

工程塑料环境因素与载荷应力耦合作用 试验装置研究

刘群, 陈星昊, 钟勇, 杨万均, 杨昊雨, 李迪凡

(西南技术工程研究所, 重庆 400050)

摘要: **目的** 设计一种能够模拟工程塑料实际服役工作环境的试验装置, 在多型自然环境中, 构建兼具环境因素侵蚀与载荷应力耦合作用的试验条件。**方法** 研制工程塑料环境因素与载荷应力协同作用试验装置, 采用包括拉伸加载、弯曲加载、控制系统等组件的模块化设计, 实现 0.01~16 Hz 加载频率的拉伸及弯曲载荷, 最大 1 550 kg 的拉伸载荷, 最大 375 kg 的弯曲载荷。**结果** 将研制完成的试验装置置于多型自然环境下对试验施加恒定和交变载荷, 以真实模拟工程塑料实际服役中的环境因素与载荷应力协同作用。**结论** 试验装置制造加工难度小, 结构稳定可靠, 可用于评价和研究工程塑料等系列类型材料的环境损伤性能演变。

关键词: 工程塑料; 环境应力协同作用; 自然环境试验; 试验装置; 交变载荷; 装置设计

中图分类号: U467.5+25

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)02-0137-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.018

Test Device for Engineering Plastics under Coupling Effect of Environmental Factor and Load Stress

LIU Qun, CHEN Xinghao, ZHONG Yong, YANG Wanjun, YANG Haoyu, LI Difan

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400050, China)

ABSTRACT: The work aims to design a test device to simulate the actual service working environment of engineering plastics, and construct the test conditions with the coupling effect of environmental factor erosion and load stress in a multi-type natural environment. The test device for engineering plastics under the synergistic effect of environmental factors and load stress was developed, and the modular design including tensile loading, bending loading, control system and other components was adopted to achieve tensile and bending loads of 0.01~16 Hz loading frequency, with a maximum tensile load of 1 550 kg and a maximum bending load of 375 kg. The developed test device was placed in a multi-type natural environment to apply constant and alternating loads to the test, so as to truly simulate the synergistic effect of environmental factors and load stress in the actual service of engineering plastics. The test device is easy to manufacture and process, with stable and reliable structure, which can be used to evaluate and study the evolution of environmental damage performance of engineering plastics and other types of materials.

KEY WORDS: engineering plastics; synergistic effect of environment and stress; natural environment test; test device; alternating loads; device design

收稿日期: 2023-11-23; 修订日期: 2023-12-26

Received: 2023-11-23; Revised: 2023-12-26

引文格式: 刘群, 陈星昊, 钟勇, 等. 工程塑料环境因素与载荷应力耦合作用试验装置研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 137-144.

LIU Qun, CHEN Xinghao, ZHONG Yong, et al. Test Device for Engineering Plastics under Coupling Effect of Environmental Factor and Load Stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 137-144.

*通信作者 (Corresponding author)

随着工程塑料近几十年来的高速发展,性能不断提高,在装备中获得广泛应用,在结构承力构件中使用工程塑料愈加广泛。装备服役过程中,所处环境愈发复杂多变,长期经受外界负载环境的综合作用,不可避免地产生损伤累积、疲劳失效和性能退化,极易出现性能变低、失效甚至报废等问题^[1-5]。由于受到长期外部载荷和环境作用,工程塑料将出现不同程度的材料性能退化和损伤,如疲劳性能下降、材料受载处断裂、表层龟裂等。国内针对工程塑料耐环境力学性能、微观结构老化后变化、工程塑料慢速裂纹增长造成的损伤积累与环境应力开裂耐受性等方面进行了广泛系统性研究^[6-8]。

装备中有大量工程塑料处于装备外侧,直接与大气介质接触,受到如湿热条件、化学介质、光照及其他生物活性介质等不同服役环境因素的影响,同时工程塑料在工作过程中将持续受到拉伸、压缩、弯曲等载荷交变复合作用^[9-10]。工程塑料在不同地区导致其老化损伤的环境因素存在不同,如在岛礁环境下太阳辐射、盐雾、高温高湿等为主要因素,高原地区主要为太阳辐射、低温和温度冲击,在寒冷地区主要是低温、太阳辐射,沙漠环境下砂蚀、太阳辐射等为工程塑料的主要损伤因素。在自然环境因素与受载荷交变符合应力两者相互循环作用下,工程塑料的化学、物理和力学性能出现改变时,材料逐渐丧失原有的各项力学性能,甚至导致结构失效,这是一种不可逆的物理及化学反应。

对装备用工程塑料受自然环境载荷应力交变复合协同作用进行研究,以工程塑料主要损伤类型为导向,对其耐久性及损伤机理进行深入分析,分析工程塑料在使用过程中将产生的环境效应和失效规律,提供有效的试验与研究手段^[11-13]。合理评估工程塑料在装备中的真实贮存寿命或对环境的敏感性,发现对装备环境适应性和服役使用过程中的薄弱环节,进行针对性改进,以提高装备的环境适应性^[14-16]。目前在常规材料力学测试领域,单载荷的测试产品如拉伸、扭转、弯曲等均已形成了较为完善的试验装置,较为著名的厂商有美国的 MTS、英斯特朗公司、日本岛津公司和德国 Zwick 公司等。但是针对工程塑料在复合载荷模式下的力学性能试验装置,目前主要集中在相关高校或科研院所自主设计,如密西根大学 Anthoy 对复合材料在拉伸和弯曲共同作用下失效机制进行了研究,代尔夫特理工大学 Fawaz 采用偏心法研究了材料在拉弯复合作用的性能等^[17]。以上研究均基于现有商用试验设备进行改造,限制较多。本文提出了一种工程塑料自然环境与受载应力交变协同复合作用的试验方法,研制一种综合自然环境因素与拉压弯复合交变的协同试验装置,构建了自然环境-受载应力的协同试验环境,使工程塑料既受自然环境各项因素作用,同时承担拉压弯等载荷作用,可真实反应工程

塑料实际服役环境下的环境效应与载荷应力,试验更加贴近服役环境。

1 工程塑料自然环境载荷应力协同损伤机理

对于装备用工程塑料,其承力材料有相当部分直接暴露于所服役的大气环境中,在太阳光辐射、氧气、温湿度等不同环境因素的长期作用下,使得工程塑料力学、理化性能下降,出现开裂老化等现象^[18-19],致使工程塑料受到结构性破坏。温度变化在工程塑料实际服役环境中也是引起其性能变化的主要诱因之一,由于工程塑料承力构件工作空间受到严格限制,随环境温度变化出现的热胀冷缩,将会导致工程塑料出现裂纹甚至开裂^[16,20]。工程塑料结构件除不可避免地受到环境因素的影响外,同时还会受到交变复合载荷的作用,工程塑料结构件在服役工作时将会持续受到交变疲劳作用,其疲劳性能将产生无法逆转的退化乃至破坏。

暴露于环境中的承力工程塑料结构件,在服役环境中,受一定拉压弯应力作用与环境因素腐蚀介质协同复合作用,其聚合物分子结合能力下降,工程塑料抗裂纹与耐环境性能降低,进而出现裂纹开裂,甚至破坏失效的现象^[21-23],这种现象称之为工程塑料环境应力开裂现象。工程塑料在交变载荷应力的作用下产生细小的缺陷,受自然环境影响,吸收环境因素介质后,将加速工程塑料中分子链断裂,诱发产生银纹,进一步导致工程塑料的宏观开裂^[11]。工程塑料在自然环境因素与载荷应力协同作用下^[24],材料分子间结合力逐渐下降,表面空隙、微裂纹等损伤持续萌生,致使工程塑料的杨氏模量、拉伸强度、弯曲强度等力学性能随自然暴露与载荷应力作用时间增加逐渐下降。若工程塑料出现裂纹,甚至裂纹贯穿材料,将意味着工程塑料力学性能失效。

2 工程塑料自然环境应力协同试验装置设计

2.1 工作原理

装备产品在实际服役中,工程塑料承力结构件经受着环境与载荷的耦合作用,如飞机起落架、挡风玻璃在地面停放阶段或是空中执飞阶段,均持续受静、动载荷和复杂环境的协同作用,传统的单独环境试验、力学载荷试验等相关试验方式各自存在一定的局限性。为真实再现装备的环境损伤,研制了工程塑料自然环境应力协同试验装置,对工程塑料服役中主要损伤原因进行剖析,确定敏感环境与载荷组合,并进行合理简化,设计适合试验装置的工程塑料试验谱开

展试验。

工程塑料自然环境-应力协同试验装置在开展试验时,可暴露在户外自然环境中时,通过装置上的横纵向加载机构对试样施加拉伸或弯曲应力,从而实现工程塑料自然环境与应力协同施加载到试样上。应力加载系统采用力控制方式,恒定应力通过砝码、加载臂、拉簧和压簧等加载实现,通过更换组合不同质量的砝码与变更力臂加载孔位,以实现控制加载应力水平。交变应力通过压簧和驱动电机等加载,加载频率可调。通过双向移动导轨和试样下方的承力支点的不同

组合,以实现试样平稳水平运行,同时对试样施加拉伸、压缩、弯曲等不同载荷。对于长伸长率试样会导致弯曲应力加载点不在试样中点处,设计了蠕变自动补偿系统,避免因试样加载过程中试样蠕变导致的砝码行程过大。通过设计不同的工装夹具和设定不同的工作方式,通过对试样施加拉、压、弯等不同类型载荷的组合,开展恒定、交变拉伸-弯曲、压缩-弯曲多点协同复合加载试验。试验装置采用模块化设计方式,主要由应力加载系统、控制系统两大模块组成,如图 1 所示。

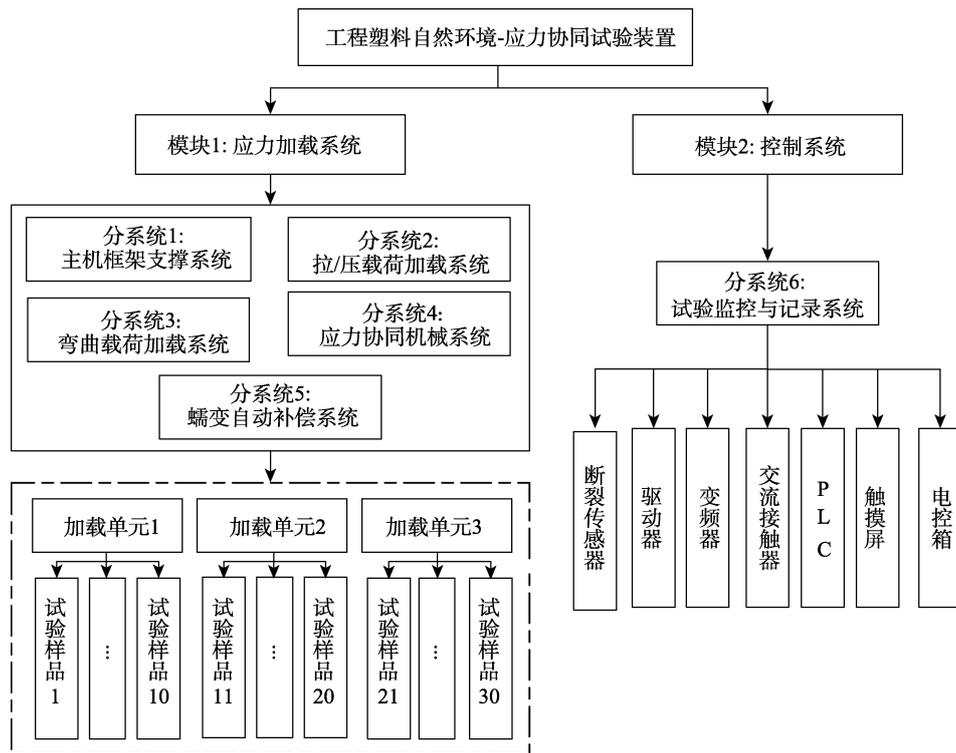


图 1 试验装置组成模块
Fig.1 Modules of test device

2.2 总体设计

试验装置长期暴露在户外工作,采用模块化设计加工,以满足其可靠性、自动化、维修性等要求。试验装置如图 2 所示,由主机框架支撑、拉压载荷加载、弯曲载荷加载、应力协同结构、蠕变自动补偿机构等组成,并结合试验监控与记录系统,对试验装置中电气元件进行通讯控制。

试验样品通过试验夹头水平放置,使试样样品能充分的接受太阳辐射、雨雪等自然环境因素的作用。如图 3 所示,试验装置通过位于试样样品左侧或右侧的加载臂、钢丝绳、砝码、驱动电机等组合对试验样品施加拉/压动静载荷;通过放置于试样下方的由步进电机、偏心轮、连杆等组成的弯曲载荷加载系统对试验样品施加弯曲载荷;通过放置于远离砝

码侧主机框架下方的由蠕变补偿驱动电机、蠕变位移驱动传感器、位移补偿导管等组成的蠕变自动补偿系统对试样位置进行调整,以防试验样品形变过大,导致砝码着地影响试验正常开展;通过由驱动滑台、动滑台等组成的应力协同机械系统实现拉压载荷与弯曲载荷的协同;通过位于装置前方或后方的由断裂传感器、PLC、触摸屏和电控箱等组成的控制系统实现试验条件输入、程序控制、试验条件实时记录与显示等功能。

2.3 主机框架支撑部件设计

试验装置主机框架支撑部件作为装置整体的重要基准性部件,对试验装置各零部件固定、支撑、安装、运转等有重要影响。同时,其作为试验装置,自然环境暴露面众多,自然环境适应性要求较其他

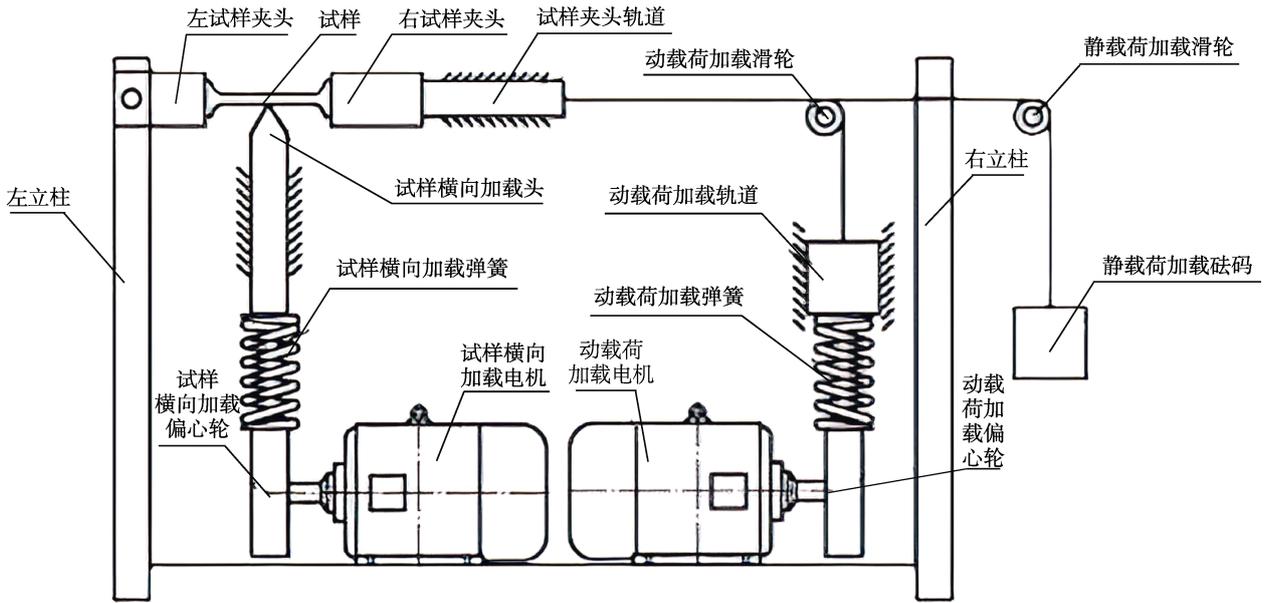


图2 试验装置加载原理
Fig.2 Loading principle of test device

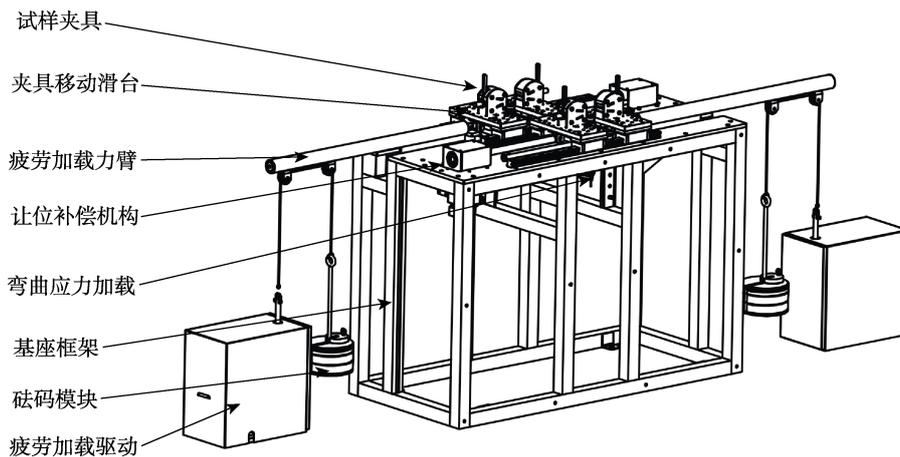


图3 工程塑料自然环境应力协同试验装置总体结构
Fig.3 Overall structure of test device for engineering plastics under synergistic effect of natural environment and stress

零部件较高。为保证试验装置整体运行平稳与结构强度等，主机框架采用不锈钢方管焊接制作主体支撑骨架，整体热处理退火，底端固定于平整地面上。主机框架外表面使用不锈钢板覆盖，同时对焊接处打磨平整，对框架喷涂环氧底漆以保证框架抵抗锈蚀。

主机框架支撑的部组件包括：拉压载荷加载、弯曲载荷加载、应力协同结构、蠕变自动补偿机构等，疲劳载荷施加电机结构，在试验装置两侧通过螺栓固定于地面。支撑结构在工作时受力较大，要求其强度必须足够，以支撑试验装置在工作时往复运动时的可靠性，避免在试验过程中出现零部件损坏，进而影响试验。对框架结构进行力学仿真分析，其中包括静力学及振动下的模态分析，以保证可靠性能达到要求。材料选用结构钢，对框架施加 50 kg 的竖直向下的静力，分析结构框架三级结构模态。

计算后结果显示，框架最大应变为 6×10^{-6} ，最大应力为 1.07 MPa (如图 4 所示)，均出现在上部中间梁与短横梁连接处，远远小于钢材强度，静力结构稳定。同时，由于试验装置需要承受振动，需对框架的固有频率进行校核。经过计算可得主机框架前三阶的模态等效变形情况，并可得在固定底部时，主机框架的前三阶固有频率别为 40.02、47.36、52.75 Hz，试验装置工作频率为 0.01~16 Hz，其中最高工作频率为 16 Hz，相较一阶频率 40.02 Hz 不会存在共振导致结构性破坏的情况。

2.4 拉弯载荷加载系统设计

拉弯载荷加载系统作为试验装置核心部件，通过放置砝码并结合电机运动，对样品施加拉伸载荷，可采用转向工装对试样施加压缩载荷，采用更换弹簧的方式对试样直接施加弯曲载荷。在试验过程中，可有

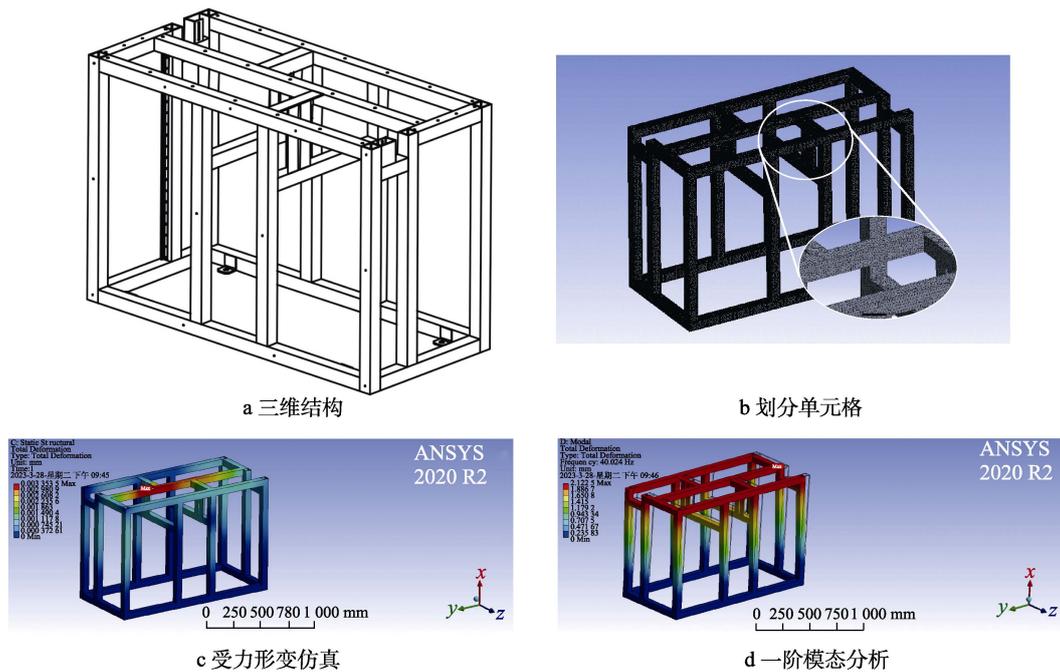


图 4 机框架力学仿真分析

Fig.4 Mechanical simulation analysis of main frame: a) 3D structure; b) cell partition; c) deformation simulation under stress; d) first order modal analysis

效地对试样施加拉弯交变载荷,模拟构建实际工程塑料实际服役环境下的自然环境-应力协同作用。

拉压载荷加载系统由三相异步电机、曲柄滑块机构、试验夹头、拉压弹簧、砝码等组成,通过砝码和驱动电机的组合实现拉伸压缩动静载荷的施加,如图 5 所示。其中,动态疲劳载荷采用立式三相异步电机驱动,电机安装在疲劳载荷机架上,由变频器控制,能实现疲劳载荷加载频率可调,驱动电机可正、反转施加扭矩或卸载,通过拉压簧后转变成垂直的向下拉力,载荷通过拉压簧安装支架传递到滑台上的夹具施加载到试样上。

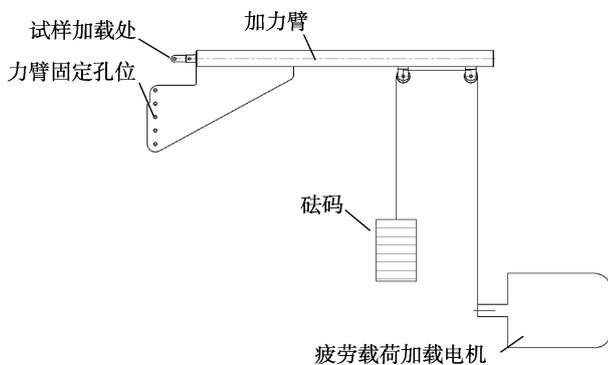


图 5 拉伸加载结构

Fig.5 Schematic diagram of tensile loading structure

为实现拉伸加载系统的往复运动,采用三相异步电机和曲柄滑块机构建立了往复驱动结构,如图 6 所示。同时设置压缩弹簧以保证驱动滑杆在往复运动过

程中的平稳,降低运动冲击。

由上述可知,机械原理角度拉压驱动加载机构由电机所提供的驱动轴、偏心摇臂、滑杆和固定板等组成,可得经过简化的机械原理。不难看出,此机构有 3 个活动构件,即电机驱动轴 1、偏心摇臂 2、驱动滑杆 3,4 个低副,即各连杆间的转动副 A、B、C 与由滑杆和固定台组成的滑动副 D。由机构自由度计算公式将前述活动构件数与运动副数量代入公式计算可得,该机构的自由度为:

$$F = 3n - (2p_1 - 3p_h) = 1$$

计算该结构自由度后可知,该拉伸压缩加载系统自由度唯一,运动轨迹确定。

弯曲载荷加载系统是试验装置中对试样施加弯曲载荷的关键部件,可通过更换不同弹簧来实现变弯曲载荷的施加作用,且能实现频率、弯曲载荷作用周期可控。由弯曲载荷加载系统结构(如图 7 所示)可以看出,其由步进电机、偏心轮、滑块导轨等组成。

偏心轮为弯曲载荷结构中较为核心的零部件,可满足弯曲载荷平顺加载释放,对试样无冲击,为保证形状,采用慢走丝线切割加工。采用步进电机可利用自锁功能,使偏心轮对试样施加长时间静载荷弯曲作用,同时在底部设置有光电传感器,对弯曲载荷施加进行计数。为保护试样,防止意外造成的弯曲载荷驱动结构中偏心轮凸起处在未开展试验时处于工作位置,当底部设置的光电传感器读取到偏心轮位置为工作位置,配合系统软件控制,将发出报警,待位置回正后方可进行工作。

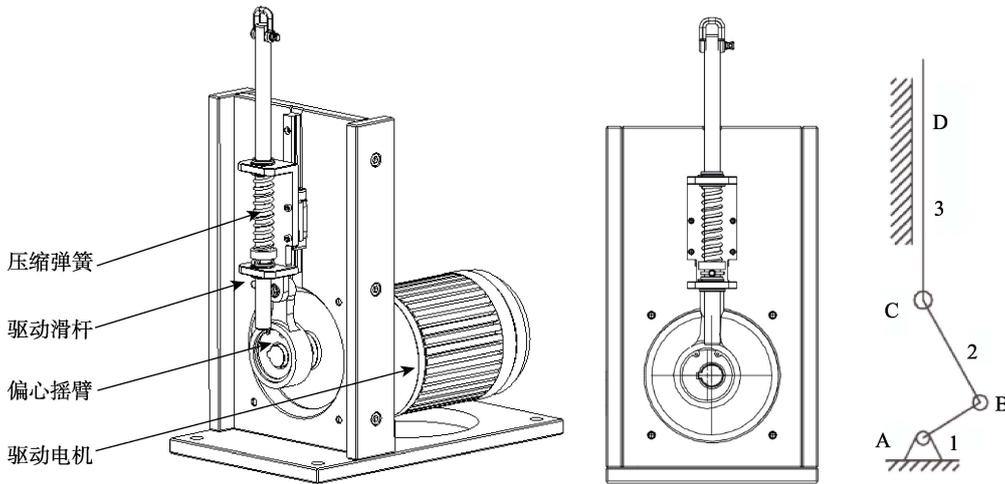


图6 拉伸载荷往复驱动结构
Fig.6 Tensile loading reciprocating drive structure

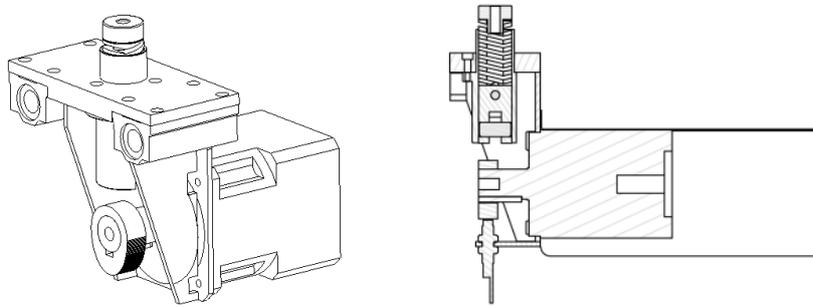


图7 弯曲载荷驱动结构
Fig.7 Bending load driving structure

2.5 控制系统

试验装置安装于距离较远的户外自然暴露试验场,为保证操作的便利性,控制系统方面同时设计有现场与远程控制。控制系统主要采用 PLC 作为主控单元,由力传感器、断裂传感器、电动机、行程开关等电气元件构成,如图 8 所示。现场可布置多个试验装置,每个试验装置均配置有一个 PLC 主控单元,工控机作为上位机设置于室内,通过设置的中央交换

机采用 RS485 与各 PLC 主控单元进行通讯。

PLC 可根据试验要求对拉伸、弯曲载荷加载力的数值、加载频率、加载时间等进行设置调整,同时实时读取监控试验过程中试验所受加载力,记录试验时间,通过断裂传感器监控试验是否存在异常等情况。远程上位机采用光纤与现场主控进行通讯,实现如拉伸疲劳加载、弯曲疲劳加载、试样断裂监控、试验加载频率调节等工作,将试验中载荷力、断裂情况、试验时间、循环次数等数据上传上位机,对各试验参数

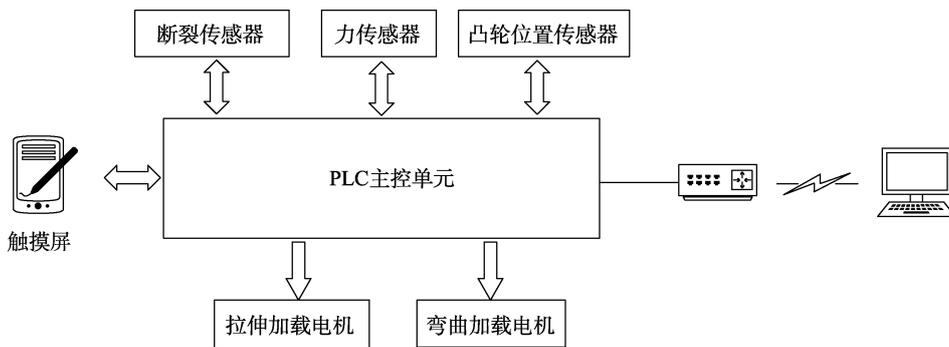


图8 控制系统拓扑图
Fig.8 Topological diagram of control system

进行处理与监控显示,并对相关实验参数和数据进行记录,实现试验远程控制的功能。

由于试验装置需长期无人值守运行,为保证试验安全可靠运行,在拉伸臂下还设置有断裂传感器。当试样意外断裂时,断裂传感器将会触发信号,运行系统停止工作,以保护试样及试验装置。在弯曲加载系统底部设置有光电传感器,当偏心轮没有处于初始位置,其凸出侧向上影响安装试样时,光电传感器持续发出信号,系统将发出警告无法运行,待偏心轮转动至不影响安装试样位置后,系统恢复正常。

3 结语

装备用工程塑料在服役工作时的开裂乃至损坏是环境因素与载荷交变应力协同作用的结果,工程塑料自然环境与受载应力交变协同复合作用的试验方法构建了自然环境-受载应力的协同试验环境,使工程塑料可同时受自然环境各项因素与拉压弯等载荷的协同复合作用,真实反应工程塑料实际服役环境下的环境效应与载荷应力,试验更加贴近服役环境。研制的工程塑料自然环境-应力协同试验装置,使试验样品承受的环境应力协同载荷与真实服役环境一致,材料性能退化损伤机理保持较高的一致性,在较短的试验周期内,有效暴露工程塑料的环境应力协同作用损伤情况,可充分模拟自然环境因素和交变载荷应力的协同作用,有效准确地评价工程塑料的耐环境-应力协同作用性能,充分缩短装备研制周期,具有广阔的应用空间和巨大的研究价值。

参考文献:

- [1] 杨万均, 崔兵兵, 陈星昊, 等. 自然环境超高加速光老化试验系统研制[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 168-174.
YANG W J, CUI B B, CHEN X H, et al. Development of Ultra-Accelerated UV Aging Test System under Natural Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 168-174.
- [2] 陈浩. 玻璃钢雷达罩结构健康监测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
陈浩. Research on Key Technology of Structural Health Monitoring of FRP Radome[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [3] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
WANG X H. Natural Environment Test Technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [4] 宣卫芳. 装备与自然环境试验. 基础篇[M]. 航空工业出版社, 2009.
XUAN W F. Equipment and Natural Environment Test Basics[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [5] 黄少仪. 湿热、亚湿热地区气候环境条件对高分子材料的影响[J]. 环境技术, 2002, 20(6): 1-5.
HUANG S Y. The Influences of Humid Tropical and Humid Subtropical Environment Conditions on Polymer Materials[J]. Environmental Technology, 2002, 20(6): 1-5.
- [6] NAKAMURA S I, SUZUMURA K. Hydrogen Embrittlement and Corrosion Fatigue of Corroded Bridge Wires[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 269-277.
- [7] NAKAMURA S I, SUZUMURA K, TARUI T. Mechanical Properties and Remaining Strength of Corroded Bridge Wires[J]. Structural Engineering International, 2004, 14(1): 50-54.
- [8] BETTI R, WEST A C, VERMAAS G, et al. Corrosion and Embrittlement in High-Strength Wires of Suspension Bridge Cables[J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2): 151-162.
- [9] 陈静. 环境与荷载作用下拉索 HDPE 防护系统腐蚀损伤试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
CHEN J. Experimental Study on Corrosion Damage of HDPE Protection System of Cables under Environment and Load[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [10] 朱天戈, 杨化浩, 武鹏, 等. HDPE 原料及制品耐环境应力开裂测试方法进展[J]. 新材料产业, 2018(5): 61-65.
ZHU T G, YANG H H, WU P, et al. Progress in Testing Methods of Environmental Stress Cracking Resistance of HDPE Raw Materials and Products[J]. Advanced Materials Industry, 2018(5): 61-65.
- [11] 刘炼. 三种典型工程塑料老化行为与摩擦学性能研究[D]. 机械科学研究总院, 2022.
LIU L. Research on the Aging Behavior and Tribological Properties of Three Typical Engineering Plastics[D]. Beijing: General Institute of Mechanical Science Research, 2022.
- [12] 刘秀丽. 不同环境条件下可降解塑料的老化机制及力学性能模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
LIU X L. Simulation Study on the Aging Mechanism and Mechanical Properties of Degradable Plastics under Different Environmental Conditions[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [13] 黄伟, 仇君. 塑料自然老化化学性能的灰色预测[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2001, 26(4): 275-277.
HUANG W, QIU J. Prediction of Mechanical Properties of Plastic Natural Aging with Grey System Theory[J]. Journal of Guangxi University, 2001, 26(4): 275-277.
- [14] 李晖, 张录平, 孙岩, 等. 玻璃纤维增强复合材料的寿命预测[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(1): 68-73.
LI H, ZHANG L P, SUN Y, et al. Prediction of Service Life of the Glass Fibre Reinforced Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(1): 68-73.
- [15] 杨万均, 罗丹, 陈星昊, 等. 高效集热自然环境加速试验设备设计[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 132-137.

- YANG W J, LUO D, CHEN X H, et al. Design of Accelerated Test in Natural Environment Equipment for High-Efficiency Solar Thermal Collector[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(4): 132-137.
- [16] 韩丽美, 孟德颖, 葛庆海, 等. 聚乙烯耐环境应力开裂性能测试方法的研究进展[J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(S1): 4-8.
- HAN L M, MENG D Y, GE Q H, et al. Research Progress on Testing Methods of Environmental Stress Cracking Resistance of Polyethylene[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2019, 38(S1): 4-8.
- [17] 程虹丙. 拉伸—弯曲复合载荷原位力学测试装置设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- CHENG H B. Design and Experimental Research of In-Situ Mechanical Testing Device for Tensile Bending Composite Loads[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [18] 王俊, 彭坚. HDPE 老化试验后的微观结构分析与机械性能对比[C]// 中美材料环境腐蚀与老化试验学术研讨会. 广州: [出版者不详], 2004.
- WANG J, PENG J. Microstructure Analysis and Comparison of Mechanical Properties after HDPE Aging Test[C]// Sion-American Academic Symposium on Environmental Corrosion and Degradation Tests of Materials. Guangzhou: [s. n.], 2004.
- [19] 王俊, 彭坚. 老化试验中 PE-HD 的结构与力学性能研究[J]. *中国塑料*, 2005, 19(1): 44-47.
- WANG J, PENG J. Study on Structure and Mechanical Properties of PE-HD during the Aging Test[J]. *China Plastics*, 2005, 19(1): 44-47.
- [20] 黄立, 江显群, 高丽, 等. 工程塑料应用于咸潮环境中钢结构表面防腐的探讨[J]. *人民珠江*, 2012, 33(S1): 79-81.
- HUANG L, JIANG X Q, GAO L, et al. Discussion on Application of Engineering Plastics in Corrosion Protection of Steel Structure Surface in Salty Tide Environment[J]. *Pearl River*, 2012, 33(S1): 79-81.
- [21] 魏江涛. 高密度聚乙烯耐环境应力开裂改性及性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- WEI J T. The Modification on Environmental Stress Cracking Resistance of High Density Polyethylene and Its Properties Study[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [22] 段凯歌, 陈章成, 王朝, 等. PA66 注塑件组装过程开裂的分析及措施[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(6): 80-84.
- DUAN K G, CHEN Z C, WANG C, et al. Analysis and Measures for Cracking of PA66 Injection Molded Parts in Assembly Process[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(6): 80-84.
- [23] 华登科, 张俊. 摩托车仪表壳体开裂失效分析及对策[J]. *塑料工业*, 2022, 50(S1): 96-99.
- HUA D K, ZHANG J. Failure Analysis and Countermeasures of Motorcycle Instrument Shell Cracking[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(S1): 96-99.
- [24] 时淼, 龚巍, 徐剑峰, 等. PEEK 特种塑料的辐照老化性能与机理研究[C]// 2015 年全国失效分析学术会议论文集. 北京: 《金属热处理》编辑部, 2015.
- SHI Miao, GONG Wei, XU Jian-feng, et al. Study on irradiation aging performance and mechanism of PEEK special plastics_Shi Miao[C]// Proceedings of the 2015 National Conference on Failure Analysis. Beijing: Editorial Department of Heat Treatment of Metals, 2015.