

复合材料圆角面外受载仿真计算研究

侯瑞*

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 采用有限元方法, 计算复合材料圆角面外受载的应力分布, 预测圆角区的分层载荷、部位与破坏载荷, 研究不同铺设方式对圆角区应力分布的影响, 并针对工程实际中圆角经常出现的制造缺陷, 如分层和富树脂, 研究了制造缺陷对复合材料圆角应力分布的影响。结果表明, 采用三维体元的有限元建模方法对圆角区的分层载荷、部位和破坏载荷的预测可靠, 可用于工程实际。

关键词: 复合材料圆角; 面外受载; 制造缺陷; 分层载荷

中图分类号: V250.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 09-0017-05

复合材料圆角作为结构的转折区, 常常承受面外载荷, 在厚度方向产生不可忽略的层间应力^[1]。与金属材料相比, 复合材料层间强度很低, 过大的层间应力可能诱发结构分层, 大大降低圆角区的承载能力, 导致圆角区成为整个结构的薄弱环节。对于工程实际中的圆角结构, 往往厚度较大、铺层较多、铺设方式复杂。解析计算方法难以给出圆角区的精确应力分布 (可预测分布趋势)。本文利用有限元方法进行复合材料圆角区建模, 计算圆角区的应力分布, 预测分层载荷和破坏载荷, 并分析不同铺层设计以及制造缺陷对圆角区应力分布的影响。为复合材料圆角区结构设计和超差处理提供依据。

1 建模及失效准则

1.1 建模及属性计算

复合材料圆角结构及受载如图 1 所示。

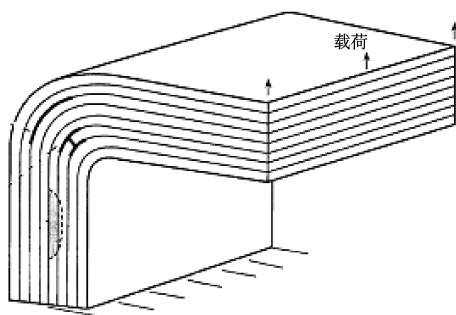


图 1 圆角区结构及受载示意图

Fig.1 The schematic diagram of the curved beam structure

选用 MSC.NASTRAN 和 MSC.PATRAN 进行圆角区有限元仿真。圆角区的应力分析涉及层间应力的求解^[2]。本文选用六面体单元 (HEX20)。将圆角区的每一层等效为三维实体单元, 图 2 为圆角区的有限元模型及模型细节。

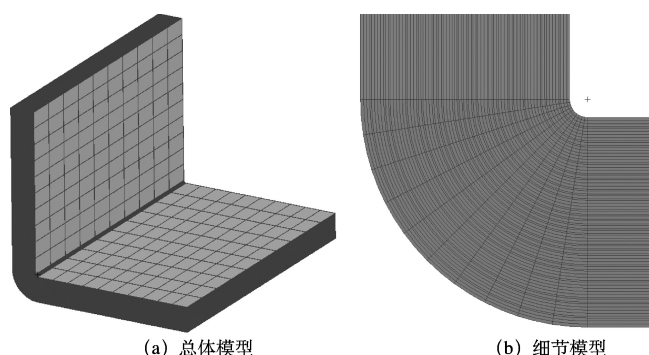


图 2 圆角区模型 (总体模型 - 细节模型)

Fig.2 The curved beam model (general model-detail model)

圆角区由织物和单向带混铺。织物或者单向带的每一层均为三维正交各向异性铺层, 其柔度矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2016-04-06; 退修日期: 2016-06-08; 录用日期: 2016-07-22

* 通讯作者. Tel.: 029-86832536 E-mail: rui_h@126.com

引用格式: HOU Rui. Simulation study of the composite curved beam under out-of-plane load [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (09): 17-21. 侯瑞. 复合材料圆角面外受载仿真计算研究 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (09): 17-21.

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{12}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{12}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{13}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{23}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对柔度矩阵求逆,可得出其刚度矩阵 C 为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)给出的刚度矩阵是正轴向的。对于与铺层面内正轴成铺层方向角 θ 的铺层,其刚度矩阵为:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & \bar{C}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{36} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

偏轴刚度矩阵与正轴刚度矩阵存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_{11} \\ \bar{C}_{12} \\ \bar{C}_{22} \\ \bar{C}_{33} \\ \bar{C}_{13} \\ \bar{C}_{23} \\ \bar{C}_{44} \\ \bar{C}_{45} \\ \bar{C}_{55} \\ \bar{C}_{66} \\ \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{36} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^4 & n^4 & 2m^2n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & m^4+n^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4m^2n^2 \\ n^4 & m^4 & 2m^2n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4m^2n^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m^2 & n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -mn & mn & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & n^2 & m^2 & 0 & 0 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & -2m^2n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (m^2-n^2)^2 \\ m^3n & -mn^3 & mn(n^2-m^2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2mn(m^2-n^2) \\ mn^3 & -m^3n & mn(m^2-n^2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2mn(m^2-n^2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & mn & -mn & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{22} \\ C_{12} \\ C_{33} \\ C_{13} \\ C_{23} \\ C_{44} \\ C_{45} \\ C_{55} \\ C_{66} \\ C_{16} \\ C_{26} \\ C_{36} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $m=\cos\theta$, $n=\sin\theta$ 。

采用式(2)和式(4)可得出单向带和织物任意铺层角

下的刚度矩阵。采用 MSC.NASTRAN 软件中三维各向异性材料卡赋属性。

1.2 失效准则

圆角区的分层准则采用:

$$\left(\frac{\varepsilon_r}{(\varepsilon_r)_{all}}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{r\theta}}{(\gamma_{r\theta})_{all}}\right)^2 \geq 1, \varepsilon_r > 0 \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{r\theta}}{(\gamma_{r\theta})_{all}} \geq 1, \varepsilon_r < 0$$

式中: ε_r 为径向工作应变; $\gamma_{r\theta}$ 为剪切工作应变; $(\varepsilon_r)_{all}$ 为径向许用应变; $(\gamma_{r\theta})_{all}$ 为剪切许用应变。

圆角区的破坏准则采用下式:

$$\left(\frac{\varepsilon_\theta}{(\varepsilon_\theta)_{all}}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{r\theta}}{(\gamma_{r\theta})_{all}}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

式中: ε_θ 为环向工作应变; $(\varepsilon_\theta)_{all}$ 为环向许用应变。

2 验证分析

2.1 试验结果

共进行 2 件复合材料圆角区试验。试验件、试验原理及破坏模式如图 3 所示。圆角几何尺寸为内圆角 1.35mm, 外圆角 17mm。试验结果如表 1 所述。

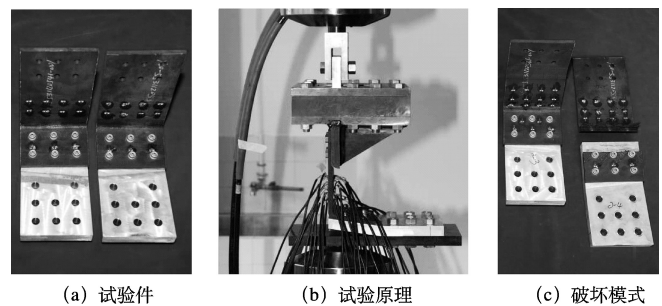


图 3 复合材料圆角试验
Fig.3 The test of composite curved beam

表 1 试验结果
Table 1 The test results

试验件 编号	试验情况	首响载荷 /kN	破坏载荷 / kN	破坏部位
1	拉伸试验	29.9	44.95	圆角区破坏
2	拉伸试验	33.0	46.48	圆角区破坏

由表 1 和图 3 可见,试验件施加开口弯矩,首响载荷为 3t 左右,在试验现场可以发现,首响后,试验件圆角区存在目视可见的分层,但试验件并未丧失承载能力,随着试验载荷的增加,试验件圆角区继续分层。当外载荷大约为 4.5t 时,试验件圆角区发生破坏。

2.2 失效分析

依据 1.1 节的方法建立圆角区有限元模型,分层与失效判据采用式 (5) 和式 (6)。计算结果如表 2 所示。圆角区首次分层载荷为 28012N,分层部位 $r=2.395\text{mm}$ (第 5 层)。首次分层发生后,纤维并未失效,圆角区可以继续承载,二次分层载荷为 35877N,分层部位为 $r=5.07\text{mm}$ (第 18 层)。三次分层载荷为 40607N,分层部位为 $r=2.04\text{mm}$ (第 3 层)。第三次分层发生后,最内层纤维失效。复合材料圆角区首层破坏。四次分层载荷为 45571N,分层部位为 $r=3.44\text{mm}$ (第 10 层)。五次分层载荷为 47163N,分层部位为 $r=8.935\text{mm}$ (第 38 层),第二层纤维失效。六次分层载荷为 46182N,分层部位为 $r=2.835\text{mm}$ (第 7 层)。七次分层载荷为 38340N,分层部位为 $r=3.795\text{mm}$ (第 12 层)。图 4 给出七次分层径向应变变化曲线;图 5 给出七次分层环向应变变化曲线。由以上分析可见本文仿真计算方法对首次分层载荷和破坏载荷的预测结果与试验结果吻合较好。

表 2 仿真计算结果与试验结果比较

Table 2 Results comparison between theoretical calculation and experimental

	理论计算 /N	试验结果 /N	误差 / (%)
首次分层载荷	28012	31450	-10.93
首层破坏载荷	40604	/	/
破坏载荷	47163	45715	3.17

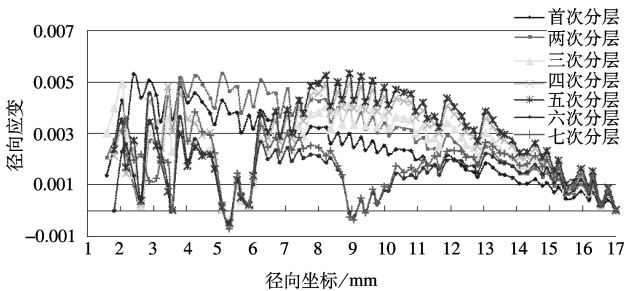


图 4 径向应变变化曲线

Fig.4 The radial strain on composite curved beam along with the change of calculation loop

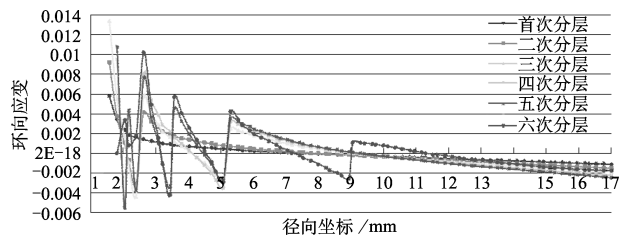


图 5 环向应变变化曲线

Fig.5 The circumferential strain on composite curved beam along with the change of calculation loop

3 不同铺设方式对圆角区应力分布的影响

将复合材料圆角区铺层按照 5 种方式铺设,研究不同铺设方式对圆角区应力分布的影响。第一种采用实际铺设;第二种采用织物 0° 铺层,即单层正交各向异性铺设;第三种采用织物 $0^\circ, 90^\circ$,单向带 $0^\circ, 90^\circ$ 铺设,即正交各向异性铺设;第四种采用织物 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ 铺设;第五种采用织物 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ$,单向带 $0^\circ, 90^\circ$ 铺设。圆角区径向应力和环向应力的计算结果如图 6 和图 7 所示。

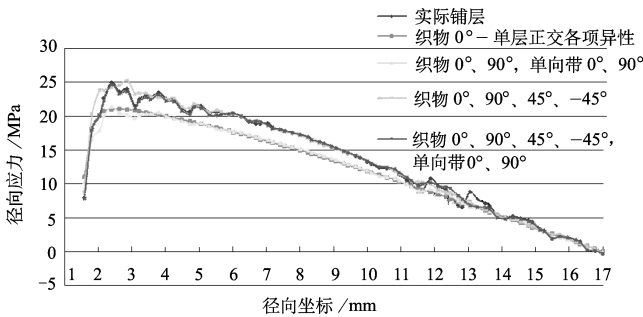


图 6 圆角区不同铺设方式径向应力对比

Fig.6 Comparison of radial stress in different lay-up of the curved beam

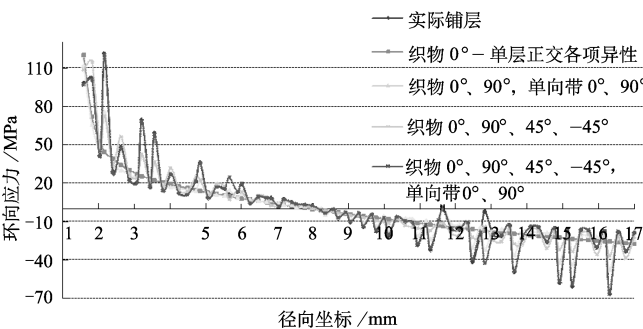


图 7 圆角区不同铺设方式环向应力比较

Fig.7 Comparison of circumferential stress in different lay-up of the curved beam

由图 6 可见,5 种铺设方式下圆角区径向应力分布规律基本相同,最大径向应力均出现在靠近内圆角处,随着径向坐标靠近外圆角,径向应力逐渐减小,遵循统一规律。圆角区采用第二种和第三种铺层时,即采用正交各向异性铺层,径向应力比其他三种铺层小,最大值约为 21MPa,较其他三种铺层小 19%。另外,当铺层方式确定时,复合材料圆角区的径向应力分布和最大径向应力只和几何尺寸有关,通过调整铺层顺序,并不能改变径向应力的分布和大小。

由图 7 可见,5 种铺设方式下圆角区环向应力总体分布规律一致,内圆角处应力为负,外圆角处应力为正,中性

面位置一致,均位于圆角区厚度 1/2 处。圆角区采用第二种和第三种铺层时,即采用正交各向异性铺层,环向应力曲线连续,没有突变。当采用其他三种铺层时,尤其是含有单向带的 45° 、 -45° 铺层(第一种铺层),环向应力不再连续。

通过不同铺设方式下复合材料圆角区的径向应力和环向应力比较可见,采用正交各向异性铺层,其径向应力较低,环向应力连续。当必须使用 45° 、 -45° 铺层时,使用织物铺设,尽量避免使用单向带。另外,通过调整铺层顺序,并不能改变圆角区径向应力的分布和大小。

4 缺陷对圆角区应力分布的影响

生产中,复合材料圆角区由于存在曲面过渡铺设困难、难以压实、树脂流动困难、气泡难以排出等问题。下面对制造缺陷进行有限元仿真,分析制造缺陷对复合材料圆角区受力特性和应力分布的影响^[3]。

4.1 分层

在圆角区的第五层和第六层之间预制分层缺陷。圆角区变形如图 8 所示。分层对径向应力的影响如图 9 所示,分层对环向应力的影响如图 10 所示。由图 9 和图 10 可见,含分层缺陷件与完好件相比,在远离分层缺陷处,其径向应力和环向应力的分布规律一致,应力大小相当;在分层缺陷处,径向应力大大降低,复合材料圆角以分层处为界,分为内外两部分,分别独立承担面外弯矩。由于分层缺陷的存在,圆角区径向应力大大降低,环向应力最大值略有增加,但应力梯度明显增大,会降低复合材料圆角的承载能力。

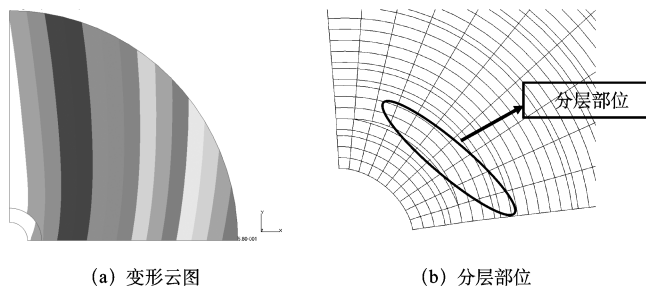


图 8 复合材料圆角区变形
Fig.8 The deformation of composite curved beam

4.2 富树脂

在复合材料圆角区的第五层预制富树脂缺陷。富树脂对圆角区径向应力的影响如图 11 所示;富树脂区径向应力增大 16%,易于从富树脂缺陷处分层。

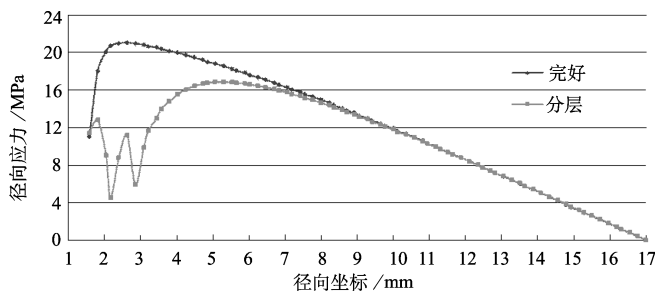


图 9 分层缺陷对径向应力的影响
Fig.9 Effect of delamination defects on radial stress

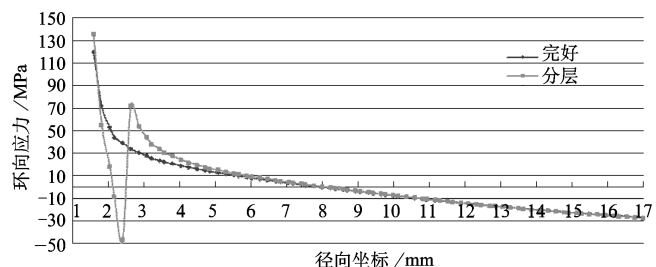


图 10 分层缺陷对环向应力的影响
Fig.10 Effect of delamination defects on circumferential stress

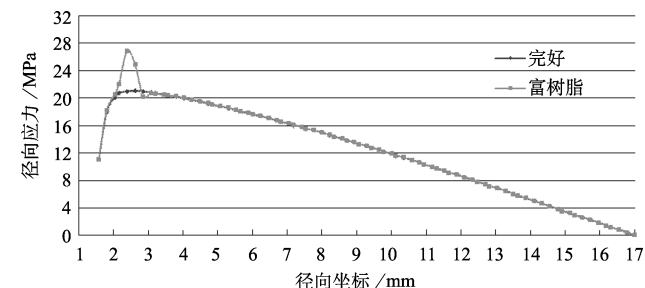


图 11 富树脂对径向应力的影响
Fig.11 Effect of resin-rich area on radial stress

5 结束语

本文建立复合材料圆角区有限元分析模型,结合失效准则进行圆角区分层载荷预估与强度破坏载荷计算。结果表明:采用六面体单元建立的有限元模型可以预测复合材料圆角区在面外载荷作用下的分层与破坏。

研究了实际铺设复合材料圆角的应力分布,并且比较了圆角区不同铺设方式对径向应力分布和环向应力分布的影响。研究结果表明,采用正交各向异性铺层时,圆角区径向应力较低,环向应力连续;当必须使用 45° 、 -45° 铺层时,应当使用织物铺设,尽量避免使用单向带。另外,通过调整铺层顺序,并不能改变圆角区径向应力的分布和大小。

针对工程实际中复合材料圆角区经常出现的制造缺陷,如分层、富树脂,研究制造缺陷对复合材料圆角应力分布

的影响。研究表明,分层缺陷并不会增大圆角区的径向应力,但会增大圆角区的环向应力梯度,降低圆角区的承弯能力。富树脂缺会显著增大圆角区的径向应力,易导致圆角区分层,分层后按照分层缺陷的讨论,会降低圆角区的承弯能力。

缠绕技术是目前复合材料结构应用和分析的热点之一,缠绕技术的理想应用对象均是曲率较大的结构,如集中受载接头等,研究方法与结果均可以应用于复合材料缠绕结构的研究中。

AST

参考文献

- [1] LIN K C, HSIEH C M. The closed form general solutions of 2-D curved laminated beams of variable curvatures[J].Composite

Structure, 2007, 79 (4): 606-618.

- [2] LIN K C, HSIEH C M. Finite deformation of 2-D laminated curved beams with variable curvatures[J].International Journal of Non-Linear Mechanics, 2011, 46 (10): 1293-1304.
- [3] Martin RH. Delamination failure in a unidirectional curved composite laminate [J].Composite Material Testing & Design. 1996.

作者简介

侯瑞(1983—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器结构强度设计。

Tel: 029-86832536

E-mail: rui_h@126.com

Simulation Study of the Composite Curved Beam Under Out-of-plane Load

HOU Rui*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Based on the FEM method, calculated the stress distribution of the composite curved beam under out-of-plane load, studied the influence of the stress distribution of the composite curved beam used different lay-up, predicted the delamination location, delamination load and failure load. This paper focused on the manufacturing defects often appearing in the actual engineering, such as delamination and resin-rich studies the influence of the stress distribution of the composite curved beam using different lay-up. The results show that the method reliable predicated the delamination location, delamination load and failure load, can be used in engineering practice.

Key Words: composite curved beam; out-of-plane load; manufacturing defects; delamination load

Received: 2016-04-06; Revised: 2016-06-08; Accepted: 2016-07-22

*Corresponding author. Tel. : 029-86832536 E-mail: rui_h@126.com