

# 湿热、干热自然老化中水分对聚碳酸酯老化行为的影响

揭敢新<sup>1</sup>, 郭燕芬<sup>1</sup>, 陶友季<sup>1</sup>, 张晓东<sup>1</sup>, 何刚<sup>2</sup>, 胡利芬<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 马坚<sup>1</sup>

(1. 中国电器科学研究院有限公司, 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广东, 广州 510663;

2. 新疆吐鲁番自然环境试验研究中心, 新疆, 吐鲁番 838000)

**摘要:** 对聚碳酸酯(PC)在我国典型的湿热(琼海)和干热(吐鲁番)进行户外自然老化试验后的老化行为进行了对比分析,发现PC在湿热条件下老化程度比干热严重。借助傅里叶变换红外光谱仪和差示扫描量热仪等方法对造成这种差异的原因进行了分析。证实在湿热环境中曝露的PC试样含水量远高于干热环境中的,且PC的户外自然老化可分为2个阶段,前期以光老化为主,后期水的增塑作用增强。

**关键词:** 聚碳酸酯;湿热;干热;自然老化;水分

**中图分类号:** TQ323.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-9456(2014)01-0071-04

## Impacts of Moisture in Hot-humid and Dry-humid Climate Natural Weathering Environments on Degradation Behaviors of Polycarbonate

JIE Gan-xin<sup>1</sup>, GUO Yan-fen<sup>1</sup>, TAO You-ji<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>, HE Gang<sup>2</sup>, HU Li-fen<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, MA Jian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products,

China National Electric Apparatus Research Institute Ltd., Guangzhou, Guangdong 510663, China;

2. Xinjiang Tulufan Natural Climate Testing and Researching Center, Tulufan, Xinjiang 838000, China)

**Abstract:** Polycarbonate (PC) was subjected to the typical hot-humid (Qionghai) and dry-humid (Turpan) climate for outdoor natural weathering. Degradation behavior revealed that hot-humid climate was harsher to PC than that of dry-humid. The reason was studied by fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and differential scanning calorimeter (DSC). It was proved that the moisture content of PC samples subjected to hot-humid climate environment were much higher than that of dry-humid. Besides, the outdoor natural weathering process of PC could be divided into two stages, at the earlier stage photo-degradation was dominated, during the later period water plasticization was enhanced.

**Key words:** polycarbonate; hot-humid; dry-humid; natural degradation; moisture

近年来,自然老化试验对材料的力学性能<sup>[1-2]</sup>、光学性能<sup>[3-4]</sup>和结构<sup>[5-7]</sup>方面的影响已成为研究热点。这些研究主要集中于材料的老化行为<sup>[8-9]</sup>、老化机理<sup>[10-11]</sup>与防老化技术<sup>[12-13]</sup>的开发领域,针对同一材料在不同自然环境下老化的差异比较,特别是在我国具有代表性的两大气候类型即湿热与干热自然环境下老化的行为差异与原因分析并不多见。

我国幅员辽阔,气候多样。文章选取了湿热、干热这2种在我国具有代表性的气候类型,分别在琼海、吐鲁番曝晒场开展户外自然老化试验,借助色差仪、扫描电镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、差示扫描量热仪(DSC)等检测技术分别对材料的外观、微观形貌、吸水程度、热性能等进行分析,提出了在湿热、干热这两种极端气候条件下,水分对材料老化行为的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

聚碳酸酯(PC):141R,沙特基础工业公司。

### 1.2 自然老化试验

按照 GB/T 3681:2000《塑料大气暴露试验方法》,分别在琼海、吐鲁番这2个典型的国内试验场(其相关气象环境数据见表1)对试样进行户外自然老化试验。试样无背板,曝晒面朝南,

表1 典型曝露试验场的环境数据

| 地点  | 平均<br>温度/℃ | 平均相对<br>湿度/% | 降水量/<br>mm | 辐照总量/<br>(MJ/m <sup>2</sup> ) |
|-----|------------|--------------|------------|-------------------------------|
| 琼海  | 27.4       | 87           | 2134       | 5 190.5                       |
| 吐鲁番 | 17.6       | 28           | 8          | 5 610.4                       |

\* 收稿日期:2013-11-28

基金项目:国家973计划课题(2012CB724605);国际自然科学基金重点项目(51133005)。

作者简介:揭敢新(1966-),男,教授级高级工程师,主要从事典型工业产品环境适应性研究与技术服务。E-mail:jiegx@cei1958.com。

通信联系人:郭燕芬(1986-),女,硕士,主要从事高分子老化研究。E-mail:guoyf@cei1958.com。

与地面呈45°。试验为期2年,每3个月取样1次,进行光学性能、SEM、FTIR以及DSC测试。

### 1.3 测试与表征

#### 1.3.1 光学性能测量

用美国爱色丽公司的X-Rite 948型便携式分光色差计,对清洗后的试样曝晒面按照ISO 7724-2:1984测量色差,按GB/T2409-1980测量黄色指数,结果各取3次测量的算术平均值。

用BYK 4430微型多角度光泽仪,对清洗后的试样曝晒面按照GB/T 8807-1988标准以黑色底板作为背衬,在60°入射角下测量光泽,结果取3次测量的算术平均值。

#### 1.3.2 扫描电镜(SEM)观察

用蔡司的Zeiss-EVO 18扫描电镜观察老化前后的试样表面形貌。待测试样裁成15×15 mm,表面作喷金处理。

#### 1.3.3 傅里叶变换红外光谱(FTIR)表征

刮取户外自然曝晒前后试样的曝晒面表层,与KBr研磨压

片,用Thermo Nicolet公司的NEXUS 670型FTIR红外光谱仪对老化过程中聚苯乙烯进行分析。

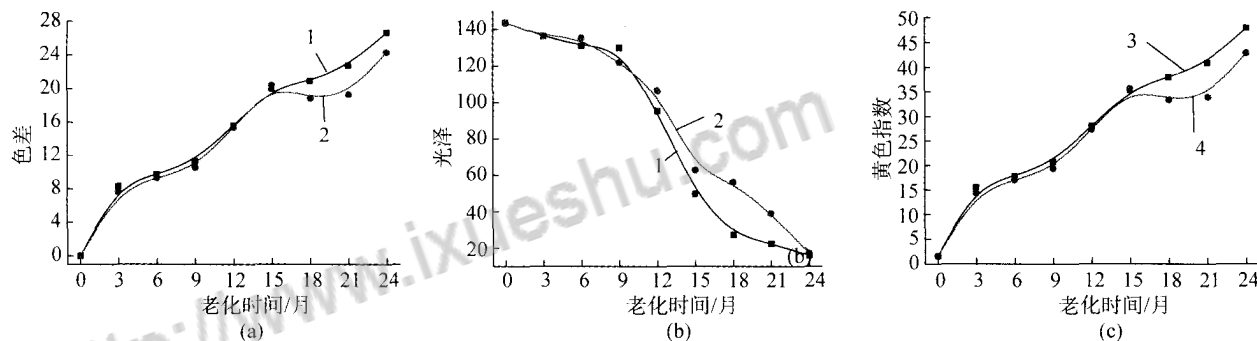
#### 1.3.4 差示扫描量热仪(DSC)分析

刮取户外自然曝晒前后试样的曝晒面表层,用NETZSCH公司的STA 40S型差示扫描量热仪对老化后的材料进行分析。升温程序如下:第一阶段从30℃升温至300℃,升温速率为40℃/min,平衡5 min,然后以30℃/min的速率降温至50℃,此阶段是为消除材料的热历史;第二阶段以10℃/min的速率升温至300℃,取该阶段的玻璃化转变温度( $T_g$ )为分析结果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光学性能对比

色差、光泽、黄色指数是表征材料光学性能的最常用参数,也是评价材料老化程度的最简易测试方式。为研究PC试样在琼海、吐鲁番两地经过为期2年的自然老化试验之后,其光学性能及老化行为差异,将光学数据对老化时间作图,示于图1。



(a) 色差; (b) 光泽; (c) 黄色指数。1 - QH; 2 - TLF; 3 - 琼海; 4 - 吐鲁番。

图1 PC试样的光学性能随自然老化时间的变化曲线图

从图1可知,随着老化时间的延长,PC试样的色差和黄色指数均呈递增趋势,光泽呈降低趋势。总体而言,色差、光泽和黄色指数反映的规律一致,即随着户外自然老化试验时间的延长,PC试样的光学性能降低,老化程度加深;且2个试验点3个性能指标的变化速率有类似的规律,即前半年曲线坡度较平缓,第9至15个月性能指标呈线性变化,且斜率较大,第15至21个月曲线坡度又趋于缓和,表明PC的户外自然老化过程分3个阶段,在自然老化试验开始的前半年,PC的老化速率较慢,随后进入1个快速老化的阶段,该阶段持续近一年,然后老化速率再次趋于平缓。

然而,值得注意的是,同一批PC试样在湿热(琼海)与干热(吐鲁番)气候环境条件下的老化行为并非完全类似。从图1(a)、(c)可以看出,PC试样在琼海与吐鲁番两地进行户外自然老化试验的前15个月,其光学性能曲线相当接近,说明其光学性能差异较小,但自15个月,PC试样在琼海进行户外自然老化试验的色差及黄色指数仍以较快速度上升,而在吐鲁番进行户外自然老化试验的色差及黄色指数则进入了平台期,不再显著地随试验时间而变化,于是两地的光学性能差距逐渐拉大。图1(b)

规律类似,只是两地的光泽差距提前至自然老化试验的第9个月即开始拉开,同样的,在琼海进行户外自然老化试验的PC试样其光泽下降速率高于吐鲁番的。这一现象说明,对于PC试样而言,湿热环境条件(琼海)比干热环境条件(吐鲁番)更为严酷,会导致PC材料的更快老化。

### 2.2 表面形貌表征

为更深入地比较PC试样在琼海、吐鲁番两地相同老化时间的老化行为差异,用扫描电镜对经历了不同自然老化试验时长的PC试样进行微观形貌观察。图2为PC试样在琼海、吐鲁番两地经过1年的自然老化试验前后的扫描电镜照片。从图2可见,PC原始试样表面平整光滑,无明显缺陷。经过了9个月的户外自然老化试验之后,琼海和吐鲁番两地的PC试样表面均出现了不同程度的缺陷,其中吐鲁番的PC试样表面可见部分起皮与微孔,而琼海的PC试样在此基础上还出现了明显细纹;经过长达1年的户外自然老化试验之后,吐鲁番的PC表面起皮和微孔密度增加,表面平整度与光滑度显著降低,而琼海的PC试样已出现显著缺陷,PC试样表面的斑驳程度更甚。SEM照片表明:PC试样在琼海的老化程度甚于吐鲁番,与光学性能的测试结果一致。

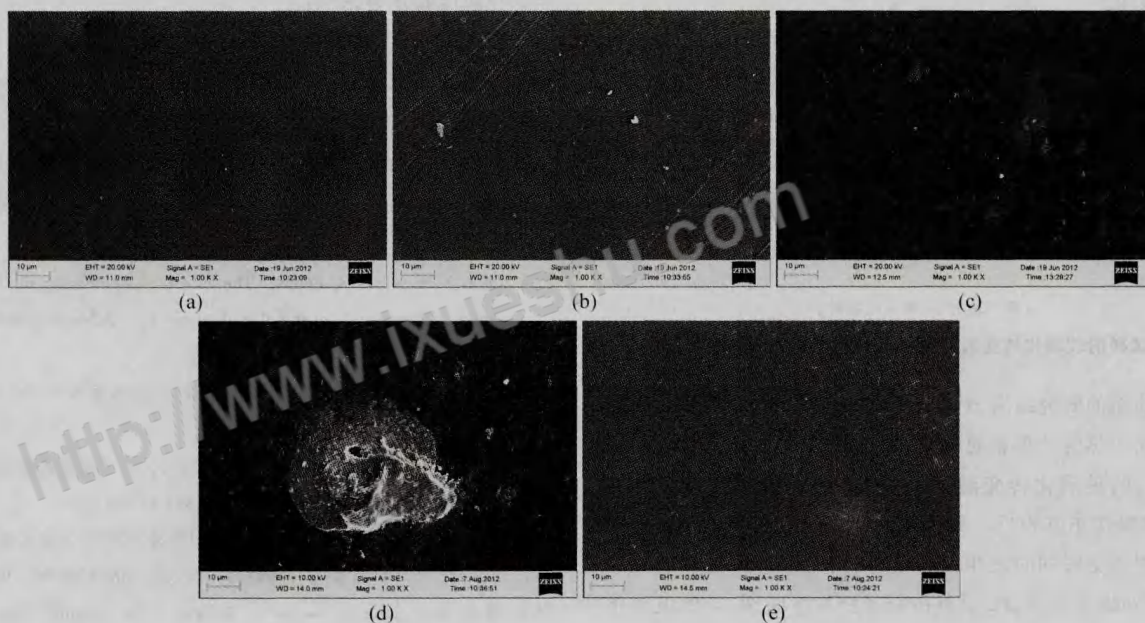
### 2.3 红外分析

但是,从表1可以清楚看到,琼海与吐鲁番两地的年均辐照量并无很大差异,温度差异居中,降水和相对湿度才是最显著的差异。

为研究水分对PC试样老化行为的影响,用傅里叶变换红外光谱仪对琼海、吐鲁番每半年的回样进行FTIR测试<sup>[14]</sup>,取 $3\,000\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 区域对回样中的水分含量进行分析<sup>[15]</sup>。

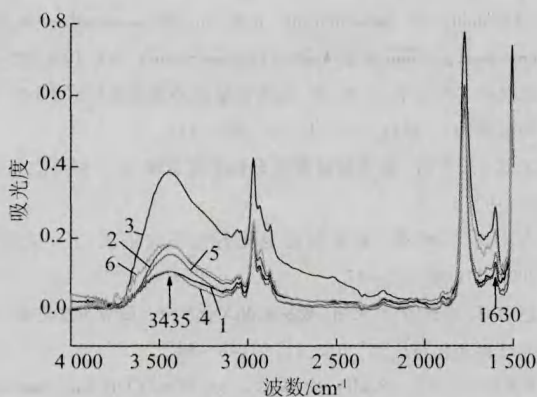
众所周知,PC老化形成的羟基也会在 $3\,000\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 区域产生吸收峰,与水峰重叠难以区分。但如图3所示,结合 $3\,435\text{ cm}^{-1}$ 处的O-H伸缩振动峰以及 $1\,630\text{ cm}^{-1}$ 处的O-H弯曲振动峰,可以比较可靠地推断PC样品中吸附水的存在。这与Shang-Ming Wang等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。Shang-Ming Wang等也曾用程序升温脱附法(TPD)证实高分子材料老化后增强的羟基

峰主要有2个来源,一是过氧基或烷氧基自由基在老化过程中获得质子的链终止反应;二是高分子材料的水分子物理吸附。二者共同作用导致高分子试样的羟基峰随老化而增强。从图3可知,对于同一地点而言,图示区域的吸光度随着户外自然老化时间的延长而呈现有规律的增强,说明PC试样确实会吸收户外曝露环境中的水分,并随着曝露时间的延长,吸水量越多。对于同一时间而言,在户外曝露6个月时,琼海和吐鲁番的PC试样吸光度非常接近,说明此时两地的PC试样含水量相近;当户外曝露12个月,两地的吸光度出现了差距,琼海的PC试样吸光度大于吐鲁番的;当户外曝露18个月,两地的吸光度差距非常显著,在琼海曝露1.5年的PC试样吸光度远远大于吐鲁番的,表明经过1.5年的户外曝露期后,湿热气候类型的琼海地区PC试样含水量大大超过干热气候类型的吐鲁番。



(a)原始试样;(b)QH-09;(c)TLF-09;(d)QH-12;(e)TLF-12。

图2 PC在不同地点经自然老化不同时间的SEM照片



1-琼海-06;2-琼海-12;3-琼海-18;

4-吐鲁番-06;5-吐鲁番-12;6-吐鲁番-18。

图3 琼海与吐鲁番的PC试样FTIR谱图(水峰区)

Henry K<sup>[17]</sup>的研究表明:水分能提高曝露材料的光氧化速率,在材料老化中起着关键作用,且温度越高,吸水越快。在相对湿度水平低时,光老化是最重要的模式;但是在相对湿度高时,水解作用对总体老化负有主要责任<sup>[18]</sup>。Hardcastle<sup>[19]</sup>研究了在亚热带的佛罗里达州与沙漠的亚利桑那州的户外自然老化结果,表明水分对材料的外观性能(20°光泽)有显著影响。水分对材料机械性能的下降和外观缺陷缺陷速率的提高都可归结为水分的增塑作用<sup>[20]</sup>。水分影响材料老化性能的作用机理有水解老化、蚀刻、改变材料内部氧化产物的含量<sup>[21]</sup>以及直接氧化和褪色等理论学说。

在研究中,琼海与吐鲁番的年均辐照量差异不大,但琼海的相对湿度为87%,年均总降水量为2 134 mm,远高于吐鲁番28%的相对湿度和8 mm的年均总降水量如表1所示;且琼海

的年均也略高于吐鲁番,鉴于温度对材料的吸水率有重大影响,在温度与相对湿度的共同作用下,PC试样在琼海的水分含量远高于吐鲁番,如图3所示。另外需要特别指出的是,PC含有极性的C=O基,易于水形成氢键,具有亲水性;因此,更易受到老化环境中水分的影响<sup>[22]</sup>。

## 2.4 DSC 分析

据J V Gulmine<sup>[23]</sup>研究报道,随着曝露时间的延长,老化试样由于交联、结晶度提高、与氧气的结合等原因会导致密度与硬度呈增大趋势。图4是PC试样的玻璃化转变温度( $\theta_g$ )随自然老化时间的变化曲线图。

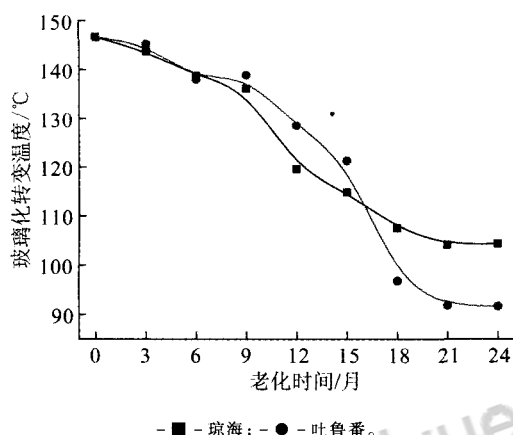


图4 PC试样的玻璃化转变温度( $\theta_g$ )随自然老化时间的变化曲线图

根据前面的研究结果,对于PC试样而言,在湿热的琼海老化程度会比干热的吐鲁番更为严重,故按常理推断,PC试样在琼海老化后的玻璃化转变温度降幅应该比吐鲁番更大。然而图4所示结果却正好相反。原因是PC试样在自然老化过程中分子链断裂与交联同时发生,综合作用的结果。在自然老化过程中,在紫外线作用下,PC试样的分子链发生断裂,导致玻璃化转变温度( $\theta_g$ )下降,如表1所示,琼海与吐鲁番的年均辐照量较为接近,故两地的 $\theta_g$ 降幅本应相近,甚至考虑到琼海的综合环境条件对于PC试样而言比吐鲁番严酷,PC试样的 $\theta_g$ 降幅本应琼海大于吐鲁番;同时,自然老化试验环境中的水分对PC试样的作用也不容低估。水分对高分子有显著的增塑作用<sup>[24]</sup>,在老化的后期,试样中对分子链氧化断裂反应越不稳定的非晶区,越容易受到水分的增塑修饰。其结果是分子链越短,活动性越强,越容易发生二次结晶<sup>[20]</sup>,从而导致在老化试验后期,PC试样的交联程度、结晶度、密度、硬度等有所上升,且老化试验环境条件中水分越充足,增塑作用和结晶度上升幅度越大;因此,二者的综合作用结果是在老化试验的前期,环境条件较为严酷的琼海试验点PC试样的 $\theta_g$ 下降较快,而在老化试验的后期,琼海的增塑作用和结晶度上升幅度也较大,缓和了琼海PC试样的 $\theta_g$ 下降速率。故图4中两地的PC试验玻璃化转变温度( $\theta_g$ )表现为在前半年,两地的 $\theta_g$ 变化趋势非常接近;在第9至15个月期间,琼海的 $\theta_g$ 下降速度明显高于吐鲁番;而自第15个月后,琼

海的 $\theta_g$ 降幅已进入缓和期,而吐鲁番的 $\theta_g$ 仍以较快速度下降。

Carlo Naddeo等<sup>[25]</sup>也有类似的研究发现:通过对化学与物理性能的检测发现,对于不同的老化试验,试样在老化的初始阶段以分子链断裂为主,表现为拉伸模量和屈服应力的下降,在老化的后期以分子链交联为主,表现为结晶度的提高。

## 3 结论

通过PC试样在典型的湿热(琼海)和干热(吐鲁番)气候环境下的户外自然老化试验可得如下结论:

1) PC对我国的湿热气候比干热气候更为敏感,在相同的老化时间下,琼海的PC试样在光学性能和微观形貌上均表现出更显著的老化行为;

2) 红外光谱测试结果证实,PC在曝露过程中会吸收环境中的水分,环境湿度越高,吸水越多,曝露环境中的水分对PC的老化程度有重要影响;

3) DSC分析结果表明:PC的户外自然老化过程受光老化和水增塑的综合作用,前期主要受辐射量作用,以分子链断裂为主;后期水分的影响增大,以分子链交联、增塑和二次结晶为主,总体作用效果表现为玻璃化转变温度( $\theta_g$ )的下降速度先急速后缓和,且湿热(琼海)的 $\theta_g$ 总体降幅小于干热(吐鲁番)。

## 参考文献:

- [1] M E Nichols, C A Peters. The effect of weathering on the fracture energy of hardcoats over polycarbonate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 75: 439-446.
- [2] 蒋世俊, 杨其, 朱家玉, 等. SBS/EP 共混体系改性 PS[J]. 塑料, 2012, 41(3): 7-10.
- [3] 王俊, 祁黎, 彭坚, 等. 在模拟户内环境下聚苯乙烯颜色变化的老化模型及预估[J]. 塑料, 2005, 34(3): 96-99.
- [4] 张晓东, 揭敢新, 彭坚, 等. 利用紫外加速老化试验分析聚苯乙烯老化的影响因素[J]. 塑料科技, 2010, 38(10): 88-90.
- [5] Bok Nam Jang, Charles A Wilkie. The thermal degradation of bisphenol A polycarbonate in air[J]. Thermochimica Acta, 2005, 426: 73-84.
- [6] G V Kozlov, I V Dolbin, G E Zaikov. A Structural model of an accessibility of polycarbonate melt to thermooxidative degradation processes[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100: 3765-3768.
- [7] 郭燕芬, 陶友季, 马坚, 等. 湿热环境户外自然老化对 PS 分子结构的影响[J]. 塑料, 2013, 42(3): 108-112.
- [8] 宋蕊, 朱光明. 航空聚碳酸酯老化研究进展[J]. 塑料工业, 2011, 39(10): 5-7.
- [9] 高伟斌, 张枝苗. 聚碳酸酯老化行为研究进展[J]. 国外塑料, 2009, 27(10): 32-37.
- [10] 赵阳阳, 高建国, 赵永仙. 聚碳酸酯老化机理与研究方法进展[J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(1): 48-54.
- [11] Bok Nam Jang, Charles A, Wilkie. A TGA/FTIR and mass spectral study on the thermal degradation of bisphenol A polycarbonate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 86: 419-430.

(下转 48 页)

- Mech Eng Congr Exp, 1998, 82: 85 - 91.
- [2] Dhavalikar R, Yamaguchi M, Xanthos M. Molecular and structural analysis of trioxide-modified poly (ethylene terephthalate) from rheological data [J]. Journal of Polymer Science: Part A. Polymer Chemistr, 2003, 41 (7): 985 - 909.
- [3] Huang YongQing, Liu YouXi, Zhao ChunHua. Morphology and properties of PET/PA6/E44 blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 69: 1505 - 1575.
- [4] N Chapleau, A Ajji. Micromachanical behavior of impact modified poly (ethylene terephthalate) [J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43: 1197 - 1205.
- [5] 邹耀邦, 苏湘, 牟小波, 等. 发泡 PET 片材及其制备方法: 中国, 200910302063.1 [P]. 2009 - 09 - 30.
- [6] 康鹏, 金滢, 蔡涛, 等. PET 树脂发泡技术研究进展 [J]. 塑料工业, 2011, 39 (3): 35 - 38.
- [7] Sanjiv S D, Kunal M K. Effects of component addition protocol on the reactive compatibilization of HDPE/PET blends [J]. Polym Eng Sci, 1994, 34 (23): 1709 - 1719.
- [8] Kalfoglou N K, Skafidas D S. Compatibility of blends of poly (ethylene terephthalate) with the ionomer of ethylene-methacrylic acid copolymer [J]. Eu polym J, 30 (8): 933 - 939.
- [9] 王雁, 黄东, 何进章. PEN 合成的酯交换反应工艺及动力学研究 [J]. 聚酯工艺, 2002, 15 (6): 15 - 18.
- [10] DAVER F, GUPTA R, KOSIOR E. Rheological characterization of recycled poly (ethylene terephthalate) modified by reactive extrusion [J]. J Mater Proce Technol, 2008, 204 (1 - 3): 397 - 402.
- [11] MAIO L D, COCCORULLO I, MONTESANO S, et al. Chain extension and foaming of recycled PET in extrusion equipment [J]. Macromol Symposia, 2005, 228 (1): 185 - 199.
- [12] 吴彤, 李莹, 蔡夫柳, 等. 扩链剂联用技术对 PET 扩链反应的影响 [J]. 聚酯工业, 2002, 15 (2): 20 - 24.
- [13] 刘伟, 刘本刚, 王向东, 等. 线形聚丙烯/低密度聚乙烯发泡体系的结晶行为研究 [J]. 中国塑料, 2010, 24 (12): 63 - 71.
- [14] Starkweather H W, Zoller P, Jones G A. The heat of fusion of poly (ethylene terephthalate) [J]. The Polym Sci Phys Ed, 1983, 21: 295 - 299.
- [15] Melvin Avrami. Kinetics of Phase Change [J]. Journal of Chemical Physics, 1939, 7 (12): 1103 - 1112.
- [16] Ozawa T. Kinetics of non-isothermal crystallization [J]. Polymer, 1971, 12 (3): 150 - 158.
- [17] Zhishen Mo. Nonisothermal melt and cold crystallization kinetics of poly (aryl ether ether ketone ketone) [J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37 (3): 568 - 575.
- [18] Homer E, Kissinger. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. Analytical Chemistry, 1957, 29 (2): 1702 - 1706.

(本文编辑 LYZ)

(上接 74 页)

- [12] 叶荣根, 肖春霞, 蔡绪福, 等. 苯乙烯树脂抗老化研究进展 [J]. 塑料, 2008, 37 (4): 72 - 75.
- [13] 徐立新, 李为立, 杨慕杰. 纳米  $\text{TiO}_2$  表面接枝聚苯乙烯及其抗紫外老化研究 [J]. 化学学报, 2007, 65 (17): 1917 - 1921.
- [14] Jonathan W Martin, Tinh Nguyen, Eric Byrd, et al. Relating laboratory and outdoor exposure of acrylic melamine coatings: I. Cumulative damage model and laboratory exposure apparatus [J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 75: 193.
- [15] 曾安, 陈仓, 陈闽杰. 红外光谱法检测润滑油中水分含量的研究 [J]. 润滑与密封, 2009, 34 (9): 102 - 104, 119.
- [16] Shang-Ming Wang, Jen-Ray Chang, Raymond Chien-Chao Tsiang. Infrared studies of thermal oxidative degradation of polystyrene-block-polybutadiene-block-polystyrene thermoplastic elastomers [J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, 52: 51 - 57.
- [17] Henry K Hardcastle, William L Meeks. Considerations for characterizing moisture effects in coatings weathering studies [J]. J Coat Technol Res, 2008, 5 (2): 181 - 192.
- [18] Nguyen T, Martin J, Byrd E. Relating laboratory and outdoor exposure of coatings: IV. Mode and mechanism for hydrolytic degradation of acrylic-melamine coatings exposed to water vapor in the absence of UV light [J]. J Coat Technol, 2003, 75 (941): 37.
- [19] Hardcastle, HK. Effects of Moisture, Location, and Angle on Automotive Paint System Appearance During Natural Weathering [C]. Krakow: Proceedings of 3rd European Weathering Symposium, Gesellschaft Fur Umweltsimulation, 2007.
- [20] Xiaodong Shi, Brian R Hinderliter, Stuart G Croll. Environmental and time dependence of moisture transportation in an epoxy coating and its significance for accelerated weathering [J]. J Coat Technol, 2010, 7 (4): 419 - 430.
- [21] Real, LP, Gardette, et al. Artificial simulated and natural weathering of poly (vinyl chloride) for outdoor applications: The influence of water in the changes of properties [J]. Polym Degrad Stab, 2005, 88: 357 - 362.
- [22] Colombini D, Martinez-Vega JJ, Merle G. Dynamic mechanical investigations of the effects of water sorption and physical ageing on an epoxy resin system [J]. Polymer, 2002, 43: 4479 - 4485.
- [23] J V Gulmine, P R Janissek, H M Heise, et al. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 79: 385 - 397.
- [24] J F Larché, P O Bussière, J L Gardette. Characterisation of accelerated ageing devices for prediction of the service life of acrylic-melamine/urethane thermosets [J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96: 1530 - 1536.
- [25] Carlo Naddeo, Liberata Guadagno, Vittoria Vittoria. Photooxidation of spherulene linear low-density polyethylene films subjected to environmental weathering: I. Changes in mechanical properties [J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 85: 1009 - 1013.

(本文编辑 YSH)

论文降重、修改、代写请加微信（还有海量Kindle电子书哦）



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

1. [航空聚碳酸酯老化研究进展](#)
2. [PC及PC/PE合金热水老化过程中的PC分子量降解规律](#)
3. [PC/PBT合金体系热老化行为研究](#)
4. [湿热、干热自然老化中水分对聚碳酸酯老化行为的影响](#)
5. [聚碳酸酯自然老化行为研究](#)
6. [ABS塑料的湿热老化性能研究](#)
7. [聚碳酸酯老化行为研究进展](#)
8. [电子器件环氧塑封料在湿热环境下的老化行为](#)
9. [聚碳酸酯人工模拟气候加速老化](#)
10. [乙烯基酯树脂及其碳纤维复合材料的湿热老化行为](#)