

太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒方法的对比研究

刘丹¹, 张晓略¹, 杜砚文², 毛敬侨³, 张恒⁴

(1. 泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201201; 2. 上海关点质量检测技术服务有限公司, 上海 201319;
3. 东华大学, 上海 201620; 4. 美国 Q-Lab 公司上海代表处, 上海 201114)

摘要: **目的** 找出太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒方法的特点和价值。**方法** 基于几种典型的透明高分子材料试样, 分别在佛罗里达典型亚热带潮湿环境自然曝晒、汽车外饰实验室氙灯加速耐候试验及亚利桑那太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒黄变结果相关性、加速性和区分度的对比分析, 来比较这几种试验方法的特点。**结果** 户外加速曝晒和自然曝晒的相关性高于氙灯加速试验和自然曝晒的相关性。与自然曝晒相比, 户外加速曝晒的平均加速倍率及不同试样的加速倍率的相对差异明显小于氙灯加速试验。自然曝晒和户外加速曝晒的区分度也明显大于实验室氙灯加速试验。**结论** 户外加速曝晒方法较好地均衡了相关性、加速性、加速一致性及区分度, 适合高分子材料的验证性试验。

关键词: 高分子材料; 氙灯; 老化; 太阳跟踪聚能曝晒; 户外加速曝晒; 耐候性; 黄变

中图分类号: TQ317.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)10-0150-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.020

Comparative Study on Accelerated Outdoor Exposure Methods with Solar Tracking and Reflective Energy Accumulation

LIU Dan¹, ZHANG Xiao-lue¹, DU Yan-wen², MAO Jing-qiao³, ZHANG Heng⁴

(1. Pan Asia Automotive Technology Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China; 2. Shanghai Guandian Quality Inspection and Technology Service Co., Ltd., Shanghai, 201319, China; 3. Donghua University, Shanghai 201620, China; 4. Shanghai Representative Office of American Q-Lab Company, Shanghai 201114, China)

ABSTRACT: This paper aims to find the characteristics and value of outdoor accelerated exposure method with solar tracking reflection and concentrated energy. Based on several typical transparent polymer material samples, the characteristics of these test methods are compared by comparing the correlation, acceleration and discrimination of the yellowing results of natural exposure in Florida's typical subtropical humid environment, xenon lamp accelerated weathering test in the automotive exterior decoration laboratory and Arizona's solar tracking reflection shaped energy outdoor accelerated exposure. The correlation between outdoor accelerated exposure and natural exposure is higher than that between xenon lamp accelerated test and natural exposure. Compared with natural exposure, the average acceleration ratio of outdoor accelerated exposure and the relative dif-

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-03-14

Received: 2021-12-01; Revised: 2022-03-14

作者简介: 刘丹(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为汽车非金属材料及非金属材料老化性能。

Biography: LIU Dan (1984-), Male, Master, Engineer, Research focus: nonmetallic materials of automotive and aging of nonmetallic materials.

通讯作者: 张晓略(1979—)女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为汽车非金属材料。

Corresponding author: ZHANG Xiao-lue (1979-), Female, Master, Engineer, Research focus: nonmetallic materials of automotive.

引文格式: 刘丹, 张晓略, 杜砚文, 等. 太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒方法的对比研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 150-155.

LIU Dan, ZHANG Xiao-lue, DU Yan-wen, et al. Comparative Study on Accelerated Outdoor Exposure Methods with Solar Tracking and Reflective Energy Accumulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 150-155.

ference of acceleration ratio of different samples are obviously smaller than that of xenon lamp accelerated test. The distinction between natural exposure and outdoor accelerated exposure is also significantly greater than that of xenon lamp accelerated test in laboratory. The outdoor accelerated exposure method has well balanced the correlation, acceleration, acceleration consistency and discrimination, and is suitable for the verification test of polymer materials.

KEY WORDS: polymer; xenon lamp; weathering; concentrated nature sunlight exposure; exposure methods with solar tracking accumulation; weatherability; yellowing

高分子材料在使用过程中, 因为光照、温度和潮湿等气候因素的影响, 会产生不同程度的老化^[1-2]。自然曝晒是评估材料耐候性较为可靠的方法之一^[3], 将高分子材料及零部件放置在自然环境下进行曝晒试验, 使得试样承受各种环境因素的综合作用, 对试样进行定期外观及力学性能的评估, 考察试样的耐候性能^[4], 为预测高分子材料使用寿命提供依据^[5]。自然曝晒试验的周期较长, 不同地区、年份的气候差异可能很大, 试验结果可重复性差, 不同自然环境的试验结果往往不能进行直接比较^[6]。

实验室加速耐候试验, 通过模拟光照、温度及水分等环境参数, 控制并提高试验强度, 以缩短试验周期^[7]。实验室加速耐候试验适合材料耐候性能的质量控制^[8]。实验室加速耐候试验光源主要有碳弧灯、氙弧灯、荧光紫外灯和金属卤素灯等^[9]。氙灯可以较好地全波段模拟太阳光, 是目前高分子材料光老化试验的主要光源之一。实验室试验方法的缺点是模拟的环境参数有限, 且试验条件相对户外实际条件较简单, 试验结果与自然曝晒的一致性因材料而异。

太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒试验^[10]利用自然太阳光作为光源, 白天自动跟踪太阳, 使用多面反射镜, 将太阳光全光谱反射并汇聚在试样上, 实现多倍太阳光辐照, 还可以根据需要对试样进行喷水, 以模拟潮湿气候对试样的影响。试验使用自然太阳光, 试验周期为自然周期 (24 h), 是一种国际上已经存在多年的户外加速试验方法^[11]。

材料耐候试验目的可细分为质量控制、开发验证和寿命预测等。评估这几种试验方法, 可为不同目的的试验方法的选择提供参考。本文将 4 种高分子材料试样 (2 种 PC 材料, 2 种 PS 材料), 分别进行佛罗里达自然曝晒试验 (以下简称自然曝晒)、氙灯实验室加速试验 (以下简称氙灯加速试验) 和亚利桑那户外太阳跟踪反射聚能装置加速曝晒试验 (以下简称户外加速曝晒), 定期测量试样的黄变值^[12]。通过分析试验结果, 来对比评估这几种试验方法。

1 试验

1.1 材料

本次试样的原料成分有聚碳酸酯和聚苯乙烯。聚

碳酸酯 (PC) 是主链中含有碳酸酯基的高分子聚合物, 无色透明, 具有良好的力学性能, 耐冲击性能好, 易于加工, 作为工程塑料广泛应用于汽车工业、电子电器工业、医疗保健及玻璃工业^[13], 如汽车天窗、车灯、仪表板等, 因此研究聚碳酸酯的老化性能对其应用很重要。PC 材料在自然曝晒过程中容易发生酯基的 Fries 光重排反应和偕二甲基光氧老化反应, 老化产物含变色基团, 从而产生黄变^[14]。

聚苯乙烯 (PS) 的侧链上连接着侧苯基, 苯环在紫外光的作用下容易形成醌式结构而变黄^[15]。也因为其老化周期相对较短, 试样制备时稳定性好, 纯聚苯乙烯避免了高分子材料复杂的化学结构对老化的影响^[16], 所以聚苯乙烯常被选作标准材料来评估老化试验的重现性。

将 4 种试样分别用代号 PC1、PC2、PS1 和 PS2 表示。PC1 是国内企业开发的标准参照样; PC2 为车灯用聚碳酸酯材料; PS1 是用于 SAE J2412 及 SAE J2527 标准比对测试的商业参照样; PS2 为通用级聚苯乙烯材料。

1.2 主要设备及仪器

实验室设备: 户外标准曝晒架、太阳跟踪反射聚能曝晒装置、氙灯老化箱、色差计等。

1.3 自然曝晒

自然曝晒在佛罗里达进行, 站点气象信息见表 1^[17]。在佛罗里达按照 SAE J1976 A 方法进行有背板自然曝晒试验^[18], 试样面向赤道与水平夹角为 5°。每 2 个月对试样进行 1 次性能评估。

表 1 佛罗里达站点地理位置及气候特点
Tab.1 Geographical location and climate conditions of Florida

地点	佛罗里达
地理位置	北纬 25°27', 西经 80°30', 海拔 7 m
气候特点	亚热带气候, 阳光充足, 潮湿, 温暖
年平均温度	26 °C
年平均相对湿度	84%
年平均降水量	1 245 mm
年辐射总量	6 588 MJ/m ²
年辐射紫外部分总量	280 MJ/m ²

1.4 氙灯加速试验

按照 SAE J2527 汽车外饰氙灯加速试验标准^[19]进行氙灯加速试验, 试验参数见表 2。

1.5 户外加速曝晒

在 Q-Lab 公司美国亚利桑那曝晒场用 Q-TRAC

太阳跟踪反射聚能曝晒装置进行户外加速曝晒。试验根据 ASTM G 90^[20]的循环 3, 晚上 7 点至早上 5 点期间, 水喷淋 3 min, 停止 12 min, 每小时重复 4 次, 白天不进行水喷淋。每隔 10 d 测量 1 次试样的黄变值。50 d 的试验过程中, 录得总辐照量 4428 MJ/m², 其中紫外辐照量为 180MJ/m²。

表 2 氙灯加速试验循环参数
Tab. 2 Xenon lamp weathering test parameters

标准	滤光片	周期	步骤	试验循环和参数设定
SAE J2527	紫外延展型	3 h	1	辐照度为 0, 黑板温度为(38±3) °C, 相对湿度为 95%±5%, 60 min 黑暗循环, 箱体空气温度为(38±3) °C, 正面+背面水喷淋
			2	辐照度为 0.55 W/m ² @340 nm, 黑板温度为(70±3) °C, 相对湿度为 50%±5%, 40 min 光照循环, 箱体空气温度为(47±3) °C
			3	辐照度为 0.55 W/m ² @340 nm, 黑板温度为(70±3) °C, 相对湿度为 50%±5%, 20 min 光照循环, 箱体空气温度为(47±3) °C, 正面水喷淋
			4	辐照度为 0.55 W/m ² @340 nm, 黑板温度为(70±3) °C, 相对湿度为 50%±5%, 60 min 光照循环, 箱体空气温度为(47±3) °C

1.6 试样性能评估

试样颜色变化的评定参照 SAE J1545^[21], 选用 CIE L*a*b 色空间、D65 光源、10°观察角、镜面反射包含条件进行测定^[22]。测量颜色的 L 值(明度)、a 值(红绿相)、b 值(黄蓝相), 测量 3 次取平均值。因为试样的颜色变化主要来源于 b 值的变化, 所以计算 Δb, 即黄变值^[23], 来反映试样的老化。

2 结果

4 种试样在佛罗里达自然曝晒、氙灯加速试验和 Q-TRAC 户外加速曝晒的黄变值分别如图 1—3 所示。3 种试验条件中, 4 种试样黄变值与曝晒时间都基本呈线性关系。

3 加速试验与自然曝晒的对比分析

3.1 相关性分析

皮尔逊相关系数^[24]是度量 2 个变量序列之间相

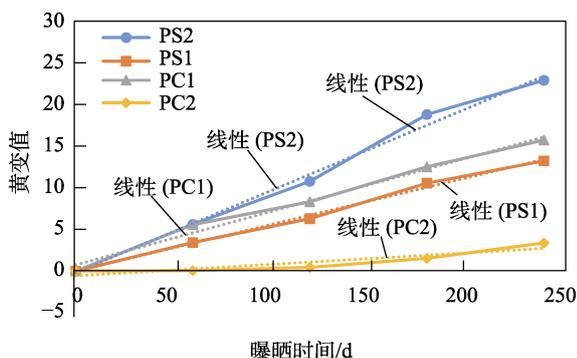


图 1 佛罗里达自然曝晒结果
Fig.1 Natural exposure results in Florida

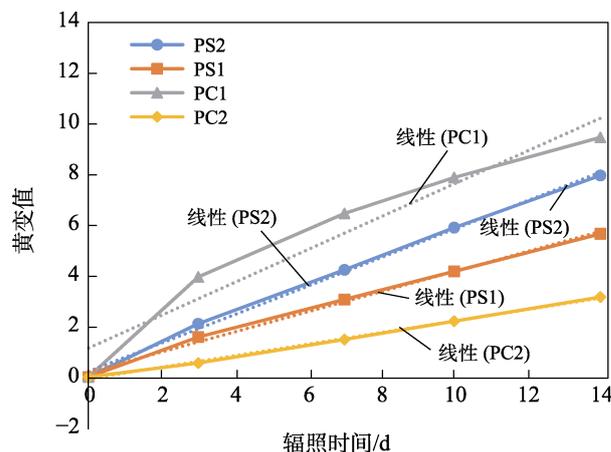


图 2 SAE J2527 标准氙灯加速试验结果
Fig.2 Xenon lamp accelerated weathering test result with SAE J2527

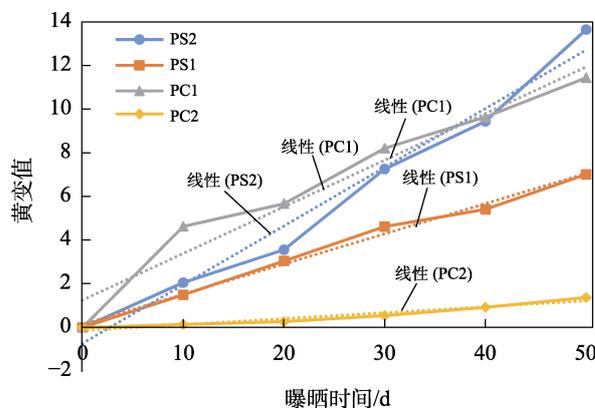


图 3 亚利桑那太阳跟踪反射聚能户外加速曝晒试验结果
Fig.3 Test result from accelerated outdoor exposure with concentrated natural sunlight in Arizona

关程度的一种常用方法^[25]。皮尔逊相关系数数值介于-1 和 1 之间, 其值越大, 相关性越好, 在 0.8~1 为极强

正相关。选取试样老化黄变程度相当, 不同方法的相应时间节点来做比较, 分别计算 120 d 的自然曝晒与 50 d 户外加速曝晒和 14 d 氙灯加速试验间的皮尔逊相关系数。

SAE J2527 氙灯加速试验方法与佛罗里达自然曝晒的相关系数为 0.88, 户外加速曝晒与佛罗里达自然曝晒的相关系数高达 0.96。2 种加速试验方法和自然曝晒都属于极强相关, 户外加速曝晒方法比氙灯加速试验方法与佛罗里达自然曝晒的相关性更好, 可能的原因有: 户外加速曝晒在自然环境中, 利用的自然太阳光, 且试验周期和自然曝晒相同 (24 h), 而氙灯加速试验在人工环境, 使用的人工光源与太阳光会有一些的差异, 且试验周期 (3 h) 较短。

3.2 加速倍率比较

因为氙灯加速试验与户外加速曝晒相对于自然曝晒的相关系数都很高, 所以可以进一步考察 2 种加速方法相对自然曝晒的加速倍率。根据达到相同黄变

值时不同方法所需要的时间来求加速倍率, 加速因子 (AF)^[26]根据式 (1) 来计算, 即加速方法相对于自然曝晒的加速倍率。

$$AF = \frac{t_1}{t_2} \quad (1)$$

式中: AF 为加速因子; t_1 为达到指定黄变值时的自然曝晒天数; t_2 为达到相同黄变值时加速试验的天数。通过加速试验终止时的黄变值, 在图 1 中找出对应的自然曝晒所需天数, 计算 3 种试样加速倍率, 及加速倍率的平均值和变异系数, 结果见表 3、表 4。

由表 3 和表 4 可以看出, 亚利桑那户外加速曝晒相对于佛罗里达自然曝晒的平均加速倍率为 2.9, SAE J2527 氙灯加速试验相对于佛罗里达自然曝晒的平均加速倍率为 10, 氙灯加速试验的加速倍率大于户外加速曝晒。佛罗里达的自然曝晒环境比世界上的大多数地方要严酷许多, 近 3 倍的户外加速曝晒的加速倍率可以满足大多数验证试验的需求。

表 3 Q-Trac 户外加速曝晒相对于自然曝晒的加速倍率
Tab.3 Accelerating factor of Q-Trac sunlight concentrator test

材料	Q-TRAC 户外加速曝晒最 终黄变值	佛罗里达自然 曝晒/d	Q-TRAC 户外加速 曝晒/d	加速倍率	平均加速倍率	变异系数/%
PS2	13.67	140	50	2.8	2.9	10
PS1	7.03	125	50	2.5		
PC1	11.45	166	50	3.3		
PC2	1.38	141	50	2.8		

表 4 氙灯加速试验相对于自然曝晒的加速倍率
Tab.4 Accelerated rate of xenon lamp accelerated weathering test

材料	氙灯加速试验 最终黄变值	佛罗里达自 然曝晒/d	Q-TRAC 户外加 速曝晒/d	加速倍率	平均加速倍率	变异系数/%
PS2	7.94	82	14	5.9	10	50
PS1	5.64	100	14	7.1		
PC1	9.44	135	14	9.6		
PC2	3.15	269	14	19		

另外, 4 种试样氙灯加速试验的加速倍率变异系数 (50%) 远大于户外加速曝晒的加速倍率变异系数 (10%)。较低的加速倍率变异系数, 更有利于加速试验中不同试样之间的平行比较。表 4 中 PC2 试样的氙灯加速试验的加速倍率 (19 倍) 是 PC1 试样的加速倍率 (5.9 倍) 的 3 倍多, 其原因可能来自相同的加速方法中参数的加强 (更高光强、更高温度、更多紫外线等), 作用在不同材料的实际效果会有差异, 有些材料可能会对某些波段的紫外线更敏感, 某些材料可能对温度更敏感, 脱离材料谈加速方法的加速倍率意义不大。在质量控制中, 设定实验室氙灯加速试验时长和指标要求时, 建议对于不同材料要区别对待。

3.3 区分度分析

3 种曝晒条件下, 4 种试样曝晒时间不同但黄变值相当的结果比较如图 4 所示。从图 4 中可以更直观地看出, Q-Trac 户外加速曝晒与佛罗里达自然曝晒试样结果排序的一致性, 明显好于 SAE J2527 氙灯加速试验与佛罗里达自然曝晒试样结果排序的一致性。同时, 从图 4 还可以看出, 同一试验方法中, 佛罗里达自然曝晒和 Q-Trac 户外加速曝晒中试样的差别明显大于 SAE J2527 试验结果。

这里尝试用区分度来表达 2 种加速老化方法对不同材料的区分能力。在不同领域, 区分度有不同的计算方法^[27], 统计学中的变异系数可以表达结果的离

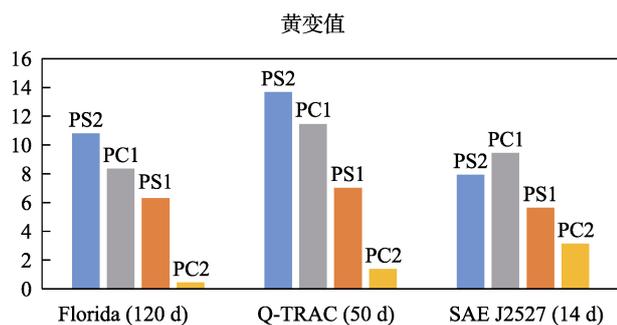


图4 4种试样在3种试验方法下最终黄变值
Fig.4 yellowing degree of four materials under three tests

散程度。本文用变异系数来表征试验方法的区分度,分别计算同一组试样在不同试验条件下试验结果(黄变值)的变异系数,结果见表5。在Q-Trac加速试验中,4种试样黄变值的变异系数(56%)和自然曝晒的(59%)相当,而SAE J2527氙灯加速试验中的4种试样黄变值的变异系数(36%)要小很多。变异系数反应结果的离散程度,相关性好的前提下,试验方法的变异系数越大,该方法对被测的一组试样的区分能力越强,越有利于考察材料性能差异。

表5 4种试样在3种试验方法下黄变值的变异系数
Tab.5 Coefficient of Variation of four materials' yellowing degree under three tests

黄变值	佛罗里达 (120 d)	Q-TRAC (50 d)	SAE J2527 (14 d)
PS1	10.81	13.67	7.94
PC1	8.35	11.45	9.44
PS2	6.31	7.03	5.64
PC2	0.44	1.38	3.15
平均值	6.48	8.38	6.54
标准差	3.83	4.70	2.38
变异系数/%	59	56	36

4 结论

通过对3种耐候试验方法的相关性、加速倍率、加速倍率的变异系数和区分度的分析,可以得出以下结论:

1) 户外加速曝晒和自然曝晒的相关系数明显高于氙灯加速试验和自然曝晒的相关系数。

2) 户外加速曝晒相对自然曝晒的加速倍率小于氙灯加速试验相对自然曝晒的加速倍率。

3) 户外加速曝晒相对自然曝晒的不同样品,加速倍率的相对差异也小于氙灯加速试验,有利于加速试验时试样之间的平行比较。

4) 自然曝晒和户外加速曝晒中,试样之间的性能差异比氙灯加速试验中的更明显,有利于试样之间的区分比较。

总之,除了加速倍率小于氙灯加速试验外,户外

加速曝晒较好地均衡了相关性、加速性、加速一致性和区分度,适合高分子材料的配方筛选、工艺改进时验证性对比试验和寿命预测。另外,此次研究结果基于选取的几种通用材料,不一定适用其他材料。

参考文献:

- [1] 李慧连, 王文涛, 李莉, 等. 汽车仪表板材料氙灯老化试验与自然曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 30-33.
LI Hui-lian, WANG Wen-tao, LI Li, et al. Study on Correlation between Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Methods of Automobile Instrument Panel Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 30-33.
- [2] 章皎琅, 庄奕玲, 季强. 整车自然曝晒与用户实际使用之间的当量研究[J]. 上海汽车, 2013(5): 43-46.
ZHANG Jiao-lang, ZHUANG Yi-ling, JI Qiang. Equivalent Coefficient of Weathering for Interior Trim in Specific Natural Exposure and those Observed in Service[J]. Shanghai Auto, 2013(5): 43-46.
- [3] 徐迪, 张立娟, 戴婷, 等. 高分子材料耐候试验技术初探[J]. 云南化工, 2018, 45(1): 41-42.
XU Di, ZHANG Li-juan, DAI Ting, et al. Preliminary Study on Weather Resistance Test Technology of Polymer Materials[J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(1): 41-42.
- [4] 胡建雄. 关于氙灯老化和户外大气自然暴晒的综述[J]. 合成材料老化与应用, 2014, 43(4): 70-72.
HU Jian-xiong. A Review of Xenon Lamp Aging and Outdoor Natural Atmospheric Exposure[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(4): 70-72.
- [5] 王剑. 汽车产品在典型自然环境下的老化行为与服役寿命预测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
WANG Jian. Study on Aging Behavior and Service Life Prediction of Automotive Products under Typical Natural Environment[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [6] 陈浩. 汽车高分子材料老化分析[J]. 汽车工程师, 2020(4): 15-17.
CHEN Hao. Aging Analysis of Automotive Polymer Materials[J]. Auto Engineer, 2020(4): 15-17.
- [7] 陈文洁, 张广彬, 郑淑春, 等. 人工加速老化试验综述[J]. 中国建筑防水, 2018(20): 37-41.
CHEN Wen-jie, ZHANG Guang-bin, ZHENG Shu-chun, et al. Summary of Artificial Accelerated Aging Test[J]. China Building Waterproofing, 2018(20): 37-41.
- [8] 袁宏辉, 孙杏蕾, 张恒. 氙灯老化与自然曝晒测试所得颜料耐候性的相关性[J]. 中国涂料, 2009, 24(12): 35-38.
YUAN Hong-hui, SUN Xing-lei, ZHANG Heng. Correlation of Weatherability Tested by Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Method[J]. China Coatings, 2009,

- 24(12): 35-38.
- [9] 彭军, 杨育农, 谢宇芳, 等. 高耐候性外墙涂料在氙灯加速老化下光学性能和微观结构的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2019(1): 1-4.
PENG Jun, YANG Yu-nong, XIE Yu-fang, et al. Study on Optical Properties and Microstructure Change of High Weatherability Exterior Wall Coatings under Xenon Lamp Accelerated Aging[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019(1): 1-4.
- [10] Q-Lab. 太阳跟踪聚能曝晒装置测试——Q-TRAC||Q-Lab [EB/OL]. www.q-lab.com.
Q-Lab. Testing of Solar Tracking Concentrated Energy Exposure Device — Q-TRAC||Q-Lab[EB/OL]. www.q-lab.com.
- [11] ISO 877-3, Plastics—Methods of Exposure to Solar Radiation—Part 3: Intensified Weathering Using Concentrated Solar Radiation[S].
- [12] 曹树东. 黄色指数在塑料老化性能评价方面的应用[J]. 齐鲁石油化工, 2006, 34(4): 446-448.
CAO Shu-dong. Application of Yellowness Index in Evaluation of Plastic Aging Performance[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2006, 34(4): 446-448.
- [13] 安平, 陈金彪, 郭开, 等. 聚碳酸酯材料耐热氧老化性能的研究[J]. 塑料助剂, 2019(3): 29-32.
AN Ping, CHEN Jin-biao, GUO Kai, et al. Research on Polycarbonate Anti-Aging Property[J]. Plastics Additives, 2019(3): 29-32.
- [14] 时宇, 陶友季, 揭敢新, 等. 聚碳酸酯在干热环境老化后表现性能与形态研究[J]. 环境技术, 2018, 36(6): 21-24.
SHI Yu, TAO You-ji, JIE Gan-xin, et al. Investigation on Morphology and Performance of Polycarbonate after being Weathered in Dry-Hot Natural Environment[J]. Environmental Technology, 2018, 36(6): 21-24.
- [15] 刘鑫, 揭敢新, 陶友季, 等. 自然环境老化对聚苯乙烯表现性能和形态的影响[J]. 塑料工业, 2013, 41(1): 83-86.
LIU Xin, JIE Gan-xin, TAO You-ji, et al. Effect of Natural Weathering Aging on Apparent Performance and Morphology of Polystyrene[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(1): 83-86.
- [16] 马坚, 张晓东, 陶友季, 等. 聚苯乙烯光氧化行为及其模型研究[J]. 塑料科技, 2013, 41(1): 53-56.
MA Jian, ZHANG Xiao-dong, TAO You-ji, et al. Research on Photo-Oxidation Behavior and Modeling of Polystyrene[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(1): 53-56.
- [17] 陈平方, 余晓杰, 陆挺. 整车自然曝晒与全光谱阳光模拟老化相关性研究[J]. 环境技术, 2020(6): 70-73.
CHEN Ping-fang, YU Xiao-jie, LU Ting. Study on the Correlation between Natural Exposure of Vehicle and Full Spectrum Sunlight Simulated Aging[J]. Environmental Technology, 2020(6): 70-73.
- [18] SAE J1976-2002, Outdoor Weathering of Exterior Material[S].
- [19] SAE J2527-2004, (R) Performance Based Standard for Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Controlled Irradiance Xenon-Arc Apparatus[S].
- [20] ASTM G90-2017, Standard Practice for Performing Accelerated Outdoor Weathering of Materials Using Concentrated Natural Sunlight[S].
- [21] SAE J1545-2005, (R) Instrumental Color Difference Measurement for Exterior Finishes, Textiles and Colored Trim[S].
- [22] 柳立志, 张恒, 孙杏蕾. 实验室加速老化试验与户外曝晒试验的对比研究——汽车内饰塑料氙灯试验与户外曝晒试验的相关性研究[J]. 汽车工艺与材料, 2016(7): 49-52.
LIU Li-zhi, ZHANG Heng, SUN Xing-lei. Comparative Study of Accelerated Aging Test in Laboratory and Outdoor Exposure Test—Correlation between Xenon Lamp Test and Outdoor Exposure Test of Automobile Interior Plastic[J]. Automobile Technology & Material, 2016(7): 49-52.
- [23] 张舒宁, 彭莉, 刘洁, 等. 免喷涂聚丙烯材料自然暴晒与人工加速老化的相关性及其老化因素研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(11): 119-124.
ZHANG Shu-ning, PENG Li, LIU Jie, et al. Study on Correlation of Natural Exposure and Artificial Accelerated Aging for Spray-Free Polypropylene Material and Its Weathering Factors[J]. China Plastics, 2017, 31(11): 119-124.
- [24] 扈涛. 教育统计学[M]. 开封: 河南大学出版社, 2000.
HU Tao. Educational Statistics[M]. Kaifeng, China: Henan University Press, 2000.
- [25] 时宇, 揭敢新, 祁黎, 等. 聚酯粉末涂料在湿热环境的自然老化与氙灯老化的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(10): 100-104.
SHI Yu, JIE Gan-xin, QI Li, et al. Correlation Study on Natural and Xenon Lamp Weathering Tests of Powder Coating Based on Polyester Resin in Hot-Humid Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(10): 100-104.
- [26] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 217-218.
WANG Xue-hua. Natural environment test technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003: 217-218.
- [27] 张天云, 杨瑞成, 陈奎. 基于区分度定量分析工程材料评价指标[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(4): 512-515.
ZHANG Tian-yun, YANG Rui-cheng, CHEN Kui. Quantitative Analysis of Comprehensive Evaluation Indices for Engineering Materials Based on Distinction Degree[J]. Materials Science and Technology, 2009, 17(4): 512-515.