T300/QY8911 单向板湿热性能模拟与损伤分析

齐忠新 燕 瑛 刘玉佳 何明泽

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 测试了不同湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲性能,建立了湿热条件下复合材料单向板的弯曲有限元模型,模拟了湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲性能,开发了复合材料损伤演化仿真模块,对湿热条件下 T300/QY8911 单向板弯曲损伤演化过程进行了仿真. 结果表明:湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲模量具有较高的保持率,弯曲强度随湿热条件的变化差异较大,模量和强度的模拟结果与试验值的误差分别小于 6% 和 2%,建立的弯曲有限元模型,能够比较准确地预测不同湿热条件下复合材料单向板的弯曲性能.

关 键 词: 单向板; 湿热条件; 弯曲性能; 损伤演化; 渐进失效

中图分类号: V 214.8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)07-0947-06

Hygrothermal properties simulation and damage analysis of T300/QY8911 undirectional laminates

Qi Zhongxin Yan Ying Liu Yujia He Mingze

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Flexural properties of T300/QY8911 undirectional laminates were tested under different hygrothermal conditions. Finite element models of composite undirectional laminates under hygrothermal conditions were built. The flexural properties of T300/QY8911 undirectional laminates tested in experimentation were simulated. Plus, a damage evolution simulation module of composite was developed. The integrated damage evolution process of T300/QY8911 undirectional laminates under hygrothermal conditions was simulated. Results show that, the flexural modulus of T300/QY8911 undirectional laminates remains unchanged under different hygrothermal conditions, but the flexural strength changes greatly with conditions. For flexural modulus, the error between simulation values and test results is less than 6%, and for flexural strength, it is less than 2%. The finite element models can predict flexural properties of composite undirectional laminates under different hygrothermal conditions relative exactly.

Key words: undirectional laminates; hygrothermal conditions; flexural properties; damage evolution; progressive failure

复合材料具有比强度高、比模量高、耐疲劳等力学特性,在航空航天领域得到了广泛应用,是我国重点研究发展的关键技术. 飞行器复合材料结构服役期间,要承受复杂的疲劳载荷、意外的冲击载荷等作用;同时也要承受温度、湿度等环境因素的考验. 随着对飞行器性能要求的不断提高,对复合材料性能的要求也越来越高,湿热环境对复合材料的性能及其损伤演化过程的影响已不容忽视.

目前,国外的复合材料技术比较成熟,对复合材料湿热特性的研究开展了较多工作[1-5]. 国内对复合材料湿热性能的研究以试验为主,在不同

收稿日期: 2011-04-14; **网络出版时间**: 2012-05-22 16:03

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1603.012.html

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2011CB606105)

作者简介: 齐忠新(1986 -),男,河北廊坊人,硕士生,zhongxinqi@126.com.

湿热条件下复合材料的力学性能试验[6-7],复合材料湿热性能的影响因素[8-9]等方面取得了较大进展;理论和数值模拟等方面比较缓慢,文献[10]推导了对称层合复合材料的宏观热膨胀系数. 文献[11]建立了湿/热/力耦合下复合材料宏观性能的定量表达式,对湿热条件下层合板损伤进行了模拟. 文献[12-13]模拟了复合材料吸湿后的水分浓度场,对吸湿残余应力进行了研究.

本文测试了湿热条件下的 T300/QY8911 单向板弯曲性能,考察了湿热对其弯曲性能的影响;建立了考虑湿热影响的单向板弯曲有限元模型,对比了应用 3 种不同失效准则,模拟单向板弯曲的精度;以隐式非线性渐进失效分析,模拟了湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲性能;基于 MSC. Patran,利用 PCL(Patran Command Language),开发了复合材料损伤演化仿真模块,对湿热条件下 T300/QY8911 单向板弯曲损伤演化的过程进行了仿真.

1 试 验

1.1 试样制备

将 T300/QY8911 单向板,依据《单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法》(GB/T 3356—1999,以下简称《试验方法》)制备弯曲试样. 试样为等横截面矩形薄板直条形试样,尺寸为 80 mm × 12.5 mm × 2 mm. 试样分为干态和湿态两种,其中,干态是指在 21 ℃干燥环境下保持 72 h;湿态是指在 70 ℃恒温水浸 168 h,试样达到饱和吸湿,吸湿率为 1.02%.

1.2 试验方法

依据《试验方法》,分别测试干态和湿态试样的弯曲性能. 试验设备为 IN-STRON 万能材料试验机. 试验采用简支梁三点弯曲中心加载,见图 1,加载压头半径 R = 5 mm,支座圆角半径 r = 2 mm,试样跨距为 64 mm.

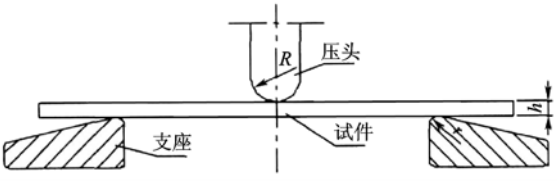


图 1 试样、加载压头和支座示意图

1.3 试验结果与讨论

分别在 21,130 及 150℃下测试了 T300/QY8911 单向板干态和湿态试样的弯曲性能. 不同湿热条件下的弯曲弹性模量和弯曲强度保持率如图 2 所示.

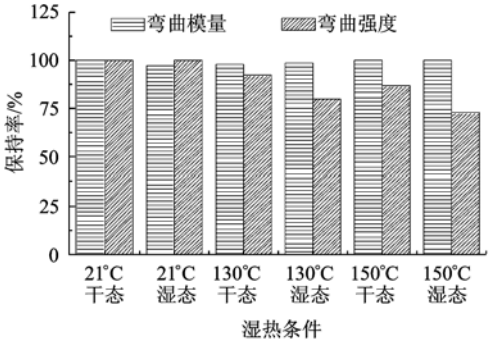


图 2 T300/QY8911 单向板弯曲性能保持率(试验结果)

从图 2 可知,T300/QY8911 单向板的弯曲模量受湿热的影响很小,具有较高的保持率;弯曲强度受湿热的影响比较明显,随着温度的升高逐渐降低. 21℃下,干态和湿态试样的弯曲强度差异很小;高温湿态试样的弯曲强度低于高温干态试样的弯曲强度,130℃下,湿态试样的弯曲强度保持率比干态试样低 12%,150℃下达到 14%.

2 建模方法

2.1 有限元模型

建立图 3 所示单向板弯曲有限元模型,压头和支座为刚性接触体,试样为可变形接触体,通过接触模拟加载压头与试样之间及试样与支座之间的真实相互作用.

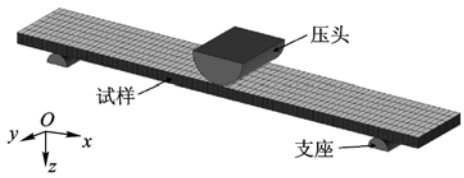
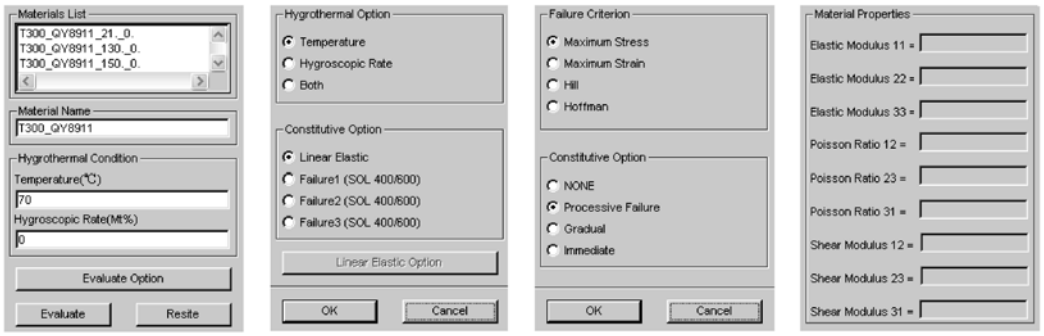


图 3 T300/QY8911 单向板弯曲有限元模型

模拟加载时,压头按给定的速度沿 z 方向逐渐加载,支座固定,试样随加载进行发生弯曲变形. 当试样挠度达到给定的最大允许挠度时,压头停止运动,加载结束. 利用该模型,开展了 T300/QY8911 单向板弯曲渐进失效分析和损伤演化仿真.

2.2 湿热的影响

湿热条件下,复合材料基本力学性能会发生变化,同时单向板厚度方向的温度场和吸湿浓度场发生变化,导致厚度方向力学性能出现不均匀分布. 本文从以上两方面,考虑湿热对复合材料单向板弯曲性能的影响,基于 MSC. Patran,利用 PCL 开发了湿热条件下复合材料力学性能预报模块,如图 4 和图 5 所示.



面板 a　　面板 b　　面板 c　　面板 d

图 4　复合材料力学性能预报模块

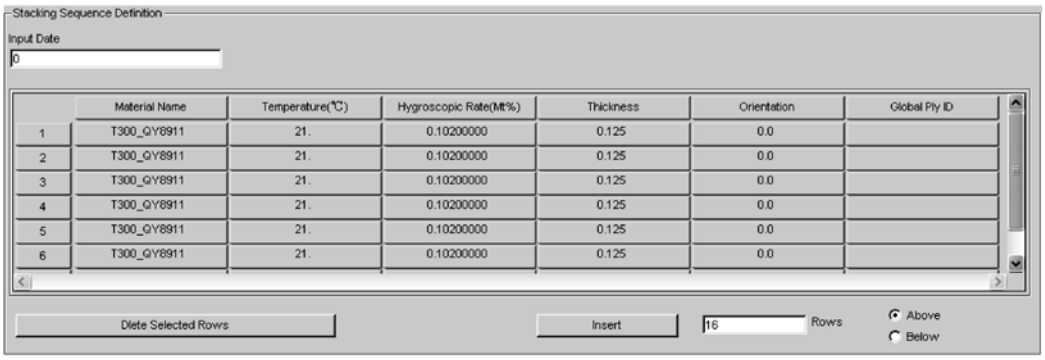


图 5　考虑湿热影响的材料铺层属性

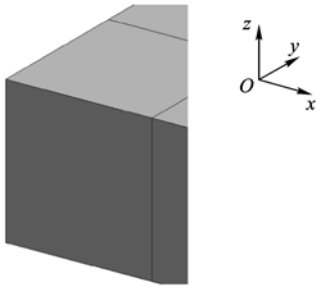
该模块将材料基本力学性能表示为温度和吸湿率的函数. 根据用户输入的试验数据,通过数值拟合,得到材料基本力学性能随温度和吸湿率变化的规律;然后,将用户给定的温度和吸湿率作为变量值,依据前面得到的规律,预报给定湿热条件下的材料基本力学性能.

如图 4 所示,面板 a 用于输入已知的材料基本力学性能及拟预报的湿热条件;面板 b、面板 c 提供了预报选项,可以考虑湿、热以及湿热耦合对材料基本力学性能的影响;预报得到的结果通过面板 d 输出.

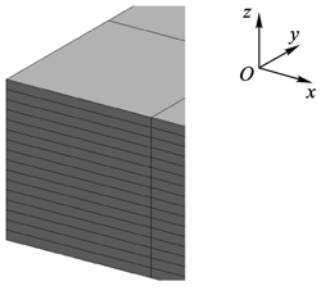
另一方面,该模块可以根据不同湿热条件下单向板厚度方向的温度场及吸湿浓度场,设置考虑湿热影响的单向板铺层属性. 本文仅考虑干态和饱和吸湿两种状态,试样厚度方向不存在温度梯度和吸湿率梯度. 21℃下湿态试样的铺层属性设置,如图 5 所示.

2.3　失效准则

建立图 6 所示两个有限元模型,区别是模型 z 方向网格密度不同. 利用模型 a 和模型 b,模拟 21℃干态 T300/QY8911 单向板的弯曲性能,对比了应用最大应力准则、Hill 准则及 Hoffman 准则的计算精度,如表 1 和表 2 所示. 由表 1 和表 2 可知,利用模型 a 或模型 b,应用 3 种不同失效准则,弯曲弹性模量均相等,与试验值的误差均小于 2.2%. 利用模型 a,应用最大应力准则和 Hoffman 准则,弯曲强度均比试验值偏高,误差分别为 12.8%和6.2%;利用模型 b,应用最大应力准则,弯曲强度与试验值相吻合,应用 Hoffman 准则的误差为 7%;应用 Hill 准则的误差较大.



模型 a



模型 b

图 6　T300/QY8911 单向板弯曲有限元模型

综上可知,应用最大应力准则,模拟 21℃干态 T300/QY8911 单向板的弯曲性能,具有较高的精度;增加有限元模型厚度方向的网格密度,有助于提高单向板弯曲性能的计算精度.

表 1 T300/QY8911 单向板弯曲模量 GPa

准则	模型 a	模型 b
最大应力准则	137	132
Hill 准则	137	132
Hoffman 准则	137	132
试验值	134	134

表 2 T300/QY8911 单向板弯曲强度 MPa

准则	模型 a	模型 b
最大应力准则	2 161	1 915
Hill 准则	1 500	915
Hoffman 准则	2 033	1 780
试验值	1 915	1 915

3 数值模拟

3.1 渐进失效分析

复合材料单向板弯曲问题既包含材料非线性,又包含边界条件非线性,属于比较复杂的非线性问题;同时,随着单向板损伤的演化,单向板刚度也将发生变化,增加了非线性求解的难度. MD Nastran 提供了隐式非线性渐进失效分析模块,可以求解复合材料单向板弯曲问题.

利用渐进失效分析模块,求解复合材料单向板弯曲问题,通过逐步施加弯曲载荷,以增量步形式逐步得到最终结果;每个增量步完成后,根据单元的弯曲正应力是否达到极限应力,判别单元是否失效;随着失效单元个数的增加,模型刚度逐渐降阶;当失效单元过多,导致刚度矩阵奇异时,分析终止.

3.2 弯曲性能模拟

利用渐进失效分析模块,对 21,130 及 150 ℃下干态和湿态 T300/QY8911 单向板的弯曲性能进行了模拟,得到的载荷-位移曲线如图 7 所示,弯曲性能保持率如图 8 所示.

从图 8 可知,模拟得到的 21℃下单向板弯曲模量与试验值吻合得较好,高温干态及湿态的弯曲模量保持率均比试验值偏低,误差均小于 6%;模拟得到的 21℃干态的弯曲强度与试验值一致,湿热条件下的弯曲强度比试验值略偏高,误差均小于 2%.

综上可知,以隐式非线性渐进失效分析,模拟湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲性能,与试验值吻合得较好,说明从复合材料基本力学性能变化及单向板厚度方向力学性能不均匀分布两方面,考虑湿热对单向板弯曲性能的影响是可行的.

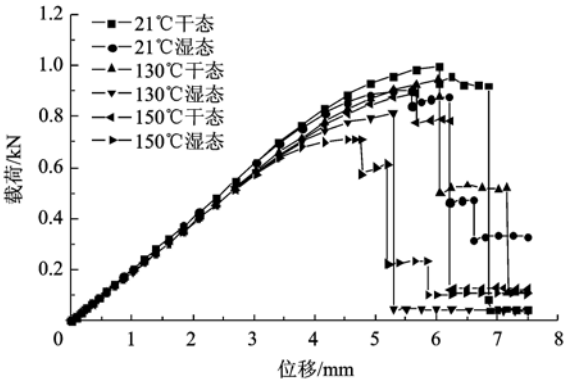


图 7 T300/QY8911 单向板弯曲载荷-位移曲线

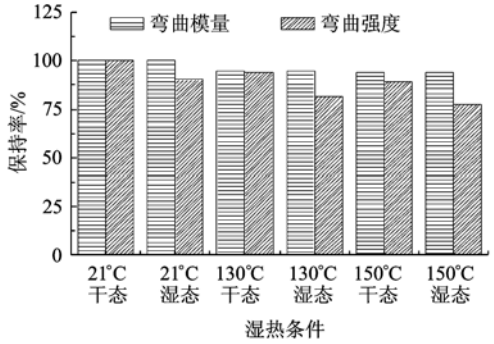
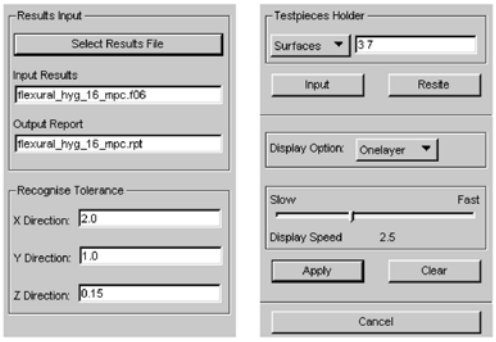


图 8 T300/QY8911 单向板弯曲性能保持率(数值模拟)

4 损伤仿真

4.1 仿真模块开发

复合材料单向板的损伤分析可以通过仿真实现,但现有有限元软件不提供损伤仿真的功能. 因此,基于 MSC. Patran,以 PCL,开发了复合材料损伤演化仿真模块,如图 9 所示,面板 a 用于导入分析结果,输入仿真参数;面板 b 提供了仿真控制选项,便于操作. 将隐式非线性渐进失效分析的结果导入该模块,根据各增量步的单元失效信息,将失效单元依次着色,实现对复合材料单向板损伤演化过程的仿真.



面板 a 面板 b

图 9 复合材料损伤演化仿真模块

4.2　损伤仿真

利用复合材料损伤演化仿真模块,对湿热条件下 T300/QY8911 单向板弯曲损伤演化进行仿真. 建立图 10 所示模型,加载前,没有单元失效.

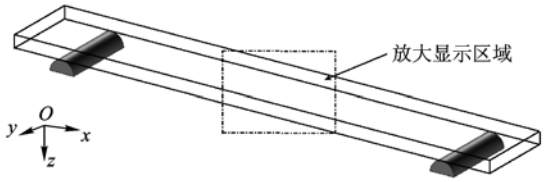


图 10　单向板弯曲损伤演化仿真模型

根据试验可知,破坏一般发生在图 10 中所标记区域,对该区域进行局部放大. 对 21℃ 干态、150℃ 干态及湿态单向板弯曲损伤演化进行仿真,不同增量步,仿真图像如图 11 所示. 通过对比可知,不同湿热条件下的单向板弯曲模型,单元失效区域的扩展规律基本相同. 单元失效从上表面开始,随后下表面也出现单元失效,继而分别沿模型厚度方向逐渐向模型中部扩展,最终发生完全破坏.

与 21℃ 干态模型相比,150℃ 干态模型单元失效的初始时间不变,单元失效区域沿模型厚度方向扩展的趋势加剧,上表面的扩展速度明显快于下表面,单元失效区域扩展的持续时间略有缩短,最终破坏提前发生;150℃ 湿态模型单元失效的初始时间明显提前,单元失效区域沿模型长度方向及厚度方向扩展的趋势均会加剧,单元失效区域明显扩大,单元失效区域扩展的持续时间有所延长,最终破坏时间大幅提前.

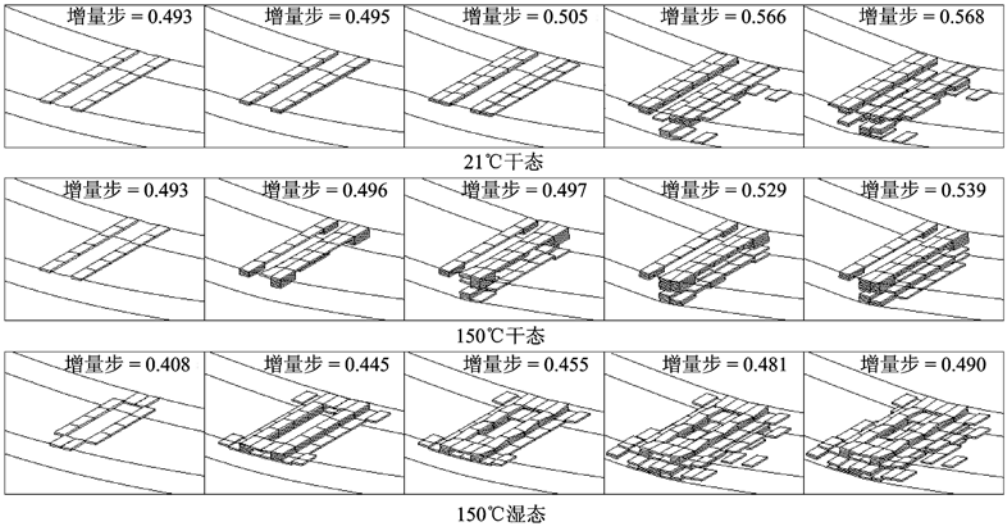


图 11　T300/QY8911 单向板弯曲损伤仿真

综上可知,通过对湿热条件下 T300/QY8911 单向板弯曲损伤演化进行仿真,呈现了其损伤演化的全过程,与试验结果有较好的一致性. 不同湿热条件下,受弯曲载荷作用单向板损伤演化的规律基本相同,随湿热条件的不同,略有差异.

5　结　论

1) 湿热条件下,T300/QY8911 单向板的弯曲模量具有较高的保持率,弯曲强度受湿热的影响比较明显. 21℃ 下的弯曲强度基本不受吸湿影响,高温下的弯曲强度随温度升高逐渐降低,吸湿使其降低的趋势加剧.

2) 从复合材料基本力学性能变化及单向板厚度方向力学性能不均匀分布两方面,考虑湿热对单向板弯曲性能的影响是可行的. 应用最大应力准则,模拟 21℃ 干态复合材料单向板的弯曲性能,具有较高的精度.

3) 以隐式非线性渐进失效分析,对湿热条件下 T300/QY8911 单向板的弯曲性能进行了模拟. 得到的 21℃ 下的弯曲性能与试验值相吻合;高温下的弯曲模量与试验值的误差小于 6%,弯曲强度与试验值的误差小于 2%.

4) 利用复合材料损伤演化仿真模块,对湿热条件下 T300/QY8911 单向板弯曲损伤演化进行了仿真,呈现了湿热条件下受弯曲载荷作用单向板,从初始损伤出现到最终破坏的全过程,与试验结果有较好的一致性.

参考文献 (References)

[1] Tsai Y I, Bosze E J, Barjasteh E, et al. Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3/4): 432 – 437

[2] Benkhedda A, Tounsi A, Adda-bedia E A. Effect of temperature and humidity on transient hygrothermal stresses during moisture

desorption in laminated composite plates[J]. Composite Structures,2008,82(4):629 – 635

[3] Amara K H,Tounsi A,Benzair A. Transverse cracking and elastic properties reduction in hygrothermal aged cross-ply laminates [J]. Materials Science and Engineering A,2005,396(1/2): 369 – 375

[4] Adda-bedia E A,Bouazza B,Tounsi A,et al. Prediction of stiffness degradation in hygrothermal aged $[0_m 90_n]_s$ composite laminates with transverse cracking[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,199(1/2/3):199 – 205

[5] Chinmay Kumar Kundu,Jae-Hung Han. Nonlinear buckling analysis of hygrothermoelastic composite shell panels using finite element method[J]. Composites Part B:Engineering,2009,40(4): 313 – 328

[6] 李敏,张宝艳. 改性双马树脂/碳纤维复合材料体系耐湿热性能研究[J]. 热固性树脂,2006,21(5): 25 – 27
Li Min,Zhang Baoyan. Study on the hydrothermal properties of a modified bismaleimide resin/carbon fiber composite[J]. Thermosetting Resin,2006,21(5): 25 – 27(in Chinese)

[7] 冯青,李敏,顾轶卓,等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报,2010,27(6):16 – 20
Feng Qing,Li Min,Gu Yizhuo,et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hygrothermal conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2010,27(6):16 – 20(in Chinese)

[8] 封彤波,肇研,罗云烽,等. 不同上浆剂的国产碳纤维复合材料湿热性能研究[J]. 材料工程,2009(10):36 – 40
Feng Tongbo,Zhao Yan,LuoYunfeng,et al. Hygrothermal property of CCF/ BMI composites with different sizing on the carbon fiber[J]. Material Engineering,2009(10):36 – 40(in Chinese)

[9] 苏佳智,顾轶卓,李敏,等. 弯曲载荷下碳纤维/双马复合材料湿热特性实验研究[J]. 复合材料学报,2009,26(5):80 – 85
Su Jiazhi,Gu Yizhuo,Li Min,et al. Hygrothermal behavior of carbon fiber/bismaleimide resin composite under flexural load [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2009,26(5):80 – 85(in Chinese)

[10] 刘兵山,燕瑛,田金梅. 纤维增强对称层合复合材料的宏观热膨胀系数研究[J]. 强度与环境,2008,35(5):17 – 24
Liu Bingshan,Yan Ying,Tian Jinmei. Study on the macro thermal expansion coefficients of fiber-reinforced symmetric laminates[J]. Structure & Environment Engineering,2008,35(5): 17 – 24(in Chinese)

[11] 闫伟,燕瑛,苏玲. 湿/热/力耦合环境下复合材料结构损伤分析与性能研究[J]. 复合材料学报,2010,27(2):113 – 116
Yan Wei,Yan Ying,Su Ling. Damage analysis and strength prediction of composites structures in hygrothermal environment [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2010,27(2):113 – 116 (in Chinese)

[12] 黄远,万怡灶,何芳,等. 碳纤维/环氧树脂单向复合材料的吸湿残余应力研究[J]. 航空材料学报,2009,29(4):57 – 62
Huang Yuan,Wan Yizao,He Fang,et al. Study on residual stresses induced by moisture absorption in unidirectional carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Aeronautical Materials,2009,29(4):57 – 62(in Chinese)

[13] 王彦君,阳建红,张晖. 芳纶纤维/环氧树脂复合材料的吸湿应力分析[J]. 宇航材料工艺,2010(6):41 – 44
Wang Yanjun,Yang Jianhong,Zhang Hui. Analysis of moisture stress in aramid fiber/epoxy resin composites[J]. Astronautics Materials Technology,2010(6):41 – 44(in Chinese)

(编 辑:李 晶)

(上接第 894 页)

[11] Mandelbrot B B. Intermittent turbulence in self-similar cascades:divergence of high moments and dimension of the carrier [J]. J Fluid Mech,1974,62:331 – 358

[12] Kraichnan R H. On Kolmogorov's inertial-range theories[J]. J Fluid Mech,1974,62:305 – 330

[13] Frisch U,Sulem P L,Nelkin M A simple dynamical model of intermittent fully developed turbulence[J]. J Fluid Mech,1978, 87:719 – 736

[14] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 1972,20:130 – 148

[15] 钱俭. 混沌、湍流和非平衡统计力学[J]. 中国科学基金,1989(2):30 – 33
Qian Jian. Chaos, turbulence and nonequilibrium statitistical mechanics[J]. Chinese Natrual Science Foundations, 1989 (2):30 – 33(in Chinese)

[16] Burgers J M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence[J]. Adv Appl Mech,1948,1:171 – 199

[17] Desnyansky V N,Novikov E A. The evolution of turbulence spectra to the similarity regime[J]. Izv Akad Nauk SSSR Fiz Atmos,1974,10:127 – 136

[18] Kerr R M,Siggia E D. Cascade model of fully developed turbulence[J]. J Stat Phys,1978,19:543 – 552

[19] Gloaguen C,Leorat J,Pouquet A,et al. A scalar model for MHD turbulence[J]. Physca D,1985,51:154 – 182

[20] Qian J. Cascade model of turbulence[J]. Phys Fluids,1988, 31:2865 – 2874

[21] Ran Z. New Sedov-type solution of isotropic turbulence[J]. Chin Phys Lett,2008,25(12):4318 – 4320

[22] Ran Z. One exactly soluble model in isotropic turbulence[J]. Advances and Applications in Fluid Mechanics,2009,5(1), 41 – 67

[23] Ran Z. Remarks on Sedov-type solution of isotropic turbulence [EB/OL]. New York:Cornell University Library,2009[2011-06-25]. http://arxiv.org/abs/0904.2036

[24] Ran Z. Multiscales and cascading in isotropic turbulence[J]. Chinese Sci Bull,2011,56:2889 – 2892

(编 辑:李 晶)