1 - V_f) E_m}{V_f (E_1 - E_2)} \quad (9)$$

当存在压缩强度要求时:

$$V_1 \geq \frac{E_1^c \sigma_0 - (V_f E_2^c - V_m E_m^c) \sigma_{1b}}{V_f (E_1^c - E_2^c) \sigma_{1b}} \quad (10)$$

其中, E_1 , E_2 和 E_0 分别表示纤维 1, 2 和基体的拉伸模量; V_f 为纤维的总体积含量。通过两个公式的综合使用,可以得到满足所需性能的最低碳纤维含量。

在实验研究方面,汕头大学^[20]对 CF/GFHFPR 的合理混杂比进行了实验研究,采用大试件测得了 HFRP 试件的应力-应变曲线,对于实验所选用的材料(CF 与高强 GF)而言,CF 体积分数为 0.198 和 0.247 的两种 HFRP 强度高,延性好,且价格低,仅刚度略低,匹配相对合理。邓宗才^[21]在研究玻璃纤维与有机纤维混杂增强混凝土的弯曲疲劳特性时发现,玻璃纤维掺量 $2.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 与有机纤维掺量 $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 混掺时,混杂纤维混凝土疲劳强度比素混凝土提高 35.0%,即

混杂纤维能充分发挥各种纤维的优势,对改善混凝土的疲劳性能比单掺玻璃纤维和有机纤维的作用都显著。此外,张小东^[22]、赵洪凯^[23]、Hayes^[24]、Barjasteh 等^[25]分别对混杂纤维复合材料在拉伸状态、弯曲状态、受热状态下的最佳混杂比例进行了研究,得出了相应的最佳混杂比例。

目前对于满足最佳力学性能的混杂比例的研究,多是先通过理论计算,再通过实验验证的方式得到。通过对混杂纤维复合材料的刚度、强度等性能进行理论计算和实验,可灵活搭配出满足工程应用的构件。

2.2 最佳成本混合比例研究

最优性能混杂比例的控制主要是为了获得优异的构件性能,并没有过多地考虑成本。但是在混杂过程中,过多地引入性能好的纤维虽然会大幅提升构件的力学性能,但同时也会增加成本,得不偿失。最优的混杂比例,同时也是构件力学性能与成本之间的博弈,使其不仅能够保证复合材料构件优异的力学性能,满足工程应用要求,同时最有效的控制成本,达到成本与性能的双赢。

对于成本与性能的研究,往往在实验的基础上加入相应的有限元模拟,来减少实验的工作量,节约成本。Deskovic 等^[26]在此领域起步较早,他们测试了一个盒形 GFRP 梁与 CFRP 和混凝土结构组合使用,CFRP 粘接在 GFRP 下翼板,混凝土固定在梁上翼板。通过实验、理论分析和有限元分析的方法,证明了混杂纤维复合材料和混凝土结构共同使用时,可以达到性能和价格的充分有效利用。

此后, Pedro 等^[27]针对相同的结构,设计研究了一个 12m 长的单跨桥,其中梁结构采用拉挤工艺生产的玻纤增强复合材料工字梁。考虑在工字梁底部粘贴碳纤维复合材料来增加构件的刚度,通过实验和有限元模拟,分析计算了不同厚度的碳纤维片材和不同厚度的 GFRP 工字梁制件相互组合,当使其达到相同的性能时,在玻璃纤维底面粘贴预应力碳纤维片层复合材料,获得同等性能时制品的总成本较纯玻璃纤维复合材料制品成本降低 40%,见示意图 2(a)和成本图 2(b),图 2(b)中(I)为纯 GFRP 制件的成本,(II)为 GFRP 粘接 GFRP 板的成本,(III)为 GFRP 粘接 CFRP 板的成本。最终 Pedro 等确立了使用 $450 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ GFRP 工字梁粘接 0.4mm 预应力 CFRP 来作为桥梁结构。

Sorina 等^[28]也对此结构进行了相应的研究,但并没有使用粘贴的方式,而是使用拉挤工艺将玻璃纤维和碳纤维混杂在一起,其中,碳纤维主要分散区域为上下翼板。最终结果表明,混入 20% 的碳纤维,使构件

的整体刚度提升了近 40%，同时可以有效控制成本。在此基础上，Sorina 还发展了相应的理论来均衡性能与成本的关系，定义了一个参数 K_m 来表示制品性能提升与材料价格提升之间的关系。

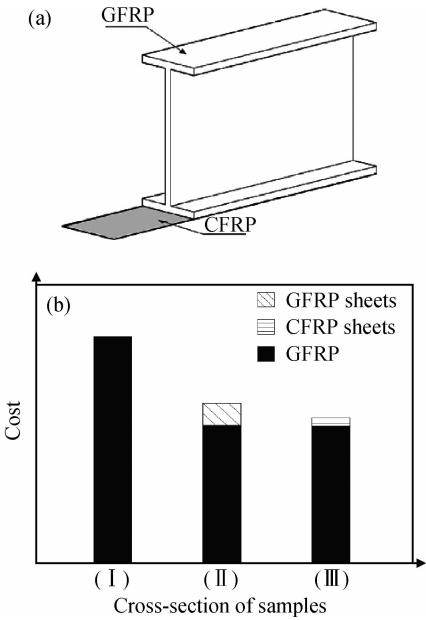


图 2 混杂纤维复合材料混杂区域及成本

(a)混杂区域及形式;(b)不同混杂形式成本对比

Fig. 2 Mixed region and cost of hybrid composites

(a)costs of different hybrid forms;(b)hybrid area and form

$$K_m(\varphi) = \Delta k_{xx}(\varphi) / \Delta p(\varphi) \quad (11)$$

式中： Δp 为加入碳纤维导致的价格增加； ΔK_{xx} 为加入碳纤维导致的刚度增加； φ 为任意参量（体积含量、性能等）。

当 φ 为体积含量时可以得到：

$$K_m = \frac{\Delta E}{P_{ca} \rho_{ca} - p_{gl} \rho_{gl}} \frac{I_{ca}}{I} \frac{P}{v_n S_{ca}} \quad (12)$$

式中： K_{ca} 为加入碳纤维后的刚度； P_{ca} 为碳纤维加入后的价格； E 为模量； I 为惯性矩； ρ 为密度； p 为一公斤纤维价格； S 为纤维面积。下标 ca, gl 分别代表加入碳纤维和纯玻璃纤维复合材料。

当 $K_m > 1$ 时，认为是最佳的性能与价格比，依此可以计算出相应的碳纤维的体积含量。这种方法是一种简单的数值算法，其存在很多不足和值得商榷推敲的地方，因此，还有待提出更好的权衡价格与性能的计算公式。

3 混杂纤维复合材料应用

目前，国内外混杂纤维复合材料的应用形式主要由以下四种：

(1)不同纤维以铺层方式混杂；(2)一种纤维拉挤型材与另一种纤维铺层共固化；(3)两种纤维通过拉挤工艺混合；(4)一种纤维拉挤型材与另一种纤维型材胶接。其混杂的区域位置包括夹芯混杂型、层间混杂型、层内混杂型、层间并层内混杂型和肋条增强型。

混杂纤维复合材料最早主要是应用于航空航天领域，如卫星导弹等，要求复合材料低的热膨胀系数，多采用玻纤/碳纤混杂，如 20 世纪 70 年代中期美国在 Sprint 导弹发动机壳体上采用了 Kevlar249、碳纤维混杂复合材料，使发动机的刚度和抗弯、抗压能力明显得到提高；美国海军 F-14 机翼表面的整流装置使用 CF/GF 织物混杂复合材料制作，使飞机减重 25%，节约费用 40%。目前，俄罗斯等国家也已经开始对米格-29 等机型所使用的碳纤维复合材料进行改进，通过混杂的方式，以期降低成本。商用飞机更是大量使用混杂纤维复合材料，如下图 3 为商用航空飞机机翼蒙皮使用混杂纤维复合材料^[29]。

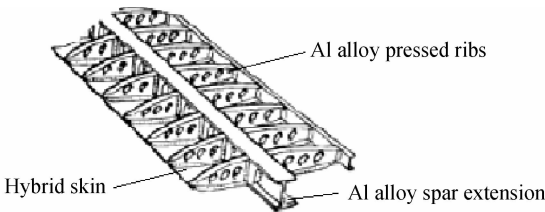


图 3 商用飞机机翼蒙皮

Fig. 3 Wing skins of commercial aircraft

20 世纪 80 年代开始，伴随着复合材料型材在土木建筑领域的大量使用，混杂纤维复合材料也开始广泛应用于土木建筑。混杂纤维复合材料最早在桥梁中使用是 2001 年施工的日本冲绳岛大桥，使用玻纤/碳纤混杂纤维作为桥体的横梁结构^[29]；此后，美国的 Tom's Creek 大桥使用混杂纤维；Arvid 等^[30]在 2005 年进行欧洲 ASSET 项目研究时，设计并建造了一座全 FRP 桥梁，桥梁尺寸 7m×10m。桥梁使用四个方形 GFRP 拉挤型材黏结在一起，在上下表面使用真空辅助工艺将 45 层单向碳纤维混合 7 层玻璃纤维（铺层：1G/6C/ 1G/6C/ 1G/6C/1G/6C/ 1G/7C/ 1G/7C/ 1G/7C）与 GFRP 拉挤桁共固化在一起，使其刚度提升了近 50%；Mendes 等设计研究了一个 12m 长的单跨桥，其中梁结构采用拉挤工艺生产的玻璃纤维复合材料工字梁，并在底面板粘贴碳纤维片材。

除此之外，混杂纤维复合材料在其他领域也有着很广泛的应用，如美军士兵使用的未来部队勇士(Future Force Warrior, 简称 FFW)帽子^[31]，见图 4。采用

碳纤维和芳纶纤维混杂,不仅强度高,而且耐冲击性能优异;碳纤维还可与记忆性金属纤维等组成新型具有记忆性的形状记忆复合材料;玻纤/碳纤混杂复合材料在风力发电领域也有着广泛的应用;在汽车领域,GEC 阿尔斯通公司/SNCF(法国铁路)使用 CF/GF 强化环氧树脂包覆发泡蜂窝材料芯制造双层大容量高速客车,并将轴重保持在 17t,与单层高速客车水平相同。

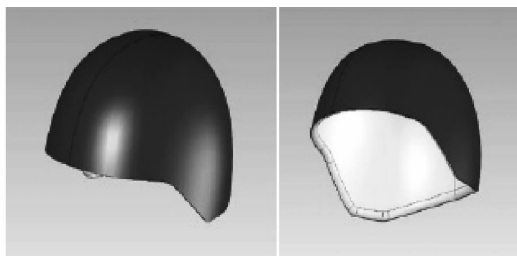


图 4 美国军用 FFW 帽子
Fig. 4 FFW cap used in army

4 结束语

混杂纤维复合材料较单一纤维增强复合材料具有明显的优势,是目前发展的重点方向之一。尤其是在土木建筑领域,不仅需求量大,而且强度、刚度的提高对建筑物的使用具有重要影响,可以显著增加建筑物的使用寿命和承载性能。对于混杂纤维最佳混合比例的研究目前也主要集中于这一领域。在其他领域如汽车、船舶、电子电器等,合理的搭配纤维的混杂比例可以有效地降低成本,可以有效地统筹协调制品的价格与性能。对于混杂纤维复合材料的发展,还存在一些可以研究和改进的空间,其存在的问题主要有:

(1)目前对于混杂纤维的研究和混杂效应的研究多集中于两种纤维混杂,国内外鲜有 3 种或 3 种以上的连续纤维增强树脂基复合材料的研究报道。

(2)对于混杂纤维价格和性能的综合考虑研究目前相对较少,现存理论模型简单,不能精准地确定最优混杂比例,需要对理论模型进行进一步的开发。

(3)连续型材的生产多依赖于拉挤成型工艺,但对于拉挤成型工艺中纤维的混杂区域位置和混杂分散性的好坏对于构件性能的影响的相关研究较少,需要对其进行进一步的系统研究,以期获得可广泛使用的生产和混杂工艺。

(4)国内对于混杂纤维的研究较多,但是实际应用较少,还存在很多可以借鉴学习的地方,此外,开拓混杂纤维在民用基础领域的应用,可以降低成本,提高性能。

参考文献

- [1] ACI Committee 440. State-of-the-Art—Report on Fiber Reinforced Plastic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures[R]. ACI 440R-96, America: American Concrete Institute, 2002.
- [2] KELLER T. Use of fibre reinforced polymers in bridge construction[M]. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2003:1—131.
- [3] HAYASHI T. On the improvement of mechanical properties of composites by hybrid composition[C]//Proceedings of the 8th International Reinforced Plastics Conference, Brighton: UK, 1972.
- [4] PALACZ M, KRAWCZUK M. Vibration parameters for damage detection in structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 249 (5):999—1010.
- [5] 张大兴,张佐光. CF/GF 多向混杂纤维复合材料拉伸特性研究[J]. 新型碳材料, 1997,(2):30—33.
ZHANG Da-xing, ZHANG Zuo-guang. Tensile character of CF/GF multi-directional hybrid composites [J]. New Carbon Materials, 1997,(2):30—33.
- [6] 张大兴,张佐光. CF/GF、CF/KF 混杂纤维复合材料混杂效应实验与分析[J]. 新型碳材料, 1997,(3):46—51.
ZHANG Da-xing, ZHANG Zuo-guang. Experiments and analyse-son hybrid effects of CF/GF and CF/KF hybrid composites[J]. New Carbon Materials, 1997,(3):46—51.
- [7] BHATIA N M. Strength and fracture characteristics of graphite-glass intraply hybrid composites[C]//Composite Materials: Testing and design(6th conference). America: American Society for Testing and Materials, 1982:183—199.
- [8] PARK R, JANG J. Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composite: Evaluation of four-layer hybrid composites[J]. Journal of Materials Science, 2001,36:2359—2367.
- [9] MAKSIMOV R D, PLUME E. Long-term creep of hybrid aramid/glass-fiber-reinforced plastics[J]. Mechanics of Composite Materials, 2001,37(4):271—280.
- [10] CAVATORTA M P. A comparative study of the fatigue and post-fatigue behavior of carbon-glass/epoxy hybrid RTM and hand lay-up composites[J]. J Mater Sci, 2007,42:8636—8644.
- [11] ROUT J. The influence of fibre treatment on the performance of coirpolyester composites[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61:1303—1310.
- [12] MANDERS P W, BANER M G. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites, Part 1: Failure strain enhancement and failure mode[J]. Journal of Materials Science, 1981,16:2233—2245.
- [13] MANDERS P W, BANER M G. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites, Part 2: A statistical model[J]. Journal of Materials Science, 1981,16:2246—2256.
- [14] MAROM G, FISCHER S, TULER F R. Hybrid effects in composites: Conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour[J]. Journal of Materials Science, 1978, 13: 1419—1426.
- [15] 范赋群,曾庆敦,黄小清. 复合材料的统计断裂理论[J]. 力学与实践, 2000, 22(2):1—5.

- FAN Fu-qun, ZENG Qing-dun, HUANG Xiao-qing. Probabilistic fracture theories for composites[J]. *Mechanics In Engineering*, 2000, 22(2):1—5.
- [16] 宋焕成, 张佐光. 混杂复合材料[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989. 23—121.
- [17] HISAO F, CHOU T W, HIROSHI F. Probabilistic strength analyses of interlaminated hybrid composites[J]. *Composites Science and Technology*, 1989, 35:331—345.
- [18] NORDIN H, TALJSTEN B. Testing of hybrid FRP composite beams in bending[J]. *Compos Part B: Eng*, 2004, 35(1):27—33.
- [19] 陈汝训. 混杂纤维复合材料受拉构件的最优混杂比研究[J]. *固体火箭技术*, 2005, 28(3):219—221.
CHEN Ru-xun. Study on optimal hybrid ratio of hybrid fiber composite tension member[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005, 28(3):219—221.
- [20] 纪梓斌. 混杂纤维复合材料的合理匹配及其在混凝土结构加固中的应用研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2004.
- [21] 邓宗才. 耐碱玻璃纤维及其混杂纤维混凝土的弯曲疲劳特性[J]. *建筑科学与工程学报*, 2008, 25(2):64—67.
DENG Zong-cai. Flexural fatigue behavior of alkali resistant glass fiber and its hybrid fibers reinforced concrete[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2008, 25(2):64—67.
- [22] 张小冬, 王耀杰, 邓宗才. 混杂纤维片材拉伸性能研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2010, 8(1):21—25.
ZHANG Xiao-dong, WANG Yao-jie, DENG Zong-cai. An experimental study of the tensile properties of IHFRP[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2010, 8(1):21—25.
- [23] 赵洪凯, 钱春香, 周效谅, 等. 拉挤工艺成型连续纤维增强热塑性 FRP 的性能研究[J]. *化学建材*, 2006, 22(1):23—25.
ZHAO Hong-kai, QIAN Chun-xiang, ZHOU Xiao-liang, et al. Study of properties of continuous fiber reinforced thermoplastic FRP molded by pultrusion[J]. *Chemical Materials for construction*, 2006, 22(1):23—25.
- [24] HAYES M D, LESKO J J. Failure analysis of a hybrid composite structural beam[J]. *Composites: Part A*, 2007, 38:691—698.
- [25] BARJASTEH E, BOSZE E J, TSAI Y I. Thermal aging of fiberglass/carbon-fiber hybrid composites[J]. *Composites: Part A*, 2009, 40:2038—2045.
- [26] DESKOVIC N, TRIANTAFILLOU T C. Innovative design of FRP combined with concrete: short term behavior[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121:1069—78.
- [27] PEDRO J D, JOAQUIM A O, JOSE M, et al. Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck[J]. *Composite Structures*, 2011, 93:2969—2982.
- [28] SORINA T G, SAFONOV A A, KHAIRETDINOY A K H. Peculiarities of using carbon glass-reinforced plastic in pultrusion composite profiles for bridge engineering[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2010, 39(1):47—51.
- [29] GURURAJA M N, HARI A N. A review on recent applications and future prospectus of hybrid composites[J]. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2012, 1(6):352—355.
- [30] ARVID H, BJORN T, MASOUD M. Large scale hybrid FRP composite girders for use in bridge structures—theory, test and field application[J]. *Composites: Part B*, 2005, 36:573—585.
- [31] SCHUYLER W J, MELZER J E. Integrated headgear for the future force warrior: results of the first field evaluations[C]// *Head and Helmet-Mounted Displays XII: Design and Applications*, Orlando, Florida, USA, 2007.

收稿日期:2012-09-14;修订日期:2014-01-10

基金项目:国家 973 计划资助项目(10813122011101008)

通讯作者:张博明(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事复合材料力学、成型工艺、固化变形模拟等方面研究,联系地址:北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学材料科学与工程学院(100191),E-mail:zbm@buaa.edu.cn