

文章编号: 2097-1974(2025)04-0090-08

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250412

拉压异性条件下正交各向异性碳/碳复合材料舵轴性能分析

杨鑫鑫, 黄建栋, 杨浩, 乔逸飞, 王淑玉
(空间物理重点实验室, 北京, 100076)

摘要: 工程设计中应用的复合材料除了具有各向异性的本构特征, 往往还具有拉、压异性的强度特征, 会影响复合材料结构在使用工况下的应力、应变分布, 进一步考虑材料拉、压强度的不同, 有可能对结构的强度分析结果产生较大影响。针对以上问题, 以碳/碳复合材料空气舵舵轴为研究对象, 首先通过ABAQUS的USDFLD接口实现二次开发, 对比分析考虑拉、压异性前后舵轴应力的变化, 然后考虑材料的拉伸、压缩和面内剪切强度极限, 引入相应的刚度折减模型, 对舵轴在弯、剪载荷作用下的破坏过程进行分析。分析结果表明拉、压异性会对复材结构应力分布产生明显影响, 该分析方法能够对舵轴的破坏过程实现更精确的模拟。

关键词: 碳/碳复合材料; 拉压异性; 强度; 刚度折减; USDFLD

中图分类号: V42; TB332

文献标识码: A

Analysis of Orthotropic Carbon/Carbon Composite Rudder Shaft with Different Properties in Tension and Compression

YANG Xinxin, HUANG Jiandong, YANG Hao, QIAO Yifei, WANG Shuyu
(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing, 100076)

Abstract: Composite materials used in engineering design often exhibit different properties in tension and compression in addition to anisotropy. The tensile and compressive anisotropy of constitutive behavior can affect the stress and strain distribution of composite structures under operating conditions, further consideration of the difference between tension strength and compression strength may have an impact on the strength analysis results of the structure. This article takes the carbon-carbon composite material air rudder shaft as the research object, implements secondary development through ABAQUS' USDFLD interface, compares and analyzes the changes in rudder shaft stress before and after considering tensile and compressive anisotropy. Then, considering the tensile, compressive and in-plane shear strength of the material, corresponding stiffness reduction models are introduced to analyze the failure process of the rudder shaft under bending and shear loads. The analysis results indicate that different properties in tension and compression will have a significant impact on the stress distribution of composite structures, and this analysis method can achieve more accurate simulation of the failure process of the rudder shaft.

Keywords: carbon/carbon composite material; different properties in tension and compression; strength; stiffness reduction; USDFLD

0 引言

工程应用中的实际材料往往具有拉、压异性的特征, 尤其是近些年应用较多的纤维增强复合材料, 抗拉性能主要由纤维决定, 基体辅助承载, 抗压性能主要由基体决定^[1], 拉、压异性对工程结构受力分析的影响较大, 需要进行精细化的研究确定。在受力分析

的基础上, 进一步考虑强度准则和刚度折减模型, 可以实现对舵轴的破坏过程的仿真。

Puck等^[2]基于单向纤维增强复合材料的损伤现象和物理机制, 提出了区分纤维失效模式(Fiber Failure, FF)和纤维间失效模式(Inter Fibre Failure, IFF)的Puck准则, 其有效性在单向复合材料以及聚

合物基复合材料分析中得到了证明。Shen 等^[3]采用哈辛准则和 Von Mises 准则分别作为纤维束和基体的损伤判据, 通过材料性能连续折减法开展了陶瓷基复合材料细观尺度的渐进损伤分析。Sun 等^[4]针对不同的细观失效模式提出相应的材料宏观性能折减方案, 对三维面芯编织复合材料在纵向拉伸及面内剪切载荷下的渐进损伤过程和细观失效机理进行了分析。Li 等^[5]在失效面理论的基础上, 建立了一种适用于热固性树脂基复合材料的失效准则, 考虑了基体失效模式和纤维失效模式的相互耦合作用。Wang 等^[6]考虑强度准则的拉压异性, 计算了单向板和斜交板的偏轴试验结果。黄耀英等^[7]从试验测量的角度说明拉压异性会导致混凝土坝监测过程中拉伸徐变和压缩徐变的不同。Gu 等^[8-9]通过测定 3D 碳/碳复合材料的基本性能建立了非线性双模量力学模型, 给出了 3D 碳/碳复合材料的强度准则, 并对其断裂机理进行了研究。王宝来等^[10]从材料试验和细观模型分析的角度研究了尺度效应对三维编织碳/碳材料破坏模式及强度的影响。陶亮等^[11]通过开展各向异性 CMC 缺口弯曲断裂试验, 结合失效模式研究, 建立了两种失效模式的理论模型。杨彩云等^[12]通过一系列试验和分析证明, 三维机织角联锁复合材料属正交各向异性材料, 其强度和模量曲线具有明显的双主轴特性。还有大量的研究工作^[13-15]集中在通过试验获得复合材料的性能参数, 以及强度准则建立和校准。

以上研究未对材料的拉、压异性问题开展深入研究, 本文通过 ABAQUS 的 USDFLD (User Defined Field) 子程序接口实现了考虑拉、压异性的复合材料舵轴应力和强度分析, 指出了本构拉压异性对应力分析的影响。

1 研究对象

研究对象选取了某典型的碳/碳复合材料舵轴, 舵轴长为 300 mm, 外径为 90 mm, 内径为 50 mm, 定义柱坐标为舵轴的材料坐标系, R 为径向, T 为切向, Z 为轴向。舵轴根部固支, 对于航空航天常用的全动舵, 舵轴主要载荷为舵面法向剪力及剪力产生的弯矩, 本文所加最大载荷为远端 100 kN 剪力, 该剪力模拟舵面的法向剪力, 同时在舵轴的轴向截面产生了随距离线性变化的弯矩, 该载荷能够包络舵轴的破坏载荷。分析模型如图 1 所示, 采用 ABAQUS 有限元软件分析。

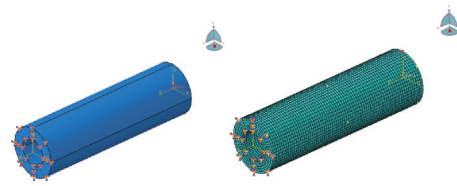


图1 舵轴模型示意

Fig.1 Schematic diagram of rudder axis model

碳/碳复合材料的弹性常数如表 1 所示。其中 E_R 、 E_T 、 E_Z 分别为径向、切向、轴向的弹性模量, μ_{RT} 、 μ_{RZ} 、 μ_{TZ} 为 RT 平面、 RZ 平面、 TZ 曲面内的泊松比, G_{RT} 、 G_{RZ} 、 G_{TZ} 为 RT 平面、 RZ 平面、 TZ 曲面内的剪切模量。

表 1 碳/碳复合材料弹性常数

Tab.1 Elastic constants table of C/C composite material

	E_R / GPa	E_T / GPa	E_Z / GPa	μ_{RT}	μ_{RZ}	μ_{TZ}	G_{RT} / GPa	G_{RZ} / GPa	G_{TZ} / GPa
拉伸	45	110	110	0.32	0.32	0.25	2.3	2.3	6.5
压缩	26	80	80	0.32	0.32	0.25	2.3	2.3	6.5

碳/碳复合材料的强度极限如表 2 所示。

表 2 碳/碳复合材料强度极限

Tab.2 Strength limit table of C/C composite material

Z 向拉伸/MPa	Z 向压缩/MPa	TZ 方向剪切/MPa
327	183	30

2 考虑拉、压异性的碳/碳复合材料舵轴

由表 1 数据可以看到, 碳/碳复合材料抗拉和抗压性能不同, 对静力分析结果可能产生影响。本文通过 ABAQUS 的 USDFLD 子程序接口实现正交各向异性材料考虑拉、压本构异性的静力分析。

2.1 USDFLD 子程序

USDFLD 为 ABAQUS 提供接口的二次开发子程序, 采用 Fortran 语言编写。USDFLD 子程序中, 允许用户自定义多个与材料属性相关的场变量 Field。ABAQUS 有限元软件在每一增量步求解的过程中, 都会向 USDFLD 子程序传递每个单元的应力、应变等信息, 在子程序中, 根据材料的应力场判断材料受压还是受拉, 然后通过 Field 变量控制材料的弹性常数, 实现拉、压异性的有限元分析。本文的算例设置 ABAQUS 的计算总时间为 1 s, 每一增量步步长固定为 0.05 s, 共 200 步完成 100 kN 剪力的线性施加。USDFLD 子程序的流程图如图 2 所示。

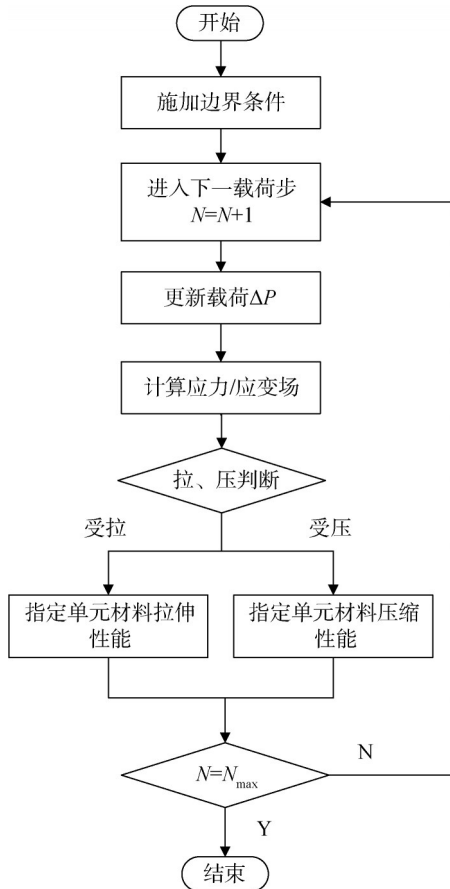


图2 USDFLD子程序的流程

Fig.2 Flowchart of USDFLD subroutine

2.2 分析结果

采用考虑拉、压异性的USDFLD子程序对舵轴开展分析,可知当剪力为38 000 N,根部弯矩为11 400 N·m时,舵轴六个应力分量最大值如表3所示,其中 σ_R 、 σ_T 、 σ_Z 分别为径向、切向、轴向正应力, τ_{RT} 、 τ_{RZ} 、 τ_{TZ} 分别为RT平面、RZ平面、TZ曲面内的剪应力,可以看到轴向应力 σ_Z 和面内剪切应力 τ_{TZ} 对舵轴强度起决定作用。

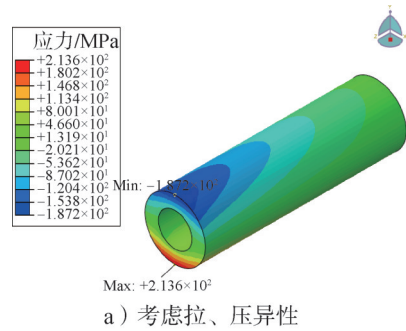
表3 舵轴最大应力(剪力38 000 N,考虑拉压异性)

Tab.3 Maximum stress of rudder shaft (shear force 38 000 N, considering tensile and compressive anisotropy)

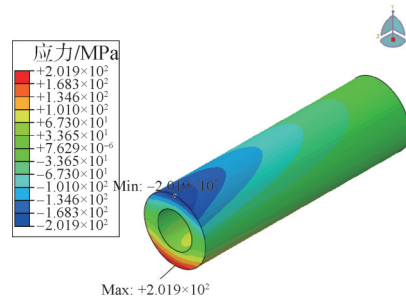
单位: MPa

	σ_R	σ_T	σ_Z	τ_{RT}	τ_{RZ}	τ_{TZ}
拉应力	4.3	54.1	213.6	1.3	7.1	21.1
压应力	-5.7	-52.4	-187.2	-1.3	-6.8	-21.1

对比考虑拉、压异性和只采用拉伸性能的舵轴分析结果,如图3和图4所示。



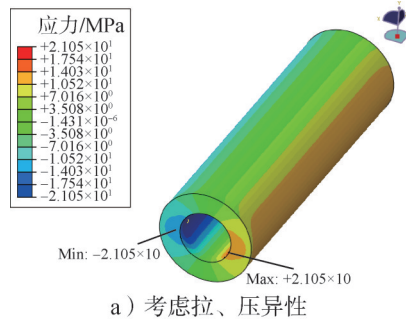
a) 考虑拉、压异性



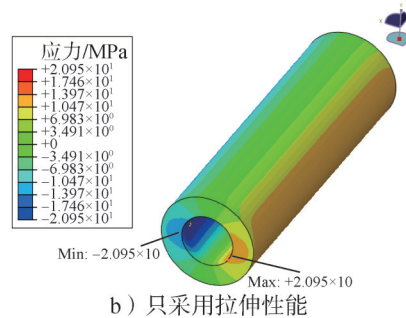
b) 只采用拉伸性能

图3 轴向应力 σ_Z 对比

Fig.3 Comparison chart of axial stress σ_Z



a) 考虑拉、压异性



b) 只采用拉伸性能

图4 面内剪切应力 τ_{TZ} 对比

Fig.4 Comparison chart of in-plane shear stress τ_{TZ}

通过对比分析可以得到以下结论:

a) 碳/碳复合材料z向拉伸模量为110 GPa,压缩模量为80 GPa,相差27.3%,导致在承弯时拉应力和压应力不再对称,与只采用拉伸性能的分析结果相比,拉应力增大了5.8%,压应力减小了7.3%。剪切模量不受拉压作用影响,剪应力变化较小,具体对比结果如表4所示。

表4 考虑拉、压异性前后分析结果对比

Tab.4 Comparison of analysis results before and after considering tensile and compressive anisotropy

	考虑拉、压异性		只采用拉伸性能		考虑拉、压异性后变化率	
	σ_z /MPa	τ_{TZ} /MPa	σ_z /MPa	τ_{TZ} /MPa	σ_z /%	τ_{TZ} /%
拉应力	213.6	21.1	201.9	21.0	5.8	0.5
压应力	-187.2	-21.1	-201.9	-21.0	-7.3	0.5

表5 进一步降低压缩模量后分析结果(剪力38 000 N,考虑拉压异性)

Tab.5 Analysis results after further reducing the compression modulus (shear force 38 000 N, considering tensile compressive anisotropy)

		拉压模量相同	压缩模量缩小45.5%	应力变化比率/%	压缩模量缩小63.6%	应力变化比率/%
σ_z	拉应力	201.9 MPa	226.0 MPa	11.9 MPa	247.6 MPa	22.6 MPa
	压应力	-201.9 MPa	-175.2 MPa	-13.2 MPa	-160.6 MPa	-20.5 MPa

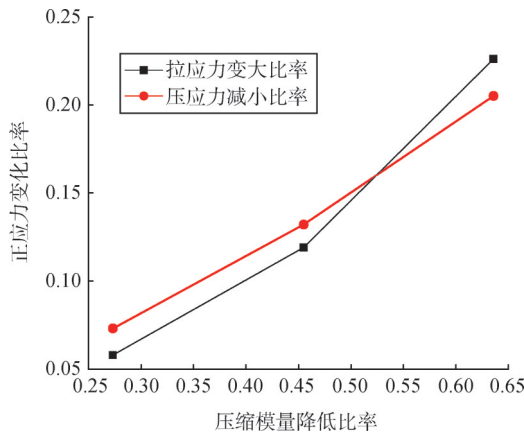
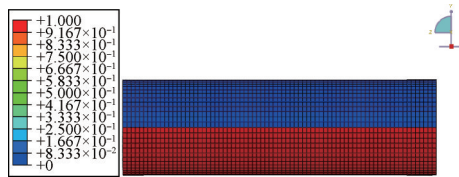


图5 正应力随压缩模量变化

Fig.5 Graph of normal stress variation with compressive modulus

c) 与应力状态一致, 由于压缩模量小于拉伸模量, 舵轴抗弯的中性轴向受拉一侧偏移, 如图6所示, 其中0代表受压, 1代表受拉。由图6可知, 当压缩模量减小27.3%时, 中性轴偏移约5 mm; 当压缩模量减小45.5%时, 中性轴偏移随弯矩增大更快发生偏移; 当压缩模量减小63.6%时, 中性轴偏移约10 mm。

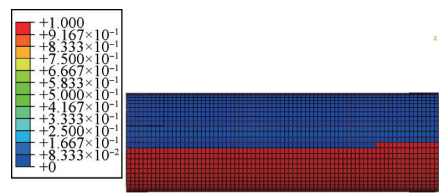


a) 拉压同性

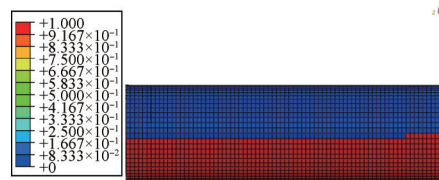
图6 中性轴变化对比

Fig.6 Comparison diagram of neutral axis changes

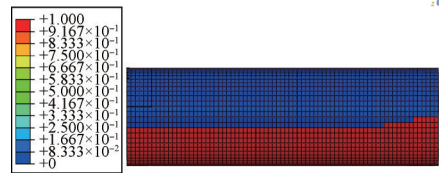
b) 进一步降低压缩模量, 拉应力逐渐提高, 压应力逐渐降低, 舵轴最大应力的变化如表5所示。拉应力升高比率、压应力降低比率与压缩模量降低比率的关系如图5所示。分析表5和图5可知, 压缩模量降低45.5%时, 拉应力增大11.9%, 压应力减小13.2%。压缩模量降低63.6%, 拉应力增大22.6%, 压应力减小20.5%。



b) 压缩模量减小27.3%



c) 压缩模量减小45.5%



d) 压缩模量减小63.6%

续图6

3 考虑宏观强度准则的舵轴断裂分析

3.1 宏观强度准则及刚度折减模式

在考虑拉、压异性的基础上, 进一步引入碳/碳复合材料的强度准则, 开展舵轴断裂分析。本文采用较简洁的最大应力准则来开展破坏分析, 后续也可引入Hoffman、Tsai-Wu等二次准则, 但需要配合材料双向强度试验来提高相应准则的准确性。对于承受弯、剪作用的舵轴, 轴向应力 σ_z 和面内剪切应力 τ_{TZ} 对强度起决定作用, 强度极限如表2所示。最大应力准

则为:

- a) z方向拉伸破坏: $\sigma_z > Z_T$;
- b) z方向压缩破坏: $\sigma_z > Z_C$;
- c) 面内剪切破坏: $\tau_{xz} > S_{TZ}$ 。

由于本文的主要目的是建立工程分析方法的架构,研究拉、压异性对复合材料舵轴强刚度的影响,故折减模型选用了较简洁的离散形式,后续可进一步引入各种连续的刚度折减模式提高分析的精度。本文所用离散形式的刚度折减模型为:

a) z向拉伸破坏后,单元产生垂直于拉伸方向的裂纹,如图7a所示,可认为材料还有一定的承受压缩载荷的能力,其他形式载荷均无法承受。

b) z向压缩破坏后,单元产生倾斜的失稳面,如图7b所示,z向压缩载荷无法承受,x向和y向拉、压载荷承受能力有一定减弱,无法承受剪切载荷。

c) 面内剪切破坏后,单元产生45°方向的裂纹,如图7c所示,认为单元丧失承载能力。

由于直接将失效的模量置零会导致计算结果奇异,本文将失效的模量降低到100 MPa,较破坏前的约100 GPa降低了3个数量级,如表6所示。

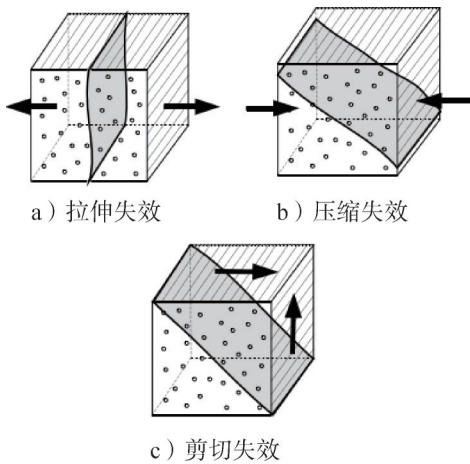


图7 失效模式示意

Fig.7 Failure mode diagram

表6 不同失效模式刚度折减结果

Tab.6 Reduction results of stiffness for different failure modes

单位:GPa

		E_R	E_T	E_Z	G_{RT}	G_{RZ}	G_{TZ}
Z向拉伸破坏	拉伸	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	压缩	0.1	0.1	32	0.1	0.1	0.1
Z向压缩破坏	拉伸	36	16	22	0.1	0.1	0.1
	压缩	5.2	88	0.1	0.1	0.1	0.1
面内剪切破坏	拉伸	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	压缩	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

3.2 引入强度准则后的USDFLD子程序

在USDFLD子程序中,增加3个Field变量,分别用于控制单元发生z向拉伸破坏、z向压缩破坏和面内剪切破坏后的性能参数变化,同时增加4个状态变量,用于在后处理中显示单元是否发生z向拉伸破坏、z向压缩破坏、面内剪切破坏以及3种失效模式单元的合集。

USDFLD子程序的流程如图8所示。

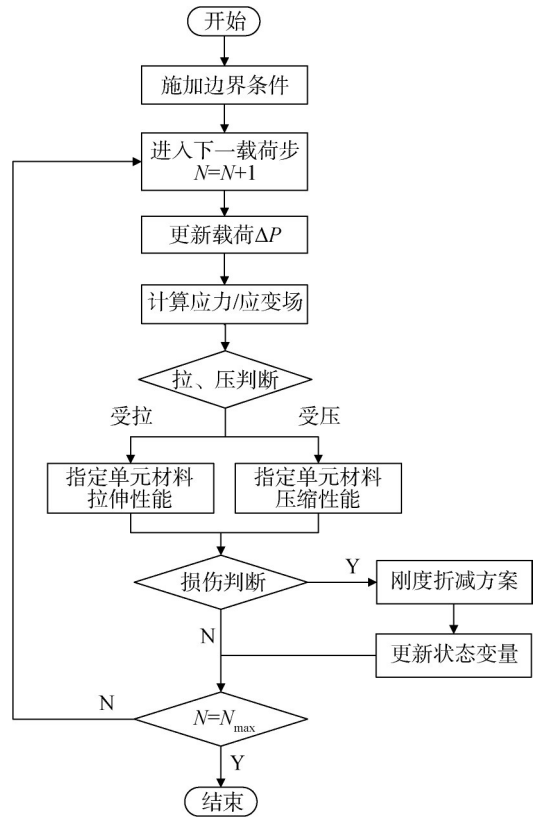


图8 USDFLD子程序的流程

Fig.8 Flowchart of USDFLD subroutine

3.3 增加宏观强度准则及刚度折减模式后分析结果

由于材料的抗拉强度较高,承受弯、剪载荷的舵轴在剪力39 000 N,弯矩11 700 N·m时首先发生了压缩破坏,破坏过程伴随有剪切破坏(剪力41 000 N,弯矩12 300 N·m时开始发生剪切破坏),直至剪力43 000 N,弯矩12 900 N·m时,舵轴受压一侧发生了完全破坏,认为此时舵轴已丧失承载能力。

z向压缩破坏过程如图9所示。其中蓝色部分为没有发生失效的单元,红色部分为已经失效、刚度折减后的单元,随着载荷的增大,失效的单元越来越多,当失效单元贯穿舵轴横截面时,认为舵轴彻底丧失承载能力。图10和图11的过程与此相似。

面内剪切破坏过程如图10所示。

两种模式综合失效过程如图11所示。

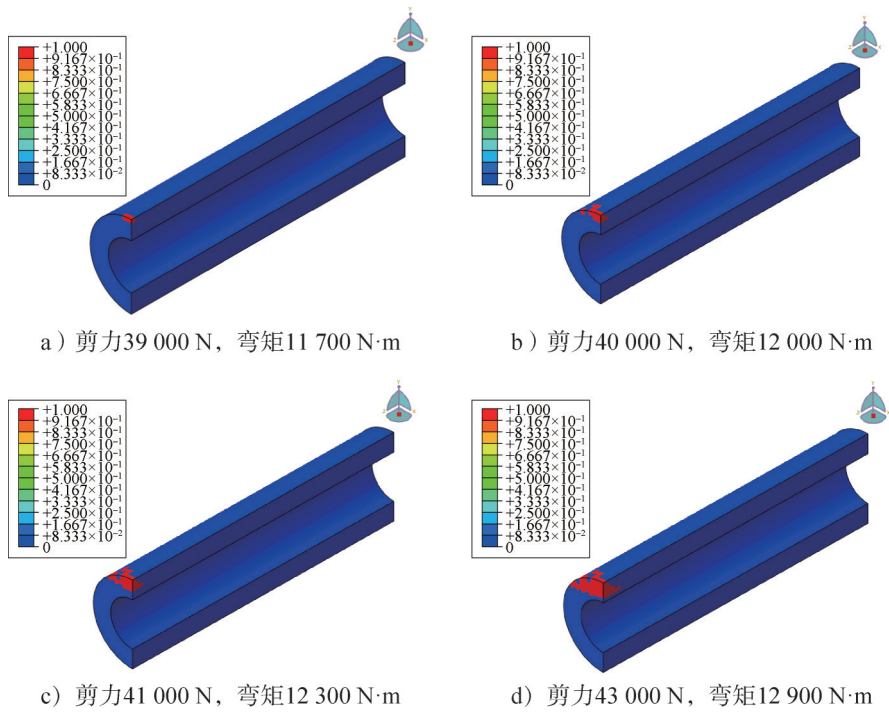


图9 压缩破坏过程示意

Fig.9 Schematic diagram of compression failure process

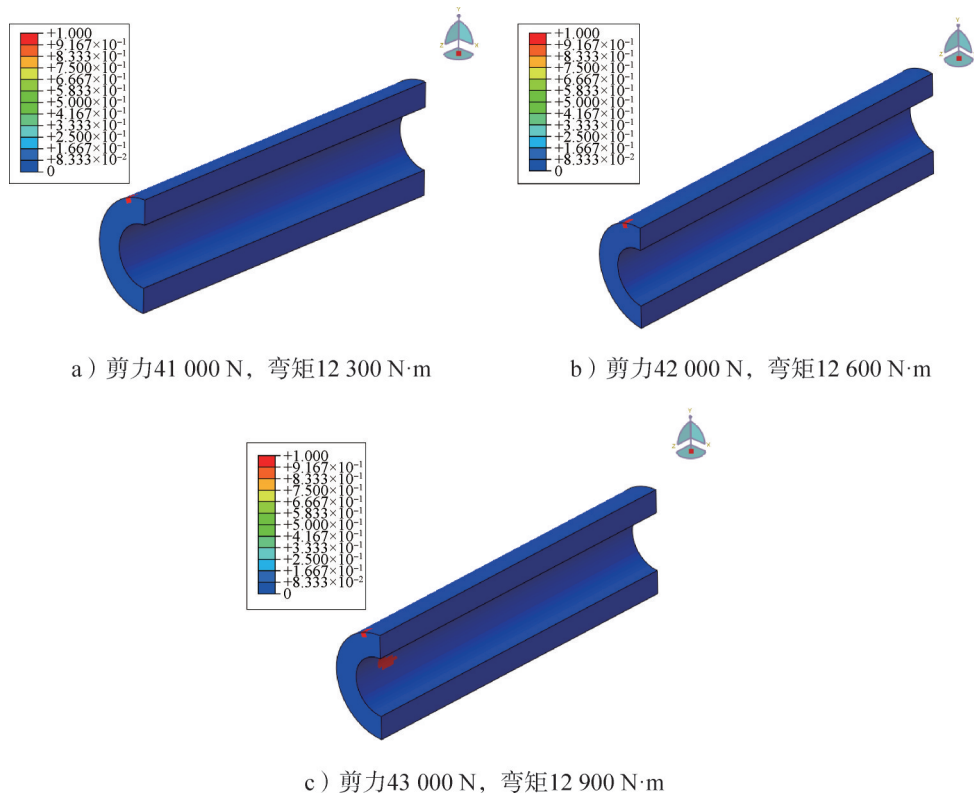


图10 剪切破坏过程示意

Fig.10 Schematic diagram of shear failure process

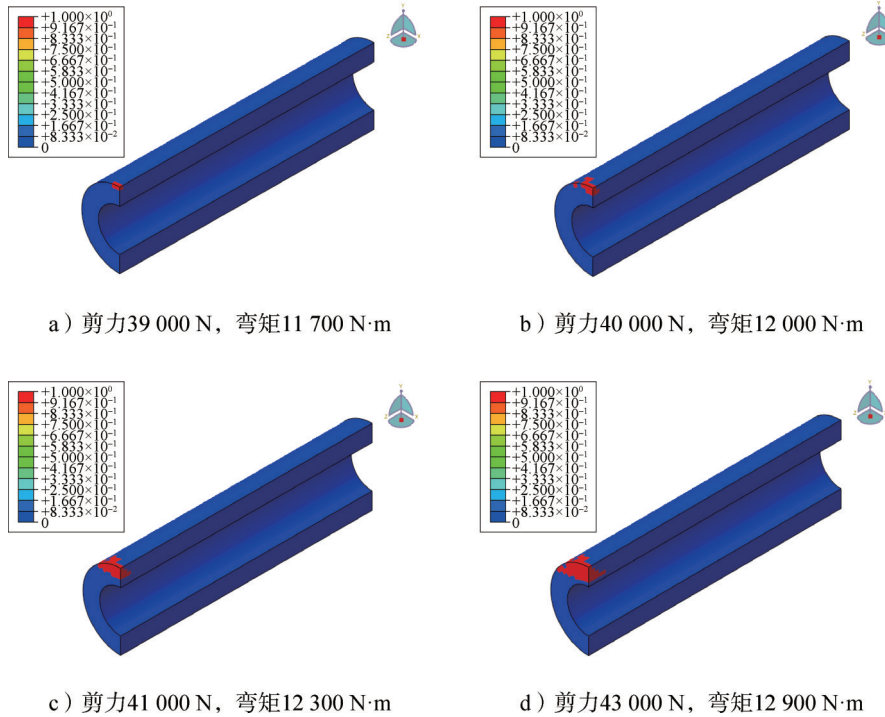


图 11 两种破坏模式综合示意

Fig.11 Schematic diagram after integrating two failure modes

3.4 舵轴分析结果与试验的对比

参考以往碳/碳舵轴的试验结果，舵轴 1 外径为 90 mm，内径为 50 mm，长度为 300 mm，在剪力为 47 046 N、弯矩为 14 114 N·m 时破坏，舵轴 2 外径为 80 mm，内径为 30 mm，长度为 335 mm，在剪力为 27 949 N、弯矩为 9 363 N·m 时破坏。采用本文方法分析所得结果与试验的对比如表 7，可以看到分析结果与试验结果一致性较好，但是复合材料舵轴强度离散较大，初始损伤的载荷难以通过试验给出，还需要更多的试验子样来修正现有分析方法。

表 7 舵轴试验与分析所得破坏载荷对比

Tab.7 Comparison of failure load obtained from rudder shaft test and analysis

舵轴外径/ mm	舵轴内径/ mm	试验结果		分析结果	
		剪力/N	弯矩/(N·m)	剪力/N	弯矩/(N·m)
90	50	47 046	14 114	43 000	12 900
80	30	27 949	9 363	28 000	9 380

4 后续研究思路

由上述论述过程可见，本文通过二次开发 ABAQUS 商用软件，建立了三维正交各向异性碳/碳工程大尺度结构的损伤破坏分析架构，主要研究了拉、压异性对应力分析结果的影响，引入刚度折减模型和强度准则后，预示了典型舵轴结构的破坏过程，

后续还需要对刚度折减模型和强度准则进行深入研究，提高结构损伤分析的精度。

复合材料强度准则分为宏观和细观强度准则两个方向。Tsai-Wu 准则是比较完备的宏观强度准则，但是三阶以上多项式系数的数量较大且依赖试验来确定。细观的强度准则近些年得到了较多发展，但仍停留在预示复合材料层合板材料试验的阶段，难以直接应用于工程结构分析。即学术层面的精确方法用于工程大尺度结构分析还有很多难点，包括非线性迭代计算规模较大、基本材料参数的获取较难等，如何发展适用于工程结构分析的强度准则是亟待解决的基础问题。

刚度折减模型决定结构产生初始损伤后的进一步破坏过程，更加符合实际的刚度折减模型需要结合试验和材料细观破坏模式来确定。

5 结束语

本文以具有拉、压异性的碳/碳复合材料为研究对象，通过 ABAQUS 软件的 USDFLD 二次开发接口，实现了考虑拉、压异性的工程结构分析。通过对典型承弯舵轴的分析发现，拉、压异性会对舵轴的应力分布产生明显影响。进一步引入强度准则和刚度折减模型，对舵轴的破坏过程进行了仿真，预示了舵轴主要为压缩破坏，伴随有剪切破坏的具体破坏过程。最后

指出了亟待发展适用于工程结构分析的高精度强度准则和刚度折减模型。

参 考 文 献

- [1] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
SHEN Guanlin, HU Gengkai. Mechanics of composite materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [2] PUCK A, SCHÜRMAN H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models[J]. Composites Science & Technology, 2002, 62(12-13): 1633-1662.
- [3] SHEN Xiuli, QIAO Yifei. Thermal load test method and numerical calculation for ceramic matrix composite turbine guide vane[J]. Applied Composite Materials, 2019, 26: 553-573.
- [4] SUN Jin, ZHOU Guangming. In-plane shear investigation of 3D surface-core braided composites[J]. Composites Science and Technology, 2016, 135: 54-66.
- [5] LI Nian, GU Jiefei, CHEN Puhui. Fracture plane based failure criteria for fibre-reinforced composites under three-dimensional stress state[J]. Composite Structures, 2018, 204: 466-474.
- [6] WANG Jie, XIAO Yi. Finite element analysis of elastic-plastic problems for strength-differential fiber reinforced resin matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(6): 1558-1566.
- [7] 黄耀英, 包腾飞. 考虑拉压异性徐变的高混凝土坝实测应变转换应力探讨[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 570-574.
HUANG Yaoying, BAO Tengfei. The investigation of stress transformation from measured strains for high concrete dams considering tensile and compressive different creep[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(4): 570-574.
- [8] GU Zhenlong. Nonlinear bi-modulus model and strength criterion of 4D Carbon-Carbon material[J]. Composite Materials, 1989, 23: 988-996.
- [9] 杜善义, 韩杰才. 多向编织碳/碳材料力学行为研究[J]. 宇航学报, 1995, 10(4): 94-100.
DU Shanyi, HAN Jiecai. Study on the mechanical behavior of multi-directional woven carbon/carbon materials[J]. Journal of Astronautics, 1995, 10(4): 94-100.
- [10] 王宝来, 梁军, 刘洋. 三维编织细编穿刺炭/炭复合材料拉伸与压缩性能及试件尺寸效应研究[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(2): 184-187.
WANG Baolai, LIANG Jun, LIU Yang. Study on tensile and compressive properties and size effect of 3D fine woven punctured carbon/carbon composite[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(2): 184-187.
- [11] 陶亮, 矫桂琼, 王波. 各向异性编织CMC弯曲断裂失效模型[J]. 固体力学学报, 2003, 24(4): 441-445.
TAO Liang, JIAO Guiqiong, WANG Bo. A failure model of 3-D braided CMC's flexure fracture[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2003, 24(4): 441-445.
- [12] 杨彩云, 李嘉禄. 三维机织复合材料力学性能的各向异性[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 59-64.
YANG Caiyun, LI Jialu. Mechanical anisotropy of three dimensional woven composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(2): 59-64.
- [13] 贾斐, 杨成鹏. 各向异性复合材料强度失效判据综述[J]. 力学学报, 2024, 56(4): 1006-1024.
JIA Fei, YANG Chengpeng. Review on strength failure criteria of anisotropic composite materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(4): 1006-1024.
- [14] 谢宗焜, 李想. 各向异性复合材料开孔板拉伸强度预测及模型验证[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1242-1250.
XIE Zonghong, LI Xiang. Tensile strength prediction and model validation of anisotropic composite laminates with open holes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1242-1250.
- [15] 陈波, 温卫东, 崔海涛. 基于细观结构的三维四向复合材料刚度预测模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2721-2728.
CHEN Bo, WEN Weidong, CUI Haitao. A stiffness prediction model for three-dimensional four directional composites based on mesoscopic structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2721-2728.

作 者 简 介

- 杨鑫鑫 (1985—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器结构强度设计。
- 黄建栋 (1981—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。
- 杨 浩 (1983—), 男, 研究员, 主要研究方向为飞行器结构强度设计。
- 乔逸飞 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为飞行器结构强度设计。
- 王淑玉 (1982—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器结构强度设计。

(上接第89页)

- [19] KRISHNA T V, SREEKUMAR J, SUGARNO M I, et al. Effect of leading-edge bluntness on shockwave-boundary-layer interaction in a scramjet intake[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2024, 61(6): 1475-1486.
- [20] CHEN Xiong, ZHENG Ya, ZHOU Changsheng, et al. Numerical simulation on ramjet inlet with different cowl leading edge[C]. Toronto: 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2005.
- [21] CHEN Xiong, ZHOU Changsheng, ZHENG Ya, et al. Influence of cowl leading edge on inlet performance of ramjet assisted-range projectiles[C]. Arizona: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [22] SCHÜLEIN E. Skin-friction and heat flux measurements in shock/boundary-layer interaction flows[J]. AIAA Journal, 2006, 44(8): 1732-1741.

作 者 简 介

- 张晨凯 (1987—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为内流空气动力学和风洞特种试验技术。
- 温玉芬 (1986—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为内外流空气动力学。
- 王 帅 (1993—), 男, 工程师, 主要研究方向为风洞特种试验技术。