

CFRP在航天伺服作动器轻量化设计中的应用探索

郑 波^{1,2} 胡逸洲^{1,2} 丁 勇^{1,2} 孙春彦^{1,2} 崔文宇³

(1 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)
(2 控制执行机构技术创新中心, 北京 100076)
(3 连云港神鹰复合材料科技有限公司, 连云港 222069)

文 摘 随着运载火箭重型化发展,伺服作动器重量因其功率等级的大幅提升而增加,传统材料和结构设计方式已很难进一步提高产品的功重比。碳纤维复合材料具有低密度、可设计性强、高强度、高模量、耐腐蚀、耐疲劳等优点,作为大型结构件已广泛应用于航空航天领域。伺服作动器作为发动机推力矢量控制的关键单机,其减重具有十分重要的意义,国内外对于碳纤维复合材料作动器均已开展相关研究,但国内尚未见成熟工程应用案例。本文针对航天伺服作动器的应用特点,以工程应用为目标,从碳纤维复合材料作动器结构设计、铺层设计与仿真、摩擦副表面增强方式以及成型工艺方法几个方面开展相关研究。设计制造了碳纤维复合材料伺服作动器样机,相比同规格金属作动器实现减重49.2%,样机完成了相关液压试验,功能性能与现有作动器相当,初步具备工程应用的技术基础。本研究工作为运载火箭提升运力、降低能耗起到了积极推动作用。

关键词 碳纤维复合材料,伺服作动器,轻量化设计

中图分类号:V45

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.011

Exploration of CFRP Application in Lightweight Design of Aerospace Servo Actuators

ZHENG Bo^{1,2} HU Yizhou^{1,2} DING Yong^{1,2} SUN Chunyan^{1,2} CUI Wenyu³

(1 Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076)
(2 Innovation Center for Control Actuator, Beijing 100076)
(3 ZGL Condor Co., Ltd, Lianyungang 222069)

Abstract With the development of launch vehicle heavy-duty, the weight of servo actuator increases due to the significant increase of its power level, and the traditional material and structural design methods have been difficult to further improve the power-to-weight ratio of the product. Carbon fiber composites have the advantages of low density, strong designability, high strength, high modulus, corrosion resistance, fatigue resistance, etc., and have been widely used in aerospace field as large structural parts. Servo actuator as the key single machine of engine thrust vector control, its weight reduction is of great significance, domestic and foreign for carbon fiber composite actuator have carried out relevant research, but the domestic has not yet seen mature engineering applications. This paper focuses on the application characteristics of aerospace servo actuator, takes engineering application as the goal, and carries out relevant research in several aspects, such as structural design of carbon fiber composite actuator, pavement design and simulation, friction sub-surface enhancement and molding process method. The carbon fiber composite servo actuator prototype has been designed and manufactured, with a weight reduction of 49.2% compared with metal actuators of the same specification. The prototype has completed the relevant hydraulic tests, and its functional performance is comparable with that of the existing actuators, so it has a preliminary technical basis for engineering application. This research work has played a positive role in promoting the launch vehicle to enhance its capacity and reduce energy consumption.

Key words Carbon fiber composite, Servo actuator, Lightweight design

0 引言

轻量化设计在航天领域对于降低发射成本,提升

收稿日期:2024-03-28

第一作者简介:郑波,1985年出生,硕士,高级工程师,主要从事电液及机电伺服系统方面的研究工作。E-mail: bobby_53@sina.com

运载能力具有重大现实意义。以“宇宙神5”“阿里安5”“联盟2”等为代表的一次性运载火箭进行高、低轨任务发射服务价格水平分别在80 000和50 000 RMB/kg以上^[1]。碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)属于各向异性材料,相比传统金属材料,具有低密度、可设计性强、高强度、高弹性模量、低热膨胀系数、耐热烧蚀及良好的抗冲击和疲劳特性,是一种性能优异的特种工程材料,近年来逐渐成为轻量化设计中金属材料的首选替代材料,在世界军事及民用领域得到越来越广泛的应用。当前碳纤维复合材料在世界航天领域应用主要集中在固体火箭发动机壳体^[2]、液体火箭发动机喷管延伸段、可延伸喷管^[3]、发动机机架^[4]、姿轨控推力室及主承力结构^[5]、储箱^[6]、增压气瓶、整流罩、卫星支架等^[7-8]大型结构件上。

作为火箭发动机推力矢量控制的执行机构,航天伺服系统具有“三高”的特点,即高可靠性、高动态和高比功率。随着新研火箭发动机推力的大幅提升,伺服系统功率等级也显著增大,由最初的几千瓦、十几千瓦提高到目前几十千瓦。现阶段采用航空航天常用金属材料并进行集成一体化结构设计,伺服系统比功率一般可达到0.4~0.5 kW/kg。其中作动器组件(包括作动筒和活塞杆)作为伺服系统关键结构件,其重量占到了伺服系统总重量的25%左右;采用碳纤维复合材料,可大幅减轻作动器重量,同时活塞杆直线运动惯量更小,有利于进一步提高伺服系统的动态响应。

目前公开资料尚未见碳纤维复合材料在航天伺服作动器上应用实例。航空领域,碳纤维复合材料在美国F18飞机舵机上已得到应用^[9],但无相关技术资料对外公布。民用工业领域,2015年前后美国派克公司(Parker)^[10]和德国汉臣公司(Hänchen)^[11]分别推出了Lightraulics系列和H-CFRP碳纤维复合材料液压缸,但未对外公布其连接结构、涂层的技术资料,目前官网已下架相关的CFRP液压缸。美国Polygon公司2018年宣布研制出复合材料气缸和液压缸,采用PolySlide材料(以环氧树脂为基体连续玻璃纤维或碳纤维增强的树脂基复合材料),主要应用于气缸上和低压液压缸^[12]。上述厂家生产的复合材料液压缸用在测试阶段尚可,实际工程应用中可能还存在一定问题^[13]。意大利布雷西亚大学的Luigi SOLAZZI教授针对挖掘机设计了一款CFRP液压缸,作动筒采用铝合金内衬上缠绕CFRP,活塞杆采用碳纤维杆与铝合金活塞头的结构,设计指标35 MPa,减重比达到88%^[14],虽对液压缸承压周向变形量进行了测试,但未见对耐压试验、内外泄漏、启动摩擦力等液压缸关键指标进行验证。哈尔滨玻璃钢研究院研制的CFRP液压缸,其缸筒内衬、活塞杆外衬材料为27SiMn,活塞和端盖材料为137不锈钢,比原型减

重45%^[15],但未见液压缸相关试验数据。浙江大学徐兵团队^[16]针对四足机器人设计了一款的CFRP液压缸,工作压力21 MPa,启动压力小于0.15 MPa,重量为0.89 kg,其功率较小。北京航空航天大学尚耀星团队^[17]研制了一款CFRP液压缸,作动筒采用铝制内衬缠绕CFRP,活塞杆应用碳纤维复合材料,工作压力31.5 MPa,启动压力0.05~0.1 MPa,其试验主要验证了作动筒相关技术指标,未见活塞杆的相关试验。武汉理工大学^[18]、武汉科技大学^[19]、江苏恒神^[20]、中联重科^[21]、三一重工^[22]等高校及企业也设计了CFRP液压缸,并申请了专利,但未见实物及相关试验数据,上述各家碳纤维液压缸如图1所示。



(a) 美国派克碳纤维液压缸^[10]

(b) 德国汉臣碳纤维液压缸^[11]

(c) 美国Polygon公司复合材料液压缸^[12]

(d) 意大利布雷西亚大学碳纤维液压缸^[14]

(e) 哈玻院碳纤维液压缸^[15]

(f) 浙江大学碳纤维液压缸^[16]

(g) 北京航空航天大学碳纤维液压缸^[17]

图1 国内外资料中碳纤维液压缸实物图

Fig. 1 CFRP hydraulic cylinder in domestic and abroad files

本文面向未来工程应用,以一种大功率电静压伺服作动器为研究对象,采用国产高模碳纤维(M40级)为增强材料,环氧树脂为基体,设计一款可原位替换的碳纤维复合材料作动器,并从结构设计、铺层设计、表面增强、成型工艺等关键技术开展应用探索。

1 结构设计

对标金属伺服作动器由作动筒、活塞杆、支耳组件、锁紧螺母及往复密封件组成,如图2所示。作动筒内孔直径90 mm,活塞杆外圆直径50 mm,行程±80 mm,额定工作压力21 MPa,作动器两腔油口设置在同侧;其中活塞杆采用合金结构钢、作动筒采用沉淀硬化不锈钢,活塞杆采用QPQ处理来提高其表面硬度、耐磨性,降低摩擦系数,作动器总重约为11.97 kg。

考虑碳纤维制品成型工艺的可行性及安装维护的便捷性,将碳纤维复合材料作动器分为作动筒组件、活塞杆组件、通油管、端盖、支耳组件、锁紧螺母及往复密封件,如图3所示,为实现原位替代,碳纤维作动器安装接口与原作动器保持一致,外形包络尺寸不超原作动器。作动筒、活塞杆及通油管组件结构将在下面进行详细说明,作动筒端盖采用航空7系铝合金,支耳组件、锁紧螺母及往复密封件与原作动器一致。

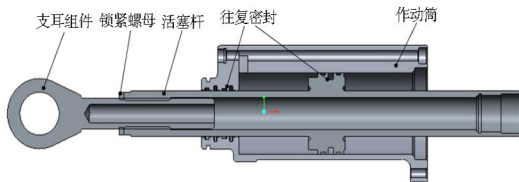


图2 对标电静压伺服作动器结构图

Fig. 2 Structure of the benchmarking electrostatic servo actuator

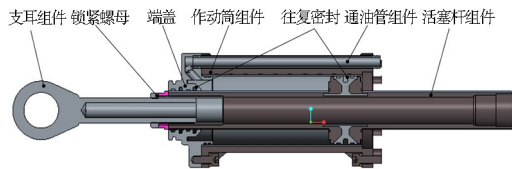


图3 碳纤维作动器结构图

Fig. 3 Structure of the CFRP servo actuator

1.1 作动筒组件

碳纤维复合材料作动筒通常分为全复合材料缸筒和金属/非金属内衬缸筒,其中全复合材料缸筒对于内表面涂层硬度、耐磨性及内孔喷涂设备及工艺要求很高,相关文献资料并未公开特殊涂层配方及技术参数,同时缺乏相关试验数据支撑,离工程化应用尚存在一定差距。采用金属/非金属内衬缸筒,可有效规避碳纤维复合材料不耐磨的问题^[23];为避免金属与复合材料异构连接的难题,多数碳纤维复合

材料液压缸缸筒与端盖采用金属法兰方式连接,虽降低了连接风险,但不利于缸筒深度轻量化设计。经分析,缸筒主要承受轴向拉力和径向液压力。为兼顾工程化应用和轻量化,设计了一种缸筒结构,内衬采用沉淀硬化不锈钢,增强层及法兰均采用国产碳纤维单向预浸带,如图4所示。内衬由无缝钢管加工而成,主体壁厚1.5~2.5 mm,硬度38~42 HRC,内孔表面粗糙度(Ra)0.2 μm,内衬外圆表面上设计有环状凸台并进行喷砂处理,一方面提高了内衬结构强度和刚度;另一方面可增加碳纤维复合材料与金属内衬的接触面积,进而提高连接强度。作动筒与端盖采用法兰螺栓连接,螺纹孔设置在金属端盖上,碳纤维复合材料法兰端为沉头通孔,通过合理的铺层设计,可弥补碳纤维复合材料法兰钻孔后部分纤维损伤对缸筒轴向强度造成的影响。

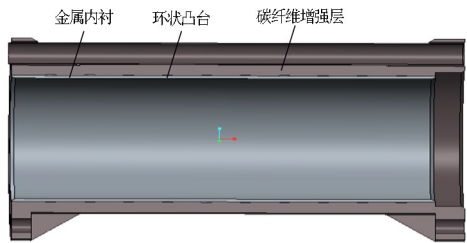


图4 作动筒结构图

Fig. 4 Structure of the cylinder

1.2 活塞杆组件

由于活塞需要集成密封圈等,对密封结构尺寸及公差要求较高,较难实现碳纤维复合材料化;活塞杆外形为圆柱体,便于碳纤维复合材料对金属材料的替代,但由于活塞杆外径不大,相关的轻量化研究较少^[23]。活塞杆主要承受轴向拉压力及径向液压力。制约碳纤维复合材料活塞杆设计的主要因素有支耳组件、活塞头等金属件与碳纤维复合材料杆体的可靠连接与密封,以及活塞杆表面摩擦运动副增强。为兼顾工程化应用和轻量化,设计了一种活塞杆结构,如图5所示。活塞杆外衬采用沉淀硬化不锈钢或特种工程塑料(聚酰亚胺或聚氨酯),壁厚1~3 mm,Ra为0.2 μm,通过DLC镀膜工艺对外表面进行增强。由于碳纤维复合材料机加损伤纤维且尺寸公差及表面Ra及硬度难以保证,因此活塞杆与作动筒往复密封部位的活塞头以及与支耳连接的螺纹部位仍采用沉淀硬化不锈钢。活塞头除密封安装部位外进行喷砂处理,以提高碳纤维复合材料与金属胶合后的附着力。活塞杆与支耳连接的部位采用金属螺纹套结构,螺纹套外部设计成粗牙螺纹,且表面进行喷砂处理;内部为细牙螺纹,便于调整支耳位置。

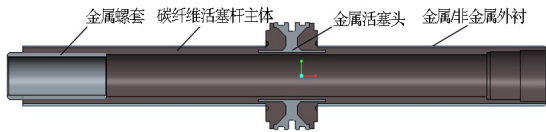


图5 活塞杆结构图
Fig. 5 Structure of the piston

1.3 通油管组件

为实现作动器两腔油口在同侧,设计了通油管,如图6所示,通油管两端分别与作动器端盖和头部壳体连接。通油管主要承受径向液压力。通油管采用薄壁金属内衬,壁厚1~2.5 mm,增强层为碳纤维复合材料;为提高密封的可靠性,通油管两端采用双道径向密封槽结构。由于通油管较长,约250 mm,且两端有密封槽结构,传统棒料或管料加工难度较大,因此采用3D打印的选择性激光熔化(SLM)进行加工,材料选用TC4钛合金。



图6 通油管结构图
Fig. 6 Structure of the tube

2 铺层设计与仿真

作动筒、活塞杆及通油管组件为带有金属(非金属)内衬/外衬的复合材料组合体,要考虑金属(非金属)与复合材料增强层的结合强度问题。对于金属(非金属)内/外衬,其失效采用 Mises 屈服准则即可。对于 CFRP 复合材料缠绕层,其强度问题较为复杂,目前工程中常用的复合材料失效准则有最大应力准则、最大位移准则、蔡-希尔准则、霍夫曼准则和蔡-吴准则。对于 CFRP 纤维缠绕层而言,蔡-吴准则以张量形式表示的强度失效准则较为精确^[24]。

$$F.I = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + 2F_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)\sigma_1 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_{11}\sigma_1 + F_{66}\sigma_6^2 + F_2(\sigma_2 + \sigma_3) \leq 1 \quad (1)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_6$ 分别对应 CFRP 缠绕层第 k 层的应力 $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r, \tau_{z\theta}$ 。

本文利用 ANSYS ACP 有限元分析软件对上述结构进行建模与仿真,建模过程见图7。在 ACP 前处理模块中对不同区域赋予相应的材料属性。作动筒铺层见图8,网格模型见图9;活塞杆铺层见图10,网格模型见图11;通油管铺层见图12,网格模型见图13。仿真结果见

表1,通过仿真验证了结构及铺层设计的可行性。



图7 碳纤维复合材料作动器仿真过程图
Fig. 7 Simulation process of the carbon fiber actuator

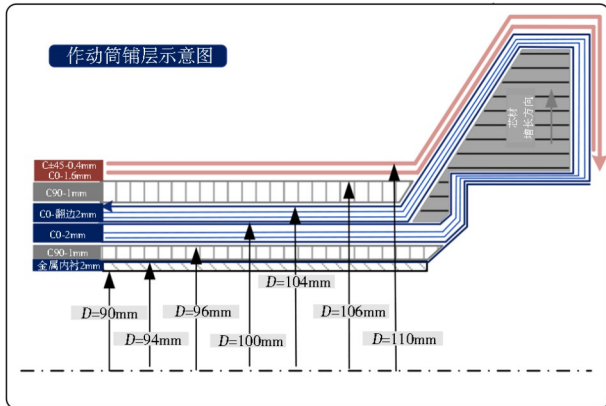


图8 作动筒铺层图
Fig. 8 Layer design of the cylinder

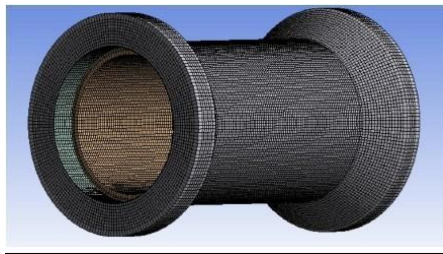


图9 作动筒网格模型图
Fig. 9 Grid model of the cylinder

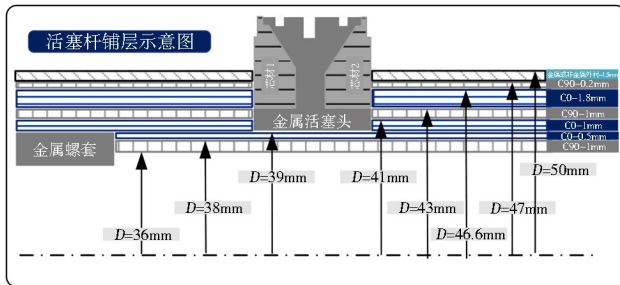


图10 活塞杆铺层图
Fig. 10 Layer design of the piston

表1 各组件仿真结果

Tab. 1 Simulation results of each component

组件名称	铺层角度及顺序	失效系数	应力/MPa	应变/%	变形/mm
作动筒	90°-1 mm/0°-2 mm/0° 翻边-2 mm/90°-1 mm/0°-1.6 mm/±45°-0.4 mm	0.435	367.55	0.008	0.089
活塞杆	90°-1 mm/0°-0.5 mm/0°-1 mm/90°-1 mm/0°-1.8 mm/90°-0.2 mm	0.180	197.42	0.003	0.042
通油管	90°-0.1 mm/90°-0.1 mm/90°-0.1 mm/90°-0.1 mm/90°-0.1 mm	0.040	133.51	9.9×10 ⁻⁴	0.029

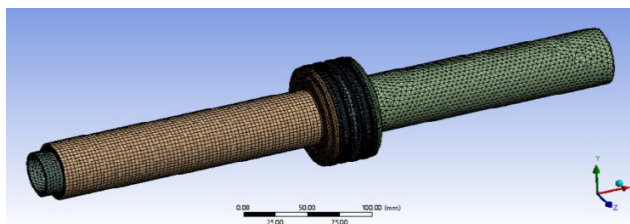


图 11 活塞杆网格模型图

Fig. 11 Grid model of the piston

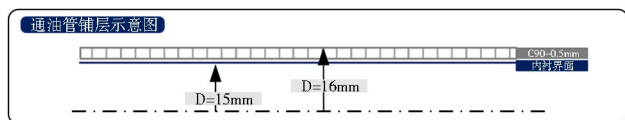


图 12 通油管铺层图

Fig. 12 Layer design of the tube



图 13 通油管网格模型图

Fig. 13 Grid model of the tube

3 摩擦副表面增强

鉴于作动器自身工作特点,活塞杆在作动筒内高速往复运动(约 300 mm/s),作动器两腔内充有交变高压液压油,因此对作动筒内孔及活塞杆外圆表面硬度、 R_a 、镀层或涂层与碳纤维复合材料基体的结合强度、孔隙率、耐油性及耐磨性有较高要求。有相关研究采用环氧树脂涂层方案,通过配方和涂覆工艺的优化来解决碳纤维复合材料成型表面精度低的问题^[25]。

前期对碳纤维复合材料表面等离子喷涂氧化铝涂层、电镀镍及特种树脂进行过调研和摸底试验,试验结果欠佳。通过进一步调研,聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)及聚酰亚胺(PI)+填料(C、SiC、BN)等工程塑料具有优异的力学性,可作为碳纤维复合材料活塞杆外衬材料,尤其是聚酰亚胺,其力学性能最为优异,并且通过添加填料,可以进一步提高其硬度、耐磨性、降低摩擦系数,硬度可达 105 HRM。另外聚酰亚胺通过环氧结构胶与碳纤维复合材料进行黏接,其结合强度可达 20 MPa 以上。因此碳纤维复合材料活塞杆采用聚酰亚胺为外衬,外衬与碳纤维复合材料活塞杆体之间采用耐高温环氧树脂进行黏接,如图 14 所示。考虑到降低工程应用的技术风险,碳纤维复合材料活塞杆外衬还可以采用薄壁金属。

尽管外衬选用高硬耐磨材料,但其表面硬度和摩擦系数仍无法达到传统金属活塞杆表面镀硬铬或 QPQ 的效果。DLC(类金刚石)是一种由碳元素构成的物质,其性质与钻石类似,同时具有石墨的原子组成结构。DLC 镀膜是一种非晶态薄膜,由于它具有弹性模量高、硬度高、摩擦系数低、良好的耐磨性和稳定的化学性能

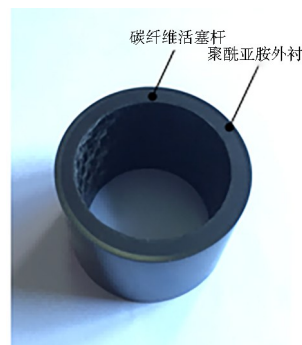


图 14 聚酰亚胺外衬样件

Fig. 14 Sample of the PI outer lining

等特点,如今常被用作表面镀膜材料。DLC 在碳纤维复合材料表面直接镀覆尚未见报道,但在金属和非金属材料上已有工程应用,因此对聚酰亚胺及金属外衬表面 DLC 镀层开展了试验,见图 15。为防止外衬与碳纤维复合材料管黏接环氧树脂及碳纤维复合材料内部环氧树脂高温失效,DLC 涂层温度控制在环氧树脂及结构胶可承受范围内。试验表明聚酰亚胺及沉淀硬化不锈钢表面 DLC 涂层可达到 $2.5\ \mu\text{m}$,金属外衬表面硬度可达 2 000 HV 以上,摩擦系数可达 0.2;聚酰亚胺外衬硬度相比基体无明显增加,其摩擦系数在 0.2~0.52。

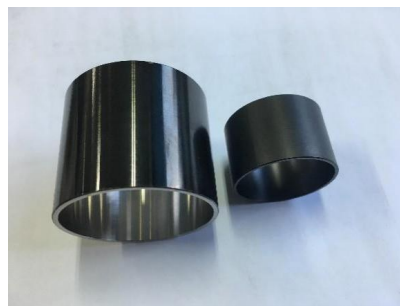


图 15 金属及聚酰亚胺外衬 DLC 后样件

Fig. 15 Samples of metal and PI out lining after DLC

4 成型工艺

根据产品自身特点碳纤维复合材料作动器采用的是缠绕+吹气模压组合工艺。

4.1 作动筒组件

由金属内衬和碳纤维复合材料增强外层组成,采用预浸带旋转缠绕、铺贴、模压成型工艺制作。

4.2 活塞杆组件

由外衬、金属螺套、金属活塞头和碳纤维复合材料杆组成,采用搓管、铺贴、OPP 带吹气模压成型工艺制作。

4.3 通油管组件

由金属通油管和 CFRP 增强外层组成,采用预浸带旋转缠绕铺贴、OPP 带旋转缠绕成型工艺制作。

上述零件成型过程中需控制预浸带的带间距、缠绕张力、成型时间及成型温度。

作动筒、活塞杆及通油管组件成型后实物如图 16 所示。



(a) 作动器各组件实物图



(b) 作动器装配后实物图

图 16 碳纤维复合材料作动器实物图

Fig. 16 Components of the CFRP servo actuator

5 试验验证

碳纤维复合材料作动器装配后开展了液压密封

及强度、磨合、空载摩擦力、内泄漏、重量及活塞杆拉压6项试验,试验结果表2。

表 2 碳纤维复合材料作动器指标满足情况汇总表

Tab. 2 Summary of Metrics Satisfaction

作动器指标要求	指标实现情况
碳纤维复合材料作动器通过 24.6 MPa, 10 min 密封试验和 37 MPa, 3 min 液压强度试验	碳纤维复合材料作动器通过 31.5 MPa, 10 min 密封试验和 40 MPa, 3 min 液压强度试验
碳纤维复合材料作动器通过信号 0.1 Hz, 24.6 MPa, 20 min 磨合试验无漏油和其他异常	碳纤维复合材料作动器通过信号 0.1 Hz, 24.6 MPa, 20 min 磨合试验无漏油和其他异常
碳纤维复合材料作动器空载摩擦力不高于 1 MPa	通过磨合台测试,碳纤维复合材料作动器空载摩擦力 0.1 MPa
碳纤维复合材料作动器内泄漏不超过 0.3 mL/min	碳纤维复合材料作动器内泄漏 0.28 mL/min
碳纤维复合材料作动器比对标金属作动器重量降低 28% 以上	碳纤维复合材料作动器总重: 6.07 kg; 金属作动器总重: 11.97 kg; 总共减重 49.2%
活塞杆在 92 362 N 拉力及压力、2 mm/min 加载速度、15 min 内不允许断裂及产生永久变形	活塞杆通过 123 150 N 拉压试验

试验结果表明,碳纤维复合材料作动器可以达到对标金属作动器的力学性能指标。但碳纤维复合材料作动器环境试验,如高低温、振动、冲击等尚未开展,其在环境条件下的性能后续还有待评估。

6 结论

(1)碳纤维复合材料伺服作动器样机,相比同规格金属作动器可实现减重 49.2%,功能性能与现有作动器相当,初步具备工程应用的技术基础,但其环境适应性还有待进一步开展评估;

(2)在当前树脂体系下,CFRP 基体硬度和耐磨性不足,精密加工性较差,表面 Ra 无法满足密封要求;耐磨涂层技术尚存在与碳纤维基体结合强度及环境适应性不足等问题,因此作动筒采用“金属内衬+碳纤维复合材料增强外层”、活塞杆采用“碳纤维复合材料增强内层+金属外衬”的结构形式更适合工程化应用;

(3)作动器结构和铺层设计时应尽可能保持铺层纤维的连续性,尽量避免二次机加造成的纤维断裂,这对提高作动器承力至关重要;

(4)CFRP 属于各向异性材料,铺层角度是决定性因素,铺层设计时应根据各零件的受力情况进行合理配置。C90 铺层可用于提高作动筒或活塞杆径向承压能力;C0 铺层可用于提高作动筒或活塞杆轴向拉压承

载能力;C±45 铺层对于提高作动器承压及轴向受力作用不大,但可用于提升作动筒或活塞杆表层质量;

(5)DLC 镀层采用反应磁控溅射,工艺温度应控制在环氧树脂及结构胶可承受范围内。采用此工艺活塞杆无须浸泡在高温溶液中,是一种可行的碳纤维复合材料活塞杆表面摩擦副增强工艺;

(6)缠绕成型工艺适合回转体构件,合理选择缠绕张力可为作动筒和通油管提供初始径向预紧力;吹气模压成型工艺具有大批量成本低、生产效率较高,制品尺寸准确,表面光洁等优点,但是模具初次投入较大;上述两种工艺方式组合使用是碳纤维复合材料作动器较优的成型工艺路线。

参考文献

- [1] 乔夏君,商显扬,罗恒,等. 国内外运载火箭发射服务价格分析及启示[J]. 中国航天,2022(08):37-41.
- QIAO Xiajun, SHANG Xianyang, LUO Heng, et al. Price analysis and enlightenment of launch service for launch vehicles of domestic and international[J]. Aerospace China, 2022(08): 37-41
- [2] 向小波,蒋永凡,程勇. 聚丙烯腈基碳纤维及其在固体火箭发动机壳体上的应用[J]. 纤维复合材料,2015,32(03):23-28.
- XIANG Xiaobo, JIANG Yongfan, CHENG Yong. Review of the application of polyacrylonitrile-based carbon fiber in solid rocket motor cases[J]. Fiber Composites, 2015, 32(03): 23-28.

[3] 葛明龙,田昌义,孙纪国. 碳纤维增强复合材料在国外液体火箭发动机上的应用[J]. 导弹与航天运载技术,2003(04):22-26.

GE Minglong, TIAN Changyi, SUN Jiguo. Application of C/C and C/SiC based composites for foreign liquid propellant rocket engines[J]. Missiles and Space Vehicles, 2003(04):22-26.

[4] 穆朋刚,李斌潮,杜大华,等. 液体火箭发动机复合材料机架初步设计研究[J]. 火箭推进,2017,43(03):35-41.

MU Penggang, LI Binchao, DU Dahua, et al. Preliminary design for composite thrust frame of liquid rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017,43(03):35-41.

[5] 姜丹丹,任建军,刘佳鑫. 姿轨控动力系统复合材料主承力结构的设计与试验[J]. 火箭推进,2021,47(04):71-78.

JIANG Dandan, REN Jianjun, LIU Jiaxin. Design and test of main bearing structure with composite material in the attitude and orbital control propulsion system [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021,47(04):71-78.

[6] 张雪松. 碳纤维复合材料储箱火箭游戏规则的改变者[J]. 卫星与网络,2017(01):66-67.

ZHANG Xuesong. Carbon fiber composite tank launch vehicle game changer[J]. Satellite and Network, 2017(01):66-67.

[7] 黄亿洲,王志瑾,刘格菲. 碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J]. 西安航空学院学报,2021,39(05):44-51.

HUANG Yizhou, WANG Zhijin, LIU Gefei. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2021,39(05):44-51.

[8] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(03):201-212.

LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011,4(03):201-212.

[9] 凌和生. 飞行控制舵机新发展-F/A-18副翼复合材料舵机[J]. 国际航空,1997(03):57-58.

LING Hesheng. F/A-18 aileron composite actuator [J]. International Aviation, 1997(03):57-58.

[10] PARKER H. Lightraulics actuators: High pressure hydraulics for lightweight applications [EB/OL]. [https://www.parker.com/literature/Composite Cylinders_1410-UK](https://www.parker.com/literature/Composite%20Cylinders_1410-UK). 2015-11-3.

[11] 习青锋. 混合碳纤维液压缸[J]. 流体传动与控制, 2015(03):63-64.

XI Qingfeng. Mixed carbon fiber hydraulic cylinder [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2015(03):63-64.

[12] Polygon PolySlide® composite pneumatic and hydraulic Cylinders[OL]. <https://www.polygoncomposites.com/products/fluid-power> [Accessed 07. 12. 2018]

[13] 尚耀星,李瑶,于天,等. 轻量化复合材料液压缸现状及挑战[J]. 机械工程学报,2021,57(24):13-38.

SHANG Yaoxing, LI Yao, YU Tian, et al. Review and challenges of lightweight composite hydraulic cylinder [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021,57(24):13-38.

[14] SOLAZZI L. Design and experimental tests on hydraulic actuator made of composite material [J]. Composite Structures, 2020,232:111544.

[15] 孟玲宇,陈家正,纪丹阳. 碳纤维复合材料在液压油

缸中的应用[J]. 纤维复合材料,2018,35(02):60-62.

MENG Lingyu, CHEN Jiazheng, JI Danyang. Application of carbon fiber composites in hydraulic cylinder [J]. Fiber Composites, 2018,35(02):60-62.

[16] ZONG Huaizhi, ZHANG Junhui. Investigation on the combination winding technology of carbon fiber reinforced polymer hydraulic cylinder[C]//The 21th ICFMCE, Chongqing University of Technology, Chongqing, China, November 6-8, 2020,.

[17] Yao LI, Yaoxing SHANG, Xiaofei WAN, et al. Design and experiment on light weight hydraulic cylinder made of carbon fiber reinforced polymer[J]. Composite Structures, 2022, 291:115564

[18] 周祖德,黄向阳,胡业发,等. 一种碳纤维复合材料液压缸[P]. CN 103727092, 2014-04-16.

ZHOU Zude, HUANG Xiangyang, HU Yefa, et al. A carbon fiber composite hydraulic cylinder[P]. CN 103727092A, 2014-04-16.

[19] 汪志南,陈奎生,湛从昌,等. 一种碳纤维复合材料增强的轻量化液压缸[P]. CN 106930998A, 2017-07-07.

WANG Zhinan, CHEN Kuisheng, ZHAN Congchang, et al. Carbon fiber composite material reinforced lightweight hydraulic cylinder[P]. CN 106930998A, 2017-07-07.

[20] 颜磊,汪东瑶,於永红,等. 碳纤维复合材料增强液压油缸[P]. CN 202756338U, 2013-02-27

YAN Lei, WANG Dongyao, YU Yonghong, et al. Carbon fiber composite reinforced hydraulic cylinder: 202756338U[P]. CN 202756338U, 2013-02-27.

[21] 左美燕. 轻量化臂架液压缸设计[J]. 液压气动与密封, 2019,39(10):75-77,81.

ZUO Meiyang. Design of lightweight boom hydraulic cylinder [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(10):75-77,81.

[22] 曾盛渠,李韶茂,李瑶. 一种复合材料筒管及制造方法、液压缸筒、活塞杆[P]. CN 103527549A, 2014-01-22.

ZENG Shengqu, LI Shaomao, LI Yao. A composite material tubewith manufacturing method, cylinder tube and piston rod[P]. CN 103527549A, 2014-01-22.

[23] 徐兵,纵怀志,张军辉,等. 碳纤维复合材料液压缸研究现状与发展趋势[J]. 复合材料学报,2022,39(02):446-459.

XU Bing, ZONG Huaizhi, ZHANG Junhui, et al. Research status and development trend of carbon fiber reinforced polymer hydraulic cylinder[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022,39(02):446-459.

[24] 汪志南,陈奎生,湛从昌. 液压缸 CFRP 缸筒结构开发及其强度理论研究[J]. 液压与气动,2018(07):1-7.

WANG Zhinan, CHEN Kuisheng, ZHAN Congchang. Structural development and strength theory research of hydraulic cylinder CFRP tube[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(07):1-7.

[25] 于水鑫. 碳纤维复合材料表面改性环氧涂层技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2020.

YU Shuixin. Study on Surface Modification Epoxy Coating Technology of Carbon Fiber Composites [D]. Beijing: Beihang University, 2020.