第 16 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 4
1999 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1999

# 含预成型孔复合材料层合板的强度分析

杨运民 彭向和 陈元强
(重庆大学 工程力学系, 重庆 400044)

**摘 要** 对生物结构的观测表明在孔口附近的纤维是连续绕过的, 已有实验证明这种绕孔结构的强度比钻孔结构有显著提高。利用迭代设计方法得到单层板绕孔方案, 在此基础上构成复合材料层合板, 并对含预成型孔层合板在面内复杂载荷作用下的强度进行了分析, 结果证实了该仿生结构具有较高的承载能力。

**关键词** 复合材料, 强度, 结构仿生
**中图分类号** TB330. 1

复合材料具有高的比强度和比刚度以及耐腐蚀等优点, 在许多工程领域中有着重要应用。然而复合材料层合板对于在孔边和切口处存在的应力集中非常敏感, 而大多数工程结构不可避免地包含有这类孔边和切口, 例如铆接孔、走线孔及装配和维修用孔等等。因此, 含孔复合材料层合板的强度问题一直是个研究热点, 倍受人们的重视[1~3]。但迄今为止的研究都是针对钻孔层合板的。值得注意的是 Cunderson 在对昆虫外骨骼的研究中发现其管道类似于人造复合材料结构中的钻孔连接, 但孔洞周围纤维是连续的, 即纤维没有断头而是紧挨孔边绕过[4], 他们模仿了这一现象。结果在碳/环氧多层复合材料孔洞试件中, 有连续纤维预成孔的仿生试件比传统试件拉伸强度提高达 39%[5]。重要的是采用纤维绕孔工艺可以避免人为的纤维不连续以及由此造成的附加损伤, 同时可以更合理地对复合材料中纤维取向和密度分布进行设计以达到提高材料承载能力和减少纤维用量的目的, 这对复合材料在工程中尤其是航空航天等高技术工程领域中的应用具有重要意义。本文基于有限元应力分析和强度准则以及纤维连续绕过孔边的约束条件, 对含孔纤维增强复合材料单层板的纤维取向和密度分布进行迭代设计, 使其在平均纤维含量不变的条件下的拉伸强度取得较大幅度的提高。在此基础上构成 $[0/90]_s$ 和 $[0/\pm45/90]_s$ 复合材料层合板, 并对该含预成型孔层合板在复杂面内载荷作用下的强度进行了较全面的分析。

## 1 单层板绕孔方案的迭代设计

### 1.1 弹性常数及强度常数的处理

含预成型孔复合材料整体上是一种非匀质的材料, 当用有限元方法对其进行离散时, 各单元的纤维密度和方向通常是不同的, 但只要网格划分得足够细, 每个单元可近似处理成匀质材料, 在纤维连续且沿横截面纤维总含量保持不变的约束下, 通过数值分析设计出各单元内的纤

收修改稿、初稿日期: 1998-07-12, 1998-04-10

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

维密度和方向。具体步骤是: 根据各单元纤维密度, 使用混合物法则计算单元的材料常数和正轴刚度, 再根据各单元纤维方向把正轴刚度转到整体坐标系下, 形成可供有限元计算的单元刚度阵。本文中使用混合物法则处理纤维方向的拉伸强度, 考虑到面内剪切和横向拉伸时, 材料的破坏主要由基体控制, 面内剪切强度和横向拉伸强度取基体的剪切强度和拉伸强度。

破坏判据采用了工程上广泛使用的蔡-希尔强度准则

$$\frac{\sigma_1^2}{x_t^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{x_t^2} + \frac{\sigma_2^2}{y_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{s_c^2} \leq 1 \tag{1}$$

如果引入强度比(安全系数)$R$, 上式可表示为

$$\left(\frac{\sigma_1^2}{x_t^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{x_t^2} + \frac{\sigma_2^2}{y_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{s_c^2}\right) R^2 = 1 \tag{2}$$

式中, 强度比 $R$ 即是我们关心的强度指标。

### 1.2 含预成型孔单层板纤维取向和与密度分布的设计

绕孔复合材料单层板是非均匀和各向异性的, 其密度和方向都是可变的设计变量, 如何求得最优分布是一个复杂的多变量最优化问题, 当结构被离散时, 其设计变量可达数百个甚至更多。用传统的最优化方法进行优化设计是十分困难的, 因此, 我们采用了迭代调整的设计方法。其基本思路是高应力区采用较大的纤维密度, 并且尽可能使各个区域的纤维取向与第一主应力方向重合, 以充分发挥纤维抗拉伸强度高的优点。具体作法是从钻孔结构开始在每次进行有限元应力分析后, 根据各单元应力大小和第一主应力方向分别调整单元的纤维密度和取向, 使其逐步向理想值逼近。调整中要满足的约束条件是纤维必须连续且横截面内的纤维总含量保持不变, 前者由应力分布的连续性保证, 后者由以下密度调整方法保证。

每次应力分析后, 我们采用下式调整纤维密度以使其逐步逼近最佳分布:

$$V_f = \frac{\sigma_x}{p} V_f^0 \tag{3}$$

式中: $V_f^0$ 为层合板整体的平均纤维含量, $\sigma_x$ 为单元应力在拉伸方向的分量, $p$ 为施加的均布拉伸外载荷集度。$V_f$ 为调整后的单元纤维含量。由此得到的密度分布保证了在调整中每个截面上纤维总量保持不变。不难看出, 由静力平衡条件, 对任意横截面由静力平衡条件, 其应力分布满足

$$\int_R^H \sigma_x \mathrm{d}y = pH \tag{4}$$

将(3)式代入(4)式, 可得

$$\int_R^H V_f \mathrm{d}y = \int_R^H \frac{\sigma_x}{p} V_f^0 \mathrm{d}y = \frac{pH}{p} V_f^0 = HV_f^0 = \mathrm{const}$$

可见横截面纤维总含量不变的约束条件在每一步迭代的密度调整中自然得到满足。

为保证计算过程稳定地趋于理想值, 引入折减因子 $\beta$ 并采用下式对每单元的纤维取向进行调整

$$\theta = \theta_0 + \beta(\varphi - \theta_0) \qquad (0 < \beta < 1) \tag{5}$$

其中, $\theta_0$ 为前一次调整后的纤维取向, $\varphi$ 为本次应力分析得到的单元第一主应力方向, $\theta$ 为本次调整后的纤维取向。

对于受均布拉伸载荷的含孔复合材料矩形单层板, 由于对称, 仅取其 1/4 部分进行分析, 采用图 1 所示的有限元网格模型, 总计有 276 个单元 545 个结点。对板内纤维取向与密度分布

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

进行了迭代设计。设计变量就是这 276 个单元纤维密度和取向。选用玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 纤维和基体的有关材料常数见表 1。

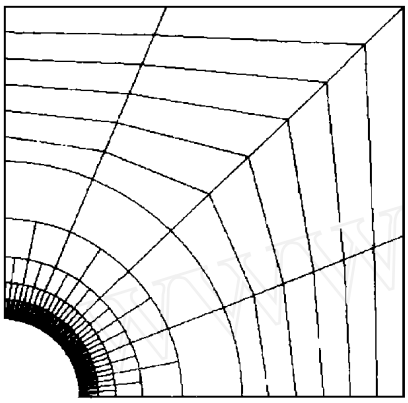

图 1　有限元网格

Fig. 1　FEM grid model in this paper

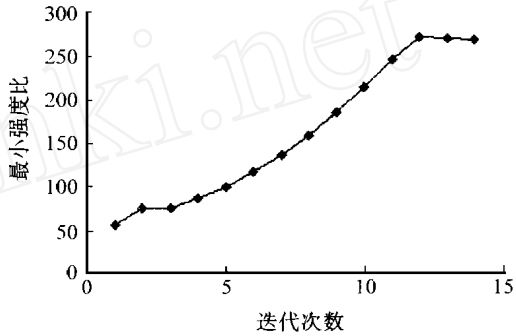


图 2　迭代收敛过程中最小强度比$R_{min}$变化

Fig. 2　Variation of $R_{min}$ in recursive process of iteration

表 1　纤维和基体的有关材料常数(强度和模量单位为MPa)

Table 1　Material constants of fiber and matrix (MPa for strength and modulus)

| | 拉伸模量 | 剪切模量 | 泊松比 | 拉伸强度 | 剪切强度 |
|---|---|---|---|---|---|
| E 玻璃纤维 | 73800 | 30750 | 0.2 | 3510 | |
| 环氧树脂 | 3500 | 1400 | 0.4 | 80 | 28 |

图 2 为单层板在多次迭代优化过程中最危险点强度比随迭代次数的变化, 可以看出在载荷不变条件下, 绕孔方案比最初钻孔方案的强度有很大幅度的提高。图 3 给出了迭代 15 次后的纤维密度分布与 $\sigma_x$ 的分布, 图 4 给出了相应的纤维流线与第一主应力 $\sigma_1$ 方向, 可以发现图 3 中的两图及图 4 中的两图都分别非常相似, 说明纤维密度和方向已调整到与应力分布相适应的状态。

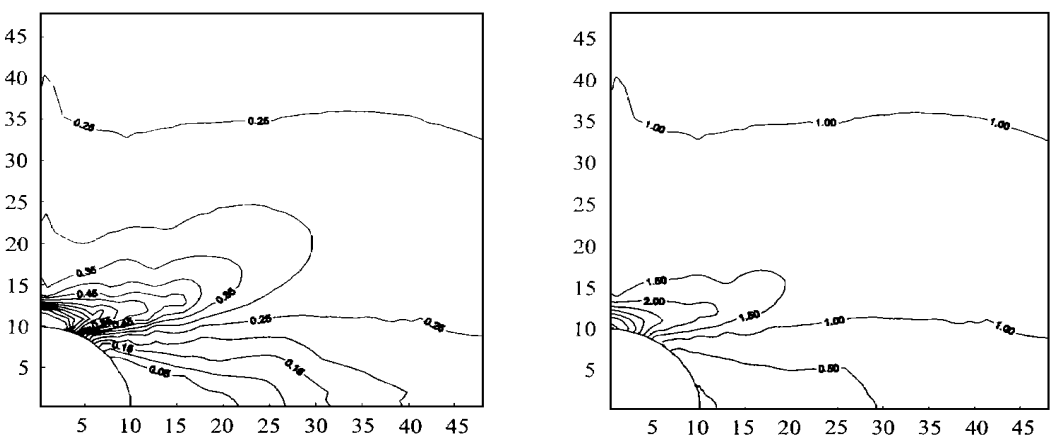


图 3　15 次后纤维密度与 $\sigma_x$ 分布

Fig. 3　Distribution of fiber density and $\sigma_x$ after 15 iterations

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

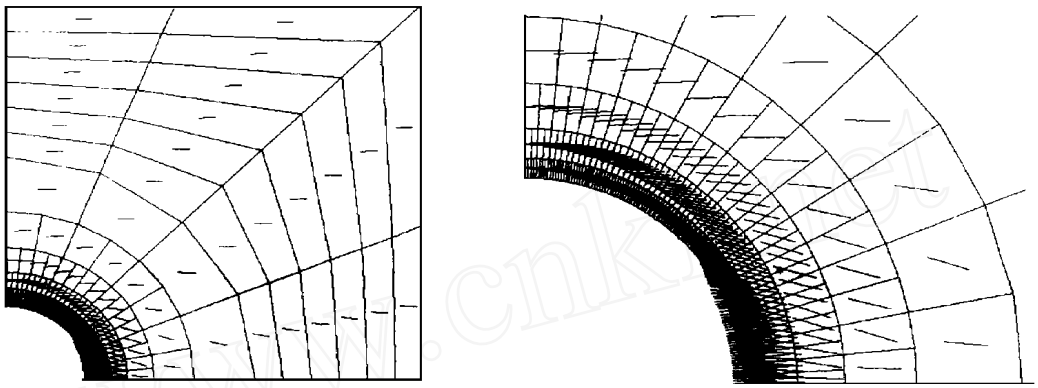

图 4 15 次迭代后的纤维流线和第一主应力 $\sigma_1$ 方向(两者一样, 仅画其一)

Fig. 4 Orientation of fiber and $\sigma_1$ after 15 iterations

## 2 含预成型孔复合材料层合板强度分析

利用上述单层板迭代设计的结果, 我们构造[0/90]s 和[0/±45/90]s 复合材料层合板, 即仅把上述单层板整体地转动某个角度 θ, 叠合在一起形成层合板。然后再利用层合板强度分析的方法分析在各种复杂面内载荷作用下板内最小强度比, 从而得到层合板的板内最小强度比包络面, 以对含预成型孔复合材料层合板的综合强度性能进行分析。为了进行比较, 我们也计

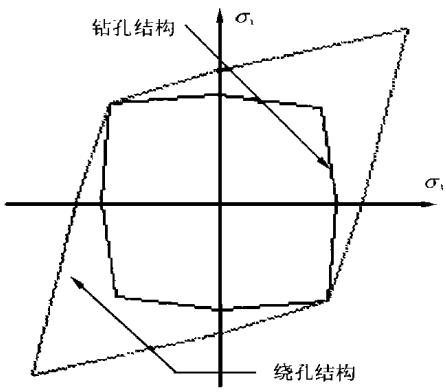


图 5 [0/90]s 层合板的安全系数包络面

Fig. 5 Safety surface of [0/90]s laminates

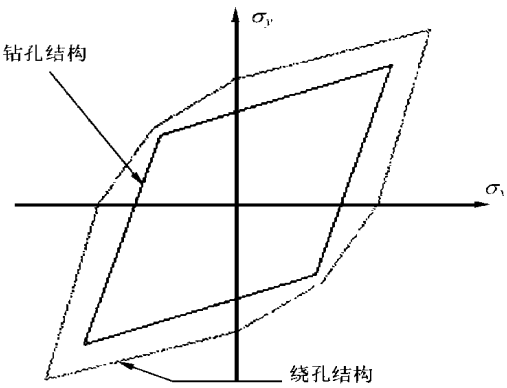


图 6 [0/±45/90]s 层合板的安全系数包络面

Fig. 6 Safety surface of [0/±45/90]s laminates

算了对应钻孔结构层合板其安全系数包络面。图 5 为两种[0/90]s 层合板的最小强度比包络面, 图 6 为两种[0/±45/90]s 层合板的最小强度比包络面。不难看出, 受拉和受压时完全对称, 这一点是由采用 Hill-Tsai 强度理论所决定的。对于纵向和横向同时受拉或同时受压的情况, 安全系数提高的幅度较大, 这是由于此时结构主要承受正应力, 而纤维的存在主要是提高了拉压强度; 随着剪应力水平的提高, 即载荷变为一方受拉一方受压, 安全系数提高幅度变小([0/±45/90]s) 甚至于不变([0/90]s), 这是由于我们假设了纤维的存在对材料的剪切强度没有影响。另外, [0/±45/90]s 层合板的安全系数在任意载荷作用下都有很大提高, [0/90]s 层合板在纵向和横向单拉、单压及同时拉压情况下安全系数都有较大提高, 这说明准各向同性及正交层合板采用绕孔方案有工程意义。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 3 结　　论

本文中提出了含预成型孔单层板纤维取向和与密度分布的设计方法, 能保证纤维连续且在纤维总量不变的条件下大幅提高单层板的强度, 在单层板设计的基础上使用整体旋转叠合的方法构造的含预成型孔正交层合板及准各向同性层合板的强度也分别比对应的钻孔结构层合板有较大幅度的提高, 结果对先进复合材料的设计和制造具有重要参考价值。

## 参 考 文 献


1 Lekhnitskii S G. Anisotropic Plates. Gordon & Breach Press, 1968

2 Tan S C. Notched strength prediction & design of laminated composites under in-plane loading. *J of Composite Materials*, 1987, 21(8): 750～780

3 Ireman T, Erikson I. Strength of composite laminates containing holes and subjected to complex loading condition. *J of Composite Materials*, 1997, 31 (12): 1214～1248

4 Cunderson S, Schiavone R. The insect exoskeleton: a natural structure composite. JOM, 1989, 41(11): 60～62

5 Cunderson S. The use of preformed holes for increased strength and damage tolerance of advanced composite, In: Proc Amer Soc Comp. New York: 1992. 461～465


## STRENGTH ANALYSIS OF COMPOSITE LAMINATES CONTAINING PREFORMED HOLE


Yang Yunmin　　Peng Xianghe　　Chen Yuanqiang

(Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044)



**Abstract**　From the observation of biological structure, it was found that the fiber changes its density and direction continuously when passing around a hole. Some experiments have demonstrated that the mechanical properties of this kind of structure were much better than those of a structure containing drilled or punched holes. An iteration method was proposed for the design of pre-formed hole structure of a single ply. Then the mechanical property of the laminates consisting of this kind of ply was analyzed. Calculation showed that the obtained laminates have higher load carrying capability than the conventional ones.



**Key words**　composite, strength, structure biomimetics


---

(上接第 71 页)

(4) 过氧化氢异丙苯(CHP)/金属皂/胺

用于乙烯基酯树脂。发热低, 可得到柔软的固化产物。用MEKPO 有发泡现象, 作业性差, 残留单体量多, 故使用以过氧化异丙苯为基础的固化剂 328E 及固化剂 328EM 等的混合物。还有低发热固化快的R-329A 上市。

### 1.4　乙烯基酯树脂用固化剂

乙烯基酯树脂是有代表性的耐腐蚀树脂, 与环氧树脂及不饱和聚酯树脂比较, 具有优良的机械特性、胶接性和范围广的耐化学药品性。

(下转第 106 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net