

汽车零部件金属卤素灯阳光模拟试验 与户外自然曝晒的相关性研究

黄涛¹, 张恒²

(1.上海汽车集团股份有限公司 乘用车分公司,上海 201804;2.美国 Q-Lab 公司上海代表处,上海 201114)

摘要: **目的** 探究汽车零部件金属卤素灯阳光模拟加速试验与户外自然曝晒的关系。**方法** 使用 3 种典型高分子透明材料分别进行阳光模拟加速试验、AIM BOX/Arizona 户外曝晒和 Florida 户外曝晒,基于试验后样品的黄变值,比较阳光模拟试验与户外曝晒的相关性,并对阳光模拟试验与户外曝晒的加速性进行探讨。**结果** 阳光模拟(IP/DP 箱)加速试验与 AIM BOX/Arizona 户外曝晒高度相关,综合加速倍率约是 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的 3 倍。阳光模拟(IP/DP 箱外)加速试验与 Florida 户外曝晒高度相关,综合加速倍率是 Florida 户外曝晒的 7 倍。**结论** 基于 3 种典型材料研究可知,汽车零部件阳光模拟加速试验与典型户外自然曝晒具有一定相关性。

关键词: 高分子材料; 阳光模拟; 自然曝晒; 耐候; 黄变值; 相关性; 加速性

中图分类号: TQ317.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0149-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.020

Correlation of Sunlight Simulation Test of Metal Halide Lamp for Automotive Parts and Outdoor Exposure

HUANG Tao¹, ZHANG Heng²

(1. Passenger Vehicle Company, SaicMotor Corporation Limited, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Representative Office of Q-Lab, Shanghai 201114, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the relationship between the accelerated sunlight simulation test with metal halide lamps for automotive parts and outdoor exposure. Three typical polymer transparent materials were used for a sunlight simulation acceleration test, an AIM BOX/Arizona outdoor exposure test, and a Florida outdoor exposure test. Based on the yellow values of the specimens after the test, the correlation between the sunlight simulation test and outdoor exposure was compared. And the acceleration of sunlight simulation tests and outdoor exposure was explored. The sunlight simulation (IP/DP box) acceleration test was highly correlated with the outdoor exposure of AIM BOX/Arizona. Its comprehensive acceleration rate was approximately 3 times that of AIM BOX/Arizona outdoor exposure. The sunlight simulation (outside IP/DP box) acceleration test is highly correlated with the outdoor exposure of Florida. Its comprehensive acceleration rate was approximately 7 times that of Florida outdoor exposure. Based on the study of three typical materials, it can be concluded that there is a certain correlation between the sunlight simulation acceleration test of automotive parts and

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2023-12-25

Received: 2023-11-08; Revised: 2023-12-25

引文格式: 黄涛, 张恒. 汽车零部件金属卤素灯阳光模拟试验与户外自然曝晒的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 149-156.

HUANG Tao, ZHANG Heng. Correlation of Sunlight Simulation Test of Metal Halide Lamp for Automotive Parts and Outdoor Exposure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 149-156.

typical outdoor exposure.

KEY WORDS: polymer; sunlight simulation; natural exposure; weatherability; yellow value; correlation; acceleration

近年来,随着汽车消费市场的日渐扩大,消费者对拥有高品质汽车的需求不断提升,主机厂对汽车内外饰零部件的外观质量要求也日趋严格。据统计,汽车每年的有效使用时间仅为 300~500 h,而每年静止时间约 8 000 h,其中有 4 000 h 是暴露在阳光下的停车场里^[1]。车辆的内外饰零件绝大部分都是由高分子材料组成,高分子材料在自然环境下由于受到光照、温度和湿度等气候因素的影响,会发生不同程度的老化^[2-4],如褪色、变形、开裂等。因此,整车及零部件在静态环境下的耐候性能极其重要。

针对整车零部件和材料的静态耐候性能,主机厂有一套完整的试验评价流程,包含实验室加速老化和自然曝晒^[5]。其中实验室加速老化主要为氙灯老化,通过氙灯老化箱模拟控制光照、温度、水分等参数,提高试验强度,以缩短试验周期^[6-8]。缺点是无低温功能,受箱体空间限制,一般仅能考察材料级别的耐候性能,无法考察整车零部件之间的相互作用。自然曝晒则选取典型气候曝晒场^[9-11],整车及零部件可以承受真实环境不同老化要素的综合作用,缺点是试验周期长,至少 1~2 a,试验重复性受天气影响,给整车开发周期带来极大挑战。

近年来,综合以上 2 类耐候测试方法的优缺点,采用金属卤素灯模拟整车大气曝晒的汽车零部件阳光模拟老化试验受到越来越多主机厂的关注和使用^[12-13]。陈平方等^[14]利用温度校正太阳辐射量法(TNR)研究

了整车阳光模拟与琼海和吐鲁番户外曝晒之间的相关性。张晓东等^[15]采用整车和 2 种高分子材料,利用典型部位失效行为和 TNR 方法研究了阳光模拟与海南曝晒之间的相关性。杜砚文等^[16]采用 6 种高分子材料,利用材料光学性能变化,研究了琼海和美国佛罗里达户外曝晒之间的相关性,并比较了两地的差异性。阳光模拟加速老化试验与户外自然曝晒的相关性一直是业内关注的焦点,尤其是利用高分子材料比较光学性能变化的相关研究方法^[17]较为成熟,但针对的主要为国内典型气候,对海外典型气候的研究较少。

本文旨在通过选取 3 种典型高分子材料试样同步开展实验室金属卤素灯阳光模拟加速老化试验、亚利桑那和佛罗里达户外曝晒试验,利用材料光学性能变化,评估这 3 种方法之间的相关性及加速性,为主机厂利用实验室阳光模拟试验方法快速评估和验证零部件海外市场耐候风险提供一定的数据支撑。

1 试验

1.1 材料

将 3 种高分子材料样品分别用代号 CN、SN、Lot9 表示,其材质、生产厂家及用途等信息见表 1。其中,样品 CN 为国内开发的标准参照样,SN 为通用级材料, Lot9 为目前国际上实验室氙灯老化测试用的通用标准参照样。

表 1 试验样品信息

Tab.1 Material information of specimens

样品	材质	生产厂家	说明	备注
CN	聚碳酸酯	Key Point	国内开发的用于 SAE J 2527 及 SAE J 2412 测试标准的参照样	高光透明样板
SN	聚苯乙烯	Key Point	通用级聚苯乙烯材料	高光透明样板
Lot9	聚苯乙烯	Testfabrics, Inc.	现用于符合 SAE J 2527 及 SAE J 2412 测试标准的参照样	高光透明样板

1.2 主要设备及仪器

实验室设备:户外标准曝晒架,具有太阳跟踪功能的汽车内饰材料户外曝晒箱(AIM BOX);金属卤素灯阳光模拟舱,模拟内饰件气候条件的试验箱(IP/DP 箱)。

实验仪器:分光测色仪,型号为 CM-26dg。

1.3 全光谱阳光模拟试验

本试验采用步入式零部件阳光模拟试验舱。试验舱主要由舱体、阳光辐射系统、IP/DP 箱组成。舱体温控范围为-15~60℃,相对湿度范围为 10%~75%。阳光辐射系统由符合 CIE 85 要求的 12 盏 2 500 W 金

属卤素灯(前罩含有滤光玻璃)组成,光谱范围符合 DIN75220 要求^[18]。IP/DP 箱由箱体、玻璃窗、换气系统组成。其中,玻璃窗采用标准 4 mm 窗户玻璃,倾斜角度为 30°。换气系统可调控 IP/DP 箱内的温度,IP/DP 箱中还配备了试样表面黑板温度传感器、采样空气温度传感器。

将 3 种试验样品分别以图 1 所示 2 种不同方式放置:

方式 1 搭载于 IP/DP 箱中仪表板的上体位置,模拟内饰零件在车厢内的耐候状态,以阳光模拟(IP/DP 箱)来表示。

方式 2 放置于试验舱中心位置的铝板上,模拟外饰零件在车厢外的耐候状态,以阳光模拟(IP/DP 箱



图 1 试验样品放置
Fig.1 Placing of test specimens

外)来表示。

2 种方式放置的样品其水平高度与阳光模拟舱的光照强度计在同一水平面上, 距离地面约 100 cm。按照 DIN 75220 标准要求依次进行 15 个干态气候(模

拟亚利桑那干热气候)循环试验和 10 个湿态气候(模拟佛罗里达湿热气候)循环试验作为一轮完整的试验周期, 试验参数如表 2 所示。

1.4 自然曝晒

自然曝晒分别在 Q-Lab 公司美国亚利桑那、佛罗里达曝晒场进行, 站点气象信息见表 3。

亚利桑那为典型干热沙漠气候, 阳光辐照强度极大, 全年高温少雨。在亚利桑那曝晒场, 将 3 种试验样品分别投放 2 块平行试样, 按照 GMW 3417 方法^[19]置于 AIM BOX 箱中(如图 2 所示), 进行自然曝晒试验。试验总共进行 8 个多月, 为期 250 d, 每 2 个月对试样进行检查, 并测量 1 次每块样品的同一区域的色差性能。该测试方法适用于考察干热环境对汽车内饰高分子材料的老化影响。此种曝晒方式与阳光模拟(IP/DP 箱)试验的放置类似。

表 2 DIN 75220 阳光模拟试验循环参数
Tab.2 Parameters of DIN 75220 sunlight simulation test cycle

1 个周期	循环方法	持续时间/h	舱体温度/°C	舱体相对湿度/%	辐照强度(280~3 000 nm)/(W·m ⁻²)
15 个循环 360h	Z-OUT-T(干态)	8.0	42±3	<30	1 000±100
		3.5	10±3	>55	/
		8.0	42±3	<30	1 000±100
		3.5	10±3	>55	/
		1.0	室温环境		/
10 个循环 240h	Z-OUT-F(湿态)	5.0	-10±3	允许结露	/
		12.0	42±3	>60	1 000±100
		6.0	-10±3	允许结露	/
		1.0	室温环境		/

表 3 亚利桑那、佛罗里达站点地理位置及气候特点
Tab.3 Geographical location and climate conditions of Arizona, Florida

地点	地理位置	气候特点	年平均温度/°C	年平均相对湿度/%	年平均降水量/mm	年辐射总量/(MJ·m ⁻²)	年辐射紫外部分总量/(MJ·m ⁻²)
亚利桑那	北纬 33°23', 西经 112°35', 海拔 320 m	炎热、干燥沙漠气候	21	35	186	8 004	334
佛罗里达	北纬 25°27', 西经 80°30', 海拔 7 m	亚热带气候, 阳光充足, 潮湿, 温暖	26	84	1 245	6 588	280



图 2 亚利桑那曝晒场 AIM BOX 箱
Fig.2 Arizona (USA) outdoor exposure AIM BOX

佛罗里达为典型湿热气候, 阳光辐照强度大, 全年高温, 雨量充沛, 且湿度高。在佛罗里达曝晒场,

将 3 种试验样品分别投放 2 块平行试样, 按照 SAE J1976 A 方法^[20]置于有背板的户外标准曝晒架上, 直接暴露于自然环境, 试样面向赤道与水平夹角为 5°(如图 3 所示)。试验总共进行 12 个月, 每 2 个月对试样进行检查, 并测量一次每块样品同一区域的色差性能。该测试方法适用于考察湿热环境对汽车外饰高分子材料的老化影响。此种曝晒方式与阳光模拟(IP/DP 箱外)试验的放置类似。

1.5 性能评估

黄变值 (Δb) 是指不含荧光物质的无色透明或半透明塑料偏离白色的程度, 用来定量评价高分子材料



图3 佛罗里达曝晒场户外曝晒架
Fig.3 Florida (USA) outdoor exposure rack

的老化^[21]。参照 SAE J 1545^[22]条件, 使用分光测色仪, 隔一定时间分别测量经过不同试验条件下的 3 种样品的黄变值。测量颜色的 L 值 (明度)、 a 值 (红绿相)、 b 值 (黄蓝相), 每次测量 3 次取平均值。计算 Δb , 来反映试样的老化程度, 如式 (1) 所示。

$$\Delta b = b_0 - b_1 \quad (1)$$

式中: b_0 为样品测试前的黄蓝偏向值; b_1 为样品测试后的黄蓝偏向值。

2 结果与讨论

2.1 样品颜色变化

样品在阳光模拟试验后, 均发生不同程度的黄变现象, 如图 4 所示。这主要是由于 PS 材料分子链中的苯环结构在紫外光的作用下形成醌式结构而变黄, PC 材料发生酯基的 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, 产生黄变^[23]。



图4 阳光模拟试验后样品
Fig.4 Specimens after sunlight simulation test

2.2 样品黄变值变化

2.2.1 IP/DP 箱内

采用方式 1 放置的样品进行阳光模拟 (IP/DP 箱) 测试, 其仪表板表面最高黑板温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$, IP/DP 箱内环境最高空气温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。各测试天数的黄变值见表 4, 可知随着试验天数增加, 3 种试验样品的

表 4 样品在阳光模拟 (IP/DP 箱) 不同周期下的黄变值
Tab.4 Yellow values of specimens after different cycles of sunlight simulation (IP/DP box)

周期	阳光模拟循环方法 (IP/DP 箱)	天数/d	Δb 值		
			CN	SN	Lot9
1	15 d 干	15	2.19	3.38	2.62
	10 d 湿	10	1.40	2.49	1.79
	15 d 干+10 d 湿	25	3.72	6.87	4.70
2	15 d 干+15 d 干	30	4.54	7.03	6.04
	10 d 湿+10 d 湿	20	2.89	6.22	4.19
	15 d 干+10 d 湿+15 d 干+10 d 湿	50	6.63	14.74	9.90

黄变值相应提高。其中, SN 样品的黄变值最高, 即该材料的耐老化性能最差。

2.2.2 IP/DP 箱外

按照方式 2 放置, 即样品放置于 IP/DP 箱外的铝板上进行阳光模拟测试, 其背板表面平均黑板温度为 $62\text{ }^\circ\text{C}$, 试验舱环境最高空气温度为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。平均辐照强度 ($280\sim 3\ 000\text{ nm}$) 为 950 W/m^2 。各阶段的 Δb 值如表 5 所示。可以看出, 与方式 1 相比, Δb 值显著升高。主要原因是, 由于样品直接暴露于辐照下, 所受辐照强度相比透过 IP/DP 箱玻璃后要高, 同时样品背板为铝板, 空气流动低, 受到的温度高。

表 5 样品在阳光模拟 (IP/DP 箱外) 不同周期下的黄变值
Tab.5 Yellow values of specimens after different cycles of sunlight simulation (outside IP/DP box)

周期	阳光模拟循环方法 (IP/DP 箱外)	天数/d	Δb 值		
			CN	SN	Lot9
1	15 d 干	15	8.32	8.65	6.66
	10 d 湿	10	6.93	5.97	4.98
	15 d 干+10 d 湿	25	12.37	15.19	9.17
2	15 d 干+15 d 干	30	14.49	22.78	12.19
	10 d 湿+10 d 湿	20	10.63	12.40	8.53
	15 d 干+10 d 湿+15 d 干+10 d 湿	50	18.61	30.41	16.99

2.2.3 AIM BOX /Arizona 户外曝晒

3 种试样在 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的试验结果如图 5 所示。根据对各阶段黄变值的统计结果发现, 其与曝晒时间呈线性关系。随着试验天数的增加, 样品的黄变值不断升高。3 种材料的黄变值大小表明, 材料 SN 的老化程度最大, Lot9 居中, CN 最小。户外曝晒结果分布趋势与阳光模拟 (IP/DP 箱) 方法一致, 进一步考虑阳光模拟 (IP/DP 箱) 与 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的相关性。

2.2.4 Florida 户外曝晒

3 种试样在 Florida 户外曝晒的试验结果如图 6 所

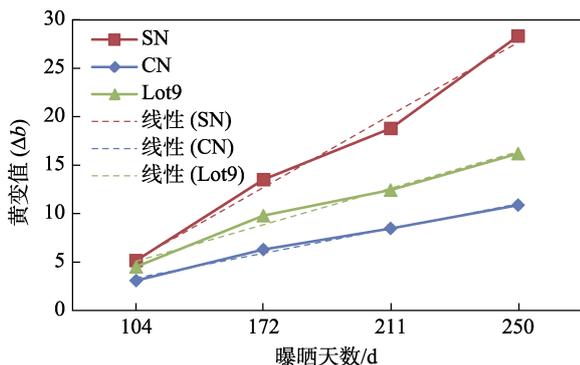


图 5 样品在 AIM BOX/Arizona 户外曝晒结果
Fig.5 Outdoor exposure results in AIM BOX/Arizona

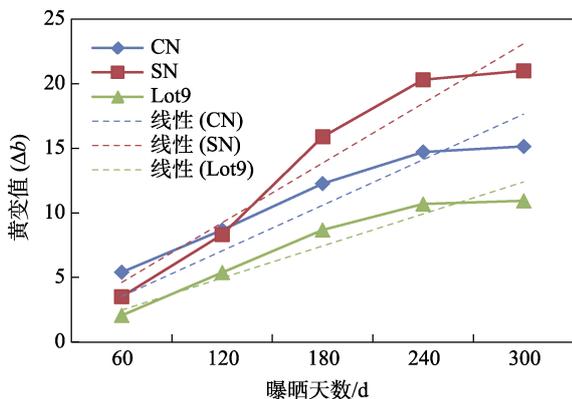


图 6 样品在 Florida 户外曝晒结果
Fig.6 Outdoor exposure results in Florida

示。根据对各阶段黄变值的统计结果发现, 其与曝晒时间同样呈线性关系。样品黄变值随试验天数的增加均相应提高, 曝晒 300 d 后, 黄变值趋于稳定。根据 3 种材料的黄变值大小表明, 材料 SN 的老化程度最大, CN 居中, Lot9 最小。户外曝晒结果分布趋势与阳光模拟 (IP/DP 箱外) 方法一致, 进一步考虑阳光模拟 (IP/DP 箱外) 与 Florida 户外曝晒的相关性。

2.3 相关性分析

皮尔逊相关系数法是度量 2 个变量之间关联程度的常用方法^[24]。皮尔逊相关系数值介于-1~+1, 绝对值越大, 表明相关性越好。采用皮尔逊相关系数考察阳光模拟测试方法与 AIM BOX/Arizona 和 Florida 户外曝晒之间的关系。

2.3.1 阳光模拟 (IP/DP 箱) 与 AIM BOX/Arizona 曝晒

1、2 个周期的阳光模拟 (IP/DP 箱) 试验与 AIM BOX/Arizona 户外曝晒试验的相关性分析结果见表 6。可以看出, 阳光模拟 (IP/DP 箱) 各阶段加速试验与 AIM BOX/Arizona 曝晒高度相关, 相关系数达到 0.97。分析可能的原因为, 样品在 AIM BOX/Arizona 户外曝晒与在阳光模拟 IP/DP 箱内所处的环境条件接近, 即样品放置于模拟车厢环境的标准 IP/DP 箱内, 在测试过程中受到的辐照以及箱体内部高温条件的影响因素一致。

表 6 阳光模拟 (IP/DP 箱) 与户外曝晒试验的相关系数
Tab.6 Correlation coefficient between sunlight simulation (IP/DP BOX) and outdoor exposure

周期	阳光模拟循环方法 (IP/DP 箱)	户外曝晒	相关系数
1	Z-OUT-T(15 d)	AIM BOX /Arizona	0.98
	Z-OUT-F(10 d)		0.98
	Z-OUT-T+F(25 d)		0.97
2	Z-OUT-T(30 d)	AIM BOX /Arizona	0.97
	Z-OUT-F(20 d)		1.00
	Z-OUT-T+F(50 d)		1.00

2.3.2 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 与 Florida 曝晒

1、2 个周期的阳光模拟 (IP/DP 箱外) 试验与 Florida 户外曝晒试验的相关性分析结果见表 7。可以看出, 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 加速试验与 Florida 曝晒为高度相关, 相关系数最高达 0.99。分析可能的原因为, 样品在 Florida 曝晒方式与在阳光模拟试验所处的曝晒方式接近, 即样品在测试过程中, 受到的辐照、环境温度以及背板等环境因素一致。

表 7 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 与户外曝晒试验的相关系数

Tab.7 Correlation coefficient between sunlight simulation (outside IP/DP BOX) and outdoor exposure

周期	阳光模拟循环方法 (IP/DP 箱外)	户外曝晒	相关系数
1	Z-OUT-T(15 d)	Florida	0.90
	Z-OUT-F(10 d)		0.43
	Z-OUT-T+F(25 d)		0.99
2	Z-OUT-T(30 d)	Florida	0.97
	Z-OUT-F(20 d)		0.99
	Z-OUT-T+F(50 d)		0.94

2.4 加速性分析

由上述分析可知, 阳光模拟分别与 AIM BOX/Arizona 和 Florida 曝晒具有良好的相关性, 这对阳光模拟测试在实验室的使用提供了一定的依据。在此基础上, 研究阳光模拟测试相比 AIM BOX/Arizona 和 Florida 户外曝晒的加速性更具有现实意义, 可以快速、低成本评估零部件的耐候风险。

以样品在阳光模拟循环试验过程中的最终黄变值为基准, 分别计算户外曝晒条件下样品达到相同黄变值时所需要的时间来求加速倍率, 即加速因子 (A_F)^[25], 如式 (2) 所示。

$$A_F = \frac{t_1}{t_2} \quad (2)$$

式中: t_1 为达到指定黄变值的曝晒天数; t_2 为达到相同黄变值的加速试验天数。

3 种样品分别在阳光模拟试验和户外曝晒后的最

终黄变值见表 8。

2.4.1 阳光模拟 (IP/DP 箱) 与 AIM BOX/Arizona 曝晒

1、2 个周期的阳光模拟 (IP/DP 箱) 试验与 AIM BOX/Arizona 户外曝晒试验的加速性分析结果见表 9。

通过表 9 可以看出：

1) 3 种样品经过 1 个周期的阳光模拟循环试验后，平均加速倍率为 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的 4.07 倍，变异系数为 12%。3 种样品的最终黄变值与 AIM BOX/Arizona 曝晒 250 d 后相比，约为其 35%~40%。

2) 经 2 个周期的阳光模拟循环试验后，平均加速倍率为 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的 3.64 倍。3

种样品的最终黄变值与 AIM BOX/Arizona 曝晒 250 d 后相比，约为其 60%~70%。

阳光模拟试验加速的原因可用样品受到温度和辐照强度的等效时长解释，即在阳光模拟 (IP/DP 箱) 试验中，样品受到最高温度的等效时长相比 AIM BOX/Arizona 曝晒试验要短。同时，在阳光模拟试验中，平均辐照强度 (950 W/m²) 相比 Arizona 户外的平均强度大很多。综合以上 2 种因素，以及短时间内高低温及湿度剧烈变化，加速了高分子材料的老化。

2.4.2 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 与 Florida 曝晒

1、2 个周期的阳光模拟 (IP/DP 箱外) 试验与 Florida 户外曝晒试验的加速性分析结果见表 10。

表 8 样品在不同试验标准下的最终黄变值
Tab.8 Final yellow values of specimens after different tests

样品	阳光模拟	阳光模拟	阳光模拟 IP/DP 箱	阳光模拟 IP/DP 箱	AIMBOX/Arizona	Florida
	IP/DP 箱外(25 d)	IP/DP 箱外(50 d)	(25 d)	(50 d)	(250 d)	(360 d)
CN	12.37	18.61	3.72	6.63	9.38	22.90
SN	15.19	30.41	6.87	14.74	24.64	27.78
Lot9	9.17	16.99	4.70	9.90	14.10	18.65

表 9 阳光模拟 (IP/DP 箱) 与 AIM BOX/Arizona 的加速性
Tab.9 Acceleration of sunlight simulation (IP/DP box) and AIM BOX/Arizona

周期	阳光模拟循环方法(IP/DP 箱)	户外曝晒	样品加速因子			平均加速因子	变异系数/%
			CN	SN	Lot9		
1	Z-OUT-T(15 d)	AIM BOX /Arizona	4.34	3.83	3.64	4.07	12
	Z-OUT-F(10 d)		4.67	4.93	4.18		
	Z-OUT-T+F(25 d)		4.02	3.59	3.48		
2	Z-OUT-T(30 d)		3.98	3.04	3.59	3.64	11
	Z-OUT-F(20 d)		4.06	4.18	3.95		
	Z-OUT-T+F(50 d)		3.36	3.24	3.35		

表 10 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 与 Florida 的加速性
Tab.10 Acceleration of sunlight simulation (outside IP/DP) and Florida

周期	阳光模拟循环方法(IP/DP 箱外)	户外曝晒	样品加速因子			平均加速因子	变异系数/%
			CN	SN	Lot9		
1	Z-OUT-T(15 d)	Florida	8.03	5.98	8.16	7.52	19%
	Z-OUT-F(10 d)		9.66	5.01	8.82		
	Z-OUT-T+F(25 d)		7.60	7.45	6.94		
2	Z-OUT-T(30 d)		7.54	9.95	7.84	7.72	14%
	Z-OUT-F(20 d)		8.00	7.26	8.03		
	Z-OUT-T+F(50 d)		5.94	8.22	6.66		

通过表 10 可以看出：

1) 1 个周期的阳光模拟试验的平均加速倍率为 Florida 户外曝晒的 7.52 倍，3 种样品的变异系数 19%。变异系数高的原因是 SN 样品的黄变值与其他样品相比差异较大，该差异也反映到阳光模拟 (IP/DP 箱外) 湿态条件下与 Florida 户外曝晒的相关性低。可能的

原因为，该材料在湿态的条件下不敏感。3 种样品的最终黄变值与 Florida 曝晒 360 d 后 (表 10) 相比，约为其 50%~55%。

2) 2 个周期的阳光模拟循环试验后，平均加速倍率为 Florida 户外曝晒的 7.72 倍。3 种样品的最终黄变值与 Florida 曝晒 360 d 后相比，约为其 95%。

该条件下阳光模拟加速倍率更快的主要原因是由于样品未受 IP/DP 箱中玻璃的影响, 直接曝晒于金属卤素灯下, 更强的紫外线加速了高分子材料的老化。

3 结语

基于以上 3 种通用典型材料进行的汽车零部件阳光模拟加速试验与户外曝晒试验的相关性和加速性方面的研究, 可得以下结论:

1) 阳光模拟 (IP/DP 箱) 加速试验与 AIM BOX/Arizona 户外曝晒高度相关, 相关系数最高达 0.99。其综合加速倍率约是 AIM BOX/Arizona 户外曝晒的 3 倍。1 个周期的阳光模拟加速试验的老化程度可达到 AIM BOX/Arizona (250 d) 户外曝晒的 35%~40%。

2) 阳光模拟 (IP/DP 箱外) 加速试验与 Florida 户外曝晒高度相关, 相关系数最高达 0.99。其综合加速倍率约是 Florida 户外曝晒的 7 倍。1 个周期的阳光模拟加速试验的老化程度可达到在 Florida 曝晒 1 a 的 50%~55%。

通过以上研究证实了汽车零部件阳光模拟与户外曝晒具有一定的相关性, 为之后更广泛开展阳光模拟与户外曝晒的相关性和加速性研究提供方法上的借鉴。同时, 在研究过程中发现, 实验室阳光模拟试验中温度的分布和金属卤素灯管的使用时间对测试结果的影响较大, 户外自然曝晒环境条件的随机性也会影响结果的相关性及加速性。此次结果是基于选取的 3 种典型材料, 其结果与所选择的材料有关, 不一定适用于其他材料, 后续需要通过更多实际样品进一步的实验验证。

参考文献:

- [1] 伯尔哈德·莱希特, 彼德·施瓦兹. 采用 PV1303 方法与户外老化实验进行比对经验点滴[C]// 第三届中美材料环境腐蚀与老化试验学术研讨会论文集. 广州: 中国电工技术学会, 2004.
BURHARD L, PETER S. Experience in Comparing PV1303 Method with Outdoor Exposure Test[C]// The Third Sino-American Academic Symposium on Environmental Corrosion and Degradation Tests of Materials. Guangzhou: China Electrotechnical Society, 2004.
- [2] 田瑶君, 秦军, 陆之洋, 等. 聚丙烯户外自然光老化失效分析[J]. 塑料, 2016, 45(3): 97-99.
TIAN Y J, QIN J, LU Z Y, et al. Failure Analysis of Outdoor Natural Light Aging about Polypropylene[J]. Plastics, 2016, 45(3): 97-99.
- [3] 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 Y. Research and Application of Automobile Full-Spectrum Sunlight Simulated Aging Test Method[J]. Automobile & Parts, 2019(1): 73-75.
- [4] 端方勇, 陈亮. 内外饰颜色对车辆暴晒后车内温度影响的研究[J]. 汽车实用技术, 2017(14): 112-114.
DUAN F Y, CHEN L. Study on the Influence of Interior and Exterior Color on Vehicle Temperature after Exposure[J]. Automobile Applied Technology, 2017(14): 112-114.
- [5] 陈拯. 汽车内、外饰零部件老化问题的试验分析[J]. 汽车工艺与材料, 2011(12): 45-51.
CHEN Z. Experimental Analysis on Aging of Automobile Interior and Exterior Parts[J]. Automobile Technology & Material, 2011(12): 45-51.
- [6] 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 H H, SUN X L, ZHANG H. Correlation of Weatherability Tested by Xenon Lamp Aging and Natural Exposure Method[J]. China Coatings, 2009, 24(12): 35-38.
- [7] 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 J X. A Review of Xenon Lamp Aging and Outdoor Natural Atmospheric Exposure[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(4): 70-72.
- [8] 龚雯雯, 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——内饰塑料氙灯试验与户外曝晒试验之间的加速因子[J]. 汽车工艺与材料, 2016(9): 54-56.
GONG W W, ZHANG H, SUN X L. Comparative Study on Accelerated Aging Test in Laboratory and Outdoor Exposure Test—Acceleration Factor between Xenon Lamp Test and Outdoor Exposure Test for Interior Plastic[J]. Automobile Technology & Material, 2016(9): 54-56.
- [9] 陈平方, 余晓杰, 姜波. 汽车整车在中东热带沙漠环境下的大气暴晒试验研究[J]. 环境技术, 2022, 40(3): 90-92.
CHEN P F, YU X J, JIANG B. Experimental Study on Atmospheric Exposure of Vehicle under Tropical Desert Environment in the Middle East[J]. Environmental Technology, 2022, 40(3): 90-92.
- [10] 张恒, Michael Crewdson, Ronald L. Roberts, 等. 户外测试检验加速测试[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 105-109.
ZHANG H, CREWDSON M, ROBERTS R, et al. Outdoor Weathering must Verify Accelerated Testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(3): 105-109.
- [11] 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 J L, ZHUANG Y L, JI Q. Equivalent Coefficient of Weathering for Interior Trim in Specific Natural Exposure and those Observed in Service[J]. Shanghai Auto, 2013(5): 43-46.
- [12] 曾文波, 骆立良, 孙建忠. DIN 75220 对国内典型干湿

- 热气候环境的适用性研究[J]. 汽车工程师, 2023(3): 23-29.
- ZENG W B, LUO L L, SUN J Z. Research Applicability of DIN 75220 to Typical Dry & Hot-Humid Climate in China[J]. Automotive Engineer, 2023(3): 23-29.
- [13] 张晓东, 陶友季, 王俊, 等. 海南自然暴晒试验与人工加速光老化试验的相关性研究[J]. 汽车工艺与材料, 2012(9): 43-44.
- ZHANG X D, TAO Y J, WANG J, et al. Correlation between Natural Exposure Test and Artificial Accelerated Photoaging Test in Hainan[J]. Automobile Technology & Material, 2012(9): 43-44.
- [14] 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 P F, YU X J, LU T. Study on the Correlation between Vehicle Natural Exposure and Full-Spectrum Sunlight Simulation Aging[J]. Environmental Technology, 2020, 38(3): 70-73.
- [15] 张晓东, 刘旭, 吕天一, 等. DIN 75220 标准阳光模拟试验与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 X D, LIU X, LYU T Y, 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.
- [16] 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 Y W, LIU D, ZHANG X L, et al. The Correlation of Areas for Natural Weathering Exposure of Automotive Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 137-142.
- [17] 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 S N, PENG L, LIU J, 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.
- [18] DIN 75220—1992, Aging Automobile Components in Solar Simulation Units[S].
- [19] GMW 3417—2018, Natural Weathering Exposure Tests for Interior Trims/Materials[S].
- [20] SAE J1976—2002, Outdoor Weathering Exterior Materials[S].
- [21] 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 S D. Application of Yellowness Index in Evaluation of Plastic Aging Performance[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2006, 34(4): 446-448.
- [22] SAE J1545—2005, Instrumental Color Difference Measurement for Exterior Finishes, Textiles and Colored Trim[S].
- [23] 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 X D, JIE G X, WANG J, et al. Optical Performance Degradation of Several Polymer Materials Exposed in Dry-Hot Climate of Tulufan[J]. Plastics, 2014, 43(2): 103-105.
- [24] 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 Y, JIE G X, QI L, 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.
- [25] 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 D, ZHANG X L, DU Y W, 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.