

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.019

复合材料环境当量等效加速老化试验方法

高超干, 周储伟

(南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

摘要: 提出一个评估复合材料自然老化寿命的流程。以单向玻璃纤维和碳纤维增强环氧树脂基复合材料试样为对象,在统计分析南京地区室外暴露条件下自然老化环境因素的基础上,采用环境当量等效方法制定了实验室加速老化环境谱进行加速老化试验,预测这些材料在自然老化环境下的剩余强度,并通过与自然老化试验结果对比来验证加速试验方法的正确性。结果表明,提出的加速老化方法能正确反映自然老化弯曲强度下降规律,该方法可以通过约2个月的加速老化试验准确预估复合材料3年自然老化的剩余弯曲强度,整体加速倍数约为18。对不同复合材料进行当量等效加速老化时,建议采用复合材料结构在服役过程中采集到的阶段性自然老化数据修正当量等效加速老化系数,这样可以得到更加准确的老化预估结果。

关键词: 自然老化; 加速老化; 环境当量等效; 复合材料; 剩余强度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0103-05

Environmental Factor Equivalent Accelerated Aging Test Method for Composites

Gao Chaogan, Zhou Chuwei

(College of Aeronautic, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : An experiment procedure for evaluating the natural ageing life of composites was presented. With unidirectional glass fiber and carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composite samples as the object, on the basis of statistical analysis of natural aging environmental factors under outdoor exposure conditions in Nanjing area, the accelerated aging test was carried out by using the environmental equivalent method to predict the residual strength of these materials under natural aging environment, and the correctness of the accelerated test method was verified by comparing with the results of natural aging test. The results show that the proposed accelerated aging method can correctly reflect the declining law of natural aging bending strength, and the method can accurately predict the residual bending strength of composites after 3 years of natural aging through the accelerated aging test of about 2 months, and the overall acceleration multiple is about 18. When equivalent accelerated aging is carried out for different composites, it is suggested to use the data of stage natural aging collected during service to correct equivalent accelerated aging coefficient, so as to obtain more accurate aging prediction results.

Keywords : natural ageing ; accelerated ageing ; environmental factor equivalent ; composites ; residual strength

树脂基复合材料具有良好的力学性能和耐腐蚀性能及优良的可加工性,被广泛用于航空航天结构、船舶上层建筑、汽车内衬等各个领域^[1-4]。它们在使用过程中会受到环境老化因素的影响,尤其在户外暴露环境中,温度、湿度、太阳光等都会使其性能下降,影响其安全使用^[5-7]。因此工程应用中需要

对树脂基复合材料进行老化试验判定其耐环境老化性能,甚至评估其使用寿命。

复合材料老化寿命的评估方法主要有两种:一种是自然老化试验^[8-9];另一种是实验室人工气候加速老化试验^[10-13]。自然老化试验真实反映了材料所承受的环境条件,获得的试验结果准确可靠,但

基金项目: 国家自然科学基金项目(11872205),江苏省研究生教育创新计划基金项目(KYLX16_0311),江苏省高等学校重点学科建设基金项目,江苏高校优势学科建设工程项目

通讯作者: 周储伟,教授,主要研究方向为复合材料及计算力学 E-mail: zcw@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2020-05-13

引用格式: 高超干,周储伟. 复合材料环境当量等效加速老化试验方法[J]. 工程塑料应用,2020,48(8):103-107,117.

Gao Chaogan, Zhou Chuwei. Environmental factor equivalent accelerated aging test method for composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):103-107, 117.

是试验周期较长,往往需要几年甚至几十年的试验周期;实验室人工气候加速老化试验是对自然老化环境的模拟,通过加速老化试验可以在较短的周期内获得试验结果,但是它往往不能准确反映全部的环境因素和各个环境因素的当量。复合材料人工气候老化的相关国家标准中都明确指出,标准仅用来评价复合材料耐某种单一环境的能力,但不能与实际使用环境相对应。因此如何在自然老化环境与实验室加速老化环境之间建立一个等效的对应关系,采用实验室加速老化方法快速评估复合材料的长期自然老化性能成为迫切需要解决的问题。

有关湿度、温度以及紫外光等单一因素老化环境对复合材料性能影响的研究有较多^[14-19],但加速老化与自然老化对应性的研究以及实验室多因素老化的研究相对较少^[20-21]。笔者统计了南京地区室外暴露条件下的自然老化环境因素,采用环境当量等效方法制定了实验室加速老化环境谱进行加速老化试验,预测这些材料在自然老化环境下的剩余强度,并通过与自然老化试验结果对比验证了加速试验方法的正确性。

1 自然老化与加速老化试验

1.1 试验材料

试验材料为手糊工艺制作的单向玻璃纤维和碳纤维增强环氧树脂基复合材料(以下统称 GFRP 和 CFRP),使用的玻璃纤维为 E-glass,碳纤维为 T300,树脂材料为凤凰牌 WSR618,固化剂为苯二甲胺,增塑剂为邻苯二甲酸二丁酯,树脂、固化剂和增塑剂的比例为 10 : 2 : 1。单向复合材料制备完成后,按照 ASTM D7264 标准裁切弯曲试验件, GFRP 和 CFRP 弯曲试验件的尺寸均为 120 mm × 15 mm × 3 mm。在自然老化和加速老化试验前,试验件均在 50℃烘箱中放置 48 h,保证材料处于干燥状态并减小后固化对老化试验的干扰。

1.2 仪器及设备

恒温水浴箱: HH-4 型,上海力达仪器设备有限公司;

紫外老化环境箱: 南京环科试验设备有限公司;

材料力学性能试验机: 2360 型,美国 INSTRON 公司。

1.3 自然老化试验方法

自然环境下的暴露老化试验按照 GB/T

2573-2008,试验站位置位于南京,暴露场选择在屋顶平台,试验件固定于暴露架上面向南方与水平面成 45°角,暴露试验装置如图 1 所示。试验开始于 2016 年 1 月结束于 2019 年 3 月,试验初期取样周期较短,后期周期较长。每次强度测试取 GFRP 和 CFRP 弯曲试验件各 5 个。



图 1 室外暴露自然老化试验

1.4 加速老化试验方法

(1) 加速老化环境因素选择。

室外老化的试验件会受到太阳辐照、温湿度、淋雨、风吹等因素的影响,其中最主要的因素为太阳辐照和温湿度,太阳光中对树脂基复合材料老化影响最为显著的是紫外光^[22-23],因此在模拟室外老化时选取紫外光和温湿度作为加速老化的环境因素。

(2) 老化环境当量等效方法。

对于温湿度引起的老化,聚合物基复合材料主要发生水解、塑化等性能衰退,可以选择高温和高湿度的环境进行加速老化试验,研究所使用的复合材料玻璃化转变温度为 80℃,因此选取加速湿热老化的环境为温度 70℃的水浴环境。湿热加速的作用时间可以按照式 (1) 吸湿速度经验公式来计算^[24]。

$$K = \frac{t_2}{t_1} = \frac{e^{-C/(T_1\varphi_1)}}{e^{-C/(T_2\varphi_2)}} \quad (1)$$

式中: K 为时间加速系数, t_1 和 t_2 分别是实验室加速老化和自然老化时间, T_1 和 T_2 分别是自然老化与加速老化的温度, φ_1 和 φ_2 分别是自然老化与加速老化的湿度, C 为等效加速系数。

对于紫外光引起的老化,一般认为老化程度与辐照总量相关,因此在加速老化试验中,只需要保持紫外辐照量与自然老化的紫外辐照量一致即可。

(3) 自然老化环境当量计算。

在缺乏长期老化数据情况下,可先采用手册(或其它文献)推荐的参数进行加速试验,初步评估复合材料长期老化性能,判断其是否满足环境耐久性要求。初步的老化评估结果与实际情况难免会有偏差,因此复合材料在使用中应同时进行自然老

化试验,并根据试验结果同步修正当量等效加速系数重新进行加速老化试验,得到更为准确的复合材料长期老化性能预估。例如,文献[24]推荐,当 $T_2 \leq 60^\circ\text{C}$ 时, $C=46.1$,当 $T_2 > 60^\circ\text{C}$ 时, $C=81.5$ 。经试验验证,该参数对于笔者所使用的复合材料偏小,按照上述方法修正后,最终采用的参数为 $C=100$,该参数的调整流程如图2所示。

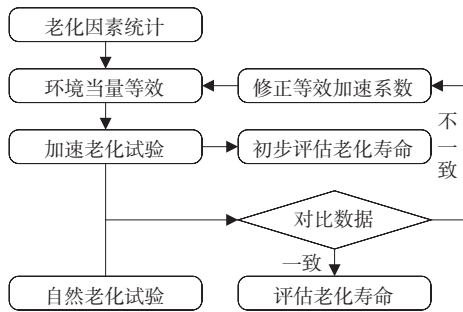


图2 复合材料自然老化寿命评估流程

表1列出了南京地区2016~2018年月平均温度和湿度数据分布。可以看出,南京地区全年最高的温度在7月份和8月份,7月份之前和8月份之后的各月份也基本呈对称形式,湿度也有类似的对称规律。按照公式(1)计算温湿度当量等效后加速老化所需要的时间,当月平均气温低于 10°C 时(1月,2月和12月),温湿度对老化的影响可以忽略不计^[25],每个月自然老化对应的加速老化时间及加速倍数见表2。

表1 南京地区2016年到2018年月平均温度和湿度数据

月份	2016年		2017年		2018年	
	平均温度/ $^\circ\text{C}$	平均湿度/%	平均温度/ $^\circ\text{C}$	平均湿度/%	平均温度/ $^\circ\text{C}$	平均湿度/%
1月	5	67	7	75	4	70
2月	8	53	8	66	6	60
3月	13	60	11	66	14	66
4月	19	73	17	64	19	57
5月	22	75	22	63	24	67
6月	25	81	25	70	28	58
7月	29	84	32	72	30	70
8月	29	79	30	74	29	76
9月	24	77	24	78	25	69
10月	19	86	18	69	19	51
11月	12	81	14	56	15	65
12月	8	76	8	50	8	66
全年	18	75	18	67	19	65

图3给出了南京市平均日最大紫外线辐射强度的变化规律^[26]。可以看出,最大日均紫外线辐射量基本以7月份为对称轴左右对称分布,这与南京市月平均温度的分布类似。南京市太阳光年辐射量一般在 $12 \sim 13 \text{ MJ}/\text{m}^2$,其中波长在 $300 \sim 400 \text{ nm}$ 的

表2 当量等效加速老化倍数与加速老化所需时间

月份	2016年		2017年		2018年	
	加速倍数	加速时间/h	加速倍数	加速时间/h	加速倍数	加速时间/h
3月	10769.06	0.07	23426.18	0.03	2113.42	0.34
4月	111.24	6.47	559.21	1.29	578.89	1.24
5月	43.60	16.51	111.71	6.45	49.61	14.51
6月	17.47	41.22	32.88	21.90	47.19	15.26
7月	8.86	81.28	10.73	67.10	15.13	47.59
8月	10.95	65.77	12.27	58.70	12.60	57.15
9月	25.68	28.03	24.27	29.66	35.18	20.47
10月	45.76	15.73	220.90	3.26	1403.11	0.51
11月	1367.16	0.53	10210.00	0.07	1332.34	0.54
全年		255.61		188.45		157.62

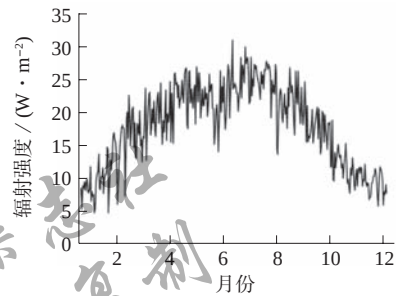


图3 南京市平均日最大紫外线辐射强度的年变化

紫外光占比为 $6.0\% \sim 6.5\%$,因此南京地区的年紫外光辐照量为 $0.72 \sim 0.85 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。

(4) 加速老化试验方法。

在人工加速老化试验中,将温湿度与紫外光进行交替循环来体现环境变化(如晴天雨天交替)的影响。通过上述分析可以看出,每年的温湿度及紫外光当量基本都以7月份为中心呈现对称性,因此选择每个试验周期的环境当量等效于半年的自然老化环境当量。每个周期的温湿度老化时间为三年温湿度加速老化总时间的 $1/6$,也就是 56.5 h ,湿热加速老化在恒温水浴箱中进行;紫外加速老化在紫外环境箱中进行,试验采用的紫外光源为UVA-340荧光紫外灯,最大紫外光辐照功率为 $0.60 \text{ W}/\text{m}^2$,南京地区半年的紫外光辐照量可以通过约 180 h 的紫外加速老化进行等效。复合材料加速老化试验的环境谱如图4所示。

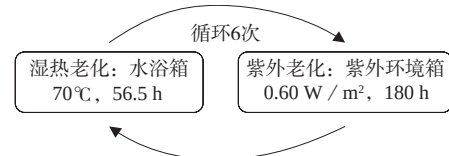


图4 复合材料加速老化试验环境谱

1.5 性能测试

老化试验过程中,定期取出一组试验件进行弯

曲强度测试,试验方法参考 GB/T 3356-2014。

2 结果分析

2.1 自然老化试验结果

图5是GFRP和CFRP在自然老化前后的照片。在经历自然老化之后,GFRP试验件的表面颜色变黄;由于碳纤维本身是黑色,CFRP的颜色变化不易观察,但从CFRP试验件可以观测到老化后试验件表面变得粗糙。试验测得GFRP和CFRP初始弯曲强度分别为549.59 MPa和851.46 MPa。

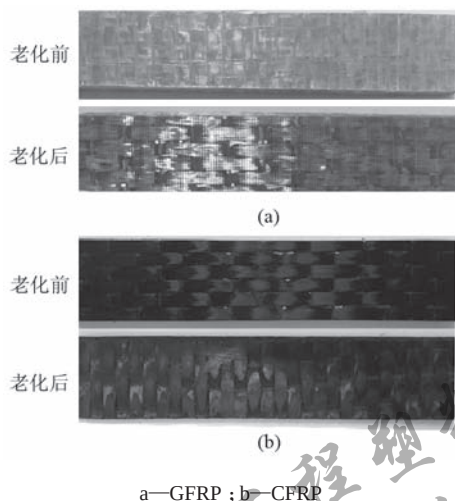


图5 自然老化前后外观变化对比

图6展示了GFRP和CFRP在室外暴露条件下自然老化弯曲强度的变化规律,可以看出两种单向复合材料在老化初期弯曲强度下降较快,在老化后期下降速度逐渐缓慢。这种变化规律服从于古尼耶夫公式^[27],如果不考虑后固化的影响,古尼耶夫公式可以用式(2)表达。

$$S = S_0 - \varphi \ln(1 + \theta t) \quad (2)$$

式中: S 为老化 t 时间后的强度, S_0 为初始强度, φ 表示材料抗老化能力参数, θ 为环境老化侵蚀系数。

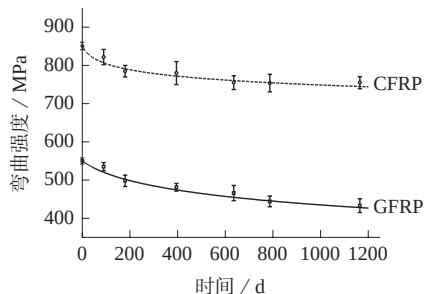


图6 GFRP和CFRP自然老化弯曲强度变化规律

通过对老化试验数据的拟合,得到式(3)、式(4)的GFRP和CFRP自然老化弯曲强度变化拟合方程。

$$S_{\text{GFRP}} = 549.59 - 53.12 \ln(1 + 0.012t) \quad (3)$$

$$S_{\text{CFRP}} = 851.46 - 26.21 \ln(1 + 0.050t) \quad (4)$$

2.2 加速老化试验结果与分析

通过6个周期的加速老化试验,得到GFRP和CFRP的当量等效加速老化试验数据,图7展示了两种复合材料的加速老化试验弯曲强度结果,试验数据已通过等效关系折算为自然老化寿命。通过对老化试验数据的拟合,得到式(5)、式(6)的GFRP和CFRP加速老化弯曲强度变化拟合方程。

$$S_{\text{GFRP}}^{\text{accelerated}} = 549.59 - 54.03 \ln(1 + 0.011t) \quad (5)$$

$$S_{\text{CFRP}}^{\text{accelerated}} = 851.46 - 41.22 \ln(1 + 0.031t) \quad (6)$$

可以看出,当湿热老化加速系数 C 的值选为100时,GFRP当量加速老化试验结果与其自然老化试验结果十分接近且老化规律相似,说明采用当量等效并考虑老化环境因素交替变化加速老化试验方法可以较准确地预估复合材料的自然老化规律。CFRP的加速老化规律也与自然老化规律基本一致,但加速老化试验明显低估了复合材料的抗老化性能,说明CFRP的实际湿热老化加速系数值更大,且与GFRP的加速系数值不一致。因此对不同材料进行当量等效加速老化时,某个单因素老化的加速系数应单独确定。

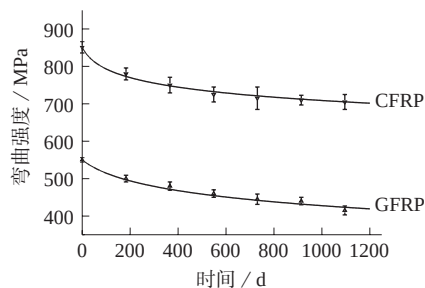


图7 GFRP和CFRP实验室加速老化弯曲强度变化规律

3 结论

(1) 考虑环境因素交替变化的当量等效加速老化试验方法较为真实地反映了复合材料所承受的实际老化环境,可以作为预估复合材料自然老化寿命的试验手段。

(2) 使用中要注意不同种类材料在各个老化因素下的加速系数选择,该参数对预估结果有较大影响。建议采用复合材料结构在服役过程中采集到的阶段性自然老化数据修正当量等效加速老化系数,这样可以得到更加准确的老化预估结果。

(3) 达到复合材料自然老化 3 年的弯曲强度下降量,当量等效加速老化试验仅需要 6 个加速老化试验周期(约 2 个月),当量等效加速老化试验方法是评估复合材料长期老化性能的高效方法。

参考文献

- [1] Mamani A, Ebrahimi M, Ataefard M. A study on mechanical, thermal and flame retardant properties of epoxy / expandable graphite composites[J]. *Pigment & Resin Technology*, 2017, 46(2):131-138.
- [2] Kathavate V S, Amudha K, Adithya L, et al. Mechanical behavior of composite materials for marine applications——An experimental and computational approach[J]. *Nephron Clinical Practice*, 2018, 27:440-450.
- [3] Shi X H. Applications of thermoplastic composites based on thermoforming process for commercial aircraft[J]. *Science & Technology Vision*, 2019, 22:4-8.
- [4] Lunin A S, Snesevskii P V. Use of polymer composites in motor vehicle electrical equipment and lighting system components[J]. *International Polymer Science & Technology*, 2018, 6:46-47.
- [5] 王健,何雍,张翔,等. 热氧老化对 PA10T / GF 复合材料性能及使用寿命的影响[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(4):91-97.
- Wang Jian, He Yong, Zhang Xiang, et al. Effects of thermal-oxidative aging on properties and service life of PA10T / GF composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(4):91-97.
- [6] Ray B C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2006, 298(1):111-117.
- [7] D' Antino T, Pisani M A, Poggi C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2017, 141:123-136.
- [8] Zhang Y J, Zhu X, Mei Z Y, et al. Experimental study on natural ageing character of T300 / epoxy composite under marine environmental load[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 40(12):25-28.
- [9] Wang Y Y, Liu J, Meng J Y, et al. A review on aging behaviors of fiber reinforced polymer-matrix composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 1(7):85-89.
- [10] Chen Y, Davalos J F, Ray I, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. *Composite Structures*, 2007, 78(1):101-111.
- [11] Mouzakis D E, Zoga H, Galiotis C. Accelerated environmental ageing study of polyester / glass fiber reinforced composites (GFRPCs)[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2008, 39(3):467-475.
- [12] Alexandre D S R, De Amorim W F, De Moura E P, et al. Effects of accelerated aging on mechanical, thermal and morphological behavior of polyurethane / epoxy / fiberglass composites[J]. *Polymer Testing*, 2016, 50:152-163.
- [13] Kong E, Yoon B, Nam J D, et al. Accelerated aging and lifetime prediction of graphene-reinforced natural rubber composites[J]. *Macromolecular Research*, 2018, 26(11):998-1003.
- [14] Dantas D C B, Mathias I F, Borges A B, et al. Effects of artificial accelerated aging on the optical properties of resin composites[J]. *Bioscience Journal*, 2018, 34(2):1105-1113.
- [15] Pala K, Tekçe N, Tuncer S, et al. Flexural strength and microhardness of anterior composites after accelerated aging[J]. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 2017, 9(3):424-430.
- [16] Cysne Barbosa A P, Fulco A P P, Guerra E S S, et al. Accelerated aging effects on carbon fiber / epoxy composites[J]. *Composites*, 2017, 110:298-306.
- [17] Nicholas J, Mohamed M, Dhaliwal G S, et al. Effects of accelerated environmental aging on glass fiber reinforced thermoset polyurethane composites[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2016, 94:370-378.
- [18] Rocha I B C M, Rajjmaekers S, Nijssen R P L, et al. Hygrothermal ageing behaviour of a glass / epoxy composite used in wind turbine blades[J]. *Composite Structures*, 2017, 174:110-122.
- [19] Han K J, Jackyou N. Experimental study on the hygrothermal ageing effect to the strength of CFRP materials for marine leisure boat[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 2018, 55(3):205-214.
- [20] Chen Y, Wang A, Bian G, et al. Aging mechanism and equivalent acceleration relationship of G827 / 3234 composite in the marine environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12):3304-3312.
- [21] 孙岩,王登霞,刘亚平,等. 玻璃纤维 / 溴化环氧乙烯基酯加速老化与自然老化的相关性[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(4):916-924.
- Sun Yan, Wang Dengxia, Liu Yaping, et al. Correlation of accelerated aging and natural aging of glass fiber reinforced bromide epoxy vinyl ester composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(4):916-924.
- [22] Mahzan S, Fitri M, Zaleha M. UV radiation effect towards mechanical properties of natural fibre reinforced composite material:A Review[J]. *IOP Conference Series:Materials Science and Engineering*, 2017, 165(1):12-21.

内条件比体外条件可能导致较少的磨损产生。后续,还需要进行实验对比研究,系统化地探究不同头部运动类型对体内磨损的影响规律。

参考文献

- [1] Kurtz S M. Total disc arthroplasty[M]. Burlington:Academic Press,2006.
- [2] Brown S A. Synthetic biomaterials for spinal applications[M]. Burlington:Academic Press,2006.
- [3] Xin H, Shepherd D E T, Dearn K D. A tribological assessment of a PEEK based self-mating total cervical disc replacement[J]. Wear, 2013,303:473-479.
- [4] Crompton P A, Dumas G A, Nolte L P. A minimally disruptive technique for measuring intervertebral disc pressure in vitro:Application to the cervical spine[J]. Journal of Biomechanics, 2001,34:545-549.
- [5] Anderst W J, Donaldson Iii W F, Lee J Y, et al. Three-dimensional intervertebral kinematics in the healthy young adult cervical spine during dynamic functional loading[J]. Journal of Biomechanics, 2015,48:1 286-1 293.
- [6] Anderst W J, Donaldson Iii W F, Lee J Y, et al. Cervical motion segment contributions to head motion during flexion / extension, lateral bending, and axial rotation[J]. The Spine Journal,2015, 15:2 538-2 543.
- [7] Shaheen A, Shepherd D E T. Lubrication regimes in lumbar total disc arthroplasty[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H:Journal of Engineering in Medicine,2007, 221:621-627.
- [8] Grupp T M, Meisel H J, Cotton J A, et al. Alternative bearing materials for intervertebral disc arthroplasty[J]. Biomaterials,2010, 31:523-531.
- [9] Craig J J. Introduction to robotics:Mechanics and control (2nd ed) [C]. Boston, United States:Addison-Wesley Publication,2010.
- [10] Diao H, Xin H, Dong J, et al. Prediction of cervical spine joint loading and secondary motion using a musculoskeletal multi-body dynamics model via force-dependent kinematics approach[J]. Spine,2017,42(24):E1 403-E1 409.
- [11] Salvia P, Champagne O, Feipel V, et al. Clinical and goniometric evaluation of patients with spasmodic torticollis[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon),2006,21:323-329.
- [12] Windberger U, Bartholovitsch A, Plasenzotti R, et al. Whole blood viscosity, plasma viscosity and erythrocyte aggregation in nine mammalian species:Reference values and comparison of data[J]. Experimental Physiology,2003,88:431-440.
- [13] Kang L, Galvin A L, Brown T D, et al. Wear simulation of ultra-high molecular weight polyethylene hip implants by incorporating the effects of cross-shear and contact pressure[J]. Journal of Engineering in Medicine,2008,222:1 049-1 064.
- [14] Abdelgaied A, Liu E, Brockett C, et al. Computational wear prediction of artificial knee joints based on a new wear law and formulation[J]. Journal of Biomechanics,2011,44:1 108-1 116.
- [15] Rawlison J J, Punga K P, Gunsallus K L, et al. Wear simulation of the ProDisc-L disc replacement using adaptive finite element analysis[J]. Journal of Neurosurgery Spine,2007,7:165-173.
- [16] Kang L, Galvin A L, Brown T D, et al. Quantification of the effect of cross-shear on the wear of conventional and highly cross-linked UHMWPE[J]. Journal of Biomechanics,2008,41:340-346.
- [17] Cobian D G, Daehn N S, Anderson P A, et al. Active cervical and lumbar range of motion during performance of activities of daily living in healthy young adults[J]. Spine,2013,38:1 754-1 763.
- [18] Komorek A, Przybyk P, Brzozowski D. The influence of UV radiation upon the properties of fibre reinforced polymers[J]. Solid State Phenomena,2014,223:27-34.
- [19] 益小苏,杜善义,张立同,等. 复合材料手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [20] Yi Xiaosu, Du Shanyi, Zhang Litong, et al. Composite materials handbook[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2009.
- [21] 许凤和,李晓骏,陈新文. 复合材料老化寿命预测技术中大气环境当量的确定 [J]. 复合材料学报,2001(2):94-97.
- [22] Xu Fenghe, Li Xiaojun, Chen Xinwen. The determination of atmospheric environment equivalence in life-prediction technology of composites aging[J]. Acta Metallurgica Sinica,2001,18(2):93-96.
- [23] 毛宇清,姜爱军,沈澄,等. 紫外线强度等级确定因子的季节性选择 [J]. 气象科学,2010,30(4):516-521.
- [24] Mao Yuqing, Jiang Aijun, Shen Cheng, et al. Seasonal choice of factors defining the ultraviolet radiation intensity levels[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2010,30(4):516-521.
- [25] Bulmanis V N, Gunyaev G M, Krivonos V V, et al. Atmospheric durability of polymer-fiber composites in cold climates[J]. Mechanics of Composite Materials,1991,27(6):698-705.

(上接第 107 页)