

# 结构取向角对仿生复合材料旋翼桨叶弹性性能的影响

李秋燃, 张艳艳, 袁建成, 韩依诺  
(中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 广汉 618307)

**摘要:** 直升机旋翼桨叶的结构刚度对旋翼系统飞行性能与稳定性具有重要影响。为了研究结构取向角对仿生复合材料旋翼桨叶弹性性能的影响, 借鉴昆虫角质层结构再取向特征, 建立基于结构取向角的仿生复合材料旋翼桨叶有限元模型; 基于复合材料力学理论, 建立不同结构取向角下材料的等效杨氏模量预测模型; 利用 ABAQUS 对桨叶在不同结构取向角下的力学响应进行数值分析, 通过提取应力、应变数据计算桨叶等效杨氏模量。结果表明: 有限元计算结果与理论预测值误差均小于 20%, 模型具有较好的可靠性; 随着结构取向角增大, 复合材料桨叶等效杨氏模量整体呈下降趋势, 结构取向角对桨叶等效杨氏模量及刚度具有显著影响。

**关键词:** 仿生复合材料; 直升机旋翼桨叶; 有限元方法; 结构取向; 刚度

中图分类号: V25; TB391

文献标识码: A

## Effect of structural orientation angle on the elastic properties of biomimetic composite rotor blades

LI Qiuran, ZHANG Yanyan, YUAN Jiancheng, HAN Yinuo

(College of Aviation Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The structural stiffness of helicopter rotor blades plays a critical role in the flight performance and stability of rotor systems. To investigate the effect of structural orientation angle on the elastic properties of biomimetic composite rotor blades, a finite element model incorporating structural orientation was developed, inspired by the reorientation characteristics of insect cuticle. Based on composite mechanics theory, a predictive relationship for the equivalent Young's modulus under different orientation conditions was derived. Numerical simulations were carried out in ABAQUS to evaluate the mechanical responses of the blades at various structural orientation angles, and the equivalent Young's modulus was determined from the extracted stress-strain data. The results indicate that the discrepancy between finite element predictions and theoretical values is within 20%, demonstrating good model reliability. Furthermore, the equivalent Young's modulus of the composite rotor blade decreases with increasing structural orientation angle, indicating that the orientation angle has a significant influence on both the equivalent Young's modulus and structural stiffness.

**Key words:** biomimetic composite; helicopter rotor blades; finite element method; structural orientation; stiffness

收稿日期: 2026-03-10; 修回日期: 2026-06-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(25CAFUC01011, 25CAFUC09001)

通信作者: 张艳艳(1982—), 女, 博士, 教授。E-mail: 191965684@qq.com

引用格式: 李秋燃, 张艳艳, 袁建成, 等. 结构取向角对仿生复合材料旋翼桨叶弹性性能的影响[J]. 航空工程进展.

LI Qiuran, ZHANG Yanyan, YUAN Jiancheng, et al. Effect of structural orientation angle on the elastic properties of biomimetic composite rotor blades[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

## 0 引言

直升机旋翼系统是直升机产生升力并实现飞行控制的关键部件,其旋翼桨叶的结构性能直接影响飞行效率、稳定性及安全性,因此,直升机旋翼桨叶的选材十分关键,要求材料必须具有高比强度、高比刚度、耐疲劳等优异性能。复合材料具有较高的比强度和比模量,并具备良好的耐疲劳性能,在旋翼桨叶结构中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。在此基础上,通过对复合材料内部结构形式进行合理设计,尤其是纤维取向及层间排布的优化,可在保证结构强度的同时进一步提升桨叶整体刚度与结构效率。Friedmann等<sup>[2]</sup>研究发现复合材料层合方向对叶片稳定性有显著影响;Mitra等<sup>[3]</sup>着重研究优化叶片蒙皮的纤维取向,以最大限度地发挥扭转—顺桨耦合机制的优势,从而提升水平轴风力涡轮机叶片的动态性能;Fraihat等<sup>[4]</sup>研究发现,在某些情况下,将结构布局 and 材料层合方向二者结合起来可以平衡冲切和冲蚀效应;Kameyama等<sup>[5]</sup>研究了层合板构型对复合材料板翼颤振和发散特性的影响,并将颤振和发散特性表示在层合板参数平面上;Abed等<sup>[6]</sup>分析了纤维取向和添加材料对复合材料机翼结构气动弹性性能的影响,发现纤维取向对结构动力学有显著影响,零纤维取向时固有频率和颤振阻力最高,而纤维角度增大则二者均降低。上述研究表明,复合材料结构设计方法在旋翼桨叶结构设计中具有重要意义。

仿生复合材料以生物的不同特征为出发点,搭建起复合材料与仿生思想的桥梁<sup>[7]</sup>。与常规材料相比,新型仿生复合材料具有高比强度、高比模量、高抗疲劳等优势,已在多个领域获得广泛研究与应用<sup>[8-11]</sup>。生物材料的一个基本特征是,它们中的大多数可以被看作是某些长度尺度上的复合材料,包括至少两个具有不同机械性能的阶段,特别是刚度<sup>[12-15]</sup>。最常见的图案是在顺应性强的基体中嵌入坚硬的加固物,这种加固物通常具有较大的长宽比,并优先沿特定方向排列,该结构形式与合成纤维增强复合材料具有一定的相似特征,这种设计的主要示例包括木材、骨、鱼鳞和昆虫角质层<sup>[16]</sup>。这类生物材料通过纤维取向变化及层状结构的协同作用实现结构性能优化,为工程复合材料结构设计提供了有益的仿生路径。

近年来,仿生结构设计方法逐渐引入工程复

合材料领域,并在结构增强与能量吸收等方面取得了一定进展<sup>[17]</sup>。赵甫等<sup>[18]</sup>借鉴贝壳珍珠层结构特征构建多层金属框架仿生模型,并利用有限元方法分析其力学响应,结果表明层状结构能够提高结构承载能力和能量吸收性能;Liu Z Q等<sup>[19]</sup>研究了仿生“缝合结构”在界面增韧中的作用机理,从界面几何设计角度揭示了仿生结构提升材料力学性能的有效途径。总体来看,现有研究多集中于材料尺度或典型结构形式,对仿生结构特征的工程应用仍处于探索阶段。

综合已有研究可以发现,现阶段针对直升机旋翼桨叶的研究着重于气动性能分析、结构优化设计、振动特性研究等方面。关于仿生复合材料的研究中,大都集中于材料微观结构或单一材料体系的力学行为分析。例如,王昊等<sup>[7]</sup>建立了结构取向变化下的等效弹性参数预测模型,并分析了结构取向对仿生材料力学性能的影响规律。然而,结构取向变化对工程结构整体力学性能影响的研究仍相对较少。特别是在航空结构领域,针对仿生结构取向变化对旋翼桨叶整体刚度及弹性性能影响规律的研究仍鲜有报道。

与已有研究基于材料代表体单元开展分析不同,本文以旋翼桨叶整体结构为研究对象,研究结构取向变化对桨叶弹性性能及刚度特性的影响。借鉴自然界生物材料结构再取向特征,将结构取向调控思想引入复合材料旋翼桨叶结构设计中,构建考虑结构取向角变化的仿生复合材料旋翼桨叶有限元模型。在复合材料力学理论基础上,建立不同结构取向条件下桨叶结构的等效力学性能分析方法,并结合数值计算手段探讨结构取向变化对旋翼桨叶刚度特性的影响规律。通过理论分析与数值结果的对比,进一步评估结构取向设计在旋翼桨叶结构优化中的应用潜力,以期对复合材料旋翼结构设计提供参考。

## 1 模型选取及建立

### 1.1 几何模型建立

查阅直升机相关文献后,了解到美国贝尔直升机公司研制的五座轻型通用直升机贝尔-206BⅢ该机型在工程应用中具有较高的可靠性与成熟度。本次研究最终选定贝尔-206BⅢ的旋翼作为典型翼型,本文旋翼桨叶的几何参数均基于该机

型。贝尔-206BⅢ旋翼的几何参数如表1所示。

表1 旋翼平面几何参数  
Table 1 Geometric parameters of rotor plane

| 旋翼直径/m | 桨叶弦长/m | 旋翼桨叶面积/m <sup>2</sup> | 旋翼桨盘面积/m <sup>2</sup> |
|--------|--------|-----------------------|-----------------------|
| 10.16  | 0.33   | 3.35                  | 81.07                 |

在选定典型翼型后,根据得到的旋翼外形参数,利用有限元软件ABAQUS建立一个以贝尔-206BⅢ为原型的用于研究结构取向效应的仿生双相简化模型,为突出结构取向角对力学性能的影响规律,本文忽略复杂内部构型,仅保留增强相—基体相两相结构特征。建模过程如下:首先,根据几何参数建立旋翼三维实体模型。其次,对模型分别赋予碳纤维与铝合金材料属性,其中碳纤维作为增强相,铝合金作为基体相。碳纤维杨氏模量取400 GPa,铝合金杨氏模量取70 GPa,两种材料均采用线弹性本构模型,泊松比均取0.30。增强相与基体相沿桨叶截面交替分布,根据模型几何分布,两相体积分数均约为50%。各工况下材料组成及体积分数保持不变,仅改变结构取向角。随后,建立分析步并设置边界条件,在桨根处施加固定约束,在桨尖端面沿桨叶轴向施加大小为0.1 m的位移载荷;最后,对模型进行网格划分并提交计算。主要步骤如图1所示。

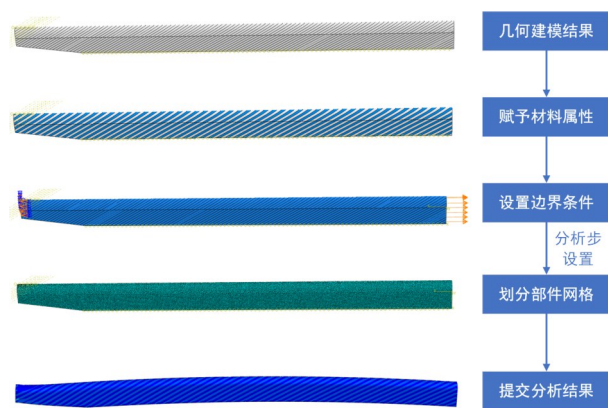


图1 建模过程  
Fig. 1 Modeling process

## 1.2 网格划分与无关性验证

模型建立完成后,为保证有限元计算结果的准确性与可靠性,同时兼顾计算效率,对模型进行了网格收敛性分析。考虑到模型内部存在不同结构取向的斜向分区及复杂界面特征,采用十节点

二次四面体实体单元(C3D10)对模型进行离散,并分别选取0.04、0.03和0.025 m三种网格尺寸开展计算。不同网格尺寸下的单元数量及等效杨氏模量计算结果如表2所示。

表2 网格收敛性分析结果  
Table 2 Mesh convergence analysis results

| 网格尺寸/m | 单元数量/个 | 等效杨氏模量/GPa |
|--------|--------|------------|
| 0.040  | 19 881 | 89.1       |
| 0.030  | 33 062 | 115.3      |
| 0.025  | 46 990 | 115.8      |

从表2可以看出:当网格尺寸由0.03 m进一步减小至0.025 m时,所得等效杨氏模量相对误差仅为0.43%,说明计算结果已基本收敛,满足网格无关性要求。综合考虑计算精度与计算效率,最终选取网格尺寸为0.03 m(对应单元数量33 062)作为后续数值分析的网格方案。

## 2 公式及理论验证

本文从仿生复合材料微观结构的几何取向角度出发,基于线弹性结构本构关系,建立两相仿生复合材料的微有限元模型,以弹性常数串联、并联预测模型以及Liu Z Q等<sup>[16]</sup>研究的仿生材料结构再定向下弹性参数预测模型,进行不同结构取向直升机旋翼仿生桨叶的杨氏模量预测,分析结构取向对直升机旋翼仿生桨叶刚度的影响。由复合材料力学可以得到两相复合材料串并联的理论解,直升机旋翼复合材料的表观杨氏模量,据复合材料在等应变和等应力状态下的规则进行简单描述<sup>[16]</sup>。首先,串联模型下的复合材料的杨氏模量推导过程为

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_1$ 为串联模型的轴向应变。

若串联模型的两相材料均处于弹性状态,则应力为

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f = E_f \bar{\epsilon}_1 \quad (2)$$

$$\sigma_m = E_m \epsilon_m = E_m \bar{\epsilon}_1 \quad (3)$$

平均应力 $\sigma_1$ 作用在横截面 $A$ 上, $\sigma_f$ 作用在纤维横截面积 $A_f$ 上, $\sigma_m$ 作用在基体横截面积 $A_m$ 上, $E_f$ 和 $E_m$ 分别代表纤维和基体的杨氏模量,作用在复合材料体积单元上的合力为

$$P = A\bar{\sigma}_1 = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4)$$

综合式(1)~式(4)可以得到:

$$E_1 \bar{\epsilon}_1 = E_f \bar{\epsilon}_1 \frac{A_f}{A} + E_m \bar{\epsilon}_1 \frac{A_m}{A} \quad (5)$$

消去  $\bar{\epsilon}_1$  并引入相对体积分分数,  $V_f = A_f/A$ ,  $V_m = A_m/A$ ,  $V_f$  和  $V_m$  分别代表纤维和基体的体积分数。复合材料内无空隙, 则得到:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (6)$$

式(6)为串联模型下复合材料的表观杨氏模量。

由串联模型得出复合材料的杨氏模量后, 接下来对并联模型下复合材料的杨氏模量进行推导, 仍然用材料力学分析方法, 假定纤维和基体承受相等的横向应力  $\bar{\sigma}_2$ , 纤维和基体的横向应变分别是:

$$\epsilon_f = \frac{\bar{\sigma}_2}{E_f} \quad (7)$$

$$\epsilon_m = \frac{\bar{\sigma}_2}{E_m} \quad (8)$$

$\epsilon_f$  作用的横向尺寸近似等于  $V_f B$ ,  $\epsilon_m$  作用的横向尺寸近似为  $V_m B$ ,  $B$  为单元宽度。

总横向变形为

$$\Delta B = \bar{\epsilon}_2 B = V_f B \epsilon_f + V_m B \epsilon_m \quad (9)$$

由上可得:

$$\epsilon_2 = V_f \epsilon_f + V_m \epsilon_m = \bar{\sigma}_2 \left( \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right) \quad (10)$$

由此得:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (11)$$

以上为并联模型下复合材料的表观杨氏模量。

由复合材料力学得出串并联模型的表观杨氏模量以后, 根据 Liu Z Q 等<sup>[16]</sup>提出的任意取向仿生结构杨氏模量理论模型, 可以得出任意取向角  $\theta$  的表观杨氏模量  $E_T$  的表达式。

假设一个准静态负载条件, 以确保结构在变形过程中可以完全重新定向。在这种情况下, 复合材料在变形过程中由结构重取向引起的应变  $\epsilon$  可以与结构定向相关:

$$\frac{d\epsilon}{d\theta} = -\sin \theta / \cos \theta \quad (12)$$

这给出了应变与方向角  $\theta$  函数的解决方

案, 即:

$$\epsilon = \ln(\cos \theta / \cos \theta_0) \quad (13)$$

式中:  $\theta_0$  为变形前复合材料的原始取向角; 当拉伸加载时,  $\epsilon_T \in [0, -\ln \cos \theta_0]$ ; 当压缩加载时,  $\epsilon_c < 0$ 。

在单层拉伸的情况下, 复合材料在任意方向上的杨氏模量  $E_T$ , 考虑到基于层状理论的复合材料的剪切—拉伸耦合, 建立了:

$$E_T = \frac{E_A}{(L \cos^4 \theta + M \sin^2 \theta \cos^2 \theta + N \sin^4 \theta)} \quad (14)$$

$$L = (V_A + K - K V_A)^{-1} \quad (15)$$

$$M = 2(1 + \nu)(K V_A + 1 - V_A) / K - 2\nu / (V_A + K - K V_A) \quad (16)$$

$$N = (K V_A + 1 - V_A) / K \quad (17)$$

式中:  $K$  为两种材料的杨氏模量之比,  $K = E_B / E_A$ 。

载荷作用下复合材料通过自适应变形结构取向发生变化, 主要是拉伸方向重新定向, 这导致了刚度的变化。复合材料在变形过程中的瞬时杨氏模量可以被描述为拉伸应变  $\epsilon_T$  的函数, 通过对上述关系的整合, 可以得到:

$$E_T = E_A [(L - M + N) \cos^4 \theta_0 e^{4\epsilon_T} + (M - 2N) \cos^2 \theta_0 e^{2\epsilon_T} + N]^{-1} \quad (18)$$

以上为本文方法原理的简要推导过程。

不同结构方向示意图如图2所示, 图中展示了串联结构、并联结构以及为  $\theta$  方向结构。

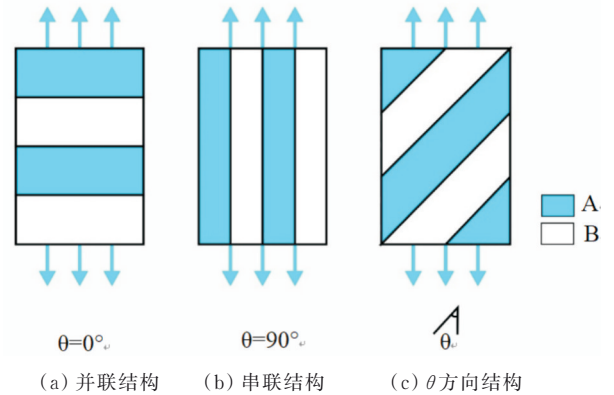


图2 不同结构方向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different structural directions

旋翼桨叶的有限元模型建立后, 根据上面的理论模型, 算出桨叶在不同结构取向角下的数值结果, 将得出的结果同参考文献[20]的理论数值进行比对。具体比对结果如表3所示。

表3 旋翼桨叶数值结果的理论比对  
Table 3 Theoretical comparison of numerical results for rotor blades

| 取向角 | 文献[20]结果/GPa | 本文结果/GPa | 误差/% |
|-----|--------------|----------|------|
| 30° | 6.48         | 7.20     | 11.0 |
| 45° | 5.34         | 5.47     | 2.4  |
| 60° | 5.03         | 5.24     | 4.2  |
| 75° | 5.02         | 5.44     | 8.4  |

从表3可以看出:有限元计算结果与参考文献理论预测结果吻合较好,各结构取向角条件下的相对误差均控制在20%以内,表明所建立的仿生双相有限元模型具有较好的准确性和可靠性,能

够有效反映结构取向变化对材料等效弹性性能的影响。该验证结果为后续不同结构取向角条件下的数值仿真分析提供了可靠基础。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 米塞斯应力云图比对分析

在完成有限元模型有效性验证后,基于验证后的模型开展不同结构取向角条件下的数值仿真分析。通过提取不同结构取向角下的米塞斯应力云图,对旋翼桨叶的应力分布特征进行对比研究。不同结构取向角下有限元模型及对应米塞斯应力云图的局部放大结果如图3所示。

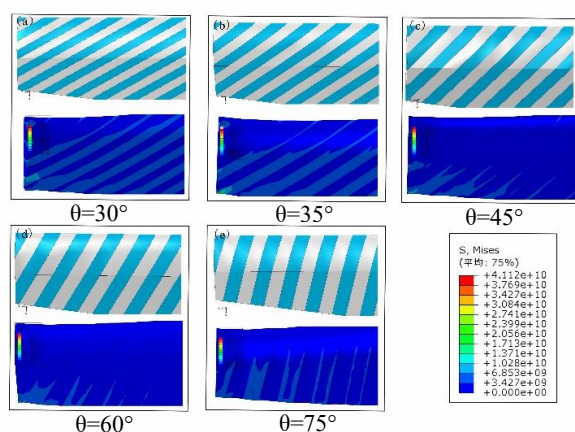


图3 不同结构取向角的局部放大图及米塞斯应力云图

Fig. 3 Local magnified images of different structural orientation angles and Mises stress cloud maps

由相同位置相同标尺下不同结构取向直升机旋翼仿生桨叶的米塞斯应力图可以看出,在相同载荷下,直升机旋翼仿生桨叶的结构取向角越小,应力相对变小,说明结构取向对直升机旋翼仿生桨叶刚度有一定影响。除此之外从米塞斯应力云图也可看出,每个取向角的边界处都具有一定的不均匀性。

#### 3.2 结果输出比对分析

在对不同结构取向角条件下的米塞斯应力云图进行初步分析的基础上,为进一步定量研究结构取向角对应力应变响应及弹性性能的影响规律,利用ABAQUS后处理模块提取桨叶位移载荷作用区域的应力分量S11和应变分量E11,并通过计算获得平均应力与平均应变数据。考虑到有限

元计算所得区域平均应力与平均应变数据点数量较多,为便于结果展示与分析,采用等间隔采样方式对原始数据进行处理。将完整应力应变数据按相同区间划分,并在各区间内选取相同位置的数据点作为采样点,从而获得10组采样数据。所有结构取向角均采用相同的数据采样规则,以保证不同工况之间结果的可比性。不同结构取向角下的典型应力应变数据如表4所示。

得到数据结果后,通过Origin软件绘制应力-应变曲线图和结构取向角 $\theta$ -杨氏模量关系图。以此来对结构取向角对旋翼的刚度影响进行讨论。基于ABAQUS导出的完整应力应变数据,绘制不同结构取向角下的应力应变关系曲线如图4所示,根据图4中应力应变曲线的线性拟合结果,计算不同结构取向角下仿生复合材料旋翼桨叶的等效杨氏模量,并绘制其变化规律,如图5所示。

表4 不同结构取向角下旋翼桨叶典型应力应变数据  
Table 4 Typical stress-strain data of rotor blades under different structural orientation angles

| 采样点<br>编号 | 取向角 30° |              | 取向角 35° |              | 取向角 45° |              | 取向角 60° |              | 取向角 75° |              |
|-----------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
|           | 平均应变    | 平均应力/<br>GPa | 平均应变    | 平均应力/<br>GPa | 平均应变    | 平均应力/<br>GPa | 平均应变    | 平均应力/<br>GPa | 平均应变    | 平均应力/<br>GPa |
| 1         | 0.000   | 0.00         | 0.000   | 0.00         | 0.000   | 0.00         | 0.000   | 0.00         | 0.000   | 0.00         |
| 2         | 0.001   | 0.24         | 0.002   | 0.29         | 0.003   | 0.20         | 0.002   | 0.20         | 0.001   | 0.18         |
| 3         | 0.006   | 1.44         | 0.011   | 1.76         | 0.015   | 1.24         | 0.012   | 1.22         | 0.005   | 1.1          |
| 4         | 0.011   | 2.64         | 0.020   | 3.23         | 0.028   | 2.28         | 0.021   | 2.24         | 0.010   | 2.02         |
| 5         | 0.016   | 3.83         | 0.030   | 4.70         | 0.040   | 3.31         | 0.031   | 3.26         | 0.014   | 2.93         |
| 6         | 0.021   | 5.03         | 0.039   | 6.17         | 0.053   | 4.35         | 0.041   | 4.29         | 0.019   | 3.85         |
| 7         | 0.026   | 6.23         | 0.048   | 7.64         | 0.066   | 5.38         | 0.050   | 5.31         | 0.023   | 4.76         |
| 8         | 0.031   | 7.43         | 0.058   | 9.11         | 0.078   | 6.42         | 0.060   | 6.33         | 0.028   | 5.68         |
| 9         | 0.035   | 8.63         | 0.067   | 10.60        | 0.090   | 7.45         | 0.070   | 7.35         | 0.032   | 6.60         |
| 10        | 0.040   | 9.83         | 0.076   | 12.00        | 0.103   | 8.49         | 0.080   | 8.37         | 0.037   | 7.51         |
| 11        | 0.045   | 11.00        | 0.085   | 13.50        | 0.115   | 9.52         | 0.089   | 9.39         | 0.041   | 8.43         |

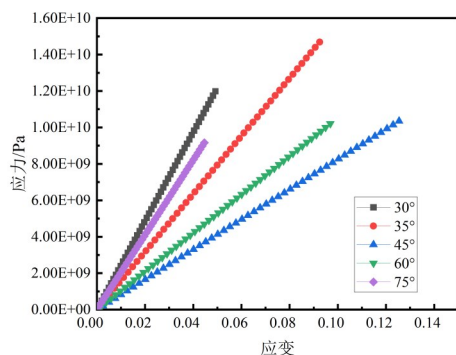


图4 应力应变图  
Fig. 4 Stress-strain diagram

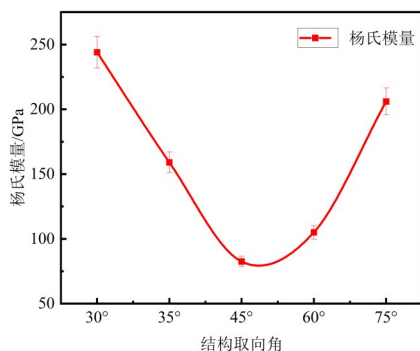


图5 结构取向角与杨氏模量关系图  
Fig. 5 Relationship diagram between structural orientation angle and Young's modulus

由米塞斯应力云图和提取数据后绘制的关系图可以看出,结构取向角是影响仿生复合材料旋翼桨叶弹性性能的重要因素。

主要结论为:1)复合材料的结构取向角增大,杨氏模量反而减小,在结构取向角增大到某一定值后,杨氏模量出现最值;2)在相同的体积分数和材料参数下,杨氏模量和材料刚度成定量关系;3)随着结构取向角的增大,复合材料的杨氏模量变化趋于对称化。研究结果表明,结构取向角不仅影响桨叶内部应力传递路径,同时会改变结构整体刚度特性,因此可作为仿生复合材料旋翼桨叶性能调控的重要设计参数。

## 4 结 论

1) 结构取向角对复合材料旋翼桨叶的等效杨氏模量具有显著影响。随着取向角的增大,桨叶等效杨氏模量整体呈下降趋势,表明结构取向偏离主受力方向会降低结构在该方向上的刚度。

2) 有限元计算结果与理论预测结果在变化趋势上保持一致,验证了所建立模型能够较好地反映结构取向变化对桨叶弹性性能的影响规律。

3) 在所研究的结构取向角范围内,等效杨氏模量对取向角变化的响应表现为非线性变化,在部分取向区间内变化更为敏感,说明结构取向角是影响桨叶刚度特性的重要设计参数,可为旋翼

结构的刚度优化设计提供参考。

4) 本文将昆虫角质层结构再取向特征引入仿生复合材料旋翼桨叶设计,通过建立结构取向角参数化有限元模型,揭示了结构取向角对桨叶弹性性能的影响规律。这说明,结构取向理论可由材料尺度推广至旋翼结构尺度,并能够有效表征结构取向变化对旋翼桨叶整体刚度特性的影响。通过优化增强相与基体相的结构取向设计,可在不改变材料组成的条件下实现桨叶刚度特性的有效调控,为仿生复合材料旋翼结构的刚度设计、轻量化优化及性能调控提供了新的设计思路和理论参考。

### 参考文献

- [1] Yu G R, Li X B, Huang W J. Performance and damage study of composite rotor blades under impact[J]. *Polymers*, 2024, 16(5): 623.
- [2] Friedmann P P, Yuan K A, De Terlizzi M. An aeroelastic model for composite rotor blades with straight and swept tips (Part I): Aeroelastic stability in hover[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, 37(4/5): 967-986.
- [3] Mitra A, Chakraborty A. Multi-objective optimization of composite airfoil fibre orientation under bending-torsion coupling for improved aerodynamic efficiency of horizontal axis wind turbine blade[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 221: 104881.
- [4] Fraihat B I, Ajaj R M. Aeroelastic tailoring of stiffened cantilever plate using composites and structural layouts: A parametric study [J]. *The Aeronautical Journal*, 2024, 128: 2073-2091.
- [5] Kameyama M, Fukunaga H. Optimum design of composite plate wings for aeroelastic characteristics using lamination parameters [J]. *Computers & Structures*, 2007, 85(3/4): 213-224.
- [6] Abed B H, Sowoud K M, Hussein E Q. Material Inclusions and fiber orientation affect the aeroelastic stability of a composite wing[J]. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(12): 361-369.
- [7] 王昊. 仿生材料结构取向对力学性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2021.  
Wang Hao. Research on effect of the structural orientation of bionic materials on the mechanical properties [D]. Shenyang: Shenyang University, 2021. (in Chinese)
- [8] Do Nascimento Pereira A C, Titotto S. Bioinspired composites: Nature's guidance for advanced materials future [J]. *Functional Composites and Structures*, 2023, 5(1): 012004.
- [9] Boaretto J, Fotouhi M, Tende E, et al. Biomimetics and composite materials toward efficient mobility: A review[J]. *Journal of Composites Science*, 2021, 5(1): 22.
- [10] Wang H P, Li S M, Zhou Q J, et al. A review of recent research on bionic structural characteristics and performance mechanisms of biomimetic materials [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 304: 112681.
- [11] Siddiqui M A S, Rabbi M S, Ahmed R U, et al. Bioinspired composite structures: A comprehensive review of natural materials, fabrication methods, and engineering applications [J]. *Composites Part C: Open Access*, 2025, 17: 100578.
- [12] Barthelat F, Yin Z, Buehler M J. Structure and mechanics of interfaces in biological materials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 16007.
- [13] Gao H J, Ji B H, Jäger I L, et al. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(10): 5597-5600.
- [14] Studart A R. Biological and bioinspired composites with spatially tunable heterogeneous architectures [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(36): 4423-4436.
- [15] Dunlop J W C, Weinkamer R, Fratzl P. Artful interfaces within biological materials[J]. *Materials Today*, 2011, 14(3): 70-78.
- [16] Liu Z Q, Zhang Y Y, Zhang M Y, et al. Adaptive structural reorientation: Developing extraordinary mechanical properties by constrained flexibility in natural materials[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 86: 96-108.
- [17] Yin Z, Hannard F, Barthelat F. Impact-resistant nacre-like transparent materials[J]. *Science*, 2019, 364: 1260-1263.
- [18] 赵甫, 史金飞, 许有熊, 等. 异质异构仿生贝壳复合材料[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2022(3): 253-259.  
Zhao Fu, Shi Jinfei, Xu Youxiong, et al. Bionic shell composites of heterogeneity isomerism [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2022(3): 253-259. (in Chinese)
- [19] Liu Z Q, Zhang Z F, Ritchie R O. Interfacial toughening effect of suture structures[J]. *Acta Biomaterialia*, 2020, 102: 75-82.
- [20] Liu Z Q, Zhu Y K, Jiao D, et al. Enhanced protective role in materials with gradient structural orientations: Lessons from Nature[J]. *Acta Biomaterialia*, 2016, 44: 31-40.

(编辑:马文静)