

环境试验与观测

# DIN 75220 标准阳光模拟试验与海南 户外暴露试验对比研究

张晓东<sup>1,2</sup>, 刘旭<sup>1</sup>, 吕天一<sup>1</sup>, 赵雪茹<sup>1</sup>, 王科孟<sup>2</sup>,  
吴恒<sup>2</sup>, 杨昌铮<sup>2</sup>, 陈泽皓<sup>2</sup>

(1. 中国电器科学研究院股份有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510663;  
2. 广州电器科学研究院有限公司 海南热带环境分公司, 海南 琼海 571442)

**摘要:** 为了对比 DIN 75220 标准阳光模拟试验与我国海南户外暴露试验, 以某型汽车整车和 PC、PS 标准板为研究对象, 对自然曝晒试验和基于 DIN 75220 标准的整车阳光模拟试验中汽车典型部位微环境、汽车典型部件失效行为以及温度校正太阳辐射量的结果进行了对比研究。分析了 2 种试验方法中各统计量间的相关关系, 进一步结合 2 种方法下的油漆件色差、内外饰件间缝隙变化结果以及关键部件典型失效问题, 提出了适用于模拟我国海南典型湿热自然环境的定制化阳光模拟试验循环。研究结果表明, 基于 DIN 75220 标准的 1 个周期整车阳光模拟试验可以反映约 80% 的湿热自然环境整车曝晒试验 3~6 个月出现的失效问题。DIN 75220 标准中, 潮湿气候循环试验可以较好地模拟我国海南湿热自然环境, 35 个潮湿气候循环可以模拟海南整车自然曝晒 1 a。

**关键词:** 自然曝晒试验; 整车阳光模拟试验; 温度校正太阳辐射量; 耐候性; 湿热; 老化  
**中图分类号:** U467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)06-0141-06  
**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.06.018

## Comparative Study on Solar Simulation Test of DIN 75220 Standard and Outdoor Exposure in Hainan

ZHANG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, LIU Xu<sup>1</sup>, LYU Tian-yi<sup>1</sup>, ZHAO Xue-ru<sup>1</sup>, WANG Ke-meng<sup>2</sup>,  
WU Heng<sup>2</sup>, YANG Chang-zheng<sup>2</sup>, CHENG Ze-hao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Hainan Tropical Environment Branch, Guangzhou Electric Apparatus Research Institute Ltd., Hainan Qionghai 571442, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare the solar simulation test based on DIN 75220 standard and the outdoor exposure test in Hainan, China. With a certain vehicle and PC and PS standard plates as the research objects, the results of micro-environment

收稿日期: 2022-08-16; 修订日期: 2022-09-22

Received: 2022-08-16; Revised: 2022-09-22

基金项目: 海南省重点研发计划项目 (ZDYF2021GXJS022)

Fund: Key Research and Design Project of Hainan Province (ZDYF2021GXJS022)

作者简介: 张晓东 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车整车、零部件及材料老化。

Biography: ZHANG Xiao-dong (1978-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: aging of automobile, parts and materials.

引文格式: 张晓东, 刘旭, 吕天一, 等. DIN 75220 标准阳光模拟试验对海南户外暴露试验对比研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(6): 141-146.

ZHANG Xiao-dong, LIU Xu, LYU Tian-yi, et al. Comparative Study on Solar Simulation Test of DIN 75220 Standard and Outdoor Exposure in Hainan[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 141-146.

of typical parts of the vehicle, failure behavior of typical parts of the vehicle and temperature-corrected solar radiation in natural exposure test and solar simulation test based on DIN 75220 standard were compared and studied. The correlation between the statistics in the two test methods was analyzed. By combining the color difference of paint parts, the change results of gaps between interior and exterior trims and the typical failure problems of key components under the two methods, a customized solar simulation test cycle suitable for simulating the typical hot-humid natural environment in Hainan, China was proposed. According to the research results, a large cycle of complete vehicle solar simulation test based on DIN 75220 standard can reflect about 80% of the failure problems that occur in 3-6 months during humid-hot natural environment exposure test. The damp climate cycle test in DIN75220 standard can better simulate the humid-hot natural environment in Hainan, China, and 35 damp climate cycles can be used to simulate the natural exposure of complete vehicle in Hainan for 1 year.

**KEY WORDS:** natural exposure; complete vehicle solar simulation test; temperature-corrected solar radiation; weathering; humid-hot; aging

气候环境中,光照、温度、水分及其之间的相互协同作用会使汽车零部件及材料产生老化腐蚀作用<sup>[1-2]</sup>,从而影响整车外观和功能,甚至产生安全隐患。因此,越来越多整车制造企业将耐候性试验纳入整车开发流程,以保障上市车辆的质量。

在国家基准气候站点开展的湿热环境和干热环境自然曝晒试验环境应力分布情况最具代表性,也是考察车辆耐候性最基础的试验手段<sup>[3-7]</sup>。因其试验条件真实,与实际使用环境一致性好,国内外相关研究也较深入和充分<sup>[8-17]</sup>,但也存在试验周期长(自然曝晒1a,甚至更长)、试验条件重复性差等缺点<sup>[1]</sup>,逐渐不能适应汽车企业的产品开发需求。因此,欧美等发达国家汽车企业或行业开发出了一系列的阳光模拟加速试验<sup>[18-21]</sup>,大大缩短了整车开发周期,国内也陆续开展了相关研究<sup>[22-23]</sup>。

关于塑料、橡胶和涂料等高分子材料的老化加速试验,国内外学者已开展大量研究工作。其机理主要是在太阳辐射、温度和水等气候环境因素的作用下,分子链因吸能或水解而发生断裂、降解、交联,导致材料性能衰减<sup>[1,24-25]</sup>。Pickett等<sup>[26-28]</sup>研究发现,辐照与芳香族工程热塑性树脂的老化行为密切相关,提出了对于大多数芳香族工程热塑性材料的最佳老化方法是尽可能提高光照强度或降低黑暗时间比例。对聚酯、酰胺类极性较大的高分子材料而言,湿度则是决定性因素,其中ABS材料在低湿度(<10%)条件下的老化速率比高湿度(>50%)条件更快,光照波长的影响则随材料种类的不同而不同,建议UV光源尽可能精确复现阳光光照条件,依据实际服役条件确定试验温度,同时避免相对湿度低于10%的非常干燥条件。德国工业标准DIN 75220《汽车零部件在阳光模拟装置中的老化》相比德国企业标准BMW PR306《内外饰件阳光模拟》和美军标MIL-STD-810中的504.2太阳辐射方法更具代表性与普适性,而中国汽车工程学会标准T/CSAE 70—2018《乘用车整车太阳光模拟加速老化试验方法》和德国行业标准VDA 230-219《汽车零部件在阳光模拟装置中的老化》试验方法与

之相近,因此,该方法是我国目前在汽车零部件、整车上应用最广的阳光模拟加速老化试验方法。

本文旨在通过对同一款车型整车同时开展我国海南湿热环境自然曝晒试验和阳光模拟试验,结合关键部位搭载的聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)和聚苯乙烯(Polystyrene, PS)标准板老化数据,分析2组试验的相关性,为开发适用于我国海南湿热自然环境的整车阳光模拟试验提供技术支撑。考察实际结构和装配条件下聚合物高分子材料在全光谱辐照、热/冷和湿度综合作用下的老化行为,反映结构件的形状、颜色、光泽等外观特性的改变,以及不同材料的结构件间相互作用,如缝隙变化、部件变形、胶粘剂开胶鼓包等。

## 1 试验

### 1.1 整车海南湿热环境自然曝晒试验

对气候老化试验来讲,热带、亚热带气候具有较为广泛的代表性。海南琼海湿热内陆地区是我国典型的湿热气候代表性气候区域,也是理想的气候老化试验地点。实验对象直接暴露在自然气候环境中,经受阳光、温度、湿度、雨水、氧、臭氧及其他环境因素的综合作用,老化效果明显<sup>[1]</sup>。本研究依据QC/T 728《汽车整车大气暴露试验方法》标准要求,将某车型整车置于中国电器科学研究院股份有限公司海南琼海湿热试验基地,开展为期1a的自然曝晒试验,实时监测大气环境常规气象数据以及二氧化硫、硫化氢、硫酸盐化速率、氨、雨水氯离子与硫酸根离子、降尘等污染物数据,获取整车关键部位微环境的辐照、温度、相对湿度数据,每3个月对试验车整体状况进行一次全面检测,检查项目包括外观、零部件匹配情况、功能、色差及光泽、涂层划痕扩展及划格附着力等。

### 1.2 整车阳光模拟试验

依据DIN 75220标准,将同一车型整车置于标准环境舱(见图1)中进行1个周期的阳光模拟试验,

试验包含 15 个连续干燥气候循环试验和 10 个连续潮湿气候循环试验, 并监测试验舱环境数据和整车微环境数据, 每 5 个循环对试验车整体状况进行一次全面检测。干燥气候循环试验几乎模拟了干热的亚利桑那气候, 进行 1 次干燥气候循环试验需要 24 h; 潮湿气候循环试验则几乎模拟了湿热的佛罗里达白昼气候和寒冷的阿尔卑斯山夜间气候, 进行一次潮湿气候循环试验同样需要 24 h。2 种气候循环的程序组成及试验参数设置见表 1、表 2。



图 1 整车阳光模拟试验

Fig.1 Complete vehicle solar simulation test

表 1 DIN 75220 标准中 2 种气候循环的程序组成  
Tab.1 Test procedure of two climate cycles in DIN 75220 standard

干燥气候循环	潮湿气候循环
8 h——干燥白昼	
3.5 h——干燥黑夜	5 h——寒冷黑夜
8 h——干燥白昼	12 h——潮湿白昼
3.5 h——干燥黑夜	6 h——寒冷黑夜
1 h——维修、改装或维护, 室温	1 h——维修、改装或维护, 室温

表 2 DIN 75220 标准中 2 种气候循环的试验参数设置  
Tab.2 Parameter setting of two climate cycles in DIN 75220 standard

试验阶段	干燥气候循环	潮湿气候循环
白昼	试验舱温度: (42±3) °C	试验舱温度: (42±3) °C
	相对空气湿度: <30%	相对空气湿度: >60%
	光照强度: (1 000±100)W/m <sup>2</sup>	光照强度: (1000±100) W/m <sup>2</sup>
黑夜	试验舱温度: (10±3) °C	试验舱温度: (-10±3) °C
	相对空气湿度: >55%	相对空气湿度: 允许有露水

## 2 结果及分析

### 2.1 汽车典型部位微环境相关性分析

车身内、外共计 7 个温度监测点在不同试验条件下的温度极高值数据见表 3。表 3 中,  $t_d$ 、 $t_h$ 、 $t_w$  分别

表示整车阳光模拟试验中干燥气候循环 (dry-hot cycle)、潮湿气候循环 (humid-hot cycle) 以及湿热环境自然曝晒 (weathering) 试验中的温度极高值;  $\sigma_{d-w}^2$ 、 $\sigma_{h-w}^2$  则表示某一监测点在干燥气候循环试验、潮湿气候循环试验中相对于湿热环境自然曝晒试验的温度极高值方差, 二者的方差均值分别为 35.43 和 15.43。由此可见, 整车阳光模拟试验中, 潮湿气候循环和干燥气候循环在光照阶段由于试验舱内空气相对湿度差异, 导致试验整车车身各处及车内空气温度会有所不同。潮湿气候循环中, 各监测点温度比干燥气候循环中稍低。由方差的平均值可以看出, 潮湿气候循环中各点的温度与湿热环境自然曝晒试验中各点的温度模拟效果更为接近。

表 3 不同试验条件下典型部件表面温度及其方差  
Tab.3 Surface temperature and its variance of typical components in different tests

序号	监测部位	$t_d/^\circ\text{C}$	$t_h/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$\sigma_{d-w}^2$	$\sigma_{h-w}^2$
1	环境空气	42	42	40	4	4
2	车顶	95	90	85	100	25
3	前保险杠	82	80	77	25	9
4	车内空气	87	80	77	100	9
5	仪表板	110	110	107	9	9
6	中控扶手箱	87	80	86	1	36
7	车门开关面板	87	80	84	9	16

### 2.2 老化行为分析

#### 2.2.1 色差与光泽

在 2 组试验中, 内外饰件表面的色差及光泽测量结果如图 2 所示。可见, 相比基于 DIN 75220 标准的阳光模拟试验, 为期 1 a 的琼海湿热曝晒试验对内外饰件 (尤其是对保险杠、仪表板等部位) 颜色及光泽的影响水平更高。

PC、PS 标准板的老化结果 (如图 3 所示) 也印证了这一结论。2 种试验方法中, 阳光模拟试验车顶处 PC、PS 标准板的色差变化分别为自然暴晒 3 个月的 58% 和 41%。车内仪表板处 PS 材料的色差变化均十分微弱, 说明该测试车型车前窗玻璃对紫外线的隔绝率较高。同时, 受户外阳光照射角度影响, 自然曝晒试验中车前盖处标准板的老化效果稍低于车顶部位。统计车顶辐照总量发现, 阳光模拟试验约占户外自然曝晒试验的 28%, 即仅从辐照量来说, 需要开展约 90 d 的阳光模拟试验才能达到户外 1 a 期的水平。

#### 2.2.2 离缝

部件间缝隙是消费者主观评价的关键指标之一, 其变化值也是反映材料尺寸稳定性的关键参数。比较整车外饰部分 80 个位置的离缝值 (如图 4 所示) 变化可以看出, 相比于自然曝晒结果, 整车阳光模拟加

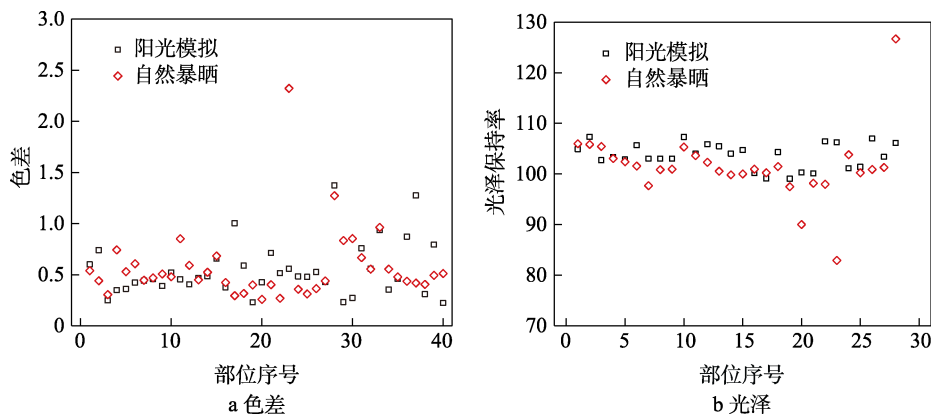


图2 内外饰表面色差及光泽的变化趋势

Fig.2 Color difference and gloss change of interior and exterior trims: a) color difference; b) gloss

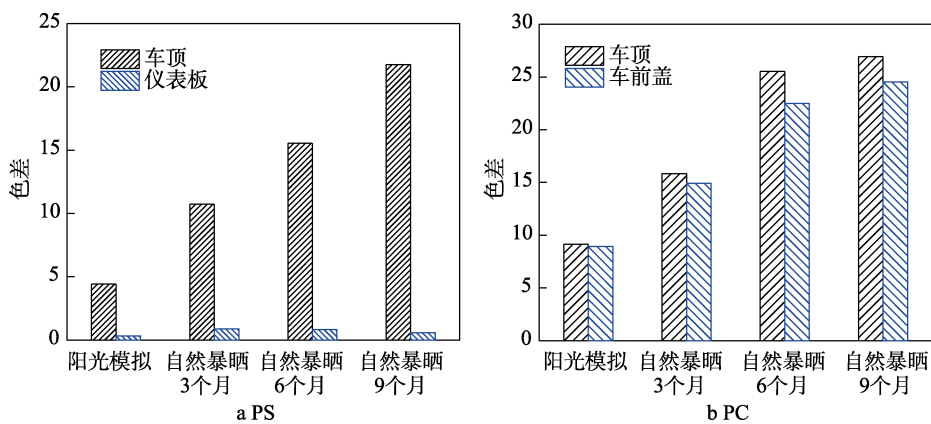


图3 PS、PC标准板色差变化趋势

Fig.3 Color difference trend of PS and PC standard plates

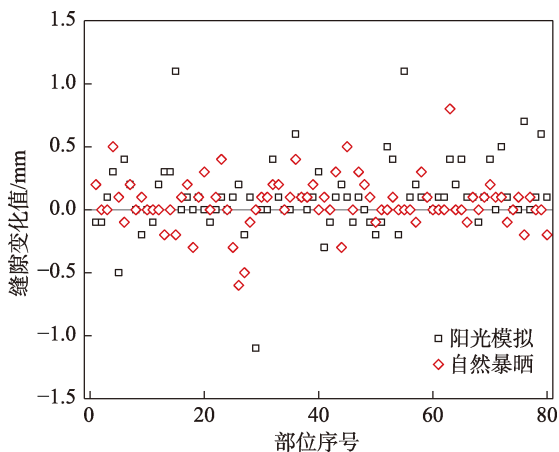


图4 整车户外曝晒与阳光模拟试验离缝值分布规律

Fig.4 Gap-width distribution for complete vehicle in outdoor exposure and solar simulation test

速试验中，离缝测量结果更加分散。进一步对离缝数据试验值取绝对值后进行平均计算，阳光模拟离缝变化值为 0.20，自然曝晒为 0.13，阳光模拟离缝值是自然曝晒的 1.5 倍左右，而且阳光模拟试验中还有个别部位离缝变化量大于 1 mm。这说明，阳光模拟加速试验，尤其是湿热循环中的低温阶段，加剧了样品膨胀收缩表现，使得缝隙变化值在短时间内明显增大。

### 2.2.3 典型部件失效

根据本次试验结果统计，基于 DIN 75220 标准的 1 个周期整车阳光模拟试验可以重现约 80% 的湿热自然环境整车曝晒试验 3~6 个月出现的失效问题。试验车湿热自然环境曝晒试验所暴露出来的涉及安全、功能以及外观等方面的部分典型失效问题如图 5—7 所示。这些失效问题在 1 个周期的整车阳光模拟试验中都得到较好的重现，且主要是金属塑料组合件开裂、胶粘部位变形脱粘、部件间缝隙变化等。



图5 安全带扣开裂

Fig.5 Crack in seat belt buckle



图 6 中控显示屏中框变形脱胶  
Fig.6 Deformation and degumming of the central control display frame



图 7 后视镜固定支架上下盖板离缝  
Fig.7 Gap between the upper and lower covers of the rearview mirror fixing bracket

### 2.3 试验周期相关性研究

环境应力可基于周期性调节太阳辐射量 (Seasonally Adjusted Solar Radiation, SASR) 或者温度校正辐射量 (Temperature Normalized Radiation, TNR) 等计算方法进行量化。考虑到 SASR 方法需要首先通过一系列的试验, 获取月份调节系数, 才能计算该地区的累计 SASR 值, 但目前仅美国亚利桑那州凤凰城和佛罗里达州迈阿密暴露场有完整的 SASR 月份调节系数, 而 TNR 方法较好地解决了这个问题。TNR 是指利用与太阳总辐射量同时段测量的黑标温度校正后的太阳总辐射量<sup>[1]</sup>。因此, 本文采用温度校正辐射量方法评估 2 种试验方法间的试验周期相关性。

汽车行业通常采用温度校正太阳辐射量 (TNR)  $Q_{\text{TNR}}$  来比较不同温度条件下试验样品的阳光模拟程度, 该理论模型最早由美国通用汽车公司提出<sup>[21]</sup>, 并逐步在国内推广应用。

$$Q_{\text{TNR}} = \sum_{\text{start}}^{\text{end}} R e^{13.643 - 5000/T}$$

式中:  $R$  为某一时段试验样品表面接收的太阳辐射量,  $\text{J}/\text{m}^2$ , 自然曝晒试验中一般每 5 min 取值一次;  $T$  为同一时段样品表面的热力学温度, K, 自然曝晒试验中一般每 5 min 取平均值一次。

整车阳光模拟试验中, 车身外表面车顶处光照阶段每小时累计的  $Q_{\text{TNR}}$  值 (车顶处表面温度按 90 °C 进

行计算) 为  $3.18 \times 10^6 \text{ J}/\text{m}^2$ 。根据整车海南湿热环境自然曝晒试验数据统计, 车身外表面车顶处每年接收的  $Q_{\text{TNR}}$  值约为  $1.26 \times 10^9 \text{ J}/\text{m}^2$ 。因此, 等效海南湿热环境自然曝晒 1 a 的阳光模拟试验光照时间约为 396 h。DIN 75220 标准中, 潮湿气候循环阶段每天的光照时间为 12 h, 光照 396 h 需要 33 d 才能完成。考虑到阳光模拟试验中模拟光源明暗转换过渡阶段的影响, 建议开展 35 次潮湿气候循环试验。

### 3 结论

1) 基于 DIN 75220 标准的 1 个周期整车阳光模拟试验可以反映约 80% 的湿热自然环境整车曝晒试验 3~6 个月出现的失效问题, 尤其是对高分子材料内部或不同零部件间内应力及粘接性作用显著。

2) DIN 75220 标准中, 潮湿气候循环试验方法对我国海南典型湿热环境自然曝晒试验的模拟效果相对更好, 35 个潮湿气候循环试验可以模拟海南湿热环境自然曝晒 1 a。

### 参考文献:

- [1] 马坚. 汽车气候老化应用技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2013.  
MA Jian. Automotive weathering application technology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013.
- [2] 李晓刚, 高瑾, 张三平. 高分子材料自然环境老化规律与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
LI Xiao-gang, GAO Jin, ZHANG San-ping. Aging Law and Mechanism of Polymer Materials in Natural Environment[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 王玲, 赵全成, 杨华明, 等. 基于聚苯乙烯老化的大气环境严酷度分类研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 86-90.  
WANG Ling, ZHAO Quan-cheng, YANG Hua-ming, et al. Classification of Atmospheric Environment Severity Based on Polystyrene Aging[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 86-90.
- [4] 王玲, 牟献良, 朱蕾, 等. 大气环境腐蚀性分类分级研究综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 24-27.  
WANG Ling, MU Xian-liang, ZHU Lei, et al. Review of Atmospheric Corrosivity Classification[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 24-27.
- [5] 唐其环, 张先勇, 张燕. 敦煌地区干热与干冷环境特征研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 81-85.  
TANG Qi-huan, ZHANG Xian-yong, ZHANG Yan. Environmental Characteristics of Dry Heat and Dry Cold in Dunhuang Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 81-85.
- [6] 李茜, 赵全成, 陈星昊, 等. 改性塑料在典型自然环境中的老化现象研究[J]. 环境技术, 2020, 38(5): 45-51.  
LI Qian, ZHAO Quan-cheng, CHEN Xing-hao, et al.

- Study on Aging Phenomena of Modified Plastics in Typical Climates[J]. *Environmental Technology*, 2020, 38(5): 45-51.
- [7] 黄亚江, 叶林, 廖霞, 等. 复杂条件下高分子材料老化规律、寿命预测与防治研究新进展[J]. *高分子通报*, 2017(10): 52-63.  
HUANG Ya-jiang, YE Lin, LIAO Xia, et al. The Degradation Behavior, Service Lifetime Prediction and Stabilization Strategy of Polymeric Materials under Complex Condition[J]. *Polymer Bulletin*, 2017(10): 52-63.
- [8] 程科. 改性塑料在汽车零部件中的应用研究[J]. *化工管理*, 2016(17): 117.  
CHENG Ke. Study on the Application of Modified Plastics in Automobile Parts[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2016(17): 117.
- [9] MARTIN J W. Service life prediction of polymeric materials: Global Perspectives[M]. New York: Springer Science+Business, 2009.
- [10] 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.
- [11] 张晓东, 王俊, 揭敢新, 等. 乘用车海南湿热环境耐候性失效统计[J]. *汽车工艺与材料*, 2015(9): 29-30.  
ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, JIE Gan-xin, et al. Failure Statistics of Weather Resistance of Passenger Cars in Hainan Hot and Humid Environment[J]. *Automobile Technology & Material*, 2015(9): 29-30.
- [12] 张晓东, 王俊, 揭敢新, 等. 干热环境下的汽车耐候性试验结果分析[J]. *汽车工艺与材料*, 2015(10): 36-38.  
ZHANG Xiao-dong, WANG Jun, JIE Gan-xin, et al. Analysis of Automobile Weather Resistance Test Results in Dry and Hot Environment[J]. *Automobile Technology & Material*, 2015(10): 36-38.
- [13] 王剑, 潘晓涛, 郑俊, 等. 某车型在海南湿热环境中的整车耐候性[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(2): 131-136.  
WANG Jian, PAN Xiao-tao, ZHENG Jun, et al. Weather Resistance of a New Vehicle in Damp-Hot Environment of Hainan[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(2): 131-136.
- [14] 曾文波, 揭敢新, 张晓东, 等. 汽车整车濒海热带沙漠环境失效行为研究[J]. *环境技术*, 2019, 37(2): 43-45.  
ZENG Wen-bo, JIE Gan-xin, ZHANG Xiao-dong, et al. Study on Failure Behavior of Vehicle in Coastal Tropical Desert[J]. *Environmental Technology*, 2019, 37(2): 43-45.
- [15] 郑习娇, 郑海生, 赵培生, 等. 中美典型干热气候下整车大气暴露环境严酷度分析[J]. *环境技术*, 2021, 39(1): 81-85.  
ZHENG Xi-jiao, ZHENG Hai-sheng, ZHAO Pei-sheng, et al. Study on the Difference of Vehicle Environmental Severity under Typical Arid Climate between China and the United States[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(1): 81-85.
- [16] 周佑洲, 李萌, 高志见, 等. 乘用车在海南湿热和新疆干热环境下的自然暴露试验研究[J]. *环境技术*, 2021, 39(3): 23-26.  
ZHOU You-zhou, LI Meng, GAO Zhi-jian, et al. Study on the Vehicle Natural Exposure in Humid-Hot Environment in Hainan and Dry-Hot Environment in Xinjiang[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(3): 23-26.
- [17] BAUER D R. Global Exposure Models for Automotive Coating Photo-Oxidation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2000, 69(3): 297-306.
- [18] PR 306—2001, Solar Simulation for Exterior and Interior Parts[S].
- [19] VDA 230-219—2011, Aging of Automotive Components in Solar Simulation Units[S].
- [20] DIN 75220—1992, Aging Automobile Components in Solar Simulation Units[S].
- [21] GMW 3417—2011, Natural Weathering Exposure Tests for Interior Trims/Materials[S].
- [22] 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.
- [23] 王云. 汽车全光谱阳光模拟老化试验方法研究与应用[J]. *汽车与配件*, 2019(1): 73-75.  
WANG Yun. Research and Application of Automobile Full-Spectrum Sunlight Simulated Aging Test Method[J]. *Automobile & Parts*, 2019(1): 73-75.
- [24] 熊俊, 吴德权, 王长朋, 等. ABS 湿热海洋大气环境室内外老化行为及相关性研究[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(5): 117-125.  
XIONG Jun, WU De-quan, WANG Chang-peng, et al. Indoors and Outdoors Aging Behavior and Correlation Research of ABS in Humid and Hot Marine Atmospheric Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(5): 117-125.
- [25] 时宇, 曾湘安, 洪志浩, 等. 太阳跟踪聚光加速老化试验在塑料耐候性领域的应用[J]. *环境技术*, 2021, 39(6): 70-77.  
SHI Yu, ZENG Xiang-an, HONG Zhi-hao, et al. The Application of Sunlight Tracking and Concentrating Accelerated Weathering Test in Weatherability Evaluation of Plastics[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(6): 70-77.
- [26] PICKETT J E, GIBSON D A, GARDNER M M. Effects of Irradiation Conditions on the Weathering of Engineering Thermoplastics[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93(8): 1597-1606.
- [27] PICKETT J E, KUVSHINNIKOVA O, SUNG L P, et al. Accelerated Weathering Parameters for some Aromatic Engineering Thermoplastics. Part 2: Polycarbonate Copolymers, Polyarylate and ABS[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 181: 109330.
- [28] PICKETT J E, SARGENT J R. Sample Temperatures during Outdoor and Laboratory Weathering Exposures[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(2): 189-195.

责任编辑: 刘世忠