

车用高分子材料不同地区户外曝晒 试验相关性研究

杜砚文¹, 刘丹², 张晓略², 高佳艺³, 张恒⁴

(1.上海关点质量检测技术服务有限公司,上海 201319; 2.泛亚汽车技术中心有限公司,上海 201201;
3.东华大学,上海 201620; 4.美国 Q-Lab 公司上海代表处,上海 200072)

摘要: **目的** 将3种高分子材料以及3种车用外饰材料分别投放在中国海南琼海和美国佛罗里达州2种典型湿热环境中进行户外曝晒试验,研究气候相似的2种地区的试验相关性。**方法** 通过测试相同时间间隔下不同材料在2处试验场曝晒过程中的黄变程度,表征材料的老化现象。采用斯皮尔曼等级相关系数的统计方法,研究材料在2个地区相同时间节点的试验结果的相关性,并利用时间同轴的作图方法比较2个地区严酷度的差异。**结果** 琼海与佛罗里达州2个地区在各个时间节点的相关系数接近于1,且在材料黄变方面呈现一定比例关系。**结论** 琼海和佛罗里达州2个地区的试验结果呈现出较好的相关性,且严酷度比值约为琼海:佛罗里达=1:1.19。

关键词: 汽车材料; 户外曝晒试验; 老化; 黄变程度; 斯皮尔曼等级相关系数; 相关性; 严酷度

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)07-0137-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.018

The Correlation of Areas for Natural Weathering Exposure of Automotive Materials

DU Yan-wen¹, LIU Dan², ZHANG Xiao-lue², GAO Jia-yi³, ZHANG Heng⁴

(1. Key Point (Shanghai) Inc., Shanghai 201319, China; 2. Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201201, China; 3. Donghua University, Shanghai 201620, China; 4. Q-Lab China, Shanghai 200072, China)

ABSTRACT: The outward appearance, physical and chemical properties of automotive materials will change during the production, machining, storage and the application, which is the aging process of polymer materials. Three polymer materials and three automotive materials were exposed in two typical humid and hot environments, one is Qionghai (China) and the other is Florida (USA), for natural weathering exposure test. The yellowing degree and the aging phenomenon of the materials during the exposure were evaluated at set intervals. The Spearman's rank correlation coefficient was used to study the correlation of the two said regions which have similar environments, and the difference in environmental severity of these two regions was compared by characterizing the aging degree of the same material in different testing grounds. The results are listed as follows, in terms of the yellowing degree of materials, these two regions have a good correlation, and the environmental severity ratio is about Qionghai: Florida=1:1.19.

收稿日期: 2021-06-11; 修订日期: 2021-08-16

Received: 2021-06-11; Revised: 2021-08-16

作者简介: 杜砚文(1980—),男,主要研究方向为车用高分子材料CAE数据包测试技术。

Biography: DU Yan-wen (1980-), Male, Research focus: CAE Packet Testing Technology of Automotive Polymer Materials.

引文格式: 杜砚文,刘丹,张晓略,等. 车用高分子材料不同地区户外曝晒试验相关性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 137-142.

DU Yan-wen, LIU Dan, ZHANG Xiao-lue, et al. The Correlation of Areas for Natural Weathering Exposure of Automotive Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 137-142.

KEY WORDS: automotive materials; natural weathering exposure experiment; aging; yellowing degree; Spearman's rank correlation coefficient; correlation; severity

随着汽车行业的发展,新型工艺的改进、新型材料的研发迫在眉睫^[1]。塑料及其复合材料制品本身具有良好的性能,且制作成本低、种类丰富、易于加工成形^[2],在汽车行业具有广阔的应用领域以及良好的发展前景^[3]。在全球不同的气候类型地域,汽车塑料产品由于导热性差、空间稳定性不如金属材料等原因在各种环境因素的共同作用下^[4-5],易产生老化现象,从而对汽车整体造成不良的影响^[6]。塑料的老化主要是指其在合成、加工、贮存以及使用的过程中,性能随时间而变化的现象,具体可表现为外部形貌、物理化学性能、力学性能等方面的变化^[7]。目前已有研究表明,太阳辐照、温度和湿度是影响高分子材料老化最主要的3种自然环境因素^[8-9]。在如今汽车市场品牌繁多、竞争激烈的大环境下,为打造优质品牌形象,提高汽车产品在全球不同地区的使用适应性,各汽车企业越发重视对于车用材料耐候性能的研究。因此,研究不同汽车材料在典型气候条件下的老化现象及其使用寿命具有重要的现实意义和参考价值^[10]。

目前,在车用内外饰产品的开发进程中,通常会采用2种试验方案对材料的耐候性能进行测试,即户外曝晒试验和人工加速老化试验。相比来说,人工加速老化试验耗时短^[11],重现性好,可以与整车开发进程相匹配,但人工试验箱可以模拟的变量有限,其结果缺乏可靠性。户外曝晒试验历史悠久,接近汽车使用的实际情况,试验结果更加真实可靠^[12],且试验设备成本低、操作简便,是设计人工加速老化试验的基础^[13-14]。此方法目前仍是在自然环境下检测材料或产品耐候性中使用最多、最直接可靠的方法。

为了使试验结果更具有代表性,户外曝晒试验一般情况下选择在高水平太阳辐射、温度和湿度的典型气候区域进行。国际上在制定户外曝晒试验的标准

时,将影响材料的气候条件分5类:湿热、干热、中温、温和极寒冷^[15]。目前世界各国在不同的气候地域设置了不同研究内容的试验场,对本土及外来产品或配件进行户外曝晒试验^[16]。其中比较著名的有美国亚利桑那州干热沙漠气候试验场与佛罗里达州迈阿密亚热带气候试验场、日本冲绳湿热气候试验场、澳大利亚爱丽斯泉干热气候试验场、南非卡拉哈里干热气候试验场、中国海南湿热气候试验场和新疆吐鲁番干热气候试验场等^[17]。

本文将3种高分子材料以及3种已应用的汽车外饰材料分别投放在美国佛罗里达州以及中国海南琼海2个典型湿热气候自然曝晒场地进行老化试验,通过测试试样的黄变来表征材料的老化程度,继而通过斯皮尔曼等级相关系数对2个地区试验结果的相关性进行分析,并采用时间同轴作图的方式比较了琼海与佛罗里达两地严酷度的差异。

1 试验

1.1 材料

将3种高分子材料分别用代号PS1、PS2、PC1表示,3种已应用的汽车外饰材料用代号PC2、SE、JS表示,其成分、用途、制备方式等见表1。其中PS1为适用于SAE J2412^[18]及SAE J2527^[19]的标准参考物质,其已知老化特征经过一个公认标准机构或组织的认证,并备案可查^[20]。PS2制备工艺条件:模具温度为80℃,烘料温度为80℃,射嘴温度为200℃。PC1为某公司研发,经过多家实验室测定后拥有统计值的标准参考物质,其制备工艺条件:模具温度为100℃,烘料温度为100℃,射嘴温度为285℃。

表1 材料分类及信息

Tab.1 Material classification and information

分类	代号	成分	用途	制备方式	备注
高分子材料	PS1	聚苯乙烯	标准参考物质	注塑	高光透明
	PS2	聚苯乙烯	测试用物质	注塑	高光透明
	PC1	聚碳酸酯	标准参考物质	注塑	高光透明
车用外饰材料	PC2	聚碳酸酯	车灯材料	注塑	高光透明
	SE	硫化橡胶	水切	零件裁切	哑光透明
	JS	保密	车膜	粘贴到铝板	哑光透明

1.2 设备

1) 色差仪:使用符合SAE J1545^[21]的色差仪。

2) 户外曝晒设备:位于中国海南琼海试验场及美国南佛罗里达试验场的户外曝晒装置如图1所示。

1.3 方法

1.3.1 户外曝晒试验

试验分别在中国海南琼海以及美国佛罗里达州2家典型湿热气候试验场进行,其环境特点为阳光充



a 中国海南琼海试验场



b 美国南佛罗里达试验场

图 1 户外曝晒架

Fig.1 Outdoor exposure rack: a) Qionghai (China) for natural weathering exposure test; b) Florida (USA) for natural weathering exposure test

足, 高温潮湿, 很好地体现了湿热环境影响高分子材料老化最主要的 3 种自然环境因素: 太阳辐照、温度和湿度 (相关气象环境数据见表 2)。按照 SAE J1976—2002 PROCEDURE A^[22]进行无背板自然曝晒试验, 曝晒角度为面向赤道 5°。试验期间记录户外温度、湿度、太阳辐射等数值。

表 2 各曝晒场地理位置及气候条件

Tab.2 Geographical location and climate conditions of each exposure site

地区信息	琼海试验场	南佛罗里达试验场
气候类型	热带湿润乡村气候	亚热带气候
年降雨量/mm	2 134	1 245
地理位置	19°14'N, 110°28'E	25°27'N, 80°30'W
	海拔高度为 10 m	海拔高度为 2 m
年辐射总量/(MJ·m ⁻²)	5 190.49	6 344.71
年平均温度/°C	27.4	26
年平均相对湿度/%	87	84

1.3.2 色差测试

本次试验共测试 6 种高分子材料, 其中 PS1、PS2、PC1、PC2 等 4 种材料分别在佛罗里达投放 2 块平行试样, 在琼海投放 3 块平行试样; SE 材料在佛罗里达投放 2 块平行试样, 在琼海投放 3 块平行试样, 每块试样分上下 2 个部位进行检测; JS 材料在佛罗里达投放 1 块试样, 在琼海为 2 块平行试样。期间每 2

个月检查并测试 1 次每块样品的同一区域, 获得色差等相关数据。试验进行 10 个月后, 两地区试样的外观均无明显龟裂、粉化、起泡等现象。

色差测试采用 CIELab 色空间, D65 光源, 10°观察角, 测量孔径选取小于 25 mm, 包含镜面光模式进行颜色数据测量, 测量颜色的明度 (L)、红绿偏向 (a)、黄蓝偏向 (b) 及其变化量数据, 并计算得到色差 (ΔE), 计算公式见式 (1)。

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 6 种材料的色差对比

6 种试验材料分别在琼海与佛罗里达两家试验场曝晒 10 个月后的色差值见表 3。可以看出, 相对于 PS1、PS2、PC1 等 3 种材料, PC2、SE、JS 这 3 种材料的色差值较小, 变色不明显。分析其原因可能是, PC2、SE、JS 等 3 种材料为现今汽车市场已应用的零件材料, 耐候性能优良, 其试验结果对于最终的数据分析影响较大。因此, 对于材料黄变方面耐候性能表征以及地区严酷度的对比, 仅使用 PS1、PS2、PC1 这 3 种高分子材料的数据。对于琼海与佛罗里达两地区之间的相关性的研究, 则分别在两地区选取 PC2、SE、JS 等 3 种材料的一组平行试样的试验结果, PS1、PS2、PC1 等 3 种材料则采用平行试样的平均值数据。

表 3 6 种材料 10 个月后的色差值

Tab.3 Color difference value of six materials after 10 months

地点	PS1	PS2	PC1	PC2	SE	JS
琼海	11.48	21.64	14.31	2.44	0.89	0.63
佛罗里达	11.66	22.29	15.62	4.17	0.70	0.97

PS1、PS2、PC1 这 3 种材料在琼海曝晒 10 个月后的外观如图 2 所示。从图 2 中可看出, 3 种材料的黄变程度明显, 其黄变值可表征其老化程度。

2.2 地区相关性的表征

2.2.1 不同材料不同地区黄变值的差异

3 种不同高分子材料在 2 家试验场的黄变值随曝晒时间的变化关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 3 种材料在 2 种湿热地区的黄变趋势基本一致。在自然老化的开始阶段, 3 种材料的黄变值随时间增长呈上升趋势。其中, PS 材料由于其分子链中的苯环结构容易在紫外光的作用下形成醌式结构, 并经过一系列自由基反应而变黄^[23]; 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化反应, 老化产物含变色基团, 从而导致黄变^[24]。由图 3 中两地区曲线纵坐标的差距可以看出, 两地区材料的黄变在初始阶段数值接近, 曝晒一段时间后, 黄变

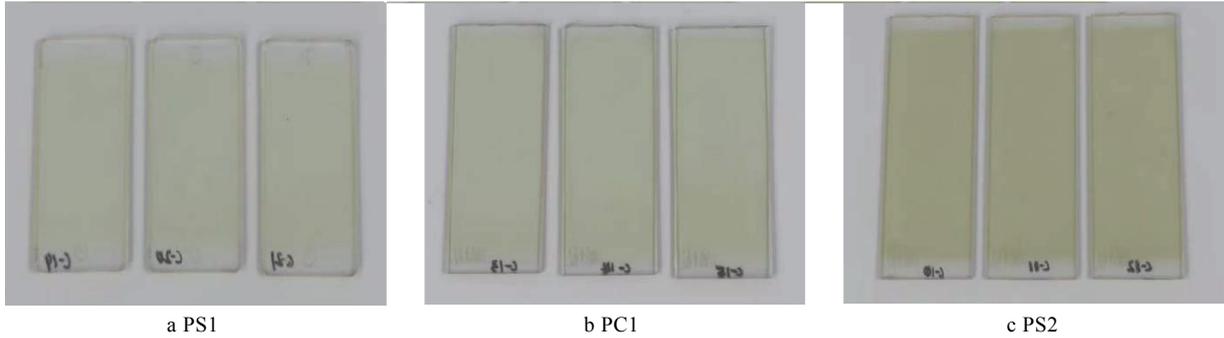


图2 3种材料的外观形貌
Fig.2 Appearance of three materials

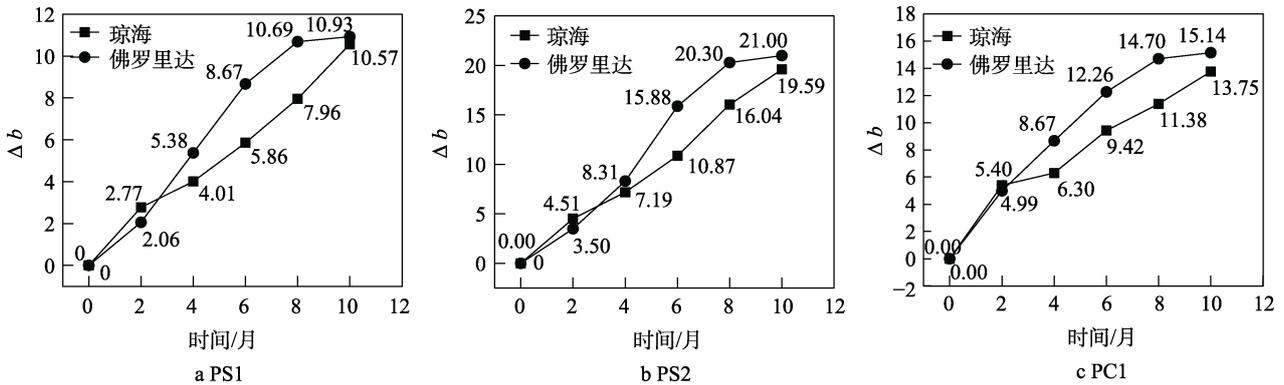


图3 3种材料在2个地区曝晒过程中的黄变值
Fig.3 Yellowing degree of three materials during exposure in the two areas

值出现一定差异，趋于稳定时，黄变值差异变小。10个月后，3种材料的黄变值大小表明，PS2材料老化程度最为明显，PS1材料变化相对较小，PC1材料居中。

2.2.2 琼海与佛罗里达地区相关性的表征

Spearman 等级相关系数 (r_s) 是衡量 2 个变量的依赖性的非参数指标，指的是利用 2 种不同的测试方法对同一组样品进行测试，所得试验结果之间的相关性^[25-26]，其计算式见式 (2)。相关系数越接近于 1，表明相关性越好。

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中： r_s 为相关系数； n 为样品个数； d_i 为 2 列排序中每一组排位之间的差值。

以 6 种试验材料在琼海与佛罗里达曝晒 2 个月后的黄变值排序为例，排序结果见表 4。依据式 (2) 计算得 $r_s=0.94$ 。

所有数据的计算结果见表 5。由表 5 中数据可以看出，琼海与佛罗里达 2 家试验场之间在试验进行的 2、4、6、8、10 个月 5 个时间点的相关性都比较好。

2.2.3 琼海与佛罗里达地区严酷度的对比

基于两地区之间相关性较好的前提下，采用时间同轴的方法，比较相同曝晒时间下黄变值的差异，分析琼海与佛罗里达两地环境严酷度的关系。PS1、

表 4 曝晒试验 2 个月后琼海与佛罗里达材料 Δb 排序
Tab.4 Δb ranking of materials after 2 months of exposure test in Qionghai and Florida

地点	样品号	2月黄变值	排序
琼海	PS1	2.77	4
	PS2	4.51	5
	PC1	5.40	6
	PC2	0.05	1
	SE	0.68	3
	JS	0.08	2
佛罗里达	PS1	2.06	4
	PS2	3.50	5
	PC1	4.99	6
	PC2	0.10	2
	SE	0.65	3
	JS	0.09	1

表 5 琼海与佛罗里达之间的相关系数
Tab.5 Correlation coefficient between Qionghai and Florida

时间/月	2	4	6	8	10
相关系数	0.94	0.89	1	1	1

PS2、PC1 等 3 种试验材料的分散数据点如图 4 所示，横纵坐标分别为在琼海与佛罗里达试验场每隔 2 个月所测得的材料同一位置的黄变值。对图 4 中对应的 10 个月的离散数据点进行过零点的线性拟合，获得

的拟合直线的斜率即可表征两地严酷度的比例关系。若斜率为 1, 则表示琼海与佛罗里达的环境条件对于

同种材料的影响程度高度一致, 即假设要使同一材料达到相同的老化程度, 在两地区需要消耗的时间相同。

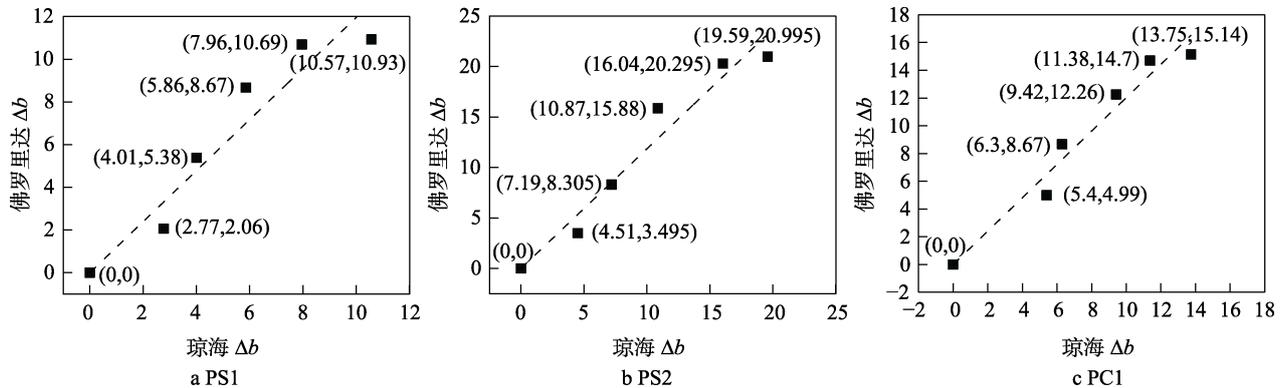


图 4 琼海与佛罗里达严酷度对比
Fig.4 Comparison of severity between Qionghai and Florida

通过线性回归结果(见表 6)中 $R^2 > 0.9$ 可以发现, 两地区之间的试验结果接近线性关系。由 3 条拟合直线的斜率值可以看出, 不同材料在琼海与佛罗里达之间环境严酷度的比值存在较小的差异。将 3 条拟合直线的斜率求取平均值, 发现琼海与佛罗里达两曝晒场之间环境严酷度比值大致为 1 : 1.19。即假设将同一材料分别放入琼海与佛罗里达两地试验场, 要使该材料达到同一老化程度, 若在佛罗里达试验场需要 10 个月的时间, 则在琼海需要耗时 12 个月左右。

表 6 3 种材料的线性回归结果

Tab.6 Linear regression results of three materials

材料	拟合方程	斜率平均值	判定系数 R^2
PS1	$Y=1.195 1x$	1.194 1	0.914 5
PS2	$Y=1.184 9x$		0.954 6
PC1	$Y=1.202 4x$		0.958 9

3 结论

1) 采用斯皮尔曼等级相关系数, 评价琼海与佛罗里达两地区试验结果之间的相关性。由 6 种材料 10 个月内的黄变值计算结果表明, 两地试验结果呈现出较好的相关性。

2) 通过时间同轴的方法作图表征琼海与佛罗里达两地严酷度的关系, 其比值大致为琼海 : 佛罗里达 = 1 : 1.19。

3) 在自然老化期间, PS1、PS2、PC1 等 3 种高分子材料的黄变程度随曝晒时间的增长呈上升趋势, 老化失效严重程度依次为 PS2>PC1>PS1。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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 Weathering Test Technology of Polymer Materials[J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(1): 41-42.

[3] 李伟, 张涛, 蒋小军, 等. 汽车轻量化用高分子材料成型加工研究进展[J]. 广东化工, 2020, 47(19): 94-96.

LI Wei, ZHANG Tao, JIANG Xiao-jun, et al. Research Progress of Polymer Material Molding for Automotive Lightweight[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(19): 94-96.

[4] 陈平方, 余晓杰, 陆挺. 整车自然暴晒与全光谱阳光模拟老化相关性研究[J]. 环境技术, 2020, 38(3): 70-73.

CHEN Ping-fang, YU Xiao-jie, LU Ting. Study on the Correlation between Vehicle Natural Exposure and Full-Spectrum Sunlight Simulation Aging[J]. Environmental Technology, 2020, 38(3): 70-73.

[5] 章皎琅, 庄奕玲, 季强. 整车自然暴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.

[6] 马利娟. 汽车塑料件自然曝晒耐候性评价方法[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

MA Li-juan. The Natural Weathering Exposure Evaluation Method of Automobile Plastic Parts[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[7] 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 Yellow Index in Evaluation of Aging Properties of Plastics[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2006, 34(4): 446-448.

[8] 时宇, 揭敢新, 高泽海, 等. 我国典型气候环境下塑料

- 老化严酷度表征模型研究[J]. 环境技术, 2019, 37(2): 56-59.
- SHI Yu, JIE Gan-xin, GAO Ze-hai, et al. Study of Severity Model of Plastic Aging in Domestic Typical Environments[J]. Environmental Technology, 2019, 37(2): 56-59.
- [9] 张晓东, 王伟健, 祁黎, 等. 基于大数据分析的汽车外饰部件光热老化模型研究[J]. 环境技术, 2020, 38(3): 97-100.
- ZHANG Xiao-dong, WANG Wei-jian, QI Li, et al. Research on Light-Heat Aging Model for Automobile Exterior Parts Basing on Big Data Analytics[J]. Environmental Technology, 2020, 38(3): 97-100.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 罗佳宇, 谢伟强, 李后乐, 等. 汽车内外饰材料光热老化分析[J]. 时代汽车, 2019(14): 124-126.
- LUO Jia-yu, XIE Wei-qiang, LI Hou-le, et al. Analysis of Photothermal Aging of Automotive Interior and Exterior Decoration Materials[J]. Auto Time, 2019(14): 124-126.
- [14] 毛海荣, 揭敢新, Kelly Hardcastle. 聚苯乙烯塑料在中美两国的自然气候曝露试验对比研究[J]. 合成材料老化与应用, 2007, 36(2): 19-21.
- MAO Hai-rong, JIE Gan-xin, HARDCASTLE K. Natural Exposure Test Result Comparison of Polystyrene Plastic in Chinese and American Outdoor Test Sites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2007, 36(2): 19-21.
- [15] 胡建雄. 关于氙灯老化和户外大气自然曝晒的综述[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.
- [16] 苏仕琼, 易军, 王春江, 等. 干、湿热自然气候环境下塑料老化——PP 老化规律研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(6): 92-95.
- SU Shi-qiong, YI Jun, WANG Chun-jiang, et al. Study on Aging Behavior of PP in the Dry Hot and Humid Natural Climates[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(6): 92-95.
- [17] 张晓东, 揭敢新, 王俊, 等. 几种高分子材料在吐鲁番干热试验场的光学失效行为[J]. 塑料, 2014, 43(2): 103-105.
- ZHANG Xiao-dong, JIE Gan-xin, WANG Jun, et al. Optical Performance Degradation of Several Polymer Materials Exposed in Dry-Hot Climate of Tulufan[J]. Plastics, 2014, 43(2): 103-105.
- [18] SAE J2412—2004, Accelerated Exposure of Automotive Interior Trim Using a Controlled Irradiance Water Cooled Xenon Arc Apparatus[S].
- [19] SAE J2527—2004, Performance Based Standard for Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using A Controlled Irradiance Xenon-Arc Apparatus[S].
- [20] T/CSAE 67—2018, 汽车气候老化 术语和定义[S]. T/CSAE 67—2018, Vehicle Weathering Testing and Evaluating Terms and Definitions[S].
- [21] SAE J1545—2005. Instrumental Color Difference Measurement for Exterior Finishes, Textiles and Colored Trim[S].
- [22] SAE J1976—2002. Outdoor Weathering of Exterior Materials[S].
- [23] 揭敢新, 时宇, 陶友季, 等. 不同干热环境对聚苯乙烯老化的严酷度差异[J]. 塑料, 2020, 49(2): 73-76.
- JIE Gan-xin, SHI Yu, TAO You-ji, et al. Difference of Polystyrene's Natural Weathering and Severity between Two Dry-Hot Environments[J]. Plastics, 2020, 49(2): 73-76.
- [24] 时宇, 陶友季, 揭敢新, 等. 聚碳酸酯在干热环境老化后外观性能与形态研究[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.
- [25] 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.
- [26] 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 Laboratory Accelerated Aging Test and Outdoor Exposure Test—Correlation Study between Xenon Lamp Test and Outdoor Exposure Test of Automotive Interior Plastic [J]. Automobile Technology & Material, 2016(7): 49-52.