

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.01.020

大剂量紫外光辐照下改性 PE-HD 浮体材料的老化性能

何晓蕾,张茂婷,周峰,张跃文,饶伟锋

(南京信息工程大学材料物理系,南京 210044)

摘要:根据历年来的气象观测数据,分析了作为国家光伏领跑者基地的山东、江苏、安徽等区域的紫外光辐射量,以此评估经过25年户外应用的高密度聚乙烯(PE-HD)浮体材料需要承受的紫外辐射总量;开发了一种能抗大剂量紫外辐射的改性PE-HD浮体材料,通过人工加速老化试验研究了其大剂量紫外辐射后的关键性能变化;并对比市场上的部分浮体材料,指出了针对PE-HD改性设立相关标准的必要性。

关键词:大剂量;紫外辐照;改性高密度聚乙烯;漂浮式光伏电站;浮体材料

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)01-0084-05

Ageing Properties of Modified PE-HD for High Dose UV Radiation in Floating Materials

He Xiaolei, Zhang Maoting, Zhou Feng, Zhang Yuewen, Rao Weifeng

(Department of Materials Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the scattered records of the energies of sunlight over years, the total amount of UV radiation over 25 years in Shandong, Jiangsu and Anhui for the evaluation of the performance of floating materials was estimated. A modified high-density polyethylene (PE-HD) material with a potentially good capability against the UV radiation was developed. Some important properties of such materials after a high dose of exposure are examined by the artificially accelerated ageing test. It is suggested by the comparison of floating materials available in the market that establishing standards for regulating the development of new floating materials is very necessary.

Keywords: high dose; UV Radiation; modified high density polyethylene; floating solar power station; floating materials

近年来,我国光伏产业取得飞速发展,但是其进一步发展受限于有限的土地资源。将光伏组件架设在水面漂浮式基台上的漂浮式光伏电站是近几年提出的电站建设新方式之一。这种新型电站避免了土地资源占用的问题,在国家光伏“领跑者计划”等新能源政策大力推动下^[1],正在迅猛地发展。

漂浮式电站首先发展并应用于欧美日等发达国家^[2]。2007年,美国率先在加州安装了400 kW的漂浮式太阳能阵列^[3];英国于2016年建成6.3 MW的漂浮太阳能农场,可向1800户家庭供电;日本是目前漂浮电站应用最多的国家,并计划于2018年建成世界最大的水上光伏电站(3330 MW)^[2];新加坡、韩国、菲律宾和巴西等国家也均有漂浮电站建

成或在建。虽然我国在2015年建成的首座漂浮电站仅为8 MW,但是规划到2018年将在两淮地区建设的总容量达到3200 MW。

水面漂浮光伏电站是近几年大力发展的一种新型发电方式,其中由于漂浮平台要求达到25年的使用寿命,对浮体材料的长期紫外稳定性能提出了很高的要求。漂浮电站一般采用“浮体+光伏组件”的形式,其中浮体(漂浮平台)需要在水汽、盐雾和大温差变化的环境中长期工作(设计寿命25年)。因此,浮体材料要求具有良好的耐候性能,特别是在长期的紫外辐射下,能够保证可靠的力学性能。高密度聚乙烯(PE-HD)本身具有足够的韧性、强度、耐腐蚀性及耐湿性,是最具潜力的浮体材料。但

基金项目:国家自然科学基金项目(11474167),江苏省特聘教授项目,江苏省“六大人才高峰”创新团队项目

通讯作者: 饶伟锋,教授,从事耐候材料等方面的研究 E-mail: 497280513@qq.com

收稿日期: 2017-11-19

引用格式: 何晓蕾,张茂婷,周峰,等. 大剂量紫外光辐照下改性PE-HD浮体材料的老化性能[J]. 工程塑料应用,2017,46(1):84-88,109.

He Xiaolei, Zhang Maoting, Zhou Feng, et al. Ageing properties of modified PE-HD for high dose UV radiation in floating materials[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 46(1):84-88, 109.

PE-HD 在长期紫外辐射下相关性能会显著下降。J. Tireau 等^[4]研究表明, $0.25 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 的紫外辐射量就会导致 PE 材料发生严重脆化; S. A. Jabarin 等^[5]将 PE-HD 暴露在环境中 6 个月,发现材料的延展性显著降低; 吴石山等^[6]研究了不同紫外光强辐照对 PE-HD 的结构和性能的影响,结果表明, PE-HD 分子链上的 C=O 基团随紫外光强提高而增加; 蒋秀亭^[7]选用不同的紫外辐照光源对 PE-HD 土工膜进行试验,证实 PE-HD 均发生交联及降解。

然而,这些工作主要集中在研究材料的光老化机理和性能变化,未能正确评估和模拟材料在 25 年的服役周期内的紫外老化,采用的辐射量仅为真实辐射量的 5% 甚至更少。因此,对电站服役中的紫外辐照总量进行评估,并建立相关加速试验对改性 PE-HD 材料进行试验验证是一项重要的任务。笔者根据近 20 年,在我国境内紫外辐射的历史观测数据,分析典型气候下的紫外光辐射情况,在此基础上对改性和未改性 PE-HD 材料进行人工加速老化对比试验,验证所获得的改性 PE-HD 浮体材料能否满足 25 年长期服役要求。

1 紫外辐射剂量的评估

太阳光中 $290 \sim 400 \text{ nm}$ 波段的紫外光能够穿过大气层到达地面。虽然纯 PE 不含吸收紫外光的基团,但 PE-HD 中的催化剂残渣、助剂、氢过氧化物、羰基化合物等杂质会吸收 $290 \sim 360 \text{ nm}$ 的紫外光^[8]。漂浮电站一般选在太阳能资源丰富的水域,其中,华东地区日照充足、水资源丰富、极端天气较少,是建设漂浮式光伏电站的优选地区。根据太阳辐射量的空间分布,我国太阳能资源分布区域大致分为 5 类^[9],其中山东、江苏和安徽被划为三类或四类地区,太阳年辐射量为 $1\,163 \sim 1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。根据胡波^[10]对我国大部分区域的地面紫外辐射与太阳辐射比值的研究,三四类地区的紫外辐射占比约为 4%。取三四类地区的太阳能辐射上限 $1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,则 25 年的紫外光辐射上限为 $4\% \times 1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \times 25 = 1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。此外,祝青林等^[11]统计了我国 29 个生态站的年度紫外辐射等数据,分析了我国区域内 2002 年的紫外辐射空间分布特征,获得全国平均年度紫外辐射总量为 $35.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,25 年的紫外辐射量为 $887.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。因此,具体地区的紫外辐照情况应详细分析。

针对山东省的情况,山义昌^[12]、邹俊丽^[13]、孙翠凤等^[14]分别研究了潍坊、泰安、菏泽区域的紫外

辐射情况,山东典型城市的紫外辐射强度曲线如图 1 所示。从图 1 可见,3 个地区的辐射强度及季节变化规律大致相同。但是由于太阳高度角、日照时数和云量等因素的不同,3 个地区的紫外辐射量存在差异。潍坊^[12]、泰安^[13]、菏泽^[14]的平均紫外辐射强度分别为 $17.72, 17.50, 15.70 \text{ W}/\text{m}^2$,年日照时数^[15]分别为 $2\,536, 2\,535, 2\,390 \text{ h}$,则 25 年紫外辐射量分别为 $1\,123.5, 1\,110, 938 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。因此,笔者认为三类地区的山东省 25 年的紫外辐射量为 $900 \sim 1\,150 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。

对于江苏省和安徽省,其东北部毗邻三类区域,西南部毗邻四类区域,太阳总辐射均呈现由东北向西南递减的趋势^[16]。沈义^[17]认为江苏和安徽的太阳能辐射强度介于上海和山东区域之间,紫外辐射强度也应如此。结合上海地区 1998 年 8 月到 1999 年 7 月的观测数据^[18],笔者认为苏皖两地 25 年的紫外辐射量约为 $800 \sim 1\,100 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。

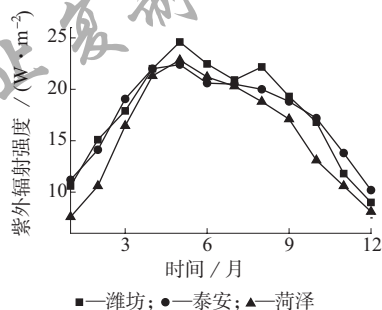


图 1 山东典型城市的紫外辐射强度曲线

因此,可认为我国三四类区域的 25 年紫外辐射总量为 $800 \sim 1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。考虑气候变化、光波反射增强效应等诸多因素,漂浮平台实际接收的紫外辐射总量可能与该数值存在一定偏差。为确保浮体安全使用 25 年,在人工加速紫外老化的评估试验中,建议总紫外辐射剂量采用上述范围的上限为 $1\,625 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。

2 大剂量紫外老化试验

在空气环境中,PE-HD 吸收紫外光的能量后会使其分子链发生断裂或处于激发态,继而生成氢过氧化物和羰基等自由基;氢过氧化物会发生光裂解、羰基发生 Norrish I 型和 Norrish II 型光氧化反应,且羰基化合物的作用占主导。材料的分子链断裂,导致其性能劣变,最终丧失其使用价值^[19-20]。

为提高 PE-HD 的长期紫外稳定性,通常是在 PE-HD 中添加紫外光吸收剂、光屏蔽剂、猝灭剂或自由基捕获剂(主要为受阻胺类)等光稳定剂。其

中,紫外光吸收剂、光屏蔽剂和猝灭剂是通过不同形式转移光能而达到保护材料的目的;而自由基捕获剂是通过分解和清除自由基来提高材料的抗光老化特性^[21]。受阻胺类光稳定剂具有更高的猝灭效率,其在有氧状态转变为氮氧自由基后,可分解氢过氧化物、捕获自由基,使材料达到优秀的光稳定性^[22]。受阻胺类稳定剂具有优异的再生能力、优良的热稳定性以及与树脂间良好的相容性等优点^[23],特别是与紫外光吸收剂、抗氧剂、屏蔽剂协调作用时,可显著提高光稳定剂的应用价值^[22]。因此,笔者采用几种光稳定剂的复配来对 PE-HD 进行改性。

2.1 原材料

PE-HD: 牌号为 B1054, MFR 为 9 g/10 min (190℃, 10 kg), 沙特基础工业公司;

样品 A, 样品 B, 样品 C: 均为浮体材料, 市售;

光稳定剂: 受阻胺类 HALS-25, 熔点大于 125℃, 市售;

光吸收剂: UV-MC 唑类, 熔点大于 130℃, 市售;

光屏蔽剂: 金红石型 TiO₂, 平均粒径为 220 nm, 市售;

抗氧剂: 1010/168 复配体系, 市售。

2.2 仪器与设备

同向双螺杆挤出机: SHJ-36 型, 南京杰恩特机电有限公司;

注塑机: LSF-98 型, 常州市龙盛机械有限公司;

紫外老化试验箱: UV500 型, 上海钟越实业有限公司;

拉伸试验机: 3367 型, 英斯特朗公司;

悬臂梁冲击试验机: ZBC1400-B 型, 美特斯工业系统有限公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: Nicolet 6700 型, 美国 Thermo Fisher 科技公司。

2.3 试样制备

将 PE-HD、受阻胺类光稳定剂、唑类紫外光吸收剂、光屏蔽剂、主/辅抗氧剂通过双螺杆挤出机进行熔融挤出造粒, 获得长效抗紫外母料; 然后将其与 PE-HD 按质量比为 1:10 混合后, 在高速混合机中均匀配混; 配混物经双螺杆挤出机熔融挤出造粒, 得到改性 PE-HD 粒料。

2.4 性能测试

将未改性和改性 PE-HD 粒料经过注塑成型制成标准试样, 在 23℃ 恒温冷却干燥后进行老化试验。试验以紫外辐照剂量 1 625 kW·h/m² 为参考,

模拟浮体材料的长期老化过程, 分别考虑了 (I) 在相同的紫外辐射条件下改性和未改性 PE-HD 材料的性能差异, 以考察光稳定剂的改性效果; (II) 模拟 25 年紫外辐射量对改性 PE-HD 材料性能的影响, 评估其大剂量紫外老化的效应; (III) 对市场上的部分浮体材料进行对比试验, 研究浮体材料的市场现状。

根据 GB/T 16422.3-2014, 将未改性和改性 PE-HD 试样分别放置在紫外光老化箱内接受强紫外光辐射, 间隔一定时间取样进行 FTIR 谱图、力学等性能测试。试验中, 光源采用 UVA340 型紫外灯, 其光强为 6.7 W/m²@340 nm, 紫外宽波段为 290~400 nm, 辐射强度为 800 W/m², 黑板温度为 (60±3)℃。试验分两组进行, 采用的最大紫外辐射剂量分别为 1 126.4 kW·h/m² 和 1 840 kW·h/m²。

3 结果与讨论

3.1 紫外辐射剂量下未改性和改性 PE-HD 的 FTIR 分析

不同剂量紫外辐射下未改性和改性 PE-HD 的 FTIR 谱图如图 2 所示。由图 2 可见, 两种 PE-HD 均在 1460, 730 cm⁻¹ 和 720 cm⁻¹ 处有很强的吸收峰, 随着辐射剂量的增加, 改性 PE-HD 经过 1 840 kW·h/m² 的紫外辐照后才在 1720 cm⁻¹ 附近出现了羰基的特征吸收峰。由 PE-HD 光降解机理可知, 光氧老化的初级阶段产生羰基基团, 羰基吸收紫外光后进一步发生 Norrish I 型和 Norrish II 降解反应, 进而加剧材料的老化反应。然而, 改性 PE-HD 在大剂量紫外辐射后才出现羰基特征峰, 说明其具有良好的抗紫外老化特性。

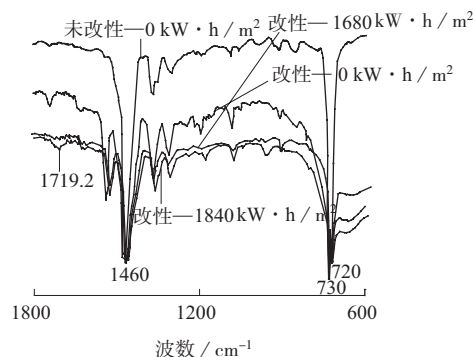


图2 不同紫外辐射剂量下未改性和改性 PE-HD 的 FTIR 谱图

3.2 紫外辐射剂量对未改性和改性 PE-HD 的力学性能影响

紫外辐射剂量对未改性和改性 PE-HD 的力学性能保持率如图 3 所示。图 3 中 a, c, e 线段分别是未改性 PE-HD 的力学性能和辐射剂量的关系。

在老化初期,材料的拉伸强度、断裂伸长率小幅度增加,此时分子结构紧密,氧难以渗透到样品内部,分子间的轻微交联导致分子量的增大和分子链柔性的增加^[24],使材料的力学性能略微上升;当辐射剂量达到 $1\,126.4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 时,材料的拉伸强度保持率下降约 40%,材料的断裂伸长率保持率仅剩 5% 以下,冲击强度仅为初始值的 10%,此时,光降解反应占主导,光敏点越来越多,使得分子链断裂,分子量变小,致使材料的力学性能均不断降低。图 3 中, b, d, f 线段分别是改性 PE-HD 的力学性能和辐射剂量的关系。老化初期,光稳定剂捕获烷基自由基或烷氧自由基生成化合物,其部分交联反应受到了抑制,致使材料的结晶度增加,因此拉伸强度小幅度增加、断裂伸长率降低;当辐射剂量达到 $1\,126.4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 时,材料的拉伸强度保持率仅下降了 4%,断裂伸长率保持率增加到 120%,冲击强度约为初始值的 92.9%,此时,光稳定剂中的受阻胺类化合物、紫外光吸收剂、光屏蔽剂、抗氧剂协调发生作用,有效抑制了材料的光氧老化反应,同时还延缓了交联反应和降解反应,致使改性 PE-HD 材料的拉伸强度、断裂伸长率、冲击强度基本不变,甚至稍有提高。因此,在大剂量紫外辐照 ($1\,126.4\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) 下,未改性的 PE-HD 老化为脆性材料,而改性 PE-HD 的力学性能基本不变甚至略有提高,说明光稳定剂可有效改善紫外辐射下 PE-HD 材料的交联和降解过程,提高其抗紫外光性能。

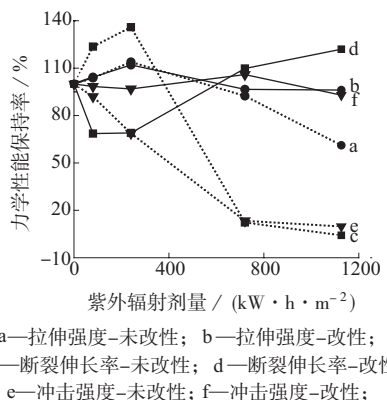


图3 紫外辐射剂量对未改性和改性 PE-HD 力学性能的影响

3.3 大剂量紫外辐射对改性 PE-HD 的力学性能的影响

试验模拟了 25 年紫外辐射剂量对改性 PE-HD 材料性能的影响,大剂量紫外辐射对改性 PE-HD 力学性能的影响如图 4 所示。从图 4 可见,当辐射剂量小于 $1\,200\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 时,材料的力学性能基本

不变;随着辐射剂量的继续增加,材料的拉伸强度有所增加,但是断裂伸长率和冲击强度呈现下降趋势。然而,当辐射剂量为 $1\,840\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 时,材料并没有达到失效点,其拉伸强度依旧有 26 MPa(断裂伸长率为 115%,冲击强度为 $42.23\text{ kJ}/\text{m}^2$)。因此,改性 PE-HD 具有良好的抗紫外老化特性,很适合作漂浮材料。

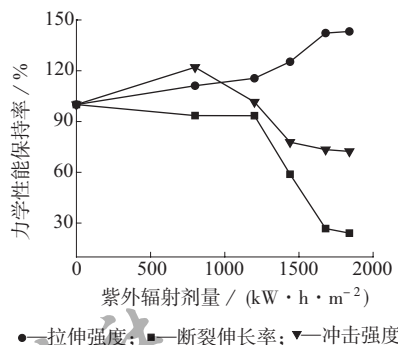


图4 大剂量紫外辐射对改性 PE-HD 力学性能的影响

3.4 大剂量紫外辐射剂量对不同来源样品的性能影响

鉴于漂浮电站正处于快速增长阶段,市场对 PE-HD 浮体材料的需求非常旺盛。然而,由于相关部门尚未制定相应标准,使得市场上的浮体材料性能差异较大,难以确保满足光伏电站的长期服役要求,因此,笔者从市场上买到了 3 种不同的 PE-HD 浮体材料样品 (A, B, C),与笔者制备的改性 PE-HD 样品 (D) 进行紫外老化的对比试验。在对比试验中,辐射总剂量设为 $1\,700\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,通过间隔取样观测样品的颜色、对折回弹力和拉伸性能等的变化。其中,回弹力测试是将老化的样品裁切成长度 $(33\pm 1)\text{ mm}$ 、宽 $(5.5\pm 0.5)\text{ mm}$ 、厚度 $(1.8\pm 0.3)\text{ mm}$ 的样品,沿中间进行正反对折,观察对折后样品的外观变化情况。试验结果显示,紫外辐射 $340\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 后,样品 A 和样品 C 的回弹力已经下降,样品 B 和样品 D 的回弹力无明显下降;当辐射剂量为 $744\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,所有样品的回弹力均消失。此外,紫外辐射 $1\,700\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 后,样品 A、样品 B 颜色明显变黄,样品 C 颜色部分变化,样品 D 颜色无明显变化。图 5 为紫外辐射剂量对不同来源样品的力学性能影响。从图 5 可见,所有样品的拉伸强度均随辐射剂量的增加而增加,增幅均小于 20%;此外,样品的断裂伸长率均发生下降,但是样品 D 在紫外辐射 $1\,700\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 后,其断裂伸长率保持率仅略有降低。因此,可认为样品 D 性能较为优异,样品 C 勉强满足使用要求,样品 A 和样品 B 需要谨慎使

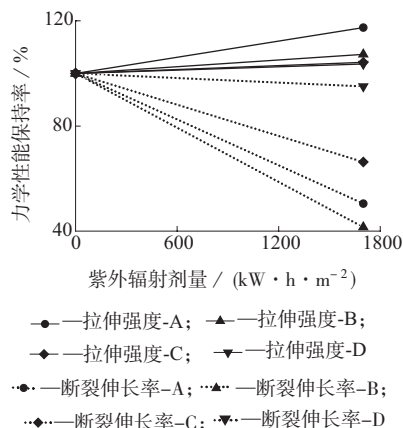


图5 紫外辐射剂量对不同来源样品的力学性能影响

用。

4 结语

我国三四类太阳能资源区域的25年紫外光辐射剂量为800~1625 kW·h/m²;其中,山东25年的紫外辐射量为900~1150 kW·h/m²;江苏和安徽25年的紫外辐射量为800~1100 kW·h/m²。在此基础上进行的人工加速老化试验表明,在累积紫外辐射1126.4 kW·h/m²时未改性PE-HD老化为脆性材料,而改性PE-HD的平均力学性能基本不改变甚至略有提升;当辐射为1840 kW·h/m²时,改性PE-HD的力学性能略有降低,但远未达到其失效点,适合作为浮体材料长期应用于户外。此外,通过采集市场上的浮体材料进行的对比试验表明,建立改性PE-HD浮体材料的相关标准十分必要。

参考文献

- [1] 王赵宾. 光伏“领跑者”计划:政策支持的新尝试[J]. 能源, 2015(8):56-58.
Wang Zhaobin. Photovoltaic plan “Top Runner”: A new attempt at policy support[J]. Energy, 2015(8):56-58.
- [2] Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 66:815-824.
- [3] Trapani K, Redón Santafé M. A review of floating photovoltaic installations:2007-2013[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2014, 23(4):524-532.
- [4] Tireau J, Schoors L V, Benzarti K, et al. Consequences of thermo-and photo-oxidation on end-use properties of pure PE[C] // International conference on times of polymers top & composites. New York: American Institute of Physics, 2010.
- [5] Jabarin S A, Lofgren E A. Photooxidative effects on properties and structure of high-density polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 53(4):411-423.
- [6] 吴石山, 徐僖. 紫外辐照官能化HDPE及复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5):60-63.
Wu Shishan, Xu Xi. HDPE functionalized by ultraviolet irradiation

and properties of the composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5):60-63.

- [7] 蒋秀亭. 不同光源下HDPE土工膜的光氧化性能[J]. 东华大学学报:自然科学版, 2016, 42(6):809-815.
Jiang Xiuting. Photo-oxidation aging of HDPE geomembrane under different light sources[J]. Journal of Donghua University: Natural Science Edition, 2016, 42(6):809-815.
- [8] 吴茂英. 聚合物光老化、光稳定机理与光稳定剂(上)[J]. 高分子通报, 2006(4):89-97.
Wu Maoying. Photo-aging and photostabilization of polymers and light stabilizers(I)[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(4):89-97.
- [9] 净玥. 我国的太阳能资源[J]. 现代家电, 2004(2):15.
Jing Yue. The resources of solar energy in China[J]. Modern Household Appliances, 2004(2):15.
- [10] 胡波. 中国紫外辐射的时空分布变化[C] // 中国气象学会2006年年会“首届研究生年会”分会场论文集. 成都:中国气象学会, 2006.
Hu Bo. The spatial and temporal distribution of ultraviolet radiation in China[C] // The 2006 annual conference of Chinese meteorological society “the first graduate student annual conference” proceedings. Chengdu: Chinese Meteorological Society, 2006.
- [11] 祝青林, 于贵瑞, 蔡福. 中国紫外辐射的空间分布特征[J]. 资源科学, 2005, 27(1):108-113.
Zhu Qinglin, Yu Guirui, Cai Fu. Spatialization research on ultraviolet radiation in China[J]. Resources Science, 2005, 27(1):108-113.
- [12] 山义昌, 张秀珍, 徐文正, 等. 山东潍坊紫外线辐射特征及影响因素[J]. 灾害学, 2007, 22(3):130-133.
Shan Yichang, Zhang Xiuzhen, Xu Wenzheng, et al. Characteristics of ultraviolet radiation in Weifang and influence factor[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3):130-133.
- [13] 邹俊丽. 泰安地区太阳紫外线辐射影响研究[C] // 第27届中国气象学会年会气候环境变化与人体健康分会场论文集. 北京:中国气象学会, 2010:5.
Zou Junli. The research on the influence of solar ultraviolet radiation in Taian[C] // The 27th annual meeting of the China meteorological society “climate change and human health” proceedings. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010:5.
- [14] 孙翠凤, 窦坤, 程德海, 等. 菏泽市紫外线辐射变化特征及月预报方程[J]. 干旱气象, 2014, 32(4):677-682.
Sun Cuifeng, Dou Kun, Cheng Dehai, et al. Variation characteristics of ultraviolet radiation and the monthly forecast equation in Heze[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4):677-682.
- [15] 董旭光. 山东省太阳能资源评估[D]. 兰州:兰州大学, 2009.
Dong Xuguang. Solar energy resources assessment in Shandong province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [16] 买苗, 火焰, 曾燕, 等. 江苏省太阳总辐射的分布特征[J]. 气象科学, 2012, 32(3):269-274.

(下转第109页)

- modification of polyurethane[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2014, 26(5):53-56.
- [3] 周立明. 聚氨酯丙烯酸酯大分子单体及其聚合物的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- Zhou Liming. Study on polyurethane acrylate macromonomer and its polymers[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2004.
- [4] 周立明, 杨彩霞, 高丽君, 等. 耐高温丙烯酸酯类聚氨酯材料的制备与性能研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(7):21-24.
- Zhou Liming, Yang Caixia, Gao Lijun, et al. Preparation and properties of poly(urethane-methacrylate) materials with high temperature resistance[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(7):21-24.
- [5] 董金路, 曹宏斌, 张懿. 阻燃型聚氨酯硬质泡沫塑料的制备[J]. 中国塑料, 2007, 21(12):50-54.
- Dong Jinlu, Cao Hongbin, Zhang Yi. Preparation of flame-retardant rigid polyurethane foam[J]. China Plastics, 2007, 21(12):50-54.
- [6] Aslzadeh M M, Abdouss M, Sadeghi G M M. Preparation and characterization of new flame retardant polyurethane composite and nanocomposite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 127(3):1 683-1 690.
- [7] Wang Lijin, Duan Yiheng, Xu Ning. Non-monotonic pressure dependence of the dynamics of soft glass-formers at high compressions[J]. Soft Matter, 2012, 8(47):11 831-11 838.
- [8] 张五一. 聚氨酯用反应型阻燃剂的制备与实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- Zhang Wuyi. Preparation and experimental study of reactive flame retardants based on polyurethane[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] 高玉玲, 尹国永, 惠继星, 等. 聚氨酯泡沫的阻燃方法研究进展[J]. 化工科技, 2013, 21(4):76-79.
- Gao Yuling, Yin Guoyong, Hui Jixing, et al. Research progress in flame retarding methods of polyurethane materials[J]. Science and Technology in Chemical Industry, 2013, 21 (4):76-79.
- [10] 温中印, 马宏明, 罗振扬. 硬质聚氨酯泡沫塑料阻燃研究进展[J]. 高分子通报, 2014(7):7-12.
- Wen Zhongyin, Ma Hongming, Luo Zhenyang. Review of flame-retardant rigid polyurethane foam[J]. Polymer Bulletin, 2014(7):7-12.
- [11] 张铁江. 常见阻燃剂的阻燃机理[J]. 化学工程与装备, 2009(10):114-115.
- Zhang Tiejiang. Flame retardant mechanism of common flame retardants[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2009(10):114-115.
- [12] 陈立君. 浅谈用氧指数法测试塑料燃烧性[J]. 广西轻工业, 2010, 26(6):63-64.
- Chen Lijun. Analysis of testing the flammability of plastics by oxygen index method[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2010, 26(6):63-64.
- [13] 吴述扬, 张柏梁, 刘昌梁. 氧指数-塑料燃烧特性的评价[J]. 塑料工业, 1982 (6):57-59.
- Hao Shuyang, Zhang Bailiang, Liu Changjiang. Oxygen index-evaluation of plastic combustion characteristics[J]. China Plastics Industry, 1982(6):57-59.
- (上接第 88 页)
- Mai Miao, Huo Yan, Zeng Yan, et al. The distribution characteristics of total solar radiation in Jiangsu province[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2012, 32(3):269-274.
- [17] 沈义. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- Shen Yi. The spatial distribution of solar energy and the comprehensive potential evaluation of regional exploitation and utilization in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [18] 张维, 邵德民. 影响上海地区太阳紫外辐射的研究[J]. 气象, 2002, 28(11):48-54.
- Zhang Wei, Shao Demin. A study of solar ultraviolet radiation influencing Shanghai[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(11):48-54.
- [19] 董显权, 刘结平, 王鲁民, 等. 纳米改性高密度聚乙烯耐老化性能的研究进展[J]. 渔业信息与战略, 2014, 29(2):103-109.
- Dong Xianquan, Liu Jieping, Wang Lumin, et al. Nano-modification research progress of anti-aging properties of high density polyethylene[J]. Fishery Information and Strategy, 2014, 29(2):103-109.
- [20] 付敏, 郭宝星. 聚乙烯材料热及光氧老化的研究进展[J]. 四川化工, 2004, 7(6):25-27.
- Fu Min, Guo Baoxing. The research progress on thermal and photo-oxygen aging of polyethylene materials[J]. Sichuan Chemical Industry, 2004, 7(6):25-27.
- [21] 吴茂英. 聚合物光老化、光稳定机理与光稳定剂(下)[J]. 高分子通报, 2006(4):76-83.
- Wu Maoying. Photo-aging and photostabilization of polymers and light stabilizers(II) [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(4):76-83.
- [22] 卢赞, 张磊, 谭惠民. 含稳态氮氧自由基的光稳定剂对 PE/EVA 薄膜老化性能的影响[J]. 中国塑料, 2006(4):95-99.
- Lu Yun, Zhang Lei, Tan Huimin. Effect of light stabilizer containing stable nitroxyl oxides of free radical on light aging-resistance of PE/EVA films[J]. China Plastics, 2006(4):95-99.
- [23] 吴琿, 王峰. 受阻胺在聚烯烃材料中的应用研究进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(3):97-102.
- Wu Hui, Wang Feng. Progress in application research on HALS from being in polyolefin material[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(3):97-102.
- [24] 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(1):44-47.
- Wang Jun, Peng Jian. Study on structure and mechanical properties of PE-HD during the aging test[J]. China Plastics, 2005(1):44-47.