

文章编号: 0253-9721(2008)12-0131-06

空间环境下柔性材料的老化性能研究现状

蔡光明¹, 于伟东^{2,3}

(1. 东华大学 纺织材料与技术实验室, 上海 201620; 2. 嘉兴学院 服装与艺术设计学院, 浙江 嘉兴 314001;
3. 东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要 空间环境是一个极为复杂的环境, 材料在空间环境下使用不可避免地受到环境中多重因素同时作用的影响, 材料的力学、物理、化学性质发生变化, 性能失效。要准确认识和评价材料在空间环境下的性能, 必须采取正确有效的表征和研究方法。介绍了空间环境的基本特征, 空间环境下材料老化性能表征的常用方法和装置, 柔性材料在热、光、真空原子氧单独及复合作用下的老化性能的研究现状及目前存在的主要问题, 同时还指出了空间环境复合作用下表征存在的主要问题, 为正确评价材料在空间环境下的性能提供参考。

关键词 柔性材料; 空间环境; 复合作用; 热老化; 光降解; 原子氧

中图分类号: V 250.3 文献标识码: A

Current status of research on flexible materials aging properties in space environment

CAI Guangming¹, YU Weidong^{2,3}

(1. *Textile Materials and Technology Laboratory, Donghua University, Shanghai 201620, China;*
2. *College of Garment & Art Design, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China*
3. *College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China*)

Abstract The space environment is an extremely complex one. The materials being applied in this environment are inevitably influenced by multiple factors simultaneously, the mechanical and physical chemical properties change, and some functions may lose. To know and evaluate the properties of materials in the space environment, we must adopt effective characterization and research methods. The scope of this presentation includes the basic characteristics, measurement methods and instruments for characterization of materials aging properties in the space environment, the domestic and foreign research status and existing problems of flexible materials aging properties under thermal, photo, vacuum, atomic and compound environments. Meanwhile, the main existing problems in characterization in the space environment are discussed. The study provides some guidance for evaluating the materials properties in space environment.

Key words flexible material; space environment; compound effect; thermal aging; photodegradation; atomic

空间环境是一个微重力、高真空、超高与超低温、强辐射和等离子体的环境。材料在这种环境下使用不可避免地会发生老化、降解, 导致材料力学、物理、化学性能的变化, 乃至失效^[1], 因此需要采取有效的研究方法评价材料在空间环境下的老化性能。空间环境下材料的老化性能研究一般采用空间飞行试验或地面模拟的方法^[2], 虽然飞行试验能够真正地测量材料在实际环境下的老化降解性能, 但

代价和风险大; 因此, 目前有关空间环境对材料性能影响的研究大多采用地面模拟试验。近年来已有越来越多的研究者采用不同的试验装置来模拟空间环境。如模拟真空原子氧环境^[1]、真空原子氧紫外装置^[3]、空间环境复合装置^[2]。利用这些装置和方法可研究材料在单独或复合环境下的性能、作用机制, 这为评价材料在空间环境下的性能, 选取优良的空间材料提供了有效的方法。

收稿日期: 2007-12-25 修回日期: 2008-07-18

作者简介: 蔡光明(1982—), 男, 博士生。研究方向为柔性材料的老化性能。于伟东, 通讯作者, E-mail: wdyu@dhu.edu.cn.

1 空间环境的特征

空间环境是高真空、超高与超低温、原子氧、等离子体、电磁、紫外光辐射,及含大量太空碎片的空间。

空间环境的真空度一般小于 1.33 mPa,高真空会引起材料的表面放气,使材料质量损失、尺寸变得不稳定、表面和内部构造发生改变,导致材料损伤^[4]。高真空中的强紫外线辐射对无保护层的聚合物有极强的破坏作用,会导致材料降解,表面形态、光学性能改变,光泽变差,力学性能逐渐降低。空间环境温度在 +200 ~ -180 ℃ 之间变化,这会引起材料的快速热老化和降解。低温会引起材料变脆而发生断裂。同时这种快速的热循环作用会使材料容易破坏、解体。空间环境中高活性的原子氧会严重危害聚合物材料,使其表面腐蚀,质量损失,发生降解,力学、热学、光学性质变化,材料表面化学成分改变。

2 柔性材料的空间老化性能研究方法

2.1 空间飞行暴露试验

空间暴露试验有很高的可信度与应用价值,但成本较高。20 世纪 80 年代以来,以美国 NASA(美国宇航局)为首的一些研究机构,先后利用航天飞机在低地球轨道环境中进行了多次空间暴露试验^[5-6]。主要有长期空间暴露试验和短期空间暴露试验 2 种。长期空间暴露试验包括 NASA 的 LDEF(长期暴露试验室)试验与 MEEP(和平环境效应有效载荷)试验。NASA 投放的 LDEF 进行了近地球轨道空间环境长期暴露试验。装置绕地球飞行了 69 个月,是迄今为止所进行的时间最长的空间暴露试验。研究人员分析了 LDEF 上各种试验材料,并建立了 LDEF 数据库和 LEO(轨道)环境效应数据库。RCC-1 试验是在“和平”号空间站外表面上完成的,对 300 多种材料共进行了 470 d 的环境暴露试验。俄罗斯与美国在 1996—1997 年联合完成了 MEEP 试验^[14]。NASA 利用航天飞机开展了 STS(亚特兰蒂斯)系列飞行试验,用以研究短期暴露时空间环境对航天器材料性能的影响。空间飞行试验能获得低地球轨道空间环境与航天器表面材料作用的真实数据,具有极高的参考价值,但由于其受到的限制条件多,周期长,费用高,且只能获得时间积分效应的数据,很难实时跟踪试验。

2.2 空间环境地面模拟试验

空间环境地面模拟试验目前较多的是在实验室进行空间复合环境的模拟。图 1^[2]所示为模拟真空、等离子体、紫外线辐射、热循环复合环境来表征复合环境对材料的作用,评价材料在复合环境作用下的各项性能。空间环境地面模拟方法的成本和风险较小,但仍与实际的空间环境有一定差距。

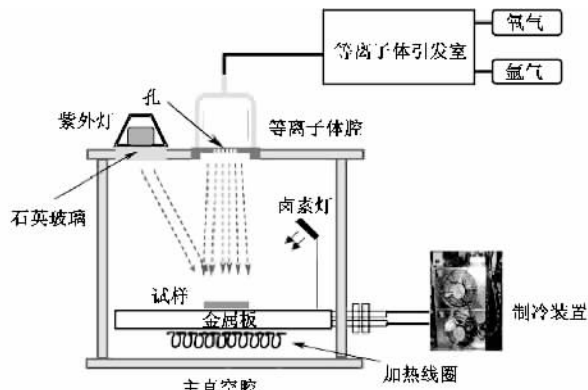


图 1 空间环境地面模拟装置

Fig.1 Schematic diagram of LEO space environment simulation facility

2.3 理论方法与数值模拟

在空间环境下材料同时受到原子氧、真空紫外线辐射、真空热循环、电磁辐射、空间碎片以及微流星体等空间环境的影响,通过飞行暴露试验所取得的数据通常不是由单一机制而是由几个机制产生的综合结果。地面模拟试验可以通过控制外界条件来达到取得单个机制与多种机制耦合的试验结果,但只能给出各种机制相互作用的定性规律。理论方法是采用建立各种模型来开展空间环境与材料相互作用的特性研究,国外工作者借助对试验结果的认识,建立了一批理论模型,为暴露试验或地面模拟试验提供理论依据。近来还有不少研究人员致力于采用数值模拟来研究空间环境与材料相互作用的机制,主要是利用 Monte Carlo 方法进行直接模拟^[7]。如航天器表面材料在空间和在地面模拟装置中的寿命是通过一系列转换因子相联系的,这些转换因子通常可以采用随机模拟方法(蒙特卡罗法)来确定^[8]。Banks 等^[9]推出了用地面模拟试验数据和数值模拟结果相结合计算双面保护的聚酰亚胺薄膜材料在空间原子氧基蚀下的质量损失公式。

$$M_s/F_s = (M_A/F_E)(Y_A/Y_S) \quad (1)$$

式中: M_s 为空间原子氧环境下材料单位面积的质量损失; F_s 为材料所承受的空间原子氧通量; M_A 为

地面模拟试验原子氧环境下材料单位面积的质量损失; F_E 为材料所承受的地面模拟试验有效原子氧通量; Y_A 、 Y_S 分别为数值模拟得到的无保护层聚酰亚胺在地面试验和空间环境下的厚度损失。需要指出,式中 Y_A 、 Y_S 应在同样的数值模拟原子氧通量下得到。

3 空间环境下老化性能表征及研究

材料在空间环境中受到光、热、真空、原子氧的复合作用,要表征材料在这些环境中的老化性能,对材料的性能进行预测,必须进行环境模拟和预测,限于复合表征的困难,目前较多的是利用单独表征来研究材料的老化性能。

3.1 光单独作用下的老化性能

表征材料在光单独作用下的性能一般采用自然光下老化试验和人工加速老化试验。目前主要利用碳弧灯、氙光灯来模拟太阳光进行光老化试验^[10],也有利用紫外灯、紫外老化仪来进行加速老化试验^[11],对材料进行一定时间的照射以评价材料的耐光老化性能。常用的表征指标有材料的断裂强度、断裂伸长、模量、材料成分、表面结构、形态等。

加拿大的 Day M 利用 Atlas xenon-arc Weather-Ometer (Model 600-WR) 来模拟日光照射 Nomex 织物,发现 Nomex 物理性能的退化是由于发生了光化学反应,主要是光氧化改变了聚合物的化学组成,首先是纤维表面然后随着进程深入内部^[12]; J R Brown 进行了 Kevlar49 织物和纱线的户外日光老化试验,结果发现未经织造的纱线断裂强度保持率高于在织物中经过同样照射的纱线的强度保持率^[13]; 据加拿大的 LJ Malvar 介绍,芳纶很容易受到紫外线破坏,薄的 Kevlar29 织物在佛罗里达(Florida)日光下照射 5 周后会损失 49% 的强力,即使是复合材料,也会遭受压缩、剪切等方面的影响^[14]; 美国国家航空和宇宙航行局的 M A Said 研究了 Kevlar49、Zylon、Vectran 和 Spectra 4 种纤维的耐紫外光性能,研究发现暴露紫外光一段时间后 Kevlar49、Zylon、Vectran 纤维的强力有下降趋势,而 Spectra 纤维变化较小,可能是 Spectra 纤维在暴露过程中发生了交联。暴露 72 h 后 Zylon 纤维的强力低于 Spectra 和 Kevlar49 纤维,暴露 144 h 后 Vectran 纤维的损失最大达到 86%^[15]。

刘晓艳研究了 Kevlar、Twaron 2000、Terlon、PBO、Kermel、UHMW-PE 纤维的耐光性能。发现 UHMW-PE 纤维的耐光性最好,Kermel 纤维在日晒条件下力

学性能下降最快,经碳弧灯照射 160 h 后纤维出现力学性能退化和变脆的特征^[10]; 天津工业大学黄故研究发现经紫外线照射 40 h 后玻璃纤维的强力下降 50%^[16]。

以上主要是利用模拟光加速老化装置研究在长时间光照作用下材料力学性能的衰减情况,尽管这些方法和研究可以评价材料的耐光性能,但与太空中光与材料作用仍有差异。太空是一个复合环境,其他因素也有一定的影响,如温度、其他辐射、外力作用等。为与空间环境更加接近,应该研究材料在一定温度、辐射或力作用下的耐光性,这样才能更准确评价材料在空间环境下的耐光性能。

3.2 热单独作用下的老化性能

对材料在热作用下的表征一般涉及 2 方面:一是在热作用下,由材料结构特征的变化而引起的性能的裂化及内部组分结构的变化;二是在热或热氧作用下分子的降解或材料失重的测量。第 2 方面的测量已有较为专业的仪器,如:热重分析仪(TG)、热力学分析仪(TMA)、差热分析仪(DTA)、差式扫描量热法(DSC),或利用热处理装置如烘箱、马弗炉、热老化仪等对材料进行热处理。常用的表征指标有材料的热分解温度、玻璃化温度、动态损耗性能以及材料的力学性能(断裂强度、断裂伸长、模量)、成分、表面结构、形态的变化。

澳大利亚国防科学技术组织利用差热分析法、热重分析法和热力学分析对 Kevlar49 和 Nomex 的耐高温性进行评价,发现其在 440 °C 附近发生热降解^[17]。他们又利用 ESR 研究了 Kevlar49 纤维在 350 ~ 550 °C 范围内的热降解^[18]。西班牙的 K Tamargo-Martínez 等研究了在室温到 1 123 K 时 PBO 纤维的热分解性能,当温度低于 933 K 时,纤维的结构没有变化,热分解主要发生在 973 ~ 993 K^[19]。Gozde Genc 等研究了 Kevlar/PBI (40/60)、Kevlar/Nomex(60/40)等织物的热学性能。DTG 曲线显示,Kevlar/PBI 织物有最高的热稳定性,热降解发生在 550 °C 以上,Kevlar/Nomex 混纺织物热降解发生在 395 °C 以上^[20]。

赵稼祥等对 Kevlar 织物的热重分析数值显示,100 °C 时热失重 1.8%,300 °C 时为 4.0%,500 °C 时为 6.0%,580 °C 时为 100%。热重分析表明 Kevlar 的热分解温度为 538 °C,失重 50% 的温度为 555 °C,达到最大失重速率时的温度为 550 °C。DSC 曲线表明,一直到 600 K, Kevlar 布都没有吸热峰与放热峰出现^[21]。刘晓艳研究了 Kevlar、Twaron 2000、Terlon、

PBO、Kermel、UHMW-PE 纤维的耐热性能。研究表明 PBO 纤维的耐高温力学性能最好,其次是 Terlon 纤维,然后是 Kevlar 和 Kermel 纤维,最后是 UHMW-PE 纤维^[22-23]。叶健青等研究了芳砜纶的热稳定性,发现其分解温度为 420 ℃。500 ℃时质量损失率为 24.17%,600 ℃时损失率为 44.38%,700 ℃时为 74.68%^[24]。

目前的研究主要集中在讨论材料的热降解、老化温度及热处理后材料的力学性能,这些方法虽然可以评价材料的耐热性能,但与材料实际使用环境有一定的差异,而有关其他环境复合作用下材料的热老化性能,如光热复合作用以及材料在受外力作用下的热老化性能方面的研究较少。空间环境中温度是变化的,有高温、低温作用,同时还有光、辐射的作用和外力作用等,因此以后的研究重点是考虑复合环境下材料的热老化性能。

3.3 原子氧作用下的老化性能

在真空、原子氧环境下主要研究材料的挥发性和耐老化性能。实验室模拟主要采用气体放电。目前,能产生原子氧束的设备可以分为以下 5 类^[25]。1)热等离子体源。使用射频、直流和微波源产生等离子体炬加热惰性气体,产生的高温惰性气体分解充入的氧气,形成氧原子和氧分子的混合流;2)低温等离子体源。通过高频放电、微波放电、热灯丝源和冷阴极源等将 O₂ 分解为 AO, O⁺, O⁺ 和电子;3)离子束。通过电子轰击或射频激发产生氧离子束,然后通过静电加速及其他技术使离子中性化;4)电子束。通过用电子束从金属氧化物表面除去氧原子而产生适当能量的原子氧束;5)激光加热分解原子氧束源。用脉冲式或连续式的激光产生高温高压等离子体,然后通过自由喷口或超音速喷嘴膨胀以产生高速中性束。常用表征的指标主要有材料的质量损失率、力学性能(断裂强度、断裂伸长、模量)、材料组成成分、表面结构、表面形态等。

Nakamura、Takashi 研究了在一定拉力作用下暴露在原子氧、紫外线辐射环境中的 PEEK 膜的表面破坏^[26]; Lipika Ghosh 模拟太空环境研究了高模量芳纶纤维在原子氧环境中的性能,暴露在 1.1×10^{21} atoms/cm² 原子氧下,芳纶纤维的强力和模量下降为原始的 65% 和 53%, XPS 和 SEM 显示纤维表面被氧化,变得粗糙^[27]。

上述方法和研究尽管可以模拟原子氧的作用,但与实际的太空环境仍有一定的差别,应该尽可能地考虑光、热等其他环境的综合影响,只有这样表征

才会更加准确。

3.4 光热复合作用下的老化性能

对光热复合作用下柔性材料老化性能表征的研究相对较少,目前仅有用先光再热或先热再光来进行复合,而直接光热复合鲜见报道。已有的发明专利“一种柔性材料弯曲疲劳中的多功能测量方法及装置”,可用于测量光热单独复合作用下柔性材料的疲劳性能^[28],以及发明专利“一种用于显微镜上的微测量方法、装置及用途”,可以用于测量挟持试样施加拉伸、压缩、扭转和动态交变应力或应变等力作用,并同步施加热、电、光或磁等作用时的材料的光学特性和力学行为^[29],但这些测量装置目前还处于模型化阶段。

Joyce A Dever 研究 SiO₂ 涂层 Kapton 材料在真空紫外和热循环复合作用下的性能,发现复合作用下 SiO₂ 涂层 Kapton 的太阳光吸收指数有轻微的增加^[30];刘晓艳研究了 Kevlar、Kermel、PBO 纤维在光照后再在不同温度下处理 1.5 h 后力学性能的变化,发现 2 种条件复合后纤维损伤剧烈^[10]。

有关材料在光热复合作用下的力学行为,光热复合作用的老化机制等方面仍存在很大的不足,而材料在实际使用过程中光热往往是同时存在的,环境的温度也经常发生变化,因此在以后的研究中应着重研究材料在光热复合作用下的性能。

3.5 紫外线和原子氧作用下的老化性能

一些学者利用真空紫外线和原子氧复合作用的模拟装置,来模拟空间环境中的紫外线、原子氧环境,以表征材料在此复合环境下的性能。图 2^[3]所示为模拟原子氧、紫外线辐射复合环境作用,来研究复合环境对材料的作用以及它们之间的相互影响,评价复合环境下材料的性能。哈尔滨工业大学、北京航空航天大学流体力学研究所等研究机构都有原子氧效应地面模拟设备,可用于原子氧效应、紫外线

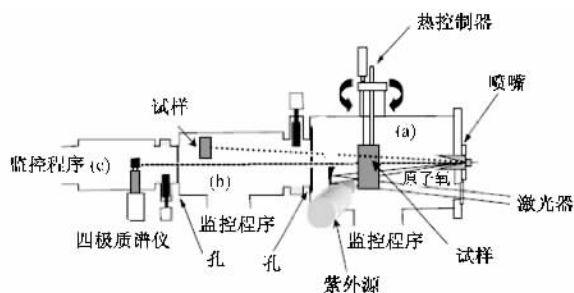


图 2 紫外线和原子氧复合作用的模拟装置

Fig.2 Simulation facility of ultraviolet atomic compound effect

辐射效应、温度效应以及它们之间协同作用的研究。

J S Forsythe 等研究了在地面模拟真空紫外线、原子氧分别和共同作用条件下含氟聚酰亚胺膜表面发生的变化^[31]。结果表明:表面发生了氧化,紫外线单独作用效果并不明显,而原子氧单独作用效果明显;原子氧和紫外线有协同作用,但原子氧单独作用与原子氧、紫外线共同作用的表面生成物不同。Lipika Ghosh 研究了原子氧和真空紫外线辐射对高模量芳纶纤维力学性能的影响。在单独紫外线辐射下纤维模量和强度下降很少,在原子氧作用下纤维的模量和强度有明显下降,二者同时作用下下降更大,原子氧单独作用纤维表面变粗糙,同时作用纤维表面粗糙程度更大^[3]。

3.6 空间复合环境下的老化性能

目前,对于材料在苛刻或特殊环境中的稳定特征与行为大都是通过单一条件下的作用或常规条件下的试验来估计与分析,但材料在实际使用环境下的作用比试验、甚至想象的要复杂得多,往往是多重环境的复合作用,如光热复合作用,真空、原子氧、紫外线的复合作用。同时这些环境因素之间可能存在相互影响及交互和耦合作用,因此单一环境的模拟不能有效地表征材料在复合环境下的性能。针对这些复合环境,应该综合、平衡地考虑各环境的影响,只有这样才能评价材料在空间环境下的性能。

针对太空特殊环境用材料,K T Kem 等模拟太空环境,研究了电场、热循环、电辐射、氧原子等作用聚酰亚胺及其复合材料的力学、热力学性能变化^[32]。华盛顿的国防航空部对近地轨道环境(原子氧、紫外线辐射、热循环、高真空、流星体和太空碎片以及微粒辐射)下的有机复合材料和涂层进行了研究^[33]。印度南方纺织研究中心对热辐射、子弹辐射、化学、机械、电以及极冷环境和微生物、核辐射等恶劣环境作用下的防护服进行了系统研究^[34]。Joo-Huun Han 等利用地面模拟装置研究了高真空、等离子体、热循环、紫外辐射对复合材料的质量损失、强力、表面形态等性能的影响^[2]。E Grossman 等研究了真空、原子氧、紫外线辐射复合环境单独作用和复合作用对含氟聚合物、硅树脂、聚合物基复合材料性能的影响^[4]。Masahito 等^[35]把聚酰亚胺暴露在紫外线和原子氧环境时发现,AO 单独作用时样品质量增加,只有紫外线辐射时质量减少,而当紫外线和 AO 协同作用时检测到的质损结果与在 LEO 环境下测试的试验结果几乎相同,这也证实了紫外线和原子氧协同作用的存在,但大多实质性的研究结果因技

术保密的原因还很少报道。

目前对材料在复合环境中的性能评价较多的还是利用单独作用来进行,对真实环境的模拟或直接试验较为欠缺。然而材料在实际使用环境中的特征和行为表现与稳定性的表征是材料筛选、设计及性能估计的基础,只有对材料在复合作用下的性能有较为准确的认识,才能准确地设计复合环境下的防护材料,因此应该模拟极端或复合环境,进行超高、低温性能试验,光、热、真空、原子氧试验和复合环境试验以及在此条件下材料的力学、热学、光学稳定性试验,准确评价和预报材料的失效行为。

4 结 语

空间环境是一个极为复杂的环境,材料要想在空间环境中能够长时间使用且性能不发生变化,必须具有优良的性能,为此要求对在空间环境作用下的材料性能有较为全面的认识。目前对空间环境下材料性能评价的相关研究较多地集中在光、热、真空原子氧单独作用下的性能,对空间环境常用材料性能的综合评价以及各环境条件之间的相互影响的研究相对较少,缺少很好的空间环境复合作用的表征方法,而材料在实际使用过程中往往是多因素的协同作用,对材料的损伤是致命的。

因此应该尽可能认识和解决环境复合作用和交互作用,本质性的认识复合作用加速老化或失效机制、材料在复合作用下的力学行为和老化机制,应该尽可能地建立与实际环境一致的复合环境或同步作用模拟装置,以提供材料在复合环境下准确、客观的表征方法。

FZXB

参考文献:

- [1] Joyce A Dever, Anthony J Pietromica. Simulated space vacuum ultraviolet(VUV) exposure testing for polymer Films [EB/OL]. [2007 - 12 - 25]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020039136_200205884-0.pdf.
- [2] Han Joo Hyun, Kim Chun Gon. Low earth orbit space environment simulation and its effects on graphite/epoxy composites [J]. Composite Structures, 2006, 72(2): 218 - 226.
- [3] Lipika Ghosh, Mohammad Harris Fadhilah, Hiroshi Kinoshita. Synergistic effect of hyperthermal atomic oxygen beam and vacuum ultraviolet radiation exposures on the mechanical degradation of high-modulus aramid fibers [J]. Polymer, 2006, 47(19): 6836 - 6842.

- [4] Grossman E, Gouzman I. Space environment effects on polymers in low earth orbit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, 208(8): 48 - 57.
- [5] Whiteside J B, Rooney W D. Effects of 69 months in low earth orbit on Kapton Antenna structures[J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 1994, 31(5): 860 - 865.
- [6] 房光强. 空间充气结构材料的热循环与真空紫外辐照效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] Banks B A, Stueber T J, Norris M J. Monte carlo computational modeling of the energy dependence of atomic oxygen undercutting of protected polymers[J]. Protection of Space Material from the Space Environment, 1998, 4(8): 1 - 14.
- [8] 蔡国飙, 祝成民, 孙冰. 原子氧对航天器表面材料作用的数值模拟[J]. 北京航天航空大学学报, 1999, 25(2): 244 - 248.
- [9] Banks B A, de Groh K K. Monte Carlo modeling of atomic oxygen attack of polymers with protective coating on LDEF[C]//The 2nd LDEF Post-Retrieval Symposium. San Diego: [s. n.], 1992.
- [10] 刘晓艳. 柔性高性能纤维光热稳定性研究[D]. 上海: 东华大学, 2005.
- [11] 班燕. TiO₂ 纳米溶胶的制备及其在缓解芳纶纤维紫外光老化中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2005.
- [12] Day M, Wiles D M. Effect of light on the flammability of Nomex fabric[J]. Textile Research Journal, 1974, 44 (11): 887 - 891.
- [13] Brown J R, Browne N M, Burchill P J, et al. Photochemical ageing of Kevlar 49[J]. Textile Research Journal, 1983, 53 (4): 214 - 219.
- [14] Malvar L J. Durability of composites in reinforced concrete[C]//CDCC' 98-First International Conference on Durability of Composites for Construction Sherbrooke (Quebec). Canada: [s. n.], 1998.
- [15] Said M A, Brenda Dingwall, Gupta A, et al. Investigation of ultraviolet (UV) resistance for high strength fibers [J]. Advances in Space Research, 2006, 37(1): 2052 - 2058.
- [16] 黄故. 玻璃纤维在特殊条件下的强度分析[J]. 纺织学报, 2006, 27(8): 4 - 67.
- [17] Brown J R, Ennis B C. Thermal analysis of Nomex and Kevlar fibers[J]. Textile Research Journal, 1977, 47(1): 62 - 66.
- [18] Brown J R, Hodgeman D K C. An e. s. r study of the thermal degradation of Kevlar 49 aramid [J]. Polymer, 1982, 23(3): 365 - 368.
- [19] Tamargo-Martínez K, Villar-Rodi S, Paredes J I, et al. Thermal decomposition of poly(p-phenylenebenzobisoxazole) fibres: monitoring the chemical and nanostructural changes by Raman spectroscopy and scanning probe microscopy[J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 86(2): 263 - 268.
- [20] Genc, Gozde Alp, Burcu, et al. Moisture sorption and thermal characteristics of polyaramide blend fabrics[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 102(1): 29 - 38.
- [21] 赵稼祥. 美国 Kevlar 布性能测试分析[J]. 纤维复合材料, 1994, 11(2): 32 - 39.
- [22] Liu Xiaoyan, Yu Weidong. Evaluation the thermal stability of high performance fibers by TGA [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99(3): 937 - 944.
- [23] Liu Xiaoyan, Yu Weidong. Evaluation of the tensile properties and the thermal stability of ultra-high molecular weight polyethylene fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 15(16): 18 - 19.
- [24] 叶健青, 张玉华, 任加荣, 等. 芳纶纶的热稳定性分析[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2005, 31(2): 14 - 16.
- [25] 尚海波. Kapton 薄膜及防护膜的原子氧侵蚀行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [26] Takashi Nakamura, Hiroshi Nakamura, Osamu Fujita, et al. The space exposure experiment of PEEK sheets under tensile stress [J]. JSME International Journal, 2004, 47(3): 365 - 370.
- [27] Lipika Ghosh, Hiroshi Kinoshita, Nobuo Ohmae. Degradation on a mechanical property of high-modulus aramid fiber due to hyperthermal atomic oxygen beam exposures [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(7/8): 1611 - 1616.
- [28] 于伟东, 刘晓艳. 一种柔性材料弯曲疲劳中的多功能测量方法及装置: 中国, 200410067529. 1[P]. 2005 - 05 - 11.
- [29] 于伟东, 刘晓艳. 一种用于显微镜上的微测量方法、装置及用途: 中国, 200510029966. 9[P]. 2006 - 03 - 1.
- [30] Joyce A, Dever Eric J. Synergistic effects of ultraviolet radiation, thermal cycling and atomic oxygen on altered and coated kapton surfaces [EB/OL]. [2007 - 12 - 25]. http://www.osti.gov/evergyecitations/product_biblio.jsp?osti_id=5422647.
- [31] Forsythe J S, George G A. The surface properties of fluorinated polyimides exposed to VUV and atomic oxygen [EB/OL]. [2007 - 12 - 25]. http://www.chem.eric.org/research/tech/periodicals/vol_view.php?seq=103538.
- [32] Kern K T, Stanch P C. Simulated space environmental effects on a polyetherimide and its carbon fiber reinforced composites[J]. Sampe Journal, 1993, 29(3): 2944.
- [33] George P E, Dursch H W. Low earth orbit effects on organic composites flown on the longduration exposure facility[J]. Journal of Advanced Materials, 1994(4): 1019.
- [34] Chandramohan Q, Chellamani K P. Protective textiles[J]. Colourage, 2000(9): 4154.
- [35] Masahito J A. Low earth orbital atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on polymers[EB/OL]. [2007 - 12 - 25]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19910009981_1991009981.pdf.