基于应变不变量失效理论的复合材料损伤模拟

李 星 关志东 刘 璐 黎增山

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 应变不变量失效理论基于物理失效模式判断纤维和基体的损伤,适于研究纤维与基体的细观相互作用及固化残余应力的影响. 介绍了应变不变量失效理论的物理背景,建立了正方形、六边形和钻石型细观代表体积单元模型,给出了宏观应变到细观应变的转换方法,提出了相应的失效模式和损伤演化准则. 基于应变不变量失效理论求得了 CCF300/5228 材料体系的机械应变放大系数和热应变放大系数,对 CCF300/5228 复合材料开孔层合板的拉伸破坏过程进行了模拟,分析了纤维和基体的失效过程. 计算与试验结果取得了较好的一致性,证明了该理论的适用性.

关 键 词: 复合材料; 应变不变量; 失效模式; 损伤演化

中图分类号: V 257; TB 33

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)02-0190-06

Damage simulation of composite materials based on strain invariant failure theory

Li Xing Guan Zhidong Liu Lu Li Zengshan

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

Abstract: Strain invariant failure theory (SIFT) estimates failure in fiber and matrix based on mechanical failure modes, which is suitable to study meso-interaction between fiber and matrix, and to evaluate influence of curing residual stress. Mechanical theory background of SIFT was introduced. Square, hexagon and diamond representative volume element(RVE) model in meso level were established. Transition method between macro and meso level was given. Failure mode and damage evolution criteria were proposed. Based on this theory, mechanical strain amplification factors and thermal strain amplification factors of CCF300/5228 were obtained, open hole tensile performance of CCF300/5228 was calculated, fracture process of fiber and matrix was analyzed. Good agreement between numerical results and experiments is observed, which demonstrates the applicability of this theory.

Key words: composite material; strain invariant failure theory; failure mode; damage evolution

纤维增强复合材料具有比强度、比刚度高,可设计性等特点,目前已广泛应用于航空航天飞行器结构,其强度预测越来越受到国内外学者的重视. 正确地预测各种失效模式以及损伤起始、损伤扩展和最终破坏的过程十分困难,由 Hinton 发起的世界范围的复合材料强度理论评比中,选出了 5 种最有发展前景的强度理论. 然而即使最优秀的理论也只能在±50% 的误差内模拟 85% 的试验条件[1]. 2001 年美国开展的《Accelerated Insertion of Materials》计划希望通过建立基于物理模型的损伤判据,构建多尺度分析模型,使设计者可以从材料细观性能出发,包括工艺影响在内,对损伤起始和损伤扩展进行可靠预测[2-3].

在此背景下,文献[4]提出应变不变量理论,

收稿日期: 2011-11-10; **网络出版时间**: 2012-03-09 10:36

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120309.1036.008.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB631103)

作者简介: 李 星(1986-),男,河北保定人,博士生,lixingd506@163.com.

并不断发展和完善[5-8]. 应变不变量理论是一种基于物理失效模式的强度理论,将纤维和基体的失效模式分为膨胀失效和扭曲失效. 它通过代表体积单元(RVE,Representative Volume Elements)将宏观应变"放大"到细观应变,从而研究纤维和树脂的相互作用,同时考虑固化残余应力的影响;另外可以改变代表体积单元中纤维和树脂的体积比,讨论纤维体积含量对复合材料性能的影响,这是相对于其他强度准则所特有的[8]. 应变不变量失效理论适用于各种几何外形、铺层、边界条件和载荷条件的复合材料结构分析,并成功用于复合材料结构断裂和耐久性分析[9].

基于应变不变量失效理论的基本原理,本文建立了 RVE 的有限元模型,研究了应变不变量失效理论的失效模式和损伤演化参数;求得了 CCF300/5228 材料体系的机械应变放大系数和热应变放大系数;采用应变不变量失效理论对 CCF300/5228 复合材料开孔层合板的拉伸破坏过程进行了模拟,分析了纤维和基体的失效过程,计算结果与试验结果具有很好的一致性,证明了应变不变量失效理论的适用性.

1　应变不变量失效理论

1.1　理论背景

弹性体变形可分解为体积变形和扭曲变形. 高分子聚合物的双轴失效包线与金属的椭圆形不同,在第一象限存在截断现象,如图 1 所示. 这种截断认为与某个临界体积变形相关,由于聚合物微裂纹的存在,降低了其体积变形的强度[10]. 基于这种物理现象,文献[4]提出了基于体积应变不变量(第一应变不变量)的破坏强度准则.

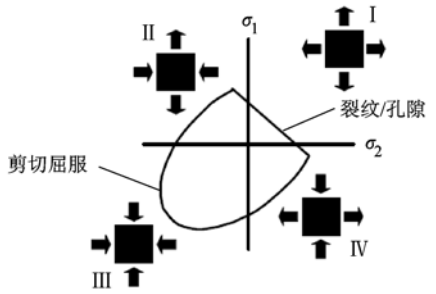


图 1　聚合物失效包线[10]

应变张量求解主应变的方程为

$$\varepsilon^3 - J_1\varepsilon^2 + J_2\varepsilon - J_3 = 0 \qquad (1)$$

其中,J_1,J_2,J_3 分别为第一应变不变量、第二应变不变量和第三应变不变量,第一应变不变量 J_1 即为体积变形,用以表征基体相的膨胀破坏,即图中第一象限的失效包线. 定义如下:

$$J_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \qquad (2)$$

将应变张量分解为应变球张量和应变偏张量,考虑应变偏张量的应变不变量,可得

$$\varepsilon'^3 + J_2'\varepsilon' - J_3' = 0 \qquad (3)$$

引入应变偏张量中的第二应变不变量 J_2' 作为损伤判据,定义如下

$$\varepsilon_{vm} = \sqrt{3J_2'} \qquad (4)$$

将主应变代入式(4)可得

$$\varepsilon_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]} \qquad (5)$$

其中 ε_1、ε_2、ε_3 分别为 3 个方向的主应变. 由于 von Mises 应变 ε_{vm} 表征了弹性体的扭曲变形,因此将其作为基体扭曲失效的判断准则.

1.2　纤维基体失效的判定

应变不变量理论将第一应变不变量 J_1 作为体积变形的失效判定准则,将 von Mises 应变作为扭曲变形的失效判定准则. 树脂基纤维增强复合材料的失效分为基体和纤维的失效两种,当纤维或基体达到应变不变量判定准则的临界值时($J_{1,Crit}$,$\varepsilon_{vm,Crit}$),即判定其失效. 应变不变量失效理论[4,11]的说明如下:

基体失效:膨胀变形失效:$J_1^m \geqslant J_{1,Crit}^m$;

扭曲变形失效:$\varepsilon_{vm}^m \geqslant \varepsilon_{vm,Crit}^m$;

纤维失效:$\varepsilon_{vm}^f \geqslant \varepsilon_{vm,Crit}^f$.

其中,上标 f 和 m 分别代表纤维和基体;复合材料的 3 个应变不变量材料性能 $J_{1,Crit}^m$,$\varepsilon_{vm,Crit}^m$ 和 $\varepsilon_{vm,Crit}^f$ 分别由 $[90]_n$,$[10]_n$,$[0]_n$ 三种不同铺层角单向层合板的拉伸应变试验结果确定[4,12].

2　宏观应变到细观应变的转换

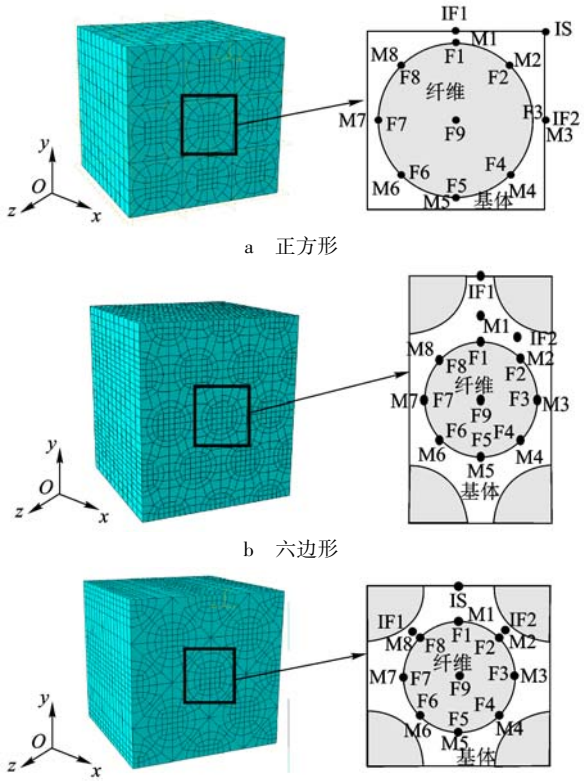
应变不变量失效理论建立在纤维和基体细观应变分析上,需要根据宏观应变求得纤维和基体的细观应变. 代表体积单元是基于纤维和树脂的典型分布建立的细观模型,用以研究纤维和基体的相互作用.

在宏观应变作用下,纤维树脂的性能差异会导致细观模型中局部位置的应变增大. 为了描述这种应变增大的情况,引入应变放大系数的概念,从而建立宏观应变与细观应变的联系.

2.1　代表体积单元

为了表征纤维与树脂的相互作用关系,建立了纤维、基体典型分布的三维 RVE,分别为正方

形,六边形和钻石型[13],如图 2 所示. 为了消除边界效应的影响,代表体积单元中包含了多个单胞,取中间的单胞进行研究.



a 正方形

b 六边形

c 钻石型

IS、IF1、IF2 表征基体相的应变放大系数;M1 ~ M8、F1 ~ F8 表征纤维基体界面的应变放大系数;F9 表征纤维相的应变放大系数.

图 2 RVE 及参考点的选取

2.2 应变放大系数

宏观机械应变可以分解为 6 个方向应变的叠加,在代表体积单元上分别施加对应于各方向宏观应变的边界条件,即可得到纤维和基体相应的应变值,从而提取出机械应变放大系数;对代表体积单元施加均匀的温度场,由于纤维和树脂的热膨胀系数不同,可以得到热应变放大系数. 对于不同的纤维和树脂分布模型,其应变放大系数是不同的,需要分别求得.

6 种边界条件中,纤维方向(1 方向)的宏观应变不会产生细观模型中的应变放大;2、3 方向和 12、13 方向分别对称,因此在实际建模中,只需要计算 2 方向、12 方向和 23 方向的应变放大系数,对应的代表体积单元的边界条件如表 1 所示.

表 1 代表体积单元的边界条件

加载方向	边界条件
2 方向(横向)	$\varepsilon_{22}=1,\varepsilon_{11}=\varepsilon_{33}=\gamma_{12}=\gamma_{13}=\gamma_{23}=0,\Delta T=0$
12 方向(面内剪切)	$\varepsilon_{12}=1,\varepsilon_{11}=\varepsilon_{22}=\varepsilon_{33}=\gamma_{13}=\gamma_{23}=0,\Delta T=0$
23 方向(面外剪切)	$\varepsilon_{23}=1,\varepsilon_{11}=\varepsilon_{22}=\varepsilon_{33}=\gamma_{12}=\gamma_{13}=0,\Delta T=0$
热载荷	$\varepsilon_{11}=\varepsilon_{22}=\varepsilon_{33}=\gamma_{12}=\gamma_{13}=\gamma_{23}=0,\Delta T=1$

2.3 细观应变的确定

复合材料结构宏观应变和内部细观应变之间通过应变放大系数进行转换,而应变放大系数是通过纤维和树脂的细观力学模型有限元分析得到的,复合材料结构单层细观应变和宏观应变之间的关系表达式[13]如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^i = \boldsymbol{M}^i\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{mech}} + \boldsymbol{M}^i\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ther}} + \boldsymbol{A}^i\Delta T \qquad (6)$$

其中,$\boldsymbol{\varepsilon}^i$ 为位置 i 处的纤维或者树脂三维宏观应变;$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{mech}}$ 为机械载荷作用下的单层三维宏观应变;$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{ther}}$ 为热载荷作用下的单层三维宏观应变;$\boldsymbol{M}^i$ 为位置 i 处的机械应变放大系数矩阵;$\boldsymbol{A}^i$ 为位置 i 处由于纤维和树脂热不匹配性引起的热应变放大系数矩阵;ΔT 为固化温度和使用温度之间的温差.

在给定的宏观应变下,按 3 种代表体积单元求得的应变放大系数分别计算细观应变,并取其中最严重的形式来判定损伤.

3 失效模式及损伤演化

在代表体积单元的有限元模型中,取出 20 个具有代表性的位置计算应变放大系数,以便于判断损伤. 3 种代表体积单元中选取的参考点如图 2 所示.

通过应变放大系数得到细观应变后,根据应变不变量理论中纤维和基体的失效准则,分别对代表体积单元中 20 个参考点进行失效判断. 由于 20 个参考点分别位于纤维、纤维基体界面或基体内,因此不同的参考点采用不同的失效准则,并得出基于物理现象的复合材料失效模式.

参考点 IS、IF1、IF2 位于基体,采用 J_1^{m} 和 $\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{m}}$ 失效准则进行判断,分别代表基体开裂和基体剪切破坏;F1 ~ F8、M1 ~ M8 处于纤维和基体的界面,采用 $\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{f}}$ 和 $\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{m}}$ 失效准则进行判断,代表纤维基体的脱粘;F9 位于纤维内,采用 $\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{f}}$ 准则判断失效,代表纤维断裂,此时单元完全失效,如表 2 所示.

表 2 失效模式及判断准则

失效模式	参考点	判断准则
基体开裂	IS,IF1,IF2	$J_1^{\text{m}} \geqslant J_{1,\text{Crit}}^{\text{m}}$
基体剪切	IS,IF1,IF2	$\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{m}} \geqslant \varepsilon_{\text{vm,Crit}}^{\text{m}}$
纤维基体脱粘	M1 ~ M8,F1 ~ F8	$\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{m}} \geqslant \varepsilon_{\text{vm,Crit}}^{\text{m}}$
纤维断裂	F9	$\varepsilon_{\text{vm}}^{\text{f}} \geqslant \varepsilon_{\text{vm,Crit}}^{\text{f}}$

为保证结果精确并提高数值计算的稳定性,当材料发生损伤时,直接对刚度矩阵中的相关元素进行折减. 正交各向异性材料的本构方程如下:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{23}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0\\ D_{1122} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0\\ D_{1133} & D_{2233} & D_{3333} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{12}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{23}\end{Bmatrix} \tag{7}$$

根据不同的失效模式,刚度矩阵性能衰减如表 3 所示.

表 3　刚度矩阵性能衰减

失效模式	D_{1111}	D_{2222}	D_{3333}	D_{1122}	D_{1133}	D_{2233}	D_{1212}	D_{1313}	D_{2323}
基体开裂	1	0	0	0	0	0	1	1	1
基体剪切	1	0	0	0	0	0	0	0	0
脱粘	1	1	1	0	0	0	0	0	0
纤维断裂	0	1	1	0	0	0	0	0	0

注:1 代表相关刚度不变;0 代表进行刚度衰减.

4　CCF300/5228 应变放大系数及算例

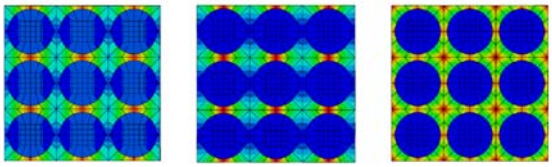
4.1　CCF300/5228 材料体系应变放大系数

CCF300/5228 纤维和基体的性能参数见表 4.

表 4　CCF300/5228 纤维和基体性能

纤维性能(纤维体积含量 63%)	数值
纵向弹性模量 E_1/GPa	252
横向弹性模量 $E_2=E_3$/GPa	25.2
泊松比 $v_{12}=v_{13=}v_{23}$	0.28
面内剪切模量 $G_{12}=G_{13}$/GPa	15.00
面外剪切模量 G_{23}/GPa	7.00
纵向热膨胀系数 $\alpha_1/10^{-6}$℃	0.13
横向热膨胀系数 $\alpha_2=\alpha_3/10^{-6}$℃	2.7
基体性能	**数值**
弹性模量 E/GPa	3.50
泊松比 v	0.35
热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}$℃	62.7

根据 2.2 节给出的代表体积单元边界条件,可以分别求得 CCF300/5228 材料体系的机械应变放大系数和热应变放大系数. 以正方形代表体积单元为例,根据模型的对称性,图 3 为 2 方向、12 方向和 23 方向的机械应变放大系数分布. 由于 1 方向不存在纤维和基体的耦合,放大系数均为 1. 表 5 给出了 3 种代表体积单元中机械应变放大系数的最大值及所在位置.



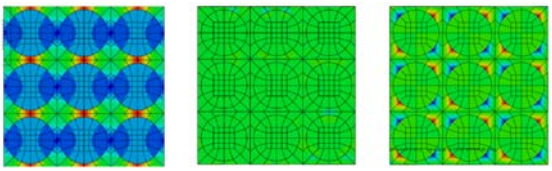
a　2 方向　　b　12 方向　　c　23 方向

图 3　正方形代表体积单元中机械应变放大系数分布

表 5　3 种 RVE 中最大机械应变放大系数及所在位置

RVE		2 方向	3 方向	12 方向	13 方向	23 方向
正方形	最大值	4.068	4.068	5.719	5.719	2.799
	位置	IF1	IF2	M1,M5	M3,M7	IS
六边形	最大值	2.488	3.605	3.114	5.010	2.948
	位置	M2,M4,M6,M8	IF1	M1,M5	M3,M7	M1,M5
钻石型	最大值	2.536	2.536	2.952	2.952	2.108
	位置	M2,M4,M6,M8	M2,M4,M6,M8	M2,M4,M6,M8	M2,M4,M6,M8	IF1,IF2

正方形代表体积单元中的热应变放大系数分布如图 4 所示. 表 6 为各模型中热应变放大系数的最大值及其所在位置. 可见 12 方向的热应变放大系数均为 0,23 方向的热应变放大系数分布呈反对称.



a　2 方向　　b　12 方向　　c　23 方向

图 4　正方形代表体积单元中热应变放大系数分布

表 6　3 种 RVE 中最大热应变放大系数及所在位置

RVE		2 方向	3 方向	12 方向	13 方向	23 方向
正方形	最大值	7.73×10^{-5}	7.73×10^{-5}	0	0	4.05×10^{-5}
	位置	IF1,IF2	IF1,IF2			M2,M4(负值),M6,M8(负值)
六边形	最大值	3.96×10^{-5}	5.91×10^{-5}	0	0	5.41×10^{-5}
	位置	M1,M5	M3,M7			M2,M4(负值),M6,M8(负值)
钻石型	最大值	3.21×10^{-5}	3.21×10^{-5}	0	0	1.06×10^{-4}
	位置	M1,M5	M3,M7			IF1(负值),IF2(负值)

4.2　开孔拉伸试验

开孔拉伸试验采用国产碳纤维复合材料 CCF300/5228,试件按照 ASTMD5766 设计,铺层为$[45/0/-45/90]_{3s}$,试件尺寸为 300 mm×36 mm×3 mm,试件尺寸信息见图 5.

试验在济南试金 WDW-200E 微机控制电子

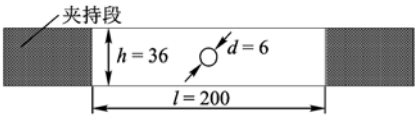


图 5 试件几何形状(单位:mm)

式万能试验机上进行. 将开孔试件两端夹持在夹头中,采用 1 mm/min 的速度加载,直至试件断裂. 图 6 为破坏后的断口形貌,试件沿孔中心截面水平拉断,试件破坏载荷为 325 MPa.

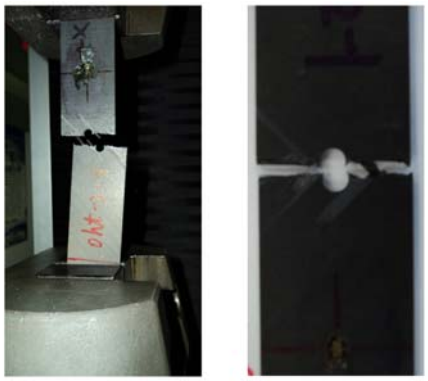


图 6 试件破坏后断口形貌

4.3 有限元模型的建立

有限元分析基于商用有限元软件 ABAQUS,表 7 为 CCF300/5228 材料的单层性能. 有限元模型采用三维实体线性减缩积分单元 C3D8R,与二次单元相比,它的计算效率较高,采用较密的网格同样可以达到较高的计算精度. 为了保证计算结果的可靠,逐渐对有限元网格进行加密,直至强度计算结果不随网格密度明显变化为止. 模型取实际试件中的方形区域,并采用变密度网格,在孔周围施加较密的网格以模拟损伤扩展的过程,节点总数为 24 180,单元总数为 21 216. 利用试验件在厚度方向的对称性,有限元模型为二分之一试验件模型,平面内尺寸为 36 mm×36 mm,有限元模型见图 7.

表 7 CCF300/5228 材料性能

性能参数	数 值
纵向弹性模量 E_1/GPa	142
横向弹性模量 $E_2=E_3$/GPa	9.46
面内泊松比 $v_{12}=v_{13}$	0.32
面外泊松比 v_{23}	0.4
面内剪切模量 $G_{12}=G_{13}$/GPa	5.6
面外剪切模量 G_{23}/GPa	3.8
纵向热膨胀系数 $\alpha_1/10^{-6}$℃	0.15
横向热膨胀系数 $\alpha_2=\alpha_3/10^{-6}$℃	35.4
临界应变不变量 $J^{m}_{1,Crit}$[12]	0.019 1
临界应变不变量 $\varepsilon^{m}_{vm,Crit}$[12]	0.144
临界应变不变量 $\varepsilon^{f}_{vm,Crit}$[12]	0.017

4.4 计算结果与讨论

根据应变不变量失效理论计算 CCF300/5228

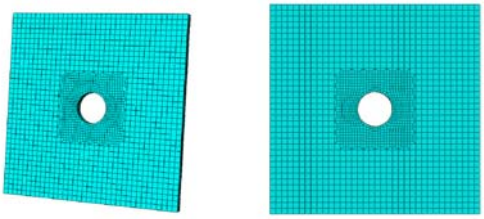
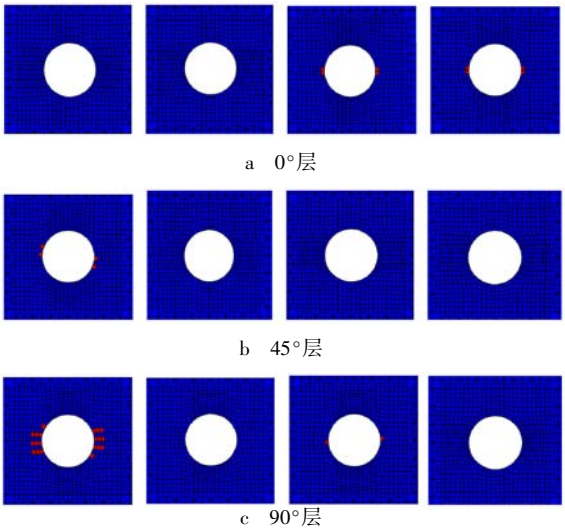


图 7 开孔拉伸有限元模型

复合材料开孔拉伸强度. 有限元模型下端固支,上端施加拉伸载荷,监测加载过程中的力-位移曲线,当载荷突然下降 30% 以上时即判断试件断裂,停止计算,断裂前的最大应力即为开孔拉伸试件的破坏强度.

强度计算结果为 333.46 MPa,与试验结果误差为 2.6%. 图 8、图 9 分别为开孔层合板损伤起始时和断裂后的单元失效模式.



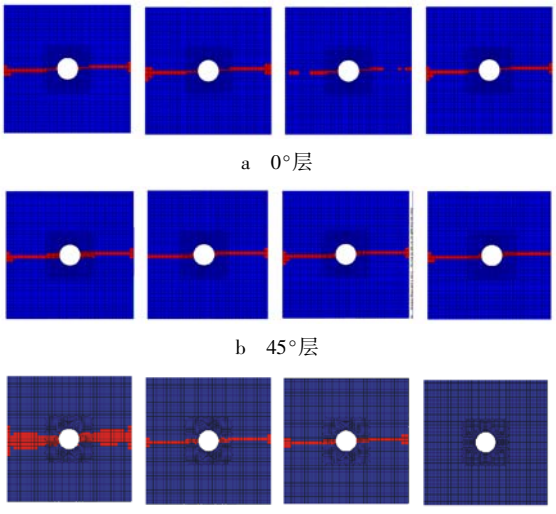
a 0°层

b 45°层

c 90°层

从左至右依次为基体开裂、基体剪切、纤维基体脱粘和纤维断裂.

图 8 损伤起始时单元失效模式



a 0°层

b 45°层

c 90°层

从左至右依次为基体开裂、基体剪切、纤维基体脱粘和纤维断裂.

图 9 断裂后单元失效模式

为了方便显示,图 8 对孔边的细化网格进行了放大. 从图中可见,损伤起始时 45°和 90°层出现基体开裂,0°层出现纤维断裂,0°和 90°层都出现了纤维基体脱粘的现象;各单层出现的损伤都垂直于加载方向扩展直至断裂,与图 6 中的试验结果相吻合.

5　结　论

1) 本文引入了一种新的基于物理现象的失效理论,详细介绍了应变不变量理论的原理和计算方法,建立了描述纤维和基体分布的 3 种代表体积单元,求得了 CCF300/5228 复合材料体系的机械应变放大系数和热应变放大系数.

2) 在应变不变量失效理论中引入了 4 种损伤模式描述复合材料的失效,分别为基体开裂、基体剪切、纤维基体脱粘和纤维断裂;提出了相应的损伤演化准则.

3) 计算得到的 CCF300/ 5228 开孔拉伸试件的失效模式与试验结果一致,破坏载荷计算结果与试验结果误差为 2.6%,证明了应变不变量理论是可行的,适用于预报复合材料的失效.

参考文献 (References)

[1] Hinton M J, Kaddour A S, Soden P D. Failure criteria in fibre-reinforced-polymer composites: the world-wide failure exercise [M]. London: Elsevier Ltd, 2004

[2] Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft National Materials. New materials for next-generation commercial transports[M]. Washington D C: National Academy Press, 1996

[3] Hahn G L. Accelerated insertion of materials-composites (AIMC) Methodology[M]. St Louis: Boeing, 2004

[4] Gosse J H, Christensen S. Strain invariant failure criteria for polymers in composite materials [C]//American Inst Aeronautics and Astronautics Inc. Soatlle: AIAA, 2001: 45-55

[5] Li R, Kelly D, Crosky A. An evaluation of failure criteria for matrix induced failure in composite materials[J]. Composite Structures, 2002, 57(1): 385-391

[6] Gosse J H. A damage functional methodology for assessing post-damage initation environments in composite structure[C]//American Inst Aeronautics and Astronautics Inc. Palm Springs: AIAA, 2004: 1788-1793

[7] Tay T, Tan V B C, Liu G. A new integrated micro-macro approach to damage and fracture of composites[J]. Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology, 2006, 132(1/2): 138-142

[8] Jasso A J M, Goodsell J E, Ritchey A J, et al. A parametric study of fiber volume fraction distribution on the failure initiation location in open hole off-axis tensile specimen[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71 (16): 1819-1825

[9] Cai H, Miyano Y, Nakada M. Long-term open-hole compression strength of CFRP laminates based on strain invariant failure theory[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2009, 22 (1): 63-81

[10] Asp L E, Berglund L A, Talreja R. A criterion for crack initiation in glassy polymers subjected to a composite-like stress state [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56 (11): 1291-1301

[11] Li R, Kelly D, Ness R. Application of a first invariant strain criterion for matrix failure in composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37(22): 1977-2000

[12] 黎增山,关志东,何为. 国产碳纤维增强树脂基复合材料应变不变量性能[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 192-196
Li Zengshan, Guan Zhidong, He Wei. Strain invariant failure theory invariant properties of domestic carbon fiber/resin composites[J]. Acta Matriae Sinica, 2011, 28(5): 192-196 (in Chinese)

[13] Ng S J, Felsecker A, Meilunas R, et al. SIFT analysis of IM7/5250-4 composites[C]//Soc for the Advancement of Material and Process Engineering. San Diego: [s. n.], 2004: 129-141

(编　辑:李　晶)