doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.03.010

检验与维护

纤维缠绕复合材料管道中的超声波传播特性研究

束　沛[1,2],杨乐辉[1,2],赵金玲[1,2],赵建平[1,2],常　乐[1,2],程经纬[3]
(1.南京工业大学 机械与动力工程学院,南京 211816;2.南京工业大学 高端装备可靠性制造研究院,南京 211816;
3.合肥通用机械研究院有限公司,合肥 230031)

摘　要:纤维缠绕复合材料管道(filament wound composite pipes,FWCP)中的纤维起伏会改变结构力学性能,从而影响超声导波传播特性,制约超声导波无损检测技术应用。针对上述问题,提出基于纤维起伏区域的细观模型及其等效刚度计算方法,将有限元特征频率法与Floquet周期性边界条件结合,构建FWCP的导波有限元模型,分析纤维起伏对导波传播特性的影响规律。结果表明,纤维起伏会使FWCP刚度整体变小,从而导致超声导波的相速度变小,但导波的模态属性未发生改变。缠绕角度对导波结构影响较小,也未引起导波的模态属性改变。本研究可为FWCP中超声波无损检测提供理论支撑。

关键词:复合管道;纤维缠绕复合材料;纤维起伏;无损检测;超声导波
中图分类号:TH145;TB333.23;TG115.285　　**文献标志码:**B

Ultrasonic wave characteristics in filament wound composite pipes

SHU Pei[1,2],YANG Lehui[1,2],ZHAO Jinling[1,2],ZHAO Jianping[1,2],CHANG Le[1,2],CHENG Jingwei[3]
(1.School of Mechanical and Power Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China;
2.Institute of Reliability Manufacturing for Advanced Equipment,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China;
3.Hefei General Machinery Research Institute Co.,Ltd.,Hefei 230031,China)

Abstract: The fiber undulation in filament wound composite pipes (FWCP) altered structural mechanical properties, thereby affecting ultrasonic guided wave propagation characteristics, which limited the application of ultrasonic guided wave non-destructive testing technology.In view of the above problems, meso-scale modeling of fiber undulation regions and equivalent stiffness calculation methods were proposed, combining the finite element eigenvalue frequency method with Floquet periodic boundary conditions, and establishing a guided wave finite element model for FWCP.The effects of fiber undulation on guided wave propagation characteristics were systematically investigated. The results demonstrate that fiber undulation reduces the overall stiffness of FWCP, leading to decreased phase velocity of ultrasonic guided waves while maintaining unchanged modal properties. Furthermore, the winding angle has a relatively small influence on the guided wave structure and does not cause changes in the modal properties of the guided wave. The research provides theoretical support for ultrasonic non-destructive testing in FWCP.

Key words: composite pipe; filament wound composites; fiber waviness; non-destructive testing; ultrasonic guided waves

0　引言

与传统材料相比,纤维缠绕复合材料具有高比强度、高比模量、优异的抗疲劳和减振性能,广泛应用于压力容器、管道运输、航空航天等领域[1]。在纤维缠绕复合材料成型工艺中,纤维铺层的空间交叉起伏现象会形成如孔洞、富树脂区等工艺缺陷,使该区域演变为裂纹扩展的初始点,对纤维缠绕复合材料结构的失效、破坏造成较大的影响[2]。因此,有必要对纤维缠绕复合材料进行定期检测,降低结构失效的风险,保障储运安全。超声导波凭借其长距离检测能力、非侵入性、

收稿日期:2025-01-07　**修回日期:**2025-03-08
基金项目:国家重点攻关项目(2023ZY01001)

便捷性与安全性高等优势，广泛应用于石油和天然气输送、航空航天和土木工程等行业[3-6]。

JOHN等[7]与LAMB[8]率先对弹性波在板中的传播特性展开研究，并成功推导出Rayleigh-Lamb方程。随后，圆柱壳中对称与非对称模态导波的传播规律被揭示，并以此为基础发现了圆柱壳与板中导波的频散特性[9]。全局矩阵建模方法[10]的提出，有效改进了传递矩阵法在求解超声导波传播方程时的局限性。XI等[11]采用半解析法研究了充液及真空条件下复合管道中超声导波的传播规律。此外，利用全局矩阵法[12]可以推导多层柱体中超声导波的传播理论，分析带有包裹层的管道中超声导波的传播特性。复合材料缠绕成型过程中的纤维起伏会对材料刚度产生影响[13]，而超声导波的传播特性与材料刚度紧密相关[14]，需要明确纤维起伏对其影响机理，才能进一步进行含纤维起伏管道结构的无损检测。

为了探明纤维起伏对超声导波传播的影响机理，文中将有限元特征频率法与Floquet周期性边界条件相结合，构建含纤维起伏的复合材料管道导波频散模型，明晰纤维起伏对FWCP中超声波传播特性的影响。

1 纤维缠绕复合材料力学性能研究

1.1 菱形元胞及其离散模型

FWCP可视为由一系列周期性重复的菱形元胞构成[15]。缠绕过程中，新缠绕的纤维束与内层纤维束相互交叉起伏，形成环向交叉起伏区域和螺旋交叉起伏区域两种形态。菱形元胞包含3个区域，A：环向交叉起伏区，B：螺旋向交叉起伏区，C：层合区，如图1(a)(b)所示。

采用相互平行的截面将环向交叉起伏区离散为MN个子块，如图1(c)(d)所示。每个子块表征缠绕复合材料交叉起伏区的细观特征，体现纤维束与基体的分布及排列方式。针对缠绕复合材料交叉起伏区，运用纤维束起伏角、纤维束体积分数等参数即可建立交叉起伏区的细观结构模型。

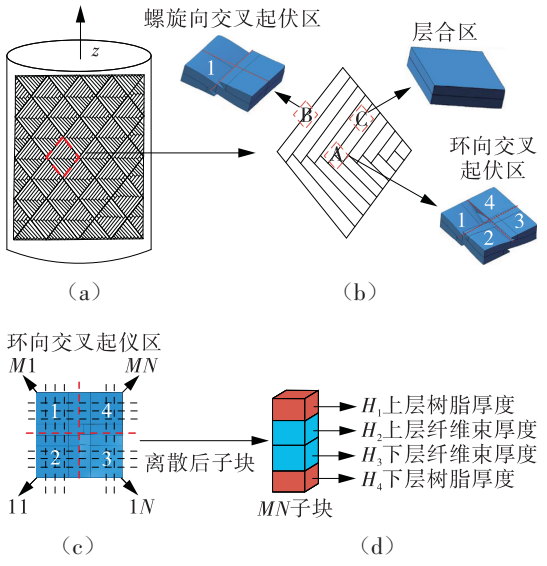


图1 纤维缠绕菱形元胞及其离散模型

Fig.1 Fiber wound rhombus cell and its discrete model

1.2 子块中基体及纤维含量的确定

选用三角函数来描述交叉起伏区纤维束的起伏路径：

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

式中，$g(w)$为纤维束起伏的形状函数[16]；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，假设起伏区域长度约为纤维束厚度的8倍[17]，如图2所示。

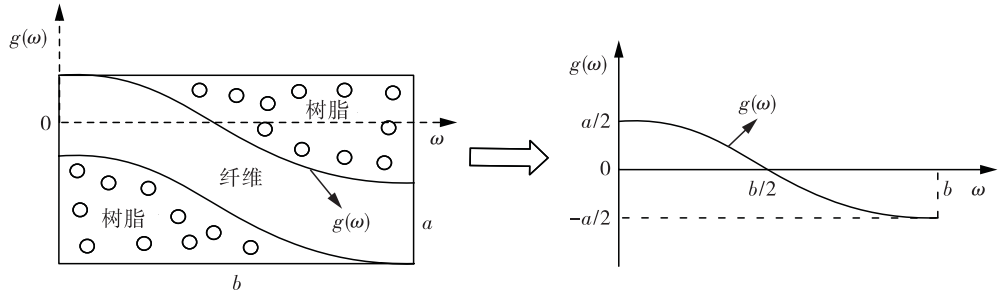


图2 纤维束起伏示意

Fig.2 Schematic of fiber bundle undulations

为便于分析和讨论，将环向交叉起伏区细观模型划分为4个子区域，如图1(c)所示。离散后各子块基体以及纤维束厚度可以由式(2)确定，其中H代表厚度，H_1，H_2，H_3，H_4分别代表上层树脂厚度、上层纤维束厚度、下层纤维束厚度、下层树脂厚度。

（1）针对环向交叉起伏区：

区域1：

$$\begin{cases} H_1=2a-H_2-H_3 \\ H_2=2\times\dfrac{m-M/2}{M}\left[a-a\cos\left(\dfrac{n-1}{N}\pi\right)\right]+a \\ H_3=a\cos\left(\dfrac{m-M/2-1}{M}\pi\right) \\ H_4=0 \end{cases} \tag{2}$$

式中，$m=1,2,3,\cdots,M/2$；$n=1,2,3,\cdots,N/2$。

区域2：

$$\begin{cases} H_1=a-H_2 \\ H_2=a\cos\left(\dfrac{m-M/2-1}{M}\pi\right) \\ H_3=a\cos\left(\dfrac{n-1}{N}\pi\right) \\ H_4=a-H_3 \end{cases} \tag{3}$$

式中，$m=-M/2,\cdots,-2,-1$；$n=1,2,3,\cdots,N/2$。

区域3：与区域1一致。

区域4：

$$\begin{cases} H_1=a-H_2 \\ H_2=2\times\dfrac{m-M/2}{M}\left[a-a\cos\left(\dfrac{n-1}{N}\pi\right)\right]+a \\ H_3=a \\ H_4=0 \end{cases} \tag{4}$$

式中，$m=1,2,3,\cdots,M/2$；$n=N/2,\cdots,N$。

螺旋向交叉起伏区细观模型关于中心点对称，取1/4模型分析各个子块纤维以及树脂的厚度。

（2）针对螺旋向交叉起伏区：

区域1：

$$\begin{cases} H_1=0 \\ H_2=a\cos\left(\dfrac{m-1}{M}\pi\right) \\ H_3=a \\ H_4=a-H_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中，$m=1,2,3,\cdots,M/2$；$n=1,2,3,\cdots,N/2$。

1.3 菱形元胞等效刚度模型

通过纤维束起伏角α来构建刚度转换矩阵，在纤维束坐标系（1-2-3）下，将子模型内纤维束的原始刚度参数进行矩阵变换，得到缠绕面上纤维束的等效刚度参数。再利用缠绕角β把缠绕面上纤维束的等效刚度参数转化为管道坐标系（$r-\theta-z$）下纤维束等效刚度参数，如图3所示。

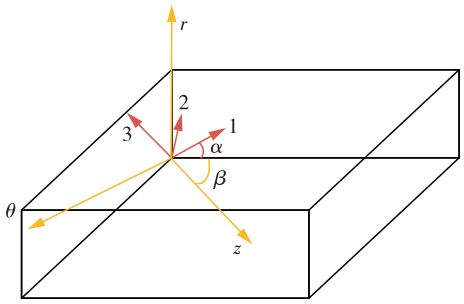


图3 *MN*子块的坐标系

Fig.3 Coordinate system of *MN* sub-block

子模型内含有两段纤维束和两层树脂，应用串联混合律与并联混合律，计算每个子模型的工程弹性常数；再沿纤维起伏方向积分，可获得纤维束坐标系下的等效刚度参数；最后，采用均值法求解整个菱形元胞的刚度参数[17]。

1.4 纤维缠绕复合材料力学性能分析

碳纤维材料为T300，纤维缠绕角为±45°，纤维束厚度为0.1 mm，纤维束宽度为0.8 mm，纤维密度为1 600 kg/m^3，环氧树脂密度为800 kg/m^3，其主方向工程弹性常数如表1所示，其中E为拉伸模量，G为剪切模量，V为泊松比，坐标系见图3。

经等效刚度法[17]计算，3个区域及菱形元胞的工程弹性常数如表2所示。

表1 T300碳纤维和环氧树脂的工程弹性常数

Tab.1 The elastic modulus of T300 carbon fiber and epoxy resin

材料	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{23}/GPa	G_{13}/GPa	G_{12}/GPa	V_{23}	V_{13}	V_{12}
T300	157.57	16.58	16.51	3.37	7.48	7.48	0.08	0.20	0.20
环氧树脂	4.57	4.57	4.57	1.73	1.73	1.73	0.32	0.32	0.32

通过对比各区域的工程弹性常数，可以得出以下结论。

（1）起伏区的E_{zz}，$E_{\theta\theta}$，E_{rr}和$G_{\theta r}$，G_{zr}，$G_{z\theta}$均小于层合区域，而$V_{\theta r}$，V_{zr}，$V_{z\theta}$则大于层合区；

（2）环向交叉起伏区的E_{zz}，$E_{\theta\theta}$，E_{rr}和$G_{\theta r}$，G_{zr}，$G_{z\theta}$均小于螺旋向交叉起伏区，而$V_{\theta r}$，V_{zr}，$V_{z\theta}$则大于螺旋向交叉起伏区。

相对于层合区，起伏区纤维束交叉起伏导致

纤维束相互挤压，纤维束截面形状发生变化，且截面积减小，具体表现为，图1(d)中H_2和H_3变小，H_3和H_4增加，导致起伏区内纤维束体积分数减少、树脂的体积分数增加，而树脂的主刚度小于纤维束，使起伏区主刚度相对于层合区也发生类似变化。

表2 各区域及菱形元胞的工程弹性常数

Tab.2 Engineering elastic constants of each region and rhombic unit cell

区域	E_{zz}/GPa	$E_{\theta\theta}$/GPa	E_{rr}/GPa	$G_{\theta r}$/GPa	G_{zr}/GPa	$G_{z\theta}$/GPa	$V_{\theta r}$	V_{zr}	$V_{z\theta}$
层合区	19.51	19.51	14.82	4.63	4.63	13.10	0.16	0.16	0.30
环向交叉起伏区	17.19	17.19	11.78	3.91	3.91	11.21	0.20	0.20	0.32
螺旋向交叉起伏区	17.52	17.52	12.30	4.01	4.01	11.61	0.18	0.18	0.30
菱形元胞	18.11	18.11	13.01	4.21	4.21	12.22	0.18	0.18	0.31

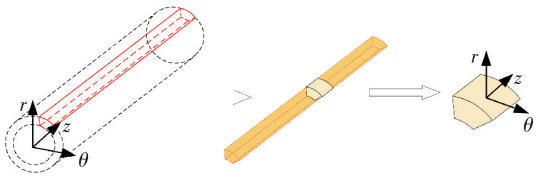
从图1(b)起伏区模型可看出，环向交叉起伏区中参与纤维起伏的纤维束数量多于螺旋向交叉起伏区，在子模型中，这种复杂性表现为纤维束层厚度的减少，树脂层厚度的增加，导致纤维束体积分数下降，树脂体积分数上升，从而引起上述工程弹性常数的变化。

2 FWCP导波模型

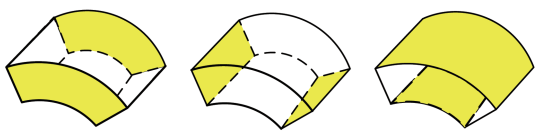
2.1 有限元特征频率法

2.1.1 基本原理

基于Floquet周期边界条件的有限元特征频率法的基础是固体物体中的周期结构理论[18]。管道沿轴向可视为周期性结构，如图4(a)所示。为了分析导波在管道中的传播特性，可以将Floquet原理与周期性理论相结合，将管道导波频散控制方程转化为元胞特征频率方程进行求解。



(a)管道示意



(b)Floquet边界 (c)连续性边界 (d)自由边界

图4 管道结构的元胞模型及边界条件

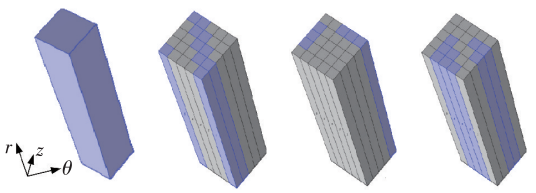
Fig.4 Cell model of pipe structure and boundary conditions

2.1.2 元胞模型

将管道简化成如图4(a)的元胞结构，并施加相应边界条件，如图4(b)~(d)，不仅可以显著减少网格数量，还能更直观地分析管道导波的波结构特性[19]。

2.2 频散特性分析

在COMSOL中建立相应的模型，纤维缠绕角为45°，设置菱形元胞几何参数(轴向长度4 mm、厚度20 mm、内径200 mm)，视为整体元胞模型，如图5(a)所示，材料参数为表2中菱形元胞的参数。将其划分为25个子单元，分别按照表2中各对应区域为3个区域的弹性模量赋值，视为分割元胞模型，如图5(b)~(d)所示。



(a)整体菱形元胞 (b)环向交叉起伏区 (c)螺旋向交叉起伏区 (d)层合区

图5 分割元胞与整体元胞模型

Fig.5 Segmented cell and integral cell model

设置自由四面体网格，单元尺寸为0.1 mm，设置扫描波数k范围为$[0,\frac{\pi}{l}]$，其中l为起伏长度，求解波导的特征频率f，获得整体元胞组成的管道和分割元胞组成的管道的(f,k)频散曲线，见图6。

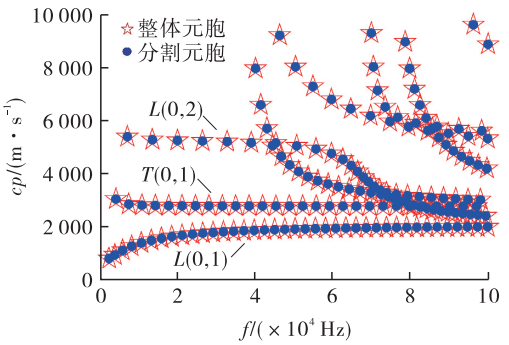


图6 整体元胞组成的管道与分割元胞组成的管道频散曲线对比

Fig.6 Comparison of dispersion curves between integral cell and segmented cell

可以看出,分割后元胞组成的管道的频散曲线与整体元胞组成的管道的频散曲线具有较高的一致性,验证了表2中分割元胞的工程弹性常数与整体元胞的工程弹性常数的等效性。

3 纤维起伏对超声波传播特性的影响

3.1 纤维起伏对频散曲线的影响

以图5(a)整体元胞模型为基础,分别将管道材料参数赋为表2层合区(不考虑纤维起伏)和表2菱形元胞(考虑纤维起伏)的材料参数,基于有限元特征频率法求解出两种管道中导波的频散曲线,如图7所示。可以看出,在给定频率下,纤维起伏管道中基础导波模态的相速度小于层合管道;纤维起伏管道中,高阶导波模态的截止频率变小。

由表2可以看出,层合区主刚度略大于起伏区,因此,层合管道的相速度更高;高阶模态的截止频率与剪切模量有关,纤维起伏导致管道剪切模量发生改变,从而导致高阶模态截止频率变化[20]。

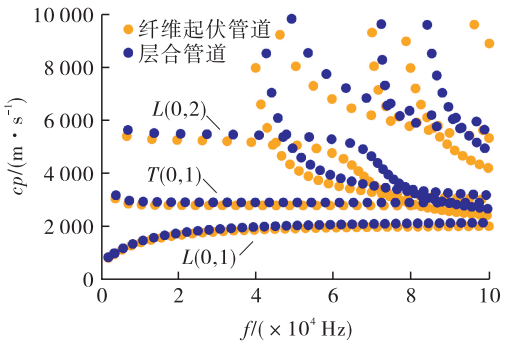
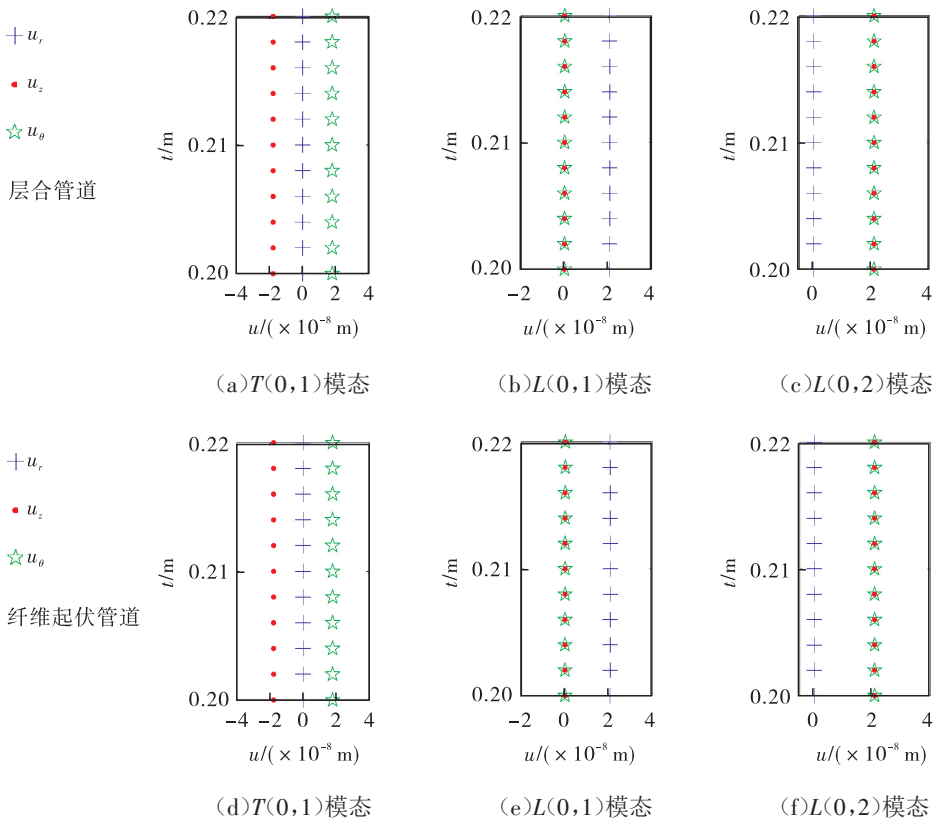


图7 层合管道和纤维起伏管道的频散曲线对比

Fig.7 Comparison of dispersion curves between laminated cells and fiber undulation cells

3.2 纤维起伏对导波波结构的影响

基于第2节整体元胞模型,提取其厚度方向r上的位移分量,分别导出位移场u_r,u_θ,u_z的分量数据,对比层合管道和纤维起伏管道的导波波结构,如图8所示。



(a)$T(0,1)$模态 (b)$L(0,1)$模态 (c)$L(0,2)$模态

(d)$T(0,1)$模态 (e)$L(0,1)$模态 (f)$L(0,2)$模态

图8 层合管道和纤维起伏管道的导波波结构对比

Fig.8 Comparison of guided wave structures between laminated cells and fiber undulation cells

由图8(a)(c)(d)(f)可以看出,$T(0,1)$和$L(0,2)$模态位移量占主导的是u_θ和u_z,表明纤维缠绕角的存在,使导波传播的位移分量发生耦合;由图8(b)(e)可以看出,位移量占主导的是u_r方

向，对应$L(0,1)$模态。

整体而言，纤维起伏对导波波结构影响较小，无论是层合元胞、纤维起伏元胞，导波的模态属性未发生改变。这是由于纤维起伏虽然会造成菱形元胞的刚度发生改变，但是变化量级较小，不足以改变基础模态属性。

4 缠绕角度对导波模态的影响研究

以整体菱形元胞管道模型为基础，选取缠绕角分别为35°和55°的菱形元胞管道进行研究[21-22]，在仅改变缠绕角度情况下，计算得到菱形元胞的工程弹性常数，其结果如表3所示。

表3 缠绕角为35°和55°的菱形元胞工程弹性常数

Tab.3 Engineering elastic constants of rhombic cells with winding angles of 35° and 55°

缠绕角	E_{zz}/GPa	$E_{\theta\theta}$/GPa	E_{rr}/GPa	$G_{\theta r}$/GPa	$G_{z\theta}$/GPa	G_{zr}/GPa	$V_{\theta r}$	V_{zr}	$V_{z\theta}$
35°	22.51	15.1	12.11	1.05	4.41	3.62	0.35	0.15	0.23
55°	15.1	22.52	12.11	4.41	1.05	3.62	0.15	0.35	0.23

在同一坐标系下分别绘制出缠绕角为35°和55°的纤维缠绕管道的频散曲线对比图，如图9所示。可以看出，给定频率下，缠绕角为55°时FWCP的$T(0,1)$模态的相速度相对于缠绕角为35°时较小，而$L(0,2)$模态的相速度相对于缠绕角为35°时较大；在给定频率下，缠绕角为35°和55°的FWCP，$L(0,1)$模态的相速度相差不大。这是由于缠绕角度决定了纤维相对于管道轴向的方向，进而影响材料的各向异性。

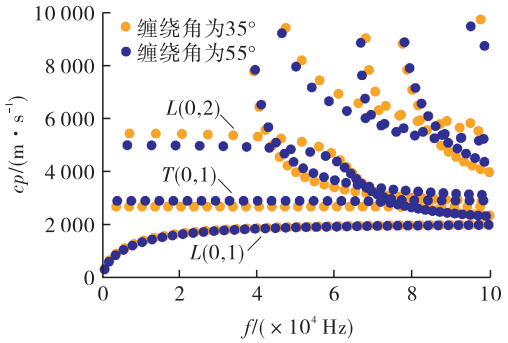
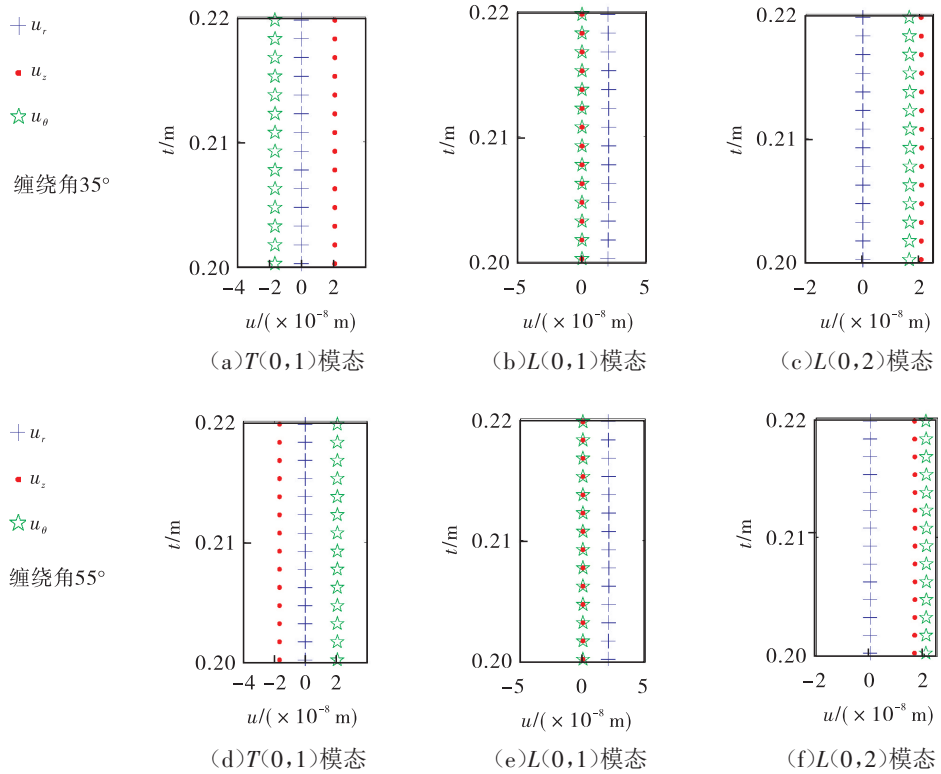


图9 缠绕角为35°和55°的管道频散曲线对比

Fig.9 Comparison of dispersion curves of rhombic cells with winding angles of 35° and 55°.



(a)$T(0,1)$模态 (b)$L(0,1)$模态 (c)$L(0,2)$模态

(d)$T(0,1)$模态 (e)$L(0,1)$模态 (f)$L(0,2)$模态

图10 缠绕角为35°和55°的管道导波波结构对比

Fig.10 Comparison of guided wave structures with winding angles of 35°and 55°

缠绕角为35°的FWCP和缠绕角为55°的FWCP相比,纤维束材料的主方向相对于管道轴向的分量较大,相对于管道切向的分量较小,使缠绕角为35°的纤维起伏管道E_{zz}和G_{zr}大于缠绕角为55°的纤维起伏管道,导致$L(0,2)$模态的上移和$T(0,1)$模态的下降。

提取其厚度方向r上的位移分量,分别导出位移场u_r,u_θ,u_z的分量数据,形成导波波结构对比图,如图10所示。可以看出,$T(0,1)$和$L(0,2)$模态位移量占主导的是u_θ和u_z,$L(0,1)$模态位移量占主导的是u_r方向。

整体而言,纤维缠绕角度对导波波结构影响较小,导波模态属性未发生改变。但对于$T(0,1)$和$L(0,2)$模态而言,随着缠绕角度的增大,纤维束材料的主方向相对于管道轴向的分量减小,对于管道切向的分量增大,会导致u_z的减小和u_θ的增大,使得模态中最大位移所对应的方向发生改变。

5 结论

以纤维缠绕复合材料管道为研究对象,考虑纤维束交叉起伏因素,研究了纤维缠绕复合材料的力学性能及FWCP中的超声导波的传播特性,结论如下。

(1)建立了纤维起伏的细观模型,基于等效刚度法,研究不同起伏区域的力学性能。环向交叉起伏区的拉伸模量和剪切模量小于螺旋向交叉起伏区和层合区,而泊松比则相反。纤维起伏复杂度的增加会显著降低拉伸模量和剪切模量,同时提升泊松比。

(2)基于有限元特征频率法,引入Floquet周期性边界条件,建立了FWCP导波频散特性模型,验证了分割元胞模型和整体模型的等效性。

(3)研究了纤维起伏对超声波传播特性的影响,由于纤维起伏的存在,导致结构整体刚度的减小,从而使得频散曲线整体下降。但刚度变化量较小,纤维起伏对导波波结构影响不大,不足以改变基础模态属性。

(4)纤维缠绕角度对导波波结构影响较小,导波的模态属性未发生改变。但对于$T(0,1)$和$L(0,2)$模态而言,缠绕角度的增大使得纤维束材料的主方向相对于管道轴向的分量减小,使得模态中最大位移所对应的方向发生改变。

(5)基于上述纤维起伏对导波传播特性的影响分析,形成纤维缠绕管道超声波无损检测的指导意见:对于依赖先验相速度的无损检测方法,考虑纤维起伏的影响,需适当调小相速度,以获得更加准确的频散曲线;纤维起伏会导致高阶模态截止频率降低,试验时可选择频率更低的基频模态作为主导振动模式;对于需要扫描成像的试验,考虑纤维起伏的影响(相速度减小,即波长减小)需适当调小扫描间距,从而提高成像的分辨率。

参考文献:

[1] 刘雁鹏,任中杰,韩宇泽,等.超薄单层复合材料缠绕压力容器承载性能研究[J].压力容器,2024,41(1):45-52.
LIU Y P,REN Z J,HAN Y Z,et al.Research on the load bearing performance of ultra-thin-ply composite wound pressure vessels [J]. Pressure Vessel Technology,2024,41(1):45-52.

[2] ARELLANO M T,CROUZEIX L,DOUCHIN B,et al. Strain field measurement of filament-wound composites at ±55° using digital image correlation:An approach for unit cells employing flat specimens[J]. Composite Structures,2010,92(10):2457-2464.

[3] 李沁霏,张蒲根,罗志,等.基于导波频散补偿的多腐蚀损伤无基线智能检测方法研究[J].压力容器,2024,41(11):57-65.
LI Q F,ZHANG P G,LUO Z,et al. Research on intelligent detection method for multiple corrosion defects without baseline based on guided wave dispersion compensation [J]. Pressure Vessel Technology,2024,41(11):57-65.

[4] 郭远顺,于新海,赵桂生,等.安全阀气体泄漏在线监测方法研究[J].流体机械,2023,51(3):77-83.
GUO Y S,YU X H,ZHAO G S,et al. Research on on-line monitoring method of gas leakage of safety valve[J].Fluid Machinery,2023,51(3):77-83.

[5] 嵇闯,张丽稳,杨喜良,等.超声波流量计流体异常诊断与处理方法研究[J].机电工程,2024,41(5):924-932.
JI C,ZHANG L W,YANG X L,et al. Ultrasonic flowmeter fluid anomaly diagnosis and processing method research [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2024,41(5):924-932.

[6] 郑金松.仓储物流搬运机器人控制系统设计与应用[J].包装与食品机械,2023,41(3):59-64.
ZHENG J S.Design and application of control system for warehouse logistics handling robot[J]. Packaging

and Food Machinery,2023,41(3):59-64.

[7] JOHN W S,BARON R.The theory of sound[M].New York:Dover Publications,1945.

[8] LAMB H.On waves in an elastic plate[J].Proceedings of The Royal Society A,1917,93:114-128.

[9] GAZIS D C. Exact analysis of the plane-strain vibrations of thick-walled hollow cylinders [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(8):786-794.

[10] KNOPOFF L. A matrix method of elastic wave problems [J]. Bulletin of the Ssmological Society of America,1964,54(1):431-438.

[11] XI Z C, LIU G R, LAM K Y, et al. Dispersion and characteristic surfaces of waves in laminated composite circular cylindrical shells [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(5): 2179-2186.

[12] BARSHINGER J N,ROSE J L.Ultrasonic guided wave propagation in pipes with viscoelastic coatings [J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2002,615:239-246.

[13] 和欣辉,韩小平.纤维缠绕复合材料起伏区域残余应力[J].材料工程,2016,44(4):76-81.
HE X H, HAN X P. Residual stresses in local fiber undulations for filament-wound composites[J].Journal of Materials Engineering,2016,44(4):76-81.

[14] LOWE M J S, NEAU G, DESCHAMPS M. Properties of guided waves in composite plates and implications for NDE [J]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation,2004,23:214-222.

[15] MORTON J B,SANDERS P,VOHRA J K,et al.Effect of chronic right atrial stretch on atrial electrical remodeling in patients with an atrial septal defect[J]. Acc Current Journal Review,2003,12(13):89.

[16] 孙江,肖琪.考虑纤维波动[+φ/-φ]缠绕角管件的轴向弹性模量计算方法[J].玻璃钢/复合材料,2006(1):38-41.
SUN J, XIAO Q. Method for calculating axial elastic modules of [+φ/-φ] filament wound tubes based on considering filament undulation [J]. Fiberglass/Reinforced Composites,2006(1):38-41.

[17] 姜云鹏,岳珠峰,卢文书,等.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(3):33-37.
JIANG Y P, YUE Z F, LU W S, et al. Effect of fiber undulating zone on the macro elastic modulus of fiber winding composites[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2005,18(3):33-37.

[18] 李正中.固体理论(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2002.
LI Z Z. Solid state theory (2nd edition)[M]. Beijing: Higher Education Press,2002.

[19] ZINDE I D, BAKIS C E. Nonlinear micromechanical model of filament-wound composites considering fiber undulation [J]. Mechanics of Composite Materials, 2011,47(1):73-94.

[20] ZHAO J L, JI H L, QIU J H, et al. Single-ply elastic properties determination in CFRP laminates using a combined ultrasonic method[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33 (20): 2604-2615.

[21] 王业成,王馨锐,王晓宏,等.复合材料回转壳体纤维缠绕角度设计及试验验证[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,49(2):31-38.
WANG Y C, WANG X R, WANG X H, et al. Fiber winding angle design and experimental verification of composite rotary shell [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science),2024,49(2):31-38.

[22] 沈创石.计及纤维交叉起伏影响的缠绕复合材料力学性能研究[D].西安:西北工业大学,2018.
SHEN C S. Research on mechanical behaviors of filament wound composite considering fiber crossover and undulation[D].Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2018.

作者简介:束沛(1995),男,主要从事超声波无损检测研究工作,通信地址:211816江苏省南京市浦口区浦珠南路30号南京工业大学江浦校区,E-mail:786808961@qq.com。

本文引用格式:
束沛,杨乐辉,赵金玲,等.纤维缠绕复合材料管道中的超声波传播特性研究[J].压力容器,2025,42(3):79-86.
SHU Pei,YANG Lehui,ZHAO Jinling,et al.Ultrasonic wave characteristics in filament wound composite pipes[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(3):79-86.