

碳纤维复合材料湿热老化加速关系

刘旭¹ 陈跃良¹ 霍武军¹ 徐丽² 王莉³

(1. 海军航空工程学院青岛校区航空机械系, 青岛, 266041;

2. 海军航空兵学院, 葫芦岛, 125001; 3. 海军航空工程学院青岛校区航空军械系, 青岛, 266041)

摘要: 受环境因素作用, 碳纤维增强聚合物基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer composites, CFRP) 湿热环境下发生性能退化是一个重要的工程问题, 而如何通过实验室加速试验再现自然环境对复合材料的老化作用成为解决此问题的关键。基于时间-温度-湿度等效原理, 将湿热环境下 CFRP 粘弹性能的改变作为材料的老化损伤度量, 建立不同湿热环境之间当量折算关系, 提出加速老化当量折算系数的确定方法。以典型军机结构用 CFRP 为例, 实例计算了材料不同温度、湿度环境下的当量折算系数, 根据地面停放环境谱当量折算得到加速试验谱, 加速效果令人满意。最后, 对比分析了温度与湿度对当量折算系数的影响, 结果表明, 温度变化对当量折算系数的影响要比湿度变化的影响显著。

关键词: 碳纤维复合材料; 时间-温度-湿度等效原理; 湿热老化; 加速关系

中图分类号: TB332; TB302.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)03-0382-07

Accelerated Relationship of Hygrothermal Aging for Carbon Fiber/Polymer Composites

Liu Xu¹, Chen Yueliang¹, Huo Wujun¹, Xu Li², Wang Li³

(1. Machinery Department of Aerospace, Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute,

Qingdao, 266041, China; 2. Institute of Naval Aviation, Huludao, 266041, China;

3. Armament Department of Aerospace, Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao, 266041, China)

Abstract: Affected by environment elements, the degeneration of mechanical property for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites under hygrothermal environments is an important engineering problem, and the key segment on solving this problem is how to reappear the aging effect of natural environment on CFRP by taking accelerated aging experiments under laboratory condition. Based on time-temperature-humidity superposition principle (TTHSP), the change of viscoelasticity for CFRP is considered as damage measure for Hygrothermal aging. The equivalent conversion relationship between different Hygrothermal environments is determined, and the calculating method of equivalent conversion coefficient is provided. Taking a typical CFRP used in warcraft structure for example, equivalent conversion coefficients under different hygrothermal environments are calculated, the accelerated aging environment spectrum are programmed according to the conversion of ground parking environment spectrum, and the accelerating result is acceptable. Finally, the influences of temperature and humidity on equivalent conversion coefficient are checked, and the result shows that the influence of temperature change on equivalent conversion coefficient is more remarkable than that of humidity change.

Key words: carbon fiber/polymer composites; time-temperature-humidity superposition principle (TTHSP); hygrothermal aging; accelerating relationship

基金项目: 航空科学基金(2008ZH85001)资助项目。

收稿日期: 2013-12-24; **修订日期:** 2014-03-24

通信作者: 陈跃良, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cy10532@sina.com。

对于飞机停放环境谱,各种环境要素组成复杂,作用时间漫长,既有谱的变化,又有作用时间长短的不同,在实验室真实模拟这些环境作用困难大、周期长、费用高。在工程实践中,需要以飞机停放环境谱为基础加以简化和加速,拟定实验可行的当量加速试验谱,使之能在实验室内短期再现环境要素对飞机材料/结构的老龄化作用。对于金属材料/结构腐蚀损伤表征与加速腐蚀当量关系的研究,目前已有大量成果,技术也已比较成熟^[1-2]。对于碳纤维增强聚合物基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer composites, CFRP)/结构,由于老化机理等研究水平所限,此方面研究的报道尚不多见。文章在前期对 CFRP 力学性能时间-温度-湿度相关性研究的基础上^[3-4],旨在建立粘弹性能改变等效原则下不同湿热环境之间 CFRP/结构的老龄化损伤当量关系,即以材料实验条件下某种加速/参考环境下的老化效应当量地表征一种实际环境/环境谱作用下的老化效应。为 CFRP 环境加速试验、结构耐久性设计以及结构全寿命期内的老化环境工程研究奠定基础。

1 CFRP 力学性能时间-温度-湿度相关性

大量研究表明^[5-8],聚合物基体的粘弹性决定了复合材料的性能也是粘弹性的,CFRP 不仅在玻璃化转变温度以上为粘弹性材料,在玻璃化转变温度以下长时间加载也表现出粘弹性特征。粘弹性材料力学性能的最显著特征是它的时间相关性,其本质在于材料特征时间的存在^[7]。这个时间对环境因素(包括温度、湿度、应力水平等)十分敏感,会随环境因素的变化而改变。影响复合材料特征时间的环境因素有很多种,其中温度、湿度是最主要的两个因素。

1.1 时间-温度等效原理

目前,时间-温度等效原理在复合材料性能预测研究方面得到了大量试验与理论验证,已经有比较成熟的试验和理论结果。最简单的时温等效关系是指,只要改变时间标度,就可以使温度 T 和某一参考温度 T_0 下的应力松弛模量曲线重合,其实质在于材料粘弹性松弛时间的温度相关性。此种思想在数学上可表示为

$$E(T_0, \frac{t}{\alpha_T}) = E(T, t) \quad (1)$$

式中: E 为应力松弛模量; α_T 为松弛模量-时间曲线的移位因子。式(1)表明, T 温度下 t 时刻的应

力松弛模量可用 T_0 温度下 t/α_T 时刻的数值来表示,改变温度的效应等同于在时间标尺上乘上一个因子或在时间对数标尺上加一个因子。同理,对于蠕变柔量 J 、动态力学实验中的储能模量 E' 和储能柔量 J' , 时间-温度等效原理同样适用。

Williams 等^[9]根据大量的实验结果,将沿时间的对数轴平移和温度变化联系起来,发现了温度移位因子表达式为

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (2)$$

此式即为著名的 WLF 方程,式中 C_1, C_2 为材料常数。

1.2 时间-温度-湿度等效原理

与时间-温度等效原理相比,复合材料湿度-时间等效原理的研究起步较晚,近几年得到快速发展。Kang 等^[7]以吸湿性较强的尼龙 6 为试验材料,对时间-湿度等效原理进行了实验验证,给出湿度-时间等效原理的初步推导。Miyano 等^[5-6,8]在复合材料力学行为的温度-时间相关性方面做了卓有成效的实验研究,发现纤维增强树脂基复合材料力学性能不仅具有时间、温度相关性,还强烈地依赖于材料的吸水率。文献^[3,4]实验验证了 CFRP 力学性能的湿度相关性,并借鉴时间-温度理论推导思路,基于自由体积理论和线性溶胀假设推导了综合温度与湿度因素的时间-温度-湿度移位因子 α_{TM} 表达式

$$\log \alpha_{TM} = \frac{-B}{2.303f_0} \left[\frac{e_T(T - T_0) + e_M(M - M_0)}{f_0 + e_T(T - T_0) + e_M(M - M_0)} \right] - C_1 \left[\frac{C_3(T - T_0) + C_2(M - M_0)}{C_2C_3 + C_3(T - T_0) + C_2(M - M_0)} \right] \quad (3)$$

式中: e_T 为自由体积分数的热膨胀系数; e_M 为自由体积分数的湿度溶胀系数; M 为材料湿度含量; M_0 为参考湿度含量; f_0 为材料在参考湿度含量 M_0 、参考温度 T_0 下的自由体积分数; B 和 C_3 为材料常数。由表达式可知若材料湿度含量无变化, $M - M_0 = 0$, 则式(3)即为式(2)。若材料温度无变化, $T - T_0 = 0$, 则可得纯湿度含量移位因子

$$\log \alpha_M = \frac{-C_1(M - M_0)}{C_3 + M - M_0} \quad (4)$$

2 基于 TTHSP 的湿热老化加速关系

CFRP 加速老化当量折算关系研究是在基本实现模拟实际环境条件(即已经完成环境谱的编制工作)基础上的研究。通常是通过将环境谱加速,用较短的实验时间达到与地面停放若干年相同的

老化损伤效果,即研究建立当量关系及编制加速老化试验谱。不同环境间加速老化当量关系的确立必须遵循老化损伤的等效原则。

2.1 CFRP 环境老化性度量参量选择

为建立材料参考环境/加速老化试验谱与实际环境/环境谱之间老化损伤的等效关系,需要选择合适的环境老化性度量参量分别表征不同环境材料指定时间下的老化损伤量。目前,表征金属腐蚀损伤的度量参量很多,如腐蚀前后蚀坑深度、直径变化,腐蚀面积,重量/质量损失,单位面积上腐蚀点数及点蚀因子等。由于复合材料老化机理的复杂性,老化影响因素的多样性、可变性,对于不同的环境条件,复合材料的耐老化性能可以有不同的术语和表征方法,相应的老化性度量参量也有不同的选择。

当复合材料处于地球气候的自然环境,其耐老化性能称为耐候性,可选用复合材料在大气环境中经一定时间的性能保留率作为老化性度量参量;当复合材料处于水环境,其耐老化性称为耐水性,主要用浸泡一定时间后的性能保留率来作为老化性度量参量;当复合材料处于化学介质环境,其耐老化性称为耐化学介质性,主要采用单位时间内材料单位面积上老化的质量或单位时间内老化的厚度来作为老化性度量参量;当复合材料处于高温有氧环境,其耐老化性称为抗氧化性,它主要用气氛性质(氧浓度、流动状态、温度及压力)和单位时间内复合材料消耗的厚度和单位面积上消耗的质量来表征作为老化性度量参量。

依据 CFRP 力学性能温度-时间相关性研究,温度、湿度是影响复合材料粘弹性力学性能的两个最主要的环境因素,均具有时间等效性。对于同一复合材料结构,相同外部载荷条件下,不同湿热环境,所观察到的力学松弛现象不同。环境老化性强的(较高温度、较大湿度),力学松弛过程越快,观察的力学松弛现象越靠后;环境老化性弱的(较低温度、较小湿度),力学松弛过程越慢,观察的力学松弛现象越靠前。本文选择复合材料粘弹性能变化的表征量(主要由应力松弛模量曲线 $E(t)$ 、或蠕变柔量曲线 $J(t)$ 、储能模量曲线 $E'(t)$ 等表征)作为不同温湿度环境下复合材料的老化性度量参量。

2.2 CFRP 湿热环境谱当量折算原理

记碳纤维/环氧树脂基复合材料饱和吸湿量(100%RH 下材料的平衡吸湿量)为 $M_{\text{饱}}$,则由文献[10]知,某一相对湿度下,复合材料平衡吸湿量 M 近似等于相对湿度 RH 乘以材料的饱和吸湿量

$M_{\text{饱}}$,即

$$M = RH \times M_{\text{饱}} \quad (5)$$

对处于实验条件下某种加速/参考环境(温度 T_1 、相对湿度 RH_1)下的复合材料结构(假设其已达到吸湿平衡),记平衡吸湿量为 M_1 ,则有

$$M_1 = RH_1 \times M_{\text{饱}} \quad (6)$$

同理,实际环境/环境谱(温度 T_0 、相对湿度 RH_0)下的平衡吸湿量 M_0 记为

$$M_0 = RH_0 \times M_{\text{饱}} \quad (7)$$

根据老化损伤等效原则,对于同一种复合材料、同一构件形式,若加速/参考环境(温度 T_1 、相对湿度 RH_1)下的应力松弛模量 $E(t)$ 与实际环境/环境谱(温度 T_0 、相对湿度 RH_0)下的 $E(t_0)$ 相等,则可建立两种环境下的老化损伤等量关系。即

$$E(T, M, t) = E(T_0, M_0, t_0) \quad (8)$$

根据时间-温度-湿度等效原理,欲实现此两种环境下的应力松弛模量-对数时间曲线的重合,仅需在对数时间轴上水平移动一个位移量(为简单起见,略去了纵向的移动;若考虑纵向移动,只会增大本讨论的复杂性,而对结论无本质性的影响),如图 1 所示。

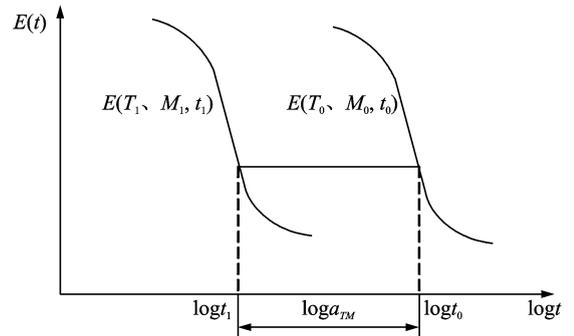


图 1 时间-温度-湿度移位示意图

Fig. 1 Shift of time-temperature-humidity

由图可知

$$\log t_0 = \log t_1 + \log \alpha_{TM} \quad (9)$$

所以有

$$t_1 = t_0 / \alpha_{TM} \quad (10)$$

式中记 $\alpha = 1/\alpha_{TM}$ 为当量折算系数。该式表明:为了得到复合材料在温度 T_0 、相对湿度 RH_0 下较长时间 t_0 时的粘弹性能,可通过加速实验的方式,将环境条件的老化性加重至温度 T_1 、相对湿度 RH_1 并进行移位,在较短的时间 t_1 内完成。经过当量折算后,实验时间 t_0 可缩短 $1/\alpha_{TM}$ 倍,达到实际环境/环境谱与实验室加速环境在老化损伤等效条件下实验过程当量加速的目的。

2.3 当量折算系数的确定

2.3.1 理论折算方法

对于纯温度作用下的复合材料试件,由 WLF 方程知,某一环境温度 T 下的应力松弛模量-对数时间曲线向参考温度 T_0 下的应力松弛模量-对数时间曲线移位时,需进行的移位量如式(2)所示。

相应的环境当量折算系数为

$$\alpha_T = 10^{\frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}} \quad (11)$$

对于不同的聚合物材料, C_1, C_2 的值略有不同,无实验数据的聚合物一般可取普适常数 17.4, 51.6, 常见的聚合物的 C_1, C_2 值如表 1 所示。

表 1 WLF 参数

Tab.1 Parameters of WLF equation

聚合物	C_1	C_2	T_g/K
聚异丁烯	16.6	104	202
天然橡胶(三叶胶)	16.7	53.6	200
聚氨酯弹性体	15.6	32.6	238
聚苯乙烯	14.5	50.4	373
聚甲基丙烯酸酯	17.6	65.5	335
“普适常数”	17.4	51.6	

对于温度、湿度共同作用下的复合材料试件,由时间-温度-湿度等效原理知,某一环境温度 T 、湿度含量 M 下的应力松弛模量-对数时间曲线向参考温度 T_0 、湿度含量 M_0 下的应力松弛模量-对数时间曲线移位时,需进行的移位量如式(3)所示。

相应的环境当量折算系数为

$$\alpha_{TM} = \frac{1}{\alpha_{TM}} = \frac{1}{10^{-C_1 \left[\frac{C_3(T-T_0)+C_2(M-M_0)}{C_2C_3+C_3(T-T_0)+C_2(M-M_0)} \right]}} \quad (12)$$

式中 C_1, C_2 的值同式(11)取值, C_3 可通过纯湿度作用下力学松弛实验求得,求出后代入式(12)即得当量折算系数 α_{TM} 。由式(12)可以看出,在参考条件(温度 T_0 、湿度含量 M_0)下 $\log \alpha_{TM}$ 为 0, 环境当量折算系数 α_{TM} 为 1。

2.3.2 工程折算方法

实际服役环境中飞机复合材料承力结构的 $E(t)$ 或 $J(t)$ 测量比较困难,尤其是测试仪器和设备的安装受到结构空间及飞行限制变得非常麻烦。工程上可考虑对复合材料结构模拟件在实验室开展一种常用的实验,即力学松弛实验(包括应力松弛和蠕变)来确定当量折算系数。如可在实验室利用材料性能测试机对复合材料模拟试验件在不同的温度、湿度含量下进行拉伸蠕变实验,测量恒定应力下拉伸蠕变柔量曲线 $J(t)$ 随时间的变化。将各温湿度下一系列蠕变柔量-对数时间曲线向某一温湿度下的参考曲线移位,就得到此温湿度下包含

许多数量级的单根蠕变柔量主曲线。移位的距离就是温度-湿度联合移位因子。

对于某型复合材料结构试件,分别绘制温度 T , 相对湿度 RH 条件下的蠕变柔量-对数时间曲线 $J(t)$ 和参考温度 T_0 , 相对湿度 RH_0 时蠕变柔量-对数时间曲线 $J(t_0)$ 。若选择温度 T_0 , 相对湿度 RH_0 的参考环境条件作为加速老化的基准实验条件,记移位曲线 $J(t)$ 与参考曲线 $J(t_0)$ 的最佳移位距离为 d , 则可得温度 T , 相对湿度 RH 的湿热环境相对于参考环境的当量折算系数为

$$\alpha = \frac{1}{10^d} \quad (13)$$

3 算 例

实验选用典型军机结构用 T300/4211 复合材料单向横向试件,测得 15 组不同温湿度组合条件下试件吸湿平衡后的蠕变柔量 $J(t)$ -对数时间曲线如图 2 所示^[4]。

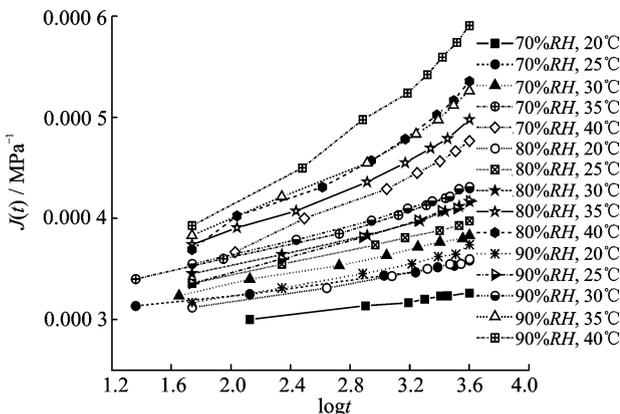


图 2 试件不同温湿度组合下蠕变柔量-对数时间曲线

Fig.2 Relation of creep compliance and log time under different temperature and humidity for specimens

选择温度 40 °C、相对湿度 90% 时的试验条件作为参考基准,把图 2 中其他环境条件下试件蠕变柔量-对数时间曲线均往温度 40 °C、相对湿度 90% 的条件下试件蠕变柔量-对数时间曲线上移位,利用 MathCAD 程序计算所得到的最佳移位距离,即温度-湿度联合移位因子值如表 2 所示。

表 2 温度-湿度联合移位因子 d

Tab.2 Unite shift factor of temperature and humidity

RH / %	$t/^\circ\text{C}$				
	20	25	30	35	40
70	3.72	1.78	1.43	0.33	0.15
80	3.06	1.71	1.38	0.28	0.09
90	2.82	1.76	1.35	0.26	0

对应当量折算系数 α 见表 3。

表 3 当量折算系数 α

Tab. 3 Equivalent reduced coefficient α

RH / %	$t / ^\circ\text{C}$				
	20	25	30	35	40
70	1.905E-4	1.659E-2	3.715E-2	0.467	0.708
80	8.709E-4	1.949E-2	4.168E-2	0.524	0.812
90	1.513E-3	1.737E-2	4.468E-2	0.55	1

对于 T300/4211 材料,用表 3 中相对温度、湿度环境条件下的 α 值,对某机场地面停放温度与相

对湿度的平均月谱(见表 4),进行折算,再将折算后的各月时间值累加,结果写入合计栏,就得到该地区当量折算后的温度、湿度平均月谱,如表 5 所示。由表 4 与表 5 的对比结果可知,经加速老化当量折算后,T300/4211 材料在该停放环境谱共 15 级温度、湿度组合下总计 1 797.3 h 的粘弹性力学行为(蠕变/应力松弛/动态力学性能等),可通过温度 40 $^\circ\text{C}$ 、相对湿度 90% 组合试验条件下 24.04 h 的加速实验得到,过程加速 74.8 倍,加速效果令人满意。

表 4 某机场地面停放温度、相对湿度平均月谱

Tab. 4 Average month spectrum of ground temperature-RH at certain airport h

RH / %	$t / ^\circ\text{C}$	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
70	20	0	0	0	0.0	5.3	35.5	22.8	1.7	14.0	30.3	10.0	0.7
	25	0	0	0	0.0	1.0	9.3	40.5	30.2	23.9	6.7	1.7	0.0
	30	0	0	0	0.0	0.0	0.3	7.5	39.2	19.0	0.5	0.0	0.0
	35	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
80	20	0	0	0	1.2	10.1	58.3	74.0	11.5	38.7	75.0	14.8	0.3
	25	0	0	0	0.0	0.7	12.1	63.8	132.7	102.9	12.9	0.0	0.0
	30	0	0	0	0.0	0.0	0.9	12.6	51.9	21.2	2.0	0.0	0.0
	35	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
90	20	0	0	0	0.5	6.8	47.9	119.5	57.7	103.4	55.1	10.6	0.0
	25	0	0	0	0.0	0.0	3.5	50.4	189.4	127.2	5.1	0.0	0.0
	30	0	0	0	0.0	0.0	1.8	11.8	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	35	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 5 某机场当量折算后的温度、相对湿度平均月谱

Tab. 5 Average month spectrum of equivalent reduced temperature-RH at certain airport h

RH / %	$t / ^\circ\text{C}$	月份													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
70	20	0	0	0	0	0.001	0.007	0.004	0.000	3	0.003	0.006	0.002	0.000	1
	25	0	0	0	0	0.017	0.154	0.672	0.500	0.397	0.111	0.028	0.000	0	
	30	0	0	0	0	0.000	0.011	0.279	1.456	0.706	0.019	0.000	0.000	0	
	35	0	0	0	0	0.000	0.000	0.42	0.607	0.000	0.000	0.000	0.000	0	
80	20	0	0	0	0.001	0.009	0.050	0.064	0.010	0.034	0.065	0.013	0.000	3	
	25	0	0	0	0.000	0.014	0.236	1.240	2.586	2.006	0.251	0.000	0.000	0	
	30	0	0	0	0.000	0.000	0.038	0.525	2.164	0.884	0.083	0.000	0.000	0	
	35	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.157	0.210	0.000	0.000	0.000	0.000	0	
90	20	0	0	0	0.001	0.010	0.072	0.180	0.087	0.156	0.083	0.016	0.000	0	
	25	0	0	0	0.000	0.000	0.061	0.875	3.290	2.209	0.089	0.000	0.000	0	
	30	0	0	0	0.000	0.000	0.080	0.527	0.268	0.000	0.000	0.000	0.000	0	
	35	0	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	
合计		0	0	0	0.002	0.051	0.709	4.943	11.178	6.395	0.707	0.059	0.000	4	

此外,通过对飞机复合材料结构件的加速老化当量折算试验研究,还可以看出:相同应力作用下,不同的湿度、温度环境可以折算成一种温度和湿度环境,折算值取决于折算系数的大小。

对于 T300/4211 材料,分别考察折算系数 α 随温度和湿度变化的曲线,绘制 $T-\alpha$ 曲线和 $RH-\alpha$ 曲线分别如图 3,4 所示。从折算系数曲线可以明显看出,温度的改变对折算系数的影响要比湿度的变化显著得多。当湿度一定时,温度由 20°C 升高到 40°C ,折算系数一般可提高 3 个数量级;而当温度一定时,相对湿度由 70% 提高到 90%,折算系数提高一般不会超过 10 倍。因而,在湿热环境中,温度是影响聚合物基复合材料力学性能变化最显著的因素。

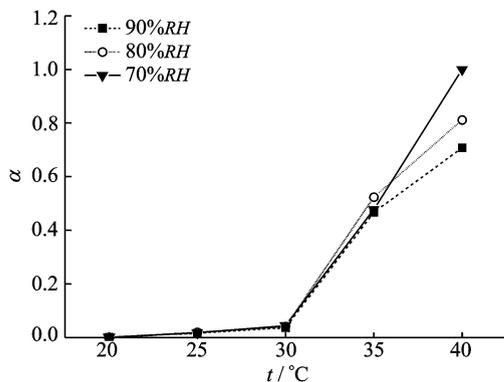


图3 $t-\alpha$ 曲线

Fig. 3 $t-\alpha$ curve

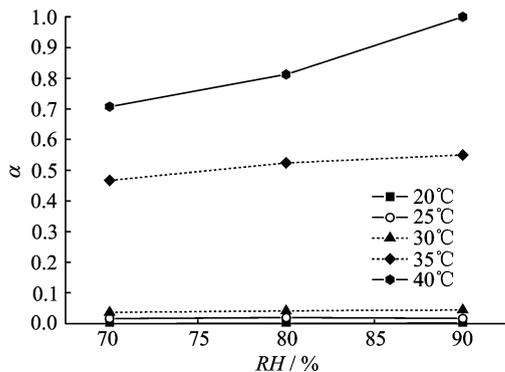


图4 $RH-\alpha$ 曲线

Fig. 4 $RH-\alpha$ curve

4 结 论

本文在前期 CFRP 力学性能时间-温度-湿度相关性研究的基础上,将复合材料粘弹性能的改变引入湿热环境下复合材料老化损伤度量,对飞机复合材料结构湿热环境老化性度量参量选择、环境谱

当量折算原理及折算方法进行了研究,初步给出了复合材料湿热老化加速关系确立的方法及思路,主要取得以下几点结论:

(1)按照老化损伤等效的原则,以聚合物基复合材料粘弹性能变化作为湿热环境老化性度量参量,建立了不同湿热环境之间当量折算关系,提出加速老化当量折算系数的确定方法。利用此折算方法可将不同温度、湿度等当量地折算到某一实验室内便于实现的试验条件上,在实验室内进行加速老化试验以再现外场结构件的老化损伤。

(2)根据建立的当量加速老化折算方法,实例计算了飞机结构典型复合材料在不同温度、湿度环境下的当量折算系数,并根据地面停放环境谱当量折算得到加速试验谱,求得加速老化试验谱相对于给定环境谱的加速倍数,加速效果令人满意。

(3)分别考察了温度与湿度变化对折算系数的影响,结果表明,温度改变对折算系数的影响要比湿度变化对折算系数的影响显著。

参考文献:

- [1] 曹定国,任三元,王浩伟. 环境严酷性指数腐蚀当量方法及其应用研究[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 634-639.
Cao Dingguo, Ren Sanyuan, Wang Haowei. Equivalent method of using ESI for corrosion damage and its application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 634-639.
- [2] 陈跃良,金平,林典雄,等. 海军飞机结构腐蚀控制及强度评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2009: 14-15; 22-34.
Chen Yueliang, Jin Ping, Lin Dianxiong, et al. Navy aircraft structure corrosion control and strength assessment [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 14-15; 22-34.
- [3] 刘旭,陈跃良,张珂,等. 温度-湿度-时间因素对聚合物基复合材料性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2011(4): 20-24.
Liu Xu, Chen Yueliang, Zhang Ding, et al. Research on effect of time-humidity-temperature factor on properties of polymeric matrix composites[J]. Equipment Environment Engineering, 2011(4): 20-24.
- [4] 刘旭. 碳纤维复合材料海洋环境谱及湿热老化加速关系研究[D]. 青岛:海军航空工程学院青岛分院航空机械系, 2011.

- Liu Xu. Research on marine environment spectrum and accelerated relation of hygrothermal aging for carbon fiber/polymer composites [D]. Qingdao: Mechinery Department of Aerospace, Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2011.
- [5] Miyano Y, Nakada M, Cai Hongneng. Formulation of long-term creep and fatigue strengths of polymer composites based on accelerated testing methodology [J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42 (18): 1897-1919.
- [6] Nakada M, Miyano Y. Accelerated testing for long-term fatigue strength of various FRP laminates for marine use[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(8): 805-813.
- [7] Kang Yilan, Zheng Gaofei, Qin Q H, et al. Effect of moisture on mechanical behavior of polymer by experiments[J]. *Key Engineering Materials*, 2003, 252: 7-12.
- [8] Miyano Y, Nakada M. prediction of flexural fatigue strength of CRFP composites under arbitrary frequency, stress ratio and temperature [J]. *Journal of Composite Materials*, 1997: 31(6): 619-638.
- [9] Williams M L, Landel R F, Ferry J D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymer and other glass-forming liquids [J]. *Am Chem Soc*, 1955, 77: 3701-3707.
- [10] 美国国防部. MIL-HDBK-17F 复合材料手册[S]. 美国国防部, 2002.
USDoD. MIL-HDBK-17F Composite materials handbook[M]. USA: USDoD, 2002.