

# 三维四向/五向编织扩张段的多尺度有限元力学性能分析

袁志超<sup>1</sup>, 孙正<sup>1</sup>, 黄浩<sup>2</sup>, 张奕珂<sup>1</sup>, 欧阳林志<sup>1</sup>, 李昊昊<sup>1</sup>, 王尧尧<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:**针对扩张段存在质量较高以及与壳体连接处性能薄弱等不足,提出一种复合材料三维编织扩张段分区成形方案。针对扩张段不同区域不同的性能要求,通过旋转三维编织柔性增减纱实现多种性能结构分区成形,改善扩张段轻量化性能。基于 ABAQUS 分析软件,选取扩张段模型不同区域结构三维四向/五向单胞模型进行性能分析。结果显示:三维五向单胞相比三维四向单胞在第五向纤维方向的弹性模量提升至 160%,能够有效提高单胞轴向结构刚度,改善编织扩张段层间性能。

**关键词:**扩张段;三维编织;分区成形;单胞模型

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)05-0074-04

## Multiscale Finite Element Mechanical Performance Analysis on 3D and Four/Five Directional Braiding Expansion Section

YUAN Zhichao<sup>1</sup>, SUN Zheng<sup>1</sup>, HUANG Hao<sup>2</sup>, ZHANG Yike<sup>1</sup>, OUYANG Linzhi<sup>1</sup>, LI Haohao<sup>1</sup>, WANG Yaoyao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To overcome the deficiency of present expansion section like high weight and weak performance at the joint with the shell, this paper proposes a divided-area forming method of composite expansion section. In the light of the different performance requirements of different areas of the expansion section, the divided-area forming of structure with various properties is realized by rotating 3D braiding flexible yarn increasing and reducing to improve the lightweight performance of the expansion section. Based on ABAQUS analysis software, 3D and four/five directional unit cell models in different regions of the expansion section model are selected for performance analysis. The results show that in comparison with 3D four directional unit cell, the elastic modulus of 3D five directional unit cell in the fifth fiber direction increases to 160%, which can effectively improve the stiffness of unicellular axial structure and the interlayer performance of braided expansion section.

**Keywords:** expansion section; 3D braiding; divided-area forming; unit cell model

## 0 引言

扩张段在工作时需要承受复杂高温燃气流所施加的热、力作用等,是发动机中最复杂、故障较多的部件之一<sup>[1]</sup>,因此选择一种可靠的材料尤为重要。三维编织复合材料克服了传统层合复合材料易分层的缺点,具有耐疲劳、抗侵蚀、抗冲击、可设计性好等优点,在航空航天、生物医疗、交通运输等领域得到了广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。

苏蕴荃等<sup>[4]</sup>利用扩展有限元方法研究了纤维体积分量和编织角三维四向编织复合材料抗冲击性能的影响规律;赵文斌等<sup>[5]</sup>研究了以 2.5D 编织预制体或针刺预制体为增强材料的扩张段层间剪切强度,相比于缠绕预制体有大幅提升,其中 2.5D 编织预制体层间剪切强度最高,达 59.2 MPa 以上;谭焕城等<sup>[6]</sup>阐述了一种三维编织复合材料的细观几何建模方法,开展了三维编织复合材料的动态

拉伸试验研究;李翠敏等<sup>[7]</sup>研究了三维编织碳纤维复合材料的剪切性能;TANG Y L 等<sup>[8]</sup>研究了三维编织碳-碳复合材料螺栓连接结构的力学性能和失效机理。

目前复合材料扩张段和薄壁金属壳体主要通过螺栓、胶接连接。当扩张段在极端环境下服役时,扩张段不同区域承受不同交变载荷,内部容易出现热应力集中、结构-性能不匹配造成的构件失效等现象。本文提出一种三维编织复合材料分区成形的方法,不同区域采用材料结构力学性能不同以改善上述问题。三维编织复合材料微观结构对宏观力学性能具有较大的影响,而目前对于三维编织结构构件多尺度有限元力学性能分析的研究仍然不够充分,因此,本文从三维编织复合材料构件的微观结构出发,建立三维四向/五向旋转编织复合材料的单胞模型,对其力学性能差异进行了研究。

# 1 扩张段设计和复合材料单胞模型建立

## 1.1 旋转编织及增减纱技术

三维编织技术具备“近净成型”的特点<sup>[9]</sup>,可以编织出各种形状、不同尺寸的三维异形构件,减少连接件的数量,提高构件整体性能。三维编织复合材料的编织工艺按照运动形式分为纵横编织和旋转编织<sup>[10]</sup>。纵横编织一般采用气动执行元件推动携纱器锭子在底盘上纵横交错,实现纱线交织<sup>[11]</sup>,其运动速率低且不连续,因此编织效率较低;旋转编织机依靠角轮旋转驱动携纱器在底盘上按照指定的轨迹运动,编织效率高,通过改变不同芯模可以实现复杂结构的编织,适合成形空心截面的复合材料构件。

变截面复合材料构件编织需要通过增减纱工艺来实现构件成形。变截面三维编织预制体的增减纱工艺有两种<sup>[12]</sup>:单元尺寸增减和单元数量增减。其中,单元数量增减通过改变参与编织的纱线数量和排列方式来实现变截面预制件的织造,可以实现任意方向尺寸的变化。

## 1.2 扩张段设计

为了保证扩张段在极端服役条件轻量化的前提下具有较高性能的使用需求,本文提出一种复合材料扩张段分区设计方法,减少连接;通过旋转三维编织柔性增减纱技术满足扩张段不同区域不同的性能要求,面对原有扩张段连接处性能薄弱的问题,将扩张段按照三维四向/五向的结构进行分区成形,加强扩张段力学性能,提高整体可靠性。

## 1.3 三维四向/五向单胞模型建立

为了分析分区成形扩张段不同区域微观结构的性能,需要对扩张段不同区域建立复合材料单胞模型。三维编织复合材料根据内部纱线走向的不同分为三维四向、三维五向、三维六向、三维七向等不同空间结构。本文涉及三维四向和三维五向结构,其中,三维五向相比于三维四向增加了沿着编织方向的纱线。三维四向和三维五向单胞纱线走向如图1所示。

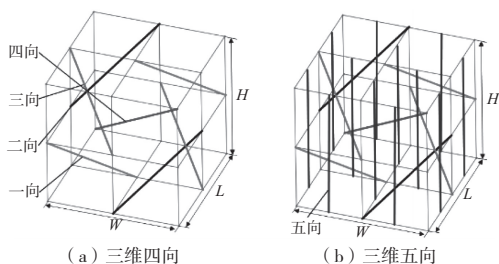


图1 三维四向和三维五向单胞纱线走向示意图

纱线的截面形状对单胞模型的仿真结果与实际情况的差异性有着很大的影响,根据大多数学者的研究,编织纱相互交织和接触产生了挤压,与圆形截面相比,椭圆形截面更接近真实的纱线截面形状<sup>[13]</sup>。因此本文采用椭圆截面代表三维四向编织纱截面,而三维五向编织纱不参与纱线交织,因此以圆形截面表示第五向编织纱线。三维四向和三维五向的单胞如图2所示。

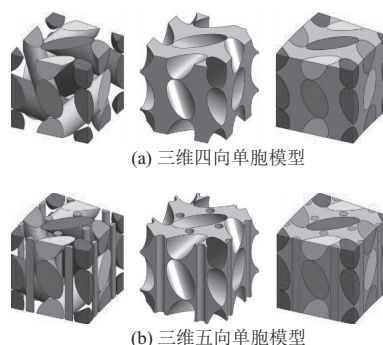


图2 三维四向和三维五向单胞模型

纤维体积分数对三维编织复合材料力学性能有着重要的影响。本文所设计的三维四向单胞与三维五向单胞的纤维体积分数相等,均为51.7%。

## 2 有限元分析

### 2.1 单胞模型简化以及网格划分

旋转编织复合材料构件实际单胞结构有一定的弧度,这是旋转编织预制体紧贴芯模产生的编织旋转角 $\theta$ ,如图3所示。

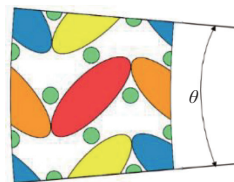


图3 旋转编织复合材料实际单胞结构

针对大型旋转三维编织机,环向一周携纱器锭数非常大,实际单胞结构的弧度非常小,即旋转角 $\theta$ 很小,对于单胞模型来说,旋转角 $\theta$ 对于性能的影响很小,但反而会大大提升模型的复杂程度,为了简化单胞模型网格划分并减小计算量,将旋转编织单胞模型的旋转角 $\theta$ 近似为0,单胞近似为长方体,以便于后续的计算及仿真分析。三维四向/五向单胞分别简化如图4(a)、图4(b)所示。对各向纤维束按向分类进行网格划分以方便对各向纤维束在单胞模型中建立材料属性局部坐标系。

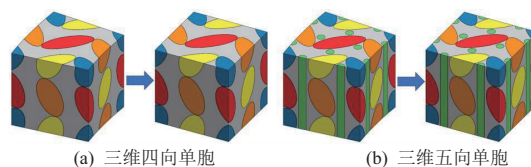


图4 单胞简化图

### 2.2 复合材料单胞性能仿真

三维编织碳纤维束使用T700 12K碳纤维,基体使用酚醛树脂,其力学性能参数如表1所示。相比钛合金构件,碳纤维复合材料构件质量降低至1/3。纤维束材料性能为横观各向同性,通过对离散场设定轴、法向量分别为三维四向单胞和三维五向单胞的各向纤维束建立材料方

向局部坐标系。前四向纤维在单胞模型中与单胞模型全局坐标系成编织角  $\alpha$ , 碳纤维束性能  $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}$ ,

$G_{23}$  方向和前四向纤维束局部坐标系与单胞模型全局坐标系所成夹角对应。

表1 碳纤维束、基体力学性能参数

材料	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$E_3/\text{GPa}$	$Nu_{12}$	$Nu_{13}$	$Nu_{23}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$
碳纤维束 T700 12K	1.78	230	15	15	0.200	0.200	0.250	24	24	5.03
酚醛树脂	1.31	2.7	2.7	2.7	0.307	0.307	0.307	—	—	—

由于碳纤维束是横观各向同性的,基体也是各向同性的,且各向纤维束在单胞模型中对称分布,单胞模型本身在扩张段结构中具有连续周期性,因此对单胞模型施加连续性周期边界条件。

在具有周期性特征的单胞模型中,其平均应力  $\bar{\sigma}_{ij}$  可以表示为

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad (1)$$

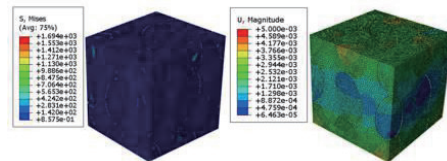
式中:  $V$  是单胞结构的体积;  $\bar{\sigma}_{ij}$  为全局平均应力。对于横观各向同性的周期性单胞结构,整体的应力-应变关系可以表示为

$$\bar{\varepsilon} = \mathbf{S} \bar{\sigma} \quad (2)$$

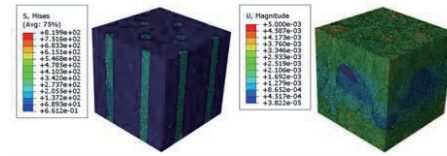
式中:  $\mathbf{S}$  为等效柔度矩阵;  $\bar{\varepsilon}$  为平均应变;  $\bar{\sigma}$  为平均应力。针对三维四向/五向单胞模型进行有限元分析,其结果分别如图 5(a)、图 5(b) 所示。

计算得到各单胞模型的横观各向同性性能参数,如表 2 所示。从表中可以看出三维四向单胞的弹性模量  $E_1$  最大,  $E_2$  和  $E_3$  相对较小且基本相同; 三维五向单胞的弹性模量  $E_2$  和  $E_3$  也基本相同,  $E_1$  相对  $E_2$  和  $E_3$  大很多。三维四向单胞切变模量  $G_{23}$  相对较小,  $G_{12}$  和  $G_{13}$  基本相同; 三维五

向单胞的各向切变模量均基本相同,但可以发现其中  $G_{23}$  最大,这是由于五向纱提高了轴向性能; 相比三维四向单胞,三维五向单胞五向纱方向弹性模量  $E_1$  得到显著提升,而由于五向纱法向性能较差导致  $E_2, E_3$  有所下降。同时,由于三维四向/五向单胞模型中纤维体积分数一致,使得三维五向单胞各向剪切性能略微下降。整体看来,三维五向单胞五向性能的提升对于扩张段层间性能的提升具有重要意义。



(a) 三维四向单胞应力、应变



(b) 三维五向单胞应力、应变

图5 三维四向/五向单胞仿真分析结果

表2 三维四向/五向单胞性能参数

编织结构	$E_1/\text{GPa}$	$E_2/\text{GPa}$	$E_3/\text{GPa}$	$Nu_{12}$	$Nu_{13}$	$Nu_{23}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$
三维四向单胞	11.92	8.26	8.52	0.50	0.49	0.28	17.36	17.67	15.97
三维五向单胞	19.07	2.38	2.41	0.46	0.43	0.84	14.20	14.11	14.41

### 2.3 分区成形扩张段性能仿真

将三维四向单胞、三维五向单胞有限元分析计算所得性能参数赋予对应扩张段结构,由于单胞本身被看作是横观各向同性,因此在整体扩张段全局坐标系中对各段建立离散坐标系,最后通过有限元分析获得整体扩张段性能,如图 6 所示。

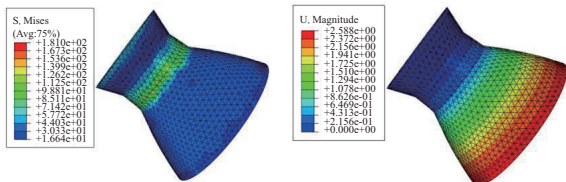


图6 扩张段仿真应力、应变

## 3 结语

本文提出了扩张段三维四向/五向编织分区成形方案,建立了使用横观各向同性纤维和各向同性基体复合的

三维编织四向/五向单胞模型,通过多尺度有限元分析研究了三维四向/五向单胞的性能,利用横观各向同性单胞模型性能来预测编织扩张段力学性能。总结如下。

1) 相比使用钛合金材料,采用碳纤维束与酚醛树脂基体复合材料能够减少扩张段 2/3 的质量,能够大大改善扩张段轻量化性能。

2) 通过对横观各向同性纤维束与各向同性基体复合的三维四向/五向单胞模型进行力学性能仿真分析,得到两个理论上为横观各向同性单胞的弹性模量、切变模量、泊松比,结果显示三维四向单胞沿编织方向的弹性模量最大,法向两个弹性模量相对较小且基本相同; 三维五向单胞沿编织方向的弹性模量相对法向两个基本相同的弹性模量大很多。三维四向单胞编织方向法向切变模量较小,其他两向切变模量基本相同; 三维五向单胞的各向切变模量均基本相同。

3) 相比三维四向单胞,三维五向单胞牺牲了部分剪切性能和五向纱方向法向弹性性能,在五向纱方向弹性性能有巨大提升,预测能够改善三维编织扩张段层间力学性能。



## 参考文献:

- [1] 沈勇. 碳/碳固体火箭发动机柔性喷管热及热-结构耦合作用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [2] 曾涛,姜黎黎. 三维编织复合材料力学性能研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):34-41,47.
- [3] 宋云飞,杜宇. 三维编织复合材料力学性能研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料,2017(10):104-109.
- [4] 苏蕴荃,陈昊,侯传涛,等. 基于单胞模型的三维四向编织复合材料力学性能研究[J]. 强度与环境,2022,49(4):34-41.
- [5] 赵文斌,田谋锋,姚亚琳,等. 法向增强预制体/酚醛扩张段RTM制备技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(3):65-69.
- [6] 谭煥成,覃文源,刘升旺,等. 三维编织复合材料细观几何建模及动力学性能的研究进展[J]. 机械工程材料,2021,45(8):1-7.
- [7] 李翠敏,阎建华,刘丽芳,等. 三维编织碳纤维复合材料剪切性能研究[J]. 纤维复合材料,2014,31(2):45-49,44.
- [8] TANG Y L,ZHOU Z G,PAN S D,et al. Mechanical property and

failure mechanism of 3D Carbon - Carbon braided composites bolted joints under unidirectional tensile loading[J]. Materials & Design (1980-2015),2015,65:243-253.

- [9] 胡美琪,孙宝忠,顾伯洪. 三维编织复合材料冲击损伤分布的温度和结构效应[J]. 中国科学:技术科学,2021,51(1):108-118.
- [10] 韩振宇,梅海洋,付云忠,等. 三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料细观结构研究进展[J]. 材料工程,2018,46(11):25-36.
- [11] 王一博,刘振国,胡龙,等. 三维编织复合材料研究现状及在航空航天中应用[J]. 航空制造技术,2017,60(19):78-85.
- [12] 荆云娟,赵领航,张元,等. 变截面三维编织预制件增减纱技术与力学性能研究概述[J]. 高科技纤维与应用,2018,43(3):51-57.
- [13] 马明,张晨辰,张一帆. 三维四向编织复合材料结构的计算机仿真[J]. 天津工业大学学报,2019,38(6):45-51.

收稿日期:2022-12-07

## (上接第73页)

场,各激光跟踪干涉仪的位置如图10所示。在该站位布置下,所需测量空间内激光跟踪干涉仪的测量距离、范围经过检验都符合要求。

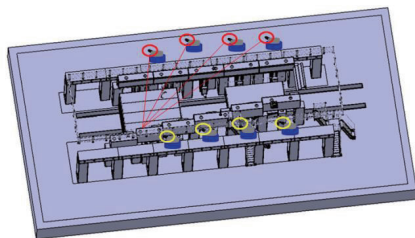


图10 大飞机机翼总装站位测量场布局图

产品测量前,对测量场进行自标定及飞机坐标系拟合。已知工装装配过程中依据飞机坐标系选择相应TB点实现工装的高精度定位,本文利用工装上的TB点,使反射镜在若干不同TB点停留测量,对测量场进行自标定,计算出各台跟踪仪的相对位置并确立测量长坐标系。在机翼翼盒入位前,使反射镜在若干ERS点及TB点停留测量,利用测量场精确测量各ERS点位置,建立飞机坐标系,建立测量场坐标系、飞机坐标系和机床坐标系三者之间的转换关系。

翼盒主要测量特征为机翼气动外形、骨架外形、梁及肋板位置等,这些测量特征依据激光雷达进行测量。首先利用激光雷达测量已用测量场标定的ERS点,确定激光雷达坐标系与测量场坐标系的转换关系,然后再利用激光雷达实现相关特征的测量,并转换到统一坐标系下,实现骨架、梁、壁板等的高精度定位。依据该测量场在大飞机翼盒的高精度装配的应用,验证了20m测量范围内测量精度能够达到0.02mm,进而保证飞机翼盒气动外形精度 $\leq 0.4\text{mm}$ ,蒙皮对缝阶差精度 $\leq 0.1\text{mm}$ ,蒙皮对缝间隙测量精度 $\leq 0.3\text{mm}$ 。

## 5 结语

本文依托4台激光跟踪干涉仪长度方向的高精度测量建立测量组网,测量组网结合其他测量设备形成统一坐标系下的高精度测量场,形成了以下结论:

1) 基于激光干涉仪组网构建的测量场,能够实现20m范围内高精度测量,测量精度可以达到0.02mm,可以实现大尺寸空间的高精度测量;

2) 测量组网与激光雷达、激光跟踪仪等测量系统经过测量数据转换,在同一坐标系下处理测量数据,简化数据处理、降低累积误差;

3) 测量设备在测量场中移动,测量数据实时转换,打破传统测量站位固定局面,降低产品/工装遮挡而无法全面检测的风险,有效实现产品高精度测量。

## 参考文献:

- [1] 梅中义,朱三山,杨鹏. 飞机数字化柔性装配中的数字测量技术[J]. 航空制造技术,2011,54(17):44-49.
- [2] 郭洪杰. 浅谈数字化测量技术在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术,2011,54(21):26-29.
- [3] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术[J]. 航空制造技术,2010,53(18):52-54.
- [4] 李洸泉,黄翔,方伟,等. 飞机装配中的数字化测量系统[J]. 航空制造技术,2010,53(23):46-48,59.
- [5] 朱三山,梅中义. 飞机数字化装配测量系统研究[J]. 现代制造工程,2011(8):95-99.
- [6] 邹冀华,周万勇,邹方. 数字化测量系统在大部段对接装配中的应用[J]. 航空制造技术,2010,53(23):52-55.
- [7] 邹爱丽,王亮,李东升,等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术,2011,54(21):72-75.
- [8] MUELANER J, MAROPOULOS P G. Large scale metrology in aerospace assembly[C]// 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, East Avon County England: University of Bath, 2008.
- [9] 于成浩,董岚,柯明,等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究[J]. 测绘科学,2008,33(2):42-44.
- [10] 于成浩,柯明,赵振堂. 提高激光跟踪仪测量精度的措施[J]. 测绘科学,2007,32(2):54-56,178.
- [11] 于成浩,柯明. 基于激光跟踪仪的三维控制网测量精度分析[J]. 测绘科学,2006,31(3):25-27,3.
- [12] 林嘉睿,郝继贵,郭寅,等. 现场大空间测量中精密三维坐标控制网的建立[J]. 机械工程学报,2012,48(4):6-11.
- [13] 朱永国,黄翔,李洸泉,等. 飞机装配高精度测量控制网精度分析与构建准则[J]. 中国机械工程,2014,25(20):2699-2704.
- [14] 朱峻可,李丽娟,林雪竹. 激光雷达测量系统的测量场规划研究[J]. 激光技术,2021,45(1):99-104.

收稿日期:2022-12-07