

计及纤维交叉起伏影响的缠绕复合材料刚度分析

沈创石^{1,2}, 韩小平^{1,2,*}, 何欣辉¹

(1. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072;

(2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 针对缠绕复合材料交叉起伏区域的细观结构, 建立了一种细观分析模型。首先, 将纤维交叉起伏区域划分为环向交叉起伏区和螺旋交叉起伏区 2 种类型; 然后, 以缠绕面为基准, 用平行横截面将起伏区域空间结构模型离散化为多个子模型, 运用纤维束起伏角、富树脂区域尺寸、纤维束的体积分数、纤维束的横截面形状及尺寸等细观参数来描述缠绕复合材料交叉起伏区域的细观结构。基于所建立的细观模型及层合板理论, 提出了缠绕复合材料交叉起伏区域的等效刚度计算方法。通过算例研究了纤维束截面、纤维束起伏角以及富树脂区体积分数等细观参数对局部区域等效刚度的影响。结果表明: 环向交叉起伏区的弹性模量比螺旋交叉起伏区下降得更为明显; 在富树脂区域, 弹性模量和剪切模量降低较为明显, 而泊松比则有所增大。纤维束厚度增加及纤维束截面变化对交叉起伏区域等效刚度会产生明显影响。

关键词: 缠绕复合材料; 纤维交叉起伏; 细观模型; 富树脂区域; 刚度

中图分类号: TB330.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2016)01-0174-09

缠绕复合材料因其具有比强度大和比刚度高, 抗疲劳性能和耐腐蚀性能好以及结构可设计性好等诸多优点而被广泛应用于航空、航天等多个行业。纤维缠绕工艺以及缠绕结构的刚度和强度分析是工程设计部门和科研人员近二十年来持续关注的问题, 缠绕复合材料的损伤、失效、破坏的机理及其力学性能的精确表征是该研究领域的难点和前沿问题。

缠绕复合材料生产工艺中会出现纤维束的交叉起伏, 从而使得纤维束在缠绕层中不再均匀排列, 特别是在纤维交叉起伏区域, 纤维束由于缠绕张力以及残余应力的存在使得其产生变形, 在浸胶后形成树脂富集区, 造成局部的应变增大和应力集中。由于纤维束的起伏造成纤维方向偏离受载方向, 并且起伏纤维束的取向不在同一个平面, 导致起伏区域内的面内力学性能降低, 这个区域往往是断裂萌生、材料损伤破坏的发源地, 会严重影响缠绕结构的刚度、强度和破坏形式, 因此, 建立合理的且与

实际相符的缠绕复合材料细观分析模型, 对缠绕复合材料结构的力学性能分析具有重要的意义。

Rousseau 和 Perreux^[1]对一系列纤维缠绕气瓶进行试验研究, 对不同缠绕排列形式和不同加载方式的影响进行了比较。结果表明, 纤维交叉起伏区域的空穴以及初始的裂纹可能导致断裂, 由此引起损伤扩展, 引发缠绕气瓶提前泄漏。Mertiny 和 Ellyin^[2]通过试验研究了不同缠绕角、不同铺层参数情况下缠绕结构失效、破坏的模式和强度的变化。结果表明, 结构性破坏模式取决于外加载荷的类型和缠绕角度等因素, 而以容器泄漏为主的功能性破坏对基体破裂更为敏感。文献[3]在编织复合材料的正弦波纹模型的基础上, 分别构造了菱形胞元和代表性体积单元, 描述纤维交叉情形, 并在细观模型中计入纤维束缠绕角度和几何位形的影响, 根据计算结果进行分析讨论, 认为纤维束交叉现象的存在加速了材料损伤的扩展, 对纤维缠绕结构的强度和刚度都会造成影响。文献[4]根据缠绕复合材

收稿日期: 2015-01-19; 录用日期: 2015-04-15; 网络出版时间: 2015-04-29 16:13

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.tb.20150429.1613.001.html

基金项目: 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题

通讯作者: 韩小平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料及其结构的力学性能分析。 E-mail: xphan@nwpu.edu.cn

引用格式: 沈创石, 韩小平, 何欣辉. 计及纤维交叉起伏影响的缠绕复合材料刚度分析[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1): 174-182. SHEN C S, HAN X P, HE X H. Stiffness analysis of filament wound composites considering filament crossover and undulation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(1): 174-182 (in Chinese).

料内部细观结构的特点, 将缠绕复合材料特征单元的刚度作为一个刚度场, 利用傅里叶级数有关理论, 建立了缠绕复合材料刚度预测模型。

Jia 等^[5]研究了缠绕复合材料圆管的压缩失效行为, 并详细研究了几何尺寸、缠绕角及预置裂纹的方位对压缩性能的影响。结果显示: 随着缠绕角度的增加, 抗压强度、抗压弹性模量以及裂纹长度呈现减小的趋势; 当预置裂纹的方位角等于或者接近于缠绕角时, 抗压强度达到最低, 随后随着预置裂纹的方位角的增加而增加。Zhou 和 Zindel^[6-7]等根据缠绕复合材料的内部细观结构特点, 选取了在材料内部周期性分布的特征单元, 通过均匀化方法预测了缠绕复合材料的弹性性能。Zhang 等^[8]根据缠绕复合材料的内部细观结构特点, 选取壳单元, 采用有限元方法分析了缠绕复合材料特征单元, 计算了材料的面内刚度特性。文献^[9]针对起伏区域纤维束的非正交交织的特点, 在计算模型中引入螺旋缠绕角和起伏层倾斜角这 2 个角度, 提出一种缠绕复合材料刚度的计算方法, 并具体给出了起伏区域有效刚度的计算步骤。

目前针对缠绕复合材料中纤维束起伏和交织现象, 纤维起伏区域的有效刚度及缠绕复合材料壳体的等效刚度的计算方法适合于简单缠绕^[10]情况, 对任意缠绕角、多层壳体以及复杂形状缠绕结构情况没有计算结果, 并且研究结果不尽相同, 甚至出现截然相反的结果。如文献^[10]通过纤维缠绕管的拉伸试验, 分别测试纤维交织区域和层合区域的应变场, 发现纤维交织、起伏导致缠绕结构刚度的下降。而文献^[11]通过试验研究发现, 纤维交织、起伏区域随着缠绕工艺参数改变而改变, 当纤维交叉起伏区域增多时, 弹性模量和剪切模量反而有所增大; 在内压载荷下的试验结果表明, 随着纤维交织起伏区域增多, 缠绕管的强度也有所增大。这些均表明, 对缠绕复合材料的研究还缺乏严格的理论分析模型以及便于应用的缠绕结构分析方法。

综上所述, 围绕着缠绕复合材料结构的力学性能分析, 仍然有很多工作有待开展。本文提出一种缠绕复合材料交叉起伏区域的细观模型, 然后引入纤维束起伏角、富树脂区域尺寸、纤维束体积分数、纤维束截面形状以及尺寸等细观参数, 建立了缠绕复合材料交叉起伏区域的刚度模型。通过算例, 分析讨论了纤维束截面、纤维束起伏角度以及富树脂区域体积分数等细观参数对局部区域等效刚度的影响。

1 纤维交叉起伏区域刚度分析

1.1 缠绕复合材料菱形特征单元

缠绕复合材料结构在整体上可看作是由一系列重复的菱形块组成^[9], 纤维缠绕图案如图 1 所示, 因此只需分析一个菱形块的细观结构即可。由于在一个缠绕循环中, 正在缠绕的纤维束与已经缠绕的内层纤维束交叉, 在局部形成 2 个纤维束的相互交叉起伏, 可划分为环向交叉起伏区域和螺旋交叉起伏区域 2 种区域, 最终使得重复特征单元内包含 3 种区域, 分别为: X 环向纤维交叉起伏区域; Y 螺旋交叉起伏区域; Z 层合板区域。重复特征单元如图 2 所示。

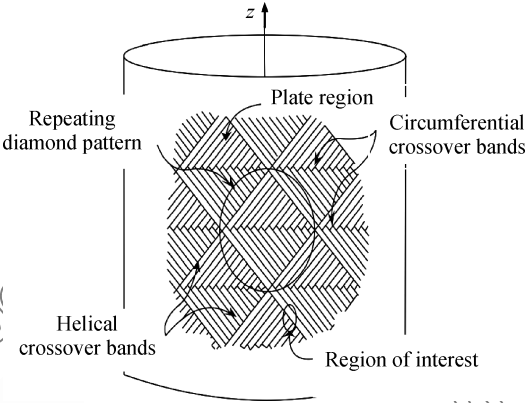


图 1 纤维缠绕图案
Fig.1 Fiber winding pattern

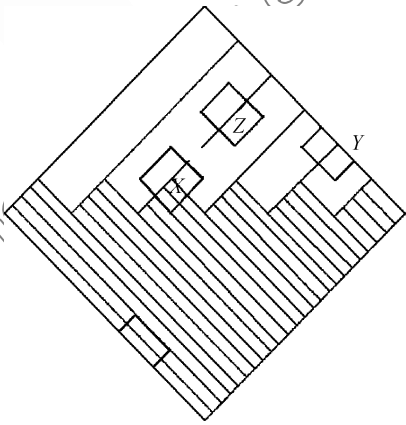


图 2 重复特征单元
Fig.2 Repeated characteristics unit

1.2 环向交叉起伏细观模型

由于预制件的固化成型工艺过程以及缠绕张力的作用, 纤维束之间存在相互交叉挤压, 使得纤维束的截面形状发生改变。假设纤维束从吐丝嘴出来的截面近似于矩形, 环向交叉起伏区域纤维束的缠绕次序依次为: 纤维束①→②→③→④, 环向交叉

起伏区域细观模型如图 3(a)所示。纤维束①在未缠绕纤维束②之前其截面为矩形,但是在缠绕纤维束②之后,其 BE 处截面变为近似于 1/4 椭圆截面;同样纤维束②在缠绕纤维束③之后,其 AH 处的截面变为近似于 1/4 椭圆截面, BE 处的截面由 B 处的矩形渐变到 E 处的 1/4 椭圆截面,同时纤维束③的 AE 处的截面变为近似于 1/4 椭圆截面, HD 处的截面由 H 处的近似于 1/4 椭圆渐变到 D 处的矩形截面;纤维束④缠绕之后,与纤维束③相互挤压,使得纤维束④的 HD 处的截面变为近似于 1/4 椭圆截面, GC 处的截面由 G 处的近似于 1/4 椭圆截面渐变到 C 处的矩形截面。

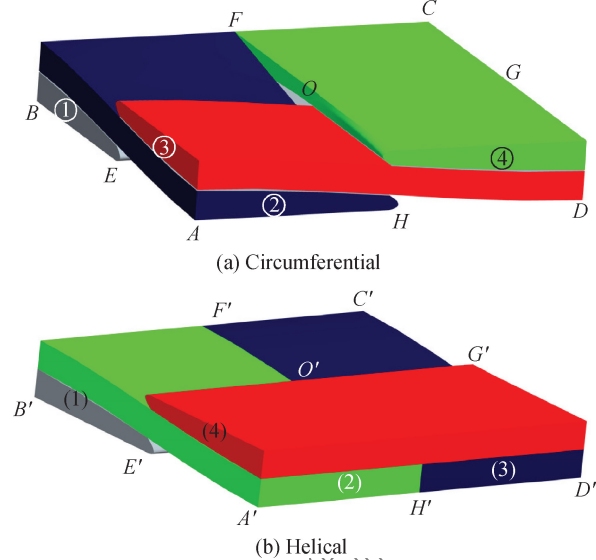


图 3 环向和螺旋交叉起伏区域细观模型

Fig. 3 Meso-scale models of circumferential and helical crossover and undulation region

1.3 螺旋交叉起伏细观模型

螺旋交叉起伏区域纤维束的缠绕次序依次为:纤维束(1)→(2)→(3)→(4),但其缠绕过程与环向交叉起伏区域有所区别,如图 3(b)所示。缠绕工艺完成之后,纤维束(1)、(4)由矩形截面变为近似于 1/4 椭圆截面,而纤维束(2)、(3)由 1/4 椭圆截面变为矩形截面。

1.4 交叉起伏细观模型离散化

目前已有的模型或忽略了缠绕复合材料的细观特征,或者仅能在宏观上反映材料的刚度特征。但是由于缠绕复合材料的菱形特征单元内,交叉起伏区域的尺寸相对于菱形特征单元的尺寸不能视为足够小,菱形特征单元就不能视为均匀,这样就需要

一种既能反映材料整体刚度特性,又能够反映材料局部刚度变化特性的刚度模型。因此,以缠绕面作为基准,利用平行横截面,分别将环向交叉起伏区域和螺旋交叉起伏区域空间结构模型离散为 $M \times N$ 个子模型,细观模型离散化和子模型编号分别如图 4 和图 5 所示,此子模型就是用来描述缠绕复合材料交叉起伏区域的细观模型。

不同位置的子模型,基体与纤维束的含量不同,且纤维束的缠绕角度与纤维束的起伏角度也不相同。螺旋交叉起伏模型与环向交叉起伏模型的富树脂区都在模型的中心区域,但两者空间结构不同,螺旋交叉起伏模型的富树脂区在中心呈带状,模型相对于这个中心带对称,环向交叉起伏模型相对于中心富树脂区没有对称性。选择 3 个有代表性的子模型,其中 11、12 子模型在细观模型的边角位置, $(M/2-1)(N/2-1)$ 子模型靠近细观模型中心,如图 5 所示。图 6 为子模型细观结构。

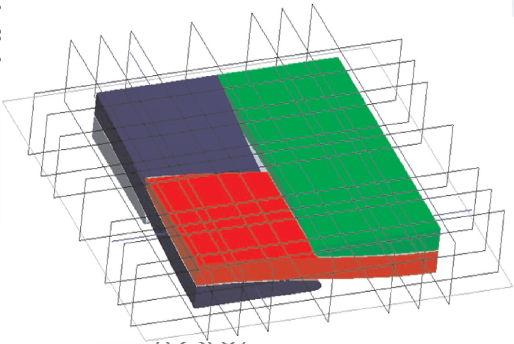


图 4 细观模型离散化

Fig. 4 Meso-scale model discretization

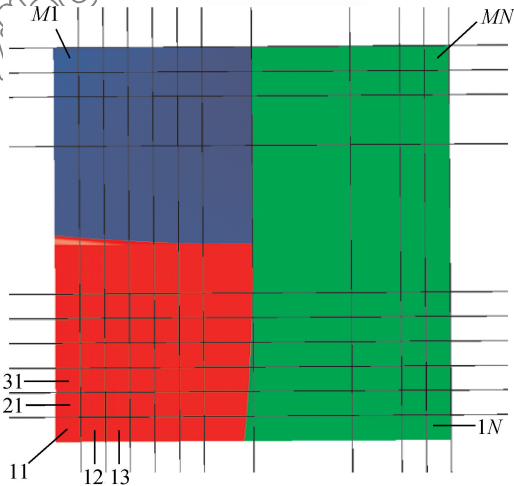


图 5 子模型编号

Fig. 5 Sub-cell number

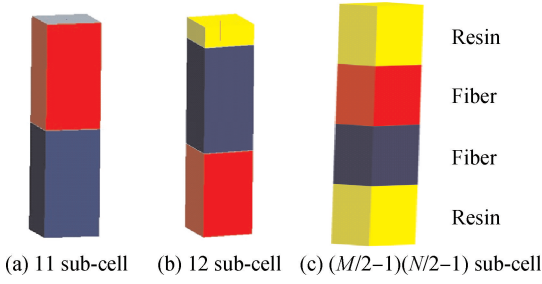


图6 子模型微观结构

Fig. 6 Meso-scale structure of sub-cell

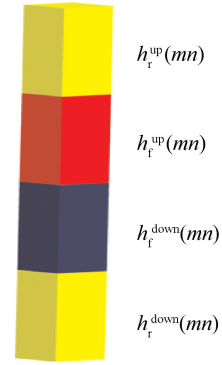


图8 mn子模型

Fig. 8 mn sub-cell

1.5 交叉起伏区域各个子模型中基体以及纤维束含量的确定

选用三角函数^[6]来描述交叉起伏区域纤维束的起伏路径:

$$g(w) = \frac{a}{2} \cos\left(\frac{\pi w}{b}\right) \quad (1)$$

式中: $g(w)$ 为纤维束中面的形状函数; a 为单层纤维束的厚度; w 为沿着起伏方向的距离; b 为起伏区域的长度。

由于在交叉起伏区域纤维束截面形状发生改变, 为了便于分析讨论, 将交叉起伏微观模型分为 I、II、III、IV 这 4 个分区域, 如图 7 所示。

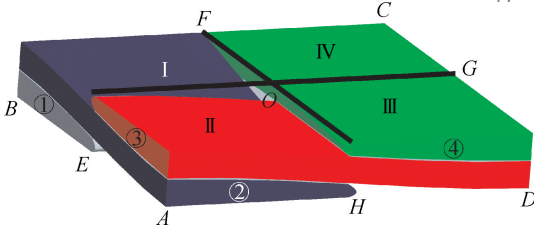


图7 微观模型分区

Fig. 7 Meso-scale model partition

对于 I 分区域, 各个子模型基体以及纤维束含量可以由式(2)确定:

$$\begin{cases} h_f^{\text{up}}(mn) = a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \\ h_f^{\text{down}}(mn) = a \cos\left(\frac{n-1}{N}\pi\right) \\ h_r^{\text{up}}(mn) = a - a \cos\left(\frac{n-1}{N}\pi\right) \\ h_r^{\text{down}}(mn) = a - a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h_f^{\text{up}}(mn)$ 和 $h_f^{\text{down}}(mn)$ 分别为 mn 子模型中上下 2 层纤维束的厚度; $h_r^{\text{up}}(mn)$ 和 $h_r^{\text{down}}(mn)$ 分别为 mn 子模型中上下 2 层基体的厚度 ($m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$)。 mn 子模型如图 8 所示。

对于 II 分区域, 各个子模型基体以及纤维束含量可以由式(3)确定:

$$\begin{cases} h_f^{\text{up}}(mn) = \frac{2(m-M/2)}{M} \left(a - a \cos\left(\frac{n-1}{N}\pi\right) \right) + a \\ h_f^{\text{down}}(mn) = a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \\ h_r^{\text{up}}(mn) = 2a - h_f^{\text{up}}(mn) - h_r^{\text{up}}(mn) \\ h_r^{\text{down}}(mn) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于 III 分区域, 各个子模型基体以及纤维束含量与 II 分区域类似。

对于 IV 分区域, 各个子模型基体以及纤维束含量可以由式(4)确定:

$$\begin{cases} h_f^{\text{up}}(mn) = \frac{2(m-M/2)}{M} \left(a - a \cos\left(\frac{n-1}{N}\pi\right) \right) + a \\ h_f^{\text{down}}(mn) = \frac{2(n-N/2)}{N} \left(a - a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \right) + a \\ h_r^{\text{up}}(mn) = a - h_f^{\text{up}}(mn) \\ h_r^{\text{down}}(mn) = a - h_r^{\text{up}}(mn) \end{cases} \quad (4)$$

螺旋交叉起伏微观模型关于中心点对称, 取 1/4 模型分析各个子模型纤维以及基体的含量:

$$\begin{cases} h_f^{\text{up}}(mn) = a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \\ h_f^{\text{down}}(mn) = a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \\ h_r^{\text{up}}(mn) = 0 \\ h_r^{\text{down}}(mn) = a - a \cos\left(\frac{m-1}{M}\pi\right) \end{cases} \quad (5)$$

1.6 纤维交叉起伏区域纤维束起伏角的描述

纤维交叉起伏微观模型内, 不同位置子模型中的纤维束起伏角度是不一样的。各个子模型的纤维

束起伏角，可由式(6)确定：

$$\theta_{f, mn}^f = \begin{cases} \arctan\left[-\frac{a\pi}{4L}\sin\left(\frac{\pi}{2M}\left(m-\frac{1}{2}\right)\right)\right] \\ \arctan\left[-\frac{a\pi}{4L}\sin\left(\frac{\pi}{2N}\left(n-\frac{1}{2}\right)\right)\right] \end{cases} \quad (6)$$

1.7 纤维交叉起伏区域的刚度模型

在纤维交叉起伏区域，弯曲的纤维束可看作由许多微元段拼接而成，每个微元段又可近似看作为空间单向层板，因此可利用层板复合材料理论进行分析。通过缠绕角和纤维束起伏角，进行2次转换得到缠绕面上纤维束的等效刚度参数。假设子模型mn中纤维束的起伏角 θ_{mn} 为 β ，子模型mn内起伏区域纤维束的局部坐标1-2-3与整体坐标x-y-z的关系如图9所示。可以看到，纤维束除了具有与整体坐标系y方向的夹角(缠绕角)外，还与x-y平面有夹角 β 。将整体坐标系x-y-z旋转 $90^\circ-\varphi$ ，得到新坐标系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 。

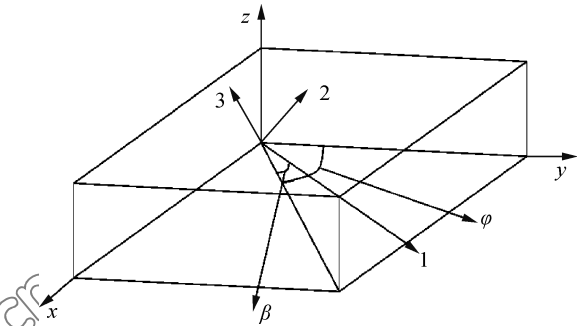


图9 起伏区域纤维束局部坐标与整体坐标的关系
Fig.9 Relationship between local coordinate and global coordinate of undulation region

面有夹角 β 。将整体坐标系x-y-z旋转 $90^\circ-\varphi$ ，得到新坐标系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 。

起伏区域纤维束的刚度参数分析过程如下：首先将纤维束局部坐标1-2-3下的刚度参数转换到 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 坐标系中。两坐标系的转换矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\beta^2 & 0 & \sin\beta^2 & 0 & 2\sin\beta\cos\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\beta^2 & 0 & \cos\beta^2 & 0 & -2\sin\beta\cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ -\sin\beta\cos\beta & 0 & \sin\beta\cos\beta & 0 & \cos\beta^2 & \sin\beta^2 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

纤维束在新坐标系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 下的刚度矩阵为

$$\bar{C}^{f, mn} = T_1^{-1} C^{f, mn} T_1^T \quad (8)$$

再将坐标系 $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ 下刚度参数转换到整体坐标系x-y-z中，两坐标系的转换矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\varphi^2 & \sin\varphi^2 & 0 & 0 & 0 & 2\sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi^2 & \cos\varphi^2 & 0 & 0 & 0 & -2\sin\varphi\cos\varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ -\sin\varphi\cos\varphi & \sin\varphi\cos\varphi & 0 & 0 & 0 & \cos\varphi^2 - \sin\varphi^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在整体坐标系x-y-z下的刚度矩阵为

$$\bar{C}^{f, mn} = T_2^{-1} \bar{C}^{f, mn} T_2^T \quad (10)$$

模型mn内含有两微段纤维束以及两微层树脂，再利用串联混合律和并联混合律，就可以计算出子模型的弹性工程常数

则纤维束在整体坐标系x-y-z下的柔度矩阵为

$$\bar{S}^{f, mn} = [\bar{C}^{f, mn}]^{-1} \quad (11)$$

利用柔度矩阵与复合材料工程常数之间的关系，可以求得子模型mn内纤维束在整体坐标系x-y-z下的9个独立的工程常数：

$$\begin{cases} E_1^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{11}^{f, mn}}, E_2^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{22}^{f, mn}}, E_3^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{33}^{f, mn}} \\ G_{23}^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{44}^{f, mn}}, G_{13}^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{55}^{f, mn}}, G_{12}^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{66}^{f, mn}} \\ \nu_{23}^{f, mn} = \frac{\bar{S}_{23}^{f, mn}}{\bar{S}_{33}^{f, mn}}, G_{13}^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{55}^{f, mn}}, G_{12}^{f, mn} = \frac{1}{\bar{S}_{66}^{f, mn}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： E 为弹性模量； G 为剪切模量； ν 为泊松比。子

$$\begin{cases} E_1^{c, mn} = V_f^{f, mn} E_1^{f, mn} + V_r^{r, mn} E^r, mn \\ E_2^{c, mn} = V_f^{f, mn} E_2^{f, mn} + V_r^{r, mn} E^r, mn \\ E_3^{c, mn} = E^r, mn E_3^{f, mn} / (E^r, mn V_f^{f, mn} + E_3^{f, mn} V_r^{r, mn}) \\ G_{13}^{c, mn} = G^r, mn G_{13}^{f, mn} / (G^r, mn V_f^{f, mn} + G_{13}^{f, mn} V_r^{r, mn}) \\ G_{23}^{c, mn} = G^r, mn G_{23}^{f, mn} / (G^r, mn V_f^{f, mn} + G_{23}^{f, mn} V_r^{r, mn}) \\ G_{12}^{c, mn} = G^r, mn V_f^{r, mn} + G_{12}^{f, mn} V_f^{f, mn} \\ \nu_{12}^{c, mn} = V_f^{f, mn} \nu_{12}^{f, mn} + V_r^{r, mn} \nu^r, mn \\ \nu_{13}^{c, mn} = V_f^{f, mn} \nu_{13}^{f, mn} + V_r^{r, mn} \nu^r, mn \\ \nu_{23}^{c, mn} = V_f^{f, mn} \nu_{23}^{f, mn} + V_r^{r, mn} \nu^r, mn \end{cases} \quad (13)$$

式中:上标 f、c、r 分别代表纤维、复合材料和树脂;
 $V_f^{r,mm}$ 和 $V_f^{c,mm}$ 分别为子模型中纤维束和树脂的体积分
数,由式(14)确定:

$$V_f^{r,mm} = \frac{h^{r,mm}}{e+a}, V_f^{c,mm} = 1 - V_f^{r,mm} \tag{14}$$

至此各个子模型的弹性工程常数已经得到,再
利用均值法即可求得整个细观模型的弹性工程常数:

$$\begin{cases} E_i^c = \frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N E_i^{c,mm} \\ G_{ij}^c = \frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N G_{ij}^{c,mm} \\ \nu_{ij}^c = \frac{1}{N^2} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \nu_{ij}^{c,mm} \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3 \tag{15}$$

2 算例验证与讨论

2.1 算例与模型验证

为验证本文中细观模型计算结果的准确性,采
用文献[12-13]的材料参数及实验结果,纤维的弹性
参数为: $E_f=73\text{ GPa}$, $\nu_f=0.22$;树脂的弹性参数为:
 $E_r=3.6\text{ GPa}$, $\nu_r=0.4$ 。文献[12]中纤维体积分
数为60%,缠绕角度为 $\pm 55^\circ$;文献[13]中纤维体积分
数为72.69%,缠绕角度为 $\pm 60^\circ$ 。表1为本文细观模型弹
性参数计算结果与文献试验结果对比。可以看出,
细观模型预测的结果与试验数据吻合很好。

2.2 交叉起伏区域刚度计算及分析

由于纤维交叉起伏细观模型中各处的纤维和基
体树脂的体积分数不同,从而导致细观模型中各处
的弹性性能参数不同。图10为计算得到的环向交
叉起伏区域弹性参数。弹性参数随着起伏区域的位
置不同而不同。在起伏区域中心,弹性模量及剪切
模量明显降低,而泊松比有所提高。这是因为环向
交叉起伏区域细观模型中心是富树脂区,纤维体分
数最低,并且纤维束的起伏角度最大,因此细观
模型中心处弹性性能变化最大。

图11为计算得到的螺旋交叉起伏区域弹性参
数。各参数随着起伏区域位置不同而不同,且相对

于模型中心的一条带呈对称分布,在这条中心带
上,弹性模量和剪切模量明显降低,泊松比有所增
大。因为模型中心带状区域的纤维体积分数最低,

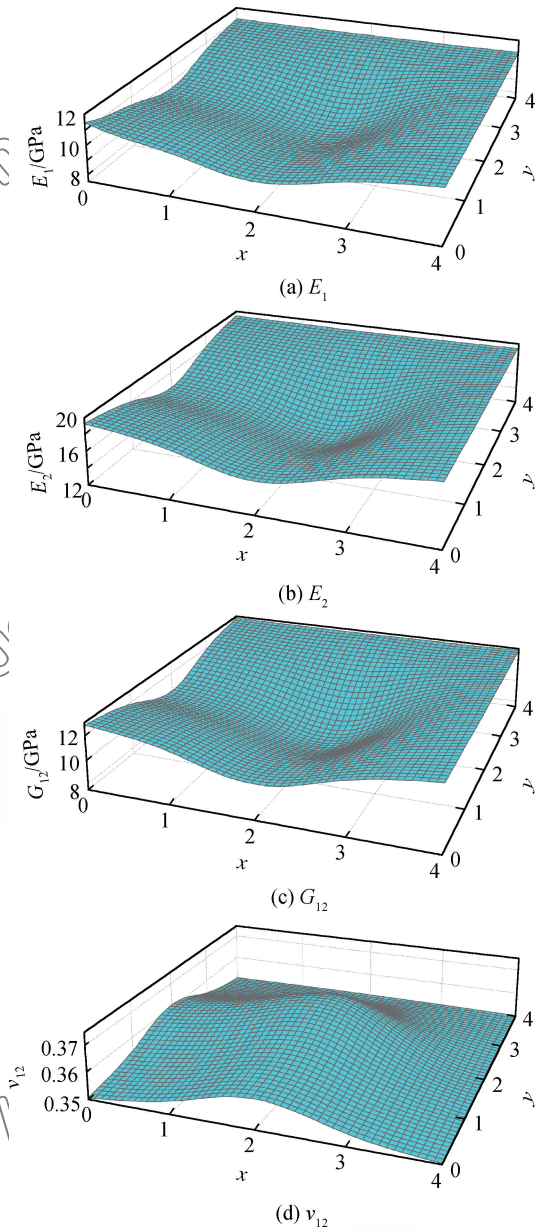


图10 环向交叉起伏区域弹性参数

Fig. 10 Elastic parameters of circumferential crossover and undulation region

表1 本文细观模型弹性参数计算结果与文献试验结果对比

Model	E_1 / GPa	E_2 / GPa	G_{12} / GPa	ν_{12}
Reference[12]	12.00	20.50	11.50	0.380
Present model($\pm 55^\circ$)	11.16	19.20	11.30	0.355
Reference[13]	21.20	36.60	—	0.310
Present model($\pm 60^\circ$)	20.40	35.10	13.90	0.275

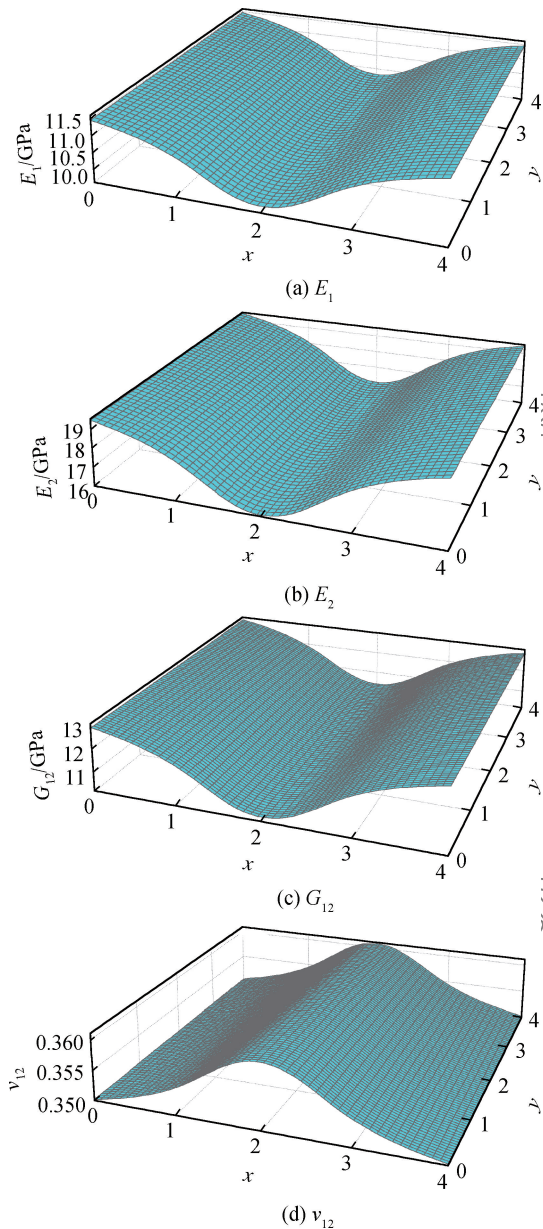


图 11 螺旋交叉起伏区域弹性参数
Fig. 11 Elastic parameters of helical crossover and undulation region

因此弹性性能变化最明显。

表 2 和表 3 分别为环向交叉起伏区域与螺旋交叉起伏区域相对应的模型边缘点 $A(A')$ 以及模型中心点 $O(O')$ (见图 3) 处弹性参数。可以看出, 由于模型中各个区域的纤维体积分数以及基体体积分不同导致各处弹性参数不同, 对于环向交叉起伏区域, 比较 $A、O$ 两点, 弹性参数 E_1 下降 29.5%, E_2 下降 32.3%, E_3 下降 28.1%, G_{12} 下降 45.5%, ν_{12} 增加 5.6%; 对于螺旋交叉起伏区域, 比较 $A'、O'$ 两点, 弹性参数 E_1 下降 13.5%, E_2 下降 16%, E_3 下降 14%, G_{12} 下降 17.8%, ν_{12} 增加 2.8%。比较 2 个模型发现, 环向交叉起伏区域的 O 点的弹性参数小于螺旋交叉起伏区域的 O' 点的弹性参数, 即环向交叉起伏区域的弹性性能降低得更为明显。

2.3 纤维束厚度的影响

根据缠绕预制件的纤维含量标准以及缠绕工艺过程的要求, 缠绕纤维束的厚度可能不同, 导致纤维交叉起伏区域中富树脂区的树脂体积分数也不同, 因此纤维束厚度也是决定纤维交叉起伏细观模型的重要参量。为了避免重复累赘, 这里只选择环向交叉细观模型的 1/4, 且缠绕角度为 $\pm 55^\circ$, 选取纤维束的厚度分别为 0.3、0.4、0.5 mm 来做对比讨论。

表 4 为不同纤维束厚度情况下交叉起伏区域的 $A、O$ 点的弹性参数。可以看到刚度参数 $E_1、G_{12}$ 随着纤维束厚度的增加而减小, 而弹性工程常数 ν_{12} 随着纤维束的厚度增加而增大。随着纤维束厚度增加, A 点弹性参数 E_1 分别下降 8.3%、13.78%, O 点弹性参数 E_1 分别下降 10.2%、15.94%; A 点弹性参数 E_2 分别下降 10.1%、16.3%, O 点弹性参数 E_2 分别下降 12.26%、19.63%, A 点弹性参数 G_{12} 分别下降 11.3%、18.06%, O 点弹性参数 G_{12} 分别下降 13.75%、21.80%。比较 $A、O$ 两点, 纤维束

表 2 环向交叉起伏区域 $A、O$ 点的弹性参数

Table 2 Elastic parameters of circumferential crossover and undulation region (point A and O)

Point	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	G_{12}/GPa	ν_{12}
A	11.5	19.35	12.8	12.8	0.350 5
O	8.11	13.10	9.20	8.25	0.370 1

表 3 螺旋交叉起伏区域 $A'、O'$ 点的弹性参数

Table 3 Elastic parameters of helical crossover and undulation region (point A' and O')

Point	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	G_{12}/GPa	ν_{12}
A'	11.46	19.42	12.85	12.84	0.350 2
O'	9.91	16.30	11.05	10.55	0.360 0

表 4 不同纤维束厚度情况下交叉起伏区域的 A、O 点的弹性参数

Thickness/mm	E_1 /GPa		E_2 /GPa		G_{12} /GPa		ν_{12} /GPa	
	A 点	O 点	A 点	O 点	A 点	O 点	A 点	O 点
0.3	11.46	9.91	19.42	16.30	12.84	10.55	0.350 2	0.360 0
0.4	10.5	8.9	17.45	14.30	11.39	9.10	0.356 5	0.366 3
0.5	9.88	8.33	16.25	13.10	10.52	8.25	0.360 2	0.370 1

厚度改变对 O 点的弹性参数影响更为明显, 即纤维束厚度增加, 交叉起伏区域中富树脂区域的弹性性能降低更多。

3 结 论

(1) 计算结果表明, 纤维交叉起伏区域中各处纤维和基体的体积分数不同, 导致起伏区域中各处的弹性参数不同, 在富树脂区域, 弹性模量和剪切模型降低较为明显, 而泊松比有所增大。

(2) 将纤维交叉起伏区域分为 2 种情况, 即环向交叉起伏区域与螺旋交叉起伏区域, 分析表明: 环向交叉起伏区域弹性参数下降得更为明显。

(3) 缠绕纤维束的厚度也是交叉起伏细观模型中的一个重要参数, 纤维束厚度增加, 纤维交叉起伏区域中富树脂区域中树脂体积分数也要增加, 导致交叉起伏区域中心各弹性参数降低更多。

参考文献:

[1] ROUSSEAU J, PERREUX D. The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes[J]. Composite Science and Technology, 1999, 59(9): 1439-1449.

[2] MERTINY P, ELLYIN F. An experimental investigation on the effect of multi-angle filament winding on the strength of tubular composite structures [J]. Composite Science and Technology, 2004, 64(1): 1-9.

[3] 姜云鹏, 岳珠峰, 卢文书. 计入纤维交叉影响的缠绕复合材料等效模量计算方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2005, 18(5): 33-37.

JIANG Y P, YUE Z F, LU W S. Effect of fiber undulating zone on the macro elastic modulus of fiber winding composites [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2005, 18(5): 33-37 (in Chinese).

[4] 李俭, 温卫东, 崔海涛. 基于傅里叶级数的缠绕复合材料刚度预测方法[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 169-174.

LI J, WEN W D, CUI H T. Predicting stiffness of filament-wound composite based on Fourier series[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(5): 169-174 (in Chinese).

[5] JIA X L, CHEN G, YU Y H. Effect of geometric factor,

winding angle and pre-crack angle on quasi-static crushing behavior of filament wound CFRP cylinder[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 1336-1343.

[6] ZHOU C W, XIA Z X, YONG Q L. Micro mechanical model of filament wound composite pipe with damage analysis[C]// Proceedings of 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference 2006. Vancouver, BC: American Society of Mechanical Engineers, 2006: 1-8.

[7] ZINDEL D, BAKIS C E. Nonlinear micro-mechanical model of filament wound composites considering fiber undulation [J]. Mechanics of Composite Materials, 2011, 47(1): 73-94.

[8] ZHANG Y, XIA Z X, ELLYIN F. Two-scale analysis of a filament-wound cylindrical structure and application of periodic boundary conditions[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(20): 5322-5336.

[9] 郭章新, 韩小平. 纤维束交叉起伏对缠绕复合材料刚度的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 72(1): 179-184.

GUO Z X, HAN X P. Calculation stiffness of filament winding composite for considering the filament undulation and crossover[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(1): 179-184 (in Chinese).

[10] WEN W D, LI J, CUI H T. Strain characteristic of filament wound composite cylinder under axial loading[C]// 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes. Guilin: Advanced Material Research, 2012: 415-417.

[11] BRITO F M. Influence of interwoven configuration on mechanical properties of crossed helicoidal filament winding composites[C]// International Conference on Composite Materials 6th, and European Conference on Composite Materials 2nd. London: Imperial College of Science and Technology, 1987: 1183-1189.

[12] ABDUL M S, ASSALEH T A, GIBSON A G. Ultimate elastic wall stress (UEWS) test of glass fibre reinforced epoxy (GRE) pipe[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(10): 1500-1508.

[13] MEIJER G, ELLYIN F. A failure envelope for $\pm 60^\circ$ filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(3): 555-564.

Stiffness analysis of filament wound composites considering filament crossover and undulation

SHEN Chuangshi^{1, 2}, HAN Xiaoping^{1, 2, *}, HE Xinhui¹

(1. School of Mechanics and Civil & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aimed at the meso-structure of crossover and undulation region in filament wound composites, a meso-scale analytical model is proposed. First, the crossover and undulation region are classified to two types, i. e. the circumferential crossover and undulation region, and the helical crossover and undulation region. Next, based on the filament wound surface, parallel cross-section was used to discrete spatial structure model of undulation region, which will be discretized to numbers of sub-models to describe the meso-structure of crossover and undulation region of filament wound composites by using meso-parameters such as fiber bundle inclination angle, size of resin rich area, volume fraction, cross-section shape and size of fiber bundle. With this meso-scale model and the laminate theory, a method for calculating the equivalent stiffness of crossover and undulation region of filament wound composites is eventually established. The effects of cross-section, inclination angle of fiber bundle and the volume fraction of resin rich area on local area equivalent stiffness were studied. The results show that the elastic modulus for circumferential crossover and undulation region decreases to greater extent as compared that of the helical crossover and undulation region. Significant decrease in elastic modulus and shear modulus and increase in Poisson's ratio are found for resin rich area. Thickness increase and cross-section change of fiber bundle have evident effects on the equivalent stiffness of crossover and undulation region.

Keywords: filament wound composites; fiber crossover and undulation; meso-scale model; resin rich area; stiffness