

湿热环境下树脂基复合材料层合板强度分析方法

宋柳青,张宏建,温卫东,崔海涛

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:考虑湿热环境对复合材料的影响,在经典层合板理论的基础上对本构模型进行修正,使用逐渐累积损伤分析方法建立湿热环境下层合板强度预测模型。以 T300/BMP316 含孔板为研究对象,在 ANSYS 有限元软件中开展不同湿热环境下的拉伸强度数值仿真预测研究,预测结果与试验结果相比误差在±5%以内,证明了模型的可靠性。

关键词:层合板强度;湿热;逐渐累积损伤;有限元法

中图分类号:TB33 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0116-03

Strength Analysis of Resin Matrix Composite Laminates in Hygrothermal Environment

SONG Liuqing, ZHANG Hongjian, WEN Weidong, CUI Haitao

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As to the influence of the hygrothermal effect on composite, the constitutive model is modified based on the classical laminated plate theory, and the prediction model of the strength of the laminated plate under hygrothermal environment is established by the progressive damage analysis method. With T300 / BMP316 perforated plate as the research object, the numerical simulation and prediction of tensile strength under different hygrothermal environment are carried out in ANSYS. The error between the prediction and experimental results is within ± 5%, which proves the reliability of the model.

Keywords: laminate strength; hygrothermal; progressive damage; finit element method

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料作为一种先进的材料,被广泛运用于建筑、车辆和航空航天等高科技领域。碳纤维增强树脂基复合材料在湿热环境会发生老化,导致力学性能下降,严重影响结构的安全性。因此,开展湿热环境对纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响研究相当重要。

国内外学者针对纤维增强树脂基复合材料的吸湿机理及其力学性能的退化开展了大量的试验研究。MA B L 等^[1]试验研究了碳纤维增强环氧树脂层合板在 70℃ 水浴后的静拉伸性能,分析了湿热老化对材料性能的影响机理。KAWAI M 等^[2]试验研究了平面编织复合材料吸湿后在常幅疲劳载荷下的疲劳性能,并基于一种非同构等寿命曲线图预测了不同湿热环境下的复合材料疲劳寿命。

目前湿热环境下复合材料的研究大部分只是试验方面的^[3-4],复合材料湿-热-力耦合的理论研究并不成熟^[5]。本文同时考虑了湿热应变和湿热环境对刚度、强度性能的影响,对经典层合板理论进行修正,采用逐渐累积损伤分析方法建立了湿热环境下层合板的强度预测模型,基于该模型预测了 T300/BMP316 含孔层合板在湿热环境下的拉伸强度,并与试验结果相比来验证模型的可靠性。

1 湿热环境下层合板强度预测模型

本节基于逐渐损伤理论建立湿热环境下层合板强度

预测模型,主要包括以下几个方面,首先使用本构方程对材料进行应力分析,然后使用失效准则进行损伤判断,根据判定结果进行材料性能退化或继续增加载荷重新应力分析,直到结构最终破坏。

1.1 湿热环境下层合板本构模型

复合材料层合板整体具有各向异性,在外载作用下其本构关系可以表示为

$$\sigma = Q\varepsilon \tag{1}$$

式中:σ 是应力分量;ε 是应变分量;Q 是刚度矩阵。

在湿热环境下,材料的总应变包括了 3 部分,分别是由于外载引起的机械应变、温度变化引起的热应变和吸湿引起的湿应变。因此,考虑湿热应变的材料本构关系修正为

$$\sigma = Q(\varepsilon - \varepsilon^T - \varepsilon^H) \tag{2}$$

式中:ε^T 和 ε^H 分别代表热应变和湿应变,上角标 T 和 H 分别代表温度和吸湿,计算方法由下两式给出:

$$\varepsilon^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^T \\ \varepsilon_2^T \\ \varepsilon_3^T \\ \gamma_{12}^T \\ \gamma_{13}^T \\ \gamma_{23}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T \tag{3}$$

第一作者简介:宋柳青(1994—)男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为复合材料结构强度与疲劳。

$$\varepsilon^H = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^H \\ \varepsilon_2^H \\ \varepsilon_3^H \\ \gamma_{12}^H \\ \gamma_{13}^H \\ \gamma_{23}^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} C \quad (4)$$

式中: α_i 是材料各主方向的热膨胀系数; ΔT 是温差; β_i 是材料各主方向的湿膨胀系数; C 是相对吸湿量。

湿热环境对复合材料的影响不仅体现在湿热膨胀引起的层合板内应力,还会对材料的刚度和强度性能造成影响。因此必须对本构模型中的材料刚度矩阵 Q 中的弹性系数进行修正。本文引入 TSIA S W^[6] 提出的综合考虑湿热影响的无量纲温度参数 T^* , 其定义如下:

$$T^* = \frac{T_g - T}{T_g^0 - T_0} \quad (5)$$

$$T_g = T_g^0 - kC \quad (6)$$

式中: T_g 为材料吸湿后玻璃化转变温度; T 为工况温度; T_g^0 为材料干态下的玻璃化转变温度, 是材料常数; T_0 为室温; k 为材料常数。将湿热环境下单向板的刚度和强度性能分别用 T^* 的幂函数来表达, 简写成

$$M = M_0 (T^*)^N \quad (7)$$

式中: M 代表湿热环境下单向板的刚度和强度性能; M_0 是室温干态下单向板性能; N 是拟合参数。单向板纵向拉伸模量 E_1 、横向拉伸模量 E_2 、面内切变模量 G_{12} 、纵向拉伸强度 X_1 和压缩强度 X_c 、横向拉伸强度 Y_1 和压缩强度 Y_c 、面内剪切强度 S_{12} , 8 个性能参数分别对应 8 个拟合参数 $a-h$, 可由式 (7) 和湿热环境下单向板试验数据拟合得到。

最终, 湿热环境下层合板本构关系为

$$\sigma = \bar{Q}(\varepsilon - \varepsilon^T - \varepsilon^H) \quad (8)$$

式中 \bar{Q} 是湿热退化后的刚度矩阵。

1.2 材料失效判定准则与性能退化

复合材料失效模式包括纤维拉伸断裂、纤维压缩断裂、基体拉伸开裂、基体压缩开裂、基体剪切和分层等, 本文采用文献[7]中提出的改进的三维 Hashin 失效准则对单元应力状态进行损伤失效判断, 具体表述如下。

1) 纤维拉伸失效:

$$(\sigma_1 > 0), \left(\frac{\sigma_1}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (9)$$

2) 纤维压缩失效:

$$(\sigma_1 \leq 0), \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (10)$$

3) 基体拉伸:

$$(\sigma_2 > 0), \left(\frac{\sigma_2}{Y_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (11)$$

4) 基体压缩:

$$(\sigma_2 \leq 0), \left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (12)$$

5) 基-纤剪切:

$$(\sigma_1 < 0), \left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (13)$$

6) 分层:

$$(\sigma_3 > 0), \left(\frac{\sigma_3}{Z_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (14)$$

$$(\sigma_3 \leq 0), \left(\frac{\sigma_3}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (15)$$

式中分子为主方向的应力状态, 分母为强度值。在湿热环境下, 各强度值应使用湿热退化后的强度值。

随着外载的增加, 当应力状态满足上述的失效准则时, 材料会发生损伤失效, 材料性能发生退化。本文参照文献采用下列材料性能退化方式。

1) 纤维拉伸失效时, E_1 、 E_2 、 E_3 、 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 、 μ_{12} 、 μ_{23} 、 μ_{13} 乘以 0.07。

2) 纤维压缩失效时, E_1 、 E_2 、 E_3 、 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 、 μ_{12} 、 μ_{23} 、 μ_{13} 乘以 0.14。

3) 基体拉伸失效时, E_2 、 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 乘以 0.02。

4) 基体压缩失效时, E_2 、 G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 乘以 0.04。

5) 基体-纤维剪切失效时, G_{12} 、 μ_{12} 乘以 0。

6) 分层失效时, E_3 、 G_{23} 、 G_{13} 、 μ_{23} 、 μ_{13} 乘以 0。

其中: E_i 是弹性模量; G_{ij} 是切变模量; μ_{ij} 是泊松比。

1.3 湿热环境下含孔层合板强度数值仿真预测方法

本文基于 ANSYS 有限元软件, 使用 APDL 语言编写了湿热环境下层合板强度预测程序。首先建立相应的有限元模型, 将湿热退化后材料性能赋给材料参数作为初始值, 然后施加载荷进行应力分析。根据 Hashin 失效准则进行判断, 对于失效单元进行性能折减, 判断损伤是否扩展到含孔板边缘, 否则继续加载, 重复应力分析和损伤判断的过程, 直至最终结构失效。湿热环境下层合板强度预测流程如图 1。

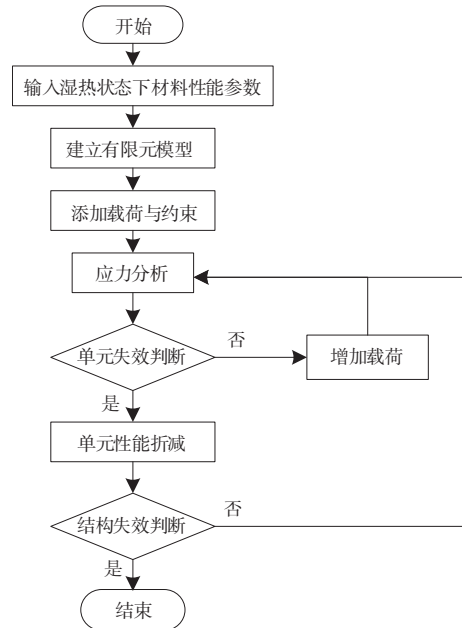


图 1 强度预测流程图

2 算例验证

2.1 湿热环境下单向板性能预测值与试验值对比

本节使用文献[8]中 T300/BMP316 单向板在 22℃ 和 80℃ 温度环境下干态、吸湿 0.5% 和吸湿饱和共 6 组试验数据来拟合得到上文提出的单向板性能湿热退化模型。具体试验工作和试验数据见文献[8],使用试验数据拟合式(7)的模型得到的拟合参数见表 1。使用该模型预测

T300/BMP316 单向板在 120℃ 温度下干态、吸湿 0.5% 和吸湿 1.0% 的性能,并与文中试验值对比见表 2。由表 2 可知:除了 120℃ 干态条件下的 E_2 预测误差最大为 -7.64%,其余性能预测误差均在 $\pm 5\%$ 以内,表明了本文建立的单向板湿热退化模型预测精度较高。

表 1 湿热退化模型拟合参数

a	b	c	d	e	f	g	h	k
0.056 7	0.339 3	0.299 3	0.034 4	0.339 6	0.427 8	0.455 1	0.541 0	5 084

表 2 T300/BMP316 单向板性能模型预测值与试验值对比

工况	项目	E_1	E_2	G_{12}	X_T	X_C	Y_T	Y_C	S_{12}
120℃ 干态	试验值 ^[8] /MPa	162 110	9 680	4 410	1 831.96	906.27	54.36	111.22	74.47
	预测值/MPa	162 070	8 940	4 450	1 836.45	914.73	55.80	111.82	74.20
	误差/%	-0.02	-7.64	0.91	0.25	0.93	2.66	0.54	-0.36
120℃ 0.5%	试验值 ^[8] /MPa	161 460	8 970	4 270	1 827.20	872.98	50.98	105.48	70.50
	预测值/MPa	160 920	8 570	4 290	1 828.56	876.65	52.89	105.63	69.34
	误差/%	-0.33	-4.46	0.47	0.07	0.42	3.75	0.14	-1.65
120℃ 饱和	试验值 ^[8] /MPa	160 730	8 410	4 110	1 819.41	839.71	47.39	97.96	67.37
	预测值/MPa	159 620	8 160	4 110	1 819.58	835.05	49.75	98.97	64.18
	误差/%	-0.69	-2.97	0	0.01	-0.55	4.98	1.03	-4.74

2.2 湿热环境下含孔层合板拉伸强度预测与试验对比

本节以 T300/BMP316 复合材料含孔层合板为研究对象预测其在不同湿热环境下的拉伸强度。层合板总共 20 层,铺层次序为 $[45/-45/90/0/-45/0/45/0/90/0]_s$,长 250 mm,宽 25 mm,厚 2.5 mm,中心孔径 5 mm。在 ANSYS 有限元软件中按照实际尺寸建立含孔层合板三维有限元模型,采用 Solid185 层状 3 维实体单元划分网格,单元厚度取单层厚度。由于孔边存在应力集中,容易成为损伤的起始点,在孔边对网格进行了加密处理,最终得到 19 200 个单元。边界条件为左端固定约束,右端施加均布拉力,有限元模型见图 2。

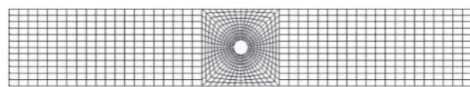


图 2 有限元模型

1) 含孔板拉伸强度预测值与试验值对比

湿热环境下 T300/BMP316 含孔层合板拉伸强度试验值与数值仿真预测值对比见表 3,试验过程见文献[8]。由表 3 中数据可知,本文拉伸强度预测值与试验值之间的误差均在 $\pm 5\%$ 以内,预测值与试验值吻合较好,且本文模型预测精度高于文献[8]。

表 3 试验值与预测值对比

工况	试验值 ^[8] /MPa	文献预测值 ^[8] /MPa	文献误差 ^[8] /%	本文预测值/MPa	本文误差/%
80℃、0.5%	460.82	482	4.59	452.5	-1.81
80℃、1.0%	458.65	478	4.22	450.0	-1.89
120℃、0.5%	449.59	468	4.09	440.0	-2.13
120℃、1.0%	443.00	464	4.74	427.5	-3.50

2) 失效模式分析

各层最终失效模式见图 3,其中 0°层主要发生纤维断裂损伤(红色),90°层发生基体开裂损伤(灰色),45°和-45°层主要发生分层损伤(黄色),仿真结果与试验结果相符。试验损伤模式见图 4(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

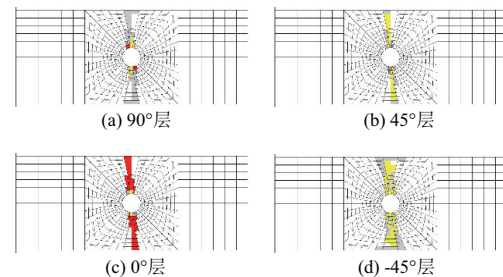


图 3 各层最终失效模式

(下转第 159 页)

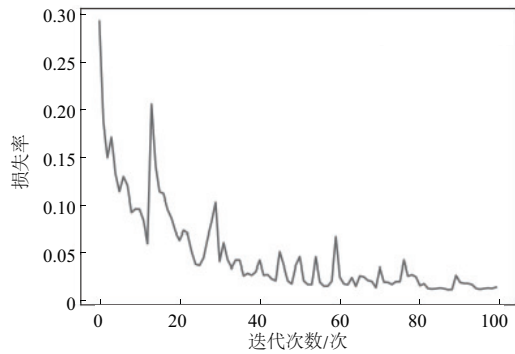


图7 损失率变化图

LSTM模型在训练集上的准确率达到0.9884,损失率为0.0148。

将训练好的模型用在测试集上测试,准确率达到99.13%,损失率为0.0136。模型在测试集上的表现优秀,分类结果与实际工步结果相差小,能够起到监控大型工件加工过程的作用。

4 结语

本文根据机床加工大型工件时功率数据具有的非线性和非平稳性的特征,提出了基于网格搜索法优化的LSTM大型工件工步识别模型,通过识别工件工步实现监控大型工件加工过程。通过对于大型工件的模拟实验,证实了模型的有效性,同时通过功率信息数据监控大型工件加工过程,为工厂在调度、加工管理方面的优化提供了一定的参考。

(上接第118页)

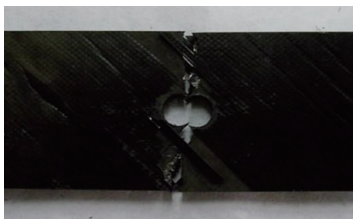


图4 试验结果

3 结语

本文考虑了湿热环境树脂基复合材料的影响,基于经典层合板理论,引入湿热相关的无量纲参数和湿热应变,修正了层合板本构模型,建立了湿热环境下层合板强度预测模型。在ANSYS软件中使用APDL语言编写逐渐累积损伤程序,进行了湿热环境下含孔层合板拉伸数值模拟研究,预测其拉伸强度,预测结果与试验结果相比误差均在±5%以内,验证了模型有效性。

参考文献:

[1] MA B L, FENG Y, HE Y T, et al. Effect of hygrothermal

参考文献:

- [1] WANG Q L, YANG H. Sensor-based recurrence analysis of energy efficiency in machining processes [J]. IEEE Access, 2020,8:18326-18336.
- [2] CAI Y, SHI X H, SHAO H, et al. Energy efficiency state identification based on continuous wavelet transform—fast independent component analysis [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(2):021012.
- [3] 单东日,王玉伟,高立营,等.考虑机床调整和工件批量加工的车间调度问题模型研究[J].制造技术与机床,2020(8):151-154,161.
- [4] 贺晓辉,鄢萍,刘飞,等.基于支持向量机和功率信息的工件在线识别方法[J].中国机械工程,2011,22(7):818-824.
- [5] 顾文斌,李卓,李育鑫,等.基于嵌入式技术的机床能耗监测系统研究[J].机械制造与自动化,2019,48(6):155-158,167.
- [6] 刘飞,刘军,何彦.基于参考功率曲线的大型工件加工进度状态信息的自动采集新方法[J].机械工程学报,2009,45(10):111-117.
- [7] SUTSKEVER I, VINYALS O, LE Q V. Sequence to sequence learning with neural networks[C]//NIPS: MIT Press, 2014.
- [8] GREFF K, SRIVASTAVA R K, KOUTNÍK J, et al. LSTM: a search space odyssey[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017,28(10):2222-2232.
- [9] 庞丽君,尚晓峰.金属切削原理[M].北京:国防工业出版社,2009.

收稿日期:2020-09-22

environment on the tension-tension fatigue performance and reliable fatigue life of T700/MTM46 composite laminates [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2019, 20(7):499-514.

- [2] KAWAI M, YAGIHASHI Y, HOSHI H, et al. Anisomorphic constant fatigue life diagrams for quasi-isotropic woven fabric carbon/epoxy laminates under different hygro-thermal environments [J]. Advanced Composite Materials, 2013, 22(2):79-98.
- [3] 陈春露,纪丹阳,孙海洋,等.湿热环境对树脂基复合材料拉伸性能的影响[J].科学技术创新,2019(11):16-17.
- [4] 刘鑫嫻,曾建江,陈智.碳纤维/环氧树脂复合材料湿热环境疲劳剩余强度试验[J].环境技术,2012,30(6):6-9.
- [5] 刘玉佳,燕瑛,何明泽,等.湿/热/力耦合条件下复合材料结构渐进损伤仿真[J].北京航空航天大学学报,2012,38(3):384-388,393.
- [6] TSAI S W, HAHN H T. Introduction to Composite Materials [M]. [S.I.]: Technomic Pub.Co., 2000.
- [7] 徐颖.复合材料层合板冲击损伤及冲击后疲劳寿命研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
- [8] 赵杨.湿热条件下树脂基复合材料层合结构刚度与强度研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.

收稿日期:2020-05-27