

FRP 高温力学性能研究进展

董舟俊, 梅志远*, 陈国涛

(海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033)

摘要: 具有轻质、高强和耐腐蚀等优异特性的纤维增强树脂基复合材料(FRP), 已被广泛应用于航空航天工程、船舶与海洋工程、土木工程等领域。然而基体树脂固有的可燃性, 使得 FRP 会在高温(火灾)环境下发生复杂物理、化学变化, 造成力学性能下降, 而强度和刚度的下降可能会导致结构变形和倒塌, 甚至造成人员伤亡。因此, 研究复合材料的高温力学性能对确保复合材料结构的消防安全至关重要。本文综述了国内外 FRP 高温力学性能的试验结果与理论预测模型; 对比分析了既有试验测试方法异同; 分析归纳了树脂类型、复合材料界面、增强纤维类型与铺层方式、防火涂层等对复合材料高温力学性能的影响; 最后指出了未来需进一步研究的方向。

关键词: 树脂基复合材料; 火灾; 高温; 力学性能

引言

纤维增强树脂基复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP), 在高温(火灾)环境下受热辐射等的作用, 会发生复杂的物理、化学变化, 造成力学性能在内的众多性能变化^[1,2]。复合材料在火灾中的强度、刚度不断下降, 造成结构件承载能力显著下降, 给结构安全带来极大威胁^[3]。FRP 在火灾环境中的可燃性及力学性能的温度敏感性, 严重制约了其使用范围的进一步扩大^[4]。基于复合材料独有的结构-功能一体化特性, 亟需对复合材料在高温(火灾)环境下的隔热-承载性能进行研究^[5]。现阶段, 已有不少关于 FRP 高温力学性能研究^[6~9], 亟需归纳整理其共性, 以便于后续进一步分析研究。

本文综述了国内外 FRP 高温力学性能的试验研究及理论预测模型, 总结了 FRP 高温力学性能的研究现状, 分析归纳了影响 FRP 高温力学性能的主要因素, 并指出未来的研究方向。

1 高温力学性能预测模型

学者对 FRP 在火灾(高温)环境中及冷却至室温后的力学性能进行了分析, 提出了各自的预测模型。从建立模型的考量角度来看, 有如下几大类: 1. 基于质量损失; 2. 基于微观结构转变; 3. 基于宏观材料损伤分区; 4. 基于试验结果进行拟合。

1.1 质量损失模型

Springer^[10](1984 年)建立了高温中 FRP 剩余力学性能与损失质量间的关系式:

$$\frac{S_{xy}}{S^0} = 1 - \left(\frac{\Delta m_{xy}}{\Delta m_m} \right)^e \quad (1)$$

式中, S_{xy} 为试样在时间 t 时刻的强度或模量; S^0 为室温时原始强度或模量值; Δm_{xy} 为试样在 t 时刻因气化解造成的失重; Δm_m 为试样在试验后的最大失重; e 为材料常数。

1.2 基于宏观材料损伤分区的两层模型

Mouritz^[11](2003 年)提出以混合律(rule-of-mixtures)为基础计算复合材料火灾后力学性能参数的

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.11.005

收稿: 2021-09-16; 修回: 2021-12-09;

作者简介: 董舟俊(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为船用材料与应用工程。E-mail: dongzhoujun@vip.qq.com;

* 通讯联系人: 梅志远, E-mail: zhiyuan_mei@163.com.

模型,见式(2)。其将单面受火后的 FRP 划分为炭层区和未燃烧区(即原始材料区)两个区域,且假设两者厚度均匀。

$$S_i = \left(\frac{d-d_c}{d}\right) \cdot S_{i(o)} + \left(\frac{d_c}{d}\right) \cdot S_{i(c)}$$

(2)

$$S_i = \left(\frac{d-d_c}{d}\right) \cdot S_{i(o)}$$

(3)

式中, d 为初始板厚; d_c 为炭层区域厚度; S_i 为复合材料火灾后的力学参数; $S_{i(o)}$ 与 $S_{i(c)}$ 分别表示原始材料和炭层的力学参数,下标 i 可取为 t、c,分别对应拉伸、压缩。考虑到在 $S_{i(c)}$ 远小于 $S_{i(o)}$ 的情况下,可将其中涉及到炭层的项略去,式(2)即简化为式(3)。其对大量经过不同加热时间和热通量处理后的复合材料层合板和夹层板进行力学性能测试,结果表明模型误差在 10% 以内。

1.3 基于微观结构转变的模型

Mahieux 等^[12](2001 年)研究得出了以温度为自变量的 FRP 刚度模型,见式(4)。该模型考虑到温度变化对树脂基体力学性能的影响,引入玻璃化转变温度 T_g 和粘流温度 T_f 。由于该模型是基于分析 FRP 组分的微观结构建立的,所以可适用于任意的树脂基体复合材料。为验证模型的合理性及适用性,其对碳纤维 AS4 增强聚苯硫醚(PolyPhenylene Sulfide,PPS)基复合材料开展了包括高温拉伸在内的高温力学性能试验,所得试验结果与模型相吻合。

$$E(T) = (E_g - E_r) \exp\{-(T/T_g)^{m_g}\} + E_r \exp\{-(T/T_f)^{m_f}\}$$

(4)

式中: $E(T)$ 为 FRP 在温度 T 时的刚度; E_g 为玻璃化转变的初始时刻的瞬态刚度; E_r 为橡胶化转变的初始时刻的瞬态刚度; T_g 为玻璃化转变温度; T_f 为粘流温度; m_g 、 m_f 为威布尔指数。

Yu 等^[13,14](2009 年)建立了高温力学性能计算模型,其表达式如下:

$$E_m = E_g \cdot (1 - \alpha_g) + E_r \cdot \alpha_g \cdot (1 - \alpha_d)$$

(5)

式中: E_g 、 E_r 与 E_m 分别表示在玻璃态、橡胶态以及混合态的材料的杨氏模量; α_g 为玻璃态到橡胶态的转化度,即已有多少百分比的材料已由玻璃态进入橡胶态,同理 α_d 表示分解度。

1.4 基于试验结果拟合模型

Saafi^[15](2002 年)总结了 AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer)筋、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)筋以及 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)筋在高温下的力学特性,并根据试验结果拟合出了拉伸强度和弹性模量保留率随温度变化的表达式,详见表 1。其中, $f_{f(T)}$ 、 $f_{f(20)}$ 分别表示在温度为 20℃ 与 T 时 FRP 的拉伸强度;同理 $E_{f(20)}$ 、 $E_{f(T)}$ 分别表示在温度为 20℃ 与 T 时 FRP 的弹性模量。

表 1 AFRP、CFRP、GFRP 不同温度下力学性能保留率

Table 1 Retention rate of mechanical properties of AFRP, CFRP and GFRP at different temperatures

材料	拉伸强度	弹性模量
AFRP	$\frac{f_{f(T)}}{f_{f(20)}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq T \leq 100) \\ 1.33 - 0.0033T & (100 \leq T \leq 400) \\ 0 & (400 \leq T) \end{cases}$	$\frac{E_{f(T)}}{E_{f(20)}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq T \leq 100) \\ 1.18 - 0.0018T & (100 \leq T \leq 300) \\ 1.63 - 0.0033T & (300 \leq T \leq 500) \\ 0 & (500 \leq T) \end{cases}$
CFRP	$\frac{f_{f(T)}}{f_{f(20)}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq T \leq 100) \\ 1.27 - 0.0027T & (100 \leq T \leq 475) \\ 0 & (475 \leq T) \end{cases}$	$\frac{E_{f(T)}}{E_{f(20)}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq T \leq 100) \\ 1.25 - 0.0025T & (100 \leq T \leq 300) \\ 2 - 0.005T & (300 \leq T \leq 400) \\ 0 & (400 \leq T) \end{cases}$
GFRP	$\frac{f_{f(T)}}{f_{f(20)}} = \begin{cases} 1 - 0.0025T & (0 \leq T \leq 400) \\ 0 & (400 \leq T) \end{cases}$	

Bisby^[16] (2003 年)在前人研究基础上提出了 FRP 力学性能随温度衰减的计算模型,其形式上包含一个双曲正切函数(tanh),具体表达式为:

$$\frac{f(T)}{f_o} = \left(\frac{1-a}{2} \right) \tanh\{-b(T-c)\} + \left(\frac{1+a}{2} \right) \quad (6)$$

式中, $f(T)$ 为温度 T 时的力学性能参数; f_o 为室温时的力学性能参数;“ a ”为描述剩余力学性能的常数;“ b ”为描述力学性能退化程度的常数;“ c ”为中心温度。除了“ a ”可通过实验结果计算外,“ b ”和“ c ”均为采用最小二乘法拟合所得。结合图 1 可更直观理解各参数含义。

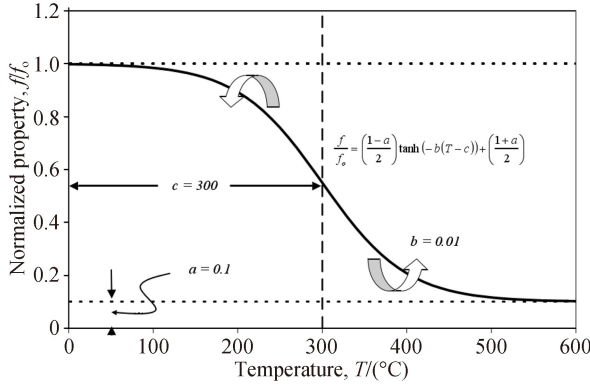


图 1 Bisby 模型参数示意图^[16]

Figure 1 Bisby model parameter diagram^[16]

Gibson 等^[17] (2006 年)考虑树脂基体在高温下的松弛及热解,提出了基于误差函数(erf)和双曲正切函数(tanh)的模型,表达式如下:

$$P(T) = \frac{P_U + P_R}{2} - \frac{P_U - P_R}{2} \operatorname{erf}\{k(T - T')\} \quad (7)$$

$$P(T) = \frac{P_U + P_R}{2} - \frac{P_U - P_R}{2} \tanh\{k(T - T')\} \quad (8)$$

式中, $P(T)$ 对应于温度为 T 时的力学参数, P_U 、 P_R 分别表示未松弛(室温)和松弛后(高温)的力学参数; k 为描述分布宽度的系数; T' 为力学性质上的玻璃化转变温度,其数值大小不一定等于 T_g 。

Wang 等^[18] (2011 年)将不锈钢和冷成型钢的高温力学性能模型(见式 9)运用到 FRP 的高温力学性能计算,发现该模型计算结果与试验结果吻合良好。

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,normal}} = A - \frac{(T-B)^n}{C} \quad (9)$$

式中, A 、 B 、 C 和 n 均为拟合系数; $f_{u,T}$ 为在温度为 T 时的力学性能参数; $f_{u,normal}$ 为常温下力学性能。

Jafari 等^[19] (2019 年)通过线性贝叶斯回归分析,得到不同厚度和纤维取向试样的 GFRP 层合板抗拉强度预测模型,其表达式如下:

$$R(T) = \begin{cases} 1 & 24^\circ\text{C} \leq T \leq 45^\circ\text{C} \\ \frac{a}{T^3} + b\{\lg(t)\}^{0.333} + c & 45^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $R(T)$ 为不同温度环境下的拉伸强度保留率, T 为温度,K; t 为试样厚度,mm; a 、 b 、 c 为拟合参数。

Ashrafi 等^[20] (2020 年)在前述考虑层合板厚度基础上,引入受火时间作为新的自变量,得到了如下表达式:

$$R(T) = \frac{a}{T^3} + \frac{b}{\left\{ \lg\left(\frac{t_1}{6}\right) \right\}^{0.5}} - \frac{c}{\{\lg(t_2)\}^{0.5}} + d \quad (11)$$

$$R(E)=-aT^4+\frac{b}{\left\{\lg(\frac{t_1}{6})\right\}^{0.5}}-\frac{c}{\{\lg(t_2)\}^{0.5}}+d$$

(12)

式中, $R(T)$ 和 $R(E)$ 分别为不同温度时的拉伸强度和拉伸模量的保留率; t_1 为受火时间,min; t_2 为试样厚度,mm。 a 、 b 、 c 、 d 均为根据试验结果拟合的参数。

1.5 小结

综上,现阶段所建立的 FRP 高温力学性能预测模型多为唯象模型,仍需通过试验获取相关参数。在上述模型中,Mouritz^[11]提出的两层模型因其模型简单、计算方便且精确度较高,是目变量前应用最为广泛的模型之一。Bisby^[16]提出的模型与高温力学性能试验结果拟合良好,在通过少量试验获取参数后,即可实现对于复合材料的高温力学性能的预测。随着研究进一步深入,基于试验结果拟合的模型中,越来越多的变量参数被纳入考量范围,此举虽使得建模精确度得到一定提升,但与此同时带来了需要确定众多待定参数的麻烦。因此,在已有模型的基础之上,如何处理好模型的计算精度与使用简便之间的矛盾,是需要考虑的首要问题之一。

2 高温力学性能试验研究

鉴于复合材料制品实际使用过程中面临的火灾(高温)环境,研究其力学性能随温度的变化情况就显得至关重要,许多学者都对复合材料筋、层合板等对不同结构形式的 FRP 制品在火灾(高温)环境中及冷却至室温后的力学性能进行了试验研究,相应的试样、测试条件与测试方法等参见表 2^[21~32]。

表 2 FRP 高温中及高温后力学性能试验研究
Table 2 Experimental study on mechanical properties of FRP at and after elevated temperature

文献	增强纤维类型	基体树脂 类型	结构 形式	几何尺寸 (mm)	保温 时间(min)	冷却 时间(h)	测试性能
[21]	碳纤维	EP	板	400×20;	120	无	高温中
	碳纤维玻璃纤维混杂			厚度根据纤维铺层而异			
	碳纤维玄武岩纤维混杂						
[22]	碳纤维	PPEK PPES	板	NA	15	无	高温中
[23]	碳纤维	PEEK	板	50×10×4	30	无	高温中
[24]	玻璃纤维	EP	板	300×30;厚度未注明	10	无	高温中
[25]	碳纤维	EP	板	150×40;厚度未注明	45	24	高温后
	玻璃纤维	EP					
	碳纤维玻璃纤维混杂	EP					
[26]	碳纤维	EP	板	150×40;厚度未注明	45	24	高温后
	玄武岩纤维	EP					
[27]	碳纤维玄武岩纤维混杂	EP	筋	直径 6,长度 700	180	未说明	高温中、高温后
	玻璃纤维	NA					
	碳纤维	BMI					
[28]	碳纤维	EP	板	75×25×1.8	5	未说明	高温中、高温后
[29]	碳纤维	EP	筋	直径 8,长度 800	30	未说明	高温中、高温后
[30,31]	碳纤维	EP	板	67×9.8×2.18	3	无	高温中
[32]	玄武岩纤维	EP	板	550×25×1	5	1-72	高温中、高温后

2.1 高温中及高温后力学性能

2.1.1 试验结果 Cao 等^[21]对不同纤维织物增强环氧树脂(EP,Epoxy)基复合材料在高温环境下的拉伸强度进行了试验研究。试验结果表明 CFRP 的拉伸强度在约 55 ℃时就已经有明显降低,而在 55~200 ℃的温度范围内几乎保持恒定。

刘文博等^[22]对碳纤维增强杂萘联苯聚醚酮(CF/PPEK)和碳纤维增强杂萘联苯聚醚砜(CF/PPES)

单向复合材料试样进行试验研究,结果表明,在 250 ℃时,拉伸强度的保留率分别为 61.9%、60.8%,模量保留率分别为 79.1%、74.3%。

牛一凡^[23]对 CF/PEEK 进行了高温拉伸性能测试,测得其拉伸强度与弹性模量在 220 ℃时较室温时分别降低 71.18%和 80.20%。

Wang 等^[18]研究了挤压成型的 CFRP 板试样在高温下的力学性能。研究表明,当温度从 20 ℃升至 150、450 和 706 ℃时,CFRP 极限拉伸强度分别降至室温的 62%、45%和 5%。研究还表明,在 150~450 ℃的温度范围内,因纤维未遭受明显的损伤而保持了纵向强度,样品拉伸强度降低可以忽略不计。

Majid 等^[24]在不同温度环境下对玻璃纤维增强环氧树脂(GFRP)片材进行了拉伸试验。在 60~150 ℃时,当温度达到 T_g (约 58 ℃)后,GFRP 的拉伸强度显著降低。在 150~400 ℃时,温度高于 T_g 且低于 T_d ,由于玻璃纤维承担了绝大部分载荷,GFRP 试样的拉伸强度下降速度较上一温度范围慢。在 400~600 ℃时,温度接近 T_d ,拉伸强度降低更为显著。当温度接近玻璃纤维熔点时,拉伸强度将进一步降低。

Hawileh 等^[25]研究了 GFRP 和 CFRP 层合板,在 25~300 ℃的温度处理后的高温后的拉伸力学性能。其研究表明,CFRP 层合板、GFRP 层合板和碳-玻混杂纤维层合板在 250 ℃保温 45 min 后冷却 24 h,其拉伸强度降低了约 42%、31%和 35%,弹性模量分别降低约 28%、26%和 9%。Hawileh 等^[26]在另一项研究中研究了高温对 CFRP 层合板,玄武岩纤维增强(BFRP,Basalt Fiber Reinforced Plastics)层合板和碳-玄武岩混杂纤维层压板的力学性能的影响。

周长东等^[27]对 GFRP 筋的高温力学性能进行了研究,其认为 270 ℃为一临界温度,超过这一温度后力学性能急剧下降。研究还表明,在加热到低于 170 ℃后冷却,玻璃化的基体可恢复粘结作用,强度可基本恢复至室温时同等水平;而加热到 190 ℃后,基体热分解和碳化加剧,已失去粘结作用,降至室温后强度难以恢复。

汪源龙等^[28]对碳纤维增强双马树脂(BMI,Bismaleimide)复合材料 CCF300/GW-300 层合板在 200 和 300 ℃分别进行了力学性能试验。研究表明,在 300 ℃以下,基体控制试件和纤维控制试件的拉伸强度保持率分别达 70%以上和 90%以上。

周飞^[29]开展试验研究了 0~500 ℃时 CFRP 筋的高温中和高温后的特性,其认为 200 ℃为高温后力学性能的关键节点温度,在 200 ℃以下高温后力学性能绝大部分能够恢复。

张雷等^[30,31]研究了碳纤维/环氧树脂复合材料的干纤维、纤维单向预浸料、树脂基体、层合板 4 种材料结构体系的火灾燃烧特性,以及不同铺层方式的层合板的高温力学性能。结果表明,层合板的火灾下性能表现最好。

肖波^[32]对玄武岩纤维/环氧树脂复合材料的高温中和高温后的力学性能进行了试验研究,结果表明在 350 ℃以下,当温度超过 T_g 后,BFRP 片材的拉伸强度迅速下降,随着温度进一步升高,其拉伸强度逐渐趋向于某一稳定值,约为其室温性能的 50%左右;其相对拉伸模量随温度升高而直线下降。高温作用一段时间并冷却到室温后,其力学性能一定程度上得以恢复,拉伸强度的下降量与其重量损失量成线性关系。

2.1.2 试验分析 综上,试验结果在总体上存在一定共性,但彼此之间又存在较大差异性与离散性。本文认为,复合材料高温力学性能试验结果表现出的离散性主要来源于几个方面:(1)材料体系的差异性,不同试验研究人员选用的复合材料的基体树脂与增强纤维本就不同,且加工制造与成型工艺也存在差异;(2)复合材料试样结构形式的多样性,上述试验中的试样类型包括筋材、片材等,在高温环境下,不同结构形式的升温及温度分布情况存在差异,从而对高温力学性能测试结果造成影响;(3)测试方法的差异性,由于缺乏统一国际标准,研究人员所采用的试验方法不尽相同,且彼此之间的试验条件和试验操作流程有所差异(见表 2),因此,所得结论虽然有一定的共性,但彼此的试验结果之间也存在较大的离散性;(4)材料的高温性能的随机性^[9],大量试验表明,与常温状态相比,结构材料在高温下和高温后的性能存在更大的随机性,进而演化为构件及结构的火灾行为和火灾后剩余性能的随机性。

2.2 高温力学性能的影响因素

FRP 的高温中和高温后的力学性能均随温度升高而降低,且均存在着几个重要的温度点,如 T_g 、 T_i 等。其中,高温后力学性能存在着一个临界温度 T_c :在加热至临界温度点以下并保温一定时间后再冷却至室温,则其力学性能基本可以恢复至室温水平;反之则力学性能损失不可逆。下面结合既有试验研究,总结归纳 FRP 高温力学性能的主要影响因素。

2.2.1 基体树脂类型 纤维增强树脂基复合材料的力学性能对温度敏感^[33],复合材料各组分中增强纤维比树脂基体耐火性能更好^[34],因此 FRP 高温力学性能主要由树脂基体控制^[1,7,35]。

FRP 的基体树脂包括热固性树脂和热塑性树脂,在火灾环境下,随着温度升高,复合材料力学性能主要经历三次降低。当升温至树脂基体的玻璃化转变温度 T_g 时,树脂基体软化,由玻璃态进入橡胶态。树脂基体传递增强纤维之间的剪切应力的能力降低,造成 FRP 的力学性能的第一次明显降低;进一步升温至树脂分解温度 T_d (约 300~400 °C),FRP 的基体逐渐分解和碳化,并释放出有毒烟雾,造成 FRP 力学性能的第二次明显降低;在更高的温度,树脂基体开始燃烧,燃烧过程将释放更多热量,最终导致 FRP 的增强纤维开始分解,造成 FRP 力学性能的第三次,亦即最后一次明显降低。

除基体树脂的温度特性外,树脂基体本身的火灾反应特性对复合材料的高温力学性能同样重要。在高温作用下,树脂基体的存在一定程度上依旧能与增强纤维共同形成复合效应,例如 Cao 等^[21]发现:树脂浸润过的纤维布在高温环境下的拉伸性能依旧要优于干纤维布。Sorathia^[36]对采用不同树脂基体的复合材料进行了火灾后剩余弯曲强度测试,测试结果表明,Graphite/PEEK 和 Graphite/Phenolic 的弯曲强度保留率最高,分别为 75%和 53%,BMI 基体复合材料的保留率不高于 21%,而乙烯基酯树脂和环氧树脂基复合材料的保留率分别仅为 14%和 5%。已知基体树脂在高温作用下所形成的炭层,一定程度上可阻止剩余基体树脂的进一步燃烧^[30,31]。而酚醛树脂的成炭率较高,使得其在 T_g 虽然低于 BMI 的情况下,相应的酚醛树脂基复合材料的弯曲强度保留率却高于 BMI 基复合材料。

2.2.2 复合材料界面 界面损伤是造成 FRP 高温力学性能降低的另一主要原因^[37],包括纤维与树脂界面脱粘^[23]、层间分层^[38]与开裂^[39]等。造成界面损伤的主要原因是界面处材料的热降解^[40]以及不同材料组分的热膨胀不匹配造成的较大热应力^[41]。

2.2.3 增强纤维类型与铺层方式 常用的增强纤维类型有:碳纤维(CF,Carbon Fiber)、玻璃纤维(GF,Glass Fiber)、玄武岩纤维(BF,Basalt Fiber)以及芳纶纤维(Aramid fiber)等。尽管增强纤维对相比于基体树脂而言耐火性能更佳,但实际上一旦超出一定温度范围后,纤维同样会因为遭受热损失而降低力学性能,而热损伤与所处气体氛围密切相关,且不同纤维类型的复合材料高温力学性能存在一定差异^[42]。一般而言在有氧气环境下,GF 和 BF 的力学性能较 AF 和 CF 好。但在有氧环境下,CF 在温度高于 400 °C 时即发生明显的氧化;AF 在 150 °C 即可发生氧化;GF 与 BF 虽不存在氧化现象,但 GF 在 800~1000 °C 的温度范围内^[6]会发生软化,而 BF 的软化温度约为 1050 °C^[43],造成其力学性能下降。而与基体树脂相类似,FRP 外层的碳化区同样能起到隔热保护作用,阻止内部碳纤维的热损伤^[7]。

此外,高温环境下同室温环境下一样,层合板力学性能与铺层方式相关,与受力方向一致的纤维数量越多,相应的力学性能越好^[30,31]。另一方面,铺层角度一致的复合材料,不易发生分层,抗烧蚀性能更好^[44]。

2.2.4 防火涂层 防火涂层的存在是通过延缓表面温度升高速率^[4],减少复合材料所受的热损伤,从而实现增大复合材料结构的力学性能保留率的目的^[36]。防火涂层的作用效果与所用材料及涂层厚度相关。在一定条件下,可以实现有涂层保护的复合材料的受火面,在去除防火涂层及炭层后,无明显损伤^[45]。

3 结语

国内外已对 FRP 高温力学性能开展了一系列研究。试验方面,由于材料体系、结构形式、试验条件

等诸多因素的影响,彼此之间的试验结果表现出较大的离散性。理论方面,已建立起了不同的性能预测模型,以实现对复合材料高温力学性能的预测。随着研究深入,为使模型更加精确,引入到模型中的变量参数也逐渐增多,导致确定参数的难度也愈发明显。但大多数基于试验数据拟合获得的唯象模型,虽然能够准确描述复合材料力学性能随温度变化的情况,但缺乏机理层面的合理解释,因此后续可开展此方面研究。

综上所述,FRP 火灾中及火灾后力学性能的测试和建模已取得显著进展。从树脂基体材料类别上看,目前研究人员已经对常用的热固性层合板开展了大量研究。相比之下,对热塑性层合板的关注较少,而且其火灾特性仍未为人所知。从结构形式上看,目前现有的研究大多集中于层合板,对于含有芯材的夹层板研究较少,此外对于层合板和夹层板对应的加筋结构,尤其是在不同类型的载荷和边界条件下的高温力学性能,同样需要进一步测试和分析。

截至目前,所有已开展的试验研究大多仍然局限于材料级别,远未达到构件级别。然而,需要明确的是,不同尺寸的试验所得到的试验结果并不具有等同性,这就要求后续继续开展大尺寸甚至全尺寸的复合材料结构件的耐火试验研究。

参考文献:

[1] Mouritz A P,Gibson A G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Dordrecht: Springer, 2006.

[2] Troitzsch J. Plastics Flammability Handbook: Principles, Regulations, Testing, and Approval. Munich: Hanser Publishers, 2004.

[3] 舒中俊,漆宗能. 工程塑料应用, 1999, (11): 37~39.

[4] Gutierrez J, Parneix P,Bollero A,Høyning B,Wright P. Fire Performance of Naval Composite Structures//Sampe Europe, Paris: 21st Int. Sampe Europe Conf. , 2000.

[5] 梅志远. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 1~8.

[6] 都凡,欧阳利军,陆洲导,陈有亮,镇斌. 玻璃钢/复合材料, 2016, 269(7): 79~85.

[7] 高皖扬,陆洲导,胡克旭. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6): 128~135.

[8] 胡克旭,何桂生. 同济大学学报(自然科学版), 2006,(11): 1451~1456.

[9] 李国强,吴波,蒋首超. 建筑钢结构进展, 2010, 12(58): 13~18.

[10] Springer G S. J Reinf Plast Compos, 1984, 3(1): 85~95.

[11] Mouritz A P. Mat Sci Eng A-Struct, 2003, 359(1): 237~246.

[12] Mahieux C A,Reifsnider K L,Case S W. Appl Compos Mater, 2001, 8(4): 217~234.

[13] Bai Y,Vallée T,Keller T. Compos Sci Technol, 2008, 68(1): 47~56.

[14] Bai Y,Keller T. Compos Part A-Appl S, 2009, 40(6): 731~738.

[15] Saafi M. Compos Struct, 2002, 58(1): 11~20.

[16] Bisby L A. Fire Behaviour of Fibre-reinforced Polymer (FRP) Reinforced or Confined Concrete. Queen-s University Ph. D. Thesis, 2003.

[17] Gibson A G,Wu Y S,Evans J T,Mouritz A P. J Compos Mater, 2006, 40(7): 639~658.

[18] Wang K,Young B,Smith S T. Eng Struct, 2011, 33(7): 2154~2161.

[19] Jafari A,Bazli M,Ashrafi H,Oskouei A V,Azhari S,Zhao X L,Gholipour H. Constr Build Mater, 2019, 202(30): 189~207.

[20] Ashrafi H,Bazli M,Jafari A,Ozbakkaloglu T. Compos Struct, 2020, 238(15): 1~19.

[21] Shenghu C. J Compos Mater, 2009, 43(4): 315~330.

[22] 刘文博,王荣国,张洪涛,贾近,矫维成,谢怀勤. 材料科学与工艺, 2004, 12(2): 183~185, 189.

[23] 牛一凡,杨赢,姚佳伟. 宇航材料工艺, 2016, 46(2): 63~67.

[24] Jarrah M,Najafabadi E P,Khaneghahi M H,Oskouei A V. Constr Build Mater, 2018, 190(30): 38~52.

[25] Hawileh R A,Abu-obeidah A,Abdalla J A,Al-tamimi A. Constr Build Mater, 2015, 75(30): 342~348.

[26] Hawileh R A,Abdalla J A,Hasan S S,Ziyada M B,Abu-obeidah A. Constr Build Mater, 2016, 114(1): 364~373.

[27] 周长东,吕西林,金叶. 建筑科学与工程学报, 2006, (1): 23~28.

[28] 汪源龙,程小全,范舟,高宇剑,陈纲. 复合材料学报, 2011, 28(3): 180~184.

[29] 周飞. 火场温度作用下 CFRP 筋混凝土受弯构件的结构性能研究. 南京:东南大学, 2019.

[30] 张雷. 碳纤维/环氧复合材料燃烧特性研究. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2017.

[31] 王志,张雷,陈健,徐艳英. 消防科学与技术, 2016, 35(12): 1659~1663.

[32] 肖波. 玄武岩纤维/环氧树脂复合材料的湿热老化及高温性能研究. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.

[33] 吴世宝,陈冠旭,马佳,高婧. 河南科学, 2020, 38(5): 703~709.

[34] Ashrafi H,Bazli M,Oskouei A V,Bazli L. J Compos Constr, 2018, 22(1): 1~17.

[35] 刘伟庆,方海,方园. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 1~16.

[36] Sorathia U,Beck C,Dapp T. J Fire Sci, 1993, 11(3): 255~270.

[37] 张德刚,陈纲. 现代防御技术, 2018, 46(2): 24~31, 164.

[38] 吕庆涛,赵世波,杜培健,陈利. 纺织学报, 2021, 42(1): 181~189.

[39] 时圣波. 高硅氧/酚醛复合材料的烧蚀机理及热-力学性能研究. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.

[40] 李洋洋. 空气热循环对 T700/HT280 复合材料力学性能的影响. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2018.

[41] 高禹,刘佳琦,王绍权,王柏臣,于祺,刘刚,包建文. 复合材料学报, 2017, 34(2): 240~246.

[42] 张凯. 火灾高温下及高温后结构中 FRP 筋残余力学性能研究. 南京:东南大学, 2018.

[43] 苗常青,徐铎东,靳广焱,孙甜甜,祖振南. 高压物理学报, 2019, 33(2): 110~116.

[44] 沈世元,王天成,胡莹,李晨曦,陈诚,王志. 消防科学与技术, 2020, 39(7): 1001~1003.

[45] 陈亚辉. FRP 层合板及泡沫夹芯复合材料受火后力学性能研究. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.

Research Progress on Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymer at Elevated Temperatures

DONG Zhou-jun, MEI Zhi-yuan* , CHEN Guo-tao

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering , Naval University of Engineering , Wuhan 430033, China)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) has been widely used in marine engineering, aerospace engineering, civil engineering and other fields due to its lightweight, high strength and corrosion resistance. However, the inherent flammability of matrix resin makes FRP undergo complex physical and chemical changes in high temperature (fire) environment, resulting in a decrease in mechanical properties. The decrease in strength and stiffness may lead to structural deformation and collapse, resulting in property losses and even casualties. Therefore, it is very important to study the mechanical properties of composite at elevated temperatures to ensure the fire safety of composite structures. The experimental and theoretical research results of high-temperature mechanical properties of FRP at home and abroad were reviewed. Several models for predicting the loss in the mechanical properties are described. Firstly, The similarities and differences of the existing test methods were compared and analyzed. Secondly, the test results of high temperature mechanical properties of composite materials are briefly introduced. The effects of matrix resin type, composite interface, reinforced fiber type and coating method, and fireproof coating on high-temperature mechanical properties of composite were analyzed and summarized. Finally, the direction for further research in the future was prospected.

Key words: Resin matrix composite; Fire; Elevated temperature; Mechanical properties