http://pmse.scu.edu.cn

湿热环境下复合材料含孔层合板静力拉伸性能及工程估算模型

贾宝惠[1]，任 鹏[2]，宋 挺[2]，卢 翔[1]，熊亿杰[2]，杨 霄[2]
（1. 中国民航大学 交通科学与工程学院，天津 300300；2. 中国民航大学 航空工程学院，天津 300300）

摘要：湿热环境下的复合材料结构件力学性能预测对其工程应用具有重要意义。文中针对复合材料层合板静力拉伸性能和强度预测问题，开展6种湿热环境下复合材料含孔层合板的静力拉伸试验，分析其结构失效响应及损伤表征。基于应力场强法建立湿热环境下复合材料含孔层合板工程估算模型，与有限元渐进损伤模型和试验结果进行对比，分析了湿热环境对含孔层合板力学性能和拉伸失效的影响。结果表明，工程估算模型预测结果与有限元及试验结果误差范围较小，可用于预测温度和吸湿率对含孔层合板拉伸失效强度的影响；相比于室温干态，75 ℃吸湿饱和态下试件拉伸失效强度下降了6.1%；25 ℃干态和75 ℃吸湿饱和态下含孔层合板0°铺层出现最为严重的纤维拉伸失效，90°铺层出现最为严重的基体拉伸失效，纤维拉伸失效和基体拉伸失效为层合板主要破坏模式；通过扫描电镜对75 ℃吸湿饱和态下层合板厚度方向微观形貌进行分析，发现试件0°方向纤维与树脂的脱粘程度加重且出现明显的裂痕，90°方向纤维分布较为齐整，但黏附的树脂较少。

关键词：复合材料；湿热环境；层合板；力学性能；工程估算模型
中图分类号：TB33 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）02-0101-14

复合材料凭借各种优越的性能在航空航天等领域被广泛应用[1~4]。在民用航空器中复合材料主要应用于机翼、整流罩、中央翼盒、机身等关键部位，实际运营过程中其复合材料结构的力学性能会受到外界环境的影响[5,6]。且为满足飞机设备的装配维护、结构连接、管路布置等要求，复合材料会使用到不同形式的开孔，而孔周的应力集中和刚度突变也会对复合材料造成一定损伤。在实际工程中，除了外界环境的影响，复合材料还会受到外部载荷、几何尺寸、材料力学性能、制造工艺和边界条件等诸多不确定性因素的影响，这些因素会导致复合材料的强度性能出现较大的离散程度，在实际工况下难以精确预测复合材料的强度性能，无法准确确定其修理容限。

目前，国内外大量学者研究了湿热环境下复合材料层合板的力学性能和层合板的强度性能预测问题。Gao等通过试验发现T700复合材料在80 ℃/85%RH湿热环境下随着老化时间的延长，复合材料的拉伸强度先增加后降低[7]；Xu等通过对不同孔型T800复合材料层合板进行老化试验，发现湿热老化后不同孔型层合板的开孔抗压强度显著降低，但热氧老化后的开孔抗压强度大于湿热老化后的强度，层合板的失效模式均为通孔失效[8]；贾宝惠等通过试验研究了不同湿热环境下T300/3238和CCF300/5228复合材料的失效过程、破坏载荷和湿热效应[9]；高坤等通过湿热循环试验研究了GF/EP608复合材料的湿热力学性能和老化机制[10]。近些年来，研究学者通过试验和有限元方法探究了湿热环境下复合材料层合板的力学性能、损伤扩展和失效模式等，研究发现温度升高产生的热应力会损伤材料，吸湿后会加快材料裂纹扩展，湿热环境会降低层合板的强度和刚度，且会改变其微观失效模式。

Goswami等基于失效准则和应力准则建立了复

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0019
收稿日期：2023-04-18
基金项目：国家自然科学基金-民用飞机持续安全性分析技术研究（U2033209）；天津市教委科研计划项目（2021KJ054）
通讯联系人：卢翔，主要从事民机复合材料结构损伤与修理方面的研究，E-mail: xlu@cauc.edu.cn

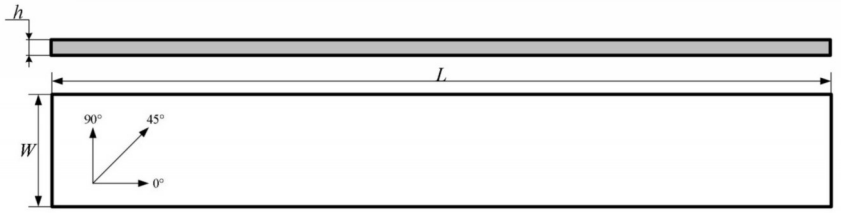


Fig. 1 Composite non-porous laminates

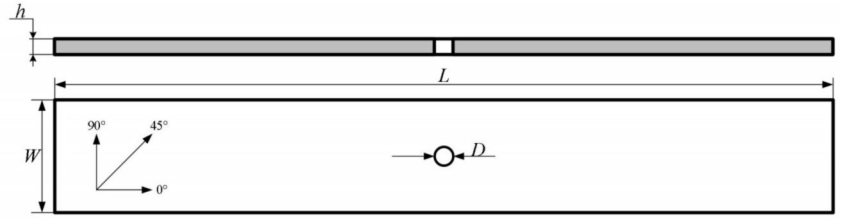


Fig. 2 Composite porous laminates

合材料含孔层合板的渐进损伤模型，预测了不同温度时含孔层合板的失效强度[11]；Wang等考虑湿热环境提出了一种考虑湿热效应的三维渐进损伤模型，预测了高强度玻璃纤维开孔复合材料层合板在2种工况下的拉、压破坏行为[12]；姚宇超等建立了湿热环境下复合材料渐进损伤模型，在不同载荷和湿热环境下预测了T300/5405复合材料含孔层合板的极限强度，结果表明，湿热环境对层合板的拉伸强度影响较小，但对其压缩强度和挤压强度影响较大[13]；刘玉佳等考虑湿/热/力互相耦合，提出了一种复合材料渐进损伤有限元方法，模拟了湿热环境下复合材料含孔层合板从初始损伤至最终发生破坏的全过程[14]。目前对湿热环境下复合材料含孔层合板强度性能预测的研究工作大多集中在数值模拟方面，而现有的含孔层合板强度工程预测方法几乎没有考虑湿热环境的影响，因此为进一步完善湿热环境下复合材料含孔层合板强度工程预测方法，有必要结合湿热环境建立含孔层合板强度工程估算模型。

综上所述，湿热环境会影响复合材料层合板的静力性能，影响其失效过程和损伤扩展，不同环境也会对复合材料层合板的静力性能产生不同的影响。目前国内外学者对复合材料含孔层合板强度性能预测的研究鲜有考虑湿热环境，不能满足实际工程的应用需要。因此本文基于应力场强法，建立含孔层合板拉伸强度工程估算模型，引入Tsai方程拟合复合材料力学性能与湿热环境之间的函数关系，建立了预测湿热环境下含孔层合板拉伸强度的工程估算模型，通过有限元方法模拟了含孔层合板不同铺层的损伤形式，结合试验验证了有限元与数学模型预测结果的正确性，并探究了湿热环境下含孔层合板的静力拉伸性能，通过扫描电镜探究了湿热环境下含孔层合板断口处及厚度方向的微观失效模式。

1 试验部分

1.1 试验试件与环境

试验试件采用苏州联桥天宜复合材料科技有限公司生产的T800碳纤维/环氧树脂复合材料层合板。环氧预浸料中温固化配方树脂为Hansort 7202，适用于模压、烘箱等成型工艺，制成部件可于－55~80 ℃温度长期使用，最高使用温度可达120 ℃以上。树脂体积含量为42.4%，纤维面密度为125 g/m^2，铺层顺序为$[0/45/90/-45]_{2s}$，单层板厚度为0.125 mm，总厚度为2 mm，含孔层合板孔径为6 mm，室温(25 ℃)干态下，复合材料力学性能参数如Tab.1所示。试验试件包括复合材料无孔和含孔层合板，几何形状分别如Fig.1和Fig.2所示。并且对不同类试件分别进行编号，含孔试件表示为HK-T-C-N，无孔试件表示为WK-T-C-N，其中，T表示试验温度，C表示吸湿状

态,N表示同一工况下试件序号。

Tab. 1 Mechanical properties of T800 composites under the 25 ℃/dry condition

Elastic constant	Value	Elastic constant	Value
E_{11}/GPa	163.5	Y_C=Z_C/MPa	278
E_{22}=E_{33}/GPa	9	S_{12}=S_{13}/MPa	172
G_{12}=G_{13}/GPa	4.14	S_{23}/MPa	105
G_{23}/GPa	3.08	E_m/GPa	3.5
X_T/MPa	2992	G_m/GPa	1.3
X_C/MPa	1183	v_{12}=v_{13}	0.32
Y_T= Z_T/MPa	70.6	v_{23}	0.46

如Tab.2所示,在6种不同环境下分别对无孔和含孔层合板试件进行静力拉伸试验,每种环境分别取6个试验试件,无孔和含孔层合板分别为36个试件,共计72个试件。

Tab. 2 Test environment

Serial number	Temperature/℃	Hygroscopic rate/%
1	Room temperature(25)	Dry(0)
2	Room temperature(25)	Hygroscopic(0.648)
3	50	0
4	50	Hygroscopic(0.648)
5	75	0
6	75	Hygroscopic(0.648)

1.2 试验过程

1.2.1 吸湿试验:吸湿试验前将复合材料层合板试件表面杂质和污渍处理干净,在室温干态下进行干燥处理,对试件进行编号并称量,记录此时试件质量M_0。参照ASTM-D5229-04试验标准进行吸湿试验[15],将试验试件放入70 ℃三用电热恒温水箱中,除去表面气泡,将试件均匀散开充分吸湿。吸湿过程中每隔24 h测量试件质量,直至前后2次试件质量增长量小于0.02%时,可以认为试件已达到吸湿饱和状态,本次试验最终吸湿率为0.648%。

$$C=\frac{M_i-M_0}{M_0} \tag{1}$$

式中:C——试件吸湿率;M_i——某一时刻试件吸湿质量;M_0——试件干态质量。

1.2.2 静力拉伸试验:根据试验标准ASTM-D5766和ASTM-D3039分别进行含孔和无孔层合板的准静态拉伸试验。所有拉伸试验均在MTS Landmark伺服测试系统上进行,试验采用位移控制模式,加载速率选择为2 mm/min。室温(25 ℃)干态下,直接安装试件进行静力拉伸试验,75 ℃吸湿饱和态下,试件需在保温保湿条件下进行静力拉伸试验。

2 理论方法

2.1 湿热环境下层合板渐进损伤模型

2.1.1 考虑湿热效应的应力-应变关系:湿热环境下复合材料的实际应变由机械应变和湿热应变组成,

$$\varepsilon=S\sigma+\varepsilon^{ht} \tag{2}$$

湿热应变与温度变化量、吸湿量和湿热膨胀系数有关,其应力-应变关系表示为[16]

$$\varepsilon=S\sigma+\alpha\Delta T+\beta C \tag{3}$$

式中:S——柔度矩阵;$\Delta T=T-T_0$——温度变化量;C——吸湿量;α和β——分别为复合材料的热膨胀系数和湿膨胀系数。

其中,复合材料的热膨胀系数和湿膨胀系数的计算公式如式(4~9)[17]

$$\alpha_{11}=\frac{V_fE_f\alpha_f+V_mE_m\alpha_m}{V_fE_f+V_mE_m}\approx\alpha_f \tag{4}$$

$$\alpha_{22}=\alpha_{33}=V_f(1+\nu_f)\alpha_f+V_m(1+\nu_m)\alpha_m-(V_f\nu_f+V_m\nu_m)\alpha_{11} \tag{5}$$

$$\partial_{12}=\partial_{13}=\partial_{23}=0 \tag{6}$$

$$\beta_{11}=\frac{E_m\rho}{(V_fE_f+V_mE_m)\rho_m}\beta_m=\frac{E_m\rho}{E_{11}\rho_m}\beta_m \tag{7}$$

$$\beta_{22}=\beta_{33}=\frac{(1+\nu_m)\rho}{\rho_m}\beta_m-(V_f\nu_f+V_m\nu_m)\beta_{11} \tag{8}$$

$$\beta_{12}=\beta_{13}=\beta_{23}=0 \tag{9}$$

式中:α_f和α_m——分别为纤维和基体的热膨胀系数;β_m——基体湿膨胀系数;V_m和V_f——分别为基体和纤维的体积分数,满足$V_m+V_f=1$;E_m和E_f——分别为常态下基体和纤维的弹性模量;ν_m和ν_f——分别为常态下基体和纤维泊松比;ρ和ρ_m——分别为复合材

Tab. 3 Failure criteria of composites

Failure mode	Failure criteria
Matrix tension(MT)($\sigma_{22} > 0$)	$(\frac{\sigma_{22}}{Y_T^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{12}}{S_{12}^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{23}}{S_{23}^{ht}})^2 \geqslant 1$
Matrix compression(MC)($\sigma_{22} < 0$)	$(\frac{\sigma_{22}}{Y_C^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{12}}{S_{12}^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{23}}{S_{23}^{ht}})^2 \geqslant 1$
Fiber tension(FT)($\sigma_{11} > 0$)	$(\frac{\sigma_{11}}{X_T^{ht}})^2 \geqslant 1$
Fiber compression(FC)($\sigma_{11} < 0$)	$(\frac{\sigma_{11}}{X_C^{ht}})^2 \geqslant 1$
Fiber-matrix shear-out(FMS)($\sigma_{11} < 0$)	$(\frac{\sigma_{11}}{X_C^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{12}}{S_{12}^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{13}}{S_{13}^{ht}})^2 \geqslant 1$
Interlaminar tension(IT)($\sigma_{33} > 0$)	$(\frac{\sigma_{33}}{Z_T^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{13}}{S_{13}^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{23}}{S_{23}^{ht}})^2 \geqslant 1$
Interlaminar compression(IC)($\sigma_{33} < 0$)	$(\frac{\sigma_{33}}{Z_C^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{13}}{S_{13}^{ht}})^2 + (\frac{\tau_{23}}{S_{23}^{ht}})^2 \geqslant 1$

Tab. 4 Material degradation rule

Failure mode	Material degradation rule
MT	$E_{22}^d = d_{mt}^{ht} E_{22}^{ht}$, $G_{12}^d = d_{mt}^{ht} G_{12}^{ht}$, $G_{23}^d = d_{mt}^{ht} G_{23}^{ht}$, $v_{12}^d = d_{mt}^{ht} v_{12}^{ht}$, $v_{23}^d = d_{mt}^{ht} v_{23}^{ht}$
MC	$E_{22}^d = d_{mc}^{ht} E_{22}^{ht}$, $G_{12}^d = d_{mc}^{ht} G_{12}^{ht}$, $G_{23}^d = d_{mc}^{ht} G_{23}^{ht}$, $v_{12}^d = d_{mc}^{ht} v_{12}^{ht}$
FT	$E_{11}^d = d_{ft}^{ht} E_{11}^{ht}$
FC	$E_{11}^d = d_{fc}^{ht} E_{11}^{ht}$
FMS	$G_{12}^d = d_{fm1}^{ht} G_{12}^{ht}$, $G_{13}^d = d_{fm1}^{ht} G_{13}^{ht}$, $G_{23}^d = d_{fm2}^{ht} G_{23}^{ht}$, $v_{12}^d = d_{fm1}^{ht} v_{12}^{ht}$
IT	$E_{33}^d = d_{dt}^{ht} E_{33}^{ht}$, $G_{13}^d = d_{dt}^{ht} G_{13}^{ht}$, $G_{23}^d = d_{dt}^{ht} G_{23}^{ht}$, $v_{13}^d = d_{dt}^{ht} v_{13}^{ht}$, $v_{23}^d = d_{dt}^{ht} v_{23}^{ht}$
IC	$E_{33}^d = d_{dc}^{ht} E_{33}^{ht}$, $G_{13}^d = d_{dc}^{ht} G_{13}^{ht}$, $G_{23}^d = d_{dc}^{ht} G_{23}^{ht}$, $v_{13}^d = d_{dc}^{ht} v_{13}^{ht}$, $v_{23}^d = d_{dc}^{ht} v_{23}^{ht}$

料和其基体的密度。

2.1.2 考虑湿热效应的失效判定准则和材料性能退化准则：对三维Hashin失效准则进行扩展改进[18]，将失效准则中的恒定强度参数改为取决于湿热环境的强度参数，如Tab.3。对基于细观力学理论分析的材料性能退化模型进行改进，给出了材料性能退化方案[19,20]，在此基础上，为了更好地模拟本文的刚度退化过程，将材料退化模型中为0的突降退化系数改为0.1，如Tab.4。

其中，$\sigma_{ii}(i,i = 1,2,3)$——复合材料的正应力；τ_{ii} $(1\leqslant i<j\leqslant 3)$——复合材料的剪应力；$X_T^{ht}$，$X_C^{ht}$，$Y_T^{ht}$，$Y_C^{ht}$，$Z_T^{ht}$，$Z_C^{ht}$，$S_{12}^{ht}$，$S_{13}^{ht}$和$S_{23}^{ht}$——单向复合材料在湿热环境下的极限强度；上标“ht”表示参数包含湿热效应；d_{ft}，d_{fc}，d_{mt}，d_{dt}，d_{mc}，d_{dc}，d_{fm1}和d_{fm2}——分别为复合材料的突降退化系数。

其中，刚度参数上标“d”表示发生损伤后的参数，d_i为湿热环境下复合材料的材料性能退化系数。本模型考虑湿度和温度的影响，通过引入湿热环境下复合材料的材料性能退化系数来降低原始刚度参数。

$$d_{ft} = \frac{V_m E_m}{E_{11}},\ d_{fc} \approx \frac{E_{22}}{E_{11}},\ d_{mt} = d_{dt} = 0,\ d_{mc} = d_{dc} \approx 0 \tag{10}$$

$$d_{fm1}=\left(\frac{1-\sqrt{V_f}}{1-\sqrt{V_f}+V_f}\right)\frac{G_m}{G_{12}} \tag{11}$$

$$d_{fm2}=\left(\frac{1-\sqrt{V_f}}{1-\sqrt{V_f}+V_f}\right)\frac{G_m}{G_{23}} \tag{12}$$

式中:V_m和V_f——分别为复合材料基体和纤维体积分数;E_m和G_m——分别为室温干态下复合材料基体弹性模量和剪切模量;E_{11},E_{22},E_{12}和G_{23}——室温干态下单向复合材料力学弹性参数。

2.2　湿热环境下层合板拉伸强度工程估算模型

在应力场强法中开口场强函数为[21]

$$f_s=\frac{1}{S}\int_\Omega f(\sigma)\varphi(r)\mathrm{d}s \tag{13}$$

根据积分中值定理,式(13)可改写为

$$f_s=\frac{1}{d_0}\int_R^{R+d_0} f(\sigma)\psi(x)\mathrm{d}x \tag{14}$$

式中:d_0——特征长度;$\psi(x)$——权函数;y方向上孔边应力为$\sigma_y(x,0)$[22],可取$f(\sigma)=\sigma_y(x,0)/\sigma_0$,其中$\sigma_0$为无孔层合板的拉伸强度,可通过试验获得。

$$\sigma_y(x,0)=\frac{\sigma^\infty}{2}\left\{2+\left(\frac{R}{x}\right)^2+3\left(\frac{R}{x}\right)^4-(K_T^\infty-3)\left[5\left(\frac{R}{x}\right)^6-7\left(\frac{R}{x}\right)^8\right]\right\} \tag{15}$$

根据文献[23]可构造权函数ψ(x)形式为

$$\psi(x)=1-\frac{x-R}{\frac{W}{2}-R}=\frac{W}{W-2R}-Bx \tag{16}$$

$$B=\frac{1}{\frac{W}{2}-R} \tag{17}$$

式中:W——含孔层合板宽度;B——衰减系数,只与含孔层合板宽度孔径有关。

根据式(14~16)可得到无限大复合材料含孔层合板拉伸强度的解析式

$$\sigma_{RD}=\frac{2(1-\lambda)\sigma_0}{\lambda[m_1+BR(m_1-m_2)]} \tag{18}$$

$$m_1=2\lambda^{-1}-\lambda-\lambda^3+(K_T^\infty-3)(\lambda^5-\lambda^7) \tag{19}$$

式中:$\lambda=R/(R+d_0)$,d_0——特征长度;K_T^∞——无限大板

$$m_2=\lambda^{-2}-\ln(\lambda)-\frac{3}{2}\lambda^2+(K_T^\infty-3)\left(\frac{5}{4}\lambda^4-\frac{7}{6}\lambda^6\right)-\frac{K_T^\infty}{12}+\frac{3}{4} \tag{20}$$

的孔边应力集中系数[24],

$$K_T^\infty=1+n \tag{21}$$

式中:A_{ij}——复合材料层合板的面内刚度系数。

无限大含孔层合板的拉伸强度预测模型如上所述,基于无限大含孔层合板的拉伸强度(σ_{RD})修正得到有限宽复合材料含孔层合板的拉伸强度(σ_n)

$$n=\left[\frac{2}{A_{22}}\left(\sqrt{A_{11}A_{22}}-A_{12}+\frac{A_{11}A_{22}-A_{12}^2}{2A_{66}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}=\left\{2\left[\left(\frac{E_{11}}{E_{22}}\right)^{\frac{1}{2}}-\nu_{12}\right]+\frac{E_{11}}{G_{12}}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{22}$$

$$\sigma_n=\frac{\sigma_{RD}}{Y}=\frac{2(1-\lambda)\sigma_0}{Y\lambda[m_1+BR(m_1-m_2)]} \tag{23}$$

式中:Y——有限宽度修正系数。由于复合材料含孔层合板是正交各向异性的,因此本文选择由Tan提出的有限宽度修正系数,其表达式为[25]

$$Y=\frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3}+\frac{1}{2}\left(\frac{2RM}{W}\right)^6(K_T^\infty-3)\left[1-\left(\frac{2RM}{W}\right)^2\right] \tag{24}$$

$$M^2=\frac{\sqrt{1-8\left[\frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3}-1\right]}-1}{2(2R/W)^2} \tag{25}$$

在基于应力场强法的含孔层合板拉伸强度工程估算模型的基础上,引入Tsai方程拟合复合材料力学性能与湿热环境之间的函数关系[26],建立了预测

湿热环境下含孔层合板拉伸强度的工程估算模型，此模型可以预测不同湿热环境下含孔层合板的拉伸强度。

将温度和湿度引入应力场强法的含孔层合板拉伸强度工程估算模型中，采用无量纲温度（T^*）来拟合复合材料基本力学性能参数与湿热环境之间的函数关系[17,27]，

$$T^* = \frac{T_g - T}{T_g^0 - T_0} \tag{26}$$

式中：T_g和T_g^0分别——为湿态和干态时的玻璃化转变温度；T和T_0——分别为试验温度和室温。

其中，复合材料在湿态下的玻璃化转变温度（T_g）的计算公式为[17]

$$T_g = T_g^0 - kC \tag{27}$$

式中：k——单位吸湿率中的温度偏移量；C——吸湿率。

考虑湿热效应建立复合材料力学性能参数与湿热环境之间的函数关系，

$$E_{11}^{ht} = E_{11}(T^*)^a,\ E_{22}^{ht} = E_{22}(T^*)^b,\ G_{12}^{ht} = G_{12}(T^*)^c,\ v_{12}^{ht} = v_{12} \tag{28}$$

式中：T^*——无量纲温度；a，b，c——复合材料湿热退化参数；E_{11}^{ht}和E_{22}^{ht}——分别为复合材料1，2方向的弹性模量；G_{12}^{ht}——复合材料的纵横剪切模量；v_{12}^{ht}——复合材料的泊松比。

$$K_T^{\infty,ht} = 1 + \left\{2\left[\left(\frac{E_{11}^{ht}}{E_{22}^{ht}}\right)^{\frac{1}{2}} - v_{12}^{ht}\right] + \frac{E_{11}^{ht}}{G_{12}^{ht}}\right\}^{\frac{1}{2}} = 1 + \left\{2\left[\left(\frac{E_{11}(T^*)^a}{E_{22}(T^*)^b}\right)^{\frac{1}{2}} - v_{12}\right] + \frac{E_{11}(T^*)^a}{G_{12}(T^*)^c}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{29}$$

因此，考虑湿热条件的孔边应力集中系数（$K_T^{\infty,ht}$）的计算公式为

最终得到考虑湿热环境的含孔复合材料层合板拉伸强度工程估算模型为

$$\sigma_n^{ht} = \frac{2(1-\lambda)\sigma_0^{ht}}{Y^{ht}\lambda[m_1^{ht} + BR(m_1^{ht} - m_2^{ht})]} \tag{30}$$

其中，

$$m_1^{ht} = 2\lambda^{-1} - \lambda - \lambda^3 + (K_T^{\infty,ht} - 3)(\lambda^5 - \lambda^7) \tag{31}$$

式中：上标“ht”代表湿热环境下的性能特征；考虑湿热环境的工程估算模型中待确定的参数有孔边应力集中系数（$K_T^{\infty,ht}$）、无孔层合板的拉伸强度（σ_0^{ht}）。

$$m_2^{ht} = \lambda^{-2} - \ln(\lambda) - \frac{3}{2}\lambda^2 + (K_T^{\infty,ht} - 3)\left(\frac{5}{4}\lambda^4 - \frac{7}{6}\lambda^6\right) - \frac{K_T^{\infty,ht}}{12} + \frac{3}{4} \tag{32}$$

$$Y^{ht} = \frac{3(1-2R/W)}{2 + (1-2R/W)^3} + \frac{1}{2}\left(\frac{2RM}{W}\right)^6 (K_T^{\infty,ht} - 3)\left[1 - \left(\frac{2RM}{W}\right)^2\right] \tag{33}$$

Tab. 5 Engineering calculation parameters of T800 composite under the 75 ℃/wet condition

a	*b*	*c*	*k*	T_g^0/℃	T_0/℃
0.04	0.5	0.5	4490	185	25

其中，不同湿热环境下，层合板的$K_T^{\infty,ht}$也不同，根据Tab.5中T800复合材料湿热环境下工程计算参数和Tab.1中T800复合材料室温干态下力学性能，由式(26~29)计算出不同湿热环境下的层合板的$K_T^{\infty,ht}$，结果如Tab.6所示。

特征长度（d_0）只与含孔层合板的材料和铺层有关，因此可利用室温干态下的试验数据计算。已知孔径R=3 mm，试件宽度W=36 mm，根据式(24)，室温干态下的有限宽度修正系数Y=0.97，再由式(17~20)，可得到含孔层合板的特征长度d_0=4.05。

Tab. 6 Engineering calculation parameters of T800 composite under the 75 ℃/wet condition

Temperature /℃	Hygroscopic rate/%	$K_T^{\infty,ht}$
25	0	7.88
25	0.648	8.20
50	0	8.15
50	0.648	8.54
75	0	8.48
75	0.648	9.00

3　有限元模型

3.1　有限元模型建立

建立复合材料含孔层合板三维有限元模型，如Fig.3所示。使用三维实体单元C3D8R来定义划分层合板网格类型，指派网格单元类型中的沙漏控制选择增强，对网格进行精细划分，在孔边缘布置80个种子，并沿厚度方向将层合板划分为16层，在远离中心孔的区域设置较为稀疏的网格，层合板左端自由度采用完全固定的方式，右端在X方向施加拉伸位移同时约束另外2个方向的自由度。2种环境下的仿真模拟均关联改进的UMAT子程序进行。

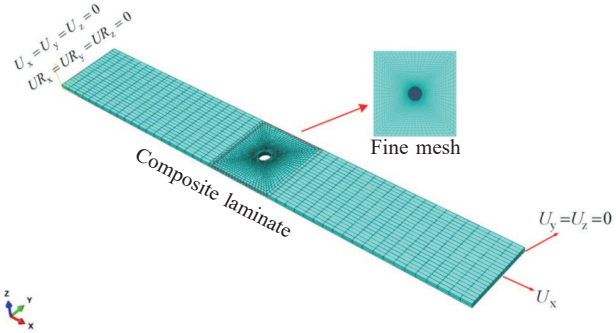


Fig. 3 Finite element model of T800 composite porous laminates

3.2　有限元模型验证

为验证有限元模型预测结果的准确性，在6种不同环境下将含孔层合板仿真与试验的载荷-位移曲线进行比对，如Fig.4所示。结果表明仿真结果与试验结果误差较小，在初始加载阶段，仿真与试验的载荷-位移曲线呈现为线性趋势，进一步加载后，仿真与试验的载荷-位移曲线均呈现出明显的非线性段，并且刚度开始出现逐渐下降的趋势，直至载荷-位移曲线出现断崖式掉载，复合材料层合板发生最

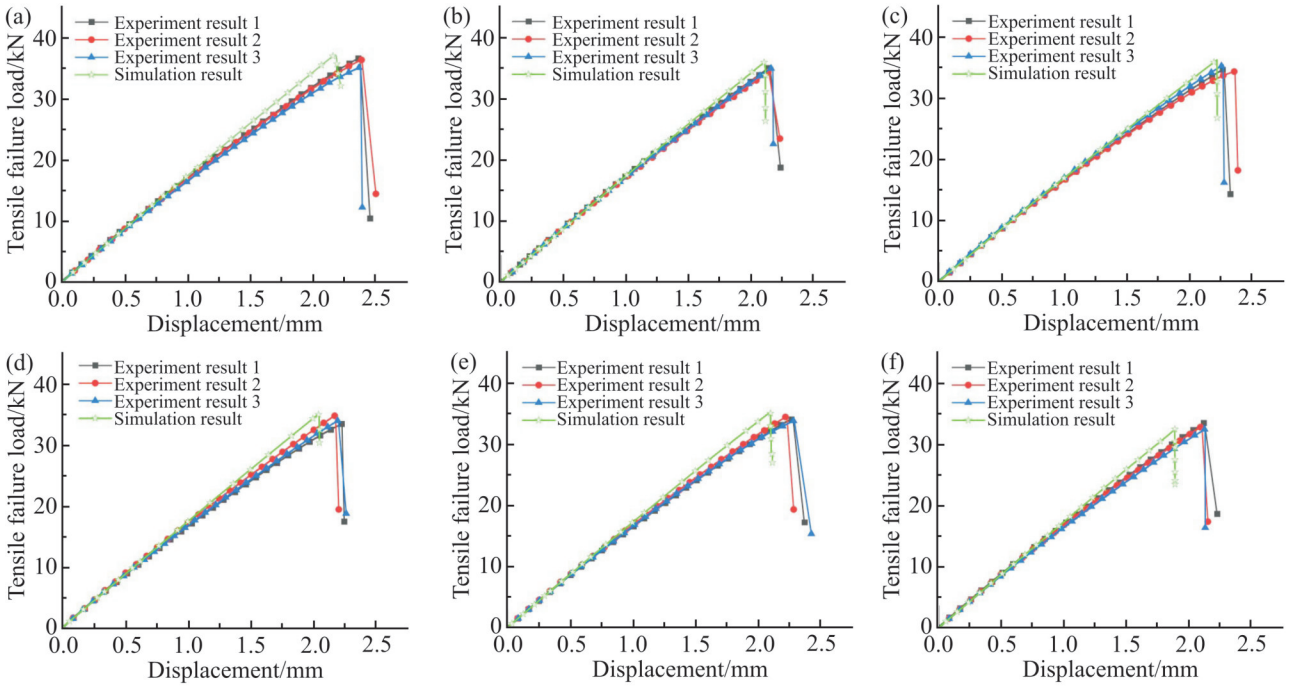


Fig. 4 Comparison of load-displacement curves in six different hygrothermal environments

(a): T=25 ℃, C=0%; (b): T=25 ℃, C=0.648%; (c): T=50 ℃, C=0%; (d): T=50 ℃, C=0.648%; (e): T=75 ℃, C=0%; (f): T=75 ℃, C=0.648%

Tab. 7 Tensile failure strength test results of non-porous laminates in hygrothermal environment

Temperature/℃	Hygroscopic rate/%	Failure strength/MPa	Coefficient/%
25	0	590.61	2.36
25	0.648	578.83	2.78
50	0	580.92	1.26
50	0.648	567.71	3.35
75	0	571.36	1.58
75	0.648	554.67	3.88

Tab. 8 Tensile failure strength test results of porous laminates in hygrothermal environment

Temperature/℃	Hygroscopic rate/%	Failure strength/MPa	Coefficient/%
25	0	590.61	2.36
25	0.648	578.83	2.78
50	0	580.92	1.26
50	0.648	567.71	3.35
75	0	571.36	1.58
75	0.648	554.67	3.88

终失效破坏，且对比载荷-位移曲线可知，有限元模型预测结果与试验结果的误差均控制在±10%内，因此可以验证有限元模型预测结果的正确性。

4 结果与分析

4.1 湿热环境下含孔层合板的静力性能

Tab.7和Tab.8给出了6种不同环境下无孔层合板和含孔层合板试件的拉伸失效强度试验平均值及变异系数，最大变异系数分别4.27%为3.88%，表示试验数据可靠真实。

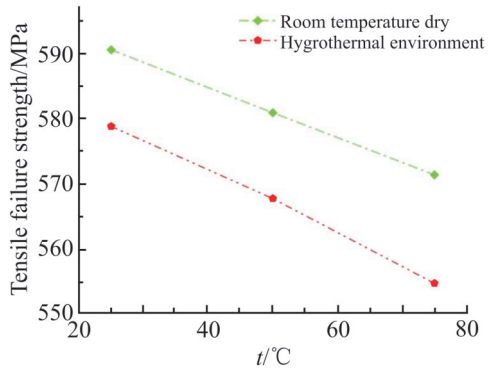


Fig. 5 Failure strength curves of porous laminate with temperature

通过试验数据对比，相较于25 ℃，干态试件的拉伸失效强度在50 ℃和75 ℃分别下降了1.6%和3.3%，而吸湿饱和试件的拉伸失效强度在50 ℃和75 ℃分别下降了1.9%和4.2%；吸湿饱和试件在3种试验温度时的拉伸失效强度相比于干态试件分别降低了2%，2.3%和2.9%，随着温度的升高，因为吸湿引起的试件拉伸失效强度下降现象越来越显著；且75 ℃吸湿饱和试件的拉伸失效强度比室温干态试件下降6.1%，湿热耦合作用比单一吸湿或单一热环境对含孔层合板拉伸失效强度的影响要更加显著。

含孔层合板试件的拉伸失效强度在不同吸湿率下随温度变化的曲线如Fig.5所示。结果表明，单一热环境和湿环境都会使含孔层合板试件的拉伸失效强度下降，干态含孔层合板试件的拉伸失效强度与温度成反比，随着试验温度的升高，失效强度下降，但失效强度的相差值较小，且下降趋势比较平滑；吸湿饱和含孔层合板试件的拉伸失效强度随试验温度上升的下降幅度也不大，在试验温度较低时，下降的趋势较为缓慢，升高温度后，失效强度的下降速率增大。

综上所述，湿热环境下含孔层合板试件的拉伸失效强度整体呈现下降趋势，这是因为高温环境下

复合材料的环氧树脂基体会发生热膨胀并且导致纤维-基体界面产生热应力,引起纤维-基体界面性能的下降;高温高湿环境下,复合材料的环氧树脂基体会因为吸湿而塑化,并导致基体产生湿应力,从而削弱了环氧树脂基体性能,同时复合材料吸湿也会使得环氧树脂基体的玻璃化转变温度下降,进一步破坏环氧树脂基体,且纤维-基体界面也会产生较高的热应力和湿应力,使其界面性能受到较大的影响,最终导致含孔层合板试件的拉伸失效强度下降;但由于高温对碳纤维的影响较小,且碳纤维并不会吸收水分,纤维的拉伸性能主导复合材料的拉伸失效强度,所以高温高湿对碳纤维的拉伸性能影响较小,则对复合材料的拉伸性能影响也较小,使其拉伸失效强度在湿热环境下减小的幅度也较小。

4.2　湿热环境下含孔层合板的微观失效形式

含孔层合板试件拉伸试验过程中,当载荷逐渐增大到一定值后,试件开始发生初始失效,此时可以听到清脆的纤维断裂的声音,并伴随着黑色碳粉的飘落,当继续增大载荷至试件的极限失效载荷时,出现更大的试件断裂声音,此时试件发生拉伸失效。Fig.6为不同湿热工况下含孔复合材料试件最终拉伸失效后的正面样貌图,发现各工况下试件的失效样貌基本相同,均在孔截面上沿垂直于拉伸方向发生横向断裂。

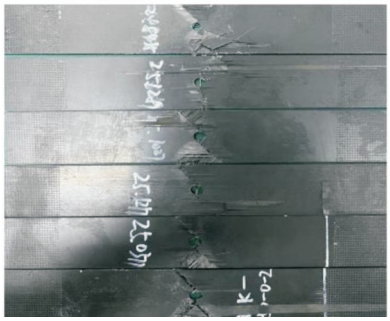


Fig. 6　Front appearance of the tensile failure of porous laminates

Fig.7为含孔层合板在25 ℃干态和75 ℃吸湿饱和态下拉伸断口处的微观SEM图,对比Fig.7(a~c)可见,0°方向25 ℃干态下试件断口树脂形态较好且纤维较完整,纤维拔出及孔洞较少;75 ℃吸湿饱和态下试件树脂损伤较严重,纤维拔出明显增多并伴随更多孔洞的出现,这主要是由于高温高湿环境对树脂和纤维造成损伤,且影响纤维-树脂的界面性能,随着水分不断向树脂内部扩展,孔洞出现程度也逐渐加剧。对比Fig.7(d~f)可见,90°方向25 ℃干态下试件断口处纤维-树脂的的黏结情况较好,且纤维分布情况较齐整;75 ℃吸湿饱和态下可以发现纤维与

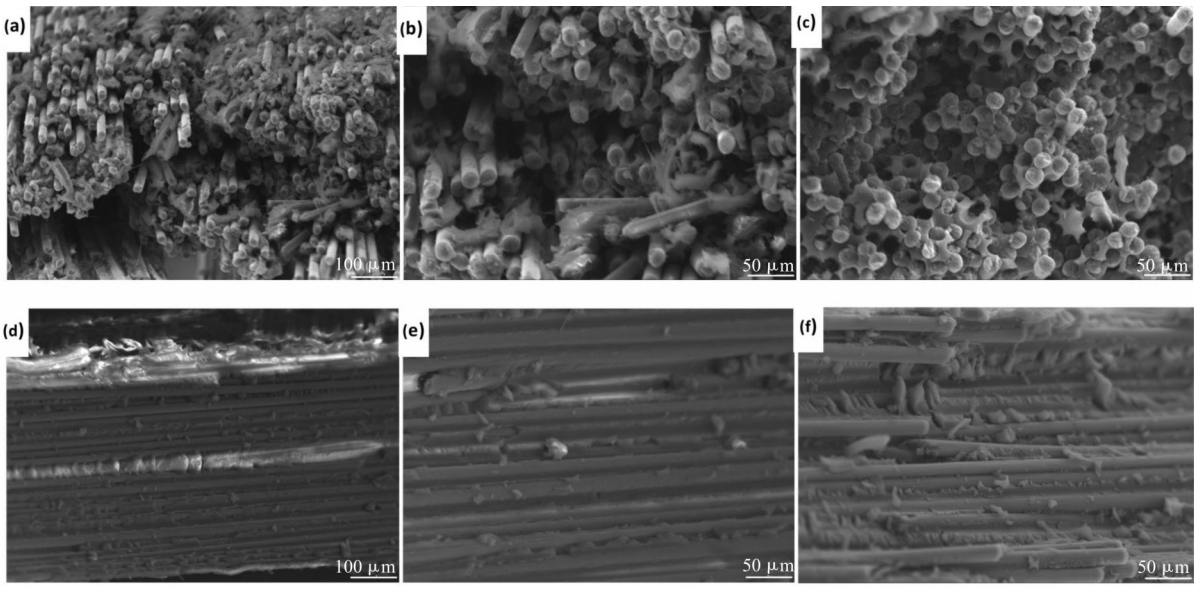


Fig. 7　Microscopic SEM images of tensile fracture of porous laminates

(a): 0° at 25 ℃ dry state; (b): 0° at 25 ℃ dry state; (c): 0° at 75 ℃ hygroscopic saturation; (d): 90° at 25 ℃ dry state; (e): 90° at 25 ℃ dry state; (f): 90° at 75 ℃ hygroscopic saturation

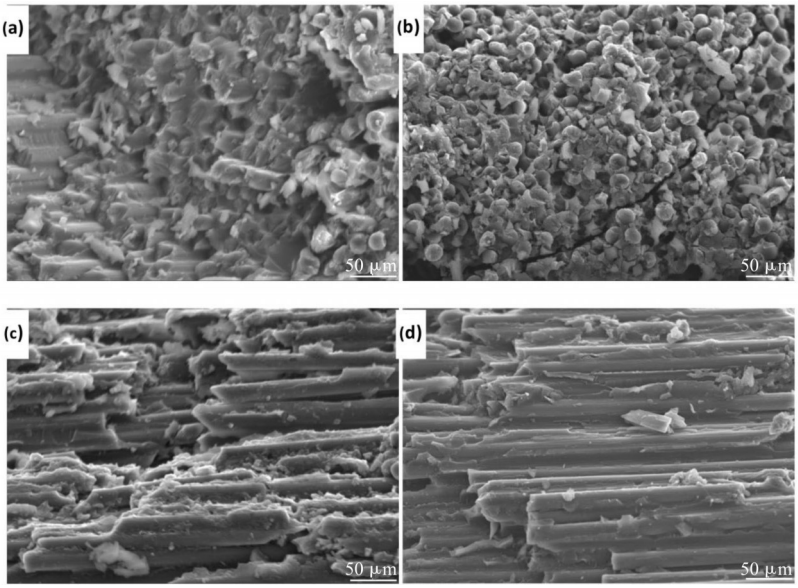


Fig. 8 Microscopic SEM images of thickness direction of porous laminates
(a): 0° at 25 ℃ dry state; (b): 0° at 75 ℃ hygroscopic saturation; (c): 90° at 25 ℃ dry state; (d): 90° at 75℃ hygroscopic saturation

树脂的分离状态较明显，这是因为高温产生的热应力削弱了纤维-树脂的界面性能，湿环境也会降低基体玻璃化转变温度，进而对基体也造成一定损伤。

Fig.8为含孔层合板在25 ℃干态和75 ℃吸湿饱和态下层合板厚度方向的微观SEM图，对比Fig.8(a)和Fig.8(b)可见，0°方向25 ℃干态下试件厚度方向纤维和树脂之间的黏结情况较好，并伴有明显的絮状树脂；75 ℃吸湿饱和态下试件纤维与树脂的脱粘程度加重，且出现明显的裂痕，这是因为水分子在树脂表面的孔洞和间隙不断向里扩散，加剧了表面裂纹和孔洞的扩张，并且在湿热环境影响下，纤维和树脂的结合性能下降，界面产生湿热应力，在承受持续的外界载荷之后产生裂痕。对比Fig.8(c)和Fig.8(d)可见，90°方向25 ℃干态下试件厚度方向纤维出现明显的断裂，并伴随较杂乱的树脂分布；75 ℃吸湿饱和态下可以发现黏附的树脂也较少，这是因为温度升高后会产生热应力，进而导致基体脆性降低，纤维-基体界面黏附力减弱。

4.3 湿热环境下含孔层合板不同铺层损伤形式

对6种环境下含孔层合板的拉伸失效行为进行有限元模拟，得到含孔层合板的载荷-位移曲线，如Fig.9所示。结果表明，湿热工况对T800碳纤维/环氧树脂复合材料的刚度影响不大，对拉伸失效强度的影响也并不显著，Fig.9中，A1，A2，A3，A4，A5和A6分别表示6种工况下含孔层合板的极限失效载荷。

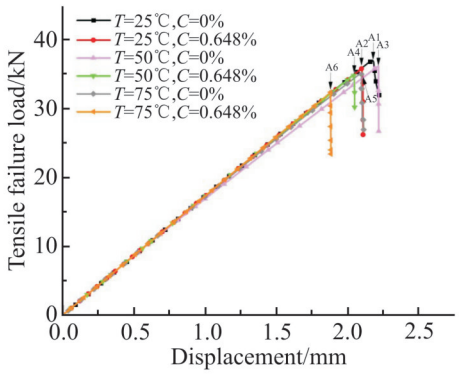
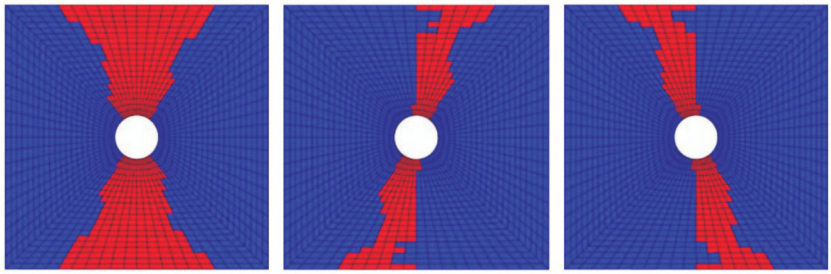


Fig. 9 Comparison of load-displacement curves of porous laminates in six hygrothermal environments

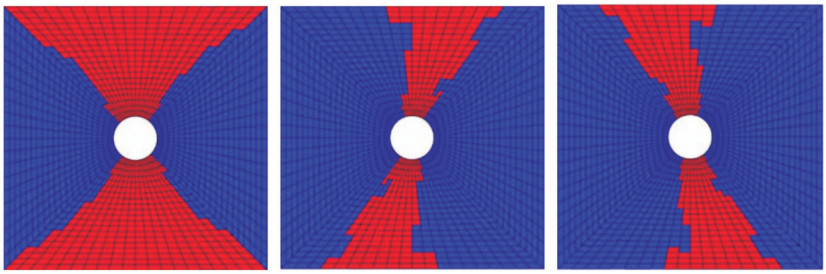
以25 ℃干态和75 ℃吸湿饱和2种工况下，含孔层合板各个铺层在特征状态A处的失效云图为例进行湿热环境下含孔层合板拉伸失效分析，如Fig.10和Fig.11所示，其中特征状态A为含孔层合板达到极限失效载荷阶段，红色表示含孔层合板的失效区域。

如Fig.10所示，25 ℃干态下，纤维拉伸失效主要发生在0°，45°和－45°铺层，其中0°铺层出现较为严重的纤维拉伸失效，其失效区域沿90°方向从孔边扩散至层合板端部，呈现为“X”型，这是因为随着外部拉伸载荷增大，含孔层合板的孔边应力集中情况更



0° layer　　45° layer　　- 45° layer

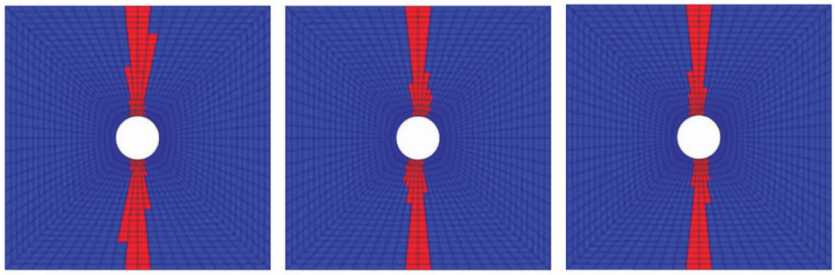
(a) tensile failure of fiber



90° layer　　45° layer　　- 45° layer

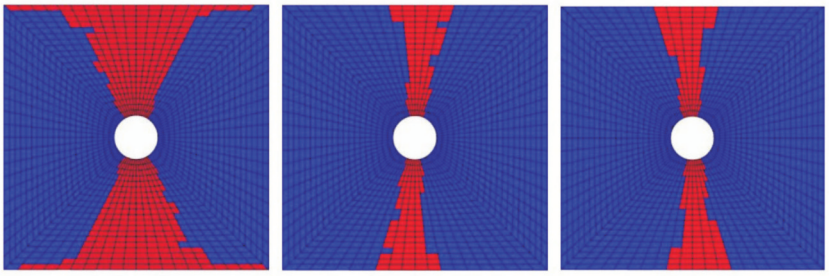
(b) tensile failure of matrix

Fig. 10 Failure cloud of each layer of porous laminate in dry state at room temperature



0° layer　　45° layer　　- 45° layer

(a) tensile failure of fiber



90° layer　　45° layer　　- 45° layer

(b) tensile failure of matrix

Fig. 11 Failure cloud diagram of each layer of porous laminate in hygroscopic saturation

Tab. 9 Comparison of failure strength of porous laminates

Environment	Predicted value	Experimental value	Deviation /%	Simulation value	Deviation /%
T=25 ℃,*C*=0%	512.59	590.61	−13.2	618.13	−17.1
T=25 ℃,*C*=0.648%	498.12	578.83	−13.9	598.28	−16.7
T=50 ℃,*C*=0%	502.16	580.92	−13.6	605.73	−17.1
T=50 ℃,*C*=0.648%	478.25	567.71	−15.8	583.49	−18.0
T=75 ℃,*C*=0%	483.67	571.36	−15.3	588.79	−17.9
T=75 ℃,*C*=0.648%	463.40	554.67	−16.5	542.91	−14.6

加严重，进而导致基体拉伸失效的区域也不断变大；45°和−45°铺层的失效区域分别沿45°和−45°方向以发散状向外延伸至层合板两侧边缘。基体拉伸失效主要发生在90°，45°和−45°铺层，其中90°铺层的基体拉伸失效最严重，45°和−45°铺层的失效区域相对较小，基体拉伸失效最先发生在90°铺层，继续施加外部载荷之后，含孔层合板孔边出现更严重的应力集中，导致基体拉伸失效的区域进一步增大，最后呈现为大“X”型；45°和−45°铺层失效区域的扩展方向和规律与45°和−45°铺层纤维拉伸失效区域的扩展方向和规律相同。

如Fig.11所示，75 ℃吸湿饱和态下，纤维拉伸失效发生在0°，45°和−45°铺层，0°铺层的纤维拉伸失效区域从孔边沿90°方向向外扩展贯穿整个层合板，呈现为“I”型；45°和−45°铺层的纤维拉伸失效区域延伸到层压板的两侧边缘，也呈现为“I”型。基体拉伸失效同时发生在90°，45°和−45°铺层，其中90°铺层的基体拉伸失效最严重，45°和−45°铺层的失效严重程度较轻；3个方向铺层的失效区域均沿层合板宽度方向贯穿整个层合板。25 ℃干态和75 ℃吸湿饱和态下含孔层合板的主要破坏模式均为基体拉伸失效和纤维拉伸失效。

4.4 湿热环境下含孔层合板拉伸强度工程估算

通过改变温度和吸湿率，在6种湿热环境下使用湿热环境下含孔层合板拉伸强度工程估算模型来预测含孔层合板的拉伸强度。如Tab.9所示，将模型预测结果与试验结果和有限元预测结果进行对比，结果表明，与试验结果和有限元预测结果相比，工程估算模型的预测结果相对较小，误差范围分别在13.2%~16.5%和14.6%~18.0%，均在可接受范围内，因此，本文建立的考虑湿热的含孔层合板拉伸强度工程估算模型可以有效预测温度和吸湿率对含孔层合板拉伸失效强度的影响。

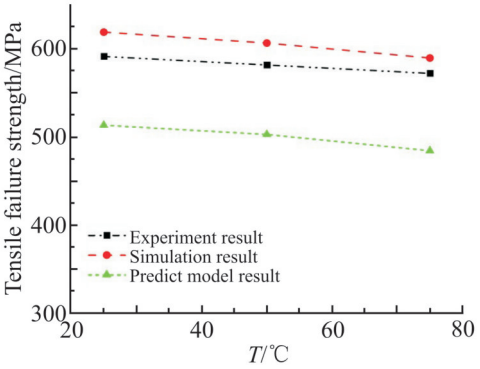


Fig. 12 Dry test piece

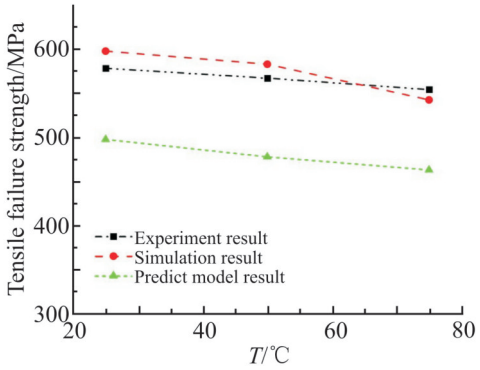


Fig. 13 Hygroscopic saturated test piece

Fig.12和Fig.13分别是干态和吸湿饱和态下试件拉伸失效强度的结果对比，结果发现2种环境下此模型的预测值都偏小，随着温度的升高，模型的预测值下降，符合复合材料失效强度的变化规律；室温干态下，随着温度的升高，模型的预测结果与试验结果之间的误差逐渐变大，与有限元预测结果之间的误差也变大；吸湿饱和态下，模型的预测结果与试验结果的误差也随着试验温度的升高而增大，但是与有限元预测结果误差的变化趋势相反，误差先增大后减小。

5　结论

(1) 建立了湿热环境下复合材料含孔层合板工程估算模型,该模型可为湿热环境下复合材料层合板的强度预测分析提供一定参考;

(2) 湿热耦合环境对含孔层合板拉伸失效强度的影响较单一吸湿或热环境更为明显,试件拉伸失效强度在75 ℃吸湿饱和态下较室温干态下降低了6.1%,因此在实际工程中需密切关注环境对材料力学性能的影响;

(3) 不同湿热工况下,含孔层合板的失效沿垂直于拉伸方向发生横向断裂,层合板侧面出现分层现象,试件失效部分的铺层相互交叠、嵌入,2种环境下含孔层合板的主要破坏模式为基体拉伸失效和纤维拉伸失效,因此应寻求最佳的铺层方式和孔径等参数来提升复合材料的力学性能;

(4) 通过扫描电镜发现,75 ℃吸湿饱和态下,层合板断口处试件0°方向树脂损伤较严重,纤维拔出明显增多并伴随更多孔洞出现,90°方向纤维与树脂的分离状态较明显;层合板厚度方向试件0°方向纤维与树脂的脱粘程度加重且出现明显裂痕,90°方向黏附的树脂较少,因此寻求更好的成型技术来增强界面性能也是提升复合材料力学性能的关键。

参考文献:

[1] 冯振宇, 解江, 迟琪琳,等. 湿热环境对复合材料单向板拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11):37-43.
Feng Z Y, Xie J, Chi Q L, *et al*. Influence of hygrothermal environment on tensile property of unidirectional composite laminates[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34 (11):37-43.

[2] Delli E, Giliopoulos D, Bikiaris D N, *et al*. Fibre length and loading impact on the properties of glass fibre reinforced polypropylene random composites[J]. Composite Structures, 2021, 263:113678.

[3] Rani M, Choudhary P, Krishnan V, *et al*. A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 215: 108768.

[4] 邓文亮,成竹,唐虎. 复合材料/金属混合结构热应力分布规律[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2):550-557.
Deng W L, Cheng Z, Tang H. Thermal stress distribution law of hybrid composite metal structures[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2):550-557.

[5] Fiore V, Calabrese L, Proverbio E, *et al*. Salt spray fog ageing of hybrid composite/metal rivet joints for automo- tive applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 108:65-74.

[6] Guermazi N, Tarjem A B, Ksouri I, *et al*. On the durabil- ity of FRP composites for aircraft structures in hygro- thermal conditioning[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 85:294-304.

[7] Gao Y, Li C, Wang J, *et al*. Investigation on fatigue be-havior and damage mechanism of C/BMI composites under hygrothermal environment[J]. Polymer Degradation and Stability, 2019, 169: 108989-.

[8] Xu L, He Y, Ma S, *et al*. Effects of hygrothermal and thermal-oxidative ageing on the open- hole properties of T800/high-temperature epoxy resin composites with different hole shapes[J]. High Performance Polymers, 2020, 32:306-315.

[9] 贾宝惠, 任鹏, 宋挺,等. 湿热环境下端径比对复合材料螺栓连接结构静力拉伸失效的影响[J/OL]. 材料导报,2024(5):1- 16[2023- 04- 06].http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230308.1356.014.html.
Jia B H, Ren P, Song T, *et al*. Effects of end-to-diameter ratio on static tensile failure of composite bolted joints under hygrothermal environment[J/OL]. Materials Reports, 2024(5): 1- 16[2023- 04- 06].http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230308.1356.014.html.

[10] 高坤, 史汉桥, 孙宝岗,等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1147-1152.
Gao K, Shi H Q, Sun B G, *et al*. Effects of hydro-thermal aging on properties of glass fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1147-1152.

[11] Goswami S. A finite element investigation on progressive failure analysis of composite bolted joints under thermal environment [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2005, 24:161-171.

[12] Wang X, Jia P, Wang B. Progressive failure model of high strength glass fiber composite structure in hygrothermal environment[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114932.

[13] 姚宇超, 许希武, 毛春见. 湿热环境下开孔复合材料层合板的强度[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(3): 425-431.
Yao Y C, Xu X W, Mao C J. Strength of composite laminates with open hole under hygrothermal conditions[J]. Journal of Materials Science &. Engineering, 2015, 33(3): 425-431.

[14] 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.
Liu Y J, Yan Y, He M Z, *et al*. Simulation of progressive damage on composite structure under hydro/thermo/mechanical coupled condition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(3): 384-388.

[15] Conshohocken W. ASTM D5229M−14, Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials[S]. [S.l.]: ASTM International, 2014.

[16] Wang X, Jia P, Wang B. Progressive failure model of high strength glass fiber composite structure in hygro- thermal environment[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114932.

[17] Shan M, Zhao L, Hong H, *et al*. A progressive fatigue damage model for composite structures in hygrothermal environments[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111:299-307.

[18] Camanho P P. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33:2248-2280.

[19] 张娇蕊, 山美娟, 黄伟, 等. 湿热环境对CFRP复合材料-铝合金螺栓连接结构静力失效的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2224-2233.
Zhang J R, Shan M J, Huang W, *et al*. Effects of hygrothermal environment on quasi- static failure of CFRP composite-aluminum alloy bolted joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2224-2233.

[20] Zhang J, Qi D, Zhou L, *et al*. A progressive failure analysis model for composite structures in hygrothermal environments[J]. Composite Structures, 2015, 133:331-342.

[21] 姚卫星, 颜永年, 俞新陆. 预测复合材料缺口强度的场强法[J]. 复合材料学报,1994(1):67-72.
Yao W X, Yan Y N, Yu X L. The method of stress field intensity for predicting notched strength of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1994(1):67-72.

[22] Konish H J, Whitney J M. Approximate stresses in an orthotropic plate containing a circular hole[J]. Journal of Composite Materials, 1975, 9:157-166.

[23] 吴义韬，姚卫星. 含孔层合板剩余强度估算的应力场强法工程简化模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4): 551-557.
Wu Y T, Yao W X. Simplified engineering model for predicting residual strength of notched laminates based on stress field intensity method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 551-557.

[24] Awerbuch J, Madhukar M S. Notched strength of composite laminates: predictions and experiments—a review[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 1985, 4:3-159.

[25] Tan S C. Stress concentrations in laminated composites[M]. London: Routledge, 2017.

[26] Tsai S W, Hahn H T. Introduction to composite materials[M]. Westport, CT: Technomic Publishing Co, 1980.

[27] Tsai S W. Composite design[M]. 4th ed. Dayton: Think Composites, 1988.

Static Tensile Properties and Engineering Estimation Model of Porous Laminates Under Hygrothermal Environment

Baohui Jia[1], Peng Ren[2], Ting Song[2], Xiang Lu[1], Yijie Xiong[2], Xiao Yang[2]

（1.*College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300,China; 2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300,China*）

ABSTRACT: The prediction of mechanical properties of composite structural parts in hygrothermal environment is of great significance for its engineering applications. Focusing on the prediction of static tensile properties and strength of composite laminates in hygrothermal environments, the static tensile test of porous laminates of composite materials was carried out, and the failure response and damage characterization of six different types of structures in hygrothermal environments were analyzed. Based on the stress field strength method, the engineering estimation model of porous laminates in hygrothermal environment was established, and the influence of hygrothermal environment on the mechanical properties and tensile failure of porous laminates was analyzed by comparing the finite element progressive damage model and test results. The results show that the error range between the prediction results of the engineering estimation model, finite element and test results is small, which can be used to predict the influence of temperature and hygroscopic rate on the tensile failure strength of porous laminates. Compared with the dry state at room temperature, the tensile failure strength of the specimen is decreased by 6.1% in the hygroscopic saturation state at 75 ℃. In the dry state of 25 ℃ and 75 ℃ hygroscopic saturation, the fiber tensile failure of 0° padding of porous laminate is the most serious, the tensile failure of the matrix of 90° ply is the most serious, and the main failure modes of laminate are matrix tensile failure and fiber tensile failure. The microscopic morphology of the thickness of the laminate in the hygroscopic saturation state at 75 ℃ was analyzed by scanning electron microscopy, and it is found that the debonding degree of fiber and resin in the 0° direction of the specimen is aggravated and obvious cracks appear, and the fiber distribution in the 90° direction is more neat, but there are fewer adherents.

Keywords: composite; hygrothermal environment; laminates; mechanical properties; engineering estimation model