

文章编号:1674-8190(2013)02-145-05

# 复合材料主轴设计及应用进展

陆山,孙庆伟

(西北工业大学 动力与能源学院,西安 710072)

**摘要:** 航空发动机复合材料主轴工作环境复杂,承受多种载荷,了解不同铺层对其力学性能的影响可以为开展复合材料主轴方案设计提供借鉴。综述了国内外在复合材料轴方面的研究进展及应用情况,分析了不同铺层设计对复合材料轴的疲劳载荷、损伤以及振动的影响。在总结复合材料轴设计一般原则的基础上,提出了后续开展航空发动机复合材料主轴设计时的研究工作建议。

**关键词:** 复合材料;主轴;铺层设计

**中图分类号:** V257

**文献标识码:** A

## Progress in Design and Application of Composite Main Shaft

Lu Shan, Sun Qingwei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aero-engine composite main shaft works in a complicated environment, subjects to many loads. Understanding how different plies effect on mechanical properties can provide reference for design of composite main shaft. A comprehensive introduction is taken on the research and application of composite shaft both domestic and abroad, and the effects on fatigue load, damage tolerance and vibration caused by layer designs are analyzed. Brief principal on composite shaft design is summarized. Some suggestions on the research of composite shaft in the future are put forward at last.

**Key words:** composite; main shaft; ply design

## 0 引言

提高发动机推重比始终是航空动力不懈追求的目标。主轴是发动机结构中的重要组成部分,对其进行减重设计能有效提高发动机推重比。但是受到材料强度、疲劳寿命、临界转速等条件的限制,使用传统金属或合金设计的主轴减重空间非常有限,新材料和新结构的开发使用将是突破目前水平实现未来发动机增推减重的重要途径。因此,开展航空发动机复合材料主轴设计方案研究显得非常必要。

纤维增强复合材料由于具有较高的比强度和比模量,目前已经广泛应用于飞行器和航空发动

机。如美国全部用碳纤维增强复合材料(CFRP)制成一架八座椅商用飞机——里尔一芳 2000 号,仅重 567 kg 并试飞成功;波音 767 大型客机使用先进复合材料作为主承力部件,减重的同时提高了飞行性能<sup>[1]</sup>;我国在 20 世纪已成功制造出直径超过 19 m 的玻璃钢风机叶片以及长度仅为 7 cm 的玻璃钢压气机叶片<sup>[2]</sup>。

但与其他部件相比,发动机主轴的复合材料设计进展较慢,主要因为它是一个高速旋转件,结构长,载荷复杂,而且各长度段的工作环境不同,具体体现在<sup>[3]</sup>以下几方面:

(1) 主轴承受多种载荷包括扭转、拉伸、弯曲,静强度尤其是扭转强度要求很高。

(2) 主轴是一个高速旋转件,转速变化范围大,尤其是对低压轴来说,跨度很大,因此对防振的要求很高。

(3) 发动机主轴是一个长寿命部件,起降过程

中以及机动飞行中的高、低周疲劳载荷要求它具有高的疲劳强度。

(4) 发动机主轴涡轮段主要在高温环境下工作,材料必须要有高强度,而且还要有高蠕变抗性,而压气机段的温度要低很多,对材料要求与高温段有所不同。

另外,发动机主轴如果破坏,后果往往是灾难性的。单一金属材料的强度理论相对成熟,也经过了实践认证,可以保证使用中的安全性。而目前复合材料强度理论和应用还存在着不少矛盾和问题不易解决<sup>[4]</sup>,在很大程度上限制了使用复合材料设计主轴。

本文对近年来公开发表的在各领域开展的纤维增强复合材料轴的研究方向进行归类,总结不同铺层方法对复合材料轴力学性能的影响,从前人工作中提炼出进行复合材料轴设计的经验准则,为今后开展复合材料主轴方案设计提供借鉴。

## 1 复合材料轴的研究进展及方向

### 1.1 研究进展

国外对复合材料轴的研究始于20世纪70年代,首先在汽车领域取得突破,分析了不同复合材料对汽车传动轴设计的影响<sup>[5-6]</sup>,而后在航空方面取得进展<sup>[7]</sup>。R. F. Kraus<sup>[8]</sup>从20世纪80年代开始就着手对直升机轴的复合材料设计,以期达到减重和简化系统的效果;J. G. Domenick<sup>[9]</sup>对F404发动机动力输出轴进行了复合材料设计,使其工作转速明显提高,并成功应用到X29飞机上;Wojciechowski等<sup>[10]</sup>对双转子涡轮喷气发动机主轴进行了复合材料设计并申请了美国专利。

国内的研究报道内容多集中在民用方面,如汽车传动轴、风机动力轴等。李丽等<sup>[11]</sup>进行了汽车碳纤维复合材料传动轴的设计与动力学分析,比较了有限元模型与理论公式法在计算临界转速方面的差异,证明了有限元法的可靠性;沈碧霞等<sup>[12]</sup>对汽车传动轴的设计与分析采用的则是玻璃纤维与碳纤维混合的复合材料;胡晶等<sup>[13]</sup>对风机传动轴进行了复合材料铺层设计和优化并试验了扭转性能;许兆棠等<sup>[14]</sup>研究了直升机复合材料传动轴,但仅限于振动分析理论研究方面。

### 1.2 研究方向

已开展的复合材料轴研究工作主要包含以下

几个方面:疲劳分析、屈曲分析、损伤容限分析和转子动力学分析等。考虑到经济及工艺实用性,也有少量关于盘轴连接处理的研究。

#### 1.2.1 疲劳分析

飞机的起降过程及机动飞行过程要求发动机在各种工况下交替工作,承受典型的高、低循环复合疲劳载荷作用。其中,扭矩和轴向力是与发动机油门杆相关的低循环疲劳载荷,在主轴工作寿命内循环104次左右;振动扭矩和弯矩则为叠加在低循环疲劳载荷上的高循环疲劳载荷,其作用超过107次。对主轴进行疲劳强度分析是有必要的,而且还要考虑两种载荷频次及其相互作用的影响<sup>[3]</sup>。

D. G. Lee等<sup>[15]</sup>对复合材料轴进行了疲劳特性研究。试验件是铝质轴芯与碳纤维复合材料通过共固化连接而成的。纤维沿轴向铺设,主要是增加刚度提高临界转速,铝质轴芯承担传扭作用。由于金属的线膨胀系数远大于纤维,加工过程中如果没有经过特殊处理就会产生残余热应力。所以,研究该轴的疲劳特性时,已考虑到工艺过程中残余热应力的影响。试验发现,在加工过程中通过施加轴向预压力减小残余热应力,可以明显地提高疲劳寿命;并且,只要在屈服极限范围内增加预压力,轴的疲劳承载能力会明显增加;所有试验件首先都是铝质轴芯由于裂纹的发展而沿着45°方向发生断裂,然后轴芯和复合层分离,导致轴的失效。同时对纯铝轴也进行了相同的试验,试验结果显示,复合材料层对扭转疲劳寿命的影响不大,轴向铺设纤维只是提高轴向刚度及减轻重量。

N. Himmel<sup>[16]</sup>对复合材料轴进行了扭转疲劳特性试验,试件是薄壁圆管,全部由复合材料制作——玻璃纤维缠绕乙烯基聚合物基质,沿45°方向缠绕。试验结果发现,扭转疲劳失效和扭转静强度失效是由聚合物基质控制的,而拉压疲劳载荷作用下的失效是由纤维控制的。同时,提出了基于聚合物基质失效的扭转疲劳预测方法,该方法使用临界元应力失效准则。

#### 1.2.2 屈曲分析

O. A. Bauchau等<sup>[17]</sup>指出,复合材料适用于长的动力轴,既可以增加扭矩也可以提高转速。对于像航空发动机主轴这样的空心轴,如果壁太薄,扭转载荷下的失效模式是扭转屈曲,而不是材料失效。因此在提高轴的传扭能力的同时必须提高轴

的横向稳定性。

J. A. Pierre<sup>[18]</sup>给出了直升机传动轴设计初期屈曲极限载荷的估算模型

$$T_{\alpha} = kE_x E_y^{1-\alpha} \frac{t^{2.25} R^{1.25}}{L^{0.5}}$$

式中:  $E_x$  和  $E_y$  分别为轴向和周向弹性模量;  $t$  为壁厚;  $R$  为平均半径;  $L$  为轴长;  $k=4.1$  和  $\alpha=0.325$  为经验系数。

根据试验结果<sup>[19]</sup>, 上式算得的极限扭矩  $T_{\alpha}$  应该再下调 25%。

O. A. Bauchau 等<sup>[17]</sup>对复合轴进行了屈曲试验, 试样是碳纤维/环氧基缠绕铝芯。试验表明, 纤维铺设顺序和加载方向对复合材料轴屈曲载荷的影响可达 80%, 试验中 +45° 和 -45° 铺层之间铺设 0° 层得到的扭转屈曲极限载荷比其他铺层组合方式高; 即使对于半径厚度比  $R/h$  大于 50 的薄壁轴, 当轴表面屈曲线数目大于 3 时, 剪切变形对屈曲载荷的影响是很重要的, 基于此, 给出了考虑弹性耦合影响和截面剪切变形影响的屈曲载荷预测模型, 并比较了预测值与试验值, 两者吻合。对有损伤的复合材料轴进行扭转试验时失效模式也是屈曲, 作者认为复合轴的扭转屈曲主要受刚度而不是强度支配。

胡晶等<sup>[13]</sup>使用有限元软件 ABAQUS 对碳纤维/环氧基复合材料轴的力学性能影响因素进行了研究, 指出 45° 铺层能明显增加复合材料轴的刚度, 这一点与 O. A. Bauchau 的结论相似, 同时也指出, 当铺层数超过 12 层时, 刚度提高不明显。

### 1.2.3 损伤容限分析

设计复合材料轴时, 在开始阶段就应该考虑到其损伤容限能力。因为与纯金属材料 and 合金不同, 复合材料为分层结构, 初始破坏更能引起裂纹扩展导致结构失效<sup>[19]</sup>。轴类零件是典型的内部工作件, 在安装维护等过程中会与其他部件发生碰触, 从而受到低速冲击载荷作用引起损伤<sup>[18]</sup>, 而发动机主轴在服役过程中由于疲劳载荷作用使得损伤累积导致轴发生断裂等破坏, 造成灾难性后果。因此在对航空发动机轴进行复合材料设计时, 必须进行损伤容限设计。

J. A. Pierre<sup>[18]</sup>对不同材料的直升机传动轴进行了损伤容限试验。试验中用不同冲击能模拟实际冲击事件, 试验完成后对轴进行扭转试验测试其

剩余强度。试样分 4 组, 如表 1 所示。

表 1 冲击试验中复合材料轴的组成  
Table 1 Material composition of composite shafts in impact tests

试样分组	基质	纤维	结合方式
1	热塑性聚醚醚酮	石墨纤维	纤维缠绕
2	热塑性聚醚醚酮	石墨纤维	纤维镶嵌
3	标准环氧基	石墨纤维	纤维双向编织
4	强化环氧基	石墨纤维	纤维双向编织

该研究发现: 所有冲击作用下复合轴都有分层现象即出现损伤; 强化环氧基基质轴对低速撞击的损伤容限最高, 热塑性聚醚醚酮基质轴撞击后剩余强度最高; 工艺原因导致纤维编织轴应力水平远低于强度时就在模塑分界线处破坏。

### 1.2.4 转子动力学分析

任何一种旋转机械, 特别是航空发动机, 在工作过程中都难免发生转子振动现象, 尤其是临界转速附近的振动, 对飞机及发动机来说, 转子是振源<sup>[20]</sup>。

飞机发动机工作状态经常发生变化, 包括启动、慢车、巡航、加速等, 这就要求发动机主轴工作转速变化范围很大。对轴类部件进行转子动力学分析主要是防止振动, 使得在各个工作状态下, 轴的振动响应不会过大。亚临界设计要求最大工作转速在临界转速以下, 而且还要保证一定的转速安全裕度<sup>[10]</sup>。复合材料铺层设计的一个主要方面就是提高轴的临界转速, 使转速安全裕度增加。

Wojciechowski 等<sup>[10]</sup>对涡轮喷气发动机低压轴进行复合材料研究时, 复合材料铺层设计沿着轴向(即 0° 方向), 因为复合材料沿纤维方向具有高比模量。此处设计使用的是金属基复合材料——钛基钨纤维复合材料, 与树脂基复合材料相比, 金属基复合材料剪切强度更高, 物理和化学性能更稳定<sup>[1]</sup>。

J. G. Domenick<sup>[9]</sup>对 F404 发动机传动轴进行复合材料设计时, 采用的是纤维沿 14° 方向铺设, 目的是同时满足扭矩和转速的要求。在研究中发现, 因为临界转速在工作转速之下, 传统的金属轴并不能满足设计中的转速要求。采用金属/复合材料设计后, 临界转速提高到了工作转速之上, 但是裕度不大。通过安装端的特殊处理, 使得临界转速

进一步提高,使安全转速裕度达到20%以上。

### 1.2.5 盘轴连接部位设计

与金属轴相比,复合材料轴虽然可以明显减重使发动机推重比提高,但是也有其不足之处,其中最重要的是,盘轴连接处的设计不如金属轴设计简便。因为复合材料比金属材料应力集中更为敏感,其抗剪强度和横向抗拉强度又较低,而连接处往往是构件薄弱的地方,因此连接问题若处理不当,将会造成该部位的局部破坏,导致整个结构破坏。所以进行轴的复合材料设计的同时,必须注重连接部位的结构设计<sup>[2]</sup>。

连接部位设计方面可供参考的研究并不多,其中 Wojciechowski 等<sup>[10]</sup>对涡轮喷气发动机低压轴给出了盘轴连接的设计方案,如图1所示。该方案为套筒过盈配合连接方案,套筒分3层,内外表面是金属铝,中间层是钛基钨纤维复合材料,纤维方向为 $\pm 45^\circ$ ,提高连接部位的传扭能力。该连接表面接触面积大,避免了应力集中,同时套筒的复合材料设计保证了其传扭能力,值得借鉴。

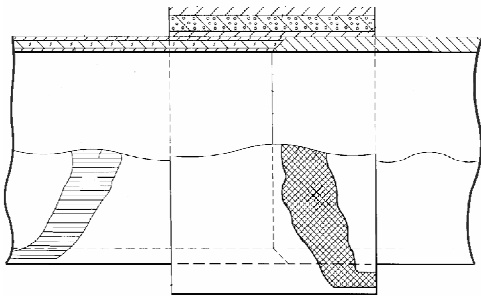


图1 套筒连接示意图

Fig. 1 Sketch map of sleeve connection

## 2 航空发动机复合材料主轴设计

关于复合材料轴的研究大多集中在地面或民用方面,少量关于航空发动机复合材料轴方面的研究,多是围绕某一特定铺层角度组合下,对轴的某一方面性能,如临界转速、疲劳抗性等展开讨论,没有开展为满足主轴的工况要求而进行优化设计的相关工作,而开展此一工作的前提是必须明确复合材料主轴设计和选材的基本准则。

### 2.1 结构设计准则

开展发动机复合材料主轴结构设计首先要明确其设计准则。进行复合材料主轴结构优化设计

时可以借鉴层合板结构设计经验<sup>[21]</sup>。

(1) 铺层取向原则:承受单向拉伸或压缩载荷,铺设方向与载荷方向一致;承受双向拉伸或压缩,取纤维方向铺层角 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 正交铺设;承受剪切载荷,纤维方向按 $\pm 45^\circ$ 成对铺设。当轴承受拉压扭转复合载荷,纤维方向按 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 铺设。

(2) 铺设顺序原则:同一角度铺层避免集中放置,以减少两种定向层之间的开裂和边缘分层。

另一方面,主轴作为循环对称件,其结构设计中又有特殊的设计准则。

(1) 铺层对称原则:为了减少复合材料轴非对称变形,铺层时尽量使得轴宏观刚度对称,若有 $+45^\circ$ 层则相邻有 $-45^\circ$ 层与之平衡<sup>[22]</sup>。

(2) 层数设计原则:为简化铺层工艺,对轴类零件铺层不宜过多,一般不超过12层<sup>[13]</sup>,设计实践也证实,最佳铺层数一般小于12层<sup>[22]</sup>。

### 2.2 选材原则

由于发动机主轴工作温度跨度大,一般在 $150\sim 500^\circ\text{C}$ 之间<sup>[23]</sup>,这使得树脂基复合材料不适用于发动机主轴设计<sup>[24]</sup>,金属基成为首选。而纤维的耐高温能力强,低于 $500^\circ\text{C}$ 时其性能基本不变<sup>[25]</sup>,影响纤维选择的主要因素是直径大小<sup>[26]</sup>。

#### (1) 基体选材

工作温度决定了需使用金属作为复合材料基体,一般首选质轻、工艺成型难度低的金属。质轻主要是考虑到减重;工艺成型包括纤维与基体的复合过程,以及复合材料与支撑轴芯的连接过程。考虑到材料成型的易实施性,一般基体与支撑轴芯选为同种材料为宜。

另外,还需考虑基体本身的宏观性能。虽然复合材料的强度、刚度等宏观性能可以通过调整纤维方向、含量等得到改善,但是基体本身的性能对复合材料宏观性能尤其是横向性能影响较大<sup>[26-28]</sup>。理论上在航空发动机复合材料主轴设计中,选用GH4169或TC11材料都可能成为其金属基及轴芯的首选,但实际设计中可能得到完全不同的结果,选用GH4169复合材料有可行解,而选用TC11作为基体则不行<sup>[22]</sup>,主要由于TC11的强度极限仅为GH4169的40%。

#### (2) 纤维选材

选用纤维时,较粗的增强纤维更为理想。因为

同等纤维体积含量下的粗纤维与基体的接触面积小,同时,大直径(如 140  $\mu\text{m}$ )纤维也有利于工艺成型,使可靠性提高<sup>[26]</sup>。

### 3 结束语

综述了国内外复合材料轴的相关研究工作,总结了复合材料轴设计的一般原则。在后续进行航空发动机复合材料主轴研究时,建议开展如下研究工作:

- (1) 进一步细化复合材料主轴结构设计的一般准则,分析纤维和基体等设计参数对复合材料力学性能的影响。
- (2) 明确复合材料主轴设计约束,并以此约束开展复合材料主轴结构设计方法研究。
- (3) 建立细观力学模型分析复合材料细观力学性能及失效模式。
- (4) 开展复合材料主轴寿命分析模型研究。

#### 参考文献

- [1] 韩荣第,金远强. 航天用特殊材料加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 182-183.  
Han Rongdi, Jin Yuanqiang. Machining technology of special materials for astronautics[M]. Harbin: Harbin Industry of Technology Press, 2007: 182-183. (in Chinese)
- [2] 陆关兴,王耀先. 复合材料结构设计[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1991: 223.  
Lu Guanxing, Wang Yaolian. Design of composite structure[M]. Shanghai: East China Institute of Chemical Technology Press, 1991: 223. (in Chinese)
- [3] 苏清友. 航空涡喷涡扇发动机主要零部件定寿指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004: 274-277.  
Su Qingyou. Life provision guides for main parts of aero turbojet engine and turbofan engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004: 274-277. (in Chinese)
- [4] 王震鸣,杜善义,张恒,等. 复合材料及其结构的力学、设计、应用和评价[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 20-23.  
Wang Zhenming, Du Shanyi, Zhang Heng, et al. Composite material and its structural mechanics, design, application and evaluation[M]. Harbin: Harbin Industry of Technology Press, 1998: 20-23. (in Chinese)
- [5] Thimmegowda R, Sabapathy V. Optimal sizing and stacking sequence of composite drive shafts[J]. Materials Science, 2005, 11(2): 133-139.
- [6] Gummadi S, Kumar A T. Optimum design and analysis of composite drive shaft for an automobile[D]. Sweden: Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology, 2007.
- [7] Singha S P, Gubran K G. Developments in dynamics of composite material shafts[J]. International Journal of Rotating Machinery, 1997, 3(3): 189-198.
- [8] Kraus R F. Design and experimental studies on supercritical composite power transmission shafting[C]. American Helicopter Society 43rd Annual Forum, St. Louis, MO, 1987: 733-738.
- [9] Domenick J G. Design and development of a power takeoff shaft[J]. Aircraft, 1986, 23(12): 876-880.
- [10] Wojciechowski, Holloway. Composite Drive Shaft[P]. United States, US Patent NO. 6210283B1, 2001.
- [11] 李丽,顾力强. 碳纤维复合材料传动轴临界转速分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(2): 239-240.  
Li Li, Gu Liqiang. An analysis on critical rotating speed of carbon fiber composite propeller shaft[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(2): 239-240. (in Chinese)
- [12] 沈碧霞,薛元德,刘壮健. 复合材料板簧与传动轴的研制[J]. 工程塑料应用, 1992, 20(4): 27-32.  
Shen Bixia, Xue Yuande, Liu Zhuangjian. Development of composite leaf spring and driveshaft for automobiles[J]. Engineering Plastics Application, 1992, 20(4): 27-32. (in Chinese)
- [13] 胡晶,李晓星,张天敏,等. 碳纤维复合材料传动轴扭性能优化设计[J]. 复合材料学报, 2009, 6(26): 177-181.  
Hu Jing, Li Xiaoxing, Zhang Tianmin, et al. Design optimization on torsion property of carbon fiber composite drive shaft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 6(26): 177-181. (in Chinese)
- [14] 许兆棠,朱如鹏. 直升机复合材料传动轴的主共振分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 155-160.  
Xu Zhaotang, Zhu Rupeng. Main resonance analysis of a composite helicopter driveshaft[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 155-160. (in Chinese)
- [15] Lee D G, Kim J W, Hwang H Y. Torsional fatigue characteristics of aluminum-composite co-cured shafts with axial compressive preload[J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38(9): 737-756.
- [16] Himmel N. Fatigue life prediction of laminated polymer matrix composites[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 349-360.
- [17] Bauchau O A, Krafchack T M, Hayes J F. Torsional buckling analysis and damage tolerance of graphite/epoxy shafts[J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22(3): 258-270.
- [18] Pierre J A. Damage tolerance evaluation of new manufacturing techniques for composite helicopter drive shafts[J]. AIAA-93-1400-CP, 1993.
- [19] Bauchau, Bryan, Peck. Torsional buckling analysis and damage tolerance of graphite/epoxy shafts[C]. Boston: Proceedings of the American Helicopter Society 45th Annual Forum, 1989.

- [6] 冯潼能, 王铮阳, 宋娅. MBD技术在协同设计制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2010(18): 64-67.  
Feng Tongneng, Wang Zhengyang, Song Ya. Application of MBD in Collaborative Design and Manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(18): 64-67. (in Chinese)
- [7] 周秋忠, 查浩宇. 基于三维标注技术的数字化产品定义方法[J]. 机械设计, 2011(1): 33-36  
Zhou Qiuzhong, Zha Haoyu. Digital product definition method based on 3D annotation technology[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(1): 33-36. (in Chinese)
- [8] 于勇, 范玉青. 飞机构型管理研究与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(3): 278-283.  
Yu Yong, Fan Yuqing. Study and application of aircraft configuration management[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(3): 278-283. (in Chinese)
- [9] 范丽华, 伍剑刚, 刘永红. 飞机构型管理研究与应用[J]. 洪都科技, 2008(1): 50-54.  
Fan Lihua, Wu Jiangan, Liu Yonghong. Development and application on A/C configuration management[J]. Hongdu Science and Technology, 2008(1): 50-54. (in Chinese)
- [10] 卢鹤, 范玉青. 飞机简化构型管理关键技术研究[J]. 航空维修与工程, 2007(3): 45-48.  
Lu Hui, Fan Yuqing. Embedded research of airplane simplified configuration management [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2007(3): 45-48. (in Chinese)
- [11] EIA649-A National Consensus Standard for Configuration Management [S]. USA; Electronic Industries Alliance, 2004.
- [12] ARP4754-A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems[S]. USA; SAE International, 2010.
- [13] 郝莲. 民机转包生产中的构型控制[J]. 航空制造技术, 2001(5): 39-42.  
Hao Lian. Configuration control in the subcontract production for commercial aircraft[J]. Aeronautics Manufacturing Technology, 2001(5): 39-42. (in Chinese)

### 作者简介:

许松林(1981—),男,工程师。主要研究方向:构型管理、产品数据管理。

龚文秀(1982—),女,高级工程师。主要研究方向:构型管理、项目管理。

王惠玲(1964—),女,研究员。主要研究方向:飞机环控、安全救生、构型管理。

(编辑:张杰)

### (上接第149页)

- [20] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京:国防工业出版社, 1988: 111.  
Li Wenlin. Strength calculation of aero engine[M]. Beijing: Nation Defense Industrial Press, 1988: 111. (in Chinese)
- [21] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2001: 145-148.  
Wang Yaoxian. Design of composite structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 145-148. (in Chinese)
- [22] 孙庆伟. 航空发动机复合材料主轴优化设计方法[D]. 西安:西北工业大学动力与能源学院, 2013.  
Sun Qingwei. Design and optimization method for composite main shaft of aircraft engine[D]. Xi'an; School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, 2013. (in Chinese)
- [23] 陆山, 陈倩, 陈军. 航空发动机主轴疲劳寿命预测方法[J]. 航空动力学报, 2010(1): 148-151.  
Lu Shan, Chen Qian, Chen Jun. Method of predicted fatigue life of aeroengine's principal shaft[J]. Journal of Aerospace Power, 2010(1): 148-151. (in Chinese)
- [24] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京:机械工业出版社, 1991: 7-9.  
Wang Zhenming. Composite material mechanics and composite structure mechanics [M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 7-9. (in Chinese)
- [25] 赵稼祥. 碳化硅纤维及其复合材料的进展[J]. 飞航导弹, 2001(1): 60-63.  
Zhao Jiexiang. Development of SiC fiber and the composite material with it[J]. Winged Missiles Journal, 2001(1): 60-63. (in Chinese)
- [26] 刘小利. 连续纤维增强整体叶环结构优化设计方法研究[D]. 西安:西北工业大学动力与能源学院, 2012.  
Liu Xiaoli. Research on structure optimum design method of continuous fiber reinforced bling[D]. Xi'an; School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, 2012. (in Chinese)
- [27] 闻荻江. 复合材料原理[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 1998: 100-110.  
Wen Dijiang. Composite material theory[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1998: 100-110. (in Chinese)
- [28] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京:化学工业出版社, 2000: 496-499.  
Wo Dingzhu. Composite material encyclopedia [M]. Beijing; Chemical Industry Press, 2000: 496-499. (in Chinese)

### 作者简介:

陆山(1955—),男,教授,博导。主要研究方向:航空发动机结构,强度、疲劳和可靠性分析。

孙庆伟(1987—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机复合材料结构设计及强度分析。

(编辑:张杰)