

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.014

法兰轴管一体成型的全碳纤维复合材料传动轴 制备与扭转试验

聂慧阳¹,倪德¹,刘之扬¹,文湘隆²,童诗坛²,张锦光²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所,湖南株洲 412002; 2. 武汉理工大学机电工程学院,武汉 430070)

摘要: 现有碳纤维复合材料传动轴通常由金属法兰与碳纤维复合材料轴管组成,金属法兰因其质量大,且需采用胶接或铆接形式与轴管进行连接,会增加启动或制动时的惯性,影响整体性能。因此,开展了法兰轴管一体成型的全碳纤维复合材料传动轴制备与扭转试验研究,采用轴管卷料及法兰翻边与环包工艺制备全碳纤维复合材料传动轴,其全长为 1 980 mm,传动轴铺层方案为 $[(\pm 45^\circ)_{32}/45^\circ]$,然后进行了静扭试验及扭转疲劳试验验证。由试验结果可得,全碳纤维复合材料传动轴在 12 000 N·m 静扭试验下,未发生破坏,测得其扭转刚度为 1.93×10^5 N·m/rad;全碳纤维复合材料传动轴在 20 万次扭转疲劳试验中未发生破坏,满足正常工作要求,扭转疲劳试验中最大剩余扭转刚度为 2.02×10^5 N·m/rad,最小剩余扭转刚度为 1.89×10^5 N·m/rad。

关键词: 碳纤维复合材料;传动轴;法兰轴管一体成型;扭转刚度;扭转疲劳特性

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0097-06

Preparation and torsion test of all-carbon fiber composite drive shaft with flange and shaft tube integrated molding

NIE Huiyang¹, NI De¹, LIU Zhiyang¹, WEN Xianglong², TONG Shitan², ZHANG Jingguang²

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract : The existing carbon fiber composite drive shaft is usually composed of metal flange and carbon fiber composite shaft tube. The metal flange has heavy weight and needs to be connected to the shaft tube by adhesive bonding or riveting, so it can increase the inertia during starting or braking and affect the overall performance. Therefore, the preparation and torsion test research of all-carbon fiber composite drive shaft with flange and shaft tube integrated molding were presented. The all-carbon fiber composite drive shaft was prepared using the tube coiling and flange flanging and wrapping process, the total length of the drive shaft was 1 980 mm, and the layering scheme was $[(\pm 45^\circ)_{32}/45^\circ]$. At last, the static torsion and torsional fatigue tests were conducted. According to the test results, the all-carbon fiber composite drive shaft has no damage under 12 000 N·m static torsion test, and its torsional stiffness is 1.93×10^5 N·m/rad. No damage occurs in the torsional fatigue tests with 200 000 times, which met the normal working requirements. The maximum residual torsional stiffness in the torsional fatigue test is 2.02×10^5 N·m/rad, and the minimum residual torsional stiffness is 1.89×10^5 N·m/rad.

Keywords : carbon fiber composite ; drive shaft ; flange and shaft tube integrated molding ; torsional stiffness ; torsional fatigue characteristic

传动轴是传动系统中的重要部件,金属传动轴因其质量大,会增加启动或制动时的惯性,影响传动系统整体性能。碳纤维复合材料具有强度高、质量轻、可设计性好等优点,在传动轴的轻量化设计

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975435)

通信作者: 张锦光,博士,教授,博士生导师,研究方向为复合材料结构功能一体化设计技术、减振技术与应用、智能制造技术与装备

收稿日期: 2024-08-29

引用格式: 聂慧阳,倪德,刘之扬,等. 法兰轴管一体成型的全碳纤维复合材料传动轴制备与扭转试验[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 97-102.

NIE Huiyang, NI De, LIU Zhiyang, et al. Preparation and torsion test of all-carbon fiber composite drive shaft with flange and shaft tube integrated molding[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 97-102.

中得到了广泛应用^[1-3]。

目前碳纤维复合材料传动轴通常由碳纤维复合材料轴管与金属法兰连接而成,常采用机械连接、胶接连接和混合连接等连接方式。罗睿^[4]设计了一体化齿形连接复合材料传动轴结构,基于齿纹机械连接,研究了复合材料齿几何特征对接头强度的影响。卢相学^[5]提出齿纹-胶接连接和齿纹机械连接,将外套筒内壁两端制成矩形齿纹,与金属轴头进行连接,增强了连接强度,然后将外套筒和内套筒分别与金属轴头和碳纤维管进行胶接,最后通过销钉连接将三者加固。赵文辉等^[6]使用变直径套管通过胶接方式连接碳纤维复合材料轴管与金属轴管,与采用等直径套管通过胶接方式连接碳纤维复合材料轴管与金属轴管的结构模式相比,使用变直径套管的连接结构的抗扭强度可以提高约27%,扭转剪切应力的均匀性可以提高约22%,强化了碳纤维复合材料轴管连接结构中存在的薄弱环节。王姝丹等^[7]在舰船推进轴系设计研究中对胶接连接、机械连接、混合连接和轴管法兰一体式连接方式的碳纤维复合材料轴抗扭转与抗拉压能力进行了对比。

目前碳纤维复合材料轴管制造主要以缠绕成型工艺为主^[8]。孙泽玉^[9]和谷晓妹等^[10]采用复合材料缠绕成型工艺制备了复合材料轴。曹培欢等^[11]研究了铺层角度对缠绕成型的传动轴扭转角影响,结果表明,随着铺层缠绕角度的增大,传动轴的扭转角呈现先减后增趋势,且采用45°铺层时,传动轴扭转角最小。Nayak等^[12]使用缠绕工艺对碳纤维复合材料传动轴进行制作,并对其扭转强度进行了测试。结果显示该碳纤维复合材料传动轴扭转强度相较于原金属传动轴提高了8.5%,并且质量减轻了60%。Prasad等^[13]使用长丝缠绕工艺制作了一种用于轻型汽车的玻璃纤维增强环氧复合材料传动轴。Tariq等^[14]使用长丝缠绕成型与卷管工艺制作了一种复合材料传动轴。孙泽玉^[9]采用金属件预埋的方法,通过缠绕成型技术制备了无胶接结构的一体化复合材料传动轴。朱桂龙等^[15]采用热压罐固化工艺制备复合材料传动轴,并进行了性能测试,测试结果表明,该复合材料传动轴相对铝合金材料传动轴,具有质量更轻、固有频率更高及使用寿命更长的优点。

在传统碳纤维复合材料传动轴的设计中,传动

轴整体一般由金属法兰与碳纤维复合材料轴管组成,金属法兰质量大,会影响传动轴整体性能。为了进一步减轻传动轴的质量,提出了一种全碳纤维复合材料传动轴制备工艺,研制了碳纤维复合材料轴管与法兰一体化成型的全碳纤维复合材料传动轴,并对该传动轴开展了静扭试验与疲劳试验研究,为碳纤维复合材料传动轴一体化成型工艺提供借鉴。

1 全碳纤维复合材料传动轴结构设计与制备

1.1 全碳纤维复合材料传动轴结构设计

对标某铝合金传动轴进行等代设计,扭转强度不低于12 000 N·m,扭转刚度不低于 1.6×10^5 N·m/rad,疲劳寿命大于20万次,考虑强度、刚度和寿命要求对全碳纤维复合材料传动轴进行了结构设计。全碳纤维复合材料传动轴内径142 mm、外径155 mm、总长1 980 mm,法兰外径250 mm、厚度30 mm,分度圆直径206 mm,法兰孔内径30 mm,其中法兰孔装有内径22 mm的铝合金衬套。含铝合金衬套的全碳纤维复合材料传动轴总重为11.70 kg,其工程图如图1所示。

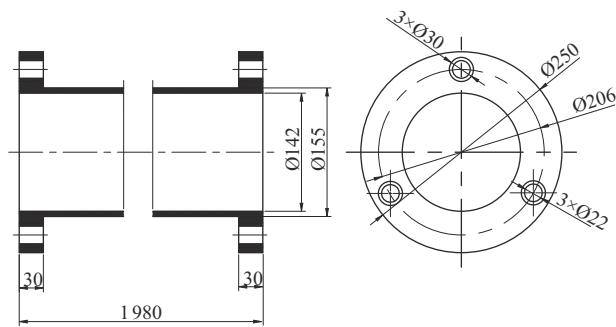


图1 全碳纤维复合材料传动轴工程图

Fig. 1 Engineering drawing of all-carbon fiber composite drive shaft

笔者设计的全碳纤维复合材料传动轴所用材料为连云港神鹰复合材料科技有限公司生产的牌号为C100R3724S的碳纤维预浸料单向布(预浸布),性能级别为T700级,树脂基为惠柏新材料科技(上海)股份有限公司的5001树脂,预浸布单层厚度为0.1 mm,树脂体积分数为33%,其性能参数见表1;铝合金衬套材料选用6061铝合金,密度为2 700 kg/m³,拉伸弹性模量为69 000 MPa。

采用45°铺层能提高传动轴的抗扭性能^[15],并且对称铺层方式相比于非对称铺层方式更能提高轴管抗扭强度。最终确定传动轴轴管部分的铺层方案为 $[(\pm 45^\circ)_{32}/45^\circ]$,沿径向铺层,共65层,如图2所示。针对法兰部分,其沿径向铺层不宜与轴管连

表 1 C100R3724S 碳纤维预浸布性能参数

Tab. 1 Performance parameters of C100R3724S carbon fiber prepreg cloth

Parameters	Value	Parameters	Value
E_1/MPa	140 000	$G_{TT}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.25
E_2/MPa	9 000	$G_{TC}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.75
E_3/MPa	9 000	X_t/MPa	1 760
ν_{12}	0.24	Y_t/MPa	51
ν_{13}	0.24	Z_t/MPa	51
ν_{23}	0.28	X_c/MPa	1 100
G_{12}/MPa	4 600	Y_c/MPa	130
G_{13}/MPa	4 600	Z_c/MPa	130
G_{23}/MPa	3 080	S/MPa	60
$G_{LT}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	50	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600
$G_{LC}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	75		

Notes: E_1, E_2, E_3 is tensile modulus of carbon fiber composite in three main directions; $\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$ is Poisson ratio in 1-2, 2-3, 1-3 directions; G_{12}, G_{23}, G_{13} is shear modulus within three planes of 1-2, 1-3, and 2-3; G_{LT}, G_{LC} is longitudinal tensile and compressive fracture toughness of fibers; G_{TT}, G_{TC} is transverse tensile and compressive fracture toughness of fibers; X_t, X_c is tensile and compressive strength in 1 direction; Y_t, Y_c is tensile and compressive strength in 2 direction; Z_t, Z_c is tensile and compressive strength in 3 direction; S is material in-plane shear strength; ρ is material density.

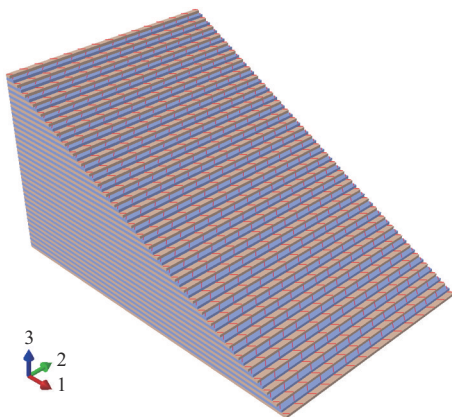


图 2 传动轴轴管铺层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drive shaft tube laying

接,实际采用轴向铺层和轴管预浸料翻边与搭接至法兰端面两种工艺,铺层方案 $[\pm 45^\circ]_{150}$,共 300 层。

1.2 全碳纤维复合材料传动轴制备

由于制备的传动轴为单件加工,无须追求过高的加工效率,同时为了实现法兰与轴管一体成型,最终选用预浸布轴管卷料工艺和法兰翻边与环包工艺对全碳纤维复合材料传动轴进行制备,其工艺路线如图 3 所示。

1.2.1 备料

在备料阶段,需同时准备好一套金属内、外模具和 100 m^2 碳纤维复合材料预浸布。

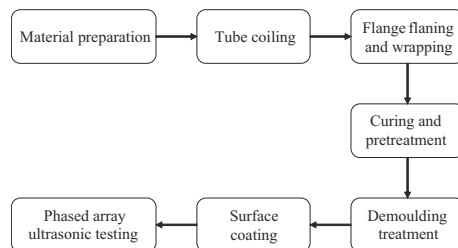


图 3 全碳纤维复合材料传动轴工艺路线图

Fig. 3 Process roadmap of all-carbon fiber composite drive shaft

金属模具分为金属芯模及法兰模具,采用 P20 模具钢,加工精度为 GB/T 1804-2000 的 m 等级。其中,芯模圆柱表面粗糙度为 $R_a 0.8$,直线度和圆跳动均为 0.05,采用机械加工的方式。将加工好的金属芯模表面清洗干净,对后续卷管区域进行喷砂处理,以增大金属芯模表面粗糙度。金属模具实物如图 4 所示。

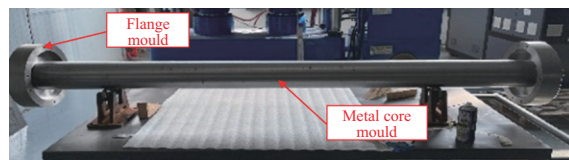


图 4 全碳纤维复合材料传动轴的金属芯模及法兰模具

Fig. 4 Metal core mould and flange mould for all-carbon fiber composite drive shaft

1.2.2 轴管卷料

卷料之前将金属芯模放在加热设备中进行预热,预热温度为 120°C ,保持 0.5 h。预热的目的是使预浸布在卷料时能够更好地贴金属芯模的外表面。预热完成后将金属芯模固定,在芯模轴管处涂上脱模剂,并对芯模进行划线,确定好预浸布卷料的起始位置,接下来进行卷料。

1.2.3 法兰翻边与环包

传动轴可分为轴管与法兰两部分,主要通过法兰翻边与环包工艺实现法兰和轴管的一体成型。预先缠绕两层预浸布,将长于轴管部分的预浸布剪开,方便后续翻边处理。将法兰按厚度均分为 5 片,将第 1 片套入模具中,接着将长于轴管部分的预浸布反向贴敷在法兰片上,完成翻边工艺。之后在轴管上缠上 7 层预浸布,同样将长于轴管部分的预浸布剪开,正向铺贴在法兰片上,完成环包工艺,至此就完成了—次翻边与环包工艺,如图 5 所示。

1.2.4 OPP 带缠绕

每铺贴 2 mm 厚度预浸布,便采用 OPP 热熔捆扎带(OPP 带)对轴管最外层进行紧密缠绕,排出层间空气,以确保复合材料每层之间贴合紧密,如图 6

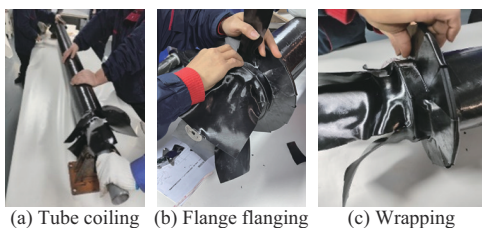


图5 法兰翻边与环包工艺过程图

Fig. 5 Diagram of flange flanging and ring wrapping process

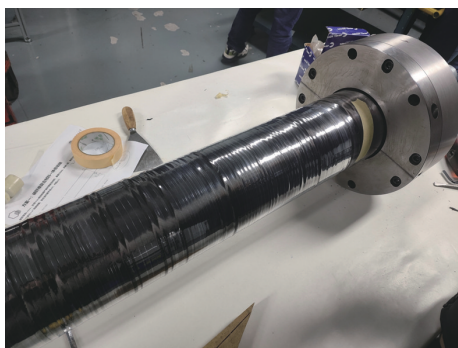


图6 OPP带缠绕示意图

Fig. 6 OPP tape winding diagram

所示。

1.2.5 固化前准备

将缠绕完成的传动轴包裹上脱模布,并在法兰模具的内表面涂刷上脱模剂,方便后续脱模;然后将传动轴与模具放入气袋内密封与抽真空,准备固化成型。

1.2.6 固化成型

固化成型工艺参数按照成型经验及树脂厂商推荐参数进行设置,采用分步成型,首先从 20 °C 升温至 80 °C,保持 0.5 h,随后从 80 °C 升温至 120 °C,保持 4 h,升温速率全程为 5 °C/min,压力全程保持 0.6 MPa,采用自然冷却方式。固化温度工艺曲线如图 7 所示。

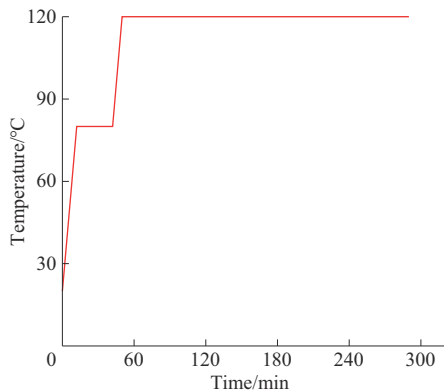


图7 固化温度工艺曲线

Fig. 7 Curing temperature process curve

1.2.7 脱模与涂装

将传动轴与芯模放到脱模机上进行脱模,然后进行法兰打孔与外表面涂装,最终得到固化成型后的传动轴,如图 8 所示。



图8 制备完成的全碳纤维复合材料传动轴

Fig. 8 The fabricated all-carbon fiber composite drive shaft

2 全碳纤维复合材料传动轴静扭试验验证

2.1 全碳纤维复合材料传动轴静扭试验方法

为了验证全碳纤维复合材料传动轴扭转刚度,采用济南东测试验机技术有限公司的PNW-30 型电液伺服扭转疲劳试验机对全碳纤维复合材料传动轴进行静扭试验,如图 9 所示。

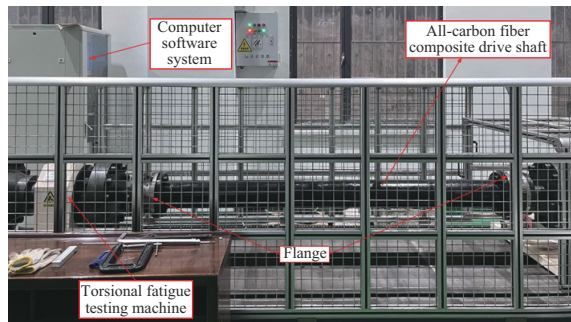


图9 静扭试验现场图

Fig. 9 Field diagram of static torsion test

将传动轴试件安装至试验机上,按照扭转强度性能要求进行设置,起始扭矩设为 0 N·m,终止扭矩设为最大工作载荷 12 000 N·m,参数设置完成后开始试验,试验过程中需观察传动轴状况与数据情况。

2.2 静扭试验结果分析

根据上述试验方法对全碳纤维复合材料传动轴进行静扭测试,并对其试验结果进行分析,如图 10 所示。

根据试验结果可知,全碳纤维复合材料传动轴在 12 000 N·m 扭矩下,未发生破坏。根据扭转刚度计算公式 $K = T/\phi$ (其中 K 为扭转刚度, T 为扭矩, ϕ 为扭转角),计算得该传动轴的扭转刚度为 1.93×10^5 N·m/rad,满足设计要求。

3 全碳纤维复合材料传动轴扭转疲劳试验验证

3.1 全碳纤维复合材料传动轴扭转疲劳试验方法

参考 QC/T 29082-2019 《汽车传动轴总成技术

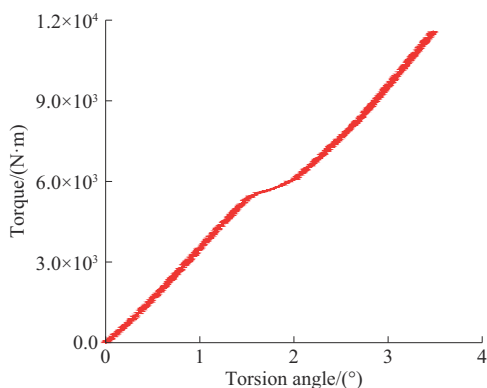


图10 传动轴扭矩-扭转角曲线

Fig. 10 Torque-torsion angle curve of drive shaft

条件及台架试验方法》对全碳纤维复合材料传动轴进行扭转疲劳试验,选择正弦波扭矩控制,采用非对称循环载荷方式。从0 N·m开始,以500 N·m/s的速度进行加载,加载至中值7 800 N·m后,以最大载荷1 200 N·m、最小载荷3 600 N·m和加载频率6 Hz的非对称循环载荷进行疲劳测试加载,如图11所示。

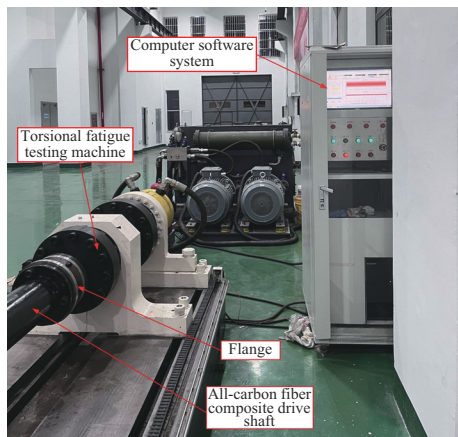


图11 扭转疲劳试验现场图

Fig. 11 Field diagram of torsional fatigue test

3.2 扭转疲劳试验结果分析

为了兼顾数据采集与分析的简便性,选择每4 000次循环作为一个采集点,再进行数据处理。最终得到传动轴扭转疲劳试验扭转角-循环次数对比曲线与剩余扭转刚度-循环次数对比曲线,如图12与图13所示。

由图12与图13可得,扭转疲劳试验曲线中最大剩余扭转刚度为 2.02×10^5 N·m/rad,此时循环次数为84 000次;最小剩余扭转刚度为 1.89×10^5 N·m/rad,此时循环次数为184 000次。在进行扭转疲劳试验时,传动轴扭转角维持在小幅度波动,未出现显著变化。因此,全碳纤维复合材料传动轴并未发

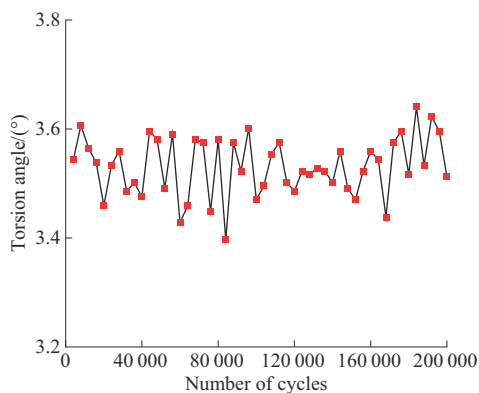


图12 扭转疲劳试验扭转角-循环次数曲线

Fig. 12 Torsion angle-number of cycles curve in torsional fatigue test

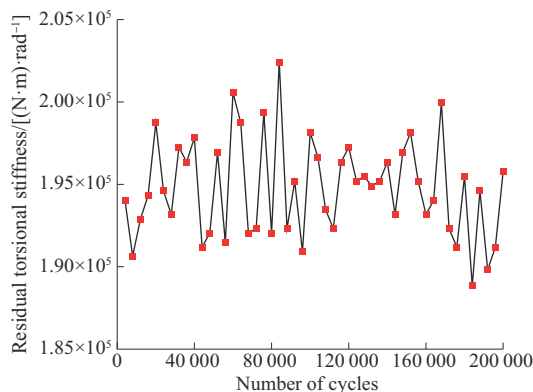


图13 扭转疲劳试验剩余扭转刚度-循环次数曲线

Fig. 13 Residual torsional stiffness-number of cycles curve in torsional fatigue test

生疲劳失效破坏,满足20万次疲劳寿命要求。

4 结论

对标某铝合金传动轴,完成全碳纤维复合材料传动轴结构设计,同时进行了制备和扭转试验研究,得到的主要结论如下。

(1)提出了一种全碳纤维复合材料传动轴的制备工艺,包含轴管卷料、法兰翻边与环包、固化成型等。轴管卷料主要应用于轴管部分的制作加工,法兰翻边与环包是实现轴管法兰一体成型的重要步骤。

(2)开展了全碳纤维复合材料传动轴静扭试验研究。静扭试验中,传动轴在最大工作载荷12 000 N·m进行试验,未发生破坏,测得其扭转刚度为 1.93×10^5 N·m/rad,满足传动轴强度和刚度设计要求。

(3)开展了全碳纤维复合材料传动轴扭转疲劳试验研究。传动轴以最大工作载荷进行了20万次循环加载,未发生疲劳失效,扭转疲劳试验曲线中最大剩余扭转刚度为 2.02×10^5 N·m/rad,此时循环

次数为84 000次;最小剩余扭转刚度为 $1.89 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$,此时循环次数为184 000次。

参考文献

- [1] KHUMAEDI M, SUMBODO W, WIDODO R D. The tensile strength properties of CFRPs and GRRPs for Unnes electric car body material[J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1 725(1). DOI:10.1063/1.4945487.
- [2] NADEEM S K S, GIRIDHARA G, RANGAVITTAL H K. A review on the design and analysis of composite drive shaft[J]. Materials Today Proceedings, 2018, 5(1):2 738–2 741.
- [3] KATO M, KONO D, KAKINUMA Y. Dynamical characteristic validation of motorized CFRP spindle unit based on receptance coupling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 173. DOI:10.1016/j.ymssp.2022.109028.
- [4] 罗睿. 纤维缠绕复合材料传动轴齿形连接结构设计及优化研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
- LUO Rui. Optimal design of teeth connection joint on filament wound composite transmission shaft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [5] 卢相学. 重载无人机碳纤维复合材料传动轴连接结构设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
- LU Xiangxue. Design and analysis of carbon fiber composite drive shaft connection structure for heavy-duty UAV[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [6] 赵文辉, 张伟东, 段振云, 等. 基于分层损伤分析的碳纤维增强树脂复合材料-金属传动轴扭转性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1 476–1 486.
- ZHAO Wenhui, ZHANG Weidong, DUAN Zhenyun, et al. Torsion properties of carbon fiber reinforced polymer composite-metal transmission shaft based on delamination damage analysis[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5):1 476–1 486.
- [7] 王姝丹, 周瑞平, 国玉阔, 等. 碳纤维复合材料在某舰船推进轴系中的设计研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(14):114–120.
- WANG Shudan, ZHOU Ruiping, GUO Yukuo, et al. Design and research on carbon fiber composite material in a ship propulsion shafting[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(14):114–120.
- [8] 沈杨. 复合材料管道约束结构设计及其关键部位计算方法研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
- SHEN Yang. Research on the design of composite pipe restraint structure and the calculation method of its key parts[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [9] 孙泽玉. 一体化缠绕成型复合材料传动轴及其振动特性的研究[D]. 上海:东华大学, 2020.
- SUN Zeyu. Research on integrated winding forming composite material drive shaft and vibration characteristics[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [10] 谷晓妹, 朱帅, 任勇生. 旋转碳纤维复合材料轴转子动力学特性的有限元分析与试验研究[J]. 机械设计, 2023, 40(7):20–24.
- GU Xiaomei, ZHU Shuai, REN Yongsheng. Finite-element analysis and experimental research on rotating CFRP shaft's rotor dynamic characteristics[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(7):20–24.
- [11] 曹培欢, 彭梓尧, 岳晓丽, 等. 碳纤维复合材料汽车传动轴材料结构及性能一体化设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(5):89–96, 104.
- CAO Peihuan, PENG Ziyao, YUE Xiaoli, et al. Material-structure-performance integrated design of carbon fiber composite automotive drive shaft[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2021, 47(5):89–96, 104.
- [12] NAYAK S Y, AMIN N M, HECKADKA S S, et al. Design, fabrication and testing of carbon fiber reinforced epoxy drive shaft for all terrain vehicle using filament winding[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 153. DOI:10.1051/mateconf/201815304010.
- [13] PRASAD A S, RAMAKRISHNA S, MADHAVI M J M T P. Experimental investigations on static and dynamic parameters of steel and composite propeller shafts with an integrated metallic joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(13): 26 925 – 26 933.
- [14] TARIQ M, NISAR S, SHAH A, et al. Effect of hybrid reinforcement on the performance of filament wound hollow shaft[J]. Composite Structures, 2018, 184:378–387.
- [15] 朱桂龙, 郭红军, 赵莹, 等. T800级直升机高疲劳性能复合材料传动轴的研制[J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(4):30–37.
- ZHU Guilong, GUO Hongjun, ZHAO Ying, et al. Development of T800 class helicopter high fatigue performance composite transmission shaft[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2022, 47(4): 30–37.