

温度和湿度对碳纤维增强复合材料老化影响研究综述



樊俊铃¹, 马国庆², 焦婷¹, 陈曾美², 韩啸²

1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024

摘 要:碳纤维增强复合材料因其良好的力学、物理和化学性能,在多个工业领域获得了广泛应用。在工程应用中,关键结构的服役寿命和性能耐久性是一个不可忽视的问题。碳纤维增强复合材料通常以树脂为基体,而树脂易受环境影响发生老化,对复合材料的性能产生显著影响。本文首先介绍了环境温度对碳纤维增强复合材料性能的影响,并总结了水分扩散理论及常见的复合材料吸湿模型,然后整理了湿热耦合环境对碳纤维增强复合材料性能的影响效应,包括理论分析、试验方法以及有限元仿真等研究手段,最后讨论了碳纤维增强复合材料在湿热老化研究方面存在的问题和挑战,并对可行的研究方向进行了展望。

关键词:碳纤维增强复合材料; 环境耐久性; 湿热老化; 有限元建模; 水分扩散

中图分类号: TB332

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.09.001

近年来,碳纤维增强复合材料(CFRP)不仅广泛应用于工业领域如航空航天、轨道交通、风力发电和汽车制造业等传统行业^[1-3],还扩展到了高端医疗、建筑行业等领域^[4]。碳纤维增强复合材料是以碳纤维或碳纤维织物为增强体,以树脂、陶瓷等为基体制备而成的复合材料。由于碳纤维增强复合材料具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、热膨胀系数小、低热导率和高残炭率等诸多优点,其被广泛应用于制造弹体整流罩、仪器舱等主要承力部件,而且在航空器结构的用量上,波音787飞机和空客A350飞机的机身复合材料用量已达到了50%以上^[5-6]。碳纤维增强复合材料应用领域的多样性决定了其服役环境的复杂性,影响其性能的环境因素包括温度、湿度、化学腐蚀、紫外线和冲击载荷等,其中湿热环境老化因素是导致CFRP性能下降的重要原因之一。当前,湿热环境下的复合材料损伤演化、服役寿命预测方法和试验技术尚未形成完整的研究体系,过度简化了服役环境对复合材料的老化作用机理。

本文归纳整理了国内外学者围绕加速老化环境试验、力学性能退化规律和湿热环境老化建模等研究工作,围绕

温度和湿度等环境因素及其联合影响对CFRP的作用机理,阐述了CFRP内部的水分扩散和损伤失效行为,讨论了CFRP在湿热环境老化研究方面存在的问题和挑战,并对可行的研究方向进行了展望。本文可以为CFRP的设计与制造、湿热条件下的损伤机理研究和服役寿命预测提供有益参考。

1 碳纤维增强复合材料环境影响因素

影响碳纤维增强复合材料性能的因素主要可以分为两类:外部环境因素和材料自身属性因素。CFRP在长期服役过程中,受到的环境干扰因素主要为温度、湿度、化学腐蚀、紫外线和外部载荷。碳纤维的吸湿能力有限,对CFRP而言,其吸湿量主要取决于树脂,树脂性能易受到环境的影响发生较大改变^[7]。CFRP为各向异性材料,其性能同时受到增强相材料、基体材料和制造工艺等影响,如碳纤维型号、纤维与基体的体积比、纤维铺层方向和固化工艺等^[8-9]。本文主要从湿热环境因素对CFRP性能的老化影响进行归纳与分析。

收稿日期: 2023-05-11; 退修日期: 2023-06-17; 录用日期: 2023-07-11

基金项目: 航空科学基金(20200009023004)

引用格式: Fan Junling, Ma Guoqing, Jiao Ting, et al. Review on the effects of temperature and moisture on the aging of carbon fiber reinforced polymers[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(09): 1-13. 樊俊铃, 马国庆, 焦婷, 等. 温度和湿度对碳纤维增强复合材料老化影响研究综述[J]. 航空科学技术, 2023, 34(09): 1-13.

复合材料环境老化试验方法主要包括自然环境老化试验和实验室环境加速老化试验两类。国内外研究人员为了缩短研究周期、掌握CFRP在复杂环境下的性能变化规律,实现对CFRP湿热老化后的寿命预测,通常采用加速老化试验方法模拟实际环境中出现的老化影响因素^[10-12]。利用实验室设计开展加速老化试验,通常将材料长期浸入指定温度的介质溶液中直至其吸湿饱和。Mamalis等^[13]为模拟由碳纤维增强复合材料制造的涡轮叶片在海水环境中的老化状态,将样本浸泡在50℃海水箱中持续6个月,发现由于海水老化导致材料强度明显下降。Mouzakis等^[14]为了研究温度、湿度和紫外线辐射共同作用对复合材料的影响,设计了可以提供循环条件的老化环境室,对材料的拉伸性能和弯曲性能进行了测试,结果显示,复合材料的刚度增加而强度有所下降,并且在老化后的试件表面观察到了微小裂纹。陈伟明等^[15]研究发现T800碳纤维增强复合材料干态层间剪切强度达到122MPa。经过95℃蒸馏水浸泡后,该复合材料的玻璃化转变活化能变化幅度较小。我国航空工业标准HB 7401—1996《树脂基复合材料层合板湿热环境吸湿试验方法》也建立了实验室加速干燥和吸湿方法标准,该方法可以保证试验材料在工程能接受的较短时间内模拟其长期使用环境中可能达到的吸湿量。

2 温度对碳纤维增强复合材料性能影响研究

2.1 高温环境

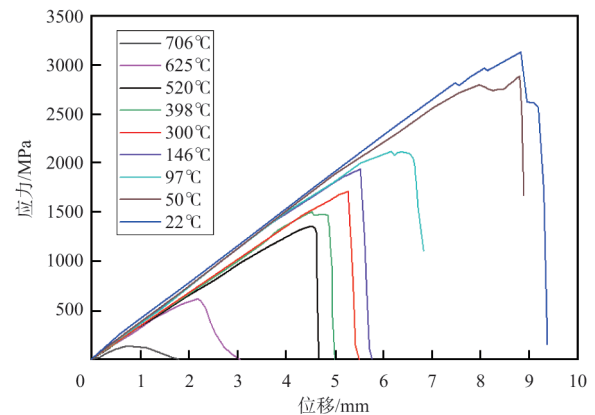
树脂基碳纤维增强复合材料通常采用高温热固或者真空高压的方式成形^[16]。CFRP处在高温环境中,会加剧分子热运动,基体发生软化,基体与纤维界面黏结性能降低,且纤维和基体的热膨胀系数存在差异,产生“离骨”现象,导致材料被破坏^[17]。Wang等^[18]在22~706℃条件下对单向碳纤维增强复合材料层合板进行拉伸强度试验,表1总结了试件在不同温度下施加拉伸载荷的失效模式。同时,图1(a)表明CFRP试件的拉伸强度随温度升高明显降低。在520℃以下,应力与位移呈线性关系,在625~706℃之间,碳纤维发生氧化导致纤维损伤,应力与位移呈非线性关系。观察图1(b)发现,在20~150℃和450~706℃之间,CFRP拉伸强度下降明显,300℃时的拉伸强度约为室温下的50%。

谭伟等^[19]在80℃环境下对正交型树脂基碳纤维增强复合材料层合板的层间力学性能退化行为进行研究发现,在试验初期阶段,CFRP层间剪切强度明显提高,层间拉伸强度无明显退化,但随着高温老化时间增加,拉伸强度和剪切强度均有退化。剪切强度先升高后降低有两个可能原因,

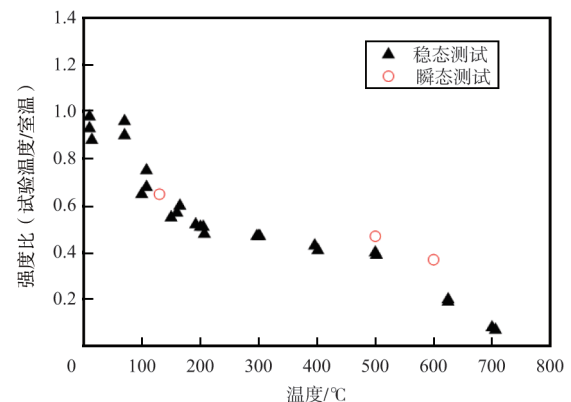
表1 不同温度下施加拉伸载荷的失效模式^[18]

Table 1 Failure modes of specimens subjected to tensile loads at different temperatures^[18]

温度区间/℃	失效模式
22~50	纤维脆性断裂为主
97~308	环氧树脂基体的软化和汽化,同时伴随着纤维断裂
395~625	环氧树脂基体在350℃左右发生自燃,板材由于无树脂填充发生自由弯曲
698~706	环氧树脂基体完全燃烧,约有50%的碳纤维发生氧化



(a) 碳纤维增强复合材料板应力-位移曲线



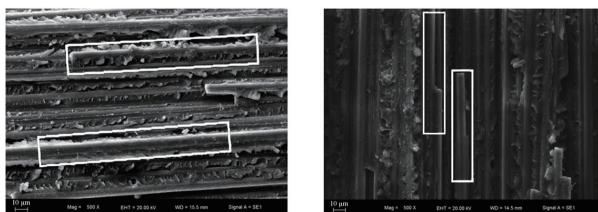
(b) 碳纤维增强复合材料板强度比

图1 碳纤维增强复合材料板在不同温度下的力学性能^[18]

Fig.1 Mechanical properties of CFRP plate at different temperatures^[18]

一是树脂在高温下产生了后固化现象,二是高温环境使得制造CFRP时产生的界面内应力得到释放。随高温老化时间增加,树脂增塑和树脂/纤维界面黏结力降低,造成拉伸强度和剪切强度的降低。通过扫描电镜(SEM)双测CFRP的断裂面,发现老化前的CFRP断裂面显示出纤维表面被树脂完整包覆,说明老化前的破坏主要是树脂开裂引起的,如图2(a)所示。而老化后的CFRP断裂面可以观察到裸露的断裂碳纤维,说明树脂与基体的黏结力显著减弱,如图2

(b)所示。冯振宇等^[20]研究发现单向碳纤维增强复合材料层合板经不同温度烘干后,其压缩强度无显著变化,但湿热因素同时作用,复合材料的压缩强度随温度及湿度升高而下降。



(a) 老化前

(b) 老化后

图2 碳纤维增强复合材料断裂面SEM图像^[19]Fig.2 SEM images of fracture surface in CFRP composite^[19]

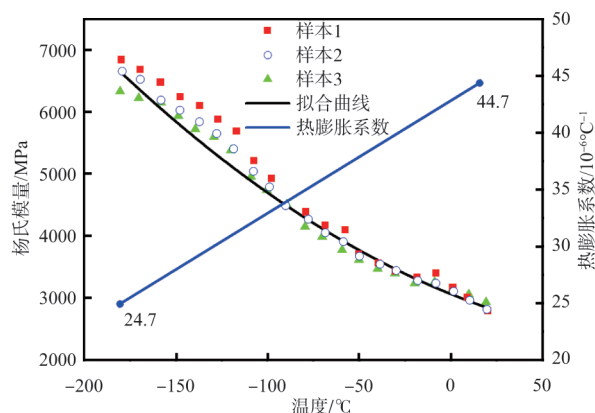
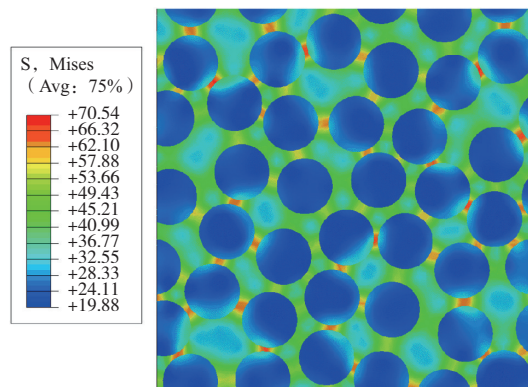
许多学者在研究温度对碳纤维增强复合材料老化性能影响中,采用了试验测定与数学模型验证联合分析的方法。陈明^[21]利用ABAQUS建立了10层碳纤维增强复合材料模型,分析试验和仿真结果得出温度升高带来的热应力和树脂软化分解是导致复合材料力学性能下降的主要原因。谭伟等^[19]提出了层内损伤力学模型,建立了一种高温老化下的失效预测模型,对老化后的碳纤维增强复合材料层间力学性能进行失效预测,并得到不同老化衰减系数下的退化模型,同时结合试验结果验证预测模型,仿真与试验数据误差小于10%,说明了预测模型的准确性。张颖军等^[22]改进了古尼耶夫中值老化公式,使得改进公式能够在不同老化环境中进行等效计算,并建立了碳纤维增强复合材料老化剩余强度的估算公式。结果表明,改进公式能够反映老化因素对材料性能的影响,与试验结果吻合较好。但该公式忽略了后固化随温度升高和时间增加对材料的增强作用,贾少澎等^[23]据此改进公式,将碳纤维增强复合材料层合板在高温下发生的后固化增强作用与高温对纤维/基体界面产生的削弱作用进行合并,并考虑温度、湿度和时间对材料性能的叠加影响。通过将试验值与预测值进行对比,验证了该强度估算公式的误差控制在5%以内。

研究表明,在高温环境下,CFRP层间剪切强度由于后固化的作用可能会在试验初期有所提高,而拉伸强度则会随着时间的增加而下降。高温环境会导致树脂增塑和纤维/基体界面黏结力的减弱,进而影响材料的力学性能。然而,研究中存在一些不足之处,例如,缺乏对高温下树脂后固化和界面黏结力变化的详细探究,以及对于预测模型的准确性和误差控制的验证也需要更多的试验数据支持。

2.2 低温环境

碳纤维增强复合材料具有高比强度、高比模量和良好的热学性能,是制备超低温贮箱的首选材料之一。Yang等^[24]研究发现环氧树脂基体的弹性模量和热膨胀系数与温度近似呈线性相关,如图3所示。利用建立的有限元模型对低温下的残余应力进行预测,图4表明两个相邻纤维的距离越近,纤维之间的基体中产生的残余应力越高。Coronado等^[25]研究发现单向碳纤维增强复合材料层合板在低温时表现出更脆的特性,并且随着温度升高,基体延展性显著增加。

从微观角度分析,温度降低,碳纤维增强复合材料基体发生收缩和硬化,体积变小使得分子间距缩短,分子间作用力增加,基体的弹性模量和拉伸强度增加、热膨胀系数降低。在低温环境中,树脂和碳纤维的热膨胀系数不同导致产生残余应力,造成材料内部产生横向裂纹和脱黏。

图3 环氧树脂的弹性模量、热膨胀系数与温度的关系^[24]Fig.3 Relationship between elastic modulus, thermal expansion coefficient and temperature of epoxy resin^[24]图4 有限元模型在-180°C下模型预测的残余应力分布^[24]Fig.4 The residual stress distribution predicted by the finite element model at -180°C^[24]

3 湿度对碳纤维增强复合材料性能影响研究

3.1 水分扩散理论

碳纤维性能稳定,吸湿能力有限,对多数树脂基碳纤维增强复合材料而言,吸湿量主要由树脂决定。水分在树脂基碳纤维增强复合材料中的扩散主要分为两部分:(1)水分渗入树脂基体内部致使树脂溶胀,增加树脂分子间距,增加分子链柔性,导致树脂增塑^[26-27]; (2)在制造 CFRP 的过程中,不可避免的材料缺陷、空隙、裂纹会导致水分子聚集,使得 CFRP 内部能够储存更多的水分。增塑现象会造成树脂拉伸强度和弹性模量的降低^[28]。虽然众多研究中 CFRP 的材料、环境温度和固化工艺不同导致其水分扩散水平差异较大,但铺层方式对水分扩散速率的影响较小,见表 2。

表2 不同铺层方式的碳纤维增强复合材料吸湿特性

Table 2 Hygroscopic properties of CFRP with different layup configurations

铺层方式	饱和吸湿量/%	扩散系数/(mm ² /s)	参考文献
[±45]	1.75	3.36×10^{-7}	[29]
[+45, -45, 0, 90]	1.59	3.27×10^{-7}	[29]
[0]	2.56	11.1×10^{-7}	[30]
[+45, -45, 0, 90]	0.86	8.69×10^{-7}	[31]

碳纤维增强复合材料长期暴露在湿热环境中,会导致可逆的物理变化和不可逆的化学反应^[32],如热膨胀会随着湿度和温度的降低而下降,但水解反应和微裂纹扩散是不可逆的。水分主要从以下三方面影响碳纤维增强复合材料的力学性能:(1)水分在基体中扩散造成基体的力学性能变化;(2)水分在基体中扩散,使得基体膨胀,导致纤维与基体脱离,造成 CFRP 界面性能的下降^[33]; (3)吸湿过程中,树脂基体与碳纤维的吸湿膨胀系数使得界面产生了湿应力^[34]。随着吸湿量的增加,CFRP 的玻璃化转变温度、拉伸强度、弯曲强度、层间剪切强度和弹性模量降低,但韧性有所增加^[35-37]。

3.2 吸湿老化试验

碳纤维增强复合材料的吸湿能力受溶液类型、温度、基体材料、制造工艺和纤维体积分数等因素影响。为探究上述因素对碳纤维增强复合材料吸湿能力的影响及引起的材料性能退化情况,国内外学者开展了大量研究。徐健^[38]将 CFRP 层合板在 60℃水浴环境下分别浸泡 5 天、20 天和 75 天,发现 CFRP 层合板的水分吸收速率随吸湿量的增加而逐渐降低,直至材料达到吸湿饱和。通过解析 Fick 扩散定律,得到该 CFRP 层合板的吸湿饱和时间为 75 天,饱和吸湿

量为 1.11%,平均吸湿率为 $1.95 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$,吸湿环境如图 5 所示。

Kafodya 等^[39]研究了浸泡在蒸馏水和海水中的单向碳纤维增强复合材料层合板吸湿性差异和对其力学性能的影响。通过试验对比发现,碳纤维增强复合材料层合板在海水溶液中的平衡吸湿量比在蒸馏水中高,但是其扩散速率低于在蒸馏水中的扩散速率。因为海水中的离子对材料表面有腐蚀作用,使得 CFRP 表面被破坏,得到了更高的平衡吸湿量,但是海水中的高浓度盐分阻碍了水分渗透,造成了扩散速率的差异。经过 20 周的浸泡后,两种溶液中的碳纤维增强复合材料拉伸强度均无明显变化,如图 6(a)所示。对于层间剪切强度,蒸馏水中的碳纤维增强复合材料下降约 22.3%,海水中下降约 25.9%,如图 6(b)所示。



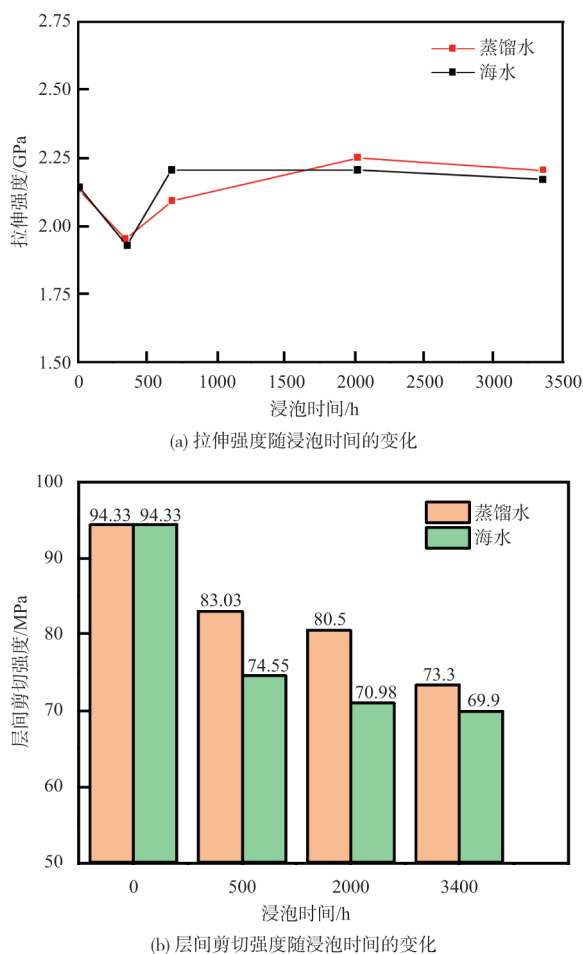
图5 碳纤维增强复合材料层合板吸湿试验^[38]

Fig.5 Moisture absorption test of CFRP laminates^[38]

Da Silva 等^[40]对浸在蒸馏水和人造海水中的单向圆柱形碳纤维增强复合材料棒横截面进行观测,发现了纤维/基质界面的脱黏现象。海水环境中的复合材料损伤程度高于蒸馏水中的复合材料,且损伤由相对稀疏和较小的空隙组成。

马贺^[41]经过试验数据对比发现,相同温度下,单向碳纤维增强复合材料层合板的吸湿率和平衡吸湿量均低于相同基体材料的浇铸体。分析其原因,CFRP 具有额外的吸湿量是因为水分的梯度扩散逐渐演变成沿材料缺陷和空隙发生毛细流动。在扩散速率方面,南田田等^[42]经过试验研究发现,恒温恒湿的环境下,水分主要扩散至树脂基体中,水分扩散速率几乎呈线性变化;同时水分扩散速率主要受溶胀应力和高聚物松弛程度影响,后期吸湿率增加缓慢,逐渐达到平衡,但在短时间内难以达到饱和。

Zhang 等^[43]就厚度对单向碳纤维增强复合材料层合板

图6 碳纤维增强复合材料层合板的力学性能退化^[39]Fig.6 Degradation of mechanical properties of CFRP laminates^[39]

吸湿的影响进行了研究,经过试验研究发现,在相同的老化时间下,随着样品厚度的增加,CFRP层合板的吸湿率在浸入初期降低,在浸入后期增加。同时,弯曲强度保持率通常随着样品厚度增加而增加,在吸湿老化中,也具有更好的强

度保持行为。而拉伸性能主要由碳纤维的性能决定,其受到吸湿行为的影响较小。同时提出了加速因素分析模型,利用离散数据对CFRP的老化行为进行了预测,并且与其所测得的试验数据相吻合。

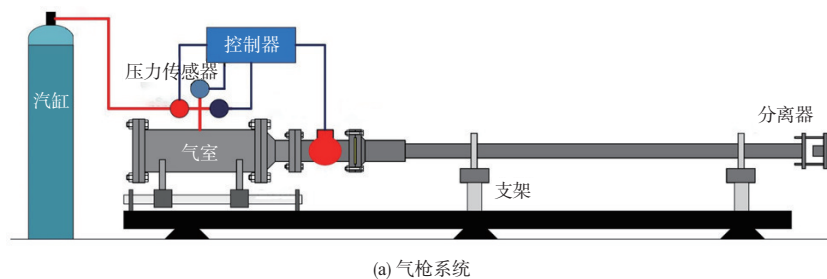
Liu等^[44]研究交叉型碳纤维增强复合材料层合板的抗高速冲击性能时发现,由于水分使得基质软化,老化后的复合材料抗冲击性能得到了提高,弹道冲击测试系统如图7所示。

布特^[45]通过对不同堆叠情况的碳纤维增强复合材料层合板做低速冲击试验,研究发现不同堆叠情况对CFRP层合板吸湿扩散速率、吸湿量和低速冲击性能有着明显的影响。交叉层结构使用越多,碳纤维增强复合材料的吸湿能力越低。铺层数量越多,水分吸收越缓慢。

上述学者开展了对CFRP吸湿性能、力学性能和冲击性能的研究。在吸湿性能方面,CFRP的水分吸收速率随吸湿量的增加而逐渐降低。研究发现在海水环境下,复合材料的吸湿量较高但扩散速率较慢,并且吸湿率随复合材料厚度增加而降低。在力学性能方面,海水和蒸馏水环境对CFRP的拉伸强度无明显影响,但其层间剪切强度随浸泡时间的增加明显下降。水分促进CFRP基质软化,提高了其抗冲击性能。

3.3 吸湿模型

现有文献表明,碳纤维增强复合材料中基体高聚物的吸湿会降低材料性能^[46]。为了准确预测CFRP由于吸湿引起的力学、热物理性能的长期老化行为,通过建模方法预测复合材料吸湿量对研究在役材料损伤和结构失效很有必要。预测吸湿引起的性能退化程度需要一个可以表达给定时间的吸湿量的准确模型,以及CFRP在特定环境中完全饱和的平衡吸湿量。高聚物及碳纤维增强复合材料的吸湿

图7 弹道冲击测试^[44]Fig.7 Ballistic impact testing^[44]

行为在短时间内遵循Fick扩散定律,该定律假设了水分可逆吸收并且吸收的水分子与高聚物之间没有发生化学反应。一维Fick扩散模型被广泛用于表征聚合物的水分扩散行为。该模型虽然在多数情况下有效,但由于碳纤维增强复合材料的各项异性三维扩散存在^[47-48]和样本尺寸限制,可能使得计算结果产生显著误差。通过各向异性Fick扩散模型的三维形式可以准确表征水分的空间扩散规律。

CFRP内部的吸湿行为在短时间内遵循Fick扩散定律,第一阶段吸水后,材料发生化学反应产生亲水基团,同时溶质的阻碍作用使得各项异性复合材料的第二阶段水分扩散过程更加复杂。为准确描述复杂的扩散过程,国内外学者建立了大量经典的复杂吸湿模型,见表3。Grace等^[54]建立了一种新的三维各项异性Non-Fick受阻扩散模型,该受阻模型扩展了经典的Fick理论,考虑了水分子与高聚物的化学反应和物理相互作用的影响。通过将结果与上述三维Fick模型的极限情况进行比较,验证了数值解的准确性,证明了所提出的受阻扩散模型的实用性。谭翔飞等^[55]开展了碳纤维增强复合材料加筋壁板的吸湿特性研究,发现加筋壁板在吸湿后期存在明显的第二阶段吸湿现象,并提出了加筋壁板的第二阶段吸湿模型,并对该型结构的吸湿行为进行了有限元仿真,仿真结果与第二阶段吸湿曲线保持一致,计算误差在5%以内。

Arhant等^[56]采用两阶段模型建立了归一化模型,将归一化后的材料性能分别构造为 $T-T_g$ 的函数和吸湿量的函数,使得每个阶段的性能退化都可以被表示为线性函数。

Papanicolaou等^[57]也将环氧树脂体系的力学和黏弹性行为表示为吸湿量、温度和浸泡时间的函数。但Attukur Nandagopal^[58]提出,这些模型没有考虑在浸泡时间相同的情况下可能会存在吸湿率不同的情况,即没有明确材料最初的降解情况。其修改了Cao等^[59]提出的半经验模型,采用了经验模型和二阶段模型,主要讨论了第一阶段水分扩散对力学性能的影响。其经过对大量模型的总结分析,发现复合材料老化后的拉伸强度、压缩强度和弯曲强度遵循三参数Weibull分布。利用当前的模型,可以预测CFRP老化后的强度及其相应的分布。于倩倩^[60]则利用试验中的老化性能数据建立了二元线性回归模型,并对模型进行了显著性检测和预测,其模型预测精度较高,这证明了通过二元分析回归方法建立试件的湿热老化寿命模型,从一定程度上来说是可行的。

4 湿热耦合环境对碳纤维增强复合材料性能影响研究

碳纤维增强复合材料在实际使用中会长时间处于高温、高湿或海水环境中,而上述因素的耦合作用使得CFRP呈现出不同于单因素作用下的性能退化表现。碳纤维和树脂基体之间存在微裂纹,且随着温度的升高而逐渐外延。在此过程中,水分会扩散并存储在CFRP的裂缝中,加速其微裂纹的外延和水解反应的进行,而水的热膨胀会增加材料内部的湿热应力,对材料内部造成破坏^[61-62]。表4总结了老化环境和老化时间对CFRP静态力学性能的影响。

表3 典型的复合材料吸湿模型

Table 3 Typical moisture absorption model of composites

类型	数学模型	特征	参考文献
Non-Fick 模型	$\frac{M_t}{M_\infty} = \left(1 + k\sqrt{t}\right) \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\exp\left[-(2j+1)^2 \pi^2 \left(\frac{D_s t}{h^2}\right)\right]}{(2j+1)^2}\right]$	扩散速率在前期是恒定的,在后期是变化的	[49]
Langmuir 模型	$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{\beta}{\gamma + \beta} e^{-\gamma t} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{e^{-l^2 t}}{l^2}\right] + \frac{\beta}{\gamma + \beta} (e^{-\beta t} - e^{-\gamma t}) + (1 - e^{-\beta t})$	湿度的空间分布和总吸湿量是时间的函数	[50]
三维受阻扩散模型	$M^* = 1 - \frac{512\mu}{\pi^6} \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{1}{(2p+1)^2 (2q+1)^2 (2r+1)^2} e^{-\alpha t^*} - (1-\mu) e^{-t^*}$	考虑分子间相互作用导致的扩散受阻	[51]
时变扩散模型	$\frac{M_t - M_i}{M_\infty - M_i} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp\left\{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{h^2}\right\} \left[D_0 t + \sum_{r=1}^R D_r \left[t + \tau_r \left(e^{\frac{t}{\tau_r}} - 1\right)\right]\right]\right\}$	扩散速率和边界浓度随时间连续变化	[52]
双扩散模型	$\frac{M_t}{M_\infty} = V_d \left\{1 - \exp\left[-7.3 \left(\frac{D_d t}{h^2}\right)^{0.75}\right]\right\} + (1 - V_d) \left\{1 - \exp\left[-7.3 \left(\frac{D_1 t}{h^2}\right)^{0.75}\right]\right\}$	水分扩散过程与材料密度相关	[53]

注: M_t 为当前吸湿量; M_∞ 为饱和吸湿量; M_i 为初始吸湿量; D 为扩散系数; t 为吸湿时间; μ 为无量纲受阻系数; ϕ 为最大吸湿比; h 为材料厚度; τ_r 为延迟时间; $j, k, \alpha, \beta, \gamma, l$ 为吸湿模型参数。

表4 不同老化环境对碳纤维增强复合材料静态力学性能的影响

Table 4 Effects of different aging environments on the static mechanical properties of CFRP

老化环境	老化时间/天	拉伸强度下降/%	弯曲强度下降/%	参考文献
25℃, 100% RH, 蒸馏水	30	1.04	12.5	[63]
50℃, 100% RH, 蒸馏水	30	7.4	17.2	[63]
60℃, 95% RH, 蒸馏水	400	31.43	27.23	[64]
25℃, 100% RH, 5%NaCl溶液	400	21.43	18.18	[64]
-196~25℃, 循环周期:150	5	2.4	10	[65]
-196~200℃, 循环周期:200	5	9.7	6.4	[66]

Li等^[67]将交叉型碳纤维增强复合材料层合板样本[90/0/±45/0]浸在不同浓度的NaCl溶液中,模拟复合材料在海水环境中的静态/动态力学性能退化,发现第一阶段中溶液温度对吸湿率的影响显著,温度越高,吸湿率和吸湿量越高。随老化时间的增加,基体材料开始膨胀松弛,内部裂纹扩展引起第二阶段吸湿,但该阶段吸湿量增加非常缓慢。在7个月后将样品从溶液中取出放置在室温环境中,吸湿量越高的样本,解吸过程中吸湿量的下降幅度越大,如图8所示。其中,实线为模型拟合曲线,散点为试验数据。但不同的NaCl溶液浓度对CFRP的吸湿行为几乎没有影响。随老化时间的增加,碳纤维增强复合材料拉伸强度和玻璃化转变温度大幅度下降,但对材料的弹性模量和泊松比无明显影响。因为在水分扩散的影响下,基体出现溶胀和增塑现象,使得试件内出现层间界面性能失效,导致拉伸强度降低。对于单向碳纤维增强复合材料而言,弹性模量主要取决于碳纤维的力学性能。由于碳纤维在海水环境中的稳定

性较高,单向碳纤维增强复合材料的弹性模量几乎不受影响。

方毅^[68]研究了不同温度浸泡环境对单向碳纤维增强复合材料层合板的拉伸疲劳性能的影响。20℃浸泡温度对CFRP层合板的疲劳性能基本无影响,最终破坏形式主要为非连续破坏。在40℃和60℃水中浸泡60天时,由于水分子的溶胀,增塑作用引起缺陷增加,复合材料内部微裂纹开始快速积累,最终造成板材失效,严重降低了板材的拉伸疲劳寿命。Ma等^[69]研究了湿热老化对交叉型碳纤维增强复合材料层合板[+45/0/-45/90]抗冲击性能的影响,发现湿热老化没有对冲击损伤样貌造成影响,但在所有试样中,凹痕深度与冲击能量之间存在一个拐点。当冲击能量低于此点时,凹痕深度随冲击能量的增加而缓慢增加,而当冲击能量较高时,凹痕深度急剧增加。

在湿热老化的数值模拟研究方面,Guo等^[70]通过多尺度有限元方法研究了碳纤维增强复合材料的老化规律、吸湿性和残余应力等湿热老化行为,并提出了一个缺陷假设来模拟湿热老化缺陷。在采用层内单元和层间单元建立试样尺寸的CFRP模型时,分别引入三维应变形式Hashin准则和改进的内聚力定律。利用遗传算法对湿热老化过程进行了定量表征。并且在力学性能和失效模式方面观察到试验结果和数值结果的一致性。与半经验方法相比,多尺度模型可以揭示微观结构演变与宏观性能退化之间的关系。

除了湿热老化因素,大气、紫外线、腐蚀性介质等也对碳纤维增强复合材料的力学性能产生很大的影响。对此,刘治国等^[71]采用实验室加速腐蚀环境对多种环境共同作用下的单向碳纤维增强复合材料层合板性能退化做了研究。试验结果表明,经预腐蚀后的CFRP静态力学性能和疲劳性能总体上随着腐蚀周期的延长呈递减趋势,层间剪切强度的下降趋势比疲劳性能和弯曲强度的下降趋势更为明显。Ding等^[72]研究表明,紫外线辐射降低了正交平纹型碳纤维增强复合材料层合板的力学性能,增加了材料的脆性,加速了刚度衰减,缩短了材料的疲劳寿命。

通过对CFRP在不同环境条件下的力学性能进行研究,发现湿热老化、腐蚀性介质和紫外线辐射等因素对材料的力学性能产生了显著影响。在湿热老化方面,温度和溶液浓度对材料的吸湿行为和力学性能退化起着重要作用。但当前研究对不同环境条件下的材料物理机制和微观结构演变的解释还不够深入,需要进一步研究材料的微观结构和化学反应,以揭示其与宏观性能变化之间的关系,并且研究中多采用简化后的试验方法,对于复杂的湿热老化过程

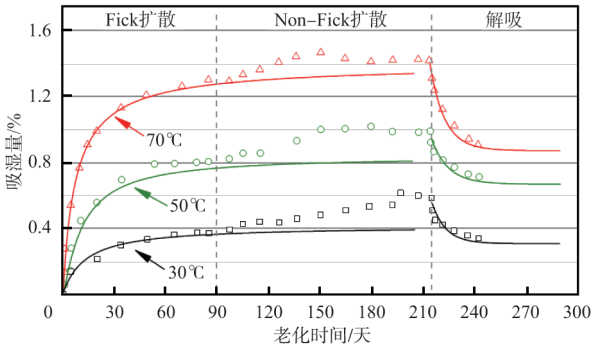


图8 碳纤维增强复合材料在不同温度下3.5% NaCl溶液中的吸湿行为^[67]

Fig.8 Moisture absorption behavior of CFRP in 3.5% NaCl solution with different temperatures^[67]

的定量表征仍然存在一定的局限性。可以考虑结合数值模拟方法,对湿热老化的过程进行更精确的模拟和预测。

5 结论与展望

近年来,围绕碳纤维增强复合材料的水分扩散建模、损伤演化机理和湿热老化性能退化等方面的研究不断深入,取得了丰富的研究成果。湿热环境下CFRP的界面结合性能下降,内部空隙和缺陷为水分扩散提供了空间,促进了裂纹进一步扩展,引起局部残余应力,造成刚度、强度退化和层间失效等。碳纤维增强复合材料种类繁多,制造工艺复杂,作为一种力学性能优异的新型材料,仍有诸多工程应用问题亟待研究。

(1) 极端环境下碳纤维增强复合材料的性能研究

碳纤维增强复合材料广泛应用于飞行器结构和超低温贮存设备。实际服役环境可能面临各种极端工况,结构表面需承受极端温度、超高压强等极度恶劣环境。现有研究的试验环境参数设定普遍较为温和,缺少对极端环境下材料的性能退化研究。开展对极端环境中碳纤维增强复合材料的性能退化研究,拓宽应用领域,可以有效减轻设备重量,提升关键服役性能。

(2) 循环湿热条件下的疲劳寿命预测

疲劳破坏是零部件失效的主要原因之一。对碳纤维增强复合材料在恒定湿热老化环境中的疲劳性能研究较多,但循环湿热条件碳纤维增强复合材料的损伤机制尚未明确,未能建立普遍适用的寿命预测模型。有必要掌握碳纤维增强复合材料的疲劳特性和寿命预测方法,为关键部件的设计开发提供理论支撑。

(3) 复杂环境下多因素耦合作用的损伤演化机制

受限于试验技术和多因素耦合作用下碳纤维增强复合材料内部复杂的湿热老化机制,目前的研究中多以恒温、恒湿和循环湿热条件为主,简化了服役环境对碳纤维增强复合材料的作用机制,其性能退化方面的研究需要充分考虑复杂环境因素、载荷类型、损伤演化等因素。探究盐雾、酸碱、紫外线、疲劳载荷等复杂环境作用下的损伤演化机制,建立微观破坏机理和宏观性能的映射关系,具有重要的理论研究和工程应用价值。

(4) 实际构件的服役环境老化建模

碳纤维增强复合材料作为多相材料,其自身具有显著和丰富的细观结构特征,在湿热环境和大应变率冲击载荷作用下材料表现出复杂的失效与吸能机理,其部件有限元模型远比材料模型复杂,目前国内外学者针对材料层面及

简化模型开展了较多研究,而对实际复杂构件的仿真分析较少。尤其对多向编织碳纤维增强复合材料和纤维缠绕先进碳纤维增强复合材料而言,具有显著的材料—结构—工艺相互影响特征,根据实际应用构件对不同服役环境的响应建立仿真模型,对服役性能评价和寿命预测将具有重要应用价值。

(5) 三维编织碳纤维增强复合材料的制造工艺及性能研究

三维编织复合材料制造及其应用研究一直是国内外三维复合材料的研究热点,三维编织复合材料较普通层合类复合材料具有更高的冲击损伤容限和断裂韧性,尤其适合异形构件的整体成形,但其制作周期长、成本相对较高,目前的应用仅集中在航空航天等领域,加强对三维编织工艺技术及性能的研究,有助于推进其在航空航天为代表的新技术领域的发展和应用。

AST

参考文献

- [1] 刘雪蓉,徐元铭,张卫方,等. 碳纤维增强树脂基复合材料湿热老化研究进展[J]. 纤维复合材料,2020,37(4):20-25.
Liu Xuerong, Xu Yuanming, Zhang Weifang, et al. Research progress of hydrothermal aging of carbon fiber reinforced resin matrix composites[J]. Fiber Composites, 2020, 37(4): 20-25. (in Chinese)
- [2] Alam P, Robert C, Brádaigh C M. Tidal turbine blade composites: A review on the effects of hygrothermal aging on the properties of CFRP[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 149: 248-259.
- [3] Meng Jiangyan, Wang Yunying. A review on artificial aging behaviors of fiber reinforced polymer-matrix composites[C]. MATEC Web of Conferences, 2016: 06041.
- [4] Smith M. New developments in carbon fiber [J]. Reinforced Plastics, 2018, 62(5): 266-269.
- [5] Fan Yuqing, Zhang Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology: advance of aircraft manufacture technology [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2009, 30(3): 534-543.
- [6] 曹景斌,王松,章强. 树脂基复合材料湿热压缩性能研究[J]. 航空科学技术,2020,31(3):47-52.
Cao Jingbin, Wang Song, Zhang Qiang. Research on resin composite hydrothermal compressive properties[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 47-52. (in Chinese)

- [7] 回丽,张旭,许磊,等. 碳纤维/环氧树脂复合材料湿热老化后的力学性能[J]. 机械工程材料,2016,40(1):62-65+97.
Hui Li, Zhang Xu, Xu Lei, et al. Mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites after hygrothermal aging [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(1): 62-65+97. (in Chinese)
- [8] 罗锐祺,刘勇琼,廖英强,等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料力学性能影响因素的研究进展[J]. 材料导报,2021,35(S2): 558-563.
Luo Ruiqi, Liu Yongqiong, Liao Yingqiang, et al. Research progress on the influencing factors of mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Materials Review, 2021, 35(S2): 558-563. (in Chinese)
- [9] 郭聪,陈福龙,李红,等. 单向碳纤维预浸料模压热固化工艺及其对力学性能的影响规律[J]. 航空科学技术,2022,33(1): 107-118.
Guo Cong, Chen Fulong, Li Hong, et al. Compression molding and curing process of unidirectional carbon fiber composite and its effect on mechanical property[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(1): 107-118. (in Chinese)
- [10] Behera A, Vishwakarma A, Thawre M M, et al. Effect of hygrothermal aging on static behavior of quasi-isotropic CFRP composite laminate[J]. Composites Communications, 2020, 17: 51-55.
- [11] 刘旭,陈跃良,霍武军,等. 碳纤维复合材料湿热老化加速关系[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(3):382-388.
Liu Xu, Chen Yueliang, Huo Wujun, et al. Accelerated relationship of hygrothermal aging for carbon fiber/polymer composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 46(3): 382-388. (in Chinese)
- [12] Zhong Yucheng, Cheng Mingyang, Zhang Xin, et al. Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites: A comparative study[J]. Composite Structures, 2019, 211: 134-143.
- [13] Mamalis D, Floreani C, Brádaigh C M. Influence of hygrothermal ageing on the mechanical properties of unidirectional carbon fibre reinforced powder epoxy composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 225: 109281.
- [14] Mouzakis D E, Zoga H, Galiotis C. Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs) [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(3): 467-475.
- [15] 陈伟明,王成忠,周同悦,等. T800碳纤维复合材料界面吸湿性能分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2006(5):20-23+27.
Chen Weiming, Wang Chengzhong, Zhou Tongyue, et al. Study on hydrothermal properties of T800 carbon fiber composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(5): 20-23+27. (in Chinese)
- [16] Shetty K, Srihari S, Manjunatha C M. Effect of hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of a carbon fibre composite[J]. Procedia Structural Integrity, 2019(14): 849-854.
- [17] 杜永,马玉娥. 湿热环境下纤维增强树脂基复合材料疲劳性能研究进展[J]. 复合材料学报,2022,39(2):431-445.
Du Yong, Ma Yu'e. Fatigue performance of fiber reinforced polymer composites under hygrothermal environment: A review [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 431-445. (in Chinese)
- [18] Wang Ke, Young B, Smith S T. Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(7): 2154-2161.
- [19] 谭伟,那景新,任俊铭,等. 高温环境下碳纤维增强树脂复合材料的层间力学性能老化行为与失效预测[J]. 复合材料学报,2020,37(4):859-868.
Tan Wei, Na Jingxin, Ren Junming, et al. Aging behavior and failure prediction of interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite at high temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 859-868. (in Chinese)
- [20] 冯振宇,马骢瑶,霍雨佳,等. 湿热环境对CFRP层板压缩性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2018,34(8):48-54.
Feng Zhenyu, Ma Congyao, Huo Yujia, et al. Hygrothermal effects on compression property of CFRP laminates[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(8): 48-54. (in Chinese)
- [21] 陈明,龙连春,陈众迎,等. 复合材料高温强度测试分析及数值模拟[J]. 材料导报,2010,24(7):81-84.
Chen Ming, Long Lianchun, Chen Zhongying, et al. Test and numerical simulation of failure strength for the composite material at high temperature[J]. Materials Review, 2010, 24(7):

- 81-84. (in Chinese)
- [22] 张颖军, 朱锡, 梅志远, 等. 聚合物基复合材料老化剩余强度等效预测方法研究[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 150-152.
- Zhang Yingjun, Zhu Xi, Mei Zhiyuan, et al. Equivalent estimating methods of ageing on polymer matrix composites residual strength[J]. Materials Review, 2012, 26(8): 150-152. (in Chinese)
- [23] 贾少澎, 纪乾, 秦嘉徐, 等. 湿热环境对CFRP层板力学性能影响预测[J]. 现代塑料加工应用, 2018, 30(5): 23-27.
- Jia Shaopeng, Ji Qian, Qin Jiaxu, et al. Prediction of influence of hygrothermal environment on mechanical properties of CFRP laminates[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(5): 23-27. (in Chinese)
- [24] Yang Lei, Li Zhiwei, Xu Hao, et al. Prediction on residual stresses of carbon/epoxy composite at cryogenic temperature [J]. Polymer Composites, 2019, 40(9): 3412-3420.
- [25] Coronado P, Argüelles A, Viña J, et al. Influence of temperature on a carbon fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode-I delamination[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(21): 2934-2940.
- [26] 王晓洁, 梁国正, 张炜, 等. 湿热老化对高性能复合材料性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(4): 301-304.
- Wang Xiaojie, Liang Guozheng, Zhang Wei, et al. Effects of hydrothermal aging on properties of high-performance composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(4): 301-304. (in Chinese)
- [27] 韩啸, 金勇, 杨鹏. 结构胶接头湿热环境耐久性研究概述[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(3): 209-217.
- Han Xiao, Jin Yong, Yang Peng. Review of research on the hygrothermal environmental durability of structural adhesively bonded joints[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(3): 209-217. (in Chinese)
- [28] Wong E H, Park S B. Moisture diffusion modeling: A critical review[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 65: 318-326.
- [29] Behera A, Dupare P, Thawre M M, et al. Effects of hygrothermal aging and fiber orientations on constant amplitude fatigue properties of CFRP multidirectional composite laminates[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105590.
- [30] 邹在平, 孟兵, 何文佩, 等. 不同水环境下碳纤维增强EP复合材料的吸湿老化[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9): 116-120+143.
- Zou Zaiping, Meng Bing, He Wenpei, et al. Hygroscopic aging of carbon fiber reinforced ep resin composites in different water environment[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 116-120+143. (in Chinese)
- [31] 回丽, 许磊, 许良, 等. 碳纤维增强环氧复合材料吸湿行为研究[J]. 化工新型材料, 2014, 42(7): 90-92.
- Hui Li, Xu Lei, Xu Liang, et al. Research on water-sorption behavior of carbon fiber reinforced epoxy composite laminates [J]. New Chemical Materials, 2014, 42(7): 90-92. (in Chinese)
- [32] 吕小军, 张琦, 马兆庆, 等. 湿热老化对碳纤维/环氧树脂基复合材料力学性能影响研究[J]. 材料工程, 2005(11): 50-53+57.
- Lyu Xiaojun, Zhang Qi, Ma Zhaoqing, et al. Study of hydrothermal aging effect on mechanical properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(11): 50-53+57. (in Chinese)
- [33] Toscano A, Pitarresi G, Scafidi M, et al. Water diffusion and swelling stresses in highly crosslinked epoxy matrices[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 133: 255-263.
- [34] Wang Zike, Huang Xiangyu, Xian Guijun, et al. Effects of surface treatment of carbon fiber: Tensile property, surface characteristics, and bonding to epoxy[J]. Polymer Composites, 2016, 37(10): 2921-2932.
- [35] 王迎芬, 彭公秋, 谢富原. 国产T700级碳纤维/BMI复合材料湿热性能[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(3): 16-22.
- Wang Yingfen, Peng Gongqiu, Xie Fuyuan. Hygrothermal properties of domestic T700 carbon fiber/bismaleimide composites[J]. Materials Science and Technology, 2018, 26(3): 16-22. (in Chinese)
- [36] 李宏福, 王淑范, 孙海霞, 等. 连续碳纤维/尼龙6热塑性复合材料的吸湿及力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(1): 114-121.
- Li Hongfu, Wang Shufan, Sun Haixia, et al. Water absorption and mechanical property of continuous carbon fiber/polyamide 6 composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(1): 114-121. (in Chinese)
- [37] Jia Nanying, Kagan V. Mechanical performance of polyamides with influence of moisture and temperature-accurate evaluation and better understanding[M]. Morristown: Plastics Failure

- Analysis and Prevention, 2001.
- [38] 徐健. 基于湿热耦合损伤的CFRP力学性能退化研究[D]. 大连:大连理工大学,2023.
- Xu Jian. Degradation of CFRP mechanical properties based on moisture and heat coupled damage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [39] Kafodya I, Xian Guijun, Li Hui. Durability study of pultruded CFRP plates immersed in water and seawater under sustained bending: Water uptake and effects on the mechanical properties [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 138-148.
- [40] Da Silva L V, Da Silva F W, Tarpani J R, et al. Ageing effect on the tensile behavior of pultruded CFRP rods[J]. Materials & Design, 2016, 110: 245-254.
- [41] 马贺. CCF300/Hby8485湿热性能演变规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Ma He. Evolution rules of hygrothermal properties of CCF300/Hby8485[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [42] 南田田. 湿热环境下弯曲载荷对CFRP性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Nan Tiantian. Influence of bending load on the properties of CFRP under hygrothermal environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [43] Zhang Xue, Wang Yanlei, Wan Baolin, et al. Effect of specimen thicknesses on water absorption and flexural strength of CFRP laminates subjected to water or alkaline solution immersion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 314-325.
- [44] Liu Lulu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, et al. An experimental investigation on high velocity impact behavior of hygrothermal aged CFRP composites[J]. Composite Structures, 2018, 204: 645-657.
- [45] 布特. 湿热老化对CFRP复合材料力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Butt H A. Effect of hygrothermal ageing on the mechanical properties of CFRP composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [46] Meng Maozhou, Le Huirong, Grove S, et al. Moisture effects on the bending fatigue of laminated composites [J]. Composite Structures, 2016, 154: 49-60.
- [47] Hamidi Y K, Aktas L, Altan M C. Formation of microscopic voids in resin transfer molded composites[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(4): 420-426.
- [48] Arao Y, Koyanagi J, Hatta H, et al. Analysis of time-dependent deformation of CFRP considering the anisotropy of moisture diffusion[J]. Advanced Composite Materials, 2008, 17(4): 359-372.
- [49] Bao L, Yee A F, Lee C Y C. Moisture absorption and hygrothermal aging in a bismaleimide resin[J]. Polymer, 2001, 42(17): 7327-7333.
- [50] Carter H G, Kibler K G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins[J]. Journal of Composite Materials, 1978, 12(2): 118-131.
- [51] Grace L R, Altan M C. Characterization of anisotropic moisture absorption in polymeric composites using hindered diffusion model[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(8): 1187-1196.
- [52] Roy S, Xu W X, Park S J, et al. Anomalous moisture diffusion in viscoelastic polymers: modeling and testing[J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 67(2): 391-396.
- [53] Maggana C, Pissis P. Water sorption and diffusion studies in an epoxy resin system[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1999, 37(11): 1165-1182.
- [54] Grace L R, Altan M C. Non-fickian three-dimensional hindered moisture absorption in polymeric composites: Model development and validation[J]. Polymer Composites, 2013, 34 (7): 1144-1157.
- [55] 谭翔飞, 谭鹏达, 何宇廷, 等. 航空碳纤维增强树脂基复合材料加筋壁板吸湿行为[J]. 材料工程, 2018, 46(12): 61-69.
- Tan Xiangfei, Tan Pengda, He Yuting, et al. Moisture behavior of aeronautic carbon fiber reinforced resin composite stiffened panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 61-69. (in Chinese)
- [56] Arhant M, Le Gac P Y, Le Gall M, et al. Effect of sea water and humidity on the tensile and compressive properties of carbon-polyamide 6 laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 250-261.
- [57] Papanicolaou G C, Kosmidou T V, Vatalis A S, et al. Water absorption mechanism and some anomalous effects on the mechanical and viscoelastic behavior of an epoxy system[J].

- Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99(4): 1328-1339.
- [58] Attukur Nandagopal R, Gin Boay C, Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material[J]. Composite Structures, 2020, 236: 111876.
- [59] Cao Shenghu, Wang Xin, Wu Zhishen. Evaluation and prediction of temperature-dependent tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(9): 799-807.
- [60] 于倩倩,侯俊峰,陈刚,等. 碳纤维复合材料热老化性能研究及预测[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013, (8): 39-43.
- Yu Qianqian, Hou Junfeng, Chen Gang, et al. The study and prediction of aging properties of CFRP[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013, (8): 39-43. (in Chinese)
- [61] 潘峤,韩保红,汤智慧,等. 碳纤维增强复合材料的环境适应性研究进展[J]. 环境技术, 2016, 34(5): 102-106.
- Pan Qiao, Han Baohong, Tang Zhihui, et al. Environmental durability of carbon fiber reinforced polymer/plastic: A recent literature review of theories and researches development[J]. Environmental Technology, 2016, 34(5): 102-106. (in Chinese)
- [62] Sun Pei, Zhao Yan, Luo Yunfeng, et al. Effect of temperature and cyclic hygrothermal aging on the interlaminar shear strength of carbon fiber/bismaleimide (BMI) composite[J]. Materials & Design, 2011, 32(8-9): 4341-4347.
- [63] 余海燕,吴航宇,石慧茹. 湿热环境中碳纤维复合材料层合板的强度退化及老化寿命预测[J]. 机械工程材料, 2021, 45(4): 40-45.
- Yu Haiyan, Wu Hangyu, Shi Huiru. Strength degradation and aging life prediction for carbon fiber reinforced polymers laminates in hygrothermal environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(4): 40-45. (in Chinese)
- [64] 王登霞,孙岩,谢可勇,等. 碳纤维增强树脂基复合材料模拟海洋环境长期老化及失效行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1353-1362.
- Wang Dengxia, Sun Yan, Xie Keyong, et al. Long term aging and failure behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites in simulated marine environments[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1353-1362. (in Chinese)
- [65] Meng Jinxin, Wang Yong, Yang Haiyang, et al. Mechanical properties and internal microdefects evolution of carbon fiber reinforced polymer composites: Cryogenic temperature and thermocycling effects[J]. Composites Science and Technology, 2020, 191: 108083.
- [66] 陈健. 温度循环骤变对碳纤维增强复合材料机械性能的影响[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- Chen Jian. Effects of temperature cycling on mechanical properties of carbon fiber reinforced composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2020. (in Chinese)
- [67] Li Hailin, Zhang Kaifu, Fan Xintian, et al. Effect of seawater ageing with different temperatures and concentrations on static/dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019 (173): 106910.
- [68] 方毅. 湿热老化对碳纤维/环氧树脂板材拉伸疲劳性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Fang Yi. Effects of hygrothermal aging on the tensile fatigue behaviors of carbon fiber reinforced epoxy plates[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [69] Ma Shaohua, He Yi, Hui Li, et al. Effects of hygrothermal and thermal aging on the low-velocity impact properties of carbon fiber composites[J]. Advanced Composite Materials, 2019, 29(1): 55-72.
- [70] Guo Fangliang, Huang Pei, Li Yuanqing, et al. Multiscale modeling of mechanical behaviors of carbon fiber reinforced epoxy composites subjected to hygrothermal aging[J]. Composite Structures, 2021, 256: 113098.
- [71] 刘治国,于德会,吕航. 加速腐蚀环境对碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响[J]. 强度与环境, 2014, 41(4): 53-57.
- Liu Zhiguo, Yu Dehui, Lyu Hang. Research on accelerated corrosion environment impact on mechanical properties of carbon fiber reinforced composite material[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(4): 53-57. (in Chinese)
- [72] Ding Junliang, Cheng Li. Experimental study on ultrasonic three-point bending fatigue of CFRP under ultraviolet radiation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021(242): 107435.

Review on the Effects of Temperature and Moisture on the Aging of Carbon Fiber Reinforced Polymers

Fan Junling¹, Ma Guoqing², Jiao Ting¹, Chen Zengmei², Han Xiao²

1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China

2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) have been widely used in many industrial fields due to its satisfactory mechanical, physical and chemical properties. In engineering application, the service life and performance durability are key issues. Resin is usually adopted as the matrix of CFRP, which is easily affected by the environment, leading to significant impact on the composite performance. First, this paper introduces the effects of environmental temperature on the properties of CFRP, summarizing the theory of moisture diffusion models. Then, this paper sorts out the effects of moisture-temperature coupled environment on the properties of CFRP, including theoretical, experimental and finite element methods, etc. Finally, combined with the problems and challenges on the research of hygrothermal aging in CFRP, feasible research directions are prospected.

Key Words: CFRP; environmental durability; hygrothermal aging; finite element modeling; moisture diffusion

Received: 2023-05-11; **Revised:** 2023-06-17; **Accepted:** 2023-07-11

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20200009023004)