

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.021

# PE-UHMW 人工颈椎间盘体内与体外工况摩擦学对比

辛骅<sup>1</sup>, 刘瑞娟<sup>1</sup>, 陈威<sup>1</sup>, 赵雪妮<sup>1</sup>, 刁昊<sup>2</sup>, 靳忠民<sup>2,3</sup>

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710021; 2. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710054;

3. 英国利兹大学机械工程学院, 利兹 LS29 JT)

**摘要:** 为探究“金属-超高分子量聚乙烯”颈椎间盘假体在体内(头部前-后屈伸运动)和体外 ISO 18192-1(2014) 工况下的摩擦学性能。采用 Hamrock & Dowson 最小膜厚公式, 进行润滑对比分析。基于“Archard 双因素磨损方程”定量预测 PE-UHMW 假体的磨粒与黏着磨损情况。结果表明, 不同工况下膜厚比  $\lambda$  值始终低于 1, 说明主要润滑类型为边界润滑, 表面微凸体直接接触不可避免。根据 500 万循环 PE-UHMW 假体的磨损体积变化趋势, 可知体内磨损率比体外磨损率小一个数量级, 并在 100 万循环 (Mc) 后趋于稳定。三种工况下, ISO 标准条件体外工况的体积磨损率最高, 为  $0.822 \text{ mm}^3/\text{Mc}$ ; 三种工况相对应的质量磨损率分别为 ISO 标准条件  $0.768 \text{ mg}/\text{Mc}$ 、ISO 替代条件  $0.607 \text{ mg}/\text{Mc}$  和体内工况  $0.025 \text{ mg}/\text{Mc}$ 。后续, 还需要进行深入的实验对比研究, 系统化地探究不同头部运动类型对体内磨损的影响规律。

**关键词:** 人工颈椎间盘; 体内; 体外; 磨损仿真; 润滑分析

**中图分类号:** TH14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0113-05

## Tribological Comparison of PE-UHMW Artificial Cervical Intervertebral Disc under In Vivo and In Vitro Conditions

Xin Hua<sup>1</sup>, Liu Ruijuan<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1</sup>, Zhao Xueni<sup>1</sup>, Diao Hao<sup>2</sup>, Jin Zhongmin<sup>2,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

3. School of Mechanical Engineering, University of Leeds, Leeds LS29 JT, UK)

**Abstract:** The tribological properties of metal and ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) based cervical intervertebral disc prosthesis (TDA) were investigated under in vivo (head flexion-extension movement) and in vitro [ISO 18192-1(2014)] conditions. Analytical lubrication regime analysis was conducted by adopting Hamrock & Dowson minimum film thickness equation. Numerical wear simulation was performed using the cross-shear dependent Archard wear equation. Abrasion and adhesion wear of PE-UHMW TDA was then quantitatively predicted for five million cycles. The results show that membrane thickness percentage  $\lambda$  value is always below unity, disregard the different working conditions. This may indicate that boundary lubrication is dominate and surface asperities contact is likely. According to the volumetric change of PE-UHMW TDA, the in vivo wear rate was one order of magnitude lower than that of in vitro, and volumetric loss ratio tended to be stable after 1 million cycles. Among the adopted three testing conditions, ISO-standard condition results in the highest volume wear rate of  $0.822 \text{ mm}^3/\text{million cycles}$ . Meanwhile, the gravimetric wear loss of ISO-standard, ISO-alternative and head flexion-extension are 0.768, 0.607, 0.025 mg/million cycles, respectively. In the future, it is necessary to carry out in-depth experimental comparative study, and to systematically study the influence of different head movement types on the in vivo wear of PE-UHMW TDA.

**Keywords:** artificial cervical intervertebral disc; in vivo; in vitro; wear simulation; lubrication analysis

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51772179, 51072107), 陕西省自然科学基金项目 (2020JQ-728)

**通讯作者:** 陈威, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为苛刻环境 (海洋环境、无润滑等) 下摩擦磨损机制、特殊服役环境中的腐蚀机理、陶瓷基复合材料制备技术 E-mail: chenweijd@sust.edu.cn

**收稿日期:** 2020-05-16

**引用格式:** 辛骅, 刘瑞娟, 陈威, 等. PE-UHMW 人工颈椎间盘体内与体外工况摩擦学对比 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):113-117.

Xin Hua, Liu Ruijuan, Chen Wei, et al. Tribological comparison of PE-UHMW artificial cervical intervertebral disc under in vivo and in vitro conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):113-117.

颈椎全椎间盘置换术(TDA)是一种治疗椎间盘退变、神经根病和脊髓病的运动保留外科治疗方法<sup>[1]</sup>。现有人工椎间盘假体,如 Prodisc-C<sup>®</sup> 和 Discover<sup>®</sup>,通常采用超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)作为摩擦副。临床应用中,PE-UHMW 假体的磨损会引起一系列并发症(如炎症和骨溶解),导致假体过早失效<sup>[2]</sup>。

基于脊柱模拟器的物理式磨损实验常用于评价假体的摩擦学性能<sup>[3]</sup>。然而,这种方法成本高、耗时长,仅能模拟相对简单的体内运动工况。而且,此种方法不适于假体参数化分析,难以提前预判假体磨损量与磨损形貌。在这种情况下,可以采用数值磨损仿真方法,该方法具有通用性高,成本较低等特点。

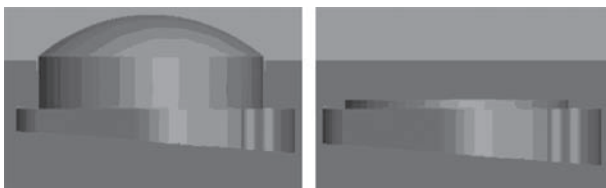
到目前为止,椎间盘真实的动态生理载荷尚不清楚。ISO 18192-1 (2014) 标准给出了一个 50~150 N 的正弦加载曲线,它是基于经验公式将椎间盘内压力转换为载荷<sup>[4]</sup>,而不是直接测量关节动态载荷。因此,ISO 载荷曲线并不能完全代表关节实际受力情况。从运动学角度看,椎间盘的生理运动模式取决于椎间盘的阶段以及头部运动类型<sup>[5-6]</sup>。每个椎间盘在特定的头部运动下都有自己独特的运动模式。然而,在 ISO 18192-1 (2014) 标准中,仅仅用一组简单固定的运动模式来表示椎间盘的运动轨迹。这些载荷和运动学上的差异可能导致不同的体内与体外摩擦学结果。

笔者针对颈椎假体体内和体外运行工况的差异,对比研究“金属-PE-UHMW”摩擦副的摩擦学性能,进而揭示 PE-UHMW 假体的生理润滑机制与磨损率,有助于人工假体的设计优化与研发。

## 1 材料与方法

### 1.1 颈椎 TDA

选择 Discover<sup>®</sup> 颈椎 TDA 作为案例。它采用“PE-UHMW 球”对“钴铬钼 (CoCrMo) 窝”设计,见图 1。其球半径为 10.27 mm,径向间隙为



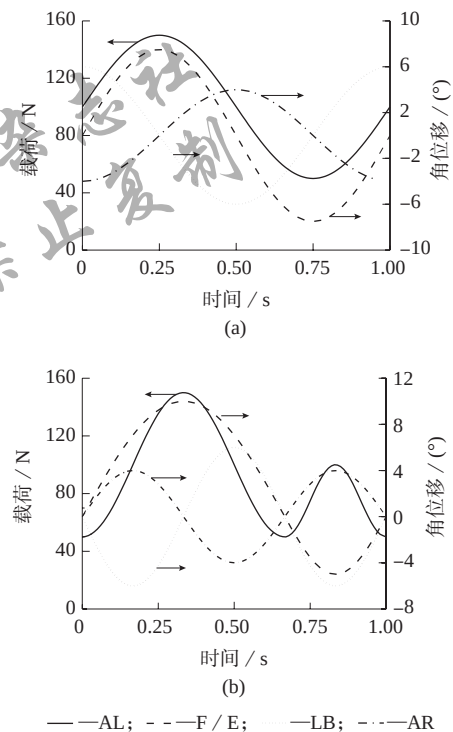
(a) (b)  
a—PE-UHMW 球; b—CoCrMo 窝

图 1 Discover<sup>®</sup> 颈椎 TDA 的  $\mu$ -CT 图像

0.42 mm,复合表面粗糙度为  $0.646 \mu\text{m}$ ;PE-UHMW 材料的拉伸弹性模量为 1 GPa,泊松比为 0.4,密度为  $0.934 \text{ g/mm}^3$ <sup>[7-8]</sup>。

### 1.2 载荷和运动循环

使用 ISO 18192-1 (2014) 规定的标准条件和替代条件进行体外分析,结果见图 2,两种测试条件的载荷范围、旋转运动范围及运行频率相同,不同点在于载荷的加载模式及旋转运动之间的相位差。椎间盘假体受垂直轴向载荷(AL),同时进行耦合旋转运动,包括弯曲伸展(F/E)、侧向弯曲(LB)、轴向旋转(AR),其中角度正值表示前屈;角度负值表示后伸。可根据欧拉旋转定律<sup>[9]</sup>计算复合旋转角速度,以便随后进行润滑状态分析。



a—ISO 标准条件; b—ISO 替代条件

图 2 载荷和运动轨迹

采用先前开发的“头-颈”部多体动力学(MBD)模型<sup>[10]</sup>,模拟头部屈伸运动( $50^\circ$  屈曲至  $50^\circ$  伸展),获取椎间盘的动态生理载荷曲线<sup>[11]</sup>。第四~五颈椎椎体之间(C4~C5)椎间盘的角位移和载荷见图 3。

### 1.3 润滑分析

采用式(1) Hamrock & Dowson 方程计算最小有效膜厚度( $h_{\min}$ )。随后,通过膜厚比  $\lambda$  值确定润滑状态, $0.1 < \lambda < 1$  为边界润滑, $1 \leq \lambda \leq 3$  为混合润滑; $\lambda$

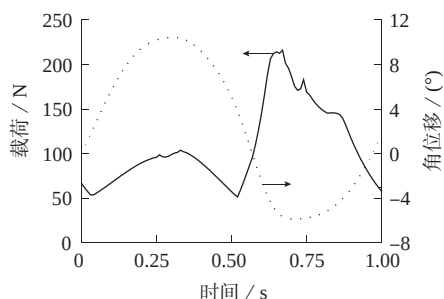


图3 体内条件下的载荷和循环

$> 3$  为流体膜润滑。黏度为  $1.24 \text{ MPa} \cdot \text{s}$  的组织间液被用作椎间盘的体内润滑分析<sup>[12]</sup>,而以牛血清为基础的润滑剂(黏度值为  $1.03 \text{ MPa} \cdot \text{s}$ )被用作体外润滑分析<sup>[3]</sup>。

$$h_{\min} = 2.8R \left( \frac{\eta u}{ER} \right) \left( \frac{F}{ER^2} \right)^{-0.21} \quad (1)$$

式中:  $R$ ——球面半径, mm;

$\eta$ ——黏度,  $\text{MPa} \cdot \text{s}$ ;

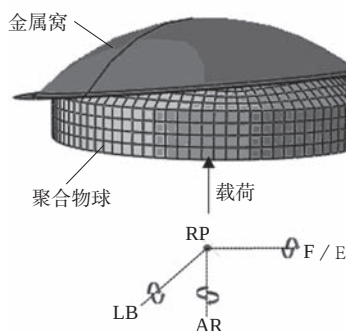
$u$ ——进入速度, m/s;

$E$ ——弹性模量, MPa;

$F$ ——载荷, N。

#### 1.4 磨损模型

采用数值磨损仿真方法可对不同工况下的磨损结果进行预测与评价。采用文献<sup>[13]</sup>所提出的通用 Archard 双因素磨损公式去定量预测 PE-UHM 假体的磨粒与黏着磨损情况。另一方面,根据文献<sup>[14]</sup>提出的方法,同时考虑了 PE-UHM 的蠕变现象。基于 Discover<sup>®</sup> TDA 设计的有限元模型如图 4 所示。PE-UHMW 球被模拟成一个弹性变形体,同时采用解析曲面来表示 CoCrMo 窝<sup>[15]</sup>。根据每个运动周期的起始位置设定球和球窝的初始方向。PE-UHMW 球完全受约束,而窝可以自由移动与旋转。采用笛卡尔坐标系,将旋转中心设置在球的中心(即 RP 点)。采用 Abaqus 显式动力分析计算节

图4 Discover<sup>®</sup>TDA 的有限元模型

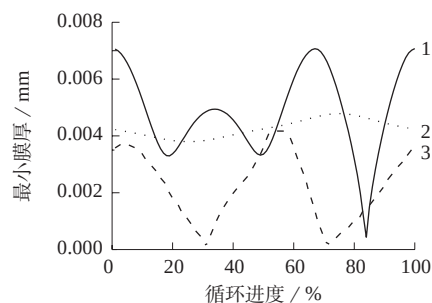
点接触应力和滑动距离。采用八节点六面体单元 (C3D8R) 对球进行网格划分。为了保证解的收敛性,对网格密度进行了敏感性分析。采用  $0.5 \text{ mm}$  单元尺寸,并在接触面之间施加  $0.08$  的摩擦系数。随后,采用自定义的 Matlab 脚本实现磨损仿真与预测<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 润滑状态

对于不同工况,润滑膜厚度的变化如图 5 所示,采用百分比去描述整个循环过程。在 ISO 标准条件下形成了相对稳定的最小膜厚。相比之下,在体内和 ISO 替代条件下都可以看到峰-谷型趋势。为了便于对比不同工况,计算  $\lambda$  值如表 1 所示。很明显,无论哪种工况  $\lambda$  值始终低于 1,这表明边界润滑总是占主导地位。

研究中,使用经验公式分析确定了 Discover<sup>®</sup> 颈椎 TDA 的润滑状态。所采用的润滑剂(牛血清和组织间液)均被假定为牛顿等黏性流体。然而,牛血清实际上是非牛顿流体,具有剪切稀化效应,即随着剪切速率的增加黏度降低。这一现象意味着实际的润滑膜厚度将小于表 1 的计算值。为了更精确地分析润滑工况可通过脊柱模拟器测量摩擦扭矩,随后绘制 Stribeck 曲线确定润滑机理。现有摩擦扭矩润滑研究表明,具有相似设计参数的聚醚醚酮“球-窝”型颈椎 TDA,在 ISO 体外工况下也是处于边界润滑状态<sup>[3]</sup>。



1—ISO 标准条件;2—ISO 替代条件;3—体内工况

图5 不同工况下获得的最小膜厚

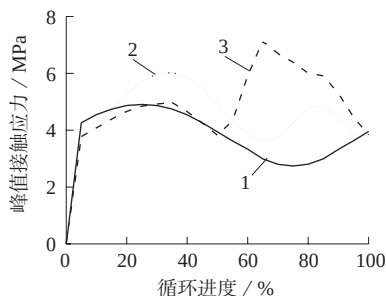
表1 不同工况下所获得的  $\lambda$  值

| 项目          | ISO 标准条件        | ISO 替代条件        | 体内工况            |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\lambda$ 值 | 0.0087 ~ 0.0109 | 0.0001 ~ 0.0160 | 0.0001 ~ 0.0078 |

### 2.2 接触力学

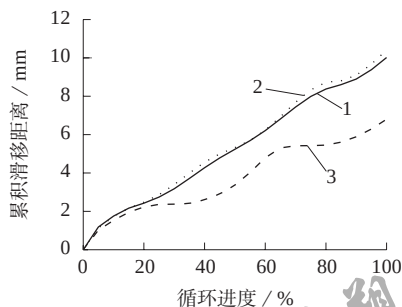
接触应力峰值和累积滑动距离的变化见图 6 和图 7。体内条件下的平均接触应力峰值相对较高为  $5.02 \text{ MPa}$ ,而 ISO 标准条件和 ISO 替代条件仅达到  $3.89 \text{ MPa}$  和  $4.66 \text{ MPa}$ 。在考虑累积滑动距时,

ISO 标准条件和 ISO 替代条件的结果相似,分别为 10.2 mm 和 10.4 mm。相比之下,体内模拟条件下的累计滑移距离较短 (6.8 mm)。



1—ISO 标准条件; 2—ISO 替代条件; 3—体内工况

图 6 不同工况下的峰值接触应力

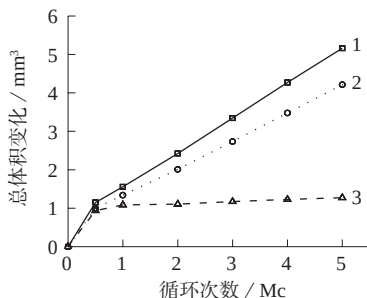


1—ISO 标准条件; 2—ISO 替代条件; 3—体内工况

图 7 不同工况下的累积滑动距离

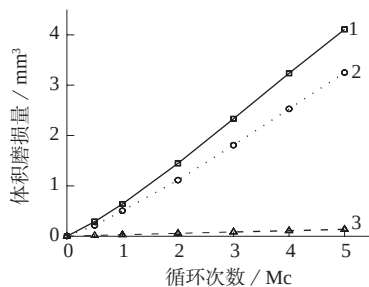
### 2.3 磨损行为

500 万磨损循环的 PE-UHMW 体积变化趋势如图 8 所示,其中“Mc”代表 100 万个循环。去除蠕变引起的体积变化后,获得了 PE-UHMW 摩擦副的体积磨损量,如图 9 所示。结果表明,体内磨损率比体外磨损率小一个数量级。此外,ISO 标准条件体外工况导致最高体积磨损率,为  $0.822 \text{ mm}^3/\text{Mc}$ ,相应的质量磨损率为  $0.768 \text{ mg}/\text{Mc}$ 。而 ISO 替代条件和体内工况的体积磨损率分别为  $0.650$ ,  $0.027 \text{ mm}^3/\text{Mc}$ ,质量磨损率分别为  $0.607 \text{ mg}/\text{Mc}$ ,  $0.025 \text{ mg}/\text{Mc}$ 。



1—ISO 标准条件; 2—ISO 替代条件; 3—体内工况

图 8 不同工况下的总体积变化



1—ISO 标准条件; 2—ISO 替代条件; 3—体内工况

图 9 不同工况下的体积磨损量

### 2.4 研究结果分析

研究基于 Archard 黏着 / 磨粒磨损公式预测了 PE-UHMW 颈椎 TDA 的磨损结果。采用“交叉剪切和接触压力相关的磨损系数”来对比研究不同的运行工况对磨损量的潜在影响。根据所获得的接触应力曲线和累计滑动距离,可知体外和体内工况将导致不同的磨损结果。500 万循环磨损仿真结果表明,ISO 标准条件比体内条件将产生更多的磨损。这一结果符合 PE-UHMW 的交叉剪切特性<sup>[16]</sup>。在交叉路径运行轨迹下 (即 ISO 标准条件和 ISO 替代条件), PE-UHMW 的磨损明显高于线性运行轨迹 (即体内弯曲伸展运动),这是由于前者出现了取向软化现象。

为了全面了解假体体内磨损状况,还应模拟其它类型的头部运动 (侧向弯曲和轴向旋转)。头部侧向弯曲和轴向旋转运动中,椎间盘呈现显著的耦合旋转运动<sup>[5]</sup>,这一运动学特征,可能会导致与“屈-伸运动”不同的磨损结果。另一方面, D. G. Cobian 等<sup>[17]</sup>指出,健康年轻人的头部运动比 ISO 18192-1 (2014) 所规定的年均运动次数 (每年  $1 \times 10^6$  次) 更频繁。实际年频率分别为屈伸  $1.06 \times 10^7$  次、侧弯  $8.5 \times 10^6$  次和轴向旋转  $5.6 \times 10^6$  次。为了更准确地预测颈椎 TDA 体内磨损,应当考虑这些事实。

研究也面临一定的局限性,所采用的磨损预测模型尚未经实验对比验证。目前, Discover<sup>®</sup> 的体外模拟机磨损评估正在进行中。此外,所采用的体内运行工况是通过多体动力学仿真间接获得。为提高准确性,后续可通过遥感植入式传感器直接实时测量患者关节载荷。

### 3 结论

对比分析了体外和体内工作条件对 Discover<sup>®</sup> 颈椎 TDA 摩擦学性能的影响。润滑机制未发现明显变化,边界润滑始终占主导地位。在磨损方面,体

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.
- (上接第 107 页)
- [23] 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.
- [24] 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.
- Yi Xiaosu, Du Shanyi, Zhang Litong, et al. Composite materials handbook[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2009.
- [25] 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.
- 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.
- [26] 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.
- 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.
- [27] 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.